

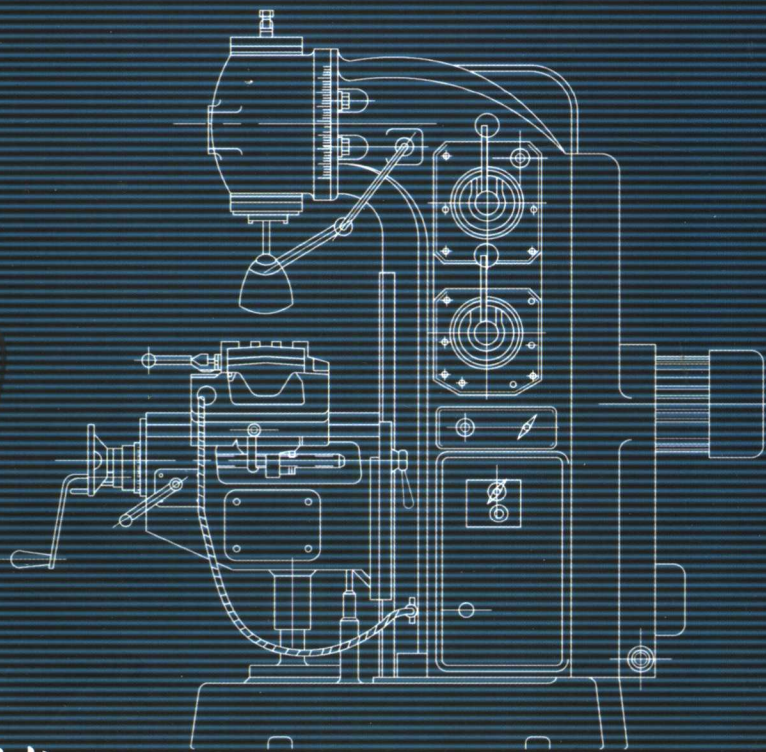
机械工程



国防科工委「十五」规划教材

现代加工技术

●左敦稳 主编
黎向锋 赵剑峰 编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·机械工程

现代加工技术

左敦稳 主编

黎向锋 赵剑峰 编

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书系统地介绍了现代加工技术,内容主要包括切削加工、磨削加工、光整加工、电加工、高能束流加工、微细加工、纳米加工、绿色加工、难加工材料加工、难加工结构加工以及加工参数优化与数据库。全书内容新颖、资料丰富、理论联系实际。

本书既可作为高等院校制造类专业本科生和硕士研究生的教材,又可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代加工技术/左敦稳主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.3

ISBN 7-81077-608-8

I. 现… II. 左… III. 金属加工 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 139436 号

现代加工技术

左敦稳 主编

黎向锋 赵剑峰 编

责任编辑 韩文礼

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16

印张:29.75 字数:666 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

印数:4 000 册

ISBN 7-81077-608-8 定价:39.00 元

总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,



积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影晌。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业



走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

加工技术具有极其古老的历史,它伴随着人类的诞生而出现,伴随着人类的进步而发展。一方面,由于人类社会在发展中不断发明新的产品、新的材料,对加工技术不断提出新的需求,因而促成了新的加工原理和方法不断诞生和成长,使得加工技术生机勃勃,持续发展。尤其是,人类社会进入 20 世纪以后,现代数学、系统论、控制论和信息论等理论和学科的创建和发展,新材料技术、数控技术、自动化技术和微电子技术的诞生和发展从根本上改变了加工技术的手工、低效的传统面貌,使之迈向自动、高效的现代化技术体系。

另一方面,由于加工技术的发展,新的加工方法不断涌现,从而在效率、精度、成本等诸多方面以难以想象的程度拓展了人类开发和制造新产品的能力。今天,人们依托先进的加工技术,以前所未有的速度更新现有的产品,不断创造新的产品,从而极大地丰富了人类社会的物质生活,有力地推动了科学技术的整体发展,加快了人类认识自我和外部世界的进程。人类社会能够创造今天辉煌的经济成就,能够享受现代化的生活方式,能够登上月球、探索太空,从根本上讲是由于加工技术获得重大发展的缘故。

加工技术日新月异,使得加工类课程教材的内容很容易变得陈旧过时、不够系统。为了比较全面地反映加工技术的体系,并满足机械工程类本科专业宽口径的培养要求,作者本着“系统、先进、实用、特色”的指导思想,编写本书作为本科生的教材。

本书的系统性表现在所介绍加工技术的涵盖面广、各具体加工技术的内容比较完整;其先进性表现在以“高速、高效、精密、微细、绿色”为关键词的内容安排上;其实用性表现在各项技术的讲述均力求结合实际应用进行;其特色表现在对国防工业中的难加工材料和结构的加工进行专门讲述。

加工的目的是获得一定的表面几何形状,并满足一定的几何精度,有



时还必须保证加工后的表面(或表面层)满足一定的力学、光学、组织、成分等物理方面的要求,尤其在航空航天、国防等特殊领域更是如此。凡能实现这一目的技术均可称为加工技术,因此,加工技术所涉及内容太广,一本教材不易将其全部包含进去。本书所介绍的加工技术主要限于基于“去除材料”的加工技术。

全书共11章。第1章 绪论,由左敦穗编写;第2章 切削加工技术,由左敦穗和黎向锋共同编写;第3章 磨削加工技术,由左敦穗编写;第4章 光整加工技术,由左敦穗编写;第5章 电加工技术,由赵剑峰编写;第6章 高能束流加工技术,由赵剑峰编写;第7章 微细加工技术,由黎向锋编写;第8章 纳米加工技术,由黎向锋和左敦穗共同编写;第9章 绿色加工技术,由左敦穗和黎向锋共同编写;第10章 难加工材料与结构的加工技术,由左敦穗、黎向锋和赵剑峰共同编写;第11章 加工参数优化与数据库技术,由左敦穗和黎向锋共同编写。

本书编写过程中,宋胜利、闫静、徐锋等老师校阅了书中的部分章节,并提出了宝贵意见;硕士研究生曹振中、范晖、布光斌、江浩、高长伟、徐礼林、宋健平、陈荣媛、金仲林、潘旭辉、杨建阳、杨根莲、程足发等参与了文字素材的整理加工;硕士研究生曾荡、朱笑笑等参与了部分图稿的绘制。对他们付出的辛勤劳动,编者在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中存在的不足之处,请读者批评指正,以便我们以后不断补充、完善该书的内容。

编 者

2004年夏于金陵

本书常用符号表

符 号	单 位	中文名称	英文名称
A_0	mm ²	切削面积	cross-sectional area of undeformed chip
A_s	mm ²	剪切面截面积	area of the shear plane
a	mm	振动振幅	vibrational amplitude
a	W/(m·℃)	导热系数	thermal diffusivity conductivity
a_0	mm	切削厚度	undeformed chip thickness
a_{cmax}	mm	单个磨粒最大切削厚度	maximum undeformed chip thickness cut by a single grain on grinding wheel
a_k	J/m ²	冲击值	impact value
a_p	mm	切削深度 (磨削时称磨削深度)	back engagement, depth of cut
a_w	mm	切削宽度	width of uncut chip
B	mm	砂轮宽度	width of grinding wheel
b	mm	卷屑槽宽度	width of chip breaker groove
C	J/(kg·℃)	比热容	specific heat capacity
c	m/s	声速	velocity of sound
C_{gw}	—	砂轮形貌常数	constant of grinding wheel morphology
d_0	mm	麻花钻直径	diameter of twist drill
d_c	mm	麻花钻钻心厚度	central thickness of twist drill
d_s	mm	砂轮直径	diameter of grinding wheel
d_{eq}	mm	砂轮当量直径	equivalent diameter of grinding wheel
d_w	mm	工件直径	diameter of workpiece
E	V	金属与溶液间的 双电层电位差	potential difference of the double electric layer between metal and solution
E	J, eV	能量	energy
E	GN/m ²	弹性模量	modulus of elasticity
E_a	V	双电层紧密部分的电位差	potential difference at compact part of double electric layer
E_a	J	材料吸收的能量	energy absorbed by material
E_b	V	双电层分散部分的电位差	potential difference at dispersion part of double electric layer
E_r	J	被材料反射的激光能量	energy reflected by material
E_s	J	入射到材料表面的激光能量	incidence energy into material
E_t	J	激光透过能量	permeated energy of laser



续表

符号	单位	中文名称	英文名称
F_c	N	超声波振动平均力	mean force of ultrasonic vibration
F_n	N	前刀面正压力	normal force on rake face
F_{ns}	N	剪切面上正压力	normal force on shear plane
F_s	N	剪切面上剪切力	shear force on shear plane
F_t	N	前刀面摩擦力	frictional force on rake face
F'_t	N/mm	比切向力	Specific tangential force
F_z	N	进给抗力 (磨削时称为轴向分力)	axial thrust force
F_y	N	切深抗力 (磨削时称为径向分力)	radial thrust force
F_x	N	主切削力 (磨削时称为切向分力)	cutting component of resultant cutting force
F	mm/r	每转进给量	feed per revolution
F	s^{-1}	振动频率	frequency of vibration
f_s	mm/r mm/str mm/min	轴向(横向)进给量	axial (transverse) feed
f_r	mm/(d · str) mm/str mm/min	砂轮径向进给量	radial feed of grinding wheel
f_s	s^{-1}	低频振动频率	frequency of low vibration
G_r	—	磨削比	grinding ratio
G_s	—	磨耗比	specific grinding wheel wear
H_t	Pa	刀具强度	tool strength
H_w	Pa	工件强度	workpiece strength
I	A	隧道电流强度	strength of tunnel current
I	A	电解电流	electrolytic current
I	A/cm ²	电流密度	density of current
i_0	A	峰值电流	peak value current
J	m ⁴	惯性矩	inertial square
KT	mm	月牙洼磨损深度	crater depth
K	g/(A · h)	电解物质的质量电化学当量	mass's electrochemistry equivalent of electrolytic matter



续表

符 号	单 位	中文名称	英文名称
K	$g/(A \cdot h)$	电解物质的质量电化学当量	mass's electrochemistry equivalent of electrolytic matter
L	m	工作台行程	length of worktable stroke
M	N	电极溶解或析出产物的重量	weight of dissolved or aggraded product on electrode
N_g	—	砂轮圆周上每毫米的磨粒数	number of abrasive grains on grinding wheel's circumference per millimeter
n	r/min	转速	Rotation rate
n_s	r/min	砂轮转速	rotation rate of abrasive wheel
n_t	s^{-1}	工作台往复运动频率	reciprocated frequency of worktable
n_w	r/min	工件转速	rotation rate of workpiece
P	kW	入射的激光功率	incidence laser power
P'_c	W/mm	比磨削功率	specific grinding power
P_o	—	主剖面	tool orthogonal plane
P_r	—	基面	tool reference plane
P_s	—	切削平面	tool cutting edge plane
P_z	kW	机床电机功率	power of machine tool motor
Q	$mm^3/(mm \cdot s)$	比磨削去除率	specific removal rate
Q_s	mm^3/s	砂轮磨损率	wear rate of grinding wheel
Q_w	mm^3/s	工件去除率	removal rate of work material
Q'_w	$mm^3/(mm \cdot s)$	比工件去除率	specific removal rate of work material
q	W/cm ²	激光功率密度	density of laser power
q	W/mm ²	热流密度	density of heat flux
q_{lim}	W/mm ²	临界热流密度	critical density of heat flux
q_m	W/mm ²	磨削区带状热源发热强度	thermal strength of striped thermal source on grinding domain
R	—	反射系数	reflected coefficient
R_s	μm	表面粗糙度	surface roughness
R_{max}	μm	平面度的最大高度值	
r	mm	准分子激光光斑半径	facula radius of excimer laser
r_o	mm	光斑半径	facula radius
r_{bn}	mm	卷屑槽槽弧半径	radius of chip breaker groove
r_n	mm	刃口圆弧半径	rounded cutting edge radius
S	mm	针尖与样品之间的距离	distance between probe tip and specimen



续表

符 号	单 位	中文名称	英文名称
T	min	刀具耐用度	tool life
T	—	透射系数	transmissive coefficient
T_a	—	吸收体的透射率	transmissivity of absorption
T_s	—	薄膜衬基的透射率	transmission of filmy substrate
t	h	电解时间	electrolytic time
t_e	μs	脉冲放电时间	discharged time of pulse
t_i	s	脉冲宽度	width of pulse
t_o	s	脉冲间隔	duration of pulse
t_p	s	脉冲周期	period of pulse
U_R	V	电解液的欧姆电压	voltage of electrolytic solution
u	J/mm^3	磨削比能	Specific grinding energy
V	mm^3	电极溶解或析出产物的体积	volume of dissolved or aggraded product of electrode
VB	mm	后刀面磨损带中部平均宽度	average width of flank wear land in central portion of active cutting edge
VB_{\max}	mm	后刀面最大磨损宽度	maximum width of the flank wear land of active cutting edge
VN	mm	主磨损沟尺寸	width of flank wear land at wear notch
V_b	V	STM 针尖与样品之间所加的偏压	bias voltage between STM probe and specimen
V_f	mm/min	振动磨削时工作台移动速度	locomotive velocity of worktable when vibration grinding
v_a	mm/min	阳极工件蚀除速度	etched rate of anodic workpiece
v_c	m/min	切削速度	cutting speed
v_c	mm/s	材料磨除速度	grinded rate of material
v_c	mm/min	阴极工具进给速度	feed rate of cathodal tool
v_f	mm/min	进给速度	feed speed
v_r	mm/s	径向进给速度	radial feed speed
v_s	m/s	砂轮速度	grinding wheel speed
v_w	m/s	工件速度	workpiece speed
w	mm	磨削区线热源宽度	width of linear thermal source on grinding domain
Z	mm^3/mm	比金属去除量	specific metal removal volume
α_0	(°)	后角	tool orthogonal clearance
α	(°)	吸收系数	absorption coefficient



续表

符 号	单 位	中文名称	英文名称
β_0	(°)	楔角	tool orthogonal wedge angle
β	(°)	摩擦角	mean friction angle
γ_0	(°)	前角	tool orthogonal rake
γ_{0e}	(°)	实际工作前角	actual working orthogonal rake
δ	—	延伸率	specific elongation
ε_r	(°)	刀尖角	tool included angle
η	—	效率	efficiency
θ	℃	切削温度	cutting temperature
θ_c	℃	超声波振动平均温度	mean temperature of ultrasonic vibration
θ_{lim}	℃	临界温度	critical temperature
θ_M	℃	超声波振动脉冲温升	increment of pulse temperature of ultrasonic vibration
θ_p	℃	普通切削切削温度	cutting temperature of common cutting
κ_r	(°)	主偏角	tool cutting edge angle
κ'_r	(°)	副偏角	tool minor cutting edge angle
λ	—	散射系数	dispersion coefficient
λ	μm	激光波长	laser wavelength
λ_s	(°)	刃倾角	tool cutting edge inclination
ξ	—	变形系数	deformation coefficient
ρ	kg/m^3	密度	density
ρ_c	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$	金属材料的比定容热容	volume specific heat of metal material
σ	S/m	电导率	conductance
σ_b	Pa	抗拉强度极限	limit of tensile strength
σ_{bb}	kg/mm^{-2}	抗弯强度	bending strength
σ_{be}	Pa	实际抗拉强度	practical tensile strength
σ_{bt}	HBS, HRC, HV	刀具硬度	hardness of cutting tool
σ_{bw}	HBS, HRC, HV	工件硬度	hardness of workpiece
σ_s	Pa	屈服强度	yield strength
τ	Pa	剪切应力	shear force
ϕ	(°)	剪切角	angle of shear plane
ϕ	—	针尖与样品之间的平均功函数	mean work function between probe and specimen
ω	$\text{mm}^3/(\text{A} \cdot \text{h})$	电解物质的体积电化学当量	volume's electrochemistry equivalent of electrolytic matter
Δ	mm	电极间隙	clearance of electrodes

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 加工技术发展简史	1
1.2 现代加工技术的地位与分类	5
1.3 现代加工技术的发展趋势	8
复习思考题	12

第 2 章 切削加工技术

2.1 切削加工机理	13
2.1.1 切削加工基本概念	13
2.1.2 切屑形成机理	16
2.1.3 切削力与切削温度	23
2.1.4 刀具磨损和耐用度	30
2.2 高速切削加工	34
2.2.1 高速切削加工的概念和特点	35
2.2.2 高速切削加工的关键技术	38
2.2.3 高速切削加工工艺及应用	43
2.3 精密与超精密切削加工	48
2.3.1 精密切削加工	49
2.3.2 超精密切削加工	54
2.4 深孔钻削技术	60
2.4.1 深孔钻削工艺及应用	60
2.4.2 深孔钻削过程监控技术	64
2.5 振动切削加工技术	68
2.5.1 振动切削原理	69
2.5.2 低频振动切削加工	72
2.5.3 超声波振动切削加工	75
2.6 加热与低温切削加工技术	79
2.6.1 加热切削加工	79
2.6.2 低温切削加工	89
复习思考题	92



第3章 磨削加工技术

3.1 磨削加工机理	94
3.1.1 磨削加工特点及其分类	94
3.1.2 固结磨料磨具	95
3.1.3 磨削加工过程	99
3.1.4 磨削温度及磨削烧伤	102
3.2 高速磨削加工技术	105
3.2.1 高速磨削加工概述	105
3.2.2 高速磨削加工的关键技术	107
3.2.3 高速磨削加工工艺及应用	110
3.3 精密和超精密磨削加工	112
3.3.1 精密磨削加工	112
3.3.2 超精密磨削加工	117
3.4 缓进给磨削技术	121
3.4.1 缓进给磨削加工的特点	122
3.4.2 缓进给磨削工艺及应用	126
3.5 砂带磨削加工	128
3.5.1 砂带的特点及制备	129
3.5.2 砂带磨削工艺	131
3.6 超声波磨削加工技术	134
3.6.1 超声波磨削的机理及特点	134
3.6.2 超声磨削加工工艺及应用	137

复习思考题	139
-------------	-----

第4章 光整加工技术

4.1 概述	141
4.1.1 光整加工分类	141
4.1.2 光整加工表面质量	143
4.2 研磨加工技术	145
4.2.1 研磨加工的特点	146
4.2.2 研磨工艺及应用	148
4.3 珩磨加工技术	155
4.3.1 珩磨加工特点及其要素	155
4.3.2 珩磨加工方法及应用	162
4.4 抛光加工技术	169



4.4.1 抛光加工的特点	170
4.4.2 抛光加工工艺及应用	171
复习思考题	176
第5章 电加工技术	
5.1 电加工机理	177
5.1.1 电火花加工原理	177
5.1.2 电化学加工机理	181
5.2 电火花加工技术	186
5.2.1 电火花加工工艺及应用	186
5.2.2 电火花加工质量控制	193
5.3 电解加工技术	197
5.3.1 电解加工工艺及应用	197
5.3.2 电解加工质量控制	204
5.4 电铸加工技术	208
5.4.1 电铸加工工艺及应用	208
5.4.2 电铸加工质量控制	214
复习思考题	216
第6章 高能束流加工技术	
6.1 概 述	218
6.2 激光束加工技术	220
6.2.1 激光束加工基本原理	220
6.2.2 激光束加工工艺及其应用	222
6.3 电子束加工技术	233
6.3.1 电子束加工基本原理	233
6.3.2 电子束加工工艺及应用	234
6.4 离子束加工技术	237
6.4.1 离子束加工原理	237
6.4.2 离子束加工工艺及应用	239
6.5 水射流及磨料流加工技术	244
6.5.1 水射流加工原理	244
6.5.2 水射流加工工艺及应用	246
复习思考题	249
第7章 微细加工技术	
7.1 概 述	250



7.1.1 微细加工概念与分类	250
7.1.2 微细加工的发展	251
7.2 硅微细加工技术	252
7.2.1 硅微细加工技术的特点	252
7.2.2 硅微细加工工艺及应用	253
7.3 光刻加工技术	258
7.3.1 光刻加工的原理及其工艺流程	258
7.3.2 光刻加工应用及关键技术	260
7.3.3 光刻技术的极限和发展前景	266
7.4 LIGA 技术及准 LIGA 技术	267
7.4.1 LIGA 技术原理	268
7.4.2 准 LIGA 技术原理	270
7.4.3 LIGA 及准 LIGA 技术的应用	273
7.5 准分子激光微细加工技术	276
7.5.1 准分子激光微细加工原理	277
7.5.2 准分子激光直写微细加工工艺及应用	281
7.6 生物加工	285
7.6.1 生物加工的分类	285
7.6.2 生物加工应用实例	288
7.7 薄膜气相沉积技术	291
7.7.1 物理气相沉积	291
7.7.2 化学气相沉积	297
7.7.3 薄膜在机械工程中的应用	304
复习思考题	305
第 8 章 纳米加工技术	
8.1 概述	307
8.1.1 基本概念	307
8.1.2 纳米技术发展简史	308
8.1.3 纳米加工	309
8.1.4 纳米加工的关键技术	310
8.2 纳米切削加工	311
8.2.1 加工原理与分类	311
8.2.2 基于 SPM 的纳米切削加工	311
8.3 纳米器件与 DNA 单分子加工	318