

(试用教材)

特种加工工艺学

陈传梁 编著

北京工业学院

1984年4月

内 容 简 介

本书系统地阐述了特种加工方法的基本原理、基本设备、工艺规律、主要特点和应用范围等。第一章电火花加工，第二章电解加工，第三章激光加工，第四章超声波加工，第五章电子束加工，第六章离子束加工，第七章电铸加工，第八章化学加工。

本书系高等工科院校机械制造工艺设备及自动化专业选修课教材，也可供从事特种加工的技术人员、工人阅读。

前 言

本书为机械制造工艺及设备专业，开设〈特种加工工艺〉选修课程试用教材。教学时数为30学时。

特种加工是指传统的机械切削加工以外的一些新的加工方法，是直接利用电能、电化学能、化学能、声能、光能、热能以及特殊机械能等能量形式对材料进行加工，具有其它加工方法无可比拟的优点，在现代加工技术中，越来越占有相当重要的地位，许多现代化技术装备和工业产品都需要采用特种加工方法才能完成。

近十几年来，特种加工技术的发展十分迅速，种类日益增多，应用日趋广泛，现已遍及各个加工领域，技术队伍不断扩大。为了补充和提高特种加工技术水平，近年来已有愈来愈多的工科院校陆续开设〈特种加工〉选修课和各种短训班，培养出一批又一批特种加工技术人才。可以预见，特种加工技术的日益发展和扩大，必将有利促进四化建设的进程。编者力图在这方面做些工作。

本书主要包括：电火花加工、电解加工、激光加工、超声波加工、电子束加工、离子束加工、电铸加工、化学加工等八章。主要系统地阐述各种加工方法的基本原理、基本设备、工艺规律、主要特点和应用范围等。

全书由王信义付教授主审。书中插图由刘秋霞同志描绘，在此一并表示感谢。

由于笔者水平有限，加之编写时间仓促，错误之处，在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1983.2

目 录

绪 论

§ 1 特种加工发展概况	1
§ 2 特种加工的分类	2

第一章 电火花加工

§ 1.1 电火花加工的基本原理和机理	3
§ 1.2 电火花加工中的一些基本规律	7
§ 1.3 电火花加工脉冲电源	16
§ 1.4 自动进给调节系统	25
§ 1.5 电火花加工机床	28
§ 1.6 电火花加工工艺	36

第二章 电解加工

§ 2.1 电解加工的基本原理和特点	80
§ 2.2 电解加工中的基本规律	85
§ 2.3 电解加工的基本设备	95
§ 2.4 电解加工工艺及其应用	98
§ 2.5 电解磨削	101

第三章 激光加工

§ 3.1 概 述	106
§ 3.2 激光加工的理论基础	106
§ 3.3 激光加工的基本原理和机理	113
§ 3.4 激光加工机	114
§ 3.5 激光加工工艺及其应用	123

第四章 超声波加工

§ 4.1 超声波加工的基本原理和特点	138
§ 4.2 超声波加工设备及其组成部分	139
§ 4.3 超声波加工速度、精度及其影响因素	152
§ 4.4 超声波加工的应用	154

第五章 电子束加工

§ 5.1 电子束加工原理和特点	159
§ 5.2 电子束加工机的组成	161
§ 5.3 电子束加工的应用	164

第六章 离子束加工

§ 6.1 离子束加工的物理基础	170
§ 6.2 离子束加工的原理和特点	172
§ 6.3 离子束加工装置	174
§ 6.4 离子束加工的应用	179

第七章 电铸加工

§ 7.1 电铸加工的原理和特点	185
§ 7.2 电铸的基本设备	186
§ 7.3 电铸工艺过程	187

第八章 化学加工

§ 8.1 化学蚀刻	197
§ 8.2 照相化学腐蚀法	199

参考文献

结 论

§1 特种加工发展概况

传统的机械切削加工已有几百年的历史，它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，应用最为广泛的一种加工工艺。用它来把毛坯加工成人们所需要的形状、尺寸和表面光洁度。它之所以行之有效，广为应用，是由它的实质所决定的。切削加工的实质，可以从两方面来看。

其一，“以硬克软”，即用高强度、高硬度的材料作为刀具，加工比较软的材料；

其二，靠机械外力和机械能量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、尺寸和表面光洁度。

一般情况下，总是可以找到一种硬的材料作为刀具加工软的材料。所以机械切削加工不论过去、现在和将来，都是一种行之有效，广为应用的加工方法。

但是，二十世纪以来，科学技术发展到一个新的阶段，特别是进入四十年代以后，生产和科学技术的发展更加迅速，很多工业部门，尤其是国防工业部门，要求尖端科学技术产品都在向高精度、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。与之相适应，很多具有高熔点、高强度、高硬度、高脆性、高韧性、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，尺寸精度、表面光洁度和某些特殊要求愈来愈高。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、锗、硅等材料的加工，对各种模具上特殊断面的型孔、喷油嘴、栅网、喷丝头上小孔、窄缝等的加工，对高精度细长零件，薄壁零件和弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述问题，仅仅靠传统的机械切削和磨削法加工是很困难的，有的根本无法实现。

二十世纪四十年代以后，人们相继探索研究出一些与传统的机械切削加工原理完全不同的新方法——电火花加工、电解加工、激光加工、超声加工、电子束加工、离子束加工等。这是直接利用电能、电化学能、化学能、声能、光能、热能以及特殊机械能等，来对材料进行加工的方法，为区别于传统的机械加工，一般统称为〈特种加工法〉。

特种加工方法与机械加工方法比较，有如下特点：

1) “以柔克刚”，因工具与工件基本不接触，加工时无明显的宏观机械力，故可加工脆性材料和精密微细零件、薄壁零件、弹性元件等，同时工具的硬度可低于被加工材料的硬度；

2) 不是主要依靠机械外力和机械能量切除金属，而是用电能、电化学能、化学能、声能、光能、热能等去除金属材料，瞬时能量密度高，故可加工任何高硬度的材料；

3) 不用切削原理，不产生宏观切屑；

4) 加工能量易于控制和转换, 故加工范围广, 适应性强。

由于特种加工方法, 具有其它加工方法无可比拟的优点, 所以在现代加工技术中, 越来越占有相当重要的地位, 许多现代化技术装备和工业产品, 非用特种加工方法加工不可。目前特种加工技术的应用已遍及到各个加工领域。为了适应科学技术的飞速发展和四化建设的需要, 必须重视特种加工技术的发展和扩大应用领域, 以促进现代化建设的高速度发展。

§2 特种加工的分类

到目前为止, 已经出现了多种形式的特种加工方法, 但还没有确切的定义和统一的分类, 仅按其用途可分为尺寸加工和表面加工两大类, 每类又可按能量形式和作用原理, 分为多种不同的工艺方法, 如表1所示。表2为几种常用的特种加工方法的综合比较。

本课程由于学时数所限, 只能对生产中应用较多, 和发展前途较广的几种特种加工方法——电火花、电解、激光、超声波、电铸、电子束、离子束、化学等加工方法的基本原理、基本设备、主要特点和应用范围等作概貌性的讲述。使学生通过学习, 对上述内容有一个基本了解, 以便在今后的工作中进一步学习和应用。

特种加工的分类

表1

类型	加工方法	能量形式
尺寸加工	电火花加工	电、热能
	电子束加工	
	离子束加工	
	等离子体加工	
	分子、原子束加工	
	电磁成形加工	电、磁能
	微波加工	
	电解加工	电、化学能
	电铸加工	
	电解磨削加工	电、化学、机械能
	化学腐蚀加工	
	化学研磨加工	化学能
	超声波加工	化学、机械能
	激光加工	声、机械能
	导电切削加工	光、机械能
	加热切削加工	
	低温切削加工	
表面加工	喷射加工	热、机械能
	电火花强化	机械能
	电解抛光	电、热、机械能
	化学抛光	电、化学能
	电子束曝光	化学能
	离子束抛光	电、热能
	离子镀膜	
	离子束注入	

第一章 电火花加工

电火花加工法是在二十世纪四十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地火花放电，靠电火花局部，瞬时产生的高温把金属蚀除下来，所以，通常称为<电火花加工>。因为是脉冲性放电，所以在某些场合也叫<电脉冲加工>，也有统称为<电蚀加工>的，日本则称为<放电加工>。电火花加工的分类，见图1-1。

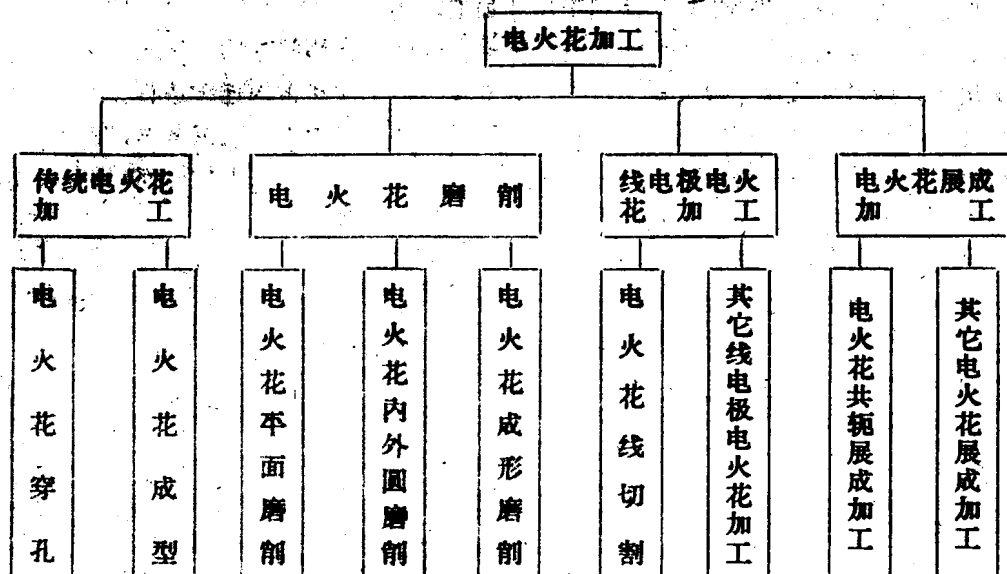


图1-1 电火花加工分类

§ 1—1 电火花加工的基本原理和机理

一、电火花加工的基本原理

在电插头或电器开关的触点将闭合或刚断开时，往往出现兰白色火花，并发出噼啪的响声，这种现象称为火花放电。仔细观察发现经过火花放电的金属表面被腐蚀成许多小的凹坑，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。

但事物都是一分为二的，在一定条件下，坏的东西可以引出好的结果，只要掌握规律，创造条件，就可以转害为益，把有害的电腐蚀用于生产。

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，放电通道中瞬时

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。所以在一定的加工介质中，通过两极之间火花放电的电蚀作用，对材料进行尺寸加工或表面加工，称为电火花加工。

但是，要将脉冲放电现象应用于“尺寸加工”，还必须具备以下条件：

(1) 在脉冲放电点必须有足够的火花放电强度，即局部集中电流密度高达 $10^8 \sim 10^9$ 安/厘米²，使金属局部熔化和气化，否则放电时，只能使金属发热，无法实现加工。

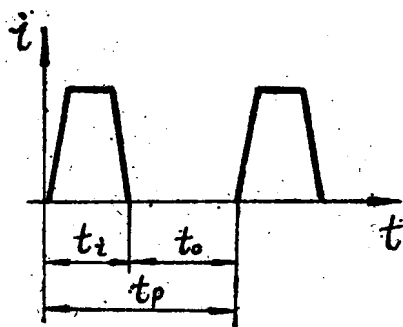
(2) 放电形式必须具有脉冲性、间歇性、瞬时性。图 1-2 为电流脉冲波形，一般，每一脉冲宽度为 $t_1 = 10^{-8} \sim 10^{-7}$ 秒，间隔一段时间 t_0 ，才能使热量来不及从极微小的局部加工区扩散到非加工区，从而能有效地蚀除金属，而且成型性和尺寸精度好。否则就象电弧放电那样，把整个工件表面“烧糊”无法用于尺寸加工。

(3) 必须把加工过程中所产生的加工屑、焦油、气体及余热等电蚀产物从微小的电极间隙中排除出去，通常在液体绝缘介质中进行，否则加工将无法正常地连续进行。

(4) 在每次脉冲放电之间的脉冲间隔内，电极间的介质必须来得及消电离，使下一个脉冲能在两极间另一“相对最靠近点”处击穿放电，以免总是在同一点上放电而形成稳定电弧，从而使工件的形状尺寸逐点无限趋近于工具电极的形状尺寸。

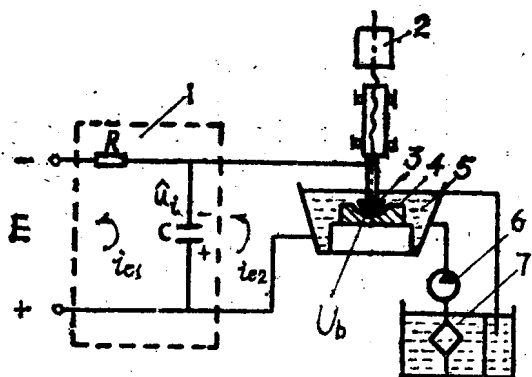
(5) 必须使电极之间保持一定的放电间隙（数微米到数百微米），也就是要使工具电极随着金属蚀除的进展而连续不断地向前送进，始终维持这一距离，使放电加工持续进行。

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 1-3 所示。



t_1 —脉冲宽度 t_0 —脉冲间隔 t_p —脉冲周期

图 1-2 脉冲波形



1—脉冲电源，2—伺服系统，3—工具电极，4—工件，5—工作液，6—液泵，7—过滤器

图 1-3 电火花加工机床工作原理示意图

(1) 脉冲电源：周期性利用电容器缓慢充电，在极短时间内快速放电，把直流电或交流电转换成具有一定频率的重复脉冲电流，是产生脉冲放电实现蚀除加工的供能装置。

一般空载电压为 30~300 伏，脉冲宽度为 0.1~2000 微秒，脉冲频率为 50~300000 赫，脉冲电流为数百毫安到数百安培。

2) 间隙自动调节系统：自动调节极间距离和工具电极的进给速度，维持一定的放电间隙，使脉冲放电正常进行。

3) 机床本体：用来实现工具和工件的安装夹固以及调整其相对位置精度等。

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

① 绝缘作用：两电极之间必须有绝缘的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，可以在较小的电极间隙下击穿，从而提高了仿型精度；

② 压缩放电通道的作用：因为受到液体介质的压缩和放电电磁场力的压缩，放电通道的横面积很小，从而使电流密度更高度集中，提高了生产率和加工精度；

③ 局部高压作用：在脉冲放电作用下，由于液体介质的急剧蒸发，则产生局部高压，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，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：绝缘恢复得快的液体介质有助于减少放电后残留的离子，以避免电弧放电。

实践证明，电火花加工在液体绝缘介质中进行比在空气中进行生产率高得多，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重要条件。

要求工作液应具有好的工艺性，即绝缘强度高，化学稳定性好，安全可靠，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。

电火花加工的基本过程，如图1-3，加工时，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 $\hat{u}_i$ 逐渐升高，当充电电压 $\hat{u}_i$ 大于间隙击穿电压 U_i 时，瞬时产生间隙击穿，发生脉冲放电，使火花放电通道内的电流密度高达 $10^8 \sim 10^9$ 安/厘米²，产生10000℃以上的高温，从而使电极表面局部金属熔化和气化，成为很细小的颗粒，并在电磁力和极间爆炸力的作用下，被抛入工作液中，而电极表面形成一个小凹坑。局部放大图如图

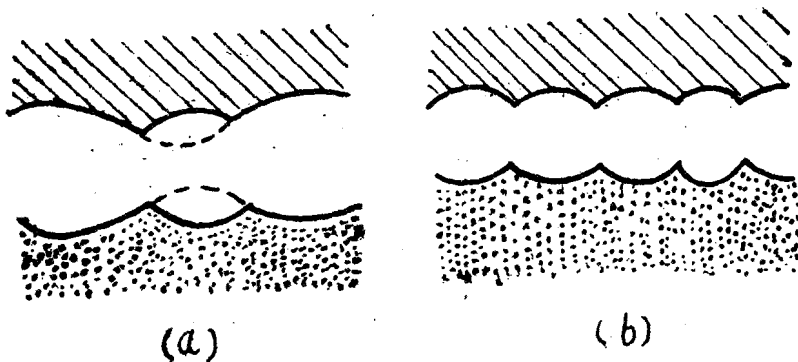


图1-4 电火花加工表面局部放大

1-4所示, (a)表示单脉冲放电, (b)表示多个脉冲放电。工作液恢复绝缘后, 第二个脉冲又在最近点绝缘最弱处击穿放电, 重复上述过程, 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, 而工具的轮廓和截面形状, 便复印在工件上。

二、电火花加工的机理

火花放电时, 电极表面的金属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工艺中工具电极损耗、加工精度和表面光洁度等各种基本规律, 以便对脉冲电源、进给装置、机床设备等提出合理的要求, 提高生产率, 降低成本。

电火花加工的机理, 即电火花腐蚀的微观过程, 由于放电时间极短, 间隙很小, 相当复杂。根据大量实验资料的分析来看, 电火花腐蚀的微观过程是电力、磁力、热力和流体动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, 即电离——击穿——形成火花放电通道; 火花放电——热膨胀——蚀除电极材料; 电蚀产物抛出发电间隙——消电离。

进行火花放电的一对电极称之为电极对。电极对的微观表面是凹凸不平的。当脉冲电源电压加到两极时, 相距最近的尖端处电场强度最高, 其间的工作液绝缘介质一小部分将最先被电离 (图 1-5 a), 即分解成电子和正离子而被击穿, 形成火花放电通道。电流急剧增加, 脉冲电压由空载电压降到工作电压。由于火花放电通道受到放电磁场力和周围液体介质的压缩

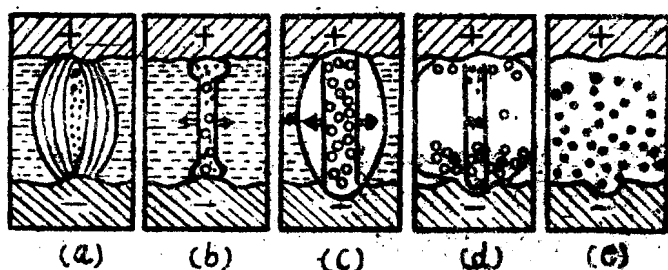


图 1-5 电火花腐蚀的微观过程

等作用, 使火花放电通道的横断面极小, 通道中电流密度可达 $10^6 \sim 10^8$ 安/厘米²。电子、离子在电场力作用下高速运动相互碰撞, 在电极间隙火花通道区产生大量热量; 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, 也将产生大量的热量。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、沸点直至气化点, 使局部金属材料熔化和气化 (图 1-5 b)。通道周围的工作液 (一般为煤油之类的碳氢化合物) 一部分气化为蒸气, 另一部分被瞬时高温分解为游离的碳粒、 H_2 和碳氢化合物 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等气体而析出, 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金属抛入附近的工作液介质里而冷却, 使电极表面形成坑穴状的蚀除凹痕。

事实上, 电蚀产物的抛出过程也是比较复杂的。火花通道周围所形成的气泡 (包含金属蒸气、工作液蒸气和分解出的气体等) 压力, 随着脉冲放电延时而迅速增高, 瞬时可达 $5 \sim$

10 个大气压，并迅速向外扩张（图 1-5c）。当脉冲电流终止时，热源虽已消失，但由于气泡外围扩张运动着的液体具有惯性，气泡体积继续增大，内部压力将大大降低，高压时溶解在液体金属中的气态电蚀产物又从小坑中分解出来，进而使一部分熔化了了的金属额外地被抛离电极表面（图 1-5d）。

熔化和气化的金属在被抛离电极表面时，除绝大部分在工作液中冷却亦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颗粒、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，此外还有少数由气态直接冷凝成的中心带有空泡的颗粒产物。

单个脉冲经过上述过程，完成了一次脉冲放电，而在工件表面留下一个带有凸边的小凹穴（图 1-5e）。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微观过程认识还很肤浅，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值得进一步研究。

§ 1-2 电火花加工中的一些基本规律

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，严格地说是指两极材料相同时。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。

产生极效应的原因是由于，在通道中电离放电时，电子的质量和惯性较小（电子的质量约为正离子质量的 $\frac{1}{1840}$ ），容易获得速度和加速度，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，大部分还未来得及到达阴极表面，脉冲便结束了，所以阳极蚀除速度大于阴极。这样，只要适当控制脉冲放电持续时间，使其 $t_i < 30$ 微秒，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，用 $t_i > 300$ 微秒加工时，则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, 因此对阴极的轰击破坏作用大大超过电子对阳极的作用。

极性效应不仅与放电时间或脉冲宽度有关, 而且还与电极材料及单个脉冲能量等因素有关。

就提高加工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, 设其它因素不变的情况下, 随着脉冲宽度由短变长, 负极的蚀除量由小变大, 正极的蚀除量由大相应地变小, 极效应由“正”变“负”, 而当在中间某一过渡状态的脉宽时, 正、负极蚀除量将相等, 极性效应接近于零, 如图 1-6 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冲宽度。一般, 精加工, 选短脉宽采用正极性加工; 粗、中加工, 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的损耗。

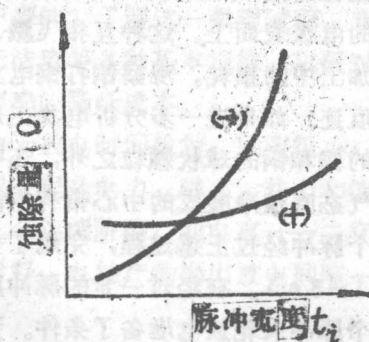


图 1-6 极性效应与脉宽对蚀除量的影响 (同种材料时)

二、影响电蚀量的主要因素

1. 电蚀量 $q(Q)$ 与脉冲能量 (W_p) 、脉冲频率 (f_p) 的关系

大量实践证明, 无论是阳极或阴极, 它的单个脉冲蚀除量 q 总是和该单个脉冲的能量 W_p 成正比, 即 $q \propto W_p$ 。而总的蚀除量 Q 即等于总的脉冲数 N 次蚀除量的总和。所以阳极和阴极单个脉冲的蚀除量 (q_a, q_k) 分别为:

$$\left. \begin{aligned} q_a &= K_a \cdot W_p \\ q_k &= K_k \cdot W_p \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中:

q_a ——阳极单个脉冲蚀除量;

q_k ——阴极单个脉冲蚀除量;

K_a, K_k ——为与电极材料、脉冲参数、工作液等有关的比例系数;

W_p ——单个脉冲能量。

阳极和阴极总的蚀除量分别为:

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= q_a \cdot N = K_a \cdot W_p \cdot N \\ Q_k &= q_k \cdot N = K_k \cdot W_p \cdot N \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中:

Q_a ——阳极总的蚀除量;

Q_k ——阴极总的蚀除量;

N ——总的脉冲次数。

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

式中 f_p ——脉冲频率(赫);
 t ——加工时间(分)。

在 t 时间内阳极和阴极总的蚀除量分别为

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= K_a \cdot W_s \cdot f_p \cdot t \\ Q_k &= K_k \cdot W_s \cdot f_p \cdot t \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

而阳极、阴极的蚀除速度 V_w 和 V_E 分别为

$$\left. \begin{aligned} V_w &= \frac{Q_a}{t} = K_a \cdot W_s \cdot f_p \\ V_E &= \frac{Q_k}{t} = K_k \cdot W_s \cdot f_p \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 V_w, V_E ——生产率或工具损耗率。

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

$$W_s = \int_0^{t_s} u_s(t) \cdot i_s(t) dt \approx \bar{u}_s \cdot \bar{i}_s \cdot t_s \quad (1-6)$$

式中 W_s ——由电源供给加工间隙的每个脉冲的放电能量(焦耳)(1焦耳=1伏·安·秒=1瓦·秒=0.24卡);

t_s ——放电时间(秒), 即介质击穿后间隙中通过放电电流的时间;

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

$i_s(t)$ ——放电电流(安), 即放电时流过间隙的瞬时电流;

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

$\bar{i}_s$ ——平均放电电流(安), 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20~25伏左右, 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

$$W_s = (20 \sim 25) \cdot \bar{i}_s \cdot t_s \text{ (焦耳)} \quad (1-7)$$

一般小孔精加工时, $\bar{i}_s \leq 1$ 安, $t_s \leq 10$ 微秒, 故 $W_s \leq 20 \times 1 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4}$ 焦耳; 粗加工时, $\bar{i}_s \geq 100$ 安, $t_s \geq 500$ 微秒, 故 $W_s \geq 20 \times 100 \times 500 \times 10^{-6} = 1$ 焦耳。

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_o 之和, 即

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

一般精加工时 $f_p \geq 5$ 万次/秒, 粗加工时 $f_p \leq 5$ 千次/秒。

由上述可知, 提高电蚀量的途径在于提高脉冲频率 f_p , 即压缩脉冲宽度 t_i , 减小脉冲间隔 t_o ; 增加单个脉冲能量 W_p , 即提高脉冲电压和电流; 设法提高系数 K_a 、 K_i , 也就是合理选用电极材料、脉冲参数、工作液成份及其循环方式等。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, 使表面光洁度降低等。

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 表示用铜电极, 单个脉冲能量 $W_p = 0.5$ 焦耳, 脉冲数 $N = 20000$ 的实验数据。

电蚀量和脉冲宽度的关系

表 1-1

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

从实验数据可以看出, 只有在某一脉冲延时蚀除量最高。因为时延过长, 由于传导而散失的热量较多, 蚀除量就降低; 时延过短, 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, 就要多消耗一部分热量, 如气化热等, 也会使蚀除量减少。图 1-7 为不同热学常数的材料出现蚀除量最大的最佳脉宽位置不同, t_i 是铜作工具电极打钢时的高效低耗最佳脉宽。

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 $\bar{V}$ 为

$$\bar{V} = \frac{Q}{C\rho(T_r - T_0) + \rho q_r} \quad (1-9)$$

式中 Q ——电极上脉冲放电区域集聚的热量;
 C ——热容量;
 ρ ——材料密度;
 T_r ——熔点;
 T_0 ——原始温度;
 q_r ——熔化潜热。

由此可见, 蚀除量与材料的热学物理常数有关, 而与硬度、强度、比重等性能关系不

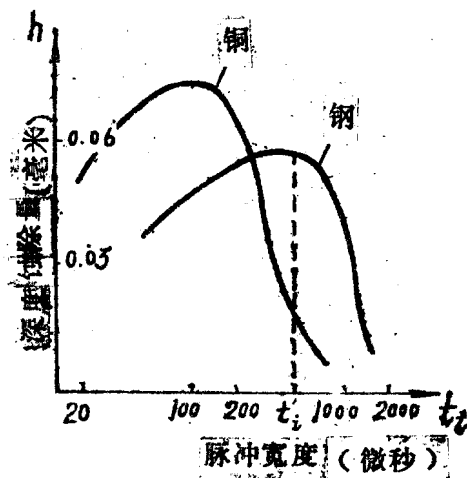


图 1-7 不同材料时脉宽与蚀除量的关系

大。所谓金属的热学常数是指熔点、沸点（气化点）、导热系数、比热、熔解热和气化热等，前三者影响较大。一般情况下，材料耐蚀性 K 可用热学常数来表示，即

$$K=C\rho\lambda T^3$$

(1-10)

表 1-2 为常用材料的热学物理常数。

热学物理常数	常用材料的热学物理常数*				
	材 料				
	铜	石 墨	钢	钨	铝
热容量 C 卡/(克·度)	0.094	0.4	0.166	0.037	0.24
密度 P 克/厘米³	8.9	2.2	7.9	19.3	2.54
导热系数 λ 卡/(厘米·秒·度)	0.92	0.117	0.08	0.36	0.49
热扩散系数 $a=\frac{\lambda}{C\rho}$	1.1	0.133	0.061	0.5	0.8
熔 点 T, °C	1083	3500	1527	3367	660
熔化潜热 q, 卡/克	43	—	50	38	92
沸 点 T, °C	2360	3700	2735	4830	2450
汽化潜热 q, 卡/克	858	11000	1590	810	2227

- * 1) 热容量（比热）——从原始温度到熔点，每 1 克温度升高 1 °C 所需热量；
2) 熔化潜热——从熔点开始，使金属熔化成液体时，每熔化 1 克所需热量；
3) 汽化潜热——使熔液蒸发成蒸汽时，每蒸汽 1 克所需热量。

钨和石墨耐蚀性高，是由于它们的熔点、沸点温度很高，且石墨的热容量又很大。铜的耐蚀性也比较高，是因为它的导热系数和扩散系数都很大。铝的导热系数虽比钢大，但因其熔点较低，所以它远比钢易腐蚀。显然，铜钨合金和铜石墨材料具有较高的耐蚀性。

式(1-9)和(1-10)基本是正确的，但并不适用于所有的金属和合金，因为耐蚀性还与材料在高温下的热学、力学和化学的稳定性有关，还与材料的微观结构有关。

目前，具有高耐蚀性的碳素石墨电极获得了广泛地应用，出现了许多低损耗的石墨材料。

高熔点化合物和复合材料具有很高的耐蚀性，如硼化物、碳化物、硅化物、铜钨合金、银钨合金、铜——石墨、碳化钨——钴——铜及碳化钨——钴——铜——镍等。

以铜为基体的合金材料最引人注目。如在铜中加入 1.5~10% 的钨或加入 4~6% 的二氧化钴或加入 1~1.5% 的石墨，都会提高耐蚀性。另外，在铜中加入 2~3% 的氮化硼，高温下氮化硼分解的蒸气有助于灭弧。在铜中加入锌或镉，放电过程中生成锌或镉的化合物覆盖

层,可以减少精加工时电极损耗等。

应当指出,材料的放电蚀除过程是十分复杂的,这不仅表现在材料的常温和高温下热学物理常数对耐蚀性的影响,而且还表现在两极材料之间,对能量分布和传递、电蚀产物的抛出等过程的相互影响。因此电极对的材料不仅影响电极损耗,而且影响加工速度等各项工艺指标,必须予以充分地重视。

4. 工作液等其它因素对蚀除量的影响

工作液介质是参与放电蚀除过程的重要因素,它的种类、成份和性质直接影响加工的工艺指标。

目前,多采用机油作工作液,粘度大,有利于压缩放电通道,使能量集中,加强蚀除效果。但放电产生的碳黑多,对排屑不利,多用于粗加工。中、精加工用煤油,因煤油粘度低,排屑条件好。寻找一种象水那样流动性好,不含碳、不燃烧、无色、无味、价廉的工作液介质是很有实用意义的。但水有绝缘强度低,易锈蚀机床等缺陷。

在电火花线切割加工中,采用去离子水或乳化液,亦得到了很好的工艺效果,获得了广泛的应用。

工作液的潜力很大,有待于进一步研究其作用机理,以获得适合于电火花加工的新工作液,以期大幅度提高加工工艺指标。

三、电火花加工生产速度及工具电极损耗速度

1. 加工速度 V_w : 单位时间的材料加工量,单位为毫米³/分。它是一个体积速度,穿孔速度 V_{wL} : 单位时间(分)内的穿孔深度。

根据前述公式,加工速度 V_w 为

$$V_w = \frac{Q_s}{t} = K_s \cdot W_s \cdot f_p \quad (1-11)$$

式中 Q_s ——工件在时间 t 内的蚀除量(毫米³);

W_s ——单个脉冲能量(焦耳);

t ——加工时间(分);

K_s ——与工件材料、脉冲参数、工作液成份有关的系数;

f_p ——脉冲频率(赫)。

由上式可知,提高生产速度的途径在于提高脉冲频率 f_p , 增加单个脉冲能量 W_s ; 设法提高系数 K_s 。

提高脉冲频率,靠压缩脉冲间隔和脉冲宽度,这是提高生产速度的有效途径。近年来高频脉冲发生器已有很大发展,最高脉冲频率可达10万赫以上。但提高脉冲频率也有一定限度,因频率过高,则脉冲间隔过短,会使工作液介质来不及“消电离”恢复绝缘而使电极间隙经常处于击穿导电状态,形成连续电弧放电,无法实现正常加工。

增加单个脉冲能量靠在脉冲频率不变的情况下,提高脉冲电压和加大脉冲电流,可以大大提高加工速度,这对粗、中加工很适用,而对精加工仍用大脉冲能量,使放电痕大而深,会降低表面光洁度。