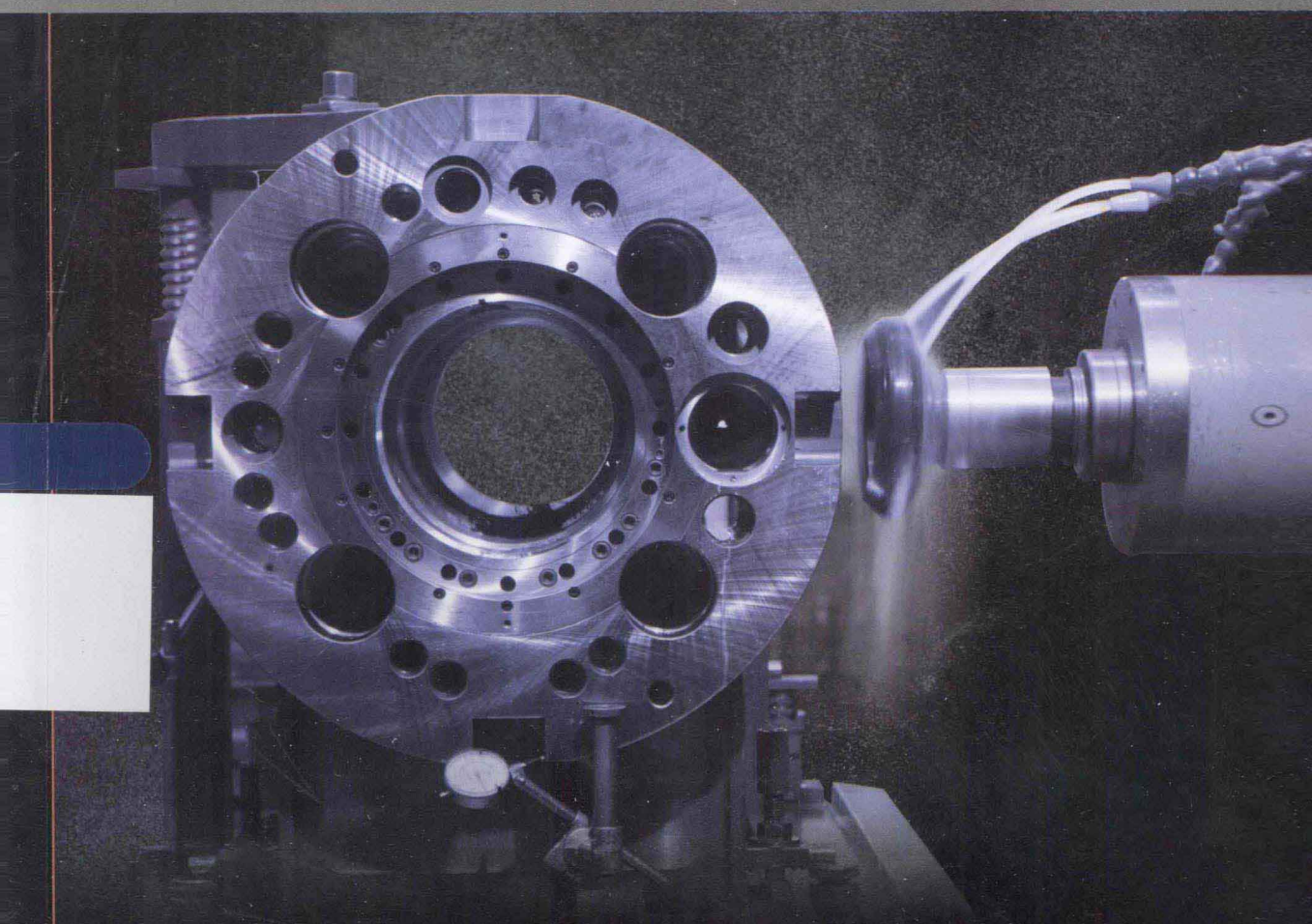




普通高等教育“十二五”规划教材
高等院校精品教材系列

现代机械加工 新技术 (第2版)

◎ 王明海 韩荣第 主编



普通高等教育“十二五”规划教材
高等院校精品教材系列

现代机械加工新技术

(第2版)

王明海 韩荣第 主编
高胜东 吴 健 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 2003 年版基础上改编而成的, 主要介绍了近些年来为适应制造业的发展而出现的机械加工新技术, 包括高速与超高速切削技术、硬态和干式(绿色)切削技术、振动切削与磨削技术、加热辅助切削与低温切削技术、特殊切削加工方法及磨削加工最新技术, 对复合加工技术重新进行了编写, 取消了高能束加工技术; 增加了高强度钢与超高强度钢的切削加工内容, 并对它及不锈钢、高温合金、钛合金、工程陶瓷、复合材料与复合构件的切削与磨削加工给予了较系统详尽的介绍, 增添了不少新资料; 还特别较系统地介绍了难加工材料切削过程的有限元仿真技术, 为新的高性能材料的工程应用提供了高效率、低成本的切削试验的好方法。

本书内容新颖、资料丰富、数据齐全、图文并茂、语言精炼, 理论联系实际。

本书既可作为高等工科院校机械设计制造及其自动化专业和航空宇航制造工程专业本科生和硕士研究生的教科书, 又可作为从事机械加工方面工作的工程技术人员的参考书。

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/王明海, 韩荣第主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2013.5

高等院校精品教材系列

ISBN 978-7-121-20371-8

I. ①现… II. ①王… 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(2013)第 098130 号

策划编辑: 余 义

责任编辑: 余 义

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 20.75 字数: 531 千字

印 次: 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 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。

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

服务热线: (010)88258888。

第 2 版前言

本书是在 2003 年版的基础上改编而成的。基于三点考虑：一是时隔 10 年，所用文献资料已不能满足当前的需要，迫切需要增加新成果、新资料，特别是国内的新成果；二是由于新的难加工材料不断出现与应用，需要进行很多烦琐的切削试验来证明其应用的可靠性和先进性，切削过程仿真技术则是其提高试验效率、降低成本的好方法和好手段，非常可取；三是界定撰写技术领域为超精密加工及特种加工技术之外的加工新技术。

全书共 16 章，第 1、3、4、6、8 章进行了部分修改；第 2、5、7 章修改较多，且将原第 10 章的射流加工技术移入了第 7 章；第 9 章复合加工技术全部重新编写；第 10 章高强度与超高强度钢的切削加工取代原高能束加工技术；第 11~15 章，特别是第 15 章增加了很多国内的新成果，且结构也有改动；第 16 章新增加了难加工材料切削过程的有限元仿真技术，以满足新的需求。为此，新增加参考文献 90 篇。

全书内容丰富，结构严谨，理论联系实际，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。

全书由沈阳航空航天大学王明海副教授和哈尔滨工业大学韩荣第教授主编。其中，第 1~7 章由韩荣第与高胜东（哈尔滨工业大学）改编，第 8~15 章由王明海、韩荣第和韦东波（哈尔滨工业大学）改编，第 16 章由吴健〔哈尔滨工业大学（威海）〕与王明海编写。全书由王明海、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

2013 年 4 月

第 1 版前言

随着科学技术的迅猛发展,特别是航天航空工业的发展,对产品性能的要求越来越高。要适应这种要求,一是要努力提高零部件加工精度和表面质量的要求,二是要采用性能更优异的难加工新材料。这就对机械制造业提出了严重的挑战,制造企业必须超前研制新装备、新工艺和新技术,亦即采用机械加工新技术。

为适应 21 世纪机械制造业发展的这种需求,作者根据多年从事科研工作和教学工作的经验,特编写《现代机械加工新技术》一书。

全书共 15 章。前 10 章重点介绍近些年逐步发展起来的高速与超高速切削技术、硬态切削技术、干式(绿色)切削技术、振动切削与磨削技术、加热辅助切削与低温切削技术、特殊切削加工方法以及磨削加工新技术,还将很有发展前景的复合加工技术和高能束加工与射流加工技术的原理、特点、机理及应用情况做了介绍;后 5 章重点介绍五种典型难加工新材料——不锈钢、高温合金、钛合金、工程(精细)陶瓷和复合材料的切削加工技术。

全书内容新颖丰富,重点突出,理论联系实际,图文并茂,结构严谨,语言精炼,既可作为机械设计制造及其自动化专业和航空宇航制造工程专业的本科生、硕士研究生的教材,又可作为相关工程技术人员的参考书。

全书主要由哈尔滨工业大学韩荣第教授、王扬教授和黑龙江科技学院张文生副教授编写。其中第 1、2、7、8、13、14、15 章由韩荣第编写;第 3、4、5 章由张文生编写;第 6、9、10 章由王扬编写;第 11、12 章由韩滨和张文生编写。全书由韩荣第统稿,由中国高校金属切削与先进制造技术研究会理事长、哈尔滨工业大学袁哲俊教授主审。

由于水平和时间所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请批评指正。

主 编

2003 年 3 月于哈尔滨

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.4 高速切削用新型夹头	32
1.1 先进制造技术	1	2.5.5 高速切削刀具的动平衡性能	34
1.2 21 世纪的先进制造工艺技术	2	2.5.6 高速与超高速切削刀具的 监测技术	35
1.3 机械加工技术	3	2.6 高性能的数控和伺服驱动系统	36
1.4 本课程的内容	6	2.6.1 用矢量控制原理的 PWM 交流 变频控制器	36
思考题	6	2.6.2 高性能高灵敏度的伺服驱动 系统	37
第 2 章 高速与超高速切削技术	7	2.6.3 精简指令集计算机系统结构的 CNC 系统	37
2.1 概述	7	2.6.4 其他辅助控制技术	38
2.1.1 高速切削的概念与高速切削 技术	7	2.7 高速与超高速切削技术的应用 领域	38
2.1.2 高速与超高速切削的特点	8	思考题	39
2.1.3 高速与超高速切削技术的研究 发展现状	9	第 3 章 硬态切削技术	40
2.1.4 高速与超高速切削对机床的 新要求	10	3.1 硬态切削的概念	40
2.2 实施高速与超高速切削的关键 技术	11	3.2 硬态车削的特点	40
2.3 独特的主轴结构单元	11	3.3 硬态车削的必要条件	41
2.3.1 电主轴单元的分类	11	3.3.1 硬态车削刀具	41
2.3.2 主轴轴承	14	3.3.2 硬态车削的切削用量	42
2.3.3 电主轴的冷却和轴承的润滑	15	3.3.3 硬态车削机床	43
2.3.4 电主轴的动平衡	16	3.4 硬态车削的应用与展望	43
2.3.5 电主轴的选用	17	思考题	44
2.4 高速直线驱动进给单元	17	第 4 章 干式(绿色)切削技术	45
2.4.1 高速直线进给传动方式分析	18	4.1 概述	45
2.4.2 高速直线电动机进给单元	19	4.2 干式切削技术的特点及实施的 必要条件	45
2.5 高速与超高速切削刀具技术及其 系统	26	4.2.1 干式切削技术的特点	45
2.5.1 适用高速与超高速切削的刀具 材料	27	4.2.2 实施干式切削的必要条件	45
2.5.2 高效安全可靠的刀具结构	29	4.3 实施干式(绿色)切削可采用的 方法	48
2.5.3 高速切削刀具与机床连接的 刀柄系统	30	4.3.1 风冷却切削	48

4.3.2	液氮冷却干式切削	50	5.5.1	概述	80
4.3.3	准(亚)干式切削	51	5.5.2	振动研磨机理	80
4.3.4	用水蒸气作冷却润滑剂	51	思考题	82	
4.3.5	射流注液切削	52			
4.4	干式切削技术的发展现状及 应用	53	第 6 章	加热(辅助)切削与低温切削 技术	83
4.4.1	干式切削技术的发展现状	53	6.1	概述	83
4.4.2	干式切削技术的应用举例	53	6.1.1	加热(辅助)切削的概念	83
4.5	当前的任务	54	6.1.2	加热(辅助)切削的发展概况	83
4.5.1	对切削液的新要求	54	6.2	加热辅助切削的加热方法与加热 辅助切削	84
4.5.2	切削液的发展趋势	54	6.3	加热辅助切削机理探讨	87
4.5.3	限制使用切削液中的有害 添加剂	55	6.4	低温切削技术	90
4.5.4	研制新环保型添加剂	55	6.4.1	概述	90
思考题	56	6.4.2	低温切削特点	90	
第 5 章	振动切削与磨削技术	57	6.4.3	低温切削分类	91
5.1	概述	57	6.4.4	低温切削的应用	92
5.1.1	传统切削与振动切削	57	思考题	92	
5.1.2	振动切削特点	58	第 7 章	特殊切削加工方法	93
5.1.3	振动切削机理的几种观点	60	7.1	磁化切削	93
5.1.4	振动切削研究现状	62	7.1.1	概念	93
5.2	振动切削过程解析	62	7.1.2	磁化切削的分类	93
5.2.1	振动切削改变实际切削速度	63	7.1.3	刀具磁化装置	93
5.2.2	振动切削改变刀具工作角度	65	7.1.4	磁化切削效果	95
5.2.3	振动切削过程中的消振作用	66	7.1.5	磁化切削机理探讨	99
5.2.4	切削力波形改变切削过程	68	7.2	真空中切削	100
5.3	典型振动切削装置及其应用	69	7.2.1	真空度对铜和铝切削的影响	100
5.3.1	对振动切削装置的基本要求	69	7.2.2	真空度对中碳钢和钛合金切削 的影响	100
5.3.2	振动切削装置分类	70	7.2.3	真空中的高速与超高速切削	102
5.3.3	机械振动切削装置	71	7.2.4	在氧气和氩气气氛中的高速与 超高速切削	102
5.3.4	超声振动切削装置	72	7.3	惰性气体保护切削	103
5.3.5	振动切削在难加工工艺中的 应用	72	7.4	绝缘切削	104
5.4	振动磨削技术	74	7.5	电熔爆“切削”	104
5.4.1	超声振动磨削	75	7.6	射流加工技术	105
5.4.2	超声振动清洗砂轮磨削	79	7.6.1	概述	105
5.4.3	超声振动修整砂轮	79	7.6.2	高压水射流加工装置	106
5.5	振动研磨技术	80			

7.6.3 高压水射流切除与切断机理	108	9.3.2 复合加工技术应用的评价	133
7.6.4 高压水射流(WJ、AWJ)切割 应用范围	108	思考题	134
思考题	108	第 10 章 高强度钢与超高强度钢的 切削加工	135
第 8 章 磨削加工新技术	109	10.1 概述	135
8.1 高效磨削新技术	109	10.2 高强度钢与超高强度钢的切削 加工特点	136
8.1.1 重负荷荒磨	109	10.3 切削高强度钢与超高强度钢的 有效途径	139
8.1.2 缓进给大切深磨削	109	10.4 高强度与超高强度钢的钻孔与 攻螺纹	145
8.1.3 高速与超高速磨削	110	10.4.1 高强度钢与超高强度钢的 钻孔	145
8.1.4 砂带磨削	111	10.4.2 高强度钢与超高强度钢的 攻螺纹	146
8.2 超硬磨料的高效磨削技术	112	思考题	147
8.2.1 超硬磨料的性能分析及应用	112	第 11 章 不锈钢的切削加工	148
8.2.2 超高速磨削典型新工艺介绍	113	11.1 概述	148
8.3 超硬磨料砂轮的修整技术	116	11.2 不锈钢的切削加工特点	151
8.3.1 超硬磨料砂轮修整的概念	116	11.3 不锈钢的车削加工	153
8.3.2 超硬砂轮修整方法	117	11.4 不锈钢的铣削加工	158
8.4 高精度小粗糙度磨削技术	119	11.5 不锈钢的钻削加工	160
8.4.1 砂轮表面磨粒应有微刃性和 等高性	119	11.6 不锈钢的铰孔	162
8.4.2 磨床要有足够好的性能	119	11.7 不锈钢攻螺纹	164
8.4.3 工艺参数选择要合理	119	思考题	166
8.5 磨削加工最新技术	121	第 12 章 高温合金的切削加工	167
8.6 先进磨削方法在难加工材料 加工中的应用举例	121	12.1 概述	167
8.6.1 高温合金的缓进给大切深 磨削	122	12.2 高温合金的切削加工特点	168
8.6.2 钛合金的磨削	123	12.3 高温合金的车削加工	172
8.6.3 热喷涂(焊)层的磨削	127	12.3.1 正确选择刀具材料	172
8.7 超硬砂轮在线电解修整 ELID 磨削技术及应用	128	12.3.2 选择合理的刀具几何参数	174
8.7.1 ELID 磨削原理	128	12.3.3 确定合理的切削用量	176
8.7.2 ELID 磨削机理与应用	128	12.3.4 选用性能好的冷却润滑剂	177
思考题	130	12.3.5 车削高温合金推荐的切削 条件	178
第 9 章 复合加工技术	131	12.4 高温合金的铣削加工	178
9.1 概述	131	12.5 高温合金的钻削加工	181
9.2 复合加工技术分类	131		
9.3 复合加工技术的应用及其评价	133		
9.3.1 应用	133		

12.6	高温合金的铰孔	184	14.2.2	陶瓷材料脆性破坏机理 探讨	215
12.7	高温合金攻螺纹	185	14.3	工程陶瓷材料的切削	216
12.8	高温合金的拉削	186	14.3.1	陶瓷材料的切削加工特点	216
	思考题	188	14.3.2	几种常用陶瓷材料的切削 加工	220
第 13 章	钛合金的切削加工	189	14.4	工程陶瓷材料的磨削	232
13.1	概述	189	14.4.1	陶瓷材料的磨削特点	232
13.1.1	钛合金的分类	189	14.4.2	正确选择金刚石砂轮的性能 参数	236
13.1.2	钛合金的性能特点	189	14.4.3	新型金刚石砂轮的开发	242
13.2	钛合金的切削加工特点	192	14.4.4	提高陶瓷材料磨削效率的 其他方法	245
13.3	钛合金的车削加工	195	14.4.5	陶瓷材料的研磨与抛光	245
13.3.1	正确选择刀具材料	195	14.5	陶瓷材料加工性的评价	245
13.3.2	选择合理的刀具几何参数	196		思考题	246
13.3.3	切削用量选择	197	第 15 章	复合材料与复合构件的 切削加工	247
13.4	钛合金的铣削加工	198	15.1	概述	247
13.4.1	正确选择刀具材料	198	15.1.1	复合材料的概念	247
13.4.2	选择合理的刀具几何参数	198	15.1.2	复合材料的分类	247
13.4.3	铣削方式的选择	199	15.1.3	复合材料的发展与应用	249
13.4.4	铣削用量	199	15.1.4	复合材料的增强相(或分 散相)	251
13.5	钛合金的钻削加工	204	15.1.5	复合材料的增强机理	252
13.6	钛合金攻螺纹	208	15.2	纤维增强树脂基复合材料 FRP 简介	252
13.6.1	选择性能好的刀具材料	208	15.2.1	FRP 的性能特点	252
13.6.2	改进标准丝锥结构	208	15.2.2	影响 FRP 性能的其他因素	253
13.6.3	采用跳齿结构	208	15.2.3	常用的 FRP	254
13.6.4	采用修正齿丝锥	209	15.3	FRP 的切削加工	256
13.6.5	切削液的选用	209	15.3.1	FRP 的切削加工特点	256
13.6.6	螺纹底孔直径的选取	209	15.3.2	FRP 的车削加工	257
13.6.7	攻螺纹速度的选取	210	15.3.3	FRP 的钻孔	262
	思考题	210	15.3.4	FRP 的铣削加工	274
第 14 章	工程陶瓷材料的切削加工	211	15.3.5	切断加工	274
14.1	概述	211	15.4	碳纤维/碳(C _f /C)复合材料的 切削加工	276
14.1.1	陶瓷材料的分类	211			
14.1.2	陶瓷制品的制备	212			
14.1.3	陶瓷的组织结构	213			
14.2	工程陶瓷材料的特性及脆性 破坏机理探讨	213			
14.2.1	与切削加工相关的陶瓷材料 的性能	214			

15.5	金属基复合材料的切削加工	276	16.1.2	常用的有限元分析软件简介	292
15.5.1	切削加工特点	276	16.2	材料性能实验手段	294
15.5.2	不同加工方法的切削加工特点	279	16.2.1	材料动态力学性能实验法	294
15.6	碳纤维增强碳化硅陶瓷复合材料 C _f /SiC 的切削加工	288	16.2.2	直角切削试验法	295
15.7	复合构件的钻孔技术	288	16.3	常用的材料本构方程(模型)	295
15.7.1	CFRP 与 Ti 合金叠层复合构件钻孔	288	16.4	切削仿真的应用实例	298
15.7.2	复合装甲构件钻孔	289	16.4.1	切削变形	298
思考题		290	16.4.2	切削力	303
第 16 章	难加工材料切削过程的有限元仿真技术	291	16.4.3	切削温度	306
16.1	概述	291	16.4.4	刀具磨损	306
16.1.1	有限元法简介	291	16.4.5	典型有限元软件的建模过程范例	308
			思考题		313
			参考文献		314

第1章 绪 论

制造业是国民经济的基础产业,它的水平和实力反映一个国家的生产力水平和国防能力,决定着国家的经济竞争力和综合国力。

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。

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 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($10\sim 1\mu\text{m}$)精密加工;二是用于磁盘与磁鼓制造的亚微米级($1\sim 0.1\mu\text{m}$)精密加工;三是用于超精密光电子器件的毫微米级($0.1\sim 0.001\mu\text{m}$)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。

1.2 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)等已不局限用于航空航天领域, 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。

1.3 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, 不仅涉及到了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。

(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15000 r/min,现在已经提高到了40000 r/min,功率从22 kW提高到了40 kW。Hyper Mach铣床已提高到了60000 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24000 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300000 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 μm ,加工形状精度为0.1~0.2 μm ,加工有色金属工件的表面粗糙度 R_a 为0.01~0.02 μm 。

美国1983年研制的大型金刚石车床DTM,可加工直径 $\phi 2100$ 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 $\phi 1625$ 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,刚度好、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 μm ,表面粗糙度 R_a 达0.0042 μm 。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 mm $\times$ 2500 mm,还有 $\phi 2500$ 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 μm 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~2.5g,其重复定位精度达到了 ± 1 μm 。

(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]。

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。

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地提高^[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 R_y 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，我们正在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 10 000HV (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。

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。

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。

1.4 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、复合加工技术。最后,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。

思 考 题

- 1.1 先进制造技术的含义是什么?它包含哪些方面的内容?
- 1.2 21 世纪的先进制造工艺技术具体体现在哪些方面?
- 1.3 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?
- 1.4 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 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_c 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。

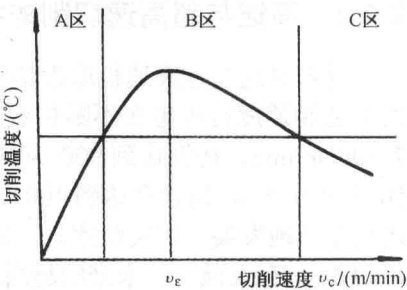


图 2.1 高速切削的概念^[100]

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