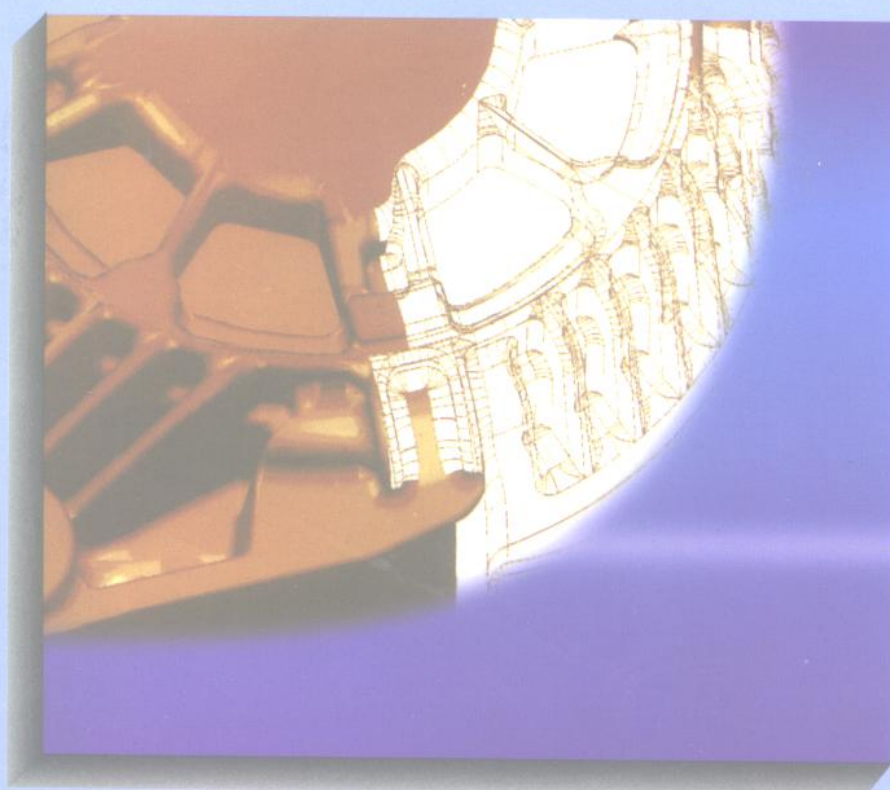


# 特种加工

TE ZHONG JIA GONG



● 孔庆华 编著

同济大学出版社

# 特 种 加 工

孔庆华 编著

同济大学出版社

## 内容提要

本书主要介绍特种加工的基本原理、特点、工艺规律、应用范畴和发展趋向。全书内容有:1. 概论;2. 电火花加工;3. 电化学加工;4. 高能束加工;5. 物料切蚀加工;6. 化学加工;7. 复合加工。

通过本书,读者不难看到特种加工这一新颖制造技术的科学性、先进性、独特性和实用性,并可从中吸取知识和力量。

本书可供电子工业、航空航天、仪器仪表、交通能源、生物工程、医疗器械、精密机械、机械制造等领域的学生、教师及工程技术人员进行教学和科研时使用。

责任编辑 缪临平

封面设计 陈益平

## 特种加工

孔庆华 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.5 字数: 320 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—1500 定价: 20.00 元

ISBN 7-5608-1769-6/TH·38

## 前 言

制造技术是人类生存和发展的基础及社会物质财富的主要来源。随着工业和科学技术的发展,由智能制造、微型机械、纳米技术、特种加工、计算机辅助设计和制造集成、传感器技术等聚集而成的先进制造技术已经形成,并且正在进入全新的时代。其中,特种加工涉及多种学科的交叉融合,不仅补充和发展了传统工艺,而且在应用范围、加工质量、生产率、经济性等方面,尤其是在高、新、尖技术领域,愈来愈发挥着重要的作用。其开发潜力之大、应用前景之广,令世人所瞩目。

本书主要介绍:电火花线切割、电火花磨削、电火花成形加工、激光束加工、电子束加工、离子束加工、等离子弧加工、电解加工、电铸和涂镀、超声加工、液体喷射加工、磨料流加工、化学铣切、照相制版、光刻加工、电解机械复合加工、复合切削加工、超声放电加工、电解电火花研磨等技术的基本原理、特点、工艺规律、应用及发展趋向,且偏重于应用较多、发展较快的去除材料的特种加工。

编写本书的宗旨是:扩大读者的机械制造知识,开拓读者的工艺思路,启迪读者在机械制造方面勇于探索和创新。

本书承蒙上海交通大学奚绍申教授的指导和同济大学侯镇冰、郭大津、诸乃雄及上海大学陈光耀、周家宝等专家学者的鼓励,并由奚绍申教授主审。在此,谨向他们致以最诚挚的谢意!

对于本书引用其内容的书籍、刊物、研究报告等技术文献资料的作者及其单位,在此也表示衷心的感谢!

本书还得到王庆明、庄满蕊、祝振广、赵力、金春鹤的大力相助。

谨向张桂珍、孔宪庭两位老人家致以深深的谢意!

作者谨以此书献给同济大学建校 90 周年校庆,并祝愿同济大学蒸蒸日上。

恳切希望读者批评指正。

孔庆华

1997 年于同济大学

# 目 录

1 概论 .....	(1)
1.1 特种加工的产生与展望 .....	(1)
1.1.1 特种加工的特点 .....	(1)
1.1.2 特种加工的发展趋势 .....	(2)
1.2 特种加工的类别和优选 .....	(2)
1.2.1 工件材料与尺寸形状 .....	(4)
1.2.2 电参数及功率消耗 .....	(5)
1.2.3 加工精度 .....	(5)
1.2.4 生产率和经济性 .....	(5)
1.3 教学内容与要求 .....	(5)
2 电火花加工 .....	(6)
2.1 放电加工的概念 .....	(6)
2.2 电火花加工的基本方式 .....	(6)
2.2.1 电腐蚀现象应用于金属材料尺寸加工必须具备的条件 .....	(6)
2.2.2 伺服系统 .....	(7)
2.3 电火花加工的机理、特点和类型 .....	(8)
2.3.1 电火花加工的机理 .....	(8)
2.3.2 电火花加工的特点和类型 .....	(10)
2.4 电火花加工的若干基本规律 .....	(10)
2.4.1 电蚀过程的极性效应现象 .....	(10)
2.4.2 影响电蚀量的主要因素 .....	(11)
2.4.3 加工速度和工具电极的相对损耗 .....	(13)
2.4.4 影响加工精度和表面完整性的主要因素 .....	(14)
2.5 电火花加工用脉冲电源 .....	(15)
2.5.1 对脉冲电源性能的要求 .....	(15)
2.5.2 脉冲电源的类型 .....	(16)
2.6 电火花成形加工机床自动进给调节系统 .....	(17)
2.6.1 自动进给调节系统的要求 .....	(17)
2.6.2 自动进给调节系统的基本组成和分类 .....	(17)
2.6.3 电液式自动进给调节系统 .....	(18)
2.6.4 电气机械式自动调节系统 .....	(18)
2.7 电火花成形加工机床 .....	(19)
2.7.1 电火花成形机 .....	(19)
2.7.2 电火花线切割机 .....	(21)

2.8	电火花穿孔和成形加工	(23)
2.8.1	冲模的电火花加工	(23)
2.8.2	型腔模的电火花加工	(25)
2.8.3	小孔的电火花加工	(26)
2.9	电火花线切割	(28)
2.9.1	电火花线切割的加工过程和工艺特点	(28)
2.9.2	影响电火花线切割工艺指标的主要因素	(30)
2.9.3	电火花线切割中的几个工艺问题	(31)
2.9.4	电火花线切割的应用	(32)
2.10	其他电火花加工	(34)
2.10.1	几种典型的其他电火花加工	(35)
2.10.2	电火花金属表面强化和刻字	(37)
3	电化学加工	(39)
3.1	电化学加工的基本原理、分类及特点	(39)
3.1.1	电化学加工的基本原理	(39)
3.1.2	电化学加工的分类及特点	(43)
3.2	电解加工	(43)
3.2.1	电解加工的基本原理和特点	(44)
3.2.2	电解加工的基本工艺规律	(46)
3.2.3	提高电解加工精度的主要途径	(53)
3.2.4	混气电解加工	(54)
3.2.5	电解加工的基本设备	(57)
3.2.6	电解加工的应用	(60)
3.3	电解刻印	(67)
3.3.1	电解刻印的基本原理	(67)
3.3.2	影响电解刻印质量的因素	(68)
3.3.3	电解刻印的特点	(69)
3.4	电铸和涂镀	(69)
3.4.1	电铸	(70)
3.4.2	涂镀	(77)
4	高能束加工	(82)
4.1	激光束加工	(82)
4.1.1	激光束加工的基本原理和特点	(82)
4.1.2	激光束加工的基本设备	(86)
4.1.3	激光束加工的基本工艺规律	(93)
4.1.4	激光束加工的应用	(97)
4.2	电子束加工	(102)
4.2.1	电子束加工的基本原理和特点	(102)
4.2.2	电子束加工装置	(105)

4.2.3	电子束加工的应用 .....	(107)
4.3	离子束加工 .....	(110)
4.3.1	离子束加工的基本原理和特点 .....	(110)
4.3.2	离子束加工装置 .....	(112)
4.3.3	离子束加工的应用 .....	(113)
4.4	等离子弧加工 .....	(117)
4.4.1	等离子弧加工的基本原理和特点 .....	(117)
4.4.2	等离子弧加工设备及工艺参数 .....	(119)
4.4.3	等离子弧加工的应用 .....	(120)
5	物料切蚀加工 .....	(122)
5.1	超声加工 .....	(122)
5.1.1	超声加工的基本原理和特点 .....	(122)
5.1.2	超声加工设备及其组成 .....	(125)
5.1.3	超声加工的基本工艺规律 .....	(131)
5.1.4	超声加工的应用 .....	(135)
5.2	液体喷射加工 .....	(138)
5.2.1	液体喷射加工的基本原理和特点 .....	(138)
5.2.2	液体喷射加工的基本设备 .....	(139)
5.2.3	液体喷射加工的去除速度和加工质量 .....	(139)
5.2.4	液体喷射加工的应用 .....	(141)
5.3	磨料喷射加工 .....	(141)
5.3.1	磨料喷射加工的基本原理和特点 .....	(142)
5.3.2	磨料喷射加工的基本设备 .....	(142)
5.3.3	磨料喷射加工的基本工艺 .....	(142)
5.3.4	磨料喷射加工的应用 .....	(145)
5.4	磨料流加工 .....	(146)
5.4.1	磨料流加工的基本原理和特点 .....	(146)
5.4.2	磨料流加工的机床和夹具 .....	(147)
5.4.3	粘性介质 .....	(147)
5.4.4	磨料流加工工艺及其参数 .....	(148)
5.4.5	磨料流加工的应用 .....	(149)
6	化学加工 .....	(151)
6.1	化学铣切 .....	(151)
6.1.1	化学铣切的基本原理 .....	(151)
6.1.2	化学铣切的主要工艺过程 .....	(152)
6.1.3	化学铣切的特点和应用 .....	(153)
6.2	照相制版 .....	(154)
6.2.1	照相制版的基本原理 .....	(154)
6.2.2	照相制版的工艺过程 .....	(154)

6.2.3	照相制版的特点和应用 .....	(157)
6.3	光刻加工 .....	(158)
6.3.1	光刻加工的基本原理 .....	(158)
6.3.2	光刻加工的工艺过程 .....	(158)
6.3.3	光刻加工的特点和应用 .....	(159)
6.4	光电成形电镀 .....	(159)
6.4.1	光电成形电镀的基本原理 .....	(159)
6.4.2	光电成形电镀的工艺过程 .....	(160)
7	复合加工 .....	(162)
7.1	电解机械复合加工 .....	(162)
7.1.1	复合电解磨削 .....	(162)
7.1.2	复合电解珩磨 .....	(165)
7.1.3	复合电解超精加工 .....	(166)
7.1.4	电解研磨复合抛光 .....	(167)
7.2	复合切削加工 .....	(170)
7.2.1	超声振动切削 .....	(170)
7.2.2	磁化切削加工 .....	(175)
7.2.3	低温切削加工 .....	(180)
7.3	超声放电加工 .....	(184)
7.3.1	超声电火花复合抛光 .....	(184)
7.3.2	超声电火花复合打孔 .....	(185)
7.4	超声电解加工 .....	(186)
7.4.1	超声电解复合加工 .....	(186)
7.4.2	超声电解复合抛光 .....	(187)
7.5	电解电火花研磨加工 .....	(187)
7.5.1	MEEC 法 .....	(188)
7.5.2	新 MEEC 法 .....	(188)
	参考文献 .....	(191)



# 1 概 论

## 1.1 特种加工的产生与展望

制造技术历史悠久,是人类生存和发展的基础及社会物质财富的主要来源,对人类的生产 and 物质文明起着极大的作用。18世纪70年代,英国发明了蒸汽机,由于当时还不能制造高精度的气缸,而迟迟不能转化为生产力。直至气缸镗床的出现,这一发明才得以广泛应用,从而导致了第一次产业革命。不言而喻,新产品的研究开发,科学技术和社会经济文化的发展,无不与制造技术息息相关。然而,以后的近200年,人们一直是采用传统加工方法,并利用机械能和切削力来切除工件金属而达到制造要求的。其加工实质是“以硬对软”。

本世纪40年代,前苏联曾发明电火花加工。人们初次脱离了传统加工的旧轨道,利用电能、热能,在不产生切削力的情况下,以低于工件金属硬度的工具去除工件上多余的部分,成功地获得了“以柔克刚”的技术效果。

自本世纪50年代以来,特别是近一二十年,由于材料科学、高新技术的发展和激烈的市场竞争、发展尖端国防及科学研究的急需,不仅新产品更新换代日益加快,而且产品要求具有很高的强度重量比和性能价格比,并正在朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。为此,各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现,对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如,各种难切削材料的加工;各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工;薄壁、弹性元件等低刚度、特殊零件的加工等。对此,采用传统加工方法十分困难,甚至无法加工。于是,人们一方面通过研究高效加工的刀具和刀具材料、自动优化切削参数、提高刀具可靠性和在线刀具监控系统、开发新型切削液、研制新型自动机床等各种途径,进一步改善切削状态,提高切削加工水平,并解决了一些问题;另一方面,则冲破传统加工方法的束缚,不断地探索寻求新的加工方法,于是一种本质上区别于传统加工的特种加工便应运而生。后来,由于新颖制造技术的进一步发展,人们就从广义上来定义特种加工,即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上,从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆的非传统加工方法统称为特种加工(NTM, Non-Traditional Machining)。它是一种涉及多学科、学科交叉融合的先进制造技术,具有传统加工所无可比拟的特点。

### 1.1.1 特种加工的特点

(1) 适应性强,加工范围广,一般不受工件材料的机械物理性能的限制,可以加工任何硬、软、脆、热敏、耐腐蚀、高熔点、高强度、特殊性能的金属和非金属材料;

(2) 多数特种加工不需要工具,有的即使采用工具,也不直接与工件接触,且几乎不承受加工作用力。因此,工具材料的硬度可低于工件材料的硬度;

(3) 可在加工过程中实现能量转换或组合,便于实现控制和操作自动化,故适于加工二维或三维复杂型面、微细表面、微小孔、窄缝、低刚度零件;

(4) 不存在加工中的机械应变或大面积的热应变,可获得较低的表面粗糙度,其热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小,尺寸稳定性好;

(5) 两种或两种以上不同类型的能量可相互组合形成新的复合加工,其综合加工效果明显,且便于推广应用;

(6) 特种加工对简化加工工艺、变革新产品的设计及零件结构工艺性等产生积极的影响。

诚然,特种加工可以解决传统加工难以或无法加工的难题,在加工范围、加工质量、生产率及经济性方面,显示了许多优越性和独到之处,而且其自身的加工工艺及机床设备等方面也都得到了迅速发展。但是,还必须进一步深入研究,提高总体加工和应用水平,切实从以下三个方面去发展。

### 1.1.2 特种加工的发展趋势

(1) 按照系统工程的观点,加大对特种加工的基本原理、加工机理、工艺规律、加工稳定性等深入研究的力度。同时,充分融合以现代电子技术、计算机技术、信息技术和精密制造技术为基础的高新技术,使加工设备向自动化、柔性化方向发展。

(2) 从实际出发,大力开发特种加工领域中的新方法,包括微细加工和复合加工,尤其是质量高、效率高、经济型的复合加工,并与适宜的制造模式相匹配,以充分发挥其特点。

(3) 污染问题是影响和限制有些特种加工应用、发展的严重障碍,必须化大力气利用废气、废液和废渣,向“绿色”加工的方向发展。

目前,特种加工已在许多工业部门的加工领域中广泛应用。我国已将特种加工的进一步发展列入国家“九·五”计划和长期计划,作为重点发展项目。可以预见,随着科学技术和现代工业的发展,特种加工必将不断完善和迅速发展,反过来又必将推动科学技术和现代工业的发展,并发挥愈来愈重要的作用。

## 1.2 特种加工的种类和优选

与其他先进制造技术一样,特种加工正在研究、开发推广和应用之中,具有很好的发展潜力和应用前景。这里主要根据加工能量的来源及其作用形式列举各种比较成熟或常用的特种加工方法(见表 1-1)。

表 1-1 常用特种加工方法分类表

加工方法		主要能量形式	作用形式	符号
电火花加工	电火花成形加工	电、热能	熔化、气化	EDM
	电火花线切割加工	电、热能	熔化、气化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	离子转移	ECM
	电铸加工 涂镀加工	电化学能	离子转移	

续表

	加工方法	主要能量形式	作用形式	符 号
高能束加工	激光束加工	光、热能	熔化、气化	LBM
	电子束加工	电、热能	熔化、气化	EBM
	离子束加工	电、机械能	切蚀	IBM
	等离子弧切割加工	电、热能	熔化、气化	PAM(C)
物料切蚀加工	超声加工	声、机械能	切蚀	USM
	磨料流加工	机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	机械能	切蚀	HDM
化学加工	化学铣切加工	化学能	腐蚀	CHM
	照相制版加工	化学、光能	腐蚀	
	光刻加工	光、化学能	光化学、腐蚀	PCM
	光电成形电镀	光、化学能	光化学、腐蚀	
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、气化腐蚀	ECAM
	电解电火花机械磨削	电、热能	离子转移、熔化、切削	MEEC
	电化学腐蚀加工	电化学、热能	熔化、气化腐蚀	ECE
	超声放电加工	声、热、电能	熔化、切蚀	
	复合电解加工	电化学、机械能	切蚀	
	复合切削加工	机械、声、磁能	切削	

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、工艺特点却不尽相同,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。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、经济性等情况作具体分析,区别对待,合理优选特种加工方法。表 1-2 对几种常用特种加工进行综合比较。

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	设备投资	功率消耗	平均电压(V)/平均电流(A)	特殊要求	材料去除率(mm <sup>3</sup> /min)	工具损耗率(%)	尺寸精度(mm)	表面粗糙度 Ra(μm)	主要适用范围		
电火花成形加工	任何导电的金属、合金、不锈钢、钛合金、耐热钢等。	中	中	80/50		30 ~ 3000	1 ~ 50	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。还可刻字、表面强化、涂覆、磨削等加工		
电火花线切割加工						20 ~ 200 (mm <sup>2</sup> /min)	极小且可补偿	0.02 ~ 0.002	5 ~ 0.32	切割各种二维及三维直纹面组成的各种模具及零件。也常用于半导体材料和贵重金属的切割		
电解成形加工		高	大	10/500	防腐蚀装置、环境保护措施	100 ~ 10000	不损耗	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、去毛刺等		
复合电解磨削		高				1 ~ 100	1 ~ 50	0.02 ~ 0.001	1.25 ~ 0.04	硬质合金等难加工材料的磨削。如,硬质合金刀具、量具小孔、深孔、细长工件等。还可超精光整研磨、珩磨		
超声加工	任何材料	低	小	220/12		1 ~ 50	0.1 ~ 10	0.03 ~ 0.005	0.63 ~ 0.16	切割、加工各种诸如玻璃、石英、金刚石等脆硬材料。可穿孔、套料、研磨		
激光束加工		高	小	4500/2	大功率激光管	0.1	不损耗	0.01 ~ 0.001	10 ~ 1.25	精密加工微小孔、窄缝及成形切割、刻蚀。还可焊接,热处理。		
电子束加工				150000 / 0.001	真空装置	1.6				在各种难加工材料上打微小孔、切缝、蚀刻、焊接等		
离子束加工						很低				最高为 0.01(μm)	0.01	精密微细加工零件表面、抛光、刻蚀、镀覆等
等离子弧加工				钢材、塑料	低	小				100/500	75000	平均 0.3
化学加工		易腐蚀金属材料	低	小		三废处理环保措施	15.0	0.01 ~ 0.001	0.4 ~ 12.5	薄板、片、型孔、型腔的加工,还可减重、图形蚀刻等		

### 1.2.1 工件材料与尺寸形状

电火花加工、电解加工、电解磨削等一般适用于导电材料,但是采取一定措施后,也可加工某些非导电材料。对于脆、硬等非金属材料的加工,适于采用超声加工和高能束加工;而高能束加工难熔合金材料的效率很低。当然,多数特种加工还是适于金属材料的加工。电子束和激光束加工适于微小孔、狭缝的加工;尺寸较小的精密异形孔宜用电火花和超声加工;较大尺寸的异形孔则应用电解加工;面积大、深度浅的图形适合化学加工;型腔用电解和电火花加工较为合适。

### 1.2.2 电参数及功率消耗

电火花加工和超声加工所用电参数不同,但两者所需功率则差不多;而电解加工和等离子弧加工消耗功率最多,其加工速度最快。电解加工的特点是低电压大电流,电子束加工是高电压小电流,其余特种加工则介于两者之间。超声加工和电火花加工的速度低于电解加工,但加工形状复杂、尺寸小、精密的工件表面仍具有较高的加工速度。

### 1.2.3 加工精度

电子束加工适于精密切割;激光束加工适于中等精度切割;等离子弧加工仅适于粗切割;电解加工适于较厚工件、较高精度的切割。激光加工可对任何材料进行微小孔的精密加工;离子束加工适合超精密加工、微细加工。

### 1.2.4 生产率和经济性

通常,电火花加工、电解加工的生产率较高,工具损耗小,适于各种模具的加工;超声加工的工具消耗较大,对脆性材料、异型面加工或与其他特种加工复合,效果较好,也比较经济;就设备投资、加工环境条件、工具损耗而言,电子束加工、离子束加工经济性较差;而电火花加工、超声加工、激光束加工则比较经济,在生产上应用日益广泛。电解加工存在电解液腐蚀、环境污染等一系列问题,同样影响经济性的提高。

## 1.3 教学内容与要求

特种加工涉及学科多,内容比较丰富。本书主要介绍:放电加工、电化学加工、高能束加工、物料切蚀加工、化学加工、复合加工。其中,偏重于发展较成熟、应用较广泛的去除材料的特种加工。书中的专业名称和术语力求按照有待公布的相关标准。

本书所述及的内容是传统机械制造技术的延伸,属于先进制造技术,既强调补充扩大机械制造技术的知识面,又重在开拓工艺方法思路,旨在启发读者勇于创新、敢于探索、善于向实践学习、不受传统加工的约束,为优选新工艺、新技术,改进加工工艺,培养分析和解决实际加工问题的能力,打下良好的基础。要求在学习掌握各种特种加工的最基本的原理、工艺方法、特点、应用范围的基础上,联系工程实际,学以致用,融会贯通,尤其是各种特种加工的综合应用。

教学过程中,可采用现场参观教学、电视录像、介绍国内外最新成果和动态等多种手段和方法。有条件的话,可配合教学内容开设实验,以提高学习兴趣和效果。

具体教学内容可根据机械类、非机械类不同专业的实际需要,进行选择 and 细化。本书可作为工科院校本科和专科学生的必修课或选修课教材,也可供研究生及有关的科技人员参考。

## 2 电火花加工

### 2.1 放电加工的概念

放电加工(EDM, Electrical Discharge Machining)是通过工件和工具电极间的放电而有控制地去除工件材料,以及使材料变形、改变性能或被镀覆的特种加工。工件和工具电极间充有通常是液体的电介质。

在去除材料的范畴中,常见的放电加工方式有电火花加工和电弧加工两大类,且以前者为主。图 2-1 所示是应用放电加工工艺去除工件材料前后的物质状态及能量形式的变化。

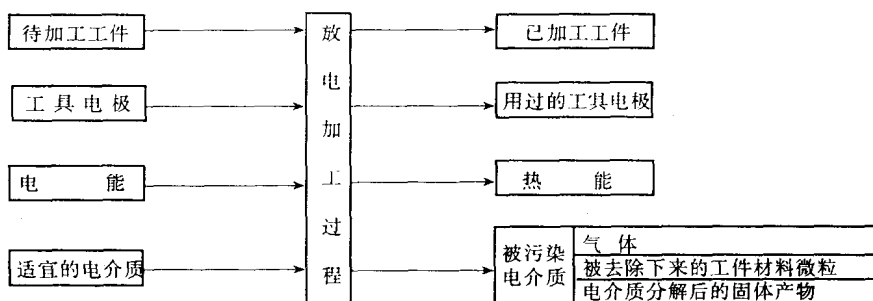


图 2-1 放电加工前后的物质状态及能量形式的变化

### 2.2 电火花加工的基本方式

电器开关的触点在闭合或断开时往往出现伴随着噼啪响声的蓝白色火花。这种现象称为火花放电,其结果是金属表面被腐蚀成许多细小的凹坑,人们称之为电腐蚀。显然,电腐蚀现象对于电器是有害的,然而从另一个角度却给人们以启示,导致了一种新的金属去除方法的产生,这就是在 20 世纪 40 年代开始研究和逐步应用到工业生产中的电火花加工(Spark-Erosion Machining)\*

研究表明,电腐蚀的主要原因是:火花放电时,放电通道中瞬时产生大量的热,达到的高温足以使任何金属材料局部熔化甚至气化而被蚀除。

#### 2.2.1 将电腐蚀现象应用于金属材料尺寸加工必须具备的条件

(1) 放电形式必须是瞬时的脉冲性放电。图 2-2 所示为矩形波脉冲电源的电压波形。脉冲宽度一般为  $10^{-3} \sim 10^{-7}$  s,相邻脉冲之间有一个间隔,这样才能使热量从局部加工区传导扩散到非加工区。否则就会像持续电弧放电那样,使工件表面烧伤而无法用于尺寸加工。

\* 由于历史原因,某些从业人员迄今仍有将“电火花加工”笼统称为“Electrical Discharge Machining”以及简称为“EDM”的。

(2) 火花放电必须在有较高绝缘强度的液体介质中进行,这样既有利于产生脉冲性的放电,又能使加工过程中产生的金属屑、焦油、碳黑等电蚀产物从电极间隙中悬浮排出,同时还能冷却电极和工件表面。

(3) 必须有足够的脉冲放电强度,一般局部集中电流密度高达  $10^5 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$ ,以实现金属局部熔化和气化。

(4) 工具电极和工件表面间必须保持一定的放电间隙,通常为数微米到数百微米,这就需要控制工具电极随着工件表面的蚀除而向前进给,以保持放电间隙。

上述问题的综合解决是通过电火花加工设备来实现的,如图 2-3 所示。

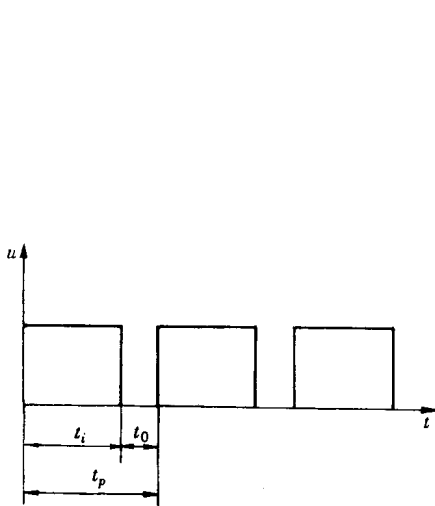


图 2-2 脉冲电源的电压波形  
 $t_i$ —脉冲宽度;  $t_0$ —脉冲间隔;  
 $t_p$ —脉冲周期

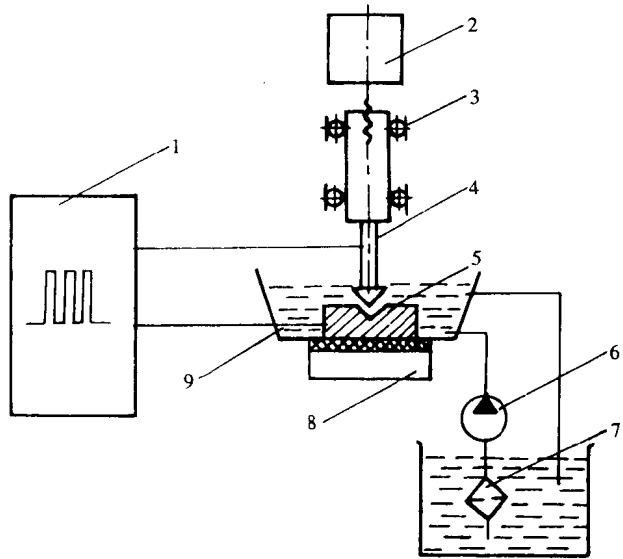


图 2-3 电火花加工设备示意图  
 1—脉冲电源; 2—伺服系统; 3—机床床身;  
 4—工具电极; 5—工件; 6—工作液泵; 7—过滤器;  
 8—工作台; 9—工作液

### 2.2.2 伺服系统

它可使工具和工件间持续保持一个很小的放电间隙。当电源接通时,脉冲电压将在工具和工件之间的某间隙最小处或绝缘强度最低处击穿液体介质,从而产生火花放电,瞬时高温将达  $10000^\circ\text{C}$  以上,使工具和工件表面的局部金属熔化和气化而被蚀除,各自形成一个小凹坑。脉冲放电结束后,液体介质在正常情况下会恢复绝缘,待第二个脉冲电压到来时,上述过程又会重复,因而在工具和电极表面又会形成一个新的小凹坑。如此循环往复,形成一秒钟成千上万次放电的结果,使整个加工表面由无数个小凹坑所组成(参见图 2-4)。随着工具电极不断向工件进给,工具的轮廓便复印在工件上,最终加工出所需的零件。

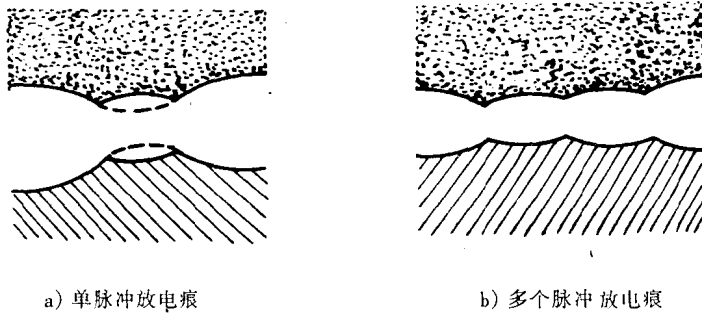


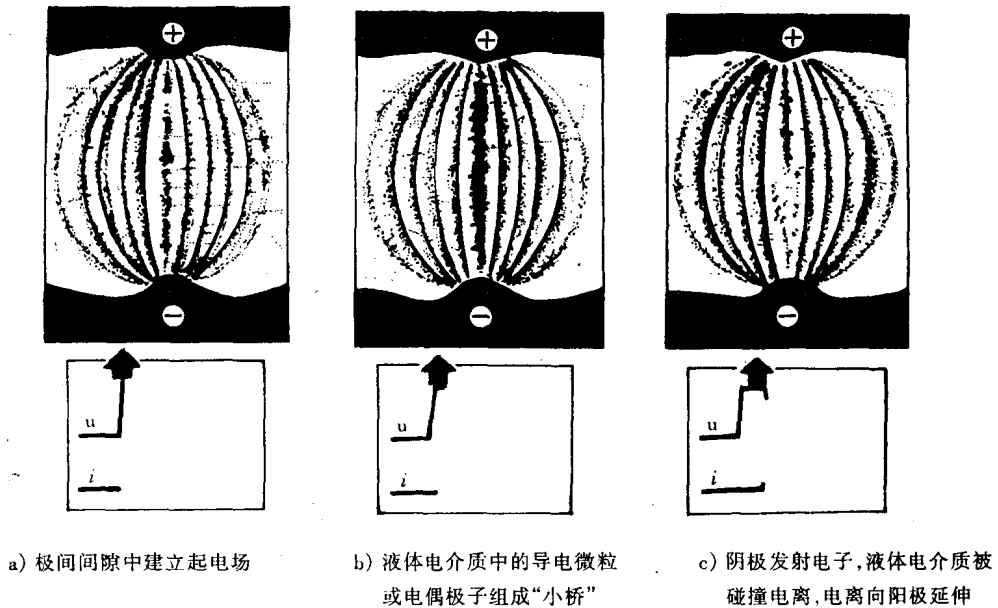
图 2-4 电火花加工表面局部放大示意图

## 2.3 电火花加工的机理、特点和类型

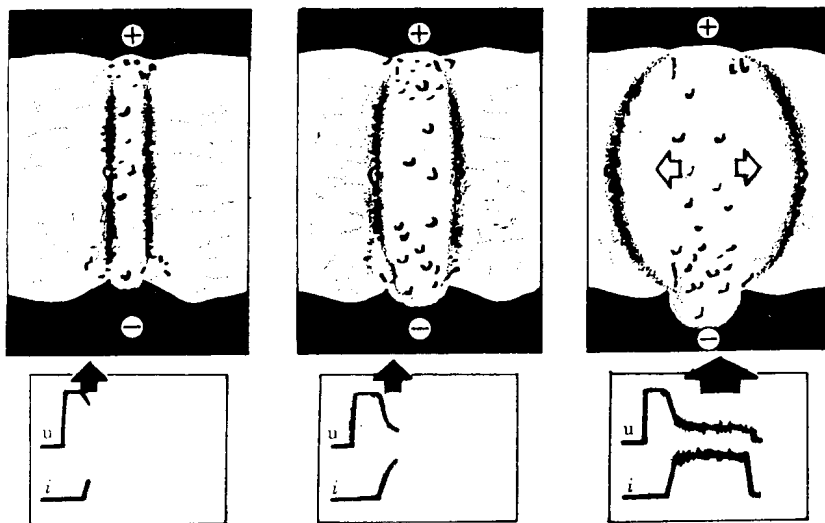
### 2.3.1 电火花加工的机理

了解放电加工的机理,即电极表面的金属材料蚀除的微观过程,将有助于掌握电火花加工的基本规律,以便能对电火花加工的进给装置、脉冲电源、机床等提出合理的要求。

实验结果表明,放电腐蚀的微观过程是电力、电磁力、热力和流体动力等综合作用的过程。一般认为在浸没于液体电介质中的工件和工具电极之间的间隙里接连不断地发生大致分为三个阶段的物理过程:极间液体电介质的电离;等离子放电通道和气泡的形成、扩展及热蚀;电蚀产物的抛出和极间液体电介质性能的复原。及时地将电蚀产物排离极间间隙并使该处的液体电介质完全恢复绝缘性能,是使上述物理过程随着脉冲电压反复施加在间隙两端而周而复始的必要条件之一。图 2-5 所示为电火花加工中的电火花腐蚀过程。



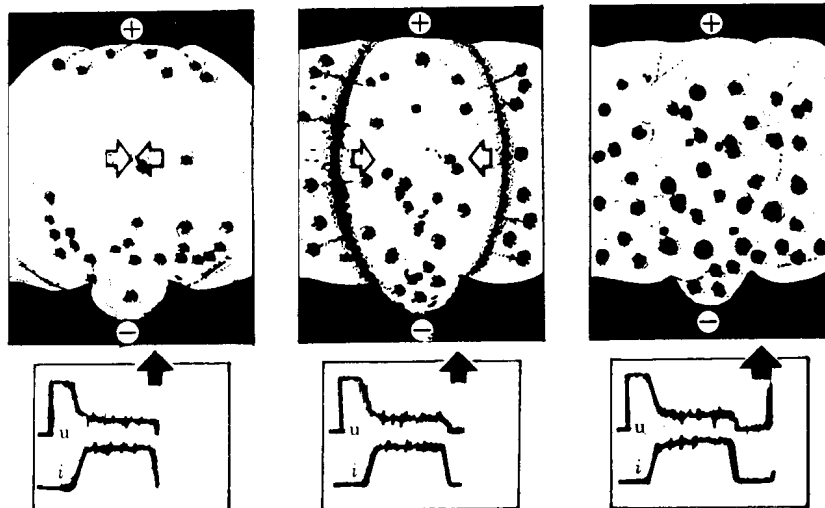




d) 极间间隙中形成等离子放电通道

e) 碰撞、冲击所产生的热量和焦耳热使电极材料熔化和气化，但通道压力使之只能部分地移离电极表面。放电通道扩展，其周围的流体电介质呈气态

f) 气态物质以大于放电通道扩展的速度扩展而形成气泡



g) 气泡在放电通道急剧收缩时的继续扩展，以及气泡壁上残余蒸汽的冷凝等等，使气泡内压力大大降低，引起已熔化的过热电极材料沸腾和未熔化的电极材料的熔化及气化，并一并随同过热材料中的气体以爆炸形式抛出

h) 放电通道消失，气泡收缩，气泡中的一部分金属液滴和由液体电介质热裂分解而成的炭黑等等穿过气泡壁进入液体中凝固冷却

i) 金属微粒、炭黑和气体弥散在液体电介质中，电极表面留下凹坑

图 2.5 电火花加工中的电火花腐蚀过程