

普通高校“十一五”规划教材

主 编 左敦稳
副主编 黎向锋
赵剑峰 徐 锋 编

现代加工技术 (第2版)



北京航空航天大学出版社

TG/38=2

2009



普通高校“十一五”规划教材

现代加工技术(第2版)

主 编 左敦稳

副主编 黎向锋

赵剑峰 徐 锋 编

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书是国防科工委“十五”规划教材——《现代加工技术》(北京航空航天大学出版社 2005 年出版)的修订版。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。本书全面阐述了材料去除加工的理论与技术,内容系统、先进、实用,满足机械工程类本科专业宽口径、创新型人才的培养要求。

本书可作为高等院校制造类专业本科生和硕士研究生的教材,也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,2009.8

ISBN 978-7-81124-845-6

I. 现… II. 左… III. 特种加工—教材 IV. TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 114702 号

现代加工技术(第 2 版)

主 编 左敦稳

副主编 黎向锋

赵剑峰 徐 锋 编

责任编辑 董 瑞

*

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(100191) 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:26.75 字数:599 千字

2009 年 8 月第 2 版 2009 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-845-6 定价:39.80 元

第 2 版前言

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,并满足机械工程专业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。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。

加工的目的在于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。

本书第1版是国防科工委“十五”规划教材,2005年3月在北京航空航天大学出版社出版,被国内同行专家誉为“难得的优秀教材”。随着教材应用范围的扩大及现代加工技术的发展,编者对该书进行了修订。本书的修订原则如下:保持现代加工技术体系主体结构的完整性,但微细加工技术、纳米加工技术、加工参数优化与数据库技术等章的内容适当精减;在切削加工机理中增加刀具材料,在难加工材料中增加工件材料的切削加工性,重新撰写钛合金加工、高温合金加工、不锈钢加工、高强度钢和超高强度钢的加工。

本书修订过程中,左敦稳对第1章、第2章、第3章和第4章进行了修订,赵剑峰对第5章和第6章进行了修订,黎向锋对第7章、第8章和第9章进行了修订,徐锋对第10章和第11章进行了修订。硕士研究生黄铭敏、李茂、吴小军、康静、蒋艳和赵云指出了原书的不妥之处,并参与了文字素材的整理。对他们付出的辛勤劳动,编者在此表示衷心的感谢。

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

2009年7月于金陵

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	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	导热系数	thermal diffusivity conductivity
a_0	mm	切削厚度	undeformed chip thickness
a_{cgmax}	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	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	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_x	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_z	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^{-1}	低频振动频率	frequency of low vibration
f_z	mm/r	每齿进给量	feed per tooth
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_e	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	$\text{g}/(\text{A} \cdot \text{h})$	电解物质的质量电化学当量	mass's electrochemistry equivalent of electrolytic matter
K_r	—	相对加工性	relative machinability
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	$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$	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	$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$	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_a	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_0	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	比金属切除量	specific metal removal volume
α_0	(°)	后角	tool orthogonal clearance
α	(°)	吸收系数	absorption coefficient

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	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	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 切削加工概述	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	24
2.1.4 切削温度	28
2.1.5 刀具材料	30
2.1.6 刀具磨损和耐用度	35
2.2 高速切削加工	40
2.2.1 高速切削历史与现状	40
2.2.2 高速切削的定义	42
2.2.3 高速切削的优势	42
2.2.4 高速切削加工的关键技术	43
2.2.5 高速切削机理的研究	47
2.2.6 高速切削加工工艺	49
2.2.7 高速切削加工的应用	51
2.3 精密与超精密切削加工	54
2.3.1 精密切削加工的概念	54
2.3.2 精密切削的加工机理	54
2.3.3 精密切削加工的关键技术	58
2.3.4 超精密切削加工概述	59
2.3.5 超精密切削对金刚石刀具的要求	60
2.3.6 超精密切削加工的特点	61
2.3.7 超精密加工实例	62
2.3.8 超精密切削加工发展前景	63



2.4 深孔钻削技术	64
2.4.1 深孔钻削加工系统	64
2.4.2 深孔钻削刀具	67
2.4.3 保证钻削质量的措施	68
2.4.4 深孔钻削的特点	68
2.4.5 深孔钻削过程监控技术	68
2.5 振动切削加工技术	72
2.5.1 振动切削分类及其原理	73
2.5.2 振动切削的特点	75
2.5.3 振动在切削过程中的作用	75
2.5.4 低频振动切削加工	76
2.5.5 超声波振动切削加工	79
2.6 加热与低温切削加工技术	83
2.6.1 加热切削加工	83
2.6.2 低温切削加工	91
复习思考题	94

第3章 磨削加工技术

3.1 磨削加工概述	95
3.1.1 磨削加工的概念及特点	95
3.1.2 磨削加工的分类	96
3.1.3 固结磨料磨具	96
3.1.4 砂轮的磨损和修整	98
3.1.5 磨削加工过程	99
3.1.6 磨削温度及磨削烧伤	103
3.2 高速磨削加工技术	106
3.2.1 高速磨削加工概述	106
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	109
3.2.4 高速磨削的应用	110
3.2.5 高速磨削的发展前景	111
3.3 精密和超精密磨削加工	112
3.3.1 精密磨削加工的概念	112
3.3.2 普通砂轮精密磨削	112
3.3.3 超硬磨料砂轮精密磨削	115
3.3.4 砂带精密磨削	116



3.3.5	超精密磨削加工	117
3.3.6	ELID 镜面磨削	119
3.4	缓进给磨削技术	121
3.4.1	缓进给磨削工艺的产生	121
3.4.2	缓进给磨削的定义	122
3.4.3	缓进给磨削烧伤机理	122
3.4.4	缓进给磨削工艺	125
3.4.5	缓进给磨削加工的特点	126
3.4.6	缓进给磨削工艺的应用	127
3.5	砂带磨削加工	128
3.5.1	砂带磨削加工的定义	128
3.5.2	砂带的磨削机理	128
3.5.3	砂带磨削的基本部件	129
3.5.4	砂带磨削的分类	131
3.5.5	砂带磨削的工艺参数	132
3.5.6	砂带磨削中易出现的问题	133
3.5.7	砂带磨削的工艺特点	133
3.6	超声波磨削加工技术	134
3.6.1	超声波磨削的概念与机理	134
3.6.2	超声波磨削的主要运动	134
3.6.3	超声波磨削的分类及特点	136
3.6.4	超声波磨削加工的典型应用	137
	复习思考题	139
第 4 章 光整加工技术		
4.1	光整加工概述	140
4.1.1	光整加工的定义与分类	140
4.1.2	光整加工的特点	141
4.1.3	光整加工表面质量	142
4.2	研磨加工技术	144
4.2.1	研磨加工的定义	144
4.2.2	研磨加工的机理	144
4.2.3	研磨加工的分类	145
4.2.4	研磨加工的特点	146
4.2.5	研磨工艺	146
4.2.6	研磨应用实例	148



4.3	珩磨加工技术	153
4.3.1	珩磨加工的概念及原理	153
4.3.2	珩磨加工的特点	155
4.3.3	珩磨加工要素及工艺	156
4.3.4	新型珩磨加工技术	160
4.4	抛光加工技术	167
4.4.1	抛光加工的定义	167
4.4.2	抛光加工的机理	167
4.4.3	抛光加工的方法	168
4.4.4	抛光加工的特点	169
4.4.5	抛光加工要素与工艺	169
4.4.6	抛光加工的应用——硅片抛光	171
	复习思考题	173
第5章	电加工技术	
5.1	电加工机理	174
5.1.1	电火花加工原理	174
5.1.2	电化学加工机理	176
5.2	电火花加工技术	181
5.2.1	电火花加工工艺及应用	181
5.2.2	电火花加工质量控制	188
5.3	电解加工技术	192
5.3.1	电解加工工艺及应用	192
5.3.2	电解加工质量控制	199
5.4	电铸加工技术	203
5.4.1	电铸加工工艺及应用	203
5.4.2	电铸加工质量控制	209
	复习思考题	211
第6章	高能束流加工技术	
6.1	概 述	212
6.2	激光束加工技术	214
6.2.1	激光束加工基本原理	214
6.2.2	激光束加工工艺及其应用	216
6.3	电子束加工技术	227
6.3.1	电子束加工基本原理	227
6.3.2	电子束加工工艺及应用	228



6.4	离子束加工技术	232
6.4.1	离子束加工原理	232
6.4.2	离子束加工工艺及应用	233
6.5	水射流及磨料流加工技术	238
6.5.1	水射流加工原理	238
6.5.2	水射流加工工艺及应用	240
	复习思考题	243
第7章	微细加工技术	
7.1	概 述	244
7.1.1	微细加工概念与分类	244
7.1.2	微细加工的发展	244
7.2	硅微细加工技术	245
7.2.1	硅的特点	245
7.2.2	硅微细加工技术的特点	246
7.2.3	硅微细加工工艺及应用	246
7.3	光刻加工技术	253
7.3.1	光刻加工的原理及其工艺流程	253
7.3.2	光刻加工关键技术	255
7.4	LIGA 技术及准 LIGA 技术	256
7.4.1	LIGA 技术原理	257
7.4.2	准 LIGA 技术原理	259
7.4.3	LIGA 及准 LIGA 技术的应用	261
7.5	准分子激光微细加工技术	265
7.5.1	准分子激光微细加工原理	265
7.5.2	准分子激光直写微细加工工艺	267
7.6	生物加工	269
7.6.1	生物加工的分类	269
7.6.2	生物加工应用实例	272
	复习思考题	275
第8章	纳米加工技术	
8.1	概 述	276
8.1.1	基本概念	276
8.1.2	纳米加工	277
8.1.3	纳米加工的关键技术	277
8.2	基于 SPM 的纳米切削加工	278



8.2.1 扫描探针显微镜的工作原理	278
8.2.2 扫描探针显微技术的关键技术和特点	280
8.2.3 扫描探针显微技术用于纳米切削加工	281
8.3 纳米器件与 DNA 单分子加工	284
8.3.1 原子排列	284
8.3.2 分子排列与分子开关	286
8.3.3 纳米器件	287
8.3.4 DNA 单分子操纵	291
8.4 碳纳米管	293
8.4.1 单根碳纳米管的操纵	293
8.4.2 碳纳米管的机械特性	294
8.4.3 碳纳米管的应用	295
复习思考题	298

第9章 绿色加工技术

9.1 概述	299
9.1.1 绿色加工的定义及其分类	299
9.1.2 绿色加工的研究内容	300
9.1.3 绿色加工的发展	301
9.2 绿色加工基本理论	302
9.2.1 绿色加工的基本特征	302
9.2.2 绿色加工的基本程序	303
9.2.3 绿色加工的评价指标体系	305
9.3 绿色加工应用技术	306
9.3.1 无冷却液机械加工	306
9.3.2 微量冷却液机械加工	311
9.3.3 高压水射流切割	312
9.3.4 其他绿色加工	313
复习思考题	313

第10章 难加工材料与结构的加工技术

10.1 概述	314
10.1.1 材料的切削加工性	314
10.1.2 难加工材料	316
10.1.3 难加工结构	326
10.2 难加工材料的加工技术	326
10.2.1 钛合金加工	326



10.2.2	高温合金加工	331
10.2.3	不锈钢加工	335
10.2.4	高强度钢和超高强度钢的加工	339
10.2.5	复合材料加工	343
10.2.6	硬脆性材料加工	347
10.3	难加工结构的加工技术	350
10.3.1	薄壁件加工	350
10.3.2	叶片及涡轮盘加工	353
10.3.3	阵列孔及微孔加工	358
	复习思考题	362
第 11 章 加工参数优化与数据库技术		
11.1	概 述	363
11.1.1	加工参数优化的方法	363
11.1.2	加工数据库技术的发展与作用	365
11.2	加工参数解析优化技术	367
11.2.1	优化数学模型的建立	367
11.2.2	静态优化	373
11.2.3	动态优化	379
11.3	加工数据库技术	381
11.3.1	数据库技术基础	381
11.3.2	加工数据库的功能要求	385
11.3.3	加工数据库的基本结构	389
11.3.4	加工数据库的应用	391
11.4	专家系统应用技术	392
11.4.1	专家系统基本构成	392
11.4.2	加工故障诊断专家系统	395
11.4.3	加工参数推荐专家系统	396
	复习思考题	398
参考文献		
名词检索		