

北京市《金属切削理论与实践》编委会

电火花加工

北 京 出 版 社

DIANHUOHUA JIAGONG

电 火 花 加 工

北京市《金属切削理论与实践》编委会

北 京 出 版 社

电 火 花 加 工

北京市《金属切削理论与实践》编委会

*

北 京 出 版 社 出 版

(北京崇文门外东兴隆街 51 号)

新华书店北京发行所发行

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

*

787×1092 毫米 16 开本 17 印张 403,000 字

1980 年 5 月第 1 版 1980 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—10,000

书号: 15071·31 定价: 1.80 元

前 言

电火花加工是一种新的加工技术，自五十年代以来，我国开始研究和试用。经过不断发展，已得到日益广泛的应用，成为加工各种模具和零件的有效方法。

为了适应社会主义现代化建设的需要，进一步推广这一新的加工技术，在中共北京市委的领导下，由《金属切削理论与实践》编委会主持，成立了《电火花加工》编写组，日常工作由北京市技术交流站负责。参加编写工作的有中国科学院电工研究所于学文、北京模具厂曹凤国、国营七九八厂庞大同等同志，由于学文同志负责全书统编工作。

全书共分四篇：第一篇电火花加工的基本原理；第二篇电火花成型加工；第三篇电火花线切割加工；第四篇其它电火花加工。

本书可供从事电火花加工的工人、技术人员使用，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

本书编写过程中，得到了兄弟省市和本市有关单位的大力支持。许多工厂、院校和科研单位不仅提供了大量资料，并审阅了原稿；特别是，中国科学院电工研究所胡传锦、北京电加工研究所于家珊、三机部六二五所楚振斌等同志，还参与了有关内容的编写工作。在此，表示衷心的感谢。

由于水平所限，书中难免有错误之处，望广大读者批评指正。

北京市《金属切削理论与实践》编委会

目 录

绪 论

第一节	电火花加工的产生	(1)
第二节	电火花加工是怎样实现的	(1)
第三节	电火花加工的特点和用途	(2)
第四节	我国电火花加工发展概况	(3)

第一篇 电火花加工的基本原理

第一章	电火花加工的物理本质	(5)
第一节	介质击穿和通道形成	(5)
第二节	能量的转换、分布与传递	(6)
第三节	电蚀产物的抛出	(7)
第四节	间隙介质的消电离	(9)
第二章	影响材料放电腐蚀的因素	(9)
第一节	极性效应	(9)
第二节	覆盖效应	(10)
第三节	脉冲放电波形与参数	(11)
第四节	间隙放电特性	(14)
第五节	电极对材料	(16)
第六节	工作液	(18)

第二篇 电火花成型加工

第一章	电火花成型加工脉冲电源	(20)
第一节	弛张式脉冲电源	(21)
第二节	电子管式和闸流管式脉冲电源	(24)
第三节	可控硅式脉冲电源	(26)
第四节	晶体管式脉冲电源	(33)
第五节	多回路脉冲电源	(40)
第六节	脉冲电源的发展	(42)

第二章	电火花成型加工的自动控制系统	(45)
第一节	自动调节器	(45)
第二节	自适应控制系统	(55)
第三章	电火花成型加工机床	(60)
第一节	机床的结构	(61)
第二节	床身、立柱、工作台及导轨组合形式	(63)
第三节	主轴头	(65)
第四节	工作液循环过滤器	(71)
第五节	机床附件	(74)
第四章	电火花成型加工的基本工艺规律	(79)
第一节	影响加工速度的主要因素	(79)
第二节	影响电极损耗的主要因素	(83)
第三节	影响表面光洁度和加工精度的主要因素	(90)
第四节	电火花加工后表面层状态	(94)
第五章	电火花成型加工工艺与应用	(101)
第一节	冲模加工	(101)
第二节	型腔模加工	(111)
第三节	零件加工	(122)
第四节	小孔加工	(125)

第三篇 电火花线切割加工

第一章	电火花线切割加工的控制 系统	(135)
第一节	靠模仿型控制系统	(136)
第二节	光电跟踪控制系统	(138)
第三节	数字程序控制系统	(143)
第四节	计算机控制与群控	(155)
第二章	电火花线切割加工脉 冲 电 源	(157)
第一节	电火花线切割加工脉冲电源的典型电路	(157)
第二节	其它形式的脉冲电源	(161)
第三章	电火花线切割加工机床	(163)
第一节	床身	(165)

第二节	坐标工作台·····	(165)
第三节	走丝机构·····	(170)
第四节	丝架·····	(175)
第五节	工作液循环与过滤装置·····	(182)
第六节	光电跟踪台·····	(183)
第七节	常用工夹具·····	(186)
第四章	电火花线切割加工的基本工艺规律·····	(190)
第一节	脉冲电源波形与参数对工艺指标的影响·····	(191)
第二节	机械传动精度对工艺指标的影响·····	(197)
第三节	切割轨迹的控制精度对加工效果的影响·····	(199)
第四节	电极丝及其移动速度对工艺指标的影响·····	(201)
第五节	工件材料及厚度对工艺指标的影响·····	(207)
第六节	工作液对工艺指标的影响·····	(208)
第七节	进给速度对工艺指标的影响·····	(209)
第八节	放电压力对工艺指标的影响·····	(210)
第九节	诸因素对工艺指标的相互影响关系·····	(212)
第五章	电火花线切割加工工艺及应用·····	(213)
第一节	对工件图纸进行审核与分析·····	(213)
第二节	工艺准备·····	(216)
第三节	工件的装夹·····	(218)
第四节	数控编程与工件的加工·····	(222)
第五节	靠模的设计、制造与装夹·····	(229)
第六节	绘制光电跟踪图与加工·····	(230)
第七节	加工带斜度的工件·····	(233)
第八节	电火花线切割加工的应用·····	(234)

第四篇 其它电火花加工

第一章	小孔及深孔的电火花磨削·····	(247)
第一节	小孔磨削的特点与机床·····	(247)
第二节	自动控制系统与脉冲电源·····	(248)
第三节	小孔电火花磨削加工的应用·····	(249)
第二章	电火花迴转加工·····	(252)
第一节	加工原理及特点·····	(252)
第二节	共轭迴转式电火花加工设备·····	(253)

第三节	共轭迴转式电火花加工的应用·····	(254)
第三章	金属电火花表面强化与刻字·····	(255)
第一节	金属电火花表面强化·····	(255)
第二节	电火花刻字·····	(258)
第四章	半导体与非导体的电火花加工·····	(259)
第一节	半导体的电火花加工·····	(259)
第二节	非导体的电火花加工·····	(260)

绪 论

第一节 电火花加工的产生

电火花加工是利用两极间脉冲放电时产生的电腐蚀现象,对材料进行加工的方法。

早在十九世纪,人们就发现了电器开关的触点开闭时,因为放电,使接触部位烧蚀,造成接触面的损坏。这种放电引起的电极烧蚀现象叫做电腐蚀。起初,电腐蚀被认为是有害的,为减少和避免这种有害的电腐蚀,人们一直在研究电腐蚀产生的原因和防止的办法。当人们掌握了它的规律之后,便创造条件,转害为益,把电腐蚀用于生产中。

研究表明,在两极发生放电的过程中,放电通道瞬时产生大量的热,足以使电极材料表面局部熔化或汽化,并在一定条件下,熔化或汽化的部分能抛离电极表面,形成放电腐蚀的坑穴。

二十世纪四十年代初,人们进一步认识到,在液体介质中进行重复性脉冲放电时,能够对导电材料进行尺寸加工,因此,创立了“电火花加工法”。

电火花加工是与机械加工性质完全不同的一种新工艺、新技术。机械加工是通过机床部件的相对运动,用比工件材料硬的刀具去切除工件上多余的部分,来得到成品零件的。但随着工业生产和科学技术的进步,具有高熔点、高硬度、高强度、高脆性、高粘性、高韧性、高纯度等性能的新材料不断出现,具有各种复杂结构与特殊工艺要求的工件越来越多,仍然采用机械加工法,有时是难于加工或无法加工的。因此,人们除了进一步发展和完善机械加工法之外,还努力寻求新的加工法。电火花加工法能够适应生产发展的需要,并在应用中显出很多优异性能,因此得到了迅速发展和日益广泛的应用。

第二节 电火花加工是怎样实现的

利用电腐蚀现象对材料进行加工,应具备以下条件:

(1) 作为工具和工件的两极之间要有一定的距离(通常为数微米到数百微米),并能维持这一距离。

(2) 两极之间应充入介质。对导电材料进行尺寸加工时,两极间为液体介质;进行材料表面强化时,两极间为气体介质。

(3) 输送到两极间的能量要足够大,即放电通道要有很大的电流密度(一般为 $10^5 \sim 10^6$ 安/厘米²)。这样,放电时产生大量的热,足以使任何导电材料局部熔化或汽化。

(4) 放电应是短时间的脉冲放电,放电的持续时间为 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 秒,由于放电的时间短,使放电产生的热来不及传导扩散开去,从而把放电点局限在很小的范围内。

(5) 脉冲放电需重复多次进行, 并且每次脉冲放电在时间上和空间上是分散的, 即每次脉冲放电一般不在同一点进行, 避免发生局部烧伤。

(6) 脉冲放电后的电蚀产物能及时排运至放电间隙之外, 使重复性脉冲放电顺利进行。

在进行电火花加工时(图 0-0-1), 工具电极接脉冲电源的一极, 工件接另一极, 两极间充满液体介质, 放电间隙自动控制系统控制工具电极向工件移动。当两极间达到一定距离时, 极间的液体介质被击穿, 发生脉冲放电, 使工件被蚀除一个小坑穴, 工具电极也会因放电而出现损耗。放电后的电蚀产物由液体介质排至放电间隙之外, 同时经过

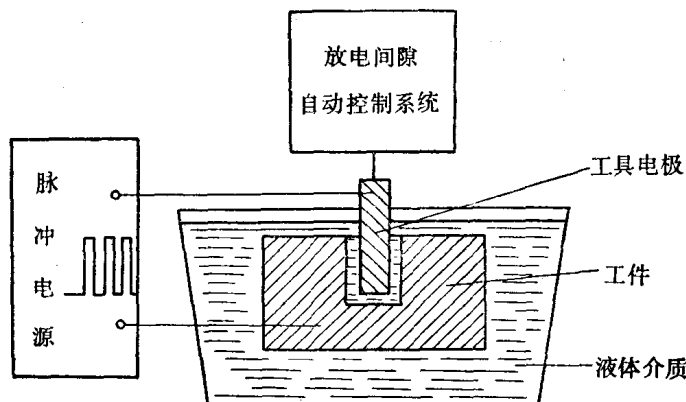


图 0-0-1 电火花加工原理示意图

短暂的间隔时间, 使极间恢复绝缘, 即消电离。然后再进行下一次脉冲放电, 又使工件蚀除一个小坑穴。如此不断地进行放电蚀除, 工具电极不断地向工件移动, 维持适宜的放电间隙, 就能在工件上加工出与工具电极形状相似的型孔或型腔。如果使工具电极或工件进行各种形式的相对运动, 则可实现电火花切割加工、共轭迴转加工、磨削加工等。

第三节 电火花加工的特点和用途

电火花加工的特点:

(1) 脉冲放电的能量密度高, 便于加工用普通的机械加工方法难于加工或无法加工的特殊材料、复杂形状的工作。

(2) 脉冲放电持续的时间极短, 放电时产生的热量传导扩散范围小, 材料被加工表面受热影响的范围小。

(3) 加工时, 工具电极与工件材料不接触, 两者之间宏观作用力极小, 工具电极材料不须比工件材料硬, 因此工具电极制造容易。

(4) 直接利用电能进行加工, 便于实现加工过程的自动化; 并可减少机械加工工序, 加工周期短, 劳动强度低, 使用维护方便。

目前, 电火花加工技术已广泛用于宇航、航空、电子、原子能、计算技术、仪器仪表、电机电器、精密机械、汽车拖拉机、轻工等行业, 以及科学研究部门。

当前,电火花加工的主要用途如下:

- (1) 加工各种金属及其合金材料、特殊的热敏感材料、半导体和非导体材料。
- (2) 加工各种复杂形状型孔和型腔工件,包括加工圆孔、方孔、多边孔、异形孔、曲线孔、螺纹孔、微孔、深孔等型孔工件,及各种型面的型腔工件。例如加工从数微米的孔、槽到数米的超大型模具和零件。
- (3) 各种工件与材料的切割,包括材料的切断、特殊结构零件的切断,切割微细窄缝及微细窄缝组成的零件(如金属栅网、慢波结构、异形孔喷丝板、激光器件等)。
- (4) 加工各种成型刀、样板、工具、量具、螺纹等成型零件。
- (5) 工件的磨削,包括小孔、深孔、内圆、外圆、平面等磨削和成型磨削。
- (6) 刻写、打印铭牌和标记。
- (7) 表面强化,如金属表面高速淬火、渗氮、渗碳、涂覆特殊材料及合金化等。
- (8) 辅助用途,如去除折断在零件中的丝锥、钻头,修复磨损件,跑合齿轮啮合件等。

总之,电火花加工是正在发展中的新工艺、新技术。它特有的功能,为各种新型材料的发展和应用开辟了广阔的途径,为各种工业产品的改革与制造提供了新的加工设备,为现代科学技术的发展和试验设计水平的提高提供了有效的手段。

第四节 我国电火花加工发展概况

五十年代初期,我国开始研究和应用电火花加工技术。先是应用电火花镀覆,把硬质合金材料镀覆于高速钢车刀和冷冲模刃口上,显著地提高了车刀和模具的使用寿命;同时试用电火花加工进行穿孔、制模、切断、磨削、刻写、取折断工具和修理工件等。此后又用于成批加工柴油机喷嘴小孔和磨削零件内孔。一九五四年设计和制造了加工喷嘴小孔的专用电火花加工设备。

一九五八年,我国电火花加工开始从研究试用阶段进入到生产应用阶段。研制成功了各种各样的电火花成型加工设备。脉冲电源一般都采用非独立弛张式电路,如 RC 、 RLC 、 $RLCL$ 电路等;放电间隙自动控制系统采用电机机械式主轴头,如电磁悬浮式、单电机式、双电机式、双机差动式等;工具电极主要用黄铜或紫铜,用于加工一般中小型冷冲模,具有明显的效果。同时,用于型腔模具加工,首先针对汽车、拖拉机等行业的锻模加工,先后研制成功采用 4.3 千瓦和 20 千瓦脉冲发电机作电源的电火花加工设备,开始以电火花加工代替铣床制造 5 吨模锻锤以下的锻模。

从五十年代末期开始,我国研究电火花线切割加工,首先用于加工电真空器件。六十年代初期研制成功靠模仿型电火花线切割加工设备,能够切割尺寸精小、形状复杂、材料特殊的冲模和零件,解决了过去用机械加工方法难于实现或无法实现的一些加工问题。同时,自行设计的电火花成型加工设备开始成批生产,许多使用部门也自行制造,更加推动了电火花加工的发展。当时采用铜电极,这给凸凹模配合和制造电极带来一定困难。经过反复实践,创造了用铸铁电极与凸模一块成型磨削,然后用电火花穿制凹模的新工艺。以后又发展为用凸模当电极直接加工凹模的“钢打钢”新工艺。此外,由于采

用了电极酸蚀法、阶梯电极法、组合电极法，进一步扩大了电火花成型加工的应用。

在这期间，脉冲电源和控制系统也有很大进展，陆续研制出电子管式、闸流管式等多种脉冲电源及喷嘴-挡板式液压头。机床也在不断改进和完善，取得了较好的经济效益。使冷冲模加工，由小型精密冲模到直径达一米的大型电机冲模，由单槽落料模到复式和跳步模，由钢冲模到硬质合金模等都获得了应用。

六十年代中期，在电火花线切割加工中也开始采用电子管式脉冲电源，加工速度比采用RC电源提高了三倍以上。一九六七年，我国把光电跟踪控制技术成功地应用于线切割加工中，用自动跟踪图线运动代替了靠模仿型控制，省去了制造高精度靠模的工序，并且利用比例变换方式，进一步提高了加工精度，可达0.02~0.03毫米左右，基本上满足了小型模具和零件加工的要求。同时，快速走丝机构进一步完善和推广，并以乳化液代替煤油，使加工速度大大提高。

六十年代末期，随着我国半导体工业的发展，研制出数字程序控制电火花线切割加工设备，并进行批量生产。改进定型的光电跟踪电火花线切割加工设备，也进行批量生产。此后，我国设计制造的电火花加工设备，曾在国内外多次展出。

七十年代以来，电火花线切割加工技术，已经成为我国冲模和一些零件加工的极为有效的加工方法之一。线切割加工设备的质量、数量、品种和功能都有较大进展，某些工艺指标达到了较高水平。大型电火花线切割加工设备已经进行批量生产。微精加工线切割专用设备也在生产中试用。带有间隙偏移、齿隙补偿、切割斜度等功能的设备多种多样，并不断完善。编制程序方法不断简化，自动编制程序已经实现，小型电子计算机控制和群控也在试用。新型的各种波形的脉冲电源不断出现，加工条件不断改善等。因此，加工范围进一步扩大，加工工艺指标显著提高。

电火花成型加工，在加工型腔模方面发展也很快。六十年代末，我国研制出晶体管式和可控硅式脉冲电源，此后不断改进，使脉冲参数调节和适应范围不断扩大。新型的适应控制等脉冲电源、大功率多回路脉冲电源、精加工高效率低损耗脉冲电源也初见成效。在自动控制方面，我国主要采用的液压头，已由滚动导轨发展到静压导轨；喷嘴-挡板发展到伺服阀；液压头的刚度、精度、灵敏度及承重能力不断提高。采用数字控制的步进电机和力矩电机的主轴控制系统及适应抬刀已开始应用。平动头结构和性能不断改善，偏心量的调节已由手动调节发展到机械式或电机式自动调节，并出现了数字控制式平动头。由于这一系列改进，我国型腔模电火花加工进入了一个新的阶段，现已广泛用于锻模、压铸模、塑料模、胶木模、陶土模、橡皮模、玻璃模和粉末冶金模的加工中，工艺水平不断提高。

此外，我国在电火花磨削等方面也有所发展，磨制小孔具有一定的经验，并成批生产小孔电火花磨削加工设备。在材料表面的电火花强化方面，近年来也有新的进展。光洁度可达 $\nabla 9 \sim \nabla 11$ 、精度为微米级的迴转式电火花加工，也取得了显著的效果。

对于电火花加工，除在应用研究方面取得了进展外，还对许多规律性、理论性的问题进行了研究和探讨。今后将继续在理论上和应用上全面地发展这一先进的加工技术，为我国早日实现四个现代化做出更大的贡献。

第一篇 电火花加工的基本原理

电火花加工,可以根据两极间脉冲放电过程中伴随发生的各种现象,进行不同的加工。例如,利用导电材料(特别是金属材料)在液体介质中放电时的电腐蚀现象,对材料进行尺寸加工;利用导电材料在气体介质中放电时材料表面层的变化,对材料进行表面强化;利用导电材料放电时的热爆炸作用,对非金属材料进行加工等。这几种加工,基本原理有共同之处,但也各有差异。这里主要说明金属电火花加工的基本原理。

第一章 电火花加工的物理本质

在液体介质小间隙中进行单个脉冲放电时,材料电腐蚀过程大致可分为介质击穿和通道形成、能量转换和传递、电蚀产物的抛出三个连续的阶段。但实现电火花加工,必须连续多次进行脉冲放电,为使每次脉冲放电正常进行,一般情况下,相邻两次脉冲放电之间还要有间隙介质消电离的过程。

第一节 介质击穿和通道形成

通常,电火花加工是在液体介质中进行的,电极间介质的击穿是脉冲放电的开始阶段。两极间的液体介质中含有各种杂质。当有电场作用时,这些杂质被吸向电场强度最大区域,并沿电力线形成特殊的接触桥,缩短了实际的极间距离,降低了间隙击穿电压,即在相同电压下大大提高了电场强度。另外,两电极微观表面是凹凸不平的,不平度甚至可以和极间距离相比拟,使得极间场强的分布很不均匀。这样,就会在场强最大的地方产生场致电子发射,由阴极表面逸出电子。在电场作用下,电子高速向阳极运动,并在运动中撞击介质中的中性分子和原子,产生碰撞电离,形成带负电的粒子(主要是电子)和带正电的粒子(正离子),导致带电粒子雪崩式增多。当电子到达阳极时,介质被击穿,产生火花放电,形成导电通道,随后电源中积聚的能量沿放电通道注入到两极放电点及间隙中。

液体介质中的各种杂质在电场作用下,也可能部分离解成带电粒子,使液体介质呈现一定的电导率。随着电场强度的增高,带电粒子在电场中获得的能量可以大于热运动时所获得的动能,从而使带电粒子的迁移率增加,电导率随之增加。如果间隙介质处于液相和气相混杂状态,散热条件不良,间隙过热,带电粒子的迁移率便会大大增加。这样,在一定电场强度下,也会产生电离雪崩过程,导致介质击穿。

介质击穿过程非常迅速,一般为 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 秒。介质一旦被击穿便形成导电通道,

间隙电阻从绝缘状态骤降至几分之一欧姆, 间隙电流迅速上升, 电流密度可高达 $10^3 \sim 10^6$ 安/厘米²。通道是由数量大体相等的带正电和带负电粒子, 以及中性粒子组成的等离子体。带电粒子在高速运动时发生剧烈碰撞, 产生大量的热, 使通道温度相当高。但通道中的温度分布是不均匀的, 从通道中心向边缘逐渐降低, 通道中心温度高达 10000°C 以上。由于受到放电时磁压缩效应和周围液体介质压缩效应的作用, 放电开始阶段, 通道截面很小, 随后迅速扩展。通道直径随放电能量、放电时间和放电间隙的增加而变大, 但并非直线关系。通道中气体密度沿截面是不同的, 密度从通道中心向边缘是增加的, 通道瞬时压力可达数十或上百个大气压, 而后迅速下降。通道发射的光谱除中性原子的谱线外, 还有变成电离气体的各种元素的离子谱线。同时, 放电还伴随着一系列派生的现象, 其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应及波长范围很宽的电磁波辐射和爆炸冲击波等等。

关于通道结构, 一般认为是单通道, 即在一次放电时间内只存在一个导电通道; 也有人认为, 在一次放电时间内顺序存在很多个相关的导电通道, 即所谓通道徙动理论; 还有人认为, 在一次放电时间内可能同时存在多个不相关的导电通道, 即多通道理论。

第二节 能量的转换、分布与传递

两极间的介质一旦被击穿, 电源就通过放电通道瞬时释放能量, 把电能转换为热能、动能、磁能、光能、声能及电磁波辐射能等。其中大部分转换为热能, 用于加热两极放电点和间隙通道, 使两极放电点局部熔化或汽化、通道中的介质汽化或热裂分解, 还有一些热量在传导、辐射过程中消耗掉。转换为动能的部分以电动力、电场力、电磁力、流体动力、热波压力、机械力等综合作用形成的放电压力, 在放电间隙起作用, 使电极放电点汽化或熔化的部分抛离电极表面, 或者转移到对面的电极上去。还有少部分能量随着放电以光、声、电磁波等形态消耗掉。

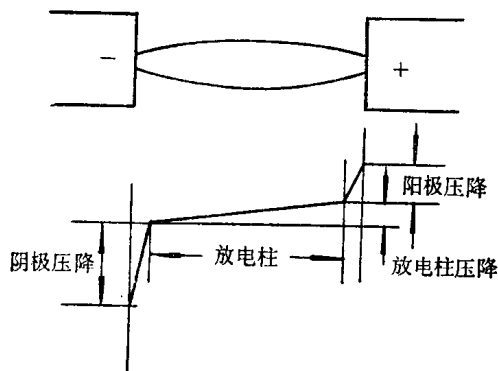


图 1-1-1 两极间电位分布示意图

热能与电火花加工的关系极大, 它在放电间隙中的分布与电位分布有关。极间电位分布为三个区域(图 1-1-1)。中间是等离子体导电通道, 叫做放电柱。放电柱中带电粒子由电场加速, 电子奔向阳极, 正离子奔向阴极。放电柱的电流是电子流与正离子流之和, 两者比例随放电能量和放电时间不同而异。

放电柱与阳极表面之间极薄的一层为阳极区, 形成阳极压降。同样, 放电柱与阴极

表面之间极薄的一层为阴极区, 形成阴极压降。

显然, 间隙中的总电压等于放电柱压降、阳极压降与阴极压降之和。因此, 间隙中的放电能量等于放电柱中的能量、阳极上能量与阴极上能量之和。

放电柱中能量主要消耗在热辐射和热传导上。随着放电柱长度、电位梯度、放电电流

和放电时间的增大，放电柱中消耗的能量亦增大。放电能量一定时，放电柱中消耗的能量增大，意味着两极上分布的能量减少。

传递给电极上的能量是产生材料腐蚀的原因。能量传递有下列几种形式：

- (1) 在电场作用下，带电粒子(电子和正离子)对电极表面的轰击；
- (2) 电极材料的蒸气在电极之间的能量交换；
- (3) 放电柱的辐射；
- (4) 放电通道中高温气体质点对电极表面的热冲击。

上述四种传递能量的形式中，主要是带电粒子对电极表面的轰击。在某些情况下，电极材料的蒸气传递的能量也不可忽视。放电柱的辐射、通道中高温气体质点对电极表面热冲击传递的能量是不大的，一般可忽略。

脉冲放电时，在放电柱等离子体中存在大量电子，这些电子一部分来源于阴极发射，一部分来源于通道中介质的电离。在电场作用下，具有一定动能的电子奔向阳极，轰击阳极表面，动能转化为热能。电子数目愈多，或者说，电子流愈大，电子传递给阳极的能量便愈大。

正离子同样具有一定的动能，在电场作用下奔向阴极，轰击阴极表面。这样，传递给阴极的能量主要决定于正离子数目及其动能和复合能的大小。

电极材料蒸气的传能效应是较复杂的。放电期间，如果电极表面汽化，则电极蒸气从电极表面喷出，当它被对面电极表面遏止时就实现了能量的传递，其中传递的热量随蒸气密度、蒸气流速和温度的增加而增加。因此，只有在放电能量密度很大、送能速度很高的情况下，电极材料蒸气的传热效应才比较明显。实际上，阴极蒸气传递给阳极的能量取决于蒸气温度与阳极放电点的温度之差。因此，用高沸点的钨、钼一类材料作阴极时，会传递给阳极以更多的热量。

第三节 电蚀产物的抛出

传递给两极的能量转化为热能，产生高温。因此，对两极来说，存在着导致材料放电腐蚀的瞬时高温热源。放电时存在两种热源，即体积热源和表面热源。

电流通过电极会产生焦耳热，并加热电极。由于电极内电流密度不均匀，因此被加热区域的温度分布也不均匀。放电通道与电极表面接触部位，尤其是靠近接触表面的边缘部位，由于瞬时放电时电流的趋肤效应，电流密度最大。而越往电极内部，电流密度降低，温度也随之降低。焦耳热对于电极来说是内部热源，这一热量是在电极体内放出的，所以叫做体积热源。

此外，电极还从通道中获得热量。通道内温度很高，经过接触表面，通道中的热传给电极，因热传导作用向电极内部传递。这一热源对于电极来说是外部的和表面的，所以叫做表面热源。

这两种热源对电极的加热规律和作用效果不一样。体积热源主要是在放电初始阶段起显著作用，此时热传导来不及起作用，电极表面上电流密度很高，释放出的焦耳热能将电极剧烈加热至熔化或蒸发。但在整个放电过程中起主要作用的还是表面热源，它所熔

化和蒸发的电极体积占放电蚀除小坑体积的大部分。

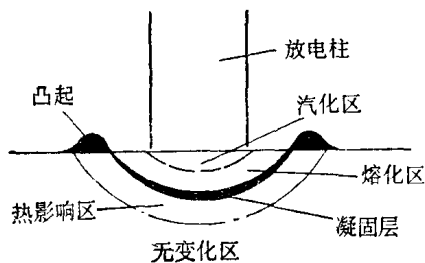


图 1-1-2 放电痕剖面示意图

一次脉冲放电产生一个小坑——放电痕（图 1-1-2）。高温热源将热量由电极表面向内部传递，表面的温度最高，如果超过材料的沸点，便形成汽化区。低于沸点而超过材料的熔点时，形成熔化区。当汽化和熔化的部分材料被抛出后，残留在小坑底部的熔化材料冷凝成凝固层，小坑边缘形成凸起。凝固层的里边是热影响区，热影响区的里边是无变化区。

无变化区。

在电火花线切割加工中，因电极丝相对工件运动，使放电通道也相应移动，放电痕呈卵形。

放电痕中的熔融材料是怎样抛出来的呢？

脉冲放电的初期，热源产生的瞬时高温，使电极放电点部分材料汽化。汽化过程中，产生很大的热爆炸力，使被加热至熔化状态的材料挤出或溅出。电极蒸气、介质蒸气以及放电通道的急剧膨胀，也会产生相当大的压力，参与熔化材料的抛出过程。脉冲持续时间较短时，这种热爆炸力抛出效应较显著。脉冲放电期间，电流的电磁效应产生电动力，它与电力线成法线方向，其大小取决于电极上电力线的分布。作用在放电痕熔化区内的电动力方向与电极表面成一角度，可分解成两个分力，即轴向力和径向力，它们的大小随放电时间而变化。当轴向力指向电极内部时，可将熔融材料压出，径向力却阻碍其被压出。随着放电时间的变化，电力线分布也变化。当轴向力减小，径向力增大时，熔化区将处于较高的压力之下，提高了熔融材料的沸点。这时，在过热熔融材料内产生汽化中心，引起汽化爆炸，将熔化材料抛出。这种效应在脉冲持续时间较长电流较大情况下比较明显。

在放电电流结束后的若干时间内，由于流体动力作用，熔化材料还会大量抛出。因为放电过程产生气泡，随着脉冲电流的增大，气泡内的压力增高。电流经过最大值后，汽化速度降低，气泡内压力降低，气泡壁上蒸气冷凝以及液体运动的惯性均导致气泡内压力的降低。电流结束后，气泡继续扩展，残余蒸气继续冷凝，致使气泡内压力急剧降低，甚至降低到大气压以下，形成局部真空。这使高压下溶解在熔融和过热材料中的气体放出，以及材料本身沸腾。使熔融的液滴和蒸气从小坑中再一次抛出，至此，小坑最后形成。

总之，材料的抛出是热爆炸力、电动力、流体动力等综合作用的结果。人们对这复杂的抛出机理的认识还在不断深化中。

小坑材料大部分呈液相抛出，一部分呈气相抛出。随着放电时间的缩短，特别是电流上升率较高时，气相抛出比例增加。在个别情况下，也有固相抛出，如高熔点的脆性材料，因热应力破坏作用会产生不具有熔化痕迹的固体颗粒抛出。

材料蒸气和液滴一部分飞溅转移在两极表面上，大部分被抛入液体介质中，由于表面张力和内聚力的作用，迅速冷却凝聚成球状颗粒，成为电蚀产物的一部分。这些颗粒中大部分是实心球体，一部分是空心球体，还有阴阳极材料相互覆盖包容的颗粒，这是

两极材料蒸汽和液滴在飞溅过程中相互碰撞和粘附而成的。

第四节 间隙介质的消电离

进行电火花加工时，一次脉冲放电结束后，一般应有一间隔时间，使间隙介质消电离，即通道中的带电粒子复合为中性粒子，恢复间隙中液体介质的绝缘强度，以待下次脉冲击穿放电。

在加工中，如果放电产物和气泡来不及很快排除，会改变间隙介质的成分和绝缘强度，使间隙中的热传导和对流受到影响，热量不易排出，带电粒子的动能不易降低，将大大减少复合的几率。这样，间隙长时间局部过热，会破坏消电离过程，易使脉冲放电转变为破坏电弧放电，使加工无法进行。因此，为了保证加工的正常进行，在两次脉冲放电之间一般应有足够的脉冲间隔时间，其最小脉冲间隔时间的选择，不仅要考虑介质消电离的极限速度，还要考虑电蚀产物排离放电区域的时间。

第二章 影响材料放电腐蚀的因素

电火花加工中，材料放电腐蚀的规律和机理是十分复杂的综合性问题。研究影响材料放电腐蚀的因素，对于应用电火花加工是很重要的。

第一节 极 性 效 应

电火花加工时，相同材料两电极的腐蚀量是不同的，其中一个电极比另一个电极的腐蚀量大，这种现象叫做极性效应。如果两极材料不同，则极性效应更加复杂。这里，我们把阴极蚀除量与阳极蚀除量的比值叫做极性系数。极性系数小于1称正极性，此时工件接脉冲电源的正端，工具电极接负端；反之，极性系数大于1为负极性，这时工件接脉冲电源的负端，工具电极接正端。极性系数的改变意味着两极间能量分布的改变。

在电场作用下，通道中的电子奔向阳极，正离子奔向阴极。由于电子质量轻，惯性小，在短时间内容易获得较高的运动速度。相反，正离子质量重，惯性大，在短时间不易获得较高运动速度。所以，在脉冲放电的前一阶段，电子动能大，电子传递给阳极的能量大于正离子传递给阴极的能量，使阳极蚀除量大于阴极蚀除量，即为正极性。随着放电时间的增加，正离子逐渐获得较高的运动速度，它的质量又重得多，轰击阴极时的动能较大，故传递给阴极的能量显著增加。同时，除液体介质蒸汽的正离子外，阳极和阴极蒸汽的正离子也参与了对阴极的轰击。因此，当正离子传递给阴极的能量超过电子传递给阳极的能量时，阴极蚀除量便大于阳极蚀除量，即为负极性。因此，从能量分布的时间特性来看，脉冲宽度是影响极性效应的重要因素之一。

随着放电能量的增加，尤其是极间放电电压的增加，每个正离子传递给阴极的平均动能增加。电子的动能虽然也随之增加，但当放电通道能量很大时，由于电位分布变化引