



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造技术与应用前沿

GAOSU GAOZHILIANG
MOXIAO LILUN GONGYI ZHUANGBEI
YU YINGYONG

高速高质量磨削 理论、工艺、装备 与应

李蓓智 编著

上海科学技术出版社

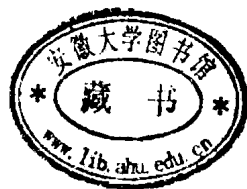


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造技术与应用前沿

高速高质量磨削理论、 工艺、装备与应用

李蓓智



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高速高质量磨削理论、工艺、装备与应用/李蓓智
编著. —上海:上海科学技术出版社,2012.1
(先进制造技术与应用前沿)
ISBN 978—7—5478—1084—2

I. ①高... II. ①李... III. ①高速磨削 IV.
①TG580.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 268436 号

上海世纪出版股份有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 30.75 插页 12

字数 500 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978—7—5478—1084—2/TG·51

定价: 105.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

本书系统地论述了高速高质量磨削所涉及的理论、工艺、装备及其应用中的关键技术。全书共分八章,第一章绪论,提出了高速高质量磨削亟待解决的科学问题,定义了高速高质量磨削涉及的重要概念,概述了 170 多年来磨削研究领域的重要发展阶段及其成果,并对本书的内容框架进行了总体描述;第二章磨削理论与高速磨削机理,概括了基于摩擦学理论的磨削过程和系统建模方法,探讨了单颗磨粒的作用形态及高速磨削的成屑理论,介绍了考察磨削效果涉及的重要计算模型,并对钛合金和陶瓷等不同难加工材料的磨削机理进行了深入的分析;第三章磨削力、热及其耦合效应,主要包括磨粒的作用行为及其表征方法、单颗磨粒的仿真技术及其结果分析、磨削力的演变及其计算模型、磨削热交换理论及能量分配模型,以及相关工程实验方法与应用;第四章高速精密磨床及其性能设计,主要涉及高速精密数控磨床的设计规范、机床工作性能的设计理论与方法、功能部件或整机的动态性能和热态性能分析,以及优化设计案例;第五章高速磨削砂轮与砂轮修整技术;第六章磨削液及其高效冷却装置;第七章高速磨削的测试、监测与测量技术,主要涉及了高速精密磨床的动态性能测试、磨削过程的监测方法及其表征、磨削精度及表面完整性的测量与分析;第八章典型高速精密磨床产品与应用,介绍了国内外著名磨床企业的典型产品、典型应用案例及其全面解决方案。

本书内容翔实,深入浅出,可以作为磨削技术与磨床领域的研发人员、高等院校教师、研究生和本科生的参考书籍。

编撰委员会

先进制造技术与应用前沿

主 任 路甬祥

副 主 任 李蓓智 曹自强

委 员 (按姓氏笔画排序)

王庆林 石来德 包起帆 严仰光

杜宝江 李 明 李 春 李希明

何 宁 何亚飞 陈 明 闾耀保

葛江华 董丽华 舒志兵

学术专家 艾 兴 汪 耕 周勤之

前言

20 世纪 30 年代以来,德国、意大利、瑞士、美国、日本、中国等相继开展了高速磨削的相关研究和典型应用,取得了令人瞩目的研究成果。高速磨削技术的产生与发展,从根本上颠覆了“磨削工艺效率低”的观念,尤其是光学玻璃、陶瓷、单晶硅等新兴材料的广泛应用,极大地推动了高速磨削技术的迅猛发展,国际生产工程学会(CIRP)将高速磨削技术确定为 21 世纪的中心研究方向之一。

与此同时,现代尖端技术产品,如激光核聚变系统反射镜、高密度磁盘、高速全陶瓷电主轴等也对精密磨削提出了更高的要求,不仅要求实现亚微米乃至纳米级的加工精度、纳米级的表面粗糙度,而且还要求极其稳定有效地控制磨削表面波纹、振纹、残余应力、加工硬化层、磨削烧伤及微裂纹等相关表面完整性评价指标。

中国 2006~2020 年的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将极端制造技术列入国家重点支持的前沿技术领域。这不仅说明了极端制造的重要性,而且也反映出实现极高的磨削质量与磨削效率等极端制造问题还需要更加深入的科学研究与工程实践。正如德国磨削专家 Konrad Gühring 博士所言,高性能磨削貌似具有普通“磨削”的名字及磨削对象,但实际上,高性能磨削从磨床、砂轮、冷却和安全装置、工件原始形状,到极端切削条件等整个磨削过程都面临全新的挑战。我国磨削领域专家、中国工程院院士周勤之教授也多次强调,机床是制造的基础,机床创新是使中国成为制造强国的根本。创新需要有很深的研究与实践基础,必须掌握磨削机理、关键功能部件的工作原理、工艺参数、磨床结构等关键技术和科学问题,才能创造出有理论基础和实用价值的高质量、高可靠性和精度稳定性的高档磨床。

综上所述,引发了作者编著本书的愿望,期望总结国内外相关研究成果

及其应用情况,反映东华大学在参加国家 973 计划、国家科技重大专项等项目中的相关研究成果,为提高我国在高速高质量磨削领域的科学研究水平,提升我国高档数控磨床及其测试应用技术等的国际竞争力贡献力量。

本书由东华大学李蓓智策划、组织编著和统稿。第一章、第二章和第八章由李蓓智编著;第三章由朱大虎编著;第四章由杨建国、庞静珠、吴喜如编著;第五章由庞静珠编著;第六章由倪嘉铭编著;第七章由李蓓智、华旻峰、倪嘉铭编著。

书中有关高速高质量磨削的相关研究成果,还凝聚了东华大学机械制造及其自动化学科的王庆霞、吕志军、周亚勤、项前等副教授,王胜利、齐蔚华、于景刚、沈凌燕、刘赏、邬舟平、周振新、冯瑞金、张强、袁益楚、丁子珊、刘杰、李大虎、郭森现等研究生的智慧和辛勤努力的成果,在此向我的同事和研究生们表示衷心的感谢!

感谢西安交通大学卢秉恒院士、山东大学艾兴院士、东华大学周勤之院士给予的引领和鼎力支持,感谢上海机床厂有限公司给予的鼎力支持和技术合作。

感谢湖南大学盛晓敏教授,上海电气集团中央研究院副院长姚俊高工,上海机床厂有限公司副总经理吴晓健教授级高工、副总工程师黄海涛高工,磨削所所长周晓琴教授级高工、王伟荣高工和徐汉新高工,宁波安杰森精密制造有限公司吉启唯总经理,上海申鉴机电技术有限公司曹自强总经理给予的大力支持和帮助!

由于磨削技术的飞速发展,加之作者所及资料 and 水平有限,书中难免有不足甚至错误之处,敬请广大读者批评指正!

本书中涉及技术的相关项目和课题受国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“超高速加工及其装备的基础研究”(2009CB724400)、国家科技重大专项项目“难加工材料轴类零件超高速精密外圆磨床”(2009ZX04001-101)资助。

作 者

目 录

第一章	绪论	1
第一节	高速高质量磨削亟待解决的科学问题	1
一、	高速磨削具有高表面质量的科学依据	2
二、	高效与高质量磨削完美统一的科学依据	2
三、	高速磨削工程应用中的科学问题	2
第二节	高速磨削的几个重要定义	3
第三节	高速磨削的重要发展阶段及其成果综述	4
一、	提高磨削效率的基础研究阶段(1840~1959 年)	6
二、	高速磨削概念与高速磨床的发展阶段(1960~1980 年)	8
三、	典型应用及对高效、超高速磨削的追求阶段(1981~ 2002 年)	12
四、	高速高质量磨床及复合型磨床的发展阶段(2003~2011 年)	14
第四节	高速磨削的重要意义	16
一、	高速磨削的力学物理效应	16
二、	高速磨削对砂轮和磨床的积极效应	18
三、	高速磨削对磨削精度和表面完整性的积极效应	18
四、	高速高质量磨削对节能环保的积极作用	19
第二章	磨削理论与高速磨削机理	21
第一节	基于摩擦学理论的磨削过程与系统建模	21
一、	基于摩擦学的磨削要素及其关联	23
二、	磨削过程的摩擦学系统	27
三、	磨削系统的影响因素及其建模	30

第二节 磨粒作用形态及高速磨削的成屑理论	34
一、磨粒的几何形状及其磨削特点	34
二、单颗磨粒的磨削行为及其表征	36
三、高速磨削的冲击成屑理论	40
四、高速磨削的碰撞侵彻成屑理论	41
第三节 砂轮与工件的接触弧长	44
一、接触弧长的定义	46
二、考虑弹性变形的接触弧长	48
三、考虑磨削热效应的接触弧长	50
第四节 最大未变形磨屑厚度及其计算模型	52
一、基于几何关系的计算模型	54
二、基于磨削层平均体积的计算模型	56
三、基于磨屑平均截面积的计算模型	57
四、考虑弹性变形的计算模型	58
第五节 材料去除率及其计算模型	60
一、传统磨削的材料去除率计算模型	60
二、高速磨削的材料去除率计算模型	60
三、考虑砂轮磨损的材料去除率计算模型	65
第六节 黏性材料的高速磨削去除机理	66
一、黏性材料特性及其难磨特性	66
二、磨削钛合金的砂轮粘附及磨削力	67
三、磨削力实验及其工艺因素的影响机制	67
四、高速磨削机理的有限元仿真及结果分析	75
五、黏性材料磨削机理研究的重要结论	78
第七节 硬脆材料的脆延性转变机制	78
一、硬脆材料的磨削力成因分析	78
二、硬脆材料的延性域磨削机理	79
三、延性域磨削的临界磨削深度计算模型	80
四、工程陶瓷的延性域磨削临界条件考察	84
五、硬脆材料磨削机理研究的重要结论	91

第三章 磨削力、热及其耦合效应**93**

第一节 磨粒的作用行为及其表征	93
一、磨粒的最小切屑厚度及其力的表征	94
二、耕犁作用的摩擦因数及其表征	96
三、磨粒剪切角及其成屑能力的表征	98
第二节 单颗磨粒的仿真及其结果分析	99
一、磨削加工的材料模型	99
二、有限元仿真热、力及其热-力耦合	103
三、高速磨削弧区的磨削力、热作用机制	110
四、高速磨削材料绝热剪切激变行为	114
五、砂轮线速度对磨削尺寸效应的解释	115
第三节 磨削力的演变及计算模型	116
一、磨削力数学模型的建立	116
二、磨削力数学模型的分析	121
三、高速磨削力的经验公式	124
四、法向力与切向力的比值	127
第四节 磨削热交换理论及能量分配模型	128
一、磨削温度概述	129
二、磨削理论热源模型	130
三、磨削能量分配模型	137
第五节 高速磨削弧区热交换理论分析与实验	147
一、热交换理论分析中 R_w 的确定	147
二、高速磨削条件下 R_w 和 $T_{\max}$ 的理论分析	151
三、高速磨削条件下 $T_{\max}$ 弧区位置点的比较	155
四、磨削弧区工件表面及亚表面温度分布	158
五、适合不同难加工材料的磨削弧区温度测试方法与实验	160

第四章 高速精密磨床及其性能设计**168**

第一节 高速精密数控磨床的设计规范	168
一、砂轮主轴转速的设计规范	169

二、驱动与关键部件结构的设计规范	169
三、关键标准部件性能及其匹配设计规范	169
四、主轴工作精度的设计规范	170
五、砂轮主轴动平衡及其动平衡等级的设计规范	170
六、砂轮主轴系统关键部位降温结构的设计及其规范	171
七、砂轮主轴系统温升测试机构的设计及其规范	171
八、主轴系统工作精度测试轴颈的设计及其规范	171
第二节 高速精密磨床性能设计的理论与方法	171
一、静态性能设计的有限元理论与方法	171
二、动态性能设计的有限元理论及计算模型	176
三、热态性能设计的传热学理论基础	180
第三节 高速砂轮主轴部件动态特性分析与设计	183
一、动力学理论仿真的研究方法	183
二、高速砂轮主轴-转子-轴承部件动态特性分析	186
三、高速电主轴-轴承-砂轮部件的动态特性分析	192
四、砂轮主轴箱的动态特性分析及结构改进研究	198
五、砂轮主轴部件的动态特性分析	200
第四节 工件主轴(头架)动态特性分析与优化设计	205
一、工件主轴(头架)的有限元模型	205
二、边界条件的确定	206
三、头架主轴的模态分析	206
第五节 进给工作台的动态特性分析	208
一、进给工作台的三维 UG 模型	208
二、进给工作台的有限元分析模型及边界参数设置	208
三、进给工作台的有限元分析结果及优化设计	209
第六节 高速精密磨床床身的特性分析与优化设计	215
一、床身的静态性能分析	215
二、床身的模态分析	217
三、床身的瞬态响应特性分析	225
四、床身的谐响应特性分析	228
第七节 高速精密磨床整机的动态特性分析与评估	229
一、整机的有限元分析模型	229

二、整机的模态参数与分析	232
三、整机的动态性能评估	234
第八节 高速同步电机主轴部件的热态性能分析与优化设计	235
一、高速同步电机热源及散热状态分析	235
二、高速同步电机定子的冷却方式	236
三、定子表面冷却管道散热分析的理论基础与计算模型	236
四、定子冷却管道结构参数的优化设计	242
五、定子表面的散热仿真与优化	244
六、高速同步电机定子表面散热效果	246

第五章 高速磨削砂轮与砂轮修整技术 **250**

第一节 普通砂轮的基本知识	250
一、砂轮的结构	250
二、砂轮的选用	259
第二节 超硬磨料高速砂轮	260
一、超硬磨料高速砂轮的发展	260
二、陶瓷结合剂高速砂轮	261
三、钎焊砂轮	266
第三节 超硬磨料高速砂轮的整形与修锐	270
一、超硬磨料高速砂轮的整形方法	271
二、超硬磨料高速砂轮的修锐方法	276
三、超硬磨料高速砂轮的整形与修锐实验	283
四、小结	296

第六章 磨削液及高效冷却装置 **297**

第一节 磨削液的类型和组成	297
一、油基磨削液	298
二、水基磨削液	299
第二节 磨削液的作用	301
一、润滑作用	301

二、冷却作用	302
三、渗透与清洗作用	302
四、防锈作用	303
第三节 超硬磨料砂轮磨削液的选择	303
第四节 高速磨削高效冷却装置及技术	304
一、针形高压喷射冷却	306
二、砂轮内冷却	307
三、开槽砂轮冷却	308
四、最小润滑(MQL)技术	309
五、液氮冷却	310
六、低温气动喷雾射流冲击冷却	311
第五节 磨削液特性对磨削性能的影响	312
一、磨削液表面张力对磨削性能的影响	312
二、磨削液黏度对磨削性能的影响	314
三、磨削液摩擦因数对加工表面粗糙度和砂轮堵塞的影响	314
第六节 磨削液对磨削表面完整性的影响	315
一、磨削液对表面粗糙度的影响	315
二、磨削液对磨削表面显微硬度及硬化层深度的影响	315
三、磨削液对残余应力的影响	317
四、磨削液对表面烧伤与磨削裂纹的影响	319

第七章 高速磨削的测试、监测与测量技术 320

第一节 概述	320
第二节 高速精密磨床的动态特性测试技术	323
一、机床动态特性及其研究概述	323
二、动态特性测试分析的理论基础	326
三、磨床动态特性的实验模态技术	331
四、高速精密磨床及其功能部件的动态性能测试及案例分析	335
五、动态性能测试结果的对比分析	357
第三节 磨削过程的监测方法及其表征	362
一、主轴功率的监测及其作用分析	362



二、磨削力监测及其作用分析	366
三、磨削温度的监测及其对磨削结果的作用分析	367
第四节 磨削表面完整性测量	378
一、表面粗糙度测试与分析	378
二、表面残余应力分析	383
第五节 磨削精度的测量与分析	391
一、形位精度测量仪器	392
二、典型磨削及其平面度测量案例	396
三、典型磨削及其圆度测量案例	399
第八章 典型高速精密磨床产品与应用	404
第一节 斯图特(STUDER)产品	405
一、S41 数控万能外圆磨床简介	405
二、S41 数控万能外圆磨床的关键部件及其特点	409
三、S41 高效、稳定和经济的完整解决方案	420
第二节 埃马克(EMAG)公司的主要产品	422
一、埃马克主要产品简介	422
二、VTC 315 DS 型同步支撑磨床及其特点	423
三、PM 系列曲轴磨床及其特点	425
四、埃马克新一代远程专家服务系统	427
五、埃马克机床的其他相关服务项目	429
第三节 上海机床厂有限公司的主要产品	430
一、MGKS1332/H 超高速精密数控外圆磨床简介	430
二、MGKS1332/H 的主要功能部件及其特点	431
三、MGKS1332/H 的动态性能测试及结果	435
四、MGKS1332/H 的典型应用案例及其全面解决方案	439
符号说明	448
参考文献	451

第一章

绪 论

高性能磨削貌似具有普通“磨削”的名字及磨削对象,但实际上,高性能磨削从磨床、砂轮、冷却和安全装置、工件原始形状,到极端切削条件等整个磨削过程都面临全新的挑战。

——Konrad Gühring

高速磨削技术的产生、发展与应用,从根本上颠覆了“磨削工艺效率低”的观念,但是,如何在提高磨削效率的同时进一步提高磨削精度及其表面完整性,如何实现高速磨削的高质量、高效率、低成本的完美统一?在高速高质量磨削理论、工艺、装备的研究与应用领域,目前尚有很多科学问题和关键技术亟待发现与解决。

本章的重点在于,根据国内外有关高速磨削、精密磨削的相关研究成果,结合作者在高速精密磨削方面所开展的科学研究与实践体会,对高速高质量磨削等重要概念进行科学解释和定义,综述国内外有关高速磨削技术与装备的发展历程与实际应用情况,明确开展高速高质量磨削研究与实践的重要意义,并给出本书的结构框架。

第一节 高速高质量磨削亟待解决的科学问题

磨削是现代机械加工领域应用最广泛的精密加工技术,并且在大多数情况下,也是精密零件最后一道加工工艺方法。但是,传统的磨削工艺效率很低,同时,至今为止的磨削加工精度一般为5~7级,粗糙度 Ra 值为 $0.2\sim 0.8\mu\text{m}$,且在磨削过程中经常出现磨削烧伤、微裂纹等表面质量问题。

高速磨削技术的产生、发展与应用,从根本上颠覆了“磨削工艺效率低”的

观念。20 世纪 30 年代以来,德国、意大利、瑞士、美国、日本、中国等都相继开展了高速磨削的研究并取得了许多应用成果。然而,正如德国磨削专家 Konrad Gühring 博士所言,高性能磨削貌似具有普通“磨削”的名字及磨削对象,但实际上,高性能磨削从磨床、砂轮、冷却和安全装置、工件原始形状,到极端切削条件等整个磨削过程都面临全新的挑战。我国在发展高速磨削技术与装备方面亟待解决的科学问题是:

一、 高速磨削具有高表面质量的科学依据

1931 年,德国金属切削物理学家 Salomon 预言,切削速度提高到一定程度时,刀具切削刃上的温度会逆转下降。由此引发的问题是,何谓切削刃温度逆转下降的理论依据? 如何再现或利用 Salomon 的预言? Salomon 预言适用于磨削工艺吗? 工件表面温度是否也会像刀具问题一样逆转下降? 只有清晰地解释上述问题,才能实现和控制高速磨削的高表面质量效应。

二、 高效与高质量磨削完美统一的科学依据

现有研究有关材料去除率、磨屑的最大未变形厚度的计算公式分别见式(1-1)、式(1-2):

$$Z_w = a_p v_w \quad (1-1)$$

$$a_{gmax} = 2\lambda \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_p(d_s + d_w)}{d_s d_w}} \quad (1-2)$$

由式(1-1)可知,仅提高砂轮线速度 v_s ,但不提高工件线速度 v_w 和磨削深度 a_p ,则材料去除率 Z_w 不变,即高速并不高效。

由式(1-2)可知,仅提高砂轮线速度 v_s ,可以减小磨屑的最大未变形厚度 h_{max} ,由此改善和提高表面完整性。但是,当使 $v_s/v_w = C$ (常数),提高 v_s , a_{gmax} 不变,因此,提高 v_s 的同时,如何恰当地把握其他相关工艺参数的取值,需要大量的实验数据和科学依据。

三、 高速磨削工程应用中的科学问题

在国外,120 m/s 砂轮线速度的磨削已得到工业界认可和成功应用,但是

国内大多企业采用 $45\sim 50\text{ m/s}$ 磨削时,仍有表面烧伤、工件内部微裂纹等缺陷。即便使用国外进口的价格不菲的高速磨床,如 $400\text{ 万}\sim 500\text{ 万元/台}$ 的轴承磨床,也很难达到国外企业使用同类机床的效果。其中涉及砂轮价格昂贵、砂轮磨损大与修整难、机床功耗大、工艺参数不易协调等诸多因素,由此反映出工程应用中的许多重要科学问题亟待解决。

第二节 高速磨削的几个重要定义

何谓高速磨削?如何解决磨削加工中出现的表面烧伤与磨削效率之间的难题?如何攻克难加工材料磨削要求等技术瓶颈?如何实现不同材料工件的高速高质量磨削?即如何进一步提高磨削精度和表面质量?如何通过高速磨削工艺与装备实现磨削质量与磨削效率的完美统一?为了回答以上问题,下面先对有关概念进行说明与定义。

1. 高速磨削

通常,高速磨削泛指高的砂轮线速度,即通常按砂轮线速度(v_s)范围定义高速磨削。目前,一般称 $45\text{ m/s} < v_s < 150\text{ m/s}$ 为高速磨削, $v_s \geq 150\text{ m/s}$ 为超高速磨削, $v_s \leq 45\text{ m/s}$ 为普通磨削。

2. 高质量磨削

高质量磨削的内涵是磨削可达到完备的技术指标及其高的等级。完备的技术指标包括加工精度和表面完整性两大方面。表面完整性除表面粗糙度之外,还涉及磨削表面波纹、振纹、残余应力、加工硬化层、磨削烧伤及微裂纹等相关评价指标。高的等级通常指 4 级或更高的加工精度、 $Ra0.2$ 和 $Rz0.4$ 或数值更小的表面粗糙度、数值适当且均匀的残余压应力或符合要求的工件残变量、无表面烧伤及微裂纹等。

3. 高速高质量磨削

使磨削特征或表面获得理想的加工精度、表面完整性、磨削效率和生产成本的砂轮线速度(v_s)及其相关工艺参数(v_w 或 v_s/v_w 、 a_p 或 v_f)等的磨削条件,以实现优质、高效和低耗的机械加工宗旨,或换言之,在保证所要求的磨削质量的前提下,实现其与高的磨削效率和适当成本的完美统一。不同的工件材料,尤其是难加工材料,获得高质量、高效率 and 适当成本的磨削,它们的砂轮线速度及其相关工艺参数会有较大差异。