

# 特种加工技术

● 主编 曹伟 张萍 吕英霞

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 特种加工技术

主 编：曹 伟 张 萍 吕英霞

副主编：于瑛瑛 解淑英 邹仁平

常州大学图书馆藏书章  
编者：曹伟 张萍 吕英霞  
副编者：于瑛瑛 解淑英 邹仁平  
陈海涛 杜翠红

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 提 要

本书结合作者在特种加工行业的教学、科研及生产实践经验,详细讲述了特种加工工艺方法的原理、特点、基本规律、设备及主要应用。全书共分为7章,包括绪论、电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、高能束流加工、超声加工、快速成形技术。

本书可作为高等院校机械类及其他相关专业特种加工课程的教材,也可作为从事特种加工生产方面的工程技术人员和技术工人的参考用书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术/曹伟,张萍,吕英霞主编. —北京:北京理工大学出版社,2017.8  
ISBN 978-7-5682-4545-6

I. ①特… II. ①曹… ②张… ③吕… III. ①特种加工-教材 IV. ①TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第188216号

---

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京市国马印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/17.25

字 数/406千字

版 次/2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

定 价/66.00元

责任编辑/赵岩

文案编辑/赵岩

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



# 前言

Qianyan

特种加工技术是机械制造的重要工艺手段，是高等院校机械类专业的重要课程，随着特种加工在工业生产中的广泛应用，尤其在航空航天等国防工业和汽车、模具等民用工业部门的广泛应用，各种特种加工的新技术、新方法不断涌现。为适应特种加工技术的迅速发展和应用的需求，本书尽可能全面地介绍了各种特种加工方法的机理、工艺规律及工程应用，将基础理论与工程实践相结合，达到提高学生技能水平的目的。

本书的主要内容包括电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、高能束流加工、超声加工、快速成形技术等多种加工方法的基本原理、工艺规律、加工特点、机床设备及应用范围等。在电火花加工和电火花线切割加工两个重点章节利用实例进行导入，最后以实例的加工作为结束，体现了理论与实践相结合的教学理念，对于提高读者对特种加工的认识和应用，丰富教学内容，提高教学效果，起到了积极的作用。本书为新媒体教材，对于重要的教学内容均配备了视频资源，读者扫描二维码便可观看相应视频，方便快捷，直观高效。

在编写本书的过程中，我们参阅了国内外同行的资料并搜集了大量网络资源，得到了专家和朋友的的大力支持和倾情帮助，在此表示衷心的感谢！

由于本书涉及内容广泛，技术发展迅速，而编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正，来电请至 [cwsdu@163.com](mailto:cwsdu@163.com)。

编者

第 1 章 绪论	1
1.1 特种加工的产生	1
1.2 特种加工的分类	3
1.3 特种加工对制造业的影响	5
第 2 章 电火花加工	8
2.1 电火花加工的原理及分类	9
2.1.1 电火花加工的原理	9
2.1.2 电火花加工应具备的条件	10
2.1.3 电火花加工的特点	11
2.1.4 电火花加工的类型及适用范围	12
2.2 电火花加工的微观过程	14
2.2.1 极间介质的电离、击穿, 形成放电通道	14
2.2.2 电极材料的熔化、汽化热膨胀	14
2.2.3 电极材料的抛出	14
2.2.4 极间介质的消电离	15
2.3 电火花加工的基本规律	15
2.3.1 极性效应	15
2.3.2 覆盖效应	17
2.3.3 加工速度	18
2.3.4 电极损耗	23
2.3.5 影响电火花加工精度的主要因素	27
2.3.6 电火花加工的表面质量	29
2.4 电火花成形加工机床	31
2.4.1 机床型号、规格与分类	31
2.4.2 电火花成形加工机床的结构及组成	32
2.4.3 机床本体各部分结构及作用	32
2.4.4 脉冲电源	35

# 目 录

# Contents

2.4.5 自动进给调节系统	38
2.5 电火花成形加工方法	42
2.5.1 电火花穿孔加工	43
2.5.2 电火花型腔加工	45
2.5.3 电火花铣削加工	49
2.6 电火花成形加工工艺	49
2.6.1 工件的准备及装夹校正	50
2.6.2 电极的准备及装夹定位	52
2.6.3 加工规准的选择与转换	64
2.6.4 平动量的分配	66
2.7 数控电火花加工 ISO 编程	66
2.7.1 数控电火花加工编程的方法	66
2.7.2 数控电火花编程常识	67
2.8 电火花成形加工实例	71
2.8.1 加工准备	72
2.8.2 加工	77
<b>第 3 章 电火花线切割加工</b>	<b>79</b>
3.1 电火花线切割加工的概述	80
3.1.1 电火花线切割加工的原理	80
3.1.2 电火花线切割加工的特点	81
3.1.3 电火花线切割加工的应用范围	81
3.1.4 电火花线切割加工常用术语	82
3.2 电火花线切割加工设备	82
3.2.1 机床本体	83
3.2.2 电火花线切割加工用的脉冲电源	87
3.2.3 工作液循环系统	89
3.2.4 控制系统	90

3.2.5	电火花线切割机床的种类及性能	90
3.3	数控电火花线切割机床的基本操作	94
3.3.1	操作前准备	94
3.3.2	机床的操作程序	94
3.3.3	电火花线切割机床常见的故障与排除方法	99
3.3.4	机床的润滑系统	100
3.3.5	电火花线切割机床的使用	100
3.4	电火花线切割加工工艺指标及加工拓展	101
3.4.1	电火花线切割加工的主要工艺指标	101
3.4.2	电参数的影响	103
3.4.3	非电参数的影响	103
3.4.4	合理选择电参数	104
3.4.5	合理调整变频进给的方法	105
3.4.2	电火花线切割加工的拓展	108
3.5	数控电火花线切割编程	112
3.5.1	电火花线切割数控编程步骤	112
3.5.2	电火花线切割 3B 编程	114
3.5.3	自动编程	117
3.6	电火花线切割加工工艺	118
3.6.1	电火花线切割加工过程	118
3.6.2	电火花线切割加工的工艺方法	121
3.6.3	电火花线切割加工的常见工艺问题和解决方法	121
3.7	电火花线切割加工实例	123
3.7.1	加工前的准备工作	123
3.7.2	加工过程中几种特殊情况的处理	125
3.7.3	电火花线切割加工实例	127

第 4 章 电化学加工	131
4.1 电化学加工的原理、分类及特点	131
4.1.1 电化学加工的基本原理	131
4.1.2 电化学加工的分类	136
4.1.3 电化学加工的特点	137
4.2 电解加工	138
4.2.1 电解加工的过程及其特点	138
4.2.2 电解加工的电极反应	139
4.2.3 电解液	142
4.2.4 电解加工的基本规律	147
4.2.5 提高电解加工精度的途径	157
4.2.6 电解加工的基本设备	161
4.2.7 电解加工工艺及其应用	164
4.3 电解磨削	170
4.3.1 电解磨削的基本原理和特点	170
4.3.2 影响电解磨削生产率和加工质量的因素	173
4.3.3 电解磨削用电解液及其设备	175
4.3.4 电解磨削的应用	177
4.4 电沉积加工	180
4.4.1 电镀加工	181
4.4.2 电铸加工	183
4.4.3 复合镀加工	186
4.4.4 特殊形式电沉积加工	187
4.4.5 电沉积发展趋势	192



第 5 章 高能束流加工	194
5.1 激光加工	194
5.1.1 激光加工的原理与特点	195
5.1.2 激光加工的基本设备	200
5.1.3 激光加工技术及应用	205
5.2 电子束加工	209
5.2.1 电子束加工的原理和特点	209
5.2.2 电子束加工设备	210
5.2.3 电子束加工的应用	212
5.3 离子束加工	216
5.3.1 离子束加工原理和特点	216
5.3.2 离子束加工设备	218
5.3.3 离子束加工应用	219
第 6 章 超声加工	224
6.1 超声加工的基本原理和特点	224
6.1.1 超声波及其特性	224
6.1.2 超声加工的基本原理	226
6.1.3 超声加工的特点	227
6.2 超声加工设备及其组成部分	228
6.2.1 超声发生器	228
6.2.2 超声振动系统	229
6.2.3 机床主体	233
6.2.4 磨料工作液及其循环系统	234
6.3 超声加工的速度、精度、表面质量及其影响因素	234
6.3.1 超声加工的速度及其影响因素	234

# 目 录

# Contents

6.3.2	超声加工的精度及其影响因素	235
6.3.3	超声加工的表面质量及其影响因素	236
6.4	超声加工的应用	237
6.4.1	型孔、型腔加工	237
6.4.2	切割加工	237
6.4.3	超声复合加工	238
6.4.4	超声清洗	241
6.4.5	超声塑料焊接	243
<b>第7章</b>	<b>快速成形技术</b>	<b>244</b>
7.1	快速成形技术概述	245
7.1.1	快速成形技术的概念和原理	245
7.1.2	快速成形技术的特点	246
7.1.3	快速成形技术的发展历程	247
7.2	快速成形技术的典型工艺与应用	249
7.2.1	SLA 工艺	249
7.2.2	SLS 工艺	252
7.2.3	LOM 工艺	256
7.2.4	FDM 工艺	258
7.2.5	3DP 工艺	260
<b>参考文献</b>		<b>264</b>

# 第1章 绪 论

## 本章导读

同学们在金工实习时接触到的车、铣、刨、磨通常称为传统加工，传统加工必须用比加工对象硬的刀具，通过刀具与加工对象的相对运动以机械能的形式完成加工。但目前难切削加工的材料越来越多，如硬质合金、淬火钢，甚至目前世界上最硬的金刚石，那么如何对它们进行加工？这正是特种加工的主要应用范畴之一。特种加工可以用比加工对象硬度低的工具甚至没有成形的工具，通过电能、化学能、光能、热能等形式对材料进行加工，并且特种加工的形式也很多，下面就让我们了解一下特种加工吧。

## 本章学习要点

1. 特种加工的产生。
2. 特种加工的分类。
3. 特种加工对制造业的影响。

## 1.1 特种加工的产生

推动人类社会进步的两个工具是语言和劳动工具。劳动工具经历了石器时代、青铜器时代后进入了机械化时代，而机械加工则是伴随着时代的进步而发展的。

传统的机械加工已有非常悠久的历史，它对人类的生产活动和物质文明起到了极大的推动作用。例如，18世纪70年代就发明了蒸汽机，但苦于制造不出高精度的蒸汽机汽缸而无法推广应用。直到后来有人创造出和改进了汽缸镗床，解决了蒸汽机主要部件的加工工艺，才使得蒸汽机获得广泛应用，引起了世界性的第一次产业革命。这一事实充分说明了加工方法对新产品的研制、推广和社会经济的发展等起着重大的作用。

但是，从第一次产业革命直到第二次世界大战之前，在这段长达150多年靠机械切削加工的漫长年代里，并没有产生特种加工的迫切要求，也没有发展特种加工的充分条件，人们的思想一直局限在自古以来传统的用机械能量或热能所提供的切削力来除去多余的金属，以达到加工要求的方式。

随着社会生产的需要和科学技术的进步,20世纪40年代,苏联科学家拉扎连柯夫妇在研究开关触点遭受火花放电腐蚀损坏的现象和原因时,发现电火花的瞬时高温可使局部的金属熔化、汽化而被蚀除掉,从而开创和发明了变有害的电蚀为有用的电火花加工的方法。他们用铜杆在淬火钢上加工出小孔的实验验证了用软的工具可加工任何硬度的金属材料这一事实,首次摆脱了传统的切削加工方法,直接利用电能和热能来去除金属,获得了“以柔克刚”的效果。

进入20世纪50年代以来,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、医药工业、国防工业等蓬勃发展,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,以及能在高温、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。例如,各种难切削材料的加工问题,如硬质合金、钛合金、高温合金、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;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、锻压模和注塑模等的立体成形表面,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、异形孔、窄缝等的加工;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用仪器、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的精细表面加工;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、微型医疗器械和机器人零件、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,仅仅依靠传统的机械切削加工方法很难实现,有些根本无法实现。在生产的需求下,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。于是一种本质上区别于传统加工的特种加工便应运而生,并不断获得发展。特种加工也称为“非传统加工”(Non-Traditional Machining, NTM)或“非常规机械加工”(Non-Conventional Machining, NCM),是指那些不属于传统加工工艺范畴的加工方法,不同于使用刀具、磨具等直接利用机械能切除多余材料的传统加工方法,泛指用电能、热能、光能、电化学能、化学能、声能及特殊机械能等能量达到去除或增加材料的加工方法,从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆等工艺。

特种加工有别于传统加工的特点体现在如下几个方面:

(1) 加工时主要用电、化学、电化学、声、光、热等能量形式去除多余材料,而不是靠机械能切除多余材料;

(2) 特种加工的工具与被加工零件基本不接触,加工时不受工件的强度和硬度的制约,故可加工超硬脆材料和精密微细零件,甚至工具材料的硬度可低于工件材料的硬度;

(3) 加工机理不同于一般金属切削加工,不产生宏观切屑,不产生强烈的弹、塑性变形,故可获得很低的表面粗糙度,其残余应力、冷作硬化、热影响度等也远比一般金属切削加工小;



(4) 两种或两种以上的不同类型的能量可相互组合形成新的复合加工形式, 加工能量易于控制和转换, 加工范围广, 适应性强。

由于具有上述特点, 因此总体而言, 特种加工技术可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属材料、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、光整加工及纳米级(原子级)的加工。目前, 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、快速原形制造及大规模集成电路等领域发挥着越来越重要的作用。

## 1.2 特种加工的分类



特种加工目前还没有明确的分类, 一般按能量来源及形式, 以及作用原理进行划分, 常用的特种加工方法分类见表 1-1。

1.2

表 1-1 常用特种加工方法分类

特种加工方法		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、汽化	EDM
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、汽化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	金属离子阳极溶解	ECM
	电解磨削	电化学、机械能	阳极溶解、磨削	EGM(ECG)
	电解研磨	电化学、机械能	阳极溶解、研磨	ECH
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	EFM
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPM
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光打标记	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	LBT
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、汽化	EBM
离子束加工	蚀刻、镀覆、注入	电能、动能	原子撞击	IBM
等离子弧加工	切割(喷镀)	电能、热能	熔化、汽化(涂覆)	PAM
超声加工	切割、打孔、雕刻	声能、机械能	磨料高频撞击	USM

续表

特种加工方法		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
化学加工	化学铣削	化学能	腐蚀	CHM
	化学抛光	化学能	腐蚀	CHP
	光刻	光能、化学能	光化学腐蚀	PCM
快速成形	液相固化法	光能、化学能	增材法加工	SL
	粉末烧结法	光能、热能		SLS
	纸片叠层法	光能、机械能		LOM
	熔丝堆积法	电能、热能、机械能		FDM

尽管特种加工优点突出,应用日益广泛,但是各种特种加工的能量来源、作用形式、工艺特点不尽相同,其加工特点与应用范围自然也不一样,而且各自还具有一定的局限性,因此为了更好地应用和发挥各种特种加工的最佳功能及效果,必须依据工件材料、尺寸、形状、精度、生产率、经济性等情况做具体分析,区别对待,合理选择特种加工方法。几种常见的特种加工方法性能和效果综合比较见表 1-2。

表 1-2 几种常用特种加工方法的综合比较

加工方法	可加工材料	工具损耗率/% (最低/平均)	材料去除率/ ( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) (平均/最高)	加工尺寸精度/mm (平均/最高)	加工表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
电火花成形加工	导电金属材料	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	10/0.04	从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等,如各种类型的孔、各种类型的模具,还可进行刻字、表面强化等加工
电火花线切割加工		0.01/5~30 万 $\text{mm}^2$	50/500 $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ <sup>①</sup>	0.02/0.002	5/0.01	切割各种二维及三维直纹面组成的模具及零件,可直接切割样板等,也常用于钨、钨、半导体材料或贵重金属切削
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.01	1.25/0.16	从微小零件到超大型工件、模具的加工,如型孔、型腔、抛光、去飞边等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	1.25/0.04	硬质合金钢等难加工材料的磨削,如硬质合金刀具、量具、轧辊、小孔研磨、珩磨等

续表

加工方法	可加工材料	工具损耗率/% (最低/平均)	材料去除率/ ( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) (平均/最高)	加工尺寸精度/mm (平均/最高)	加工表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
超声加工	任何脆性材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.63/0.16	加工、切割脆硬材料,如玻璃、石英、宝石、金刚石、硅等,可加工型孔、型腔、小孔等
激光加工	任何材料	不损耗	瞬时去除率很高,受功率限制,平均去除率不高	0.01/0.001	10/1.25	精密加工小孔、窄缝及成形切割、蚀刻,如金刚石拉丝模、钟表宝石轴承等
电子束加工					1.25/0.2	在各种难加工材料上打微小孔、切缝、蚀刻、焊接等,常用于制造大、中规模集成电路微电子器件
离子束加工					0.1/0.01 $\mu\text{m}$	0.1/0.01
水射流切割	钢铁、石材	无损耗	>300	0.2/0.1	20/5	下料、成形切割、剪裁
快速成形	增加材料方法加工,无可比性			0.3/0.1	10/5	快速制作样件、模具

注:①线切割加工的金属去除率按惯例均用  $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$  为单位,电火花线切割分为单向低速走丝机床和高速往复走丝机床两大类,但加工指标差异较大,一般只有后者考虑工具电极损耗,详见第3章。

②这类工艺主要用于精微和超精微加工,不能单纯比较材料去除率。

### 1.3 特种加工对制造业的影响

由于特种加工与传统机械加工的工艺特点不同,对机械制造工艺技术产生了显著的影响,主要有以下几个方面:

#### 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,但是现在已经广泛采用的利用金刚石、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模具等都可以采用电火花、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。特种加工方法使材料的可加工范围从普通材料发展到硬质合金、超硬

材料和特殊材料。

### 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、成形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。特种加工技术的出现，改变了这种一成不变的程序格式。由于特种加工基本上不受工件材料硬度的影响，而且为了免除加工后再淬火引起热处理变形，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、电火花成形加工、电解加工等。

### 3. 改变了新产品的试制周期

以往试制新产品的关键零部件时，必须先设计、制造相应的刀、夹、量具、模具及二次工装，现在试制新产品时，采用精密与特种加工技术就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，各种变压器铁芯，各种特殊及复杂的二次曲面体零件，可以不用设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具及二次工装，大大缩短了新产品的试制周期。而快速成形技术更是试制新产品的必要手段，改变了过去传统的产品试制模式。

### 4. 对产品零件的结构设计产生了很大的影响

特种加工对产品零件的结构设计的影响主要有零件上尖角与圆角、零件与部件拼镶结构或整体结构的选定。例如，为了减少应力集中，花键孔、轴及枪炮膛线的齿根部分最好做成小圆角，但由于拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利，容易磨损，因此刀齿只能设计与制造成无棱角的齿根，而采用电解加工技术时，由于存在尖角变圆的现象，因此必须采用小圆角的齿根。各种复杂冲模，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而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了重要影响

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”。而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的加工，在采用电火花加工技术以后都变难为易了。过去，若淬火处理以前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺，那么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。



1.3

### 6. 特种加工已经成为微细加工和纳米加工的主要手段

近年来出现并快速发展的微细加工和纳米加工技术，主要是电子束、离子束、激光、电火花、电化学等电物理、电化学特种加工技术，学习和掌握这种加工技术后，可以使设计和



工艺技术人员采用更小的结构，甚至微细结构。

### 思考与练习

1. 从特种加工的发生和发展来举例分析科学技术中有哪些事例是“物极必反”的？（提示：如高空、高速飞行时，螺旋桨推进器被喷气推进器所取代）哪些事例是“坏事有时会变为好事”？（提示：如开关触头金属的电火花腐蚀转变为电火花加工，金属锈蚀转变为电化学加工）

2. 试举出几种因采用特种加工工艺之后，对材料的可加工性和结构工艺性产生重大影响的实例。

3. 常规加工工艺和特种加工工艺之间有何关系？应该如何正确处理常规加工和特种加工之间的关系？

