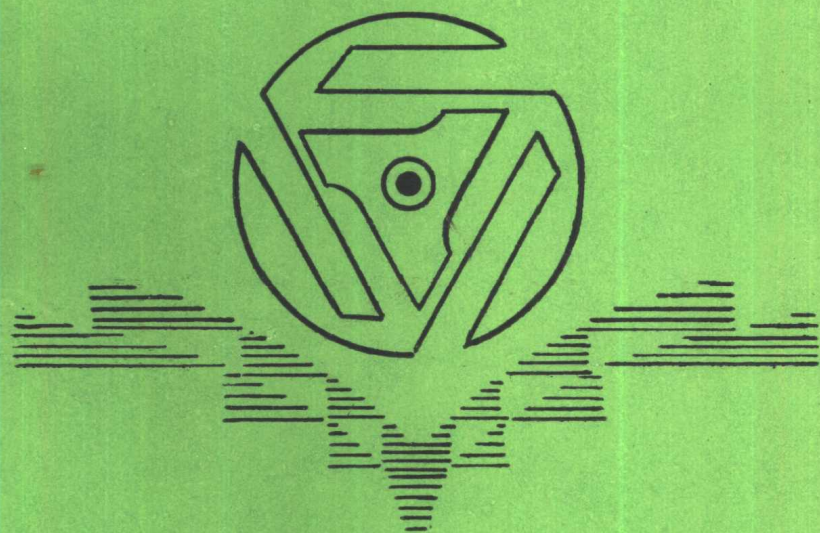


特种加工



航空工业出版社

6

特 种 加 工

金庆同 主编

航空工业出版社

内 容 简 介

本书可供高等工科院校机械类各专业本科生或大专生选修特种加工课程的教科书，以及有关专业研究生的参考用书。也可供工厂、研究所从事特种加工的科技人员参考。

本书在取材上注意了系统性、先进性和实用性，以便使读者从中获得教益和启发。

全书共分七章，主要讲述：特种加工综述、电火花加工、电火花线切割加工、电解加工、高能束流加工、超声加工和其它特种加工。

特 种 加 工

金庆同 主编

航空工业出版社出版

(北京市安定门外小关东里14号)

新华书店总店科技发行所发行

南京航空学院印刷厂印刷

1988年6月第1版

1988年6月第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：14.75

印数：1-2500

字数：360.3千字

ISBN 7-80046-033-9/TH·006

定价：2.50元

前 言

本书为机械类专业特种加工课程的教学用书，教学时数为30学时。

随着近代工业和科学技术的迅猛发展，特种加工已成为机械制造中新兴的分支，很多高等工科院校相继开设特种加工选修课程，迫切需要该方面的教材，很多有关专业的科技人员和研究生也迫切需要该方面的参考用书。

针对上述需求，本书以高等工科院校机械类专业的本科生和大专生作为主要对象，并可供工厂及研究所从事特种加工及其它机械制造工艺方面的科技人员和工人参考之用。

本书根据编者多年从事特种加工的教学经验，在历届特种加工讲义的基础上修改、充实编写而成。在内容取材方面注意结合我国生产实际，广泛收集国内外的先进科技和生产成果，以求达到先进性、实用性和科学性。

本书主要内容包含：特种加工综述、电火花加工、电火花线切割加工、电解加工、高能束流加工（含激光加工、电子束加工、离子束加工）、超声加工和其它特种加工（含等离子弧加工、磨料流加工、磨料喷射加工、液体喷射加工、化学铣削和光化学加工），着重阐述各种特种加工方法的基本原理、工艺规律、加工设备和加工工艺。

本书由南京航空学院特种加工教研室和精密机械教研室有关教师集体编写。由金庆同教授主编，各章分别由金庆同（编写第一章）、赵国光（编写第二、三章）、杨怡生（编写第四章）、杨雪樱（编写第五、六、七章）等同志编写。

本书由西北工业大学周广诚教授主审。在编审过程中西北工业大学特种加工教研室和南昌航空学院机械制造工艺教研室教师对本书提出了很多宝贵意见，在此谨向上述同志致以谢意。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中难免存在缺点和错误，望兄弟院校有关教师、厂、所科技人员和广大读者惠予批评指正。

编 者 1987年8月

目 录

第一章 特种加工综述	(1)
§ 1.1 特种加工的产生背景.....	(1)
§ 1.2 特种加工的特点.....	(1)
§ 1.3 特种加工的分类.....	(2)
§ 1.4 几种常用特种加工方法的比较.....	(3)
§ 1.5 特种加工的应用范围.....	(5)
第二章 电火花加工	(7)
§ 2.1 电火花加工的基本原理.....	(7)
§ 2.2 电火花成型加工的基本工艺规律.....	(22)
§ 2.3 电火花成型加工机床和脉冲电源.....	(35)
§ 2.4 电火花成型加工的控制.....	(50)
§ 2.5 电火花成型加工工艺.....	(57)
§ 2.6 共轭回转式电火花加工.....	(67)
§ 2.7 其他电火花加工.....	(72)
第三章 电火花线切割加工	(78)
§ 3.1 电火花线切割加工的基本原理.....	(78)
§ 3.2 电火花线切割加工设备.....	(81)
§ 3.3 电火花线切割控制和编程技术.....	(87)
§ 3.4 影响线切割工艺指标的因素.....	(95)
§ 3.5 线切割加工工艺.....	(107)
第四章 电解加工	(115)
§ 4.1 电解加工的基本原理.....	(115)
§ 4.2 电解液.....	(115)
§ 4.3 电解加工的成型规律及加工精度.....	(130)
§ 4.4 电解液的流动特性及流场设计.....	(144)
§ 4.5 电解加工的设备.....	(156)
§ 4.6 典型零件的电解加工.....	(159)
第五章 高能束流加工	(168)
§ 5.1 激光加工.....	(168)
§ 5.2 电子束加工.....	(189)

§ 5.3 离子束加工·····	(196)
第六章 超声加工 ·····	(203)
§ 6.1 超声加工的基本原理和特点·····	(203)
§ 6.2 超声加工的基本设备·····	(205)
§ 6.3 超声加工的基本工艺规律·····	(208)
§ 6.4 超声加工的应用·····	(210)
第七章 其它特种加工 ·····	(213)
§ 7.1 等离子弧加工·····	(213)
§ 7.2 磨料流加工·····	(215)
§ 7.3 磨料喷射加工·····	(217)
§ 7.4 液体喷射加工·····	(219)
§ 7.5 化学铣削·····	(220)
§ 7.6 光化学加工·····	(224)
参考文献 ·····	(227)

第一章 特种加工综述

§ 1.1 特种加工的产生背景

五十年代以来, 由于机械工业、电子工业、航空航天工业和化学工业等的迅猛发展, 科学技术的突飞猛进, 许多产品要求具备很高的强度重量比和性能价格比, 有些产品则需要高温、高压、高速、重载荷或腐蚀环境下长期而可靠地进行工作。为了适应这一要求, 各种新结构、新材料和复杂形状的精密零部件大量涌现, 其结构形状愈来愈复杂, 材料性能愈来愈强韧, 精度要求愈来愈高, 表面完整性愈来愈严格, 这就使机械制造面临一系列严峻的任务:

1. 难切削材料的加工 如硬质合金、高温合金、钛合金、耐热不锈钢、淬火工具钢、聚晶金刚石、宝石、陶瓷、玻璃、锗、硅等高硬度、高强度、高韧性、高脆性、高熔点、高纯度的导体、非导体和半导体等的加工。

2. 复杂型面的加工 如涡轮叶片、整体涡轮、型腔模、发动机机匣等零件上的立体型面、喷油咀、喷丝头、花键、炮管、燃烧室等零件上的型孔、小孔和窄缝。

3. 精密表面的加工 如航空陀螺、高压液压活门、精密光学透镜等零件上的精细表面尺寸精度达 0.1 微米, 表面粗糙度 R_a 达 0.01 微米。

4. 特殊零件的加工 如薄壁零件、弹性元件等低刚度零件。

上述情况, 用传统的切削加工方法难以达到经济性的要求。在生产的迫切需要下, 人们通过各种渠道、借助于多种能量形式, 探寻新的工艺途径, 于是各种区别于传统切削加工方法的新型的特种加工方法先后应运而生。目前, 特种加工已成为机械制造中不可缺少的一个分支, 在难切削材料、复杂型面、精细表面、低刚度零件以及模具加工等领域中已成为重要的工艺方法。

§ 1.2 特种加工的特点

特种加工是借助于电能等多种能量或其组合以实现材料切除的加工方法。由于它发展较晚, 并区别于传统的切削加工方法, 故又称“新工艺”或“非传统加工工艺”。

特种加工与切削加工相比较, 其本质区别在于用以切除材料的能量形式不同。切削加工主要利用机械能, 通过刀具实现材料切除。而特种加工则利用电能、热能、光能、声能、化学能等能量或其与机械能的组合以实现材料切除。由于它们赖以切除工件材料的能量形式不同, 决定了特种加工如下的一系列特点:

1. 工件的几何特征方面 便于加工复杂型面, 低刚度零件和微细表面。

由于不少特种加工方法仅需以简单的进给运动, 即可加工出三维复杂型面, 故特种加工

已成为复杂型面的主要加工手段。由于特种加工大多系非接触加工，工件不承受较大的宏观机械力，故便于加工低刚度的薄壁零件。由于一些特种加工方法借助于可控高能粒子流切除材料，故便于实现微孔、窄缝等微细表面的切除。

2. 工件的材料特征方面 便于加工超硬超强材料，热敏材料，特殊性能的金属或非金属材料。

由于很多特种加工不是借助于机械能切除材料，其加工性能与工件材料的强度或硬度等机械性能无直接联系，故便于加工超硬超强材料。由于特种加工过程中产生的宏观热量甚小，故便于加工热敏材料。由于各种特种加工方法借助于不同能量形式，故可分别用于加工各种特殊性能的金属或非金属材料。

3. 工具材料方面 可以采用较软的工具材料切除较硬的工件材料。

切削加工所用工具材料必须硬于工件材料，而绝大多数特种加工所用工具不与工件接触，且不承受较大的作用力，故可根据加工需要采用较软的工具材料。有些特种加工则仅通过粒子流进行加工，不需任何工具。

4. 工件的表面特征方面 便于获得良好的表面质量。

由于特种加工过程中工件表面不似切削加工那样产生强烈的弹、塑性变形，故有些特种加工方法可获得良好的表面粗糙度，其残余应力、冷作硬化、热影响区及毛刺等表层缺陷较切削加工者为小。

§ 1.3 特种加工的分类

特种加工包含面甚广，不少书刊将磨料流加工、液体喷射加工、磨料喷射加工等借助于机械能切除材料，但又不同于一般切削加工和磨削加工的加工方法也归于特种加工范畴。目前，各种特种加工方法总计已达数十种。一般多按其所用能量形式进行分类。表 1-1 即目前常用的一些特种加工方法的分类表。

由表 1-1 可以看出，除主要借助于化学能或机械能的加工方法以外，大多数特种加工均为直接利用电能或电能产生的特殊作用所进行的加工方法，通常将这些特种加工方法统称为“电加工”。

六十年代以来，为了进一步发展特种加工，相互取长补短，以多种能量同时作用为主要特征的复合加工得到迅速发展，如电解磨削、电火花磨削、电解放电加工、超声电火花加工等。如图 1-1 所示。

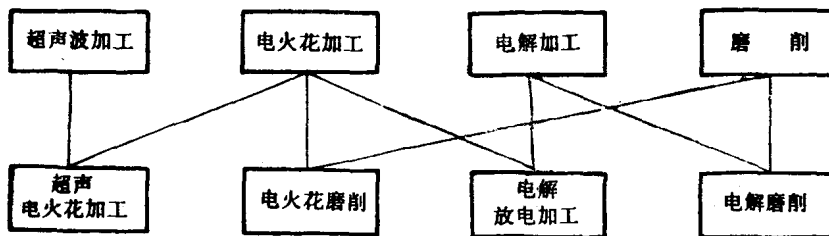


图 1-1 复合加工示意图

表 1-1 常用特种加工方法分类表

主要能量形式	加工方法	符号	备注
电、化学能	电解加工	ECM	电 加 工
电、化学、机械能	电解磨削	ECG	
电、热能	电火花加工	EDM	
	等离子弧加工(切割)	PAM(C)	
	电子束加工	EBM	
光、热能	激光加工	LBM	
电、机械能	离子束加工	IBM	
声、机械能	超声加工	USM	
化学能	化学加工(铣削)	CHM	非 电 加 工
光、化学能	光化学加工	PCM	
机械能	磨料流加工	AFM	
	磨料喷射加工	AJM	
	液体喷射加工	HDM	

§ 1.4 几种常用特种加工方法的比较

由于各种特种加工用以切除材料的能量形式各有差异，故其加工过程的物理参数、工艺指标和适用范围均彼此不同。为便于比较，将大致情况介绍如下，以供参考。

一、加工过程的物理参数

在特种加工过程中，通常以电压、电流、功率、加工间隙和工作介质等作为主要物理参数。今将几种常用特种加工的物理参数（大致数）列于表 1-2，以资比较。

由表 1-2 可知，电解加工物理参数的特点是低电压和大电流，而电子束加工的特点则为高电压和小电流，其余几种特种加工方法则介于上述两者之间。电解加工所需大电流主要用以形成离子微粒的切除，电子束加工所需高电压主要用以驱使电子以极高速度冲击工件表面。由于离子与电子尺寸上的巨大差异，使电解加工的体积切除速度较电子束加工快达万倍以上。

从消耗功率来看，电解加工和等离子弧加工消耗功率最多，其加工速度在所有特种加工中也最高。

从加工间隙来看，电火花加工最小，故其加工精度也高。

综上所述，各种特种加工物理参数上的差异，与其工艺指标有密切联系。

二、工艺指标

特种加工的工艺指标主要包含：加工速度、加工精度（尺寸控制）、表面粗糙度、棱角

表 1-2 特种加工过程的物理参数

物理参数 加工方法	电压 (V)	电流 (A)	功率 (W)	加工间隙 (mm) ≥	工作介质
电解加工	12	5000	60000	0.12	电解液
电火花加工	80	50	4000	0.02	液体介质
等离子弧加工	100	500	50000	7.5	惰性气体
电子束加工	150000	0.001	150(平均)	~100	真空
激光加工	4500		1000	~150	空气
超声加工	220	12	400	0.25	磨料悬浮液
化学加工	—	—	—	—	化学溶液
磨料喷射加工	—	—	—	76	含磨料气流

半径、加工斜度等方面。其具体数值变化很大,为便于定性比较,将其大致数值列于表1-3以供选用时的参考。

表 1-3 特种加工的工艺指标

工艺指标 加工方法	加工速度 (mm ³ /min)	尺寸控制 (mm)	棱角半径 (mm)	加工斜度 (mm/mm)	表面粗糙度 (μm)
电解加工	11000	0.1	0.3	≥10	0.2~0.8
电火花加工	400	0.02	0.03	<10'	0.4~2.5
等离子弧加工	15000	1.5		1°~7°	粗
电子束加工		0.03	0.25	1°~2°	0.5~2.5
激光加工		0.03	0.25	1°~2°	0.2~1.3
超声加工	300	0.02	0.03	0.005	0.2~0.8
化学加工	20	0.05	1.5		0.5~2.5
磨料喷射	20	0.05	0.10	0.005	0.15~1.6
(铣削)		0.05	0.05		0.5~50

由表 1-3 可以看出,各种特种加工方法的工艺指标彼此相差悬殊,各有特色。

在加工速度方面,电解加工与等离子弧加工最高。由于电解加工对加工表面形状和工件材料(金属)的适用性又很好,故电解加工具有很大的发展潜力。等离子弧加工的适用性差,主要用于切割。电火花加工与超声加工的加工速度较电解加工为低,但当其加工小的、复杂的和精密的表面时,仍具有较大的加工速度。电子束加工和激光加工的加工速度(平均值)很低,但其瞬时加工速度高,主要用于特定的加工条件下(如加工微小孔及窄缝切割)。

在尺寸控制方面,电解加工、化学加工、电子束加工和激光加工与一般铣削加工相近(0.03~0.05毫米),而超声加工与电火花加工则可分别控制在0.02毫米乃至0.01毫米的公差内,适于精密加工。等离子弧加工的尺寸控制很差,仅适用于简单的粗糙的切割。

在棱角半径方面，以超声加工和电火花加工为优，它们可使棱角半径保持在 0.03 毫米范围内。而其它特种加工方法则远大于此值。

在加工斜度方面，精密电火花加工的加工斜度都可控制很小。激光加工和电子束加工的加工斜度则相当大，其余各特种加工方法可控制在一般的要求范围内。

在表面完整性方面，除等离子弧加工外，其余特种加工的表面均可控制在一般要求的范围内。一些零件对表面完整性要求较高，不仅要求较小的微观不平度，且要求较小的表面缺陷。在该方面的比较见表 1-4。

表 1-4 特种加工的表面缺陷

加工方法 \ 表面缺陷	微观不平度	微裂纹	溶化区	硬化层
电解加工	较小	少	无	无
电火花加工	中	有	有	有*
电子束加工	中	有	有	有
激光加工	中	有	有	有
超声加工	较小	有	无	中
化学加工	中	少	无	无

* 线切割加工表面存在软化层。

§ 1.5 特种加工的应用范围

总的来说，特种加工的应用范围是相当广泛的。由于各种特种加工采用的能量形式及其工艺特征不同，其应用范围也不一样。为便于比较，将大致情况介绍如下，以供参考。

一、对工件材料的适用性

特种加工对工件材料的适用性较切削加工为优，但对不同工件材料仍有区别。其大致情况如表 1-5 所示。

表 1-5 特种加工对工件材料的适用性

加工方法 \ 工件材料	铝	钢	超合金	钛	难溶合金	陶瓷	塑料	玻璃
电解加工	良	优	优	良	良	×	×	×
电火花加工	良	优	优	良	优	×	×	×
电子束加工	良	良	良	良	优	优	良	良
等离子弧加工	优	优	优	良	劣	×	劣	×
激光加工	良	良	良	良	劣	优	良	良
超声加工	劣	良	劣	良	优	优	良	优
化学加工	优	优	良	良	劣	劣	劣	良
磨料喷射加工	良	良	优	良	优	优	良	优

由表 1-5 可知，多数特种加工对金属材料具有优良的适用性，但超声加工不宜加工铝和超级合金。而难溶合金则不宜选用激光加工、等离子弧加工和化学加工等方法。对于非金属

材料，应选用超声加工、激光加工、电子束加工和磨料喷射加工等方法，而不能选用电解加工和等离子弧加工。电火花加工在采取适当措施后也可用于加工某些非金属材料。

二、对加工表面形状的适用性

各种特种加工方法对加工表面形状的适用性不尽相同，如表 1-6 所示。

表 1-6 特种加工对表面形状的适用性

表面形状 加工方法	微小孔 D(mm)		较大孔 L/D		异型孔		型腔		立体型面	切割	
	<0.03	0.13 } 0.03	<20	>20	精密	一般	浅	深		薄	厚
电解加工	—	—	优	优	良	优	优	优	优	优	优
电火花加工	—	—	优	良	优	优	优	优	良	优	—
等离子弧加工	—	—	良	—	劣	劣	—	—	—	优	优
电子束加工	良	优	良	劣	劣	劣	—	—	—	优	良
激光加工	优	优	良	劣	劣	劣	—	—	—	优	良
超声加工	—	—	优	劣	优	优	劣	劣	劣	优	—
化学加工	良	良	—	—	劣	良	优	劣	—	优	—
磨料喷射加工	—	—	良	劣	劣	良	—	—	—	优	—

由表 1-6 可知，对于微小孔来说，电子束加工和激光加工是适用的加工方法。但在特定条件下，电火花加工乃至电解加工也可用于加工微小孔。当加工深径比小于 20 的较大直径的孔时，电解加工、电火花加工和超声加工（加工脆性材料）即成为合适的加工方法。当加工深径比大于 20 的深孔时，电解加工的优越性更为突出。

对于异型孔来说，最好采用电火花加工，电解加工和超声加工。当加工超级合金等难加工材料、圆角半径小及深度大的异型孔时，电解加工要比立铣为佳。一般来说，电火花加工及超声加工适于尺寸较小的精密异型孔，而电解加工则适于加工较大的异型孔。

对于型腔来说，主要采用电解加工、电火花加工和化学加工。当加工深度较大，圆角较小或难切削材料时，电解加工和电火花加工较之切削加工更为优越。化学加工则主要用于面积大、深度浅或含有多个小型腔的情况。

对于立体型面来说，电解加工是该型面的主要加工方法，电火花加工次之。

对于切割来说，可采用电解加工、等离子弧加工、激光加工和电子束加工等方法，当切割较厚材料时，电解加工和等离子弧加工的切割速度更快，其优越性更为显著。

第二章 电火花加工

§ 2.1 概 述

一、放电加工和电火花加工

所谓放电加工 (Electrical Discharge Machining 简称 EDM) 是在一定的加工介质中, 通过两极 (工具电极或简称电极和工件电极或简称工件) 之间的火花放电和短电弧放电的电蚀作用来对材料进行加工的方法, 电火花加工则是放电加工的主要方式。

电火花加工的特征是采用在空间上和时间上相互分开的、不稳定或准稳定的一系列放电 (脉冲放电或称为广义火花放电) 来进行材料的蚀除加工; 而短电弧加工则是利用虽然在空间上和时间上也相互分开, 但却是稳定的放电 (电弧) 来进行的。

放电指的是电流通过绝缘介质 (气、液或固体) 的一种现象, 电闪雷鸣就是自然界里的一种放电现象。放电是一个极为复杂的过程, 对于电火花加工条件下微小电极间隙内的放电现象, 目前还研究得不够深入。通常引用大间隙条件下的气体放电过程来说明一些问题, 这种放电的伏安特性以及放电电流密度随时间变化关系如图 2-1 所示。

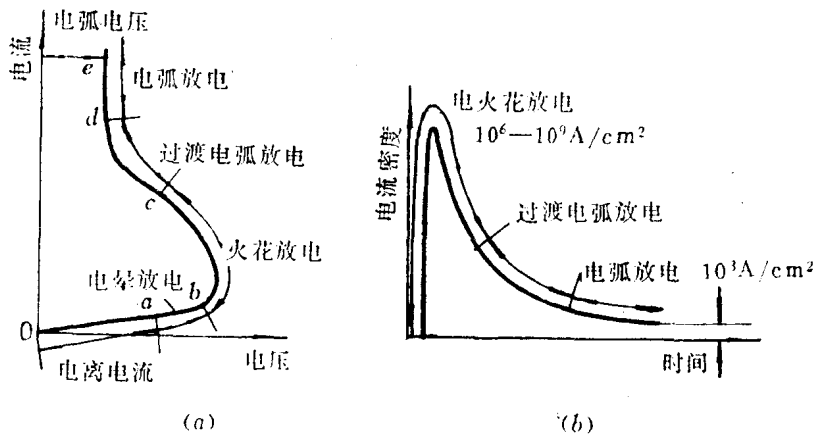


图 2-1 气体中的放电特性
(a) 伏安特性 (b) 电流密度

当置于气体中的两金属电极上的电压逐渐升高时, 由于外界的高能粒子能使介质电离, 形成了很小的电离电流 (图 2-1 中的 0—*a* 段), 又称为暗流。对于液体, 因为会产生气体, 也存在暗流, 电压继续提高会使绝缘部分破坏, 造成电晕放电 (*a*—*b* 段), 这是一种不稳定的放电状态, 带电粒子不能自行增殖, 只能在某些局部产生和消灭, 保持平衡的放电。若继续提高电压, 带电粒子的速度增加, 能使被碰撞的分子、原子电离, 造成带电粒子不断增殖, 向全路绝缘破坏转移, 电流急剧增大, 成为稳定的放电——电弧 (*d*—*e* 段), 这种放电在时间上连续, 在空间上集中, 放电加工中如出现这一情况常引起电极和工件的烧

伤。但电弧放电在工业上可用作光源、热源、进行焊接、切割等。

靠外界因素激发才能维持的放电称为非自持放电；靠本身带电粒子增殖就能维持的放电称为自持放电，两种放电之间的转折点，即自持放电的初始阶段，称为介质击穿。

从介质击穿到电弧放电之间的过渡形式称为脉冲放电（又称为广义火花放电）。这种放电在时间上断续、在空间上分散，是电火花加工所采用的放电形式。脉冲放电又可分为火花放电和过渡电弧放电，前者的特点是放电电流密度和伏安特性有急剧的变化（ $b-c$ 段），后者的特点是放电电流密度随时间而下降，放电电压随电流的增加而降低（ $c-d$ 段）。

放电加工中的另一类称为短电弧加工，短电弧放电指的是弧柱短和时间短的电弧放电。在放电加工中一般特指那种靠电极与工件相对运动（转动或振动）的断续电弧放电（不用脉冲电源），主要用于盘电极或带电电极的放电切割（图 2-2），通常采用水玻璃溶液等做为工作液，又称阳极机械切割。这种加工方法的精度不高，本书中以后不再讨论。

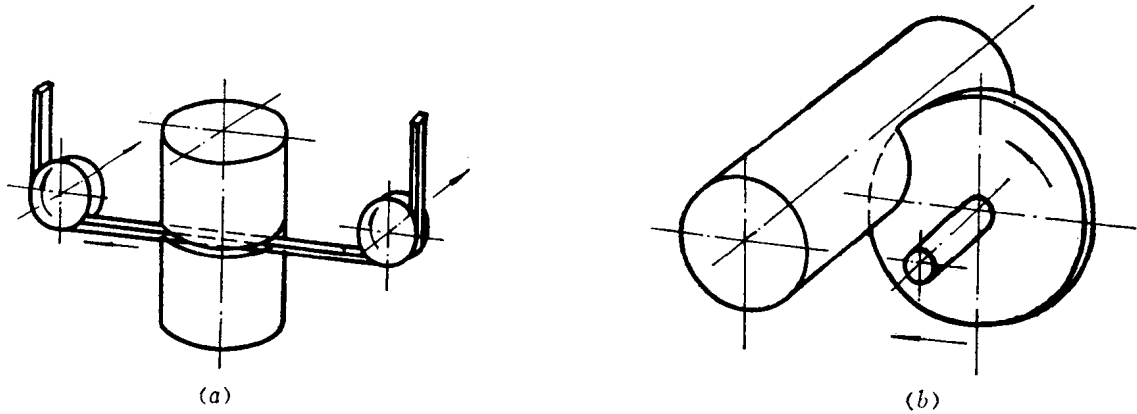
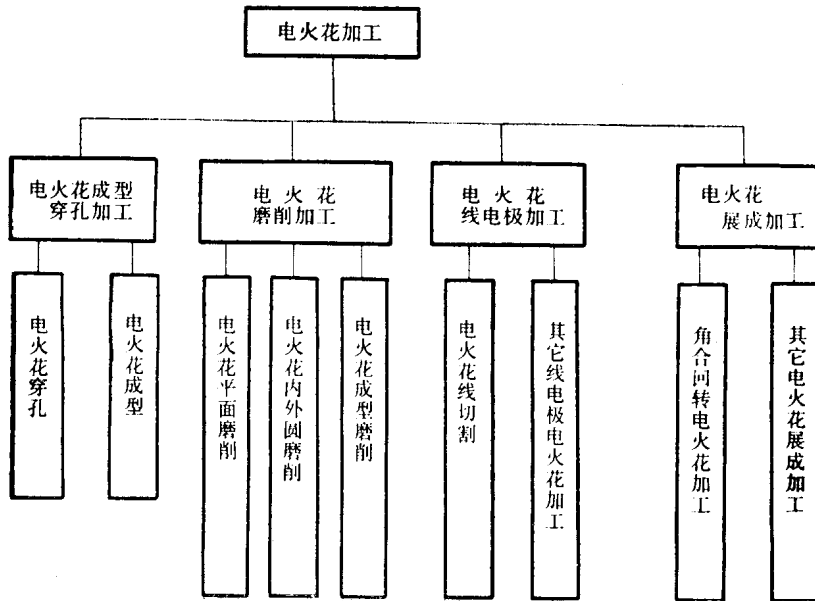


图 2-2 短电弧放电切割
(a) 带电极 (b) 盘电极

电火花加工按工艺方法分类，如表 2-1 所示。

表 2-1 电火花加工分类



(一) 电火花成型穿孔加工 是传统的电火花加工方法，其特点是电极相对于工件产生一进给运动。有时还伴随着一、两个辅助运动，如振动、抬动、转动、平动、行星运动或轨道运动（摇动）。这种方法又可分为电火花穿孔和电火花成型：

1. 电火花穿孔 一般指贯通的二维型孔的电火花加工，如图 2-3 所示。

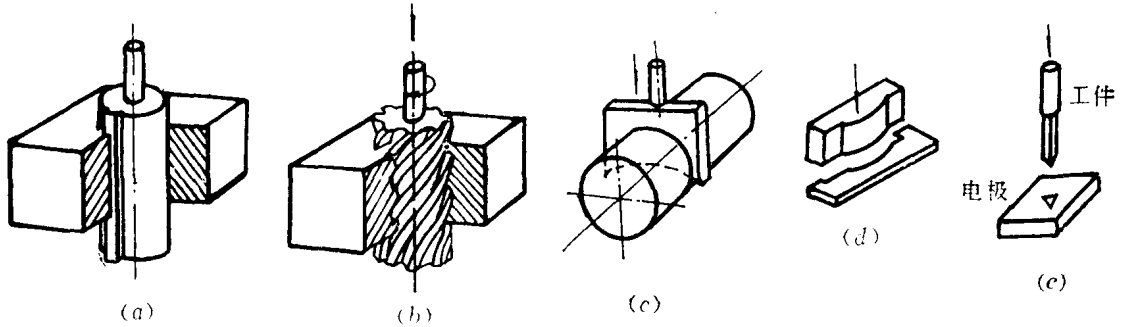


图 2-3 电火花穿孔

(a) 等截面通孔 (b) 变截面通孔 (c) 片电极切割
(d) 侧面成型 (e) 反拷贝加工

2. 电火花成型 一般指三维型腔和型面的电火花加工，如图 2-4 所示。

(二) 电火花磨削 这种方法的特点是工具电极（表面）和工件电极（表面）之间有一个相对运动，其中之一或两者作旋转运动，它没有象传统电火花加工那样的伺服进给运动。几种类型的电火花磨削如图 2-5 所示。

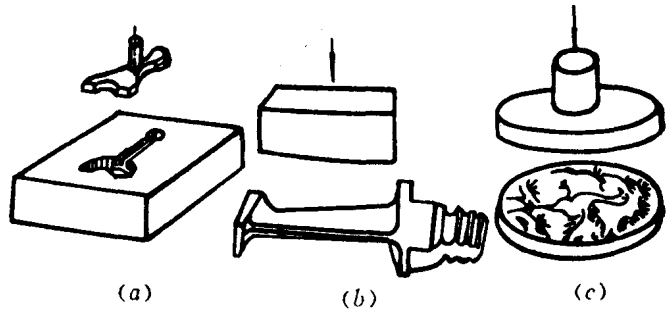


图 2-4 电火花成型

(a) 型腔加工 (b) 型面加工 (c) 雕刻

(三) 电火花线电极加工 这是一种用线状电极做工具的电火花加工，其主要应用有电火花线切割。其特点是电极丝作走丝运动，

工件相对电极丝作任意轨迹运动（图 2-6）。因其发展很快，故另立一章（第三章）进行讨

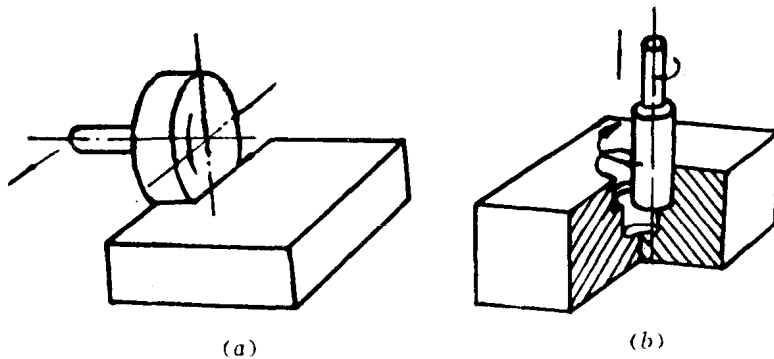
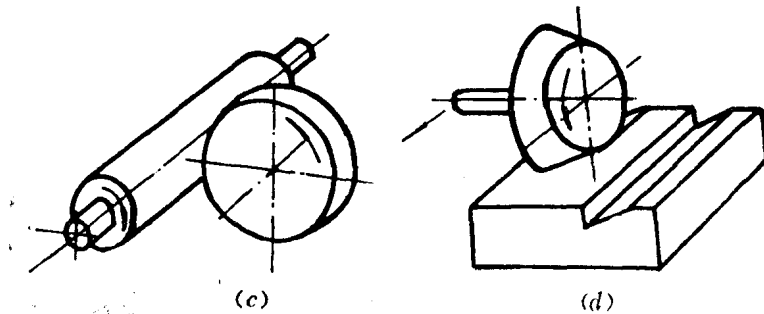


图 2-5 电火花磨削

(a) 平面磨削 (b) 内圆磨削



续图 2-5 电火花磨削
(c) 外圆磨削 (d) 成型磨削

论；除线切割外的其他类型的电火花线电极加工，如图 2-7 所示。

(四) 电火花展成加工 利用成形工具电极相对于工件作对应的运动（回转、回摆或往复等），使二者相对应的点保持固定重合的关系，逐点进行电火花加工。这种方法的特点是工具与工件之间的切向相对运动线速度极小，有时几乎等于零，利用这种方法可以展成多种形状的工件。

由我国发明的共轭回转电火花加工即属此类，以后还要作较详细的介绍。

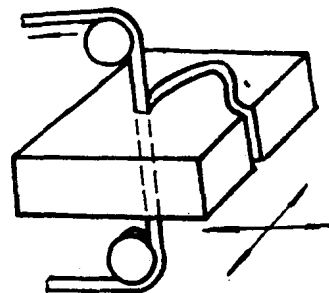


图 2-6 电火花线切割

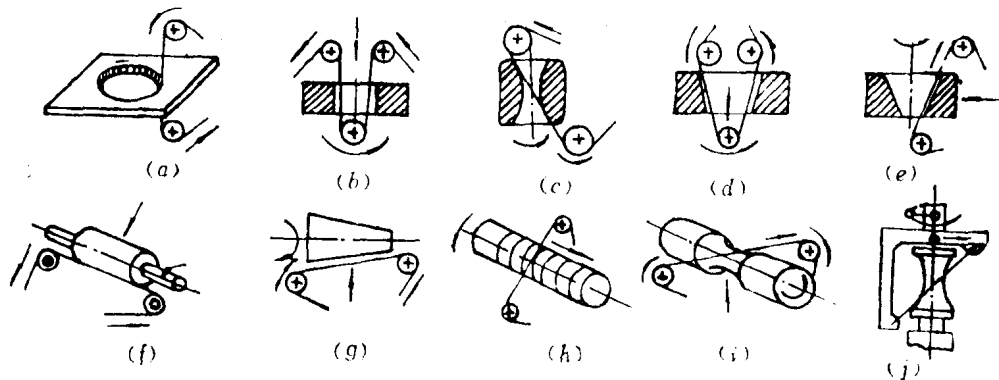


图 2-7 其它电火花线电极加工
(a)–(e) 内表面线电极加工 (f)–(j) 外表面线电极加工

二、电火花加工基本原理

(一) 实现电火花加工的条件

电火花加工是基于脉冲放电的腐蚀原理，在欧、美常称为电蚀加工。当工具电极（简称电极）与工件电极（简称工件）在绝缘液体中相互接近至很小距离时，极间电压将在某点击穿，形成脉冲放电。为利用这种现象进行材料加工，应具备下列条件：

1. 在脉冲放电点必须有足够大的能量密度，能使金属局部熔化和气化，并在放电爆炸

力的作用下，把熔化的金属抛出来。为了使能量集中，放电过程通常在液体介质（工作液）中进行。

2. 放电形式应是脉冲的，放电时间要极短，一般为0.1~3000微秒，使脉冲放电时产生的绝大部分热量来不及从极微小的局部加工区传输出去。

3. 必须把加工过程中所产生的电蚀产物（包括加工屑及焦油、气体之类的介质分解产物）及时地从电极间隙中排除出去，使加工能正常地连续进行。

4. 在相邻两次脉冲放电的间隔时间内，电极间的介质必须来得及消电离，避免在同一点上持续放电而形成集中的稳定电弧。

5. 在加工过程中，工具电极和工件之间应保持一定的距离（通常为几微米到几百微米），以维持适宜的放电状态。

（二）加工设备的主要组成部分

具备以上条件的电火花加工设备与传统的金属切削机床不同，主要由以下四大部分组成（图2-8）：

1. 机床本体 包括床身、立柱、主轴头、工作台。用以实现工件和工具电极的装夹、固定和调整其相对位置等的机械系统。

2. 脉冲电源 提供电极和工件间产生火花放电所需的重复脉冲，是电火花加工的能源。一般脉冲电源的开路电压为30~300伏，放电峰值电流为数百毫安到数百安培。

3. 工作液循环过滤系统。

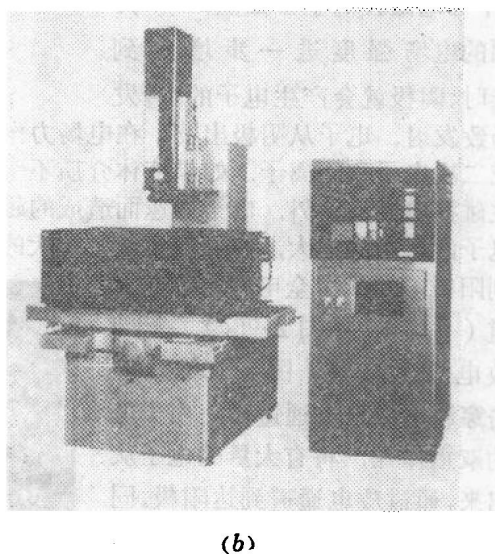
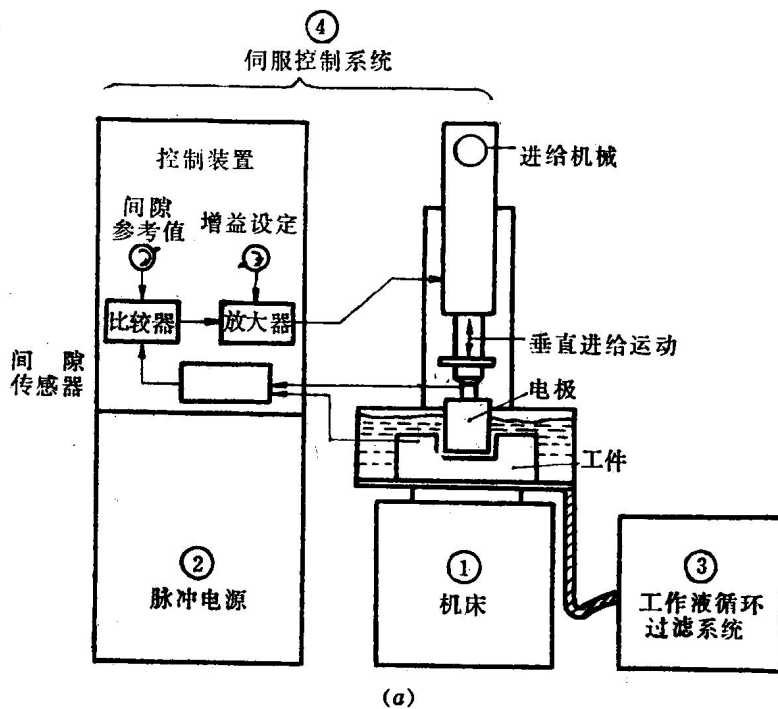


图2-8 电火花加工设备
(a) 设备组成示意图 (b) 机床实物照片