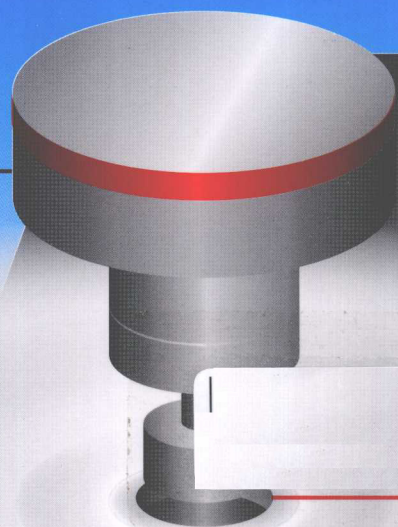


电火花 表面加工新技术

New Surface Processing Technology of Electrospace

陈长军 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电火花表面加工新技术

New Surface Processing Technology of Electrospark

陈长军 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了电火花表面强化的基本理论和电火花表面强化加工的实际应用,内容包括电火花加工的基础理论、电火花合金化的基本特征、金属材料的基本特性、金属材料的焊接性、镁合金的电火花表面强化、铝合金的电火花修复与强化、钛合金的电火花修复与强化、钢铁材料的电火花修复与强化、铜合金的电火花修复与强化、高温合金的电火花修复与强化。本书既有丰富的理论阐述,也有翔实的工程案例,书中提供了大量精美的电火花修复与强化图片。本书是一本实用性较强的电火花表面加工新技术学习参考书。

本书可供冶金、材料、机械、电加工、表面工程及再制造领域的研究人员、技术人员参考阅读,也可供相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电火花表面加工新技术/陈长军编著. —北京:机械工业出版社, 2011.1

ISBN 978-7-111-32587-1

I. ①电… II. ①陈… III. ①电火花加工 IV. ①TG661

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第232508号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:崔滋恩

版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京四季青印刷厂印刷(三河市杨庄镇环伟装订厂装订)

2011年1月第1版·第1次印刷

148mm×210mm·8印张·228千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-32587-1

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010)88379734

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

电火花加工技术自1940年开始应用以来,在机械加工中的应用日益广泛,尤其是近年来,电火花加工的技术研究已发展成为一个新的热点。自2000年以来,电火花表面强化与修复的研究获得了迅速的发展,并得到了较为广泛的应用,电火花表面强化与修复业已成为一支生力军。

近年来,作者在国家自然科学基金的资助下开展了电火花的表面强化与修复研究工作,取得了一些可喜的成果。本书是在“高能微弧火花作用下镁合金表面稀土合金化研究”、“液体中高能微弧火花改性合金化及耐蚀性研究”(编号50801050),以及“高能微弧火花外延沉积制备定向凝固MnAlY涂层及其性能研究(项目编号50671116)”三个国家自然科学基金项目中取得的大部分科研成果的基础上撰写的。

本书共分10章,前两章主要介绍电火花加工的基本理论、电火花表面改性的基本方法;第3章和第4章主要介绍金属材料的基本特性、应用及其焊接特性;后面几章主要介绍了电火花改性技术在几种典型金属材料上应用的情况。

本书的撰写首先感谢国家自然科学基金的资助,否则就不会有作者这几年的研究成果;其次要感谢作者的导师王茂才和同门师姐李华玲及师弟谢玉江,他们都对本书的内容作出了贡献。

在本书的出版过程中,得到了武汉科技大学材料与冶金学院、钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室的资助和机械工业出版社的大力支持,在此一并表示感谢。

由于电火花表面加工技术的发展日新月异,加之作者对其认识还非常有限,书中难免会有不当之处,望广大读者不吝批评指正。

作 者

武汉科技大学材料与冶金学院

钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室

目 录

前言

第1章 电火花加工的基础理论	1
1.1 电火花加工的特点及应用范围	1
1.1.1 电火花加工的特点	1
1.1.2 电火花加工的应用范围	2
1.2 电火花放电加工与表面改性	7
1.2.1 电火花放电加工的原理与过程	7
1.2.2 电火花放电加工参数	11
1.2.3 电火花放电加工的表面结构与性质	16
1.2.4 电火花表面改性的基本形式	17
1.3 电火花加工技术的发展趋势	23
第2章 电火花合金化的基本特征	27
2.1 新型电火花合金化强化修复设备	27
2.2 电火花合金化机理	30
2.2.1 电火花沉积层的形貌	30
2.2.2 电火花合金化机理	30
2.3 电火花合金化放电机理	32
2.4 合金化层的形成规律(质量转移)	34
2.5 合金化层的性能	37
第3章 金属材料的基本特性	39
3.1 镁合金的基本特性	39
3.2 铝合金的基本特性	52
3.3 钛合金的基本特性	59
3.4 高温合金的基本特性	64
3.5 铜合金的基本特性	70
3.6 钢铁材料的基本特性	75
3.6.1 铸铁的基本特性	75
3.6.2 钢的基本特性	79

第4章 金属材料的焊接性	86
4.1 镁合金的焊接性	86
4.2 铝合金的焊接性	98
4.3 钛合金的焊接性	101
4.4 高温合金的焊接性	106
4.5 铜合金的焊接性	109
4.6 钢铁材料的焊接性	111
第5章 镁合金的电火花表面强化	115
5.1 电火花表面强化过程	115
5.1.1 质量转移特征	116
5.1.2 强化点的形成过程	125
5.1.3 合金化层的形成	136
5.1.4 合金化放电过程	146
5.2 合金化层的耐蚀性	153
5.2.1 Mg-Nd 稀土电极合金化层的耐蚀性	154
5.2.2 Al-Nd 稀土电极合金化层的耐蚀性	156
5.2.3 Al-Y 稀土电极合金化层的耐蚀性	158
5.2.4 腐蚀机理	161
第6章 铝合金的电火花修复与强化	165
6.1 氩气保护下的铝合金表面合金化	165
6.2 电火花超声波复合添加 SiC 与 TiC 强化	168
6.3 铝合金修复应用举例	172
第7章 钛合金的电火花修复与强化	176
7.1 气体保护下钛合金的电火花表面渗碳强化	176
7.2 气体保护下钛合金的电火花表面合金化	179
7.3 液体中钛合金电火花表面渗碳	181
7.4 液体中钛合金电火花表面渗氮	184
7.5 液体中钛合金电火花表面渗氧	191
7.6 钛合金的表面电火花修复与强化	192
第8章 钢铁材料的电火花修复与强化	195
8.1 SKD 61 模具钢液体中添加 Al 粉改性合金化	195
8.2 球墨铸铁液体中表面 Si 合金化	198
8.3 SKD 61 模具钢液体中添加 Al + Cr 粉改性合金化	200

8.4 核电站部件的电火花修复强化	204
8.4.1 核电站阀门密封面的损伤状态	204
8.4.2 阀门密封面的损伤修复	205
8.5 电厂关键部件的电火花修复强化	207
8.5.1 汽轮机叶片的强化	208
8.5.2 柴油机曲轴的修复	209
8.5.3 QF-12000kW 汽轮发电机转子轴裂纹的修复	210
8.5.4 大型发电机转子密封段轴颈磨损区域修复	211
8.6 镀铬层失效的电火花修复	211
8.7 铸铁件的电火花修复	213
8.8 其他行业的电火花修复应用	215
第9章 铜合金的电火花修复与强化	220
9.1 铜合金表面 Cu-W 层的研究	220
9.2 黄铜表面修复的结果	221
9.3 修复应用	226
第10章 高温合金的电火花修复与强化	228
10.1 高温合金电火花渗碳研究及其应用	228
10.2 高温合金表面 NiCrAl (Y) 电火花沉积	229
10.3 液体中高温合金表面电火花合金化	233
10.3.1 液体中 Al-Mo 电极合金化	233
10.3.2 液体中 NiCrAl 电极合金化	234
10.4 高温合金电火花修复及其应用举例	236
参考文献	241

第 1 章 电火花加工的基础理论

电火花加工又叫放电加工和电蚀加工，在日本称之为放电加工，在前苏联则称之为电蚀加工。电火花加工同样是人们认识自然和改造自然而加以应用的典型范例。早在 19 世纪，人们发现开关触点开闭时，都会产生一道蓝白色的电弧光，这种弧光放电往往会使接触表面被腐蚀得凹凸不平、粗糙发毛以至逐渐损坏。这种金属表面在自激放电作用下所产生的破坏现象称为金属的电蚀（或电腐蚀）。在对电腐蚀现象进行大量的研究过程中，前苏联的学者拉扎连珂夫妇于 1943 年成功地利用电腐蚀原理在淬火钢上钻出了一个孔，由此开创了人类电火花加工的新纪元。人们可以直接利用电能和热能去除金属，取得了“以柔克刚”的效果。

1944 年，前苏联便制造出了世界上第一台电火花穿孔机床，此后电火花加工技术便开始了飞速的发展。

电火花加工从开始运用到现在，也不过六十多年的历史，但其发展却可以用日新月异来形容。

1.1 电火花加工的特点及应用范围

1.1.1 电火花加工的特点

电火花的加工运用经历的六十多年，其主要加工特点可以总结为以下五点：

1) “以柔克刚”，电火花加工利用的是火花放电破坏材料的原理，因此可加工任何导电的材料，不受材料硬度、韧性和脆性等限制。加工电极与工件不接触，没有切削力作用的影响，不会因切削力使零件变形而产生误差，如采用石墨、纯铜作电极可以加工淬火钢、硬质合金，甚至金刚石。

2) 冷加工，加工时脉冲能量是间歇地以极短的时间作用在材料上的，工作液是流动的，起散热作用，被加工工件几乎不受热的

影响。

3) 不需要复杂的切削运动, 可以加工形状复杂的零件表面。工具就是一个电极, 不必采用复杂而昂贵的切削刀具。需要制造精度较高的工具电极, 而且工具电极在加工过程中有一定的损耗, 在一定程度上会影响到加工精度。

4) 只能加工能导电的材料, 不能加工有机玻璃、尼龙等绝缘材料。

5) 不能由手动操作实现, 必须用控制系统自动完成。必须配备一个性能良好的脉冲电源, 以保证加工效率和表面粗糙度要求。

1.1.2 电火花加工的应用范围

目前, 电火花加工是仍然处于高速发展中的一门新技术、新工艺, 并已经广泛应用于航空航天、电子、能源化工、原子能、计算机仪器仪表、电机电器、精密机械等各个领域。按照工具与工件相对运动的特点和用途不同, 可以将电火花加工分成穿孔成形加工、线切割加工、电火花内孔加工、外圆成形、同步共轭回转加工、高速小孔加工、表面强化刻字等, 如表 1-1 所示。表 1-2 所示为电火花加工的图示说明。

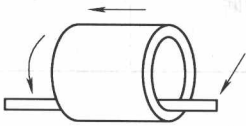
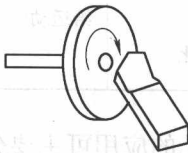
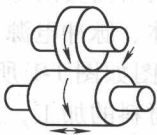
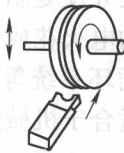
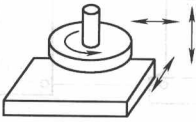
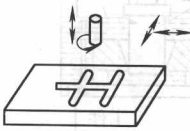
表 1-1 电火花加工的分类

类别	工艺方法	特 点	用 途	备 注
1	穿孔成形加工	工具为成形电极, 主要有一个进给运动	型腔加工、冲模、挤压模、异形孔	约占电加工机床总数的 30%
2	电火花线切割加工	工具为线状电极, 两个进给运动	冲模、直纹面、窄缝、下料	占电加工机床总数的 60%
3	内孔、外圆成形磨	做相对旋转运动, 且径向、轴向进给运动	精密小孔、外圆、小模数滚刀	占电加工机床总数的 3%
4	同步共轭回转加工	均做旋转运动, 且纵、横进给	精密螺纹、异形齿轮、回转表面	占电加工机床总数的 1%

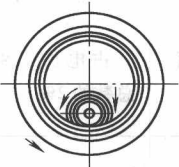
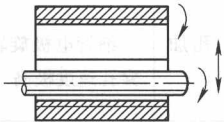
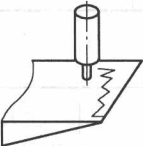
(续)

类别	工艺方法	特 点	用 途	备 注
5	高速小孔加工	细管电极旋转, 穿孔速度极高	深小孔、喷嘴、穿丝孔	占电加工机床总数的2%
6	表面强化、刻字	工具在工件上振动, 工具相对工件移动	工具刃口强化、刻字	占电加工机床总数的2%~3%

表 1-2 电火花加工方法的图示说明

 内圆磨削	工件旋转、轴向运动并做径向进给运动	 刃磨	工具电极旋转运动, 刀具(工件)横向往复运动, 纵向直线进给运动
 外圆磨削	工具电极旋转和直线进给运动, 工件旋转和往复运动	 成型刀具的刃磨	工具电极旋转和直线运动, 工件直线进给运动
 平面磨削	工具电极旋转运动, 工件三个互相垂直方向直线进给运动	 铣沟槽	工具电极旋转和一个方向直线运动, 工件两个互相垂直方向的直线运动

(续)

 回转齿轮加工	工具电极与工件做共轭展成运动, 工具电极做径向进给运动	 回转螺纹加工	工具电极与工件同步旋转运动, 工件做径向进给运动
 金属表面强化	电极振动, 并沿金属表面做进给运动	 材料切断	工具电极旋转和直线进给运动

电火花加工的应用可主要分为以下几大类:

1. 电火花成形加工

电火花成形加工是通过工具电极相对于工件的进给运动, 把工具电极的形状和尺寸反复制在工件上, 从而加工出所需要的零件的加工方法。常见的电火花成形加工机床由机床本体、脉冲电源、伺服系统、工作液循环系统等所组成, 其加工示意图如图 1-1 所示。电火花成形加工适合于机械加工方法难于加工的材料加工, 如淬

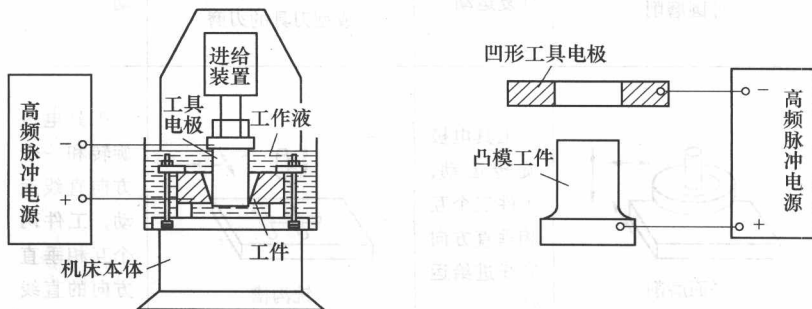


图 1-1 电火花成形加工示意图

火钢、硬质合金、耐热合金等。其可加工特小孔、深孔、窄缝及复杂形状的零件，如各种型孔、立体曲面、复杂形状的工件等。

2. 电火花线切割

电火花线切割是冲裁模具加工中应用最广的方法。它是利用一根移动着的金属丝（钼丝、钨丝或铜丝等）作工具电极，在金属丝与工件间通以脉冲电流，使之产生脉冲放电而进行切割加工的。电火花线切割加工依据走丝速度可以分为高速、低速走丝两大类。高速走丝的速度一般为 $2 \sim 12\text{m/s}$ ，这是我国独创的加工方法。低速走丝速度一般为 $0.017 \sim 0.133\text{m/min}$ 。如图 1-2 所示为高速走丝电火花线切割加工原理示意图。电极丝穿过工件上预先钻好的小孔（穿丝孔），经导轮由走丝机构带动进行轴向走丝运动。

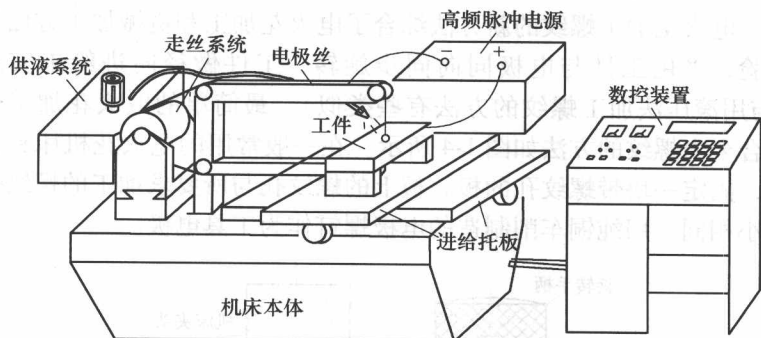


图 1-2 高速走丝电火花线切割加工原理示意图

电火花线切割加工具有如下特点：①它不需要专门制造的成形电极；②仅用细金属丝作为工具电极切割成形，不必大量蚀除金属；③可以对工件套裁，有效地利用工件材料；④由于电极丝很细，切缝窄，因此可加工一般方法难以加工的窄缝及复杂精密形状的零件。

3. 电火花磨削加工

电火花磨削加工是用电火花加工原理与机械磨削的运动方式相结合，使工件达到加工尺寸的一种加工方法。其工具电极与工件电极之间做相对运动，其中之一或两者做旋转运动。电火花磨削加工

的示意如图 1-3 所示。电火花磨削加工主要用于磨平面和内外圆、小孔、深孔以及成形镗床和铲磨。

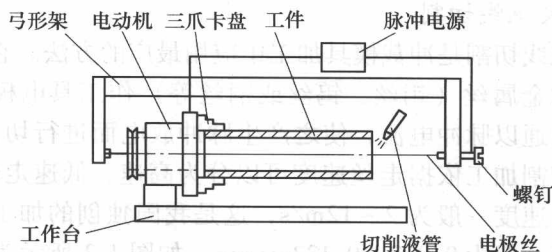


图 1-3 电火花磨削加工原理示意图

4. 电火花加工螺纹的新方法

电火花加工螺纹的新方法综合了电火花加工和机械加工方面的经验，采用工件与电极同向同步旋转，工件做径向进给来实现（与用滚压法加工螺纹的方法有些类似）。最简单的电火花加工硬质合金内螺纹的方法如图 1-4 所示。在一般常用的电火花机床夹头上，固定一块带螺纹孔的板，板上的螺纹孔与所要求加工的螺纹孔大小相同。用纯铜车削制造的电极螺钉作为工具电极。

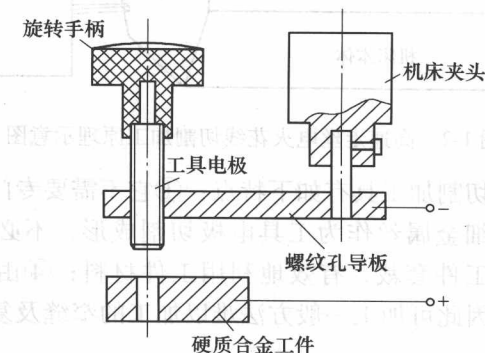


图 1-4 简单的电火花螺纹加工示意图

5. 电火花表面强化和刻字

电火花表面强化和刻字是一种金属表面处理的方法。它采用硬质合金、石墨、合金钢等导电材料作为工具电极，在空气或特殊气

体中,使电极与被强化的金属工件间产生火花放电,利用放电时释放出的能量,使电极材料移镀到工件表面或渗入工件表面层,从而形成所谓的强化层,以改善工件表面性能,提高表面硬度、耐磨性、耐蚀性等,延长工件的使用寿命。图 1-5 所示为金属电火花表面强化的加工原理示意图。其中,电火花表面强化是本书的重点内容,其强化机制和内容将在后面专门介绍。

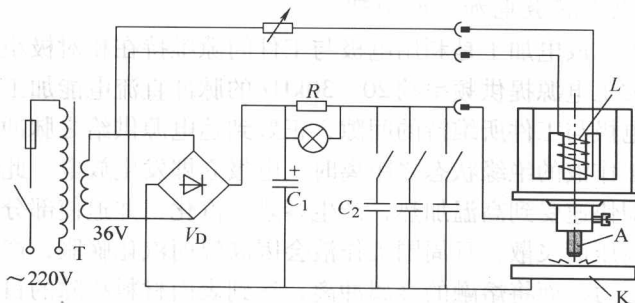


图 1-5 电火花表面强化加工原理图

1.2 电火花放电加工与表面改性

电火花放电表面合金化是放电加工原理应用在表面改性上的一种方法,其加工原理、材料表面结构及性质皆与放电加工相近。因此,本节将对电火花放电加工原理、放电加工过程、加工参数、表面结构与性质及放电加工在表面改性上的应用等内容加以阐述。

1.2.1 电火花放电加工的原理与过程

电火花放电加工与传统的机械加工方法完全不同,它是利用电弧或电火花来进行加工的一种特种加工方法。在加工过程中,电极与工件分置于正极或负极,将加工电极与工件没入不导电的工作液或介电液中,并在两极间通以数十至数百伏的电压。电极由伺服控制系统操控而缓缓靠近工件时,电极与工件间距离逐渐缩短,使得两极间距离最近处(约数微米至数十微米)的工作液发生介电崩溃或绝缘破坏,工作液的自由电子因而排成细桥式通路,在阴、阳两极间形成等离子体通道,此能量可使两极间温度达到 8000 ~

12000℃, 甚至高达 20000℃。电极与工件材料表层因此被加热、熔融、移除, 因而达到加工效果。由于放电加工时电极与工件之间没有接触的机械应力, 在加工期间也不会有机械颤抖或振动的问题。对于导电性材料, 无论其硬度多高皆可加工。电火花加工特别适合于航空业、模具业、汽车工业及外科医学用具中的高硬度材料的加工。

1. 电火花放电加工的原理

电火花放电加工是利用电极与工件间隙维持在相对极小的状态时, 由加工电源提供频率约 20 ~ 30kHz 的脉冲直流电能加工工件材料的。电极与工件所维持的间隙, 正好到达电源供给之脉冲电压可以破坏工作液的绝缘状态之距离时, 电极立即发生放电。此时, 放电点周围快速受到高温加热, 产生熔融、汽化, 并迫使部分熔融金属遭受高压而飞散, 且周围工作液会因高温而汽化膨胀, 产生爆震的冲击压力, 而将熔融的金属冲离, 达到表面材料移除的目的。当脉冲电流停止时, 放电停止, 等离子体通道也消失, 受到加热部位随即被循环的工作液急速冷却, 两极间的温度与压力下降, 恢复至绝缘状态, 直到下一次的脉冲放电。此过程在极短时间内重复进行(每秒约数百次至数万次), 即可达到加工目的。放电高温造成工作液突然汽化膨胀, 会对熔融金属施加压力, 此压力对整体的电极和工件而言并不大, 但对放电区域的单位面积而言却相当大。此股爆破压力使熔融金属飞散于工作液中, 形成加工屑(debris)。而未被喷散的熔融金属则附着于电极或工件的端部形成隆起部分, 此隆起部分, 可能是下一次的放电点。熔融的金属喷开之后, 被周围的工作液侵入, 很快带走其残余的热能。使用的工作液通常为低粘度的碳氢化合物或矿物油, 具有绝缘、冷却与排渣等功能。

2. 电火花放电加工的过程

在电火花放电加工过程中, 两极间的放电火花所产生的局部高温使工件与电极表面熔融与蒸发, 并借由放电柱中的工作液, 因高温产生的膨胀与汽化现象产生冲击力, 使部分熔融材料冲除, 两极间旋即恢复绝缘状态, 完成单发放电加工。因此, 放电加工也称电火花蚀出加工。完整的放电加工材料移除机制包括以下五个步骤:

(1) 放电现象的发生 电极逐渐趋近工件时, 两极间的电场强度渐渐增强, 带负电荷的电子从负极脱离, 电极继续向工件接近时, 大量电子开始由负极释出并加速撞击正极, 使两极间距离最短处迸发火花, 火花即成为细小的柱形电弧, 称为放电柱 (electrical column)。在放电柱内, 电流密度很高的电子流, 撞击工件表面的一点, 使电子流撞击点的材料局部熔化, 如图 1-6a ~ 图 1-6c 所示。

(2) 产生电离作用 在自由电子朝向正极加速的过程中, 不断碰撞工作液中的中性粒子, 其中有些粒子获取电子, 有些则失去电子, 这种现象称为电离作用, 如图 1-6d 所示。

(3) 熔融蒸发 工作液发生电离作用, 致使两极间形成含有高能量带电粒子 (正、负离子与电子) 的放电通道, 带电粒子分别向阴、阳两极撞击时, 瞬间动能即转变成大量的热能, 足以将放电点的材料表面熔融, 部分材料可能蒸发, 工件端即产生材料移除, 电极端则造成电极消耗, 如图 1-6e 所示。

(4) 加工屑冲除 放电柱周围的工作液因高温汽化膨胀而产生极高压力, 能够将工件与电极之间加工屑予以冲除。这些加工屑包含了熔融状态的工作物、电极材料与工作液的分解物 (焦油、气体、炭黑) 等, 并随着循环工作液的流动而被带离, 新的工作液旋即补充之, 如图 1-6f 和图 1-6g 所示。

(5) 加工周期的完成 当放电终止时, 放电柱随即消失, 两极间恢复绝缘状态, 温度与压力迅速下降, 熔融金属受工作液的冷却而凝固成为细小球状物, 分散于工作液中。然而, 没有被冲除的加工屑部分也因工作液的冷却作用而凝固, 生成类似火山口形状的放电坑, 放电坑凸起的部分成为续击发的放电点。至此, 单发放电加工周期完成, 如图 1-6h 和图 1-6i 所示。放电加工即是上述五个步骤反复施作的累积, 而能将材料移除以形成与电极外形相映射的工件。单发放电的能量 W 可由放电期间的峰值电流 I_p 与极间电压 E_g 的乘积对时间积分而得, 时间范围为单一脉冲的持续时间:

$$W = \int_0^{\tau_{on}} E_g(t) I_p(t) dt \quad (1-1)$$

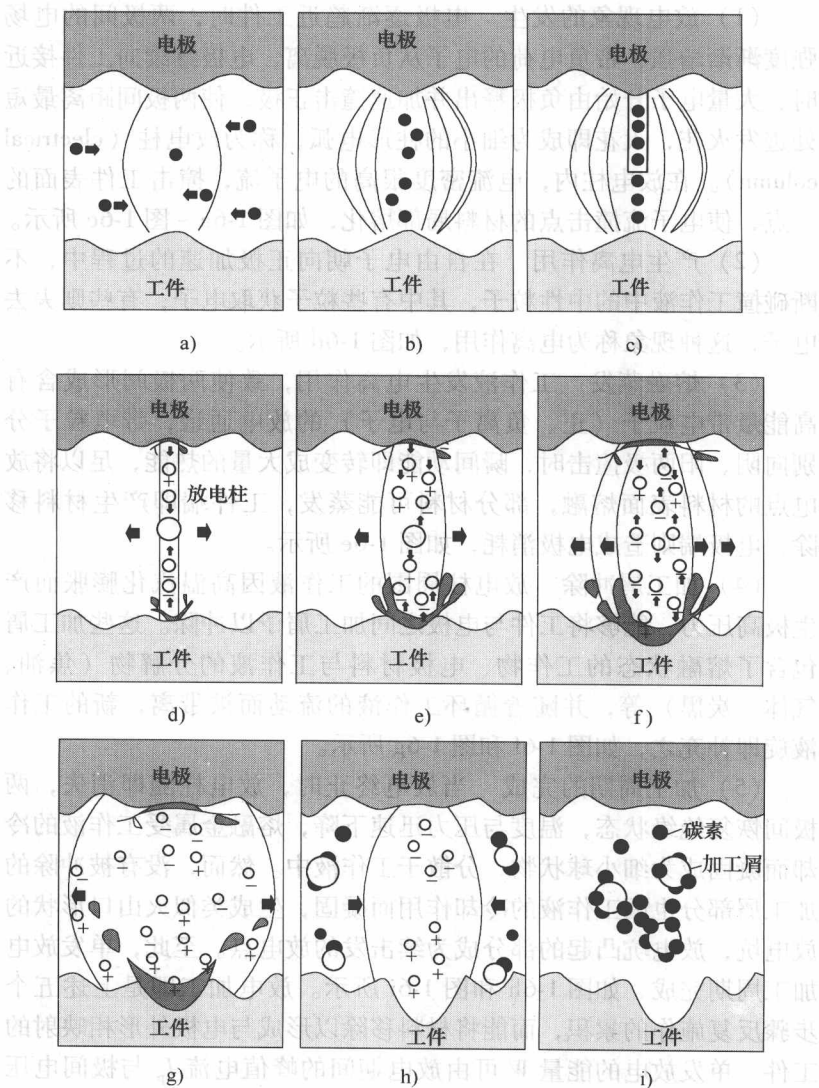


图 1-6 放电加工时材料蚀除过程示意图

(1-1) a) ~c) 放电现象 d) 电离作用 e) 熔融蒸发 f)、g) 加工屑冲出
h)、i) 单发放电加工周期完成