



普通高等教育机电类“十三五”规划教材
高等院校精品教材系列

现代机械加工新技术

吴 健 韩荣第 主 编
王明海 高胜东 韦东波 副主编

(第3版)

XIANDAI JIXIE
JIAGONG XINJISHU

□□□□ □□□ □□□□ □
□□□ □□□ □□□ □



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机电类“十三五”规划教材
高等院校精品

现代机械加工新技术

(第3版)

吴健 韩荣第 主编

王明海 高胜东 韦东波 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是在第1版及第2版的基础上改编而成的。结合“中国制造2025”重大战略及最新研究成果,本书主要讲述近年来为适应机械制造业和航空航天业发展而出现的满足高效率、高质量要求的机械加工新技术,包括:高速与超高速切削技术、硬态切削技术、绿色切削技术、复合加工技术、特殊切削方法及磨削新技术。内容涉及应用日益增多的先进工程材料——工程陶瓷材料、复合材料、高温合金、钛合金、高强度与超高强度钢、不锈钢等的高效切削与磨削新技术和切削过程有限元仿真技术。本书还较系统地介绍了切削加工过程的切削力预测技术,为新的高性能材料的工程应用提供了高效率、低成本的切削力研究方法。

本书内容新颖、资料丰富、数据可信、图文并茂,实际与理论紧密联系,语言精练,可供高等工科大学机械设计制造及其自动化专业、航空宇航制造工程专业师生使用,也可供相关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代机械加工新技术 / 吴健, 韩荣第主编. —3版. —北京: 电子工业出版社, 2017.5

普通高等教育机电类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-31309-7

I. ①现… II. ①吴… ②韩… III. ①金属切削—高等学校—教材 IV. ①TG5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 074348 号

策划编辑: 赵玉山

责任编辑: 赵玉山

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.75 字数: 557 千字

版 次: 2003 年 5 月第 1 版

2017 年 5 月第 3 版

印 次: 2017 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254556, zhaoyz@phei.com.cn。

前言

本书是在第1版及第2版的基础上改编而成的。第2版所用资料仍略显陈旧,尤其缺少近5年的研究成果,迫切需要增加新成果、新资料,特别是国内的新成果。近几年国家提出了“中国制造2025”等重大战略计划,对机械加工新技术也带来了一些新的变化。现如今,书中的某些技术更完善、更成熟了,应用实例更多、更全面了,如切削过程仿真技术。这次修订还增加了新的切削加工过程的切削力预测技术,充实了机械加工新技术内容。

全书共15章,在第2版的基础上,对原第2、3、7~13章进行了部分修改;原第1、4、5、6、14章修改较多;第1章增加了中国制造2025对先进制造技术影响的相关内容;原第5、6、9章及第7.1节合并重新修订,更符合教材要求;第15章新增了切削加工过程的切削力预测技术。

全书内容丰富、结构严谨、重点突出、语言精炼、图文并茂,既可作为机械设计制造及其自动化和航空宇航制造工程专业本科生、研究生的教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

全书由哈尔滨工业大学(威海)吴健博士和哈尔滨工业大学韩荣第教授主编。其中,第1~6章由吴健、韩荣第和高胜东(哈尔滨工业大学)修订,第7~13章由吴健、王明海(沈阳航空航天大学)和韦东波(哈尔滨工业大学)修订,第14、15章由吴健编写。全书由吴健、韩荣第统稿。

由于水平和时间所限,疏漏和不妥之处在所难免,恳请批评指正。

编者

2017年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 中国制造 2025	1
1.2 先进制造技术	1
1.3 21 世纪的先进制造工艺技术	3
1.4 机械加工技术	3
1.5 本课程的内容	7
思考题	7
第 2 章 高速与超高速切削技术	8
2.1 概述	8
2.1.1 高速切削的概念与高速切削技术	8
2.1.2 高速与超高速切削的特点	9
2.1.3 高速与超高速切削技术的研究发展现状	10
2.1.4 高速与超高速切削对机床的新要求	11
2.2 实施高速与超高速切削的关键技术	12
2.3 独特的主轴结构单元	12
2.3.1 电主轴单元的分类	12
2.3.2 主轴轴承	15
2.3.3 电主轴的冷却和轴承的润滑	16
2.3.4 电主轴的动平衡	17
2.3.5 电主轴的选用	18
2.4 高速直线驱动进给单元	18
2.4.1 高速直线进给传动方式分析	19
2.4.2 高速直线电动机进给单元	20
2.5 高速与超高速切削刀具技术及其系统	27
2.5.1 适用高速与超高速切削的刀具材料	28
2.5.2 高效安全可靠的刀具结构	30
2.5.3 高速切削刀具与机床连接的	

刀柄系统	31
2.5.4 高速切削用新型夹头	33
2.5.5 高速切削刀具的动平衡性能	35
2.5.6 高速与超高速切削刀具的监测技术	36
2.6 高性能的数控和伺服驱动系统	37
2.6.1 用矢量控制原理的 PWM 交流变频控制器	37
2.6.2 高性能高灵敏度的伺服驱动系统	38
2.6.3 精简指令集计算机系统结构的 CNC 系统	38
2.6.4 其他辅助控制技术	39
2.7 高速与超高速切削技术的应用领域	39
思考题	40
第 3 章 硬态切削技术	41
3.1 硬态切削的概念	41
3.2 硬态车削的特点	41
3.3 硬态车削的必要条件	42
3.3.1 硬态车削刀具	42
3.3.2 硬态车削的切削用量	43
3.3.3 硬态车削机床	44
3.4 硬态车削的应用与展望	44
思考题	45
第 4 章 干式（绿色）切削技术	46
4.1 概述	46
4.2 干式切削技术的特点及实施的必要条件	46
4.2.1 干式切削技术的特点	46
4.2.2 实施干式切削的必要条件	46
4.3 实施干式（绿色）切削可采用的方法	49

4.3.1 风冷却切削	49	5.6.2 复合加工技术的评价	102
4.3.2 液氮冷却干式切削	51	思考题	103
4.3.3 准(亚)干式切削	52	第6章 特殊切削加工方法	104
4.3.4 用水蒸气作冷却润滑剂	52	6.1 真空中切削	104
4.3.5 射流注液切削	53	6.1.1 真空度对铜和铝切削的 影响	104
4.4 干式切削技术的发展现状及 应用	54	6.1.2 真空度对中碳钢和钛合金 切削的影响	104
4.4.1 干式切削技术的发展现状	54	6.1.3 真空中的高速与超高速 切削	106
4.4.2 干式切削技术的应用举例	54	6.1.4 在氧气和氩气气氛中的高速 与超高速切削	107
4.5 当前的任务	55	6.2 惰性气体保护切削	108
4.5.1 对切削液的新要求	55	6.3 绝缘切削	108
4.5.2 切削液的发展趋势	55	6.4 电熔爆“切削”	108
4.5.3 限制使用切削液中的有害 添加剂	56	6.5 射流加工技术	109
4.5.4 研制新环保型添加剂	56	6.5.1 概述	109
思考题	57	6.5.2 高压水射流加工装置	111
第5章 复合加工技术	58	6.5.3 高压水射流切除与切断机理	112
5.1 概述	58	6.5.4 高压水射流(WJ、AWJ) 切割应用范围	112
5.2 复合加工技术分类	58	思考题	113
5.3 振动切削加工技术	60	第7章 磨削加工新技术	114
5.3.1 振动切削加工概述	60	7.1 高效磨削新技术	114
5.3.2 振动切削过程	66	7.1.1 重负荷荒磨	114
5.3.3 典型振动切削装置及其应用	73	7.1.2 缓进给大切深磨削	114
5.3.4 振动磨削技术	78	7.1.3 高速与超高速磨削	115
5.3.5 振动研磨技术	84	7.1.4 砂带磨削	116
5.4 加热与低温切削加工技术	86	7.2 超硬磨料的高效磨削技术	117
5.4.1 加热切削加工技术概述	86	7.2.1 超硬磨料的性能分析及应用	117
5.4.2 加热切削方法	87	7.2.2 超高速磨削典型新工艺介绍	118
5.4.3 加热辅助切削机理探究	90	7.3 超硬磨料砂轮的修整技术	121
5.4.4 低温切削技术	93	7.3.1 超硬磨料砂轮修整的概念	121
5.5 磁化切削加工技术	95	7.3.2 超硬砂轮修整方法	122
5.5.1 概述	95	7.4 高精度小粗糙度磨削技术	124
5.5.2 磁化切削方法	95	7.4.1 砂轮表面磨粒应有微刃性和 等高性	124
5.5.3 刀具磁化装置	96	7.4.2 磨床要有足够好的性能	124
5.5.4 磁化切削效果	97		
5.5.5 磁化切削机理探究	101		
5.6 复合加工技术的应用及其评价	102		
5.6.1 复合加工技术的应用	102		

7.4.3	工艺参数选择要合理	125	10.2	高温合金的切削加工特点	169
7.5	磨削加工最新技术	126	10.3	高温合金的车削加工	173
7.6	先进磨削方法在难加工材料加工中的应用举例	127	10.3.1	正确选择刀具材料	173
7.6.1	高温合金的缓进给大切深磨削	127	10.3.2	选择合理的刀具几何参数	175
7.6.2	钛合金的磨削	128	10.3.3	确定合理的切削用量	177
7.6.3	热喷涂(焊)层的磨削	133	10.3.4	选用性能好的冷却润滑剂	178
7.7	超硬砂轮在线电解修整 ELID 磨削技术及应用	133	10.3.5	车削高温合金推荐的切削条件	179
7.7.1	ELID 磨削原理	133	10.4	高温合金的铣削加工	179
7.7.2	ELID 磨削机理与应用	134	10.5	高温合金的钻削加工	182
思考题		135	10.6	高温合金的铰孔	185
第 8 章	高强度钢与超高强度钢的切削加工	136	10.7	高温合金攻螺纹	186
8.1	概述	136	10.8	高温合金的拉削	187
8.2	高强度钢与超高强度钢的切削加工特点	137	思考题		189
8.3	切削高强度钢与超高强度钢的有效途径	140	第 11 章	钛合金的切削加工	190
8.4	高强度与超高强度钢的钻孔与攻螺纹	146	11.1	概述	190
8.4.1	高强度钢与超高强度钢的钻孔	146	11.1.1	钛合金的分类	190
8.4.2	高强度钢与超高强度钢的攻螺纹	147	11.1.2	钛合金的性能特点	190
思考题		148	11.2	钛合金的切削加工特点	193
第 9 章	不锈钢的切削加工	149	11.3	钛合金的车削加工	196
9.1	概述	149	11.3.1	正确选择刀具材料	196
9.2	不锈钢的切削加工特点	152	11.3.2	选择合理的刀具几何参数	197
9.3	不锈钢的车削加工	154	11.3.3	切削用量选择	198
9.4	不锈钢的铣削加工	159	11.4	钛合金的铣削加工	199
9.5	不锈钢的钻削加工	161	11.4.1	正确选择刀具材料	199
9.6	不锈钢的铰孔	163	11.4.2	选择合理的刀具几何参数	199
9.7	不锈钢攻螺纹	165	11.4.3	铣削方式的选择	200
思考题		167	11.4.4	铣削用量	200
第 10 章	高温合金的切削加工	168	11.5	钛合金的钻削加工	205
10.1	概述	168	11.6	钛合金攻螺纹	209
			11.6.1	选择性能好的刀具材料	209
			11.6.2	改进标准丝锥结构	209
			11.6.3	采用跳齿结构	209
			11.6.4	采用修正齿丝锥	210
			11.6.5	切削液的选用	210
			11.6.6	螺纹底孔直径的选取	210
			11.6.7	攻螺纹速度的选取	211
			思考题		211

第 12 章 工程陶瓷材料的切削加工	212
12.1 概述	212
12.1.1 陶瓷材料的分类	212
12.1.2 陶瓷制品的制备	213
12.1.3 陶瓷的组织结构	214
12.2 工程陶瓷材料的性能及脆性破坏机理探讨	214
12.2.1 与切削加工相关的陶瓷材料的性能	215
12.2.2 陶瓷材料脆性破坏机理探讨	216
12.3 工程陶瓷材料的切削	217
12.3.1 陶瓷材料的切削加工特点	217
12.3.2 几种常用陶瓷材料的切削加工	221
12.4 工程陶瓷材料的磨削	233
12.4.1 陶瓷材料的磨削特点	233
12.4.2 正确选择金刚石砂轮的性 能参数	237
12.4.3 新型金刚石砂轮的开发	243
12.4.4 提高陶瓷材料磨削效率 的其他方法	246
12.4.5 陶瓷材料的研磨与抛光	246
12.5 陶瓷材料加工性的评价	246
思考题	247
第 13 章 复合材料与复合构件的 切削加工	248
13.1 概述	248
13.1.1 复合材料的概念	248
13.1.2 复合材料的分类	248
13.1.3 复合材料的发展与应用	250
13.1.4 复合材料的增强相(或 分散相)	252
13.1.5 复合材料的增强机理	253
13.2 纤维增强树脂基复合材料 FRP 简介	253
13.2.1 FRP 的性能特点	253
13.2.2 影响 FRP 性能的其他因素	254
13.2.3 常用的 FRP	255
13.3 FRP 的切削加工	257
13.3.1 FRP 的切削加工特点	257
13.3.2 FRP 的车削加工	258
13.3.3 FRP 的钻孔	263
13.3.4 FRP 的铣削加工	275
13.3.5 切断加工	275
13.4 碳纤维/碳(C_f/C)复合材料 的切削加工	277
13.5 金属基复合材料的切削加工	277
13.5.1 切削加工特点	277
13.5.2 不同加工方法的切削加工 特点	280
13.6 碳纤维增强碳化硅陶瓷复合 材料 C_f/SiC 的切削加工	289
13.7 复合构件的钻孔技术	289
13.7.1 CFRP 与 Ti 合金叠层复合 构件钻孔	289
13.7.2 复合装甲构件钻孔	290
思考题	291
第 14 章 难加工材料切削过程的有限 元仿真技术	292
14.1 概述	292
14.1.1 有限元法简介	292
14.1.2 常用的有限元分析软件 简介	293
14.2 材料性能实验手段	295
14.2.1 材料动态力学性能实验法	295
14.2.2 直角切削试验法	296
14.3 常用的材料本构方程(模型)	296
14.4 切削仿真的应用实例	299
14.4.1 切削变形	299
14.4.2 切削力	304
14.4.3 切削温度	307
14.4.4 刀具磨损	307
14.4.5 加工表面残余应力	309
14.4.6 典型有限元软件的建模过 程范例	310

思考题.....316

第 15 章 切削加工过程切削力预测技术.....317

15.1 概述.....317

15.1.1 切削过程中的切削力.....317

15.1.2 切削力模型.....317

15.2 切削力理论预测模型.....318

15.2.1 直角切削模型.....318

15.2.2 斜角切削模型.....319

15.3 钻削力预测模型.....320

15.3.1 钻头几何角度^[120].....320

15.3.2 钻削力理论模型.....323

15.4 典型难加工材料的钻削力预测.....326

15.4.1 1Cr18Ni9Ti 的钻削力.....326

15.4.2 Ti6Al4V 的钻削力.....327

15.4.3 GH4169 的钻削力.....327

思考题.....328

参考文献.....329

1.1 中国制造 2025

制造业是国民经济的支柱产业，也是我国参与全球分工合作、提升国际竞争力的重要领域。党的十八大以来，我国制造业发展取得了显著成就，为全面建成小康社会和实现中华民族伟大复兴奠定了坚实基础。进入新时代，我国制造业发展面临新的机遇和挑战。《中国制造 2025》作为我国实施制造强国战略第一个十年行动纲领，明确了我国制造业发展的指导思想、基本原则、主要任务、重点工程、保障措施等，为我国制造业高质量发展提供了行动指南。

《中国制造 2025》提出，要加快发展先进制造业，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。要深入实施制造强国战略，加快构建现代产业体系，提升制造业核心竞争力。要推动制造业与互联网深度融合，发展智能制造，提高制造业生产效率和产品质量。要推动制造业绿色发展，加强节能环保，降低资源消耗和环境污染。

《中国制造 2025》还提出，要推动制造业服务化，发展服务型制造，提高制造业附加值。要推动制造业国际化，加强国际合作，提升我国制造业的国际竞争力。要推动制造业人才队伍建设，培养高素质的制造业人才队伍，为制造业高质量发展提供人才支撑。

1.2 先进制造技术

- 先进制造技术是指以下列内容：
- ① 先进制造工艺技术
 - ② 先进制造装备技术
 - ③ 先进制造材料技术
 - ④ 先进制造管理技术

第1章 绪论

制造业是一个国家的基础和支柱工业，它的水平和实力反映一个国家的生产力水平和国防能力，对国家的经济建设、繁荣富强和国家安全至关重要。

在整个制造业中，机械制造业占有特别重要的地位。因为机械制造业是国民经济的装备部，国民经济各部门的生产水平和经济效益在很大程度上取决于机械制造业所提供装备的技术性能、质量和可靠性。《中国制造 2025》重大战略的实施，对机械制造业也提出了明确的发展方向，如绿色制造、先进制造等。

先进制造技术是制造技术的最新发展，它早已超越了传统的制造技术、工厂与车间的边界，它包容了从市场需要、创新设计、工艺技术、生产过程组织与监控、市场信息反馈在内的工程系统。先进制造技术是以先进制造工艺技术、计算机应用技术为核心的信息、设计方法、工艺技术、物流工程及相应的管理工程集成的现代制造工程，是不断更新发展的高技术体系。

1.1 中国制造 2025

目前，我国的制造业大而不强。为此，2015 年 5 月国务院正式颁布了《中国制造 2025》文件，其总目标就是要由大变强，建设成制造强国。文件提出了三步走战略：第一步，到 2025 年，经过 10 年努力，能够进入世界制造业强国行列。第二步，到 2035 年，希望能够进入世界制造强国阵营较高水平，大体上可以接近或者达到德国或日本的水平。第三步到 2045 年，或者到建国 100 周年，也就是 2049 年，希望我国能够进入世界强国的前列。建设制造强国要以创新驱动为指导思想，以强化先进工艺基础为技术支撑，以智能制造为突破口。

《中国制造 2025》包括五大工程实施方案：制造业创新中心建设工程、智能制造工程、工业强基工程、绿色制造工程及高端装备制造业工程。十大重点领域包括：新一代信息通信技术产业，高档数控机床和机器人，航空航天装备，海洋工程装备及高技术船舶，轨道交通装备，节能与新能源汽车，电力装备，新材料，生物医药及高性能医疗器械，农业机械装备。

工业发达国家都在重振制造业，如德国的工业 4.0，美国的国家制造创新网络等。柳百成院士对国际先进制造技术的发展趋势做了很好的归纳，主要有四点：①制造技术与高技术的集成；②数字化、智能化的制造技术；③极端工作条件下的制造技术；④轻量化、精密化、绿色化的制造技术。

1.2 先进制造技术

先进制造技术包括下列内容^[1]：

- ① 先进制造工艺技术；
- ② 信息技术和综合自动化技术；
- ③ 先进管理技术。

1. 先进制造工艺技术

先进制造工艺技术离不开设备,先进制造工艺与设备是先进制造系统的工艺基础与装备,是实现优质、高效、低耗、清洁生产的基础,是产品质量和市场竞争力的基本保证。因此,先进制造工艺与设备是计算机集成制造技术的重要支柱之一。先进制造工艺技术包括以下内容:

(1) 少无余量精密成型技术

少无余量精密成型技术是实现高效与清洁生产的关键技术。

(2) 精密与超精密加工技术

精密与超精密加工技术大致可分为三个层次:一是用于汽车、飞机与精密机械的微米级($10\sim 1\text{ }\mu\text{m}$)精密加工;二是用于磁盘与磁鼓制造的亚微米级($1\sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$)精密加工;三是用于超精密光电子器件的毫微米级($0.1\sim 0.001\text{ }\mu\text{m}$)精密加工,即纳米级加工。

(3) 新材料的成型与加工技术

新材料的成型与加工是指高分子材料、复合材料、精细陶瓷与超硬材料等的成型和加工。

(4) 构件或材料间的连接技术

构件或材料间的连接技术包括复合材料制作的精密零件间的粘接、精密焊接和铆接等连接技术。

(5) 表面新技术

表面新技术包括表面改性、涂层、修饰技术等。

这其中,(2)、(3)两项所述技术都是与先进切削磨削加工技术——机械加工技术有关的。

2. 信息技术和综合自动化技术

信息技术和综合自动化技术是先进制造技术发展的高级阶段的重要组成部分。即在数据库技术、接口与通信、集成框架软件工程、人工智能专家系统和神经网络、决策与支持系统、系统监督与诊断等基础信息的基础上,实现将企业内外市场、技术、生产、经营有机地集合,实行统一控制与协调的计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System) 与敏捷制造 AM (Agile Manufacturing)。

3. 先进的管理技术

没有先进管理技术的完美配合很难形成先进制造技术。先进管理技术包括:数据标准、工艺标准、质量标准、生产计划与控制、质量管理、市场分析、用户与员工培训等先进管理技术的基础要素。

先进管理技术与先进制造技术的优化组合最终形成精益生产或敏捷制造技术。敏捷制造技术是以柔性生产技术和动态组织结构为特点,以高素质、协调良好的工作人员为核心,实行企业网络化集成,形成快速响应市场需求的社会化制造系统。它是以准时生产 JIT (Just In Time)、成组技术 GT (Group Technology) 和全面质量管理 TQC (Total Quality Control) 为支柱,并引入并行工程 CE (Concurrent Engineering) 和整体优化概念形成的。敏捷制造技术在空间和时间上合理地配置和利用生产要素,发挥了以人为核心的整体制造系统效益。

1.3 21 世纪的先进制造工艺技术

21 世纪先进制造工艺技术具体体现在下列方面^[2]:

(1) 切削与磨削加工的高精度化

精密零件的精度要求达到 nm 级, 切削与磨削加工的高精度化是今后技术革新的重要基本课题。

(2) 切削与磨削加工的高速化和高效率化

目前研究的主轴转速已达 300 000 r/min 以上, 进给速度 $v_f = 120$ m/min。用 PCD (Poly Crystalline Diamond) 刀具切削铝合金时, 切削速度可达 $v_c \geq 10\,000$ m/min; 用 CBN (Cubic Boron Nitrogen) 刀具切削球墨铸铁时, 切削速度 $v_c \geq 5\,000$ m/min。各国都在开展研究高速加工钢材及不锈钢、高温合金、钛合金等难加工材料的工作。

(3) 降低加工成本

加工成本若不能降低, 就无法使先进制造技术产生应有的经济价值。

(4) 缩短加工周期

制造业中计算机集成制造 CIM (Computer Integrated Manufacturing) 的采用, 使得工业产品的生产周期大幅度地缩短。

(5) 切削与磨削加工的自动化和无人化

产品从订货、生产到交货均可完全由 CIM 控制, 实现无人化车间。

(6) 使自动生产系统向多品种、小批量的自动化和无人化加工方向发展

(7) 开发新材料难加工材料的加工技术

Inconel 超耐热合金 (高温合金)、Ti 合金 (Ti-6Al-4V) 等已不局限于航空航天领域, 在船舶、汽车、核能、石化、海水淡化设备、垃圾处理焚烧炉及热分解炉等各工业领域也已逐渐采用各种各样的难加工材料。包括有纤维增强塑料 FRP (Fiber Reinforced Plastics)、纤维增强金属 FRM (Fiber Reinforced Metal)、工程陶瓷、非晶态合金、高熔点金属及其合金的用量也在不断增多。

技术革新的历史也是材料不断革新的历史, 具有优异性能的新材料不断地被开发出来。一般认为, 新材料的切削加工都较困难。

21 世纪将是新材料和难加工材料应用不断增多的时代, 切削与磨削加工技术也将面临更大地考验。

1.4 机械加工技术

机械加工技术通常是指切削和磨削加工技术。随着科学技术的发展与进步, 尽管在过去的几十年里, 不断出现了许多新的加工方法, 如电物理加工、电化学加工、激光束和离子束加工、精密铸造和精密锻造成型加工方法等, 并且得到了较广泛地应用和发展, 但是切削和

磨削加工仍是迄今为止机械制造应用最多、最广、最为主要的加工方法。据专家估计,机械制造中约有 30%~40% 工作量是切削和磨削加工,对于尺寸和形状的配合精度要求越高的零件(在微米内),就越必须经过切削和磨削加工来完成,至今还没有更好的加工方法。因此,重视切削和磨削加工技术的研究,不断提高切削和磨削加工技术水平,对提高一个国家的机械制造技术水平和机电产品的性能、质量及市场竞争力具有十分重要的意义,所以切削和磨削加工技术理所当然地受到了所有工业发达国家,如美、德、日、英等国的极大重视。

衡量一个国家的切削和磨削加工技术水平的高低可从三个方面考虑:一是考虑机械制造业中普遍采用的切削用量(v_c 和 f) 达到的加工精度、生产效率和加工质量等;二是考虑在切削和磨削加工中的自动化、柔性化程度以及在超精密加工、难加工材料(如特硬、特软、特黏及特脆材料等)加工方面所具有的能力和水平;三是考虑切削和磨削加工中的材料消耗、能量消耗和所产生的环境污染(切削液和噪声污染)等^[3]。

由此可见,现代切削和磨削加工技术,即机械加工新技术,不仅涉及切削和磨削加工机理和工艺方法方面的问题,也涉及到所需的技术装备,包括机床、刀具、磨料、磨具、量具、量仪及监测监控技术等诸方面的问题。而且前者是发展和提高切削和磨削加工技术水平的依据,后者(技术装备)则是实现发展和提高切削和磨削加工技术水平的保证。二者必须同步发展,相互适应。

1. 机床技术的发展

为适应国民经济发展的需要,现代机床正在向高速化、高精度化和自动化方向发展。中国制造 2025 国家重大战略已把高档数控机床列为十大重大领域之一。

(1) 机床的高速化

航空和航天工业、轿车工业的迅猛发展,迫切要求生产高效率。高效率的根本途径就是生产的高速化。特别是 20 世纪 90 年代以来,随着电主轴和直线进给电动机在机床上的应用,使得机床的主运动和进给运动的速度大大提高。航空和航天工业是高速与超高速加工传统的应用领域,最新发展趋势是采用整体铝合金坯料“掏空”制造飞机的机身和机翼等大型零件,用以代替传统的拼装结构。例如,美国 CINCINNATI 公司以往用于飞机制造的铣床主轴转速为 15 000 r/min,现在已经提高到了 40 000 r/min,功率从 22 kW 提高到了 40 kW。Hyper Mach 铣床已提高到了 60 000 r/min,功率达 80 kW。Hyper Mach 铣床采用了直线电动机,工作行程进给速度最大达 60 m/min,空行程快速达 100 m/min,加速度达 2g。该铣床试切一薄壁飞机零件,仅用了 30 min。意大利的 JOBS 公司 2000 年用于航空和模具工业的高速大型铣床 Linx,其主轴转速为 24 000 r/min,功率为 44 kW,进给速度为 60 m/min,加速度为 0.6g。据称,由于电主轴的高速和直线电动机进给的高速,使得加工时间减少了 50%,机床结构大大简化,机床零件减少了 25%,使得维修也变得容易。

轿车工业也是高速加工应用的一个重要领域,据报道,现在已采用高速加工中心代替多轴组合机床,提高了产品生产的柔性,有利于产品的更新换代。上海通用汽车公司已用高速加工中心代替部分组合机组成新生产线。

淬硬模具钢的加工也采用高速铣削,这又推动了电加工机床实现直线电动机进给,也使电加工大大减少了加工时间,提高了模具加工的生产效率。

据报道,现在正在研制主轴转速为 300 000 r/min,直线进给速度达 200 m/min 的新加工中心。当然,这么高转速和这么快进给速度的机床也必须实现自动化和高精度才有意义。

(2) 机床的高精度化

要想满足航空和航天,特别是微电子产品和光学产品性能的要求,必须解决超精密加工技术问题,其核心是要有超精密加工机床。美国的超精密机床水平是全世界公认的。美国pneumo公司的MSG-325金刚石车床主轴回转精度可达 $0.025\text{ }\mu\text{m}$,加工形状精度为 $0.1\sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$,加工有色金属工件的表面粗糙度 R_a 为 $0.01\sim 0.02\text{ }\mu\text{m}$ 。

美国1983年研制的大型金刚石车床DTM,可加工直径 $\phi 2100\text{ mm}$,质量为 4500 kg 的工件;1984年研制的大型光学金刚石车床LODTM,可加工直径 $\phi 1625\text{ mm}$,质量为 1360 kg 的工件。它们的主轴分别采用空气轴承和高压液体静压轴承,刚度高、动态特性好;采用精密数字伺服控制内装式CNC系统和激光干涉测长仪,以实现随机测量定位;用压电式微位移机构以实现刀具的微量进给(nm 级位移);用恒温油淋浴系统,使油温控制在 $20\pm 0.0005^\circ\text{C}$,以消除加工中机床的热变形;还采用了压电晶体误差补偿技术,使得加工精度达到 $0.025\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 达 $0.0042\text{ }\mu\text{m}$ 。DTM既可加工平面、球面,又可加工非球曲面。

英国1991年研制成功了OAGM2500大型超精密机床,专门用于加工X射线天体望远镜的大型曲面反射镜,其工作台为 $2500\text{ mm}\times 2500\text{ mm}$,还有 $\phi 2500\text{ mm}$ 高精度回转工作台。机床采用精密数控驱动,用分辨率为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的双频激光测量系统检测运动位置并向数控系统反馈。OAGM2500大型精密机床的精度大大高于过去的同类机床。

此外,20世纪90年代以来,高速铣床和高速铣削加工中心的精度也在不断提高。例如,德国和日本研制的高速铣削加工中心,主轴转速达 60000 r/min ,进给速度达 80 m/min ,加速度 $2g\sim 2.5g$,其重复定位精度达到了 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 。

目前,在加工精度方面,我国普通级数控机床的加工精度可达到 $5\text{ }\mu\text{m}$,精密级加工中心可达到 $1\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$,且超精密加工精度已进入纳米级($0.001\text{ }\mu\text{m}$)。在加工速度方面,以电主轴和直线电机的应用为特征,使主轴转速大大提高,进给速度达 60 m/min 以上,进给加速度和减速度达到 $2g$ 以上,主轴转速达 100000 r/min 以上。

(3) 机床的自动化

机床的自动化乃是提高生产效率和产品质量的必然途径。自动化包括两个层次:一是大批量生产的自动化,二是中小批量生产的自动化。过去的自动线生产早已解决了大批量生产的自动化。数控化乃是实现中小批量生产自动化最可行的办法。

数控化使制造技术从手工制造、机械制造、自动化制造推进到了信息化制造。因此,数控化率已成为当今衡量一个国家制造技术水平高低的重要指标。20世纪80年代发达国家机床的数控化率已达10%;日本在1994年就达到了20.8%,它的机床年产量的70%以上为数控机床;很多发达国家在航空、航天、造船、模具、机床制造业中机床数控化率高达30%~70%,制造业已发展到了一个很高水平。但我国1995年数控化率才只有1.9%,1998年机床总产值中数控机床产值只占21%,即便在机床数控化率较高的飞机制造厂,其数控化率也只有10%~20%^[4]。中国制造2025明确提出,到2025年中国的关键工序数控化率将从2015年的33%提升至64%。

为提高效率,多轴联动和机床的复合化也是机床发展的新方向,如近些年出现的车铣复合加工中心就是一例。

永磁环形伺服力矩电机将在复合转台和复合主轴头A、C轴伺服传动中取代蜗轮蜗杆副,采用一个复合主轴头就可实现5个面加工,对大型模具加工非常有利。车铣复合加工中心可

实现在一次装夹中就可把大直径整体材料加工成发动机曲轴,用 X、Y、C 三轴联动就可加工出连杆轴颈和曲拐的多个表面。

(4) 智能化

智能化是指机床工作过程智能化,即利用计算机将信息、网络等智能化技术有机结合,对数控机床进行全方位的监控。包括数控系统中的各个方面,如为提高驱动性能及使用连接方便等方面的智能化,为追求加工效率和加工质量方面的智能化,简化编程、简化操作方面的智能化;还有智能化的自动编程、智能化的人机界面等,以及智能诊断、智能监控等方面的内容^[189]。“将机床与智能机器人融合”也是已提出的提升机床智能化水平的一条途径^[190]。

(5) 绿色化

绿色的核心概念是减少对能源的消耗。绿色机床应该具备的特征有:机床主要零部件由再生材料制造;机床的重量和体积减小 50%以上;通过减轻移动部件质量、降低空运转功率等措施使功率消耗减少 30%~40%;使用过程中的各种废弃物减少 50%~60%,保证基本没有污染的工作环境;报废机床的材料接近 100%可回收^[191-193]。

2. 刀具技术的发展

高速与超高速机床的出现,使得在切削加工技术步入以高速切削 HSC (High Speed Cutting) 为重要特征的全新发展阶段。新型刀具材料和涂层技术的发展又为高速切削工艺的实现创造了条件。20 世纪 70 年代化学气相沉积 CVD (Chemical Vapor Deposition) 法和物理气相沉积 PVD (Physical Vapor Deposition) 法硬质涂层技术的出现是刀具材料发展的一次重大变革,硬质涂层为刀具切削性能的提高开创了历史新篇章。至今涂层材料的发展,已由最初的单一 TiN 涂层、TiC 涂层,经历了 TiC-Al₂O₃-TiN 复合涂层和 TiCN, TiAlN 等多元复合涂层的发展阶段,又发展到了 TiN/NbN, TiN/CN 等多元复合薄膜材料,使得刀具涂层材料的性能有了更大提高^[5]。

自 20 世纪 70 年代初采用低压化学气相沉积法合成金刚石薄膜以来,经过近 30 年的攻关,低压气相合成金刚石技术已有了重大突破。1995 年 Sandvik Coromant 公司已把涂复金刚石层的硬质合金可转位刀片投放市场,金刚石硬质合金刀具的商品化是涂层技术的又一个重大成就,这种刀片有极好的切屑控制性能,使切削力大大减小且不生成积屑瘤,加工工件的表面质量极好,刀具寿命比常用刀具高 10 倍。日本 OSG 公司开发的超微细金刚石涂层硬质合金立铣刀,加工高 Si-Al 合金时,表面粗糙度 Ra 可达 0.66 μm ,明显优于粗颗粒金刚石涂层高速钢 HSS (High Speed Steel) 立铣刀,且刀具寿命也有较大提高。如能解决金刚石的热稳定性问题,金刚石涂层硬质合金刀具还可能用于钢铁材料的加工,我们正期待着这一天的到来。

20 世纪 80 年代以来,美国科学家又开始了合成氮化碳 (CN) 的研究工作,这也是世界材料科学领域的热门课题。近年日本已合成氮化碳的维氏硬度达 6 380HV (63.8 GPa),很有希望达到或超过金刚石 10000HV (100 GPa) 的水平。还有一项尚待突破的技术就是立方氮化硼 CBN 薄膜合成技术,这将是 21 世纪要解决的刀具又一重大突破性技术,因为 CBN 可高速精加工钢铁材料。近年来,高速切削、硬切削、干切削等新的工艺快速发展,已经成为现代切削加工共性基础技术的重要发展方向。纳米晶粒硬质合金技术、陶瓷材料的增韧技术, CBN、PCD 的粒度控制技术等是主要核心技术。

3. 磨削技术的发展

20 世纪 70 年代以来,磨削加工技术也有了很大发展,新研制和开发了很多高效、高质量、高精度磨削加工新工艺与新方法。例如,重负荷荒磨削、大切深缓进给磨削、高速和超高速磨削、高精度小粗糙度磨削、砂带磨削,特别是超硬磨料砂轮在线电解磨削(ELID)技术、快速点磨削新工艺、CBN 蜗杆砂轮硬齿面齿轮磨削、珩磨内齿轮新工艺等。国外磨削速度已高达 150~180 m/s,试验速度在 200~250 m/s 以上,超高速磨床已推向市场了。

2010 年,日本 Makino 等公司展出亚微米级超精密机床。近年来,日本成功研制出磨削速度 400 m/s 的超高速平面磨床。2011 年汉诺威欧洲国际机床展上,万特公司展示了周边负倒棱磨床 WAC 715 QUATTRO,即使对于很硬的材料也能实现高效率、高精度磨削。近年来,湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心等单位联合研发了 Olymball-D600 精密球体研磨机。随着新型超高速磨削砂轮的应用与发展,高速大功率主轴单元制造,新型磨削液及砂轮修整等相关技术及磨削数控化和智能化等技术的发展,高速和超高速磨削技术的发展前景将非常广阔。

随着科学技术的不断发展,切削和磨削加工技术还在不断地发展。

以上这些都标志着机械加工技术已发展到了一个新阶段。

1.5 本课程的内容

本课程的目的在于介绍当今机械加工的最新技术,包括起源并应用于飞机制造业和汽车制造业的高速与超高速切削技术,应用新刀具材料的硬态和干式(绿色)切削与磨削技术,解决难加工材料精密加工的复合加工技术,如振动切削和磨削技术、加热辅助切削与低温切削技术、其他特殊切削加工方法、磨削加工新技术。接着,对几种典型新材料与难加工材料,如高强度钢与超高强度钢、不锈钢、高温合金、钛合金、工程陶瓷及复合材料等的切削加工技术进行研究,以期掌握其切削加工特点、加工机理及有效加工方法等。最后,研究了典型难加工材料切削过程的切削力预测技术及有限元仿真技术。

思考题

- 1.1 中国制造 2025 重点领域有哪些?
- 1.2 先进制造技术的含义是什么?它包含哪些方面的内容?
- 1.3 21 世纪的先进制造工艺技术具体体现在哪些方面?
- 1.4 衡量一个国家的切削与磨削加工技术水平从哪几个方面考虑较为合适?
- 1.5 如何理解机床技术的发展方向?

第 2 章 高速与超高速切削技术

高速与超高速切削技术是一种先进制造技术,是 21 世纪切削加工领域重大的技术性课题之一,具有广阔的应用前景。

2.1 概 述

2.1.1 高速切削的概念与高速切削技术

高速切削理论是 1931 年 4 月德国物理学家 Carl. J. Salomon 提出的。在当时硬质合金 WC+Co 刚出现的实验条件下,这只能是一个假说。他指出,在常规切削速度范围内(见图 2.1

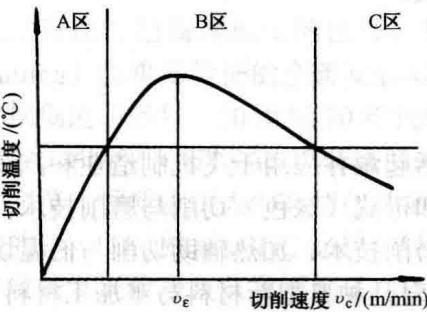


图 2.1 高速切削的概念^[100]

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,且该切削速度值 v_{c0} 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 2.1 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,称该区为“死谷”。虽然由于实验条件的限制,当时无法付诸实践,但这个思想给后人一个非常重要的启示,即如能越过这个“死谷”,在高速区(见图 2.1 中 C 区)工作,有可能用现有刀具材料进行高速切削,切削温度与常规切削基本相同,从而可大幅度提高生产效率。

关于假说中的“切削温度”,如果指切削工件表面的温度,该假说已得到了很多研究者的切削试验的验证,但若指真正的切削区平均温度,即真正意义的切削温度的话,至今还没有得到切削试验的验证,只是得到了随切削速度的进一步提高,切削温度上升趋势减缓了的结论^[101]。

高速切削是个相对的概念,究竟如何定义,目前尚无共识。由于加工方法和工件材料的不同,高速切削的高速范围也很难给出,一般认为应是常规切削速度的 5~10 倍。

高速切削的速度范围见表 2-1 和表 2-2^[100, 101]。

表 2-1 不同材料的高速切削速度范围

工件材料	高速范围/(m/min)	超高速范围/(m/min)
钢	500~2 000	>2 000
Al 合金	1 000~7 000	>7 000
黄铜、青铜	900~5 000	>5 000
铸铁	800~3 000	>3 000
Ti 合金	100~1 000	>1 000
Ni 基合金	50~500	>500
纤维强化塑料	1 000~8 000	>8 000