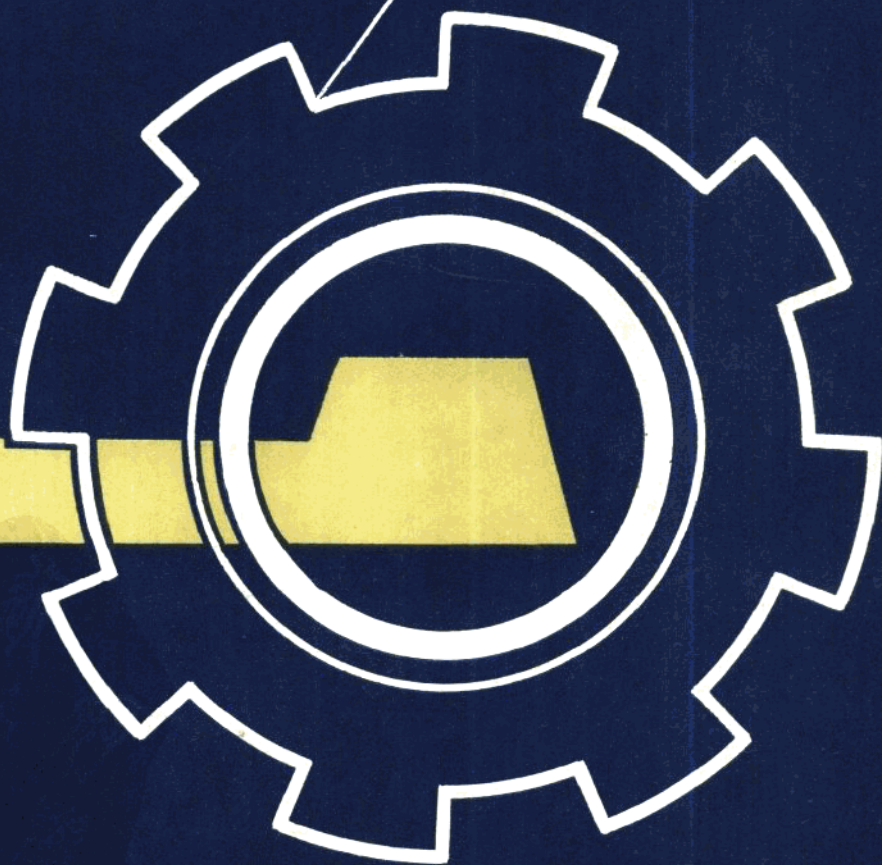


特种加工技术

陈传梁 编著

北京科学技术出版社



序 言

“特种加工技术”是指传统的机械切削加工和磨削加工以外的一些新出现的加工方法，是直接利用电能、热能、声能、光能、化学能、电化学能以及某些特殊机械能等能量形式，对难加工材料进行加工，具有其它加工方法无可比拟的优点。在现代加工技术中，特种加工技术越来越占有特殊重要的地位。许多现代化技术装备和工业产品，非采用特种加工方法不可。

近十余年来，随着电子工业和精密机械工业的发展，尖端技术产品要求向高精度、高密度和微细化的方向发展。这促使特种加工技术十分迅速地发展，其种类日益增多，应用日趋广泛，现已遍及到各个加工领域，技术队伍也不断扩大。但迄今为止，国内尚无一本较系统、全面论述特种加工技术的书籍。

为了适应“四化”建设的需要，笔者编著此书奉献给从事特种加工技术的工程技术人员、工人以及有志于在该领域进行探索的科学工作者。如能填补当今社会需求之缺，作者将感到莫大的荣幸。

全书共分四篇，第一篇电火花加工；第二篇电化学加工；第三篇高能粒子束加工；第四篇超声波加工和其它特种加工。

本书初稿承蒙重庆电器厂姜昌炽高级工程师审阅和修改，全书插图由刘秋霞描绘，在此一并致谢。

由于笔者水平有限，实践经验不足，加之编写时间仓促，缺点和错误在所难免，恳请广大读者指正。

编者

1986年4月于北京工业学院

目 录

绪 论

- 第一节 特种加工技术的产生..... (1)
- 第二节 特种加工技术的分类..... (1)
- 第三节 特种加工技术的特点与应用范围..... (3)

第一篇 电火花加工

- 第一章 电火花加工的理论基础**..... (5)
 - 第一节 电火花加工的原理和特点..... (6)
 - 第二节 电火花加工的物理本质..... (8)
 - 第三节 电火花加工的基本规律..... (10)
- 第二章 电火花成型加工**..... (18)
 - 第一节 加工设备..... (18)
 - 第二节 成型工艺..... (39)
 - 第三节 典型工艺实例..... (52)
- 第三章 线切割加工**..... (55)
 - 第一节 原理与特点..... (55)
 - 第二节 线切割加工设备..... (56)
 - 第三节 影响线切割工艺指标的主要因素..... (59)
 - 第四节 线切割控制原理及程序编制..... (63)
- 第四章 电火花回转精密加工**..... (84)
 - 第一节 角相位重合回转加工..... (84)
 - 第二节 展成回转加工..... (89)
- 第五章 小孔电火花加工**..... (92)
 - 第一节 精密小孔加工..... (92)
 - 第二节 异形小孔加工..... (95)
 - 第三节 深小孔加工..... (96)
- 第六章 电火花表面强化与刻字**..... (101)
 - 第一节 电火花表面强化..... (101)

第二节	电火花刻字	(106)
-----	-------	-------

第二篇 电化学加工

第一章	电化学加工的理论基础	(108)
第一节	基本原理	(108)
第二节	电化学过程的机理	(108)
第二章	电解加工	(114)
第一节	基本原理和特点	(114)
第二节	基本规律	(115)
第三节	混气加工	(124)
第四节	基本设备	(125)
第五节	应用	(128)
第三章	电化学机械加工	(134)
第一节	基本原理与特点	(134)
第二节	电化学机械加工的应用	(135)
第四章	电化学抛光	(139)
第一节	基本原理和特点	(139)
第二节	影响电化学抛光的因素	(141)
第三节	电化学抛光的设备	(145)
第四节	电化学抛光的应用	(148)
第五章	电镀和电铸加工	(152)
第一节	槽镀	(152)
第二节	刷镀	(153)
第三节	电铸	(156)
第四节	光电成形	(165)

第三篇 高能粒子束加工

第一章	电子束加工	(168)
第一节	原理和特点	(168)
第二节	加工设备	(171)
第三节	电子束加工的应用	(173)
第二章	离子束加工	(183)
第一节	原理和特点	(183)
第二节	加工设备	(185)
第三节	离子束加工的应用	(190)
第三章	激光束加工	(194)

第一节	概述	(194)
第二节	激光加工的原理	(196)
第三节	加工设备	(197)
第四节	加工工艺及应用	(204)
第四章	等离子体加工	(220)
第一节	等离子体加工的原理	(220)
第二节	等离子体加工的应用	(221)

第四篇 超声波加工和其它特种加工

第一章	超声波加工	(225)
第一节	基本原理	(225)
第二节	加工设备	(226)
第三节	工艺规律	(234)
第四节	超声波加工的应用	(237)
第二章	化学加工	(245)
第一节	化学铣削	(245)
第二节	化学抛光	(247)
第三节	化学镀膜	(250)
第四节	照相化学腐蚀加工	(253)
第三章	喷射加工	(257)
第一节	液体喷射加工	(257)
第二节	磨料喷射加工	(260)
第四章	挤压珩磨	(264)
第一节	原理与工艺规律	(264)
第二节	磨料与基本设备	(267)
第三节	应用	(269)

绪 论

第一节 特种加工技术的产生

传统的机械切削加工已有几百年的历史，它的出现对社会生产力的发展起了极大的促进作用。它是一种历史悠久，行之有效，应用最为广泛的加工工艺。用它来将毛坯加工成满足人们所需要的性能的零件。它之所以行之有效，广为应用，是由它的特点所决定的。传统加工，特别是切削加工的主要特点是：

1. 以硬克软：用高强度、高硬度的材料作为刀具，加工比较软的工件。

2. 靠强大的机械力和机械能，克服工件材料内部的分子结合力，使工件材料变形和分离，把被加工表面多余的材料切除掉，以获得所需要的形状、尺寸和表面粗糙度。

20世纪以来，科学技术发展到一个新的阶段。特别是进入40年代以后，生产和科学技术的发展更加迅速。在很多工业部门，尤其是国防工业部门，尖端科学技术产品要求向高精度、高速度、高温、高压、大功率和小型化等方向发展，对材料的要求愈来愈高。相应地很多具有高熔点、高强度、高硬度、高韧性、高脆性、高纯度等特殊性能的材料不断涌现；具有特殊结构的零件愈来愈多，形状愈来愈复杂；对精度、表面光度的要求和某些特殊要求也愈来愈高。例如，对硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、陶瓷、锆、硅等材料的加工，对各种模具上特殊断面的型孔、喷油嘴、喷丝板上的微孔、异形孔、狭缝等的加工，以及对高精度细长杆、薄壁、弹性元件进行加工等。

要解决上述问题，仅仅靠传统的机械切削加工是很困难的，有的根本无法实现。

20世纪40年代以后，人们相继探索研究出一些与传统的机械切削加工在原理上完全不同的新方法——电火花加工、电解加工、化学加工、电子束加工、离子束加工、激光加工、超声加工等。这是直接利用电能、热能、声能、光能、电化学能、化学能及特殊机械能等，来对材料进行加工的方法。为区别于传统的机械切削加工，一般统称为“特种加工”。

第二节 特种加工技术的分类

到目前为止，已经出现了近百种特种加工方法。但还没有确切的定义和统一的分类。一般按作用原理可分为物理加工、化学加工和复合加工三大类，每类又可按应用能量的形式分为多种加工方法。具体划分见表0-0-1。

表 0-0-1 特种加工的分类

原理名称	加工方法	能量形式	主要用途			
			加工	成形	焊接	处理
物理加工	电火花加工 (EDM)	电、热能	✓	✓		✓
	电子束加工 (EBM)		✓		✓	✓
	电子同步辐射加工		✓			
	离子束加工 (PAM)		✓	✓		✓
	等离子体加工 (PAM)		✓		✓	
	原子束加工		✓			✓
	分子束加工		✓			✓
	微波加工 (MWM)	电、磁能				
	电磁成形加工 (HERF)				✓	
	电爆成型加工	电、机械能				
	激光加工 (LBM)	光、热能	✓		✓	✓
	超声加工 (USM)	声、机械能	✓		✓	
	喷射加工 (AJM)	机械能	✓	✓		✓
	化学加工	电解加工 (ECM)	电、化学能	✓		
电铸				✓		
刷镀				✓		✓
镀膜						✓
化学铣削 (CHM)		化学能	✓			
化学刻蚀			✓			
化学抛光 (CP)					✓	
复合加工	电解磨削 (ECAM)	电、化学、机械能	✓			
	电解放电磨削 (ECDMG)	电、热、化学、机械能	✓			
	电解放电加工 (ECDM)	电、热、化学能	✓			
	超声放电磨削	声、电、热、机械能	✓			
	超声电解磨削	声、电、化学、机械能	✓			
	超声放电电解磨削	声、电、热、化学、机械能	✓			
	超声放电电解加工	声、电、热、化学能	✓			
	超声振动切削	声、机械能	✓			
	超声塑性加工		✓			
	导电切削	电、热、机械能	✓			
	加热切削	热、机械能	✓			
	低温切削		✓			

第三节 特种加工技术的特点与应用范围

特种加工与机械加工比较,有如下特点:

1. 以柔克刚:因工具与工件不直接接触,加工时无明显的强大机械力,故加工脆性材料和精密微细零件、薄壁零件、弹性元件时,工具的硬度可低于被加工材料的硬度。

2. 主要不是依靠机械力和机械能切除金属,而是直接用电、热、声、光、化学和电化学能去除金属和非金属材料。瞬时能量密度高,直接、有效地利用各种能量,造成瞬时或局部熔化,以强力、高速爆炸、冲击去除材料,故可加工任何高硬度材料。

3. 无需符合切除原理,不产生连续的深吃刀切屑。被加工表面不产生破坏层,且能提高表面质量,改善表面物理机械性能。

4. 加工能量易于控制和转换。工件一次装夹实现粗、中、精加工,从而可大大减少装夹时间,减少安装误差,有利于保证加工精度,提高生产率。

5. 利用一些简单的运动,完成某些复杂表面的加工。一般说来,机床结构比较简单,运动速度较低,易于实现自动化。

由于特种加工工艺具有其它加工工艺无法比拟的优点,所以在现代化加工技术中,占有越来越重要的地位。许多现代技术装备和工业产品,非采用特种加工工艺不可。目前特种加工技术的应用已遍及到各个加工领域。

常用特种加工工艺的综合比较和应用范围见表0-0-2。

表 0-0-2 常用特种加工方法综合比较

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	材料去除率 (mm ³ /min) 平均/最高	可达到尺寸精度 (mm) 平均/最高	表面粗糙度 R _a (μm) 平均/最高	主要适用范围
电火花加工	任何导电的金属材料	1/50	30/3000	0.05/0.005	6.3/0.1	从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等。如圆孔、方孔、异形孔、螺纹孔、微型孔、深孔以及冲模、锻模、压铸模、塑料模、拉丝模。表面强化、刻字、涂复
电火花线切割加工	如硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、钛合金等	极小 (可补偿)	5/60	0.02/0.005	3.2/0.4	切割各种冲模、塑料模、片类零件、样板、喷丝板异形孔、磁钢、工艺美术品零件,切割贵重稀有材料,也可切割半导体或非线性导体
电加解工		不损耗	100/10000	0.1/0.03	0.8/0.1	从精小零件到一吨重的超大型工件,如仪表微型小轴、蜗轮叶片、炮管膛线、螺旋花键孔、各种异形孔、冲压模、挤压模、铸造模、锻造模,抛光、切割、去毛刺等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	0.8/0.02	难加工的硬质合金刀具、量具、轧辊、小孔、深孔、细长杆件的磨削

(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 (mm ³ /min) 平均/最高	可达到尺寸精度 (mm) 平均/最高	表面粗糙度 R _a (μm) 平均/最高	主要适用范围
超声波加工	任何脆性的金属及非金属材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.4/0.1	加工硬脆材料, 如玻璃、云母、石英、宝石、金剛石。还可加工各种型孔、型腔、弯孔, 切割、雕刻等
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	6.3/0.1	加工各种金属、半导体和非金属材料, 进行打孔、切割、焊接、划线、调平、热处理等。如金剛石拉丝模、钟表宝石轴承、化纤喷丝头、及钛、镍、铜、铝、硅、石棉、玻璃上打微孔。切割贵重稀有材料及玻璃、石棉、木材、纸张、纺织品、皮带、橡胶等。还可焊接特殊异种材料
电子束加工						在各种难加工材料上打微孔, 镀膜、焊接、曝光、切缝、蚀刻等
离子束加工			很低	/0.01 μm	/0.006	对零件表面进行超精密、超微量加工、抛光、蚀刻、注入、镀复等

第一篇 电火花加工

电火花加工是在20世纪40年代初开始研究和逐步应用于生产的。它是利用工具和工件之间脉冲性火花放电，局部、瞬时地产生高温把金属蚀除下来，即在一定的加工介质中，通过两极之间脉冲性火花放电的电蚀作用，对材料进行尺寸加工或表面加工，都称为“电火花加工”。因为是脉冲性放电，所以也叫“电脉冲加工”或“放电加工”。也有统称为“电蚀加工”的。电火花加工的分类见图1-0-1。

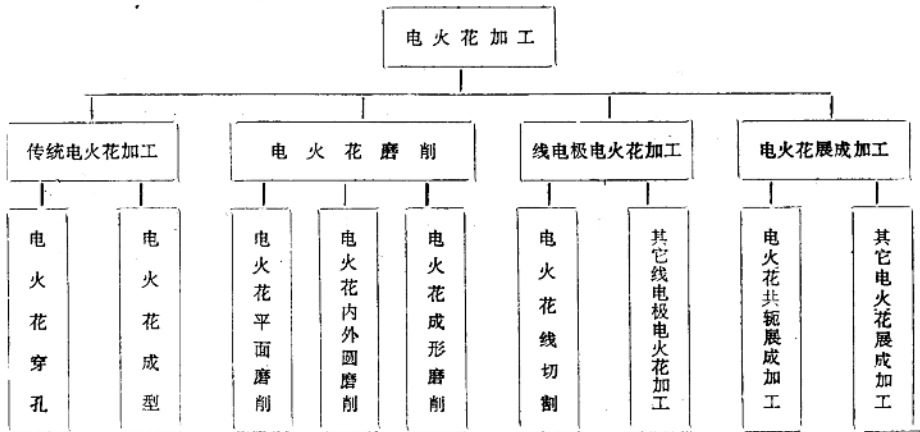


图 1-0-1 电火花加工分类

第一章 电火花加工的理论基础

电火花加工，可以根据两极间脉冲放电过程中所发生的各种现象，进行不同的加工。例如，利用导电材料在液体介质中放电时的电腐蚀现象，对金属材料进行尺寸加工；利用导电材料在气体中高压放电时的热爆炸作用，对非金属材料进行加工；利用导电材料在气体介质中放电时的热熔渗作用，使材料表面层发生变化，对材料进行表面强化等。这几种加工，其共同之处，都是基于电、热物理本质。为了深入掌握电火花加工工艺，正确理解电火花加工过程中的各种现象，寻求更完善的工艺方法，就必须研究和掌握其基本理论。

第一节 电火花加工的原理和特点

一、原 理

在电插头或电器开关的触点将闭合或断开时，往往出现蓝白色火花，并发出噼啪的响声，这种现象称为火花放电。仔细观察可发现，经过火花放电后，金属表面被烧蚀出许多小的凹坑，这种现象称为电腐蚀。长期以来，电腐蚀一直被认为是一种有害的破坏现象。人们不断研究其原因，并设法减少和避免它。

经过大量实验研究，结果表明电火花腐蚀的主要原因是：火花放电时，放电通道在瞬间产生大量的热能，达到很高的温度，足以使电极表面的金属局部熔化，甚至气化蒸发而被蚀除下来。

要将脉冲放电现象应用于尺寸加工，必须具备以下条件：

1. 在脉冲放电点，必须有足够的火花放电强度。即局部集中的电流密度须高达 $10^6 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$ ，使金属局部熔化和气化。

2. 放电形式必须具有脉冲性、间歇性。图1-1-1为电流脉冲波形。一般脉冲宽度 $t_i = 10^{-3} \sim 10^{-7} \text{ s}$ ，才能使热量来不及从极微小的局部加工区扩散到非加工区。从而能有效地蚀除金属，成型性和尺寸精度好。否则就象电弧放电那样把整个工件表面“烧糊”，无法用于尺寸加工。

3. 必须把加工过程中所产生的加工屑、焦油、气体等电蚀产物及余热，从微小的电极间隙中排除出去，否则加工将无法正常地连续进行。

4. 在脉冲间隔 t_o 内，电极间的介质必须及时消电离，使下一个脉冲能在两极间另一“相对应最近点”另行击穿放电，从而使工件的形状尺寸逐点地趋近于工具电极的形状尺寸。

5. 必须使电极之间保持一定的加工间隙（数 μm ~ 数百 μm ）。也就是要使工具电极随着工件蚀除深度而连续不断地向前送进，始终维持同一距离，使放电加工持续进行。

上述问题的综合解决须通过图1-1-2所示的电火花加工设备来实现。

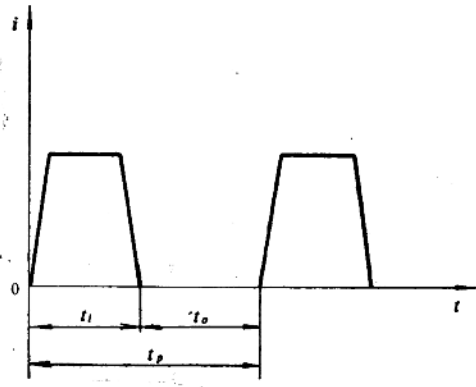


图 1-1-1 脉冲波形

i —脉冲宽度 t_o —脉冲间隔 t_p —脉冲周期

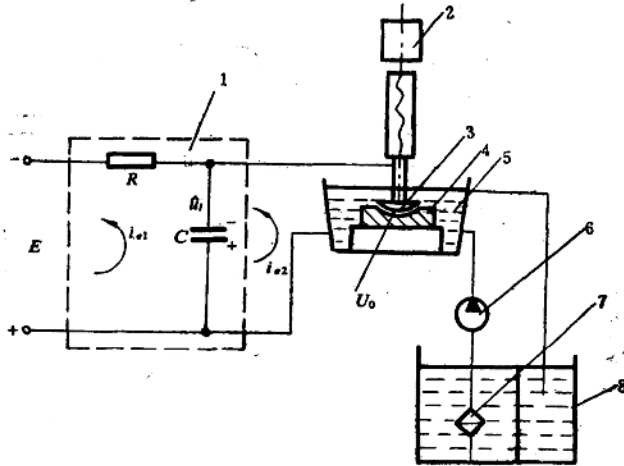


图 1-1-2 电火花加工原理图

1—脉冲电源 2—伺服系统 3—工具阴极 4—工件阳极 5—工作液 6—工作液泵 7—过滤器 8—工作液箱

(1) 脉冲电源：周期性地利用电容器缓慢充电而在极短时间内快速放电，把直流或整流后的电流转换成具有一定频率的重复脉冲电流。它是产生脉冲放电实现蚀除加工的供能装置。

空载电压为 $30\sim 300\text{V}$ 。脉冲宽度为 $0.1\sim 2000\ \mu\text{s}$ 。脉冲频率为 $50\sim 300000\text{Hz}$ 。脉冲电流为数百mA到数百A。

(2) 间隙自动调节系统：用伺服系统自动调节极间距离和工具电极的进给速度。维持一定的最佳间隙，使脉冲放电加工正常进行。

(3) 机床床身：用来实现工具和工件的安装夹固及调整相对位置精度等。

(4) 工作液及其循环过滤系统：电火花加工通常是在煤油、去离子水等液体绝缘介质中进行。

液体绝缘介质的作用：

(1) 绝缘作用：两电极之间必须有绝缘介质，才能产生火花击穿和脉冲放电。而液体介质的绝缘强度比较高，只能在较小的电极间隙下才被击穿，从而有利于提高仿型精度。

(2) 压缩放电通道作用：因为受到放电磁力的压缩时，放电通道的断面积易于收缩，从而使电流密度更高度集中，有利于提高生产率和加工精度。

(3) 局部高压作用：在脉冲放电作用下，由于液体介质的急剧气化，产生局部高压，既有利于熔化金属的抛出，又有利于电蚀产物的排出。

(4) 冷却作用：冷却电极和工件，防止热变形。同时，冷却的介质又使电流密度加大，使能量更加集中。

(5) 消电离作用：绝缘恢复得快，有助于减少放电后残留的离子，避免电弧放电。

实践证明，电火花加工在液体绝缘介质中进行，生产率比在空气中高得多，表面质量也好得多。因此工作液是电火花加工中必不可少的。而且要求工作液应具有良好的工艺性，即绝缘强度高，化学稳定性好，对人体无害等。

常用的液体绝缘介质有煤油、机油、去离子水、蒸馏水、皂化油水溶液等。

电火花加工的基本原理（见图1-1-2）：接通电源 E ，电流通过限流电阻 R 对电容器 C 充电，电容器两端电压 u_c 逐渐升高。充电电压 u_c 大于间隙击穿电压 U_0 的瞬间，发生间隙击穿和脉冲放电，使截面极微小的火花放电通道内的电流密度高达 $10^5 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$ ，瞬时产生 10000°C 以上的高温。电极表面局部被熔化和气化，并在电磁力和放电爆炸力作用下，被抛入工作液中，电极表面形成一个小的凹坑。局部放大图见图1-1-3。图1-1-3 a表示单脉冲放电凹痕，b)表示多脉冲放电凹痕。工作液介质恢复绝缘后，第二个脉冲又在绝缘最弱点击穿放电。重复上述过程，循环往复，形成一秒钟成千上万次放电。结果使整个加工表面由无数个小凹坑所组成。工具的轮廓，即截面形状，便复印在工件上。

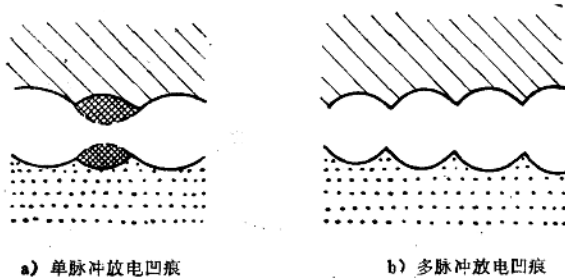


图 1-1-3 电火花加工面局部放大

二、特点

电火花加工是利用电、热能而实现加工的，与机械加工相比，有如下特点：

1. 脉冲放电能量密度高。便于加工用机械加工方法难于加工或无法加工的特殊材料和复杂形状的工件。不受材料硬度影响。
2. 脉冲放电持续时间极短，放电时产生的热量传导扩散范围小，材料热影响范围小。
3. 加工时，工具电极与工件材料不接触，无宏观作用力，工具的硬度可低于工件，故工具易于制造。
4. 放电规准可以任意调节，如一次装夹可实现粗、中、精加工，有利于简化工艺过程，减少工人劳动强度，易于保证加工精度。
5. 直接利用电能加工，便于实现加工过程自动化。

第二节 电火花加工的物理本质

火花放电时，电极表面的材料究竟是怎样被蚀除下来的？了解这一微观过程，有助于掌握电火花加工过程中有关工具电极损耗、加工精度和表面粗糙度形成的各种基本规律。以便对脉冲电源、进给系统、机床本体等提出合理的要求，以提高生产率和降低生产成本。

电火花加工的物理本质，即电火花腐蚀的微观过程，由于放电时间极短，间隙很小，故

很难观察。根据大量实验资料的分析，电火花腐蚀的微观过程是电力、磁力、热力和液力等综合作用的过程。这一过程，一般认为可分为以下几个连续阶段：介质电离击穿并形成放电通道；电热能量转换并形成高温热源蚀除电极材料；电蚀产物被抛出放电间隙并消除电离。

进行火花放电的一对电极称为电极对。电极对的微观表面是凹凸不平的，极间间隙也是大小不等的。当脉冲电压加于两极时，相距最近的尖端处电场强度最高。其间的工作液绝缘介质有一小部分将最先被电离，如图1-1-4所示，分解成电子和正离子而被击穿，形成火花放电通道。此时电流急剧增加，间隙压降由空载降至工作电压。由于火花放电通道受到放电磁场和周围液体介质的压缩等作用，使火花放电通道的横断面收缩成极小，通道中电流密度可达 $10^5 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$ 。电子、离子在电场作用下高速运动并相互碰撞，在电极间隙中火花通道区产生大量的热。同时，阳极和阴极表面分别受到电子流和离子流的高速轰击，也将产生大量的热。这样，电极间隙内沿火花通道将形成一个瞬时高温热源，其中心部位温度可达 10000°C 左右。电极对的极小区域表面，很快被加热到熔点、直至气化点，使局部金属材料熔化和气化（图1-1-4 b），通道周围的工作液（一般为煤油之类的碳氢化合物）也部分被气化为蒸气，另一部分被瞬时高温分解为游离的碳粒和 C_2H_2 、 C_2H_4 、 H_2 等气体碳氢化合物，导致工作液很快变黑，电极间冒出小气泡。这些熔化、气化和分解的过程非常短促，加工时的噼啪声表明具有爆炸的特性。爆炸力把熔化和气化了了的金属抛入附近的工作液介质中而冷却，使电极表面形成坑穴状的蚀除凹痕。

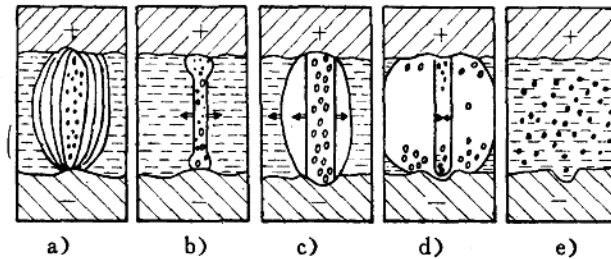


图 1-1-4 电火花腐蚀的微观过程

事实上，电蚀产物的抛出过程也是比较复杂的。火花通道周围瞬时形成的气泡（包含金属蒸气、工作液蒸气和分解出的气体等）的高压，随着脉冲放电延续而继续增高，可达 $0.5 \sim 1\text{MPa}$ ，并高速向外扩张（图1-1-4c）。当脉冲电流终止时，热源虽已消失，但由于气泡外围扩张着的液体具有惯性，气泡体积还可继续增大，内部压力将回降，高压时溶解在小坑中液体金属里的气态电蚀产物又逸出，进而使又一部分熔化了了的金属随同气泡额外地被抛离电极表面（图1-1-4 d）。

熔化和气化的金属在被抛离工件表面时，除绝大部分在工作液中被冷却且凝固成圆球状小颗粒（直径约为 $0.1 \sim 500\mu\text{m}$ ，因脉冲能量而异）外，还可能有一小部分飞溅、粘附、镀覆在对面的电极表面上。这种互相飞溅、镀覆的现象，在某些条件下可以用来减少或补偿工具电极在加工中的损耗。观察铜打钢电火花加工后的电极表面，可以看到钢上粘有铜，铜上粘有钢的痕迹。如果进一步分析电加工后的产物，在金相显微镜下可以看到除了游离碳粒、大小不等的铜和钢的球状颗粒之外，还有一些钢包铜、铜包钢互相飞溅包容的颗粒，此外还有少数由于冷凝前带有气泡而形成的中心有空泡的颗粒产物。

经过上述单个脉冲一次放电过程，在工件表面留下一个带有凸边的小凹穴（图1-1-4 e）。在经过一定的脉冲间隔后，放电间隙消电离。介质恢复初始的绝缘状态，为第二个脉冲火花放电准备了条件。无数次脉冲放电蚀除量的积累，就使工件达到所需要的加工要求。

到目前为止，人们对于电火花加工的物理本质的认识还很肤浅，诸如正负电极间能量的转换及分配，金属抛出过程中热场、力场的变化，电极损耗及补偿机理等都尚待进一步研究。

第三节 电火花加工的基本规律

一、电蚀过程的极效应

火花放电过程中，阳极和阴极表面分别受到电子和离子的轰击以及瞬时高温热源的作用，因此，它们都会遭到电腐蚀。但阴阳两极表面所获得的能量是不一样的，所以蚀除速度也不一样。在电火花加工中，把这种两极蚀除速度不同的现象称为极性效应。作定量分析时，如未说明，是指两极材料相同。通常把阳极蚀除速度大于阴极的称作正效应，反之，阴极蚀除速度大于阳极的称作负效应。

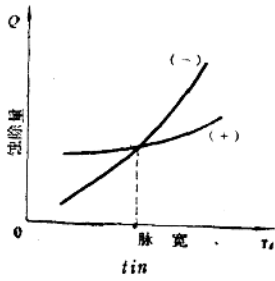
产生极性效应的原因在于，通道中电离放电时，电子的质量和惯性较小（如氢原子中电子的质量约为正离子质量的 $1/1840$ ），容易获得速度和加速度。并且有大量的电子作为大电流的载流子，从阴极出发获得较大能量后迅速奔向阳极，轰击阳极表面，蚀除金属。而正离子由于质量和惯性较大，起动慢，加速也慢，数量也少，大部分还未来得及到达阴极表面，脉冲便结束了，所以阳极蚀除速度一般大于阴极。这样，只要适当控制脉冲放电持续时间，使 $t_1 < 30\mu\text{s}$ ，就可以实现正极性加工。这时工件应接阳极，工具接阴极。反之，当 $t_1 > 300\mu\text{s}$ 加工时，阴极蚀除速度大于阳极，实现负极性加工。这时工件应接阴极，工具接阳极。这是因为随着脉冲延时的加长，质量和惯性较大的正离子相对数量迅速增加，且逐渐得到了加速度，正是由于它的质量和惯性较大的缘故，因此它对阴极的轰击破坏作用大大超过电子对阳极的轰击作用。

极性效应不仅与放电时间即脉冲宽度有关，而且还与绝缘介质、电极材料及单个脉冲能量等因素有关。

就提高生产率和减少工具电极损耗而言，当然希望极性效应愈显著愈好。

由上述可知，在其它因素不变的情况下，随着脉冲宽度由窄变宽，负极的蚀除量由较小变大，正极的蚀除量由较大相应地变小，极性效应由“正”变“负”。在中间某一脉宽 t_{10} 时，正、负极蚀除量将相等，极性效应接近于零，如图1-1-5所示。从减少工具电极损耗的观点来看，在实际加工中应避免选用这样的脉宽。一般，精加工选短脉宽，采用正极性加工；粗加工选长脉宽，采用负极性加工。

在电火花加工过程中，必须充分利用极性效应，合理选择加工极性，以提高加工速度和减少工具电极损耗。



二、影响电蚀量的主要因素

1. 电蚀量 q (或 Q) 与脉冲能量 W_0 、脉冲频率 f 的关系
 大量实践证明, 无论是阳极还是阴极, 它的单个脉冲蚀除量 q 总是和该单个脉冲的能量 W_0 成正比, 即 $q \propto W_0$ 。而总的蚀除量 Q 等于脉冲次数为 N 次时蚀除量的总和。阳极和阴极单个脉冲的蚀除量分别为

图 1-1-5 极性效应与脉冲宽度对蚀除量的影响

$$\left. \begin{aligned} q_a &= K_a \cdot W_0 \\ q_K &= K_K \cdot W_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-1)$$

式中 q_a ——阳极单个脉冲蚀除量(g);

q_K ——阴极单个脉冲蚀除量(g);

K_a, K_K ——与电极材料、脉冲参数、工作液等有关的比例系数, $\text{Cu}^+ - \text{St}^-$ 时为 9.4×10^{-11} ;

W_0 ——单个脉冲能量(J)。

阳极和阴极总的蚀除量分别为:

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= q_a \cdot N = K_a \cdot W_0 \cdot N \\ Q_K &= q_K \cdot N = K_K \cdot W_0 \cdot N \end{aligned} \right\} \quad (1-1-2)$$

式中 Q_a ——阳极总的蚀除量(g);

Q_K ——阴极总的蚀除量(g);

N ——脉冲次数。

$$N = f_p \cdot t \quad (1-1-3)$$

式中 f ——脉冲频率(Hz);

t ——加工时间(s)。

在 t 时间内阳极和阴极总的蚀除量分别为

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= K_a \cdot W_0 \cdot f_p \cdot t \\ Q_K &= K_K \cdot W_0 \cdot f_p \cdot t \end{aligned} \right\} \quad (1-1-4)$$

而阳极、阴极的蚀除速度 V_w 和 V_B 分别为

$$\left. \begin{aligned} V_w &= \frac{Q_a}{t} = K_a \cdot W_0 \cdot f_p \\ V_B &= \frac{Q_K}{t} = K_K \cdot W_0 \cdot f_p \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

因放电能量等于电压、电流和时间的乘积, 所以单个脉冲放电能量为

$$W_0 = \int_0^{t_0} u_0(t) \cdot i_0(t) dt \approx \bar{u}_0 \cdot \bar{i}_0 \cdot t_0 \quad (1-1-6)$$

式中 W_0 ——由电源供给加工间隙的每个脉冲的放电能量(J) ($1\text{J} = 1\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s} =$

$$1 \text{ W} \cdot \text{s};$$

t_0 ——放电时间 (s)，即介质击穿后间隙中通过放电电流的时间；

$u_0(t)$ ——放电电压 (V)，即间隙击穿后通过放电电流时，间隙两端的瞬时电压；

$i_0(t)$ ——放电电流 (A)，即放电时流过间隙的瞬时电流；

\bar{u}_0 ——平均放电电压 (V)，即放电时间内放电电压的算术平均值；

\bar{i}_0 ——平均放电电流 (A)，即放电时间内放电电流的算术平均值。

由于火花放电间隙的负阻特性，击穿后的火花维持电压恒为20~25V左右，而与空载电压和击穿电压关系不大。

对于晶体管和可控硅脉冲电源，其脉冲电流近似地为一方波，故

$$W_0 = (20 \sim 25) \cdot \bar{i}_0 \cdot t_0 \text{ (J)} \quad (1-1-7)$$

一般小孔精加工时： $\bar{i}_0 \leq 1 \text{ A}$ ， $t_0 \leq 10 \mu\text{s}$ ，故 $W_0 \leq 20 \times 1 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4} \text{ J}$ ；粗加工时： $\bar{i}_0 \leq 100 \text{ A}$ ， $t_0 \leq 500 \mu\text{s}$ ，故 $W_0 \leq 20 \times 100 \times 500 \times 10^{-6} = 1 \text{ J}$ 。

脉冲频率 f_p 为脉冲周期 t_p 的倒数，而脉冲周期又为脉冲宽度 t_i 与脉冲间隔 t_0 之和，即

$$f_p = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_i + t_0} \quad (1-1-8)$$

一般精加工时， $f_p \geq 50 \text{ kHz}$ ，粗加工时 $f_p \geq 5 \text{ kHz}$ 。

由上述可知，提高电蚀量和蚀除速度的途径在于增加单个脉冲能量 W_0 ，提高脉冲频率 f_p ，设法提高系数 K_0 、 K_t 。也就是合理选用电极材料、脉冲参数、工作液成分及其循环方式等。当然在实际生产中，要考虑到这些因素之间的相互制约关系和对其它工艺指标的影响，如频率过高，间隔时间过小，将产生拉弧。单个脉冲能量过大，将使表面粗糙度值变大。

2. 电蚀量与脉冲宽度 t_i 的关系

实践表明，在电极材料、脉冲能量等条件相同的情况下，脉冲宽度不同，其蚀除量差别很大。表1-1-1是用铜电极，单个脉冲能量 $W_0 = 0.5 \text{ J}$ ，脉冲数 $N = 20000$ 的实验数据。

表 1-1-1 电蚀量和脉冲宽度的关系

脉冲宽度 t_i (μs)	10	30	60	140	900
阳极蚀除量 Q_a (g)	0.042	0.067	0.085	0.100	0.029
阴极蚀除量 Q_k (g)	0.012	0.021	0.036	0.058	0.027

从表中数据可以看出，在某一脉冲宽度时蚀除量最高。脉冲能量分布太宽，由于传导而散失的热量较多，蚀除量就降低；持续时间过短，热量来不及向外扩散，金属在气化状态下抛出的百分比增大，也要消耗一部分热量，使蚀除量减少。图1-1-6表明，不同热学常数的材料，出现蚀除量最大的最佳脉宽位置亦不同。

3. 电蚀量与金属热学常数的关系

工具电极材料耐蚀性愈高，损耗愈小，仿型精度愈高。工件材料耐蚀性愈低，蚀除量愈大，加工速度愈高。

根据热学理论，放电痕熔化体积 V 为