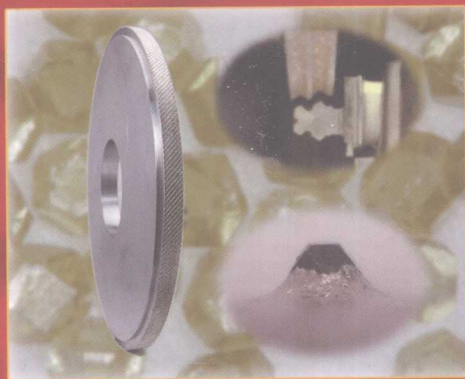




“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

钎焊超硬磨料砂轮 高效磨削理论与技术

·傅玉灿 徐九华 丁文锋 苏宏华 陈 燕 杨长勇 著·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21世纪先进制造技术丛书

钎焊超硬磨料砂轮高效磨削 理论与技术

傅玉灿 徐九华 丁文锋 苏宏华 陈燕 杨长勇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统总结了南京航空航天大学在钎焊超硬磨料砂轮高效磨削基础理论和实际应用中的研究成果。全书共7章,除第1章绪论外,其余部分主要包括高效磨削机理与工具(第2~4章)和难加工材料高效磨削工艺技术(第5~7章)两部分内容。在高效磨削机理与工具部分,重点论述了高效磨削过程材料成屑去除机理、基于磨粒切厚控制的砂轮地貌优化、金刚石与CBN超硬磨料钎焊机理与损伤控制技术、高效磨削弧区热作用机理与强化冷却技术。在难加工材料高效磨削工艺技术部分,分别针对高强韧性钛合金与高温合金、高硬脆性陶瓷与石材以及树脂基复合材料三类难加工材料,重点讨论了高效磨削工艺技术应用中涉及磨削加工性与表面完整性评价、磨削工艺优化、磨削工具研制与修整技术等。

本书可作为高等院校从事磨削加工技术教学人员和机械制造专业本科生与研究生的参考书,也可作为从事高效磨削加工技术领域研究的科研人员的参考书,并可为从事高效磨削技术领域应用开发的工程技术人员提供指导。

图书在版编目(CIP)数据

钎焊超硬磨料砂轮高效磨削理论与技术/傅玉灿等著. —北京:科学出版社, 2016

(“十二五”国家重点图书出版规划项目; 21世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-048325-6

I. ①钎… II. ①傅… III. ①钎焊—超硬磨料—砂轮—磨削 IV. ①TG580.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第109631号

责任编辑: 惠 雪 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第一版 开本: 720×1000 1/16

2016年8月第一次印刷 印张: 24

字数: 489 000

定价: 149.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

张宪民(华南理工大学)

王 煜(香港中文大学)

周仲荣(西南交通大学)

王田苗(北京航空航天大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

查建中(北京交通大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

柳百成(清华大学)

王越超(中科院沈阳自动化所)

钟志华(湖南大学)

冯 刚(香港城市大学)

顾佩华(汕头大学)

冯培恩(浙江大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

任露泉(吉林大学)

黄 田(天津大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

黄 真(燕山大学)

江平宇(西安交通大学)

黄 强(北京理工大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

管晓宏(西安交通大学)

李泽湘(香港科技大学)

雒建斌(清华大学)

李涤尘(西安交通大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

谭建荣(浙江大学)

宋玉泉(吉林大学)

熊蔡华(华中科技大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

翟婉明(西南交通大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '熊有怡' (Xie Youyi). The characters are written in a fluid, cursive style.

华中科技大学

2008年4月

序

高效磨削技术在保证零件加工精度和加工表面质量的前提下可以大幅度提高加工效率，是一项应用前景广阔的加工技术，尤其在难加工材料的高效加工领域具有很大的发展潜力。

钎焊超硬磨料砂轮是一种新型的超硬磨料砂轮。它借助高温钎焊时在磨料、钎料和基体界面上发生的冶金键合作用，可以从根本上改善钎料合金对超硬磨料和工具基体的把持强度；同时可以实现砂轮表面磨料的相对有序合理排布，有效控制磨粒切厚，提高砂轮的动、静态锋利度，增大容屑空间，降低磨削比能，能够适应难加工材料高效磨削工艺的要求。该书阐述了钎焊超硬磨料砂轮高效磨削的基础理论、关键技术和发展及其应用，特别是在超硬磨料钎焊技术基础、磨削弧区热作用机理和典型难加工材料的高效磨削工艺等方面进行详细阐述。

徐鸿钧教授是我国磨削加工领域的著名学者，是钎焊超硬磨料砂轮高效磨削技术的开创者。他的研究团队在高效磨削加工理论与技术研究方面具有较高的学术造诣。该书是在总结徐鸿钧教授及其团队主要研究成果的基础上撰写而成的，内容翔实、文笔流畅，具有严谨的科学学风、新颖的研究前沿动态和完整的学术体系。全书较全面地反映了钎焊超硬磨料砂轮高效磨削理论与技术的最新进展，深入浅出，层次分明，并有典型的应用实例，有很好的可读性和借鉴性。

该书对于磨削加工技术和应用的研究人员具有很好的参考价值。该书的首次出版将大大推动我国磨削加工技术的发展和應用，将为世界磨削加工技术的发展和应用做出重要贡献！因此，我向广大读者推荐此书。



中国科学院院士

2016年4月12日

前 言

当前,随着诸如钛合金、镍基高温合金、金属间化合物、高温结构与功能陶瓷、金属基/陶瓷基/树脂基复合材料等一大批具有优异使用性能但却又特别难加工的新型材料的不断推出,世界加工制造业正承受着巨大的压力,也面临着究竟还能否为这些材料提供高效精密加工技术支持的严峻挑战。确实,其中的某些材料已是现有的工具,包括超硬材料工具都无法“啃动”的超级难加工材料。总体而言,发达国家在关于材料加工(包括工具、机床、工艺)技术的基础水平上一直占有比较明显的领先优势。我国作为制造大国,虽然拥有的生产企业已经覆盖到了包括航空航天、能源动力、高档机床、高速列车等几乎所有的装备行业,但相对于工业发达国家,在加工制造业方面并无特殊优势,并非制造强国。

高效磨削依靠砂轮工作面上众多磨粒的微切削可实现材料的高效去除,也就是说用单一的超硬切削刀具无法完成的任务可由众多磨粒的分解协同完成。特别是以缓进深切磨削、高速超高速磨削、高效深切磨削为代表的高效磨削技术改变了“粗切精磨”的传统分工模式,它在获得零件要求加工精度的同时所能提供的去余量能力在很多情况下远远超过了切削加工,甚至可使材料磨削加工性从根本上发生难易逆转。

近年来,虽然高效磨削技术在理论研究和应用推广方面令人鼓舞,但在充分肯定成绩的同时,仍应清醒地看到,到目前为止国内外为发展高效磨削所做的工作事实上仍存在很大的局限性,尤其是在难加工材料高效磨削的推广应用中还存在着许多问题,特别是磨削热的产生问题和磨削弧区的换热问题。

进一步开发高效磨削的潜力实质就是解决在保证加工精度和加工表面完整性的前提下大幅度提高材料极限去除率的问题。解决这个问题不外乎两种基本方法:①尽可能提高砂轮的锋利度,大幅度降低磨削比能以减少产生的磨削热;②尽可能强化弧区换热以最大限度地疏导已经产生的积聚在弧区的磨削热。据此,本书提出综合了尽最大可能降低磨削比能和最大限度地强化弧区换热的高效磨削理论与技术,将可开拓高效磨削领域的一个极富活力的主要研究方向,并可能将国内外现有高效磨削工艺完善和提高到一个新的水平。

本书是对南京航空航天大学徐鸿钧教授及其四十余名研究生二十年研究成果的总结,详见书末所列文献[1-86];其他同行的相关研究成果也已在参考文献[87-200]中引用。由于篇幅有限,有些学者和单位未能一一列举,特此说明。谨向所有相关的学者和单位致以诚挚的感谢!

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高效磨削发展概况	1
1.2 高效磨削在推广应用中存在的主要问题	4
1.3 关于进一步开发高效磨削潜力的研究构想	6
1.4 本书的编著思路与主要内容	7
第 2 章 磨削成屑机理与磨粒切厚控制	9
2.1 基于单颗磨粒磨削的成屑机理研究方法 with 平台	9
2.1.1 基于磨粒滑擦的传统磨削成屑机理研究方法	9
2.1.2 基于单颗磨粒磨削的成屑机理研究方法	12
2.1.3 单颗磨粒磨削成屑机理研究平台	15
2.2 单颗磨粒磨削磨屑形成机理	18
2.2.1 单颗磨粒磨削过程阶段划分	18
2.2.2 临界成屑厚度的定量分析	23
2.2.3 单颗磨粒磨削力	25
2.3 单颗磨粒磨屑形貌	31
2.3.1 磨屑形貌	31
2.3.2 磨屑绝热剪切变形特征	34
2.3.3 工件磨痕形貌及隆起特征	37
2.4 基于切厚控制的超硬磨料砂轮地貌优化	40
2.4.1 面向强韧材料高效磨削的超硬磨料砂轮地貌优化设计	40
2.4.2 面向硬脆材料高效磨削的超硬磨料砂轮地貌优化设计	59
第 3 章 超硬磨料钎焊技术基础	67
3.1 超硬磨料钎焊的热力学分析	67
3.1.1 钎料选择	67
3.1.2 超硬磨料与钎料界面反应热力学分析	70
3.2 超硬磨料钎焊界面形成与控制	73
3.2.1 钎焊金刚石磨粒界面形成与控制	73

3.2.2	钎焊立方氮化硼磨粒界面形成与控制	94
3.3	超硬磨粒钎焊损伤表征与控制	104
3.3.1	超硬磨粒钎焊损伤的表征	105
3.3.2	超硬磨粒钎焊损伤的控制	117
第 4 章	高效磨削弧区热作用机理与强化冷却技术	132
4.1	高压水射流冲击强化冷却技术	134
4.1.1	关于高压水射流冲击强化换热的传热学基础试验	135
4.1.2	弧区径向向高压水射流冲击强化冷却效果的验证性磨削试验	143
4.2	低温喷雾射流冷却技术	148
4.2.1	低温喷雾射流冷却系统的研制与参数测定	148
4.2.2	低温喷雾射流冷却在钛合金磨削中的应用	152
4.3	基于热管技术的磨削弧区强化冷却技术	153
4.3.1	热管砂轮的结构及工作原理	154
4.3.2	热管砂轮的传热性能	157
4.3.3	热管砂轮的磨削性能	165
第 5 章	强韧难加工材料高效磨削技术	173
5.1	钛合金高效磨削	173
5.1.1	钛合金及其磨削加工特点	173
5.1.2	钛合金缓进深切磨削	174
5.1.3	钛合金高速磨削	185
5.1.4	钛合金干磨抛	194
5.1.5	钛合金榫头高效成型磨削加工	199
5.2	镍基高温合金高效磨削	210
5.2.1	镍基高温合金及其磨削加工特点	210
5.2.2	镍基高温合金缓进深切磨削	211
5.2.3	镍基高温合金高速超高速磨削	218
5.2.4	镍基高温合金高效深切磨削	232
5.2.5	镍基高温合金典型槽试件高效成型磨削	247
5.2.6	镍基高温合金叶片榫头高效成型磨削	250
第 6 章	硬脆材料高效磨削技术	254
6.1	粗磨粒金刚石砂轮高效精密磨削硬脆材料	255
6.1.1	硬脆材料磨削去除机理	255
6.1.2	单层钎焊金刚石砂轮修整技术	258
6.1.3	机械化学复合修整中的砂轮状态	261
6.1.4	单层钎焊粗磨粒金刚石砂轮高速磨削陶瓷材料	267

6.1.5	单层钎焊粗磨粒金刚石砂轮超声辅助磨削	278
6.2	多孔金属结合剂金刚石砂轮磨削氧化铝陶瓷	286
6.2.1	多孔金属结合剂金刚石砂轮结构特点	287
6.2.2	氧化铝陶瓷磨削	289
6.3	有序排布多层钎焊金刚石锯片的石材锯切加工	296
6.3.1	有序排布多层钎焊金刚石锯片结构特点	296
6.3.2	花岗石锯切对比	297
第 7 章	碳纤维树脂基复合材料高效磨削技术	303
7.1	CFRP 材料制孔加工	303
7.1.1	钎焊金刚石套料钻研制	303
7.1.2	钎焊金刚石套料钻的加工机理研究	313
7.1.3	CFRP 材料加工缺陷的控制	323
7.1.4	孔壁粗糙度的控制	332
7.2	CFRP 材料铣磨加工	335
7.2.1	磨削力	335
7.2.2	CFRP 铣磨加工表面形貌及粗糙度	340
7.2.3	CFRP 铣磨加工表层缺陷分析	344
参考文献	354
索引	367

第1章 绪 论

1.1 高效磨削发展概况

本书是对南京航空航天大学高效精密加工技术研究所近二十年来有关钎焊超硬磨料砂轮高效磨削理论与技术研究成果的总结^[1-86]。

有文献提到磨削加工的历史似乎可以追溯到远古的石器时代,因为根据出土的石器有理由推想人类的远祖就曾经利用砂石来修磨他们的石制器械。关于磨削最早的记载,一般认为来自公元前两千多年的古埃及,丰富的考古发现使很多人相信,在古埃及时期就已经开始了对金属器械的修磨加工。不过应该说,直到19世纪在工业作坊中出现专用的磨床和人造磨料磨具以后,才开始有了今天意义上的磨削加工。现代磨削加工则是在更近期才被确立的。追溯这一段历史还可以发现,在20世纪50~60年代以前的漫长历程中,就从毛坯到零件的加工作业而言,磨削与切削一直有着明确的分工,切削通常承担着绝大部分的去余量工作,而磨削则一直扮演着赋予零件最终要求的尺寸形状精度、表面粗糙度和表面完整性的小余量精加工的角色。不过最近三四十年来,磨削与切削的这种传统的分工模式已经发生了很大改变。以磨削加工为例,它在获得零件要求的加工精度的同时,所能提供的去余量能力在很多情况下甚至远远超过了通常的切削加工,每小时去除余量的重量居然可以用吨来计算。磨削加工所发生的这种令人瞩目的变化就是在国外首先崛起的新一代高效磨削工艺所创造的奇迹。

一般而言,工艺的发展总是由科技和生产的需求驱动的,但具体到某一项新工艺的推出则往往又依赖于工艺从业研究人员杰出的创新构思。在近三四十年中先后涌现并已在生产中得到推广应用的以下几项高效磨削新工艺就是最好的例证^[56,87-97]。

1) 高速磨削工艺

平面磨削时单颗磨粒的平均切厚公式

$$a_g = \frac{1}{N_d l_s} \cdot \frac{v_w a_p}{v_s} = \frac{1}{N_d \sqrt{d_s}} \cdot \frac{v_w \sqrt{a_p}}{v_s} \quad (1.1)$$

其中, v_s , v_w 分别为砂轮线速度, 工件速度; a_p , d_s 分别为砂轮切深, 砂轮直径; l_s 为砂轮与工件接触弧长; N_d 为单位圆周长度上的动态有效磨粒数。

由上述公式容易分析得到, 提高砂轮线速度 v_s , 由于可以增加单位时间内参与

切削的磨粒数而使单颗磨粒平均切厚减小,因而在保持单颗磨粒平均切厚不变的条件下就可以通过相应提高工件进给速度 v_w 来提高磨削的材料去除率 $v_w a_p$ 。不过,高速磨削可以提高效率的原因其实远不止于此,亦即我们还不能简单地从纯几何干涉运动的角度来理解高速磨削的工艺优势^[98-101]。众所周知,高速磨削这一杰出的工艺构想源起德国的著名学者 C. Salomon 博士。他在 1931 年就曾经预言,材料的切磨削加工在高速超高速领域有可能会变得更加容易和轻松。尽管限于历史条件,这一预言在当时尚缺乏充分的试验支持,但众多有识之士一直对此寄予厚望。因此在 20 世纪 60 年代初期,当由美国军方资助的以接近 1000m/s 的模拟高速(相当于加农炮弹的出口速度)进行的一项有关高速超高速切磨削机理的基础试验研究终于确证了 Salomon 的预言时,关于高速磨削的实用化研究便迅即加快了步伐。随着诸如高频电主轴、陶瓷滚子轴承、磁悬浮轴承、快进给系统包括直线电机驱动的快进给系统以及可承受高速超高速的超硬磨料砂轮及其在线动平衡等配套技术的开发成功和不断完善,生产用高速磨床磨头的速度便步步登高,60 年代中后期还只在 60m/s 上下,80 年代就已达到 80~120m/s,90 年代又进一步提高到了 150~180m/s。实验室用磨床速度增长更快,已达到 500m/s,相当于步枪子弹的出口速度,有 700m/s 左右。高速磨削近期在国外的势头之所以如此强劲,客观上说明它在生产中推广应用后确已收到了极其显著的技术经济效果,而且预计进一步的开发和投入还可望取得更大的回报。

关于高速磨削机理的后续研究已经揭示,事实上它的突出工艺优势更主要是来源于高速下磨削力、磨削比能以及材料临界成屑厚度的下降特性,这三者的下降特性的综合既意味着高速下材料可磨削加工性的根本改善,也可以理解为是高速下砂轮动态锋利度的显著提高,其结果正如 Salomon 博士在早年所预言的一样,材料的磨削加工在高速超高速条件下确实可以变得更加容易和轻松。文献指出,在严格控制的恒压力磨削试验中,当砂轮线速度从 20m/s 提高到 90m/s,即 v_s 提高 4.5 倍时,材料去除率即可提高 11 倍之多,高速磨削的优势和效果由此可见一斑。

2) 缓进给磨削工艺

缓磨工艺在 20 世纪 60 年代初期诞生于当时的联邦德国。由于缓磨的用量条件与传统磨削几乎完全相悖,对于用砂轮磨削一次切深居然可以达到十几至二十毫米,人们在观念上确实一时很难接受,因而在它刚一被推出时曾经在磨削界引起过轩然大波,虽不乏赞赏的,但更多的是怀疑,上下一片哗然。随着时间的推移,人们才逐步意识到它的价值,才开始承认缓磨工艺的确是以杰出的创新工艺构想成功解决当时生产需求的最值得称道的一个典范。重新回味缓磨工艺从推出到完善的一段历史,对今天的工艺开发研究是有借鉴意义的。

20 世纪 60 年代初期,航空发动机上因为引入镍基高温合金材料而使得涡轮叶片榫头的榫槽加工遇到了困难,由于叶片榫槽属深沟槽,加工余量大,又是配合

面,其型面精度和表面粗糙度要求都比较高,再加上新引入的镍基高温合金材料本身特别难加工,因而在事实已经证明硬质合金成形铣刀根本无法加工的情况下,开始考虑转向磨削谋求出路。不过尽管刚玉砂轮比硬质合金铣刀更适合加工高温合金材料,但磨削的传统小余量作业方式显然也不适合榫槽型面的大余量加工要求。为了提高磨削效率当然可以考虑走高速磨削的路子,但是在 60 年代初期,所谓高速磨的砂轮线速度也仅在 45m/s 上下,可供开发的潜力不大,这就是当时所面临的尴尬局面。正是在这种近乎走投无路的情况下,一种完全突破传统观念的解决问题的创新工艺构想被推到了前台。

其实,若从磨削的纯几何干涉运动角度考察,为了提高材料去除率,除了提高砂轮线速度以增加单位时间内参与切削的磨粒数以外,起码还存在着另外一种可供选择的方案,即采用大切深方案,大幅度增加砂轮工作面上同时参与切削的磨粒数。后一种方案尽管有悖于小余量磨削的传统观念,加之此前从未有人做过类似的设想,听来自然易被人们讥为异想天开,但从上面列出的单颗磨粒平均切厚的公式分析可以发现它倒是切实可行的,因为若选择砂轮切深使之提高 n 倍,则原则上只需将工件速度减小为原来的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$,即可保持单颗磨粒的平均切厚不变,而这时材料去除率却提高到原来的 \sqrt{n} 倍。这就是缓磨工艺的原始构想,亦即大切深的磨削方式尽管有悖于常规,但只要加上配套的缓进给措施,就可以在保持单颗磨粒切除负荷不变的条件下大幅度提高磨削效率。尤其值得称赞的是,大切深这种磨削方式正好可以满足当时深沟槽类型面零件的加工要求。当然,作为一项新工艺的推出,当时还考虑了一些相关的细节,譬如,虽然单颗磨粒平均切厚并不增加(事实上缓磨推出当时并不完全着眼于提高材料去除率,关心的只是能否一次把榫槽型面合格地加工出来,所以单颗磨粒平均切厚实际取得比普通磨削小得多),但因单颗磨粒切削路径加长,切屑体积增加很多,因而当时的缓磨采用的是一种专门制作的大气孔砂轮,意在增加容屑空间,避免可能发生的切屑堵塞。另外由于材料本身特别难加工,加上切除量增加,为了避免烧伤发生,缓磨时还采用了大流量高压喷注磨削液的强冷却措施(大气孔砂轮同时也有贮运更多的磨削液进入弧区的作用)^[102-104]。

在 60 年代初期,成功推出的这一项大切深慢进给的创新磨削工艺虽然可以有条件解决当时镍基高温合金叶片榫槽的加工难题,但是由于一直无法有效地控制生产中常突发的磨削烧伤问题,因而还不能认为是一项成熟的工艺。在进一步完善此项缓磨新工艺的过程中,英国布里斯托大学的 C. Andrew 教授做出了极其重要的贡献,他通过基础研究所阐明的缓磨烧伤的发生机制以及作为控制烧伤的对策所提供的缓磨时砂轮的连续修整方案,为缓磨工艺最终能在生产中大面积推广应用奠定了基础。尤其是考虑到正是在经过完善的缓磨工艺的基础上,导引发展了一代新的高效深切磨削工艺,布里斯托大学 C. Andrew 教授领导的工艺实验室的工

作的确是功不可没。

3) 高效深切磨削工艺

将高速磨与缓进给磨结合在一起是德国学者 P. G. Werner 在 1979 年提出的一项创意, 由此构成的所谓高效深切磨削工艺是由于自然综合了高速磨与缓进给磨两项工艺的优势, 因而发展势头最为强劲, 作为一项被普遍看好的主流技术, 40 年来, 它的发展一直代表着国外高效磨削工艺发展的最高水平^[105]。

4) 高效砂带磨削工艺

砂带磨削可被视作国外高效磨削工艺发展中的一个相对独立的特例, 它同时也是至今唯一一项借磨料的相对有序合理排布, 大幅度提高磨具的静态锋利度, 实现高效磨削的成功范例。至今仍属专利的静电植砂技术由于可使有一定长径比的磨料一律锋刃向外以合理的间距直立排布在砂带的工作面上, 从而就赋予砂带以超常的静态锋利度。以此种静电植砂带磨削钢材, 其比能可被降低到接近切削比能的水平, 材料去除率则高达 $200\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 。由于磨削比能低, 热效应低, 因此砂带磨削可在不加冷却液的条件下实现高效作业。

表 1.1 列出的是与普通往复磨对照的几种主要的高效磨削工艺 (未包括砂带磨削) 的用量选择范围和它们各自可以达到的材料去除率水平。

表 1.1 高效磨削用量及效率的对比

用量参数	磨削工艺			
	普通往复磨削	缓进深切磨削	高速磨削	高效深切磨削
磨削深度 a_p/mm	小, 0.001~0.05	大, 0.1~30	小, 0.003~0.05	大, 0.1~30
工件速度 $v_w/(\text{m}/\text{min})$	高, 1~30	低, 0.05~0.5	高, 1.0~10	高, 0.5~10
砂轮圆周速度 $v_s/(\text{m}/\text{s})$	低, 20~60	低, 20~60	高, 80~200	高, 80~200
材料去除率 $Z/[\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})]$	低, 0.1~10	低, 0.1~10	中, <60	高, 50~2000

从表 1.1 中高效深切磨削的材料去除率数据容易看出, 它确实代表了当今高效磨削工艺发展的最高水平。但是应该强调的是, 高效磨削今天已经达到的水平并不表示就是它能够达到的极限水平, 由于在开发高效磨削的过程中从一开始就忽略了关于弧区热作用机理的基础研究, 没有及时采取一些本来应该采取的对策措施, 因而必然就会在很大程度上束缚高效磨削潜力的更充分的发挥。事实上, 只要认识到这一点, 并且不采取回避的态度, 我们就容易从分析存在问题的症结中自然找到进一步开发高效磨削潜力的思路和对策。

1.2 高效磨削在推广应用中存在的主要问题

高效磨削技术实用化的成功以及已经达到的水平, 无疑是令人鼓舞的。不过在充分肯定成绩的同时, 仍应清醒地看到, 到目前为止国内外为发展高效磨削所做的

工作,事实上仍存在很大的局限性,在推广应用中也存在许多问题,这些问题突出表现在以下两个方面:

1) 磨削热的产生问题

高效磨削时砂轮线速度的提高,虽然可以增加砂轮的动态锋利度并可以收到诸如增加单位时间内参与切削的磨粒数、降低单颗磨粒临界切厚等效果,但无可否认,它同时也带来了空载功耗急剧增加(可达磨削有效功率的4倍以上)、磨削弧区高温、工件特别是难加工材料工件烧伤等一系列难于解决的问题。从根本上来讲,为使高效磨削产生的磨削热最小就应该力求确保磨削比能最小,作者曾按单颗磨粒切厚核算过相关文献提供的若干高效磨削的应用实例数据,发现它们大多均深深地工作在由尺寸效应所决定的最高比能状态下,这无疑是非常不科学的。这说明现有高效磨削仅着眼于利用砂轮在高速下的动态锋利效应来降低比能是显然不够的,因为事实上除了速度因素以外,诸如砂轮的结构(开槽与否)、工作面地貌以及用量组合条件等都可以对磨削比能产生显著影响。因此,如何更为有效地控制和降低磨削比能以减少产生的磨削热,应该是进一步开发和完善现有高效磨削技术的关键问题。至于 Andrew 教授当时为推广应用缓进给磨削工艺而提出的砂轮连续修整方案,其着眼点仅在使砂轮能保持初始锋利状态,因此充其量只能称得上是一种在低水平上控制烧伤的权宜对策,并无进一步开发高效磨削潜力的功效。

2) 磨削弧区的换热问题

1975年,Andrew 教授指导的博士生 G. R. Shafto 将缓磨情况与传热学中受热液流管内沸腾换热的情况相类比,首先解释了缓磨烧伤的发生机理。Shafto 博士认为,在磨削热流密度 q 接近但不超过临界热流密度 q_{lim} ,磨削液处于泡核沸腾状态时,由于磨削液可以直接从工件表面吸收大量汽化潜热,不仅换热效率最高,而且工件表面温度也可稳定维持在磨削液发生成膜沸腾的临界温度 $120\sim 130^{\circ}\text{C}$ 或以下。但磨削热流密度是随着砂轮钝化增长的,这种情况在磨削镍基高温合金、钛合金等难加工材料时尤为严重,因而上述理想换热状态是无法稳定维持的,磨削热流密度一旦增长到超过临界热流密度 q_{lim} ,弧区磨削液发生成膜沸腾后,磨削液就会因汽膜层阻挡而无法再与工件表面接触,于是原本可由磨削液汽化带走的磨削热便会被迫改道进入工件,从而导致工件表层急剧升温并很快发生烧伤。

国内外关于磨削烧伤机理的研究虽然揭示了磨削弧区发生成膜是导致磨削烧伤的原因,但从未有人考虑过如何突破成膜沸腾这一障碍,使在更高的热流密度下仍能获得最佳的换热效果。事实上,这个问题不仅可以解决,而且潜力巨大。应该承认,弧区换热技术在多年时间里未见有质的改进和提高,其根源就在于未能摆脱学科界限的束缚。

针对磨削烧伤问题,虽然人们曾构想了包括常规供液、高压喷注顺流供液、有气流挡板辅助供液以及利用砂轮气孔的内外渗漏供液等各种将磨削液引入弧区的

方法,但却都是将磨削时弧区的热疏导工作简单地理解为只需将足量磨削液引入弧区便可确保换热效果。然而,从传热学角度考虑,这其实是一种误解。这种误解是由于磨削界对磨削液成膜沸腾存在一种十分保守和错误的认识,即认为临界热流密度是仅由磨削液本身性质决定,因而发生在弧区的成膜沸腾是一种只能认识但无法人为干预的客观物理现象。正因此,磨削界至今仍在按照既定的磨削液临界热流密度值来界定可以正常工作的磨削热流密度极限。很明显,正是磨削界在认识上的这一误区极大地限制了高效磨削工艺潜力的进一步开发。因此,纵观已有的弧区冷却工作,基本上只做到了将磨削液引入到弧区使其能参与弧区的换热过程为止,而不能确保引入弧区的磨削液产生满意的换热效果,更无法进行有效的强化换热以获得最佳的换热效果,这就大大地限制了高效磨削时材料去除率的进一步提高。

1.3 关于进一步开发高效磨削潜力的研究构想

进一步开发高效磨削的潜力概括起来就是如何大幅度提高不发生烧伤的材料极限去除率的问题。解决这个问题总不外乎以下两种基本方法:

1) 尽可能提高砂轮的锋利度、大幅度降低磨削比能以减少产生的磨削热

要尽可能提高砂轮的锋利度、大幅度降低磨削比能以减少产生的磨削热,就要求砂轮的工作面具有理想的锋利地貌。因此,我们提出砂轮表面磨料相对有序合理排布实现磨粒切厚可控的新概念,因为磨料的相对有序排布可提高砂轮的动静态锋利度,增大容屑空间,降低磨削比能,使设计制造的砂轮更能够适应高效磨削工艺的要求。同时,进一步深入研究按照不同加工要求和磨削用量组合条件,以比能最小为目标优化砂轮的结构地貌并按优化的结构地貌排布磨料制作高锋利度砂轮的方法和技术,它将更为有效地控制和降低磨削比能以进一步开发和完善现有的高效磨削技术。

2) 尽可能强化弧区换热以最大限度地疏导已经产生的积聚在弧区的磨削热

在砂轮与用量组合条件已定,磨削比能不可能再有大的改善的情况下,弧区换热效率便是决定材料去除率的第一要素,因此,弧区强化传热技术上的任何突破都足以改变高效磨削工艺的现状,使材料去除率跃登上更高的台阶。为了实现弧区的强化换热,我们认为可以借鉴热工领域强化传热的思想,突破成膜沸腾的障碍,使换热系数大幅度地提高,在远高于临界值的磨削热流密度下仍可最大限度地稳定发挥泡核沸腾的换热优势,获得满意的换热效果。将弧区换热提高到一个全新的水平上,便可有效地避免和抑制烧伤。

综上所述,我们提出的综合了尽最大可能降低磨削比能和最大限度地强化弧区换热两项技术的高效磨削新构想,预计可开拓高效磨削领域一个极富活力的主要研究方向,并可能将国内外现有高效磨削工艺完善并提高到一个新的水平。另