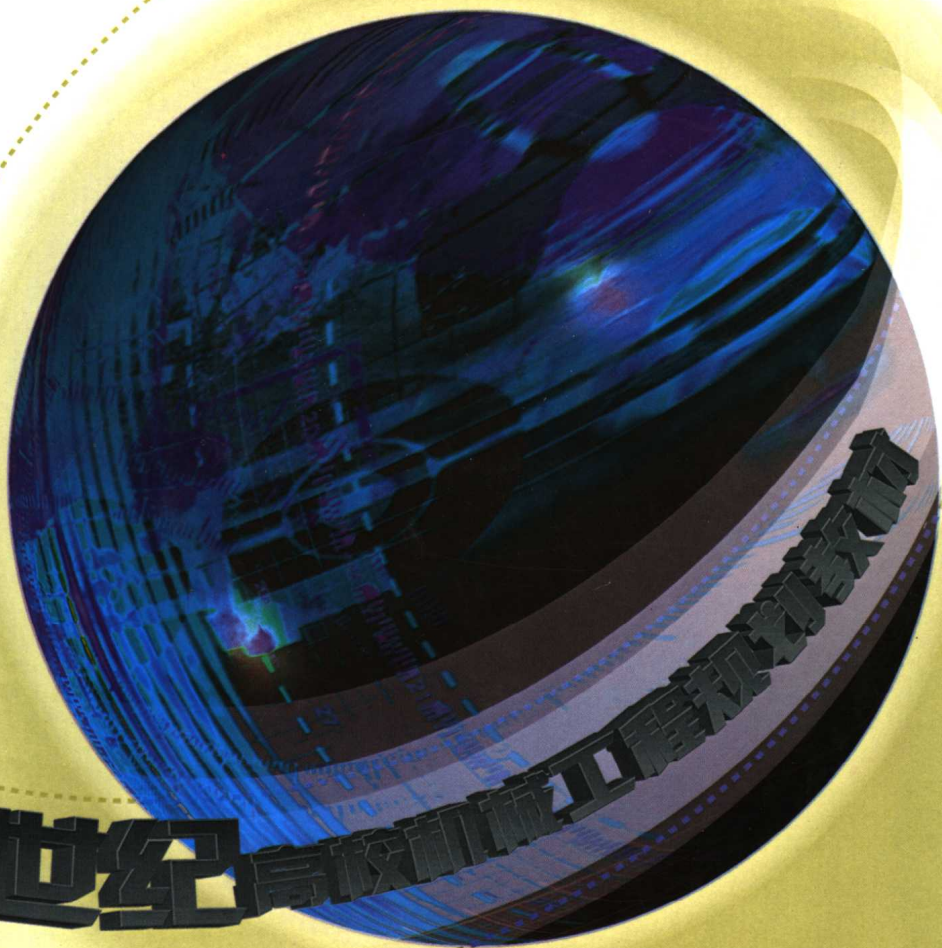


新世纪 GAOXIAO GUIHUA JIAOCAO 高校机械工程规划教材



# 精密与特种加工技术

主 编 张建华  
副主编 盖玉先 刘军营 王斌修



0.61

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



新世纪高校机械工程规划教材

# 精密与特种加工技术

主 编 张建华  
副主编 盖玉先 刘军营 王斌修  
参 编 许崇海 刘永红 尹占民 王积森  
      张 佳 王 强 徐 宁  
主 审 张 明

机 械 工 业 出 版 社

本书收集了国内外大量的文献资料,较系统地讲述了精密和特种加工的主要内容,适于作为机械制造及其自动化专业本科学生的教材,同时也适于从事机械制造业的工程技术人员作为参考书使用。

全书共十一章,除第一章概论外,其余各章的内容分别为:金刚石刀具精密切削加工、精密与超精密磨料加工、电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、激光加工、超声波加工、电子束和离子束加工、超高压水射流切割、其他精密与特种加工技术。

### 图书在版编目(CIP)数据

精密与特种加工技术/张建华主编. —北京:机械工业出版社, 2003.7

新世纪高校机械工程规划教材

ISBN 7-111-12108-2

I. 精… II. 张… III. ①金刚石—精密切削—高等学校—教材②金刚石—特种加工—高等学校—教材  
IV. TG580.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 034744 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:冯 铨 版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:姚 毅 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·8.125 印张·314 千字

定价:20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面防伪标均为盗版

# 新世纪高校机械工程规划教材 编审委员会

顾 问	艾 兴(院士)				
领导小组	张 慧	高振东	梁景凯	高文龙	
	赵永瑞	赵玉刚			
委 员	张 慧	张进生	宋世军	沈敏德	赵永瑞
	程居山	赵玉刚	齐明侠	高振东	王守城
	姜培刚	梅 宁	昃向博	梁景凯	方世杰
	高文龙	王世刚	尚书旗	姜军生	刘镇昌

# 前 言

精密与特种加工是先进制造技术的重要组成部分，不仅直接影响着尖端技术和国防工业的发展，而且还影响到机械产品的加工精度和加工表面质量，影响产品的国际竞争能力。例如，通过精密加工技术制造的陀螺仪，其制造精度直接影响导弹的命中精度；通过微细特种加工技术制造的大规模集成电路，其集成度与微细特种加工技术的进步直接相关，加工工艺水平决定了集成电路上的集成元件数，直接影响微电子工业和计算机技术的发展。目前，世界各国都非常重视精密和特种加工技术，将其作为发展先进制造技术中的优先发展内容。

近年来，微电子技术、计算机技术、自动控制技术等发展迅速，精密与特种加工技术也产生了飞跃式的发展，已经成为机械制造业水平的重要标志。例如，20世纪50年代加工精度的最高水平是 $1\mu\text{m}$ ，20世纪70年代后期加工精度的最高水平是 $0.1\mu\text{m}$ ，目前加工精度的最高水平已经达到 $0.01\sim 0.001\mu\text{m}$ 。

改革开放以来，我国在精密和特种加工技术方面取得了很大的进步，对改造和提升我国的制造业水平及提高产品竞争力起到了很大的推动作用。但必须注意的是，目前我国在精密和特种加工技术及设备方面与西方发达国家相比还有很大的差距，严重制约着我国的尖端技术和国防工业发展，影响自主知识产权产品和核心竞争力产品的开发，需要加大这方面的研究开发和推广等工作。

高等学校机械制造及其自动化专业的历史较长。近年来，由于各种新技术的发展和应用，机械制造业的面貌发生了很大的变化。机械制造及其自动化专业也面临着改革和发展，迫切需要更新教学内容，增设新的课程以适应机械制造业的快速发展。已经有很多高等学校为机械制造及其自动化专业本科生开设了特种加工选修课或精密加工选修课。

本书收集了国内外大量的文献资料，较系统地讲述了精密和特种加工的主要内容，适于作为机械制造及其自动化专业本科学生的教材，同时也适于从事机械制造业的工程技术人员作为参考书使用。

本书各章的编者如下：山东大学张建华（第一、十一章）；哈尔滨工业大学威海分校盖玉先（第二、三章）；青岛建筑工程学院王斌修（第四章）；山东理工大学尹占民（第五章）；山东理工大学刘军营、徐宁（第六章）；华东石油大学刘永红（第七章）；山东科技大学张佳、王积森（第八章）；山东轻工业学院许崇海（第九章）；济南大学王强（第十章）；全书由山东大学张建华任主编，山东理工大学张明教授任主审。

在本书的编写过程中，得到山东机械工程学会特种加工专业委员会的大力支持，山东大学机械工程学院的秦勇、张代林、任升峰等做了大量的辅助工作，在此表示衷心感谢。

本书的内容涉及面较广，由于编者水平所限，书中难免有不足和欠妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

前 言	
<b>第一章 概论</b>	1
第一节 精密与特种加工的产生背景	1
第二节 精密与特种加工的特点及其对机械制造领域的影响	2
第三节 精密与特种加工的方法及分类	4
第四节 精密与特种加工技术的地位和作用	8
思考题	10
<b>第二章 金刚石刀具精密切削加工</b>	11
第一节 概述	11
第二节 超精密机床及其关键部件	15
第三节 金刚石的结构与性能	27
第四节 金刚石晶体的定向	31
第五节 金刚石刀具的结构	33
思考题	36
<b>第三章 精密与超精密磨料加工</b>	38
第一节 精密磨削	38
第二节 精密研磨与抛光	44
思考题	50
<b>第四章 电火花加工</b>	51
第一节 电火花加工的机理、特点及分类	51
第二节 电火花加工中的基本工艺规律	58
第三节 电火花加工设备和工作液	67
第四节 电火花穿孔成形加工	80
第五节 电火花加工技术的发展及应用	92
思考题	100
<b>第五章 电火花线切割加工</b>	101
第一节 电火花线切割加工的原理、特点及应用	101
第二节 电火花线切割加工机床	103
第三节 数控线切割编程	107
第四节 电火花线切割加工的工艺指标和常用工艺参数	110

第五节	三维电火花线切割和多次切割加工 .....	112
思考题	.....	115
<b>第六章</b>	<b>电化学加工</b> .....	<b>116</b>
第一节	电解加工的机理和基本规律 .....	116
第二节	电解液 .....	130
第三节	电解加工参数和加工精度 .....	136
第四节	混气电解加工 .....	140
第五节	电解加工设备 .....	142
第六节	电解加工工艺 .....	148
第七节	电化学机械复合加工 .....	154
第八节	阴极沉积加工 .....	162
思考题	.....	169
<b>第七章</b>	<b>激光加工</b> .....	<b>170</b>
第一节	激光加工的原理与特点 .....	170
第二节	激光加工设备 .....	174
第三节	激光打孔工艺 .....	178
第四节	激光束切割 .....	182
第五节	激光焊接和表面处理 .....	185
思考题	.....	190
<b>第八章</b>	<b>超声波加工</b> .....	<b>192</b>
第一节	超声波加工的机理和特点 .....	192
第二节	超声波加工的设备及构成 .....	193
第三节	超声波加工工艺参数及应用 .....	197
思考题	.....	204
<b>第九章</b>	<b>电子束和离子束加工</b> .....	<b>205</b>
第一节	电子束加工 .....	205
第二节	离子束加工 .....	210
思考题	.....	216
<b>第十章</b>	<b>超高压水射流切割</b> .....	<b>217</b>
第一节	超高压水射流切割原理、分类和特点 .....	217
第二节	超高压水射流切割设备 .....	219
第三节	超高压水射流切割工艺和应用 .....	224
思考题	.....	227
<b>第十一章</b>	<b>其他精密与特种加工技术</b> .....	<b>228</b>
第一节	等离子体加工 .....	228



## VIII

第二节	挤压珩磨 .....	231
第三节	磨料喷射加工 .....	235
第四节	磁性磨料研磨加工 .....	237
第五节	光刻加工 .....	240
第六节	纳米级加工技术 .....	243
思考题	.....	248
<b>参考文献</b>	.....	<b>249</b>

# 第一章 概 论

## 第一节 精密与特种加工的产生背景

制造技术的发展已经有几千年的历史,从石器时代、铜器时代、铁器时代到现代的高分子塑料时代;从手工制作、机器制作到现代的智能控制自动化制作;同时,从一般精度加工、精密加工到现代的超精密加工及纳米加工,代表了当前先进制造技术发展的重要方向。

由于现代科学技术的迅猛发展,机械工业、电子工业、航空航天工业、化学工业等,尤其是国防工业部门,要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、大功率、小型化方向发展,以及在高温、高压、重载荷或腐蚀环境下长期可靠地工作。为了适应这些要求,各种新结构、新材料和复杂形状的精密零件大量出现,其结构和形状越来越复杂,材料的性能越来越强韧,对精度要求越来越高,对加工表面粗糙度和完整性要求越来越严格,使机械制造面临着一系列严峻的任务:

1) 解决各种难切削材料的加工问题。如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、石英以及锆、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属及非金属材料的加工。

2) 解决各种特殊复杂型面的加工问题。如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、发动机机匣、锻压模等的立体成型表面,各种冲模、冷拔模等特殊断面的型孔,炮管内膛线、喷油嘴,喷丝头上的小孔、窄缝等的加工。

3) 解决各种超精密、光整零件的加工问题。如对表面质量和精度要求很高的航天航空陀螺仪、精密光学透镜、激光核聚变用的曲面镜、高灵敏度的红外传感器等零件的精细表面加工,形状和尺寸精度要求在 $0.1\mu\text{m}$ 以上,表面粗糙度 $R_a$ 要求在 $0.01\mu\text{m}$ 以上。

4) 特殊零件的加工问题。如大规模集成电路、光盘基片、复印机和打印机的感光鼓、微型机械和机器人零件、细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述一系列问题,仅仅依靠传统的切削加工方法很难实现,有些根本无法实现。在生产的迫切需求下,人们通过各种渠道,借助于多种能量形式,不断研究和探索新的加工方法。精密和特种加工技术就是在这种环境和条件下产生和发展起来的。

目前,精密与特种加工已经成为制造领域不可缺少的重要方面,在难切削材料、复杂型面、精细零件、低刚度零件、模具加工、快速原形制造以及大规模集成电路等领域发挥着越来越重要的作用。

## 第二节 精密与特种加工的特点 及其对机械制造领域的影响

精密与特种加工是一门多学科的综合高级技术,要获得高精度和高质量的加工表面,不仅要考虑加工方法本身,而且涉及被加工的工件材料、加工设备及工艺装备、检测方法、工作环境和人的技术水平等等。精密与特种加工技术与系统论、方法论、计算机技术、信息技术、传感器技术、数字控制技术的结合,促成了精密与特种加工系统工程的形成。

精密加工的范畴包括微细加工、光整加工和精整加工等,与特种加工关系密切。

特种加工是指利用机、光、电、声、热、化学、磁、原子能等能源来进行加工的非传统加工方法(NTM, Non-Traditional Machining),它们与传统切削加工的不同特点主要有:①不是主要依靠机械能,而是主要用其他的能量(如电能、热能、光能、声能以及化学能等)去除工件材料;②工具的硬度可以低于被加工工件材料的硬度,有些情况下,例如在激光加工、电子束加工、离子束加工等加工过程中,根本不需要使用任何工具;③在加工过程中,工具和工件之间不存在显著的机械切削力作用,工件不承受机械力,特别适合于精密加工低刚度零件。

由于具有上述特点,就总体而言,特种加工技术可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属、非金属材料或复合材料,而且特别适合于加工复杂、微细表面和低刚度的零件,同时,有些方法还可以用于进行超精密加工、镜面加工、光整加工以及纳米级(原子级)的加工。

特种加工技术不仅可以采取单独的加工方法,更可以采用复合加工的方法。近年来复合加工的方法发展迅速,应用十分广泛。目前,许多精密加工和超精密加工方法采用了激光加工、电子束加工、离子束加工等特种加工工艺,开辟了精密加工和超精密加工的新途径,一些高硬度、高脆性的难加工材料,例如淬火钢、硬质合金、陶瓷、石英、金刚石等等,一些刚度差、加工中易变形的零件,例如薄壁零件、弹性零件等等,在精密加工和超精密加工时,特种加工已经成为必要的手段,甚至是惟一的手段,形成了精密特种加工技术。

当前,虽然传统加工方法仍占有较大的比例,是主要的加工手段,应该重视并进一步发展。但由于特种加工的迅速兴起,不仅出现了许多新的加工机理,而且出现了各种复合加工技术,将几种加工方法融合在一起,发挥各自所长,相辅

相成，具有很大的潜力，因而提高了加工精度、表面质量和加工效率，并且扩大了加工应用范围。

由于精密与特种加工技术的特点以及逐渐被广泛应用，已经引起了机械制造领域内的许多变革。例如对材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品的试制过程、产品零件结构设计、零件结构工艺性好坏的衡量标准等产生了一系列的影响：

(1) 提高了材料的可加工性 一般情况下认为金刚石、硬质合金、淬火钢、石英、玻璃、陶瓷等是很难加工的。现在已经广泛采用的金刚石、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模等等，可以采用电火花、电解、激光等多种方法来加工。工件材料的可加工性不再与其硬度、强度、韧性、脆性等有着直接的关系。对于电火花、线切割等加工技术而言，淬火钢比未淬火钢更容易加工。

(2) 改变了零件的典型工艺路线 在传统的加工领域，除磨削加工以外，其他的切削加工、成型加工等都必须安排在淬火热处理工序之前，这是工艺人员不可违反的工艺准则。精密与特种加工技术的出现，改变了这种一成不变的程序格式。由于基本上不受工件材料硬度的影响，而且为了免除加工后再引起淬火热处理变形，一般都是先淬火处理而后加工。最为典型的是：电火花线切割加工、电火花成型加工、电解加工等都必须先进行淬火处理后再加工。

精密与特种加工的出现还对以往工序的“分散”和“集中”引起了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例，由于精密与特种加工过程中没有显著的机械作用力，机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾，即使是较大的、复杂的加工表面，往往使用一个复杂工具、简单的运动轨迹，经过一次安装、一道工序加工出来，工序比较集中。

(3) 大大缩短新产品试制周期 试制新产品时，采用精密与特种加工技术可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮，微型电动机定子、转子硅钢片，各种变压器铁心，各种特殊、复杂的二次曲面体零件，可以省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具以及二次工具，大大缩短新产品的试制周期。

(4) 对产品零件的结构设计产生很大的影响 例如为了减少应力集中，花键孔、轴以及枪炮膛线的齿根部分最好做成小圆角，但拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利，容易磨损，刀齿只能设计与制造成清棱清角的齿根。而采用电解加工技术时，由于存在尖角变圆的现象，非采用小圆角的齿根不可。各种复杂冲模，例如山形硅钢片冲模，以往由于难以制造，经常采用镶拼式结构，现在采用电火花、线切割加工技术后，即使是硬质合金的模具或刀具，也可以制成整体式结构。喷气发动机涡轮也由于电解加工技术的出现可以采用整体式结构。

(5) 对传统的结构工艺性好与坏的衡量标准产生重要影响。以往普遍认为方孔、小孔、弯孔、窄缝等是工艺性差的典型，是设计人员和工艺人员非常“忌讳”的，有的甚至是机械结构的“禁区”。对于电火花穿孔加工、电火花线切割加工来说，加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔，喷丝头小异形孔，涡轮叶片上大量的小冷却深孔、窄缝，静压轴承和静压导轨的内油囊型腔等等，采用电火花加工技术以后都变难为易了。过去淬火处理以前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺，淬火处理后这种工件只能报废，现在则可以用电火花打孔、切槽等进行补救。相反，现在有时为了避免淬火处理产生开裂、变形等缺陷，故意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火处理之后，使工艺路线安排更为灵活。

### 第三节 精密与特种加工的方法及分类

#### 1. 加工成形的原理

精密与特种加工从加工成形的原理和特点来分类，可以分为去除加工、结合加工、变形加工三大类。

去除加工又称为分离加工，是从工件上去除多余的材料，例如金刚石刀具精密车削、精密磨削、电火花加工、电解加工等。

结合加工是利用理化方法将不同材料结合(Bonding)在一起。按结合的机理、方法、强弱等又可以分为附着(Deposition)、注入(Injecion)、连接(Jointed)三种。附着加工又称为沉积加工，是在工件表面上覆盖一层物质，为弱结合，例如电镀、气相沉积等。注入加工又称为渗入加工，是在工件的表层注入某些元素，使之与工件基体材料产生物化反应，以改变工件表层材料的力学、机械性质，属于强结合，例如表面渗碳、离子注入等。连接是将两种相同或不同的材料通过物化方法连接在一起，例如焊接、粘结等。

变形加工又称为流动加工，是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形，改变其尺寸、形状和性能，例如锻造、铸造、液晶定向等。

表 1-1 列出了上述三大类精密与特种加工方法，范围十分广泛。

从材料在加工过程中的流动来分析，去除加工是使工件材料逐步减少，一部分工件材料变成切屑的加工，这种流动称为分散流。结合加工是使工件材料在加工过程中逐步增加的加工，这种流动称之为汇合流。近年来，提出和发展了电铸、晶体生长、分子束外延、快速成形加工等加工方法，突破了传统加工大多局限于分离去除加工和表面结合加工的概念，特别是快速成形加工是一种利用离散/堆积成型技术的分层制造方法，将一个三维空间实体零件分散为在某个坐标方向上的若干层有很小厚度的三维实体，由于厚度很小，可按二维实体成型，再叠

加而成为所需零件的原型。变形加工是指在加工过程中工件材料基本不变的加工，称为直通流。

表 1-1 精密与特种加工方法

分 类	加工成形原理		主要加工方法
去除加工 (分离加工)	电物理加工 电化学加工、化学加工 力学加工(力喷射)  热物理加工(热蒸发、热扩散、热溶解)		电火花线切割加工、电火花成型加工 电解加工、蚀刻(电子束曝光)、化学机械 抛光 金刚石刀具精密切削、精密磨削、研磨、 抛光、珩磨、超声加工、离子溅射加工、等 离子体加工、磨料喷射加工、超高压水射流 加工、电子束加工、激光加工
结合加工	附着 加工	化学 电化学 热物理(热熔化) 力物理	化学镀、化学气相沉积 电镀、电铸 真空蒸镀、熔化镀 离子镀(离子沉积)、物理气相沉积
	注入 加工 (渗入 加工)	化学 电化学 热物理(热扩散) 力物理	氧化、渗氮、活性化学反应 阳极氧化 晶体生长、分子束外延、掺杂、渗碳、烧结 离子束外延、离子注入
	连接 加工	热物理、电物理 化学	激光焊接、快速成形加工、卷绕成形 化学粘接
变形加工 (流动加工)	热流动、表面热流动  粘滞流动 分子定向		锻造、塑性流动加工(气体火焰、高频电 流、热射线、电子束、激光) 铸造、液体流动加工(金属、塑料、橡胶等 注塑、压铸)、液晶定向

## 2. 加工方法机理

从加工方法的机理来分类，精密与特种加工可以分为传统加工、非传统加工、复合加工。传统加工是指使用刀具进行的切削加工以及磨削加工；非传统加工是指利用机、光、电、声、热、化学、磁、原子能等能源来进行加工的特种加工方法；复合加工是指采用多种加工方法的复合作用，其中包括传统加工和非传统加工的复合、非传统加工与非传统加工的复合，进行优势互补、相辅相成的加工。目前，在制造业中，占主要地位的仍然是传统的加工方法，而非传统加工和复合加工是极其重要的发展方向。表 1-2 列出了按刀具切削加工、磨料加工、特种加工、复合加工分类的各种常用的精密加工方法，及其所用的工具、所能达到的精度和表面粗糙度、被加工材料及应用情况。

表 1-2 精密加工方法

分类	加工方法	加工工具	精度 / $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应用	
刀具切削加工	精密、超精密车削	天然单晶金刚石刀具、人造聚晶金刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、硬质合金刀具	1~0.1	0.05~0.008	金刚石刀具 有色金属及其合金	球、磁盘、反射镜	
	精密、超精密铣削					多面棱体	
	精密、超精密镗削					活塞销孔	
	微孔钻削	硬质合金钻头、高速钢钻头	20~10	0.2	低碳钢、铜、铝、石墨、塑料	印制线路板、石墨模具、喷嘴	
磨料加工	精密、超精密砂轮磨削	氧化铝、碳化硅、立方氮化硼、金刚石等磨料	砂轮 0.5	0.05~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面	
						精密、超精密砂带磨削	砂带
	精密、超精密研磨	铸铁、硬木、塑料等研具 氧化铝、碳化硅、金刚石等磨料	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面	
						油石研磨	氧化铝油石、玛瑙油石、电铸金刚石油石
	磁性研磨	磁性磨料	10~1	0.01	黑色金属 黑色金属等	外圆 去毛刺	
	滚动研磨	固结磨料、游离磨料、化学或电解作用液体				型腔	
	抛光	精密、超精密抛光	抛光器 氧化铝、氧化铬等磨料	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、铝合金	外圆、孔、平面
		弹性发射加工	聚氨酯球抛光器、高压抛光液	0.1~0.001	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料	平面、型面
		液体动力抛光	带有楔槽工作表面的抛光器 抛光液	0.1~0.01	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面、圆柱面
		水合抛光	聚氨酯抛光器 抛光液	1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料	平面
磁流体抛光		非磁性磨料 磁流体	1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面	

(续)

分类	加工方法	加工工具	精度 / $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应用	
磨料加工	抛	挤压研抛	粘弹性物质 磨料	5	0.01	黑色金属等	型面、型腔 去毛刺、倒棱
		喷射加工	磨料 液体	5	0.01 ~ 0.02	黑色金属等	孔、型腔
		砂带研抛	砂带 接触轮	1 ~ 0.1	0.01 ~ 0.008	黑色金属、非 金属材料、有色 金属	外圆、孔、 平面、型面
		超精研抛	研具(脱脂木材、细 毛毡)、磨料、纯水	1 ~ 0.1	0.01 ~ 0.08	黑色金属、非 金属材料、有色 金属	平面
	超精加工	精密超精加工	磨条 磨削液	1 ~ 0.1	0.025 ~ 0.01	黑色金属等	外圆
		珩磨	精密珩磨	磨条 磨削液	1 ~ 0.1	0.025 ~ 0.01	黑色金属等
特种加工	电火花加工	电火花成形加工	成形电极、脉冲电 源、煤油、去离子水	50 ~ 1	2.5 ~ 0.02	导电金属	型腔模
		电火花线切割加工	钼丝、铜丝、脉冲 电源、去离子水	20 ~ 3	2.5 ~ 0.16		冲模、样板 (切断、开槽)
	电化学加工	电解加工	工具电极(铜、不锈 钢)、电解液	100 ~ 3	1.25 ~ 0.06	导电金属	型孔、型面、 型腔
		电铸	导电原模 电铸溶液	1	0.02 ~ 0.012	金属	成形小零件
	化学加工	蚀刻	掩模板、光敏抗蚀 剂、离子束装置、电 子束装置	0.1	2.5 ~ 0.2	金属、非金 属、半导体	刻线、图形
		化学铣削	刻形、光学腐蚀溶 液、耐腐蚀涂料	20 ~ 10	2.5 ~ 0.2	黑色金属、有 色金属等	下料、成形 加工
	超声加工	超声波发生器、换 能器、变幅杆、工具	30 ~ 5	2.5 ~ 0.04	任何硬脆金属 和非金属	型孔、型腔	
	微波加工	针状电极(钢丝、铍 丝)、波导管	10	6.3 ~ 0.12	绝缘材料、半 导体	打孔	
	红外光加工	红外光发生器	10	6.3 ~ 0.12	任何材料	打孔、切割	
	电子束加工	电子枪、真空系统、 加工装置(工作台)	10 ~ 1	6.3 ~ 0.12	任何材料	微孔、镀膜、 焊接、蚀刻	



(续)

分类	加工方法	加工工具	精度 / $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应用
特种加工	粒子束加工	离子枪、真空系统、 加工装置(工作台)	0.01 ~ 0.001	0.02 ~ 0.01	任何材料	成形表面、刃磨、蚀刻
			1 ~ 0.1	0.02 ~ 0.01		镀膜
						注入、掺杂
	激光束加工	激光器、加工装置(工作台)	10 ~ 1	6.3 ~ 0.12	任何材料	打孔、切割、焊接、热处理
电 解	精密电解磨削	工具极、电解液、砂轮	20 ~ 1	0.08 ~ 0.01	导电黑色金属、硬质合金	轧棍、刀具刃磨
	精密电解研磨	工具极、电解液、磨料	1 ~ 0.1	0.025 ~ 0.008		平面、外圆、孔
	精密电解抛光	工具极、电解液、磨料	10 ~ 1	0.05 ~ 0.008	导电金属	平面、外圆、孔、型面
复 合 加 工	超 声	超声波发生器、换能器、变幅杆、车刀	5 ~ 1	0.1 ~ 0.01	难加工材料	外圆、孔、端面、型面
			3 ~ 1	0.1 ~ 0.01		外圆、孔、端面
			1 ~ 0.1	0.025 ~ 0.008		黑色金属等硬脆材料
化 学	机械化学	研具、磨料、化学活化研磨剂	0.1 ~ 0.01	0.025 ~ 0.008	黑色金属、非金属材料	外圆、孔、平面、型面
			0.01	0.01	各种材料	外圆、孔、平面、型面
			0.01	0.01		外圆、孔、平面、型面

#### 第四节 精密与特种加工技术的地位和作用

目前,先进制造技术已经是一个国家经济发展的重要手段之一,许多发达国家都十分重视先进制造技术的水平和发展,利用它进行产品革新、扩大生产和提高国际经济竞争能力。