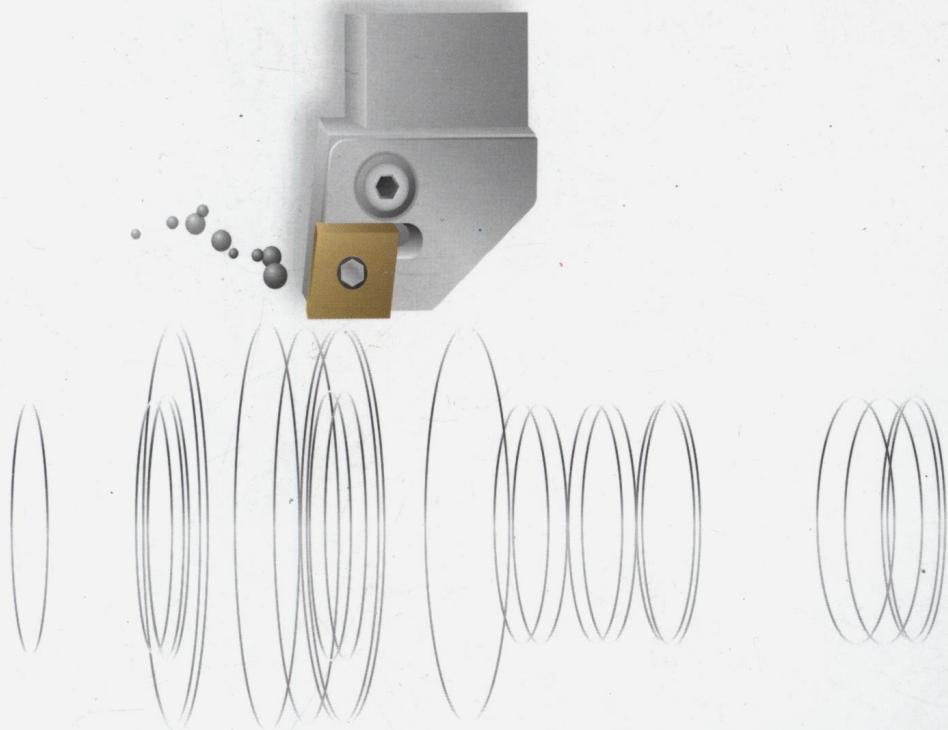


干切削理论 与加工技术

任家隆 刘志峰 唐文献 编著

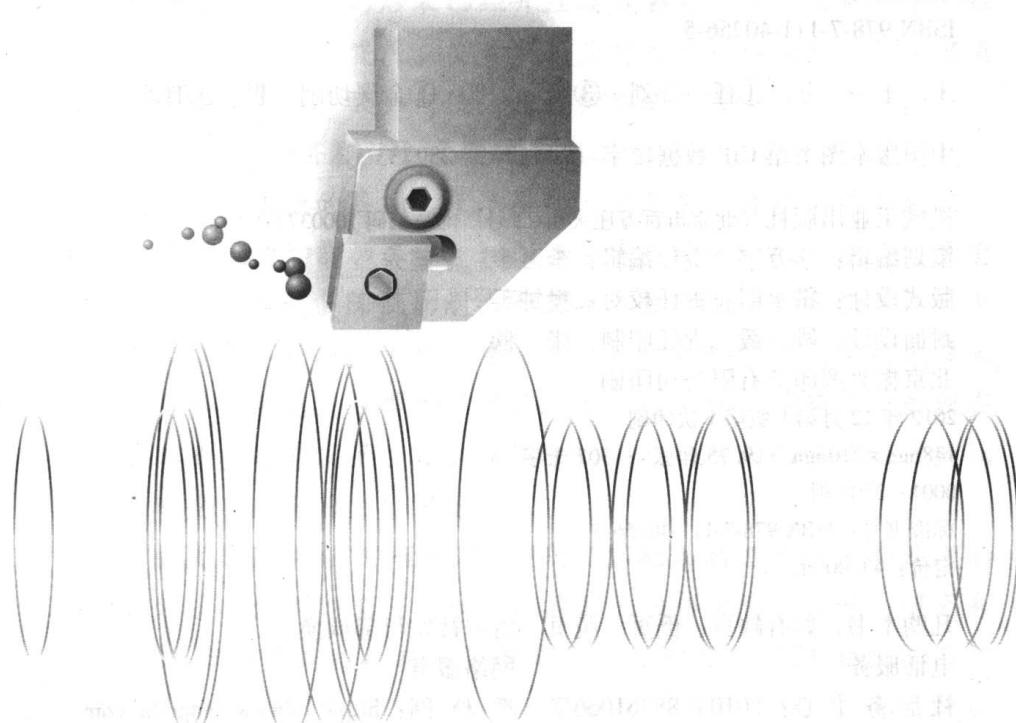


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



干切削理论 与加工技术

任家隆 刘志峰 唐文献 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书全面系统地阐述了干切削理论与加工技术，内容包括干切削技术的产生背景和基础理论、干切削加工的理论研究和实施条件、干切削加工的机床与刀具、干切削加工技术的应用、干磨削加工和干式切削标准（草案）。同时介绍了亚干切削加工的理论研究与应用和亚干式切削标准（草案）等。本书内容丰富新颖，既包含对干切削的概念、理论及方法的探讨，又有大量的应用实例，对干切削加工技术的研究和应用有很好的指导意义。

本书既可供机械加工企业的工程技术人员参考，也可供相关专业的研究人员及在校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

干切削理论与加工技术/任家隆，刘志峰，唐文献编著. —北京：机械工业出版社，2012. 11

ISBN 978-7-111-40256-5

I. 干… II. ①任…②刘…③唐… III. ①金属切削 IV. ①TG5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 259733 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：李万宇 责任编辑：李万宇 李建秀

版式设计：霍永明 责任校对：樊钟英

封面设计：姚毅 责任印制：张楠

北京振兴源印务有限公司

2012 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

148mm×210mm·9.75 印张·307 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-40256-5

定价：43.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

社服中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前　　言

资源、环境和人口是人类社会发展所面临的三大问题。20世纪后半叶，经济的高速发展、资源的大量消耗、工业污染物的过量排放以及人口的迅速增长，是这三大问题的直接和主要原因。我国的环境和资源问题也很突出，以资源、环境为代价，换取眼前局部利益的短期行为所造成的后果已经并继续威胁着人类的生存质量和经济、社会的持续健康发展。鉴于制造业对生态、环保和资源等起着直接和主要的影响，故如何使企业进行环境友善生产和资源最佳配置，是21世纪经济和社会发展的关键之一。

制造业是工业的基础，而切削加工又是制造过程中的重要组成部分。在传统的切削加工中，切削液占有重要的地位，因为它具有冷却、润滑、清洗、降低切削力和改善工件表面质量等功效，是大多数加工过程不可缺少的生产要素之一。但是切削液的使用也带来了越来越多的问题，如增加了产品成本、造成环境污染等。如何在保证加工质量的前提下，减少或消除切削液的负面影响已经成为切削加工研究及应用的主要问题。

工业发达国家在20世纪90年代中期把切削工艺研究和开发的重点转向了干切削加工。例如，在德国，联邦教育、科学、研究和技术部在1995年制定和启动了研究和开发称之为“21世纪工业生产战略”的干切削加工工艺科研框架项目“生产2000”，并为此提供了4.5亿马克的研究开发经费，组织了包括机床厂、刀具厂和汽车厂在内的18家企业和9个高校研究所协同攻关。目前，干切削加工在工业生产中已获得了成功应用，已有20%左右的德国企业采用

了干切削理论与加工方法及技术。

干切削加工是绿色制造战略实施的具体体现，目前已成为切削加工领域的研究热点之一。随着制造业的发展，严格的环境立法和激烈的市场竞争，干切削加工必将在所有的切削加工中得到应用。

我国干切削加工的研究和应用与工业发达国家还有一定的距离，但已经引起了政府、企业和研究人员的广泛重视，许多高校、研究院所的专家、学者进行了大量的研究，并取得了一定的成果。为了更系统地阐述干切削加工的原理、方法，把成功的应用实例和经验介绍给有关研究人员和工程技术人员，作者在参与编著的《干切削加工技术及应用》（2005 年出版）一书的基础上，结合近期作者的研究成果和研究经验，经重新整理后写成本书。

本书共分为 6 章，系统地阐述了干切削理论与加工技术，内容包括干切削技术的产生背景和基础理论、干切削加工的理论研究和实施条件、干切削加工的机床与刀具、干切削技术的应用、干磨削加工和干式切削标准。同时介绍了亚干切削加工的理论研究与应用和亚干式切削标准等。本书沿用了 2005 版书的许多优点，列举了大量的国内外干（亚干）切削技术应用的实例；从实施条件出发介绍了干切削加工的工具、干切削加工机床及工艺装备以及干磨削加工等；针对亚干切削在研究和应用中的重要性，本书重点新写了第 6 章，整理、补充了第 1、2、3、4 章。本书由任家隆、刘志峰、唐文献三位教授共同策划并完成。感谢 2005 版书的全部作者所付出的辛勤劳动，感谢本书作者的研究生所参与的工作，也要特别感谢机械工业出版社的支持和帮助。

本书既包含对干切削、亚干切削的概念、理论及方法的探讨，又有大量的应用实例，既可作为机械加工企业的工程技术人员进行技术改造、更新知识、继续教育的辅助资料，也可作为大专院校机械设计制造及自动化等有关专业的本科生和研究生的教材或教学参考书，还可作为高校教师及科研人员的参考资料。

绿色制造工艺是 21 世纪工业生产的发展趋势，国内外对干切削、亚干切削加工技术的研究与开发，必将推动其在实际生产中的

有效应用。

本书附录收录了由全国绿色制造技术标准化技术委员会(SAC\TC337)提出并归口的《干式切削 通用技术要求》、《亚干式切削 通用技术要求》标准草案，谨此表示感谢！

由于干切削、亚干切削加工技术处在进一步发展之中，也由于作者的水平和实践经验有限，书中错误在所难免，恳请各位读者提出宝贵意见，以便于进一步完善。

作 者

2012年12月11日

目 录

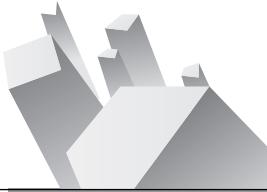
前言

第1章 概述	1
1.1 干切削加工的产生背景	1
1.1.1 制造业对环境的影响	1
1.1.2 可持续发展对制造业的约束	3
1.1.3 绿色制造是可持续发展的必由之路	4
1.2 干切削加工的内涵及特点	6
1.2.1 对干切削加工的认识	6
1.2.2 干切削加工的内涵	8
1.2.3 干切削加工的特点	9
1.3 干切削加工技术的国内外研究和应用现状	10
1.4 干切削加工的研究体系和关键技术	12
1.4.1 干切削加工的研究体系	12
1.4.2 干切削加工的关键技术	14
第2章 干切削加工的理论研究和实施条件	17
2.1 干切削加工的理论研究	17
2.1.1 切削加工中的冷却方法	17
2.1.2 干切削加工的术语和定义	18
2.1.3 干切削加工的理论综述	19
2.2 干切削加工实施条件分析	24
2.2.1 现有切削条件分析和实施干切削的主要难点	24
2.2.2 干切削实施条件分析	24

2.3 干切削加工的研究内容	30
2.3.1 干切削加工方法的研究	30
2.3.2 干切削加工条件的研究	36
2.4 亚干切削加工综述	40
2.4.1 亚干切削概述	40
2.4.2 几种亚干切削加工技术介绍	41
2.4.3 切削液的应用	48
第3章 干切削加工的机床与刀具	54
3.1 干切削加工机床	54
3.1.1 干切削对机床的要求	54
3.1.2 干切削机床机械结构设计	56
3.2 干切削加工的夹具和工具系统	68
3.2.1 干切削机床夹具	68
3.2.2 干切削刀具的刀柄结构	69
3.3 干切削加工的刀具	72
3.3.1 干切削加工对刀具的要求	72
3.3.2 干切削加工刀具材料的选择	74
3.3.3 涂层刀具	92
3.3.4 干切削刀具结构设计	126
第4章 干切削技术的应用	136
4.1 干车削加工	136
4.1.1 硬车削	136
4.1.2 低温冷却车削加工	151
4.1.3 激光辅助干车削加工	162
4.2 干铣削加工	163
4.2.1 干铣削加工及特点	163
4.2.2 干铣削加工的应用	163
4.3 干钻削加工	169
4.3.1 干钻削加工及特点	169

4.3.2 干钻削加工的应用	175
4.4 干式齿轮加工	178
4.4.1 干式滚齿加工及效果比较	178
4.4.2 干式插齿加工	188
4.4.3 干式齿轮加工应用实例	190
4.5 其他干切削加工方法	191
4.5.1 干式螺纹加工	191
4.5.2 螺纹旋风硬铣削	195
4.5.3 超声振动镗削	198
4.5.4 静电冷却干切削技术	201
4.6 干切削工艺的综合应用	204
第5章 干磨削加工	207
5.1 磨削及其环境问题	207
5.1.1 磨削的特点	207
5.1.2 磨削加工的环境问题	208
5.1.3 磨削液的净化处理与管理	209
5.1.4 环保型磨削加工技术	212
5.2 干磨削技术	213
5.2.1 干磨削的可行性分析	214
5.2.2 强冷风干磨削	215
5.2.3 低温 CO ₂ 干磨削	222
5.2.4 点磨削技术	226
第6章 亚干切削加工的理论研究与应用	230
6.1 亚干切削加工的理论研究	230
6.1.1 对亚干切削的认识	230
6.1.2 亚干切削加工的基础理论研究	232
6.1.3 亚干切削工艺的基础研究	236
6.2 亚干切削加工的应用	258
6.2.1 亚干切削与冷风冷却的冷却效果比较	258

6.2.2 亚干切削与有关冷却方法的切削力、切削热比较	259
6.2.3 亚干切削与有关冷却方法的加工精度和表面质量比较	261
6.2.4 水蒸气的冷却切削	263
6.3 亚干切削的进一步研究	269
6.3.1 亚干切削技术研究中若干问题的思考	269
6.3.2 亚干切削对工件表面加工质量的影响	270
6.3.3 亚干磨削的研究	271
6.3.4 亚干切削条件下刀具破损在线检测的研究	278
附录	284
附录 A 干式切削 通用技术要求（草案）	284
附录 B 亚干式切削 通用技术要求（草案）	288
参考文献	294



第 1 章

概 述

人类资源和环境面临着空前的严峻挑战，要求机械与制造科学比以往任何时候更重视制造资源的节省、环境的保护、产品的安全和绿色度等问题。当前，一个以降耗、节能、节材、减废、有利于环境保护和人的身心健康、实行清洁安全生产的“绿色工程”已在很多国家兴起。在切削加工中使用切削液对环境的污染、对操作者健康的伤害，成为必须治理的重点。我国继提出“鼓励清洁生产模式”后，于 2012 年再次审议了清洁生产促进法修正案草案，建议对企业实施强制性清洁生产审核的要求。对切削液所造成危害的治理使制造成本显著增加，因此基于环境的“绿色工程”、“绿色制造技术”是新世纪切削加工发展的重要课题。干切削及微量润滑切削、冷风切削等亚干切削新工艺新技术的开发，是绿色制造实施的具体体现，是切削加工领域研究开发的热点之一。随着制造业的发展，面对日益严格的环境政策、资源的束缚和激烈的市场竞争，干切削加工的进一步研究和应用将更加重要和紧迫。

1.1 干切削加工的产生背景

1.1.1 制造业对环境的影响

制造业是将可用资源（包括能源）通过制造过程，转化为可供人们使用和利用的工业品或生活消费品的产业。它涉及国民经济的许多行业，如机械、电子、化工、食品、军工等。制造业的发展有力地促进了社会经济的发展，极大地丰富了人类的物质文明，但同时又是当前环境污染的主要源头之一。图 1-1 表示了制造业与环境的关系。其中

虚线表示产品制造过程和使用过程对环境直接产生的污染。制造业对环境的影响主要表现在以下几个方面：

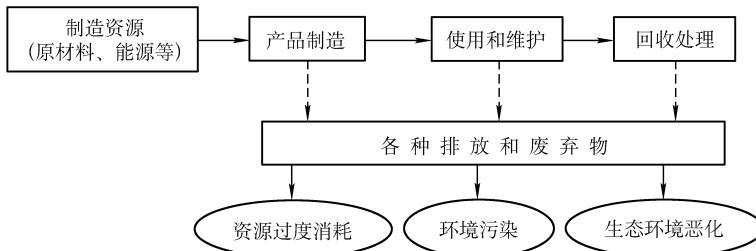


图 1-1 制造业与环境的关系

(1) 资源过度消耗 随着技术发展和人们物质文化水平的提高，无论是机电产品还是人们的日常生活用品都越来越追求高性能化和高附加值化，伴随而来的是这些产品和材料的大量生产、大量消费和大量废弃，资源过度消耗，从而导致地球上的有限资源锐减。据有关部门统计，现在我国许多矿石的后备资源已明显不足。

(2) 环境污染严重 制造业是人类社会的传统产业，它的历史可以追溯到远古时代，人们磨制石器、铜器和铁器用来农业生产和捕猎。制造业是最大的资源使用者，它在给我们创造巨额财富的同时，也给社会带来了大量的资源消耗和环境污染，对经济和社会的可持续发展构成十分严峻的威胁。据美国工业有害物来源统计表明：金属加工业占工业废物来源的 5%，排在各项工业污染的第四位。制造业在将制造资源转变为产品的过程中同时产生废弃物，制造业每年排出的三废（废气、废水、废渣）造成严重的大气污染、水体污染、土壤污染和生物污染。工业烟尘和粉尘排放量占大气排放总量的 75%。我国工业废水排放量占所有水排放量的 70%，随着用水量增大和水污染加剧，“净水”在减少，水荒在困扰着许多城市和农业的发展；固体废弃物堆存量越来越大，目前我国工业废弃物排放量占固体废弃物排放量的 87%，存在着严重的威胁。据有关资料报道，世界银行估算我国大气污染和水体污染对人体健康影响所造成的经济损失占我国国民生产总值的 3% 左右。切削加工中产生的切屑和使用的切削液也是造成大气、水体、土壤等污染的重要因素之一。全球每年消耗的切削液的总量大约在 700 000 ~ 850 000t，对环境是一个巨大的负担。

(3) 生产环境日益恶化 目前的经济增产方式，主要是以自然资源的高投入、高消费为主要特征。由于制造业的发展对资源、能源的需求不断增加，环境污染不断加剧，因此制造业发展带来的生态环境破坏亦日趋严重。

1.1.2 可持续发展对制造业的约束

面对工业社会所带来的严峻问题，人们深刻地反思传统的发展观、价值观、环境观和资源观。发展是人类社会不断进步的永恒主题，但是种种始料不及的环境问题击破了单纯追求经济增长方式的经济模式，全世界都在理性地探索新世纪的发展模式和发展战略，寻求一条既能保证经济增长和社会发展，又能维护生态良性循环的全新发展道路。可持续发展就是在这一背景下提出来的。

可持续发展具有两个最基本的要点：一是强调人类享有追求健康而富有生产成果的生活的权利，但应该坚持与自然相和谐，而不是凭借当代人手中的技术和投资，采取耗竭资源、破坏生态和污染环境的方式来追求这种发展权利的实现；二是强调当代人在创造和追求当今发展与消费的时候，应当承认并努力做到使自己的机会与后代人的机会相平等，不能允许当代人一味地、片面地、自私地为了追求当代人的发展与消费，而毫不留情地剥夺后代人本应享有的同等发展与消费的机会。

制造业是工业的基础，而切削加工又是制造过程中的重要组成部分。在传统的切削加工中，切削液占有重要的地位，因为它具有冷却、润滑、清洗、降低切削力和改善工件表面质量等功效，是大多数切削加工过程不可缺少的生产要素之一。但是它的使用也带来了越来越多的问题，如增加了产品成本、造成了环境污染等。使用过的废切削液中，有的含有有害成分（如 Cl 和 S），有的含有大量的矿物油及乳化剂。乳化剂易被植物吸收，不少乳化剂有增加致癌物的作用。一个大型的轴承厂每年耗用的乳化溶解油约 150t，排放的废液约达 7000 ~ 10000t；一个中型的轴承厂每年耗用的乳化溶解约 15 ~ 20t，排放的废液约 1000 ~ 1500t。其中含有亚硝酸钠、硝酸钠等腐蚀剂和表面活性剂等，严重地污染了水资源和环境。

针对切削液的环境污染，各国都制定了相关的法律。我国

GB8978—1996《污水综合排放标准》规定了工业污水排放的标准。切削液在生产成本中所占的比例已经达到了13%~17%，而且切削液的排放严重污染了土壤、大气和水资源，使人们的生活环境质量下降并危害身心健康。在德国，对废液、废屑的处理作了严格的规定，所涉及的法律文件从1950年的仅两个文件增加到1993年的28个文件，而且还有进一步增加的趋势。1996年，国际标准化组织公布了ISO 14001环境管理体系标准，在工业发达国家的制造业掀起了对这项标准的认证活动，治理切削液对环境造成的污染和对操作者身心健康带来的危害，成为此次取证活动的一项共同内容。

我国工业污染负荷占全国污染负荷的70%以上。多年来，工业污染一直是我国环境保护工作的重点。在“预防为主，防治结合，综合治理”、“谁污染，谁治理”和“强化环境管理”三大对策以及各项环境管理制度的推动下，工业污染防治工作取得了很大的进展，对遏制工业污染的迅速扩展发挥了重要作用。但是，另一方面，长期以来把保护环境的人力、物力、财力重点放在了生产末端污染排放的处理上，实际以排放标准为依据的排污收费制度和相应的污染控制政策，没有从根本上解决生产污染的问题。

因此，虽然人类消耗巨资进行环境管理和污染控制，但是人类赖以生存的环境并没有得到根本好转，而且还不断地向人类发出警告，新的环境问题又在接踵而来。反思过去的战略及技术路线时发现，忽略“全过程控制”、“从源头抓起”，而只注重末端治理，是一个重要原因。按照可持续发展的要求，改变传统的发展战略和生产模式，协调社会和自然的相互关系，主要应着眼于消除造成污染的根源，而不仅仅是消除污染的后果，这既是战略方向，又是主要手段。切削液的污染治理问题，也应该从源头抓起，在切削过程中尽量少用或者不用切削液，实施干切削，从源头切断污染源，是加工制造业实践可持续发展战略的根本性措施。

1.1.3 绿色制造是可持续发展的必由之路

如何使制造业在生产出不断满足人们物质和文化需求的产品的同时，有效地利用资源和能源，尽可能少地产生环境污染，已经成为当前制造科学发展面临解决的重大问题。为此，经过人们不断地努力，

涌现出许多新的生产方式和生产技术。例如，从20世纪90年代以来，制造业的生产方式已经由高效大量生产型向低环境负荷的方式发展，如图1-2所示。

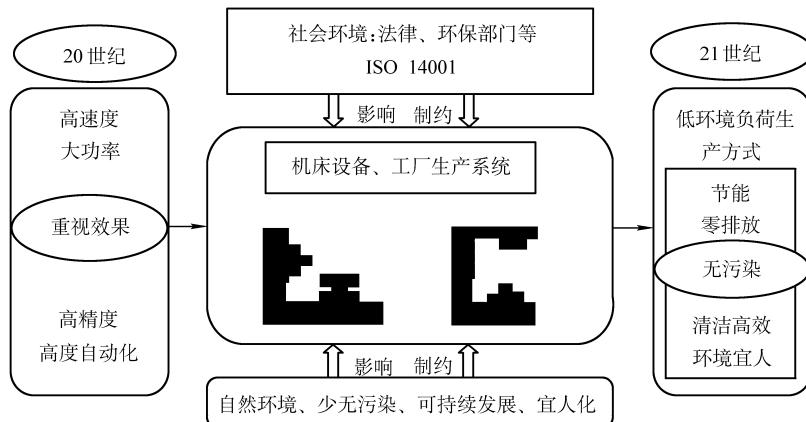


图1-2 生产方式指导思想变迁

面对竞争激烈的国际市场，企业需要通过绿色制造的实施来获取更大的经济效益。经济全球化和国际商品市场的逐渐形成，使得制造业面临的竞争更加激烈，如何获得更大的经济效益，求得生存，是制造业所面临的最大挑战。绿色制造可以使制造业通过有效配置资源，合理利用资源，最终赢得市场竞争，获得更大的经济效益。

发展生产和保护环境已经成为一对相互对立的矛盾，经过人们多年探讨和大量实践，逐渐认识到解决这一矛盾的唯一途径就是转移经济增长模式。就制造业来说，就是从传统制造模式向可持续发展模式转变，即从高投入、高消耗、高污染的粗放型发展模式转变为集约型发展模式——提高生产效率、最大限度地利用和减少废气、废物。这样的发展模式需要通过绿色制造技术来实现。研究和发展绿色制造技术是解决环境问题、实现可持续发展的关键。

与环境有关的法律及国际标准对制造过程及其相关活动的要求越来越严格。为了改善环境质量，防治环境污染，世界各国的政府部门和一些国际新组织制定了许多法律法规来约束产品的制造过程及其相关活动，而且标准的要求有越来越严格的趋势。因此，制造业必须通

过应用各种技术方法来满足相关法律法规的要求。

保护环境已经成为国际贸易中的主要准则，国际标准化组织也正式颁布了 ISO 14000 系列环境管理标准。发达国家根据自己技术上和经济上的优势，不断设置严格的进出口标准，形成了“绿色贸易壁垒”。据统计，我国每年因不符合环境标准要求而造成的出口损失高达 40 亿美元，实施绿色制造是打破“绿色贸易壁垒”的有效手段。

作为绿色制造的具体体现之一，干切削加工是一种先进的制造技术。它摒弃了传统切削加工中使用的切削液，可基本消除切削加工过程中使用切削液所带来的负面影响，适应了 21 世纪清洁生产和降低成本的要求，较好地解决了生态环境、技术与经济间的协调关系与可持续发展。

1.2 干切削加工的内涵及特点

1.2.1 对干切削加工的认识

在切削加工中加注切削液，对降低切削温度、断屑、排屑起到了很好的作用，但也存在着许多弊端。例如，维持一个大型的切削液循环系统需花费很多资金；同时需要定期添加防腐剂，更换切削液等，因而也增加了许多费用。加之由于切削液中的有害物质，对工人的健康造成危害，也使切削液的使用受到限制。由此，干切削技术应运而生。干切削作为一门新技术，有一些新的问题和许多模糊的认识需要加以澄清，为此，美国密歇根（Michigan）技术大学（MTU）进行了大量的调查研究和比较性的切削实验，深入地分析研究了使用切削液对工人的健康、刀具使用寿命、切削力和力矩及加工质量等多方面的影响，以提高人们对干切削这种新技术的认识。

（1）工人的健康 MTU 所作的大量调查研究认为，切削液的使用，会使生产环境恶化，长期接触，可感染皮肤病与气管炎等，给工人健康与安全造成威胁。所以许多国家规定了严格的环卫标准，例如，由美国环境保护局（EPA）规定，要求空气中有害物质的允许含量，由原来的 $5.0\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 。且空气中的有害物质允许的颗粒（PM）直径大小由原来的 $10\mu\text{m}$ 下降至 $2.5\mu\text{m}$ 。而要达到这一标准，需要高精度的切削液过滤装置、空气净化设备等，这将大大地增加制造

成本，就这一点而言，已远远超过了使用切削液所带来的优点。

(2) 刀具的使用寿命 通常认为，加注切削液可以提高刀具使用寿命。然而从 MTU 在切削速度为 $v = 130\text{m/min}$ 条件下，所作的切削实验证明：加注切削液切削，由于加注过程的不连续性与冷却程度的不均匀性，使刀具产生不规则的冷、热交替变换，容易使刀头产生裂纹，进而引起刀具破损，极大地降低了刀具的使用寿命。

(3) 表面粗糙度 MTU 进行了 100 多次钻削试验，加工材料为铝合金 (Al304 和 Al390)，刀具选用不涂覆的硬质合金钻头，选择通常钻孔时所用的切削参数，结果表明，不加注切削液的干切削与加注切削液的湿切削相比，内孔的表面粗糙度值增大了两倍。所以对内孔表面粗糙度要求高的零件应尽量避免采用干切削。但在对铝合金进行的镗削加工的比较性切削试验中发现，在相同加工条件下，所获内孔表面粗糙度与加不加注切削液几乎没有关系。

(4) 切削力和力矩 MTU 进行的钻削试验表明 (条件同上)，加注切削液，可明显地降低作用在钻头上的切削力和力矩，尤其对于封闭式的切削加工影响更大。攻螺纹加工、深孔拉削加工、锯削加工等的切削试验也充分证明了这一点。同样，对铝合金进行的镗削加工比较性切削试验的结果证明，在相同加工条件下，加注与不加注切削液，作用在镗刀上的切削力和力矩大小也基本没有变化。

(5) 切削热与内孔尺寸精度 MTU 在试件内孔镗削加工试验中分时段、在不同轴向和径向位置上进行切削温度测量，并进行相应的切削温度有限元分析。其结果表明，不加注切削液会使试件内孔不同位置的切削温度上升，因而使内孔尺寸变大。所以，对内孔尺寸精度要求高的零件加工，确实面临着一个是否加注切削液的问题。

MTU 所作的大量调查研究是在加注切削液和完全干切削条件下进行，若采用适量切削液以适当的技术方式进行封闭式的切削加工，其被加工件的尺寸精度、表面粗糙度、切削力和力矩等指标都明显好于加注切削液的切削条件。如钻孔，目前采用从钻杆中空对试件钻削区进行风冷或亚干冷却方式的试验效果就优于加注切削液条件。

由以上几个方面认为，对于零件尺寸精度、表面粗糙度要求不高的非封闭式的切削加工，完全可以采用干切削。而对于尺寸精度、表面粗糙度要求高的非封闭以及封闭式的切削加工，需采取一系列的技

术措施，例如，提高主轴转速，减少进给量等，这些势必提高生产成本。但经计算分析，这些费用正好与取消切削液的费用相当。加之采用最新的制造技术，如使用新型刀具材料、采用高速切削技术等，完全可替代常用的加工技术。因而，干切削加工具有很好的发展前景。

1.2.2 干切削加工的内涵

目前大部分机器零件加工，尤其是在自动化程度较高的数控机床、加工中心和自动化线上的加工，大都使用切削液，切削液的主要作用是排屑、降低切削温度以及润滑等。然而随着人们对环境保护的重视和可持续发展意识的提高，切削加工中大量使用切削液的加工方法已经受到种种限制。切削液的污染会对周围环境和操作者造成伤害，对切削液在零件及切削表面形成附着物的清理不仅会造成“二次污染”，而且将提高生产成本。德国 VDMA 和日本精密工程协会的研究表明；切削加工中切削液的费用约占生产加工总费用的 13% ~ 17%，而刀具成本通常只占总成本的 2% ~ 4%，如图 1-3 所示。

干切削加工简言之就是在切削过程中不使用任何切削液的工艺方法。从金属切削加工技术产生的那一天起，就有了干切削和湿切削的方法，因此，干切削这种工艺方法从原理上讲并不新，且已在生产中有较长时间的应用（如铸铁的干铣削等）。但其内涵却与以往有很大不同，因为这里的干切削加工已不仅局限于铸铁材料的加工和传统的自然方式，而是通过建立新的理论和新的工艺力图在所有材料加工及所有加工方法中均采用干切削加工。

干切削不是简单地停止使用切削液，而是要在停止使用或尽可能少用切削液的同时，保证高效率、高产品质量、高的刀具使用寿命以及切削过程的可靠性，这就需要用性能优良的干切削刀具、机床以及

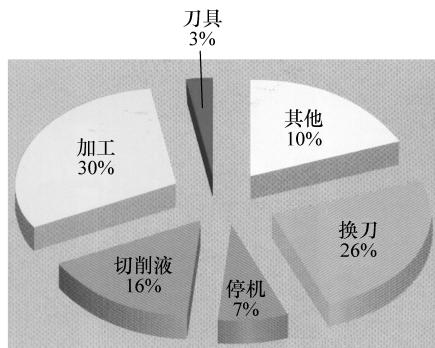


图 1-3 生产成本的分配比例

辅助设施替代传统切削中切削液的作用，来实现真正意义上的干切削加工。干切削加工涉及刀具材料、刀具涂层、刀具几何结构、加工机床、切削用量、加工方式等各个方面，是制造技术与材料技术及信息、电子、管理等学科之间的交叉和融合。

干切削意味着在车削、铣削、钻削、镗削等切削加工过程中，消除切削液的不利影响，极大地节约加工成本，保护生态环境。目前，欧洲和日本等工业发达国家都非常重视干切削技术的开发和应用，据统计，在欧洲工业界，有大约 10% ~ 15% 的加工已经采用干切削工艺。21 世纪的制造业对绿色环保的要求越来越高，干切削技术作为一种绿色制造工艺对于节省资源、环境保护、降低成本具有重要意义，随着机床技术、刀具技术和相关工艺研究的深入，干切削技术必将成为金属切削加工的主要技术手段而得到广泛应用。

就目前来看，干切削加工的范围还较为有限，但其深入研究和广泛应用已成为加工领域的一个热点。以色列专家认为：干切削“它至今并仍是一个很复杂的领域，不是简单地把冷却切削液停掉，然后再订购一把其他刀具就行了”，近年来，在高速切削工艺发展的同时，工业发达国家的机械制造业正在利用现有刀具材料探索干切削加工的新工艺。有意义且经济可行的干切削加工应该是在仔细分析特定的边界条件和掌握影响干切削加工复杂因素的基础上，为干切削工艺系统的设计提供所需的数据和资料。

1.2.3 干切削加工的特点

由于不用切削液，完全消除了切削加工中使用切削液所导致的一系列负面效应。与湿切削相比，干切削具有以下特点：

- 1) 形成的切屑干净、清洁、无污染，易于回收和处理。
- 2) 省去了与切削加工中使用切削液有关的传输、过滤、回收等装置及费用，简化了生产系统，节约了生产成本。
- 3) 节省了与使用切削液及切屑处理有关的费用。
- 4) 不产生环境污染及与使用切削液有关的安全与质量事故。

由于具有这些特点，干切削已成为目前清洁制造工艺研究的热点之一，并在车、铣、钻、镗削中得到了成功的应用。

和相同条件下的湿切削加工相比，干切削也有以下不足的地方：

- 1) 直接的加工能耗（加工变形能和摩擦能耗）增大，切削温度增高。
- 2) 刀具/切屑接触区的摩擦状态及磨损机理发生改变，刀具磨损加快。
- 3) 切屑因较高的热塑性而难以折断和控制，切屑的收集和排除较为困难。
- 4) 加工表面质量易于恶化。

1.3 干切削加工技术的国内外研究和应用现状

继高速加工在 20 世纪 80 年代中期取得突破和应用领域不断扩大之后，工业发达国家在 20 世纪 90 年代中期把切屑工艺研究和开发的重点转向了干切削加工。例如，在德国，联邦教育、科学、研究和技术部在 1995 年制定和启动了研究和开发称之为“21 世纪工业生产战略”的干切削加工工艺科研框架项目“生产 2000”，并为此提供了 4 亿 5 千万马克的研究经费，组织了包括机床厂、刀具厂和汽车厂在内的 18 家企业和 9 个高校研究所协同攻关。经过 4 ~ 5 年的开发，干切削加工在工业生产中已获得了成功应用，表明不用切削液或采用微量切削液的切削加工（亚干切削加工）技术已进入推广应用阶段。

据统计，现在已有 20% 左右的德国企业采用了干切削技术。干切削技术的研究和应用方面，德国居国际领先地位，日本也已成功开发了不使用切削液的干式加工中心，采用装有液氮冷却的干切削系统，从空气中提取高纯度氮气，常温下以 0.5 ~ 0.6 MPa 压力将液氮送往切削区，可顺利实现干切削。

以色列 ISCAR 公司认为，干切削工艺是切削加工技术的主要发展趋势。干切削应用较普通，因为车削中切削区热量恒定，容易通过采用新型硬质合金刀具，选用合理的进给量和切削速度，就能进行干切削，在某些场合还可以利用激冷气体或旋风喷雾降低切削温度。

此外，其他工业发达国家，如加拿大、英国等也纷纷开展了有关干切削加工技术方面的研究，有些发展中国家也非常重视干切削的研究，通过各种途径积极鼓励和支持制造业发展的相关工作。随着刀具材料、涂层技术、刀具结构和工艺装备的发展及对环境管理和监测有

严格规定的 ISO 14000 系列标准的出台，美国、德国、日本等国家已对干切削进行了大量的研究并应用于实际生产，取得了明显的经济效益和社会效益。

美国 LE BLOND MAKINO 公司研究开发的“红月牙”（Red Crescent）铸铁干切削技术，就是利用陶瓷或 CBN 刀具进行高速切削，由于干切削速度和进给量均很高，产生的热量很快聚集在刀具前端产生红热状态，工件热到 370℃时屈服强度将显著下降，从而大大提高了生产效率，切除率可达 $49\text{cm}^3/\text{min}$ ，提高效率两倍多，此时的切削速度可达 $914 \sim 1219\text{m/min}$ ，进给速度达 $1270 \sim 5080\text{mm/min}$ ，该技术也可用于小直径刀具切削工况。

日本某公司研制开发的一种新型刀具，使用它进行切削加工不再需要切削液，利用该技术生产的滚刀、剃齿刀，以及用于加工弧齿锥齿轮的刀具已经商品化。这种技术同时在日本及欧美各国申请了 16 项相关专利。该公司最新生产的滚齿机已经配用了这种新型刀具，在同样的使用条件下刀具寿命延长了四倍，切削速度是原来的两倍，达到 200m/min ，加工一个零件的刀具成本降低了 40% 左右。尽管新刀具的售价是原来产品的 2.5~3 倍，但它所带来的好处是显而易见的，既降低了生产成本又有利于环境保护。

BIG THREE 公司在变速箱通道板的加工中，采用 38 台高速（ 15000r/min ）金刚石干切削加工系统，其加工精度达 0.05mm ，每小时可加工 600 件，与传统磨削方法比，每年可节约 300 多万美元。该公司在工件的钻削加工中采用最小量润滑技术（MQL），效果也不错。例如，采用 $\phi 6\text{mm}$ 硬质合金钻头，钻削孔深 26mm ，钻速 $30000 \sim 60000\text{r/min}$ ，切削液用量减至最少 0.1mL/h ，如采用新型金刚石涂层钻头则可完全实现干切削加工。

为了今后在国际机械行业竞争中立于不败之地，我国也非常重视干切削加工技术的研究工作，已有多个项目得到了各种方式的资助。

我国部分高校和研究院所已进行了大量干切削加工技术的研究和探讨，并取得了一批科研成果。如合肥工业大学、哈尔滨工业大学、山东大学、重庆大学、江苏科技大学、广东工业大学等在干切削的刀具材料、刀具设计、刀具涂层、加工工艺、所使用的机床及加工方式等方面进行了较为系统的研究，积累了一定的研究经验。

合肥工业大学承担的国家科技攻关地方重大项目——纳米 TiN、AlN 改性的 TiC 基金属陶瓷刀具制造技术，这标志着一种利用纳米材料制作的新型金属陶瓷刀具问世。这个项目研究的 TiN 改性 TiC 基金属陶瓷材料，是在金属陶瓷（TiC 碳化钛）中加入纳米 TiN（氮化钛）细化晶粒。根据 HALL – PETCH 公式，晶粒细小有利于提高材料的强度、硬度和断裂韧度，这对力学性能有优化作用，对刀具材料的发展可以起到积极的推动作用。应用这项新技术研制的纳米 TiN 改性 TiC 基金属陶瓷刀具，具有优良的力学性能，是一种高技术含量、高附加值的新型刀具。在干切削加工的试验研究中，与硬质合金刀具相比，寿命提高两倍以上，生产成本与其相当或略低。

哈尔滨理工大学对干切削 GGr15 材料的切削力、切削温度、已加工表面质量的切削实验研究，得到了被加工材料硬度对上述各项指标以及切屑形态、硬度、变形系数的影响规律，提出了临界硬度的概念，并得到了 50HRC 为区分硬态切削与普通切削 GGr15 材料的临界硬度。

江苏科技大学从 1997 年开始进行干切削加工研究，先后对 Gr12、铸铝、ZH62、钛合金以及 GH6149 等材料进行了冷风冷却、亚干式冷却切削的实验和试验研究，并取得了一定的成果。成都工具研究所、山东大学和清华大学等单位对超硬刀具材料及刀具涂层技术进行过系统的研究，陶瓷刀具在我国目前已经形成了一定的生产能力，这些都为干切削技术的研究与应用打下了良好的技术基础。北京机床研究所成功开发了能实现高速干切削的 KT 系列加工中心。

1.4 干切削加工的研究体系和关键技术

1.4.1 干切削加工的研究体系

由于在切削过程中不使用或使用少量的切削液，干切削加工规律将明显不同于加注切削液的湿切削规律。例如，刀具／切屑、刀具／工件表面的摩擦加剧，切削温度升高，切屑排除难度加大等。因此，用传统的切削规律已经很难指导干切削加工过程，传统的加工工艺系统也很难适应干切削的要求。所以，必须进行系统的试验与应用研究，建立干切削的基本理论体系。

干切削加工技术是在机床结构与材料、机床设计制造技术、高性

能刀具夹持系统、高性能刀具材料及刀具设计制造技术、高性能的涂层技术、高效高精度测试技术、干切削加工工艺方法等诸多相关技术的硬件与软件技术得到充分发展的基础上综合而成的。因此，干切削加工技术是一项复杂的系统工程，是诸多单元技术集成的一项综合技术，主要包括干切削加工理论、机床、刀具、工件、加工工艺及切削过程监控与测试等诸多方面。干切削加工技术的研究体系如图 1-4 所示。其中切削加工基础理论主要是研究分析干切削加工可行性、切削过程中的变形、切削力、切削温度、刀具磨损、破损与刀具寿命。切削过程的稳定性、加工表面质量等的特征及其与机床、刀具、工件和切削参数等诸多因素之间的关系。干切削加工综合技术中刀具技术、涂层技术、机床技术、加工工艺、测试技术等是干切削实施的最重要的关键技术，它们对干切削加工技术的发展和应用，起着决定性的作用。

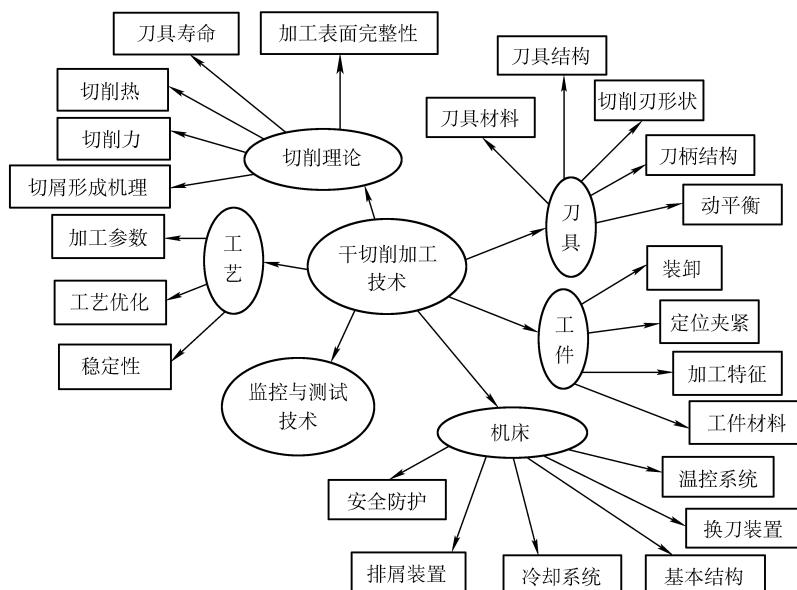


图 1-4 干切削加工技术的研究体系

要使干切削加工技术广泛应用于生产实际，还需要对其相关技术进行深入的研究。干切削加工的研究内容包括：

- 1) 干切削加工机理的研究。包括切屑形成过程、切削力、切削温度及刀具的磨损与破损机理，从切削过程中的基本现象来研究干切削的规律和应用条件。
- 2) 干切削加工的刀具材料及其涂层技术研究。包括现有刀具材料的选择和优化、新型刀具材料及涂层技术的开发与涂层性能的研究。
- 3) 分析干切削加工中的摩擦行为，深入系统地研究干切削加工中的磨损机理和摩擦特性，探讨选择适用于干切削加工的刀具材料及其涂层的科学、合理方法及依据。
- 4) 干切削加工刀具的几何参数选择及优化方法研究。进行系统的对比试验研究，确定不同干切削工艺方法、不同的工件材料所对应的刀具结构及几何参数，为干切削的应用提供支持。
- 5) 机床结构研究。在干式车、铣加工条件下，排屑比较容易；而在孔加工等封闭或半封闭条件下，排屑困难，必须通过适宜的加工方式、合理的刀具结构等来辅助排屑。因此，研究加工方式（如工件的安装方式、主轴与工件的相对位置等）、刀具结构及几何参数等，进而为机床结构设计及刀具设计标准化提供依据。
- 6) 干切削加工工艺系统的匹配研究。干切削加工工艺系统由机床、刀具、工件和夹具组成，在不同工艺条件下，它们之间应该具有最佳的匹配。通过这种匹配关系的研究，进一步促进干切削加工方法的实际应用。

1.4.2 干切削加工的关键技术

1. 干切削的刀具技术

由于不使用切削液，干切削时的切削温度比普通湿切削要高很多，刀具能否承受干切削时巨大热能，是实现干切削的关键。这方面的主要措施有：

(1) 采用新型刀具材料 干切削不仅要求刀具材料具有极高的热硬性和热韧度，而且还须有良好耐磨性、耐热冲击和抗粘结性。目前已发展的刀具材料主要有金刚石、立方氮化硼、陶瓷、金属陶瓷、涂层和超细晶粒硬质合金等。发展具有更加优异的高温力学性能、高化学稳定性和热稳定性及高抗热振性的刀具材料，是推动干切削技术发展和广泛应用的重要前提。

(2) 采用涂层技术 对刀具进行涂层处理，是提高刀具性能的重要途径。刀具的涂层不仅提高了刀具表面硬度，而且能降低刀具／工件和刀具／切屑表面之间的摩擦，也能隔绝切削区的热量传入刀具(片)。目前使用的刀具有40%是涂层刀具，新的涂层还在不断出现，使用涂层刀具实现干切削加工的趋势在不断增长。近十年来，刀具涂层技术发展十分迅速，涂层材料多达几十种，涂层工艺也越来越成熟，通过多年的“技术攻关”，现已解决了涂层与基体材料结合强度低的技术难题。

(3) 采用合理的刀具结构 在干切削加工中，原有的标准刀具不能适应干切削，刀具几何参数的优化非常重要。为此，干切削加工应优化刀具几何参数，以减少加工中刀具与切屑间的摩擦和强化切削刃。干切削刀具拟通过如下方法进行设计：

- 1) 基于自由切削的原理，设计刀具切削部分的几何形状，以减少由于切屑干涉引起的切削能耗。
- 2) 尽量增大刀具切削部分单位表面积所包含的材料体积，提高刃部、尖部的瞬间受热能力。
- 3) 使刀具为负前角或使前、后刀面凸起，以延缓月牙洼对切削刃的损害，这种方法在一些新型刀具上已有应用。
- 4) 增大负刃倾角，改善切削刃及刀尖的切入状态，以提高刀具抗冲击和抗热振能力。
- 5) 加大切屑在前刀面断屑台上的变形量和增加断屑台的个数，以提高对强韧性切屑的断屑能力。

2. 干切削的机床技术

研制干切削加工机床有利于更好地实现干切削加工。这种机床应该刚性足、功率大、能快速有效地排屑，同时用合适的软件系统补偿温度对加工的影响。设计干切削机床时应要考虑的特殊问题有两个：一是切削热的迅速散发，干切削时在机床加工区产生的热量较大，这些热量如不及时从机床的主体结构排出去，就会使机床产生严重的热变形，影响工件的加工精度和机床工件的可靠性。而对于一些无法排出的热量，相关部件应采取隔热措施。另一个是切屑和灰尘的快速排出，切屑中带有大量的热量并且落到工件上会划伤工件，灰尘则会影响工件的加工质量。因此，要注意干切削机床的快速排屑结构、辅助

排屑设施和提高干切削机床热稳定性的结构设计。

3. 干切削的工艺技术

工件材料在很大程度上决定了实施干切削的可能性。改善材料的可加工性、减少切削过程中变形和摩擦产生的热量，是发展干切削的一项技术措施。例如，开发易切钢和易切铸铁等。不同工件材料的热学特性差别较大，干切削要求工件有较大的热容量和较低的热导率，因此，大质量的零件比小质量的零件更适宜干切削。切削力大、温度高是干切削的主要特点，为了减少高温下刀具和工件之间材料的粘结和扩散，获得正常的刀具寿命，应特别注意刀具材料和工件之间的合理匹配。

刀具确定以后，根据具体加工，还应选择合适的切削用量和其他参数，在干切削加工中，建议采用高的切削速度，因为高的切削速度会使切屑排除快、散热快，对提高刀具寿命非常有利。

现在已经采用的干切削加工工艺有：低温冷风干切削技术；高速干切削技术；低温干切削技术；静电冷却干切削技术；微量润滑切削技术以及亚干切削等。

4. 可靠的刀具检测装置

干切削使刀具处于一个更加恶劣的加工环境，如温度升高、切削力增大等，同时使刀具破损、磨损失效的概率增大。因此，刀具检测装置成为干切削可靠性和安全性以及加工质量的有利保证，目前随着传感器、数字信号处理技术的发展以及神经网络、人工智能在刀具检测领域的应用，各种性能稳定、可靠性高的刀具检测装置都能在市场上找到，选择时主要取决于对其性能的要求和经济角度的考虑。



第2章

干切削加工的理论研究 和实施条件

由于在金属切削加工时，干切削没有采用一定压力和流量的液体连续不断地冷却、润滑刀具和工件的加工部位，致使金属切削过程的工作环境、加工条件发生了很大的变化。实现干切削或亚干切削涉及刀具、涂层和机床等诸多要素，是一项系统研究开发工程，需要多方面的协调配合。为了使干切削加工技术得到更好的应用，希望达到甚至超过液体冷却条件下零件的加工质量和效率，需要对干切削加工的理论基础和干切削加工实施的条件等进行研究分析。

2.1 干切削加工的理论研究

2.1.1 切削加工中的冷却方法

金属切削中切屑的变形、刀具与切屑及刀具与工件之间的摩擦等会产生大量的切削热，从而引起工件的热变形，影响加工精度和刀具使用寿命。对切削加工区加注冷却介质的目的主要是冷却、润滑、排屑和被加工面的防锈保护，从而达到保护刀具，减少切削热，提高工件加工质量和生产率之目的。切削加工的冷却方法大体上可以理解为三种：湿式浇注冷却、自然冷却和干（亚干）式冷却。

(1) 湿式浇注冷却 在切削加工中，使用低压泵等设备将切削液（水基、油基等）连续不断地输送到喷嘴，冲刷（加注）刀具和工件的加工部位，切削液冲刷后经过过滤，再反复使用。这种方法的特点是方便、易行，是目前使用最普遍的一种。但不可避免的飞溅、挥发和铁屑沾带，极易造成环境污染。依据浇注方式不同湿式浇注冷却又有

径向、侧向等多种形式。

(2) 自然冷却 在切削加工中仅依靠自然环境冷却作用满足加工要求，这主要是相对目前加注切削液冷却切削方法而言，除自然环境外切削加工时不加任何“修饰”完成加工任务，如对铸铁材料的传统加工工艺。大多数常规切削就属于这一种，一般通过控制切削速度，减少切削用量，降低生产率，使刀具、工件在这种冷却可以承受的范围内完成切削运动，其生产率的提高不同程度地依赖刀具新材料的应用，同时刀具的切削效率没有得到应有的发挥。

(3) 干(亚干)式冷却 干式、亚干式冷却切削既没有湿式冷却时大量流体浇注，又不完全听命于自然环境的作用，是人们试图改造和利用少、无污染自然介质，增强它在切削加工时的冷却、润滑等功能，进而提高生产率而发展起来的一种新工艺。依据使用湿式介质多少和切削速度高低，干式切削又有许多不同的冷却方式和切削机理。

相对于干(亚干)切削，自然冷却法是指切削过程中高温区向低温区、高热量向周围进行热传导和辐射的冷却是在自然规律中完成，没有人工严格和刻意“修饰”的工艺行为。

相对于湿式加注方法中的浇注冷却，射流冷却是干式、亚干式冷却方法中一种集约型冷却方法。它把冷却介质直接、“强行”送入切削区“集中”使用，试图改造和利用少、无污染的自然介质，增强它的冷却、润滑等功能或根据不同加工对象优选工艺参数达到或超过浇注冷却的加工效果，从而相对地减少了环境污染程度。依照射流介质不同，射流冷却又分为液体射流、气体射流和混合射流三种。

2.1.2 干切削加工的术语和定义

干切削加工的基础研究和应用受到国内外广泛的重视，多年的研究成果推动了干切削技术的应用和实施。但有关干切削的术语和定义专家学者都有不同的表述，近期拟议中的国家标准给予了规定：

拟议中的标准适用于机械产品完全干切削、辅助干切削（包括风冷、液氮冷却、激光辅助等干切削）加工工艺。

干切削（干式切削，Dry machining）：在切削过程中不使用任何切削液的工艺方法。

完全干切削：在切削过程中不使用任何切削液及辅助冷却介质的

工艺方法。

亚干切削（亚干式切削，Sub-dry machining）：应用不同技术方法，将适量润滑液注入带有一定压力、不同温度的气流中混合雾化，生成微量润滑介质，并喷入切削点，对发热区实施微量润滑冷却的切削技术。

亚干式切削通常包括：微量润滑切削、低温微量润滑切削（冷风切削）、保护气微量润滑切削、内冷喷射法、混喷喷射法工艺。

上述术语和定义给出干切削和亚干切削的基本区别和规范，随着研究的深入和技术进步，标准也有一个不断进步和完善的过程。如：亚干切削（亚干式切削）定义中，“将适量润滑液”就宜改作“将适量冷却和润滑介质”注入带有一定压力、不同温度的气流中混合雾化，生成微量冷却润滑介质，并喷入切削区，对受热影响区实施微量冷却润滑的切削技术。

2.1.3 干切削加工的理论综述

传统的切削加工是以力学为基础，在切削中使用硬度远大于工件材料硬度的刀具，通过刀具对被切削材料的作用，在挤压、滑移、剪切等过程中完成切屑与工件的分离，切削过程中切削热、切削力、切屑变形变化规律、刀具磨损等特征量都深刻反映切削过程的状况，使用任何减少切削热、降低切削力的方法和工艺措施，都能有效地改善切削过程状况，提高切削效率，提高被加工工件的加工质量。干切削加工整个工艺方法都或多或少偏离了传统的湿式切削工艺方法，其切削原理涉及的因素更多，很难用一种理论基础去分析干切削加工机理，加之很多工艺中应用的问题还需要进一步的理论探索，其理论基础远不及传统金属切削理论成熟。目前，对于干切削理论基础、应用原则的分析主要有以下几种：

(1) 清洁生产原则 21世纪生产工程的重要内容之一是面向环境清洁的绿色制造技术，国际生产工程学会一直对生态平衡、环境保护、可持续发展给以充分重视。干切削在提高生产效率、降低生产成本的同时，一个重要的目标就是清洁生产。因此，无论完全干切削还是亚干式切削，无论风冷、低温冷却还是喷雾冷却、润滑技术，都是尽量不用、少用对环境造成污染、造成切屑处理费用上升的切削液，实现

清洁生产、绿色制造。

(2) 金属切削层的软化机理 完全的干切削（主要包括硬态切削、高速干切削等切削条件）的进给速度、切削深度和切削速度都有别于普通切削。刀具一般都设计有负倒棱保护刃口，虽然与传统切削一样选用硬度远高于所加工工件材料硬度的刀具去切除切屑，但由于切削过程的特点不同，传统的金属切削理论已不能完全适用于完全干切削过程的分析。完全干切削随着切削速度等参数的提高，随着被加工工件材料硬度的提高，随着超硬刀具材料的使用，其金属切削过程中由于没有了冷却润滑作用，刀具与被切削工件材料之间摩擦加剧，故使切削力增大，切削热急剧增加，切削温度显著升高，引起刀具的使用下降，但与此同时，由于采用超硬刀具，刀具的耐热性、红硬性高，金属在高温下产生了软化效应，致使金属材料的剪切强度、抗拉强度下降，并在前刀面形成一薄层的保护膜，使切削力降低，刀具寿命反而增高。图 2-1 反映了在实施硬态切削时，被加工件切削区存在切削温度和工件硬度变化之间的金属软化效应。

干切削机理的一个主要方面是金属的软化效应，若干切削时工件材料的硬度不高、切削速度为一般切削速度，刀具并非是超硬刀具材料，则从理论上分析此时的金属软化效应并不明显。此时，若采用超硬材料刀具、且刀具主切削刃具有负倒棱时，则负倒棱增强了切削刃强度，避免了刀具早期磨损，延长了刀具使用寿命，但从另一个角度看，负倒棱又加剧了切屑变形，增加了切削热，使切削温度上升，导致刀具热磨损，又会降低了刀具寿命。要确定这两方面作用结果是哪一个起主要作用，便涉及到工件材料、刀具材料、切削要素等工艺系统各因素共同作用的态势。因此，干切削在金属软化效应机理前提下，根据不同工艺条件有一个传统金属切削机理向金属软化切削机理的过

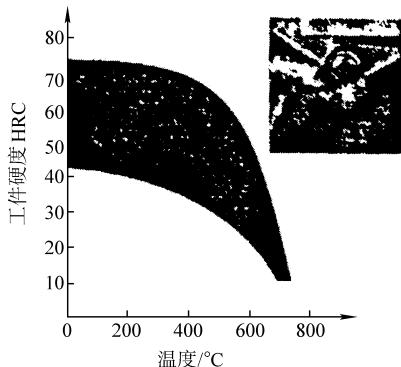


图 2-1 硬态切削的金属软化效应

渡区，在这个过渡区的切削机理要根据具体工艺条件进行具体分析。

干切削时刀具的主要磨损形态仍以月牙洼磨损、后刀面磨损、热扩散磨损为主。以高速干车削加工中金属陶瓷刀片切削 D60 钢为例，其刀具磨损形态主要为后刀面磨损，磨损区外观形态呈倒驼峰形，前刀面上有与切屑流动方向一致的磨痕，由于高速干车削中刀片切入切出温度变化存在高频交变热应力，致使后刀面磨损区有微裂纹；又由于刀片受长时间高温作用，刀具中的粘结相 Ni、Co 发生软化，向表层扩散，并在后续切削过程被带走，致使刀具表层硬质相粘结强度下降以及硬质相颗粒脱落。由此可见，干切削温度高、摩擦加剧，造成刀具粘结相热扩散严重；由于热扩散、粘结层的软化使其前、后刀面与切屑、工件的摩擦严重，造成的上述磨损是干切削中刀具磨损、报废的一个主要原因。

硬态切削是非常典型、特殊的干切削。用硬态切削取代磨削加工，其主要问题集中体现在如何保证获得理想的加工表面粗糙度、形状精度和加工表面状态。硬态干切削加工工件表面完整性是决定能否采用硬态切削作为淬硬钢精加工手段的重要指标。目前硬态干切削加工对工件表面边界区域的影响以及与切削参数和刀具磨损状态的关系等尚未能作出全面的解释。大多数研究表明，硬态干式切削易产生残余压应力，有利于提高工件寿命。工件表面形成白层是伴随硬态切削过程所形成的一种组织形态。如图 2-2 所示，它具有独特的磨损特性：一方面硬度高，耐蚀性好；另一方面又表现出高脆性，易引起早期剥落失效。白层尺寸薄，难于准确分析其组织特征，因此对其形成机制有一定争议。一种观点认为白层是相变的结果，是由切削过程中的快速加热和骤然冷却而形成晶粒十分细小的细晶马氏体组成；另一种观点则认为白层的形成仅属于变形机制，只是由塑性变形而得到的非常规型马氏体。Griffiths 认为切削过程中白层现象的产生原因是高速滑动磨损的结果，其组织形态是超细晶粒结构的奥氏

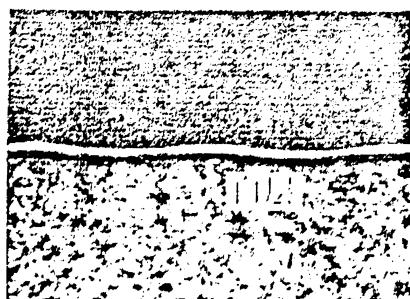


图 2-2 硬态干切削中已加工表面的白层

体和马氏体的混合组织，而且与刀具磨损密切相关。硬态干切削中已加工表面完整性的研究，需探讨白层的形成对工件的寿命和性能的影响，白层的物理结构及其对零件性能的影响，白层的生成机理与切削热和刀具磨损之间的内在关系，这些研究将进一步丰富干切削加工的理论基础。

由以上分析可知，完全干切削对机床结构、刀具材料和刀具结构、切削过程中切削参数的选取都有严格的要求，即机床、刀具、工件和工艺环境等问题所组成工艺系统的平衡条件比较苛刻，对被加工件的加工精度和表面质量控制也困难。因此，不同程度地妨碍了完全干切削工艺方法在更多场合的应用。

(3) 低温脆性 干切削时采用低温气体或用液态氮直接、间接作用于切削区时，在相同切削参数、刀具等工艺条件下，其切削钢材时的切削力显著低于其他传统的冷却润滑切削方法。研究表明：低温切削时体心立方晶格材料易发生低温脆化。在低温下金属内部位错热能低，其塑性变形应力比高温下抗力大，因而能提高材料强度；而低温脆性是由孪生引起的龟裂所产生的。体心立方晶格金属引起滑移所需屈服应力随温度上升急剧增大，但孪生应力因温度不同产生的变化不大，因此低温下孪生应力比滑移应力小，低温脆性是由孪生优先发生的。由此可见，采用低温作用于切削区引发被切削材料的低温脆性，是降低切削力、减少切削热、不同程度保护或延缓刀具被磨损的主要机理。

(4) 强化换热效应 在干切削或亚干切削中，广泛使用以气体为动力的喷射、喷雾、最小润滑技术等冷却润滑方式。从环保的角度看，自然空气作为冷却介质是最好的，无需作任何处理，但从冷却效果看，空气的比热容低、吸热能力远不如水，不适宜作为冷却介质。

从现代传热学角度研究空气的传热问题，其传热方程为

$$Q = \alpha A \Delta T$$

式中 ΔT ——两种载体的温差 (°C)；

α ——传热系数 [W/(m² · °C)]；

A ——换热面积 (m²)。

根据传热方程可知，对空气传热过程进行一番改造，创造条件让空气起到良好的换热作用，即通过对空气实施冷却，扩大低温空气和

切削区的温差 (ΔT)，使气体有较强的冷却能力，以射流的方式让空气用适当较快的速度通过切削区，使单位时间通过切削区截面的冷气越多，说明通过切削区动态换热面积 A 越大，因而能够带走更多的热量，从而弥补了空气传热系数 α 的不足。这样空气就成为切削区强化换热的良好载体。其次，气体比液体更容易进入刀具/切屑、刀具/工件的接触界面，冷却作用更直接，冷却效果更明显。如果调整气体的压力、气体的温度、气体射向切削区的角度、靶距（喷口与切削区的距离）和入射点，冷风就成为根据人们需要可以控制的冷却介质。气体射流冷却换热虽然能起到冷却切削区的作用，但缺少润滑作用，也不利于被切削工件防锈等问题的处理，不同程度地妨碍了此种冷却方法在更多场合的应用。

以气体射流为动力，辅以必要的润滑油、冷却液等冷却润滑介质形成亚干式冷却润滑方式射向切削区，适量冷却润滑介质或在切削区形成沸腾汽化，达到这种境界其冷却润滑效果高于纯气体冷却作用的上千倍，加之润滑、对切屑的冲刷作用，必将大大降低切削过程中的切削力，减少切削热、降低切削温度、减少刀具磨损和工件热变形。从切削机理的另一角度分析，润滑作用减少了前刀面、后刀面的摩擦因数。按照切削方程式 $\varphi = \pi/4 - \beta + \alpha$ (φ —剪切角， β —刀具前面摩擦角， α —切削时的刀具前角)，减少摩擦因数，意味着 β 变小， φ 增大，从而使前刀面与切屑的接触长度得到减少，降低了切削力，因而也减少了切削热，从而使切削向更加有利于零件尺寸稳定性、表面完整性的方向发展。

在这种冷却切削方法中，切削过程和机理与传统金属切削理论趋于一致，但是由于采用强化换热，促进润滑作用等多方面高效冷却、润滑方式使问题的研究趋于复杂。分析其切削机理，比较切削过程状况，被切削工件最终尺寸精度和表面质量，不难看出，其综合效果明显优于传统切削的冷却润滑方式。

(5) 其他冷却切削机理研究 国内和日本有关学者在研究了干切削、干磨削加工热量的产生及其输送过程，尤其是研究了切削热的产生及移动机理之后，根据切削热是由于机械的摩擦热与化学氧化热组成，且切削热中氧化热所占比重较大的结果，提出了控制保护气氛浓度的干切削、干磨削加工法。该干切削、干磨削加工方法的机理是制

造不同保护气体（如氮气）浓度的气氛，将其输入切削区，使切削、磨削表面生成，切屑分离过程处于保护气体气氛中，阻断切屑氧化热、新生表面氧化热的氧源，从而控制切削热的产生、控制切削温度上升，为获得优良的加工质量奠定了基础。

随着不同干切削加工方法的发明和创新，干切削加工的基础理论还处于不断地完善过程中，这就需要研究新问题，对具体情况作具体分析，用动态的眼光看待事物的发展，使干切削加工方法更好地应用于工业现场。

2.2 干切削加工实施条件分析

2.2.1 现有切削条件分析和实施干切削的主要难点

干切削的实施必须满足一定的条件，即至少应完成与湿切削相同的生产效率、零件加工质量，并且具有相同的刀具寿命。但由于在加工过程中不使用切削液，虽然消除了使用切削液带来的一系列负面影响，但停用切削液后也会产生一些不利的影响。因此，必须考虑要用什么措施消除这些不利影响，才能保证干切削的顺利实施。

干切削时，由于缺少了切削液，切削液的润滑、冷却以及排屑与断屑等作用也即丧失，因而切削热会急剧增加，机床加工区温度明显上升，刀具使用寿命大大降低。由此可见，要使干切削得以顺利进行，达到或超过湿冷却切削加工时的加工质量、生产率和刀具使用寿命，就必须从刀具、机床和工件各方面采取一系列的措施。因此，干切削技术是一项系统工程，其中最大的难点在于如何提高刀具的切削性能、优化和控制工艺过程，同时也对机床结构等提出了新的要求。

2.2.2 干切削实施条件分析

1. 干切削对刀具的要求

(1) 刀具材料应具有优异的耐热性能和耐磨性能 干切削的切削温度一般都比湿切削时高得多，要实现干切削，必须要求刀具材料有高的耐热性（热硬性）和耐磨性能。图 2-3 列出了几种不同刀具材料的硬度与温度的关系，图 2-4 给出切削刀具材料的耐磨性与断裂韧度的关

系。由图2-3可见，陶瓷(Al_2O_3 、 Si_3N_4)、金属陶瓷等刀具材料硬度在高温下很少降低，因此，很适合于一般目的干切削，但是这类刀具材料一般较脆，热韧度不好，不适用于断续切削。由图2-4可见，理想的刀具材料是位于该图右上角的材料，既具有极好的耐磨性（有利于延长刀具使用寿命），又具有高断裂韧度（能承受高切削力）。然而，在耐磨性和断裂韧度之间往往不能兼而有之。通常有较好断裂韧度的刀具材料（如高速钢），往往没有很好的耐磨性，而具有良好耐磨性的材

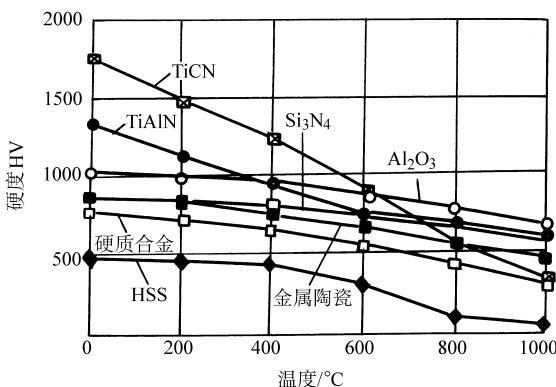


图 2-3 不同刀具材料的硬度与温度的关系

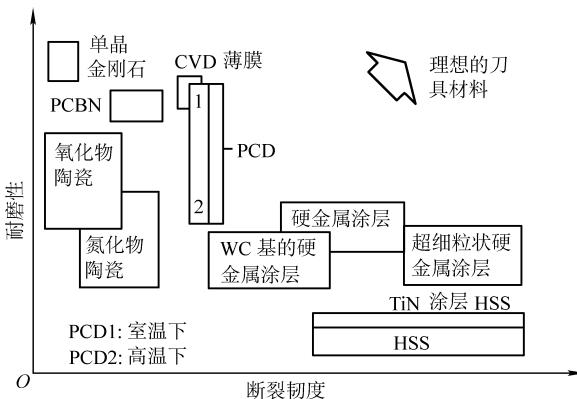


图 2-4 刀具材料的耐磨性与断裂韧度的关系

料（如陶瓷材料）往往断裂韧度不好。目前立方氮化硼（CBN）、聚晶立方氮化硼（PCBN）、聚晶金刚石（PCD）、超细晶粒硬质合金等超硬刀具材料已广泛用于干切削之中。

(2) 刀具应具有低的摩擦因数 降低刀具/切屑、刀具/工件表面之间的摩擦因数，在一定程度上弥补了无切削液的润滑作用，抑制切削温度的上升。在这方面最好的办法是对刀具表面进行涂层。图 2-5 给出刀具有涂层与无涂层的耐磨性比较。涂层分两大类：一类是硬涂层，即在表面上涂 TiN、TiC、 Al_2O_3 等涂层，这类涂层刀具涂层硬度高，耐磨性好；另一类是“软”涂层，即在刀具表面上涂硫族化合物 MoS_2 或 WS_2 等减摩涂层，这类涂层刀具也称“自润滑刀具”。据有的资料报道，这种“软”涂层与工件材料的摩擦因数很小，只有 0.01 左右，可有效地减少切削力，降低切削温度。

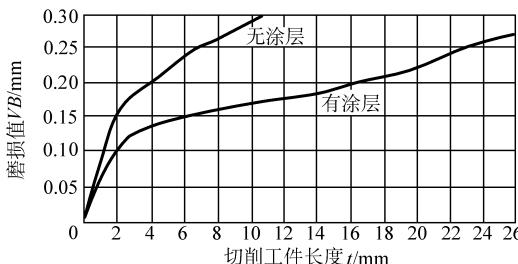


图 2-5 有涂层与无涂层的耐磨性比较

注：工件材料 45； $v = 250 \text{ m/min}$, $f = 0.2 \text{ mm/r}$, $a_p = 2.0 \text{ mm}$, 干切削。

无论哪种涂层，实际上都起到了类似于切削液的冷却作用，它产生一层隔热层，使切削热不会或很少传入刀具，在高速干切削中，涂层还保持刀具材料不受化学反应的作用，从而保证刀具的切削性能。

切削实验表明， TiAlN 涂层丝锥在质量分数 $w(\text{Si})$ 为 9% 的 Si-Al 合金上可加工螺纹 1000 个， MoS_2 软涂层丝锥则可加工螺孔 4000 个，而 $w(\text{Co})$ 为 10% 的超细晶粒硬质合金无涂层丝锥只能加工 220 个。如果采用软涂层涂在钻头的螺旋沟部位，以减少刀具/切屑之间摩擦，硬涂层则涂复在刀尖部位上的组合涂层工艺，可以更好地发挥涂层作用。据有的资料报道，厚膜 Al_2O_3 涂层还有保持刀具材料化学稳定性的作用。由此可见，涂层技术是干切削成功应用的一项关键技术，各种涂

层的化学稳定性和耐磨性见图 2-6。

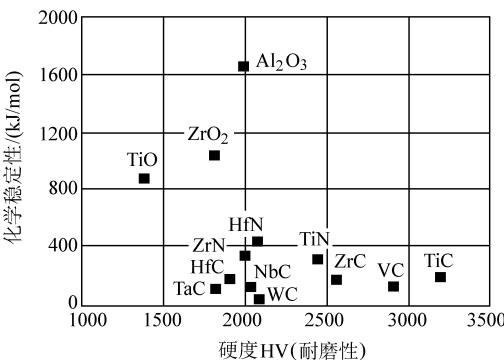


图 2-6 各种涂层的化学稳定性和耐磨性

(3) 刀具几何参数的合理设计 干切削时采用优化的刀具几何形状, 可减少切削时的摩擦, 有利于干切削对断屑、排屑的要求。目前在车刀三维曲面通用断屑槽系列方面的设计制造技术已比较成熟, 可针对不同的工件材料和切削用量, 设计出相应的断屑槽结构与尺寸, 其既能大大提高切屑折断能力和对切屑流向的控制能力, 又能控制积屑瘤的产生和减少刀具的磨损速度。

2. 干切削对工艺技术的要求

干切削的工艺技术对干切削的实现往往起到关键的作用, 这涉及工件材料实施干切削的可靠性、工件材料和刀具材料的合理匹配、工艺方法、工艺参数的合理选用等问题。

工件材料在很大程度上决定了干切削实施的可靠性。干切削的“工件材料与加工方法”的组合见表 2-1。由表可见, 超硬合金和钢的干切削难度最大。一般熔点较高、热导率和热膨胀系数较小的材料适合干切削, 大质量工件比小质量工件适合干切削。例如: 铸铁、钢、高合金和钛、铝合金适于干切削; 镁的应用正在日益扩大, 干切削加工镁是一个趋势; 一些难加工材料, 如钛合金、超级合金、反应烧结氮化硅 (RBSN) 等进行干切削时, 除了选好刀具以外, 还应增加一些工艺辅助措施, 才能保证干切削顺利进行。

表 2-1 干切削加工的工件材料与加工方法的组合

工件材料	加工方法				
	车削	铣削	铰削	钻孔	攻螺纹
铸铁					
钢		×	×		×
铝合金		×			×
复合材料					
高硬度材料	×	×	×	×	×

注：×表示干切削应用比较困难。

干切削时，切削温度高，为了防止高温下的刀具材料和工件之间材料的扩散和粘结，应特别注意刀具材料与工件之间的合理匹配。一般刀具材料的硬度应为被加工工件材料硬度的四倍以上，如：PCDN 刀具加工淬硬钢、冷硬铸铁及表面热喷涂材料等高硬度材料时的刀具寿命较高；而加工中、低硬度工件时，刀具的寿命不如硬质合金刀具高。又如：金刚石刀具与铁元素有很强的化学亲和力，故不宜加工钢铁材料等工件；切削钛合金和某些含钛的不锈钢、高温合金时，不宜选用含钛的硬质涂层刀具进行干切削。

干切削加工的工艺方法、工艺参数合理选用对于解决某些工件材料的干切削也非常重要。如：铝合金热导率高，加工过程中容易吸收大量的切削热；热膨胀系数大，易造成热变形、切屑和刀具之间的“冷焊”或粘结，影响工件的加工精度。因此，在普通干切削中，铝合金是否能进行干切削仍然存在争议。但在高速干切削中，95% ~ 98% 的切削热都传给切屑，切屑在刀具前刀面的接触界面上会被局部熔化，形成一层极薄的液体薄膜，因而切屑很容易在瞬间被切离工件，大大减少了切削力和产生积屑瘤的可能性，工件可以保持常温状态。这样既提高了生产效率，又改善了铝合金工件的加工精度和表面质量。

正确选择切削用量可使陶瓷刀具在硬态车削中发挥作用。由于陶瓷刀具有优越的耐磨性和耐热性，切削用量对刀具磨损的影响程度比硬质合金小。通常硬态车削精加工的合理切削速度应为 80 ~ 200m/min，背吃刀量一般为 0.1 ~ 0.3mm，进给量为 0.05 ~ 0.25mm/r，其选择应根据机床的性能、材料的硬度、切削中的冲击力大小、工件表面粗糙度

和生产率的要求综合确定。如用 FD22 [Ti(CN)-Al₂O₃] 陶瓷刀具干切削 86CrMoV7 淬火轧辊钢 (60HRC) 时, 取切削速度 $v = 60\text{m/min}$, 背吃刀量 $a_p = 0.8\text{mm}$, 进给量 $f = 0.11 \sim 0.21\text{mm/r}$, 表面粗糙度值 R_a 为 $0.8\mu\text{m}$, 可以代替半精磨; 当取 $f = 0.07\text{mm/r}$ 时, 表面粗糙度值 R_a 为 $0.4\mu\text{m}$, 达到精磨水平。

3. 干切削对机床的要求

在进行高速干切削和硬态切削这两类特殊的干切削时, 对机床有更高的要求。此时干切削机床设计必须考虑两个主要问题: 一个是切削热的散发; 另一个是切屑和灰尘的排出。除此之外, 机床应具有高刚度、高转速、大功率等特点。

(1) 切削热的散发 干切削在机床加工区产生的热量较大, 如不及时从机床主体结构排出, 就会使机床产生热变形, 从而影响工件的加工精度和机床工作的可靠性。对一些无法排出的热量需要从机床的结构设计方面考虑, 以提高机床系统的热稳定性, 在相关部位采取隔热措施或采取精度的误差补偿设计。

(2) 切屑的排出 干切削机床应具有较好的吸尘、排屑装置, 机床结构应有利于排屑, 应注意主轴、导轨等精密运动部件密封。干切削机床及时排屑有两方面的意义: 一是切屑的顺利排出, 防止加工时连带造成的不安全因素; 另一方面, 干切削时的大部分切削热经由切屑带走, 若不及时清除切屑, 切屑的热量传递给机床, 会使机床产生温升, 引起局部热不平衡, 极易导致机床热变形, 最终影响工件的加工质量。因此, 机床是否能够将切屑及时排出, 是机床结构功能设计中不可忽视的问题。

干切削加工时, 应尽量采用高速、超高速机床或其他高速数控机床、加工中心, 机床应具有较大的功率和刚性。这类机床在加工过程中, 可降低 30% 左右的切削力, 使大量的切削热随切屑带走, 有利于工件在切削时基本保持室温状态。

(3) 机床应具有高刚度、高转速、大功率 干切削加工机床的加工速度通常比较高, 这就要求机床具有良好的刚性, 优良的吸振特性和隔热性能, 其床身往往采用具有很高的热稳定性、良好吸振性能的人造大理石。研究表明: 人造大理石的吸振性是铸铁的六倍左右; 其次机床导轨系统的精度要求高, 导轨直线性好、间隙小, 不能有爬行

现象。

必须指出，实施干切削对刀具、工艺条件、机床的要求不是彼此孤立的，在实际干切削中要根据工件图样给出的技术要求、工件材料本身的信息和工艺现场条件，在正确把握干切削基本原理的基础上，对各种条件进行合适的优化、试验，才能保证干切削加工得以实现。

2.3 干切削加工的研究内容

干切削加工工艺系统涉及工件、刀具、机床和工艺环境等问题，对干切削加工的研究，归根结底是对这一种切削加工形式工艺系统的研究。其研究内容可归纳为干切削加工方法的研究和干切削条件的基础研究。

2.3.1 干切削加工方法的研究

1. 干切削加工方法在不同机床上的工艺研究

干切削是对传统生产方式的重大创新，是一种崭新的绿色制造技术，虽然从其出现至今只有很短的历史，但它是 21 世纪的前沿制造技术，同时干切削又是一项系统工程，不可能一蹴而就。干切削应用于不同类别的机床时，需要根据不同类别机床的加工特点，研究不同类别机床实施干切削的可能性、方便性，以及相关条件的特殊性。目前，需要研究干切削在车削、铣削、钻削、齿轮加工、磨削以及其他类型切削加工中应用的条件、特点、方法和采取的工艺措施。例如：相对于普通的干车削，干铣削是断续切削，干钻削则是封闭式切削；干磨削的速度高，切削热上升快，易烧伤工件，完全的干磨削往往较困难，是否需要添加切削液，如何添加切削液，加多少切削液切削效果最好等。诸如此类问题，均需要针对不同机床、工艺类型的特点逐一加以实验、分析，并结合工件材料、刀具、机床、工艺条件等问题进行研究，才能使干切削在各类机床上真正实现，并且这种实现是有价值的。

2. 干切削工艺方法研究

(1) 干切削、亚干切削研究 通常将在切削过程中不使用任何切削液的工艺方法称为干切削（干式切削，Dry machining），它包括完全干切削、辅助干切削（包括风冷、液氮冷却、激光辅助等）加工工艺。

完全干切削是指在切削过程中不使用任何切削液及辅助冷却介质的工艺方法；亚干切削（亚干式切削，Sub-dry machining）是指应用不同技术方法，将适量冷却和润滑介质注入带有一定压力、不同温度的气流中混合雾化，生成微量冷却润滑介质，并喷入切削区，对受热影响区实施微量冷却润滑的切削技术。亚干式切削通常包括：微量润滑切削、低温微量润滑切削（冷风切削）、保护气微量润滑切削、内冷喷射法、混喷喷射法等工艺。

有关亚干切削内容将在2.4节中综述。

(2) 完全干切削 完全干切削是指在切削过程中不使用任何切削液及辅助冷却介质的工艺方法，完全依机床、刀具、工件材料和工艺参数之间的合理选择、优化而进行的切削。当此类干切削只有普通精度要求时，只要机床的刚度、刀具材料的硬度、耐磨性等指标，以及工艺系统热稳定性满足加工要求就可以达到。当加工精度、生产率要求较高时，往往需要对机床的性能、刀具性能、被切削工件材料和工艺参数之间进行深入的研究、试验和优化工作，才能实现真正意义上的完全干切削。

(3) 风(空气)冷或冷风干切削 风(空气)冷干切削必须要有空气压力输送系统；冷风或低温冷风冷却干切削除空气压力输送系统外，还必须有对空气的制冷系统，其构成如图2-7所示。

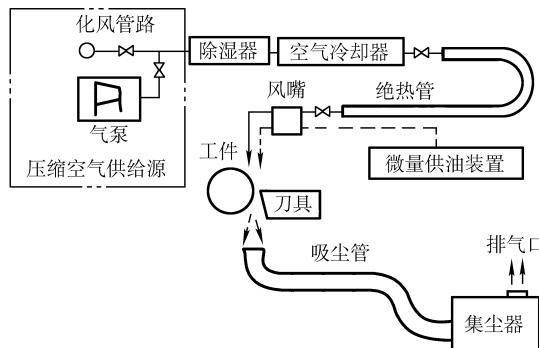


图2-7 风冷却系统

风冷却系统一般有压缩空气供给源、除湿器、空气冷却器、绝热管、微量供油装置、风嘴、吸尘管和集尘器等组成。来自压缩空气源

的空气经过除湿器去除水分后，送入空气冷却器冷却至 $-50\sim-5^{\circ}\text{C}$ ，再经绝热管由风嘴将冷风送至需要冷却的部位，必要时喷入少量润滑介质以防锈，并兼有一定润滑作用。在风嘴的对面设有集尘装置用于收集尘屑，再经过集尘器内的过滤器滤去切屑。在该系统中，建立气体压力、流量、风嘴的喷射角和靶距（通常指风嘴至切削区的距离，下同）等工艺应用参数的可调机制，随工件材料、刀具材料、刀具结构、刀具几何参数等加工信息进行有利于干切削的变化，才能使风冷却系统较好地对被加工对象实施干切削任务。

实现空气冷却的方法较多，根据制冷原理目前可归纳为以下四种：

1) 低沸点液体汽化间接制冷，其原理如图 2-8 所示。这种制冷方法是将液化厂的低沸点液氮送入风（空气）冷却系统中，使液氮在常温常压下蒸发汽化吸热而使空气冷却。这种冷却系统的结构较简单，液氮汽化温度为 -180°C ，可将空气冷却到 -100°C 以下，温度可由液氮流量控制，过冷还可通过加热器加热。由于需要大容量储液器和液氮的外部制备，整个系统的运行成本大大增加，故不太实用。

2) 制冷机压缩机循环间接制冷，其原理见图 2-9。该制冷方法使用低沸点制冷剂，由压缩机、蒸发器、冷凝器、储液器和膨胀阀等构成闭环冷却系统。这是电冰箱和冷却仓库广泛采用的制冷方式，其温度控制和能耗效率均较理想。

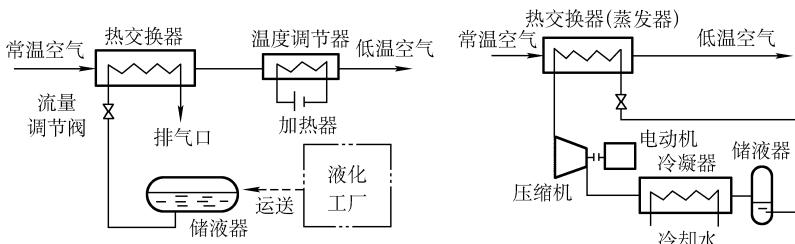


图 2-8 低沸点液体
汽化间接制冷原理

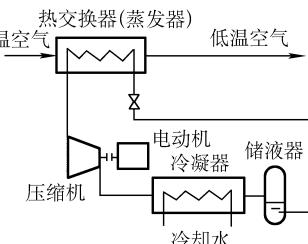


图 2-9 制冷机压缩机
循环间接制冷原理

3) 空气绝热膨胀直接制冷，其原理见图 2-10。由空气压缩机或管路来的常温高压空气进入膨胀机，使其在设定压力下膨胀，通过动力负荷对膨胀后空气能量的消耗，使空气温度下降。低温空气的出口温度由气源的入口压力和出口压力及膨胀机的性能来决定。

4) 涡流管直接制冷。图 2-11 给出了涡流管直接制冷原理。压缩空气通过涡流管时将产生涡流运动，涡流内外气体的压力差就会产生温度差，其中心部分的气体为低温，外侧气体为高温。制冷空气的温度取决于入口空气压力与出口气体的流量。其结构很简单，只需一个涡流管。但有一部分气体作为热气排出，故制冷效率较低。

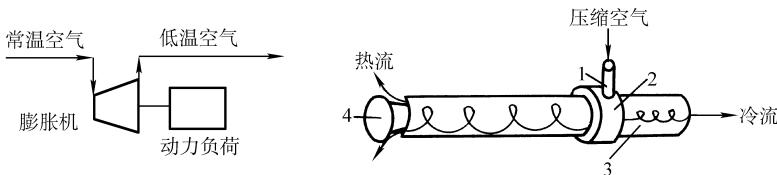


图 2-10 空气绝热膨胀
直接制冷原理

图 2-11 涡流管直接制冷原理
1—喷嘴 2—孔板 3—涡流室 4—控制阀

上述四种制冷方法的性能比较见表 2-2。

表 2-2 四种制冷方法的性能比较

制冷方法	装置复杂程度	初始成本	运行成本	可控性	可靠性	综合评价
低沸点液体汽化间接制冷	简单	低	高	好	最好	差
制冷机压缩机循环间接制冷	较复杂	较高	较低	最好	最好	最好
空气绝热膨胀直接制冷	较简单	高	低	中	好	好
涡流管直接制冷	简单	低	较高	差	最好	中

对于实施干切削的工艺系统，最主要的问题是保证切削过程平稳，以便获得理想的工件加工质量，由表 2-2 性能比较可知：制冷机压缩机循环间接制冷方法综合评价最好。目前，实际研究和应用中也主要采用这种方法。

风冷却虽可进行干切削，但也存在一些尚需解决的问题，如切屑的收集问题，纯风冷却时刀具的润滑问题，纯风冷却时工件的防锈问题和冷风的噪声问题。

(4) 液氮冷却干切削 液氮冷却干切削是采用液氮使刀具或工件的切削区处于低温冷却状态进行切削加工的方法。其主要有两种方式：

一是采用液氮的自身瓶装压力喷射到切削区进行冷却；二是采用液氮受热蒸发循环原理，间接使刀具冷却。这是一种低温干切削方法，其装置见图 2-12。这种方法是在车刀刀片表面上倒装了一个金属帽装物，其内腔与刀片上表面间形成一个密闭室，帽状物上有液氮的入口和出口。在切削过程中，液氮不断地在密闭室中流动，吸收刀片上的切削热，使刀片的切削温度不致过高，故能保持良好的切削性能，使干切削得以顺利进行。

用 PCDN 刀具车削烧结氮化硅（RBSN）的刀面磨损值如图 2-13 所示。当不用液氮冷却刀具时，PCDN 切削工件长度（轴向测量）仅为 40mm，后刀面磨损值 V_B 就达 3mm，切削无法进行下去。当采用液氮冷却后，切削长度 160mm， V_B 仅为 0.4mm，生产效率提高了三倍，刀具磨损值 V_B 减小为没采用液氮冷却时的 $1/6$ ，工件圆度误差从 $20\mu\text{m}$ 减至 $3.2\mu\text{m}$ 。

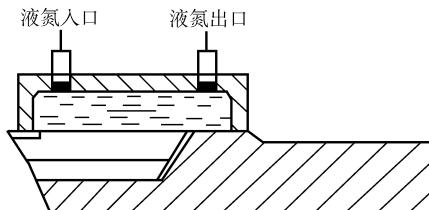


图 2-12 液氮冷却干切削装置

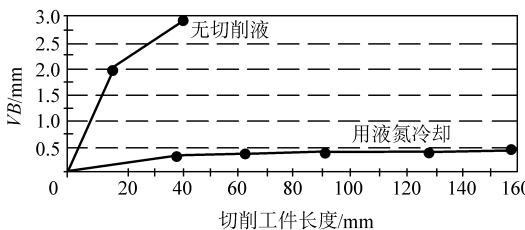


图 2-13 PCDN 刀具车削 RBSN 的刀面磨损值 V_B

注： $v_c = 2.23\text{m/s}$ ， $f = 0.1\text{mm/r}$ ， $a_p = 0.5\text{mm}$ ， $\gamma_0 = -6^\circ$ ，
 $\lambda_s = -6^\circ$ ， $\alpha_0 = 5^\circ$ ， $\kappa_r = \kappa'_r = 15^\circ$ ， $\lambda_e = -6^\circ$ 。

(5) 硬态切削 所谓硬态切削主要是指利用高性能刀具对淬硬工件 (50~65HRC) 的切削加工，目前主要在车削加工中进行。硬态车削可作为淬火钢的最终加工或精加工，即实现以车代磨。

通常淬硬钢工件在热处理前已完成粗加工，精加工一般由磨削完成。由于超硬材料刀具的出现及数控机床等加工设备精度的提高，以

硬态切削代替磨削来完成零件的最终加工已成为一个新的精加工途径。硬态切削可达到小于 0.013mm 的尺寸精度和小于 $0.3\mu\text{m}$ 的表面粗糙度。磨削虽然可以保证 $1\mu\text{m}$ 的尺寸精度，表面粗糙度值小于 $0.25\mu\text{m}$ ，但与硬态切削相比，磨削是一种成本高、耗时多的加工方式。一般来说，硬态切削比常规磨削更能保持工件表面性能的完整性，在硬态切削加工中，绝大部分的热量被切屑带走，在控制良好的硬态切削加工中，很少会发生工件表面热损伤。

目前，硬态切削加工的研究除了刀具、机床、工艺参数等一些基础条件外，对于各种不同材料硬态切削时临界值研究、硬态切削是否要添加切削液的研究（即硬态切削中微量冷却润滑技术的研究）、硬态切削中工件表面完整性研究、切削力和切削温度的模拟与控制、切削机理等都在进一步的探索中，并取得了一定的成果。

(6) 高速干切削 高速干切削理论是 1931 年 4 月由德国物理学家 Carl. J. Salomon 提出的。他指出，在常规切削速度范围内（见图 2-14 中 A 区），切削温度随着切削速度的提高而升高，但切削速度提高到一定值后，切削温度不但不升高反而会降低，且切削速度值 v_e 与工件材料的种类有关。对每一种工件材料都存在一个速度范围，在该速度范围内（见图 2-14 中 B 区），由于切削温度过高，刀具材料无法承受，即切削加工不可能进行，通常称该区为“死谷”。但若能越过这个“死谷”进行高速干切削，切削温度将不会随切削速度提高而升高，基本维持在与常规切削相同的切削温度，从而可大幅度提高生产效率。由此可见，高速干切削是一个相对的概念，根据被加工材料、生产方式的不同，亦有不同范围，通常指切削速度超过传统切削速度 5~10 倍的切削加工。

随着高速与超高速机床设备和刀具等关键技术领域的突破性进展，高速与超高速切削技术的速度范围也在不断扩展。如今在生产中高速切削铝合金的切削速度范围为 $2000\sim7500\text{m/min}$ ，铸铁的切削速度范围

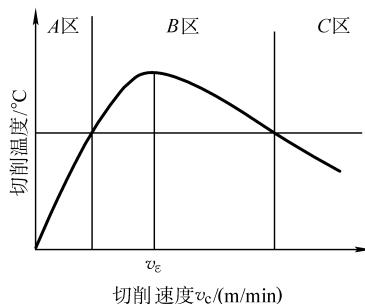


图 2-14 高速切削的概念

为 $900 \sim 5000\text{m/min}$, 普通钢的切削速度范围为 $150 \sim 1000\text{m/min}$, 纤维增强塑料的切削速度范围为 $2000 \sim 9000\text{m/min}$, 进给速度高达 $20 \sim 40\text{m/min}$ 。

研究高速干切削加工技术是从与其他切削方法的比较开始的, 实施高速切削相对于普通的干切削, 对机床、刀具、工艺方法将有更高的要求。如: 机床的主轴需具备高转速、大功率和大转矩, 进给速度也要相应地提高, 保证刀具进给量基本不变, 进给系统要有很大加速度等问题; 在刀具方面, 除了考虑刀具材料、结构等刀具本身的技术问题外, 刀具更换方便和可靠、机床和刀具良好的动态特性和热特性等问题都需要进行更深入的研究。

对于高速干切削工艺技术的研究, 是实施高速切削又一个非常重要的课题, 其主要内容包括: 适合高速切削的加工走刀方式, 专门的 CAD/CAM 编程策略, 优化的高速加工参数等。

2.3.2 干切削加工条件的研究

干切削方法的研究是干切削条件基础研究的助推剂。每一种新的干切削方法的产生、应用都会对干切削条件的基础研究提出新的课题, 这些研究内容可以归结为以下三个问题: 能是否实现干切削; 如何更好、更方便地实现干切削; 为了方便、可靠、绿色、保证质量地实现干切削涉及哪些最基本的条件。前两个问题是方法的创新、工艺的创新问题, 后一个问题具有干切削研究的一些共性问题。从干切削实施条件分析中可以看出, 机床、刀具、工艺参数等问题是干切削条件基础研究中的主要问题。

1. 干切削机床技术

(1) 普通干切削的机床技术 设计干切削机床首先要考虑切削热的散发、切屑和灰尘的及时排出, 这两个问题已在 2.2 节中进行了叙述, 但要解决上述问题, 需要对机床结构、机床部件、机床零件的设计, 机床零件材料的选用, 机床自动化系统等问题进行深入研究。

为了便于排屑, 干切削机床应尽可能设计成立式主轴和倾斜式床身, 工作台上的倾斜盖板可用绝热材料制成, 将加工过程中产生的大量切屑直接送入螺旋排屑槽; 也可以采用吸气系统防止切屑堆积在工作台和其他支承部件上。采用内置的循环冷气系统可以提高机床工艺

系统的热稳定性。在加工区的某些关键部位设置温度传感器，用以监控机床温度场的变化情况，必要时通过数控系统进行精确的误差补偿等。这些机床结构和子系统、部件的增加和改进都是干切削机床设计时需要探讨的问题。

(2) 高速干切削机床技术 高速干切削的机床结构有其特殊要求，它是实现高速干切削最基本且关键的技术。通常，与机床结构有关的关键技术包括：

- 1) 独特的主轴结构单元。
- 2) 高速直线驱动进给单元（系统）。
- 3) 高速切削刀具技术及其系统。
- 4) 高性能的数控和伺服驱动器。
- 5) 高效冷却系统。
- 6) 可靠的安全装置与实时监控系统。
- 7) 高阻尼和高刚度的机床床体结构。
- 8) 良好的动态特性和热特性。

2. 干切削刀具技术

刀具能否承受干切削时产生的大量热量，是实现干切削的关键。干切削的刀具技术包括新型刀具材料、刀具几何参数设计、刀柄结构等方面。

(1) 新型刀具材料 根据干切削对刀具的要求，以及干切削时防止刀具材料与工件材料扩散、粘结，应注意刀具材料与工件材料的合理搭配，并积极开发新型刀具材料。新型刀具材料的研究主要集中在超硬刀具材料（含聚晶金刚石 PCD、聚晶立方氮化硼 PCBN、立方氮化硼 CBN 等）、金属陶瓷、陶瓷、涂层、性能优异的高速钢和硬质合金等方面。除了研究刀具材料的硬度、韧度、热稳定性外，还有不同刀具材料在干切削中的适应性；不同被切削材料在干切削中的作用、特点、性能的研究；在刀具涂层中对涂层材料、涂层参数、涂层工艺、复合涂层的研究；在硬质合金刀具材料中添加 TaC 和 NbC 等元素的研究；对其材料的细晶粒（ $1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ ）、超细晶粒（ $< 0.5 \mu\text{m}$ ）乃至颗粒纳米化等方面的研究。对高速钢刀具材料的研究，倾向于无钴、少钴、少钨、粉末冶金高速钢刀具等方面。在这些研究中，需考虑某些材料资源多则多用，某些材料资源少则少用或不用，使有限资源尽可能发

挥更大作用。

(2) 刀具几何参数设计 刀片形状及几何参数的合理确定，对充分发挥刀具切削性能非常重要。目前，可转位刀片是发展的主流。刀片材料选定后，应尽可能选用强度高的刀片形状和可靠的刀片夹紧方式。各种刀具刀片形状的刀尖强度由高往低依次为：圆形、 100° 菱形、正方形、 80° 菱形、三角形、 55° 菱形、 35° 菱形。刀体上还有许多小的结构设计，如：各种槽（刀片槽、容屑槽、键槽等）应避免贯通形式，减少尖角以防应力集中；刀体质量的分布应调整合理，使得刀体膨胀均匀。在铝合金的高速铣削中，通常用双刃铣刀，这是因为过多的切削刃会缩小容屑空间，容易引起切屑粘刀。为避开共振频率，也可采用三刃铣刀，以增加冲击频率等。

对几何参数而言，干切削尤其是在硬切削中，应选择尽可能大的刀尖圆弧半径，用圆形及大半径刀片粗加工，精加工时刀尖半径取 $0.8 \sim 1.2\text{mm}$ 。干切削时由于切削力、切削热相对集中，且切削温度又高，在硬切削时切削力比较大，特别是径向切削力比主切削力还要大，因此，刀具宜采用负前角 ($\gamma_0 \leq -5^{\circ}$) 和较大的后角 ($\alpha_0 = 10^{\circ} \sim 15^{\circ}$)，主偏角根据机床刚性，一般取 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，以减少工件和刀具的振动。

值得指出的是，刀具结构、刀具几何参数的设计与刀具材料、被加工工件材料、切削工艺参数、机床条件、冷却方式等因素有关，使用者需经过一定的工艺试验研究后选用，才能取得适用于生产实际的优化值。

(3) 刀柄结构 在高速干切削中，刀片的固定、刀头与主轴的连接等问题，不仅涉及安全问题，还决定高速干切削能否实现。除此而外，涉及刀具寿命和安全性的因素还有刀具系统平衡设计、减少径向和轴向圆跳动、控制平衡精度等。

3. 干切削工艺技术

干切削工艺技术涉及工艺方法、切削用量三要素、工艺环境等方面的研究。当采用某种工艺方法时，再增加一些相应的工艺措施会使该工艺方法的应用更加完善。例如，在对氮化硅 (Si_3N_4) 工件进行硬态车削时，由于该材料有极高的抗拉强度，使得任何刀具都会很快产生破损。采用激光辅助切削，用激光束对工件切削区进行预热，使工

件局部软化（其抗拉强度由750MPa降至400MPa），从而使切削阻力减少30%~70%，刀具磨损降低80%左右，使干切削得以顺利进行。

加工工艺中的切削用量是一个非常活跃的因素，切削用量与刀具材料、刀具结构、几何参数，以及被加工工件材料、机床性能、加工方式的优化有关，这些因素能使干切削更容易实现。一般来说，硬态切削时，通常采用CBN或陶瓷刀具材料，由于其耐热性和耐磨性好，因而可选用较高的切削速度和较大的切削深度以及较小的进给量。但当使用硬质合金刀具时，由于硬质合金刀具的耐磨性不如CBN或陶瓷刀具，因此，不宜选用较高的切削速度和切削深度。

高速干切削时，切削参数选择的一般原则是：高的切削速度、中等的进给量和较大的切削深度。但具体选择时，还需要和被加工工件材料、机床性能、刀具情况、工艺环境等因素结合起来考虑。例如，上海某模具厂高精度铝制模具型腔的加工，长期以来达不到图样规定的加工技术要求，加工后需要手工铲刮、抛光。经过一段时间摸索，采用DIGTT—218高速铣床，半精加工选取主轴转速18000r/min、背吃刀量2mm、进给速度5m/min，精加工选取主轴转速20000r/min、背吃刀量0.2mm、进给速度8m/min。结果每件工件的加工周期由原来的60h缩短为6h，且模具质量满足客户要求。由此可见，由于高速干切削是一种新的切削方式，目前尚没有完整的加工参数供选择，也没有许多与使用者工艺环境非常接近的加工实例供参考。因此，高速干切削时，合理的切削参数、最佳的切削效果，需要在工艺应用试验和必要的研究后才能得到。

普通干切削过程中一般不使用切削液，高速干切削、硬态切削过程中更是如此。但在某些加工中完全实施不使用切削液的干式切削技术往往又是比较困难的。这就提出了什么情况下使用切削液、如何使用切削液的研究问题。美国职业安全健康委员会(OSHA)根据调查提出了切削液使用的新概念，其中有低温冷却、喷雾冷却(复合喷雾冷却)、最小润滑技术(Minimal Quantity of Lubricating, MQL)等。上述三种冷却润滑方法，从根本上讲是冷却润滑方法在干切削、亚干切削两大类切削方法中的应用。目前在干切削或亚干切削中使用的冷却、润滑方法很多，如：气体冷却、亚干式切削、低温冷却、保护气体油雾冷却、水蒸气冷却润滑切削、喷雾冷却等。在低温冷却中又有液态

氮直接喷射冷却，以及用 CO₂的自喷方式对切削区的直接冷却。用经干燥的空气维持杜瓦瓶的恒压，利用虹吸原理让压缩空气从瓶中抽出液态氮，经特制的喷嘴喷向切削区，采用液态氮或 CO₂从外部冷却工件，来达到降低切削区温度的目的；另一种是采用刀具内部制冷方法，甚至把刀具与冷冻机直接相连对刀具进行循环冷却，效果也很明显。实验证明，低温切削钛合金、不锈钢、高强度及耐磨铸铁等均能取得良好效果。采用低温冷却切削技术能有效降低切削区的切削热，改变切削区切削温度的分布。

在比较干切削和湿式切削的试验中，我们不难发现切削热是影响被加工工件尺寸精度的一个主要问题，干切削由于切削热来不及散发从而累积在切削区，使工件产生膨胀，其精度低于同等条件下的湿切削。因此，在需要进行干切削时，除了上述有关因素外，冷却润滑方法、冷却温度、喷射方式、喷射角度、靶距、切削液的用量等因素的优化也是需要系统研究的问题。

2.4 亚干切削加工综述

2.4.1 亚干切削概述

完全干切削对机床结构、刀具材料、工艺条件都有相对严格的要求，因而使得完全干切削的实施变得困难，应用范围受到限制。在同样工艺条件下，完全干切削会使切削过程产生一些特殊的问题，例如：

- 1) 使刀具/切屑接触区的摩擦状态和刀具磨损机理发生变化，刀具磨损加快。
- 2) 由于工件材料本身的热塑性增加使得切屑的折断、控制和处理困难。
- 3) 加工表面质量不稳定。

但是，如果将干切削与湿式切削两者的优点相互结合，既可满足加工要求，又可以使与切削液相关费用降至很低，取得甚至超过湿式切削的效果。在一般意义，通常将这种介于湿式切削与干切削之间的加工技术称之为亚干切削。亚干切削包括最小润滑技术、低温微量润滑切削（冷风切削）、保护气微量润滑切削技术等。

亚干切削在本质上和传统的切削机理是一致的。亚干切削是将适

量冷却和润滑介质注入带有一定压力、不同温度的气流中混合雾化，生成微量冷却润滑介质，并喷入切削区，对受热影响区实施微量冷却润滑的切削技术。

最早提出的亚干切削的定义是：以低温或亚低温气体射流为动力，不但给予切削区最小润滑（满足基本润滑条件），还给予切削区最大冷却（有限冷却介质达到沸腾汽化的最大冷却效果），可以极大地提高切削过程中冷却润滑效果，故又称为最小润滑、最大冷却技术。目前，其中“最小”“最大”的概念由“适量”所替代，这既说明随着研究的深入，人们认识问题不断进步，同时又说明在亚干切削技术领域有许多未知问题等待人们去认识。

在一般干切削中，切削温度较湿切削加工要高得多，润滑油极易挥发，切屑与刀具前刀面之间的正压力也使润滑油难以真正进入切削区，切削过程中不仅有外摩擦，还有被切削材料变形所消耗的功转变成热量，这些因素并非润滑所能解决。亚干切削中采用冷空气射向切削区，辅以润滑和易引起强化换热的冷却介质，一方面气流的压力作用使冷却介质容易进入切屑与刀具表面之间，另一方面低温有利于在两种材料的摩擦表面维持润滑油的润滑作用，三是冷却介质的沸腾汽化可进一步降低切削区温度，有利于保持刀具硬度，减小工件热变形，减小刀具磨损。诸多方面的效果更加有利于切削过程向增大切削效率、提高工件尺寸稳定性和提高工件表面完整性方向发展。

2.4.2 几种亚干切削加工技术介绍

1. 最小润滑技术

最小润滑（MQL）是亚干切削技术中的一种，通常将压缩空气与少量的润滑液混合后，再喷射到工件的加工部位，使刀具/切屑接触区得到润滑。MQL技术可大大减小刀具/切屑及刀具/加工表面间的摩擦，起到降低切削温度、减小刀具磨损和提高加工表面质量的作用。由于最小润滑技术所使用的润滑液量很少，但效果明显，既提高了生产效率，又不会造成污染。例如，一台加工中心采用传统湿切削中，需要切削液 $20 \sim 100\text{L/min}$ ，采用MQL技术只需要 $0.03 \sim 0.2\text{L/h}$ 。这样，清洁干净的切屑经过压缩后即可回收使用，完全不污染环境。

在MQL中，对油滴颗粒直径的控制非常重要。粒径过大，容易粘

附在配油管内，不能对切削点进行正确的供油，所以油滴的粒径一般控制在 $2\mu\text{m}$ 以下。图 2-15 为油滴的粒径分布图。MQL 推荐使用的油剂多采用分解性高的合成脂和油脂，其专用切削油的特性如下：

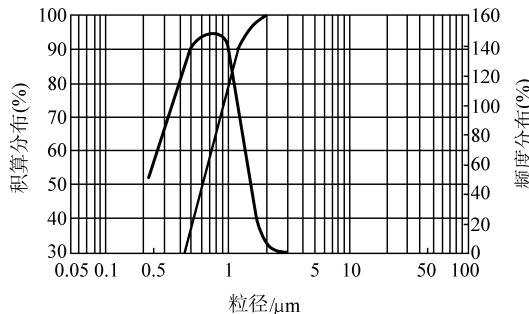


图 2-15 油滴的粒径分布

- 1) 运动粘度 (40°C)： $19.1\text{ mm}^2/\text{s}$ 。
- 2) 引火点 (COC)： 250°C 。
- 3) 流动性： -45°C 。
- 4) 生物分解性 (CEC)：100%。

实施 MQL 技术和亚干切削都存在两个问题：一个是如何保证冷却和润滑介质可靠进入切削区进行充分冷却润滑；二是如何确定所需的冷却和润滑介质用量。解决第一个问题有两种方法：一种使用“外喷法”，将冷却和润滑介质混合物从外部喷向切削区，此法简单易行，但对半封闭、封闭状况的切削加工（如钻、绞、拉削等）效果不好；另一种方法是“内喷法”，即在刀具中开出冷却和润滑介质流入通道，让冷却润滑介质和气体混合物经此通道喷向切削区，这种方法切削消耗量少，冷却润滑充分，特别适合半封闭、封闭切削加工，但刀具结构较复杂。目前，刀具结构和制造技术的发展为上述技术提供了有利条件。高速钢和硬质合金钻头、立铣刀均有油孔结构，规格也越来越多，如直径为 $3\sim 4.5\text{ mm}$ 的钻头，其油孔直径可为 $0.4\sim 0.6\text{ mm}$ 。美国职业安全健康委员会 (OSHA) 制定的切削液标准中规定：空气中的雾剂的最大允许值为 $5.0\text{ mg}/\text{m}^3$ ，期望能达到 $0.5\text{ mg}/\text{m}^3$ ，而且生产成本不能过高。不同材料、不同工况在实施 MQL 技术时具体用量目前拟用实验方法逐步解决。

亚干式切削技术对刀具的要求不会苛刻，一般的 YT、YW 牌号刀具也可用于亚干切削，当与刀具涂层技术结合时，可取得更好的切削效果。如用 TiAlN + MoS₂ 涂层钻头钻削铝合金工件时，干钻削只能加工 16 孔，切屑就粘结在螺旋沟中，而采用 MQL 技术后，钻孔数高达 320 个，钻头寿命提高了 19 倍，钻头没有显著磨损，且钻出的孔都满足图样要求。用 TiIN 涂层钻头加工 X90CrMoV18（DIN 牌号，相当于 9Cr18MoV）合金钢时，完全干切时切削路程为 3.5m 钻头便损坏，而用 TiAlN + MoS₂ 涂层钻头并采用 MQL 技术后，切削路程为 115m，钻头寿命提高近 32 倍。

采用亚干切削中的微量润滑切削技术可以采用大的切削用量，从而可以显著地缩短加工时间（见表 2-3）。目前，亚干切削加工已在许多加工领域中获得成功应用。例如，在 BMW（宝马）汽车厂的一条加工曲轴箱缸孔的自动线上，采用了微量润滑技术加工气缸孔，获得了十分显著的技术经济效益。自动线由于省去了冷却润滑系统和清洗设备而使设备的投资减少了 22%，能源、人员和设备运行等费用节省了 11%。

表 2-3 微量润滑加工的效果

加工名称：壳体 工件材料：16MnCr		湿式加工（乳化液）		微量润滑加工（合成脂）	
刀具		切削速度/ (m/min)	进给速度/ (mm/min)	切削速度/ (m/min)	进给速度/ (mm/min)
中心钻 φ10mm		70	80	80	250
硬质合金钻头 φ4mm		63	100	90	760
硬质合金钻头 φ9.8mm		77	450	77	860
阶梯钻 φ23mm/φ12.5mm		43	30	72	180
倒角（M14×1.5）		24	30	47	250
倒角（M12×1.5）		20	80	46	200
硬质合金钻头 φ9mm		80	450	80	665
锥度锪钻 φ6mm/30°		8	40	38	225
丝锥（M12×1）		11	300	87	200
丝锥（M14×1.5）		19	300	87	240
丝锥（M12×1.5）		17	300	87	240
总加工时间/min		15.42		6.36	
节省时间：58.7%					

图 2-16 所示为用切断刀进行二维切削，刀具前刀面的摩擦因数变化情况。采用 MQL 时的切削摩擦因数，相比水溶性切削液和干切削时的摩擦因数要低，即便极微量的油剂供给也具有润滑作用。

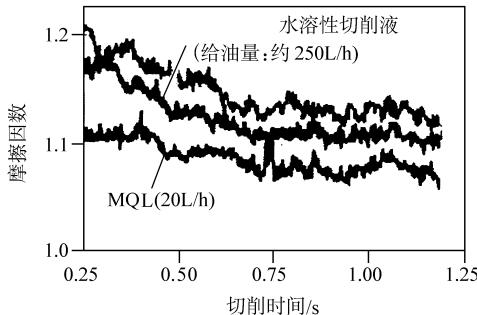


图 2-16 刀具前刀面的摩擦因数变化情况

外圆车削时刀具后刀面的磨损情况如图 2-17 所示。图 2-18 是加工表面粗糙度的变化情况。可以看出，用 MQL 方法加工的表面粗糙度的变化与湿切削水平相当，这就证明了 MQL 方法的有效性。

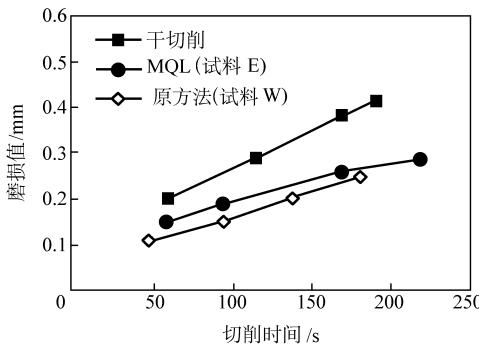


图 2-17 刀具后刀面的磨损情况

目前，在机床市场上已有适合于干加工和亚干加工的各种机床（特别是加工中心）可供选用。这标志着干加工技术已进入实用化阶段，随着刀具、涂层和微量润滑等技术的进一步开发和不断完善，干切削技术的应用领域将会不断扩大。

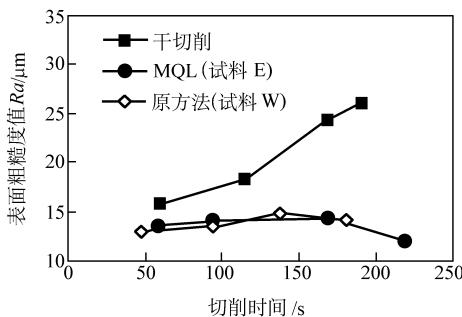
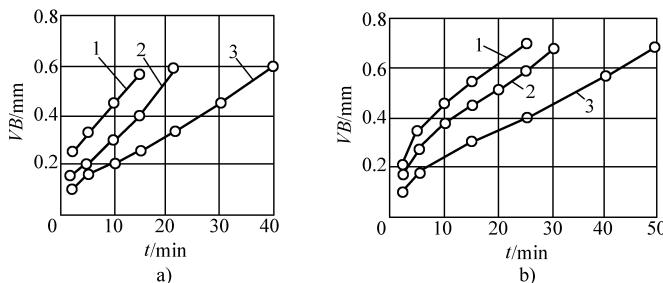


图 2-18 加工表面粗糙度的变化情况

2. 用水蒸气作冷却润滑剂的切削加工

俄罗斯专家 1998 年首次提出用水蒸气作冷却润滑剂的切削加工方法，这种方法后来又获得了专利。B. АГОДЛЕВСКИЙ 等人 1998 年分别用 YT15 对 45 钢和不锈钢 (12Cr18Ni10Ti) 进行了切削试验。试验结果如图 2-19 和图 2-20 所示。

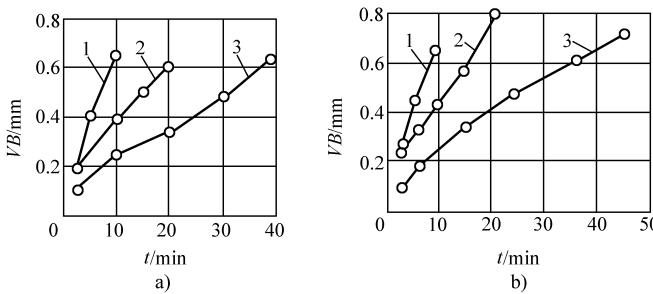
图 2-19 用水蒸气作切削液的车刀磨损 VB 值

a) YT15—45 ($v_C = 230 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.15 \text{ mm/r}$)

b) YT15—12Cr18Ni10Ti ($v_C = 50 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.1 \text{ mm/r}$)

1—干切削 2—浇水 3—水蒸气

对切削过程的研究认为，切削液的冷却润滑效果不能归结于单纯的对流热毛细管分三个阶段迁移，而在于其润滑效应，即毛细管动力学。研究认为切削液渗入到毛细管内是分三个阶段：①液相渗入毛细管阶段；②液滴在毛细管内微滴爆炸蒸发阶段；③气相填充毛细管渗

图 2-20 用水蒸气作切削液的铣刀磨损 VB 值a) $D_0/B = 3$ (B 为工件宽度) b) $D_0/B = 1.25$

1—干切削 2—浇水 3—水蒸气

注: YT15—45 ($v_c = 260\text{m}/\text{min}$, $a_p = 2\text{mm}$, $f = 0.1\text{mm}/\text{r}$)。

入切削区阶段。使用水蒸气作为冷却润滑介质时，只需其中的第三阶段，即水蒸气充填毛细管直接渗入切削区阶段，因而冷却切削效果好于单纯使用切削液切削。

用水蒸气作冷却润滑剂大大加强了冷却润滑的渗入能力，取消了液相渗入阶段。当冷却润滑剂的成分与浇注法相同时，水蒸气在很大程度上保持着优异的效果，水蒸气冷却润滑剂保证冷却均匀，特别在硬质合金刀具断续切削时效果更好。用水蒸气作冷却润滑剂能够提高硬质合金刀具的使用寿命，车削 45 钢、不锈钢和灰铸铁时提高 1~1.5 倍，铣削时提高 1~3 倍。

3. 射流液切削

日本学者采用高压注液法精加工 Ni 基高温合金 Inconel718 等材料时，后刀面磨损值与切削温度存在一种定量关系，切削温度的升高会加快后刀面磨损。用 K20、涂层 P40 刀具，与湿式浇注冷却相比，随着射流速度的提高，后刀面磨损减小。如刀具磨损值一定，在一定切削条件下，用射流冷却比浇注法可提高切削速度 2~2.5 倍，刀具使用寿命延长 5 倍左右。

4. 喷雾冷却技术

随着高速切削和强力切削的发展，刀具承受着比过去高得多的压力、摩擦力和温度，虽然刀具材料的进步极大地促进了切削效率的提

高，但切削区的冷却始终是提高刀具寿命的一条重要措施。鉴于防止废弃切削液对环境的污染，采用喷雾冷却不失为一种较好的选择。喷雾冷却是利用雾滴汽化散热的方法来实现冷却的。汽化的方式分为两种：泡状汽化和层状汽化。雾化冷却切削区属泡状汽化，当雾滴落于温度较高的表面时，形成汽化中心，气泡的脱离带动雾滴液体剧烈翻动，使雾滴进一步汽化，把热量带走，细小水滴变成水蒸气。浇注式冷却使液体产生层状汽化，汽化时蒸汽成层状，汽化层把被加热的表面和冷却介质分离，所以液体浇注冷却仅是对流和热传导起主要作用。

喷雾冷却装置的气流元件主要由引流和被引流两大部分组成，根据引流部分所处位置的不同可分为喷射器和环形气流放大器两种。蒸汽喷射器是喷射器中最为典型的一种，其结构如图 2-21 所示，主要由喷嘴、吸入室和扩压器三大部分组成。喷嘴的功能是产生高速的扰流，对吸入的气体产生扰动，带动吸入室的气体一起流入扩压器中，从而产生气流放大作用。环形气流放大器（见图 2-22）的特点是：高压的气体从很小环形间隙流出，形成高速气流，流入喉部，再从扩张段流出，流动过程中诱发大量周围的自由空气同时运动，从而产生较大的气流输出。环形气流放大器由环形气流室、扩张室和引流室三部分组成，特点是结构比较精巧，通过环形气流室内的气流参数就可调节总气流量的大小。

在相同切削条件下选用 YT15 机夹可转位刀具，进行完全干切削和喷雾冷却切削对比实验，工件材料为 J-55 钢料，采用一般乳化切削液作为喷雾剂，用显微镜观察发现，喷雾冷却的刀具前刀面磨损很少，刀尖高度稍有磨损，负后刀面没有明显磨损，后刀面有一定的磨损量。

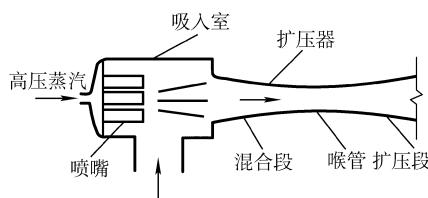


图 2-21 蒸汽喷射器结构简图

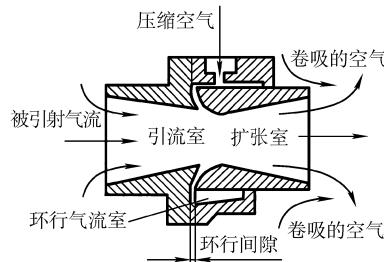


图 2-22 环形气流放大器结构简图

干切削时刀具的负后刀面磨损严重，且有深的沟槽，前刀面形成月牙洼，后刀面有一定的磨损量。干切削时切屑颜色为深蓝色，喷雾冷却时切屑颜色为土黄色。实验表明，喷雾冷却对切削热的抑制十分有效，经过一段时间切削后，用手触摸刀具和工件仍有凉感，刀具寿命和生产率大幅度提高。

将适量冷却和润滑介质注入带有一定压力、不同温度的气流中混合雾化，生成微量冷却润滑介质，并喷入切削区。对受热影响区实施微量冷却润滑为主的亚干切削技术涉及的篇幅较多，其研究和应用将在第6章详细叙述。

2.4.3 切削液的应用

在金属切削过程中，刀具与工件、刀具与切屑的界面存在着很大的摩擦，使切削力、切削热和工件的变形增加，导致了刀具磨损，降低了加工质量。合理使用切削液，可以改善金属切削过程的界面摩擦情况，减少刀具与切屑的粘结，抑制积屑瘤的生长，减少切削力，降低切削温度，减小工件热变形，从而保证了加工质量，提高了刀具使用寿命和生产效率。所以，在过去以及今后相当长的一段时间内，在金属切削过程中使用切削液仍会得到相当的重视。亚干切削正是基于这种认识，提出尽可能少用切削液，并致力于微量切削液的功效发挥极致的研究。

亚干切削过程中尽管使用的切削液用量极少，但和传统湿式冷却切削过程中使用切削液的意义近乎一致，同样承担冷却、润滑、防锈和排屑等作用。切削液应根据工件材料、刀具材料和加工方法、加工需求等具体情况合理选用。通常以冷却为主的宜选用水溶性切削液，以润滑为主的宜选用非水溶性（油基）切削液。在工艺上，粗加工时加工余量和切削用量较大，会产生大量的切削热，宜选用以冷却为主的切削液。若用高速钢刀具进行粗加工，则使用乳化液和水溶液。若用硬质合金刀具进行粗加工，有必要使用时必须保证切削液连续、充分和稳定应用。精加工时，选用切削液的主要目的是改善工件表面加工质量和提高刀具使用寿命，一般选用乳化液情况较多。此时若用高速钢刀具进行精加工，宜选用润滑性能好的极压切削油或高浓度的极压乳化液。硬质合金刀具进行精加工时，宜选用冷却性能好的低浓度

乳化液或水溶液。高温合金、高强度钢等难加工材料进行切削时，应使切削加工均处于极压润滑状态，宜选用极压切削油或极压乳化液。表2-4~表2-12给出切削液有关数据供选用时参考。

水和油的冷却性能比较见表2-4；水溶性切削液的清洗性能比较见表2-5；几种切削液防锈性能比较见表2-6；金属加工（系列M）切削液分类见表2-7；非水溶性金属加工液的组成见表2-8；水溶性金属加工液的组成见表2-9；切削液技术性能综合评价见表2-10；新型环保水基切削液的配方见表2-11；新型环保水基切削液的质量指标见表2-12。

表2-4 水和油的冷却性能比较

物质类型	热导率/ [W/(m·K)]	质量热容/ [J/(kg·K)]	汽化热/ (W/kg)
水	0.0024.55	1	540
油	0.0001~0.0005	0.4~0.5	40~75

表2-5 水溶性切削液的清洗性能比较

切削液类型	清 洗 性 能
乳化液	磨削时的清洗性能较差，砂轮上粘附一层细砂粒和黑灰
极压乳化液	磨削时的清洗性能一般，砂轮上有黑灰，但是没有细砂粒
全合成加工液	磨削时的清洗性能较好，砂轮上没有黑灰和砂粒

表2-6 几种切削液防锈性能比较

时间	1h	2h	18h	24h
切削液				
含量5%乳化液	未变	边缘锈蚀	锈蚀扩大	锈蚀面积20%
全合成加工液	未变	未变	边缘锈蚀	个别锈点
L-AN15全损耗系统用油 (GB443—1989)	未变	未变	未变	边缘锈蚀
L-AN15全损耗系统用油+防锈剂	未变	未变	未变	未变

表 2-7 ISO 6743/7 用于金属加工（系列 M）切削液分类

类 型	性 能
L-MHA	可能有防腐性能的液体
L-MHB	L-MHA 型液体，具有降低摩擦的性能
L-MHC	L-MHA 型液体，具有极压 (EP) 性能，无化学活性
L-MHD	L-MHA 型液体，具有极压 (KP) 性能，呈化学活性
L-MHE	L-MHB 型液体，具有极压 (KP) 性能，无化学活性
L-MHF	L-MHB 型液体，具有极压 (EP) 性能，呈化学活性
L-MHG	润滑脂、膏、蜡，以纯态使用或者用 MHA 型液体稀释后使用
L-MHH	皂、粉末、固体润滑剂及其掺混物
L-MAA	浓缩液，与水混合后生成乳状乳液，具有耐蚀性
L-MAB	MAA 型浓缩液，具有降低摩擦的性能
L-MAC	MAA 型浓缩液，具有极压 (KP) 性能
L-MAD	MAB 型浓缩液，具有极压 (EP) 性能
L-MAE	浓缩液，与水掺混生成具有耐蚀性的透明乳液（微滴乳化液）
L-MAF	MAE 型浓缩液，具有降低摩擦的性能和/或极压 (EP) 性能
L-MAG	浓缩液，与水掺混则生成具有耐蚀性的透明乳液
L-MAH	MAG 型浓缩液，具有降低摩擦的性能和/或极压 (EP) 性能
L-MAI	润滑脂和润滑膏，与水掺混后使用

表 2-8 非水溶性金属加工液的组成

组 成	种 类
基础油	动植物油：豆油、菜油、棉子油、鲸鱼油等 矿物油：煤油、柴油、全损耗系统用油等 合成油：聚烯油、酸酯类、受阻酯类
油性剂	油脂类：植物油脂（豆油、菜油、糠油等） 动物油脂（猪油、鲸鱼油、羊毛脂等） 脂肪酸类：油酸、棕榈酸等 高级醇类：油醇、十八醇等 酯类：脂肪酸酯类
极压剂	氯系极压剂：氯化石蜡、氯化脂肪酸、氯化脂肪酸甲酯 硫系极压剂：硫化矿物、油脂、硫、氯化油脂、硫化物 磷系极压剂：磷酸盐、亚磷酸盐 有机金属化合物：硫化磷酸盐、钼化合物、硼化合物
其他添加剂	防锈剂：磷酸（盐）、碘酸盐、脂类、胺、磷酸盐等 抗氧化剂：酚系、胺系、硫系 降凝剂：氯化石蜡和苯的缩合物，聚烷基甲醛丙烯酸酯等

表2-9 水溶性金属加工液的组成

组 成	种 类
基础液	动植物油：豆油、菜油、棉子油、鲸鱼油等 矿物油：煤油、柴油、全损耗系统用油等 合成油：聚烯油、酸酯类、受阻酯类 水
油性剂	油脂类：植物油脂（豆油、菜油、糠油等） 动物油脂（猪油、鲸鱼油、羊毛脂等） 脂肪酸类：油酸、棕榈酸等 高级醇类：油醇、十八醇等 酯类：脂肪酸酯类
表面活性剂	阴离子系：脂肪酸衍生物（脂肪酸皂、环烯酸皂） 磷酸酯型（长链醇硫酸酯，动植物油的硫酸化油等） 非离子系：聚乙烯系（聚氧乙烯基酚醚、聚氧乙烯单脂肪酸酯类） 多元醇系（山梨脂醇酐脂肪酸酯类） 烷基酰胺
防锈剂	有机系：磷酸（盐）、磺酸盐、脂类、胺、磷酸盐等 无机系：亚硝酸盐、磷酸盐、硼酸盐、硫酸金属盐类等
极压剂	氯系极压剂：氯化石蜡、氯化脂肪酸、氯化脂肪酸甲酯 硫系极压剂：硫化矿物、油脂、硫、氯化油脂、硫化物 磷系极压剂：磷酸盐、亚磷酸盐 有机金属化合物：硫化磷酸盐、钼化合物、硼化合物
偶合剂	醇类：异丙醇、多元醇（乙二醇类）
非铁金属防腐剂	氮化合物：苯三唑、咪唑啉等 硫氮化合物：硫代重氮多硫化合物 其他：二烷基二硫代磷酸锌等
防腐剂	酚系：邻苯基苯酚、四氯化酚等
其他	消泡剂：硅油乳化剂、高级醇 金属离子结合剂：EDTA、钠盐 香料 着色剂

表 2-10 切削液技术性能综合评价

类别	评价项目	评价内容
加工特性	冷却性能 润滑性能 清洗性能 加工时间 工件表面的完整性 刀(磨)具使用寿命	工件表面有无烧伤、退火等现象 工件表面的质量是否改善 工件的清洗程度,磨具不易堵塞 加工一件(一批)工件所需时间 按完整性内容进行评价 每把刀(磨)具所加工的工件数量或所能加工的时间
自身质量性能	粘度 表面张力 安定性 消泡性 防锈性能 防腐性能 最大无卡咬负荷(PB) 烧伤负荷(PD) 有效浓度 使用浓度 抗硬水性 使用期限	运动粘度或恩氏粘度 用表面张力仪测定 储存期内不变质 按 GB/T6144—2010 测试泡沫的体积和消泡时间 按 GB/T 6144—2010 测试 按 GB/T6144—2010 测试 按 GB/T 3142—1982 测试 按 GB/T 3142—1982 测试 浓缩液的浓度 临界使用浓度 不抗硬水则发生混浊 实际使用天数
环境适应性	气味感觉 皮肤感觉 毒性反应 pH 值 悬浮物 生物需氧量 化学耗氧量 硫化物 挥发性酚 有机磷 石油类	有无不良气味 有无刺激反应 有无致病(癌)的毒性物质 6~9 砂粒沉降好,应无悬浮物 是否超过 60mg/L 是否超过 100mg/L 是否超过 1mg/L 是否超过 0.5mg/L 是否超过 0.5mg/L 是否超过 10mg/L

表 2-11 新型环保水基切削液的配方

组 分	纯 度	用量 (%)
非离子表面活性剂 H	工业	6
极压抗磨剂	工业	3
防腐剂	工业	1.5
清洗剂	工业	1
消泡剂	工业	1
自来水		余量

表 2-12 新型环保水基切削液的质量指标

项 目	质 量 指 标
外 观	褐色或淡黄色液体
pH 值 (5%)	7.8 ~ 8.5
安定性 (5%)	- 12 ~ 70
腐 蚀 性 (5%)	铜、钢、铝均合格
防 锈 性, 一 级 铸 铁	单片、叠片均合格
最 大 无 卡 咬 负 荷	≥700N
消 泡 性	<2mL/min



第3章

干切削加工的机床与刀具

干切削技术带动了机床与刀具行业的发展，出现了干切削机床、干切削加工的夹具和工具系统、干切削刀具。干切削机床一般都有较高的主轴转速和进给速度，可充分发挥 CBN、陶瓷、PCD 等刀具材料的性能。这就要求机床应有较好的刚性，其机床结构也应有利于切屑的排出，应配有切屑主动排除装置、微量润滑装置或冷风装置，避免灼热的切屑堆积在切削区和机床上，影响刀具寿命和降低机床精度。同时对连接机床和刀具的夹具及工具系统也会提出特殊的要求。

干切削的刀具设计时不仅需要考虑几何参数、刀具材料和涂层之间的相互兼顾，更需要考虑干切削加工对刀具的特殊要求，以便为干切削准备必要的基础条件。

本章针对干切削对机床的要求、干切削加工机床机械结构设计和干切削加工的夹具及工具系统进行了介绍，对干切削加工对刀具的要求、刀具的材料选择、涂层刀具的应用以及干切削加工刀具的设计等也进行了较为详细的讨论。

3.1 干切削加工机床

3.1.1 干切削对机床的要求

在干切削中，由于没有切削液的冷却、润滑和排屑作用，干切削会产生以下几种情况：①切削过程中产生比湿切削更多的热量，而这些热量主要集中在切屑中。虽然选用超硬刀具材料，对刀具表面进行适宜的涂层处理，优化刀具的几何参数以及采用合适的切削用量都能减少切削力，降低切削温度，但却无法避免大量炽热的切屑堆积在切

削区和机床上，如不及时地将其从加工机床的主体机构排出，会影响切削过程，还会使机床温度升高和热变形加剧，严重影响加工质量和生产效率。②在干切削石墨电极和铸铁等硬脆材料时，会产生大量粉尘，如不及时清除，会对操作工人的身体健康造成严重损害，同时细微颗粒也会侵入丝杠、轴承等关键部件，加大机床的磨损以及影响机床的加工精度和可靠性。③由于没有切削液的润滑，干切削中的切削阻力会大大增加，相应的振动会增加。

由于干切削存在上述现象，所以对干切削机床的要求和使用与湿式切削有所不同。干切削机床必须具有良好的散热、排屑及吸尘装置和具有良好刚性的基础部件。

1) 干切削机床应有较高的刚性，以避免加工中产生振动。如铝合金的干切削，要求使用具备高切削速度，大进给量性能的机床。在铝合金铣削、钻削加工中，机床应满足主轴转速高达 $6000\text{r}/\text{min}$ 的条件下也不产生振动的条件。

2) 机床结构与切削力相适应，尽量减少零件数量。干车削硬度较高的零件时，刀具转塔应对着机床刚性强的方向进行加工，因为这个方向的长导轨能够分散切削力。机床结构设计合理时，也能直接在短导轨上分散这些切削力，同时应简化刀架结构，使其组成零件数量尽可能少；另外，可考虑用螺栓将一组刀具直接固定在横滑板，省去回转分度机构。

3) 干切削机床应尽可能是高速机床，这种机床可降低 30% 左右的切削力，95% 以上的切削热可由切屑带走，工件可基本保持室温状态。

4) 机床应有吸尘、排屑装置。机床结构应有利于排屑，应注意主轴、导轨等精密运动部件的密封。

5) 对于采用最少量润滑切削、冷气切削或氮气切削的亚干切削机床，还应在切削区附近安装喷雾装置、冷气供给装置或氮气供给装置，以保证油雾、冷气或氮气能可靠、快速地喷向切削区。

6) 由于干切削会在加工区产生非常高的热量，会影响切屑的成形。过高的温度会导致形成带状和缠结状的切屑，影响加工精度和降低工件表面质量。所以还有必要在加工区设置温度传感器，用以监控机床温度场的变化情况，并进行必要的温度补偿。

7) 干切削机床的合理使用。在使用加工中心等机床进行干切削

时，应尽量使刀具伸出长度较短，使主轴处在刚度最佳的情况下，同时还要考虑机床的速度和额定功率等。

采用干切削技术的主要目的就是为了减少对环境的危害，所以干切削机床在满足上述要求的情况下，还必须注意机床本身的绿色特性（低能耗、低污染、低噪声和轻量化）。

3.1.2 干切削机床机械结构设计

虽然干切削机床是由湿切削机床发展而来，但在快速排屑、热稳定性和刚性等方面具有更高的要求，因此，其关键部件在结构设计中也有较大变化。目前适合干切削的机床有两类：一类是在现有机床的基础上，添加排除切屑的抽吸装置、微量润滑装置或冷风装置，这类机床目前用得比较多；另一类是针对干切削的切屑堆积和排出问题而设计的床身结构，使切屑易于落入切屑输送器中。有的机床甚至作更大的改动。

干切削机床的组成部件虽然与湿切削机床相似，但为了满足快速排屑的要求，其机床总体布局还是有很大的变化。图 3-1 所示为干切削加工金属切削机床的结构原理图。为使炽热切屑的热量不传给机床部件，排屑槽用绝热材料制造，而机床部件借助专用的封闭系统冷却。由于切屑积聚在工作区的安装处会破坏切削过程，使已加工表面的质量恶化，故工件和切屑隔绝。机床应配备压缩空气、吸尘和工作区密封的一些辅助装置。

1. 干切削机床支承件的设计

高速干切削对机床的要求主要针对机床的整体结构和辅助设施，机床床身是保证机床稳定性的基础大件，应采用热稳定性较好的整体铸造框架式或龙门式结构，最好应用绝热材料（如人造花岗岩等）或

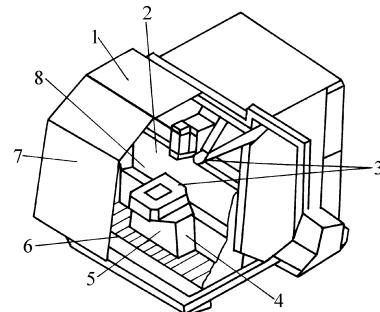


图 3-1 干切削加工金属
切削机床的结构原理图

- 1—吸尘 2—热补偿
- 3—刀具和工件安装处的绝热
- 4—排屑槽 5—吸尘装置
- 6—排屑用传动装置
- 7—封闭冷却系统
- 8—排屑用的压缩空气入口

新型均热材料（如在铝材料中添加质量分数为2%的碳化硅得到的新型复合材料），增加绝热倾斜盖板。机床整体结构尽量简单，尽可能采用方便排屑的立式主轴布置，工作间宽敞明亮，内部减少凸台、凹槽，方便排屑，密闭工作间内增加通风设施。支承件是机床的基础大件，其结构应具有高的强度和刚度、较好的抗振性和热稳定性。常用的主要措施包括：铸件采用全封闭截面；合理布置内部隔板和肋条；含砂造型或填充混凝土等材料；导轨面加宽；车床采用倾斜的床身；床身、立柱采用钢质焊接结构以及采用热对称结构等。干切削机床的支承件结构设计时，必须对排屑和热稳定性问题予以足够的重视，其结构设计时应注意以下问题：

- 1) 保证排屑顺畅。在结构允许的情况下，降低立柱高度。例如，三菱重工的CNC滚齿机采用工件主轴卧式布局的结构，其立柱的高度减少了一半，不仅有利于顺利排屑，还可减少机床支承件的热变形。在刀架下方的床身上设计出排屑槽，可保证切屑在重力的作用下，顺利落入排屑槽下的切屑传送装置上。
- 2) 改善隔热条件，减少排屑过程中切屑传给机床部件的热量。例如，对于铸铁床身，采用保护罩来保护陡峭的倾斜壁，防止切屑与机床铸件之间的直接接触；排屑槽用绝热材料制造等。
- 3) 采取均热结构。热变形影响加工精度的原因不仅仅是温升，更重要的是温度不均的影响。可采取的措施有很多，可以在床身的左右两侧以及顶部与底部设计四个相通的型腔，并注入油液，从而使床身顶部与底部、左侧与右侧都具有相同的温度；或者将金属管嵌入床身内对称分布的四个型腔粘滞材料中，并使控制温度的切削液循环通过这些金属管，不仅可均衡温度，还可增加阻尼，衰减振动，如图3-2所示。

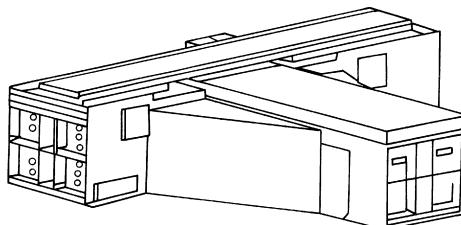


图3-2 均热与减振的机床床身结构

4) 采用专门设计的抗弯曲扭矩管状铸造床身，并在床身中添满疏松的聚合物材料。这样不仅床身的刚性好，而且吸振能力比普通的铸造床身高几十倍。或者采用热膨胀系数小的材料整体制造，如立柱与底座采用人造花岗岩（树脂混凝土）整体制造，人造花岗岩具有低的热导率、极好的振动阻尼特性（阻尼比平均提高 40% ~ 90%）以及无吸湿性等特点，而且铸件的加工制造及处理完全符合生态学要求。

5) 减少机床的材料使用量。通常在制造精密产品或是大型物件时，机床结构必须满足所要求的刚性，因此，机床的体积往往增大，不仅机床所用材料较多，驱动功率增大，而且占用较大空间。因此，在满足使用要求的情况下，为使机床轻巧化，减少了机床的材料使用量，减少功率消耗，充分利用环境空间，通常采用的方法有：

- ① 采用有限元分析等方法，去除材料，减少不必要的浪费。
- ② 多使用复合材料。
- ③ 采用蜂窝式结构。图 3-3 所示为采用蜂窝式结构的 DMC65 机床 [加工范围：X (650mm) / Y (500mm) / Z (500mm)；最大速度：X (60m/min) / Y (60m/min) / Z (60m/min)；加工速度：X (10m/s²) / Y (10m/s²) / Z (10m/s²)；主轴速度：30000r/min；主轴功率：15kW]。

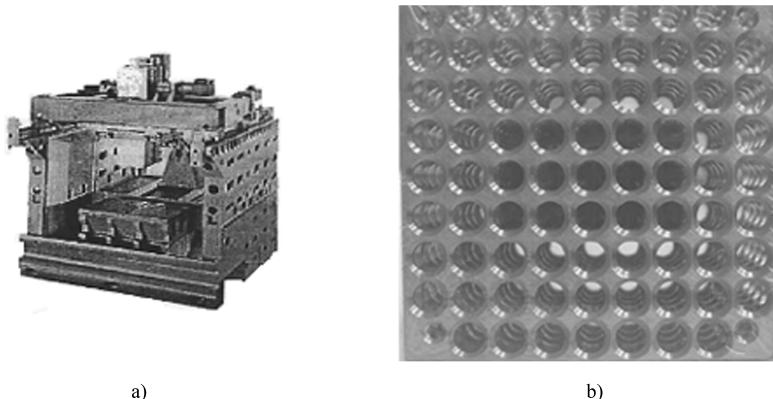


图 3-3 采用蜂窝式结构的 DMC65 机床

a) DMC65 机床 b) 蜂窝式结构

2. 主轴组件的设计

机床工作时，主轴组件夹持着工件或刀具直接参加成形运动，其工作性能对加工质量和生产率有重要的影响。因此，要求主轴组件旋转精度和静刚度高，抗振性好，热稳定性好，耐磨性好。目前在机床设计中常采用的结构是：高精度主轴轴承、混合陶瓷轴承、静压或动压轴承；角接触轴承（采用配对的背靠背组合方式，以提高主轴刚度）；采用油雾润滑装置以及主轴恒温的水冷装置（以保持主轴组件的热稳定性）；采用三支承主轴组件，以提高刚性等。此外，干切削机床主轴组件的结构还具有以下特点：

(1) 干切削机床的主轴单元 干切削加工机床的主轴转速比普通机床高，多采用高速主轴单元，因而不仅要求主轴单元在很高的转速下旋转，具有很高的同轴度，同时还要具有大而恒定的转矩和过热检测装置及良好的动平衡性能。高速主轴应在短时间内实现升速和降速，并在指定位置快速准确停车，使用传统的带齿轮和离合器等中间传动系统，由于“打滑”振动、噪声大、转动惯性等因素已不再适用。往往采用将交流变频电动机直接装在机床主轴上，形成内装式电动机主轴，即电主轴（Elector Spindle）。图3-4为GD-2型电主轴单元，其电动机的转子与机床的主轴间是靠过盈套筒的过盈配合实现转矩传递的，其过盈量是按所传递转矩的大小计算出来的。目前电主轴的过盈套筒直径在33~256mm内有十几个规格，最高转速达180000r/min，功率达70kW。

设计机床的电主轴时，一般是根据用户的工艺要求，用典型零件的统计分析法来确定上述各参数。通常把同一尺寸规格的高速机床又分为“高速型”与“高刚度型”分别进行设计。前者主要用于航空航天工业加工铝合金、复合材料和铸铁等零件，后者用于模具制造及高强度钢、高温合金等难加工材料及钢件的高效加工。此外，还要选择较好的转矩—功率特性、调速范围足够宽的变频电动机及其控制模块。

图3-5为内埋式永磁同步电动机电主轴单元结构示意图。单元中的主轴部件由高速精密陶瓷轴承支撑于电主轴的外壳中，外壳中还安装有电动机的定子铁心和三相定子绕组。为了有效地散热，在外壳体内开设了冷却管路。主轴系统工作时，由冷却泵打入切削液带走主轴单

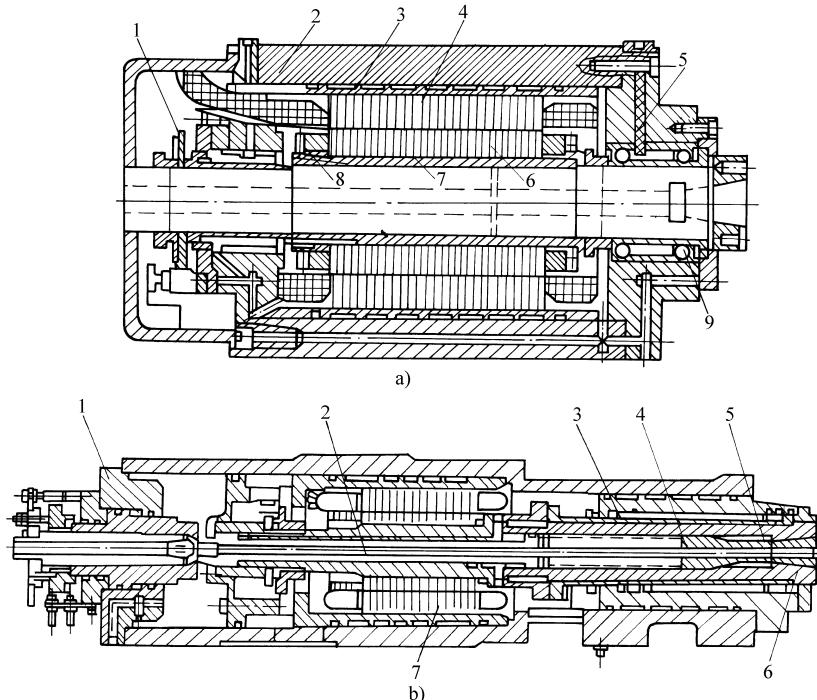


图 3-4 GD-2 型电主轴单元

a) 电动机置于两轴之间

1—编码盘 2—电主轴壳体 3—冷却水泵 4—电动机定子
5—油气喷嘴 6—电动机转子 7—阶梯过盈套 8—平衡盘 9—角接触陶瓷球轴承

b) 电动机置于后轴承之后

1—液压缸 2—拉杆 3—主轴轴承
4—碟形弹簧 5—夹头 6—主轴 7—内置电动机

元内的热量，以保证电主轴的正常工作。主轴为空心结构，其内部和顶端安装有刀具的拉紧和松开机构，以实现刀具的自动换刀。主轴壳体内有电动机转子，主轴端部还装有激光角位移传感器，以实现对主轴旋转位置的闭环控制，保证自动换刀时实现主轴的准停和螺纹加工时的 C 轴与 Z 轴的准确联动。

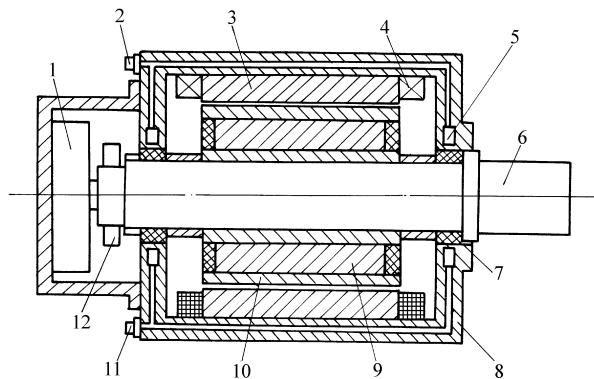


图 3-5 内埋式永磁同步电动机电主轴单元结构示意图

1—松刀气缸 2—切削液进口 3—定子铁心 4—定子绕组
5—冷却管道 6—主轴 7—轴承 8—电动机壳体 9—永久磁铁
10—转子铁心 11—切削液出口 12—反馈装置

除电主轴结构单元外，也可采用薄膜联轴器将电动机与主轴连为一体，从而实现主轴的直接驱动，这样有利于电动机的散热，省去了水冷却装置。缺点是增加了转动惯量，降低了角加速度。

此外，气动主轴单元和水动主轴单元也在研究开发中。但它们的输出功率更小，甚至小到几十瓦。

(2) 主轴轴承 高速主轴单元设计中主轴轴承类型的选择与设计也非常关键，主轴轴承不但要有高的刚度和大的承载能力，而且要有较长的使用寿命。到目前为止，有四种轴承可选做高速主轴轴承，即滚珠轴承、空气静压轴承、液体静压轴承和磁悬浮轴承。

1) 滚珠轴承在高速旋转时，滚珠会产生很大的离心力和陀螺力矩，此时的离心力远大于切削时作用于滚珠的力，故轴承设计的主要参数不再是工作载荷，而是转速，一般用转速特征值 A 表示，即

$$A = n d_m$$

式中 n ——转速；

d_m ——轴承的平均直径。

因此，必须采取措施解决高速旋转中的离心力问题，这些措施包括：① 尽量减小滚珠直径；② 采取密度小的热压烧结 Si_3N_4 ，陶瓷材料

制作滚珠。

2) 空气静压轴承用于高精度、高转速、轻载荷的场合。使用空气轴承的主轴单元，主轴转速可达 150000r/min，但输出的转矩和功率很小，主要用于零件的光整加工。

3) 液体静压轴承目前主要用于重载大功率场合。采用液体的动力和静力相结合的方法，使主轴在油膜中支撑旋转。其特点是径向和轴向圆跳动小、刚度高、阻尼特性好、寿命长，粗精加工均适用。

4) 磁悬浮轴承是用磁力将主轴无接触地悬浮起来的新型智能化轴承。其特点是高速性能好，无接触、无摩擦、无磨损、高精度、不需润滑和密封，能实现实时诊断和在线监控。磁悬浮轴承是实现超高速转速理想的主轴轴承，但其中某些技术问题尚在研究中。

主轴采用新型材料制造，如日本 Sodick 公司采用陶瓷材料制造主轴，热膨胀系数低，质量较轻（比钢轻 60%），具有高的刚性和精度。

使用特殊的断热联轴器（热导率是铁的 1/200）分隔主轴电动机，隔断发热量大的电动机转子至主轴的热传导。

3. 进给传动机构与导轨的设计

普通切削机床的进给传动机构为确保其传动精度和工作稳定性，在设计时，应遵循“无间隙、低摩擦、低惯量、高刚度”的原则，在结构上通常采取的措施有：采用低摩擦、轻拖动、高效率的滚珠丝杠和直线滚动导轨；采用大转矩、宽调速的伺服电动机直接与丝杠相连接，缩短和简化进给传动链；通过消除间隙装置消除齿轮、丝杠、联轴器的传动间隙；对滚动导轨和丝杠预加载荷、预拉伸等。此外，干切削机床的进给传动机构和导轨还具有以下特点：

1) 进给传动机构采用双滚珠丝杠或大直径、中心冷却的滚珠丝杠驱动，以保证足够高的刚性和稳定性。由于直线电动机进给机构有许多优点，在目前的机床进给系统设计中经常被采用。表 3-1 为直线电动机与滚珠丝杠副转动方式的性能比较。直线电动机进给单元包括：直线电动机、工作台滚动导轨、精密测量反馈系统等。该单元需要解决直线电动机的进给速度，工作台质量大小对进给单元的静动系统的特性影响，导轨的材料、结构与系统刚度，承载能力以及避免发热和爬行等问题。

表 3-1 直线电动机与滚珠丝杠副传动方式的性能比较

传动性能	直线电动机	普通滚珠丝杠副	精密高速滚珠丝杠副
最大速度 v_{\max} / (m/min)	60 ~ 200	20 ~ 30 (40)	60 ~ 100 (120)
最小加速度 a_{\min} / (m/s ²)	2 ~ 10	0.1 ~ 0.3 (0.5)	0.5 ~ 1.5
静刚度 K_j / (N/ μ m)	70 ~ 270	90 ~ 180	90 ~ 180
动刚度 K_D / (N/ μ m)	160 ~ 210	90 ~ 180	90 ~ 180
调整时间/ms	10 ~ 20	100	90 ~ 180
可靠性周期/h	50000	6000 ~ 10000	

2) 采用三角组合导轨(见图3-6)。通过两侧导轨中央位置的第三根导轨,来消除运动部件在床身上的扭曲和翘起,以保证其刚性和稳定性。

3) 采用滚动、滑动混合的导轨结构,导向导轨采用滚动导轨,以保证移动精度稳定可靠;承载导轨采用Turcite涂层矩形滑动导轨,以降低爬行,保证断续切削时的运动平稳,并改善阻尼,抑制振动。

4) 直线滚动导轨采用三个导轨滑块,提高导轨的承载能力和刚性。

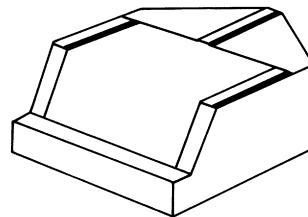


图 3-6 采用三角组合导轨

4. 排屑机构的设计

干切削时,为了降低工艺系统的切削温度,必须将切下的切屑快速排出。干切削机床常用的排屑装置有真空排屑装置(利用空气的减压将切屑从切削区吸走)、喷气排屑装置(利用压缩空气将切屑吹出切削区)和虹吸排屑装置(利用干燥的空气吸出切屑)。其中,真空排屑装置能及时将悬浮颗粒从机床内部吸走,因此,对于切削机床来说,它是最理想的吸尘装置。图3-7是适用于孔加工的真空虹吸系统原理图。

良好的机床设计应在机构上避免出现能聚集切屑的洼坑和高台,并用排屑螺旋与传送器尽快将切屑排出机床外。若采用工件在下、刀具在上的传统立式布局,则在工件下方安装排屑装置来辅助排屑。现在某些干切削加工机床上采用的倾斜导轨(与水平方向倾斜45°),借助重力来排屑,甚至出现了工件在上、刀具在下的布局,从下方清除切屑的方法,如图3-8所示。

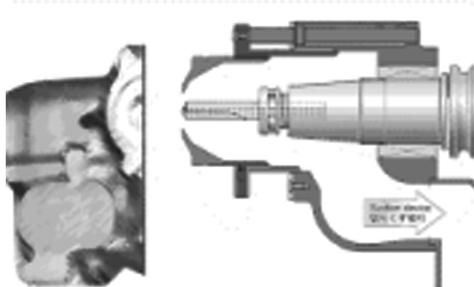


图 3-7 适用于孔加工的真空虹吸系统原理图

图 3-9 是利用重力排屑的机床结构。在加工过程中，切屑由于重力作用，掉落在切屑输送器上，随即被从加工区排出。

从机床结构上不能有效解决排屑问题时，可用压缩空气等方法辅助排屑。压缩空气的压力为 $1.0 \sim 1.4 \text{ MPa}$ 。在现有机床上可利用传输切削液的管道输送压缩空气，也可以采用真空泵系统，用吸气将切屑排除出切削区。排屑效果与切屑形状有关，因此，刀具及加工参数的选择应形成压缩机或真空泵系统便于清除的切屑形态。此外，机床应备有能保证切屑顺利收集和吸出的装置，以防止干切削过程中形成的切屑堆积，并将切屑中贮存的切削热传输给机床、刀具和工件。

日本某公司设计制造的切屑排出系统，内有螺旋式传动机构，能快速排出切屑。加工中形成的切屑由倾斜的保护导轨滑入切屑输送装置，而顺利排出加工系统，不会造成机床、刀具和工件的升温，保证了零件的加工质量。加工效果表明，切屑排

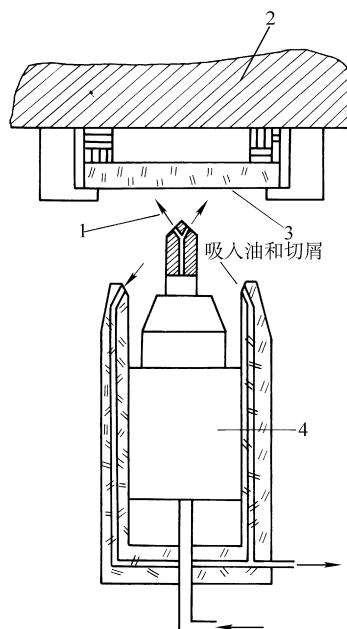


图 3-8 从下方清除切屑的方法

1—雾状润滑剂 2—工作台

3—工件 4—主轴

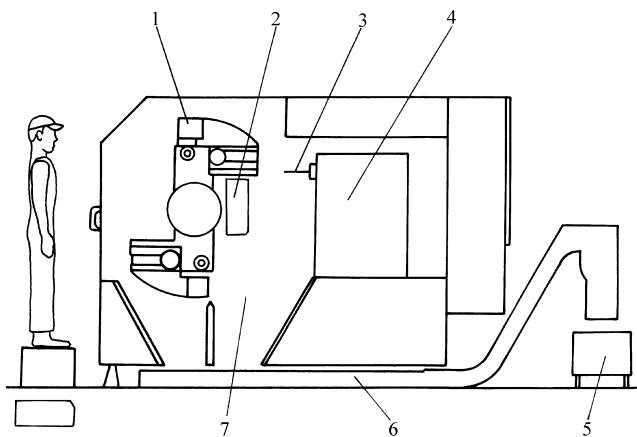


图 3-9 利用重力排屑的机床结构（垂直结构的夹具）

1—旋转夹具 2—工件 3—刀具 4—床头箱

5—切屑堆放小车 6—切屑输送器 7—排屑空间

出系统只对大体积切屑起作用，而对小体积、质量轻的切屑，则只有由真空泵吸出。对于大批量加工铸铁的干切削，建议使用空气过滤装置，以防止小体积、质量轻的粉末微屑飞至大气中污染空气。如果工作环境恶劣，机械加工车间还必须装备通风设备，以保证工人的身体健康。

5. MQL 装置的设计

用 MQL 方法成功取代传统的湿切削加工必须解决两个关键问题，一是开发能保持传统加工性能的 MQL 装置；二是采用适宜的切屑排出方法。

最简单的 MQL 装置就是采用从刀具外部用一个或多个喷嘴提供压缩空气或最少量的切削液。这种方法特别适合对现有机床进行改造。但是，如果加工工件的品种较多，则往往需要针对相应刀具槽形而调节喷嘴位置。此外，喷嘴的对齐还存在受切屑、设备或工件碰撞所发生的非受控变化的限制，结果是空气喷嘴往往会偏离刀具。因此，在设计新机床时，通常是将压缩空气或最少量的切削液穿过主轴供给到切削区，这种冷却供应方法特别适合深孔加工，如图 3-10 所示。

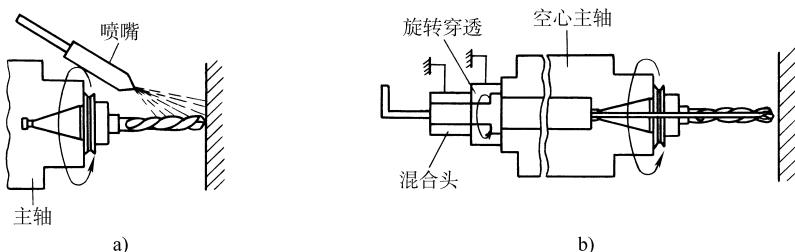


图 3-10 最少量油雾润滑的供应方式

a) 外部冷却 b) 内部冷却

MQL 方法通常是将压缩空气和一定量的切削液混合供给到切削区。压缩空气和一定量的切削液的混合方式有两种，即主轴内部混合（见图 3-11）和主轴外部混合（见图 3-12）。与主轴外部混合方式相比，主轴内部混合方式有诸多优点：即混合距离短、刀具的冷却效果好；切削液是通过定量泵供给，供液量的多少易于控制，可针对不同刀具设置不同的供液量；容易传输大尺寸液滴，产生的蒸发雾气少；易于在 MQL 方法和传统的加工方法之间实现转换，不需要更换主轴和轴承。因此，主轴内部混合方式是采用较多的一种方法。

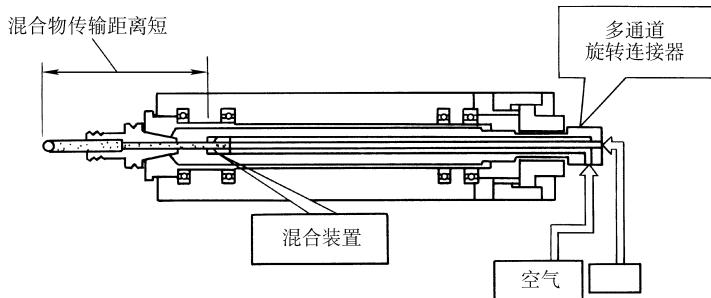


图 3-11 主轴内部混合方式

图 3-13 给出了主轴内部混合方式和切削液定量供给系统原理图。主轴内部混合方式和主轴外部混合方式可根据机床类型进行选择（见表 3-2）。例如，加工中心可采用主轴内部混合方式，其他场合则可采用主轴外部混合方式。

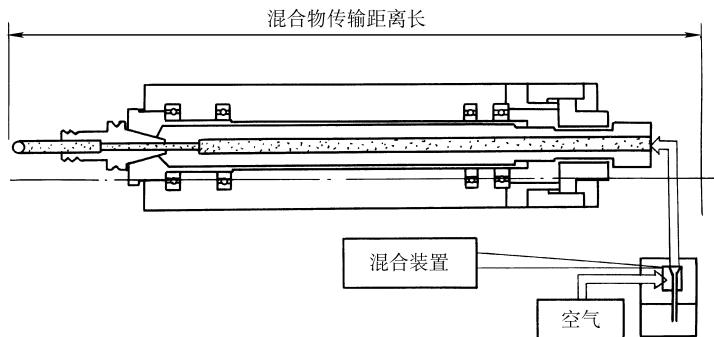


图 3-12 主轴外部混合方式

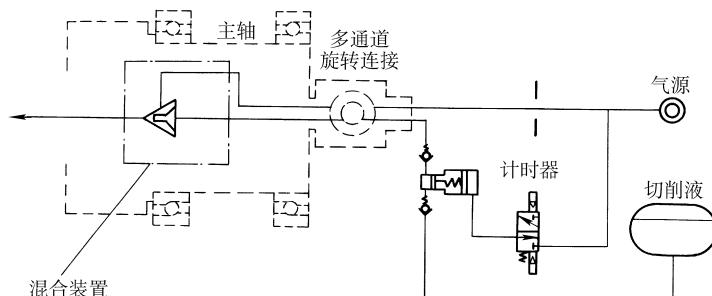


图 3-13 主轴内部混合方式和切削液定量供给系统原理图

表 3-2 主轴内部混合方式和主轴外部混合方式机床类型选择

主轴内部混合	主轴外部混合
主轴单元加工中心	专用机床
心轴单元加工中心	圆锯切割机
数控车床	带锯
带中央给油功能的专用机床	冲床
	通用铣床
	通用车床
	镗床

通过前面的分析，可以将干切削加工机床的设计要点总结为以下几方面：

- 1) 干切削加工机床的设计主要应考虑热应力和切屑的控制。
 - 2) 机床必须结构简单、具有快速的排屑装置。
 - 3) 机床有封闭、内装的冷却系统，以保证切削过程的稳定性。通过合适的刀具设计，使加工黑色金属时不产生长的带状切屑，带状切屑是产生热变形的根源；用温度传感器监视切削区温度；在夹具或刀具内装有测微器进行温度补偿。
 - 4) 干切削时产生的灰粒，除用常规系统外，还要用加压系统，阻止灰粒进入主轴驱动系统和紧密的液电支持系统。
- 这些设计要点将逐渐体现到现代机床的设计中。

3.2 干切削加工的夹具和工具系统

3.2.1 干切削机床夹具

机床夹具是工艺装备的基本组成部分，是工件和机床、刀具、机器人等设备的接口。在干切削条件下，虽然不用切削液，提高了工件的加工效率和减轻了环境污染，但在这种特殊切削条件下，却对工件装夹的夹具提出了更高的要求，主要包括如下几个方面：

(1) 高精度、动平衡 干切削加工通常是在高速加工机床上完成，而高速切削加工时，回转类机床主轴通过夹具带动工件回转，以实现工件成形所需的表面成形运动。对于这类回转型工夹具，为了保证定位精度和装夹的可靠性，要求夹具设计一方面要保证提供足够的夹紧力；另一方面装夹机构必须达到精密的动平衡。

在高速回转情况下，因夹具设计与安装不平衡会造成很大的离心力。离心力的作用，会使主轴和刀具或夹具产生扩展效应，且动平衡精度越低，扩展效应越严重。扩展效应的产生，不仅会影响它们之间的连接刚度，严重时还会飞出伤人，因此，在高速切削加工机床上进行干切削时，必须注意达到精密的动平衡，确保连接刚性和安全。

(2) 高刚度 工夹具的设计不仅需要保证其本身的固有刚性，而且对于工件和夹具之间以及夹具和机床本体（主轴）之间的连接，还必须保证具有高的动态连接刚性，以克服高的切削抗力和高的离心力。夹紧方式的选择和夹紧点位置的分布必须考虑实际加工情况（实际工件形状和体积、切削用量参数等）合理安排。否则，可能造成因动态

夹紧刚性不足在干切削加工下的剧烈振动和颤振，从而导致夹具精度降低，甚至造成危险。

(3) 质量轻 由于很多干切削加工是在高速机床上完成的，因此，为了减少高速回转切削夹具的离心力，干切削加工夹具设计时，必须尽可能地减轻其质量。一方面夹具本身影响回转主轴的性能，设计的过重，主轴回转组件转动惯量增大，对主轴起动和停止的加（减）速性能影响较大；另一方面，若动平衡性能不好，离心力就会增大，从而增加对干切削加工机床夹具的强度和刚度等方面的要求。

(4) 高自动化和柔性化 干切削加工机床的夹具设计还必须考虑实现高自动化。因为干切削加工除了满足环境性能的要求外，还要实现高效率加工。在干切削加工机床上，不适合采用手动操纵方式的夹具，为此，干切削加工机床夹具设计，一般应该考虑采用电磁、液压、气动等方式来实现自动夹紧。同时为了满足不同工艺性质的加工，应提高夹具的柔性，如考虑采用夹具和 NC 机床一体化的可编程夹具；考虑采用结构可调整的适应型夹具、标准和非标准夹具元件相组合的组合夹具等，以适应高加工效率的要求。

3.2.2 干切削刀具的刀柄结构

干切削加工时的刀具系统必须有良好的平衡状态和安全性。在普通机床上进行干切削加工，刀具的安装和普通加工相差不多。但是，在高速机床上进行干切削，对刀具系统的平衡性和安全性则有着更高的要求。刀柄是高速干切削加工的一个关键部件，它的一端与机床主轴连接，另一端与刀具连接，传递机床的动力和精度。

在高速干切削中，刀片的固定、刀头与主轴的连接等问题，不仅涉及安全方面，还决定着高速干切削能否实现。为了估算刀体结构强度和夹紧的可靠性，国外已开发了高速铣刀的有限元 FEM (Finite Element Methods) 模型。根据 FEM 计算和相关试验表明，可转位铣刀失效有两种形式，一是由于夹紧螺钉被剪断，使得刀片和其他夹紧零件甩飞；另一种是刀体破碎。对直径 80mm 铣刀的模拟计算和相关试验表明，夹紧螺钉在转速为 30000 ~ 35000r/min 时已达失效临界状态。因此，从安全的角度出发，需要对不同刀具结构在高速干切削条件下的转速许用值进行研究。

除刀具本身外，高速干切削同时对刀具与机床主轴间的连接刚性、精度及可靠性也提出了严格的要求。传统的 7:24 锥度工具系统由于连接刚性较差，轴向尺寸不稳定，已不适合高速干切削的要求，目前大多数采用 20 世纪 90 年代德国开发的 HSK (HohlSchaft Kegel) 空心短锥柄，美国 KM (Kenna Metal) 公司开发的空心短锥柄 KM 系列，以及日本精机开发的精密锥柄 BIG PLUS 工具系统。HSK 和 KM 系列刀柄的结构特点见表 3-3。

表 3-3 HSK 和 KM 系列刀柄的结构特点

刀柄类型	HSK	KM
结合部位	锥面 + 端面	锥面 + 端面
夹紧力传递方式	筒夹	钢球
刀具	HSK—63B	KM6350
基本直径/mm	38	40
柄部形式	空心短锥柄	空心短锥柄
牵引力/kN	3.5	11.2
夹紧力/kN	10.5 ~ 18	33.5
过盈量（理论值）	3 ~ 10	10 ~ 25
刀柄锥度	1/10	1/10

1) HSK 工具系统采用 1:10 锥度，刀柄为中空短柄，如图 3-14a 所示。其工作原理是靠锁紧力及主轴内孔的弹性膨胀来补偿端面间隙。由于中空刀柄自身有较大的弹性变形，因此，对刀柄的制造精度要求

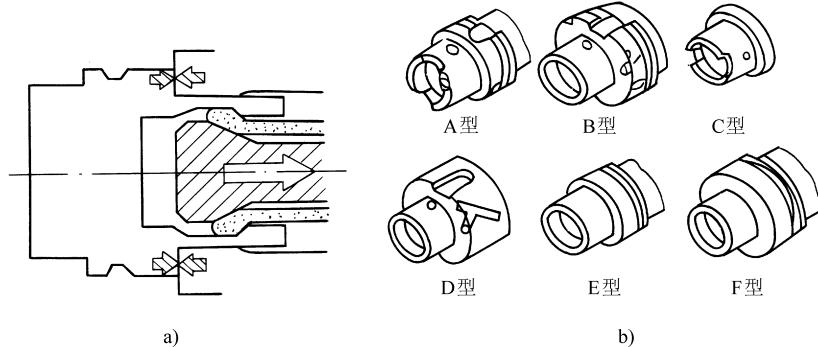


图 3-14 HSK 工具系统
a) 刀柄结构原理 b) 刀柄结构形式

相对较低；又由于 HSK 工具系统质量较小，柄部又较短，这样有利于高速自动换刀及机床小型化。但中空短柄结构也使其系统刚性和强度受到了一定影响。HSK 整体式刀柄采用平衡式设计，刀柄结构有 A 型、B 型、C 型、D 型、E 型、F 型六种形式，如图 3-14b 所示。图 3-15 为 A 型 HSK 面铣刀刀柄（HSK50ADIN69893）结构尺寸图。国内多采用 A 型和 C 型标准，例如，HSK50A，HSK63A，HSK100A。实际应用时，HSK50 和 HSK63 刀柄适用的主轴转速可达 25000r/min，HSK100 刀柄适用的主轴转速为 12000r/min。图 3-16 为 HSK 型刀柄及其连接结构图。

2) BIG-PLUS 工具系统采用 7:24 锥度，图 3-17 所示的结构设计可减小刀柄装入主轴时（锁紧前）与端面的间隙，锁紧后可利用主轴内孔的弹性膨胀对该间隙进行补偿，使得刀柄与主轴的端面贴紧。这种结构形式的特点包括：

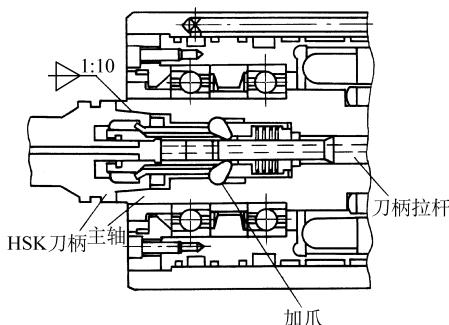


图 3-16 HSK 型刀柄及其连接机构

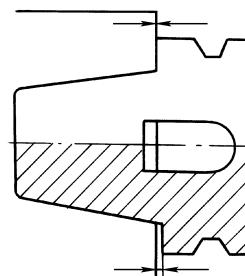


图 3-17 BIG-PLUS 工具系统

- ① 增大了与主轴的接触面积，增加了系统的刚性，提高了对振动的衰减作用。
- ② 采用端面的矫正作用提高了刀具自动换刀的重复精度。
- ③ 端面的定位作用使系统的轴向尺寸更加稳定。
- ④ 与传统的 7:24 工具系统有互换性。

3) 除此之外,涉及刀具寿命和安全性的设计还包括:刀具系统的平衡设计,减小径向和轴向圆跳动,控制平衡精度等。例如,刀具夹紧的最新趋势是采用冷缩式夹紧机构(或称热装式),装夹时利用感应或热风加热使刀杆孔膨胀,取出旧刀具,装入新刀具,然后采用冷风使刀具冷却到室温,利用刀杆孔与刀具外径的过盈量咬合夹紧,这种结构刀具的径向圆跳动为 $4\mu\text{m}$ 左右,刚性高,动平衡性好,夹紧力大,高转速下仍能保持高的夹紧可靠性,特别适用于高速铣削加工。

3.3 干切削加工的刀具

3.3.1 干切削加工对刀具的要求

干切削由于不用切削液,因而不可避免地会使加工中产生的热量增加,导致切削温度升高,排屑不畅,刀具寿命变短,生产效率降低,加工表面质量变差。只有克服这些不利因素,才能使干切削具有湿切削的同样效果,从而使干切削得到成功应用。与湿切削相比,干切削刀具的工作条件更为恶劣,对刀具的要求也就更严格,如图3-18所示。

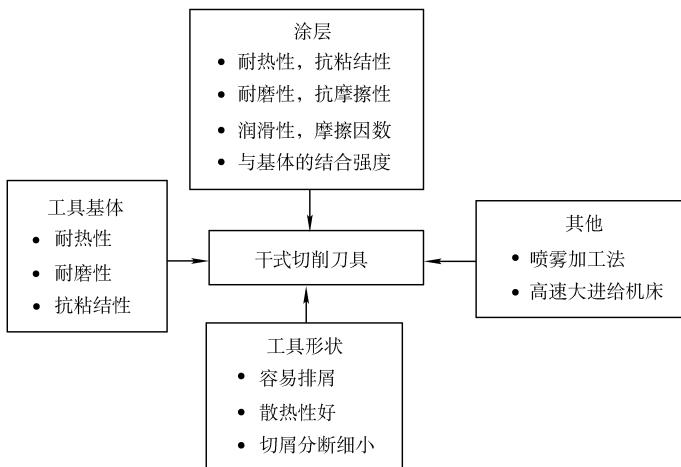


图3-18 干切削加工对刀具的要求

1) 刀具应具有优异的耐高温性能。干切削通常是在高速下进行(低速下的干切削也有应用,如低速拉削等),加工产生的切削热主要作用于刀具、工件、机床和工艺装备组成的工艺系统。随着切削速度的提高,切削温度会上升,因此,干切削的切削温度较湿切削时的高,因而刀具要有更高的耐高温性能。目前的刀具材料中,如新型硬质合金、陶瓷和PCBN等有足够的耐高温磨损性能,能够在干切削条件下使用。此外,对刀具表面进行涂层,在切削过程中就会在刀具与切屑之间增加了一道隔热屏障,阻止热量传递到刀具基体,因而能保证刀具切削刃的锋利性,显著提高刀具的耐高温性能。生产实践表明,尽管在干切削中还不能将切削区产生的热量完全随切屑排出,但只要合理选择刀具几何形状、切削参数,将能使绝大部分切削热随切屑排出,取得良好的加工效果。

2) 干切削时,刀具/切屑及刀具/工件表面之间的摩擦因数要尽可能小。湿切削中通常是采用切削液来降低刀具/切屑及刀具/工件表面之间的摩擦因数。但干切削加工由于没有切削液,切削区产生的高温会造成化学不稳定性、刀具与切屑之间的摩擦增大、排屑速度减慢,因而极易产生积屑瘤,加剧刀具磨损。因此,必须采取措施减小切屑和刀具之间的摩擦因数,例如,选择刀具材料与工件材料的合理匹配等。但最有效的方法就是进行刀具表面涂层,并设计排屑良好的刀具结构,例如,大螺旋角TiAlN涂层丝锥就是具有这种性能的干切削刀具。

3) 干切削刀具的结构要保证排屑方便快捷,以减少热量堆积。为了保证工件加工质量和刀具具有一定寿命,要求传入其中的热量尽可能少,这样在产生相同热量的情况下,切屑必须带走更多的热量。这就需要刀具必须能够快速排出切屑,即以尽可能高的金属切除率进行加工,这样可使刀具和工件之间的接触时间最短,传入工件和刀具的热量就会大幅度减少。当然机床的布局也要适应高速切削,并尽可能使切屑快速离开工作区。

4) 刀具应有更高的强度和冲击韧度。选择适宜于干切削的刀具材料,如超细晶粒硬质合金、陶瓷和金属陶瓷刀具材料、金刚石和CBN等,也可在高速钢、硬质合金基体上进行适宜的涂层,如TiAlN涂层、TiCN涂层、TiAlN+MoS₂涂层、类金刚石DLC(Diamond Like Carbon)

涂层等。金刚石和 CBN 可用于干切削铸铁、过共晶铝合金、各种钢和钛合金等。

5) 干切削刀具安装要安全可靠。干切削通常是在高速加工状态下进行的，要求刀片在刀体上定位夹紧牢固、安全，刀具与机床连接可靠，因此，必须对刀体、刀片和刀具与机床的连接进行特殊结构设计，以保证刀具在高速回转时能正常工作。

3.3.2 干切削加工刀具材料的选择

1. 刀具材料的发展

刀具材料的发展史，实际上就是不断提高刀具材料耐热性能的过程。18世纪后半叶，采用碳素钢作车刀，由于耐热性很低（200℃左右），切削钢时的切削速度仅为6~8m/min，切削铸铁的速度仅为3~5m/min。用碳素工具钢车刀镗削瓦特蒸汽机的一个大气缸的孔和端面需用去27.5个工作日。1861年英国人R.莫歇特（Robert Mushet）制成含钨的合金工具钢。1898年美国人W.泰罗（Winslow Taylor）和M.怀特（Maunsell White）研究成功了高速钢，最初的高速钢中w(W)、(Cr)分别为8%、3.6%，切削速度达12m/min。1906年确定的高速钢最佳成分：w(C)为0.67%，w(W)为18.91%，w(Cr)为5.47%，w(Mn)为0.11%，w(V)为0.29%，其余为Pe。从1900年到1920年，出现了添加钒和钴的高速钢，使耐热性提高到500~600℃，同时还出现了铸造钴基合金（斯太立特合金），使切削速度达到了30~40m/min，切削铸铁的速度提高了近六倍。高速钢的出现，引起了金属切削实践的革命，大大提高了金属切削的生产率，并要求完全改变机床结构，以适应新刀具性能的要求。

1925年德国人K.史律太尔（K. Schroter）发明了硬质合金。最初研制的是WC-Co合金，耐热性达到了800℃，切削速度提高到40m/min以上。这种合金加工铸铁时效果很好，加工钢时的寿命却很低。到了1931年，出现了在WC-Co合金中添加TiC，即WC-TiC-Co合金，其耐热性达到900℃以上，切削钢件时的切削速度达到220m/min。这就是说，在这40年间，由于刀具材料耐热性的提高，切削速度提高了近40倍。

随着制造业的发展，新型刀具材料不断涌现，比如陶瓷刀具、金

刚石刀具、立方氮化硼等超硬材料刀具的出现，使切削加工的水平提高到了一个崭新的水平，切削速度大幅提高，使一些原来难加工或不可切削加工的硬脆材料的加工也成为可能。

2. 干切削刀具材料

由于干切削不同于以往的传统切削，它对刀具材料提出了更高的要求。合适的刀具材料是干切削加工的基本条件。干切削刀具材料的选择首先应考虑干切削加工的特点，即刀具材料应具有耐高温、耐磨损、高韧度、低摩擦因数等性能。工件材料不同，所选用的刀具材料也不同。表3-4为加工常见工件材料的干切削刀具材料。

表3-4 加工常见工件材料的干切削刀具材料

工件材料	刀具材料	
	粗加工	精加工
轧制铝合金	K10、K20	PCD（聚晶金刚石）、金刚石涂层
铸造铝合金	K10、Si ₃ N ₄	PCD、Si ₃ N ₄ 、金刚石涂层
铜合金	K10、K20涂层硬质合金、金属陶瓷	PCD、Si ₃ N ₄ 陶瓷
结构钢	金属陶瓷、PVD（物理气相沉积）涂层刀具、高TiC添加Ta、Nb的硬质合金	CBN（立方氮化硼）、陶瓷
高强度钢、淬硬钢	高TiC添加Ta、Nb的硬质合金	CBN、金属陶瓷
不锈钢、高温合金、钛合金	超细晶粒添加Ta、Nb的P类硬质合金	细晶粒及超细晶粒添加Ta、Nb的P类硬质合金
纤维强化复合材料	K类硬质合金	PCD
铸铁	金属陶瓷、K类硬质合金	CBN、Si ₃ N ₄ 陶瓷

其次，刀具材料的选择还应考虑加工要求、加工方式等因素，并进行必要的试验研究。例如，有色金属干切削较为理想的刀具材料是K10和K20硬质合金，而精加工时金刚石刀具则效果更好。

(1) 硬质合金刀具材料 硬质合金是由难熔金属碳化物(WC、TiC等)和金属粘结剂(如Co)粉末在高温下烧结而成，硬质合金可

分为 WC 基和 TiC 基两大类。我国最常用的碳化钨基硬质合金有钨钴类和钨钛钴类。表 3-5 是常用硬质合金的化学成分、力学性能及用途。

表 3-5 常用硬质合金的化学成分、力学性能及用途

牌号	化学成分(质量分数, %)				硬度 HRA	抗弯强度/GPa	使用性能	使用范围
	WC	TiC	Ta(NbC)	Co				
YG3X	96.5	—	—	3	91.5	1.1	YG 类合金中耐磨性最好的一种，但冲击韧度较差	铸铁、有色金属及合金的精镗精车，合金钢、淬火钢及钼材料的精加工
YG6X	93.5	—	—	6	91	1.4	细晶粒合金，其耐磨性较 YG6 高，而使用强度接近于 YG6	铸铁、合金钢及耐热钢加工，小型刀具和小模数磨刀
YG6	94	—	—	6	89.5	1.45	耐磨性较高但低于 YG6X、YG3X，韧性高于 YG6X、YG3X，可使用比 YG8 高的切削速度	铸铁、有色金属及其合金与非金属材料粗精加工
YG8	92	—	—	8	89	1.5	使用强度较高，抗冲击和抗振性能较 YG6 好，耐磨性和允许的切削速度较低	铸铁、有色金属及其合金与非金属材料的粗加工
YT30	66	30	—	4	92.5	0.9	耐磨性及允许的切削速度较 YT15 高，但使用强度及冲击韧度较差，焊接及刃磨时极易产生裂纹	碳钢及合金钢的精加工
YT15	79	15	—	6	91	1.15	耐磨性优于 YT14，但抗冲击韧度较 YT14 差	碳钢及合金钢的半精加工和精加工

(续)

牌号	化学成分(质量分数,%)				硬度 HRA	抗弯强 度/GPa	使用性能	使用范围
	WC	TiC	Ta(NbC)	Co				
YT14	78	14	—	8	90.5	1.2	使用强度高, 抗冲击和抗振动性能好, 但较 YT5 稍差, 耐磨性及允许的切削速度较 YT5 高	碳钢及合金钢的粗车, 不平整面和间断的半精车和精车
YT5	85	—	—	10	89.5	1.4	在 YT 类合金中, 强度最高, 抗冲击和抗振动性能最好, 不易崩刃, 但耐磨性较差	碳钢及合金钢的粗加工
YW1	84	6	4	6	91.5	1.2	热硬性较好, 能承受一定的冲击负荷, 通用性较好	耐热钢、高锰钢、不锈钢等难加工钢材的精加工, 一般钢材、铸铁、有色金属的精加工
YW2	82	6	4	8	90.5	1.35	耐磨性稍次于 YW1 合金, 但使用强度较高, 能承受较大的冲击负荷	耐热钢、高锰钢、不锈钢等难加工钢材的半精加工, 一般钢材、铸铁、有色金属的半精加工

1) WC-TiC-Co (P类) 类硬质合金中的硬质相除 WC 外, 还含有 5% ~ 30% (质量分数) 的 TiC。由于含有 TiC, 因而具有较高的硬度, 特别是具有较高的耐磨性, 在高温时的硬度和抗压强度比 K类硬质合金高, 抗氧化性能好。常用牌号有 YT5、YT14、YT15 及 YT30, TiC 含量 (质量分数) 分别为 5%、14%、15% 和 30%, 相应的钴含量 (质量分数) 为 10%、8%、6% 及 4%, 主要用于加工热轧、锻造或铸造高合金钢, 退火工具钢 (低于 45HRC) 等材料。随着合金成分中 TiC 含量的提高和 Co 含量的降低, 硬度和耐磨性提高, 抗弯强度则降低。与 WC-Co (YG) 类硬质合金比较, YT 类合金的硬度提高了, 但抗弯强

度，特别是冲击韧度却显著降低。

在用 WC-TiC-Co 类硬质合金干切削钢材时，金属切削率常常不是受刀具抗月牙洼磨损能力的限制，而是受刀具抗塑性变形能力或抵抗刀具后刀面快速磨损能力的限制。

WC-TiC-Co 类硬质合金的导热性能差，切削时传入刀具的热量较少，大部分热量集中在切屑中，切屑受强热后会发生软化，因而有利于干切削的顺利进行。

2) WC-Co (K类) 类硬质合金由 WC 和 Co 组成。常用牌号有 YG3X、YG6X、YG6 及 YG8 等，钴含量（质量分数）分别为 3%、6%、6%、8%，这种合金有较高的抗弯强度和冲击韧度（与 P 类硬质合金相比），这可减少切削时的崩刃。同时，WC-Co 类硬质合金的热导率比较大，有利于切削热从刀尖散走，降低刀尖温度，避免刀尖过热软化。因此，WC-Co 类硬质合金主要用于加工奥氏体钢、淬硬钢（高于 45HRC）、冷硬铸铁、铸铁、有色金属、高温合金以及非金属材料等。

3) 超细晶粒硬质合金。一般普通硬质合金中 WC 粒度为微米级，而超细晶粒硬质合金 WC 的粒度在 $0.2 \sim 1\mu\text{m}$ 之间，大部分在 $0.5\mu\text{m}$ 以下。这种硬质合金也称为超微粒硬质合金。

超细晶粒硬质合金是一种高硬度、高强度兼备的硬质合金，它具有硬质合金的高硬度和高速钢的强度。其钴含量（质量分数）通常为 9% ~ 15%，硬度一般为 90 ~ 93HRA，抗弯强度为 2000 ~ 3500MPa。与钴含量相同的一般 WC-Co 硬质合金相比，其硬度一般要高 1.5 ~ 2HRA，抗弯强度要高 600 ~ 800MPa，这是由于其硬质相和钴高度分散，增加了粘结面积，提高了粘结强度。这种合金的高温硬度比一般的 WC-Co 要高。

我国研制的 YM051、YM052、YM053 即属于超细晶粒硬质合金范围，其平均晶粒尺寸为 $0.4 \sim 0.5\mu\text{m}$ ， $1\mu\text{m}$ 以下的占 95% 以上。一般硬度大于 92.5HRA，抗弯强度在 1600MPa 以上。YM051 和 YM052 的通用性很强，既能干切削加工钢材，又能干切削加工铸铁，还能干切削加工耐热合金，特别是对难加工材料的干切削效果尤为显著。YM053 则主要用于干切削加工各种铸铁。

超细晶粒硬质合金由于其优异的性能也常作为涂层硬质合金的基体材料。

4) WC-TiC-TaC (NbC)-Co (M类) 类硬质合金。这类硬质合金是在YT类硬质合金成分中加入一定数量的TaC (NbC)，常用牌号有YW1和YW2，加入TaC (NbC) 可提高抗弯强度、疲劳强度和冲击韧度，提高合金的高温硬度和高温强度，提高抗氧化能力和耐磨性。这类合金既可加工铸铁和有色金属，也可加工钢，因此常称为通用硬质合金。

(2) 金属陶瓷刀具 金属陶瓷刀具是硬质合金的一种，与前述WC基硬质合金不同，它主要的硬质相成分是TiC和TiCN，具有高的抗磨损性能。作为刀具材料的金属陶瓷，应用最广泛的是TiCN基金属陶瓷，通常以TiC为主要成分，Ni作为粘结金属，增加其含量，可提高合金的强度，但却会使合金的硬度降低。向Ni中添加Mo(或Mo₂C)，可改善液态金属对TiC的湿润性，使TiC晶粒变细，可提高合金的强度及硬度。Ni和Mo的总含量(质量分数)通常为20%~30%。

TiCN基金属陶瓷是20世纪70年代出现的新型工具材料，其性能具有以下特点：

1) 硬度很高。一般可达91~93.5HRA，有些可达94~95HRA，即达到陶瓷刀具硬度的水平。

2) 有很高的耐磨性和理想的抗月牙洼磨损性能，在高速切削钢材时磨损率极低，其耐磨性可比WC基硬质合金高3~4倍。

3) 有较高的抗氧化能力。一般硬质合金月牙洼磨损开始产生温度为850~900℃，而TiCN基金属陶瓷为1100~1200℃，高出200~300℃。TiC氧化形成的TiO₂有润滑作用，所以氧化程度较WC基的硬质合金低约10%。

4) 有较高的耐热性。TiCN基金属陶瓷的高温硬度、高温强度与高温耐磨性都比较好，在1100~1300℃的高温下尚能进行切削。一般切削速度可比WC基硬质合金高2~3倍，可达300~400m/min，即使加工某些高硬度材料和难加工材料，切削速度也可达到200m/min。

5) 化学稳定性好。TiCN基金属陶瓷刀具切削时，在刀具与切屑、工件接触表面上会形成Mo₂O₃、镍钼酸盐和氧化钛薄膜，它们都可以作为干润滑剂以减少摩擦。TiCN基合金与钢不易产生粘结，在700~900℃时也未发现粘结情况，即不易产生积屑瘤，加工表面粗糙度较低。

TiCN基金属陶瓷在具有良好综合性能的同时，还可以节约普通硬

质合金所必需的 Co、Ta、W 等贵重稀有金属。随着资源消耗速度的加快和绿色制造的推广应用, TiCN 基金属陶瓷必会成为一种应用广泛的工具材料。

TiCN 基金属陶瓷刀具与传统的硬质合金刀具相比, 具有较高的热硬性、耐磨性、抗月牙洼磨损能力及较低摩擦因数的特点, 从而刀具使用寿命较长, 或在寿命相同的情况下, 可采用较高的切削速度。与陶瓷相比, TiCN 基金属陶瓷接近于陶瓷的硬度和耐热性, 其抗弯强度及断裂韧度却比陶瓷高。但也存在抗塑性变形能力、抗崩刃性能差及韧度不好等问题。因此, 长期以来对金属陶瓷刀具进行增韧一直是材料科学工作者努力的方向, 已有一些增韧技术得到了应用。而近几年来出现的纳米技术, 特别是通过纳米添加对传统材料进行改性, 则为金属陶瓷刀具的增韧提供了新的途径。

图 3-19 和图 3-20 分别为 TiCN 基金属陶瓷刀具干车削冷硬铸铁和高速干车削 45 钢的磨损对比曲线和后刀面的磨损形貌。由图 3-19 可见, 干车削冷硬铸铁时, TiCN 基金属陶瓷刀具的切削性能低于 YG8 硬质合金, 后刀面的磨损形态也不相同, 主要是因为 TiCN 基金属陶瓷材料加工冷硬铸铁时的磨损机理属于脆性断裂。由图 3-20 可见, 高速干

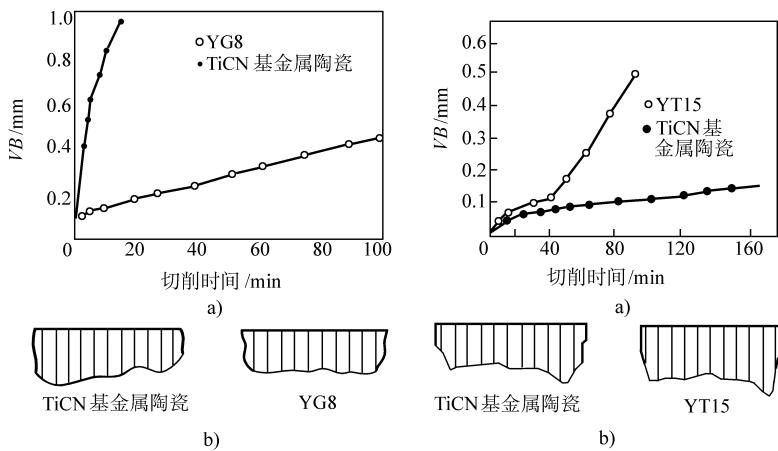


图 3-19 干车削冷硬铸铁时的刀具磨损状况

a) 磨损曲线 b) 后刀面磨损形貌

图 3-20 干车削 45 钢时的刀具磨损状况

a) 磨损曲线 b) 后刀面磨损形貌

车削45钢时，TiCN基金属陶瓷材料的切削性能优于YT15，其工作寿命约为YT15的两倍。

(3) 陶瓷刀具材料：

1) 氧化铝基陶瓷。这类陶瓷的基本成分是 Al_2O_3 ，故统称为 Al_2O_3 基陶瓷。主要包括纯 Al_2O_3 陶瓷、氧化铝-金属系陶瓷、氧化铝-碳化物系陶瓷和氧化铝-碳化物-金属系陶瓷。

① 纯 Al_2O_3 陶瓷。这类陶瓷的 Al_2O_3 纯度在99.9%以上，采用热压制成，其密度多在 $3.9 \sim 4.0\text{g/cm}^3$ 之间，俗称白陶瓷，为了降低烧结温度，避免晶粒过分长大，常在 Al_2O_3 中添加少量(0.1%~0.15%)玻璃氧化物，如 MgO 、 NiO 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 等。添加玻璃氧化物对陶瓷的强度有好处，但高温性能却有所降低。

② 氧化铝-金属系陶瓷。为提高纯 Al_2O_3 陶瓷的韧性，可添加些数量不多(10%以下)的金属，如 Cr 、 Co 、 Mo 、 W 、 Ti 等，以构成所谓的金属陶瓷，其密度都在 4.1g/cm^3 以上，在现在陶瓷刀具中，这类陶瓷牌号不多，由于这类陶瓷蠕变强度低，抗氧化性能也差，故使用得较少。

③ 氧化铝-碳化物系陶瓷。这类陶瓷是将百分之几到百分之几十的碳化物添加到 Al_2O_3 中热压(温度 $1500 \sim 1800^\circ\text{C}$ ，压力 $1500 \sim 3000\text{MPa}$)烧结而成，添加的碳化物有 TiC 、 WC 等，使用得最多的是 TiC ，在 Al_2O_3 中添加 TiC 而组成的 Al_2O_3 - TiC 混合陶瓷(俗称黑陶瓷)的使用性能有很大程度的提高，我国生产的M16、AT6、SG3、SG4均属此类陶瓷，后两种还加入了 WC 的成分。

④ 氧化铝-碳化物-金属系陶瓷。在氧化物-碳化物陶瓷中添加粘结金属，如 Ni 、 Mo 、 Co 、 W 等，可提高 Al_2O_3 与碳化物的连接强度，提高其使用性能，可用于断续切削加工和使用切削液加工的场合。

陶瓷不仅硬度和耐磨性高，高温性能好，而且抗粘结性能和化学稳定性优良，摩擦因数低，在一定切削条件下是比硬质合金切削性能更好的一种刀具材料，非常适合干切削。但陶瓷材料脆性大、强度和韧度差，在很大程度上限制了陶瓷刀具的应用范围和可靠性，尤其是在干切削中的应用。因此，改善陶瓷刀具材料的脆性，成为推广使用陶瓷刀具和扩大其加工范围的关键所在。新型陶瓷材料的开发较好地解决了这一难题。

2) 高纯度细晶粒氧化铝陶瓷刀片。提高陶瓷材料强度及韧度最有效的方法是减小陶瓷晶粒尺寸，提高材料纯度。通常，在陶瓷刀片制造过程中，特别是在高温烧结时，存在晶粒长大现象。为遏制晶粒长大，常在陶瓷粉末加入 MgO 作为抑制剂，但该氧化物烧结后形成玻璃相，沉积于晶界处，使晶界分离，从而降低了晶界强度，且易产生晶间碎裂。如能在低温下烧结陶瓷，则无须添加抑制剂，就可避免上述现象，提高陶瓷刀片性能。

日本学者开发了一种微细晶粒 ($0.22\mu m$)、高纯度 (99.99%) 的新型氧化铝陶瓷粉末，用于制造陶瓷刀片。这种微细粉末具有很大的比表面积 ($15.1m^2/g$)，压实时具有极大的表面能，在此能量作用下，烧结时所需温度明显降低， $1230^\circ C$ 时即可充分烧结，这就意味着烧结时无须添加抑制剂，从而使晶界处无杂质存在。这种刀片采用高速离心压实法制造，在 $100 \sim 200N$ 的大离心力作用下压实坯料，经干燥后，在 $1230^\circ C$ 的温度下烧结 $1.5h$ 即可获得成品。这种新型陶瓷刀片的平均晶粒尺寸 $0.7\mu m$ ，使用时以穿晶碎裂为主。而一般陶瓷刀片的晶粒尺寸为 $2\mu m$ ，使用中的碎裂形式以晶间碎裂为主。使用这种刀片对灰铸铁和中碳钢进行干车削和干铣削试验，结果表明，这种刀具在干切削中具有满意的切削性能。

表 3-6 为新型氧化铝陶瓷刀片 (HU) 与普通刀片 (AW) 的力学性能比较。

**表 3-6 新型氧化铝陶瓷刀片 (HU) 与
普通刀片 (AW) 的力学性能比较**

性能参数	AW 刀片	HU 刀片
抗弯强度/MPa	780	1330
硬度 HV	1650	2100
断裂韧度/MPa · m ^{1/2}	3.5	3.3
密度/(g/cm ³)	3.94	3.95

分别用 HU 刀片和 AW 刀片对灰铸铁和中碳钢进行干车削和干铣削，进行对比试验，结果表明，晶粒更细，晶界更纯的 HU 陶瓷刀片在干切削中具有更为优异的切削性能。

图 3-21a、b 分别为 HU 刀片与 AW 刀片干切削灰铸铁时后刀面平

均磨损量和最大磨损量随切削时间的变化曲线（切削用量： $v_c = 300\text{m/min}$, $a_p = 1.0\text{mm}$, $f = 0.39\text{mm/r}$ ）。

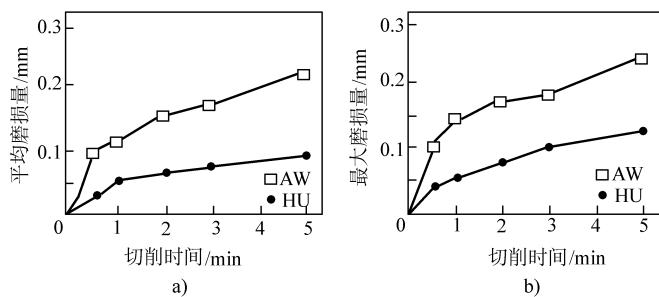


图 3-21 HU 刀片与 AW 刀片干切削灰铸铁时后刀面

平均磨损量和最大磨损量随切削时间的变化曲线

a) 平均磨损量随切削时间的变化曲线 b) 最大磨损量随切削时间的变化曲线

通过对切削 5min 后的刀片形态进行 SEM 检查，结果显示 HU 刀片磨损很小，而 AW 刀片后刀面相当粗糙。这是因为普通陶瓷刀片晶粒较大，磨损主要是由晶间碎裂造成，而新型陶瓷刀片不仅硬度高，而且晶界无杂质，粘结强度好，磨损形式主要为穿晶碎裂。

同样用这两种刀片干车削中碳钢，图 3-22a、b 分别为 $a_p = 1.0\text{mm}$ 、 1.5mm 时，两种刀片的磨损宽度随切削时间的变化曲线（切削用量： $v_c = 200\text{m/min}$, $a_p = 1.0\text{mm}$ 、 1.5mm , $f = 0.21\text{mm/r}$ ）。

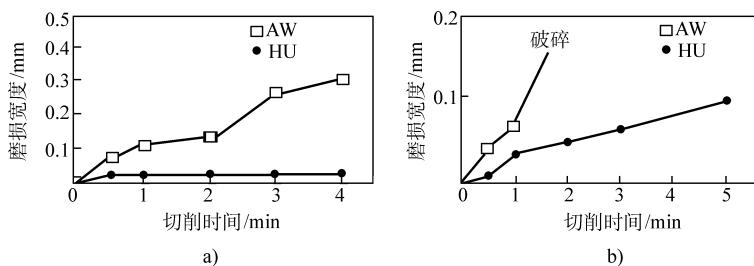


图 3-22 HU 刀片与 AW 刀片干车削中碳钢时后刀面

平均磨损量和最大磨损量随切削时间的变化曲线

a) $a_p = 1.0\text{mm}$ b) $a_p = 1.5\text{mm}$

由图 3-22 可见, 当背吃刀量较小时 ($a_p = 1.0\text{mm}$), HU 刀片耐磨性好; 当背吃刀量较大时 ($a_p = 1.5\text{mm}$), 切削 1min 后 AW 刀片破碎失效, 而 HU 刀片切削 5min 后仍可继续使用。对磨损后的刀片进行 SEM 检查表明, AW 刀片的磨损由破碎造成, 而 HU 刀片的磨损是逐渐形成的, 没有明显的破碎现象。

上述结果表明, 晶粒更细、晶界更纯的新型氧化铝陶瓷刀片, 具有良好的机械冲击和热冲击性能, 以及极高的耐磨性和抗破损能力, 是用于干切削的理想刀具。

3) 高温自润滑陶瓷刀具 实现陶瓷刀具材料本身自润滑的主要方法有三种, 即:

① 利用陶瓷刀具在切削高温作用下的摩擦化学反应, 在陶瓷刀具材料表面原位生成具有润滑作用的反应膜, 从而实现陶瓷刀具的自润滑。由于刀具在切削过程中其表面始终存在高温, 因此, 摩擦化学反应发生在刀具表面上且伴随着整个切削过程。通过对陶瓷刀具材料进行合理的组分匹配设计和摩擦学设计, 有望利用切削过程中的摩擦化学反应, 在陶瓷刀具表面原位生成具有润滑作用的反应膜, 从而达到陶瓷刀具自润滑的效果, 所得到的自润滑陶瓷刀具材料在高温下具有很好的自润滑能力, 尤其适合于高速干切削。

② 对陶瓷刀具材料施加自润滑涂层, 或对陶瓷刀具材料表面进行离子注入。用涂层、镀膜等方法将固体润滑剂粘结在陶瓷刀具表面, 或采用离子注入等表面处理手段在陶瓷表面形成固体润滑膜, 可使陶瓷刀具材料具有自润滑功能。例如, 采用 MoS_2 、 WS_2 、 TaS_2 、 MoS_2/Mo 、 WS_2/W 等进行“软”涂层, 可减小摩擦和粘结, 降低切削力和切削温度。与普通涂层刀具不同, 自润滑涂层通过在陶瓷表面采用合适的硬、软相材料成分和特殊工艺, 能够在高温高压下形成有较强减摩和抗磨功能的陶瓷刀具表面。另外, 金属 Al、Ti、Si、V、Mo 和 W 等的氧化物保护膜具有较低的摩擦因数, 在陶瓷刀具材料表面通过离子注入这些元素, 也可形成具有极小摩擦因数和自润滑功能的摩擦表面。

③ 以固体润滑剂作为陶瓷刀具材料的添加剂, 制备自润滑陶瓷刀具材料。以固体润滑剂(如 MoS_2 、 H_3BO_3 、 WS_2 等)作为添加剂, 加入到陶瓷刀具材料基体中形成复合陶瓷刀具材料时, 利用固态润滑剂易施敷、摩擦因数低的特点, 在陶瓷刀具表面形成连续的固态润滑层,

从而赋予陶瓷刀具材料自润滑特性。

由于硼化物在摩擦过程中，很容易生成溶解有其他元素的硼氧化物润滑膜，该润滑膜具有较低的抗剪强度。因此，目前已经有用硼化物作为添加剂制备的陶瓷刀具材料。例如，用硼化钛 (TiB_2) 作为添加剂 (TiB_2 粉末纯度大于 99.8%，密度为 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ ，平均粒径小于 $1.0\mu\text{m}$)，以 Al_2O_3 ，陶瓷为基体 (氧化铝粉末为 $\alpha-Al_2O_3$ ，纯度大于 99.9%，密度为 $5.99\text{g}/\text{cm}^3$ ，粉末平均粒径小于 $0.5\mu\text{m}$) 的 Al_2O_3/TiB_2 陶瓷刀具材料制作的刀片 SNGN15608 [几何参数为： $\gamma_0 = -5^\circ$ ， $\alpha_0 = 5^\circ$ ， $\lambda_s = -5^\circ$ ， $K_r = 75^\circ$ ， $b_{i0} \times \gamma_{01} = 0.2 \times (-20^\circ)$]，在 CA6140 车床上干切削 45 锰钢 (45HRC)。由图 3-23 可见，随着切削速度的升高，切削温度升高，当 $v = 210\text{m}/\text{min}$ 时，切削温度已达 1190°C 。

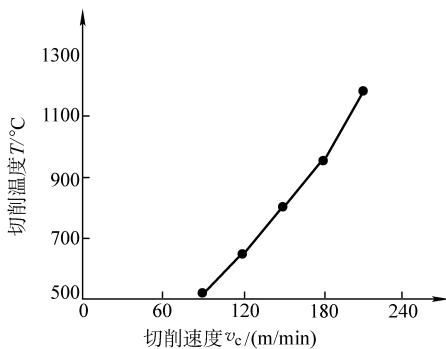


图 3-23 Al_2O_3/TiB_2 陶瓷刀具干切削

淬火钢时切削速度对切削温度的影响

注： $f = 0.15\text{mm}/\text{r}$ ， $a_p = 0.3\text{mm}$ ， $t = 10\text{min}$ 。

由于 TiB_2 的氧化温度为 800°C ，当 $v < 120\text{m}/\text{min}$ 时，切削温度小于 800°C ，此时刀具表面未形成氧化物保护膜，刀具的磨损机制主要表现为磨粒磨损与粘着磨损。当 $v > 120\text{m}/\text{min}$ 时，刀具表面平均切削温度大于 800°C ，实际瞬间最高温度比平均温度还要大。在这样高的切削温度作用下，刀具中的 TiB_2 将会被氧化，形成氧化膜。当陶瓷刀具表面覆盖有氧化膜时，基体承受载荷，而摩擦则在氧化膜上发生。 TiB_2 氧化物将会在切屑与刀具前刀面之间起到固体润滑剂的作用，并能使刀具与切屑之间的粘结减弱，进而可减小切削力和前刀面的平均摩擦因数，

减轻刀具的磨损，从而提高刀具的耐磨性能。

4) 加入结晶纹理或碳化硅晶须，提高氧化铝陶瓷韧度的方法 在陶瓷材料的增韧补强方面常用的主要方法（粒子弥散增韧、氧化锆相变增韧和晶须增韧）中，实践证明晶须增韧不仅增韧效果高，而且适用于室温和高温，因此，该方法是目前陶瓷材料的最佳增韧手段。

SiC 增韧 Al_2O_3 基陶瓷材料是国外研究最多、应用最广的陶瓷刀具材料，它比一般陶瓷刀具材料表现出更好的韧性、强度和导热性，可大大提高加工速率和加工质量，且刀片寿命长，抗机械冲击和热冲击性好，可加工各种难加工材料且刀片质量稳定。这种方法可在材料中形成特殊的、很结实的 SiC 晶须（平均直径 1nm，长度 20 μm ），其作用犹如钢筋混凝土中的钢筋，能阻挡或改变裂纹的发展方向，极大地增加了陶瓷的韧性、强度和抗冲击性能。晶须加强陶瓷是一种很有前途的干切削刀具材料。

(4) 聚晶立方氮化硼（PCBN）刀具材料 聚晶立方氮化硼（PCBN）是干切削加工中应用较为广泛的超硬刀具材料。这主要是因为这类刀具材料具有优良的切削加工性能。

1) PCBN 的种类。按添加成分的不同，PCBN 可以分为直接由 CBN 单晶烧结而成的 PCBN 和添加一定比例粘结剂的 PCBN 烧结体两大类；按制造复合方式可分为整体 PCBN 烧结块和与硬质合金复合烧结的 PCBN 复合片两类。目前应用较广的是带粘结剂的 PCBN 复合片。添加的粘结剂的比例不同，PCBN 的性能也不同，粘结剂含量越多则硬度越低；粘结剂种类不同，PCBN 的用途也不同。表 3-7 为常见粘结剂的 PCBN 刀具及其用途。

表 3-7 常见粘结剂的 PCBN 刀具及其用途

CBN 含量（质量分数，%）	粘结剂种类	主要用途
≈60	TiN	淬火钢
≈70	TiC	铸铁
≈70	Al_2O_3	铸铁
≈90	AlN	高强度铸铁
≈80	Co	耐热合金钢、铸铁

2) PCBN 刀具的性能。由于 CBN 晶体与金刚石晶体都属于闪锌矿型且晶格常数相近，化学键类型相同，因此，其具有接近金刚石的硬度和抗压强度，是自然界中硬度仅次于金刚石的矿物质（显微硬度达 8000~9000HV）。而且由于 CBN 是由 N、B 原子所组成，因此，其具有比金刚石更高的热稳定性和化学惰性。PCBN 刀具的主要性能如下：

① PCBN 刀工具具有很高的硬度和耐磨性。CBN 单晶的显微硬度为 8000~9000HV，其硬度仅次于金刚石，至少是其他刀具材料（如碳化硅、氧化铝、硬质合金）硬度的两倍，是工具钢的六倍。PCBN 复合片的硬度一般为 3000~5000HV 左右，如图 3-24 所示。CBN 的耐磨性约为陶瓷的 2~5 倍，是涂层硬质合金的 5~10 倍，如图 3-25 所示。因此，PCBN 刀具用于加工高硬度材料时，具有比硬质合金及陶瓷更高的耐磨性，能减小大型零件加工中的尺寸偏差及尺寸分散性，尤其适用于自动化程度高的加工设备，减少换刀调刀的辅助时间。

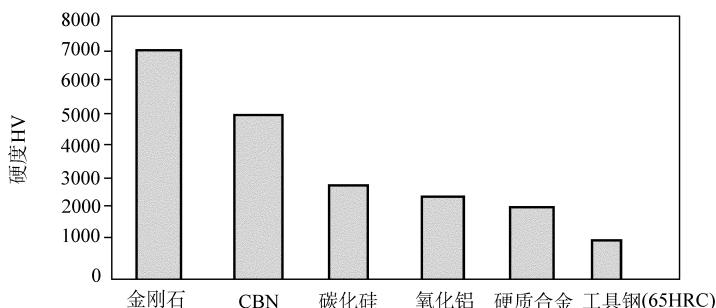


图 3-24 各种刀具材料的硬度

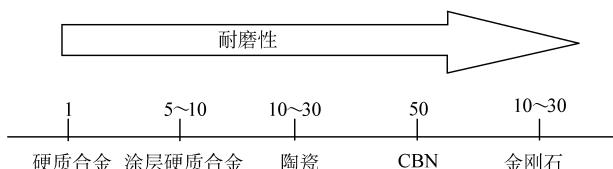


图 3-25 刀具材料的耐磨性比较

② 具有很高的热稳定性和高温硬度。CBN 的耐热性可达 1400~1500℃，在 800℃ 时仍具有相当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷的常温硬度。因此，当

切削温度较高时，被加工材料会软化，此时工件材料与刀具间的硬度差增大，有利于切削加工进行，而对刀具寿命影响不大。

③具有较高的化学稳定性。CBN 具有很高的抗氧化能力，在1000℃时不产生氧化现象，与铁系材料在1200~1300℃时不发生化学反应，但在1000℃左右时与水产生水解作用，造成大量CBN被磨耗。因此，PCBN刀具最适合干切削加工方式。

④具有良好的导热性。CBN材料的热导率低于金刚石，但大大高于硬质合金，并且随切削温度的提高，PCBN刀具的热导率会增大，可使刀尖处的热量很快传出，有利于加工精度的提高。

⑤具有较低的摩擦因数。CBN与不同材料的摩擦因数为0.1~0.3，大大低于硬质合金的摩擦因数(0.4~0.6)，而且随摩擦速度及正压力的增大略有减小。因此，低的摩擦因数及优良的抗粘结能力，使PCBN刀具切削时不易形成滞留层或积屑瘤，有利于加工表面质量的提高。

图3-26a、b是两种不同的PCBN刀具材料[PCBN1：90%（质量分数）CBN；PCBN2：65%（质量分数）CBN]在断续和连续切削时的性能对比情况。在试验条件下，PCBN2显得较为耐磨，但在恶劣的条

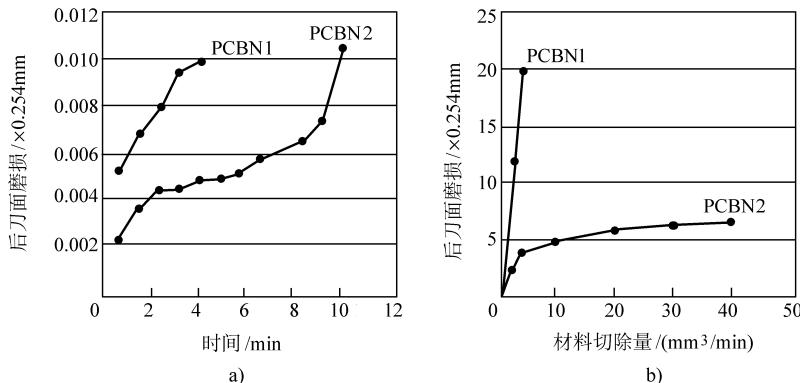


图3-26 不同的PCBN刀片的磨损曲线

- a) 连续加工 (工件材料：4043钢，硬度58HRC；切削速度：109m/min，进给速度：0.2mm/r，背吃刀量：0.25mm)
- b) 断续加工 (工件材料：4043钢，硬度58HRC；切削速度：109m/min，进给速度：0.13mm/r，背吃刀量：0.5mm；刀片形状：SNG323)

件下，PCBN1 的性能则显得更为适用，如图 3-27 所示。PCBN 在高速干切削情况下，比湿切削具有更高的刀具使用寿命，如图 3-28 所示。这是因为干切削时的切削温度高，PCBN 刀具在高温下硬度降低少，而工件材料在高温下硬度大幅度下降。刀具硬度与工件硬度在高的切削温度下的这种相对变化，有利于干切削的顺利进行。

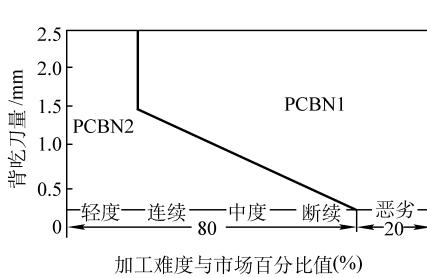


图 3-27 切削状态与 PCBN1
与 PCBN2 的选择

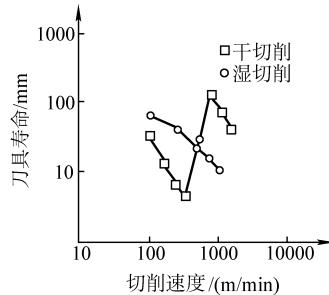


图 3-28 干切削与湿切削 PCBN
刀具寿命与切削速度的关系选择

例如，某企业生产的三缸及四缸柴油机机体缸孔精度要求如图 3-29 所示。缸体材料是 HT250，硬度为 200 ~ 250HBW。原先一直采用 YG3 硬质合金刀具加工，由于加工的孔较深，刀具切削行程长，磨损快，在镗孔过程中主要存在以下几方面的问题：a、精镗后缸孔产生上大下小的锥度，圆柱度达不到要求；b、刀具刃磨频繁，调刀工作量大；c、加工尺寸散差大，稳定性差；d、工件热变形大，影响加工尺寸精度；e、生产效率低，严重影响生产批量的扩大等。为此，企业选用 PCBN 刀具材料，并根据其切削性能，分别在加工中心及组合机床上进行了工艺试验，取得了很好的效果。

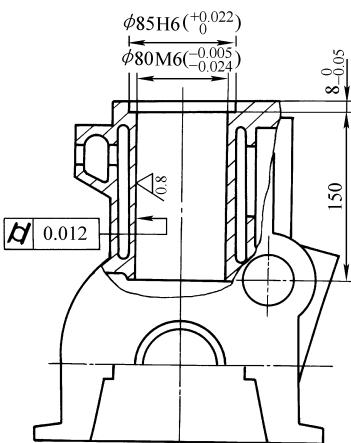


图 3-29 柴油机机体

试验得出的最佳刀具几何参数见表 3-8，主偏角等其他角度根据需要确定。合理切削用量见表 3-9，表 3-10 为 PCBN 与 YG3 硬质合金刀具加工缸孔对比表。

表 3-8 最佳刀具几何参数

前角 $\gamma_0/(\circ)$	负倒棱 $\gamma_{0l}/(\circ)$	倒棱宽/ b_g/mm	后角 $\alpha_0/(\circ)$	刀尖 γ_e/mm	刃倾角 $\lambda_s/(\circ)$
0	-10 ~ -15	0.2 ~ 0.3	6 ~ 8	0.4 ~ 0.8	0

表 3-9 合理切削用量

切削速度 $v/(\text{m/min})$	进给量 $f/(\text{mm/r})$	背吃刀量 a_p/mm
500 ~ 1000	0.25 ~ 0.4	>0.3

表 3-10 PCBN 与 YG3 硬质合金刀具加工缸孔对比

刀具	加工工件数/件	表面粗糙度值 $Ra/\mu\text{m}$	圆柱度/mm	尺寸散差范围/mm	生产率/(min/件)
YG3	25	3.2 ~ 1.6	0.015 ~ 0.035	0.045	12
PCBN	160	1.6 ~ 0.8	0.008 ~ 0.020	0.020	2

3) PCBN 刀具应用范围。PCBN 刀具是高速精加工或半精加工淬硬钢、冷硬铸铁和高温合金等的理想刀具材料，可以实现“以车代磨”。国外还研制了不同 CBN 含量的 PCBN 刀具，以充分发挥 PCBN 刀具的切削功能，如表 3-11 所示。

表 3-11 不同 CBN 含量的 PCBN 刀具及用途

CBN 含量(质量分数, %)	用 途
50	连续切削淬硬钢(45 ~ 65HRC)
65	半断续切削淬硬钢(45 ~ 65HRC)
80	Ni-Cr 铸铁
90	连续重载切削淬硬钢(45 ~ 65HRC)
80 ~ 90	高速切削铸铁(45 ~ 65HRC)，粗、半精切削淬硬钢

(5) 聚晶金刚石 (PCD) 刀具材料 聚晶金刚石复合片是由粒度为微米级的金刚石颗粒与 Co、Ni 等金属粉末均匀混合后，在高压高温下，在碳化钨 (WC) 基材上烧结而成的一种刀坯材料。PCD 复合片不仅具有金刚石高硬度、高耐磨性、高导热性、低摩擦因数、低热膨胀系数等优越性能，同时还具有硬质合金良好的强度和韧度。PCD 复合

片还具有导电性，因此，可用线切割机切割成所需刀头，将刀头焊接在刀体上，经过刃磨制成 PCD 刀具。

PCD 刀具材料的主要性能表现在：① PCD 的硬度可达 8000HV，为硬质合金的 80~120 倍；② PCD 的热导率为 $700\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，为硬质合金的 1.5~9 倍，甚至高于 PCBN 和铜，因此，PCD 刀具热量传递迅速；③ PCD 的摩擦因数一般仅为 0.1~0.3（硬质合金的摩擦因数为 0.4~0.6），因此，PCD 刀具可显著减小切削力；④ PCD 的热膨胀系数仅为 $0.9 \times 10^{-6} \sim 1.18 \times 10^{-6}$ ，仅相当于硬质合金的 1/5，因此，PCD 刀具热变形小，加工精度高；⑤ PCD 刀具与有色金属和非金属材料间的亲和力很小，在加工过程中切屑不易粘结在刀尖上。

表 3-12 是 PCD 刀具的应用范围。但是，金刚石刀具对铁族金属的亲和力会引起化学反应，因此，它只能用于加工非铁零件；同时，PCD 不能经受切削区超过 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ 高温，因而不能加工韧度及高延展性材料。

表 3-12 PCD 刀具的应用范围

被加工材料		加工对象
非铁 金属	铝、 铝合金	汽车、摩托车：活塞，轮毂，传动箱，泵体，进气管，各种壳体零件等
		飞机、机电产品：各种箱体，壳体，压缩机零件等
		精密机械：各种照相机，复印机，计量仪器零件等
		通用机械：各种泵体，油压机，机械零件等
	铜、 铜合金	内燃机船舶：各种轴，轴瓦，轴承，泵体等
		电子仪器：各种仪表，电动机整流子，印制电路板等
		通用机械：各种轴承，轴瓦，阀体，壳体等
非金属	硬质合金	各种阀座，气缸等烧结品及半烧结品等
	其他	镁、锌等各种有色金属
	木材	各种硬木，人造板，人造耐磨纤维板及制品
	增强塑料	玻璃纤维，碳纤维增强塑料等
	橡胶	纸用轧辊，橡胶环等
	石墨	碳棒等
	陶瓷	密封环，柱塞等烧结品及半烧结品

在实际选用时，应根据 PCD 刀具的使用场合、被切削材料的特性以及加工的具体要求，选用适当牌号和粒径的 PCD 复合片制作刀具刀头。一般情况下，复合片中金刚石体积浓度高或粒径较大的耐磨性较好，金刚石体积浓度低或粒径较小的则韧度较好。

3.3.3 涂层刀具

除了选择适宜的刀具材料外，刀具表面涂层对干切削来讲是非常重要的。切削刀具表面涂层技术是近几十年发展起来的材料表面改性技术。目前，所有刀具中的 40% 是涂层刀具，同时为了适应更宽的加工范围和优化加工工艺，新涂层也在不断地出现。涂层刀具最适宜于干切削加工，因为适宜的刀具涂层既可承受高的切削温度，降低刀具/切屑及刀具/工件表面之间的摩擦因数，减小刀具磨损和产生的热量，还可使刀具有强韧的基本体及满足切削要求的切削刃或工作表面。因此，涂层技术与刀具材料、切削加工工艺一起并称为切削刀具制造领域的三大关键技术。

涂层在干加工中的主要功能表现在以下几个方面：

- 1) 分隔刀具和切削材料。
- 2) 降低刀具接触区以及刀槽内的摩擦。
- 3) 为刀具隔热，保护刀具不受切屑影响。

涂层刀具常有的基体材料主要有硬质合金和高速钢，其中以硬质合金应用最多。

1. 涂层硬质合金刀具的发展

硬质合金具有高强度、高硬度等诸多优点，涂层刀具的基体通常选用硬质合金，涂层硬质合金刀具在涂层刀具中占有重要地位，应用也最为广泛。

通过气相沉积或其他方法，在硬质合金刀具基体上涂覆一薄层耐磨性高的难熔金属（或非金属）化合物，是提高刀具耐磨性而不降低其韧度的有效途径之一。这样，刀具材料发展中经常要产生的一对矛盾（材料硬度及耐磨性提高会导致强度及韧度的降低）很好地得到了解决。

涂层硬质合金从 20 世纪 60 年代研制成功以来，发展非常迅速，特别是机夹可转位刀片的广泛应用，更增加了涂层工艺的实用价值。在

工业发达国家，涂层刀片占可转位刀片的比例也逐年增加，近年来，随着数控机床的广泛应用，涂层刀片获得了更大的应用空间，几乎占切削刀具的80%左右。

涂层硬质合金的发展大致可分为四个时期：20世纪60年代末期涂层刀具出现时以TiC涂层为主，刀具基体一般是WC基硬质合金，称为第一代涂层；第二代涂层大约出现在20世纪70年代初期，这时对TiC涂层作了很多改进，控制了涂层与基体间脆性大的 η 相层厚度，并发展了TiN、Al₂O₃、HfN等单涂层以及上述物质的双涂层及三涂层，如TiC-TiN、TiC-Al₂O₃、TiC-Ti(CN)-TiN、TiC-Ti(CN)-Al₂O₃等；第三代涂层出现在20世纪70年代中期，除了以上几种涂层材料外，出现了新的涂层材料及三种涂层以上的多涂层，并发展了与涂层材料匹配的特殊硬质合金基体，使涂层刀片的强度性能得到了进一步的提高；第四代涂层主要是指新涂层材料的开发，包括金刚石、立方氮化硼和氮化碳等这些超硬材料涂层刀具。

随着新的涂层材料和新的涂层工艺的出现，涂层刀具的综合性能大幅度提高，不仅能加工原先硬质合金不能加工的硬材料，同时也能适用于现代高速切削，由于涂层的作用，使刀具的耐高温性、耐磨性得到很大提高，工件的加工表面质量也得到很大的提高，并使干切削在现代生产中的应用成为可能。

基体为WC的涂层硬质合金刀具有以下性能特点：

(1) 高的硬度及耐磨性 涂层的硬度一般都比硬质合金基体的硬度高得多，例如，TiC涂层硬质合金的硬度可达2500~4200HV，因而涂层刀片具有较高的抗机械摩擦和抗磨损能力。

(2) 高的耐热性 涂层刀片的耐热性可达1000~1200℃，高于硬质合金基体。如果在常温下涂层刀片的硬度为2000HV，在1000℃高温下仍能保持1000HV，而未涂层硬质合金的硬度这时会降到500HV。不同碳化物的软化温度也不同，WC的软化温度为1100℃，TiC为1200℃，TiN为1300℃。如果考虑到钴的软化温度比WC还低得多，则TiC、TiN涂层刀片的抗软化能力也比硬质合金基体高得多。涂层物质的热导率低于硬质合金，切削时使切削热大部分积聚在切屑中，传到刀片基体中的热量减少，涂层起到了热屏障的作用，因而基体温度较低，可减少软化程度。

(3) 高的抗粘结性能 Al_2O_3 与工件材料的亲和性很小，其次是 TiC 及 TiN，WC 与工件材料的亲合性则大得多。因此，涂层刀片与工件材料的亲和性较小，不容易产生粘结，减少了刀具与工件间产生的粘附作用以及刀具的粘结磨损。

(4) 高的化学稳定性 不同涂层物质与硬质合金和工件材料在高温下的反应特性不同， Al_2O_3 涂层的化学稳定性特别好，与工件材料几乎无反应，使刀具有较高的抗溶解于铁的能力，在高温下对钢与铸铁的化学惰性好。TiC 与工件材料仅有轻微的反应，因此，涂层刀片比硬质合金基体有较好的抗化学磨损能力。

涂层还可明显减少刀具表面和工件材料的相互扩散作用。 TiC 涂层既可阻止工件材料中的铁扩散到硬质合金中，又可阻止硬质合金中的钨和钴扩散至钢中，起到了扩散屏障作用。 TiN 对铁族金属不易扩散， TiN 中溶解的铁量低于 TiC 中溶解的量，在高温下 TiN 具有很好的阻止扩散作用，虽然 TiN 涂层的硬度不及 TiC 涂层硬度高，但抗月牙洼磨损能力却较 TiC 涂层优越。

Al_2O_3 在常温时的硬度虽不及 TiC ，但高温硬度高，在高速范围内其耐磨性比 TiC 涂层及 TiN 涂层好，其月牙洼磨损率小于 TiC 或 TiN 涂层。

(5) 摩擦因数低 TiC 涂层刀片在切削时所形成的氮化钛薄膜可起润滑作用，故可降低摩擦因数和摩擦力。 TiN 与铁基材料的摩擦因数较 TiC 更低。另外，其他一些涂层材料与硬质合金相比，对工件材料的摩擦因数较低，如金刚石与铝，其摩擦因数仅为硬质合金的一半左右。

2. 常用涂层及其性能

涂层刀具整体性能的优劣与基体材料及涂层本身的性能密切相关。常用的涂层基体材料主要是硬质合金、高速钢等，涂层材料主要有 TiC 、 TiN 、 TiCN 、 TiAlN 、 Al_2O_3 、 MoS_2 、金刚石等，涂层方式有单涂层及多涂层。涂层厚度通常在 $2 \sim 18 \mu\text{m}$ 之间，较薄的涂层比厚涂层在冲击切削条件下，经受温度变化的性能要好，这是因为薄的涂层应力较小，不易产生裂纹。在快速冷却和加热时，厚涂层就像玻璃杯极快地加热冷却一样，容易产生碎裂，用薄涂层刀片进行干切削可以使刀具寿命提高 40%。表 3-13 是常见涂层的物理力学性能。

表 3-13 常见涂层的物理力学性能

涂层名称	硬度 HV	密度/(g/cm ³)	弹性模量 / × 10 ⁵ MPa	热导率 [× 418.68 W / (m · K)]	热膨胀系数/(× 10 ⁻⁶ /℃)	摩擦因数	氧化温度/℃
TiC	2900 ~ 3800	4.9	3.2 ~ 4.6	0.04 ~ 0.06%	7.4 ~ 7.8	0.25	1100
TiN	1800 ~ 2800	5.4	2.6	0.05 ~ 0.07	8.3 ~ 9.5	0.49	1200
TiCN	2800 ~ 3000	5.1	5.1	0.07 ~ 0.08	8.1 ~ 9.4	0.34	—
TiAlN	2300 ~ 3500	4.0	4.0	—	6.5 ~ 7.0	0.50	—
Al ₂ O ₃	2300 ~ 2700	4.0	4.0	0.07	6 ~ 9	0.15	稳定

表 3-14 是各种常见涂层的散热特性。由该表可知，各种涂层的散热性能与 TiN 相比，TiAlN 最好，TiC 次之。因此，干切削加工刀具大都采用了 TiAlN 作为涂层材料。

表 3-14 各种常见涂层的散热特性

涂层材料	加热梯度/(℃/s) (30 ~ 90s)	散热梯度/(℃/s) (10 ~ 30s)	TiN 基体
TiN	0.17	0.15	1
TiC	0.24	0.70	4.82
TiAlN	0.28	0.85	5.96
CrN	0.14	0.27	1.87

涂层根据其性质可分为硬涂层和软涂层，表 3-15 是几种硬涂层和软涂层的性能。表 3-16 则是用于干切削加工刀具的涂层。

表 3-15 几种硬涂层和软涂层的性能

涂层类型	涂层名称	颜色	显微硬度 HV0.05	耐热性	摩擦因数	主要应用
硬涂层	TiN	金色	2.300	中	中	攻螺纹
	TiNAl ^R -UTURA	灰蓝	3.000	高	比 TiN 稍高	钻削、攻螺纹、铸铁
	TiblAl X. TREME	灰蓝	3.500	高	比 TiN 稍高	整体硬质合金铣刀
	TiCN	深蓝	3.000	中	与 TiN 相当	铣刀
软涂层	MoS ₂	黑灰	<50	高	非常低	通常涂在硬涂层之上
	WC/C	深灰	1.000	中	非常低	

表 3-16 用于干切削加工刀具的涂层

涂层类型	涂层名称	涂层厚度/ μm	显微硬度 HV0.05	耐热性/°C	摩擦因数
硬涂层	TiN	1~5	2100~2600	450~600	≈ 0.4
	TiCN	1~5	2800~32000	350~400	0.25~0.4
	TiAlN	1~5	2600~3000	700~800	0.3~0.4
	TiAlCrYN	1~5	2600~3000	900	0.3~0.4
软涂层	MoS_2	0.2~0.5	—	—	<0.2

(1) TiN 涂层 TiN 涂层是使用最广泛的刀具涂层材料之一。其常用的基体材料是高速钢。TiN 涂层的硬度远高于高速钢，摩擦因数低，并且具有良好的韧性、很高的热硬性，能承受一定弹性变形的压力。其膨胀系数与高速钢相近，在切削过程中当温度变化时，它们之间的热应力较小，具有良好的结合强度。还具有良好的化学稳定性、耐蚀性和抗氧化性，不易与被切削金属发生化学反应。另外，TiN 膜的制备方法简单，几乎可以用所有的物理和化学气相沉积法制备。

TiN 涂层刀具主要用于高速切削或加工较高硬度的材料，如正火材料或调质材料的切削加工、锡青铜材料的滚切削以及螺纹加工和钻削加工。

图 3-30 所示是 TiN 涂层钻头进行干钻削加工时，刀具使用寿命与

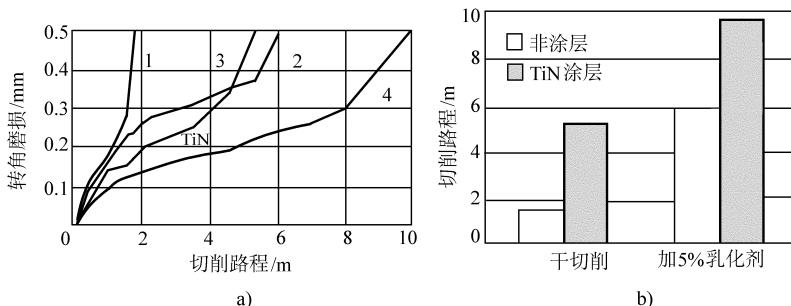


图 3-30 TiN 涂层对钻头转角磨损和切削路程的影响

a) 对钻头转角磨损的影响 b) 对钻头切削路程的影响

1—非涂层 (干切削) 2—非涂层 (5% 乳化液)

3—TiN 涂层 (干切削) 4—TiN 涂层 (5% 乳化液)

注：钻头直径： $\varnothing 18\text{mm}$ ；钻孔深度：35mm；钻头材料：高速钢；工件材料：45 钢；

工件材料硬度：200HBW；钻孔速度：35m/min；每齿进给量：0.05mm。

非涂层钻头使用5%乳化液时的寿命基本相同，这就意味着TiN涂层在这里承担并代替了乳化液的功能。

图3-31是采用TiN涂层高速钢拉刀进行干切削与普通湿切削的拉削长度比较。从该图中可以看出，干拉削完全可行，拉刀寿命提高了5~10倍（工件材料为16CrNiMo6 BG和42CrMo4V），而且取消了含氯切削液的使用。

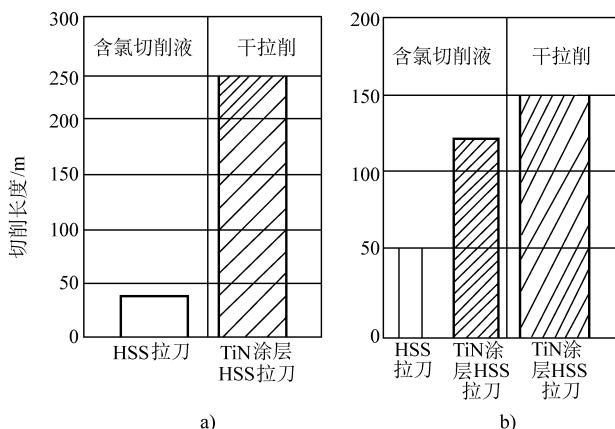


图3-31 干切削与普通切削的拉削长度比较

a) 16CrNiMo BG b) 42CrMo4V

注：拉削速度为10m/min，切削厚度为0.1mm

(2) Al_2O_3 涂层 Al_2O_3 涂层具有良好的力学性能、极好的热硬性和化学稳定性，因此， Al_2O_3 涂层刀片具有良好的抗月牙洼磨损能力，刀具寿命得到了很大的提高。另外， Al_2O_3 涂层具有低的热导率，且随着温度的升高其热导率降低，这种特性在切削加工中，可阻碍切削热传到刀具的切削刃，防止切削刃受热发生塑性破損。

Al_2O_3 涂层主要用于硬质合金刀具表面，其涂层后的刀具兼有陶瓷刀具的耐磨性和硬质合金的强度，适用于陶瓷刀具因脆性大而易于崩刃的场合，可用于铸铁和高速钢的切削加工。

例如，用 Al_2O_3 涂层刀片加工汽车铸铁制动盘和制动鼓等零件时，其寿命比TiC涂层刀片、金属陶瓷及陶瓷刀要高2~4倍，比硬质合金刀具高6~8倍。在 $v = 365 \sim 550 \text{ m/min}$ 切削速度范围内，其性能可与

陶瓷刀具相比。一般在 Al_2O_3 涂层与基体间增加一层 TiN、TiC 或 TiCN 膜，不但可以提高耐磨性，而且可防止高温下 Co、W 等元素从硬质合金基体中向涂层扩散，从而改善涂层与基体的结合强度。但中间层 TiC 作为脆性相，会降低膜的强度。

(3) TiAlN 涂层 TiAlN 是一种较好的能适合高速干切削的涂层。TiAlN 抗氧化温度高，在切削时会产生 TiAlN 膜，具有较好的抗氧化性能，开始氧化温度为 $700 \sim 800^\circ\text{C}$ ，高于 TiC、TiN 等涂层的氧化温度。TiAlN 在高温时比 TiN 硬度高，热稳定性好。其高温时产生的氧化膜 (TiAlN 膜) 可改善刀具与工件、切屑的摩擦，减少热量的产生。此外，TiAlN 涂层的热导率也低于 TiN 等涂层，从而起到隔热作用，使刀具在干切削时能承受更高的温度。

图 3-32 是干铣削时，TiN 和 TiAlN 涂层刀具的切削性能比较，结果表明 TiAlN 涂层具有明显的优越性。

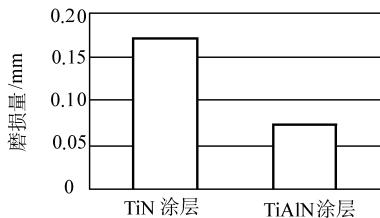


图 3-32 TiN 和 TiAlN 涂层刀具的切削性能比较

注：切削速度：50m/min，进给量：55mm/min，铣削宽度：15mm，
铣削深度：2.5mm，铣削路程：1m，工件材料 stL 2379。

美国某企业研制的一种改进型的 PVD - TiAlN 涂层，硬度与 TiCN、TiN 相当，而热稳定性温度比 TiCN 和 TiN 高，达到 1450°C 。这种 TiAlN 涂层随 Al 含量的提高，其硬度更高，抗高温断裂性更强，而氧化温度不变。如果在其上再涂一层 MoS_2 或 TiCN 涂层，将形成具有耐高温磨损和摩擦因数低的复合涂层，适合高速切削、干切削和难加工材料的切削加工，其铰孔和钻孔加工能力比未涂层刀具提高三倍，磨损后还可重磨和重涂，而且切削温度越高，其切削效率越高。

日本某公司最初用传统的高速钢滚刀，浇注切削油进行切削，工件、滚刀参数和切削条件见表 3-17。滚刀表面采用 TiCN 涂层，图 3-33 是连续加工少数工件 (26 件) 后滚刀的磨损情况。由该图可见，滚刀

左后面出现异常磨损，已超过其寿命不宜继续使用。TiN涂层滚刀的使用结果也大致相同。采用新开发的 TiAlN 涂层高速钢“超级干滚刀”，在与表 3-17 相同的加工条件下，滚刀寿命明显改善。图 3-34 是新滚刀的磨损状况，其寿命约提高了五倍。为了确认这种结果，在实际生产线上对这种新滚刀的使用情况进行了评价，结果见表 3-18，刀具寿命

表 3-17 工件、滚刀参数和切削条件

工件参数	模数	2.25mm
	齿数	49
	螺旋角	21.5°
	齿高	6.5mm
	齿宽	40mm
	材质	SCM415
	硬度	170HBW
滚刀参数	外径	φ75mm
	头数	3
	容屑槽数	16
切削条件	切削速度	200m/min
	进给量	2.4mm/r
	切削方式	顺向滚削

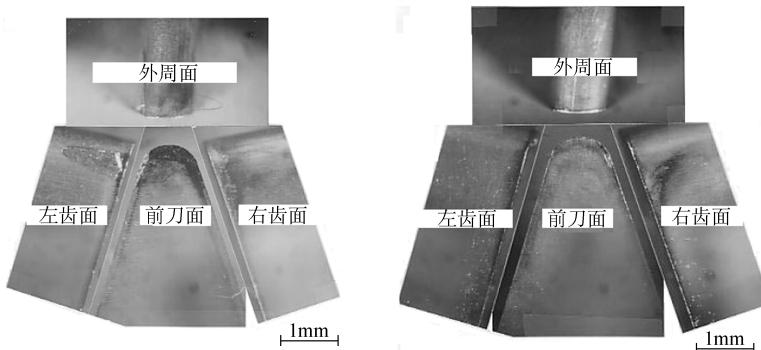
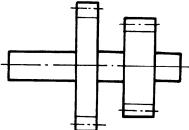
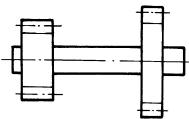


图 3-33 连续加工少数工件
后普通滚刀的磨损情况

图 3-34 “超级干滚刀”的磨损情况

表 3-18 超级干切削滚刀在生产线上的应用情况

工 件	切 削 速 度	刀 具 寿 命
汽车变速齿轮 1  模数: 1.75mm, 齿数: 36, φ80mm	100m/min→200m/min (44.9s→29.9s)	600 件→3200 件 (5.3 倍)
汽车变速齿轮 2  模数: 2.25mm, 齿数: 17, φ52mm	90m/min→200m/min (47.4s→31.2s)	400 件→2320 件 (5.8 倍)

的提高超过了五倍，而且在加工过程中未出现啃削现象，加工精度明显高于传统的湿滚削。这种滚刀经过重新涂覆后，仍可采用 200m/min 的切削速度，寿命可延长四倍。即使在开刃后不重涂，前刀面处于无涂层状态下使用，在切削速度与传统湿切相同的条件下，刀具使用寿命也能延长两倍以上，所发挥的性能仍然大大超过传统湿切。

最近开发的一种新型涂层 TiAlCrNO，是在 TiAlN 的基础上添加了适量的 Cr 和 O。Cr 的加入增加了 TiAlN 涂层的抗氧化性，而 Cr 和 O 的加入则减少了涂层的压应力，因而使得 TiAlN 涂层刀具具有更加优良的切削性能。

德国 Guhring 公司也研制了一种称之为 Firex 的多涂层新工艺。该涂层利用瑞士 Plait 公司生产的真空涂层炉，采用超薄 TiN 和 TiAlN 对刀具进行交替涂覆。所涂覆的刀具具有粘附力强、耐热性高和抗磨损性好等特性，聚集了 TiN、TiAlN 以及 TiNC 等涂层的优点，非常适合于干切削加工。例如，用 Firex 涂层硬质合金钻头平均一次可钻削 2000 个孔，而 TiN 涂层钻头只能钻削 1200 个孔；在钻削 6Al4VTi 材料时，Firex 涂层钻头平均一次可钻削 12000 个孔，而 TiN 涂层钻头只能钻削 2500 个孔。由此可见，Firex 涂层钻头的效率比 TiN 涂层钻头高。图

3-35是Firex涂层硬质合金钻头钻削45淬硬钢的磨损曲线。在1998年芝加哥国际机床展览会上，Guhring公司还配套展出了新开发出的用于亚干切削的加工设备“GumJet System”和OK460UF超细颗粒硬质合金刀具材料，配以Firex涂层工艺，完全可以对各种孔进行高效干切削加工。

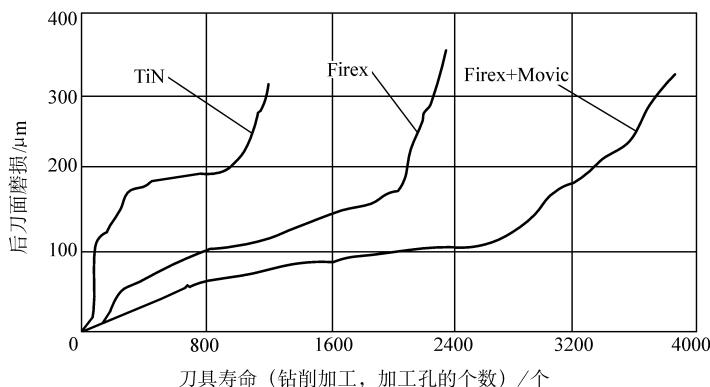


图 3-35 Firex 涂层硬质合金钻头钻削 45 淬硬钢的磨损曲线

注：工件材料：45 淬硬钢；刀具：DP300 整体硬质合金刀片；
直径：8.5mm；孔深：25mm；切削速度：395r/min；进给量：0.18mm/r。

(4) AlTiN 涂层 对于铝含量（质量分数）超过 50% 的 TiAlN 涂层通常称为 AlTiN 涂层，以区别原来的 TiAlN。由于铝含量的加大，这种涂层具有很高的硬度和非常优异的耐磨性能，在刀具/工件接触区温度高达 800 ~ 900℃ 时，AlTiN 涂层仍能保持高硬度，因而被认为是“下一代”的耐磨新涂层。目前，已经有一系列的刀具使用含铝（质量分数）超过 65% 的 AlTiN 涂层，例如，Carboloy 公司的涂层铝含量（质量分数）为 67%，IonBend 公司的涂层铝含量（质量分数）为 70%，Ceme Con 公司则在 2002 年 7 月开发了一种用于生产超级氮化物涂层的工艺，铝含量（质量分数）达到 80%。

AlTiN 涂层刀具的理想加工速度为 183 ~ 244m/min，主轴转速为 20000 ~ 40000r/min 或更高，但背吃刀量不宜太大。在这样的加工条件下，可改善主轴受力状况，提高生产效率，获得良好的加工表面质量。

AlTiN 涂层刀具是高硬度（>40HRC）、高耐磨性材料高速加工及

干式高速加工的理想刀具，可应用于铣削、钻削、车削加工等加工中。图 3-36 是这种涂层在钻削加工中的应用情况；图 3-37 是在齿轮加工中的应用情况；图 3-38 是在车削加工中的应用情况；图 3-39 是铝合金成形加工中的应用情况。表 3-19 是这种涂层与其他几种涂层的性能比较。

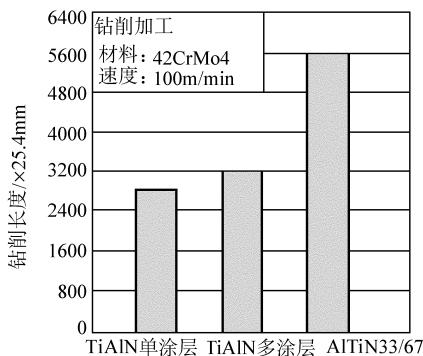


图 3-36 AlTiN 涂层在钻削加工中的应用

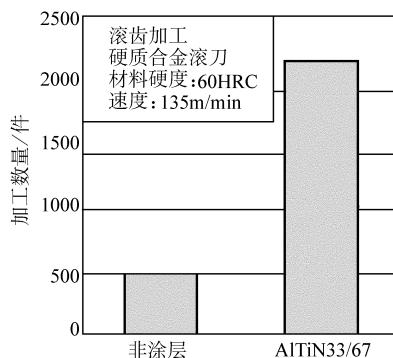


图 3-37 AlTiN 涂层在齿轮加工中的应用

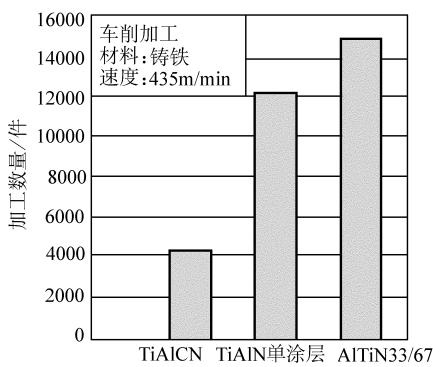


图 3-38 AlTiN 涂层在车削加工中的应用

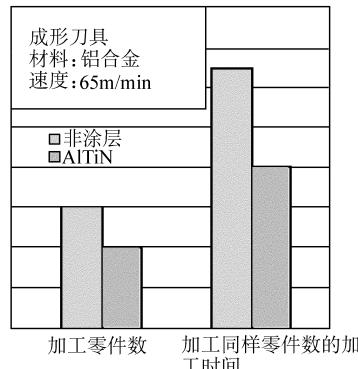


图 3-39 AlTiN 涂层在铝合金成形加工中的应用

(5) 刀具表面的富氧 TiAlON 涂层 TiAlN 比 TiN 涂层有更高的耐氧化性，主要是因为 TiN 在 600℃时会产生氧化，而 TiAlN 在 800℃时才开始氧化，并且由于氧化易在刀具表层形成致密的 Al_2O_3 层，增加了 TiAlN 膜抗扩散和抗氧化能力。非合金化的 Al_2O_3 显微硬度比较低，

表 3-19 AlTiN 涂层与其他涂层的性能比较

涂层	TiN	TiCN	TiAlN	Firex (特殊的 TiN-TiAlN 多层涂层)	AlTiN	MolvGlide MoS ₂ 基涂层
类型	耐磨的硬涂层	耐磨的硬涂层	耐磨的硬涂层	耐磨的硬涂层	耐磨的硬涂层	软的润滑涂层
颜色	金黄色	灰紫色	紫黑色	紫红色	暗灰色	银色
涂覆工艺	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD
涂覆温度/℃	500	500	500	500	500	150
涂层结构	单层	梯度涂层	单层	多层	单层	单层
厚度/μm	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.0
纳米硬度/GPa	24	30	33	30 ~ 33	38	
摩擦因数	0.5	0.25	0.5	0.5	0.6	0.1
热稳定性/℃	595	450	800	800	900	800
应用情况	广泛应用于切削加工及成形加工	冲压加工、铣削、滚齿及攻螺纹加工	钻削、车削及干式高速加工	广泛应用于高韧性、高硬度及耐热材料的加工	硬材料 (>40HRC) 加工、高速加工及干式高速加工	应用于各种硬涂层之上，提高刀具的润滑性能

(1500HV0.05)，但 Al₂O₃ 刀具材料却具有高的抗磨损性，这主要是由于 Al₂O₃ 中的 α 相有良好的氧化稳定性和高的热稳定性。加入氮，可形成 Al-O-N 涂层；若再加入钛，则可形成富氧 Ti-Al-O-N 涂层，使涂层的显微硬度和耐磨损性得到进一步提高。因此，通过 PVD 沉积工艺形成的 TiAlON 涂层具有高的氧化稳定性，而且显微硬度提高很多，改善了刀具干切削加工时的耐磨损性。

单层 TiAlON 涂层由于界面之间存在氧化杂质，其显微硬度较低 (<2000HV0.05)，粘结强度不高。为了确保有良好的粘结强度和高的显微硬度，可采用 TiAlN - TiAlON 基的多层涂层。

德国汉诺威大学进行了将 TiAlON 涂层在干式钻削中的应用研究。

结果表明，涂层层数不同、涂层中的元素含量比例不同，涂层的耐磨损性能也不相同。图 3-40a 为不同涂层形成方式（MSIP 表示磁控管溅射离子涂覆；H. I. STM 表示高离子流溅射；HF 表示高频）及不同元素

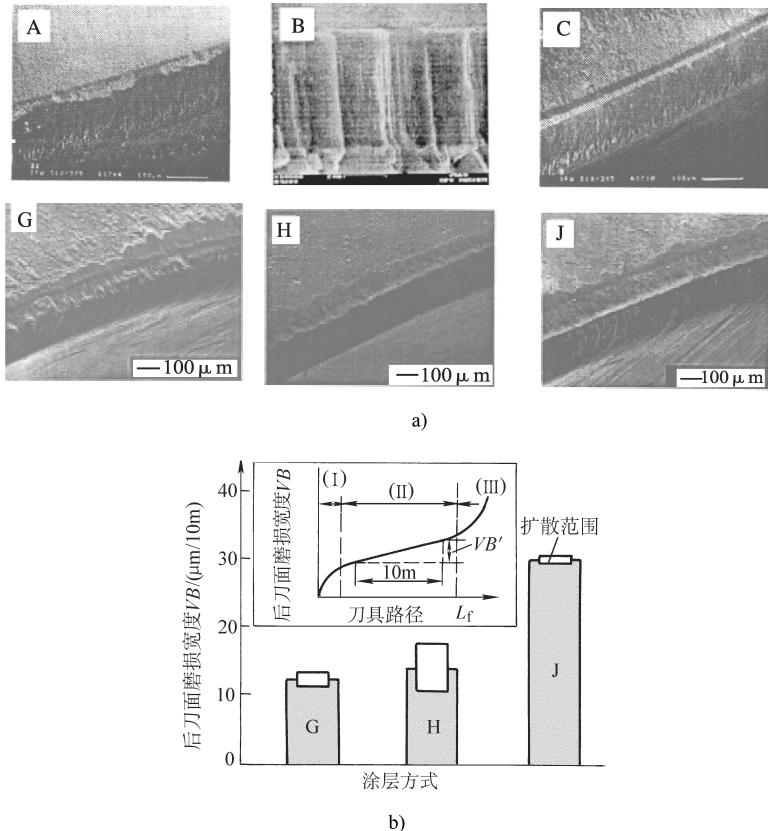


图 3-40 TiAlON 涂层在干式钻削中的磨损状态

a) 涂层微观组织面貌

A—W (Al) / W (Ti) 为 0.6 B—密集的细柱状结构晶粒

C—增加 Al 含量细化晶粒 G—MSIP TiAlON + TiAlON (7 层)

H—H. I. STM TiAlON + TiAlON (2 层) J—HF 辅助 MSIP TiAlON + Al_2O_3

b) 磨损曲线 (2 次试验)

注：加工方式：不通孔钻削，干式钻削；工件材料：45 淬硬钢；

加工条件： $v = 80\text{m}/\text{min}$, $f = 0.16\text{mm}/\text{r}$, 孔深为 2.5 倍的孔径；

刀具：P25/30 麻花钻，N 型，几何角度 A；涂层厚度：3 μm 。

比例含量的涂层微观组织形貌图。图3-40b所示为TiAlON多层涂层的磨损曲线。当钻削路径为1~3m时，TiAlON涂层钻头切削刃的磨损(V_B')迅速增大。TiAlN-TiAlON双层涂层(H)的磨损速率最大，在钻削1000个不通孔(钻削路径20m)后，切削刃的磨损为0.2mm。而HF辅助的MISP TiAlN/ Al_2O_3 涂层(J)和7层TiAlON涂层(G)的磨损速率则明显减小。

图3-41是TiAlON和TiAlN涂层在干钻削中的切削性能比较。 $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 为0.6的MISP涂层钻头后刀面磨损宽度最大。如果TiAlN涂层(A)和TiAlON涂层(C, H, J)的显微硬度相同，由于TiAlON涂层的高温性能明显改善，TiAlON涂层在钻削调质钢时表现出了非常优异的抗磨损性能。其中，7层TiAlN+TiAlON涂层的抗磨损性能最好。

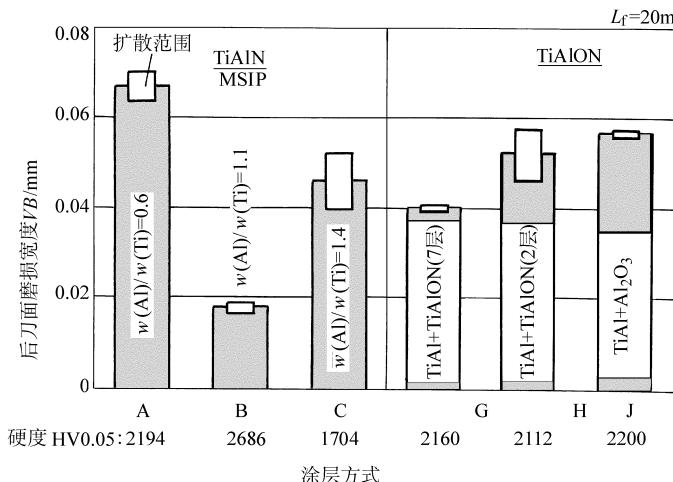


图3-41 在干钻削中TiAlON和TiAlN涂层的切削性能比较

注：加工方式：不通孔钻削，刀具：麻花钻，N型，几何角度A；

工件材料：45淬硬钢；加工条件： $v=80\text{m}/\text{min}$, $f=0.16\text{mm}/\text{r}$ ，

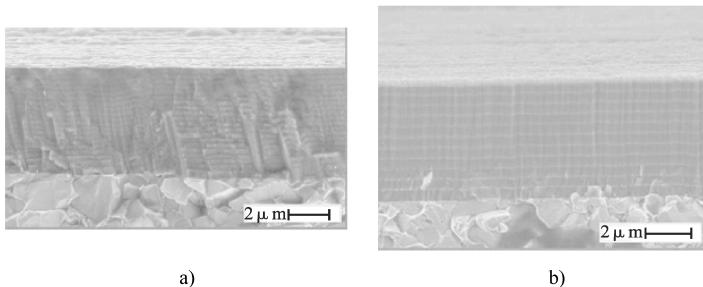
孔深为2.5倍的孔径；干式钻削；涂层厚度：3μm，A、B、C：MSIP。

(6) 氧化物 PVD 多涂层 氧化物涂层具有高的耐磨损性和低的摩擦因数，可以最大限度地阻止热量传入刀具基体。常用的氧化物涂层有TiAlN-Al₂O₃、TiAlN-ZrO₂，和TiZrN-ZrO₂，其主要性能见表3-20。

表 3-20 氧化物涂层主要性能

涂层类型	厚度/ μm	硬度 HV0.05	涂层数
AlTiN-Al ₂ O ₃	3~4	3000	40
TiAlN-ZrO ₂	3~4	2900	20
TiZrN-ZrO ₂	3~4	2800	20

图 3-42a 是 AlTiN-Al₂O₃涂层的显微照片，AlTiN-Al₂O₃涂层具有高的硬度、很好的附着力以及优良的微观结构。图 3-42b 是 TiAlN-ZrO₂涂层的显微照片。

图 3-42 AlTiN-Al₂O₃涂层和 TiAlN-ZrO₂涂层的显微照片

a) AlTiN-Al₂O₃涂层的显微照片 b) TiAlN-ZrO₂涂层的显微照片

在 SGi70（德国高强度球墨铸铁牌号）材料上钻削直径 6mm、深 18mm 的不通孔。采用和湿切削相同的切削用量，切削速度为 80m/min，进给量为 0.35mm/r。采用五种不同刀具，即非涂层刀具、TiAlN 涂层刀具，其他三种是氧化物 PVD 多涂层刀具，刀具基体都是硬质合金，失效形式为切削刃的磨损宽度达到 0.3mm。图 3-43 是这五种刀具的切削效果对比图。

由图 3-43 可见，没有涂层的刀具，在加工 10 个孔后，切削刃磨损就达到了 0.3mm（切削长度 0.2m），TiAlN 涂层刀具切削长度可达 4.5m；而氧化物 PVD 多涂层刀具则显示了良好的抗磨损性，TiZrN-ZrO₂涂层刀具的切削长度可达 7.2m，AlTiN-Al₂O₃涂层刀具可达 16.2m，切削效果最好的 TiAlN-ZrO₂涂层刀具则可达到 18.1m，是一般 TiAlN 涂层刀具寿命的四倍。

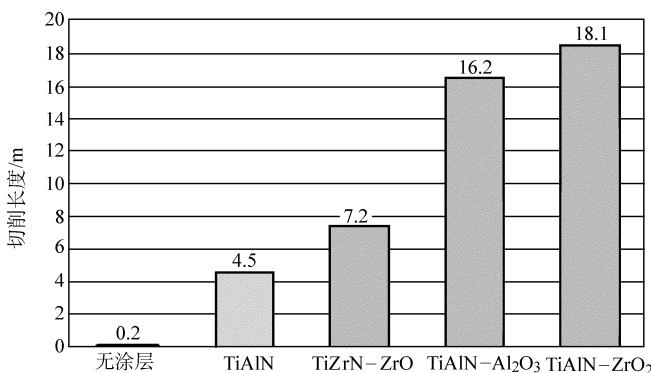


图 3-43 五种刀具的切削效果对比图

3. 超硬材料涂层

(1) 金刚石涂层 金刚石涂层有许多优异的性能，主要表现在以下几方面：

- 1) 具有极高的硬度和耐磨性。
- 2) 与有色金属的摩擦因数比其他材料都低，约为硬质合金的一半，不仅降低了变形和切削力，而且不产生积屑瘤，改善了加工表面粗糙度。
- 3) 具有高的弹性模量，可长期保持切削刃的锋利性，有利于减少切削及磨削力。
- 4) 金刚石涂层还具有高的化学稳定性，耐绝大部分酸、碱和溶剂的腐蚀。

但是高温下金刚石化学活性高，易与被加工工件材料发生化学反应，导致化学磨损，所以金刚石涂层刀具不适合加工铁合金。

用金刚石涂层刀具加工硅铝合金和铜合金等有色金属、玻璃纤维和碳纤维等工程复合材料，以及石墨和未烧结的陶瓷与硬质合金等制品，其切削性能和耐磨性与聚晶人造金刚石（PCD）刀具大致相当，刀具寿命是普通硬质合金刀具的 50~100 倍。此外，因金刚石涂层刀具中不含有金属结合剂，它是在低于 1000℃ 的温度和低于 0.1 MPa 的压力条件下制成的，杂质含量低，纯度接近 100%，硬度和热导率比 PCD 刀具更高，摩擦因数更小，化学稳定性更好，可采用比 PCD 刀具更高

的切削速度，而其价格又比同类 PCD 刀具要低，且易于沉积到各种复杂型面和几何形状的刀具上。近年来，刀具生产企业已相继推出了金刚石涂层的丝锥、铰刀、立铣刀，以及用于加工印制电路板上小孔的金刚石涂层硬质合金钻头和带断屑槽的各种可转位刀片。

目前，形成金刚石涂层的方法主要有三种：等离子法、材料热电子放射法和化学反应法。等离子法根据等离子发生方法的不同又可分为微波等离子法、高频等离子法及电弧等离子法；材料热电子放射法（热丝法）是最早开发的金刚石气相合成法；化学反应法是用乙炔和氧混合气体燃烧焰内得到的乙炔过剩部分生成金刚石。从金刚石成膜的稳定性、速度及整体成本来考虑，目前主要采用的方法是微波等离子法和热丝法对刀具进行涂层。

金刚石涂层一般是采用化学气相沉积法（CVD）形成。CVD 金刚石在刀具上的应用主要有两种类型：即金刚石厚膜焊接刀具和金刚石薄膜涂层刀具。前者是先制备一层金刚石厚膜（厚度大于 $300\mu\text{m}$ ），然后通过激光切割成所需要的形状，再将其焊接在刀体上。这种厚膜焊接刀具已进入商品化生产，并开始替代 PCD 刀具。但由于金刚石厚膜的表面粗糙，且脆性大，为此给刀具的刃磨和抛光带来较大困难。金刚石涂层刀具则是直接在刀头表面沉积一层厚度小于 $20\mu\text{m}$ 的金刚石薄膜，其制备工艺简单，成本较低，而且可以做成各种复杂的几何形状。

金刚石涂层最本质的问题是金刚石膜与基体的附着强度，附着强度在很大程度上取决于基体材料的性质。作为金刚石涂层刀具的基体材料，除了应具有较高的硬度和韧度外，还要满足两个方面的要求：一是金刚石膜的化学气相沉积温度一般都在 600°C 以上，故基体材料要有较好的热稳定性；二是要有利于金刚石的成核和生长。大量的实验研究表明，基体材料的物理和化学性质对金刚石的成核和生长有极大的影响。例如，在高温高压法合成金刚石的过程中，充当催化剂的过渡金属，如铁、钴、镍等就不宜作为 CVD 金刚石膜的基体。因为在 CVD 条件下，石墨是碳的稳定相，过渡金属会稳定石墨相，抑制金刚石生长；另外，这些过渡金属对碳有较高的溶解度，也不利于金刚石形核。目前，金刚石涂层刀具多选用钨钴类硬质合金（WC-Co）或氮化硅（ Si_3N_4 ）等陶瓷材料作基体。 Si_3N_4 陶瓷基体与金刚石的热膨胀系数相近，二者之间的附着性能较好，但 Si_3N_4 陶瓷的韧度较差。WC-Co

硬质合金是当前应用最为广泛的刀具材料，它不仅具有较高的硬度和热硬性，而且韧度较好，能够被加工成各种复杂形状的刀具。金刚石涂层与硬质合金基体的结合，可以有效地解决传统刀具材料硬度与韧度之间的矛盾，使金刚石涂层刀具既有金刚石的硬度和耐磨性，又有硬质合金的强度和韧度。硬质合金基体的不足之处在于基体中作为粘结相的 Co 具有催石墨化的作用，对金刚石涂层的质量及涂层与基体之间的附着力有不利影响。

一般的铝合金，可加工性较好，用硬质合金钻头即能充分满足孔加工要求。但近年来，为了使铝合金具有高的强度，Si 含量较高的铝合金日益增多。这种高硅铝合金中，Si 含量（质量分数）高达 12% 以上，加工时往往会出现 Si 硬质粒子，硬质合金钻头遇到析出的 Si 粒子，容易造成刀具损伤，降低使用寿命。

金刚石涂层刀具加工时，可降低刀具/切屑及刀具/工件表面之间的摩擦因数，能承受高温，具有很高的热硬性，是铝材干切削加工时最适宜的刀具之一。例如，用金刚石薄膜涂层刀具，在 C616A—1 精密车床上干车削铝合金 [未经热处理 Si 含量（质量分数）为 12% ~ 14% 的共晶铸造铝硅圆棒]，刀具几何参数为： $\gamma_0 = 0^\circ$ ， $\alpha_0 = 15^\circ$ ， $\kappa_r = \kappa_r' = 60^\circ$ ，刀尖圆弧半径 $r = 0.7 \sim 1.0\text{mm}$ ，刃口钝圆半径 $r_n = 0.05\text{mm}$ ；切削用量见表 3-21。

表 3-21 切削用量表

切削参数	1	2	3
切削速度 / (m/min)	150	240	400
进给量 / (mm/r)	0.05	0.1	0.2
背吃刀量 / mm	0.1	0.2	0.4

图 3-44 表示了切削路程与表面粗糙度值的关系，图 3-45 是金刚石涂层刀具与未涂层的 YG6 的磨损对比曲线。

从图 3-44 和图 3-45 可以看出：

1) 用金刚石薄膜涂层刀具干切削硅铝合金，刀具初期切削时，试件表面粗糙度值不稳定，这主要是因为金刚石颗粒形成的刃口不平造成的，进入刀具正常磨损阶段，试件表面粗糙度值非常稳定，切削路程相当长，具有很好的干切削性能。

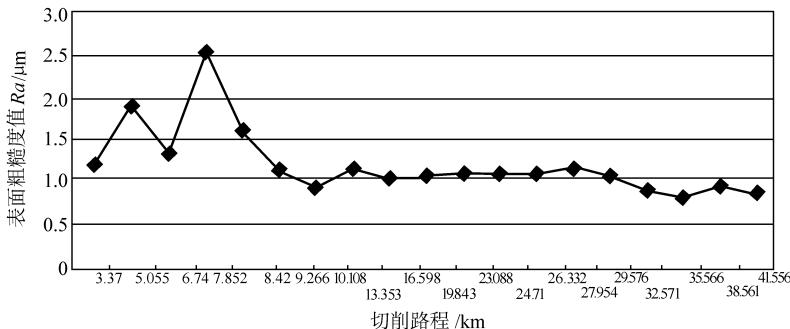


图 3-44 金刚石薄膜涂层刀具切削路程与表面粗糙度值的关系

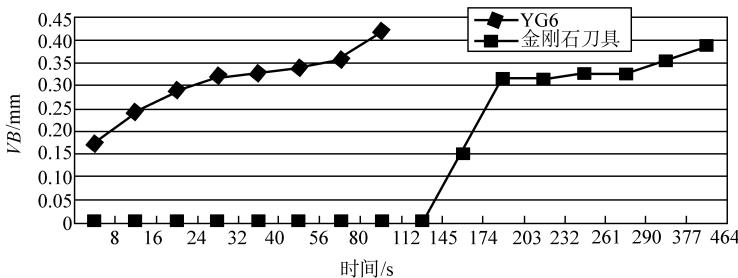


图 3-45 金刚石涂层刀具与未涂层的 YG6 的磨损对比曲线

2) 切削用量对表面粗糙度影响最大的是进给量，在较高切削速度的情况下，只要进给量合适则表面粗糙度值变化不大。因此，加大刀尖圆弧半径，进给量对表面粗糙度的影响会减小。

3) 刀具损坏以涂层破损为主，因此，提高金刚石薄膜涂层刀具的寿命主要是提高涂层与基体的粘结强度。

4) 金刚石涂层大大改善了刀具的切削性能，金刚石薄膜（涂层）刀片寿命比基体 YG6 提高 10 倍以上，在同等条件下，以 $VB = 0.15 \text{ mm}$ 为标准，YG6 仅切削 8s， $VB = 0.17 \text{ mm}$ ；金刚石刀具切削 174s， $VB = 0.15 \text{ mm}$ ，寿命是 YG6 的 22 倍。

(2) 刀具表面的类金刚石涂层 类金刚石涂层 DLC (Diamond Like Carbon) 是一种非晶体，其大量的类金刚石结合剂在很大程度上决定了涂层的电学、光学、机械和化学特性。

通常，这类涂层不导电（电阻率为 $10^6 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ），击穿电场强度约为 10^6V/cm ，其颜色在深棕色到深灰色之间变化，在波长 $1.2 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 的红外区间是透明的。它不会受任何化学物质的影响，但会很快地被氧等离子体带走。加入适当的原子，可从本质上增加这类涂层对氧等离子体的稳定性。

类金刚石涂层的主要力学性能包括：

- 1) 显微硬度在 $2000 \sim 3000 \text{HV}$ 之间。
- 2) 与金属的干摩擦因数为0.19（相对湿度为50%时）。
- 3) 弹性模量为90%。
- 4) 与其他材料几乎不产生粘结反应。
- 5) 最大耐久温度，对钢基体为 600°C ，而对于陶瓷基体则大于 800°C 。
- 6) 可以施加涂层的基体材料范围广，包括钢、铝、镁、陶瓷等。

加入适当原子的类金刚石涂层刀具可以用来加工钢材。通常碳和铁产生相互作用，但这类金刚石涂层没有这种趋势，因为掺杂物可使类金刚石碳的原子结构稳定性增加，这样就可以加工钢和铁材料，其寿命是TiN涂层的两倍。特别是在高速钻削和加工钢件螺纹时，其寿命大约是非涂层刀具的17倍。图3-46是类金刚石碳涂层与TiN、金刚石涂层的加工性能比较。加工工件材料是AlSi18。这种材料由于含有大量的偏析硅晶体，因而与刀具的粘结趋势很强。从图3-46中可以看出，类金刚石碳涂层与TiN、金刚石涂层相比，其碳涂层的磨损最小。

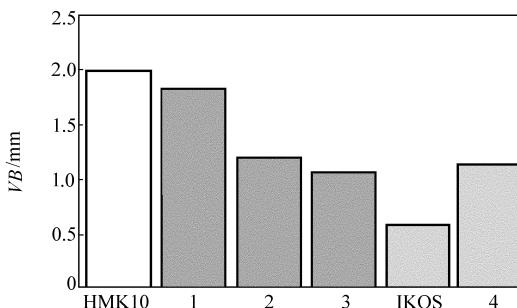


图3-46 类金刚石碳涂层与TiN、金刚石涂层的加工性能比较

(3) 刀具表面的氮化碳(C_3N_4)涂层 氮化碳是20世纪90年代

初才出现的新型超硬材料。20世纪80年代后期Cohen等人通过理论计算预言类似 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 结构的化合物 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 可能具有超过金刚石的硬度，此说立即引起国内外研究人员的广泛关注。1993年Niu首先宣布用激光烧蚀法得到了 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 薄膜。随后研究人员用电子回旋共振-化学气相沉积(ECR-CVD)、热丝CVD、反应磁控溅射等方法成功合成了氮化碳薄膜。

武汉大学自1994年起研究氮化碳的合成方法。先后用射频CVD、磁控溅射等方法成功合成了氮化碳薄膜，并研究了氮化碳薄膜在高速钢基体上的镀膜工艺。

氮化碳涂层具有优异的性能，主要表现在以下几方面：

1) 超硬性。氮化碳是一种新型超硬薄膜材料，它在高硬度、耐磨损、低摩擦因数和导热性等方面与金刚石十分相似。氮化碳涂层的超硬特性是其在刀具上应用的关键。由表3-22可知，将氮化碳镀在刀具表面将极大提高刀具的表面硬度。

表3-22 各种材料硬度比较

材料	高速钢	硬质合金	TiN	立方氮化硼	金刚石	氮化碳
硬度 HRC	62~66	74~81	—	—	—	
硬度 HV/GPa	8~9	13~18	21	47	800	50

2) 较好的热稳定性。用热失重(TG)一差热分析(DTA)研究氮化碳在室温至1200℃的热稳定性发现，石墨相含量较小的样品在上述范围内无明显的热失重，证明氮化碳薄膜具有较好的热稳定性。

3) 与Fe元素的低亲和性。由于生成氮化碳的C-N元素构成牢固的共价键，使它在化学稳定性、耐氧化性方面与优质的陶瓷材料 Si_3N_4 非常相似。因而它没有金刚石的缺点，即金刚石涂层刀具在空气中使用超过700℃，金刚石薄膜即被氧化生成 CO_2 而被烧蚀；金刚石刀具加工铁基材料时，容易与铁发生化学反应，因而它不能加工钢材。

由于氮化碳涂层刀具具有高的硬度、良好的抗磨损能力和热稳定性，因此，是较理想的干切削刀具材料。氮化碳涂层刀具可用于加工不锈钢、耐热合金钢、球墨铸铁、钛合金、高硅铝合金等难加工材料，可以大大提高刀具的寿命和加工精度，具有很高的使用价值。试验表明，镀有氮化碳的钻头比没有镀氮化碳的钻头使用寿命提高25倍，比

镀氮化钛的钻头寿命提高三倍。氮化碳涂层刀具还能进行硬质面加工，并可以取代部分磨削。

图3-47为氮化碳涂层刀具磨损后的电子扫描照片，由该图可见，刀具的磨损主要以破损为主，前刀面明显可以看到刀具材料的剥落，没有明显的月牙洼，后刀面磨损主要由前刀面的剥落引起。

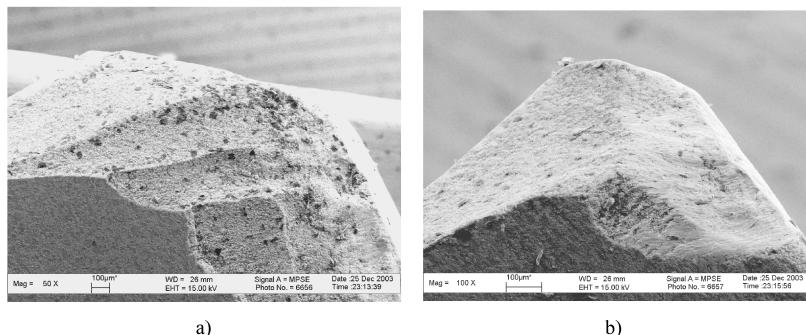


图3-47 氮化碳涂层刀具磨损后的电子扫描照片

a) 前刀面 b) 后刀面

用直径6.3mm的 C_3N_4 涂层高速钢(W6Mo5Cr4V2)麻花钻，干钻削高强度钢38CrNi3MoVA(经调质处理，36~40HRC)，钻孔深度约10mm，切削用量为：钻削速度 $v=10\text{m}/\text{min}$ (转速 $n=600\text{r}/\text{min}$)，进给量 $f=0.13\text{mm}/\text{r}$ 。其磨损曲线如图3-48所示。由该图可见，当 $VB=0.3\text{mm}$ 时， C_3N_4 涂层麻花钻的钻削时间最长，一般约为无涂层的10倍，TiN涂层的钻削时间次之，约为无涂层的七倍。应该注意的是， C_3N_4 涂层麻花钻的最后失效为崩刃，说明其脆性较大。

对 C_3N_4 涂层麻花钻头重磨其后刀面，再进行钻削试验，同所有涂层钻头相似，涂层仍会起到一定的作用。但随着重磨次数的增加，涂层即失去作用。

某企业由于齿轮经渗碳淬火热处理后的变形使得公法线公差达不到设计要求，因而需要精加工，但齿轮经渗碳淬火后表面硬

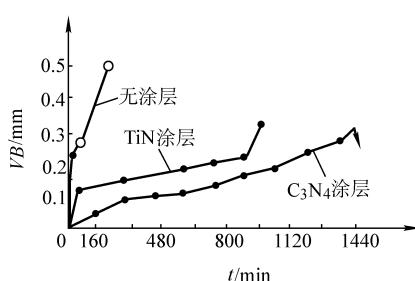


图3-48 钻孔试验磨损曲线

度达到 62HRC 以上，且该齿轮设计形状特殊，不能进行磨削，使得该齿轮的废品率一度达到 80% 以上。使用氮化碳插齿刀对热处理后的齿轮进行精加工，极大地提高了成品率，结果如表 3-23 所示。

表 3-23 齿轮加工情况

插齿刀	直径/mm	117	
	材质	W18Cr ₄ A	
	模数/mm	9	
被切齿轮	直径/mm	180	
	材质	20Cr ₂ Ni4A	
	硬度 HRC	>60 (经渗碳淬火)	
切削参数	冲程次数/(次/mm)	83	
	切削速度/(m/min)	10	
	进给量/(mm/齿)	0.1	
切削结果	白刀	切削件数	0
		磨损	刀具严重磨损
	黄刀	切削件数	4
		表面粗糙度值/ μm	3.2
		磨损量/mm	0.2
	测试机床		Y54A

注：白刀—未镀 C₃N₄/TiN 复合刀片，黄刀—镀 C₃N₄/TiN 复合刀片。

用氮化碳薄膜涂层刀具干切削硅含量（质量分数）12% ~ 14% 的硅铝合金活塞，采用的切削用量如表 3-24 所示。图 3-49 是切削用量与表面粗糙度的关系。

表 3-24 切削用量的选择

切削参数	1	2	3	4
切削速度/(m/min)	150	240	300	400
进给量/(mm/r)	0.03	0.05	0.08	—
背吃刀量/mm	—	0.1	0.2	0.4

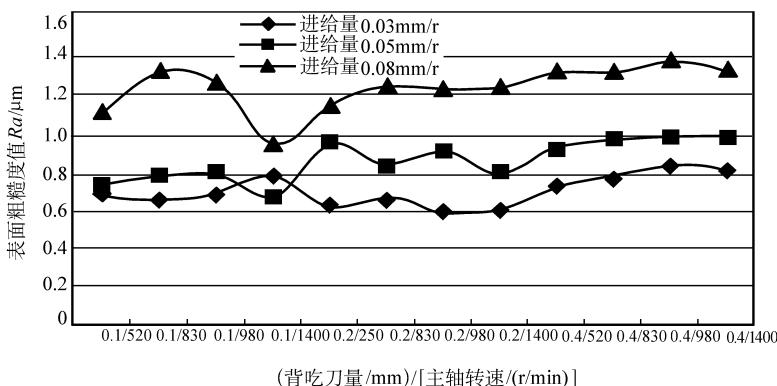


图 3-49 切削用量与表面粗糙度的关系

用氮化碳薄膜涂层刀具干切削硅铝合金，与金刚石涂层刀具相比，刀尖的积屑瘤非常小，如果选择合适的刀具几何参数，干切削加工的表面粗糙度值会更小，能满足对活塞外圆加工表面粗糙度的要求，具有很好的干切削性能。切削用量对表面粗糙度影响最大的是进给量，在较高切削速度情况下，只要进给量合适则表面粗糙度值变化不大。加大刀尖圆弧半径，进给量对表面粗糙度的影响会减小。

4. 软硬组合涂层

对刀具进行软、硬两种涂层，可充分发挥每种涂层的优点，克服缺点，有效地提高刀具的切削性能。当切削温度较低时（ $< 400^\circ\text{C}$ ），摩擦因数较小的硫化物，如 MoS_2 、 WS_2 、 TaS_2 是较理想的固体减摩材料，它们能显著降低与金属的摩擦因数，可达到 $0.1 \sim 0.2$ ，是普通刀具材料的 $1/4 \sim 1/2$ 。例如， MoS_2 涂层丝锥的寿命（切削长度为 150m）是 TiAlN 涂层丝锥（切削长度为 40m）的 3.75 倍；用 MoS_2 涂层硬质合金可转位铣刀铣削高强度钛合金零件时，铣刀寿命比未涂层铣刀提高 20%。当切削温度较高时（ 1000°C 左右），软金属 Ni、W、Al、Ti、Co 则具有更好的减摩效果。为了在降低刀具表面摩擦因数的同时，获得较高的表面硬度，可在刀具表面涂覆较硬的材料，如 B_4C 、 Al_2O_3 、 WC 、 TiAlN 、 TiCN 等。

(1) WC/C 与 TiAlN 的组合涂层 美国某刀具制造企业研制了一种称为 BALINIT HARDLUBE 的软硬结合双层涂层，这种涂层在没有润滑

剂的情况下可以改善排屑性能。其中的硬涂层是氮铝化钛 (TiAlN)，而软质涂层，即润滑层是碳化钨/碳 (WC/C)，它具有中等硬度和低的摩擦因数。这两种涂层的组合能改善切屑流动状态，并且减小了刀具/切屑表面的摩擦，降低了切削力。

BALINIT HARDLUBE 组合涂层是通过 PVD 技术进行涂覆的。TiAlN 层主要通过铝化钛在活性氮气体中用强弧法沉积而成，WC/C 层则是通过溅射法喷涂沉积而成。BALINIT HARDLUBE 的 TiAlN 层在切削过程中起保护切削刃的作用，避免或减小在高温下产生磨损。外层的 WC/C 层的滑动性和润滑性可减小切削应力，同时可控制切屑的形成，减小切屑流动过程中的摩擦，WC/C 层的微观硬度可达 1000HV0.05。

表 3-25 是各种 PVD 涂层与 BALINIT HARDLUBE 组合涂层的性能比较。

表 3-25 各种涂层性能比较

涂层种类	BAUNIT (A)	BAUNIT (B)	BAUNIT (C)	BAUNIT X-TREME	BAUNIT FUTURA	BAUNIT HARDLUBE
涂层材料	TiN	TiNC	WC/C	TiAlN	TiNC	TiAlN + WC/C
微观硬度 HV0.05	2300	3000	1000	3500	3000	3000
与钢的干摩擦 因数	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4	0.2
涂层厚度/ μm	1~4	1~4	1~4	1~3	2~5	2~6
最高工作温 度/°C	600	400	300	800	800	800
涂层颜色	金色	灰白	灰白	紫灰	紫灰	灰白

由于 BALINIT HARDLUBE 涂层综合了 TiAlN 涂层的极高硬度、热稳定性和 WC/C 涂层润滑性能的优点，解决了刀具磨损、崩刃和积屑瘤的产生等问题，因而非常适合干钻削和在塑性较大的材料上进行攻螺纹加工。例如，在合金钢上钻削不通孔（钻削深度为其直径的四倍），分别采用不同的钻头进行加工，结果如图 3-50 所示。由该图可见，BALINIT HARDLUBE 涂层刀具的加工效率明显提高。

(2) 基于 MoS₂的组合涂层 MoS₂是一种具有润滑作用的软涂层，

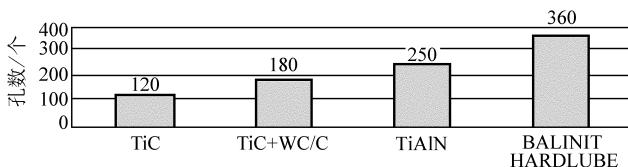


图 3-50 不同涂层刀具的加工效果比较

摩擦因数很小（与钢的摩擦因数为 0.04~0.09），可代替切削液，减少刀具/切屑表面之间的摩擦，它能防止积屑瘤产生，又有利于切屑排出。这种涂层具有特氟隆（Teflon）的特性，与刀具基体表面粘结性能优良，且形成的涂层表面光滑，摩擦因数小。这种基于二硫化钼（ MoS_2 ）的软涂层，被称为 MOVIC。在硅含量（质量分数）为 9% 的硅铝合金工件上攻螺纹时，非涂层丝锥〔基体为钴含量（质量分数）10% 的超细晶粒硬质合金〕可加工 20 个孔， TiAlN 涂层丝锥可加工 1000 个孔，而 MOVIC 涂层丝锥可加工 4000 个孔。另一种涂层是组合涂层，即将 MOVIC 软涂层涂覆在某种硬涂层上，这种涂层也在钻削钢及硅含量（质量分数）为 9% 的铝合金中得到了成功应用。

$\text{MoS}_2 + \text{TiAlN}$ 的复合涂层具有较好的综合性能，特别适合于钻削与攻螺纹。由于铝合金在切削时易产生粘刀，为防止这一现象，一般都应用切削油，而采用 $\text{MoS}_2 + \text{TiAlN}$ 复合涂层干铣削铸铝 AlSi10Mg 比未涂层的湿式加工相比，刀具寿命提高了 10%。

MoS_2 与金属或其他涂层组合在一起可极大地改善刀具的切削性能。如 MoS_2 与金属 Ti 组成的组合涂层（其代号为 MoST），其硬度比 MoS_2 本身的硬度高，具有优良的耐磨性能，应用范围非常广泛。这种涂层有低 Ti 含量（Ti 的质量分数为 10%）和高 Ti 含量（Ti 的质量分数为 20%）两种。低 Ti 含量组合涂层的显微硬度为 500HV，在 100N 载荷作用下的摩擦因数为 0.02，磨损率很低。而高 Ti 含量组合涂层的硬度比 TiN 低，在 100N 载荷作用下的摩擦因数为 0.04，磨损率比低 Ti 含量组合涂层要低很多。

MoS_2/Ti 组合涂层在众多切削加工中表现出了优异的性能。例如，分别用涂有 TiN、 TiCN （低碳含量）、 TiAlN （高铝含量）、 $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ 、 TiCN （低碳含量）+ MoS_2 涂层的高速钢丝锥钻头进行钻削对比试验。试验分别在干和加注切削液的条件下进行，在 AISI400 不锈钢（板厚

11.7 mm) 上钻削直径为 5.5 mm 的通孔, 切削速度分别为 10 m/min (转速为 530 r/min) 和 22 m/min (转速为 1060 r/min)。如图 3-51 所示, TiN 及 TiCN 硬涂层上涂覆 MoS₂/Ti 组合涂层的钻头在干加工条件下, 加工孔的数量是 TiN 涂层钻头的两倍, 是 TiCN 涂层钻头的 4.1~4.8 倍。在 TiCN 硬涂层上再涂覆 MoS₂/Ti 涂层的钻头, 在使用混合油的加工条件下, 钻头使用寿命提高了 2.4 倍。在铣削加工中, 这种组合涂层也具有优异的切削性能。例如, 对尺寸为 12 mm × 4 mm × 25 mm 的硬质合金立铣刀分别进行 TiCN 和 TiCN + MoS₂/Ti 涂层, 在干和加注切削液的加工条件下铣削 AISI304 不锈钢材料, 切削速度为 150 m/min, 进给量为 0.04 mm/r, 径向吃刀量为 4 mm, 轴向吃刀量为 5 mm, 图 3-52 是所测得的加工过程中的平均铣削力、刀具磨损和加工表面质量结果。

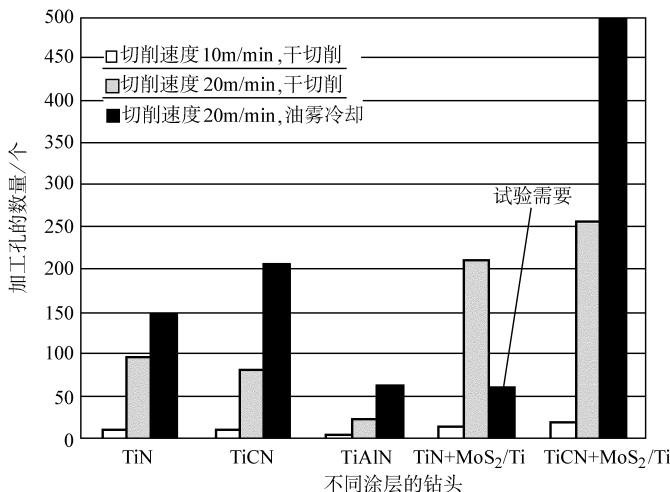
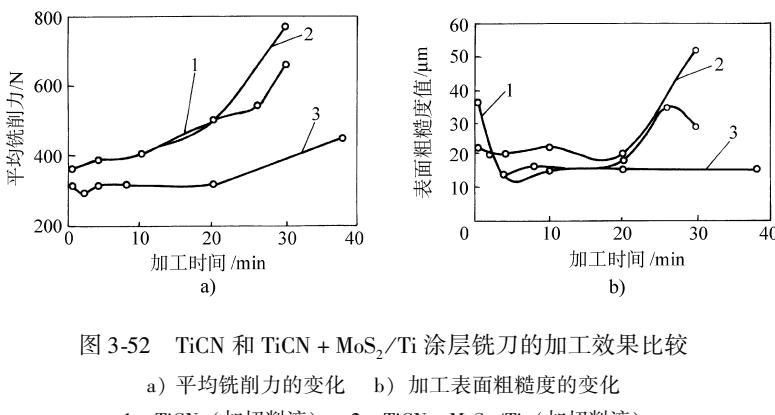


图 3-51 不同涂层钻头加工孔的数量比较

由图 3-52 可见, 与单纯的 TiCN 涂层刀具相比, TiCN + MoS₂/Ti 组合涂层切削长度更长, 平均铣削力减少, 加工表面质量得到改善, 而且这两种涂层铣刀均提高了生产效率, 改善了零件的加工表面质量。同时, 从该图中也可以看出, TiCN + MoS₂/Ti 涂层与单纯的 TiCN 涂层相比, 在加注切削液状态下进行切削, 并没有使铣削路径增加或减少平均铣削力。

图 3-52 TiCN 和 TiCN + MoS₂/Ti 涂层铣刀的加工效果比较

a) 平均铣削力的变化 b) 加工表面粗糙度的变化

1—TiCN (加切削液) 2—TiCN + MoS₂/Ti (加切削液)3—TiCN + MoS₂/Ti (干切削)

除了涂层材料外，新的涂层结构也有利于改善涂层的耐磨性能，取得良好的加工效果。研究表明，由 MoS₂和 Mo 两种材料构成的超多层涂层（总厚度 3.2 μm，含 400 个复合层）的高速钢钻头加工钛合金 Ti-6Al-4V 时，钻削转矩比未涂层钻头低 33%，避免了粘刀，比单层的 MoS₂能承受更高的氧化温度，从而保持更高的润滑性。

5. 纳米涂层刀具

纳米涂层（Nanocoating）是 20 世纪 80 年代末期才出现的，对于切削来说，这是一种很有前途的涂层方法。纳米材料是指材料颗粒尺度在 100nm 以下，直径接近原子尺寸（0.2~0.3nm）的粒子，这时，很多传统的物理原则将不复存在，而出现光、电、磁、化学、力学性能的奇异变化，因此，纳米材料被人们誉为“21 世纪最有前途的材料”。纳米涂层可采用多种涂层材料的不同组合，如金属/金属组合、金属/陶瓷组合、陶瓷/陶瓷组合、固体润滑剂/金属组合等，以满足不同的功能和性能要求。设计合理的纳米涂层可使刀具的硬度和韧度显著增加，使其具有优异的抗摩擦磨损及自润滑性能，非常适合干切削加工。

从摩擦、润滑和磨损的观点来看，硬质合金刀具的多层纳米涂层可分为四类：

1) 硬/硬组合。如碳化物、硼化物、氮化物、氧化物之间的组合，常见的有 B₄C/SiC、B₄C/HfC、TiC/TiB₂、TiN/TiB₂、TiC/TiN 等。

2) 硬/软组合。如碳化物/金属组合, 如 B_4C/W 、 SiC/Al 、 SiC/W 、 SiC/Ti 等。

3) 软/软组合。如金属/金属组合, 常见的有 Ni/Cu 等。

4) 具有润滑性能的软/软组合。如固体润滑剂/金属组合, 常见的有 MoS_2/Mo 、 WS_2/W 、 TaS_2/Ta 、 $MoS_2/Al-Mo$ 等。这些复合涂层每层由两种材料组合而成, 厚度仅为几纳米。根据切削性能需要及涂层的性质, 可交互叠加上百层, 总厚度可达 $2\sim 5\mu m$ 。

B_4C/SiC 、 HfC/SiC 和 HfC/B_4C 等硬/硬复合涂层可为刀具提供高温氧化保护。此外, 当 $TiAlN$ 中的 Al 氧化生成氧化铝时, 可改善 TiN 涂层的性能, 使其热导率减小, 抗氧化扩散的保护能力提高。Al 与硬度更高(与 TiN 相比)的 B_4C 、 SiC 、 HfC 等碳化物组成复合涂层, 可进一步改善涂层的性能。此外, 具有较小摩擦因数的氧化物膜可减少刀具与工件界面处产生的切削热。能形成这种低摩擦因数氧化物保护膜的金属有 Al、Ti、Si、Mg、V、Zr、Ta、Mo 和 W。例如, 在陶瓷表面离子注入混合的 Ti 和 Ni 而形成的表面, 具有极小的摩擦因数($0.06\sim 0.09$); 由 Zr 的氧化物形成的氧化锆表面摩擦因数更小, 且具有优异的抗热和散热性能。层状结晶的二硫化物也具有较小的摩擦因数, 例如, 二硫化钼(MoS_2)是常用的固体润滑剂, 但在空气中加热到 $350\sim 400^\circ C$ 时即显著氧化, 如将 MoS_2 与耐热金属 Mo 组合成复合涂层 MoS_2/Mo , 其耐热能力可明显提高。其他一些耐热金属的二硫化物(如 WS_2 、 TaS_2)在空气中比 MoS_2 具有更好的稳定性。因此, 由耐热金属的二硫化物与耐热金属组合的复合涂层(如 WS_2/W 和 TaS_2/Ta)具有优异的抗高温性能。

纳米涂层的涂覆可采用先进的封闭场不平衡磁溅射法(CFUMS)获得。该方法与普通磁溅射法相比, 具有效率高、功率消耗小、溅射室压力小、温度低、靶到工件距离大等优点, 获得的涂层更洁净、更致密, 性能更一致。此外, 试验证明, CFUMS 生产重复性好, 涂层具有更高的粘结强度, 摩擦因数稳定, 因而在干切削中具有更长的使用寿命。

采用 CFUMS 涂覆工艺, 在硬质合金刀具和 HSS 钻头上涂覆 B_4C/W 多层纳米涂层(100 层双材料层, 每层厚度 B_4C 为 $1.3nm$, W 为 $1.8nm$), 然后与未涂覆刀具、普通单涂层($TiAlN$)刀具、三涂层

(TiC/TiCN/TiN 和 TiC/Al₂O₃/TiN) 刀具，在 105m/min 的切削速度下对中碳钢工件进行干切削对比试验。试验结果表明，纳米涂层刀具的后刀面磨损量比未涂层刀具和常用的 TiC/Al₂O₃/TiN 三涂层刀具的后刀面磨损量大大减小。此外，随着切削时间的延长，纳米涂层刀具的切削力与未涂层刀具、TiC/Al₂O₃/TiN 三涂层刀具和 TiAlN 涂层刀具相比也显著减小。

例如，用固体润滑剂多层纳米涂层 (MoS/Mo 双材料涂层，共 400 层，总厚度 3.2 μm，每层厚 80nm) 的 HSS 钻头 (直径为 9.5mm) 与未涂层钻头进行干切削对比试验，加工工件材料为 Ti-6Al-4V 合金 (这种材料热导率低，切削时容易生成积屑瘤，加工硬化现象严重，属难加工材料)，旋转速度为 2200r/min。结果表明，钻削过程中，未涂层钻头的钻削力急剧增大，最后导致钻头卡入工件中。而多层纳米涂层钻头的钻削力减少约 33%，未发生钻头卡住现象或其他故障，钻削性能显著优于未涂层钻头。

6. 刀具涂层对加工表面质量的影响

选择合适的涂层可使刀具承受高的切削温度，降低刀具/切屑及刀具/工件表面之间的摩擦因数，减小刀具磨损和产生的热量，从而延长刀具寿命，再配上刀具基体的优良性能，完全可进行干切削加工。但是应该注意的是无论采取何种加工方式，都必须保证加工出来的零件能够满足使用要求。

在干切削过程中，如果采用涂层刀具，那么在切削加工中，不是刀具基体而是涂层与工件和切屑接触，刀具涂层对工件的加工表面质量有着直接的影响。

涂层本身的晶粒大小影响着工件的加工表面质量。传统的金刚石涂层都是由大颗粒金刚石组成的，这会造成被加工材料 (如铝合金) 的加工表面质量不高。目前，采用 CVD 技术，并选用适当的涂覆参数，可以得到表面粗糙度值小于 1 μm 的新型金刚石涂层。用以 Co 含量 (质量分数) 为 6% 的钨基硬质合金为基体材料并涂覆上述涂层的刀具加工铝合金，可以使铝合金的表面粗糙度值低于 1 μm，大大改善了工件表面质量。

对于含有多种元素的涂层，由于其中各元素的含量不一样，加工工件的表面粗糙度也不一样。例如，采用 Ti_{1-x-y}Al_xCr_yN 涂层刀具钻削灰

铸铁，钻削速度 38.5m/min，进给量 0.28mm/r。虽然同是使用 TiAlCrN 涂层，但由于涂层中的 Ti、Al、Cr、N 的含量不一样，则加工工件的表面粗糙度也不相同（见表 3-26）。

表 3-26 涂层元素含量不同时的加工表面粗糙度比较

涂层元素含量（质量分数，%）	Ti0.27A10.19Ce0.54N	Ti0.21A10.14Cr0.65N
涂层厚度/（μm）	2.4	2.6
表面粗糙度值		
R _a /（μm）	0.14	0.15
R _z /（μm）	1.78	1.88
R _z /（μm）	1.08	1.10

7. 切削加工仿真优化对刀具的选择

前述章节中对刀具材料性能、特点乃至应用的选择都做了较为详细的叙述，但随着近十年来不锈钢、钛合金、高温合金等难加工材料应用的增加，现代刀具已不局限于高速钢刀具和硬质合金刀具，涂层刀具越来越广泛地被应用，因此某种材料被切削时选择合适的刀具就变得尤为重要。材料切削性能的研究是一个包含众多影响因素的复杂过程，如果单纯依靠试验手段，不但耗时费力，增加生产成本，而且加工过程中的变形、温度、刀具磨损等也很难准确适时获知。随着计算机技术及其硬件的迅猛发展，有限元法的应用已经日趋完善。采用有限元法研究难加工材料的切削性能，针对工件材料优化刀具材料和切削参数的选择，也是一条很好的途径。

基于金属塑性成形有限元软件 DEFORM-3D，利用有限元法对工件进行三维车削仿真研究。Deform 分析制造工程实际问题的顺序如下：

- 1) 定义工程实际问题，收集所需的数据。
- 2) 生成 FEM 网格，生成一个 DEFORM 数据库。
- 3) 进行仿真，处理仿真结果。

仿真采用四个节点组成的四面体单元来划分刀具网格。单元尺寸以 35000 个相对网格数来表示，为提高精度，还可以在刀尖处设定 4:1 的尺寸比例来细化网格，也就是将刀尖处的网格在刀具网格粗划分的基础上再细化 25%。

本实例刀具选用 WC 为基体，分别涂单层材料 TiC、TiN、Al₂O₃、

TiCN, 加工 $\phi 50\text{mm}$ 圆柱形不锈钢 AISI-316h (美标, 中国标准 0Cr17Ni12Mo2)、钛合金 Ti-6Al-4V (TC4)、高温合金 IN718 (美标, 中国标准 GH4169)、调质钢 30CrNiMo8 (2A) (德标, 中国标准 30Cr2Ni2Mo) 材料, 设置环境温度为 20℃。

仿真时, 固定刀具几何参数, 仿真实切削用量选择见表 3-27。

表 3-27 仿真实切削用量

工件材料 \ 切削用量	背吃刀量 a_p/mm	进给量 f/mm	切削速度 v_c/mm
不锈钢	4	5	90
钛合金	4	4	60
高温合金	4	5	80
调质钢	4	5	80

通过仿真和分析研究表明: 四种难加工材料中钛合金 Ti-6Al-4V 切削力最小, 其次是不锈钢 AISI-316h, 接着是调质钢 30CrNiMo8 (2A), 而高温合金 IN718 的切削力最大; 高温合金 IN718 的切削温度是最高的, 不锈钢 AISI-316h 的切削温度是最低的。调质钢 30CrNiMo8 (2A) 的切削温度稍高于切削钛合金 Ti-6Al-4V 时的切削温度。如果四种难加工材料分别用四把不同涂层刀具切削时, WC + Al₂O₃涂层刀具表征出的切削力最小。表 3-28 ~ 表 3-33、图 3-53 和图 3-54 反映了四种难加工材料被四种不同涂层材料刀具切削时切削力大小和切削温度高低的情况。

表 3-28 切削不锈钢时四种不同刀具材料对切削力的影响

刀具材料 \ 切削力/N	WC + TiC	WC + TiN	WC + TiCN	WC + Al ₂ O ₃
F_x	19	18	24	22
F_z	403	350	400	380
F_y	140	135	157	140
F	427	375	430	405

由表 3-28 表明: 切削不锈钢时, 切削力的大小与刀具材料的硬度有关, 在 TiC、TiN、TiCN、Al₂O₃ 中, 他们的硬度分别为: 3200HV、1950HV、3400HV、3000HV。随着刀具材料硬度的增大相应的切削力也随之变大。

表 3-29 切削钛合金时四种不同刀具材料对切削力的影响

刀具材料 切削力/N	WC + TiC	WC + TiN	WC + TiCN	WC + Al ₂ O ₃
F_x	19	18	20	20
F_z	340	300	320	330
F_y	95	90	110	100
F	353	313	338	345

由表 3-29 表明：切削钛合金时，切削力的大小也与刀具材料的硬度有关，在 TiC、TiN、TiCN、Al₂O₃ 中，它们的硬度分别为：3200HV、1950HV、3400HV、3000HV。随着刀具材料硬度的减小相应的切削力也随之变小。

表 3-30 切削高温合金时四种不同刀具材料对切削力的影响

刀具材料 切削力/N	WC + TiC	WC + TiN	WC + TiCN	WC + Al ₂ O ₃
F_x	20	26	32	30
F_z	800	820	900	700
F_y	100	250	230	230
F	806	857	929	737

由表 3-30 表明：切削高温合金时，切削力的大小与切削区在高温时的反应特性有关，在 TiC、TiN、TiCN、Al₂O₃ 中，它们的反应特性分别为：轻微、中等、较大、不反应。随着反应特性的加剧相应的切削力也随之变大。

表 3-31 切削调质钢时四种不同刀具材料对切削力的影响

刀具材料 切削力/N	WC + TiC	WC + TiN	WC + TiCN	WC + Al ₂ O ₃
F_x	45	42	43	40
F_z	600	640	660	560
F_y	200	230	250	230
F	634	681	707	606

由表3-31表明：切削调质钢时，切削力的大小也与切削区在高温时的反应特性有关，在TiC、TiN、TiCN、Al₂O₃中，它们的反应特性分别为：轻微、中等、较大、不反应。随着反应特性的加剧相应的切削力也随之变大。

表3-32 切削四种不同工件材料时对切削力的影响

(单位：N)

刀具材料\工件材料	AISI-316h	Ti-6Al-4V	IN718	30CrNiMo8(2A)
WC + TiC	427	353	806	634
WC + TiN	375	313	857	681
WC + TiCN	430	338	929	707
WC + Al ₂ O ₃	405	345	737	606

由表3-32表明：切削不锈钢 AISI-316h、钛合金 Ti-6Al-4V 时，在四种刀具中均是选用 WC + TiN 涂层刀具切削力最小；切削高温合金 IN718、调质钢 30CrNiMo8 (2A) 时，在四种刀具中均是选用 WC + Al₂O₃ 涂层刀具切削力最小。

表3-33 切削时，四种不同工件、刀具材料对切削温度的影响

温度/℃\工件材料	AISI-316h	Ti-6Al-4V	IN718	30CrNiMo8(2A)
TiC涂层 刀具	$T_{刀具}$	212	256	294
	$T_{工件}$	686	804	1040
TiN涂层 刀具	$T_{刀具}$	256	308	351
	$T_{工件}$	703	776	1040
TiCN涂层 刀具	$T_{刀具}$	228	273	308
	$T_{工件}$	678	785	1130
Al ₂ O ₃ 涂层 刀具	$T_{刀具}$	536	607	601
	$T_{工件}$	882	1200	898
				713

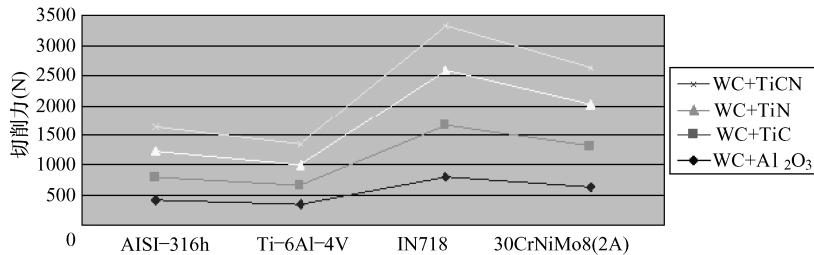


图 3-53 工件材料对切削力影响的比较

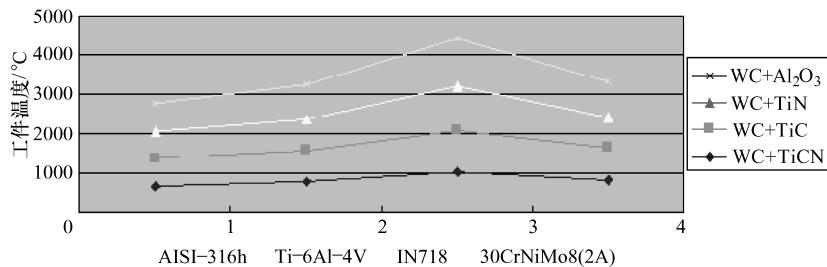


图 3-54 工件材料对工件切削温度影响的比较

由表 3-33 表明：切削不锈钢 AISI-316h 时，在四种刀具中选用 WC + TiCN 涂层刀具切削温度最低；切削不锈钢钛合金 Ti-6Al-4V 时，在四种刀具中均是选用 WC + TiN 涂层刀具切削温度最低；切削高温合金 IN718、调质钢 30CrNiMo8 (2A) 时，在四种刀具中均是选用 WC + Al₂O₃ 涂层刀具切削温度最低。

由上述仿真结果可以看到，有限元仿真实现强大的生命力，用同样的方法也可以拟定目标，选择被加工材料理想的刀具和优化的切削参数。但仿真毕竟和实际切削过程有一定距离，所得参数和结果只是为实际应用提供方向，供参考。

3.3.4 干切削刀具结构设计

1. 干切削刀具结构的设计准则

与普通加工一样，加工方法的多样性对于切削的刀具结构也提出

了多种多样的要求。干切削加工刀具的设计准则包括：

1) 热扩散是干切削加工中基本问题之一。因此，刀具结构设计必须考虑使加工过程中产生的热量尽可能少，也就是说刀具结构应力力求做到低切削力及低摩擦。

2) 用于深孔加工的钻头通常必须考虑排屑问题。因此，深孔加工刀具的设计必须确保具有特别好的排屑效果。例如，为干加工而专门研制的 ALPHA 22 型深孔钻头，很好地遵循了上述设计准则。这种钻头可以在不进行润滑和冷却的情况下，可钻削深度达 7~8 倍直径的孔。它是采用特殊的 40°螺旋角结构，结合较高钴含量的微晶粒硬质合金，实现较大的螺旋角和较大的前角，同时在使用过程中具有较高的可靠性。

3) 干切削刀具设计应力力求遵循“低切削力”设计原则，即要求刀具具有较大的前角，并配合有适宜的切削刃形状。例如，TITEX PLUS 刀具可以通过较窄的钻心和较大的倒锥实现比较低的摩擦。而且刀具特有的槽形轮廓，可以实现良好排屑，保证低摩擦切屑的流动，ALPHA22 的切削部分如图 3-55 所示。用直径 8.5mm 的这种钻头，采用 70m/min 的钻削速度，0.16mm/r 的进给量，钻削 C45 时，切削扭矩明显下降，如图 3-56 所示。

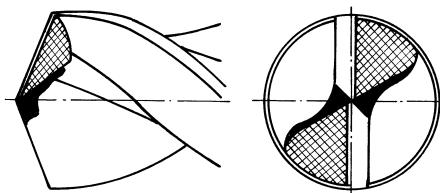


图 3-55 ALPHA22 的切削部分

在干切削加工中，刀具几何形状的优化非常重要。标准刀具不适宜干切削，因此，干切削加工应选择优化的刀具几何形状，以减少加工中刀具与切屑间的摩擦。刀具几何形状优化应做到：第一，减少刀具/工件表面之间的接触面积，如增大钻头的倒锥量和螺旋角；第二，考虑刀具表面的最大润滑性，防止积屑瘤的产生。尽管近期在新型刀具材料的制备与开发上取得了很大的进步，但用金属陶瓷、陶瓷、CBN 和 PCBN 制造的刀具仍然比硬质合金要脆的多，不能经受太大的压力，因此，用这些材料制造的刀具必须结合其特点进行设计，即对它加强支撑，分散压力。

为了加强刀具刃口强度，通常可采用以下三种刃口强化措施：

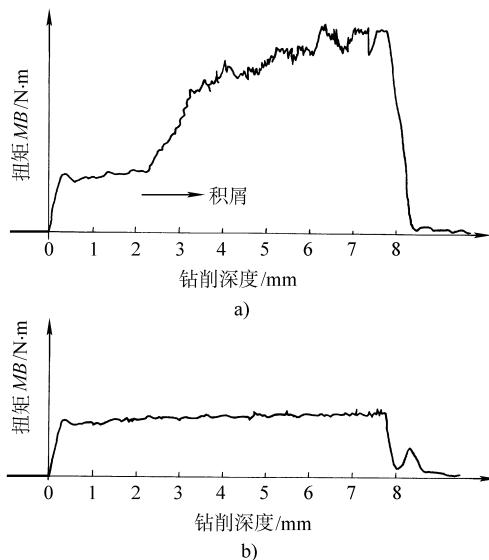


图 3-56 对 C45 进行干钻削时的扭矩情况

(a) 普通整体硬质合金钻头 b) ALPHA22 钻头

(1) T形刃带 T形刃带就是一个倒棱——在刃口上磨出窄的平面，以取代较脆弱而锋利的切削刃。用此法进行刀具使用寿命设计时，一个重要的任务就是要找出最佳的平面宽度和能赋予切削刃适当强度和寿命的角度，这是因为大的宽度和加大刀片的角度无疑会增加切削力。

(2) 强化 强化就是圆整锋利的刀口。虽然强化刀具不像T形刃那样有棱有角，但是强化对于精加工用的先进刀片材料效果很好。这些强化刀具用于切削时，应该采用小背吃刀量、低速进给，并保持切削压力最小。

此外，在干切削加工时，细颗粒优质硬质合金刀具和金刚石刀具的切削刃口可作轻微的小钝化，以其自身基体的强度来保持刃口的锋利，达到降低切削温度的目的。这不但可保持刀具的高性能，而且还可保持刀具的最佳使用寿命。

2. 干车（铣）刀具设计要点

(1) 刀片设计 在车削或铣削加工中，切屑通常带走大部分热

量，对于普通铣削或车削刀具，由于切屑与前刀面的接触面积大，会使积聚的热量增加，产生月牙洼磨损，降低刀具寿命。因此，通常应使刀具有大的前角和刃倾角。但前角增大后，切削刃强度会受影响；此时，应以适宜的切削刃负倒棱或前刀面的加强单元，使刀尖和刃口有足够的材料和较合理的方式承受切削热和切削力，减缓冲击和月牙洼扩展，使刀尖和刃口可在较长的切削时间里保持足够的强度。

图 3-57 所示的是干铣削刀片的几何形状，由于具有大的前角和后角，因而可大大减小刀具与切屑之间的接触面积，使切屑带走大量热量。图 3-58 则是干车削和普通车削的加工过程比较，由图可见，当切屑流过普通车削刀片的前刀面时，由于接触面积大，传入刀具的热量多，从而产生月牙洼磨损，降低刀具寿命；而采用图 3-58b 所示的刀片，刀具前刀面上有加强棱，刀具与切屑的接触面积大大减小，绝大部分热量被切屑带走，切削温度可比普通刀片降低约 400℃，同时也增大了剪切角，使刀具寿命显著提高，并允许采用高的切削速度，可提高生产效率，若保持普通的切削速度，则刀具寿命可提高 3~4 倍。

此外，减小切屑/工件表面的接触区，也可以减少传入工件的热量。采用图 3-59 所示的可转位刀片（SDMT1506PDR-ML），可以在接触区形成鳞状切削面，切屑朝侧向弯曲，可控制其流出方向，使排屑非常容易，这对于干切削非常重要。

如采用图 3-60 所示具有大前角和大刀倾角的干铣刀片，实验证明，可大大减小刀具与切屑之间的接触面积，使切屑带走大量热量。

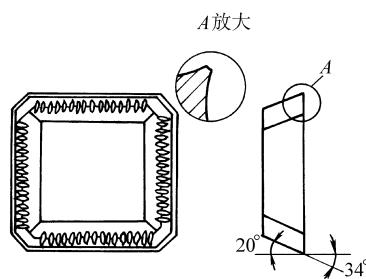


图 3-57 干铣削刀片的几何形状

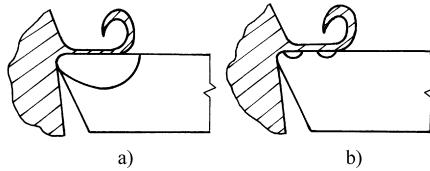


图 3-58 干车削和普通车削的加工过程比较

a) 干车削 b) 普通车削

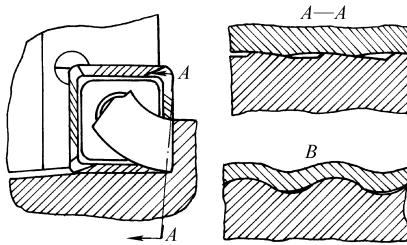


图 3-59 最小接触面摩擦的断屑几何形状 (B 为普通断屑几何形状)

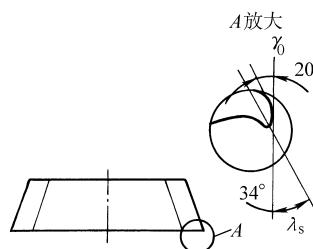


图 3-60 具有大前角和大刃倾角的干铣刀片

对于陶瓷刀具，由于其脆性较大，因此，可以选用 T 形或双 T 形棱面，或者研磨，或几种方法组合。例如，美国 Valenite 公司推荐将 $0.5 \times 30^\circ$ 的 T 形棱面用于 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 刀片，干切削加工淬硬钢，并尽量采用小的主偏角。常用的刀片几何形状是正方形、三角形和 80° 菱形。

对 CBN 刀具，若切削刃的倒棱太大，在加工淬硬钢时，会使刀具与工件接触处温度过高、使刃口很快磨损。因此，一般不宜采用大倒棱，刃口可采用斜面或倒圆及负前角。

(2) 刀具应用举例 图 3-61 是用于加工大型冷铸轧辊的 PCBN 刀具，这种 PCBN 刀具具有以下结构特点：

1) 采用负刃倾角 $\lambda_s = -6^\circ$ 。负刃倾角具有加强刀尖的作用，刀尖不易打掉。切削时冲击点落在刀尖的后端，这对保护刀尖起了重要作用。 $\lambda_s \neq 0^\circ$ 的切削刃在切入工件过程中，不是整个切削刃同时接触，而是逐渐切入，因而冲击力较小，切削平稳。采用负刃倾角，可以提高切削刃强度，减小实际的楔角，使切削刃锋利。因此，在硬态切削时，可以减少切入抗力，较采用 $\lambda_s = 0^\circ$ 时，不易引起振动，以免崩刃打刀。

2) 采用较大的主偏角和过渡刃。 75° 强力切削车刀的主偏角为 75° ，与 90° 偏刀相比，刀具的使用寿命较高。选择 75° 主偏角，比 60° 的不易发生振动，可允许较大的背吃刀量和进给量，但又比 90° 的寿命高。为进一步提高刀具寿命，在刀尖处磨一个主偏角等于 45° 的过渡刃。这样刀具寿命更长，而又不易产生振动。过渡刃的长度一般为 $a_p/4$ ，也可采用圆弧过渡刃。

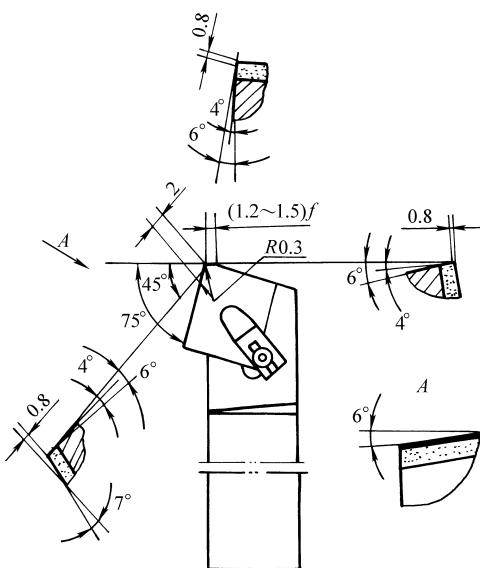


图 3-61 高速干切削大型冷铸轧辊的 PCBN 刀具

3) 采用了修光刃。进给量加大后，已加工表面的表面粗糙度就要增加，在切削刃上磨一小段与刀杆中心线垂直的直切削刃，就可以解决这个问题。直切削刃的长度一般取 $(1.2 \sim 1.5) f$ ，长了会引起振动。有了修光刃，装刀时，则必须保证直切削刃与工件中心线平行。

4) 采用较小的后角。高速干切削大型冷铸轧辊专用 PCBN 刀具的主切削刃、过渡刃和修光刃都采用 4° 的后角。较小的后角，一是为保证切削刃强度，提高抗冲击性；二是减小振动，以免引起崩刃打刀；三是在后刀面上，切削刃以下 0.8mm 一段的后角是 4° ，再下面一段的后角为 6° ，其目的是为了便于研磨，切削刃附近的一段后刀面表面粗糙度要低，必须研磨，而其余部分则不必研磨，但要精磨。

通过以上的结构设计，使这种 PCBN 刀具具有以下切削性能：

- 1) 允许大切削用量： a_p 为 $2 \sim 5\text{mm}$ ； f 为 $0.1 \sim 0.3\text{mm/r}$ ； v 为 200m/min 左右或 $500 \sim 1000\text{m/min}$ 。
- 2) 冲击韧度好。刀具在上万次冲击作用下不崩刃打刀，完全满足冷硬铸铁轧辊包括间断车削在内的高速干切削要求。
- 3) 刀具寿命长。该刀具的寿命是硬质合金刀具寿命的 $50 \sim 100$ 倍。

4) 刀具锋利, 加工质量好。当采用 a_p 为 1~2mm; f 为 0.1mm/r; v 为 200m/min 左右或 800~1000m/min 时, 表面粗糙度值 Ra 可达 0.4μm。

3. 干螺纹加工刀具设计要点

目前, 在用丝锥攻螺纹时, 以采用含有有机氯化物抗极压的乳化液效果最好。但有机氯化物对环境污染很大。为了完成干攻螺纹, 在丝锥参数设计时, 必须考虑以下几方面的问题:

- 1) 有小的摩擦阻力, 以获得尺寸准确和表面粗糙度值小的螺纹。
- 2) 槽型设计应使切屑易于卷曲, 并自由离开螺纹孔。
- 3) 对丝锥表面进行涂层处理, 以获得理想的表面状态, 减小切削应力, 保护丝锥。
- 4) 增大刀具的容屑槽空间和背锥的锥度。

德国 Emuge 螺纹刀具厂为减少环境污染, 研制开发了 øKO 丝锥, 即生态有利丝锥, 它可在较广范围的材料上攻螺纹而无须切削液。这种丝锥的尺寸范围有两种, 即 M5~M10 的加强柄尺寸系列和 M12~M20 的尺寸系列。

干切削加工钢件螺纹丝锥的槽型通常为螺旋槽, 加工通孔螺纹和不通孔时的螺旋角大小不同。如加工不通孔螺纹时, 往往采用 35° 的大螺旋角; 当孔深大于两倍丝锥直径时, 可采用小螺旋角, 通常为 5°, 此时丝锥切削锥部长度为 $C/2 \sim 3$ 牙。而干切削加工铸铁螺纹时, 无论是通孔还是不通孔, 丝锥槽型均为直槽, 其切削锥部长度为 $C/2 \sim 3$ 牙。对于小直径丝锥, 为了提高强度和刚度, 其槽型也可设计成特殊形状, 如无槽挤压丝锥。无槽挤压丝锥用于加工小直径螺纹或塑性较大材料上的螺纹是非常有效的。干切削加工丝锥通常均需进行涂层处理, 常用的涂层有 TiN 或 TiCN。日本 Syun-ichi Yamagata 研究开发了钢件干切削挤压丝锥。与普通加切削液挤压丝锥相比, 可显著提高丝锥寿命。如用普通挤压丝锥加工冷轧钢板上 M4×0.7 的通孔螺纹, 加工约 7000 个孔时, 丝锥切削部分便产生磨损与粘结, 使切削无法继续进行。而采用干切削挤压丝锥, 加工 50000 个以上的孔也不产生粘结和显著磨损, 丝锥还可继续使用。使用表明, 干切削挤压丝锥与普通挤压丝锥相比, 刀具寿命可提高数倍或数十倍。

图 3-62a 是用普通丝锥与干切削丝锥加工螺纹孔数量的比较。加工

要求： $M6 \times 1-G7P$ ，螺纹长度3.2mm（通孔）；工件材料：锌钢板；底孔直径：5.55mm；切削速度：15m/min。由图3-62a可以看出，普通丝锥加工100个螺纹孔时，切削部分的螺纹牙就产生粘结现象，而干切削丝锥的寿命可提高80倍。图3-62b则是湿式攻螺纹与干攻螺纹加工的螺纹数量的比较。试验条件： $M5 \times 0.8$ 丝锥，螺纹长度11mm（不通孔）；工件材料：LY-2；底孔直径：4.2mm（切削）、4.5mm（挤压）；切削速度：15m/min（切削），10m/min（挤压）。其结果表明：在一定条件下，干攻螺纹是可能的。

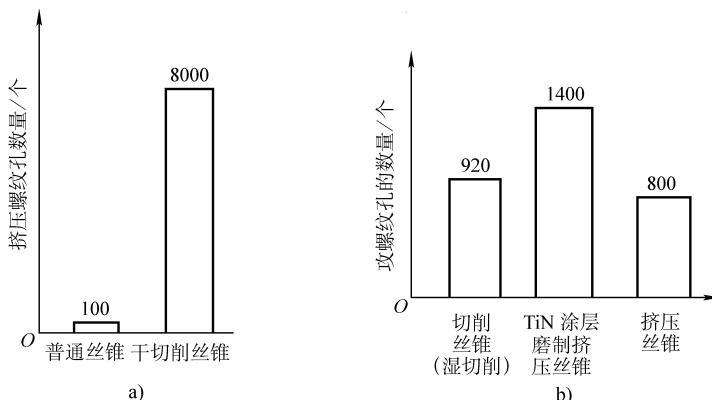


图3-62 不同方式加工螺纹孔数量的比较

- a) 普通丝锥与干切削丝锥加工螺纹孔数量的比较
- b) 湿式攻螺纹与干攻螺纹加工的螺纹数量的比较

4. 其他干切削刀具的设计

除选择合理的刀具材料及进行适宜的涂层外，干切削还需根据不同加工条件，选用合适的刀具结构及几何参数。如可采用热管式刀具、回旋型刀具和特殊几何形状的新型刀片等，以获得更理想的干切削效果。

图3-63所示为热管式车刀和热管式面铣刀。它们的结构与普通车刀和硬质合金面铣刀相同，所不同的是车刀刀体或铣刀的单个刀齿内部制成了热管。热管刀具是一种冷却刀具，它可大大降低切削温度（热管的热导率比相当的银、铜棒高几百倍），提高冷却效果，故无须再从外部浇注切削液，尤其适合于在数控机床、加工中心和自动生产线上

应用。图 3-64 是采用热管刀具的效果对比图。从该图中可以看出，利用热管刀具时，在相同条件下，其切削温度可降低 50~60℃，热管刀具前刀面的平均温度仅为普通刀具的 2/3。热管刀具目前已成功应用于车刀和铣刀上，一般可提高刀具寿命 2~3 倍。可见，热管刀具用于干切削，将有助于提高刀具寿命。

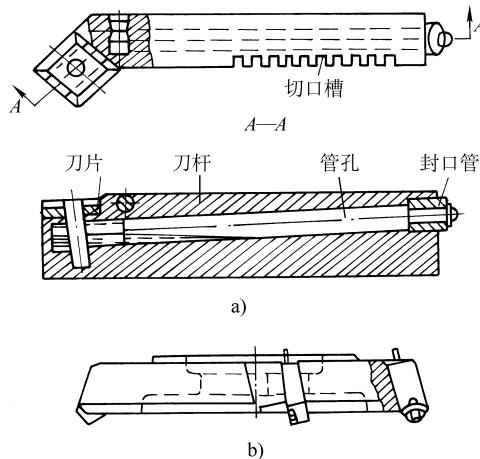


图 3-63 热管式车刀和热管式面铣刀

a) 热管式车刀 b) 热管式面铣刀

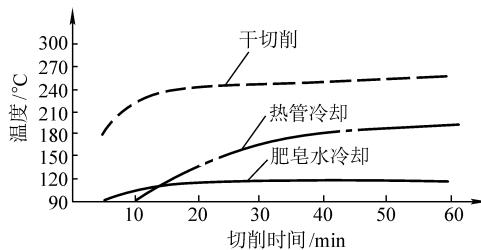


图 3-64 热管刀具的效果对比图

日本三菱金属公司开发出一种适用于干切削的“回转型车刀”，该刀具采用圆形超硬刀片，刀片的支持部分装有轴承，在加工中刀片能自动回转，使切削刃始终能保持锋利，具有加工效率高，加工质量好，刀具寿命长等特点。

开发易于排屑的刀具结构也是干切削刀具的一个发展方向。国外已开发出了利用冷风、真空原理等的刀具，用这种刀具进行切削加工，对环境不会造成任何污染，而且排屑效果非常好。图3-65是吸引式车刀的原理图，它是利用真空原理，在切削区形成负压，通过管道将切屑吸走。图3-66所示的是吸引式铣刀的工作原理图，这种铣刀可使切屑回收率在95%以上，大大改善了环境，降低了成本，这种刀具最适宜于柔性制造系统（FMS）或加工中心等现代加工设备。

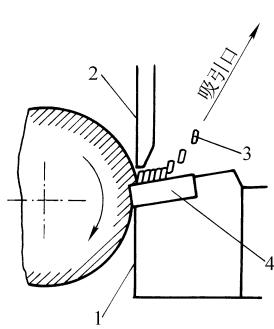


图3-65 吸引式车刀的原理图

- 1—刀夹
- 2—挡板
- 3—切屑
- 4—刀片

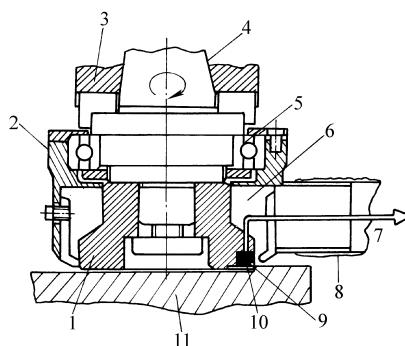


图3-66 吸引式铣刀工作原理图

- 1—端铣刀本体
- 2—外壳
- 3—机床主轴
- 4—刀杆
- 5—轴承
- 6—容屑空间
- 7—吸引机
- 8—导管
- 9—刀片
- 10—切屑导向板
- 11—被加工工件



第4章

干切削技术的应用

干切削技术于 20 世纪 90 年代源于欧洲，目前在西欧各国最为盛行。美国、日本、加拿大、以色列、德国等国家在干切削技术的研究应用方面处于领先地位。据统计，目前德国制造业有 20% 左右采用干切削技术。干切削作为一种先进的制造技术，代表了今后制造技术的一个发展方向。目前干切削的应用工艺参数和相关数据虽不能像传统金属切削那样完善，但通过其在车削、铣削、钻削、磨削等机床上试验、应用的具体案例，可以帮助我们更好地了解对工件实施干切削的过程，了解干切削（含亚干切削）中辅助条件的应用，对于干切削的推广和应用具有实际的指导意义。

4.1 干车削加工

由于车削加工中，刀具与工件的相对运动一目了然，切削区的热量比较稳定，容易通过采用新型刀具、选用合理的进给量和切削速度实现干车削加工，因而干车削是目前应用最广泛的干切削加工工艺方法。

根据加工对象的特点、加工过程中采用的不同辅助措施等可以将干车削分为硬车削、低温冷却干车削加工和激光辅助干车削加工等。

4.1.1 硬车削

1. 硬车削的定义

通常所说的硬车削是指用车刀对淬硬钢（50 ~ 63 HRC）材料进行的切削加工，这种加工通常是作为最终加工或精加工，实现以车代磨。

淬硬钢材料通常是指淬火后具有马氏体组织，硬度高、强度也高、塑性很低的工件材料，硬度 $>55\text{HRC}$ 时，其强度 σ_b 约为 $2100\sim2600\text{MPa}$ 。通常，工件在热处理淬硬之前就已经完成了粗加工工序，只有精加工在淬硬状态下进行。精磨是精加工最常用的加工工艺，但其加工范围窄，投资大，生产效率低。随着加工技术的发展，硬车削代替磨削已经成为可能。同样，钻削、铣削等也能实现硬切削。表4-1是包括硬车削在内的几种硬切削加工方法的常用切削参数及加工质量。

表4-1 几种硬切削加工方法的常用切削参数及加工质量

刀具及加工方法 切削参数及加工质量	用陶瓷、CBN 硬车削	用超细晶粒硬 质合金+TiN涂 层硬铣削	用超细晶粒硬质 合金+TiN涂层硬 钻削
切削速度 $v/(m/min)$	120~250	200~350	40~60
进给量/mm	0.05~0.15	0.1~0.2	0.02~0.1
表面粗糙度值 $Rz/\mu\text{m}$	1~4	2~5	1~4
公差等级IT	5~7		7~10

2. 硬车削的特点

硬车削之所以受到重视，是因为硬车削与传统的磨削相比，具有以下特点：

1) 硬车削的加工效率高。去除同样体积的材料，硬车削具有比磨削更高的加工效率，而加工能量消耗是磨削的 $1/5$ 。硬车削相对磨削来说，可以采用大的背吃刀量、高的工件转速，因此，金属切除率是磨削加工的 $3\sim4$ 倍。车削加工时，可在一次装夹中完成多表面加工。如图4-1所示零件，采用车削可非常容易地完成外圆、端面以及槽、球面等复杂形状的表面加工。若采用磨削加工，则需多次安装，非常困难。

2) 硬车削是绿色制造工艺。磨削加工产生的废液和废弃物越来越难以处理和清除，且对人体有害。硬车削无须加切削液，加工中所产生的大部分热量被切屑带走。硬车削时，切削区的高温使工件材料退火变软，切屑形成容易，工件加工表面没有烧伤或裂纹。此时，若用切削液，刀具使用寿命和工件加工表面质量具有不确定性。同时硬车削可省去与切削液有关的装置，降低生产成本，简化生产系统，形成的切屑干净清洁，回收处理容易。

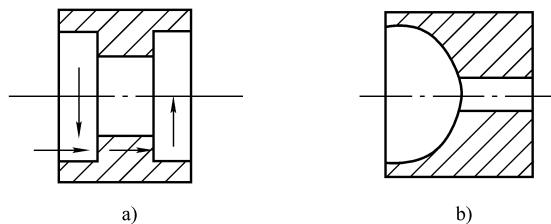


图 4-1 复杂零件的硬车削

a) 台阶孔车床上的镗削 b) 内球面的镗削

3) 硬车削的设备投资少，适合柔性生产要求。在生产率相同时，车床是磨床成本的 $1/3 \sim 1/2$ ，占地面积小，辅助系统费用低。磨床则需要水槽、切削液、过滤器等辅助系统。车削是一种加工范围广的柔性加工方法，可配备多种刀具转盘、刀库等以实现加工转换。现代 CNC 车床尤其适合硬车削，对多品种、计划多变、交货期短、生产批量小的柔性化生产更显其优越性。

4) 硬车削可使零件获得良好的整体加工精度。一般来说，硬车削比磨削更能保持工件表面性能的完整性。虽然目前磨削比硬车削的尺寸精度高（磨削可保证 $1\mu\text{m}$ ，而硬车削通常 $\leq 13\mu\text{m}$ ），但已有很多研究表明：硬车削的尺寸精度可达 $2 \sim 3\mu\text{m}$ ，表面粗糙度值 R_a 可达 $0.5\mu\text{m}$ 。

3. 硬车削加工机理及应用研究

(1) 硬车削的切削规律 硬车削条件下的进给速度、切削速度和背吃刀量都有别于普通切削，刀具一般采用负倒棱来保护刃口，在高速切削状态下，一般的金属切削理论已不完全适合硬质材料的切削过程分析，因此，必须根据硬质材料和所用刀具的特点来研究其切削加工过程。

从 20 世纪 70 年代起，人们已经开始研究硬质材料的切屑形成机理了，进入 20 世纪 90 年代，随着 PCBN、陶瓷刀具的实用化及对硬态切削技术需求的日益迫切，对硬质材料加工技术的研究进入了高潮。淬硬钢的硬态干切削机理是在高速切削时产生的切削热使被切削金属层软化，切削温度对金属软化效应起决定性作用，即工件硬度随着切削温度的升高而降低，并进一步影响已加工表面的形成及其质量。研究

表明，当淬硬材料硬度高于 50HRC 时，切削机理因金属软化效应的产生而发生变化。

以轴承钢 GCr15 的硬车削为例进行分析。在 CA6140 车床上，用 PCBN（聚晶立方氮化硼）外圆车刀加工 GCr15 轴承钢。通过热处理得到 30HRC、40HRC、50HRC、60HRC、64HRC 等五种硬度的试验用料。试验用车刀的几何参数和选用的切削用量见表 4-2 和表 4-3。

表 4-2 试验用车刀的几何参数

参数	前角 $\gamma_0/(\circ)$	后角 $\alpha_0/(\circ)$	刃倾角 $\lambda_0/(\circ)$	主偏角 $\kappa_r/(\circ)$	刀尖圆弧半径 r_e/mm	倒棱宽度 $b_{\gamma t}/\text{mm}$	倒棱前角 $\gamma_{b\gamma t}/(\circ)$
数值	0	8	0	17	0.4	0.1	-25

表 4-3 试验选用的切削用量

切削用量	切削速度 $v_c/(\text{m/min})$	进给量 $f/(\text{mm/r})$	背吃刀量 a_p/mm
取值	75、110、160、200	0.08、0.15、0.24、0.10	0.25、0.5、0.8

试验结果及分析如下：

1) 切削力的变化规律符合一般金属切削理论。图 4-2 所示为在不同切削用量和工件材料硬度条件下，主切削力的变化规律。随切削用量和工件材料硬度的增加，主切削力增大。

2) 切削温度变化规律不符合一般的金属切削理论。对工件材料 GCr15 而言，硬度约为 50HRC 时温度达到最高值，之后随着工件硬度增加，温度呈下降趋势。这是硬切削的特殊规律。50HRC 就是工件材料为 GCr15 时区分普通切削和硬切削的临界硬度。

3) 在实验范围内，切屑形态、已加工表面粗糙度和加工硬化层深度等的变化都是以 50HRC 为分界点。如图 4-3 所示，工件硬度低于 50HRC 时为带状切屑，达到 50HRC 时为锯齿形切屑。

图 4-4 和图 4-5 分别为工件不同硬度时的表面粗糙度和硬化层深度的变化情况。从两图中可以看出，工件硬度在 50HRC 左右时的表面粗糙度值最大，之后随硬度增加，表面粗糙度值呈下降趋势；已加工表面硬化层深度随着工件材料硬度的增加而增加，当工件硬度达到 50HRC 后，已加工表面硬化深度达到最大，而且随工件硬度的增加，硬化层深度基本上不变。

(2) 硬车削加工条件的研究 硬车削虽然具有许多优点，但成功

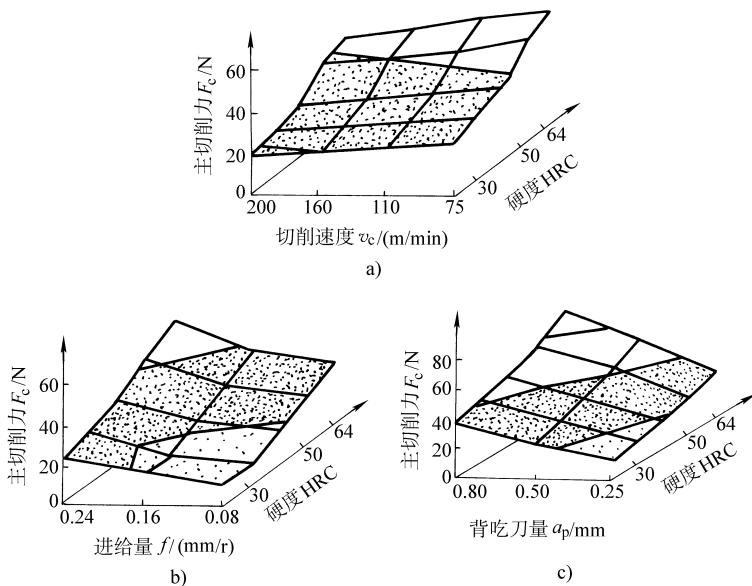


图 4-2 不同切削用量和工件材料硬度条件下的主切削力的变化规律

a) v_c -HRC 变化时的切削力曲面 b) f -HRC 变化时的切削力曲面

c) a_p -HRC 变化时的切削力曲面

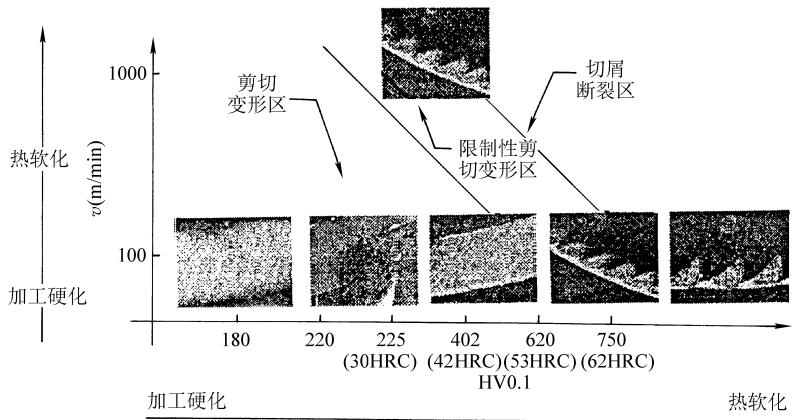


图 4-3 不同工件硬度时的切屑形态

地进行硬车削必须满足必要的加工条件。这些条件包括适宜的刀具材料及涂层、合理的刀具几何参数、足够功率和刚性的机床及相应的工艺装备等。

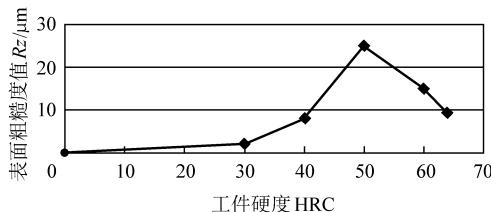


图 4-4 工件硬度不同时的表面粗糙度对比

1) 硬车削的刀具材料。普通高速钢和硬质合金不能进行硬车削，必须用新型硬质合金、涂层硬质合金、陶瓷和聚晶立方氮化硼（PCBN）等刀具材料。

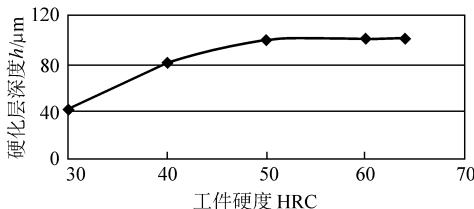


图 4-5 工件硬度不同时的硬化层深度对比

当工件硬度为 40 ~ 50HRC 时，可采用新型硬质合金、涂层硬质合金刀具或陶瓷刀具。新型硬质合金刀具韧度高，价格低，但寿命较短。某些新型硬质合金可适应较大范围硬度的淬硬件的加工，这种硬质合金细化了碳化物颗粒，并同时增加了粘结剂的含量。含钴量 $w(\text{Co})$ 一般为 9% ~ 15%，使粘结层保持一定厚度。切削性能有很大的提高，为切削淬硬件创造了有利的条件。近年来，刀具生产企业靠改进涂层材料与比例，极大地改善了涂层刀具的性能。如美国、日本一些厂家采用瑞士 AlTiN 涂层材料和新涂层专利技术生产的刀片，硬度高达 4500 ~ 4900HV，在切削温度高达 1500 ~ 1600℃ 时硬度仍然不降低、不氧化，刀片寿命为一般涂层刀片的四倍，而成本只为一般涂层刀片的 30%，且附着力好，并可以在 498.56m/min 的速度下，加工硬度达 47 ~ 52HRC。

的模具钢。

金属陶瓷与陶瓷刀具是硬车削较理想的刀具，使用正常时，寿命很长，车削速度比硬质合金刀具提高2~5倍，特别适合高硬度材料加工、精加工以及高速加工，可加工硬度达62HRC的各类淬硬钢和硬化铸铁。在加工工件硬度低于45HRC时，会产生长带状切屑，使刀具前刀面产生月牙洼磨损，降低了刀具使用寿命，此时，陶瓷刀具是最好的选择。近年来，通过大量的研究、改进和采用新的制作工艺，陶瓷材料的抗弯强度和韧度均有了很大的提高，如日本三菱金属公司开发的新型金属陶瓷NX2525，以及瑞典山德维克公司开发的金属陶瓷刀片新品CT系列和涂层金属陶瓷刀片系列，其晶粒组织的直径细小至 $1\mu\text{m}$ 以下，抗弯强度和耐磨性均远高于普通的金属陶瓷，大大拓宽了陶瓷材料的应用范围。

当工件硬度达到55~65HRC时，可采用PCBN刀具进行硬车削。PCBN刀具广泛适用于淬硬钢（50HRC以上）、珠光体灰铸铁、冷硬铸铁和高温合金等的切削加工，与硬质合金刀具相比，其切削速度甚至可提高一个数量级。

CBN含量高的PCBN刀具硬度高、耐磨性好、抗压强度高及冲击韧度好，其缺点是热稳定性差和化学惰性低，适用于耐热合金、铸铁和铁系烧结金属的切削加工。复合PCBN刀具中CBN颗粒含量较低时，采用陶瓷作粘结剂，其硬度较低，但弥补了前一种材料热稳定性差、化学惰性低的特点，适用于淬硬钢的切削加工。

在车削灰铸铁和淬硬钢时，可选用陶瓷刀具或PCBN刀具，但干车削淬硬钢时， Al_2O_3 、陶瓷刀具的成本低于PCBN材料，虽然陶瓷刀具有良好的热化学稳定性，但韧度和硬度却不如PCBN刀具。在车削硬度低于60HRC及小进给量的加工工件，陶瓷刀具是较好的选择。PCBN刀具适合加工硬度高于60HRC的工件，尤其适合自动化加工和高精度加工。除此之外，在相同后刀面磨损情况下，PCBN刀具切削后的工件表面残余应力也比陶瓷刀具稳定，如图4-6所示。

2) 刀片结构及几何参数。各种刀片形状的刀尖强度从高往低依次为：圆形、100°菱形、正方形、80°菱形、三角形、55°菱形、35°菱形。刀片材料选定后，应选用强度尽可能大的刀片形状，同时应选择尽可能大的刀尖圆弧半径。粗加工时通常选用圆形或大圆弧半径的刀片。

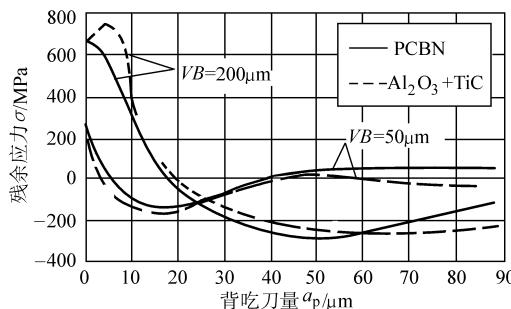


图 4-6 陶瓷和 PCBN 刀具切削淬硬钢的残余应力

为改善刀片受力状况，使切削力方向由切削刃向内对着刀体，并对刀片刀口进行钝化处理，如图 4-7 所示。

刀具的刃磨和研磨质量对其切削性能影响很大。硬车削刀具一般用金刚石砂轮在工具磨床上进行刃磨，以保证刃磨质量。

硬车削时，由于切削速度高，导致切削温度很高，切屑呈红而酥软的、易于碎断的缎带状，不会产生积屑瘤，切屑易于清理。硬车削时，切削力比较大，所以刀具宜采用负前角 ($\gamma_0 \leq -5^\circ$) 和较大的后角 ($\alpha_0 = 10^\circ \sim 15^\circ$)；主偏角取决于工艺系统的刚性，一般在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 之间取值；刃倾角 $\lambda_s = 0^\circ \sim 10^\circ$ ；倒棱宽度 $b_{rl} = 0.1 \sim 0.3$ mm，倒棱前角为 $-15^\circ \sim 25^\circ$ ；刀尖圆弧半径 $r_e = 0.2 \sim 1.2$ mm。

3) 硬车削的切削用量。合理选择切削用量是充分发挥刀具切削性能的重要因素之一。它直接影响加工生产率、加工成本、加工质量和刀具寿命。

陶瓷刀具硬度高、耐磨性好，但脆性大、强度较低。硬车削淬硬钢时，进给量对刀具破损影响最大，所以应选择较小的进给量，一般 $f = 0.1 \sim 0.3$ mm/r。较高的切削速度 (80 ~ 100 m/min) 可获得酥化易碎的切屑，同时切削温度升高可改变工件材料性能和提高陶瓷刀具韧

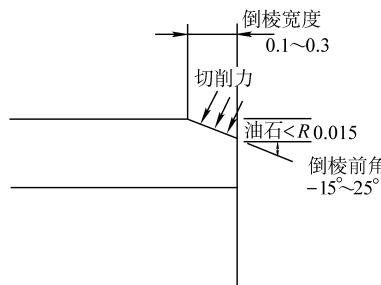


图 4-7 推荐的硬车削刀口参数

度，减少刀具破损。

背吃刀量受机床功率和工艺系统刚性限制。硬车削时，若工艺系统的刚性较差应选择较小的背吃刀量，以免引起振动使刀具破损。

聚晶立方氮化硼刀具（PCBN）硬车削淬硬钢时推荐的切削用量见表 4-4。

表 4-4 PCBN 硬车削淬硬钢时推荐的切削用量 ($>45\text{HRC}$)

工件材料	切削速度/ (m/min)	进给量/ (mm/r)	背吃刀量/ mm
工具钢（连续切削或轻微断续切削）	100~200	0.1~0.3	0.1~0.3
合金钢（连续切削或轻微断续切削）	80~200	0.1~0.3	0.1~0.3
工具钢/合金钢（有表面氧化皮或极度不圆/严重地断续切削）	70~110	0.15~0.6	0.15~0.6

切削速度对 PCBN 刀具切削性能的影响见图 4-8。切削速度有着严格的最佳范围。

用 FD22 (TiC(CN)-Al₂O₃) 陶瓷刀具干车削淬火轧辊钢 86CrMoV7 (60HRC) 时，切削速度为 60m/min，背吃刀量为 0.8mm，进给量为 0.11~0.21mm/r，加工表面粗糙度值 R_a 可达 0.8μm，可以代替半精磨；进给量取 0.07mm/r 时，表面粗糙度值 R_a 可达 0.4μm，达到精磨水平。试验表明，当表面粗糙度值 R_a 为 0.3~0.6μm

时，硬车削比磨削经济得多。若用 PCBN 刀具，可以选择更高的切削速度，效果将更好。

(3) 硬车削加工机床 硬车削与非淬硬钢车削相比，切削力增加 30%~100%，切削功率增加 1.5~2 倍，所以硬车削对机床有更高的要

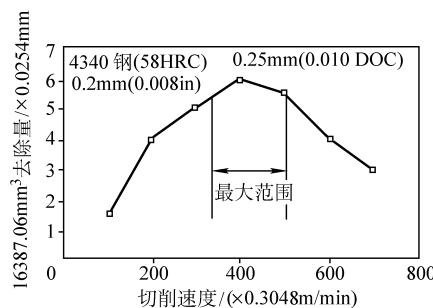


图 4-8 切削速度对 PCBN
刀具切削性能的影响

求，机床应具有高刚性、高转速、大功率等特点。机床主轴系统必须进行良好平衡，以防止振动。主轴的径向圆跳动和端面圆跳动不得大于 $3\mu\text{m}$ 。机床必须具有良好的热稳定性。导轨系统精度要求较高，要求导轨直线性好、间隙小，不能有爬行现象。

同时，刀具、工件、夹具也应有足够的刚性。刀具安装的悬伸长度要尽可能短，夹具采用刚性夹紧装置，工件长径比不要太大，一般限制在 $6:1$ 以内。若能满足以上要求，卧式车床也能很好地完成硬车削。

4. 硬车削应用举例

硬车削是目前应用最广，也是应用效果最好的干车削加工方法。下面给出一些国内外企业应用硬车削加工的实例：

1) 美国某公司用热压陶瓷刀片车削淬火钢（ $>50\text{HRC}$ ）轧辊的外圆、端面、槽和成形表面，粗车切削速度为 137m/min ，精车切削速度为 198m/min ，进给量为 $0.13 \sim 0.33\text{mm/r}$ ，背吃刀量为 $0.51 \sim 0.89\text{mm}$ ，切削用量较大，切削效率高。

2) 德国某公司在加工 $100\text{Cr}6$ 材料的摩擦盘（ $60 \sim 62\text{HRC}$ ）时，用车削代替磨削，加工时间缩短 60% 。

3) 我国某机车车辆厂，加工硬度为 60HRC （其中硬质点硬度近 70HRC ）的轴承内圈（ $\text{GCr}15$ 材料），直径为 285mm ，采用磨削工艺需 2h ，采用硬车削加工，用优质硬质合金刀片（726），切削速度为 20m/min ，进给量为 0.18mm/r ，背吃刀量为 $0.5 \sim 1.5\text{mm}$ ，仅用了 45min 。

4) 北美最大的齿轮制造厂用PCBN刀具硬车削粉末冶金（PM）金属齿轮坯件，切削速度为 200m/min ，背吃刀量为 0.25mm ，进给量为 0.09mm/r ，选用SNG-434形刀片，刃口倒棱 $-15^\circ \times 0.2\text{mm}$ ，加工表面粗糙度值 Ra 为 $0.18\mu\text{m}$ ，不仅实现了以车代磨，而且大大提高了生产效率。

用立方氮化硼（CBN）刀具进行硬车削，加工时间、设备成本、切削刀具的成本比磨削加工成本下降 40% ，从而使每个零件的加工成本下降了 55% ，如图4-9所示。

5) 图4-10a是弹簧销（材料为淬硬的 $16\text{MnCr}5$ ），图4-10b是支撑钉（材料为淬硬的 $9\text{S}20\text{k}$ ， $9\text{S}20\text{k}$ 是德国钢号）。由于弹簧销刚性较差，车削加工时通常采用小的切削用量，用新型硬质合金GC4025进行粗

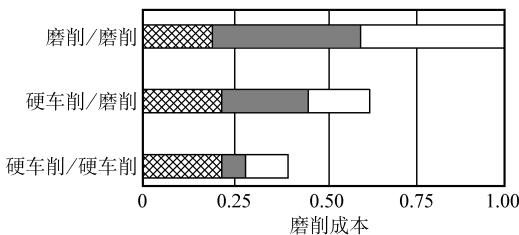


图 4-9 硬车削与磨削成本比较

■粗精加工总成本 ■设备成本 □其他

注：1 是相对硬车削而选择的一个任意数。

车，用金属陶瓷 CT5015 对球部进行精车，可以获得满意的加工精度。支撑钉的外圆精车后，用 TiNAl 钻头和 TiN 涂层丝锥，即可完成钻孔和内螺纹加工，加工后工件温度不超过 55℃，并达到 h6 的加工精度。

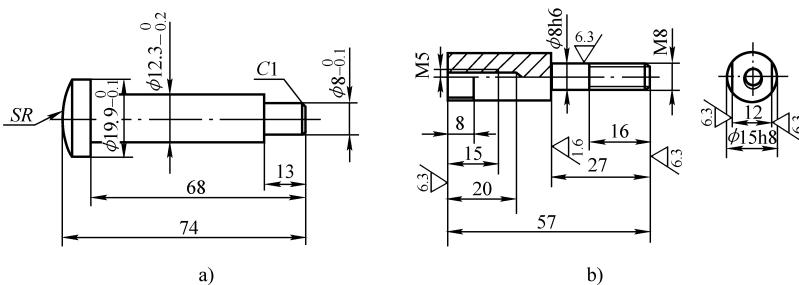


图 4-10 零件图

a) 弹簧销 b) 支撑钉

6) 轧辊的硬车削。目前,国内十几家大型轧辊企业已经在冷硬铸铁、淬硬钢等各类轧辊的加工中采用了硬车削技术,对轧辊进行荒车、粗车和精车等,取得了很好的效果。采用硬车削技术后,平均提高加工效率2~6倍,节约加工工时和电力50%~80%。例如,武汉钢铁公司轧辊厂,对硬度为60~80HS的冷硬铸铁轧辊粗车、半精车时,切削速度提高了三倍,每车一根轧辊,节约电力、工时费400多元,节约刀具费近100元,取得了巨大的经济效益。又如某校机电工程实验中心,用FD22金属陶瓷刀具车削55~63HRC的86CrMoV7淬硬钢轧辊,切削速度为60m/min,进给量为0.2mm/r,背吃刀量为0.8mm,单刃连续切

削轧辊路径达 15000m，满足了以精车代替磨削的要求。

7) 砂浆泵是广泛应用于矿山、电力等行业的配套产品，其护套、护板材料是 63~67HRC 的 Cr15Mo3 高硬铸铁件。过去由于刀具材料的限制，这种材料很难进行车削加工，因而不得不采用先退火软化后进行粗加工，然后淬火再进行车削加工的工艺。采用硬车削加工技术以后，顺利地解决了一次硬化加工问题，免除了退火、再淬火两道工序，节约了大量的工时和电力。目前国内砂浆泵生产企业约有 70%~80% 已经采用了硬车削加工技术。

8) 柴油机气阀的硬车削。柴油机的气阀分进气阀和排气阀，进气阀的材料为 4Cr9Si2，排气阀的材料为 4Cr4Ni14W2Mo。这两种材料经热处理后，硬度高达 48~52HRC。为了提高气阀的耐高温、耐腐蚀、耐磨损、抗冲击的能力，进气阀堆焊钴基合金，排气阀堆焊铬基合金，如图 4-11 所示。

钴基合金与铬基合金硬度高达 50~60HRC 左右，材料的可加工性极差。用 YG3 硬质合金刀具加工，刀具磨损快，加工质量差，切削效率低，生产成本高。若采用合理设计的 PCBN 刀具进行硬车削，不仅加工质量好，而且切削效率高。气阀硬车削的 PCBN 刀具结构如图 4-12 所示。

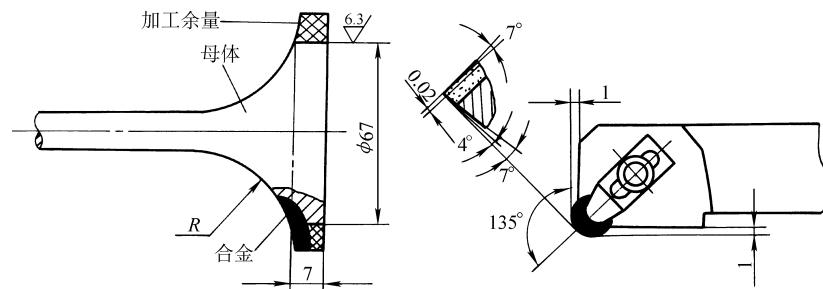


图 4-11 气阀加工示意图

图 4-12 气阀硬车削的 PCBN 刀具结构

PCBN 刀坯层厚为 0.8mm，总厚度为 3.18mm。刀坯型号可选 De Beers 公司产品 DBA80、日本住友工电产品 BN600 或国内产品。刀片为圆形，几何参数为前角 -7°，刃倾角为 0°，刀具悬伸 25~30mm。采用 PCBN 刀具不仅刀具寿命长，通常是硬质合金刀具的 50~100 倍，当机床转速为 1600r/min 时，一个切削刃可连续加工 500 件气阀，而且加工

质量容易保证，例如，当背吃刀量为 $1\sim2\text{mm}$ ，进给量为 0.1mm/r ，切削速度为 200m/min 或 $800\sim1000\text{m/min}$ 时，加工表面粗糙度值 R_a 小于 $0.4\mu\text{m}$ 。

9) 某企业加工几何精度和表面粗糙度均要求较高的薄壁套工件，该工件材料为 Cr12MoV，淬火硬度为 59 ~ 62HRC，如图 4-13 所示。原先采用的磨削工艺为：磨两平面→磨内孔→磨外圆→靠磨 B 端面。由于磨削加工中的热变形和多次装夹，加工效率低（磨削一件需要 28 ~ 30h），废品率高，很难满足加工质量要求。现改用 PCBN 车刀进行硬车削，较好地解决了这一问题。

图 4-14 是 PCBN 车刀的几何结构。前角 $\gamma_0 = 0^\circ$ ，主副后角相同，CBN 部位的后角 $\alpha_0 = 6^\circ$ ，硬质合金和刀片部位的后角 $\alpha_1 = 8^\circ \sim 10^\circ$ ，主偏角 $\kappa_t = 45^\circ$ ，刀尖圆弧半径 $r = 0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 。PCBN 车刀前面、刀尖圆弧及后面等部分的表面粗糙度值 R_a 均为 $0.2 \mu\text{m}$ ，其余部位 R_a 为 $0.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。

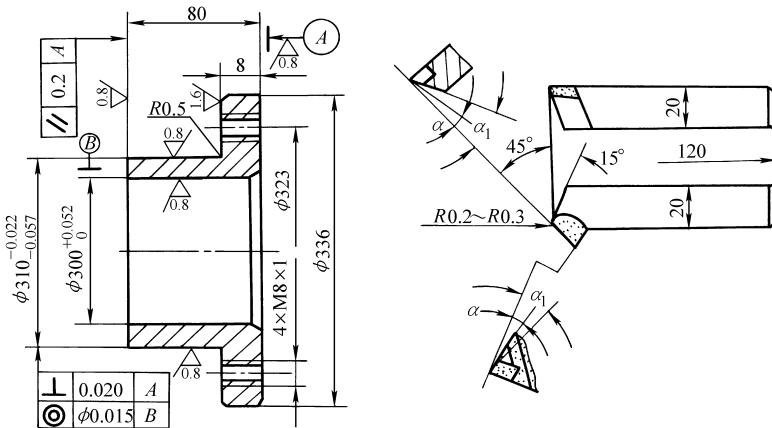


图 4-13 薄壁套工件

图 4-14 PCBN 车刀的几何结构

采用的切削参数为：切削速度为 $235\sim243\text{m/min}$ ，转速为 250r/min ，半精车的进给量为 0.15mm/r (37.5mm/min)，精车的进给量为 0.07mm/r (17.5mm/min)，半精车的背吃刀量为 0.2mm ，精车的背吃刀量为 0.05mm ，加工过程中不使用切削液。磨削与硬车削的加工效果对比如表4-5所示。

表 4-5 磨削与硬车削的加工效果对比 (单位: mm)

尺寸及形位公差		图样要求	磨削加工	PCBN 刀具加工
$\phi 310\text{mm}$		-0.022 ~ -0.057	-0.04 ~ 0.05	-0.03 ~ -0.053
$\phi 300\text{mm}$		0 ~ 0.052	0.03 ~ 0.045	0.02 ~ 0.05
垂直度		0.02	0.03	0.02
平行度		0.02	0.02	0.015
同轴度		0.015	0.016	0.01
表面粗糙度值 $R_a/\mu\text{m}$	外圆	0.8	0.7	0.44 ~ 0.65
	内孔	0.8	0.8	0.55 ~ 0.76
	平面	0.8	0.8	0.8
	端面	1.6	1.6	1.0
单件加工时间/h			30	6

从表 4-5 中可以看出：

- ① 两种工艺方法的尺寸公差都能达到图样要求，但磨削工艺误差略大于硬车削工艺。
- ② 硬车削加工工艺达到了图样要求的几何公差，而磨削加工有两种超差。
- ③ 两种工艺方法的加工表面粗糙度均达到了图样要求，而硬车削的值略小于磨削加工。
- ④ 硬车削的加工效率是磨削的五倍。

10) 某企业生产的五十铃汽车变速器中三只同步器齿套上的拨叉槽，改原先的磨削加工为硬车削，取得了满意的效果。工件的加工过程如图 4-15 所示。工件材料为 20CrMnH，渗碳淬火后的硬度为 58 ~ 62HRC，不用切削液，在 CK7815 数控车床上加工。选用了 Sandvik 公司的 CBN 刀片，切槽刀杆为 LF151.22—2525—30，切槽刀片为 N151.2—400—GCB20，刀片宽度 4mm。

加工过程如图 4-15 所示。加工余量各单边均为 0.15mm；共分四次走刀完成槽的加工，①②③三次径向进给后，各侧面留余量均为 0.02 ~ 0.05mm，切削速度为 100m/min（转速 258r/min），进给量为 0.08mm/r；④为径向轴向进给加工至工艺要求。其中径向进给参数如①②③，轴向切削时的切削速度为 150m/min（转速 388r/min），进给

量为 $0.08 \sim 0.15 \text{ mm/r}$ 。

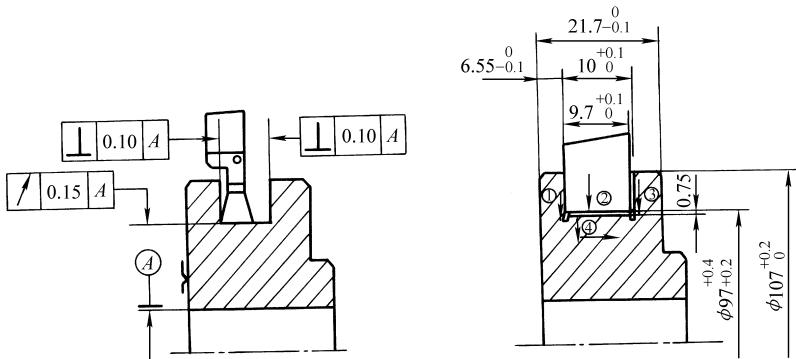


图 4-15 工件的加工过程

每一个新刀片能加工 $200 \sim 300$ 个零件，若继续加工，则会使工件表面粗糙度增大，刀片产生崩裂，此时可将刀片取下进行重磨，修磨后的刀片寿命约为新刀片的 $70\% \sim 80\%$ 。而且硬车削的生产效率高于原来的磨削加工，加工成本约为磨削的 $32\% \sim 50\%$ 。

11) 轴承锥面硬车削加工。轴承内外圈（轴承钢， $w(\text{C}) 1\%$ ， $w(\text{Cr}) 1.5\%$ ；热处理后的硬度为 62HBC ）的壁很薄，而要求达到的精度却很高，为减小装夹变形，采用磁性卡盘夹持。

传统的加工工艺：精磨前三道工序，三次装夹，调整共耗时 165min ，实际加工工时 19min 。

用硬车削工艺：精磨前一道工序，一次装夹，调整共耗时 55min ，实际加工工时 8min 。加工所用刀具为 CBN。其加工精度的测量结果为：圆度误差为 $0.85 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ；表面粗糙度值 R_a 为 $0.5 \sim 1.2 \mu\text{m}$ ；同轴度误差为 $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ；尺寸精度为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。

由此可见，采用硬车削加工工艺不仅减少了准备工时和实际工时，提高了机床利用率，而且由于加工工序的减少，也减少了造成同轴度误差的因素，提高了加工质量。

12) 液压卡盘零件的硬车削加工。传统的加工工艺：精磨前四道工序，四次装夹，调整共耗时 210min ，实际加工工时 759min 。用硬车削工艺：精磨前两道工序，两次装夹，调整共耗时 75min ，实际加工工时 16min 。因此，硬车削明显地提高了加工效率。

13) 齿轮内孔的硬车削。汽车、摩托车齿轮零件的材料一般为20CrMnTi，经渗碳淬火后，表面硬度为60~62HRC，齿轮孔公差等级为IT6，表面粗糙度值 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$ 。传统加工工艺为：车削加工→热处理→磨削。采用超硬刀具“以车代磨”的加工工艺为：粗车加工→热处理→精车加工。新工艺可大幅度提高加工效率，降低加工成本，原来用磨削工艺一班仅能加工100个小齿轮，现采用PCBN刀具车削（切削参数 $v_c = 60 \sim 120\text{m/min}$, $f \leq 0.12\text{mm/r}$, $a_p \leq 0.1\text{mm}$ ），一班能加工400个小齿轮，而且分摊到每个齿轮的加工成本明显下降。

虽然硬车削有很多优点，但目前在生产中应用还不广泛，其主要原因是：

- 1) 操作者对硬车削的效果了解不够，通常认为淬硬材料只能磨削。
- 2) 认为用于硬车削的刀具成本太高。
- 3) 对硬车削加工机理研究不够，没有足够的规范来指导生产实践。

因此，除了对硬车削机理进行深入研究外，必须加强硬车削加工知识的培训、成功经验演示及严格操作规范，使这种高效、洁净的加工方法更多地用于生产实践。

为了促进硬车削的应用，需在现有基础上进行以下几方面研究：

- 1) 加强设备改造与研制，提高机床的转速、功率、刚性等性能。
- 2) 试验研究各种硬度材料的合理切削用量，如陶瓷、PCBN等刀具材料的硬车削特性和优化的几何参数，积累更多的加工数据，建立各种参数选择标准。
- 3) 研究硬车削机理，为提高表面质量和解决断屑等问题提供理论依据。
- 4) 研究开发新型刀具材料，降低刀具成本。

4.1.2 低温冷却车削加工

1. 低温冷却车削加工及其特点

随着科学技术的发展需要，新材料不断涌现，有些材料具有高强度、高硬度、良好的化学惰性和很低的热导率，采用常规加工方法和常用刀具材料对其进行加工很难取得满意的结果。采用低温加工系统

对这些极难加工的材料进行干切削，却表现出了优异的效果。

低温冷却车削（Cryogenic Machining）是利用液态氮（-186℃）、液体CO₂（-76℃）及其他低温液体或气体的冷却特性，通过一定装置将冷却气体或液体送入切削区，可极大地降低切削区温度的车削加工方法。这种方法可极大地提高刀具使用寿命和生产效率，并显著改善加工精度和表面质量。这种加工方法可以使切削点低温化，不仅使工件材料局部变脆，有利于切屑的撕裂，降低切削负荷，同时也防止了刀具自身的软化，减少了与工件之间的摩擦、粘结、扩散和相变磨损，使刀具使用寿命得到提高，尤其适合钛、镁、铝、钼、不锈钢等难加工材料和薄壁材料的加工。

低温切削装置的原理有以下几种：利用瓶装液体CO₂的自喷对切削区直接冷却；用经干燥的空气维持杜瓦瓶的恒压，利用虹吸原理让压缩空气从瓶中抽出液态氮，经特制的喷嘴喷向切削区；采用液态氮或CO₂从外部冷却工件，来达到降低切削区温度的目的。有的采用刀具内部制冷方法，甚至把刀具与冷冻机直接相连对刀具进行循环冷却，效果也很明显。实验证明，低温切削钛合金、不锈钢、高强度及耐磨铸铁等均能取得良好效果。实验还表明，低温冷却技术的实施有利于切屑的折断。普通碳素钢的力学性能受切削温度的影响很大，在低温下易于脆裂，因此，切屑在低温条件下呈脆性并比较容易折断，这为低温在冷却切削加工中有助于断屑的应用提供了可行性基础。

低温切削具有以下特点：

(1) 可减小切削力 由于低温切削降低了切削区的温度，使被切削材料的塑性和韧性降低，脆性增加，切削时变形减小，因而切削力有所降低。与传统车削相比，背向力F_p和进给力F_f分别减小20%和30%，磨削力可减小60%。但切削某些特殊材料或冷却温度过低时，会使被切削材料的硬度明显增高，可能会使切削力有所增加。因此，在特殊情况下，切削力的变化趋势要由低温切削的工艺条件来决定。

(2) 切削温度大大降低 低温切削钢时，可降低切削温度300~400℃；切削钛合金时，可降低200~300℃。

(3) 刀具使用寿命大幅度提高 由于切削温度大幅度降低，刀具材料的硬度降低较小，刀具磨损减小，刀具使用寿命相应提高。例如，低温切削耐热钢时，刀具使用寿命可提高两倍以上；切削不锈钢时，

刀具使用寿命可提高3~5倍。

(4) 可提高加工表面质量 传统切削时,用金刚石刀具切削钢料(45钢、T8A、GCr15)不到1min时,切削刃明显磨损,加工表面粗糙度明显增大。而在低温切削时,切削时间可达10~20min,肉眼很难看出刀具磨损,加工表面粗糙度无明显变化。据有关资料介绍,工件温度在-20℃时,积屑瘤基本被抑制,低于-20℃时不仅积屑瘤消失,而且在加工表面上可清晰地观察到切削刀原形的刻印痕迹,大大减小了其表面粗糙度值。

2. 低温冷却车削加工的类型

低温加工是利用超低温流体在工件内或在刀具内形成局部的低温(或超低温)状态,在这种状态下的工件和刀具力学性能会发生改变,从而有利于机械加工的一种工艺方法。

低温加工有多种不同类型,通常按以下方法进行分类:

1) 根据低温介质及使用方法不同,可将低温切削的温度分为三个区,即亚常区($2\sim6^{\circ}\text{C}$)、低温区($0\sim-30^{\circ}\text{C}$)和超低温区(-50°C 以下)。

2) 根据冷却的连续性,可分为连续的低温切削和间断的低温切削。连续的低温切削是指对整个工件进行连续冷却,冷却效果比较好;间断的低温切削是把工件放入冷冻槽进行冷却,再取出进行加工,由于冷却温度的不一致,其冷却效果不如连续冷却好。

3) 根据冷却对象不同,将低温切削分为冷却刀具的低温切削(见图4-16)和冷却工件的低温切削(见图4-17)两大类。

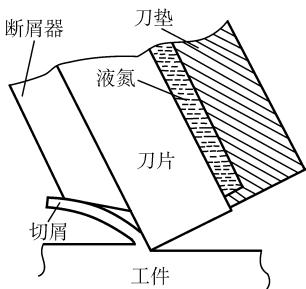


图4-16 冷却刀具的低温切削原理

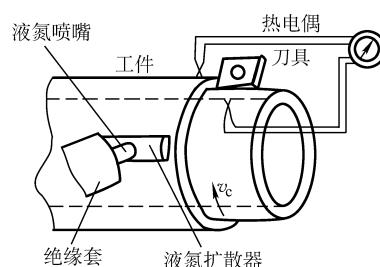


图4-17 冷却工件的低温切削原理

4) 根据冷却形式不同, 将低温切削分为内冷式切削(见图 4-18)和外冷式切削(见图 4-19)。外冷式只使工件或刀具表面温度降低, 内部温度仍然较高; 内冷式可使整个工件或刀具温度一致, 切削效果比外冷式好。

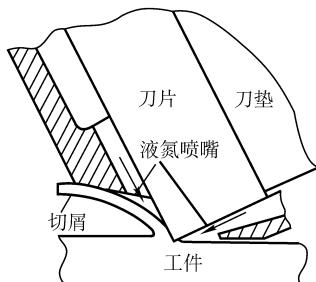


图 4-18 内冷式低温切削原理

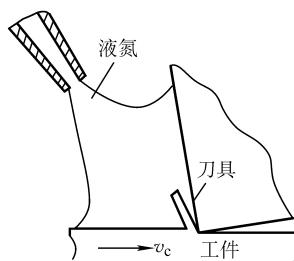


图 4-19 外冷式低温切削原理

5) 根据制冷方式不同, 将低温切削分为机械式制冷切削、化学式制冷切削和电子式制冷切削。

3. 低温冷却切削的步骤

- 1) 根据加工对象和加工刀具的特性, 设定最佳低温加工温度 T_{opt} 。
- 2) 利用冷却剂或其他方法, 使特定封闭加工区的温度达到 T_{opt} 。
- 3) 自动控制低温流体的喷射量, 以维持加工区的温度在 T_{opt} 状态。

一方面, 当检测的加工区温度偏离 T_{opt} 时, 通过反馈控制器调节喷射流量; 另一方面, 当加工系统输入功率发生变化时, 则通过前馈控制器调节流量, 以维持最佳低温状态。

低温加工示意图如图 4-20 所示。

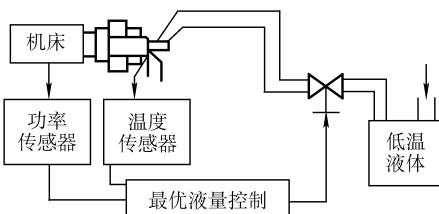


图 4-20 低温加工示意图

4. 低温冷却车削加工的应用

1) 工程陶瓷 RBSN 的液体低温车削。RBSN、Ti-6Al-4V 和 H13A 性能见表 4-6。它在 1400℃ 高温下仍具有高强度、低热膨胀率、良好的抗振性和化学惰性。独特的高强度、低热导率特性使 RBSN 成为极难加

工的材料。

表 4-6 RBSN、Ti-6Al-4V 和 H13A 的性能

材 料	化学成分 (质量分数, %)	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ ×10 ⁵ MPa	抗拉强度/ ×10 ⁸ MPa	热导率/ [W/(m·K)]
工程陶瓷阳 RBSN	98Si ₃ N ₄	2.4 × 10 ³	1.72	1.2	13
钛合金 Ti-6Al-4V	6Al, 4V	4.43 × 10 ³	1.16	9.3	15
硬质合金 H13A	92WC, 8Co	14.7	6.20	—	100

图 4-21 是用聚晶立方氮化硼 (PCBN) 刀具干车削 RBSN 棒料的磨损曲线。切削速度为 200m/min, 进给量为 0.1mm/r, 背吃刀量为 0.495mm。刀具的几何参数为: 前角 $\gamma_0 = -6^\circ$, 后角 $\alpha_0 = 6^\circ$ 。刃倾角 $\lambda_s = -6^\circ$, 刀尖圆弧半径 $r_e = 0.8$ mm。在不使用液氮冷却刀具时, PCBN 刀具车削长度仅为 40mm, 后刀面磨损量便高达 3mm, 切削无法再进行下去。采用液氮冷却装置后, 刀具磨损情况大为改善, 车削 160mm 长度后, 后刀面仅磨损 0.4mm。被加工工件的表面粗糙度值 R_a 也从 20μm 减至 3.2μm, 如图 4-22 所示。由此可见, 低温冷却的效果非常明显。而且液氮是一种很容易获得的原料, 价格便宜还可以反复使用。

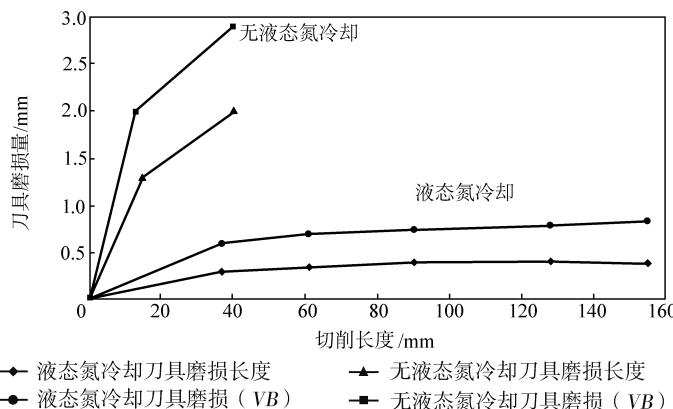


图 4-21 干车削 RBSN 时 PCBN 刀具的磨损曲线

图 4-23 是干车削 RBSN 时的切削温度变化曲线。用液态氮冷却的刀具在切削长度为 160mm 时，测量的切削温度几乎不变（ $-160 \sim -170^{\circ}\text{C}$ ）；未经冷却的刀具，每次切削长度为 40mm，切削时间很短，切削温度增加很快。而且第二次切削度增加很快。而且第二次切削时，由于刀具磨损使切削温度大大高于第一次切削。

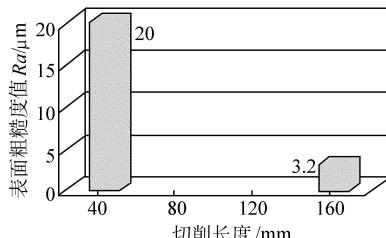


图 4-22 车削 RBSN 时的表面粗糙度变化

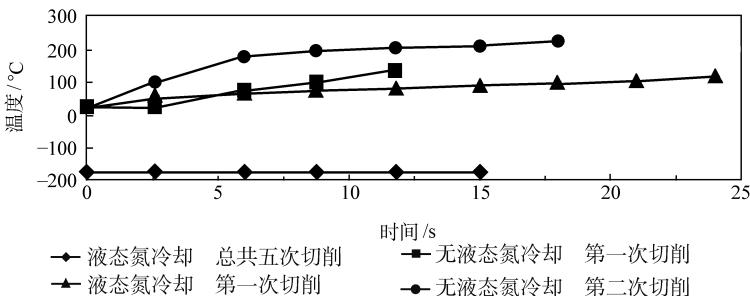


图 4-23 干车削 RBSN 时的切削温度变化曲线

2) 钛合金 Ti-6Al-4V 的液体低温车削。钛合金 Ti-6Al-4V 具有良好的力学性能（见表 4-6），广泛应用于航空工业。经热处理后，强度可超过 $1.17 \times 10^3 \text{ MPa}$ ，而热导率很低 [约 $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]。切削过程中，切屑与刀具接触区有很高的温度，钛也产生了化学反应，使刀具产生熔接而加剧了刀具的磨损。

H13A 渗碳硬质合金（见表 4-6）刀片车削钛合金 Ti-6Al-4V，分别用油冷却车削和用液态氮冷却干车削，其磨损曲线如图 4-24 所示。图 4-25 是测得的切削温度，由图 4-25 可以看出，用油冷却车削时的最高温度为 210°C ，图中曲线有两处峰值是由于工件两端的硬度略高于中间部分，而且降温较快所致。

3) 美国的 K. P. Raiiukar 博士采用液氮循环冷却刀具的方法，对 Ti 合金进行了低温加工试验。试验采用 H13A 硬质合金刀具材料，切削速度为 132 m/min ，进给量为 0.2 mm ，背吃刀量为 1 mm 。刀具的几何参数

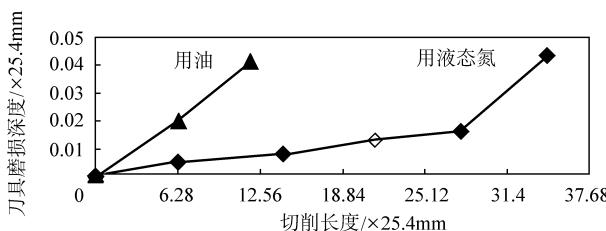


图 4-24 车削 Ti-6Al-4V 磨损曲线

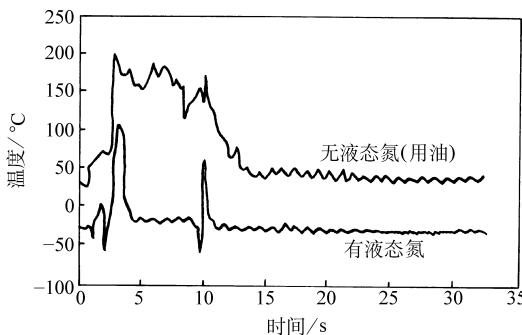


图 4-25 车削 Ti-6Al-4V 测得的切削温度

为：前角 $\gamma_0 = 0^\circ$ ，后角 $\alpha_0 = 7^\circ$ ，刃倾角 $\lambda_s = 0^\circ$ ，刀尖半径为 0.88mm。试验表明，采用液氮循环冷却刀具的方法低温加工钛合金时，刀具的磨损明显减小，切削温度降低 30%，工件的表面加工质量得到很大的改善，但切削力的变化不明显。

4) 气体低温冷却车削加工。用低温强风对切削区域进行冷却和排屑，也是对难加工材料进行干切削的一种有效方法。用气体冷却的效果和经济性均表现出明显的优势。

- ① 气体介质的温度可控制在 -20°C 以下，因此有较强的冷却能力。
- ② 低温气体比液体更易进入切削区以及刀具、切屑和工件的接触面，增加了冷却效果。
- ③ 低温气体对刀具的冷却均匀充分，避免了液体冷却不充分时刀具表面产生的微裂纹。
- ④ 气体介质可以为空气、氮气等，若采用空气介质，其成本可以说没有，也没有排放和处理的投资费用，因此，这样的冷却系统的运

行成本较低。

图 4-26 为气体低温冷却系统。它包括气泵、压缩机，干燥、冷冻装置，调温增压和送风装置等部分。目前，国内外用于切削试验的风冷系统的温度可调范围为 $-50 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ，压强为 $0.2 \sim 0.7\text{ MPa}$ ，流量为 $0.5 \sim 3\text{ m}^3/\text{min}$ 。

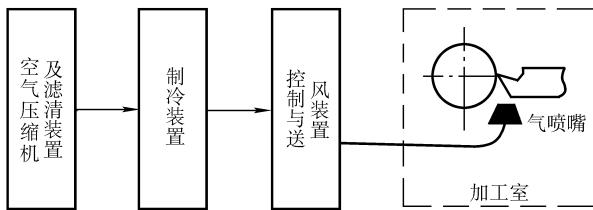


图 4-26 气体低温冷却系统

图 4-27 为车削 35CrMo 钢时的刀具磨损曲线。切削速度为 $186\text{m}/\text{min}$ ，进行常温 (20°C) 和低温 (-20°C) 风冷却、断续和连续车削。由图 4-27 可以看出，低温风冷却时，刀具磨损率显著下降。试验表明，利用气体的低温冷却系统，进行断续或连续干车削均能取得良好的效果。

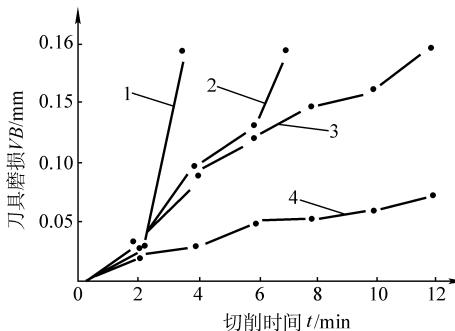


图 4-27 车削 35CrMo 钢时的刀具磨损曲线

1—常温风冷却断续车削 2—低温风冷却断续车削
3—常温风冷却连续车削 4—低温风冷却连续车削

5) 亚干低温冷却车削加工。把微量润滑油滴雾化和冷风分别送到切削区域以达到冷却、润滑和排屑的作用，如图 4-28 所示。

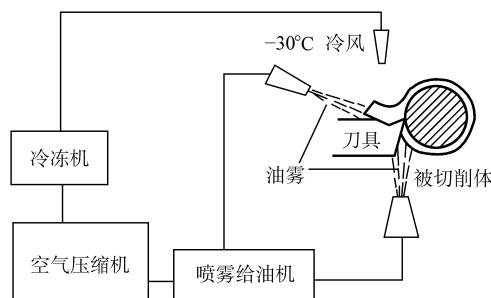


图 4-28 亚干低温冷却系统

以含硅量 $w(\text{Si})$ 为 22% ~ 24% 的高硅铝合金的发动机活塞加工为例。由于这种合金中含有大量硅结晶粒子，虽然使用金刚石刀具也能进行加工，但难度比较大。以往使用大量的切削油进行切削加工，不仅造成环境污染，而且油的冷却润滑效果并不好，造成切削温度升高。刀具被软化而加剧磨损，加工精度也随之下降。图 4-29 是用低温冷风和微量雾化植物油与其他冷却润滑方式的刀具磨损曲线，可以看出，使用 -30°C 冷风和微量雾化植物油试验的刀具磨损最小。这是因为 -30°C 冷风降低了切削区域的温度，防止了刀具的软化；同时微量雾化植物油减少了刀具与切屑和工件的摩擦。

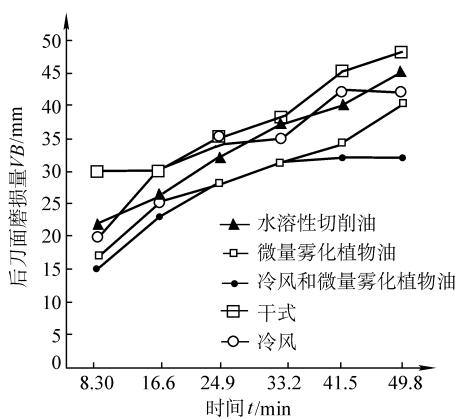


图 4-29 各种冷却润滑方式的刀具磨损曲线

6) 工件低温冷却车削加工。这种方法的基本思路是把工件在极冷的温度下冷却一段时间，然后取出，使工件材料在低温状态下进行干切削加工。冰冷的切屑带走大部分切削热，切削点始终处于低温状态，可有效地保持刀具的锋利性。下面以高锰钢为例说明这种加工方法。

高锰钢就是工程上特指的耐磨钢，牌号 Mn13 的高锰钢，增韧处理后，在常温下为单相奥氏体组织，具有强度高、塑性大、韧性高、易加工硬化、热导率低、线胀系数大等特点，是一种性能优良的结构钢。由于它的性能导致了其在常温下切削加工时，切削力大，切削温度高，刀具易磨损，断屑困难，工件热变形大，是典型的难切削材料。有关数据表明，在用 YT 类硬质合金车削高锰钢时，切削速度仅为 8 ~ 14m/min，刀具寿命一般在 30min 以下，如此低的切削效率极大地限制了材料的使用范围，因此，有必要开辟高锰钢切削的新途径。

金属材料在低温下要发生脆化，即材料的抗拉强度、屈服强度和硬度提高，塑性和韧度下降，这一点，高锰钢也不例外。按晶体结构的观点，高锰钢有不显著的低温脆性，然而，化学成分对高锰钢低温脆性的影响是很大的。表 4-7 是低温下高锰钢的冲击韧度。

表 4-7 低温下高锰钢的冲击韧度

试验温度/℃	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120
$a_K / (\text{J/cm}^2)$	276.55	252.55	201.04	150.04	90.22	44.13	16.67	24.52
$a_K/a_{20} (20^\circ\text{C}) (\%)$	100	91.1	72.7	54.3	32.6	15.9	6.0	8.9

注：钢的化学成分（质量分数）：C0.98%，Mn13.67%，Si0.42%，S0.018%，P0.082%；1050℃，2.5h 水淬。

一般认为当 a_K 值降到常温的一半（或相应标准总规定值的一半）的温度，是韧—脆转变温度，通常高锰钢的此温度约为 -40℃。表 4-8 是在 HB—3000 型布氏硬度计上，测定了高锰钢在室温和液氮冷冻后的硬度，每个工件测量三次，取平均值。

表 4-7 和表 4-8 的数据反映了高锰钢是具有低温脆性的。根据低温脆性理论，凡是具有低温脆性的材料，低温切削时，在降低切削力和切削温度、减少刀具磨损、易于断屑、提高刀具使用寿命和表面质量等方面具有明显的效果，下面介绍使用液氮冷却高锰钢进行干切削加工的实例。

表 4-8 高锰钢的硬度

试验温度/℃	试件	硬度测量值 HBW			硬度均值 HBW
		第一点	第二点	第三点	
20	A	231	232	257	240
	B	245	240	238	241
-193	B	255	252	244	250

注：A、B 两试件的原始状态相同。

采用可转位车刀在 CA6140 车床上完成，工件的冷冻设计了一套简易可行的冷冻装置，如图 4-30 所示。所采用的切削条件如下：刀具材料 YT15；硬质合金刀片型号 41605A；刀具几何参数：主前角 $\gamma_0 = 5^\circ$ ，主后角 $\alpha_0 = 10^\circ$ ，主偏角 $\kappa_r = 45^\circ$ ，副偏角 $\kappa'_r = 45^\circ$ ，刃倾角 $\lambda_s = 0$ 。

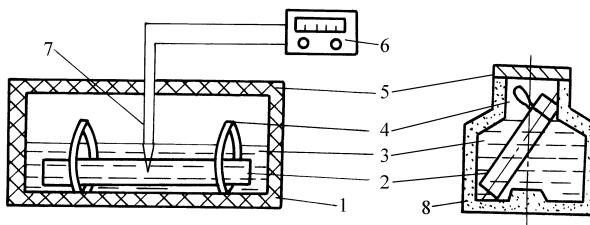


图 4-30 冷冻装置示意图

1—容器 2—工件 3—液氮 4—取料环
5—上盖 6—温度仪表 7—热电耦 8—杜瓦罐

在切削过程中，把工件放入冷冻槽中，数分钟即可达到平衡温度，然后取出进行切削。测出的高锰钢在不同温度下，切削力与切削速度的关系如图 4-31 所示。从图 4-31 可以看出，低温切削力的数值与常温时基本相同，在切削速度为 20 ~ 40m/min 时，切削力随速度变化的情况为低温时较平缓，数值较稳定，而常温下切削力变化趋势复杂，数值不稳定，波动较大。从切削力的变化情况可以推知，低温切削时刀具的切削刃承受的冲击也比常温时小，因此，低温下切削对提高刀具使用寿命是有利的。

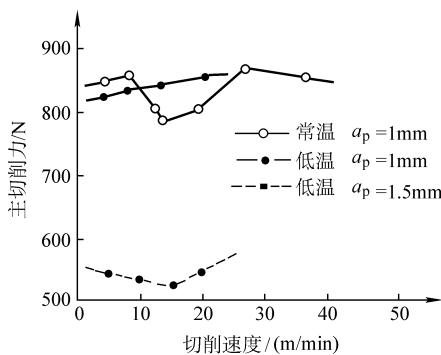


图 4-31 切削力与切削速度的关系

4.1.3 激光辅助干车削加工

为了能够更加经济地采用干切削加工方法加工陶瓷等硬质材料，在切削加工时将附加能量引入工件的表层，以便改善这类材料的切削加工性。采用激光束的形式将能量送到材料的表层，即采用激光辅助切削是一种常用的方法。采用激光辅助干切削，可以利用激光对切削区进行预热，从而使工件产生局部温升，加工区域硬度下降，加大了刀具/工件表面之间的硬度差，减小了切削力和刀具磨损，提高了工件的可加工性。

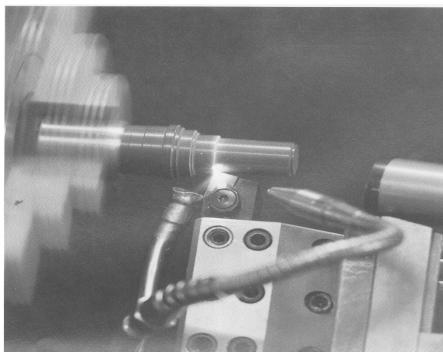


图 4-32 激光辅助车削的工艺系统构成

图 4-32 为激光辅助车削的工艺系统构成。例如，在对氮化硅陶瓷 (Si_3N_4) 工件进行干切削时，由于该材料有极高的抗拉强度，使用任何刀具加工都会很快产生磨损。但是如果采用激光辅助切削，可使工件材料局部软化，抗拉强度由 750MPa 下降至 400MPa (见图 4-33)，可减小切削阻力 30% ~ 70%，显著改善了氮化硅陶瓷材料的可加工性，刀具磨损可降低 80% 左右，干切削中的振动也大为减少，大

大提高了材料切除率，使得干切削得以顺利进行。

激光辅助加工的刀具材料可以采用聚合晶体硬质材料，如 CBN 等。将激光辅助车削加工的工件试样与经磨削加工的试样进行比较，其断裂强度提高了 64%，这主要是由于表面缺陷减少的缘故。对难切削的金属材料，如钛合金和镍合金，也可用激光辅助的方法进行加工。

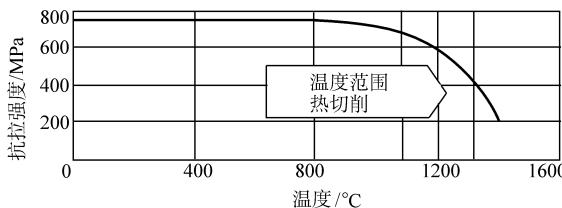


图 4-33 工件强度与温度之间的关系 (氮化硅陶瓷材料)

采用以半导体为基础的微型大功率激光器，可连同所有辅助设备全部装在一台车床中，这样可减小机床及其辅助设备的体积和占地面积。采用激光辅助干切削加工具有很好的应用前景。

4.2 干铣削加工

4.2.1 干铣削加工及特点

通常在铣削中尤其是在端铣加工中，经常会加注切削液，但在铣削中加注切削液会使刀具产生温度的激烈变化，铣刀刀片自工件切入时冷却，再切入时温度又上升。温度急剧变化在刀片中产生应力，会导致裂纹的产生。尽管在干铣时也有加热和冷却循环产生，但相比之下这种温度变化要小得多，可以通过合理选择刀具材料、结构和几何参数得到解决。对于铣削加工，采用干切削可以得到比湿切削更理想的切削效果。干铣削也是目前应用最广泛的干切削加工技术之一。

4.2.2 干铣削加工的应用

1. 铸铁与钢件的干铣削加工

铸铁及钢件的干铣削常用刀具材料包括陶瓷、CBN 等。CBN 由于具有很高的耐热性和高温硬度，很适合铸铁和淬火钢的干铣削，但综合考虑经济和技术因素，要求灰铸铁和球墨铸铁的自由石墨含量（质

量分数) 小于 5%，钢的硬度在 45HRC 以上，在机床主轴转速、进给系统允许的条件下，才可以达到很高的切削效率。表 4-9 是用 CBN 刀具干铣削灰铸铁和钢件时的切削参数。

表 4-9 CBN 刀具干铣削灰铸铁和钢件的切削参数

参数 材质	切削速度/ (m/min)	进给量/ (mm/r)	背吃刀量/ mm
灰铸铁 (精加工)	1000 ~ 2000	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4
灰铸铁 (粗加工)	1000 ~ 1500	0.4 ~ 0.5	1 ~ 3
淬硬钢 (精加工)	100 ~ 250	0.05 ~ 0.4	0.05 ~ 0.2
淬硬钢 (粗加工)	60 ~ 100	0.2 ~ 0.4	0.5 ~ 1.5

例如，美国某公司用陶瓷或 CBN 刀具材料的铣刀高速铣削铸铁。由于切削速度 (1400m/min) 和进给量 (40m/min) 都很高，切削区的温度可达 600 ~ 700℃，产生可见的红色弧光，故称为“红热切削”或“红月牙切削” (Red Crescent)。此时，切削区的工件材料达到红热状态，屈服强度下降，可使切削力降低 75% ~ 90%，并显著提高了切削效率，铣削铸铁时的切除效率比传统的粗加工提高三倍。由于进给速度很高，大部分热量留在切屑中，所以工件的热变形小，尺寸精度高。

表 4-10 为传统切削方法与红热切削的比较，可看出这种加工所产生的加工效果，这些性能参数适用于直径为 152mm 的端铣刀。表 4-10 中所示的显著效果表明，应用先进的金属切削方法是提高切削水平的关键。

表 4-10 传统切削方法与红热切削的比较

加工参数	传统切削方法	红热切削	加工效果
圆周线速度/ (m/min)	6.35	127	提高到 20 倍
主轴转速/ (r/min)	160	3200	提高到 20 倍
进给量/ (mm/r)	0.51	0.13	减小约 25%
径向切削力/N	1.9127	0.1165	减小 94%
金属切除率/ (cm/min)	525	1312	提高到 2.5 倍
刀片数量	10	5	减少 50%

上海某汽车零部件加工企业在加工上海通用汽车公司别克轿车的铸铁排气管时，采用 SECO 公司的 T150M 黑色涂层硬质合金刀片干铣削排气管端面。与原先采用另一公司的陶瓷刀片相比，生产效率明显提高，刀具使用寿命每个刃口超过 100 件。刀盘型号：R220.43—0088—Z（直径 88mm，齿数 $z = 5$ ）；刀片涂层等级：T150M；刀片型号：OFET070405TN —16；切削参数： $n = 1100\text{r}/\text{min}$, $a_p = 1 \sim 1.2\text{mm}$, $v_f = 600\text{m}/\text{min}$ 。每个切削刃的使用寿命大于 100 个工件。

近年来，CBN 刀具在珠光体灰铸铁发动机缸体的平面铣削加工中表现出了优良的特性。在上海通用汽车公司（SGM）新建成的发动机柔性生产线上，已成功地将 CBN300 运用于铣削发动机缸体平面，铣削线速度 v_c 高达 $1500\text{m}/\text{min}$ ，不仅大大提高了发动机缸体的加工效率，而且节省了大量的设备投资，提升了发动机生产线的柔性度。

2. 铝合金的干铣削

德国某大学利用各种硬质合金涂层刀片进行单刃铣削试验，干铣削锻造铝合金 AlZnMgCu1.5（飞机部件）和干铣削铸造铝合金 Al-Si10Mg（汽车发动机部件）。干铣削 AlZnMgCu1.5 材料时的主要问题是容易产生积屑瘤。试验表明，在硬质合金 K10 基体上，用涂有 WC/C、 α -C:H 涂层及金刚石涂层的刀片进行干铣削效果很好。干铣削 Al-Si10Mg 材料时的主要问题是刀具使用寿命短，加工表面质量差。图 4-34 和图 4-35 分别表示了不同涂层刀片干铣削 AlSi10Mg 时的磨损曲线和表面粗糙度值，可以看出用金刚石涂层刀片干铣削铝合金时的切削性能最好。

汽车发动机壳体的常用材料是铸铝合金，目前采用硬质合金刀具加工，但在生产过程中存在以下问题：①采用硬质合金刀具铣削加工一定数量后，工件表面质量和加工精度明显下降；②刀具磨损严重，且容易产生振动；③切削量增大时造成工件热变形，影响加工精度。发动机铝合金铣削加工是多刃断续切削，在加工过程中切削刃频繁受到周期性冲击力的作用，刀片铣削时不断受到交变弯曲应力的作用和铣削空载时的急剧冷却，同时还承受热交变负荷，刀片在切削区域内的部分存在有裂纹和机械疲劳裂纹的危险，导致加工中不可避免地发生粘刀和崩刃现象。铸铝合金材料本身具有硅的硬质点，会通过对铣刀的冲击和挤压加重刀具崩刃和刀片磨损现象，这就是硬质合金刀具

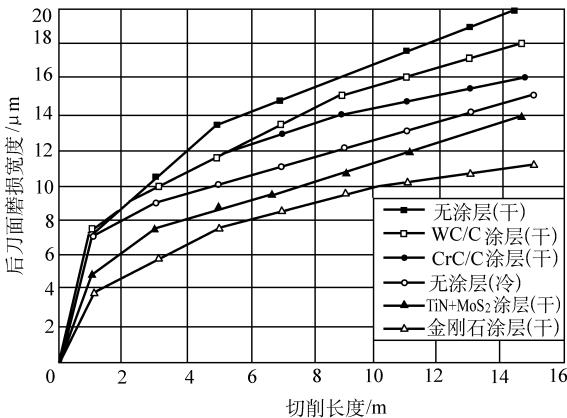


图 4-34 不同涂层刀片干铣削 AlSi10Mg 时的前刀面磨损宽度

注：切削速度为 2750m/min；接触宽度为 80mm；背吃刀量为 3mm；

进给量为 0.64mm/齿；切削长度为 15m；刀片参数为 SPGN120308；

端铣刀直径为 160mm；铣削方式为顺铣。

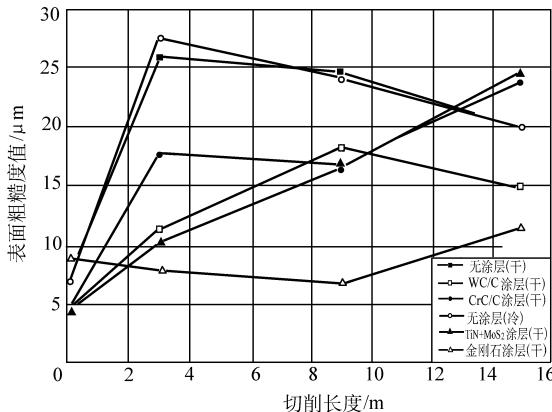


图 4-35 不同涂层刀片干铣削 AlSi10Mg 时的工作表面粗糙度

注：切削速度为 2750m/min；接触宽度为 80mm；背吃刀量为 3mm；

进给量为 0.64mm/齿；切削长度为 15m；刀片参数为 SPGN120308；

端铣刀直径为 160mm；铣削方式为顺铣。

加工的工件表面质量和加工精度明显下降，刀具磨损严重，且容易产生振动的根本原因。由于在切削时产生的切削力和切削热很小，切削过程稳定，PCD刀具更适应壳体铝合金这种断续切削加工。用PCD刀具代替硬质合金刀具，干铣发动机气缸盖球型燃烧室，在原有加工参数保持不变的条件下，加工后零件表面粗糙度值在 $0.4\mu\text{m}$ 以下（硬质合金刀具加工表面粗糙度值为 $0.8\sim1.6\mu\text{m}$ ）。加工4000件后刀具磨损量VB仅为 0.02mm ，尺寸精度和表面质量明显优于硬质合金刀具，为了提高工作效率，将进给量从 0.3mm/r 提高到 0.6mm/r ，其他参数保持不变，加工后零件表面粗糙度值仍保持为 $0.4\sim0.8\mu\text{m}$ ，加工4000件后刀具磨损量VB仅为 0.033mm 。

美国某大学用高压水喷射技术对刀具与切屑的接触区进行喷射冷却，并进行了基于这种技术的亚干铣削试验。端铣时喷水口两装置直接制作在刀具前刀面上，如图4-36所示。周铣时可设外置喷水口。铣削加工时，穿过刀具前刀面的高压水雾，在刀具与切屑的接触面间形成一缓冲层，阻止了刀具与切屑的紧密接触，从而减少了刀具与切屑表面之间的摩擦，同时使切屑弯曲而自动碎断。内置喷水口形成的冲击流可使切屑碎断，同样也减少了刀具与切屑之间的接触面积。试验表明，应用高压水喷射进行亚干铣削加工，可大大降低切削力，并明

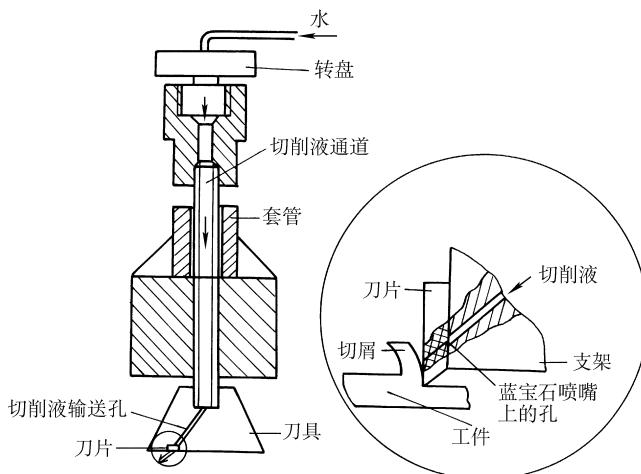


图4-36 穿过前刀面高压喷射冷却润滑系统图

显地改善了加工工件的表面粗糙度。在难加工材料（如钛合金等）铣削加工时，由于这种高压水喷射改变了切屑变形，既可减小刀具磨损，又明显地提高了生产效率，如图 4-37 所示。高压水喷射冷却润滑系统的喷水口非常小（通常为 $\phi 0.2 \sim \phi 0.5\text{mm}$ ），因而切削液用量很少，处理也很容易，因此，这种方法也是符合环境保护要求的加工工艺之一。

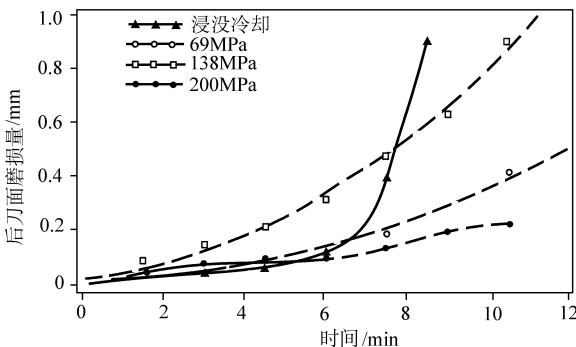


图 4-37 高压水喷射冷却润滑的磨损曲线

3. 不锈钢的干铣削

某企业在加工不锈钢（工件材料：CF—8M，不锈耐酸特种钢）阀门座底面时，原来采用 SECO 公司的 T25M（CVD 涂层）刀片湿式粗铣和精铣，由于生产批量的急剧上升，刀具寿命的矛盾显得比较突出。该企业用于粗铣的铣刀刀盘型号为 R220.43—0080—07W（主偏角 43° ，直径 80mm），所选用的刀片涂层为 T25M，刀片型号为 OFER070405TN—ME15（八角形边长 7mm 的铣刀片）。粗铣切削参数： $v_c = 130\text{m/min}$, $f_z = 0.16\text{ mm/z}$, $a_p = 2 \sim 3\text{mm}$, $a_e = 64\text{ mm}$ ；每个切削刃能加工 4~6 个工件。精铣切削参数： $v_c = 250/\text{min}$, $f_z = 0.1\text{ mm/z}$, $a_p = 0.7 \sim 0.8\text{ mm}$, $a_e = 64\text{ mm}$ ；每个切削刃能加工 12~16 个工件。企业希望提高粗铣加工的刀具使用寿命，第一次改进后选用与原来相同的切削参数，采用 SECO 公司的 NOM（PVD 物理涂层）刀片湿式粗铣，刀具寿命为 9~10 件，其结果仍没有达到要求。后改用 SECO 公司的 F20M（PVD 物理涂层）刀片干粗铣，刀片型号为 OFEN070405TN—D18（断屑槽为 D18，难加工型）。切削参数： $v_c = 180\text{m/min}$, $f_z = 0.16\text{ mm/z}$, $a_p = 2 \sim 3\text{mm}$, $a_e = 64\text{ mm}$ ；每个切削刃可加工 24~28 个工

件，取得了理想的效果。

4. 超高强度钢的干铣削

某牌号超高强度钢的 Ni、Cr、Mo 元素含量较高，具有高硬度 ($>45\text{HRC}$)、高强度 (抗弯强度 1174MPa) 和良好的韧性，因其优异的物理、力学性能而在国防工业上有着重要应用。原采用硬质合金 YT15 刀具进行铣削加工，不仅刀具寿命短，而且加工效率和加工质量都不理想。后采用 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基陶瓷刀具进行干铣削 (刀具几何参数： $\gamma_0 = 0^\circ$, $\alpha_0 = 0^\circ$, $b_{\text{r}} \times \gamma_{01} = 1\text{mm} \times 15^\circ$, $r_e = 2.5\text{mm}$ ；切削方式：单齿端面对称干铣削；铣刀盘参数：直径 $d = 125\text{ mm}$, $\gamma_p = -9^\circ$, $\gamma_f = -3^\circ$)，加工表面粗糙度值 R_a 为 $0.48 \sim 0.77\mu\text{m}$ ，取得了理想的效果。

4.3 干钻削加工

4.3.1 干钻削加工及特点

钻削加工时钻头处在半封闭的空间中，钻削产生的热量也聚集于此，同时切屑也必须从孔中排出，因此，不使用切削液的干钻削就显得更为困难。日本不二越公司对干钻削进行了研究，开发出了专门用于干钻削加工的 AQUA 钻头系列。AQUA 是一种蓝绿色涂层，它是以 TiAlN 涂层为基础，在其上再涂覆一层润滑性能优异的表层。钻削时，这种涂层具有与切削液相当的润滑作用，再与特殊设计的排屑槽相匹配，使此种钻头获得了十分优异的切削性能。

图 4-38 所示为用 AQUA 钻头和涂层硬质合金钻头高速干钻削碳钢 S50C (185HBW) 时的情况对比，AQUA 钻头加工孔的数量是涂层硬质合金钻头的四倍以上。

干钻削铝合金显得更为困难。为了寻找适宜的干钻削条件，有人对铝合金 AlSi6Cu3 的干钻削进行试验，并观察了干钻削时的一些现象。下面就对干钻削试验过程及现象进行简单的

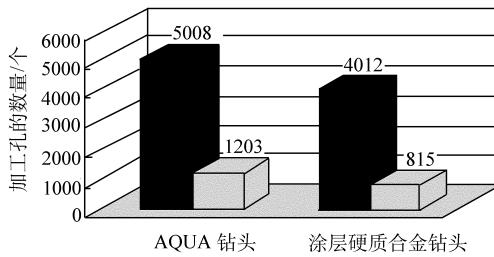


图 4-38 高速干钻削碳钢

分析。

(1) 积屑瘤的产生 干钻削铝合金 AlSi6Cu3 时, 仅仅在钻削了几个孔后, 在切削刃附近就产生了严重的积屑瘤, 如图 4-39a 所示。分析标准钻头钻削时切屑的流速, 如图 4-39b 所示, 切屑流动速度从钻心向外切削刃逐渐增大, 整个主切削刃上产生宽而薄的带状切屑向钻心方向卷曲, 受到螺旋槽及端面的阻挡, 因而形成积屑瘤。由于较大切屑不能及时排出, 因而形成大量的热量聚积, 这样, 切屑就粘在容屑槽中, 使钻头失去切削能力, 如图 4-40 所示。

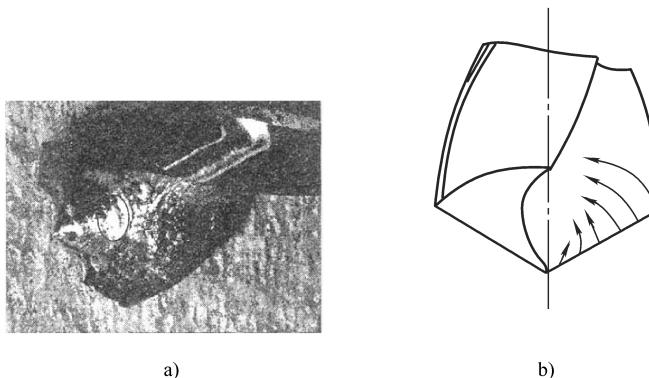


图 4-39 切削刃附近的积屑瘤

a) 积屑瘤 b) 切屑流速

(2) 干钻削钻头几何参数的确定 排屑是否流畅是干钻削的关键问题。影响切屑排出的因素主要有螺旋槽的形状、螺旋角、切屑的初始流动方向和钻削时产生的热量。这些因素与钻头的几何参数有关, 这些参数包括螺旋角、钻尖角和后角。一般分析认为, 大螺旋角可改善切屑排除状况, 同时由于前角增大, 减小了钻削时产生的热量; 大的钻尖角会改善切屑的初始流动方向, 并使容屑空间增大, 可减少积屑瘤的形

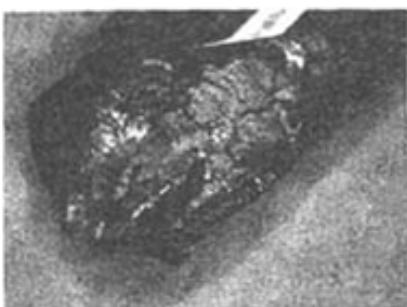


图 4-40 钻削铝合金
AlSi6Cu3 时切屑的堵塞

成；大的后角减少了钻头后刀面与工件之间的摩擦，因而也减小了热量的产生。

当干钻削铝合金时，上述三个因素对刀具使用寿命和加工表面粗糙度的影响，可通过正交试验进行分析。设钻削速度和进给量不变，三个因素均为两水平，分别记录钻头所加工孔的数量和测量孔的表面粗糙度数值，其结果如表 4-11、表 4-12 和图 4-41 所示。

表 4-11 几何参数和切削条件水平

因素水平	A	B	C	切削速度/(r/min)	进给量/(mm/r)
	螺旋角/(°)	钻尖角/(°)	后角/(°)		
1	31	130	15	3000	22.5
2	39	160	25	3000	22.5

由试验结果可见，大螺旋角和大钻尖角钻头的使用寿命较长，而所有试验条件对表面粗糙度的影响不大。

为了进行干钻削，可对钻头进行修磨，以改变其切削角度并磨出分屑槽，各种群钻就是这种理念的实践。

表 4-12 每种钻头所加工的孔的数量

钻头号	A	B	C	钻头几何参数（螺旋角-钻尖角-后角）/(°)	试验1	试验2	试验3	平均值
1	1	1	1	31-130-15	5	7	3.5	3.5
2	1	1	2	31-130-25	5	5	4.5	4.5
3	1	2	1	31-160-15	8	10	5.5	5.5
4	1	2	2	31-160-25	9.5	5.5	7	7
5	2	1	1	39-130-15	7.5	9	6.5	6.5
6	2	1	2	39-130-25	7.5	7.5	7	7
7	2	2	1	39-160-15	9	9.5	6	6
8	2	2	2	39-160-25	9	7.5	7.5	7.5

(3) 干钻削加工条件分析 改善切屑排除的另一种方法是改变切削参数，使切屑形状变成小而轻的，以利于方便地排出。切屑形状的变化主要取决于切削速度和进给量。在其他条件不变的情况下，改变主轴转速和进给量进行试验，可以观察切屑形状的变化，如表 4-13 和图 4-42 所示。

表 4-13 主轴转速和进给量

序号	主轴转速/(r/min)	进给量/(mm/r)
1	800	0.71
2	1500	0.38
3	3000	0.19
4	6000	0.076

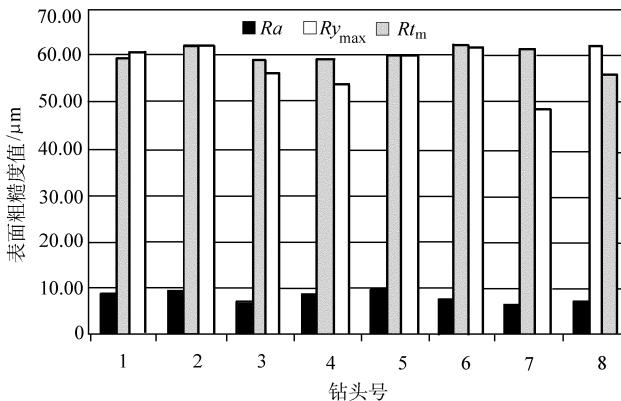


图 4-41 每种钻头所加工孔的表面粗糙度值

试验中每钻削 10 个孔后，将切屑收集起来以便观察分析和比较。当进给量由大向小变化时，切屑从厚重向轻薄变化，其形状变化非常明显。细小切屑的数量也随着进给量的增加而迅速增加，这些细小切屑沉积在切削刃附近，极易形成积屑瘤，如图 4-42a 所示。进给量最小时，切削刃附近只有轻微的切屑沉积，如图 4-42d 所示。所有这些表明，切削参数的改变是改善切屑排除状况，提高钻头寿命的方法之一。

(4) 亚干钻削和气体低温冷却钻削的比较 从上述试验结果得知，用大螺旋角、大钻尖角和小进给量，可以提高干钻削加工铝合金钻头的使用寿命，但是这种改善是非常有限的。因为切屑的沉积、粘结在螺旋槽中和生成积屑瘤等问题都未得到解决。采用亚干中最小润滑钻削 (MQL, Minimal Quantity of Lubrication) 或气体低温冷却 (AC, Air Coolant) 及两者组合的方法 MQLAC 进行铝合金的钻削加工，可显著改善上述情况，如图 4-43 所示。

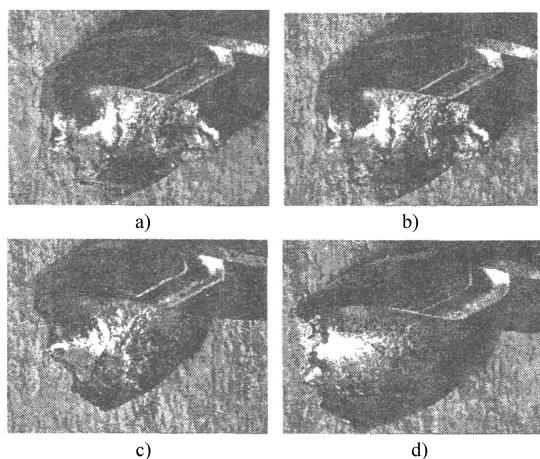


图 4-42 不同钻削条件下的切屑沉积
a) 主轴转速 800r/min b) 主轴转速 1500r/min
c) 主轴转速 3000r/min d) 主轴转速 6000r/min

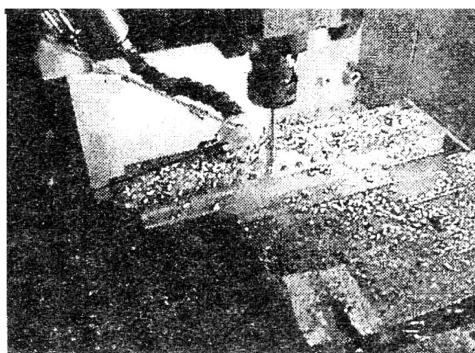


图 4-43 MQLAC 方法试验装置

冷却空气输送系统可参照旋风管理论来设计。压缩空气沿切向送入加工系统，通过一个旋风管转换成两路低压空气流，一路热气流，一路冷气流。热气流在一热空气交换器中流动和交换；冷气流通过一柔性管指向钻尖处，驱散钻削过程中产生的热量。通过降低切削温度，来减轻或消除积屑瘤和切屑的粘结问题。

MQL 方法的目的在于改善钻头螺旋槽的润滑性能。切削液可以防止微小切屑沉积和粘结在螺旋槽表面，保持螺旋槽表面光滑，以利于切屑的排出和防止积屑瘤的产生。采用甘油三酸酯、丙烯乙二醇酯类等切削液，借助于压缩空气将切削液雾化，并吹到钻尖处。切削液使用量为 0.1 ~ 0.3 mL/min。

钻削试验的主轴转速为 3000r/min，进给量为 0.19mm/r。不同钻削条件下的钻削孔数、钻头状况及钻孔表面粗糙度见图 4-44 和表 4-14。

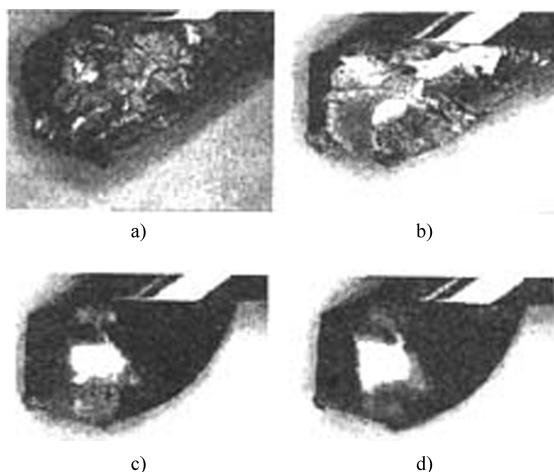


图 4-44 不同钻削条件下的钻头状况

- a) 冷却空气（加工 29 个孔后） b) 最小润滑（加工 55 个孔后）
- c) 冷却空气 + 最小润滑（加工 80 个孔后） d) 湿切削（加工 80 个孔后）

表 4-14 不同钻削条件下加工的孔的表面质量

孔数及表面粗糙度 /钻削条件	干钻削	冷却空 气钻削	最小润滑 钻削	最小润滑 + 冷却空气钻削	湿式钻削
钻削孔的数量/个	8. 2	29	55	>80	>80
$Ra/\mu\text{m}$	6. 51	4. 71	5. 52	7. 04	1. 62
$Ry_{\max}/\mu\text{m}$	61. 58	58. 94	59. 04	59. 07	40. 71
$Rt_m/\mu\text{m}$	48. 26	54. 78	56. 26	46. 17	15. 64

钻削试验中，干钻削、冷却空气钻削和最小润滑（ $0.12\text{mL}/\text{min}$ ）钻削的钻孔数量分别为8个、29个和55个。钻头的失效方式都是由于切屑粘结在螺旋面而排屑不畅、并生成积屑瘤所致。当切削液的使用量增加到 $0.3\text{mL}/\text{min}$ 时，可钻削80个孔。这说明切削液数量多可以减小摩擦，降低钻削过程中产生的热量，抑制了积屑瘤的产生，提高了钻头的使用寿命。将最小润滑方法和冷却空气方法结合使用，钻削过程中产生的热量很快地被冷却空气带走，积屑瘤得到了明显抑制。这种钻削状态与湿式钻削相同，钻头使用寿命得到明显提高。但以上方法加工的孔表面质量皆不如湿式钻削好。

从上述试验和分析结果得知，干钻削铝合金时，必须使钻头螺旋槽表面保持平整、光滑，以减小积屑瘤形成的可能（已讨论过的各种涂层钻头正是适应这样的要求而制作的）；设计或选择合理的钻头几何参数，如螺旋角、钻尖角及切削刃形状，可改善切屑形成的状态，有利于切屑的排出，减少切削热量等，但这种改善是有限的；通过合理地选择钻削用量（钻削速度、进给量），改善排屑情况可能更方便和有更好的效果。总之，干钻削铝合金最有效的方法是采用亚干钻削加工。

4.3.2 干钻削加工的应用

1. 深孔加工中的干钻削

深孔钻削是金属切削加工中较困难的工艺过程，深孔加工常用的钻头有枪钻、内排屑深孔钻、喷吸钻、套料钻等。现在采用普通喷吸钻的工作原理以压缩空气代替切削液的深孔加工方法，钻头的结构设计和几何参数的选择作了适当的改进，制造工艺较为简单。

图4-45为气体喷吸钻工作原理图，压缩空气由进口处进入后，三分之二的气体从内、外管之间通过钻头上的小孔进入切削区，另外的三分之一气体从内管后端的斜孔向后排出，由于斜孔很小，气体流速很快，产生喷射效应而形成一个低压区，使管的后端对切削区有一定的吸力，从而将切屑很快向后排出。

图4-46为喷吸钻钻头的结构示意图。与普通喷吸钻刀片的错齿排列方法不同，气体喷吸钻钻头刀片的切削刃采用在钻头中心线上连续排列的方法。一是可以有效地减少径向切削力的不对称，有利于减少因径向力而引起的钻杆偏斜；其次，有利于制造并增强刀尖的强度，

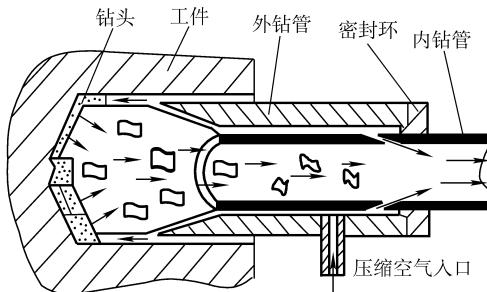


图 4-45 气体喷吸钻工作原理图

根据直径大小和钻头各部位的切削条件，可以用一到几片不同牌号的硬质合金刀片焊在刀体上，通常在钻头中心应选择韧度较好的刀片，如 YT5 等，而在钻头的外缘则可选择高温切削性能较好的刀片，如 YT15、YW2 等。

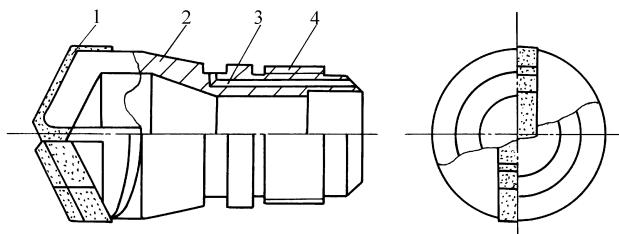


图 4-46 喷吸钻头的结构图

1—刀片 2—刀体 3—通气小孔 4—方牙螺纹

气体喷吸钻钻头的几何参数如下：

(1) 钻尖角 由于刀片布置较对称，径向力较小，因此，取较适中的 120° 左右的钻尖角，这样，可以增大刀片外缘的刀尖角，改善散热条件，提高钻头寿命。

(2) 前角 因为钻头切削刃各处切削力不同，为保证切削刃的强度和切削效率，靠近钻头外缘处可取 $\gamma_0 = 8^\circ \sim 15^\circ$ ，而在钻头近中心处，为防止崩刃，可采用 $0^\circ \sim -5^\circ$ 的前角。为增加切削刃的强度，可用油石在切削刃上修磨出 $0.05 \sim 0.1\text{ mm}$ 、 $0^\circ \sim -5^\circ$ 的倒棱。

(3) 后角 为增强钻头的强度，后角可适当取得小一些，钻削钢材时，可取 $\alpha_0 = 5^\circ \sim 8^\circ$ 。

(4) 分屑槽 在切削刃上应磨出分屑槽，分屑槽的尺寸取宽1~1.5mm，深0.3~0.5mm为宜。这样可减少切屑的宽度，切屑变形减小，有利于排屑的顺畅，两条分屑槽之间切削刃的长度应根据钻头排屑孔的大小决定，一般可在5~10mm之间选择。

(5) 断屑槽 切屑的形状是关系到深孔加工成败的关键，切屑的形状以C形为佳。由于断屑情况取决于工件材料、切削用量和刀具几何参数等因素，所以断屑槽参数必须通过试验才能最后确定，在制造时，可先在车刀上进行试验。

此外，气体喷吸钻钻头刀片的外缘与孔壁接触处应修磨圆滑，这样，刀片外缘可代替导向块，减少了制作成本。

要使切屑顺利地从内管排出，内管的排气小孔的加工质量十分重要。孔的轴线与钻头的轴线成30°较好，角度太大，不利于在管内形成低压空间和产生喷吸效应，角度太小则加工比较困难。如果内管的管壁较厚，小孔可直接在内管壁上加工，如果管壁较薄，可利用内、外管末端的密封圆环配合加工，直接在密封圆环上加工出斜孔。

当钻头直径较小时，为了尽可能增加内管内径，可直接在刀体上铣出直槽来代替六个小孔，但此时刀体末端与外管的配合间隙应尽量减小，以减少气体的泄漏。刀体与外管的连接应采用多头方牙螺纹，以便于钻头的拆卸。

与使用切削液的喷吸钻相比，气体喷吸钻的刀片散热较为困难，因此温度较高。为此，可在进气口处增加一个定量泵，并使切削液雾化后进入进气口，这样可大大改善刀片刀口的工作状况，从而提高切削速度。

2. 采用热管技术的干钻削

这种方法是在钻头中加工一个孔，在其中加入液体（水），然后盖上盖子，这样就形成了一个热管。热管在工作中没有任何移动部件或电子元件。在钻削过程中，由于钻尖连续与工件接触，因此会产生热量，这些热量会从钻尖处传递到钻头本体上。随着热从钻尖传到热管中，管中液体变热而沸腾，并在热管中产生蒸汽。蒸汽上升会从钻头顶尖处带走部分热量，直至刀夹（V形法兰或HSK）体所在的钻柄处。这种热对流动作可以让刀夹充当散热器，并将热从钻头带走。随着热的扩散，蒸汽冷却并重新冷凝成液态水。液体流回热管，这种循环一直

重复进行。实际上，热管是一个热驱动泵，由它将热从钻头顶尖带走。这种热管使钻头的寿命比直接进行干钻削的钻头寿命延长了 40% ~ 60%。图 4-47 则是这种热管钻头顶尖处的热量分布情况。

3. 几种材料的干钻削比较

干钻削是干加工工艺中最难的工艺，但通过改进钻头的几何形状和采用硬涂层可以解决这一问题。如改进排屑槽的横截面形状，使槽口直接延伸到柄部，增大排屑槽的螺旋角，采用较大的倒锥、较窄的倒棱和较小的切削刃半径，以及采用 TiAlN 涂层和微量润滑等措施，以减少摩擦和确保可靠排屑。表 4-15 列出了干钻削的应用实例。

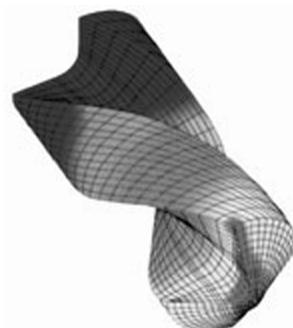


图 4-47 热管钻头
顶尖处的热量分布情况

表 4-15 干钻削的应用实例

刀具	材料	硬质合金		
	镀层	TiAlN		
	直径/mm	5.05	14	三刃阶梯钻 8.6/11.0
工件材料	ST37	球墨铸铁 (GGG70) QT700-2	球墨铸铁 (GGG40) QT400-18	
切削速度/ (m/min)	317	100	86/110	
进给量/ (mm/r)	0.4	0.3	0.3	
孔深/mm	15	30	42	
微量润滑/干加工	微量润滑	微量润滑	干加工	
刀具寿命/min	7	25	280	

4.4 干式齿轮加工

4.4.1 干式滚齿加工及效果比较

1. 干式滚齿加工

20 世纪 60 年代以来，世界各国一直在为采用硬质合金滚刀以提高

滚齿工艺水平而努力。我国在重型机械行业，对模数较大的淬硬齿轮（硬度在 50~52HRC 以内）进行刮齿精加工，能达到 7~8 级的加工精度，个别情况也可达到 6 级精度水平。这方面已有成熟的经验，与国外水平相当。进入 20 世纪 90 年代中期，研究中心转移到大批量生产的滚—刮—珩汽车齿轮上来。近年来，随着环保立法对切削液的使用和废油处理的限制，齿轮加工的重心又转向了不用切削液的干式齿轮加工，以求得到良好的社会效益和经济效益。

日本的三菱公司、美国的格里森公司都在齿轮干切削方面做了大量的工作。三菱公司推出了世界上第一套干滚切系统，其切削速度是传统滚切速度的两倍，达到了 200m/min。三菱公司专门设计了涂有专有涂层的 MACH7 高速钢滚刀，这种涂层有助于散热，并减少刀具磨损，滚刀寿命是一般湿式加工方式的五倍。这一系统在加工汽车末级传动齿轮、大型载重齿轮、汽车小齿轮及行星齿轮时效果均很理想，使生产成本降低 40%。格里森公司用硬质合金滚刀在 Phoenix 机床上用干切削方法加工锥齿轮，滚切速度可达 3000r/min，与传统的高速钢刀具湿切削相比，降低切削时间 50%，而且齿轮表面粗糙度显著降低，几何精度大大提高，加工精度可达 AGMA12~13 级。该公司生产的 GP 系列滚齿机以其独特的设计，使其加工质量能与湿加工相媲美。其床身设计成大角度斜坡，以利于切屑流动；床身内部循环冷却，以利于维持热平衡；此外，机床还配有一套真空除尘系统。

某工厂在对轿车变速操纵轮工艺装备进行技改时，决定由原来的湿式加工改造为干切削。为此采用涂层硬质合金滚刀替代原来的涂层高速钢滚刀，切削速度由原来的 110m/min 提高到了 290m/min。这不仅缩短了加工时间，提高了机床的加工能力，而且每件的加工费用降低了 43%（见图 4-48）。由此可见，采用干切削可以获得很好的技术经济效益。

用高速钢滚刀对钢质齿轮滚齿时，一般需加切削液对滚刀进行冷却和润滑，同时能使工艺系统温度稳定，以保证加工精度。用硬质合金滚刀进行高速滚齿时，由于交变的瞬时热冲击会造成滚刀崩刃，这是高速滚齿长期不能推广的重要原因之一。为此，人们进行了广泛的研究，以求改善滚刀的性能。例如，开发新的刀具材料（如细晶粒、超细晶粒的 P25~P40，我国相应的牌号有“材 21”、“材 23”和热强度

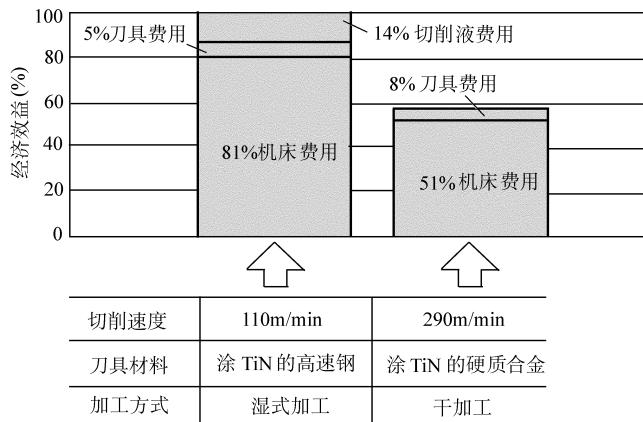


图 4-48 干式滚铣汽车操纵轮的经济效益

更高的 K05 ~ K10)；对滚刀进行 TiN 和 TiAlN 涂层等。这些方法虽然使硬质合金滚刀的切削速度达到 200m/min 左右，但还不能避免崩刃的出现。近年来，也开发了陶瓷材料滚刀，其切削速度可达 400m/min，但价格过于昂贵。

能否干式滚齿，不是简单地提高转速和不用切削液，而是需要对刀具、机床和工艺参数进行综合协调和优化，作出重大改进才能实现。表 4-16 是干式滚齿和湿式滚齿的比较。

表 4-16 干式滚齿和湿式滚齿的比较

比较项目	湿式滚齿	干式滚齿
滚刀寿命	<ul style="list-style-type: none"> ● 在中等切削速度时能减少切削刃的磨损 ● 没有最小切削厚度的限制 ● 采用小压力角滚刀可以带凸角 	<ul style="list-style-type: none"> ● 有可能允许更高的切削速度 □ 设计滚刀和考虑进给量应按照使切屑负荷在 0.1 ~ 0.8mm 左右，或者采用分两次走刀 ◊ 允许滚刀的最小压力角 (10°)
生产能力	<ul style="list-style-type: none"> ● 可以多工件叠合加工以节约加工时间 ◊ 要求齿坯定位面有较高的精度 	<ul style="list-style-type: none"> ◊ 由于存在温度影响，每次只能加工一件 ● 精加工时，螺旋角、锥度和鼓形均能修正 ● 材料和镀层预期还能进一步改进（例如，采用陶瓷材料）

(续)

比较项目	湿式滚齿	干式滚齿
工件加工质量	<ul style="list-style-type: none"> ●工件齿面上不会因切屑流动不畅而出现抓伤 ●切削热量主要由切削液带走，所以机床热平衡需要较长时间 ●工件温度不高，检验方便 	<ul style="list-style-type: none"> ●切削热量主要由切屑带走，齿面质量较好 □先测定加工后工件的热膨胀大小，在温热状态下检查工件并不麻烦 □必要时，机床可以修正锥度
排屑	<ul style="list-style-type: none"> ●常规的冲洗清除切屑 	<ul style="list-style-type: none"> □排屑器需适应切屑流，迅速排屑
环境保护	<ul style="list-style-type: none"> ◇必须配备抽油雾机 ■工件是否需要清洗 ◇切屑需要除油处理 	<ul style="list-style-type: none"> □建议增加吸尘器 ●观察切削过程很方便 ●对周围环境不会有影响

注：●表示占优势；□表示中性；◇表示弱点；■表示不一定。

高速干式滚齿工艺对滚齿机的要求是提供足够高的切削速度和切削功率，并从保证工件加工质量和延长滚刀寿命的角度处理好能量分配，如图 4-49 所示。

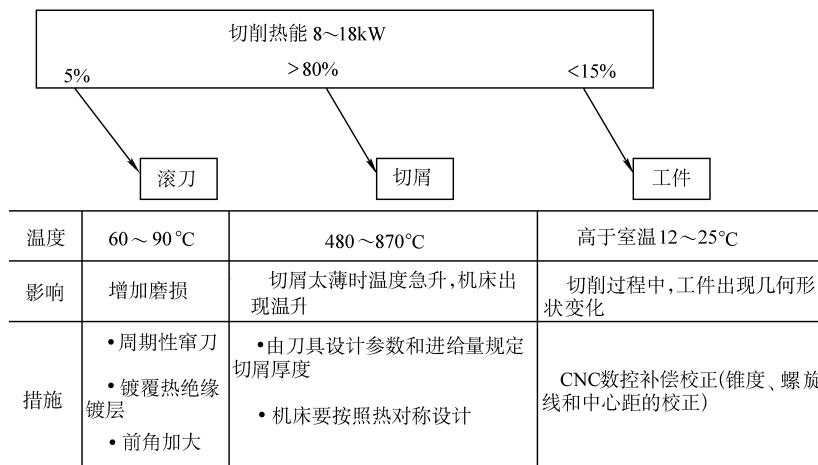


图 4-49 干式滚齿时理想的切削能量分配

美国某公司设计了一种型号为 LC82 的新型滚齿机，驱动滚刀的电动机功率为 18kW，转速为 3000r/min，滚刀最大直径为 900mm，此时

滚刀转速为850r/min，工作台的转速可达450r/min，并配备了适合干切削的排屑装置和自动上下料机构。在该机床上滚削汽车变速器中的齿轮，若采用TiN涂层高速钢滚刀加工，切削速度为120m/min，进给速度为3mm/r，加上上下料时间3s，单件总工时为28s；若采用TiN硬质合金滚刀干滚削，切削速度为350m/min，单件总工时则降至17s；若用陶瓷滚刀干滚削，单件总工时可进一步下降至13s，这样加工成本可下降15%~25%。

进行干滚削的滚刀应设计成多头多槽的长滚刀（目前用得较多的是双头，12~18槽），切削槽数越多，参加切削的刀齿数目增多，可提高齿形精度，减小切屑厚度。但必须保证有足够的容屑空间和刃磨次数（不得少于18~20次）。滚刀的长度越长，容许窜刀范围越大。通过窜刀，可使滚刀各刀齿的磨损均匀，适当地选择窜刀量对延长滚刀寿命有重要影响。假若长度比标准滚刀增加一倍，刀具价格也增加一倍，那么通过窜刀使寿命可以增加两倍。

滚刀的刃磨应安排在加工完一批工件或生产满一个班后进行。刃磨质量会影响滚刀的使用寿命。刃磨余量要小，滚刀刀口一定要倒成0.05~0.1mm的圆角，如图4-50所示，否则滚刀刃磨后涂覆的TiN涂层容易剥落。刃磨时用金刚石砂轮，磨削速度为20~30m/min，轴向往复行程速度约为4m/min，最后无火花磨削约0.5h。刀口可用布轮进行抛光倒钝，然后再去涂层。

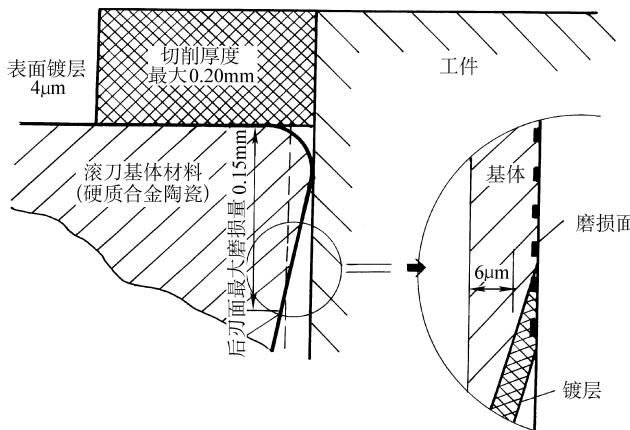


图4-50 滚刀刀口的倒钝

进行干滚削时的切削速度主要受滚刀材料和工件材料限制。工件材料越硬或者强度越高，则允许的切削速度就越低，如图 4-51 所示。进给速度受走刀波纹高度限制，若后续有剃齿工序，能去除波纹，可选用较大的进给速度。为保证切削厚度不小于 0.1~0.12mm，当工件材料较硬时，只能降低进给速度。切削厚度也与刀具和工件材料强度有关，如图 4-52 所示，一般在 0.1~0.2mm 之间。

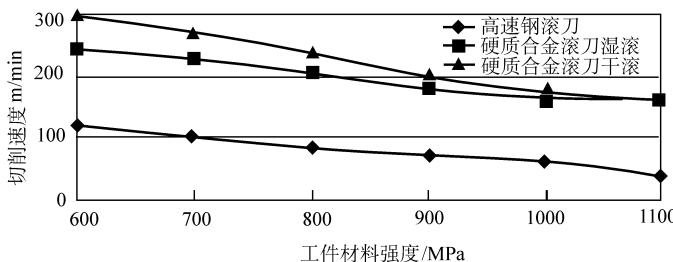


图 4-51 滚切速度和工件材料强度之间的关系

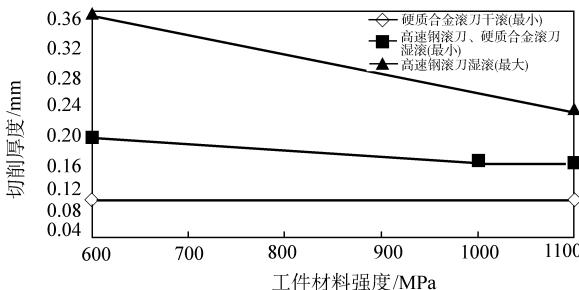


图 4-52 允许的切屑厚度和工件材料强度之间的关系

干滚齿加工在大批量生产中能取得良好的经济效益。表 4-17 是美国福特公司某工厂加工汽车转向齿轮时几种工艺方案的比较。工件材料为 SAE1045，硬度为 22HRC。原来的工艺为用高速钢滚刀湿式滚齿。新工艺 1 为 P 类硬质合金滚刀 TiN 涂层，前角为 0°，14 槽，采用干高速滚齿；新工艺 2 为 P 类硬质合金滚刀 TiAlN 复合涂层，前角为 5°~7°，12 槽，干高速滚齿。从表 4-17 中可以看出，新工艺不仅提高了生产率，降低了成本，加工质量也全面超过了高速钢滚刀滚齿的水平。

表 4-17 加工汽车转向齿轮时几种工艺方案的比较

比较项目	原来的工艺	新工艺 1	新工艺 2
单件工时/s	42	21	22.5
单件成本/美元	0.1149	0.1042	0.0814
每次刃磨后加工的工件数量/件	3150	4500	10000
滚刀刃磨次数/次	新刀 + 12	新刀 + 20	新刀 + 20
每把滚刀总寿命/件	39000	94600	200000
齿面表面粗糙度值(要求 $R_a < 1.5 \mu\text{m}$)/ μm	1.1 ~ 1.5	0.5 ~ 0.75	0.5 ~ 0.75
齿圈径向圆跳动(要求 $< 0.1 \mu\text{m}$)/ μm	0.05 ~ 0.1	0.013 ~ 0.05	0.013 ~ 0.05

2. 不同冷却方法滚齿效果比较

某高校进行了低温气体射流冷却(冷气、水、油混合雾化射流, 即亚干冷却)、冷风射流冷却、传统油冷却、不加任何冷却介质四种不同冷却方法进行滚切试验。试验用工件材料选用 45 钢, 硬度为 175HBW; 加工齿轮内径为 25mm, $Z = 24$, $m = 3\text{mm}$; 试验机床为 YB3150 滚齿机及附件, 滚刀材料为 W18CrMnNi、A 级、头数 $K = 1$; 测量仪器: 激光红外线测温仪(ST—60 美国)、传感式测温表 TM—920C、BCJ—2 型表面粗糙度检测仪等; 试验用装置为冷风射流发生器。

由于滚切齿轮时切削温度测量非常困难, 试验通过测量参与切削的滚刀刀齿齿背的瞬间温度来间接反映滚刀切削时各种冷却方法下切削区的切削温度, 试验过程中记录的试验数据如表 4-18 所示, 以曲线表示如图 4-53 所示。

表 4-18 四种冷却工况下滚刀刀齿齿背温度试验数据

低温气体射流冷却工况							
时间间隔/min	0	2	4	6	8	10	12
滚刀温度/°C	24	24.2	24.6	25.2	24.1	23.7	22.7
冷风射流冷却工况							
时间间隔/min	0	2	4	6	8	10	12
滚刀温度/°C	25.6	25.7	26.3	26.8	26.4	25.1	24.6
传统油冷却工况							
时间间隔/min	0	2	4	6	8	10	12
滚刀温度/°C	28.9	30.7	32.7	33.4	30.8	29.8	29.3
无任何冷却工况							
时间间隔/min	0	2	4	6	8	10	12
滚刀温度/°C	33.2	34.1	34.5	35.8	35.4	35.1	34.4

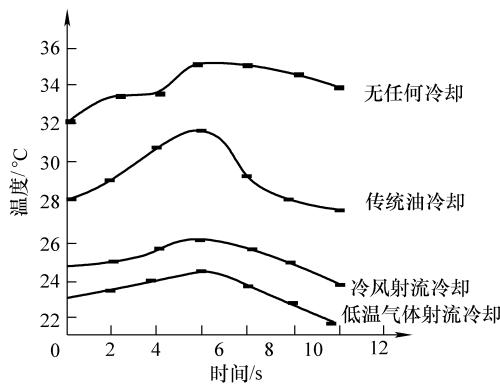


图 4-53 四种冷却方法滚刀齿背温度对比

滚齿切削试验时在前述四种冷却工况下，滚刀前刀面磨损、烧损状况见滚刀刀齿磨损宽度数据表 4-19，滚刀前刀面磨损、烧损状况见图 4-54 ~ 图 4-57。

表 4-19 滚刀刀齿磨损宽度数据 (单位: mm)

低温气体射流冷却工况						
测量的齿序	1	2	3	4	5	6
可见磨损宽度	0.2	0.15	0.24	0.32	0.34	0.17
冷风射流冷却工况						
测量的齿序	1	2	3	4	5	6
可见磨损宽度	0.7	0.6	0.42	0.58	0.68	0.38
传统油冷却工况						
测量的齿序	1	2	3	4	5	6
可见磨损宽度	0.98	0.92	0.68	0.66	0.34	0.17
无任何冷却工况						
测量的齿序	1	2	3	4	5	6
可见磨损宽度	1.4	1.1	1.04	0.8	1.36	1.34

滚齿切削试验时在前述四种冷却工况下，切屑形态见图 4-58 ~ 图 4-61。



图 4-54 无任何冷却介质切削的刀具磨损情况

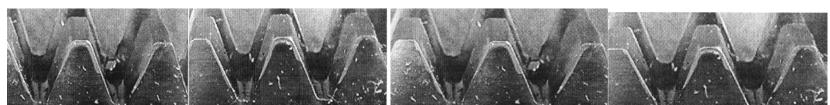


图 4-55 传统油冷却切削的刀具磨损情况



图 4-56 冷风射流切削的刀具磨损情况



图 4-57 低温气体射流冷却切削的刀具磨损情况



图 4-58 低温气体射流
冷却切削时的切屑形态



图 4-59 冷风射流冷却
切削时的切屑形态



图 4-60 传统油冷却
切削时的切屑形态



图 4-61 无任何冷却介质
切削时的切屑形态

从图 4-58 ~ 图 4-61 的切屑形态可以看出，低温气体射流冷却切削情况下切屑外表面光滑，切屑小而细长，内表面相对不是太粗糙；冷风射流冷却切削情况下的切屑呈条状，几何尺寸比低温气体射流冷却切削工况下大，外表面可见摩擦表面，内表面受挤压有轻微炭化；传统油冷却切削情况下的切屑呈块状，外表面较粗糙，内表面显见炭化；无任何冷却介质切削情况下切屑大，呈块状，外表面非常粗糙，内表面炭化严重，有“烧伤”现象。

由表 4-18、图 4-53 可知，低温气体射流冷却对切削热的抑制要好于冷风射流冷却，其主要原因是低温气体射流冷却加入微量润滑油，冷风条件下加强了润滑效果，改善了刀具与工件之间的摩擦状况，因而能更好地降低切削温度；油冷时切削温度明显低于不加任何冷却方法的情况，不加任何冷却方法情况摩擦大，产生切削热不能及时带走，而油冷时有润滑，大量的油浇注能够带走一部分切削热，虽然效果不如低温气体射流冷却切削、冷风冷却切削，但是较不加任何冷却介质切削方法要优越得多。试验表明：低温气体射流冷却滚削（冷气、水、油混合雾化射流，即亚干冷却）时测量的滚刀切削温度最低，冷风射流冷却、传统油冷却、不加任何冷却介质冷却滚削时测量的滚刀切削温度依次增高。同样，由图 4-54 ~ 图 4-57 可知：低温气体射流冷却滚削（冷气、水、油混合雾化射流，即亚干冷却）时滚刀的磨损最轻微，冷风射流冷却、传统油冷却、不加任何冷却介质冷却滚削时滚刀的磨损依次严重。

干式齿轮加工中采用硬质合金、高速钢刀具或适宜的涂层，同时

进行亚干冷却、冷风冷却切削以及在适宜工况下的高速切削，可以获得良好的加工质量、高的生产效率和低的生产成本，这种工艺方法将会在齿轮加工中得到广泛应用。

4.4.2 干式插齿加工

插齿加工为间断切削，插齿刀处于一种强烈的机械和热的交变载荷作用下，由于插齿时同时有多个切削刃参与切削，其特有的刀具载荷的叠加会导致特殊的刀具磨损形态，这些磨损形态与插齿时的进给方法有关。传统插削是采用有滚动或无滚动的往复运动方式插齿，这种加工方式会使工件加工表面产生强烈的变形和加工硬化，从而导致插齿刀后刀面发生磨损，影响插齿过程的进行和插齿质量。采用控制切削过程（CCP，Controlling Cutting Process）插齿方式，由于高的滚动进给速度再加上递减分级的径向进给，刀具不再形成或仅产生很小的后刀面磨损，此时的前刀面月牙洼磨损对插齿质量几乎不产生影响，再配合采用新型涂层插齿刀，可使刀具寿命提高两倍以上。插齿刀除采用普通的硬质材料涂层外，如 CrN、(Ti, Al) N、Ti (C, N) 梯度涂层，还可采用优化涂层工艺的 Ti (C, N) 多层涂层，TiN + MoS₂混合涂层等。试验过程的结果表明，采用涂层刀具，在不降低插齿刀使用寿命和加工质量的条件下，完全可以实现干插齿加工。

CCP 插齿时，插齿刀月牙洼磨损的发展可以划分为五个阶段，如图 4-62 所示。初始月牙洼的形成点总是在切入边；随着加工时间的延续，月牙洼磨损也会产生在切出边，随后从切入边向齿顶方向发展；在月牙洼磨损深度最大值部分从切入边向齿顶方向延长的同时，切入边和切出边上的两个月牙洼磨损区也同时增大；最终在齿顶中部形成磨损最大值区域，并直至月牙洼磨损边缘的破裂。

图 4-63 为 CCP 法插齿时湿式和干切削插齿刀的月牙洼磨损比较。其中图 4-63a 是用 TiN 涂层高速钢插齿刀（外径 20mm）加工时，切削液和切削速度 v_c 对月牙洼磨损深度值的影响，齿轮材料为 16MoCr5，切削速度为 60m/min，初始进给与终进给的比例关系为 3，终进给量为 3.77 mm/min，圆周进给量为 3 mm/双行程。图 4-63b 是在干切削条件下高速钢刀具采用不同涂层时的刀具寿命比较，其齿轮材料和切削速度与图 4-63a 相同。

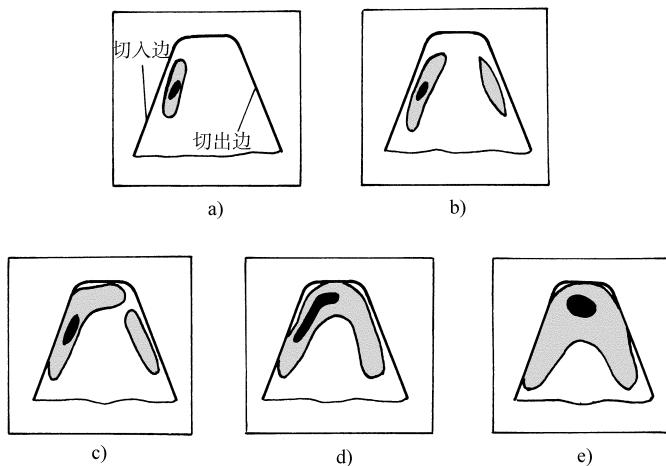


图 4-62 插齿刀的磨损形态图

- a) 磨损在切入边形成 b) 磨损扩散到切出边
 c) 磨损扩展到齿顶上 d) 月牙洼磨损深度最大值的区域加长
 e) 月牙洼磨损区加大、加深直至与刀具刃口的距离消失

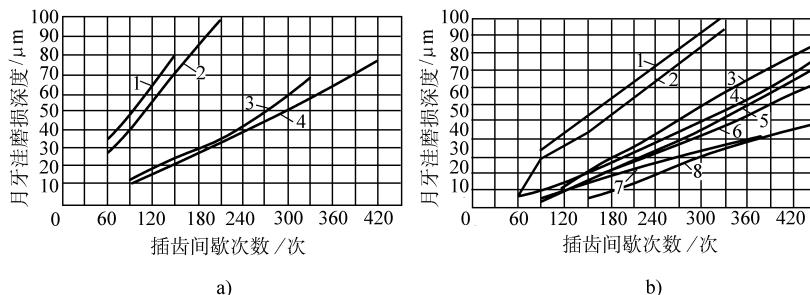


图 4-63 CCP 法插齿时湿式和干切削插齿刀的月牙洼磨损比较

- a)
- 1— $v_c = 75 \text{ m/min}$, 用切削液 1—非涂层 2—MOS₂ 涂层 3—TiN 涂层
 2— $v_c = 75 \text{ m/min}$, 干切削 4—CrN 涂层 5—(Ti, Al) N 涂层
 3— $v_c = 60 \text{ m/min}$, 用切削液 6—TiCN 涂层 7—TiN + MOS₂ 涂层
 4— $v_c = 60 \text{ m/min}$, 干切削 8—TiCN 多层涂层

从图 4-63a 可以看出，切削速度从 60m/min 提高到 75m/min 时，月牙洼磨损深度增加，增加值的大小与润滑状态无关；当切削速度相同时，对任意一组切削条件，干切削加工时和使用切削液时的刀具寿命之间差别很小。

从图 4-63b 可以看出，在一定的插齿间歇次数下，干切削加工时的月牙洼磨损深度值比使用切削液时小。这是因为切屑温度提高，同时切屑的流动速度加快，月牙洼磨损宽度在干切削时减小，因此，在干切削时很少发现由于月牙洼边缘破裂而引起的崩刃现象。试验结果表明：采用 $\text{TiN} + \text{MoS}_2$ 涂层及 TiCN 多层涂层，插齿刀的寿命明显提高。因此，优化插齿工艺过程，采用适宜的涂层，干插齿可以获得与普通加工方式相同或者更好的加工效果，并具有良好的环境性能。

4.4.3 干式齿轮加工应用实例

1) 英国最大的独立齿轮加工厂 Precision Components 是齿轮的生产企业，年产各种汽车用齿轮 120 万件，产品范围广泛，包括表面淬硬钢、铸铁与渗碳钢的直齿与斜齿圆柱齿轮，同时也生产各种轴齿轮。这些齿轮的节距不同，直径为 $60 \sim 200\text{mm}$ 。该公司购进了一台 Liebherr 的 LC122 滚齿机和一台 LC153 滚齿机，采用细晶粒硬质合金滚刀进行干加工。将切削速度从高速钢滚刀的 90m/min 提高到 290m/min 。干滚切工艺因不需要使用切削液，除了明显地减小了生产成本与有利于环境保护外，还能获得很好的表面粗糙度，齿轮加工精度可以很容易达到 ISO7 级精度。

2) 日本三菱公司推出了世界上第一套干式滚切系统。它采用的切削速度是传统滚切速度的两倍，可达到 200m/min 。配合专门设计的高速钢（MACH7）干式涂层滚刀，不仅有助于散热，而且减少了刀具磨损，其寿命可延长到一般湿切方式的五倍。这一系统在加工汽车末级传动齿轮、大型重载齿轮、汽车小齿轮及行星齿轮时的效果均非常理想，生产成本至少降低 40%。

3) 著名的齿轮加工机床生产企业，美国的格里森（Gleason）公司用硬质合金滚刀在 Phoenix 机床上，采用其开发的高速干加工方法加工锥齿轮，滚切速度可达 300m/min ，与传统的高速钢刀具湿切削法相比，

降低切削时间约 50%，而且齿轮的表面粗糙度显著降低，几何精度大大提高，加工精度可达 AGMA12~13。

4.5 其他干切削加工方法

干切削加工除了在车削、铣削、钻削等这些常用的加工方法中应用外，也在螺纹加工、镗削等领域得到了应用。

4.5.1 干式螺纹加工

常见的螺纹加工工艺方法有车削、铣削、攻螺纹等，与其他加工方法相比，螺纹加工的工作条件较为恶劣（其容屑状态为封闭或半封闭）。目前，在加工螺纹时，普遍采用切削液。其中以含氯化物、极压乳化液效果最好，但对环境污染也最严重。改用低污染的切削液，不能从根本上解决问题。要彻底消除切削液带来的环境污染，干式螺纹加工则是可行的方法。

1. 干式螺纹加工的可行性分析

干式螺纹加工时由于不用切削液，使切削状态进一步恶化，即加工温度升高，刀/屑及刀/工表面之间摩擦进一步加剧，排屑不畅和刀具使用寿命降低。在这种情况下，加工过程能否顺利进行必须寻求技术上的解决方案。下面以常见的丝锥加工内螺纹为例分析其可行性。

1) 刀具材料及其涂层技术的发展使丝锥性能得到了极大改善。通常丝锥是用工具钢或高速钢制造的。近年来有高钴高速钢、粉末冶金高速钢及超细晶粒硬质合金制造丝锥，使丝锥的强度、韧度及耐磨性得到了很大提高。但在干切削条件下，刀具使用寿命不高。涂层技术使这个问题得到了较好的解决。适宜的涂层使刀具在切削过程中能承受高的切削温度，降低刀屑及刀具表面之间的摩擦因数，以减小刀具磨损和产生的热量。涂层丝锥既有强韧的基体，又有满足切削要求的刀面和切削刃，可以进行干式螺纹加工。表 4-20 是 TiN 涂层丝锥的应用效果。

表 4-20 TiN 涂层丝锥的应用效果

序号	工件材料	攻螺纹速度 / (m/min)	起始扭矩 / N·m	丝锥磨损特征
1	低碳结构钢 $\sigma_b \leq 400 \text{ MPa}$, 硬度 $\leq 119 \text{ HBW}$	15	8	TiN 涂层稍有磨损痕迹
2	中碳钢, 如 45 $\sigma_b \leq 570 \text{ MPa}$, 硬度 $\leq 170 \text{ HBW}$	10	9.5	TiN 涂层稍显见磨损
3	调质合金结构钢 $\sigma_b \leq 1200 \text{ MPa}$, 硬度 $\leq 354 \text{ HBW}$	5	11.5	切削锥部切削刃剧烈磨损, TiN 涂层完全磨损掉
4	耐热、耐酸、耐蚀钢 $\sigma_b \leq 850 \text{ MPa}$, 硬度 $\leq 252 \text{ HBW}$	5	10	切削锥部切削刃的 TiN 涂层有显见的磨损, 齿侧稍有擦伤
5	铸铁	20	5.1	切削锥部切削刃变圆, TiN 涂层有显见的磨损

2) 刀具设计技术的进步使丝锥具有更合理的结构。丝锥的结构从传统的结构形式发展到螺尖丝锥、挤压丝锥等多种结构; 槽型有直槽和螺旋槽。丝锥的结构形式可根据加工条件优化选择, 配合适宜的几何参数, 可使排屑顺畅。德国 ÖKO 公司开发的在钢件上加工通孔螺纹的干切削丝锥, 采用的是螺尖丝锥, 其切削锥长为 B 型 [B/(2~3)牙]; 加工不通孔的干切削丝锥采用螺旋槽型(螺旋角为 35°); 当不通孔深度大于两倍丝锥公称直径时, 采用 5° 螺旋角的螺旋槽丝锥, 在干攻螺纹中取得了良好效果。

2. 干攻螺纹对工艺系统的要求

干攻螺纹加工对工艺系统提出了较高的要求:

- 1) 机床要有足够的刚性、精度和功率, 同时必须仔细调整。若机床有良好的对中、良好的进给控制或采用刚性/同步攻螺纹装置, 则机床调整就较为简单; 否则若采用普通攻螺纹装置, 则要进行仔细调整。
- 2) 由于不用切削液, 为了保证足够的丝锥使用寿命, 应采用较低的切削速度。
- 3) 根据所加工工件材料及螺纹孔的结构形状, 选择适宜的丝锥

类型。

- 4) 丝锥的螺旋槽型和几何参数设计应使切屑易于卷曲，有较低的摩擦阻力，以便于排屑及获得较高的尺寸精度和较低的表面粗糙度。
- 5) 选择适宜的表面涂层，确保丝锥的工作寿命。

3. 干攻螺纹的应用

干攻螺纹加工方法在日本、德国等国家均开展了研究，并已应用于生产实际。

德国某公司开发的复合涂层丝锥 ($\text{MoS}_2 + \text{TiAlN}$) 在含硅量 $w(\text{Si})$ 为 9% 的硅铝合金工件上干攻螺纹，丝锥使用寿命为攻 4000 个螺孔；而单涂层 TiAlN 丝锥使用寿命为 1000 个螺孔；超细晶粒硬质合金丝锥仅加工了 20 个螺孔。

日本某公司开发的钢件干切削挤压丝锥，与普通加切削液的挤压丝锥相比，使用寿命显著提高。用普通挤压丝锥加工冷轧钢板上 M4 × 0.7 的通孔螺纹，加工约 7000 个螺孔时，丝锥切削部分便产生磨损与粘结，无法继续进行切削；采用干切削挤压丝锥加工 50000 个螺孔以上，丝锥未产生粘结和显著磨损，可继续使用。这表明新型的干切削挤压丝锥与普通挤压丝锥相比，使用寿命提高了数十倍。

国内目前对干攻螺纹加工方法研究不多。作者在纯铝螺纹加工和薄板螺纹加工中，对干攻螺纹进行了试验研究，取得了较好效果。

(1) 纯铝内螺纹干挤压加工 我国某企业的产品中有一零件，材料为 LY-2，如图 4-64 所示。其上的 M5 × 0.8 螺纹对产品整体质量有重要影响，曾采用普通切削丝锥进行攻螺纹，螺纹加工质量不高，使用中经常产生滑丝现象，严重影响了产品的整体质量，也成了企业的生产瓶颈。其主要原因是 LY-2 铝材的塑性大，韧度好，以切削加工方式攻螺纹时，切屑形成困难，致使切削力大，难以保证加工质量；LY-2 铝材本身强度不高，用切削丝锥攻螺纹切断了金属纤维，进一步降低

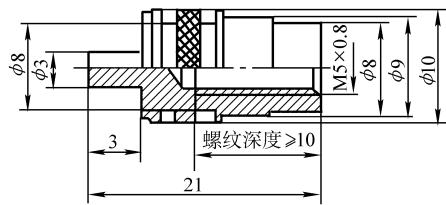


图 4-64 LY-2 材料的工作结构图

了螺纹牙型强度；螺纹表面硬度低，耐磨性差，表面粗糙度差，经若干次旋合后中径会胀大等。

通过对工件材料及原来加工工艺分析后，决定采用挤压方式加工螺纹。最初采用加切削液的湿式方式挤压螺纹，加工效果较好，同时存在一些不足。一是切削液流到工件、夹具、机床工作台上，给操作带来很多不便，也污染了工作现场；二是原机床无切削液供给装置，若配备该装置，则使工艺系统结构复杂，成本上升。为此，进行了干切削和干挤压螺纹对比试验。结果表明：后者比前者攻螺纹扭矩高10%~20%，但加工出的螺纹强度和表面粗糙度均较好。因此，干挤压加工内螺纹是较理想的加工方法。为了使丝锥具有足够长的使用寿命，除优化挤压加工参数外，还要选择适宜的丝锥类型。选择有螺旋棱边的高速钢挤压丝锥，分别对搓制、磨制及TiN涂层挤压丝锥进行对比试验。搓制丝锥在干攻螺纹时易崩刃，磨制丝锥基本能满足加工要求，TiN涂层挤压丝锥既满足了螺纹的加工质量要求，又具有长的使用寿命。图4-65是湿式攻螺纹与干攻螺纹的丝锥寿命比较。其结果表明，在一定条件下，干攻螺纹是可能的。

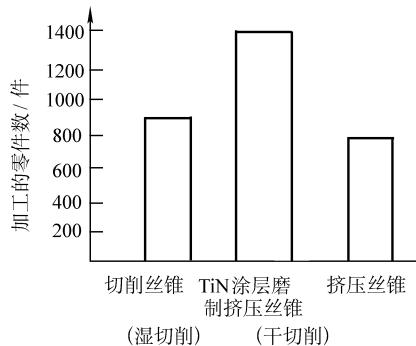


图4-65 湿式攻螺纹与干攻螺纹的丝锥寿命比较

注：实验条件：M5×0.8丝锥；螺纹孔形式：不通孔；螺纹长度：11mm；

底孔直径：4.2mm（切削），4.5mm（挤压）；

切削速度：15m/min（切削），10m/min（挤压）；机床AG-32。

(2) 薄板干钻孔及螺纹加工 钣金零件、家具、汽车拖拉机等行业中，很多零件是薄板件（厚度<2mm），需在其上加工螺纹孔，以连接或固定其他零件。但因板太薄，螺纹长度很短，连接的可靠性很差。

通常需在冲孔翻边或加工孔后再焊一螺母，以提高其连接强度。这不但增加了冲孔或焊接工序，也增加了加工成本。我们研制了专用的孔加工工具，使薄板孔部位的材料变成孔壁，孔的深度大大增加，再进行干挤压（或切削）螺纹，取得了满意的效果。目前已研制成功了适用于这种工艺的专用刀具、工艺及设备。图 4-66 是在薄板零件上加工螺纹示意图和加工工件的效果图。

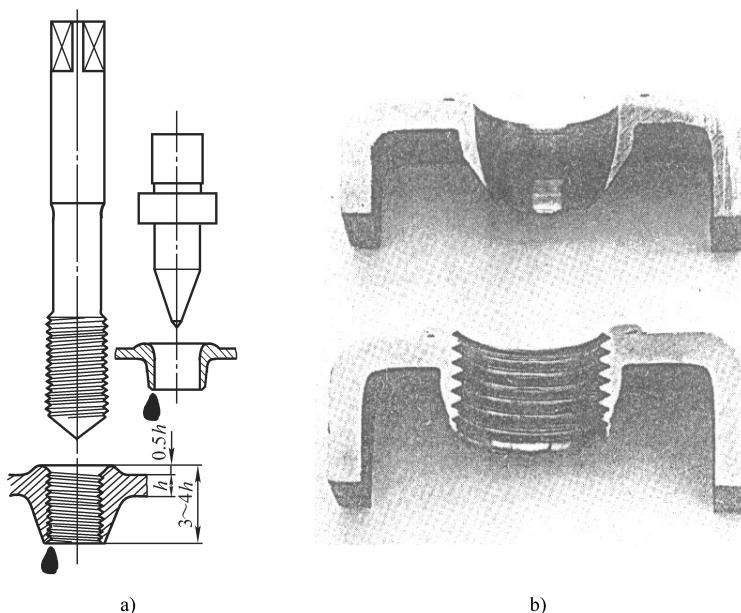


图 4-66 在薄板零件上加工螺纹

a) 薄板螺纹底孔及螺纹加工示意图 b) 加工工件的效果图

4.5.2 螺纹旋风硬铣削

1. 旋风铣削的原理

螺纹的旋风铣削是用安装在刀盘上的多把成形刀，借助于刀盘旋转中心与工件中心的偏心量 e 来完成渐进式的高速铣削，如图 4-67 所示。刀盘的旋转轴线相对于工件轴线倾斜一个被加工螺纹的螺旋升角 β_0 加工时，工件以 n_w 低速旋转，刀盘以 n_0 与工件同向（顺铣）或反向（逆铣）高速旋转，工件每转一圈（ 360° ）刀盘纵向进给一个导程，

从而铣出螺纹。旋风铣削有内铣法和外铣法两种，其中后者应用最广。图 4-68 为内切式旋风铣削刀盘的结构，图 4-68a 为径向装刀的刀盘结构，图 4-68b 为切向装刀的刀盘结构。刀盘上的刀头依次参与切削过程。通过合理分配切削余量，切削厚度的渐进式变化使切削力减小，而偏心量 e 使尚未进入切削区的刀头有充分的散热时间，有利于延长刀具使用寿命，提高加工表面质量。与一般铣削相比，旋风铣削的金属切除率要高得多，由于在加工过程中不用切削液，而采用压缩空气强冷，切屑带走绝大部分热量，工件温升低，热变形小，是一种高效绿色螺纹加工方法。

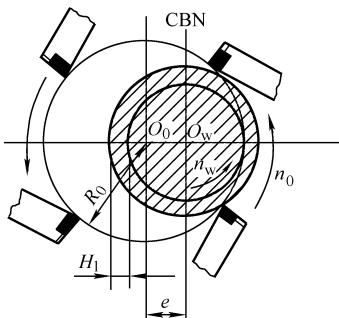


图 4-67 螺纹旋风铣削原理图

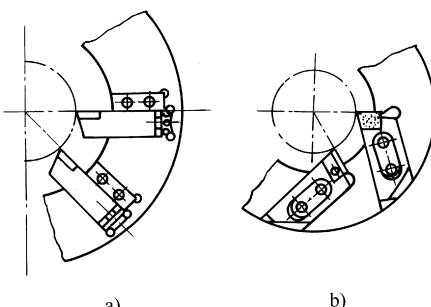
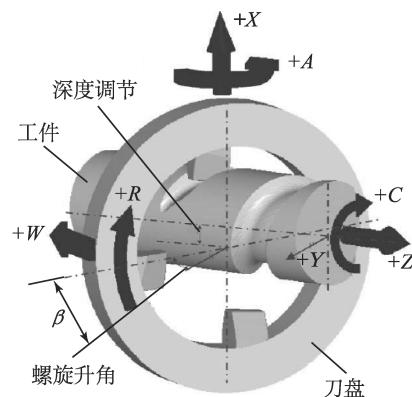


图 4-68 内切式旋风铣削刀盘的结构

a) 径向刀盘 b) 切向刀盘

图 4-69 为 CNC 旋风铣床各轴的运动示意图。其中， R 为刀盘（刀头）高速旋转运动； W 为刀盘相对于丝杠的轴向旋转运动。 X 为刀盘相对于丝杠的径向旋转运动。除完成上述运动的控制外，新一代的 CNC 旋风铣床还可以减小由于热变形引起的导程误差，由刀具磨损等原因引起的螺纹中径误差，还可补偿因热变形对刀盘同轴度和回转精度的影响。当采取这些措施后，加工滚珠丝杠的精度可达到

图 4-69 CNC 旋风
铣床各轴的运动示意图

DIN 69051 的 3 级。

2. 旋风硬铣削的可行性

旋风铣削除用于一般钢件螺纹的软铣削外，目前在硬铣削方面也已经取得了长足的进步，可以对 60HRC 以上的滚珠丝杠和滚珠螺母等进行硬铣削，而且可以达到较高的精度和加工表面质量。能够直接在淬硬的工件上铣出螺纹，主要是因为：

- 1) 旋风铣削是渐进式的断续切削方式，使切削阻力大大降低。
- 2) 金属切削加工中的高速硬切削、干切削理论，如“绝热剪切理论”、“周期脆性断裂理论”等，在生产实践中得到进一步的验证和发展。
- 3) 先进的刀具材料和精密的刀具、刀盘制造技术为旋风硬铣削创造了必要的条件。
- 4) 新一代的 CNC 旋风铣床大大强化了机床、工具、刀具系统的动刚度。
- 5) 先进的强冷技术使高速旋风铣削具有优良的排屑和散热条件。

3. 旋风硬铣削应用实例

旋风硬铣削在国外的一些企业已经得到了成功应用，并取得了良好的加工效果和效益。

1) 德国的 Leistritz 公司是世界著名的旋风铣削设备生产和应用企业，该企业采用旋风硬铣削加工滚珠丝杠、滚珠螺母，效果良好。

① 在 PW160 型 CNC 旋风硬铣床上，铣削滚珠丝杠 GQ40 × 10（钢珠 $\phi 6.35\text{mm}$ ），螺纹长度为 1000mm，丝杠材料为 CF63（德国 DIN 1.1213），淬火后的硬度为 60 ~ 62HRC。加工后的导程精度（静态测量）为 P3 级 ($0.012\text{mm}/300\text{mm}$)，中径锥度为 $0.01\text{mm}/1000\text{mm}$ ；齿形精度 $< 0.02\text{mm}$ ，表面粗糙度值 $R_a \leq 0.4\mu\text{m}$ ；加工的单件工时为 11.37min，刀片寿命为 750m。

② 在 PWM200 型 CNC 内旋风硬铣床上，铣削滚珠螺母 GQ32 × 32（钢珠 $\phi 3.2\text{mm}$ ），螺纹长度为 120mm，螺母材料为 CF63，淬火后的硬度为 60 ~ 62HRC。加工后的导程精度（静态测量） $< 0.006\text{mm}/32\text{mm}$ 、 $0.008\text{mm}/120\text{mm}$ ；齿形精度为 0.004mm ，表面粗糙度值 $R_z < 4\mu\text{m}$ ；加工的单件工时为 1.3min，刀片寿命为 350 件。

2) 美国某公司在丝杠加工中，原先采用的工艺是在软材料上加工

出螺纹→淬硬→精磨，整个过程需要约 170h 的工时。后采用 G. E. 超硬磨料公司的 PCBN 刀具进行旋风铣削，直接在已淬硬的钢坯上加工出螺纹，只需 1.75h，提高效率近 100 倍，如图 4-70 所示。

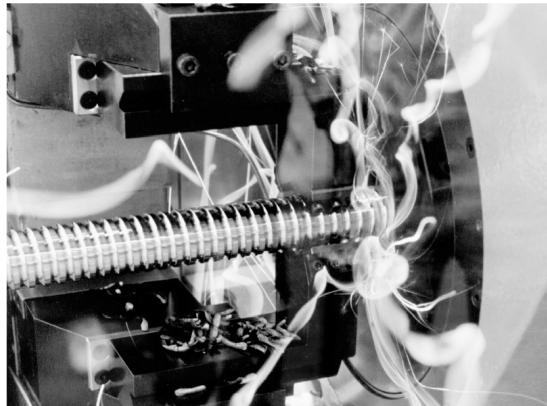


图 4-70 干式旋风铣削加工

4.5.3 超声振动镗削

1. 超声振动干镗削及其特点

将超声波的能量通过声学系统施加于镗刀上，使其以一定的频率和振幅作圆周扭转振动。由于刀具以 $v = \omega A \cos \omega t$ (角速度 $\omega = 2\pi f$, f 为振动频率, A 为振幅) 速度振动，形成了脉冲力作用的分离型振动切削机理，消除了普通切削过程中的弹性挤压振动，使切削过程变为脉冲状有规律的断续切削，切削力降为普通切削的 $1/10 \sim 1/3$ ，系统稳定，刚性加强。

将超声波应用到镗削加工中，会使切削过程表现出一些特有的现象：

- 1) 超声振动干镗削可得到薄而长的切屑，圈与圈之间的间距特别大，薄厚均匀一致，呈弹簧状。切屑与刀具前刀面的接触面十分光亮平滑，切屑有韧度，不易折断。
- 2) 超声振动干镗孔得到类似于超精研的表面，其上布满均匀的网纹。

3) 在镗削过程中,如果刀杆悬伸较长,则刚性差,但超声振动干镗削中,即使在主轴213r/min转速下也能稳定镗孔。整个切削过程中可以听到“咯、咯”声音,显得切削很轻松、稳定。一旦关掉超声波发生器,即使在转速很低的情况下,切削刀也会立刻崩掉。

4) 切削速度 $v=7\sim55\text{m}/\text{min}$ 范围内,始终没有发现积屑瘤,切削刃十分光滑。加工表面没有发现鳞刺。

5) 在镗削过程中切屑没有明显温升,用手拿不感觉灼手,可见超声振动于镗孔切削温度不高。

2. 超声振动干镗削的应用

40CrMnSiMoVA钢是我国自行研制的无镍低合金超高强度钢,主要用于飞机起落架等零件。其加工特点是强度高、切削力大、韧度好,但断屑困难、热导率低,切削区温度高,故刀具磨损严重。该种材料有很高的缺口敏感性,加工表面质量要求高,加之这种材料使用硬度高,因此,精加工广泛采用磨削、珩磨、超精加工等方法。但是由于该材料淬火温度高,热处理变形大,因此,加工效率低,特别是对于高精度孔的精加工更为困难。通常采用的超声振动湿式镗孔,是用脉冲力作用的分离型振动切削机理对40CrMnSiMoVA钢进行镗孔。虽然取得了比较理想的切削效果,但是切削过程中切削液的使用增加了成本且污染环境。而采用超声振动干镗孔的加工方法,可以实现以车代磨、代珩的高效率的精加工。

采用如下切削用量:切削速度 $v\leq35\text{m}/\text{min}$,进给量 $f=0.1\text{mm}/\text{r}$,单边背吃刀量 $a_p=0.05\text{mm}$ 。镗削后测得的加工结果为:①圆度0.003~0.005mm,圆柱度0.004~0.006mm;②试件的表面粗糙度值 $Ra < 0.3\mu\text{m}$;③对上述试件

加工表面进行显微硬度检测,其硬化程度仅为45.1%。这些数据说明,超声振动干镗削40CrMnSiMoVA钢可达到或超过磨削效果,而且切削区的变形很小。

图4-71、图4-72和图4-73分别表示了切削速度、进给量、

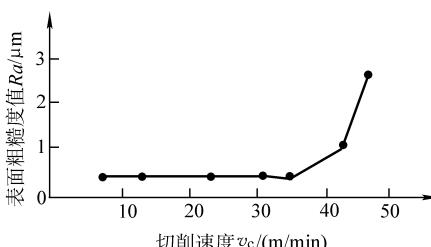


图4-71 切削速度对表面粗糙度的影响
注: $a_p = 0.05\text{mm}$, $f = 0.07\text{mm}/\text{r}$ 。

背吃刀量与加工表面粗糙度的关系。由图 4-71 可见, 当 v 小于某一切削速度 v_c ($v_c = \omega A$) 时, 表面粗糙度几乎与切削速度无关。只有当切削速度 $v \geq v_c$ 时, 表面粗糙度与普通镗削才没有区别。超声波振动干镗削时, 必须使切削速度 $v < v_c$, 而只有在 $v \leq (1/3)v_c$ 时, 才会得到显著的振动镗削效果。由图 4-72 可见, 在系统刚性较好, 不产生自激振动的条件下, 如果刀具不带有修光刃, 表面粗糙度值随进给量加大而略有增加。这是由于几何因素作用的结果。在系统刚性足够的条件下, 刀具可带有修光刃, 以便在保证表面粗糙度要求的条件下加大进给量, 提高生产效率。图 4-73 表明, 随着背吃刀量增加, 表面粗糙度值亦有所增加, 主要是因为该材料抗拉强度很高, 随着背吃刀量的增大, 超声波发生器功率满足不了要求所致。在背吃刀量 $a_p < 0.05\text{ mm}$ 时, 表面粗糙度几乎与背吃刀量无关。在超声波发生器功率足够的条件下, 且系统刚性足够时, 可以增大背吃刀量以提高生产效率。

图 4-74、图 4-75 和图 4-76 分别表示了切削速度、进给量和背吃刀量与圆度的关系。由图 4-74 可见,

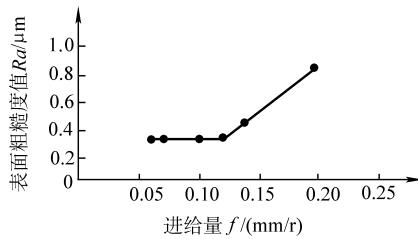


图 4-72 进给量对表面粗糙度的影响

注: $a_p = 0.1\text{ mm}$, $v = 23\text{ m/min}$ 。

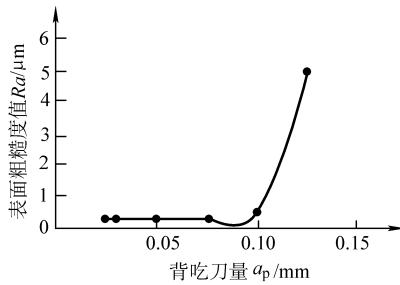


图 4-73 背吃刀量对表面粗糙度的影响

注: $v = 28\text{ m/min}$, $f = 0.1\text{ mm/r}$ 。

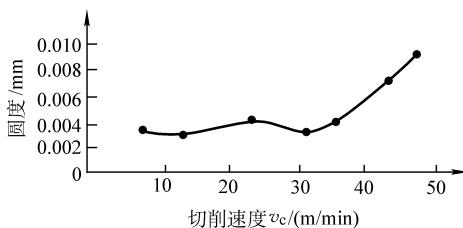


图 4-74 切削速度对圆度的影响

注: $a_p = 0.05\text{ mm}$, $f = 0.07\text{ mm/r}$ 。

在切削速度 $v \leq (1/3)v_c$ 时，其加工圆度精度很高，这是因为镗削时，脉冲切削力使平均切削力大为降低，极大地增加了工艺系统稳定性，从而使加工圆度达到很高的精度。随着切削速度的增加，超声波振动干镗削越来越接近普通镗削，加工圆度下降，最终接近普通镗削。图 4-75 表明，超声波振动干镗削时的进给量对加工圆度影响不大，可以采用大进给量以提高生产率。图 4-76 则表明，在超导波发生器有足够功率保证切削刃有规律振动的条件下，背吃刀量几乎对加工圆度无影响。但随着背吃刀量的增加，会影响刀具切削刃的振动特性，使加工圆度下降。一般选取的镗削深度应视超声系统功率而定。

4.5.4 静电冷却干切削技术

静电冷却干切削技术是由俄罗斯的“罗士技术”公司发明的，现已在 30 多个国家获得专利的静电冷却干切削生态净化工艺，它可以在许多情况下取代切削液。该工艺曾在前苏联的几十家国防企业中使用，近期在美国、德国、日本、瑞士和其他国家的著名研究中心和公司成功地通过测试。由“罗士技术”公司直接参与的项目有：丹麦工业部的“干法静电冷却”、德国机床协会的“采用离子化空气冷却插齿加工”、北大西洋公约组织的“机械加工生态安全技术的开发”等。应用这种技术的结果表明：在机械工业和汽车制造业中，采用静电冷却干

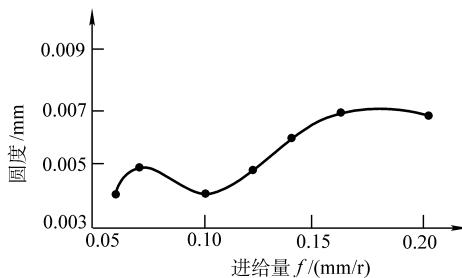


图 4-75 进给量对圆度的影响

注： $a_p = 0.05 \text{ mm}$, $v = 23 \text{ m/min}$ 。

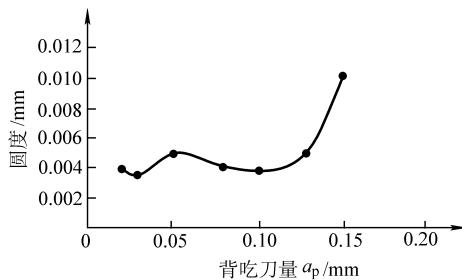


图 4-76 背吃刀量对圆度的影响

注： $v = 28 \text{ m/min}$, $f = 0.1 \text{ mm/r}$ 。

切削工艺可取得良好的技术经济效益。

静电冷却干切削能够增加工件塑性，改善切削性能，因此，在正确选择装置工作规范的情况下，可提高切削刀具的寿命和加工表面的质量，改善断屑性能，显著降低加工面表层的拉应力。

1. 静电冷却装置

静电冷却干切削工艺原理是，将经过特殊类型小功率放电器处理过的空气送入切削区内，从而取代切削液。静电冷却装置的外形尺寸为 $240\text{mm} \times 228\text{mm} \times 85\text{mm}$ ，质量不超过 5kg ，所需功率不大于 25W （单相电网 $220\text{V}, 50\text{Hz}$ ）。

为了满足不同需求，静电冷却装置可配备各种不同类型的电离器。例如，带一个电离器的装置，在技术经济参数上最适用于大多数车削操作。如果采用大功率车削（ $3 \sim 5\text{kW}$ ）或高速切削（ $> 200\text{m/min}$ ），适用的装置应该具备两个电离器。它还适用于多种铣削操作，其中包括高速铣削，也适用于钻孔操作。带有多个电离器的装置，适用于铣齿、插齿以及多种铣削操作和其他切削加工。一个电离器消耗空气为 $1\text{m}^3/\text{h}$ ，压力为 $0.3 \sim 0.6\text{MPa}$ 。对压缩空气没有任何特殊的要求。

2. 静电冷却在切削过程中的作用

静电冷却在切削过程中的作用主要表现在：

- (1) 润滑功能 润滑作用取决于工件和刀具初始表面产生强烈的氧化，并伴随形成具有润滑作用的薄膜。
- (2) 冷却能力 空气流的直接冷却和被加工材料遭受破坏所需能量减少时，产生间接温升下降，在温升下降的后一种情况下出现列宾德尔效应。

(3) 切屑断裂和导出能力 干静电冷却进行加工时，对切屑形成过程的控制，不仅可通过改变切削参数和刀具几何角度来实现，也可通过改变干静电冷却装置的工作规范和该装置喷嘴相对于刀具和工件的位置来实现。在许多情况下，干静电冷却装置的空气流能够控制切屑导出过程。但将喷嘴位置相对于加工区域合理布置，虽然可达到刀具寿命的最佳效果，但却不能控制切屑的导出。

(4) 对切削刀具材料的要求 工业应用结果和测试证明，使用硬质合金、高速钢及立方氮化硼刀具加工时，静电冷却能获得很好的效果。使用其他冷却方法进行加工的刀具，静电冷却方法也有效果，而

且不要求使用特殊的材料和涂层。

(5) 对刀具几何角度和结构的要求 切削刀具不应挡住进入切削区的空气流，应使喷嘴的布置距切削区不超过100mm。

(6) 对机床结构的要求 机床应保证静电冷却装置布置在靠近切削区，在许多情况下，必须安装防护装置，以便导出切屑和避免切屑落入机床内部。

3. 静电冷却适应的加工材料与工艺

根据试验结果，静电冷却技术适应的加工材料与切削工艺见表4-21。

表 4-21 静电冷却技术适应的加工材料与切削工艺

加工类型	车削、镗削			刨削			端面铣			圆柱铣			切螺纹			齿轮加工			钻孔	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<3D ^①
材料	碳素合金钢	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
	合金钢	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
	热强钢	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
	钛合金	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
	铸铁	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
	黄铜	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
	青铜	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
	淬火钢	+	+					+	+	+	+									

注：1为粗加工，2为精加工，3为精细加工，4为用车刀切螺纹，5为用丝锥攻螺纹，6为用板牙搓螺纹，7为用螺旋铣刀切螺纹，8为刨削，9为铣削，10为用螺旋铣刀加工。“+”表示与使用切削液相比，刀具寿命相同或更长，“-”表示刀具寿命相当于使用切削液时的0.8~0.9倍，但是超过其他干加工时的寿命。

① D为加工孔的直径。

4. 干静电冷却对表面残余应力的影响

零件在加工后，表层中残余应力的数值和符号对机器寿命的影响，在很多行业都是不可忽视的重要因素，这一点对航空工业尤为突出。大的拉应力会导致微裂纹的生成，并最终造成零件的破坏，压应力则

能延长零件使用寿命。研究结果表明，采用静电冷却干切削加工，在工件表层会产生有利的压应力，在 $20\mu\text{m}$ 深度内最大值为 $300\sim350\text{MPa}$ ，压应力扩展深度达 $200\mu\text{m}$ 。值得指出的是，切向残余应力是拉应力，在表面上或 $40\sim50\mu\text{m}$ 深度范围内其最大值为 $200\sim400\text{MPa}$ 。

4.6 干切削工艺的综合应用

上述各节给出的干切削应用实例是以加工工艺方法进行论述的，下面则给出一些以零件为对象的整个加工工艺过程的干切削应用实例。

1) VOGEL 综合运用了干车削、干钻削、干式螺纹加工等多种干切削加工方法，在机床 TRAUBTNA 300 上加工如图 4-77 所示的工件，工件材料为 X10CrNiS189-1.4305 (DIN 668-RD30)。

表 4-22、表 4-23 分别是在湿式条件 (以乳化液作切削液) 和

亚干条件下加工零件的工艺参数。湿切削加工用时 5min，亚干切削加工用时 2.07min，时间节约了 59%，并且工件的加工质量也达到了要求。

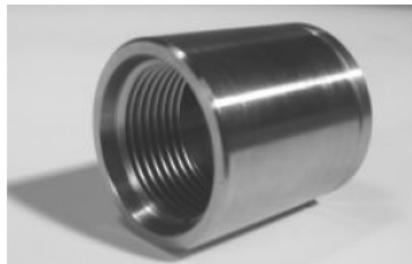


图 4-77 零件图

表 4-22 湿式条件下加工零件的工艺参数

刀具	切削速度 v_c /(m/min)	进给量 f_n /(mm/min)
车刀	220	0.20
$\phi 19\text{mm}$ 麻花钻	15	0.14
中心钻	19	0.12
$\phi 8\text{mm}$ 麻花钻	10	0.12
$\phi 18\text{mm}$ 平钻	34	0.10
$\phi 10\text{mm}$ 平钻	13	0.12
插入式车刀	152	0.12
插入式车刀	207	0.08
螺纹车刀	55	1.50
车退刀槽	50	0.06
键槽铣刀	19	70.00

表 4-23 亚干切削加工零件的工艺参数

刀 具	切削速度 v_c /(m/min)	进给量 f_n /(mm/min)
车 $\phi 28\text{mm}$ 外圆	250	0.25
钻 $\phi 19\text{mm}$ 孔	160	0.06
钻 $\phi 8.7\text{mm}$ 孔	60	0.08
钻 $\phi 10\text{mm}$ 孔	60	0.08
插入式车削	250	0.10
车螺纹	90	1.50
铣键槽	38	400

2) 由奥地利 Ernst krause & Co 公司为宝马发动机厂设计的一条加工发动机缸孔的自动线, 由于采用了微量润滑技术而获得了很好的加工效果。在这条自动线上, 缸孔的加工分为粗镗、半精镗和精镗三道工序, 考虑到润滑材料会对加工效果有重要影响, 故在前两道工序采用涂层硬质合金镗刀, 用植物油进行润滑, 而精加工采用聚晶 CBN 镗刀, 用醇酯进行润滑。压缩空气和润滑材料在空心锥柄接口前混合后, 由设置在镗刀容屑腔中的喷嘴直接喷向切削刃, 以使刀具获得最佳的湿润, 从而起到良好的润滑作用。缸孔精加工后, 无需进行清洗, 而直接将灰铸铁缸套压装到缸孔中。该自动线的运行表明, 与湿式加工相比较, 技术经济效益是十分显著的。自动线由于省去了冷却润滑系统和清洗设备, 使设备的投资减少了 22%, 分摊的利息和设备折旧费降低了 22%, 能源、人员和设备运行等费用节省了 11%。

3) Ford 汽车厂在 2000 年就将离合器壳体和变速器体的加工由湿式加工逐步转向干切削。加工系统采用 Kx-Cell-O 公司的 12 台 XHC241 高速加工中心, 每天以三班制加工 230 个铝合金薄壁箱体零件, 目前集成到系统中的亚干加工(微量润滑)机床与湿式加工机床平行配置, 通过工业机器人将两种加工方式的加工中心连接起来, 以后所有机床将逐步转向干加工。

为了考验干加工在大批量生产中的可靠性, 并能采用较高的切削速度和进给速度(见表 4-24), Ex-Cell-O 和 Ford 两个公司在高速加工中心 XHC241 上, 对离合器壳体(AlSi9Cu3)的亚干加工进行了实验, 结果表明, 干加工时工件的温升(4K)虽比湿式加工(2K)高出一

倍，但温度分布均匀，夹具和机床温升很低。从而保证了 $\pm 0.025\text{mm}$ 的孔间距公差和 $C_p = 1.67$ 的工序能力指数。

表 4-24 实验时干加工离合器壳体的切削用量

加工工艺	切削速度/ (m/min)	进给速度/ (mm/min)
钻孔 $\phi 5.55\text{mm}$ 和 $\phi 9.25\text{mm}$	87 ~ 646	800 ~ 7400
挤压攻螺纹 $M6\text{mm} \times 10\text{mm}$	75 ~ 100	4000 ~ 4800
钻铣螺纹 $M16\text{mm} \times 1.5\text{mm}$	364 ~ 641	1120 ~ 1440
镗孔 $\phi 46.4 \sim \phi 67.4\text{mm}$	1240 ~ 1740	2550
铰孔 $\phi 10 \sim \phi 6.8\text{mm}$	314 ~ 2136	500 ~ 3000
铣削 $\phi 32 \sim \phi 100\text{mm}$	1206 ~ 3536	4000 ~ 8600



第5章

干磨削加工

磨削加工是常用于高硬度零件的一种高效、高精度加工方法。在常规磨削加工过程中，通常大量使用磨削液。由于磨削液含有油和大量的有害化学成分，在使用过程中及排放后，会对操作者的身体健康及生态环境造成严重威胁，因此，不用或少用磨削液的绿色磨削技术已成为当前磨削技术研究的主题之一。本章将对磨削液对环境的危害进行分析，同时介绍几种典型的干磨削加工方法。

5.1 磨削及其环境问题

5.1.1 磨削的特点

磨削加工是利用砂轮高速旋转而对工件进行加工的方法。20世纪60年代以来，随着新磨料、磨具和新型磨削液的开发，磨削技术也取得了长足的发展，出现了精密磨削、镜面磨削、高速磨削、宽砂轮磨削、大磨削深度磨削等新工艺，因此，磨削不仅是一种精密的加工方式，而且是一种高效的加工方法。磨削加工具有以下特点：

1) 磨削加工是由数目众多的磨粒一点一点地切削工件表面，每个磨粒切下的切屑厚度很薄。一般切削方法得到最小的切屑厚度都大于 0.02mm ，而磨削加工一般的厚度则可小到微米以下，故磨屑通常既轻薄又细小。

2) 磨削速度比一般切削速度高得多。一般切削速度不大于 400m/min ，而砂轮磨削速度一般在 2000m/min 以上，容易使磨削液雾化，造成空气污染。

3) 磨削产生的热量大，约有 $70\% \sim 80\%$ 的热量传入工件，造成加

工表面温度很高，磨削区温度可达 400°C 以上，工件与砂轮接触点的温度可达 1000°C 以上，这种瞬时高温将会引起加工表面层产生烧伤、裂纹等现象，直接影响工件的力学物理性能。此外，磨削热会使工件产生膨胀变形，影响加工精度，故磨削过程往往需要大量的磨削液进行冷却和润滑，但是磨削液对人体和环境影响很大。

4) 砂轮有自锐作用，使磨料粉尘较多。

5.1.2 磨削加工的环境问题

在磨削加工过程中，制造系统的产物不仅仅是产品，还包括固、液、气体废弃物。固体废弃物主要包括磨屑、磨料粉尘等，液体废弃物主要是磨削液，气体废弃物主要是磨削液的烟雾、蒸汽，这些废弃物对人体和环境危害很大。

(1) 固体废弃物的危害性 当磨削工件时，在砂轮高速旋转下甩出的磨屑和磨料，会带动周围空气随其流动（即诱导空气），使静止状态的粉尘随空气迅速扩散。悬浮于空气中。由于粉尘粒径小，粒子在空气中不易沉淀，造成长期空气污染。同时易于随空气吸入人的呼吸道。粉尘粒径大于 $5\mu\text{m}$ 容易被呼吸道阻塞，粒径为 $2\sim 5\mu\text{m}$ 的微粒大都阻留在气管和支气管，粒径小于 $2\mu\text{m}$ 的微粒能进入人体肺泡，被肺泡吸收，不经肝脏的解毒作用，直接被血液和淋巴液输送至全身，对人体有很大的危害性。特别是当毒性强的粉尘（如铬、锰、镍）进入人体达一定量后，会引起中毒甚至死亡。

(2) 磨削液的危害性 磨削过程中所使用的磨削液大多数都是乳化液或者化学合成液，它的洁净度会直接影响磨削加工中零件的表面质量。磨削加工产生的大量磨屑、砂轮磨料的微细粉末以及结合剂的碎粒与磨削液混合在一起，构成了不洁净的磨削液。在磨削加工时，含机械杂质较多的磨削液，不能用于磨削加工，必须给予净化处理才能继续使用。

磨削加工时所用的乳化液或者化学合成液，都是将浓缩液用大量的水稀释后才使用。稀释的水，一般是自来水，当水的硬度较高时，水中的钙、镁离子与磨削液中的某些机械杂质成分会产生化学反应，生成沉淀物，这样也会影响磨削液的洁净度。

磨削液用水稀释后，通过加工工件、工作环境以及操作人员的手、

周围空气等方式会对稀释液造成污染，所带入的微生物便开始繁殖，从而导致磨削液的腐败与劣化。它不仅产生恶臭，污染环境并危害人体健康，而且会造成磨削液的 pH 值降低，润滑性能下降，产生腐蚀，生成油泥，堵塞设备切削液的管线等一系列不良影响。这样就缩短了磨削液的使用寿命，降低了散热条件。从而迫使操作者不断更换新磨削液，造成时间、人力、物力的大量浪费。

此外，从事磨削加工的操作人员，在操作时，手、腕等处与磨削液长时间接触的机会多，且很容易被磨屑之类划伤，如果操作不当，就会引起皮肤炎。这主要是因为作为基油的矿物油的脱脂性能和刺激性，以及作为添加剂的动植物油脂、磷化合物等由于热分解或加水分解，变成刺激性物质所致。

另一方面，水基磨削液会使皮肤表面变干燥，继而脱脂、开裂，引起皮肤红肿、化脓。这主要是因为表面活性剂的脱脂作用和有机胺、无机碱之类的碱性物质引起的碱性损害，以及杀菌剂、防腐剂、防霉剂等引起的刺激损害。由于人的皮肤表面的 pH 值约为 4.5~6.0，呈弱酸性，当水基磨削液 pH 值为 8.5~10.5 的碱性时，若与这样的液体长时间接触，则皮肤会由于起保护作用的皮脂被中和洗掉而变得干燥，特别是在 pH 值为 10.5 以上的场合，刺激性将大大增强，会引起皮肤红肿溃烂。

在螺纹成形磨削等加工工序中，使用油基磨削液时，磨削液会发生冒烟、分解出气体以及油雾等不良现象，导致加工环境很差，严重影响操作人员的呼吸器官。而且粘度越低的矿物油这种现象就越严重。

5.1.3 磨削液的净化处理与管理

1. 磨削液的净化处理技术

磨削液可分为油性和水溶性两大类，前者的润滑性能比较好，而冷却性能较差。水溶性磨削液又可分为乳化液和透明水溶液磨削液。

油性磨削液以轻质矿物油为主体，掺入 5%~10%（质量分数）的脂肪油，有时还加入含硫、氯等的极压添加剂。极压添加剂虽然有良好的润滑性和抗粘结性，但是对人体和环境具有一定的危害性。油性磨削液使用时容易发烟和产生油雾，油雾到处浮游，影响工作环境。油、烟和硫、氯添加剂在高温下产生的有害气体均影响环境卫生条件。

水溶性磨削液成分包括：用于防锈的氨和亚硝酸盐；用于稳定亚硝酸盐的硝酸盐；用于软化水的磷酸盐与硼酸盐；用于润滑和减小表面张力的肥皂和润湿剂；用作化学润滑的磷和氯的化合物；用作混合剂的乙二醇及控制细菌生长的杀菌剂等。不难看出，其中的每种成分对环境的危害都是不可忽视的，亚硝酸盐具有致癌作用，不利于工作人员健康，磷酸盐一旦进入水中，会增加水体的富营养化程度。另外，磷硫氯的化合物在高温下也会产生一些有害物质危害环境。

由此可见，磨削液的主体是水和添加剂，但因其腐败与劣化，并含有有害、有毒成分，会给环境方面带来一系列负面效应。因此，磨削液决不允许直接排入到下水道或者地表水中，需要达到国家规定的环境排污标准后才能排放。而且，在一般情况下，磨削液是循环使用（精密磨削除外），当循环所使用的是已污染的磨削液时，对零件的加工质量、人体健康、环境保护极为不利。为了解决上述问题，必须采用净化技术获得洁净度比较高的磨削液。磨削液的净化处理方法包括磁化处理技术、物理处理技术和化学处理技术。

（1）磁化处理技术 为了保持磨削液始终处于新鲜状态及具有耐蚀性能，并抑制微生物的生长，防止磨削液的腐败与变臭，可采用磁化器对磨削液进行磁化处理。

（2）物理处理技术 若磨削液中的污染物是悬浮物质，通常这些物质包括：金属磨屑、磨粒的粉末和混入磨削液中的漏油粒子等，并且粒子直径在 $10\mu\text{m}$ 以上，则可以利用悬浮物质和水的密度差进行沉淀分离和浮上分离，也可以利用过滤分离。在一些工厂或车间净化设备不完整的条件下，通常还可以用纱布进行过滤处理，同样可以收到一定的效果。不过在使用一段时间后，需要清洗，才能继续使用。使用经验表明，用国产无纺布作过滤纸对被污染的磨削液进行过滤，效果良好。

（3）化学处理技术 若被污染的磨削液中的悬浮粒子和胶体粒子的直径在 $0.001\sim10\mu\text{m}$ 范围及废液中含有有害成分时，可用化学方法处理。这些方法包括：

1) 以无机絮凝剂和有机絮凝剂等来促使微细的悬浊粒子和胶体粒子凝聚聚成絮状物质，上述杂质便可以去除。

2) 利用氯气、臭氧、过氧化氢及高锰酸钾等氧化剂，将污染物氧

化成终端产物或较易降解的生物及较易吸附的中间产物，并利用电解方法，使磨削液中的有害物质发生氧化还原反应而去除。

3) 利用活性炭(木材、木质素、烟煤、褐煤及炼油的残渣)等固体物质的表面吸附作用，去除磨削液中的有机污染物。但这种方法应考虑经济性和活性炭的再生与利用。同时，还可利用一些一定规格的小煤粒做活性炭，经验表明，它的吸附作用比较理想。与此同时，还可利用粒子交换树脂的交换能力，可将废液中有害成分予以去除。

4) 在乳化液中加入酸(盐酸或硫酸)，使水、油分离，称为酸化法；往乳化液中添加盐电解质(如质量分数为0.4%的氯化钙)和凝聚剂(质量分数为0.2%的明矾)来达到油水分离，称为聚化法。

(4) 生物处理技术 若是化学合成的磨削液，而废液中含有有机胺、非离子型表面活化剂、多元醇等物质，只能用活性污泥法和滴滤池法的生物处理技术除去上述有害物质。

(5) 焚烧处理技术 用化学絮凝和生物处理等技术来净化磨削液，均会产生污泥。污泥经过固、液分离而沉淀下来，这时还需要浓缩、脱水及最终处理，最终处理方法可采用填埋或焚烧。

2. 加强磨削液的管理

对于每一种磨削液而言，它的综合技术性能可用三项指标加以评定，即磨削液的加工特性、自身质量性能和环境适应性。若以某一特定的磨削工艺来说，当机床设备型号及其功能一定时，磨具、工艺条件、磨削液则成为三个可变因素。如果砂轮与磨削工艺条件不变时，那么只能改变磨削液。因此，选择合适的磨削液就可以保证磨削工艺的实施，确保产品质量的提高。以科学和合理的方法管理磨削液，防止其腐败、劣化是保证磨削加工的基础，同样也是绿色生产工艺技术的需要。

1) 控制异物排入磨削液，防止其腐臭、劣化。一般来说，磨削液都是浓缩液稀释之后才使用。但稀释的磨削液是分散胶状体系，呈不稳定状态。若磨削液管理不善，致使异物排入，其稳定性就更差，容易改变其化学和物理性能。另外，水本身是导致锈蚀与腐臭的重要原因，当金属碎屑混入时，则会促使其变质与劣化。若在磨削中采用的是浸渍砂轮，覆盖在磨粒表面上的固体润滑剂(如石墨、碘化钾、硫磺和二硫化钼等)，会随着磨粒脱落也会进入磨屑中去，促使了磨削液

的失效，改变了其功能，因此，应尽快高效地去除磨粒粉末和固体润滑剂粉末。

2) 监测磨削液中有关参数的变化，提高加工精度和砂轮寿命。一般磨削液是循环使用的，但在使用过程中不可避免会消耗一部分磨削液，这时应及时补充。但在补充磨削液时，首先要完全清除磨削液中的金属碎屑与异物，用杀菌剂进行清洗后才能装入新的磨削液。与此同时，应检测磨削液的浓度是否在规定范围内，否则会带来一定的弊病。若浓度过低，即水分过大，易使磨削液的润滑性能、防锈性能下降，致使加工精度下降，砂轮寿命缩短，容易滋生细菌，加速磨削液的腐蚀和劣化。若浓度过高，除经济性差外，还会造成消泡性下降，对操作人员的皮肤刺激作用加强，容易引起皮肤炎等。一般应使整个磨削液的浓度不低于“临界浓度”(pH值在9左右)，否则会破坏其稳定性。

3) 提高磨削液管理人员与操作人员的业务素质。管理与使用人员应对各种磨削液的使用性能和使用后处理的基本知识有所了解。如不定期向工作液中加入杀菌剂；设备长时间不用时，应对磨削液进行鼓风或进行循环，防止厌气性细菌生长；加强设备润滑油的管理，防止有漏油混入磨削液中等。此外，还应了解净化处理方面的知识，这些都是为实现磨削加工的绿色化创造条件。

采用湿磨加工技术，目前只要在工艺上采取一定的技术措施，仍然是一种比较理想的加工方法，产生的负面效应也会得到明显减少。

5.1.4 环保型磨削加工技术

综上所述，常规的磨削加工技术会产生环境问题，影响操作者身体健康及生产安全等，而且磨削废液的处理成本也非常高，这种处理费用还有不断上涨的趋势。因此，开展有利于环保的磨削加工技术方面的研究，就成为目前磨削加工领域研究的新热点。环保型磨削的基本思路是不使用磨削液，如果非使用不可时，也尽可能减少使用量。目前所采用的主要方法包括：

(1) 用干切削取代磨削加工 随着高性能刀具材料不断出现（如陶瓷刀具、立方氮化硼刀具及涂层刀具等）以及高速加工的兴起，过去只能用磨削方式加工的工件现在可考虑用硬态车削方式来加工。因

此，用干切削取代磨削加工是解决磨削加工环境问题的一个切实可行的办法。

(2) 干磨削 通过上述分析可知，使用磨削液存在若干负面影响，由此出现了不使用磨削液的干磨削加工技术。由于干磨削的实施难度较大，因此，在实际加工中应用不如干切削普遍。但如果使用热传导性良好的CBN砂轮进行低效率磨削，或用金刚石砂轮进行点式磨削，以及采用合适散热方式的冷风磨削，仍可采用干磨削加工方式。

(3) 亚干磨削 由于通常情况下，不使用磨削液很难进行磨削加工，因此，在磨削时一般都要使用磨削液。在必须使用磨削液的情况下，如何尽量减少磨削液的使用，即进行亚干磨削加工，是当前研究的重点。其主要方法为，首先是采用合适的供液方法，以使磨削液有效地送到磨削区域，增强冷却效果；其次是磨削液用量微量量化，减少磨削液的使用量，不断探索最佳的流量。

(4) 新型磨削液的开发 磨削加工时，粘附在工件上的油剂，包含了一些沉淀物，需要清理去除，这样就必须不断补充磨削液，增加了购买费用。此外，清除到磨削加工区以外的磨削液和沉淀物也必须进行妥善处理，否则会造成环境污染，这种处理费用是相当高的。因此，开发新型磨削液，改善磨削液的综合性能，也是磨削工艺绿色化的主要内容之一。其主要内容包括开发油剂（矿物油）的代用品，如乳化油剂、水溶性油剂及对人体无害、污染低的新型磨削液。

5.2 干磨削技术

改善磨削加工的环境一直受到企业和研究人员的广泛关注，国际生产工程学会（CIRP）在1993年第42届年会的主题报告“磨削加工的未来发展”中，就提出了磨削加工将不用或少用磨削液的设想。

所谓干磨削就是在加工过程中不用任何磨削液的工艺方法，使形成的磨屑无污染，易回收处理，且可节省磨削液保存、回收处理等方面装备及费用，节约了生产成本，也不会造成环境污染及与磨削液有关的安全生产事故，是一种很有前途的磨削技术。当前，随着新型磨料、磨具技术、磨削技术、机床制造技术等不断的不断发展，使干磨削加工逐渐成为可能。

5.2.1 干磨削的可行性分析

干磨削的优点与干切削的优点相同，但是实现干磨削的困难则要比干切削大。这是因为，原来由切削液承担的任务，如磨削区的润滑、工件的冷却以及磨屑的排除，都需要另外设法去完成。

对于磨削工艺而言，需特别重视的是散热问题。由于切除一定体积金属的磨削加工所需要的能量比车削或铣削要大，且摩擦功率所占的份额较高，所以通过磨屑带走的热量比较少，这样就要求砂轮的导热性要好，或采取改善散热的措施。

此外，干磨削时高的磨削温度有可能使工件过热，这样可能导致工件金属组织的破坏和工件尺寸与形状精度的下降，所以进行干磨削需要解决下列问题：减少所需的单位切削能量；减少传入工件的热量；改善磨屑及砂轮的散热状况。

按照一般的设想，磨屑的形成为三个阶段（见图 5-1）。磨粒的形状决定了它在切削时有一个很大的负前角，与工件的接触轨迹是一个很扁平的啮合圆弧。开始磨削时，工件处于弹性变形过程中，磨粒只是在工件表面上摩擦。随着磨削深度的增加，工件材料开始塑性变形，继而伴随着微型沟槽的形成，工件材料也被挤向侧面。当超过切削起动厚度之后，才形成切屑。在这个过程中，摩擦、挤压与切屑形成过程同时存在。

在切入过程前两个阶段所消耗的能量并没有用于产生切屑，而基本上是转化成了热量。此外，这个热量是在磨粒之下被释放出来的，由于磨粒的导热性能比工件差，热量就传向工件。

由于砂轮中磨粒的分布不均匀，所以依次进入啮合磨粒之间的径向与轴向距离都不一样，因而也产生了不同的动态切屑厚度。基于这一原因，在进入啮合的磨粒中只有一部分磨粒有机会达到必须的切削

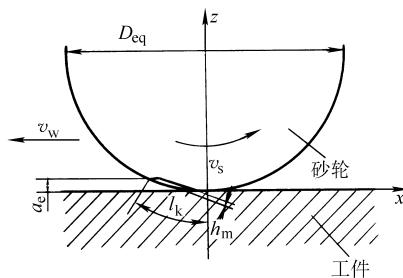


图 5-1 平面磨削示意图

a_e —磨削深度 D_{eq} —砂轮直径

h_m —平均切削厚度 l_k —接触长度

v_s —砂轮圆周速度 v_w —工件速度

起动厚度，其他磨粒则只能停留在切削过程的前两个阶段。

可以认为，磨削过程中输入的能量大部分都转化成摩擦热，除了由于切削角度不利的原因之外，主要由于切入过程太长，且与固定切削刃切削相比的切屑厚度太小，最终使得磨削过程的能量利用率很低。

由上述分析可知，影响干磨削的主要因素是磨削热，因此，如何降低磨削热的产生或使产生的磨削热很快地散发出去是能否进行干磨削的关键。为此可采取以下措施：

- 1) 选择导热性好或能承受较高磨削温度的砂轮，降低磨削对磨削液的依赖程度。新型磨料磨具的发展已为此提供了可能性，如具有良好导热性的 CBN 砂轮可采用干磨削加工方式。

- 2) 减少同时磨削的磨粒数量及砂轮与工件的接触面积，以降低磨削热的产生，如点式磨削方式。

- 3) 减少砂轮的圆周速度 v_s 与工件圆周速度 v_w 之比的比值 ($q = v_s/v_w$)，这样可使磨削热源快速地在工件表面移动，因此不容易进入工件内部。

- 4) 提高砂轮的圆周速度，以减少砂轮与工件的接触时间。同时为了保持上述的速比值不变，应等量地提高工件的圆周进给速度。

- 5) 采用除施加磨削液外的新型冷却方式，这样既可减少因使用磨削液所带来的环境问题，又可达到散热目的，如采用强冷风磨削方式。

5.2.2 强冷风干磨削

强冷风干磨削加工新技术。其基本原理是以 -110°C 的强冷风吹向加工区域，带走磨削加工中产生的热量，从而取代了传统的磨削液（油剂或水剂），避免了因使用磨削液造成的环境污染。

1. 强冷风磨削产生的背景

强冷风磨削加工的研究是从利用金刚石砂轮加工钢铁材料开始的。日本明治大学在试验中发现，如果用金刚石砂轮磨削 SCM435 等低碳钢材料，由于磨削热的作用，金刚石中的碳元素会向工件中扩散，影响加工的顺利进行。这时若使用磨削液，则希望其温度越低越好，但是水溶性磨削液在 5°C 以下，非水溶性磨削液在 -5°C 以下，都会因为流动性恶化而无法使用，因此，研究人员萌发了使用冷风冷却的想法，开始了对强冷风磨削技术的研究，并逐渐转移到 CBN 砂轮的磨削加工

中去。

2. 强冷风磨削的原理

强冷风磨削是一种不用磨削液的干磨削工艺方法。其原理是通过热交换器，压缩空气把液氮从20℃冷却到-110℃，然后经喷嘴喷射到磨削区（由于温度下降，原来空气中的水分会冻结在管道中，因此需使用空气干燥装置），由于压缩空气温度很低，所以在磨削区很少有火花出现，几乎没有热量产生，因而工件热变形极小，可得到1μm以内的圆度。因此，采用CBN砂轮的强冷风磨削技术具有极好的加工效果。同时强冷风磨削也为被加工材料的再生利用开辟了道路，设置在磨削点下方的真空泵吸入磨削产生的磨屑，所搜集的磨屑粉末纯度很高，几乎没有混入磨料和粘结剂颗粒。这是因为CBN砂轮的磨削比约为30000的缘故，即CBN砂轮几乎不磨损，磨屑中没有砂轮的粉末。例如，陶瓷结合剂的CBN砂轮的气孔率为50%，磨屑粉末中陶瓷和CBN磨粒的含量只有0.0025%（质量分数），因此，磨屑粉末融化后再生材料的成分几乎没有发生变化。

图5-2为加注磨削液的普通无心磨削系统与强冷风无心磨削系统的比较。在传统的加注磨削液的普通无心磨削系统中，由冷却泵将磨削液从磨削液箱中吸出，通过管道送入配流器，再分别输送到无心磨床的磨削区和砂轮、导轮修整部位。使用后的磨削液则通过床身内的泄油孔排出，再通过管道输送到磁性分离器，过滤掉磨屑后，将其返回至磨削液箱。此外，为防止磨削液溅出和油雾外逸，还需要配置相应的挡水板和防护罩。

在强冷风无心磨削系统中，磨削液则由压缩空气所取代。压缩空气先经储压器稳压后，进入冷风发生装置，经净化、除湿、干燥和冷却后，通过绝热管道供给无心磨床。采用传统的加注磨削液方法磨削时，磨削液兼有冷却、润滑和净化三种作用。采用冷却空气进行磨削时，冷风则仅有冷却作用。因此，为了解决磨削区的润滑，除使用专用喷嘴向磨削区、砂轮和导轮修整部位提供冷风外，还需要向砂轮提供对人体无害的微量植物油。此外，在磨削区的下方配置有吸尘装置，通过空吸泵将磨屑吸入集尘器内。至于砂轮的净化，则采用吹气排屑方式，由喷嘴向砂轮表面喷气，除去附着的磨屑，以免砂轮堵塞。表5-1是与无心磨床配套的冷风发生装置技术参数。

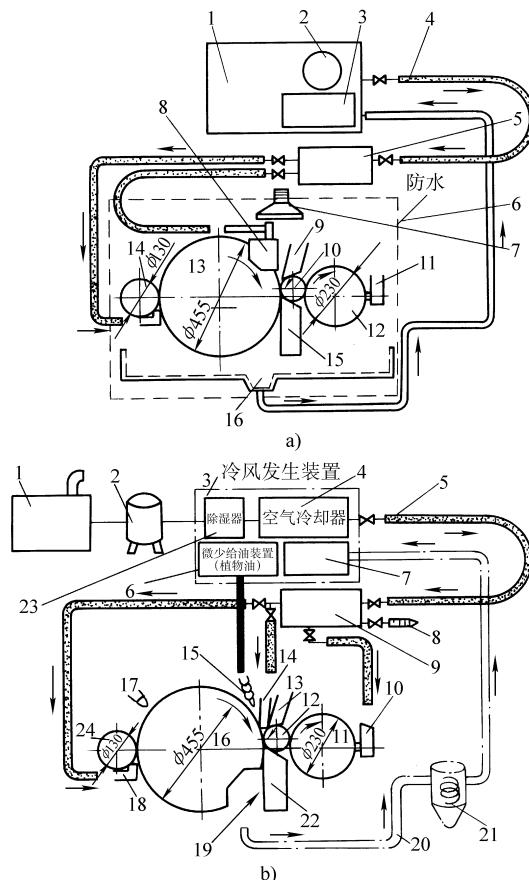


图 5-2 加注磨削液的普通无心磨削系统与强冷风无心磨削系统的比较

a) 加注磨削液的普通无心磨削系统

1—磨削液箱 2—泵 3—磨屑分离器 4—软膏 5—配流器 6—防水罩

7—油雾防护罩 8—喷嘴 9—压紧装置 10—工件 11、14—修整器

12—导轮 13—砂轮 15—托板 16—排水孔

b) 强冷风无心磨削系统

1—压缩机 2—储压器 3—冷风发生装置 4—空气冷却器 5—绝热软管

6—给油装置 (植物油) 7—空吸泵 8—消声器 9—配流器

10、24—修整器 11—导轮 12—工件 13—压缩装置 14—冷风喷嘴

15—润滑油喷嘴 16—砂轮 17—空气嘴 18—修整冷风喷嘴

19、21—集尘器 20—集尘软管 22—托板 23—除湿器

表 5-1 冷风发生装置技术参数

型 号	MYCOM CAC2. 2 ~ 30	
入口空气流量	2. 2 ~ 2. 3 m ³ /min (ANR)	
冷却空气喷出量	1. 7 ~ 1. 8 m ³ /min (ANR)	
入口空气压力	0. 65 ~ 0. 79 MPa	
冷却空气喷出压力	0. 2 MPa	
入口空气温度	40℃ 以下	
冷却空气喷出温度	-30℃	
电源	φ30mm, 200V, 50Hz	
额定功率	6. 6kW (内 150W 用于控制)	
装置周围温度	40℃ 以下	
噪声值	68dB (A)	
管接头直径	供给空气入口	1B (25A)
	冷却空气出口	1B (25A)
	供油喷嘴	φ8mm × 2mm
装置外形尺寸	1660mm × 1120mm × 230mm	
装置质量	约 950kg	

3. 强冷风磨削的磨具

强冷风磨削最理想的磨具是 CBN 砂轮。强冷风磨削方法与 CBN 砂轮结合使用，可充分发挥 CBN 的优越性。这是因为 CBN 磨粒的热导率虽然比金刚石小，但却是传统砂轮磨料 Al₂O₃、SiC 及钢铁材料的 15 倍。如果用传统砂轮磨削，加工点上发出的热量不易从工件上散出，工件的温度会上升到 1000℃左右；如果用 CBN 砂轮磨削，加工点上产生的热量可以经热导率大的 CBN 磨粒传递出去，工件温度大约只有 300℃左右。因此，使用 CBN 砂轮进行干磨削时，再对磨削点实行强冷风吹冷，可得到良好的效果。

4. 强冷风磨削要注意的工艺问题

在 0℃的静压状态下，空气的热导率约是水的 1/23，因而其导热性差。在流体状态下，气体的质量较之液体要小得多，且易扩散。因此，在采用风冷却磨削加工时，必须重视供给冷风的温度、流量、压力和方向四个要素，并充分考虑最佳的喷嘴形状和冷风的供给方法。

例如, 图5-3所示的销轴, 按表5-2所示加工条件对其进行无心磨削试验。所用喷嘴如图5-4中所示, 亦即将其管接头直径、冷风供给距离以及喷嘴出口的截面积设计成各不相同的结构形式。

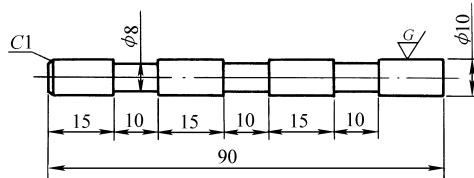
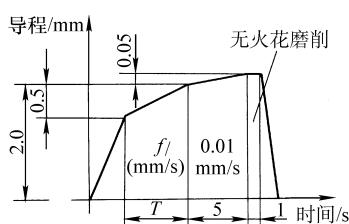


图5-3 销轴零件图

表5-2 轴销加工条件

工件	名称: 轴销	材料: SISC	热处理: 渗碳淬火	磨削余量: 0.4mm					
砂轮牌号	19A80JV ($\phi 455\text{mm} \times 150\text{mm}$)		转速: 1890r/min	线速度: 2700m/min					
导轮牌号	A150RR ($\phi 200\text{mm} \times 150\text{mm}$)		转速: 80r/min	线速度: 50.2m/min					
金刚石修整器	砂轮用: $\phi 0.4\text{mm} \times 2\text{mm} \times 108\text{mm}$ (4130mm \times 1.5mm)		导轮用单颗粒金刚石						
	转速: 250r/min								
托板	厚度: $t = 6\text{mm}$	顶角: 60°	材料: 超硬材料						
砂轮修整	导程: 0.05mm/r		磨削循环图						
	切入进给量: 0.005mm								
导轮修整	导轮转速		无火花磨削						
	修整角度 $0^\circ 20'$		导程/mm						
	修整高度: 0mm		0.5						
	导程: 0.1mm/r		2.0						
	切入进给量: 0.01mm		f/(mm/s)						
工件中心高: 8mm									
进给角度: $0^\circ 20'$									
周速比 (q): 53.7									
冷风条件	压力: 0.14MPa		T						
	流量: $1.8\text{m}^3/\text{min}$		5						
	温度: -30°C		1 时间/s						



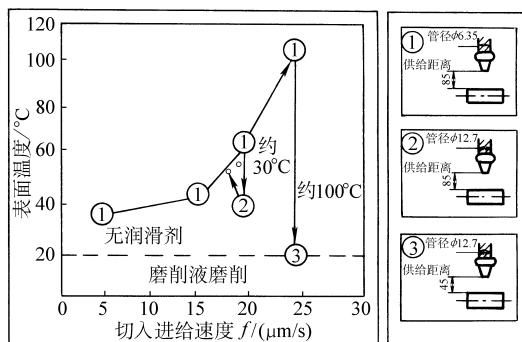


图 5-4 喷嘴结构与零件表面温度的关系

使用①型喷嘴试磨的结果表明，工件表面温度随切入进给速度的增大呈比例地增高。当切入进给速度为 $25\mu\text{m/s}$ 时，工件表面温度达 100°C 以上。②型喷嘴管接头直径为①型喷嘴的两倍，目的在于增加冷风的供给量，试磨结果表明，当切入进给速度为 $20\mu\text{m/s}$ 时，较之使用①型喷嘴，工件表面温度约降低 30°C 。③型喷嘴既加大管接头直径，又缩短冷风供给距离，试磨结果表明，当切入进给速度为 $25\mu\text{m/s}$ 时，工件表面温度较之使用①型喷嘴造成磨削烧伤时的温度，降低约 100°C ，与使用磨削液冷却时的情况基本相同。

由此可知，冷风供给的必要条件有三点：①尽量加大喷嘴管接头的直径，以减小冷风因管内阻力而造成的流量损失；②尽量缩短冷风供给距离；③与水相比，气体有较大的压缩性，喷嘴出口截面积愈小，则在管道内被压缩的冷风流量亦愈小，故喷嘴出口截面积应选择恰当。

图 5-5 是根据测量得出的冷风供给距离与冷风温度的关系曲线。由该图可知，在离喷嘴出口 20mm 以内，冷风温度基本不变，故喷嘴出口应尽量靠近磨削区。

5. 强冷风磨削中的其他问题及其对策

除上述工艺问题外，强冷风磨削中噪声、磨削液的雾化和磨屑的处理等问题也必须得到妥善解决。

(1) 噪声 为消除冷风喷嘴喷射压缩空气时发出的噪声，可考虑在喷嘴附近配置消声器或采用吸声材料，设置可将砂轮架完全罩起的防护罩。

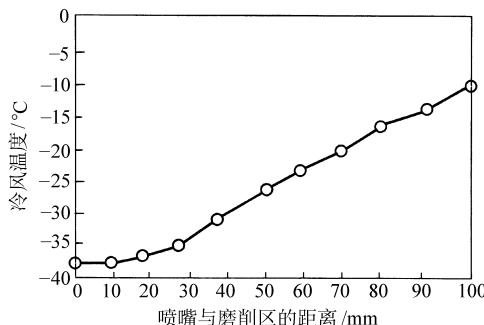


图 5-5 冷风供给距离与冷风温度的关系曲线

(2) 润滑剂雾化 为防止润滑剂雾化的油雾外逸，在供给润滑剂时，最好呈雾状喷向砂轮表面。

(3) 磨屑的处理 磨屑如附着在砂轮表面，易造成砂轮堵塞；如附着在导轮和托板上，则势必会影响加工精度。可在磨床的磨削区，以及砂轮、导轮修整部位配置吸尘装置，对吸尘方式及其效果要尤为重视。

由于强冷风干磨削目前尚属起步阶段，还有许多方面有待深入研究，例如，喷嘴的形状和位置，以及在保证加工精度和经济效益的前提下，如何确定相对于磨削量的冷却效率等。

6. 强冷风磨削应用实例

强冷风磨削已经在生产实际中得到应用，下面以钛合金磨削为例，说明强冷风磨削的应用效果。

由于钛合金材料的性能特点，其磨削加工性很差，主要表现在以下几个方面：

1) 磨削温度高。钛合金的磨削比为 1.53，而 45 钢的磨削比则为 71.5，因而磨削钛合金时的磨削温度高，相同条件下是 45 钢的 1.5~2 倍，最高温度可达 1000℃。

2) 磨削应力大。磨削钛合金所需要的磨削力比 45 钢大 30% 左右。

3) 砂轮易磨损失效。磨削钛合金时除粘结、扩散磨损外，钛合金还会与磨粒间发生化学反应，从而加速了砂轮磨损，加工表面质量不易保证，钛合金磨削易产生残余的拉应力和表面污染层，表面较粗糙，砂轮易磨损造成加工效率很低。

4) 钛合金的化学活性大，易与切削液中的多种化学物质发生不良反应。

采用强冷风磨削钛合金，将液氮喷注在被加工材料表面，通过氮的挥发可以迅速吸收大量热量，使工件表面温度急剧下降，从而降低了磨削表面温度，减少由此产生的热变形与磨削烧伤现象，且液氮形成保护区，控制钛合金进行化学反应的条件，保证了钛合金零件的磨削表面质量。

在万能外圆磨床（M1431A）上进行强冷风磨削钛合金，选择立方氮化硼（CBN）砂轮，砂轮粒度为60号；设定液氮流量 Q 为 $1100\text{mm}^3/\text{s}$ 。（液氮流量的设定，应能使其在作用表面完全汽化后吸收的热量满足对冷却程度的要求，最低限度也要保证吸收的热量大于磨削热）；试验材料选用直径为10mm，长度为20mm的TC4圆棒。

试件分三组：第一组常规磨削TC4圆棒（用油基磨削液冷却），第二组强冷磨削TC4圆棒（液氮从砂轮前方向待加工表面喷射），第三组强冷磨削TC4圆棒（液氮从砂轮后方向磨削区表面喷射），主要测试常规磨削与强冷磨削钛合金的工作效率（见表5-3），试验结果见表5-4。

从表5-3可以看出，强冷风磨削可采用高的磨削速度和大的进给量，同时砂轮的寿命也得到了改善，劳动效率也得到了相应提高。由表5-4可以看出，强冷磨削对降低被加工工件的表面粗糙度有一定的效果。

表 5-3 工艺参数

磨削方式	常规磨削	强冷磨削
砂轮速度/ (m/s)	10~15	20~30
径向进给/ (mm/s)	0.005~0.013	0.03~0.6
工件移动速度/ (m/min)	20~30	7~10
砂轮的修整/ (次/min)	5	20

表 5-4 试验结果

组别	一组	二组	三组
表面粗糙度值/ μm	0.8	0.4	0.4

5.2.3 低温CO₂干磨削

除冷却空气外，利用低温二氧化碳进行强冷磨削，也是干式磨削加工中常见的一种方法。例如，在改装的外圆磨床上，采用A80KV棕

刚玉砂轮和粒度 80 的金属基体电镀 CBN 砂轮进行低温 CO_2 干磨削。砂轮线速度为 20m/s , 工件材料为 Q235, 工件速度为 $11\sim34\text{m/min}$, 磨削深度为 $10\sim35\mu\text{m}$ 。

利用电镀 CBN 砂轮进行内冷却，在结构设计上应满足以下几点：

- 1) 应能够均匀而有效地将低温冷气传输到砂轮表面，直至磨削区内。
- 2) 砂轮表面不会因存在通气小孔而影响 CBN 磨料层的粘附强度和磨削性能。
- 3) 应保证砂轮在高速回转时的平衡性，即结构应对称，动平衡效果好。

图 5-6 所示是基于以上原则设计出的一种内冷却电镀 CBN 砂轮及其夹盘结构。具有一定压力的低温冷气经导气管 1、砂轮夹盘法兰 3 中的内沟道和金属基体砂轮 4 的径向微孔传到砂轮表面。导气管 1 通过固定在磨床上的支撑盘 2 与砂轮夹盘相连。为防止砂轮高速回转时低温冷气不外逸，在固定支撑盘 2 与砂轮夹盘法兰 3 的非接触连接处设计为双密封结构。砂轮的平衡通过砂轮夹盘基体 5 外侧梯形环道内的平衡块解决。为使低温冷气能够均匀地喷射到磨削区，在金属基体的砂轮表面上均匀开设了许多微孔，其分布形式如图 5-7 所示。砂轮上布孔的基本

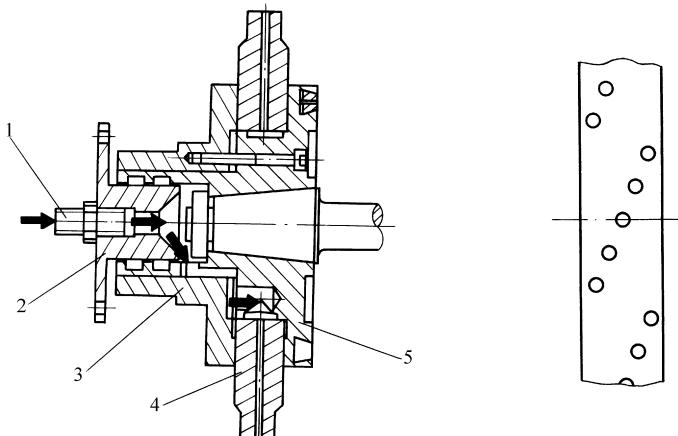


图 5-6 内冷却电镀 CBN 砂轮及其夹盘结构

1—导气管 2—支撑盘 3—砂轮夹盘法兰
4—金属基体砂轮 5—砂轮夹盘基体

图 5-7 砂轮气孔分布形式

原则是：在砂轮轴向方向上尽可能宽的区域能得到冷却；砂轮磨削区内得到的冷却尽可能均匀；在结构上应保证砂轮高速回转的平稳性和磨削时的足够强度，且受力均匀。

电镀 CBN 砂轮的外冷却喷嘴内径为 5mm，喷嘴出口处为扁状，冷气直接喷向磨削区。外冷却喷嘴安装时，要尽量贴近砂轮并靠近磨削区，以提高冷却效果。室温为 8℃，供气压力为 0.12MPa 时，距喷嘴出口 10mm 处温度为 -25℃ 左右，而 30mm 处降为 -10℃ 左右，可见距离越近，冷却效果越好。

图 5-8 所示为不同工件速度和磨削深度下，干磨削所获得的试验结果。从该图中可以看出，随着工件速度的增大，工件表面温度有所增加。另外，在工件速度不变的情况下，随着磨削深度的增加，磨削温度也增加。磨削深度的增加，使热源强度增大，接触弧长增大，热源作用于工件表面时间增加，因而磨削温度升高。

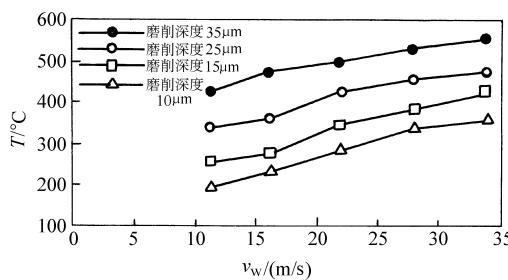


图 5-8 工件速度对磨削温度的影响

注：砂轮材料为 CBN；工件材质为 Q235；砂轮圆周速度为 20m/s。

图 5-9 所示为采用 A80KV 棕刚玉砂轮和电镀 CBN 砂轮分别进行干磨削和外冷却磨削时，所获得的磨削温度对比曲线。由该图可见，采用冷气冷却的磨削温度明显低于干磨削，说明采用冷气冷却可有效降低磨削温度。CBN 砂轮与 A80KV 棕刚玉砂轮相比，同等条件下能获得较低的磨削温度。与刚玉砂轮相比，CBN 磨料硬度高，磨粒锋利，为磨屑形成提供了足够的容屑空间。另外，电镀 CBN 砂轮导热性好，能将磨削热迅速导出。这些因素综合作用使得 CBN 砂轮磨削温度明显低于刚玉砂轮。

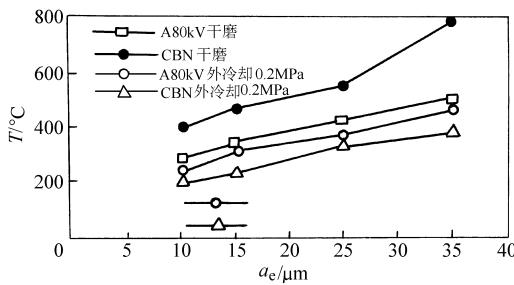
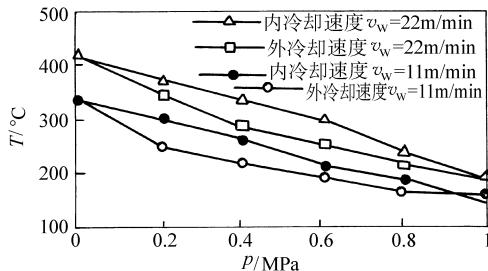


图 5-9 磨削深度对磨削温度的影响

注：砂轮材料为 CBN；工件材质为 Q235；

砂轮圆周速度为 20m/s；工件速度为 22m/s。

图 5-10 所示为砂轮速度 20m/s 时，不同工件速度和冷气压力下内冷却和外冷却所获得的磨削温度曲线。图中压力等于 0 时，即干磨削的情况。可以看出，内冷却和外冷却磨削温度均随着冷却压力的增加而降低，这是由于冷气压力越大，冷气从磨削区带走的热量就越多，使得磨削温度降低。工件速度对强冷磨削的温度也有影响。工件速度越慢，工件表层的冷却越充分，磨削温度越低。因而，通过控制工件速度和冷气的流量或压力等，以达到控制工件表面温度，改善表面质量的目的。

图 5-10 冷气压力 p 对磨削温度的影响

注：砂轮材料为 CBN；工件材质为 Q235；砂轮圆周速度为 20m/s。

从图 5-10 中还可以看出，在冷却压力不大于 1MPa 时，外冷却的冷却效果稍稍优于内冷却。随着冷气压力的增大或者说随着冷量的增加，

内冷却的冷却效果在不断地加强。当冷气压力达到 1MPa 时，内外冷却的效果达到相当水平。对外冷却而言，其优势在于它能直接集中到冷却磨削区部位，在压力不大的情况下，冷气利用效率高；而内冷却冷气很大一部分用于砂轮基体的降温。因而冷气压力小于 1MPa 时，外冷却优于内冷却。但是，对外冷却而言，冷气难于达到磨削区，喷嘴的结构和方向，对冷却效果也有很大影响。随着压力的增加，内冷却既可以使冷气直接达到磨削区带走热量，又可大幅度地降低砂轮基体温度的双重优势逐渐显露出来。对外圆磨削而言，内冷却的优势还在于冷却效果的发挥不受工件半径大小的影响。因而，对外圆磨削而言，冷气内冷却很有发展前途。

5.2.4 点磨削技术

点磨法是一项专利技术，是由德国容克（Junker）公司首先发展起来的一种超硬磨料高效磨削新工艺。这种方法简单地说就是用顶尖对称顶住工件，在磨削送进极其精确的情况下，以横向磨削和端面一次性的磨削加工整个磨削余量。因此，点磨法既有极高的金属切削率，又有很好的加工柔性，同时冷却效果极佳，在一次装夹中可以完成工件上所有外形的磨削。目前在我国汽车工业中，这种方法已经得到应用。

普通的外圆磨削方法是在线接触情况下完成磨削过程的，需要较大的传动功率；而点磨削过程中，砂轮与工件是以极小的磨削力和很低的传动功率完成磨削过程的，图 5-11 则表示了普通外圆磨削和点磨

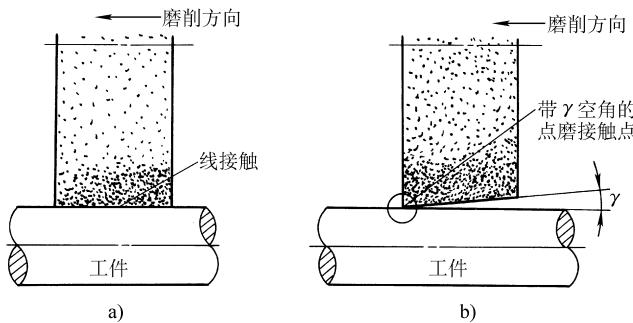


图 5-11 普通外圆磨削和点磨削中砂轮与工件的接触情况

a) 普通外圆磨削 b) 点磨削

削中砂轮与工件的接触情况。

将砂轮的轴心线相对工件轴心倾斜一定的角度，使之形成点接触即可实现点磨削，如图 5-11 所示。此时，在砂轮的横向角度形成一个微小的空角，砂轮通过快速点接触可以磨削出光滑、平整、无进给痕迹的工件外形。在纵向垂直线上，由于砂轮倾斜形成砂轮与工件之间接触线上二分之一的点接触（见图 5-12），磨屑长度和磨削力相应减半，因此，可以选择大的磨削用量。

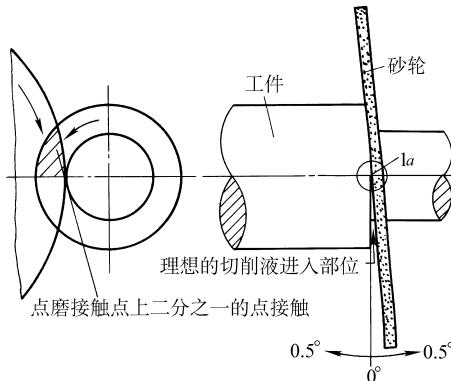


图 5-12 点磨削中砂轮垂直接触点二分之一的点接触示意图

点磨削技术是利用单层 CDN 薄砂轮（宽度仅数毫米）和超高线速度（ $120 \sim 250\text{m/s}$ ）砂轮来实现。加工时，砂轮轴线与工件轴线（在水平方向）形成倾斜角，以使砂轮与工件间理论上的线接触变成点接触，以减少磨削接触面积。而极高的磨削速度可使磨屑变薄，磨粒负荷减轻，产生的磨削热来不及传到工件和砂轮上，几乎全被磨屑带走。点磨削技术主要有以下特点：

- 1) 点磨削工艺使用长寿命、高硬度的砂轮，砂轮的速度和工件转速可以显著提高。例如，砂轮的速度可达 140m/s ，工件转速可达 6000r/min ，从而提高了加工效率。在这种速度下磨削，除了会有极高的切除率和砂轮寿命外，更由于切削时变形速度已超过热量传导速度，大量变形能转化成的热量保持在切屑中并被迅速带走，而来不及传到工件和砂轮上，因而点磨削是一种冷态磨削。这样可提高加工精度和加工表面质量，降低砂轮表面温度，实现干磨削。磨削速度的提高还

使切屑厚度减小，利于排屑，减轻磨粒上的负荷，提高了使用寿命。据 Junker 公司介绍，点磨削的生产效率为普通外圆磨削的六倍。

2) 点磨削工艺在提高砂轮速度的同时，还减薄了砂轮的厚度，使砂轮的厚度只有几个毫米，不但可以降低砂轮的造价，而且有利于砂轮制造的质量均匀、性能一致。薄砂轮还降低了砂轮的质量和不平衡度，大大减少了运转时施加在轴上的附加力。此外，由于砂轮宽度减小而损失的磨削效率，可以被高的磨削速度补偿并提高。

3) 为进一步减少砂轮与工件间的磨削接触区，除降低砂轮厚度外，在加工时，砂轮轴线在水平方向与工件轴线还形成一定的倾角，这使砂轮与工件之间的接触变成点接触，这也是点磨削名称的由来。这样更进一步降低了磨削接触区的面积，不存在磨削封闭区，更利于磨削热的散发。

4) 点磨削时，由于砂轮与工件间的磨削接触区变成点接触，使磨削力大大减小，这实际上等于增加了机床的刚度，减少了磨削振动产生的可能性，使切削平稳，同时提高了砂轮的寿命和加工质量。采取上述措施后，机床变得十分轻巧，便于提高精度。由于切削力非常低，机床甚至取消了一般机床所用的头架卡盘或拨叉等工件驱动装置。

5) 由于点磨削时磨削速度非常高，要求机床应采取动平衡措施，为此机床应采用高回转精度的非接触封闭性主轴结构；为了减小误差环节，安装砂轮时，用法兰盘的一侧直接与主轴做成一体，以消除法兰盘与主轴连接部分的安装误差，提高连接刚度。在法兰盘的芯子部分还应装有随机自动电子平衡装置，随时校正不平衡因素。这些措施均可提高机床的动刚度，且可降低砂轮消耗，减少了加工成本。

6) 砂轮安装在法兰盘上时，一般也易造成较大的安装误差，影响砂轮使用，不少机床在砂轮安装时造成了较大误差，不得不在每次装夹后，重新对砂轮进行修整，增加了加工成本，为此点磨削机床在砂轮安装时，采用了 JUNKER 的专利技术——三点定心技术，使砂轮的安装精度达到了微米级，装夹后的砂轮完全不必要再进行修整，直接可以进行加工。该专利中砂轮内孔被三个经过精加工的且按 120° 间隔安装的圆柱棒代替，实现了真正的三点定心。法兰盘安装砂轮的部位，有三个 120° 对称分布的偏心圆弧代替了过去的圆柱形状。

7) 由于点磨削采用的是薄片砂轮而不是与成形表面形状相匹配的

砂轮，因此，配合 CNC 技术，点磨削可以加工多种工件形状，具有较宽的适用范围。

8) 砂轮磨损表现为砂轮侧面的环状（与磨削深度相对应）薄片层损耗，即轴向磨损，而不是传统的圆周面磨损，因而在砂轮磨损过程中，工件外形不会受到影响。

9) 点磨削砂轮寿命长（使用一年），修整频率低（每次修整可磨削加工工件 20 万件）。

点磨削工艺中通常采用立方氮化硼（CBN）和金刚石等高硬度砂轮。CBN 常用于磨削淬火和不淬火的钢材、铝材、铜材和各种铸铁，而金刚石一般用于磨削硬质合金、玻璃和工业陶瓷等。点磨削的砂轮直径通常为 350~400mm，呈薄片状，厚约几毫米。图 5-13 表明了砂轮在不同工作阶段中的磨损状态。图中 s 为切深， α 为后角， la 为磨损棱边。当砂轮侧面（即轴向）逐渐磨损到占砂轮宽度的 80% 时，需对砂轮进行修正。砂轮的工作高度（在半径方向）一般为 5mm，允许修正量为 4.5mm。

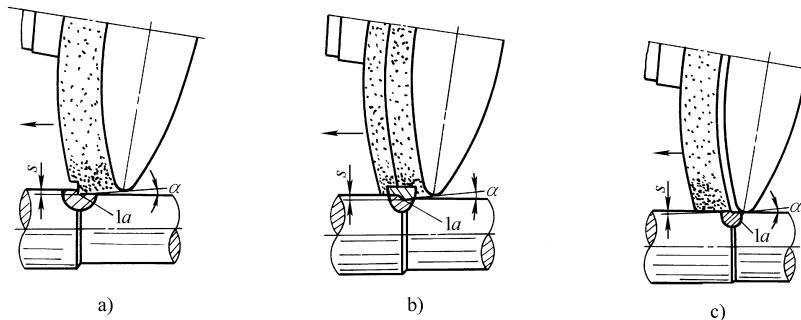
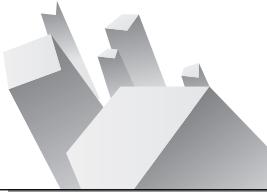


图 5-13 点磨削中砂轮的磨损状态

a) 新砂轮 b) 磨损 50% 的砂轮 c) 磨损 80% 的砂轮



第 6 章

亚干切削加工的理论研究 与应用

在 2.4 节亚干切削综述和有关章节中都不同程度初步介绍了亚干切削。本章将结合作者的研究，尤其是对将适量冷却和润滑介质注入带有一定压力、不同温度的气流中混合雾化、并喷入切削区方式的亚干切削技术给予进一步的表述。

6.1 亚干切削加工的理论研究

6.1.1 对亚干切削的认识

如前所述：完全干切削对机床结构、刀具材料、工艺条件都有相对严格的要求，因而使得完全干切削的实施变得困难，应用范围受到限制：湿式切削既不利于环境保护，又使生产成本上升：如果将干切削与湿式加工两者的优点相互结合，既可满足环境保护和加工要求，又可以使与切削液及其处理相关费用降至很低，取得甚至超过湿式切削的效果。在一般意义，通常将这种介于湿切削与干切削之间的加工技术称为亚干切削（Sub-dry Machining）。亚干切削包括最小润滑技术（Minimal Quantity of Lubricating, MQL）、低温微量润滑切削（冷风切削）、保护气微量润滑切削技术等。

亚干切削在本质上和传统的金属切削理论是一致的，建立在力学基础上的传统金属切削理论基本上都可以用于研究亚干切削，都是在切削中使用硬度远大于工件材料硬度的刀具，通过刀具对被切削材料的作用，在挤压、滑移、剪切等过程中完成切屑与工件的分离，切削过程中切削热、切削力、切屑变形变化规律、刀具磨损等特征量都深

刻反映切削过程的状况，使用任何减少切削热、降低切削力、降低切削温度的方法和工艺措施，都能有效地改善切削过程状况，提高切削效率，提高被加工工件的加工质量。

亚干切削和完全干切削不一样，它对机床和刀具没有许多特殊要求；尽管机床和刀具的特殊设计对亚干切削有很多益处，但亚干切削并不是非它不行；在工艺上，亚干切削追求的是在湿切削同等甚至不及的条件下，通过工艺进步、有限的设备改造、刀具革新等手段，来达到湿切削能加工、尚不能加工以及不能企及的高生产效率、低成本和高加工质量之目的。这也是亚干切削研究和应用的宗旨和生命力。

作者最早提出亚干切削的定义是：以气体射流为动力，给予最小润滑（满足最基本润滑条件），最大冷却（有限的冷却介质达到最大的冷却效果），去冲刷切削区，提高切削效果——亚干切削（磨削）加工冷却方式或最小润滑、最大冷却技术。近期对该定义又完善为：基于绿色，拟以一定压力的冷风射流为动力、运载适量冷却及微量润滑介质，形成汽化对流强化换热和微润滑的多流体耦合冷却切削技术。前者最小润滑、最大冷却技术是一个目标，如何达到呢？这就需要研究。后者，“最小”“最大”的概念由“适量”所替代，这既说明随着研究的深入，人们认识问题不断进步的过程，同时说明在亚干切削技术领域有许多未知问题等待人们去认识。

亚干切削包括最小润滑技术（MQL）、低温微量润滑切削（冷风切削）、保护气微量润滑切削技术等。从定义范畴讲：冷却及微量润滑介质中的介质并非仅指切削液、润滑油，可泛指具有冷却及微量润滑作用、能用于该工艺过程中的一切介质；气体可以是空气也可以是其他气体，可以是高温至低温区间任一适宜的温度；当该工艺过程中仅有微量润滑介质时，又可称为最小润滑技术，可以说最小润滑技术是亚干式切削技术中的特例。

在一般干切削中，切削温度较湿切削加工要高得多，润滑油极易挥发，切屑与刀具前刀面之间的正压力也使润滑油难以真正进入切削区，切削过程中不仅有外摩擦，还有被切削材料变形所消耗的功转变成热量，这些因素并非润滑所能解决。亚干切削中采用冷空气射向切削区，首先降低切削区的切削温度，使润滑介质能更好地发挥润滑作

用，使冷却介质更好地强化换热。即：一方面气流的压力作用容易进入切屑与刀具表面之间；另一方面，低温有利于在两种材料的摩擦表面维持润滑油的润滑作用；三是冷却介质的沸腾汽化可进一步降低切削区温度，有利于保持刀具硬度，减小工件热变形，减小刀具磨损。诸多方面的效果更加有利于切削过程向增大切削效率，提高工件尺寸稳定性和提高工件表面完整性方向发展。

6.1.2 亚干切削加工的基础理论研究

虽然亚干切削在本质上和建立在力学基础上的传统金属切削理论基本上一致，但亚干切削加工整个工艺方法都或多或少偏离了传统的湿式切削工艺方法，其切削原理涉及的因素将会更多，需要和可以平衡及利用的工艺因素也比湿切削多得多。这一方面为提高切削效率、提高被加工工件的加工质量提供了一个更为宽松的平台，同时也会产生许多工艺中应用的问题需要进一步的理论探索，很难用一种理论基础去分析亚干切削加工机理；有必要逐步建立亚干切削理论基础去丰富传统金属切削理论。对于亚干切削理论基础、应用原则的分析主要有以下几种：

1) 本书第2章2.1节所述清洁生产原则同样是亚干式切削首先要遵循的原则。

2) 低温脆性。当使用低温气体、并且气体温度达到切削区材料产生引发被切削材料的低温脆性时，本书第2章2.1节所述低温脆性同样是亚干式切削过程中降低切削力、减少切削热，不同程度保护或延缓刀具被磨损的主要机理之一。

3) 强化换热效应。亚干式切削过程中强化换热效应主要体现在以下几个方面：

① 热传递。亚干式切削中广泛使用以气体（冷风）为动力的射流，从环保的角度看，自然的空气作为冷却介质是最好的，无需作任何处理；但从冷却效果看，空气的比热容低、吸热能力远不如水，不适宜作为冷却介质。从现代传热学角度研究空气的热传递问题，即传热方程

$$Q = \alpha A \Delta T$$

式中 ΔT ——两种载体的温差（℃）；

α ——传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$];

A ——换热面积 (m^2)。

亚干式切削中根据传热方程可知, 对空气热传递过程进行一番改造, 创造条件让空气起到良好的换热作用, 即: 通过对空气实施冷却, 扩大低温空气和切削区的温差 (ΔT), 使气体有较强的冷却能力; 以射流的方式让空气用适当较快的速度通过切削区, 使单位时间通过切削区截面的冷气越多, 说明通过切削区动态换热面积 A 越大, 因而能够带走更多的热量, 从而弥补了空气传热系数 α 小的不足。这样空气就成为切削区换热的良好载体。

② 沸腾汽化, 强化换热。亚干式切削思考的是一种能够以尽可能少的冷却介质并充分发挥其换热潜力的强化传热对策作为突破口, 尽可能疏导已经产生并积聚在加工区的热量, 提高加工区的换热效率。能够实现该冷却技术的基本想法是: 使微量的水在喷嘴里经低温气流充分搅拌“碎化”, 形成低温雾状流(低温气液两相流), 低温气液两相流从喷嘴喷出后和周围空气发生热交换, 导致射流外层被微小水滴包围, 这样气液两相流就含有更多的液滴, 这种雾状射流遇到高温壁面, 形成汽化中心, 微小液滴迅速沸腾、汽化, 气泡脱离, 并且带动雾滴液体剧烈翻动, 使雾滴进一步汽化, 带走大量热量, 细小水珠产生相变, 变成蒸汽, 而且由喷嘴喷向切削区的射流不断“冲刷”高温表面, 形成强迫对流, 并破坏泡状汽化层, 使得沸腾汽化得以加强, 大大提高了散热能力。而传统切削液浇注式冷却, 液体很难进入切削区, 即使少量的液体进入切削区遇到高温壁面, 液体也只是产生层状汽化, 汽化时, 其蒸汽成层状, 这个汽化层把被加热的表面和冷却介质分离, 所以液体浇注冷却仅是对流和传导起主要作用, 由于气层传热能力较小, 因而层状汽化散热能力低于泡状汽化。如果泡状汽化能辅以强迫对流来破坏汽化层, 则可大大提高散热能力。低温气体雾化射流冲击冷却集低温气液二相射流和充分汽化的强化换热优势, 充分发挥冷却介质的换热潜力以获得最佳的强化换热效果。据有关机构统计, 16mL 的雾状冷却润滑剂在相同时间内吸收的热量是同体积液体浇注冷却润滑的 1000 倍。

低温气液两相流对高温壁面的冷却的高效性也可以用滞流层和粘度来解释。在流体对高温固体表面进行冷却的时候, 由于流体与固体

分子之间的吸引力和流体粘度的作用，在固体表面就有一个流体滞流层，从而增加了热阻。滞流层越厚，热阻就越大，散热能力就越低。滞流层的厚度主要取决于流体的流动性即粘度，所以粘度小的流体冷却效果比粘度大的流体冷却效果好。固体和流体传热过程如图 6-1。

气液两相流体的动力粘度可用下式表示：

$$\mu = \mu_f - (\mu_f - \mu_g)x \quad (6-1)$$

式中 μ_f ——液体的动力粘度；
 μ_g ——气体的动力粘度；

x ——液体质量分数 (%)， $x = \frac{W_f}{W_f + W_g}$ (W_f 为液相质量流量，
 W_g 为气相质量流量)。

显然式中 $\mu < \mu_f$ ，即气液两相混合流体的粘度 μ 总小于单相液体的粘度，所以低温气体射流冷却的降温效果要优于单相切削液。

③ 剪切角增大。以气体射流为动力，辅以必要的润滑油、冷却液等冷却润滑介质形成亚干式冷却润滑方式射向切削区，在切削区形成沸腾汽化，达到这种境界其冷却润滑效果是同体积液体浇注冷却润滑的 1000 倍，远高于纯气体冷却，在强化冷却的同时也强化了润滑作用。从切削机理的角度分析，润滑作用减少了前刀面、后刀面的摩擦因数。按照切削方程式 $\varphi = \pi/4 - \beta + \alpha$ (φ —剪切角， β —刀具前面摩擦角， α —切削时刀具前角)，减少摩擦因数，意味着 β 变小， φ 增大，从而使前刀面与切屑的接触长度减少，降低了切削力，因而也减少了切削热，从而使切削向更加有利于零件尺寸稳定性、表面完整性方向发展。

④ 减少前刀面与切屑的接触长度。在工艺上，由于切削过程中，刀具前刀面上的摩擦很激烈，切削中的润滑属极压边界润滑，湿式浇注冷却供应的切削液很少进入切削区，因而依靠润滑作用体现出的冷却效果随切削力加大而降低，切削液仅靠自身和切削区的温差带走切削热起冷却作用。以气体为动力的亚干切削中，射流或喷射的方式又使冷却润滑介质以微元的形态进入切削区，沸腾汽化强化冷却又能使

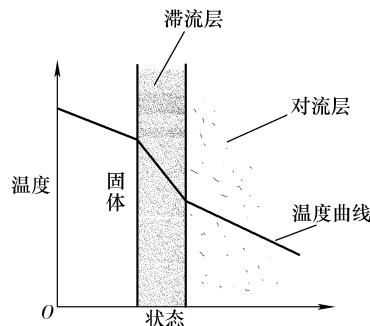


图 6-1 固体和流体传热过程

润滑介质更好地发挥了减摩作用，一定压力流体射流或喷射的方式可以改变切屑流向、切屑的卷曲半径，减少了切屑与前刀面的接触长度，受一定压力流体射流冲击形成切屑的卷曲半径大小交替变化的“泵吸”作用，推动冷却润滑介质进一步深入切削区。因此，在以气体为动力的亚干切削中，一定压力气体的吸附作用比浇注冷却更能进入切削区，具有冷却的针对性、强迫性，因而切削温度越高，冷却润滑作用比浇注冷却越显著。

4) 润滑效应，即毛细管动力学。切削加工过程中产生切削热的主要原因就是摩擦和变形，变形是不可抗拒的，而摩擦则可以通过改变刀具/工件和刀具/切屑的接触条件来减小。

从摩擦学角度来说，摩擦力 (F_t) = 剪切节点力 (F_j) + 吸附力 (F_x) + 耕犁力 (F_g) 。减少摩擦的首要任务就是减小摩擦因数，降低能耗并避免磨损。当两个物体表面接触且有相对运动时，相对表面之间的润滑剂或它的薄膜保证了切应力发生在液体内部，将大大减少摩擦力。所以，切削加工中在刀具/工件和刀具/切屑接触

面形成薄膜是关键。从俄罗斯学者 Goldlevskiy V. A. 提出了图 6-2 所示的切削区渗透的毛细管几何模型分析中，可以表明低温气体射流冷却在这方面有着比常温传统切削液更强的形成薄膜的能力。

俄罗斯学者 Goldlevskiy V. A. 认为：切削液的冷却润滑效果不能归结于单纯的对流热迁移，而在于其润滑效应，即毛细管动力学。研究认为：常温传统切削液渗透在刀具/切屑和刀具/工件接触面间的毛细管分三个阶段：①液相渗入毛细管阶段；②液滴在毛细管内微滴爆炸蒸发阶段；③气相填充毛细管渗入切削区阶段。使用气体射流冷却润滑作为介质具有同水蒸气作为冷却润滑介质时近似相同的优势。在毛细管渗透模型中，可取消液相渗入毛细管阶段，即直接进入气体充填毛细管渗入切削区阶段。所以，低温气体射流冷却、水蒸气作为冷却润滑介质时的冷却切削效果好于单纯使用切削液切削。

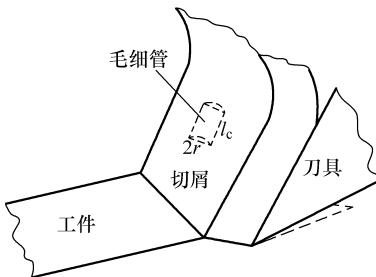


图 6-2 Goldlevskiy V. A. 的毛细管几何模型

随着亚干切削加工技术的不断创新和研究的展开，亚干切削加工的基础理论将会得到进一步发展和不断地完善，同干切削加工方法一样更好地为应用于工业现场。

6.1.3 亚干切削工艺的基础研究

1. 冷风温度与冷却效果的关系

以冷风温度为横坐标，将各种在同等工艺条件下不同冷却方法得到的切削热、切削力值，以风冷得到的值为分子，分别比自然冷却（曲线1）、浇注冷却（曲线2）的相应值，并以此比值为纵坐标，得到评判冷却效果与冷风温度关系（见图6-3）。图6-3说明：在现行工艺条件下，切削轴承钢风冷 X_1 ℃左右的冷却效果不是太理想的； $-X_3$ ℃左右是一个拐点，在此温度前，随着冷风温度降低，冷却效果提高，在此后到 $-X_4$ ℃之间，降低冷风温度，冷却效果反而降低； $-X_4$ ℃以后随着冷风温度降低，冷却效果提高。这说明冷风温度与冷却效果并不存在线性关系，在这曲线中有一个集成本、冷却效果统一体的临界值。

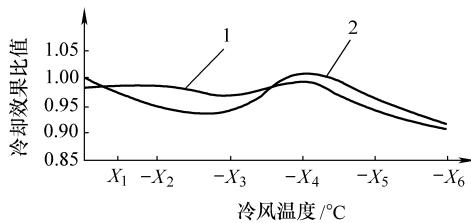


图 6-3 切削 GCr15 冷风温度与其冷却效果的关系

1—风冷/自然冷却 2—风冷/浇注冷却

2. 冷风温度的冷却效果优化值研究

亚干切削借助于一定压力的气体（或冷风）为动力进行射流，那么在不同材料处于不同温度时，是否存在某一冷风的温度最合适，或其冷却效果较好，以便选用此冷风温度实施亚干切削，取得更好的亚干切削效果。

研究表明，对不同材料处于不同温度时进行冷风冷却时，存在一个优化的冷风温度可取得良好的冷却效果问题。在冷风冷却实验中，气体的压力 $p = 0.2 \text{ MPa}$ 、靶距 $h = 25 \text{ mm}$ 设为额定值，选用 GH4169、钛

合金、45钢和纯铜四种材料进行如下实验，得到不同材料冷风冷却时，宜选用的冷风温度，供参考。

(1) 镍基高温合金 (GH4169)

由图6-4、图6-5和表6-1、表6-2说明，镍基合金在300℃时，冷却效果最好的是冷风温度为-35℃时，降温幅值为54.9%，-25℃的冷风时，降温幅值为53.9%，降温效果也非常好；而在600℃时，降温效果最好的是-25℃的冷风，降温幅值为46.8%。综合表明，镍基合金冷风冷却时，宜选-25℃冷风。

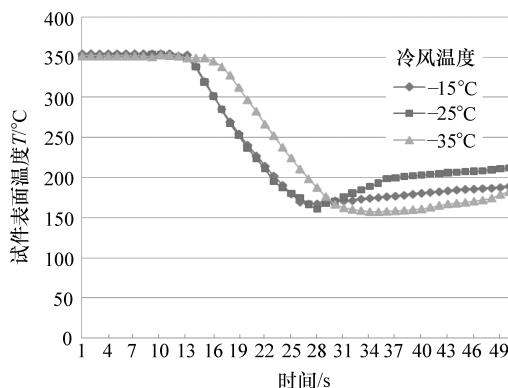


图 6-4 350℃镍基合金冷风冷却效果

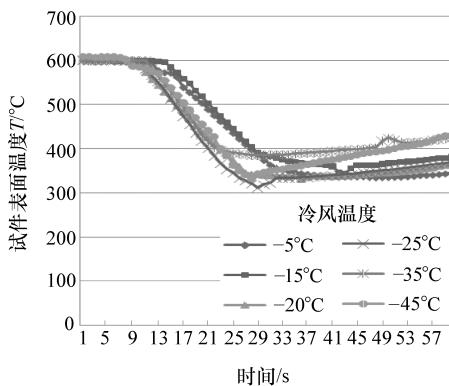


图 6-5 600℃镍基合金在不同温度冷风下的冷却效果

表 6-1 镍基合金试件 350℃时不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
350	-15	167.9
350	-25	161.5
350	-35	157.8

表 6-2 镍基合金试件 600℃时随不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
600	-5	335.5
600	-15	343.9
600	-20	322.2
600	-25	312.2
600	-35	365.7
600	-45	332.5

(2) 钛合金冷却实验

由图 6-6、图 6-7 和表 6-3、表 6-4 说明，钛合金在 400℃时，冷却效果最好的是 -10℃冷风，降温幅值达到 70.4%，其次是 -35℃，降温幅值达到 68.4%；高温 600℃时，降温最好的是 -45℃冷风，降温幅值为 78.1%，其次是 -35℃冷风，降温幅值为 77.5%。钛合金是难切削加工材料，总体趋势是冷风温度低，它的降温效果好，综合表明，

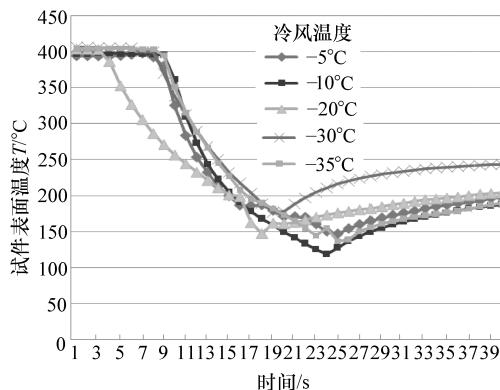


图 6-6 400℃时钛合金在不同温度冷风冷却下的冷却效果

钛合金冷风冷却时，宜选-35℃冷风。

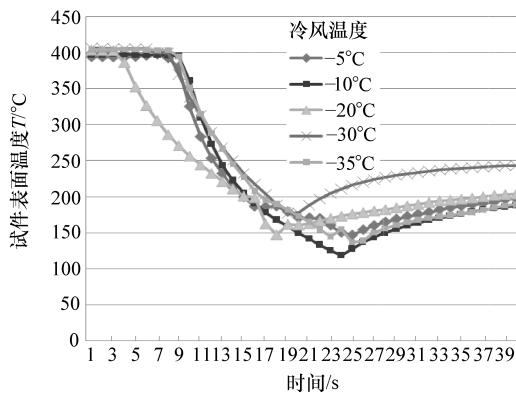


图 6-7 600℃时钛合金在不同温度冷风冷却下的冷却效果

表 6-3 钛合金 400℃时随不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
400	5	146.5
400	-10	118.6
400	-20	146.7
400	-30	176.9
400	-35	126.4

表 6-4 钛合金 600℃时随不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
600	-10	242.4
600	-15	200.8
600	-20	200.3
600	-30	157.9
600	-35	135.2
600	-45	131.3

(3) 纯铜冷却实验

由图 6-8、图 6-9 和表 6-5、表 6-6 说明，纯铜在 400℃ 时，冷却效果最好的是 -20℃ 冷风，降温幅值为 53.1%；在 600℃ 时，也是 -20℃ 冷风冷却效果最好，降温幅值为 59.2%，综合表明，纯铜冷风冷却时，宜选 -20℃ 冷风。

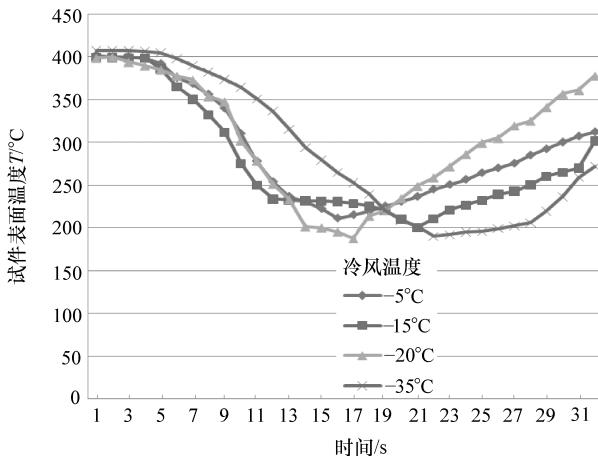


图 6-8 400℃ 时纯铜在不同温度冷风冷却下的冷却效果

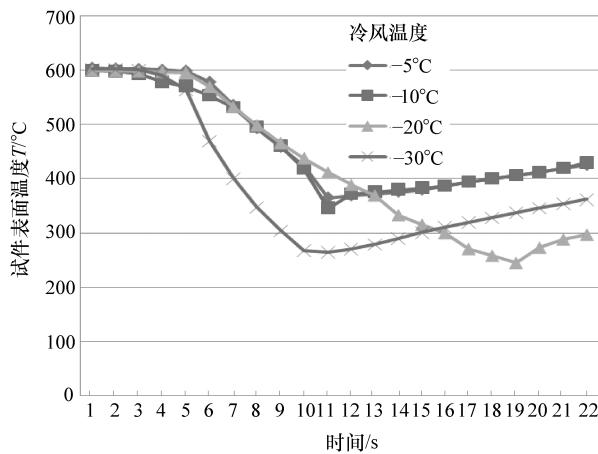


图 6-9 600℃ 时纯铜在不同温度冷风冷却下的冷却效果

表 6-5 纯铜 400℃时的随不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
400	-5	211.5
400	-15	200.6
400	-20	187.5
400	-35	190.7

表 6-6 纯铜 600℃时的随不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
600	-5	365.1
600	-10	345.8
600	-20	244.9
600	-35	264.9

(4) 45 钢冷却实验

由图 6-10、图 6-11 和表 6-7、表 6-8 说明，45 碳素钢无论是低温还是高温冷风，冷却效果都较好，低温 350℃时，降温幅值最大的是 -5℃冷风，降温幅值达到 74.1%，这是其他几种金属不可能达到的；高温 600℃时，冷却效果最好的是 -25℃冷风，降温幅值为 66.5%；综合表明，45 钢冷风冷却时，宜选 -25℃冷风。

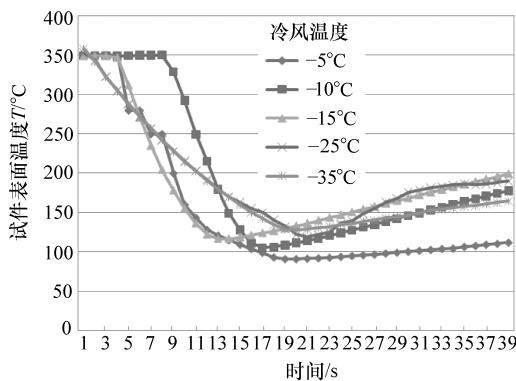


图 6-10 350℃时 45 钢在不同温度冷风冷却下的冷却效果

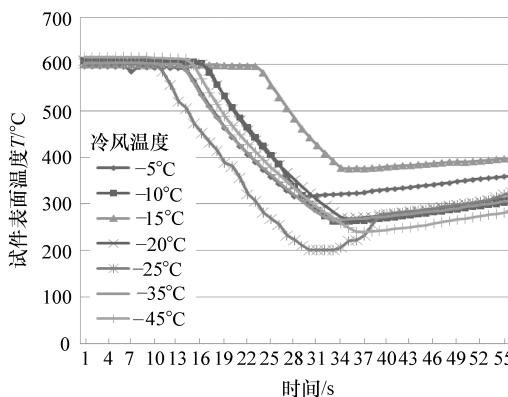


图 6-11 600℃时 45 钢在不同温度冷风冷却下的冷却效果

表 6-7 45 钢 350℃时随不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
350	-5	90.8
350	-10	105.5
350	-15	116.5
350	-25	118.9
350	-35	127.9

表 6-8 45 钢 600℃时随不同冷风温度冷却后的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	冷却后试件表面最低温度/℃
600	-5	315.5
600	-10	262
600	-15	375.4
600	-20	268.8
600	-25	201.3
600	-35	264.4
600	-45	239.3

3. 汽化能力

前述亚干切削涵义中有一个最小润滑（满足最基本润滑条件），最大冷却（有限的冷却介质达到最大的冷却效果）问题，前者指满足最基本润滑条件的润滑介质的量是多少？后者指什么条件下有限的冷却介质才能全部被沸腾汽化达到最大的冷却效果。为了探索亚干式不同冷却条件下冷却介质如何能够充分有效的发挥冷却作用，引入了“汽化能力”，即定义为某种材料处于某一温度时，单位时间将液态冷却润滑介质转化为气态的能力。

为了验证汽化能力进行了如下实验：

(1) 试件温度在 250℃ 及以下的情况 试验取纯水（纯水的量从 0.0102 ~ 0.526mL/s 之间取代号分别为 w_1 、 w_2 、 w_3 、…、 w_{12} ），在常温(20℃)下进行，在试验中固定靶距、气压（固定了气压就固定了气流量）、冷风温度，各参数的选取见表 6-9。

表 6-9 试验参数的选取

试件材料	钛合金 Ti6Al4V	气压/MPa	0.4
试件端面温度/℃	100、150、200、250	靶距/mm	35
冷风的温度/℃	20	喷射角/(°)	90
水流量	w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、…、 w_{12}		

试验在钛合金试件端面热电偶测量到的温度分别为 100℃、150℃、200℃、250℃ 时周期添加不同水的剂量，实施雾化、气体射流或水射流冷却瞬态实验采集到的数据如图 6-12 ~ 图 6-19 所示。

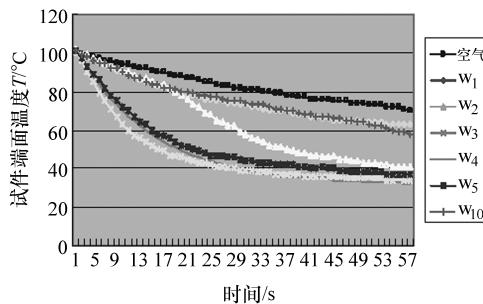


图 6-12 试件端面温度为 100℃ 时不同水剂量雾化冷却效果比较

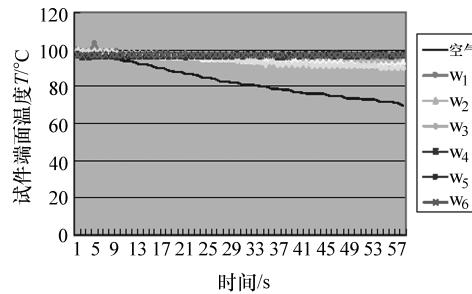


图 6-13 试件端面温度为 100℃ 时不同纯水量或纯气冷却效果比较

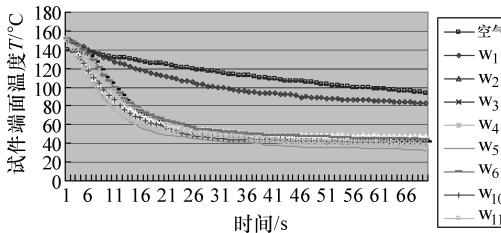


图 6-14 试件端面温度为 150℃ 时不同水剂量雾化冷却效果比较

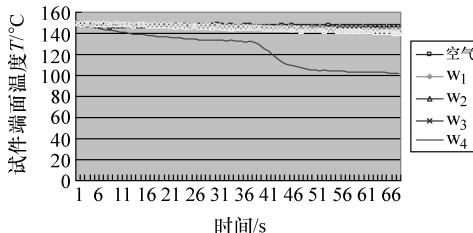


图 6-15 试件端面温度为 150℃ 时不同纯水量或纯气冷却效果比较

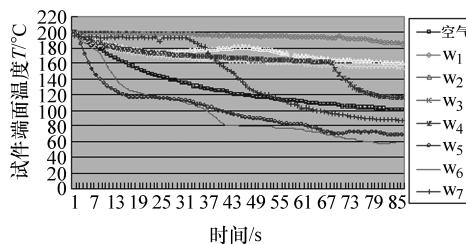


图 6-16 试件端面温度为 200℃ 时不同水剂量雾化冷却效果比较

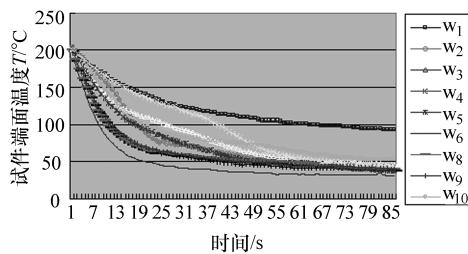


图 6-17 试件端面温度为 200℃ 时不同纯水量或纯气冷却效果比较

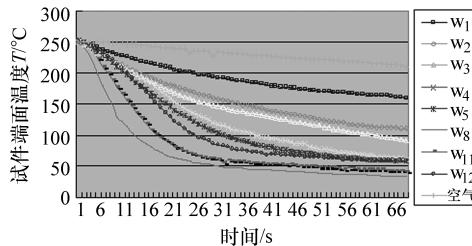


图 6-18 试件端面温度为 250℃ 时不同水剂量雾化冷却效果比较

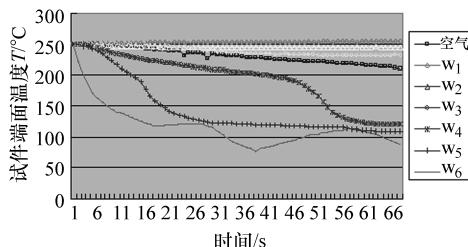


图 6-19 试件端面温度为 250℃ 时不同纯水量或纯气冷却效果比较

在试件端面热电偶测量到的温度分别为 100℃、150℃、200℃、250℃ 时分别实施空气射流冷却瞬态实验采集到的数据构成如图 6-20 所示。

在试件端面热电偶测量到的温度分别为 100℃、150℃、200℃、250℃ 时周期添加不同水的剂量，实施雾化、空气射流或水射流冷却稳

态实验采集到各组实验数据的温度最低值构成如图 6-21 所示。

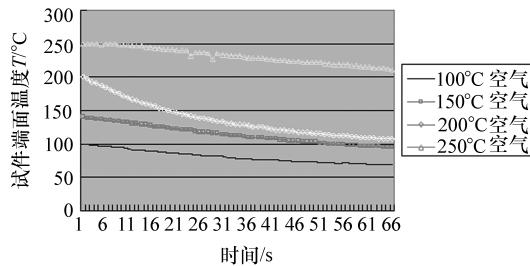


图 6-20 试件端面不同温度纯气体射流冷却效果比较

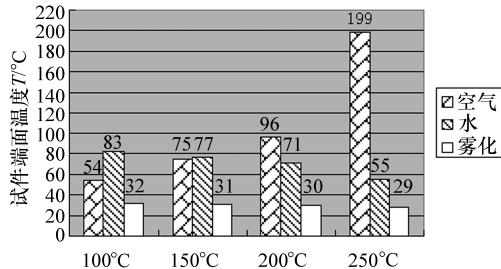


图 6-21 试件端面不同温度时风、水、雾化冷却实验温度最低值比较

由图 6-12、图 6-14、图 6-16、图 6-19 说明，每幅图上都有一条温度最低线，它们分别对应 w_4 、 w_5 、 w_6 、 w_8 线。由实验条件中含水量定义可知：随着试件温度的提高，雾化冷却中得到温度最低线时水的剂量在增加，但在试件每个不同实验温度区进行雾化冷却时，水的剂量并非总是多比少好。如图 6-12 上 w_5 、 w_{10} 线，图 6-14 上 w_6 、 w_{10} 、 w_{11} 线，图 6-16 上 w_8 、 w_9 、 w_{10} 线，图 6-18 上 w_{11} 、 w_{12} 线都比 w_4 、 w_5 、 w_6 、 w_8 线实验时水的剂量多，其余图线则比上述图线水的剂量少，但都不是被冷却温度的最低线。用传热学的理论进行分析，实验试件在每个实验温度区，使雾化冷却中的液体发生相变换热的剂量是不一样的，其既要达到其全部发生相变换热，又要使其全部发生相变换热时液体剂量最多，就要找到雾化冷却时相应微量水的最佳值域，而这个值域也必须同其材料所在温度相应的“汽化能力”相适应；显然， w_4 、 w_5 、 w_6 、 w_8 线实验时水的剂量就是本实验所在条件雾化冷却时相应微量水

的最佳值域。

图6-13、图6-15、图6-17、图6-19的每幅图上也都有一条温度最低线，这说明了水射流冷却也有一个与其材料的每个温度区的换热能力相适应的问题。由上述图示可见：其温度最低线与雾化冷却时相应温度最低线的温度高了许多，这说明了水射流冷却效果不如雾化冷却，也说明传统切削液浇注冷却其冷却效果不如雾化冷却；其次随着试件温度的提高，试件被水射流瞬态冷却降低了的温度值反而增大。如：试件温度100℃时，被水射流瞬态冷却降低了的温度值是11℃；试件温度150℃时，被水射流瞬态冷却降低了的温度值是48℃；试件温度200℃时，被水射流瞬态冷却降低了的温度值是129℃。这是因为同样的水剂量落在温度低的试件端面一般不会发生或发生较少的相变换热，而随着试件温度的提高，试件表面的热量亦增加，同样的水剂量落在温度高的试件端面上不仅发生相变，而且发生相变换热的水量会上升，从而会带走试件端面更多的热量，使其温度降得快、降低得多。

另一方面雾化时水以雾滴的形式落在试件的热端，每个微小的试件端面面积上瞬间接触的液滴非常微小，能即时发生相变换热，未发生相变而余下的水滴又会被气吹走，使之不能结膜，从而保证下一个雾滴再被汽化，形成周而复始换热的良性循环。而水射流时水柱较为集中地冲刷试件，每个微小的试件端面面积上瞬间接触的不仅水量多，而且不能即时地全部发生相变换热；未发生相变而余下的水虽被冲走，但同时又接触新的水流，水流来不及发生相变又易结膜妨碍新的汽化发生，只有当具有冲破膜层的能量时试件端面才会发生新的汽化换热，这显然不如雾化冷却时相变换热的良性循环好。因而水射流冷却的效果不如雾化冷却。其本质是材料在实验温度时，试件的“汽化能力”没有能够得到充分发挥或利用。

气体射流冷却方法因强化了试件表面的对流换热其冷却效果优于一般的散热方法，但显然远不如相变换热。如在图6-12~图6-20中，在试件端面温度较低时，因为前述低温时试件端面一般不会发生或发生较少的相变换热，又因易结膜妨碍新的汽化发生和水射流速度低等原因，此时的水射流冷却效果低于气体射流冷却效果。而当试件端面温度高时，冲破膜层的能量增长，水射流中发生相变换热的水量急剧

增加，其冷却试件端面温度的能力提高，此时水射流冷却效果优于一般气体射流冷却。同样气体射流冷却效果优于实验中少数雾化冷却曲线，也是因为这些雾化冷却实验点的水太少，不能满足试件材料端面相应温度的“汽化能力”需要，或试件端面温度低，相应的“汽化能力”弱得低于气体射流冷却效果的原因。

由图 6-20、图 6-21 可见，试件端面温度较低时其气体射流冷却效果可以达到试件端面自身温度的 $1/2$ 左右，当试件端面温度比较高时其气体射流冷却效果仅为试件端面自身温度的 $1/5$ 左右，到了试件端面 200°C 时水射流冷却就优于气体射流冷却的效果。

图 6-12 ~ 图 6-21 综合表明：

1) 材料每个实验温度区的最佳雾化冷却效果是不一样的，只有当充分发挥材料相应温度的“汽化能力”时，雾化冷却试件端面的效果才能优于其相应的水射流和气体射流冷却方法。

2) 温度较低时，气体射流冷却效果优于水射流冷却；反之水射流对其冷却效果优于气体射流冷却。换言之：当切削区的温度较低时，使用气体射流冷却效果比水射流冷却好；当切削区的温度较高时，由于冲破膜层的能量增长、水射流中发生相变换热的水量急剧增加，其冷却温度的能力提高，此时水射流冷却效果优于一般的气体射流冷却。

(2) 试件温度在 250°C 以上的情况 采用图 6-22 所示的实验装置，额定气体压力 $p = 0.2\text{ MPa}$ 、靶距 $h = 25\text{ mm}$ ，选用型号为 LZB-3WB、量程范围为 $2.5 \sim 25\text{ mL/min}$ 的流量计计量水流量，采用 AT89C55 单片机作为核心，完成温度值设定、系统控制、显示等功能，如图 6-23 所示。

1) 镍基合金喷雾冷却

由表 6-10 ~ 表 6-12 和图 6-24 ~ 图 6-26 表明，镍基合金喷雾冷却时，在低温 300°C 时冷却效果最佳时的水流量是 2 mL/min ，降温幅值为 48.6%； 500°C 冷却效果最好时的水流量是 4 mL/min ，降温幅值为 71%；高温 650°C 冷却效果最好时的水流量为 6 mL/min ，此时降温幅值为 69%。随着试件温度的升高，达到冷却效果最好时的水流量也随之增加；并不是水流量越大，降温效果就越好，在达到最佳冷却效果后，水流量越大降温幅值反而变小。

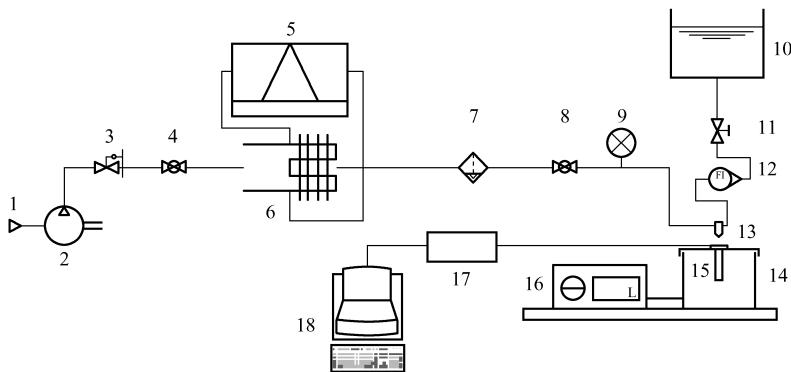


图 6-22 喷雾冷却发生系统原理图

1—能量源 2—空气压缩机 3—减压阀 4—球阀 5—制冷器
 6—冷凝器 7—空气疏水器 8—球阀 9—压力表 10—水箱
 11—截止阀 12—转子流量计 13—喷嘴 14—加热炉 15—试件
 16—炉温控制仪 17—温度信号采集与测试系统 18—终端显示

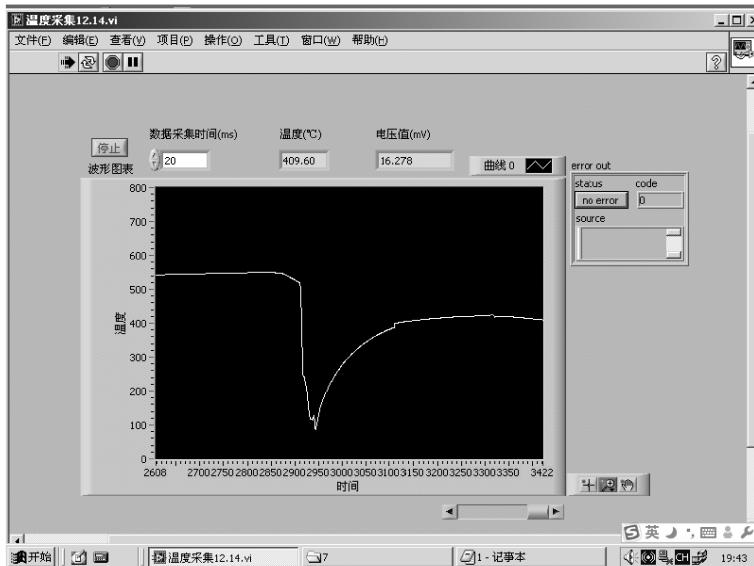


图 6-23 试件表面温度采集界面

表 6-10 镍基合金 300℃喷雾冷却时改变水流量时的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	水流量/ (mL/min)	冷却后试件表面最低温度/℃
300	-25	0.6	215.8
	-25	0.8	159.3
	-25	2	154.1
	-25	3	163.1
	-25	4	173.2

表 6-11 镍基合金 500℃喷雾冷却实验时改变水流量时的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	水流量/ (mL/min)	冷却后试件表面最低温度/℃
500	-25	0.8	247.1
	-25	2	191.3
	-25	3	208.1
	-25	4	145
	-25	5	229.2

表 6-12 镍基合金 650℃喷雾冷却实验时改变水流量时的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	水流量/ (mL/min)	冷却后试件表面最低温度/℃
650	-25	0.8	362.8
	-25	2	284.1
	-25	3	309.2
	-25	4	374.4
	-25	5	310.6
	-25	6	201.8
	-25	7	222.4
	-25	8	346.1

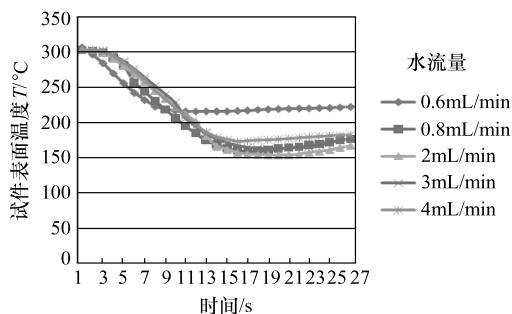


图 6-24 镍基合金 300℃ 喷雾冷却时随不同的水流量时的冷却效果

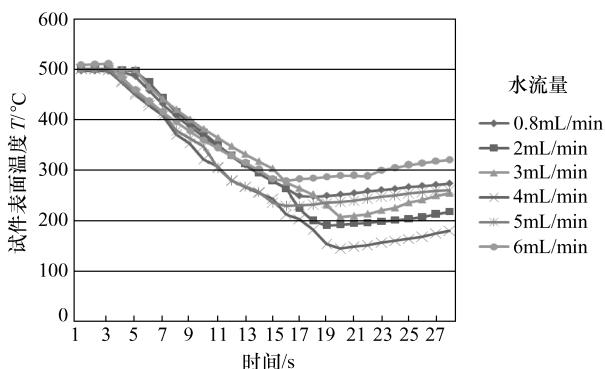


图 6-25 镍基合金 500℃ 喷雾冷却时随不同的水流量时的冷却效果

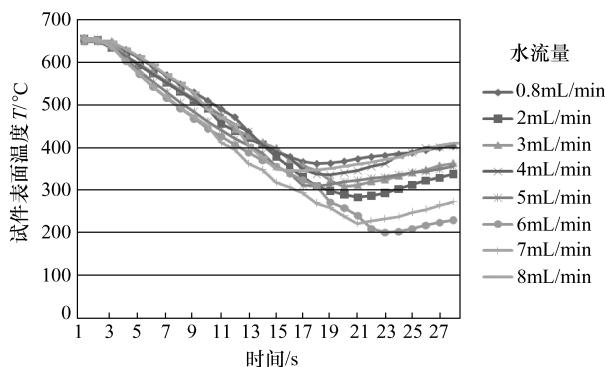


图 6-26 镍基合金 650℃ 喷雾冷却时随不同的水流量时的冷却效果

2) 45 钢喷雾冷却

由表 6-13 ~ 表 6-15 和图 6-27 ~ 图 6-29 表明, 45 钢在喷雾冷却时, 300℃ 时冷却效果最佳时的水流量是 0.8mL/min, 降温幅值为 90.4%; 500℃ 时冷却效果最好的水流量为 3mL/min, 降温幅值为 82.4%; 650℃ 时冷却效果最好的水流量是 6mL/min, 降温幅值为 88.4%。一定的范围内随着水流量的增加, 冷却效果越来越好, 但过了最佳冷却水流量后, 随着水流量的增加, 冷却效果反而变差。

表 6-13 45 钢 300℃ 喷雾冷却实验时随不同的水流量时的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	水流量/ (mL/min)	冷却后试件表面最低温度/℃
300	-25	0.6	42.4
	-25	0.8	28.8
	-25	2	34.6
	-25	3	37
	-25	4	39.5

表 6-14 45 钢 500℃ 喷雾冷却实验时随不同的水流量时的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	水流量/ (mL/min)	冷却后试件表面最低温度 (℃)
500	-25	2	100.3
	-25	3	87.9
	-25	4	103
	-25	5	97.2

表 6-15 45 钢 650℃ 喷雾冷却实验时随不同的水流量时的试件表面温度

试件温度/℃	冷风温度/℃	水流量/ (mL/min)	冷却后试件表面最低温度/℃
650	-25	2	119.7
	-25	3	114.1
	-25	5	107.1
	-25	6	75.1
	-25	7	131.5
	-25	8	120.1

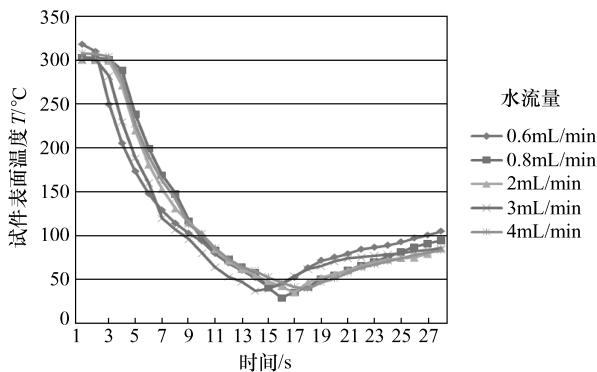


图 6-27 45 钢 300℃ 喷雾冷却时随不同的水流量时的冷却效果

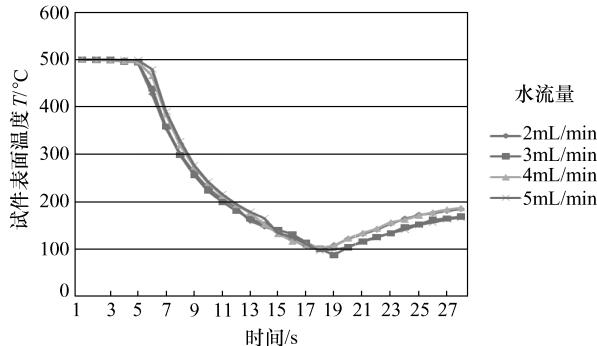


图 6-28 45 钢 500℃ 喷雾冷却时随不同水流量时的冷却效果

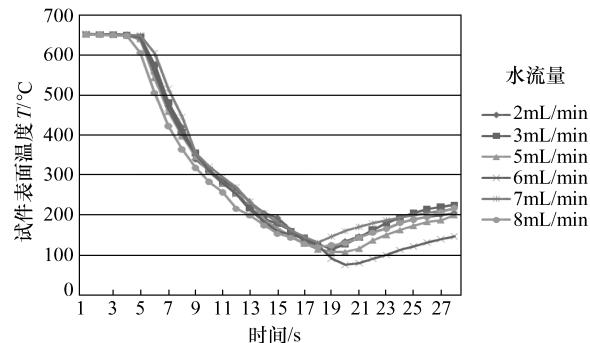


图 6-29 45 钢 650℃ 喷雾冷却时随不同水流量时的冷却效果

依据实验，同样得到纯铜、钛合金喷雾冷却效果最佳时的水流量。

实验表明：某种材料处于某一温度时，单位时间将液态冷却润滑介质转化为气态的能力——“汽化能力”的存在，掌握这个规律有利于亚干式不同冷却条件下冷却介质能够充分有效地发挥冷却作用。

4. 喷射压力、靶距等工艺参数优化

必须指出实施亚干切削对刀具、工艺条件、工艺参数的要求不是彼此孤立的，在实际亚干切削中要根据工件图样给出的技术要求、工件材料本身的信息和工艺现场条件，在正确把握亚干切削基本原理的基础上，对各种条件进行合适的试验、优化，才能保证亚干切削加工更好的实现。

亚干切削中的工艺参数、切削用量是一些非常活跃的因素，它们与被加工工件材料有着密不可分的关系，工艺参数、切削用量、加工方式的优化能使亚干切削更容易实现。

针对镍基高温合金 GH4169 材料，搭建一个 5 个 4 水平因素的正交试验平台。表 6-16 和表 6-17 为根据正交试验表列出的实验的具体参数和实验操作表。应用 GeniDAQ 软件捕捉冷却曲线 $\theta_w - \tau$ ，通过观察曲线，可直观分析冷却效果。试验中，GeniDAQ 的捕捉频率 20ms/次，图 6-30 试件表面温度下降曲线示例，表 6-18 为雾化冷却实验结果的数据统计。

表 6-16 试验原始数据示意表

因素 水平 斜线	气体压力	喷口温度	水流量	试件表面 温度	靶距
1	A1	B1	C1	D1	E1
2	A2	B2	C2	D2	E2
3	A3	B3	C3	D3	E3
4	A4	B4	C4	D4	E4

表 6-17 实验操作表

序号 \ 因素	气体压力 /kPa	喷口温度 $T_1/^\circ\text{C}$	水流量 $Q/(\text{mL/s})$	试件表面温度 $T_2/^\circ\text{C}$	靶距 L/mm
1	150	5	5	100	15
2	150	0	10	200	20
3	150	-5	15	250	25
4	150	-15	20	300	30
5	200	5	10	250	30
6	200	0	5	300	25
7	200	-5	20	100	20
8	200	-15	15	200	15
9	300	5	15	300	20
10	300	0	20	250	15
11	300	-5	5	200	30
12	300	-15	10	100	25
13	400	5	20	200	25
14	400	0	15	100	30
15	400	-5	10	300	15
16	400	-15	5	250	20

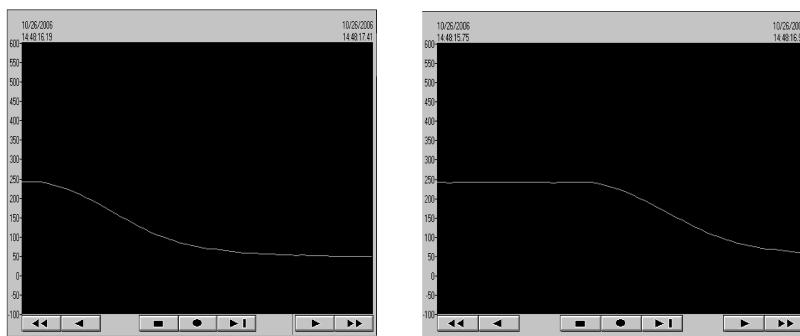


图 6-30 试件表面温度下降曲线示例

表 6-18 雾化冷却实验结果数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
试件表面温度/℃	100	200	250	300	250	300	100	200
冷却后温度值/℃	18	54	44	30	44	21	27	29
降温值/℃	82	146	206	270	206	279	73	171
降温幅度 (%)	82	73	82.4	90	82.4	93	73	85.5
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
试件表面温度/℃	300	250	200	100	200	100	300	250
冷却后温度值/℃	27	57	51	28	62	37	33	63
降温值/℃	273	193	149	72	138	63	267	187
降温幅度 (%)	91	77.2	74.5	72	69	63	89	74.8

16 组试验中降温幅度变化曲线如图 6-31 所示，从这条曲线中，我们可以清楚地看出降温效果最好的是第 6 组实验，最差的是第 14 组。

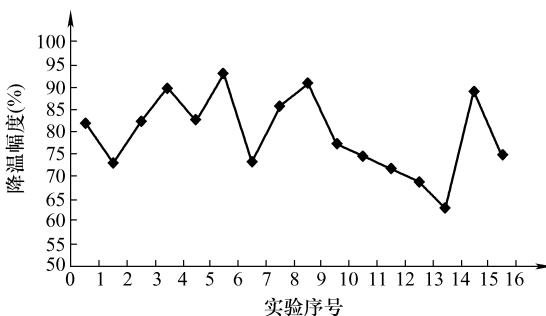


图 6-31 实验降温幅度变化曲线

降温幅度随试件表面温度的变化而变化的曲线如图 6-32 所示。从图 6-32 中看出，当试件表面温度为 300℃ 时，降温效果最好，即降温幅

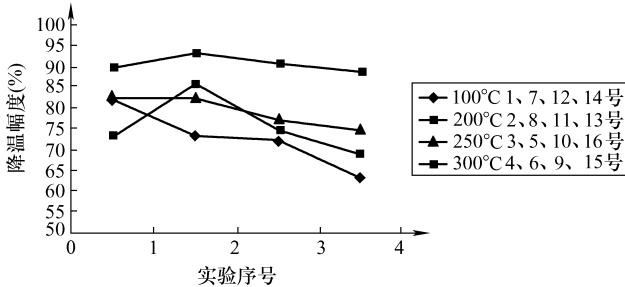


图 6-32 试件表面温度变化时降温幅度曲线

度最大；当试件表面温度为100℃时，降温效果最差，即降温幅度最小；当试件表面温度分别为100℃、200℃、250℃和300℃时，降温效果最好的实验组分别为1、8、5（和3）、6号。

采用正交试验分析方法中的直观分析法进行分析。为了便于分析计算，把降温幅度列在正交表的右边，做成新表6-19。

表6-19 试验数据分析表

试验号 \ 因素	1 (A)	2 (B)	3 (C)	4 (D)	5 (E)	降温幅度 (%)
1	1	1	1	1	1	82
2	1	2	2	2	2	73
3	1	3	3	3	3	82.4
4	1	4	4	4	4	90
5	2	1	2	3	4	82.4
6	2	2	1	4	3	93
7	2	3	4	1	2	73
8	2	4	3	2	1	85.5
9	3	1	3	4	2	91
10	3	2	4	3	1	77.2
11	3	3	1	2	4	74.5
12	3	4	2	1	3	72
13	4	1	4	2	3	69
14	4	2	3	1	4	63
15	4	3	2	4	1	89
16	4	4	1	3	2	74.8
T_1	327.4	324.4	324.3	290	333.7	
T_2	333.9	306.2	316.4	302	311.8	
T_3	314.7	318.9	321.9	316.8	316.4	
T_4	295.8	322.3	309.2	363	309.9	
$t_1 = (T_1/4)$	81.9	81.1	81.1	72.5	83.4	
$t_2 = (T_2/4)$	83.5	76.6	79.1	75.5	78.0	
$t_3 = (T_3/4)$	78.7	79.7	80.5	79.2	79.1	
$t_4 = (T_4/4)$	74.0	80.6	77.3	90.8	77.5	
极差	9.5	4.5	3.8	18.3	5.9	
优方案	A ₂	B ₁	C ₁	D ₄	E ₁	

经分析表明：各因素对试验指标（降温幅度）的影响按大小次序来说应该是 D（试件表面温度）、A（气体压力）、E（靶距）、B（喷口温度）、C（水流量），最好的方案应当是 $D_4 A_2 E_1 B_1 C_1$ ，即

D_4 ：试件表面温度，第 4 水平， 300°C ；

A_2 ：气体压力，第 2 水平， 200kPa ；

E_1 ：靶距，第 1 水平， 15mm ；

B_1 ：喷口温度，第 1 水平， 5°C ；

C_1 ：水流量，第 1 水平， 5mL/s 。

最好方案在已经做过的 16 次试验中并没有出现，与它比较接近的是第 6 号试验，在第 6 号试验中有三个因素处在最好水平，只有对试验指标影响不大的两个因素不在最好水平，从实际做出的结果看出第 6 号试验中的降温幅度为 93%，是 16 次试验中效果最好的，这也说明我们找出的最好方案是符合实际的。

按 $D_4 A_2 E_1 B_1 C_1$ 方案又一次试验的结果是降温幅度为 94.5%，超过前述 16 次试验。

涉及气体压力、喷口温度、水流量、试件表面温度和靶距五个亚干切削冷却参数的优化可以有助于亚干切削水平的提高，但每一次优化结果只能针对优化时的工艺环境，五因素是材料、材料所处温度等极为敏感的工艺参数，在亚干切削实际加工中，本次试验结果能起到一定的指导作用。

6.2 亚干切削加工的应用

研究亚干切削加工技术是从与其他切削冷却方法的比较开始的，通过比较能更好地认识、应用和研究亚干切削加工技术。

6.2.1 亚干切削与冷风冷却的冷却效果比较

应用 6.1.2 节中汽化能力平台和实验结果，经整理得图 6-33、图 6-34。

由图 6-33、图 6-34 分析表明：无论是低温还是高温，针对四种材料喷雾冷却的冷却效果基本都是优于冷风冷却；虽然低温时镍基合金的冷风冷却效果好于喷雾冷却，但高温时镍基合金的喷雾冷却效果远

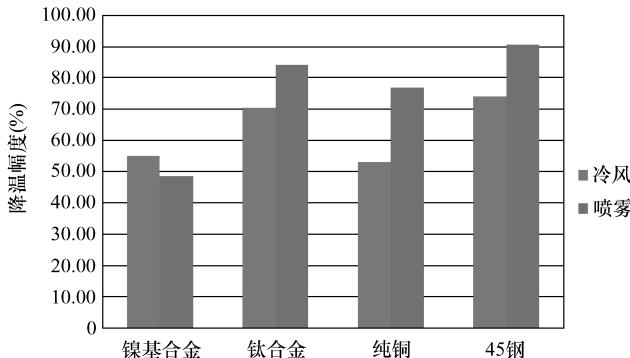


图 6-33 低温时四种材料的冷风冷却和喷雾冷却降温效果对比

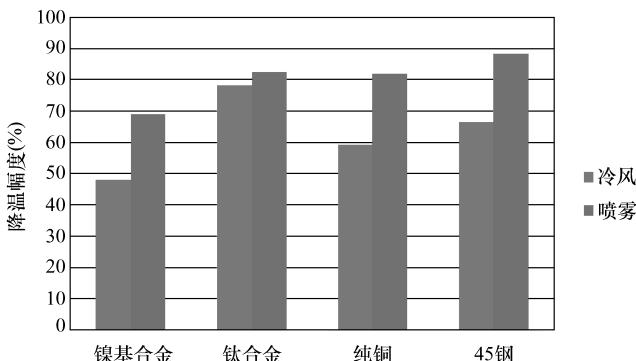


图 6-34 高温时四种材料的冷风冷却和喷雾冷却降温效果

远优于冷风冷却。比较图 6-33 和图 6-34 很明显看出，镍基合金的降温幅值最小，说明该材料的难加工性。

6.2.2 亚干切削与有关冷却方法的切削力、切削热比较

建造一个有效的低温气体冷却系统，如图 6-35 所示。图 6-36 为作者采用水基切削液、自然环境（自然冷却）和低温风（-15℃）三种冷却条件下，以 $49\text{m}/\text{min}$ 、 $f=0.15\text{mm}/\text{r}$ 的工艺参数切削轴承钢，得到

不同冷却方法切削力对比曲线。由图可见：自然冷却切削时切削力最大，风冷次之，水基浇注冷却最小；随着切削深度加大，切削力上升，气体冷却曲线有向浇注冷却曲线靠近的趋势，且都远离自然冷却曲线，说明随着切削力在一定范围内增大，冷风冷却降低切削力的效果会相对更好些。

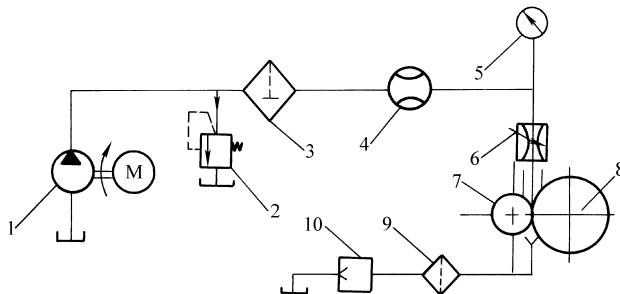


图 6-35 射流冷却系统原理图

1—空气压缩机 2—安全阀 3—主过滤器 4—流量计 5—压力表
6—节流阀 7—工件 8—砂轮 9—过滤器 10—真空泵

图 6-37 是不同冷却方法，切削 45 钢，取 $a_p = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 0.2 \text{ mm/r}$

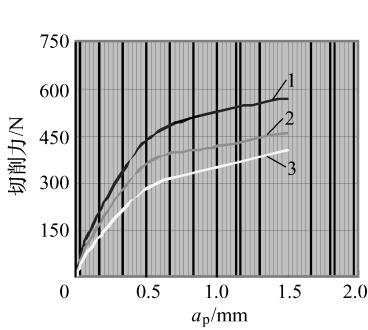


图 6-36 不同冷却
条件下切削力对比曲线
1—自然冷却 2—风冷（-15℃）
3—水基切削液

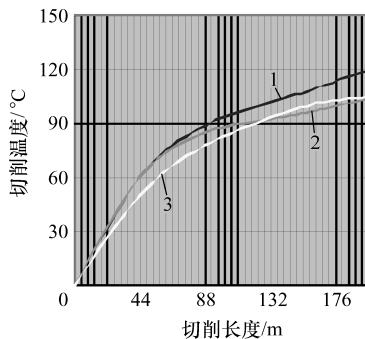


图 6-37 不同冷却
条件下切削温度比较
1—自然冷却 2—风冷（-20℃）
3—水基切削液

时切削热对比曲线。由图所知：风冷的冷却效果初期好于水基切削液的冷却效果，随着切削热的增高，风冷的冷却效果在一定条件下低于水基切削液的冷却效果。实验表明：低温风冷却在一定区间能取得良好的冷却效果，但随着切削热增大，其效果将不及水基切削液的冷却效果。该结论与 6.1.3 节中“汽化能力”的研究结果趋于一致。

6.2.3 亚干切削与有关冷却方法的加工精度和表面质量比较

1. 切削过程稳定性比较

采用 6.2.2 节中车削实验系统，取：以相同切削条件下（工件材料为 Cr12， $v = 52\text{m/min}$ ， $f = 0.2\text{mm/r}$ ， $a_p = 1\text{mm}$ ），用风冷（ -12°C ）和亚干方式切削时，沿切削长度方向切削力的比较如图 6-38 所示。由图 6-38 可见：随着切削长度的增加，亚干式方式切削情况下的切削力增加的很缓慢，曲线较平坦；明显优于风冷切削情况下切削力曲线随切削长度增加上升较快的状况；说明亚干式切削不仅比冷风冷却切削状况好。而且切削过程平稳性好，被加工零件的尺寸一致性好，综合效果优于用水基切削液、自然冷却和低温风（ -12°C ）冷却切削时的情况。

2. 被加工件表面粗糙度值 R_a 的比较

采用 6.2.2 节中车削实验系统，以亚干式、自然冷却、浇注冷却（本试验使用 1:5 的水基 1# 金属乳化切削液）方式相比较，试验条件：用 CA6140 机床，测力仪（Y6D-3A）、自制工件—刀具热电偶、BCJ-2 型表面粗糙度检测仪；工件材料为 GCr12 轴承钢，58HRC；刀具为车用机夹刀片，德国产 SNMM120408-NR7 WAP30。取 $v = 76.4\text{m/min}$ ， $f = 0.2\text{m/r}$ ， $a_p = 1\text{mm}$ ；得表面粗糙度值 R_a 为纵坐标的试验结果如图 6-39 所示。

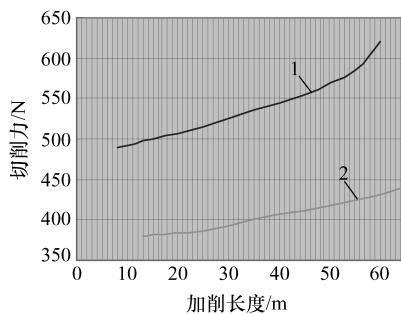
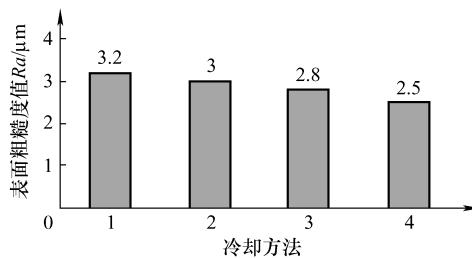


图 6-38 切削冷却方式与
切削过程稳定性关系
1—冷风冷却切削 2—亚干式切削

图 6-39 表面粗糙度值 R_a 与冷却方法关系图

1—自然冷却 2—14°C冷风射流冷却 3—亚干式方式 I 4—亚干式方式 II

图 6-39 说明，亚干式切削机件的表面粗糙度值小于风冷，而风冷又小于自然冷却；同样是亚干式切削，方式 I 仅仅改变了方式 II 的射流冷却入射区，就显著降低了 R_a 值；亚干式切削 II 较之自然冷却的 R_a 值下降 22%，说明冷却方法的冷却效果还必须通过适当的方式才能得到充分显示。

3. 被加工件尺寸精度值比较

当采用和切削过程表面粗糙度值 R_a 比较相同的工艺环境，取 $v = 76.4 \text{ m/min}$ ， $f = 0.2 \text{ mm/r}$ ， $a_p = 1 \text{ mm}$ ，以刀具的切削长度为横坐标，刀具磨损和尺寸精度相对于切削长度影响的斜率百分数为纵坐标，得图 6-40。

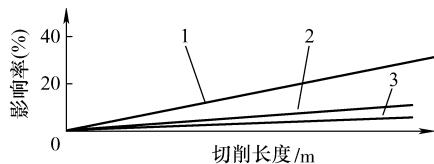


图 6-40 切削 GCr12 时不同冷却方法对刀具磨损和尺寸精度的影响

1—自然冷却 2—风冷 (-18°C) 3—亚干式方式 I

图 6-40 清楚地表明亚干式切削能更好地维护尺寸稳定性，亚干式切削时尺寸误差是自然冷却切削时尺寸误差的 5.5%；风冷切削时的尺寸误差是自然冷却切削时尺寸误差的 38%。经测量刀具磨损，在相同工艺条件下自然冷却刀具后角磨损值 $VB = 1.2 \text{ mm}$ ，风冷时刀具后角磨

损值 $VB = 0.42\text{mm}$ ，由此可见风冷、亚干式切削能延长刀具的使用寿命，维护被加工零件的尺寸稳定性，是精密加工理想的冷却方式。

6.2.4 水蒸气的冷却切削

水蒸气具有无污染、无危害、易回收及廉价等优点，是一种新型绿色切削润滑剂，为绿色切削技术提供了新的方法和途径。用压缩空气、水、乳化液、水蒸气作冷却润滑剂及干切条件下进行切削试验，图 6-41 是水蒸气发生器及供气系统原理图，压力在 $0.1 \sim 0.5\text{MPa}$ 之间调节，试验用 CA6140 普通车床，YT15 可转位车刀，试验材料为高温合金 GH4169、钛合金 TC4、不锈钢 Cr12，试件均为棒材， $v = 30 \sim 70\text{m/min}$ ， $f = 0.1 \sim 0.3\text{mm/r}$ ， $a_p = 0.5 \sim 2.5\text{mm}$ 。

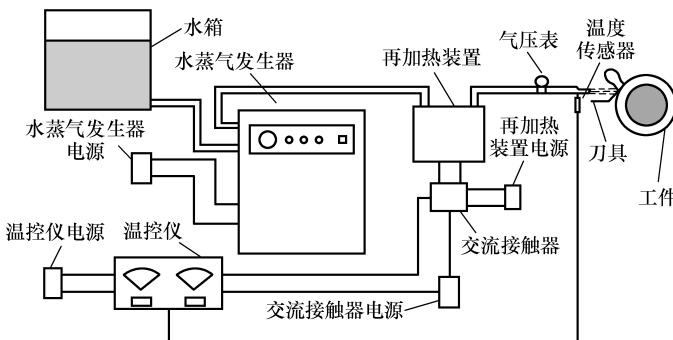


图 6-41 水蒸气发生器及供气系统原理图

1. 切削力试验

(1) 切削 GH4169 时的切削力试验结果 图 6-42 给出了当 $f = 0.2\text{mm/r}$, $v = 50\text{m/min}$ 时切削 GH4169 的主切削力 F_c 。

图 6-43 给出了当 $a_p = 1\text{mm}$, $v = 50\text{m/min}$ 时切削 GH4169 的主切削力 F_c 。

图 6-44 给出了当 $a_p = 1\text{mm}$, $f = 0.2\text{mm/r}$ 时切削 GH4169 的主切削力 F_c 。

(2) 切削 TC4 时的切削力试验结果 图 6-45 给出了当 $f = 0.2\text{mm/r}$, $v = 60\text{m/min}$ 时切削 TC4 的主切削力 F_c 。

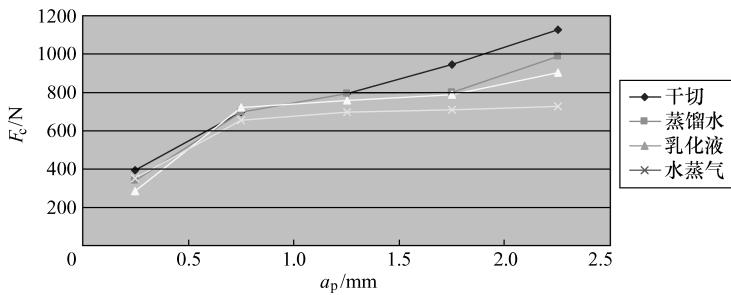
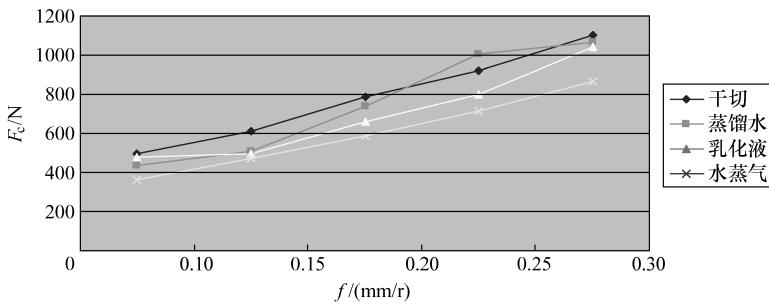
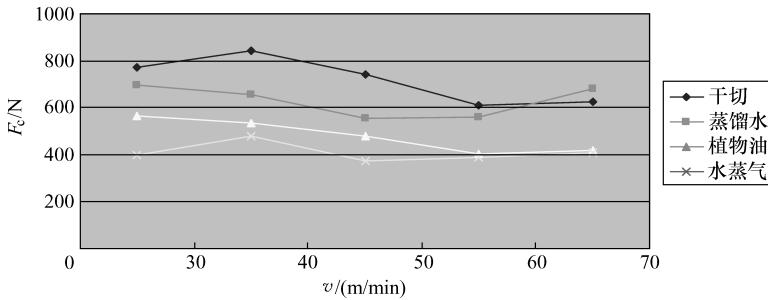
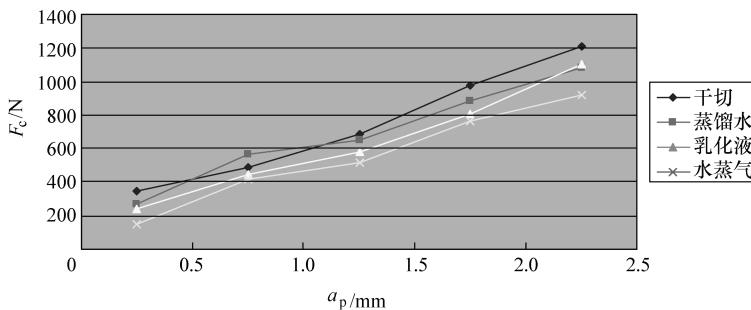
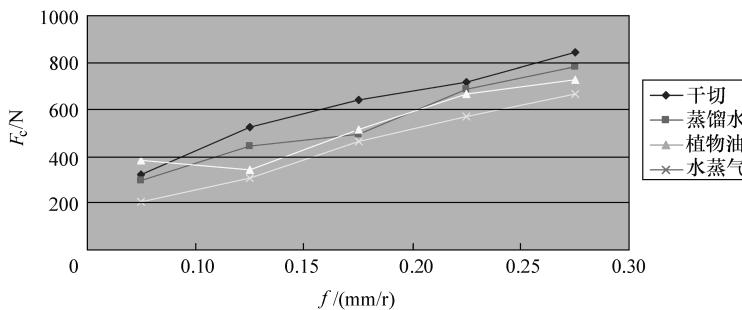
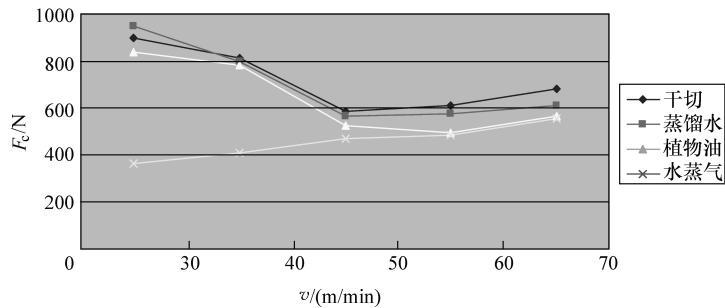
图 6-42 改变背吃刀量时切削 GH4169 的主切削力 F_c 图 6-43 改变进给量时切削 GH4169 的主切削力 F_c 图 6-44 改变切削速度时切削 GH4169 的主切削力 F_c

图 6-46 给出了当 $a_p = 1 \text{ mm}$, $v = 60 \text{ m/min}$ 时切削 TC4 的主切削力 F_c 。
 图 6-47 给出了当 $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.2 \text{ mm/r}$ 时切削 TC4 的主切削力 F_c 。

图 6-45 改变背吃刀量时切削 TC4 的主切削力 F_c 图 6-46 改变进给量时切削 TC4 的主切削力 F_c 图 6-47 改变切削速度时切削 TC4 的主切削力 F_c

(3) 切削 Cr12 时的切削力试验结果 图 6-48 给出了当 $f = 0.2 \text{ mm/r}$, $v = 70 \text{ m/min}$ 时切削 Cr12 的主切削力 F_c 。

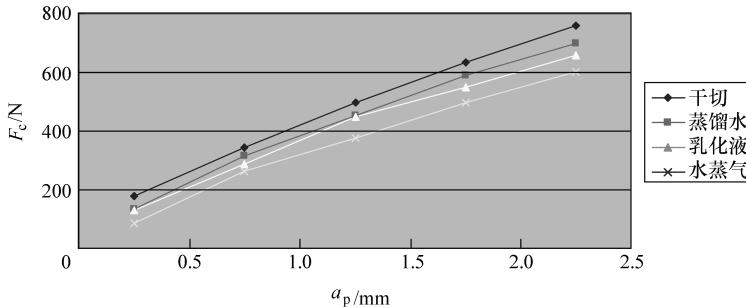
图 6-48 改变背吃刀量时切削 Cr12 的主切削力 F_c

图 6-49 给出了当 $a_p = 1\text{mm}$, $v = 70\text{m/min}$ 时切削 Cr12 的主切削力 F_c 。

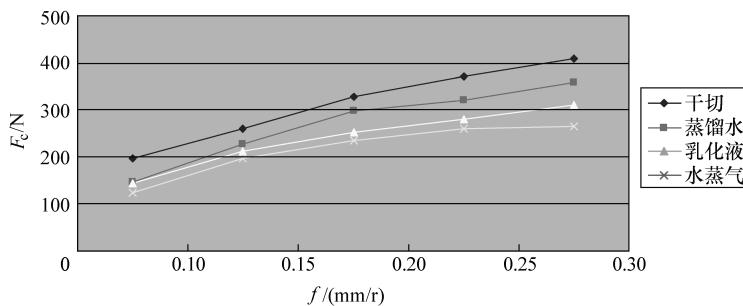
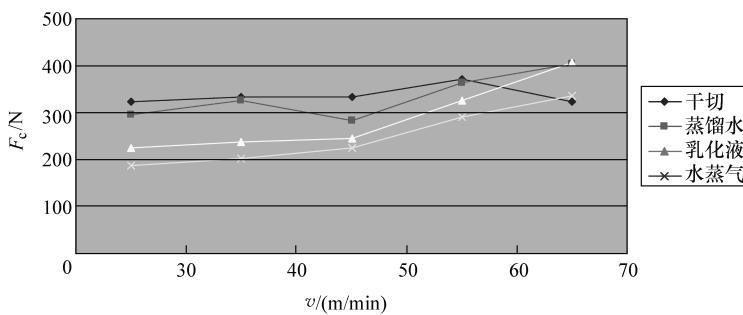
图 6-49 改变进给量时切削 Cr12 的主切削力 F_c

图 6-50 给出了当 $a_p = 1\text{mm}$, $f = 0.2\text{mm/r}$ 时切削 Cr12 的主切削力 F_c 。

图 6-50 改变切削速度时切削 Cr12 的主切削力 F_c

2. 切削温度试验

(1) 切削 GH4169 时的切削温度试验结果 图 6-51 给出了当 $f = 0.2 \text{ mm/r}$, $v = 50 \text{ m/min}$; 切削 GH4169 的切削温度 T 。

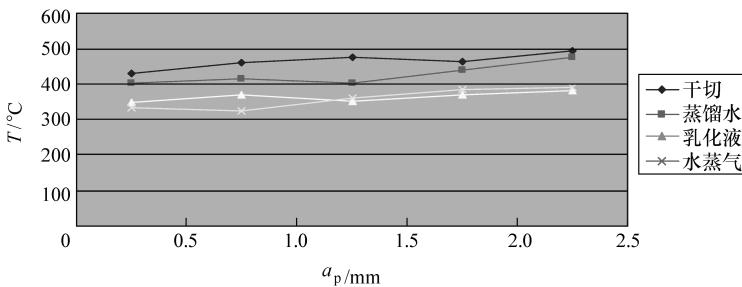


图 6-51 切削 GH4169 时的切削温度

(2) 切削 TC4 时的切削温度试验结果 图 6-52 给出了当 $f = 0.2 \text{ mm/r}$, $v = 60 \text{ m/min}$ 时, 切削 TC4 的切削温度 T 。

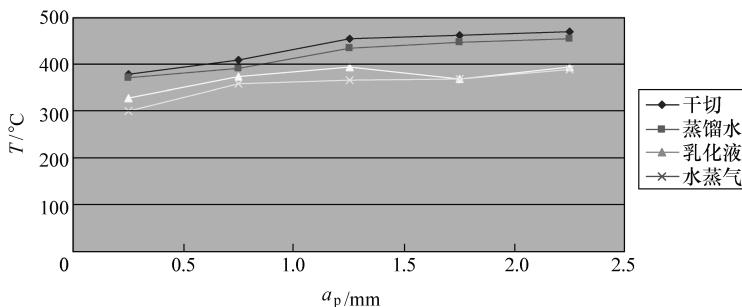


图 6-52 切削 TC4 时的切削温度

(3) 切削 Cr12 时的切削温度试验结果 图 6-53 给出了当 $f = 0.2 \text{ mm/r}$, $v = 70 \text{ m/min}$; $a_p = 1 \text{ mm}$ 时, 切削 Cr12 的切削温度 T 。

3. 切削力试验结果分析和讨论

(1) 切削 GH4169 图 6-42 ~ 图 6-44 表明, 用水蒸气作冷却润滑剂切削 GH4169 时, 改变背吃刀量时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 27%、26%、20%。改变进给量时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 27%、26%、25%；改变切削

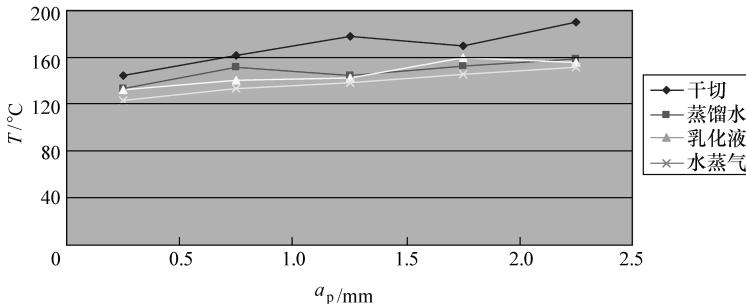


图 6-53 切削 Cr12 时的切削温度

速度时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 34%、29%、26%。

(2) 切削 TC4 图 6-45 ~ 图 6-47 表明，用水蒸气作冷却润滑剂切削 TC4 时，改变背吃刀量时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 28%、27%、26%；改变进给量时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 29%、24%、15%；改变切削速度时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 33%、27%、26%。

(3) 切削 Cr12 图 6-48 ~ 图 6-50 表明，用水蒸气作冷却润滑剂切削 Cr12 时，改变背吃刀量时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 28%、26%、18%；改变进给量时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 30%、19%、14%；改变切削速度时主切削力 F_c 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 34%、26%、14%。

4. 切削温度试验结果分析和讨论

(1) 切削 GH4169 图 6-51 表明，用水蒸气作冷却润滑剂切削 GH4169 时，改变背吃刀量时切削温度 T 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 16%、10%、7%。

(2) 切削 TC4 图 6-52 表明，用水蒸气作冷却润滑剂切削 TC4 时，改变背吃刀量时切削温度 T 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 12%、8%、4%。

(3) 切削 Cr12 图 6-53 表明，用水蒸气作冷却润滑剂切削 Cr12 时，改变背吃刀量时切削温度 T 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约

14%、5%、2%。

综合在不同切削参数和润滑条件下进行了硬质合金刀具 YG15 车削 GH4169、TC4 及 Cr12 的切削试验研究结果表明，水蒸气作冷却润滑剂时，主切削力 F_z 可比干切、蒸馏水及乳化液时分别减小约 30%、26% 及 22%；切削温度 T 比干切、蒸馏水及乳化液分别减少约 12%、6%、3%。说明水蒸气作冷却润滑剂切削 GH4169、TC4 和 Cr12 时，具有较好的冷却润滑作用。

6.3 亚干切削的进一步研究

绿色制造是一个综合考虑环境影响和资源消耗的现代制造模式，涉及产品整个生命周期，绿色制造实质上是人类社会可持续发展战略在现代制造业中的体现，它的宗旨是力争以最少的资源消耗，最低限度的环境污染，产生最大的社会、经济效益。而传统的制造业，以制造产品为目标，极少地考虑制造资源的优化配置，以及对包括操作者在内的环境污染。如何减少制造业的污染，实现清洁生产模式是现代生产对制造业的要求。由于 21 世纪我国资源和环境面临空前的严峻挑战，要求机械与制造科学比以往任何时候更重视制造资源的节省、环境的保护、产品的安全和绿色度等的基础研究。21 世纪的切削加工将向着高速、强力和高精度化方向发展，切削加工仍然是获得精密机械零件最重要的加工方法之一。因此，亚干切削技术的进一步研究有着重要的科学意义和社会价值。

6.3.1 亚干切削技术研究中若干问题的思考

- 1) 工艺因素、参数对冷却切削效果影响
 - ① 射流空气压力高低与切削效果的普遍规律。
 - ② 射流角度与切削效果的规律。
 - ③ 不同射流方向位置，即前、后、侧刀面等；不同刀具材料在不同温度冷风冷却切削时的切削性能。
- 2) 亚干切削在什么条件下效果好，机理尚须进一步研究。
- 3) 亚干冷却切削过程中不仅是冷却，还涉及摩擦、润滑、切屑变形及流向等其他问题。

- 4) 上述研究对不同材料、不同刀具材料等因素的普遍意义。
- 5) 沸腾汽化传热机理。
- 6) 高温摩擦机理、微塑性变形机理。
- 7) 高效冷却对工件表面质量、热处理作用问题。
- 8) 自适应、自主控制问题。

6.3.2 亚干切削对工件表面加工质量的影响

图 6-54、图 6-55 和图 6-56 是作者近期在绿色射流冷却实验及检测系统平台上所做的部分实验结果。图 6-54 是 45 钢试件的原始金相组织图；图 6-55 是 45 钢试件被加热到 750℃时，在含 5mL/min 水雾的亚干式冷却条件下，依据图 6-54 相同的方法测得试件的金相组织图。两图相比较，反映了经过亚干式冷却后试件金相组织的变化。图 6-56 是 45 钢试件被加热到 750℃后、分别在含 2mL/min、5mL/min、7mL/min 水雾的亚干式冷却条件下检测到试件的表面显微硬度比较图。这些实验结果表明：在亚干式冷却切削工艺过程中，切削区存在特殊热传导和小范围特殊热作用，它直接影响机械产品和零件的精度和表面质量。零件的精度和表面质量是国际竞争中取得成功的关键技术，许多国防工业、尖端技术产业、微机械电子工业产品对零件的表面加工质量都有明确的要求，必须予以正视，尤其是绿色高效冷却切削方法中条件改变对被加工件表面质量影响的定量研究。

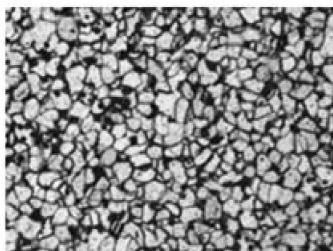


图 6-54 45 钢试件的
原始金相组织图

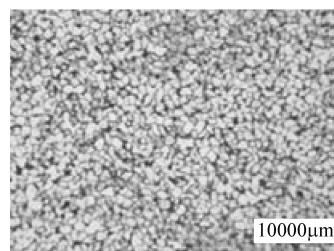


图 6-55 45 钢试件被加热到 750℃
时的亚干式下的金相组织图

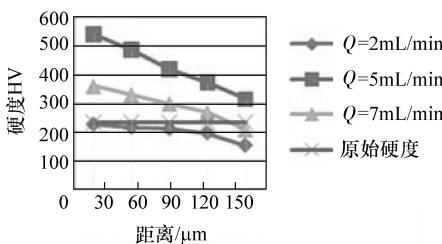


图 6-56 亚干式冷却条件下表面显微硬度比较图

6.3.3 亚干磨削的研究

磨削加工是一种利用磨料去除材料的高效、高精度的加工方法。在对零件的磨削加工过程中，由于磨粒的高速切削和滑擦，使磨削区产生非常高的温度，从而造成零件表面的烧伤并导致砂轮的严重磨损，结果使零件的精度和表面完整性恶化。传统磨削加工中通常浇注大量乳化液到磨削区以降低磨削温度，提高零件表面精度和完整性。磨削液在使用过程中及排出后影响操作工人的身体健康并对生态环境造成严重威胁。随着社会环保意识的增强，绿色磨削技术越来越引起研究人员的重视，由于亚干磨削工艺的困难，这方面的研究尚不多见，尤其需要加强，从而以较快的进程早日实现磨削中的绿色制造。

1. 亚干磨削的认识

由于磨削液会产生环境问题，但在磨削过程中，有时磨削液的作用是不可替代的，为此，人们把目标瞄准在尽量少用磨削液上，这种新的磨削技术就是亚干磨削技术。

亚干磨削就是在磨削过程中施加微量磨削液，并采取一定的工艺措施，使这些磨削液全部消耗在磨削区且大部分被蒸发掉，没有多余的磨削液污染环境。经常使用的射流冷却磨削加工方法就是一种亚干磨削。

相对于传统浇注切削液冷却磨削加工，射流冷却是一种比较经济的冷却方法。它把冷却介质直接强行送入磨削区集中使用，希望使用较少的冷却介质达到大量浇注的效果，从而也相对减少了对环境的污染程度。依照射流介质不同，分为液体射流、气体射流和混合射流三种。从与环境友好的角度来讲，气体射流冷却是一种比较好的冷却方

式。相对于干磨削，采用气体射流冷却，冷却效果更好。液体射流冷却，就是将磨削液以很高的速度喷向磨削区，将热量带走，同时达到润滑的目的，这种冷却方式对环境不是太好。气体射流和液体射流是目前使用最多的两种冷却方式。射流冷却系统原理如 6.2.2 节的图 6-35 所示。

选择一定压力的气体，通过控制开关、仪表等仪器设备将介质送到射流口，以一定的方式冲刷加工区，加强了磨削区与周围的热交换，改善了磨削区的散热条件。射流冷却，比其他冷却方法更能使冷却介质进入磨削区，冷却的针对性强，效果显著，而流量不一定很大。射流的冲刷作用使磨削时产生的磨屑粉末不易粘附在砂轮上，有利于加工质量的提高。

混合射流冷却是亚干方式的一种，就是以高压（ $0.1 \sim 0.39 \text{ MPa}$ ）空气使磨削液雾化，并以很高的速度喷向磨削区，经磨削区的高温作用，使磨削液雾化，吸收大量的磨削热，使磨削区的温度大幅度下降，这有利于加大磨削用量，提高生产效率。

雾化的质点颗粒吸附在金属表面上，形成了润滑膜，能起到一定的润滑作用。喷雾冷却喷出的介质具有一定压力，使磨屑易于排出，增强了排屑作用，避免了粘屑现象，也降低了清洗要求，有利于保证加工质量。更主要的是喷雾冷却的介质（通常为乳化液）消耗量很小，每小时仅消耗约 400g，就能起到很好的冷却效果。冷却介质几乎 100% 被汽化蒸发，可以保持干净整洁的工作环境，同时大大降低了处理费用。这种方法综合了气体（高速、渗透性好）和液体（汽化热高，可加各类添加剂）的优点，在磨削中取得了满意的效果。

此外，通过研制新型的喷嘴形式也可达到减少用液量的目的。如德国的阿亨（Aachen）工业大学开发出的一种新型喷嘴，商品名为“Shoe”，可在 0.15 MPa （过去需 0.3 MPa ）条件下供油 25 mL/min （过去为 200 L/min ），即可充分满足加工需要。Shoe 喷嘴如图 6-57 所示。

对被加工零件进行全面检查的结果

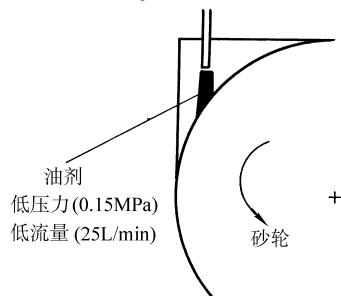


图 6-57 Shoe 喷嘴

表明，采用这种喷嘴对加工表面和材料组织状态无任何不良影响。由于减少了供油压力和油剂用量，可以有效抑制主轴电动机的无负载动力损失。避免了过去在高压大流量供油的情况下，由于磨削液的阻滞效应，使主轴电动机空耗掉许多动力的现象。

2. 加强亚干式磨削仿真研究

在磨削过程中，磨削产生的热量绝大部分传入试件中，从而引起试件表面温度升高，同时热源的移动使得磨削温度场处于动态变化过程中。结合相关磨削条件和冷却参数，通过有限元仿真往往比切削仿真困难，但磨削试验成本高，开展亚干式磨削仿真研究就显得更有意义。

根据有限元法和 ANSYS 热分析相关理论，并在此基础上建立了磨削温度场有限元模型。其中，边界条件包括试件的初始温度场、水蒸气的对流换热和移动热源的加载，移动热源的加载运用 ANSYS 中参数化设计语言 APDL 编写子程序得到。然后，对磨削温度场进行有限元计算得到磨削温度场的分布。运用 ANSYS 后处理器研究不同磨削参数对磨削温度场的影响以及磨削温度沿试件深度方向的分布。图 6-58、图 6-59 就是对 TC4 材料的磨削仿真得到的。图 6-58 显示试件温度分布以

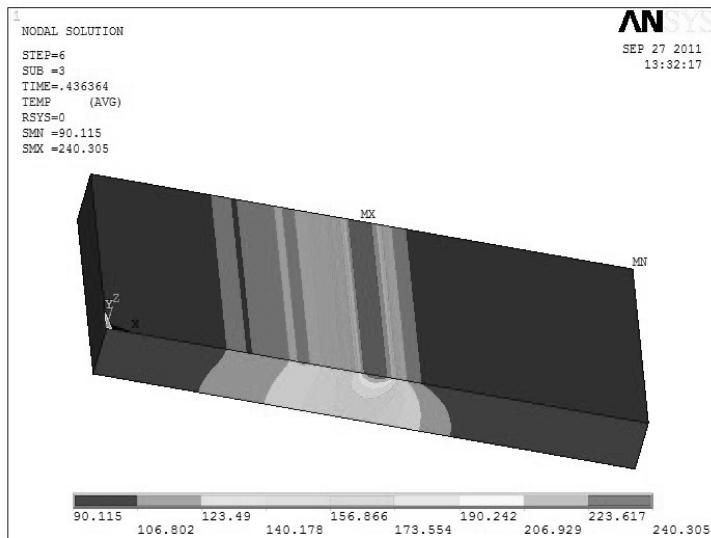


图 6-58 磨削温度场云纹图

及最高温度、最低温度及等温线分布情况。分析图 6-58 相关数据得到：水蒸气对磨削区强行射流能够迅速降低试件表面温度，换热效果非常明显。 $a_p = 0.015\text{mm}$, $v_w = 1.5\text{m/min}$ 时，水蒸气射流时磨削区最高温度为 240.3°C ，干磨削时磨削区最高温度为 754.5°C ，水蒸气冷却条件下磨削试件表面温度比干磨削时降低了 68.2%。

图 6-59 的基础条件是 $v_s = 26.38\text{m/s}$, $a_p = 0.015\text{mm}$, $v_w = 1.5\text{m/min}$ ，图 6-59 表明，磨削温度沿试件深度方向变化梯度较大，试件内部距离磨削表面 1mm ，温度却相差几十度甚至超过 100°C ，试件内部温度场呈不规则弧形分布。

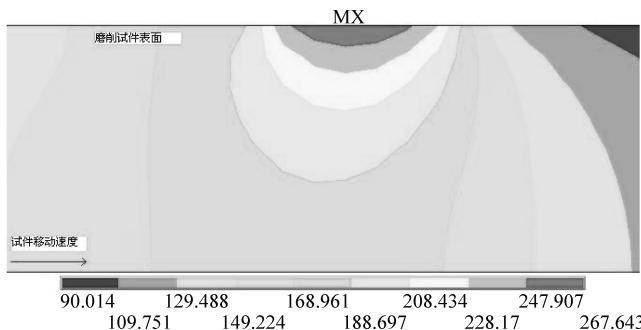


图 6-59 磨削深度方向温度分布

本仿真采用水蒸气的对流换热和移动热源的加载，仿真结果表明：

1) 水蒸气对磨削区强行射流能够迅速降低试件表面磨削温度，换热效果非常明显，一定磨削参数条件下水蒸气的冷却能够将磨削区温度控制在 400°C 以内，比干磨削降低了 50% 以上。

2) 磨削深度、试件速度、砂轮线速度的改变对磨削温度场均有一定影响。其中，磨削深度对磨削温度影响最大，试件速度次之，砂轮线速度最小。

3) 在磨削过程中，随着试件的移动，磨削温度的变化非常迅速，磨削温度降低几十度甚至 100°C 以上所用时间却不足 0.08s 。

4) 磨削温度沿 TC4 试件深度方向变化不大，试件内部距离磨削表面 1mm ，温度却相差几十度甚至超过 100°C 。

3. 加强亚干式磨削试验研究

试验选用：M7132H 型卧轴矩台平面磨床，白刚玉砂轮

(WA46LV35)，试件为长方体钛合金TC4 (Ti-6Al-4V)，尺寸为 $110\text{mm} \times 50\text{mm} \times 23\text{mm}$ ；靶距 $L = 25\text{mm}$ 、喷嘴与试件表面倾角 $\theta = 15^\circ$ ；冷却介质：水蒸气、喷雾、乳化液；冷却参数、水蒸气：喷嘴出口温度 $T_1 = 90^\circ\text{C}$ 、压力 $p_1 = 0.3\text{ MPa}$ 、流速 $v = 25\text{m/s}$ 、喷嘴直径 $\phi = 3\text{mm}$ ；喷雾：用自来水与冷风在喷嘴口混合形成雾状射流物对试件磨削表面进行射流冷却；喷嘴出口冷风温度 $T_2 = -15^\circ\text{C}$ 、压力 $p_2 = 0.3\text{ MPa}$ 、自来水流量为 60ml/min ；乳化液：温度 $T_3 = 20^\circ\text{C}$ ，体积分数为5%、流量为 3.6L/min ；镍铬-镍硅热电偶直接测量。

(1) 不同冷却介质对比

1) 改变磨削深度，其他磨削参数不变的条件下，研究不同冷却方式对磨削温度场的影响，磨削参数： $v_s = 26.38\text{m/s}$ ， $v_w = 1.5\text{m/min}$ ，如图6-60所示。

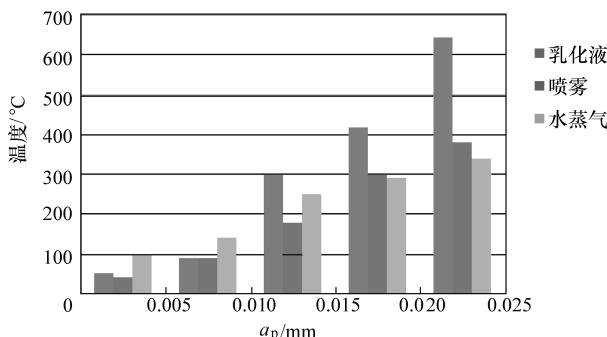


图 6-60 磨削深度对磨削温度的影响

图6-60说明，三种冷却方式在一定程度上均能降低试件表面磨削温度，无论采用哪种冷却方式，随着磨削深度的增加，试件表面磨削温度均随之升高。但水蒸气和喷雾冷却效果较好，乳化液冷却效果次之。当磨削深度 $a_p \leq 0.01\text{mm}$ 时，乳化液冷却效果较好，水蒸气和喷雾冷却效果次之；当 $0.01\text{mm} < a_p \leq 0.02\text{mm}$ 时，喷雾冷却效果最好，水蒸气次之，乳化液冷却效果较差；当 $0.02\text{mm} < a_p \leq 0.025\text{mm}$ 时，水蒸气冷却使得磨削区温度保持在 350°C 以内； $a_p = 0.025\text{mm}$ 时，水蒸气冷却条件下磨削温度和乳化液冷却相比下降了50%左右。因此，磨削深度较大时水蒸气的冲击换热效果较好。

2) 改变试件移动速度，其他磨削参数不变的条件下，研究不同冷

却方式对磨削温度场的影响，磨削参数： $v_s = 26.38 \text{ m/s}$ ， $a_p = 0.015 \text{ mm}$ ，如图 6-61 所示。

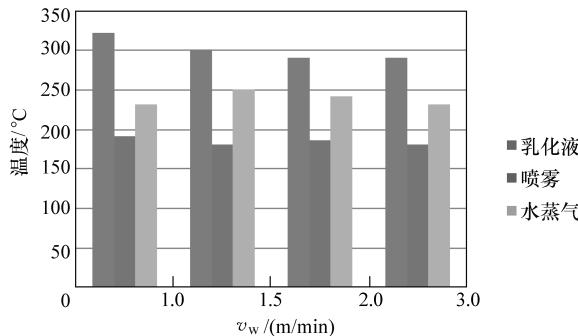


图 6-61 试件速度对磨削温度的影响

图 6-61 说明，磨削参数相同时，喷雾和水蒸气对磨削温度场冷却效果较好，乳化液次之。冷却条件相同时，试件移动速度的变化（1~3m/min）对试件表面磨削温度场影响不大。这是因为试件移动速度的提高虽然使磨削热源强度增大，却使得热源在试件表面的移动速度加快，热源在试件表面上作用时间缩短，二者共同作用下使试件表面磨削温度变化不大，规律不明显。

总体上来说，当 $v_s = 26.38 \text{ m/s}$ ， $a_p = 0.015 \text{ mm}$ 时，在试件不同移动速度条件下 ($1 \text{ m/min} \leq v_w \leq 3 \text{ m/min}$)，乳化液冷却时试件表面磨削温度平均值约 310°C ，水蒸气冷却时试件表面磨削温度平均值约 240°C ，喷雾冷却时试件表面磨削温度平均值约 190°C 。水蒸气冷却时磨削温度比乳化液冷却时下降 22.5%，却比喷雾冷却时升高 20.8%。

(2) 水蒸气冷却时磨削参数对温度场影响

1) 磨削深度对磨削温度的影响。由图 6-62、图 6-63 可知：水蒸气射流对试件表面磨削区冷却效果较好，能够迅速降低磨削温度。

由图 6-62 可见，当 $a_p \leq 0.01 \text{ mm}$ 时，水蒸气冷却使试件表面磨削温度介于 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ ，此时磨削区产生热量较少，水蒸气冷却使磨削温度与水蒸气温度非常接近；当 $0.01 \text{ mm} < a_p \leq 0.02 \text{ mm}$ 时，磨削热在试件表面层形成局部高温（干磨削时该温度可高达 $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ ），水蒸气冷却使试件表面磨削温度下降到 300°C 以下，试件表面磨削温度降

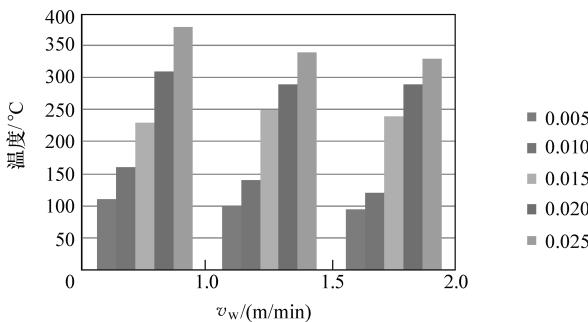


图 6-62 水蒸气冷却时磨削深度对温度的影响

低了一倍多，提高了试件表面质量，避免了热损伤；当 $0.02 \text{ mm} < a_p \leq 0.025 \text{ mm}$ 时，水蒸气冷却使试件表面磨削温度控制在 400°C 内。

2) 试件移动速度对温度的影响。从图 6-63 中容易看出，在水蒸气冷却条件下，磨削深度仅增加 0.005 mm ，试件表面磨削温度升高幅度就达约 100°C ；磨削速度提高了 $0.5 \text{ m}/\text{min}$ ，试件表面磨削温度却变化不大。由此可见，磨削深度的改变相对试件移动速度的改变对试件表面磨削温度影响较大。

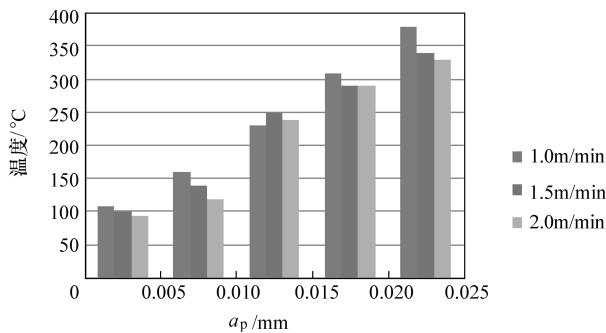


图 6-63 水蒸气冷却时试件移动速度对磨削温度的影响

(3) 仿真与试验比较

1) 磨削深度对磨削温度的影响。基础条件：水蒸气冷却， $v_s = 26.38 \text{ m}/\text{s}$ ， $v_w = 1.5 \text{ m}/\text{min}$ ，如图 6-64 所示。

如图 6-64 所示，磨削深度不同时，对磨削温度场仿真和试验数据

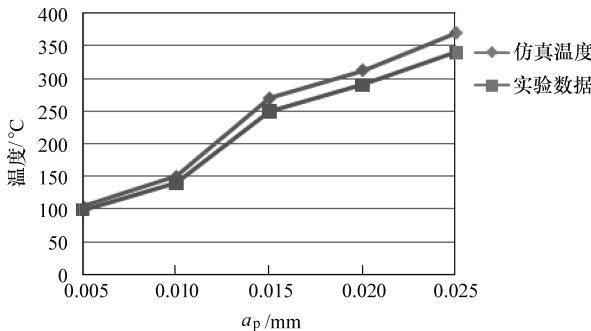


图 6-64 磨削深度对磨削温度的影响

进行对比表明，仿真温度比实验温度稍高，仿真和试验数据之间差值不超过 10%。

2) 试件速度对磨削温度的影响。基础条件：水蒸气冷却， $v_s = 26.38 \text{ m/s}$ ， $a_p = 0.015 \text{ mm}$ ，如图 6-65 所示。

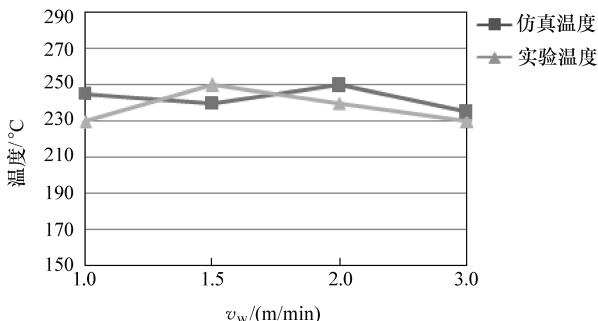


图 6-65 试件速度对磨削温度的影响

如图 6-65 所示，试件移动速度不同时，对磨削温度场仿真和试验数据进行对比表明，仿真和试验数据非常接近，其差值不超过 8%。

6.3.4 亚干切削条件下刀具破损在线检测的研究

随着生产自动化程度的提高，特别是柔性制造系统技术的出现，人们越来越重视对加工过程监测技术的发展。在金属切削加工的过程中，刀具的破损如未能及时地发现，会导致切削过程的中断，引起工

件的报废、机床损坏、甚至停止运行，造成很大的经济损失。虽然刀具使用寿命管理可以预测刀具破损，但因为刀具寿命的随机性，其寿命极限估计往往过于保守，以致大部分刀具未能充分利用，在自动化加工系统中，这将意味着换刀次数和刀具费用的增加。因此，机械加工过程中掌握刀具状态，监测与诊断刀具破损等损伤故障，对于延长机床设备无故障运行，提高产品质量具有重要的意义。

在数控切削过程中，刀具的破损和失效是造成机床设备损坏和切削加工安全事故的主要起因。据现场统计，由刀具破损和失效引起的停机时间占故障停机时间的 $1/3 \sim 1/5$ ，这使得数控机床的利用率大大下降。因此成功实现对刀具破损的检测，实时发现刀具破损并做出相应处理，将不仅保护工件和机床设备，保证加工的安全，同时也能保证产品的加工质量，节省时间，提高生产效率。

实验在欧马数控加工中心上进行，刀具材料为高速钢 HSS，转速为 $500\text{r}/\text{min}$ ，进给量为 $0.03\text{mm}/\text{r}$ 。使用两把相同材料的正常和破损的刀具，分别用 45 钢和灰铸铁 HT200 两种材料、在钻削和铣削两种加工方式下进行，检测并采集所产生的 AE 信号进行分析和研究。加工检测现场环境如图 6-66 所示。



图 6-66 加工检测现场环境

检测由系统 CCS2000 的支持，在硬件 TMS320F2812 芯片上，进行在线联机调试后逐步完成。在两种材料、两种加工方式的基础上采集分析正常刀具和破损刀具的时域和频域图形，采样频率 3MHz ，一次循环采样点数为 100 个，分别记录下 AE 信号的波形和频谱，获得刀具破损前后的

时域和频域波形。图 6-67 为采集的 AE 信号的时域和频域波形。

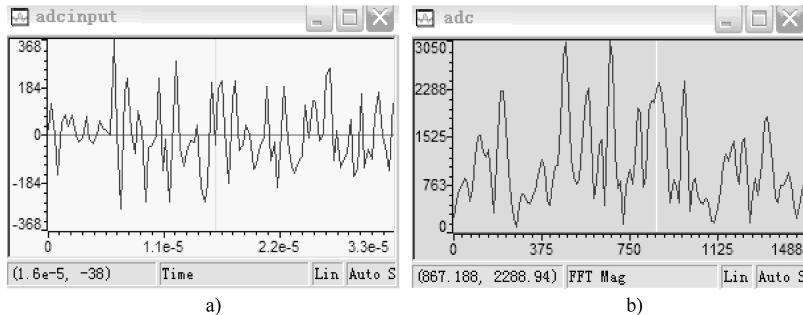


图 6-67 AE 信号的时域和频域波形

a) 时域波形 b) 频域波形

正常刀具钻削钢材料如图 6-68 所示，滤波后时域图的幅值范围为 ± 50 （模拟值为 35mV），频域图的幅度范围 < 250 ，频率主要集中在 200 ~ 650kHz。

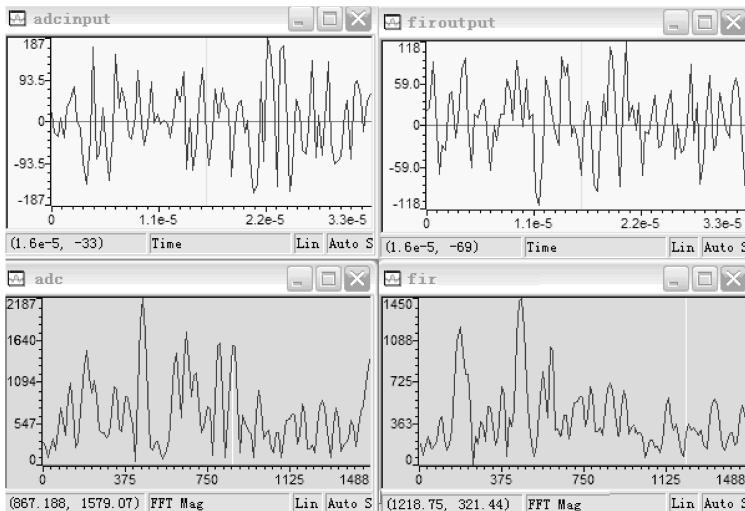


图 6-68 正常刀具钻削钢材料下滤波前和滤波后的时域和频域图

破损刀具钻削钢材料如图 6-69 所示，滤波后时域图的幅值范围为 ± 650 （模拟值为 500mV），频域图的幅度范围 > 4000 ，频率主要集

中在 300 ~ 600kHz。

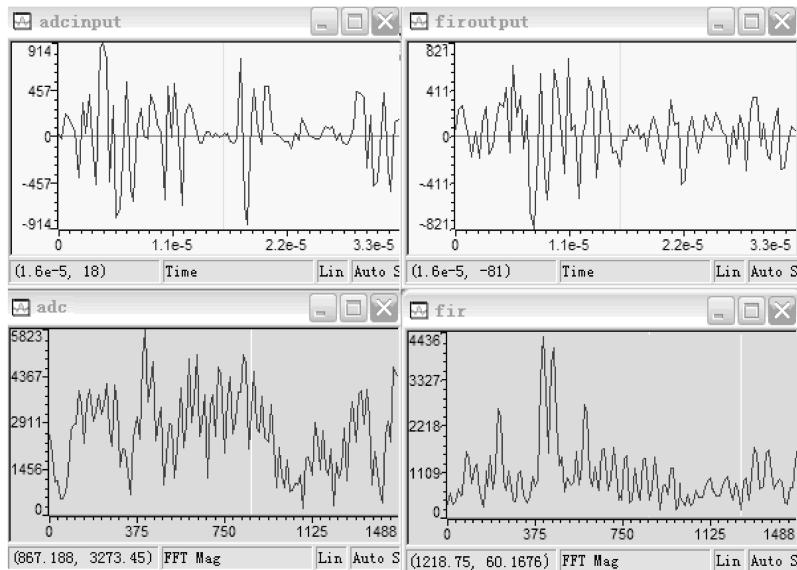


图 6-69 破损刀具钻削钢材料下滤波前和滤波后的时域和频域

其他工况下的数据归纳见表 6-20。

表 6-20 各种工况下滤波前和滤波后的时域、频域范围

工况 数据	滤波前 输出/幅度	滤波前幅值 频谱/kHz	滤波后 输出/幅度	滤波后幅值 频谱/kHz
正常、铁、钻	100 ~ 200	1000 ~ 2000/ (0 ~ 1500)	100 ~ 200	1000 ~ 2000/ (200 ~ 650)
正常、钢、铣	100 ~ 200	200 ~ 400/ (0 ~ 1500)	100 ~ 200	1000 ~ 2000/ (150 ~ 575)
正常、铁、铣	100 ~ 150	250 ~ 450/ (0 ~ 1500)	100 ~ 200	1000 ~ 2000/ (180 ~ 550)
破损、铁、钻	700 ~ 850	4000 ~ 6000/ (0 ~ 1500)	500 ~ 700	3000 ~ 5000/ (350 ~ 500)
破损、钢、铣、	500 ~ 650	3000 ~ 4500/ (0 ~ 1500)	400 ~ 700	3000 ~ 4500/ (400 ~ 550)
破损、铁、铣	500 ~ 650	3000 ~ 4500/ (0 ~ 1500)	400 ~ 600	3000 ~ 4500/ (275 ~ 450)

根据标准 GB/T 18182—2000，判别声发射信号危险与否的主要依据之一为此信号的幅度。金属材料在断裂或裂纹扩展时会出现单个或多个突发的声发射信号，破损声发射信号频率大于 100kHz（钢材料声发射检测的频带一般在 100~600kHz 范围内），比正常切削的 AE 信号大 4~5 倍，因此通过幅值和频率的综合考虑，可对声发射信号进行分析。

由此可以看出正常刀具和破损刀具的区别：

正常刀具和破损刀具滤波前的频率在整个频率段 0~1.5MHz 范围内都有，所以无法识别破损刀具。但从幅度上看，正常刀具幅度 <200，破损刀具幅度 >500，因此未滤波前，从幅度上可以检测出刀具破损，破损刀具的声发射信号幅度比正常刀具的声发射信号的幅度约大三倍以上。

正常刀具滤波后的幅度 <200，频谱范围大，从 150~650kHz 范围内都有；破损刀具滤波后的幅度 >400，且频率范围是集中在 275~550kHz 范围内，因此滤波后，从幅度上和频率上都可判断出刀具的破损。破损刀具的声发射信号幅度比正常刀具的声发射信号的幅度大 4~7 倍。

虽然基于 DSP 的网络制造平台现场数据采集系统还有许多不足的地方有待于进一步的研究与开发，但作为一个大胆的探索，为今后的研究提供了一条思路。

依传统切削理论：降低切削过程的切削力，减少切削热，改善这一过程中诸因素的摩擦状况和材料变形功大小，总是有利于切削过程正常进行的；也有利于提高被加工零件的综合质量。亚干切削技术虽然不同于传统湿式浇注冷却切削，但基本原理仍建筑在传统金属切削理论之上。实施前述冷风射流冷却为基础，辅以冷却润滑介质，使之在雾化中射向切削区的亚干冷却方式；其射出的冷却、润滑雾化介质比常规加注方式容易进入切削区，减少摩擦；冷却介质以特殊的方式射向切削区，如能达到沸腾汽化，其换热冷却作用远远高于一般的冷却，从而能充分地降低切削温度，保护和延长刀具切削性能，增强被加工零件质量的稳定性；同时大的冷却效果能减少润滑油在切削区的挥发，增强润滑作用，使整个切削过程诸因素作用效果倾向于良性循环。

切削和磨削加工是制造技术的主要基础工艺，反映了一个国家机

械工业的基础水平，国防工业的基本制造能力。随着材料科学和加工技术的发展，新型材料具有特殊的物理力学性能，使其成为新的、典型的难加工材料，干切削或亚干切削是对传统生产方式的重大创新，是一种新的绿色制造技术，虽然从其出现至今只有很短的历史，但它是新世纪的前沿制造技术；同时干切削或亚干切削又是一项系统工程，不可能一蹴而就。进一步深入进行亚干切磨削技术基础理论和工艺机理以及应用的研究，有助于推动机械制造业工艺过程的清洁生产，有助于更好地实现对包括难加工金属材料在内各种材料的精密切削、磨削，并达到或超过常规加工不能达到的生产率、加工精度和表面加工质量，同时能丰富金属切削基础理论，并具有广阔的工业应用前景，并带来良好的社会、经济效益。



附录

附录 A 干式切削 通用技术要求（草案）

本标准由全国绿色制造技术标准化技术委员会（SAC\TC337）提出。

本标准由全国绿色制造技术标准化技术委员会（SAC\TC337）归口。

本标准起草单位：（略）

本标准主要起草人：（略）

本标准为首次制定。

1 范围

本标准规定了干式切削的基本术语、一般要求及干式切削机床、刀具、工件、加工工艺参数的一般技术要求。

本标准适用于机械产品完全干切削、辅助干切削（包括风冷、液氮冷却、激光辅助等干切削）加工工艺。

本标准不适用于非金属材料的干式切削。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 15760 金属切削机床 安全防护通用技术条件

GB/T 16461 单刃车削刀具寿命试验

JB/T 9878 金属切削机床 粉尘浓度的测量

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 干式切削 [干切削] dry machining

在切削过程中不使用任何切削液的工艺方法。

3.2 完全干切削

在切削过程中不使用任何切削液及辅助冷却介质的工艺方法。

4 干式切削的一般要求

4.1 在干式切削过程中，如有可能造成人身伤害或设备损害时，应采取安全防护措施，防止切屑、工件、刀具飞出。

4.2 干式切削工作场所粉尘浓度应不大于 $2\text{mg}/\text{m}^3$ ，粉尘浓度的测量应符合 JB/T 9878 的有关规定。

4.3 采取热辅助或低温冷却干切削时应采取保护措施，防止人体直接接触过热或过冷介质。干式切削机床在空运转条件下，机床的噪声声压应不大于 85dB (A)。

5 干式切削机床要求

5.1 干式切削机床防护要求应满足 GB15760 《金属切削机床 安全防护通用技术条件》中的有关要求。

5.2 干式切削机床应有足够的刚性和强度和热稳定性以满足切削加工工艺的要求。

5.3 干式切削机床应有较好的防振防噪性能。

5.4 干式切削机床结构应具有良好的排屑性能、热平衡性能、冷却性能。

5.5 主轴、导轨等精密运动部件应采取相应的密封措施。

5.6 干式切削机床应具有相应的清洁措施。

5.7 必要时干式切削机床可增加温度检测及补偿控制系统。

6 刀具要求

6.1 刀具总体要求

为了保证刀具的使用寿命，干式切削刀具应具有良好的耐高温性、

耐磨性及耐冲击性，刀具结构要利于排屑、散热及断屑。

6.1.1 刀具结构要求

6.1.1.1 干式切削刀具结构应有利于降低切削力及减少摩擦，刀具的几何形状要有利于切削热的扩散。

6.1.1.2 干式切削刀具结构应有利于辅助冷却介质到达切削区。

6.1.1.3 干式切削刀具前刀面形状应有利于减少刀具与切屑的接触面积，有利于断屑、排屑和防止积屑瘤的产生。

6.1.2 刀具寿命要求

干式切削刀具使用寿命一般应不低于普通切削，刀具寿命试验参照 GB/T 16461《单刃车削刀具寿命试验》进行。

6.2 干式切削常用刀具及特性（见表 1）

表 1 干式切削常用刀具及特性

刀具材料	刀具特性	主要应用
硬质合金	YG 系列 耐磨、韧度好	有色金属、铸铁等
	YT 系列 耐磨性较好	碳素钢、合金钢
	YW 系列 热硬性较好	耐热钢、高锰钢、不锈钢
	金属陶瓷 硬度高、耐磨、耐热、化学稳定性好	碳素结构钢
陶瓷	硬度和耐磨性高、热稳定好	铸铁、碳素钢、淬硬钢
聚晶立方氮化硼 (PCBN)	高硬度、耐磨、热稳定好、低摩擦	冷硬铸铁、高温合金、碳素钢、硬质合金、淬硬钢
聚晶金刚石 (PCD)	高耐磨性、高导热性、低摩擦、低热膨胀系数、强度高、韧度好	有色金属、复合材料
涂层刀具	氮化钛涂层 韧度、热硬性好	高硬度材料
	铝涂层 耐热、化学稳定性好	高硬度、高耐磨材料
	氧化物涂层 耐磨、阻热性好	耐磨铸铁等
	金刚石涂层 高硬度、耐磨、弹性好	铝合金、铜合金、复合材料
	碳氮化钛涂层 超硬、耐磨、热稳定好	淬硬钢等

7 加工工件要求

7.1 加工工件材质要求

工件材料在很大程度上决定了实施干式切削的可能性，表2给出常用工件材料的干切削性能。

表2 工件材料干切削性能

工件材料	加工方法					
	车削	铣削	铰孔	攻丝	钻孔	齿轮加工
铝及铝合金	○○				○	○
铸铁	○○	○○	○○	○○	○○	○○
一般碳素钢	○○	○○			○	○
复合材料	○○	○○	○○	○○	○○	○○
淬火钢	○	●	●	●	●	●
不锈钢	●	●	●	●	●	●
高温合金	●	●	●	●	●	●
钛合金	●	●	●	●	●	●

注：1. ○○表示易于进行干式切削。

2. ○表示可以进行干式切削。

3. ●表示难于进行干式切削。

7.2 工件及刀具夹紧要求

干式切削通常是在高速加工状态下进行的，刀片在刀体上定位夹紧应牢固、安全，刀具与机床连接可靠，保证刀具在高速回转时正常工作。

加工工艺参数要求

实施干式切削时，一般应根据工件材质、加工技术要求、机床、刀具及辅助工艺方法等进行工艺试验，确定加工工艺参数。

附录 B 亚干式切削 通用技术要求（草案）

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草

本标准由全国绿色制造技术标准化技术委员会（SAC/TC337）提出并归口。

本标准起草单位：（略）

本标准主要起草人：（略）

本标准为首次制定。

1 范围

本标准规定了亚干式切削一般要求及亚干式切削机床、刀具、微量润滑介质喷射、工件、加工工艺参数等的一般技术条件。

本标准适用于机械零件的亚干式切削，通常包括：微量润滑切削、低温微量润滑切削，保护气微量润滑切削工艺。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 9061—2006 金属切削机床 通用技术条件

GB 15760 金属切削机床 安全防护通用技术条件

GB/T 16461 单刃车削刀具寿命试验

GB/T 16769 金属切削机床 噪声声压级测量方法

JB/T 9878 金属切削机床 粉尘浓度的测量

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 亚干式切削

应用不同技术方法，将适量润滑液注入带有一定压力、不同温度的气流中混合雾化，生成微量润滑介质，并喷入切削点，对发热区实施微量润滑冷却的切削技术。

注：通常包括：微量润滑切削（MQL切削）、低温微量润滑切削（冷风切削）、保护气微量润滑切削等技术。

3.2 微量润滑介质

将适量润滑液注入带有一定压力的气流中混合雾化，使气流富含微米级润滑液微粒，并喷向发热区，实施微量润滑冷却的不同温度流体。

3.3 微量润滑切削（MQL切削）

将温度在0℃以上的微量润滑介质喷入切削点，对发热区实施微量润滑冷却的切削技术。

3.4 低温微量润滑切削（冷风切削）

将温度在0℃以下的微量润滑介质喷入切削点，对发热区实施低温微量润滑冷却的切削技术。

3.5 保护气微量润滑切削

将不同温度阻燃气体构成的微量润滑介质喷入切削点，对发热区实施微量润滑冷却的切削技术。

注：通常使用氮气、二氧化碳等阻燃气体。

3.6 切削点

切削过程中，刀刃与工件、刀刃与切屑之间的接触点。

3.7 同管喷射法

通过同一通道，将不同温度微量润滑介质，喷向切削点或其它发热部位，实施润滑冷却的方法。

3.8 异管喷射法

通过不同的通道，将常温微量润滑介质与低温气流同时喷向切削点或其他发热部位，实施润滑冷却的方法。

3.9 内冷喷射法

通过设置在刀具、刀体、刀柄或辅助工具上的喷射孔，向切削点或其他发热部位喷射不同温度微量润滑介质，实施润滑冷却的方法。

3.10 混喷喷射法

将气体与油基、水基润滑液同时混流，生成的不同温度微量润滑介质，并喷入切削点或其他发热部位，实施润滑冷却的方法。

4 亚干式切削一般要求

4.1 在亚干式切削过程中，若有可能造成人身伤害或设备损害时，必须采取安全防护措施，防止切屑、工件、刀具或喷射器构件飞出或干涉。

4.2 亚干式切削生产车间的大气粉尘浓度应不大于 $3\text{mg}/\text{m}^3$ ，粉尘浓度的测量，应符合 JB/T 9878 标准有关规定，油（液）雾浓度应控制在 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 以内。

4.3 低温微量润滑切削的工作温度，以控制在 $-10^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ 范围为宜，低温微量润滑系统的输出温度，一般应不低于 -55°C ，特殊要求时，可以使用更低工作温度进行切削。

4.4 低温微量微滑切削时，相关部位应该具备绝热保护措施。采用 -55°C 以下工作温度进行亚干式切削时，必须采取严格的绝热保护措施，防止人体长时间直接接触低温部位。加工结束后，刀具、工件等部位应该注意防锈。

4.5 亚干式切削机床空运转时，噪声声压级应不大于 $85\text{dB}(\text{A})$ ，噪声测量方法应符合 GB/T 16769 标准的规定。

4.6 在亚干式切削机床的操作区，应具有关停微量润滑系统的功能，必要时，应该具备与机床操纵板同步的功能和报警功能。

4.7 在亚干式切削过程中，微量润滑系统喷射器的出口，应尽可能靠近切削点，以保持在 $20 \sim 80\text{mm}$ 的距离范围内为宜。

5 亚干式切削机床要求

5.1 亚干式切削机床结构，必须具有非常好的排屑性能、热平衡性能和散热性能，并满足 GB/T 9061—2006《金属切削机床 通用技术条件》中的各项有关要求。

5.2 亚干式切削机床的防护，应满足 GB15760《金属切削机床安全防护通用技术条件》中的各项有关要求。

5.3 亚干式切削机床应有足够的刚性、强度和热稳定性，以满足切削加工工艺的要求。

5.4 亚干式切削机床应有较好的防振、防噪性能。

5.5 亚干式切削机床主轴、导轨等精密运动部件，应采取严格的

密封措施。

5.6 亚干式切削机床应具有相应的清洁措施，在使用低温微量润滑介质切削时，相关部位应采取保温防霜措施。

5.7 使用低温微量润滑介质的亚干式切削机床应具有温度检测、温度显示、温度调整及温度补偿的功能。

5.8 亚干式切削机床应尽量减少、简化换刀时所需的微量润滑喷射器调整动作，对频繁换刀的机床，应使用自动定点喷射或切削点跟踪喷射的机构。

6 亚干式切削刀具要求

6.1 亚干式切削刀具总体要求

亚干式切削刀具应具有良好的耐温性、耐磨性及耐冲击性，刀具结构要利于断屑、排屑及微量润滑介质向切削点的喷射流通。

6.2 亚干式切削刀具结构要求

亚干式切削刀具结构应有利于降低切削力和减少摩擦，刀具几何形状要有利于切削热的扩散。

亚干式切削刀具结构应有利于微量润滑介质顺利喷入切削点，宜采用内冷却切削的结构形式。

亚干式切削刀具前刀面形状应有利于减少与切屑的接触面积，有利于断屑、排屑和防止积屑瘤的生成。

6.3 亚干式切削刀具耐用度要求

在同等条件下，亚干式切削刀具耐用度应高于普通干切削、不低于油剂喷淋切削，切削用量的优化可采用：直觉优化法、试验优化法或数学模型优化法。本标准推荐使用试验优化法评定刀具耐用度，试验过程应参照 GB/T 16461《单刃车削刀具寿命试验》进行。

6.4 亚干式切削常用刀具及特性

亚干式切削常用刀具可参照《干式切削 通用技术要求》选用，并满足金属切削刀具相关标准要求。

7 亚干式切削微量润滑介质喷射

7.1 总体要求

亚干式切削用的微量润滑系统必须保证工作时，微量润滑介质供

给的连续性、均匀性和可控性。

微量润滑介质中的润滑油（液）粒粒度，应控制在 0.002mm 大小范围以内。

亚干式切削微量润滑介质工作流量不得低于 $0.3 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ，压力应控制在 $0.2 \sim 0.8 \text{ MPa}$ 以内。

7.2 亚干式切削微量润滑介质喷射方法

亚干式切削微量润滑介质的喷射，可以使用同管喷射法、异管喷射法、内冷喷射法和混喷喷射法。

7.3 低温微量润滑介质喷射

使用低温微量润滑介质时，喷射器应该具备绝热保护措施，温度低于 -55°C 时，必须采取严格的绝热保护措施，加工结束后，相关部位应该注意防锈。

7.4 保护气微量润滑介质喷射要求

保护气微量润滑切削必须使用无毒气体，加工场所必须具备良好的通风条件，必要时可封闭切削区，并回收气体。

7.5 不同切削方式所需的微量润滑液用量范围参考

不同切削方式所需的微量润滑液用量范围可参考表 1。

表 1 不同切削方式微量润滑液用量范围参考

应 用	用量范围/ (mL/h)	应 用	用量范围/ (mL/h)
铣削	10 ~ 30	车削	10 ~ 30
圆锯	10 ~ 40	冲孔	10 ~ 20
带锯	10 ~ 50	磨	20 ~ 50
拉削、扩孔	10 ~ 45	钻削	10 ~ 30

7.6 亚干式切削对润滑液的要求

亚干式切削应使用公害较小的植物性油剂或水基切削液。使用低温气体时，除采用异管喷射法外，其他喷射法润滑液的倾点都必须比气体的温度低 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 。

8 亚干式切削被加工工件要求

亚干式切削对被加工工件没有特殊要求，但在大型、贵重零件或

批量生产前，应该进行必要的切削性能优化。

8.1 加工材质、加工方法与可切削性能

工件材料的物理特性，很大程度上决定了实施亚干式切削的可切削性能，表2给出了常用材料、加工方法及亚干式切削的可切削性能参考。

表2 不同材料与亚干切削的可切削性能参考

工件材料	加工方法					
	车削	铣削	铰孔	攻丝	钻孔	齿轮加工
铝及铝合金	○○	○○	○○	○○	○○	○
铸铁	○○	○○	○○	○○	○○	○
一般碳素钢	○○	○○	○○	○○	○○	○
不锈钢	○○	○	○○	○○	○○	○
淬火钢	○	○	○	○	○	●
高温合金	○	○	○	○	○	●
钛合金	○	○	○	○	○	●

注：1. ○○表示易于进行亚干式切削。

2. ○表示可以进行亚干式切削，但推荐使用低温微量润滑切削、低温混喷喷射切削、低温保护气微量润滑切削。
3. ●表示有待完善切削参数，选择工况条件。建议使用低温混喷喷射切削、低温保护气微量润滑切削进行可切削性能优化后进行。
4. ○○表示易于进行亚干式切削，但必须采取防尘措施。

8.2 工件夹持要求

亚干式切削工件在机床上的定位夹持应牢固、安全，与机床连接可靠，应保证在高速回转时正常工作，并满足相关标准要求。

9 亚干式切削加工工艺参数要求

实施亚干式切削前，应该根据工件材质、加工技术要求、机床、刀具、辅助工艺方法、微量润滑喷射方式等进行可切削性能评估，必要时，可进行切削参数优化试验，最终确定加工工艺参数。

参 考 文 献

- [1] 金属切削理论与实践编委会. 金属切削理论与实践 [M]. 北京: 北京出版社, 1979.
- [2] 华南工学院, 甘肃工业大学. 金属切削原理及刀具设计: 上册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [3] 刘志峰, 张崇高, 任家隆. 干切削加工技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 刘光复. 绿色设计与绿色制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [5] 商宏漠, 译. 国内外涂层高速钢刀具发展和事业情况简介 [J]. 刀具研究, 1995 (4): 1-8.
- [6] 刘飞. 绿色制造 [M]. 北京: 中国经济出版社, 1999.
- [7] 艾兴. 高速切削加工技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [8] 周雍鑫. 金属加工液使用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [9] 刘光复. 绿色制造 [M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2002.
- [10] 张伯霖. 高速切削技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [11] 曼格 T, 德雷泽尔 W. 润滑剂与润滑 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [12] 韩荣第. 现代机械加工新技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [13] Ren J L, Lu S, Ren J J, et al. A Study of Precision Sub-dry Cutting Mechanism [J]. Key Engineering Materials VIII 315-316: 2006, 805-808.
- [14] Byme G, Scholte E. Environmentally Clean machining Processes-A Strategic Approach [C]. Annals of the CIRP, 1993.
- [15] Sheng P, Srinivasan M. Multi-Objective Planning in Environmentally-Conscious Manufacturing: A Feature-Based Approach [C]. Annals of the CIRP, 1995.
- [16] Kovacevic R. High pressure waterjet cooling/lubrication to improve machining efficiency in milling [J]. International Journal of Machine and Manufacturing, 1995, 10 (35): 1459-1473.
- [17] Graedel T E, Allenby B R. Industrial Ecology, et al. Englewood Cliffs [M]. New Jersey, 1995.
- [18] Robert b Arson. Why Dry Machining [J]. Manufacturing Engineering, 1995, 20 (5): 15-18.
- [19] Tior Cselle DR. New Directions in Drilling [J]. Manufacturing Engineering,

- 1995, 108 (10): 24-27.
- [20] Samir B Billators, Nadia A Basaly. Green Technology And Design for the Environment [M]. Taylor & Francis, 1997.
- [21] Lahres M, Muller-Hummel P, Doerfel O. Applicability of different hard coatings in dry milling aluminium alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 91: 116-121.
- [22] Kustas F M, Fehrenbacher L L. Nanocoatings on Cutting Tools for Dry Machining [C]. Annals of the CIRP, 1997.
- [23] Lahres M. Applicability of different hard coatings in dry milling aluminum alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 91: 116- 121.
- [24] Tibor Cselle. The 10 commandments of dry high- speed machining [J]. American Machinist, 1998, 5: 68-74.
- [25] Tnshoff K, Karpuschewski B. Performance of oxygen-rich TiAlON coatings in dry cutting applications [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108: 535-542.
- [26] Bert P Erdel. New Dimensions in Manufacturing [M]. Hanser Gardner Publications, 1998.
- [27] Srinivasan M, Sheng P. Teatute-based process planning for environmentally conscious machining-Part 1: microplanning [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15: 257-270.
- [28] Derflinger V. New hard/hibricant coating for dry machining [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 113: 286-292.
- [29] Enke K. Dry machining and increase of endurance of machine parts with improved doped DLC coatings on steel, ceramics and aluminum [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 116: 488-491.
- [30] Srinivasan M, Sheng P. Development of a scoring index for the evaluation of environmental factors in machining processes-Part 2: applications [M]. University of California at berkrley, 1999.
- [31] Ye Chen, Xuewen Lin, Jun Ni. An experimental study of dry and near dry drilling of Aluminum alloy [C]. Proceeding of International Conference on Sustainable Manufacturing' 99. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999.
- [32] Renevier N IVI. Performance of MoS₂/Metal composite coatings used for dry machining and other industrial applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 123: 84-91.

- [33] Gerard Poulachon, Alphonse L Moisan. Hard turing: chip formation mechanisms and metallurgical aspects [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122: 406-412.
- [34] Sreejith P S, Ngoi B K A. Dry machining: machining of the future [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101: 287-291.
- [35] Schulz H, Dorr J, Rass I J, et al. Performance of oxide PVD-coatings in dry cutting operations [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 146: 480-485.
- [36] Jialong Ren , Wei Li. The Experimental Study of Phase Transformation Heat—Transfer simulation of grinding of Ti Alloy [J]. Key Engineering Materials XIV 359-360: 2008, 548-808.
- [37] 万光珉, 柯建宏. 高锰钢的低温切削研究 [J]. 昆明工学院学报, 1994, 8: 64- 69.
- [38] 崔继文, 译. 用 PCBN 车削硬质合金 [J]. 国外金属加工, 1995 (4): 2.
- [39] 王惠忠. 淬硬零件的以车代磨 [J]. 工具技术, 1995, 29 (4): 25-26.
- [40] 刘志峰. 正前角几何参数铣刀及应用 [J]. 机械制造, 1996, 2: 30-31.
- [41] 刘志峰. 内切式旋风铣削刀盘及刀具设计 [J]. 机械设计与研究, 1996, 2: 42-43.
- [42] 刘志峰, 宋守许. 绿色产品制造技术——清洁生产 [J]. 机械科学与技术, 1996, 3: 419-422.
- [43] 王西彬, 赵伯彦. 陶瓷刀具干切削淬硬钢的研究 [J]. 工具技术, 1996, 9: 11-14.
- [44] 张魁禄. 极压型水基切削液的研究 [J]. 辽宁化工, 1996, 12: 12-13.
- [45] 山形俊一. 无给油用 [J]. 机械工具, 1996, 56 (4); 67-70.
- [46] 刘志峰. 干切削加工的原理、特点及应用 [J]. 机械工程师, 1997, 2: 44-46.
- [47] 刘志峰. 陶瓷材料的磨削加工 [J]. 水利电力机械, 1997, 2: 31-33.
- [48] 刘志峰. 清洁生产与切削液的环境适应性 [J]. 机械制造, 1997, 3: 6-7.
- [49] 丁有光, 李克微. 多用途环保型水基切削液的研制 [J]. 机车车辆工艺, 1997, 4: 9-11.
- [50] 刘志峰. 喷雾冷却法在旋风铣螺纹中的应用 [J]. 机械制造, 1997, 6: 27-28.
- [51] 贾晓鸣, 张秀玲. 未来切削液的展望 [J]. 工具技术, 1997, 7: 38-40.

- [52] 刘志峰. 纯铝工件内螺纹的挤压加工 [J]. 工具技术, 1997, 7: 22-23.
- [53] 刘志峰. 干切削加工技术的发展及应用 [J]. 机械制造, 1997, 9: 5-8.
- [54] 叶伟昌, 严卫平. 废乳化液的回收处理 [J]. 机械制造, 1997, 9: 27-28.
- [55] 刘志峰. 陶瓷刀具材料的选择 [J]. 机械制造, 1997, 10: 25-26.
- [56] 叶伟昌, 顾锋. 切削液的供给净化与回收 [J]. 机械科学与技术, 1997, 12: 3-5.
- [57] 吴元昌. OKO 丝锥及其攻丝扭矩 [J]. 刀具研究, 1997, 15 (4): 5-8.
- [58] 刘志峰. 挤压丝锥 CAD [J]. 工具技术, 1997, 28 (11): 11-14.
- [59] 刘志峰. 硬车削及其应用 [J]. 工具技术, 1998, 1: 27-29.
- [60] JilrgenSchmidt, OliverDüffel. 干切削插齿加工 [J]. MM 机电信息, 1998, 1: 26-29.
- [61] 王西彬. 陶瓷刀具干切削淬硬钢的研究 [J]. 工具技术, 1998, 2: 11-14.
- [62] 郭秀珍, 译. 干切削一种明智的选择 [J]. 国外科技, 1998, 3: 29-30.
- [63] 刘志峰, 夏链. 硬车削及其加工技术 [J]. 机械制造·制造工艺, 1998, 3: 18-19.
- [64] 刘志峰. 干切削加工刀具材料及涂层应用 [J]. 机械研究与应用, 1998, 3 (11): 45-47.
- [65] 陆少鹤. 废切削液回收处理技术 [J]. 洪都科技, 1998, 4: 43-46.
- [66] 刘志峰. 干切削加工刀具及其设计 [J]. 制造技术与机床, 1998, 8: 20-22.
- [67] 陈循介. 适应环保的机床不断开拓新市场 [J]. 世界制造装备市场, 1998, 8: 35-37.
- [68] 刘献礼, 陈波, 孟安, 等. PCBN 刀具应用于先进切削工艺研究 [J]. 制造技术与机床, 1998, 9: 22-25.
- [69] 王黎明, 译. 采用硬车削还是磨削 [J]. 世界制造装备市场, 1998, 11: 33-35.
- [70] 刘志峰. 干式螺纹加工工艺 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17 (6): 1002-1004.
- [71] 刘志峰. 干式螺纹加工工艺研究 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17 (6): 1002-1004.
- [72] 张希康, 编译. 不用切削油的干态高速滚齿 [J]. 机械传动, 1999, 1: 42-45.
- [73] 吴希让. 用于干切削的新型刀具 [J]. 工具技术, 1999, 2: 16-19.

- [74] 肖德明. 风冷却无心磨削的实用化 [J]. 磨床与磨削, 1999, 2: 48-52.
- [75] 孙公新, 译. 超冷却车削加工 [J]. 国外金属加工, 1999, 4: 19-26.
- [76] 李良福, 编译. 保护机械加工中生态安全的冷却液和方法 [J]. WMEM, 1999, 4: 30-32.
- [77] 刘志峰. 干式加工—绿色制造工艺的应用研究 [J]. 机电一体化, 1999, 5 (1): 29-31.
- [78] 时忠明, 范训慧, 汪通悦. 切削液的使用和环境保护 [J]. MachineBuilding&Automation, 1999, 6: 24-26.
- [79] 吴希让, 张宛利. 干切削加工的研究和应用 [J]. 汽车工艺与材料, 1999, 8: 3-5.
- [80] 刘志峰. 干切削加工刀具及其设计 [J]. 制造技术与机床, 1999, 8: 20-22.
- [81] 刘志峰. 干切削加工刀具 [J]. 机械制造, 1999, 9: 31-33.
- [82] 孙建国, 刘镇昌, 李久立. 现代切削液的特点及发展趋势 [J]. 工具技术, 1999, 9: 11-12.
- [83] 康磊晶. 绿色制造 [J]. 机器人技术与应用, 1999, 10: 14-16.
- [84] 任家隆. 车削加工中射流冷却方法的探讨 [J], 中国机械工程, 1999, 10 (12): 55-56.
- [85] 李志英, 罗勇, 张伯霖, 等. 干切削及其对刀具的要求 [J]. 机械开发, 2000, 1: 1-4.
- [86] 刘献礼. 冷风发生装置及风冷却切削技术 [J]. 制造技术与机床, 2001, 10: 8-9.
- [87] 叶伟昌. 干切削刀具及其应用 [J]. 机械工程师, 2000, 6: 5-7.
- [88] 宋银胜. PCBN 刀具镗削灰铸铁的工艺实验 [J]. 机械工艺师, 2000, 6: 22-23.
- [89] 任家隆. The Study Of Sub-dry Cutting Cr12 [J]. 机械工程学报 (英), 2002 (1): 40-42.
- [90] 刘飞, 曹华军, 何乃军. 绿色制造的研究现状与发展趋势 [J]. 中国机械工程, 2000, 11 (1-2): 105-110.
- [91] 宋书华, 郭惠俊. 点磨削和数控快速点磨机床 [J], 机电一体化, 1994 (5): 4.
- [92] 孙建国, 葛培琪, 刘镇昌. 绿色切削液研究开发的生命周期分析与评价 [J]. 工具技术, 2000, 34: 13-14.
- [93] 孙建国, 刘镇昌, 李久立. 现代切削液的特点及发展趋势 [J]. 工具技术, 2000, 34: 11-12.

- [94] 刘献礼, 孟安, 陈立国, 等. 硬态干式切削 GCr15 时的临界硬度 [J]. 机械工程学报, 2000, 36 (3): 13-16.
- [95] 王西彬. 绿色切削加工技术的研究 [J]. 机械工程学报, 2000, 36 (8): 6-9.
- [96] 陈德成, 铃木康夫, 酒井克彦. 微量润滑油润滑和冷风冷却加工法对高硅铝合金切削面的影响 [J]. 机械工程学报, 2000, 36 (11): 70-74.
- [97] 张树森. 硬态车削加工技术 [J]. 机械制造, 2000, 38 (2): 36-37.
- [98] 陈超, 周福章, 李力千. 机械工业中的绿色制造技术 [J]. 机械制造, 2000, 38 (7): 18-19.
- [99] 叶伟昌, 梁萍, 叶毅. 切削液净化处理方法及其装置 [J]. 机械工程师, 2001, 1: 20-21.
- [100] 左建华, 张志英, 李殿超, 等. 淬硬钢的铣削加工 [J]. 新技术新工艺, 2001, 1: 12, 15.
- [101] 张伯霖, 夏红梅, 黄晓明. 干切削的关键技术 [J]. 机电工程技术, 2001, 2: 1-6.
- [102] 孙建国, 刘镇昌. 论绿色切削液的必要性和可行性 [J]. 润滑与密封, 2001, 2: 68-71.
- [103] 刘菊东. 干切削机床的结构特点 [J]. 江苏机械制造与自动化, 2001, 4: 106-110.
- [104] 蒋修治, 译. 高效干滚齿加工系统 [J]. 国外金属加工, 2001, 4: 39-43.
- [105] 胡黄卿. 机械加工业的展望 [J]. 矿山机械, 2001, 5: 6-8.
- [106] 唐永杰. 柴油机气阀干切削 PCBN 刀具 [J]. 机械工程师, 2001, 5: 46-47.
- [107] 陈战, 王家序, 秦大同. 新型环保水基切削液的研制及应用 [J]. 润滑与密封, 2001, 6: 55-56.
- [108] 王君, 杨永萍. 机械加工中的绿色制造工艺 [J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2001, 9: 47-48.
- [109] 倪俊芳, 苏桂生, 谢志余. 涂层硬质合金刀具干式切削淬硬钢的试验研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2001, 9: 56-57.
- [110] 张伯霖, 夏红梅, 黄晓明. 新世纪的干切削技术 [J]. 制造技术与机床, 2001, 10: 5-7.
- [111] 马祖军, 代颖. 干切削加工及其措施 [J]. 工艺与检测, 2001, 11: 41-43.
- [112] 文东辉, 刘献礼, 杨兴, 等. 硬态切削中的冷却润滑技术 [J]. 制造技

- 术与机床·工艺与检测, 2001, 12: 28-30.
- [113] 唐永杰. 提高 PCBN 刀具抗冲击性能的技术措施 [J]. 工艺与工艺装备, 2001, 12: 31-32.
- [114] 朱从容, 王魄. 干式切削技术在铣削加工中的应用 [J]. 机械工程师, 2002, 3: 6-8.
- [115] 谭显春, 刘飞, 曹华军, 等. 面向绿色制造的切削液综合选择模型及其应用实例 [J]. 工具技术, 2002, 3: 10-14.
- [116] 沈岷山. 深孔加工中干式切削方法的应用 [J]. 上海电机技术高等专科学校学报, 2002, 3: 22-24.
- [117] 任家隆. 绿色干切削技术的研究 [J]. 新技术新工艺, 2002, 5: 9-11.
- [118] 张建中, 李秀人, 申奎东. 超声振动干式镗削 40CrMnSiMovA 钢的试验研究 [J]. 新技术新工艺, 2002, 5: 58-60.
- [119] 胡世军, 范执元, 李有堂. 绿色的干切削技术及应用 [J]. 机床与液压, 2002, 6: 40-41.
- [120] 谢峰, 沈维蕾. 磨削加工中的绿色制造 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2002, 6: 18-20.
- [121] 宋昌才. 高速机床与高速切削在现代机械加工中的应用 [J]. 新技术新工艺, 2002, 9: 2, 5.
- [122] 陈定芳, 金孝发. 干切削在数控加工中的应用 [J]. 制造·材料, 2002, 11: 37-38.
- [123] 石雪英. 干式切削在铣削加工中的应用 [J]. 机械管理开发, 2002, 12: 24-25.
- [124] 刘献礼, 文东辉, 侯世香, 等. 硬态干式切削机理及技术研究综述 [J]. 中国机械工程, 2002, 13 (11): 973-976.
- [125] 盖全文, 王继先. 强冷磨削的试验研究 [J]. 化工机械, 2002, 29 (6): 320-323.
- [126] 张震, 何曙光. 低温冷风切削技术浅谈 [J]. 工具技术, 2002, 36: 32-33.
- [127] 胡墨俊. 发动机铝合金壳体切削加工工艺改进 [J]. 机电工程技术, 2002, 36: 59-60.
- [128] 刘忠和, 于启勋, 林景. 新型氮化碳超硬涂层刀具的切削试验研究 [J]. 新技术新工艺, 2003, 1: 19-20.
- [129] 么炳唐、静电冷却干切技术 [J]. 工艺与检测, 2003, 1: 66-68.
- [130] 吴希让, 宗荣珍. 干切削的刀具和切削条件选择 [J]. 现代制造工程, 2003, 1: 63-65.

- [131] 唐振宇, 李锻能, 马平. 干式切削机床与刀具技术 [J]. 机床与液压, 2003, 2: 254-256.
- [132] 肖永革, 尚文辉, 张太和. 陶瓷刀具在车削高硬冷轧辊中的应用 [J]. 机械工程师, 2003, 4: 71-72.
- [133] 杜国臣. 硬车削技术及其应用 [J]. 机械工程师, 2003, 4: 61-64.
- [134] 白钊, 马平. 金属切削领域的可持续发展战略—高速干切削技术 [J]. 机械工程师, 2003, 6: 10-12.
- [135] 白钊, 马平. 干切削技术及其新发展 [J]. 现代制造工程, 2003, 8: 96-98.
- [136] 邓建新, 丁泽良. 高温自润滑陶瓷刀具材料及其切削性能的研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 8: 106-109.
- [137] 曹杰, 刘军. 切削液环境评价体系与方法的研究 [J]. 机械制造与研究, 2003, 9: 32-35.
- [138] 江志刚, 张华, 谭显春, 等. 切削液系统绿色特性分析及其优化设计措施 [J]. 制造技术与机床, 2003, 11: 15-18.
- [139] 杨海东, 孔晓玲, 韦山. 金刚石涂层刀具干切削硅铝合金性能研究 [J]. 合肥工业大学学报, 2003, 12: 1276-1278.
- [140] 刘志兵, 王西彬, 杨洪建. 陶瓷刀具干铣削超高强度钢的试验研究 [J]. 工具技术, 2003, 37: 7-9.
- [141] 薛建新, 游顺英, 虞建明. 聚晶金刚石(PCD)刀具的开发与应用 [J]. 工具技术, 2003, 37: 45-47.
- [142] 周彬. 绿色环保切削液的应用与展望 [J]. 机械管理开发, 2004, 2: 3-4.
- [143] 赵恒华, 蔡光起, 高航. 基于绿色磨削的冷气冷却实验研究 [J]. 制造技术与机床, 2004, 4: 54-55.
- [144] 兰俊思, 丁培道, 黄楠. SiC 晶须和 Ti (C、N) 颗粒协同增韧 Al2O 、陶瓷刀具的研究 [J]. 材料科学与工程学报, 2004, 2: 59-64.
- [145] 吴敏镜, 译. MQL 切削的现状和发展 [J]. 航空精密制造技术, 2004, 40 (1): 24-26.
- [146] VDMA. 德国的制造技术 [J]. 物流和自动化, 1999, (4): 11-14.
- [147] 孙方宏. 关于高效磨削时采用径向射流冲击强化弧区换热的基础研究 [D]. 南京: 南京航天航空大学, 1998.
- [148] 米尔斯, 雷德福 A H. 工程材料的可切削性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [149] 白井英治. 切削磨削加工学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

- [150] 巩三动. 低温气体射流冷却切削试验与仿真研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2006.
- [151] 李伟. 雾化冷却切削效果的实验及仿真研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2008.
- [152] 张风. 喷雾冷却对高温合金表面组织和性能影响研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2010.
- [153] 王岩. 基于水蒸气冷却磨削的仿真和试验研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.

地址:北京市百万庄大街22号
邮政编码:100037
电话服务
社服务中心: 010-88361066
销售一部: 010-68326294
销售二部: 010-88379649
读者购书热线: 010-88379203
网络服务
教材网: <http://www.cmpedu.com>
机工官网: <http://www.cmpbook.com>
机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>
封面无防伪标均为盗版

ISBN 978-7-111-40256-5



9 787111 402565 >

上架指导 工业技术/机械工程/机械加工
ISBN 978-7-111-40256-5
策划编辑◎李万宇

定价: 43.00元