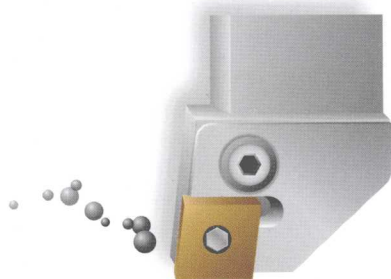


干切削理论 与加工技术

任家隆 刘志峰 唐文献 编著



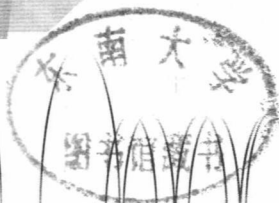
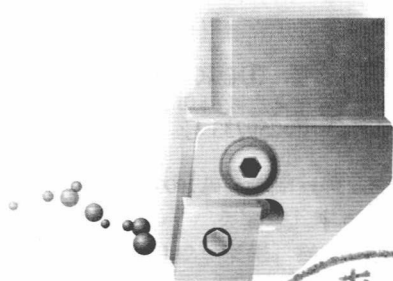
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TG5
20

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)

策划编辑: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印刷

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

社服务中心:(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、科研院所的专家、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和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 and 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

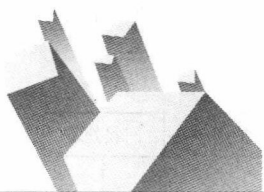
前言

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



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:

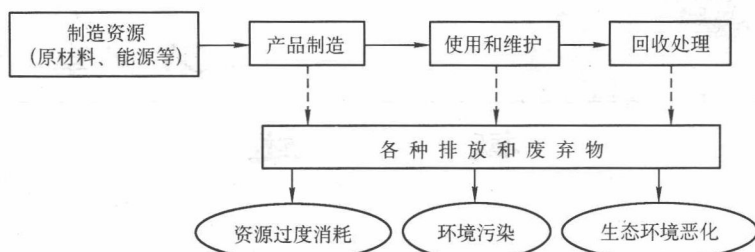


图 1-1 制造业与环境的关系

(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有所有水排放量的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经济生产总值的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—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油约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环境管理系统标准，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，

涌现出了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。

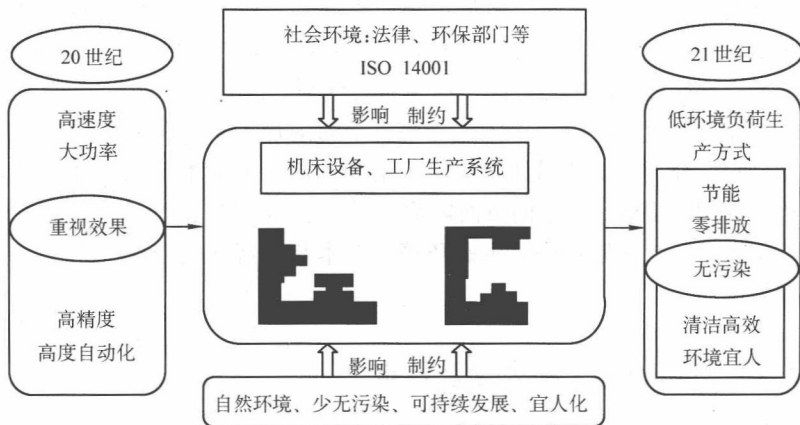


图1-2 生产方式指导思想变迁

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