

特 种 加 工

（新工艺新技术之一）

上海交通大学 610 教研组

一九七五年九月

《特种加工》是我校610和620专业的同学在学习了普通金属切削加工工艺之后进一步学习新工艺、新技术时使用的教材。

我们根据毛主席关于“课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁就简。”的教导，尽可能地结合典型工艺实践，将基础理论知识与专业知识有机地结合在一起，并且有重点地分叙各个章节。尽管如此，由于我们缺乏实践经验，又加上本门课程涉及的内容较广，所以教材仍然烦琐庞杂，这有待于我们今后在实践中，与广大工人老师傅和革命技术人员相结合，根据我国飞跃发展的“特种加工”实际，来总结和完善这本教材。

由于时间仓促，又加上水平有限，编写过程一定会有不少缺点和错误，请读者批评指正。

《电加工》小组

1975.9.

目 录

概述.....	1
第一章 电火花加工	
§ 1-1 电火花加工的基本原理.....	1-1
(一)电火花加工的原理.....	1-1
(二)电火花腐蚀的物理过程.....	1-3
(三)电蚀过程的极效应现象.....	1-6
(四)电火花加工机床的基本组成部分.....	1-8
§ 1-2 脉冲发生器.....	1-8
(一)脉冲发生器的要点及分类.....	1-8
(二)非独立弛张式脉冲发生器.....	1-10
(三)晶体管脉冲发生器.....	1-20
(四)可控硅脉冲发生器.....	1-29
(五)电子管和闸流管式高频脉冲发生器.....	1-38
§ 1-3 自动调整器.....	1-41
(一)概述.....	1-41
(二)自动调整器的基本环节.....	1-43
(三)伺服电机自动调整器.....	1-45
(四)电——液压自动调整器.....	1-49
(五)自动调整器的特性及其设计原则.....	1-53
§ 1-4 机床和工作液系统.....	1-58
(一)设计要点.....	1-58
(二)主轴头.....	1-60
(三)工作液系统.....	1-64
§ 1-5 电火花加工工艺.....	1-67
(一)电参数对工艺指标的影响.....	1-68
(二)影响加工稳定性的几个因素.....	1-73
(三)电极材料和电极设计.....	1-76
§ 1-6 电火花加工工艺的应用.....	1-81
(一)冲模电火花加工.....	1-81
(二)型腔模电火花加工.....	1-84

(三) 线电极切割工艺.....	1 — 85
(四) 电火花磨削及铰磨.....	1 — 87
(五) 小孔电火花加工.....	1 — 89

第二章 电化学加工

§ 2-1 电化学加工的基本原理.....	2 — 1
(一) 电化学加工原理及特点.....	2 — 1
(二) 电解过程的机理.....	2 — 3
(三) 电极反应.....	2 — 7
§ 2-2 电化学加工装置.....	2 — 9
(一) 电源装置.....	2 — 9
(二) 机床.....	2 — 10
(三) 电解液及其循环系统.....	2 — 11
§ 2-3 电化学加工工艺.....	2 — 14
(一) 影响生产率的因素.....	2 — 14
(二) 影响加工精度的因素.....	2 — 17
(三) 电解加工的表面质量.....	2 — 21
(四) 电解加工的阴极设计.....	2 — 22
§ 2-4 电化学加工工艺的应用.....	2 — 25
(一) 电化学加工工艺的应用.....	2 — 25
(二) 清洗和充气问题.....	2 — 28
§ 2-5 电解磨削.....	2 — 30
(一) 电解磨削的基本原理.....	2 — 30
(二) 电解磨削用的电解液.....	2 — 32
(三) 导电砂轮.....	2 — 33
(四) 电解磨削的应用.....	2 — 35

第三章 超声波加工

§ 3-1 超声波的物理基础	3-1
(一) 超声波的物理概念	3-1
(二) 超声波的物理特性	3-2
(三) 介质中的几种物理现象	3-5
§ 3-2 超声波加工的基本原理和特点	3-7
(一) 超声波加工的基本原理	3-7
(二) 超声波加工的特点	3-8
§ 3-3 超声波加工装置	3-9
(一) 高频发生器	3-9
(二) 床身	3-15
(三) 磨料工作液输送和排除系统	3-16
(四) 冷却系统	3-16
§ 3-4 超声波加工的声学部件	3-17
(一) 超声波的发生方法	3-18
(二) 声学部件	3-21
§ 3-5 超声波加工工艺及其应用	3-28
(一) 超声波加工的生产率	3-28
(二) 加工精度、工具磨损及表面质量	3-33
(三) 超声波加工工艺的应用	3-36

第四章 激光加工

§ 4-1 激光的物理基础	4-2
(一) 激光的物理概念	4-2
(二) 激光的特性	4-4
(三) 激光的产生	4-8
§ 4-2 激光加工基本原理及特点	4-10
(一) 激光加工原理	4-10
(二) 激光加工特点	4-11

(三)激光加工装置的组成部份.....	4-12
§ 4-3 激光器.....	4-13
(一)激光器的种类.....	4-13
(二)激光器的基本结构.....	4-16
§ 4-4 电源和光学、机械系统.....	4-20
(一)激光器电源.....	4-20
(二)光学系统.....	4-24
(三)机械系统.....	4-27
§ 4-5 激光加工工艺及其应用.....	4-28
(一)激光照射面的能量分布.....	4-28
(二)影响激光加工的主要因素.....	4-30
(三)激光加工工艺的应用.....	4-34

近几十年来，随着人们进行阶级斗争，生产斗争和科学实验的需要，很多国防、工业部门和尖端科学技术中的产品都向高精度、高速度、高温和高压等方面发展，具有各种特殊物理机械性能的新型材料不断涌现，各种结构和工艺要求的零件越来越多，加工已成了当前薄弱环节。面临这种现实，人们除了进一步完善现有的机械加工方法外，还借助于现代科学技术的成就，创造了崭新的有别于金属切削加工的所谓“特种加工法”。

众所周知，历史悠久的机械切削加工的实质是依靠刀具（工具）和工件材料相接触，对被加工表面施以机械力和能量，使之分离，以达到加工目的。因此，机械加工必须具备下列两个最基本条件。

(1) 加工使用的刀具（工具）材料的硬度必须大于工件材料的硬度。虽然近几十年来不断出现新的刀具材料（例如硬质合金刀具等），但是越来越多的零件的材料硬度，已经接近甚至超过一般刀具材料的硬度，导致加工生产率越来越低，甚至无法加工。

(2) 依靠作用在刀具（工具）上的切削力使工件材料分离变形，这就不只是要求工具材料要有很高的硬度，而且还要求有一定的强度和刚度，同时要设法使切削力作用于加工部位上，这样就限制了诸如小孔、深孔、窄缝、复杂型孔和低刚度薄壁零件的加工。由于工件——刀具——夹具——机床系统中存在有很大的切削力，因此，对机床、夹具部件的强度和刚度都有很高的要求，既增大了它们的体积和重量，又不可避免地会影响加工精度。

事物是在不断发展的，矛盾可以转化，物极必反。当我们用高硬度的工具仍无法加工时，就探索用软的工具加工硬的工件。这种方法不是用机械能，而是用电能、化学能、光能等来进行加工，它有别于现有的金属切削加工工艺，而称之为“特种加工工艺”。虽然，对于“特种加工工艺”还没有确切的定义，但是它们都具有下列两个共同特点：

(1) 加工用的工具硬度不必大于被加工材料的硬度；

(2) 加工过程中工具和工件之间不存在着显著的机械切削力。

从目前的生产实际来看，特种加工主要是电加工，即直接利用电能的各种效应进行材料加工，包括电火花加工（也称电脉冲加工）、电子束加工、离子束加工、等离子体射流加工、液中放电成形加工、阳极机械加工、电解加工等。除电加工外，还有超声波加工、激光加工（莱塞加工）、爆炸成型、液体磨料抛光等等也属特种加工。

由于特种加工富有一系列的优异特点，它具有金属切削加工方法所难有的加工能力，为各种新型材料的发展和应用开辟了途径，也为机械产品提高设计和制造水平提供了有利条件，因而，它从出现到现在，虽然只有三十年的历史，但已经广泛地应用于各国的军工、航空制造、电机电器、仪器仪表、汽车拖拉机等制造工业，对于发展少、无切削工艺起了一定的推动作用，已经成为机械制造中不可缺少的组成部分。

我国人民遵照伟大领袖毛主席“独立自主，自力更生”以及“中国人民有志气、有能力，一定要在不远的将来赶上和超过世界先进水平”教导，五十年代就开始搞电加工。一九五八年大跃进中，上海等地区开始采用电火花加工冲模；一九六三年起又开始试验研究电解加工等新工艺。在短短的二十年里，我国特种加工技术和专业队伍，从无到有，从小到大，发展速度很快。根据社会主义建设的需要，设计和制造了大量特种加工机床设备，开展了不少项目的试验研究，使特种加工迅速应用于国防、民用的许多工业部门，对于提高我国机械工业水平起了一定的作用，并为支援兄弟和友好国家作出了贡献。

就目前情况来看，我国特种加工的工艺水平同国外先进水平相比，差距并不大，而且在某些方面，结合我国实际情况和需要，还有所创新。但是，我国特种加工的应用面还较窄，远不能满足生产的需要，在加工精度、稳定性等方面还存在一定问题，特别在机械装置、脉冲电源、自动控制等方面，品种不全，质量、效率和稳定性都有赖于进一步提高，有些新技术还处于研制探索阶段，有的项目还是空白，机理方面的研究还急待加强。为此，我们必须以阶级斗争为纲，在毛主席无产阶级革命路线指引下，更好发挥各种“三结合”作用，认真总结经验，不断提高特种加工工艺水平，扩大应用范围，发展机床新品

种，努力提高产品质量，大力做好技术力量培训工作，为社会主义建设和支援兄弟和友好国家作出新贡献。

当前，生产中应用最广的是电火花加工，所以，我们将重点讨论电火花加工工艺。此外，对电解加工、超声波加工、激光加工也作一些介绍。

各种主要的特种加工方法的工艺指标见下表。

电火花加工方法是二十世纪四十年代开始研究和应用到生产中的。它是使工件和工具之间脉冲性地火花放电，靠火花局部、瞬时产生的高温把金属蚀除下来，达到加工的目的，所以叫作“电火花加工”。因为是脉冲性放电，所以在某些场合也叫做“电脉冲加工”，也有统称之为“电蚀加工”的。

由于电火花加工是基于火花放电过程，它能“以柔克刚”，用软的工具来加工任何硬度的金属材料；它还因为加工过程没有明显的切削力而能加工许多不能承受机械力的小孔、薄壁、窄槽等金属零件，各种型孔、立体曲面、复杂形状零件，也能用成型电极一次加工，其生产率不仅很高，而且能保证足够的精度和光洁度。正是这些特有的优点，当1943年出现第一台电火花加工装置后，就很受人们注意和重视，在不到三十年的时间内，就发展得十分成熟、应用非常普遍。就日本而言，电火花加工机床年产量约有1200台。我国广大工人和革命知识分子遵照伟大领袖毛主席“我们必须打破常规，尽量采用先进技术”的教导，从五十年代起，就开始研究和使用了这一新技术。特别是在文化大革命期间，制成了带有高压附加回路的晶体管电火花机床，可控硅电脉冲机床，数字控制线电极切割机床及光电跟踪线电极切割机床，迅速赶上了世界先进水平，在某些领域内如快速走丝、光电仿形、“钢打钢”冲模加工工艺等方面还有所创新。目前，电火花加工在我国已广泛地用来加工淬火钢、硬度合金零件，冲压模具以及特殊复杂表面和低刚度零件，如成型孔、弯孔、小孔、窄缝等。

§ 1—1 电火花加工的基本原理

(一) 电火花加工的原理

金属电火花加工的原理基于电极间脉冲放电时的电腐蚀现象。电腐蚀现象早在一百多年前就被人们发现了，例如在插头和电气开关触头闭合或断开时，往往出现兰白色的电火花而把触头部份烧毛、腐蚀成粗糙不平的小凸起或凹坑以至损坏。长期以来电腐蚀一直是一种有

害现象，人们不断地研究它腐蚀原因，并设法减少和避免它。

但是，任何事物都是一分为二的，在一定条件下，坏的东西也可以引出好的结果。只要了解和掌握其规律，创造条件，就可以把坏事转化为好事，把有害的电腐蚀现象用来为生产服务。研究表明，电火花腐蚀的主要原因是电火花放电时，火花通道中瞬时产生大量的热，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。要使电火花腐蚀原理用于尺寸加工，必须创造条件，解决下列问题：

(1)必须有足够的火花放电强度，亦即有很大的电流密度，否则金属只是发热而不能熔化和气化。

(2)火花放电的时间必须极短，必须是间歇性的、脉冲性的瞬时放电，例如图 1—1 的电流波形。一般每一脉冲持续时间应小于 0.001 秒才能使热量来不及传导扩散到其余部份，从而能局部地蚀除金属，否则，如果象电弧持续放电那样，必然会使整个工件发热，表面“烧糊”，只能用于切割或电焊，无法用于满足一定精度要求的尺寸加工。

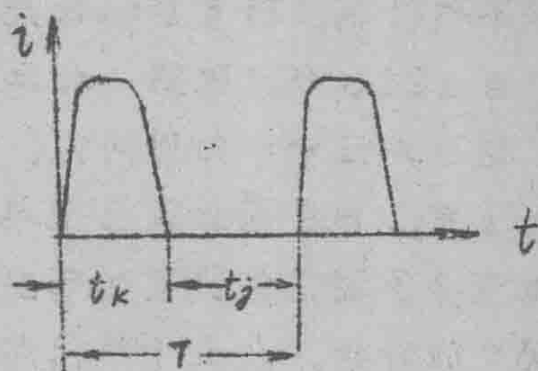


图 1—1 脉冲波形

(3)必须能把电火花加工后的金属小屑等电蚀产物从电极间隙中排除出去，否则加工过程无法正常连续进行。

总而言之，火花放电必须在瞬间把密度很高的能量脉冲式地送到尺寸极小的被加工部位，而在各放电之间的一定停歇时间内，电极间的介质绝缘性能必须来得及恢复，使其不转变为电弧放电，只有这样，才能实现电蚀加工。

以上这些问题的综合解决，最初是通过下列办法实现的：

(1)周期性地利用电容器缓慢充电，快速放电，把积蓄起来的电能，在瞬时之间在电极间隙内放出，亦即把普通电流转换为脉冲电流（这样的装置叫作脉冲发生器）。

(2)使火花放电过程在不导电的液体中（如煤油、机油）进行，在这种绝缘介质作用下，产生火花击穿（击穿电位可达 36 千伏/厘米以上）和脉冲放电。液体介质还有助于压缩放电通道，使通道能更加集中。

此外，在脉冲放电作用下，由于液体介质的急剧蒸发和惯性效果，则产生局部高压及负压的冲击波，有利于把电蚀产物从加工区域中排除。

图1—2(a)是最简单的电火花加工装置原理图。脉冲发生器1利用电容的充放电，把直流电转变为脉冲电流。电流和电能经过电阻R逐渐充集储存在电容器C上，电容器C两端电压逐渐升高，当它升高到足以使电极工具2和工件3之间的间隙产生击穿火花放电时，电容器上储存的绝大部分能量瞬时之间在电极间隙内放出，在放电通道中心达到很高的电流密度，产生极高的温度（10000℃以上），足以使局部表面的金属熔化和气化，在工作液冲击波的同时作用下，它将成为很细的小颗粒而抛入工作液4（煤油）中，蚀除成为图1—2(b)所示的凹坑。电容器C上的电能瞬时放光后，电压也就降低到接近于零，工具和工件间的介质立即恢复绝缘状态，这时又经过电阻重新充电，如此循环不止。图1—2(c)为电极工具和工件间间隙放大图，由于金属表面微凸起间此起彼伏地进行火花放电的结果，整个表面将由无数个小凹坑所组成，而电极工具的轮廓形状便复印在工件上。

(二) 电火花腐蚀的物理过程

电火花放电时，电极表面的金属究竟是怎样被蚀除下来的？了解这一物理过程，有助于掌握电火花加工工艺中生产率、工具损耗等各种基本规律，

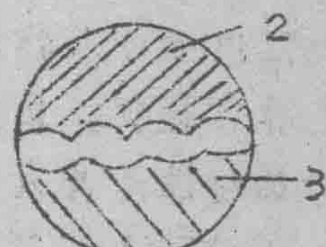
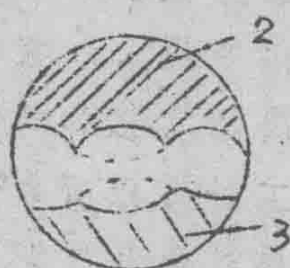
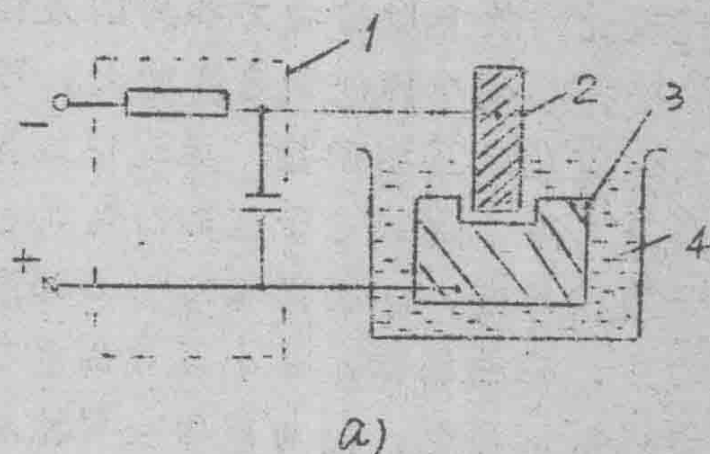


图1—2 电火花加工原理图

- 1—脉冲发生器
- 2—电极工具
- 3—工件
- 4—工作液

才能对脉冲电流、机床设备等提出合理的要求。

电火花腐蚀的物理过程，即电极间隙的电蚀过程，它的机理是相当复杂的，并随放电条件不同而有所差异，所以人们对它的认识至今尚未完成，因而也有各种不同的解释。根据大量实验资料的分析来看，电火花腐蚀的物理过程是电磁学、热力学、流体动力学等综合作用的过程。这一过程大致可以分为以下几个阶段：电离、放电、热熔、抛出金属等。

电极的微观表面是凹凸不平的，离得最近的尖端处电场强度最高，其间的工作液绝缘介质最先电离，即分解成负电子和正离子而被击穿，形成火花放电通道。在通道内负电子高速奔向阳极，正离子奔向阴极，形成电流通路。这时电极间隙的电阻从绝缘状态的几兆欧降低到几分之一欧姆，所通过的电流亦相应地由零增大到相当大的数值。又由于放电通道受到放电时磁场力和周围液体介质的压缩，所以放电通道的断面很小，通道中的电流密度极大，可达 $10^5 \sim 10^6$ 安/厘米²。电子、离子高速流动时互相碰撞，通道中放出大量的热，同时阳极金属表面（一般是工件）受到电子流的高速冲击，阴极表面（一般是工具）受到离子流的冲击，电极间隙内沿通道形成一个瞬时热源（可达 10000°C 左右），在热源作用极小区域的电极表面，很快被加热到熔点、沸点直至气化的温度，使局部的金属材料熔化和气化蒸发。至于通道周围的工作液（一般为煤油之类的碳氢化合物），除一部份气化之外，另一部份被瞬时高温分解为碳粒和 H_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_nH_{2n} 等气体而游离出来（工作液很快变黑，电极间冒出小气泡）。由于这一加热过程非常短促，因此金属的熔化和气化以及工作液介质的气化都具有爆炸的特性（电火花加工时可以听到噼啪声），爆炸力把熔化和气化了金属抛入附近的工作液介质里面而冷却。当它凝固成固体时，由于表面张力和内聚力的作用，使它具有最小的表面积，因而凝固成细小的圆球颗粒（直径约 $0.1\mu \sim 500\mu$ ，因脉冲能量而异），而电极表面则形成一个微小的凹坑。

事实上金属的抛出过程远比上面所说的要复杂。用超高速摄影研究的结果表明：火花放电时，在热源作用下通道周围迅速形成气泡，

它是由金属蒸气、工作液蒸气和分解出的气体组成的，气泡的压力随着脉冲延时而迅速增高，远高于大气压力（瞬时约为5—10气压），所以气泡迅速向外扩张。当脉冲电流停止后，虽然热源消失了，压力也不再升高，但由于气泡外围扩张运动着的液体具有惯性，气泡体积仍继续扩张增大，同时气泡边缘处的蒸气冷却凝固，以致使气泡内的压力大大降低，因而使有些熔化了了的金属额外地在低压下沸腾蒸发为气体。气泡的压力甚至可以大大低于大气压力，形成局部真空，致使高压时溶解在金属液体中的气体伴随气化金属从小坑中喷爆出来，进而促使已熔的液态金属从电极表面抛出。研究发现，大部分液体金属是在脉冲电流结束后抛出的。

实际上熔化和气化了了的金属在抛离电极表面时，向四处乱射飞溅，除绝大部分抛入工作液中缩凝成球状小颗粒外，有一小部分飞溅、粘附、复盖在相对的电极端面上去了。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，这在粗加工时尤为显著。如果进一步分析其电加工后的产物，在金相显微镜下可以看到除了游离碳、钢和铜的球状颗粒之外，还有一些钢包铜、铜包钢的颗粒。这种互相飞溅复盖的现象，在某些条件下可用以减少或补偿电极工具在加工中的损耗。

研究结果表明，一般每个脉冲所抛出的金属总量中，气体状态的约占15—30%，其余的都是在液体状态下抛出的。当单个脉冲能量一定时，脉冲持续时间愈短，热量就愈集中，金属以气态抛出的百分比也愈大。当然具体的数字和单个脉冲的能量、金属的熔点、沸点、导热系数、溶解热、气化热等热学常数有关。

单个脉冲经过上述的物理过程，完成了一次火花放电，在电极表面留下了一个小凹穴，这个小凹穴是十分微小的，但无数个脉冲放电蚀除量的积累，就使工件加工出相似于工具电极形状的型腔。

此时，人们又非常关心加工过程中的无数个脉冲放电是如何进行的。许多实验和生产实际证明，每一个脉冲放电，绝不是简单的在电极距离最近的二点间进行，而是有一个复杂的连续过程。

在加工过程中，首先在二电极离得最近的尖端处产生放电，由于放电形成的加工屑和工作液的热分解产生的碳黑（焦油成份）等使实

际间隙变小；更由于放电部份工作液的绝缘强度降低，就使放电容易在放电点附近的一个区域内发生。另一方面，没有放电的部份，工作液比较干净，因而绝缘强度较高，不易产生放电。这样，致使放电发生不均匀，尽管其他区域二电极间距离相对小一点，但放电仍将在已经放电点的附近继续进行，这类似一种正反馈的作用。但加工到某一程度，间隙的距离超过能击穿放电的极限时，放电即自行停止，而转移到另外一个区域内进行。从这里我们可以清楚地认识到，被加工过的表面所能看到的小凹坑，是这样连续过程的无数个脉冲作用结果。而单个脉冲所能蚀除的小凹坑体积，远比电极表面所见的小凹坑小得多。同时许多已经蚀除下来但尚未散开的金属微粒，往往因为处于放电通道高温作用下又从新粘熔成较大的颗粒，它的体积远比单个脉冲作用时飞溅出的金属微粒要大。

(三)电蚀过程的极效应现象

火花放电过程中，电极的阳极和阴极表面分别受到电子和离子的轰击以及瞬时热源的作用，因此它们都会同时遭到电腐蚀。但是“矛盾着的两方面中，必有一方面是主要，他方面是次要的”。因为阳极和阴极表面所获得的能量不一样，蚀除量也就不一样（即使是电极材料相同）。由于电子的质量惯性小，加速度和速度大，所以在脉冲放电的前阶段，电子轰击大于离子轰击。在用持续时间较短的脉冲加工时，阳极的蚀除速度大于阴极，此时工件应接阳极，工具接阴极。反之用较长的脉冲加工时，条件改变了，矛盾的主要方面也转化了，蚀除速度则是阴极大于阳极，这时，工件应接阴极，工具接阳极。这是因为随着脉冲延时放电时间的加长，质量惯性较大的正离子也逐渐获得了较大的速度。正是由于它质量较大，因此阴极的轰击破坏作用也就显著。

电加工时两极蚀除速度不同的现象叫做“极效应”。一般习惯于当阳极蚀除速度大于阴极时的极效应称作“正”的，反之称作“负”的。

从提高生产率和减少工具损耗的观点来看，极效应愈显著愈好。当用交变的脉冲电流加工时，单脉冲的极效应便相互抵消，总的极效应便为零。因此，应尽可能采用单向直流脉冲电流进行电火花加工，

这就对电加工所用的脉冲发生器提出了要求。

有人曾对极效应问题，进行过许多试验，得出图1—3所示的结果，试验的条件是：电极为直径1吋的石墨，试件为不淬火的钢板，中间冲油。这一图表说明：接正极的工具电极，其损耗随脉宽增加而

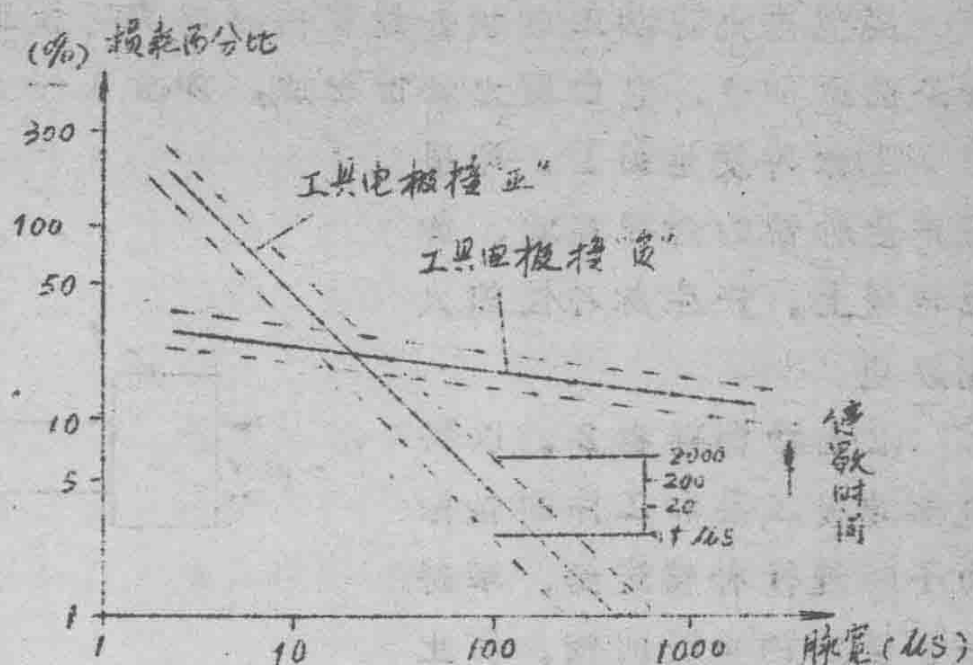


图1—3 电极损耗与脉宽、停歇时间关系

减少，当脉宽超过400微秒后损耗将小于1%。若把极性倒过来，即工具电极接负极，损耗就难于低于12%。（与电极材料有关），但在脉宽小于20微秒后，损耗将比电极接正极时为小。所以，对于粗加工，采用长脉冲，工具电极接“正”，损耗就低；而精加工，采用短脉冲，电极接“负”，损耗将大大低于电极接“正”时的数值。用铜电极试验所得数据作出的类似图表，可以得一个同样（虽然并不那么显著）的结论。

当工具和工件的材料不同时，仍有极效应现象，不过这时变得复杂化了，因为不同金属的熔点、沸点、导热、导电系数等都不一样。

电火花加工过程中，必须注意防止电弧放电。电弧放电不是火花放电，而是稳定的连续放电过程。因为电弧放电时与短脉冲的极效应相反，增加了工具电极的损耗和降低了生产率。而且电弧产生的热量有足够的时间来得及向四处传递，会使工件发热，表面烧蚀，大大降低加工精度和表面质量，甚至使工件报废。

引起电弧放电的原因是：电极工具和工件间隙过小或电极间电压过高（相对于该种电极间隙而言），使工作液介质经常处于电离击穿状态，引起电弧放电。此外，脉冲频率过高，脉冲间歇太小，以致工