

放电加工理论及应用

杨建新 编著

冶金工业出版社

放电加工理论及应用

杨建新 编著

冶金工业出版社

(京)新登字036号

内 容 提 要

本书详细地介绍了放电加工的基本理论、放电加工基本工艺装备、放电加工机械、电器常见的故障及其消除方法和以大量加工实例而归纳的放电加工编程技术等。

本书可供从事放电加工工作的工人和技术人员阅读，也可作为高校有关专业师生的教学参考书。

放电加工理论及应用

靳建新 编著

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街崇文门北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 10 字数 264 千字

1992年 12 月第一版 1992年 12 月第一次印刷

印数00,001~1,200册

ISBN 7-5024-0993-9

TG·140 定价10.00元

序

放电加工已成为机械加工领域中不可替代的加工手段，正发挥着日益重要的作用。随着放电加工领域的不断扩展和从事放电加工工作的人员队伍的迅速扩大，迫切需要出版一些既具有一定理论水平又具有一定实用价值的参考书。这也是作者编写本书的宗旨。

本书的重点是：放电加工工艺及应用技术和放电加工的编程范例及技术。读者可以从中找到对实际加工过程中经常碰到而又难以解决的一些问题的详细阐述。本书也力求让读者对放电加工技术有一个全面的了解，对放电加工的起源、现状以及发展趋势、放电加工的基本理论、放电加工的基本工艺设备、常见问题的处理方法等都有系统的论述。

著名电加工专家蔡献同志在繁忙的工作之余仔细审阅了全稿，提出了许多宝贵意见，使手稿质量进一步提高。湖北第二汽车制造厂领导及科委的部分专家也给予了充分的肯定和大力的帮助，在此特致谢意。

作者诚恳地希望读者对书中的不足之处提出批评指正。

目 录

1 放电加工的基本原理	1
1.1 放电加工概述	1
1.2 放电加工的原理和机理	2
1.3 放电加工中的一些基本规律	7
1.4 特种加工的种类、用途、技术经济指标	19
2 放电加工的基本设备	23
2.1 放电加工的脉冲电源系统	23
2.2 放电加工的自动进给机构和自动调节 系统	44
2.3 放电加工机床及工作液系统	55
3 放电加工工艺及应用	69
3.1 冲模放电加工法	69
3.2 型腔模放电加工法	72
3.3 放电磨削、镗磨和同步回转加工法	75
3.4 放电刻字、打印法	76
3.5 放电加工方法的应用范围	76
4 放电加工的编程范例及技术	78
4.1 人工编程技术	79
4.2 自动编程技术	240
5 放电加工机床常见故障与排除方法	259

5.1	输入及运算系统的故障与排除方法·····	270
5.2	工作电极及高频电源系统的故障与 消除方法 ·····	301
5.3	加工控制及电气系统的故障与排除方法·····	306

1 放电加工的基本原理

1.1 放电加工概述

放电加工方法是在20世纪40年代开始研究和逐步应用到生产中来的，它是使工件和工具之间产生脉冲性的火花放电、靠局部放电瞬时产生的高温把金属蚀除下来的一种特殊的机械加工方法。

从1943年出现的第一台放电加工装置起，最初都是把利用电阻电容充、放电的所谓 RC 线路作为脉冲发生器，电极工具由丝杠螺母传动，靠手动进给和调节，稍后则利用电磁线圈的吸引力，实现了“悬浮式主轴”简单的自动进给和调节系统。即使是这样的简单装置，效率也不高，但已能用它来完成许多普通机械加工很难或无法完成的工序，例如在淬过火的钢上或其他难加工的材料上加工各种四方、六角等型孔，窄缝，在喷油嘴上打 0.1mm 以下的小孔，下料、截割，去除折断在工件中的钻头、丝锥等。

50年代，脉冲电源由 RC 线路改进为 RLC 等线路，出现了脉冲发电机等所谓长脉冲电源，稍后又出现了大功率电子管、闸流管等高频脉冲电源，电极工具进给也广泛地采用了交、直流伺服电机等自动进给和调节系统，这样，随着加工精度和效率的提高，放电加工的应用范围大为扩大，尤其在各类冲压模具制造中发挥了很大的作用。

60年代初，出现了靠模仿型线电极切割工艺和设备，以后又发展出光电跟踪、数字程序控制线切割工艺设备，为模具和产品生产提供了新的工艺途径。放电加工的应用范围迅速扩大到电

子、电器、仪表等工业生产中去。

60年代中期，随着电子技术的发展，出现了晶体管及可控硅脉冲电源，扩展了粗、精加工的范围。在机床的自动进给方面，广泛地采用了液压进给和喷嘴挡板机电转换器自动调节系统，大大提高了加工灵敏度和稳定性。

进入70年代后，脉冲电源方面又有了新的发展，出现了附加有高压回路的晶体管脉冲电源（复合回路），每一工作脉冲之初，用高电压、小电流的附加脉冲使放电间隙击穿，可以大大减少空载脉冲数，提高生产率和加工稳定性。在此基础上，附加一组“试探脉冲”，用以检测放电间隙的状态（开路、短路、正常），发展成为等脉宽、等能量、等间歇、等粗糙度等能自寻最佳点（保持最高生产率和稳定性）的初步的适应控制系统。现在放电加工正在向着大型、精密、高效、自动化等方面发展。

放电加工技术这一崭新的领域为什么能如此迅速的发展，成为机械加工领域中一种不可替代的加工方法呢？这是因为：

第一，它能以柔克刚，用较软的工具来加工较硬的工作材料，即加工一些常规机械加工难以胜任的金属材料包括淬火钢、不锈钢、耐热合金等。

第二，在加工过程中没有显著的“切削力”。所以许多小孔、深孔、弯孔、窄缝、薄壁弹性零件都可以不致因工具或工件刚度太低而无法加工；各种型孔、立体曲面及一些复杂形状的表面都可以采用成型电极一次加工；不必担心同时加工面积过大，切削力过大而引起的切削变形。

1.2 放电加工的原理和机理

1.2.1 放电加工的原理

金属放电加工的原理基于电极间脉冲放电时的电腐蚀现象。而电腐蚀现象早在一百多年前就被人们发现了，例如在插头或电器开关触点闭合或断开时，往往出现蓝白色的电火花而把接触部分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

一直是一种有害的现象，人们不断研究电腐蚀的原因，并设法变害为利，造福于人类。

放电加工方法的发明人——前苏联著名的科学家 B. P. 拉扎连柯教授首次将电腐蚀现象成功地运用到生产领域，获得了巨大的成功。

当今，世界各工业国家都无一例外地越来越广泛地采用这种新方法，并且成为现代工业不可缺少的有效加工手段，几乎所有模具制造都离不开它。采用放电加工方法生产的零件，其质量可从数毫克到数十吨，而制造精度已跃入微米级行列，表面粗糙度可达到 $Ra0.012$ 。

可以相信，随着人们对电的本质过程的深入认识，随着不断引用现代化科学技术新成就，这一方法必将日臻完善和迅速发展。

而放电腐蚀的主要原因是放电加工时，放电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。要使放电腐蚀原理用于尺寸加工，必须要有一定的条件，需解决下列问题：

1) 必须有足够的放电强度，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) 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 $0.001s$ 才能使热量来不及传导扩散到其余部分，从而能局部地蚀除金属，否则，就会像电弧持续放电那样，使整个工件发热，表面“烧糊”，只能用于切割和电焊，无法用于尺寸加工。

3) 必须能把放电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。

以上问题的综合解决，最初是通过下列办法实现的：

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

2) 使放电过程在不导电的液体(如煤油、机油)中进行,以利抛出腐蚀下来的产物。

图1-2a是最简单的放电加工装置原理图。脉冲发生器1利用电容的充电放电,把直流电转变成脉冲电流。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放电时,电容器上储存的绝大部分能量在电极间隙内瞬时放出,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,成为很细的小颗粒而抛入工作液4中(煤油),蚀除成为图1-2b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,工具和工件间立即恢复绝缘状态,这时又经过电阻重新充电,如此循环往复不已。图1-2c为电极工具和工件间间隙放大图,由于金属表面的微凸起点此起彼

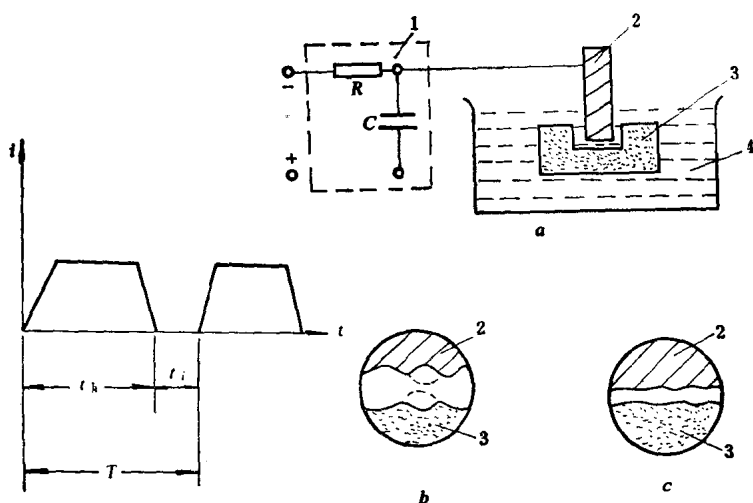


图 1-1 脉冲波形

t_k —脉冲延时或脉冲宽

度; t_i —脉冲间歇;

T —脉冲周期

图 1-2 放电加工原理图

a —简单装配图; b —蚀除后的凹坑; c —间

隙放大图; 1—脉冲发生器; 2—电极工具;

3—工件; 4—工作液

落的火花放电，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。从而形成机械零件的加工方法。

1.2.2 放电加工的机理——放电加工的微观过程

放电加工时，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，有助于掌握放电加工工艺中生产率、工具损耗等各种基本规律，并能对脉冲电源、机床设备等提出合理的要求。

由于放电时间很短、间隙很小，所以放电加工的机理相当复杂。人们对各种测量仪器和实验手段对放电加工的物理本质进行了多方面的研究，从大量的实验数据和理论分析看来，放电加工的微观过程需要用电磁学、热力学、流体动力学的原理来综合分析。这一过程大致可分为以下几个连续的阶段：电离、放电、热熔化、抛出金属。

电极的微观表面是凹凸不平的，离的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个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，通道中间电流密度极大，达到 $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ 。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 $5000^\circ\text{C} \sim 10000^\circ\text{C}$ ），在热源作用区的电极表面，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），除一部分气化之外，另一部分被瞬时高温分解为碳粒和氢气 H_2 、碳氢化合物 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（放电加工时可以听到噼啪声），爆炸力把熔化和气化了了的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，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 $0.1\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ ，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。超高速摄影研究的结果表明：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，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，所以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，以致于气泡内的压力逐渐降低，因而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降低到低于大气压力，形成局部真空，高压时溶解在金属液体中的气体也在低压下分解出来，进而促使金属从电极表面抛出。研究结果表明，大部分液态金属是在脉冲电源结束后抛出的。

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收缩成球状小颗粒外，有一小部分飞溅、附着、覆盖在相对的电极表面上去了。观察铜打钢放电加工后的电极表面，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。如果进一步分析其放电加工后的产物，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。在某些条件下这种互相飞溅覆盖的现象的产物，可以用来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 $15\sim 40\%$ ，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。当然具体的数字与单个脉冲的能量、金属的熔点、沸点、导热系数、熔解热、气化热等热学常数有关。

1.3 放电加工中的一些基本规律

1.3.1 电蚀过程的极效应现象

放电加工过程中, 电极的阳极和阴极表面分别受到瞬时热源的作用以及电子和离子的轰击, 因此它们同时都会遭到电腐蚀。但阳极和阴极表面所获得的能量不一样, 故蚀除量也是不一样的 (即使是电极材料相同)。

放电加工时两极蚀除速度不同的现象叫做“极效应”(严格而言是指电极材料相同时)。一般习惯于把阳极蚀除速度大于阴极时的极效应称作“正”的, 亦称“正极性”, 反之称作“负”的, 或称“负极性”。

产生极效应现象的原因在于: 通道中电离放电时, 由于负电子的质量惯性较小, 容易获得加速度和速度, 而正离子的质量及惯性较大, 加速度较低, 起动较慢, 所以在脉冲放电的前阶段, 负电子对阳极的轰击多于正离子对阴极的轰击, 因此在用持续时间较短 (例如小于 $50\mu\text{s}$) 的脉冲加工时, 阳极的蚀除速度将大于阴极, 此时工件应接阳极, 工具应接阴极, 即采用“正极性”加工。反之用较长的脉冲 (脉冲延时大于 $300\mu\text{s}$) 加工时, 例如用脉冲发电机或低频可控硅脉冲电源时, 则阴极的蚀除速度大于阳极, 条件改变了, 此时工件应接阴极, 工具接阳极, 即按“负极性”加工。这是因为随着脉冲延时放电时间的加长, 质量和惯性较大的正离子也逐渐获得了加速, 正是由于它质量较大, 因此对阴极的轰击破坏作用也就显著。

从提高加工生产率和减少工具损耗的角度来看, 极效应愈显著愈好。当用交变的脉冲电流加工时, 单个脉冲的极效应便互相抵消, 总的极效应便为零, 增加了工具的损耗。因此一般都采用单向、直流脉冲电流进行放电加工, 或者用阻尼二极管把负半波切除消耗掉, 这是对放电加工用的脉冲发生器提出的基本要求。

如前所述, 在其他条件不变的情况下, 随着脉冲延时的由短变长, 极效应将由“正”变“负”。而当在某中间过渡状态的

脉冲延时时, 极效应将接近于零。从减少工具损耗的观点而言, 在实际操作时最好避免选用这样的工艺和电参数。

当电极工具和工件的材料不同时, 仍然有极效应现象, 不过此时变的复杂化了, 因为不同金属的熔点、沸点和导热系数等都不一样。

1.3.2 影响电蚀量的主要因素

1.3.2.1 电蚀量和脉冲能量、脉冲频率

实践证明, 无论阳极或阴极, 它的单个脉冲蚀除量 q 总是和该单个脉冲的能量 W_m 成正比; 而总的蚀除量 Q 即等于总的脉冲数 N 次蚀除量的总和; 至于阳极或阴极的蚀除速度 r 则为单位时间内的蚀除量, 即:

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

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= K_a W_m N = K_a W_m f t \\ Q_k &= K_k W_m N = K_k W_m f t \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} r_a &= Q_a / t = K_a W_m N / t = K_a W_m f \\ r_k &= Q_k / t = K_k W_m N / t = K_k W_m f \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 q_a, q_k ——阳极或阴极的单个脉冲蚀除量;

Q_a, Q_k ——阳极或阴极的总蚀除量;

r_a, r_k ——阳极或阴极的蚀除速度, 亦即生产率或工具损耗率;

W_m ——单个脉冲的能量;

N ——脉冲总数;

f ——脉冲频率;

t ——加工时间;

K_a, K_k ——与电极材料、脉冲参数、工作液等有关的比例系数。

而无论在正极或负极上, 都存在着单个脉冲的蚀除量与单个脉冲能量 W_m 大致成比例的关系。单个脉冲能量为:

$$W_e = \int_0^{t_e} u_e(t) i_e(t) dt$$

$$\approx \overline{u_e} \overline{i_e} \overline{t_e} \quad (1-4)$$

式中 W_m ——单个脉冲能量 (J);
 t_e ——放电时间(s);
 u_e ——间隙瞬时放电电压(V);
 i_e ——间隙瞬时放电电流(A);
 $\overline{u_e}$ ——平均放电电压(V);
 $\overline{i_e}$ ——平均放电电流(A)。

由于放电间隙的负阻特性, 击穿后的放电电压(即维持电压)的变化很小, 几乎为一与电极材料及工作液种类有关的常值, 如在煤油中用紫铜加工钢时的间隙瞬时放电电压为20~25V, 用石墨加工钢时为30~35V。所以, 当电极对材料和工作液种类确定后, 单个脉冲能量仅与放电峰值电流及放电时间有一定关系, 而放电时间可近似地用脉冲宽度来代替。图1-3为铜加工钢, 反极性加工时放电能量与蚀除量之间关系的实验曲线。式1-5为单个脉冲的蚀除量与脉冲宽度, 放电峰值电流之间关系的实验曲线。

$$M_o = K_m t_i^{1.1} \hat{i_e}^{1.4} \quad (1-5)$$

式中 M_o ——实测的单个脉冲蚀除量(g);
 K_m ——常数, Cu[⊕]—St[⊖]时为 9.4×10^{-11} ;
 t_i ——脉冲宽度(μs);
 $\hat{i_e}$ ——放电峰值电流(A)。

由上述可见, 提高电蚀量和生产率的途径在于提高脉冲频率(压缩脉冲宽度, 减小脉冲间歇); 增加单个脉冲能量(提高脉冲电压及电流, 增加延时); 设法提高系数 K_m , K_k (合理选用电极材料, 脉冲参数, 工作液成分及其循环方法等)。当然, 实际生产时要考虑到这些因素之间的相互制约关系和对其在工艺上的影响。

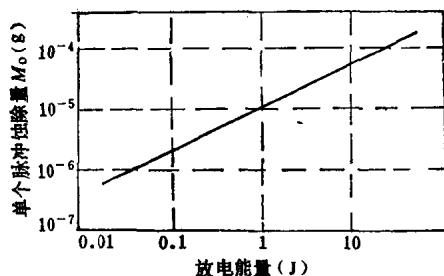


图 1-3 反极性加工时放电能量与蚀除量的关系曲线

1.3.2.2 电蚀量和脉冲延时的关系

实践表明,在其他条件(如电极材料,脉冲能量等)相同的情况下,脉冲延时 t_k 不同,则蚀除量差别很大。表1-1为电极是铜,单个脉冲能量 $W_m=0.5(J)$,脉冲数 $N=20000$ 的实验数据。

表 1-1 电蚀量和脉冲延时的关系

脉冲延时 t_k (μs)	10	30	60	140	900
阳极蚀除量 (g)	0.042	0.067	0.085	0.100	0.029
阴极蚀除量 (g)	0.012	0.021	0.036	0.058	0.027

这些数据表明,只有在某一脉冲延时蚀除量为最高。因为延时过长,由于导热而散失的热量较多,会降低蚀除量;延时过短,热量来不及向外扩散传导,金属在气化状态下抛出的百分比增大,要多消耗一部分能量(气化热等),也会使蚀除量减少。

1.3.2.3 电蚀量和金属热学常数的关系

所谓热学常数是指材料的熔点、沸点(汽化点)、导热系数、热容量、熔化潜热、汽化潜热等。对蚀除量影响较大的是前三者。

金属的熔点和沸点愈高，导热系数、电热、熔解热、汽化热等愈大，则其电蚀量就愈小，反之则大。钨、钼的熔点沸点很高，故较难腐蚀；铜虽比铁的熔点低，但导热性好，所以一般其电蚀量仍比铁小；铝虽然导热系数比铁大，但因其熔点较低，所以远不如铁耐腐蚀。

此外，每次脉冲放电时，通道内及正、负电极放电点均瞬时获得大量热能，其中一部分热量由于热传导散失到电极其它部分和工作液中，另一部分热量使放电点材料升温、熔化和汽化。

1.3.2.4 极性效应

放电加工时，即使一对电极（工具和工件）的材料相同，它们的蚀除量也不一样。这种由于正、负极性接法不同而蚀除量或蚀除速度不一样的现象叫做极性效应。

对极性效应现象的传统解释是：在脉冲放电的初期，由于电子质量轻、惯性小，在短时间内易获得较高的运动速度而奔向阳极，因此在用短脉冲宽度的脉冲加工时，电子轰击是主要的，而阳极的蚀除量就大于阴极；随着放电时间的增加，正离子逐渐获得较高的运动速度，由于正离子的质量大，轰击阴极时的动能较大，所以在用长脉宽的脉冲加工时，离子轰击是主要的，而阴极蚀除量大。实际上，除了电子轰击和离子轰击外，放电加工过程中的覆盖效应，材料转移和镀覆效应，蒸气炬的轰击等对极性效应都有影响，只是加工状况不同，影响的程度不同。

从提高生产率和减少工具损耗的角度来看，极性效应愈显著愈好。当用极性交变的脉冲加工时，单个脉冲的极性效应便相互抵消而使总的极性效应为零。这就增加了工具电极的损耗。因此一般都采用单向、直流脉冲电源进行放电加工，或者用阻尼二极管把负半波切除、消耗掉，以减少电极损耗。而且，在用短脉宽的脉冲加工时，应将工件接阳极；在用长脉宽的脉冲加工时，应将工件接阴极。通常把前者称为正极性加工，而把后者称为反极性加工。

1.3.2.5 脉冲波形