

放电加工的原理

—— 模具加工技术 ——

〔日〕 井上潔 著

帅元伦 于学文 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分十二部分：1.放电现象与电加工法；2.加工特性的实际研究；3.放电加工的物理本质；4.加工特性的理论探讨；5.放电加工的电气装置；6.加工液；7.电极材料；8.放电加工的机械装置；9.放电加工面的精加工；10. 适应控制方式；11. 操作方面的诸问题；12. 今后的放电加工机床。

本书深入浅出、图文并茂、理论联系实际，有一定参考价值。

本书可供从事电火花加工的工程技术人员、工人和大专院校有关专业师生参考。

放电加工の原理

——金型工作技術——

井上潔 著

未踏加工技術協会

1979

*

放 电 加 工 的 原 理

——模具加工技术——

〔日〕 井上潔 著

帅元伦 于学文 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 6⁵/₈ 167千字

1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷 印数：0,001—7,500册

统一书号：15034·2521 定价：0.85元

前 言

早期从事放电加工工作的人，至今也有二十五年的经历了。其间对“放电”这个不连续的现象，反复作过一个又一个的实验推论，但是其真实本质始终没有弄清楚。《放电加工的原理》这本书除了对实验结果作统一解释之外，为了把这种解释推向更广的范围，还对主要问题设定了多种假说，尝试了种种“试行错误”。过去的论述，大多是采用指出结论的方式，相比之下，本书则是着重于尝试这种“试行错误”的。它既不是作为书籍传播知识的媒介，也不是一本尚有疑点而想当然地传播知识的书籍。本书引导读者对某一现象如何去思考、如何去探索、如何去解决更为有效，努力作了说明。

另一方面，在著作本书过程中深深感到对于“放电”这一现象，即使再努力探讨二十年或三十年，自然还会有许多未知的部分。也就是说，这一学科还有很大的发展前途。因此，本书如果能给有志于此种加工方法的读者提示各种问题，使这些读者尝试新的“试行错误”，那么，放电加工就会有进一步的发展。

最后，为了能更好地理解放电加工，推荐读者能阅读本书的姐妹篇《线切割放电加工》一书，该书是从不同于往常的原理来解释加工方法的。

井上潔

1978年8月

目 录

1. 放电现象与电加工方法	1
1.1 放电加工的起源	1
1.2 放电现象的基础	3
1.3 放电的加工特性	6
1.3.1 放电加工与机械加工	6
1.3.2 放电加工机床的必要条件	8
2. 加工特性的实际研究	10
2.1 表面光洁度	10
2.1.1 放电痕与表面光洁度	10
2.1.2 放电能量与表面光洁度	10
2.1.3 物理特性与表面光洁度	12
2.2 加工速度	13
2.2.1 放电能量与加工速度	13
2.2.2 表面光洁度与加工速度	17
2.3 放电加工电流	18
2.3.1 加工条件与放电重复数	19
2.3.2 放电痕与加工速度	20
2.3.3 平均加工电流密度	21
2.3.4 有效放电效率	24
2.3.5 加工面积与平均加工电流	26
2.3.6 加工进给速度与放电电流峰值	27
2.4 电极损耗比	29
2.4.1 放电能量和电极损耗量	29
2.4.2 放电能量与电极损耗比	31
2.4.3 电极损耗对电极表面的影响	33
2.4.4 电极材料的种类和电极的制造方法	50
2.5 加工间隙	54
2.5.1 加工间隙的形成原因	54
2.5.2 计算值与实测值	57

3. 放电加工的物理本质	60
3.1 电极的异常损耗	60
3.2 放电的热作用	63
3.2.1 放电柱的温度与半径	63
3.2.2 热传导下放电点的分析	64
3.3 放电的极性效应	69
3.4 放电中电磁力其它的作用	74
3.5 放电的机械作用	74
3.5.1 放电柱的压力特性	74
3.5.2 放电压力和冲击波	75
3.5.3 发生气体的分解特性	79
3.6 重复放电的机理	81
3.7 放电加工面的形成	82
3.8 加工屑概论	84
3.8.1 加工屑的分布	85
3.8.2 喷出粒子与放电加工屑	90
3.8.3 放电痕直径和加工屑粒径	92
4. 加工特性的理论探讨	96
4.1 放电间隙和放电能量	96
4.2 表面光洁度和放电能量	97
4.2.1 放电痕和表面光洁度	98
4.2.2 放电痕的熔化层	100
4.3 加工速度和加工能量	102
4.4 电极损耗比和放电能量	103
4.5 加工间隙和放电能量	104
4.6 不同种金属的加工特性	105
4.6.1 表面光洁度、加工速度	106
4.6.2 电极损耗比	107
4.6.3 加工屑的产生	110
4.7 放电加工面的特性	112
5. 放电加工的电气装置	123
5.1 加工电源的发展和基本电路	123
5.2 脉冲宽度和加工现象	129
5.3 脉冲发生装置的构成条件	133
6. 加工液	136

VI

6.1	加工液的作用	136
6.2	金属分散液的特性	137
6.3	加工液的特性	139
6.4	加工液和平均加工电流密度	144
6.4.1	加工液的分解能量和最大平均加工电流密度	144
6.4.2	加工液的分解气体量与最大平均加工电流密度	146
7.	电极材料	150
7.1	放电现象和电极材料	150
7.2	电极损耗和电极材料	153
7.3	热变形与电极材料	157
7.4	放电间隙长度	159
8.	放电加工的机械装置	163
8.1	电气控制部分	163
8.1.1	电极进给机构	163
8.1.2	加工屑的自动排除机构	167
8.2	机械结构部分	169
8.2.1	液压伺服方式的放电加工机床	169
8.2.2	电气伺服方式的放电加工机床	169
8.2.3	放电加工机床的构成	171
9.	放电加工面的精加工	173
9.1	手工精加工和电解磨削	173
9.2	液体珩磨及其它	175
10.	适应控制方式	178
10.1	适应控制的定义和适应控制装置	178
10.2	放电加工 (EDM) 的适应控制装置	180
10.3	第二代放电加工的加工特性	185
11.	操作方面的诸问题	194
11.1	加工异常现象	194
11.2	安全措施与维修	200
12.	今后的放电加工机床	203
12.1	向软设备发展	203
12.2	向软加工系统发展	204

1. 放电现象与电加工方法

1.1 放电加工的起源

放电加工是通过人工设定的放电现象，利用其能量进行加工的方法。人们很早以前就知道放电现象，我们熟知的雷，这种夏天特有的气象现象，就是由积雨云产生的放电现象。另外，我们日常遇到的工业产品中，利用这个原理的也很多，如电弧焊接、电气集尘、静电喷涂、日光灯、霓虹灯等，举不胜举。

然而，在金属加工方面的应用却是格外新颖的。即使查找那些消极使用的记录，也是引人注目的。例如十九世纪末期，在美国发明了电笔，它是在电极与被加工工件金属之间，通过低电压、大电流时进行刻印或写字的；进入二十世纪后，通过在介电液体中放电，能够制作金属粉末等。

苏联学者拉扎连柯夫妇边解释这种现象，边积极进行应用尝试，于1943年在金属上打孔获得成功。此后，世界各国也都争先开展这项研究工作，所以，要追究放电加工起源的话，1943年是恰当的。

世界各国争先研究的内容是什么呢？大多是专门为了在超硬合金和硬质难切削材料上打孔，此外别无所求。

日本是1948年从东京大学凤诚三郎博士首先开始研究的，这里必须特别指出的是，由于他看穿了放电现象的精密程度，所以把它作为金属模具加工通用机床的方案来研究。现在，放电加工机床已经成为金属模具加工的代名词了。

这样，从初期的打孔加工到精密加工的实现，大大地促进了高能量密度的加工方法（电加工方法）的发展。随着材料技术的

表1.1 电加工方法的分类

〔加工原理名称〕〔加工名称〕		〔主要用途〕	〔用途名称〕
物理加工	1 一放电加工	穿孔、成型、制造粉末	分离加工
	 2 一放电电解加工	成型、穿孔	
	 3 一不良导体加工	穿孔	
	 4 一放电切断加工	切断	
	5 一放电高速流体加工	穿孔	
	6 一水冲击加工	穿孔	
	7 一放电涂敷加工	涂敷	合成加工
	8 一超声波加工	焊接、(合成树脂)、穿孔	
	9 一摩擦压接加工	扩散	
	10 一离子束加工	扩穿、穿孔	
	11 一电子束加工	焊接、穿孔	
	12 一等离子体加工	焊接、切断	
	13 一放电烧结加工	烧结、熔化成型	
	14 一短脉冲烧结加工	烧结	
	15 一接触加工	切削	
	16 一激光加工	焊接	
电加工法	17 一放电冲击涂敷加工	熔化涂敷	电加工法
	18 一放电冲击压接加工	焊接	
	19 一放电冲击烧结加工	烧结	
	20 一电磁成型加工	铆接成型	
	21 一放电冲击成型加工	成型	变形加工
	22 一放电高压处理加工	相变换	
	23 一气蚀加工	切削	分离加工
	24 一电解加工	穿孔、成型	
	25 一电解磨削加工	成型	处理加工
	26 一放电电解加热加工	加热(热处理)、熔化	
	27 一放电电解扩散加工	扩散	
	28 一高电解放电加工	切削、磨削	
	29 一电泳加工	涂饰、涂敷	
	30 一高速电铸加工	析出涂敷	
化学加工			

发展, 进一步要求开发新的加工方法, 从而更加推进了电加工方法的研究和应用, 取得了显著的进步。于是, 除了电解加工 (ECM)、电解磨削加工 (ECG)、放电冲击成型加工 (PF)、放电烧结加工 (SS) 等之外, 电子束加工 (EBM)、电磁成型 (EMF)、离子束加工 (IBM)、激光加工 (Laser) 等方法也接连被应用, 目前, 还在提出更新的加工方法。

现把这些加工方法整理列于表1.1中。

电加工法按加工原理主要可分为: 利用物理现象加工的物理加工和利用化学现象加工的化学加工。还有按用途大体可分为: 用于对工件穿孔、成型、去除的分离加工、以涂敷、接合、烧结、焊接等为目的的合成加工、以工件的塑性变形、相变换为目的的变形加工、以及包括电镀、热处理等的处理加工。如此对电加工法分类高达三十多种, 今后随着新材料的发展, 估计还会越来越多。下面对放电加工进行详细地分析。

1.2 放电现象的基础

伴随雷鸣、闪电而来的破坏力等与雷有关的各种现象, 我们都会有切身的体会。如村里的一棵松树或庙里的一棵大树被雷击裂了的传说, 似乎谁都听说过。把这种现象, 即在固体、液体、气体的绝缘体内通过电流时的现象称为放电。很早以前, 汤姆森 (J. J. Thomson)、汤塞德 (J. S. Townsend)、帕斯恩 (L. H. Paschen) 等人就发表了很多有关放电的学术探讨的论文。但是, 所有论文都是只对放电开始阶段的电压和绝缘体之间的带电粒子的产生状态, 或者放电时介质的物理变化等作了定性的说明, 而没有在理论上作出定量的分析。另外, 有关放电的研究, 大多以大电极间隙为对象, 而本书则是以极微小的电极间隙场合的放电, 以至电弧放电的放电现象为对象的。特别是, 这个间隙小到由于放电而产生的材料消耗, 直接影响到放电的程度, 这一点与过去的研究是不同的。

也就是说,过去的研究是把放电时的放电通道特性作为对象,而在放电加工中,主要是把放电中和放电后的电极表面或形状、电极的损耗、加工屑等状态或性质作为对象。虽然很早以前就有关于放电的研究,但还说它是新颖的,就是因为有这些不同之处。

对于所利用的放电加工的放电本身的研究,可以和长间隙下的放电一样进行定性说明。就是说,把金属电极置于绝缘体(气体)中,并使其产生绝缘破坏,就会从电晕放电(corona)开始,经过火花放电(spark)、电弧放电(arc)的形式,完成绝缘的破坏。图1.1定性地表明了这个状态的“伏-安”特性。在液体中的放电,因为放电开始后就产生气体,所以和这个形式是相似的。

电源E经电阻R接到置于大气中的金属电极间隙G上,如果使电源电压逐渐升高,由于自然界存在的高能粒子(也包括紫

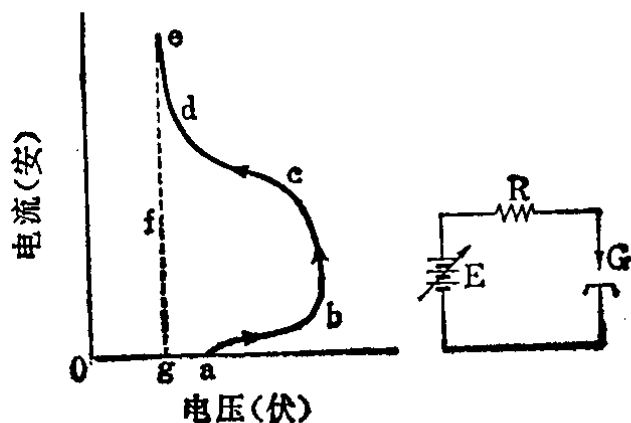
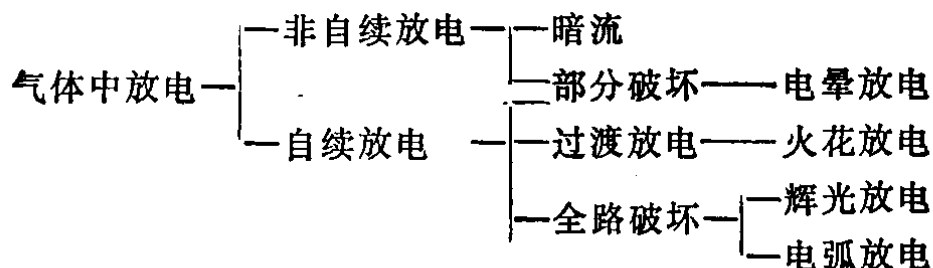


图1.1 绝缘破坏的“伏-安”特性

外线之类的电磁波)使介质稍有电离,所以随电源电压的上升,将有电离电流流过。如果是在液体中时,因为会产生气体(空隙),也会流过电离电流。这种状态由图1.1中的a-b段表示,有时也把这种电流称为暗流。在这种状态下,如果保持电源电压不变,电流也将保持一定值而不变化。如果降低电压的话,则因没有带电粒子的增殖能力,电流将立即降低。把这种状态的放电统称为非自续放电。下面列举出了放电的分类。



若是继续提高两极间电压，就发生电晕放电（b）。电晕放电只是在极间电位梯度高的部分引起的绝缘破坏，它的电流比火花放电（b-c 段）、电弧放电（d-e 段以后）要小。相对电弧放电、辉光放电的全路绝缘破坏来说，把电晕放电称为部分绝缘破坏。电晕放电（b）是不稳定的放电状态，带电粒子不能自行增殖，在局部地方产生，又消灭，重复这种产生与消灭的过程，总的是保持平衡的放电。在工业上用于电气集尘机、空气净化装置、静电涂饰机等。

从电晕放电状态继续提高电源电压，带电粒子的速度就增加，并碰撞周围的分子、原子，带电粒子将一个接一个地自行增殖（自续放电），而向全路绝缘破坏转移。在这种状态下，电流急剧增大（d-e），成为稳定的放电。这种放电形式叫做电弧放电（arc）。这种情况取决于放电间隙中的带电粒子是随时间增加还是减少。

带电粒子的增加或减少，用下式表示：

$$dn = na^{\bullet} \cdot dx \quad (1)$$

$$\therefore n = n_0 e^{al} \quad (2)$$

式中 n ——距离阴极为 l 处的带电粒子密度；

a ——碰撞电离系数；

n_0 ——初始阴极的粒子密度；

dn ——从 x 前进了 dx 时增加的带电粒子数。

这时的电流值，可以用 $I = I_0 e^{al}$ 表示。因此，

$$Ae^{al} + Be^{-bl} \geq 0 \quad (3)$$

式中 A 、 B ——常数；

a ——碰撞电离系数；

b ——再结合系数。

式（3）大于零时为放电状态（连续）（图1.2）。

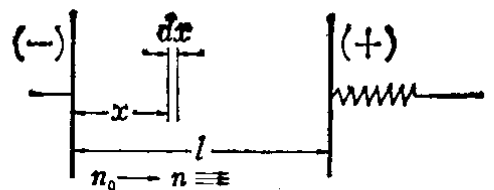


图1.2 图1.1的间隙图
(模型)

转移到放电的过渡状态（b-c）叫做火花放电（spark）。

● 式中 a 原书为 α ，与本书其它公式不符，故改为 a 。——译者

如果超过电晕放电的话, 虽然停止提高电源电压, 但在实际间隙中电压不再上升, 而只有电流增加, 并在瞬时之间转移成电弧放电。火花放电的持续时间是极短的, 为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 秒, 电位梯度为 $10^5 \sim 10^6$ 伏/厘米, 电流密度达 $10^8 \sim 10^9$ 安/厘米²。即火花放电时释放能量的梯度, 可在极短的时间内达到非常高的数值。例如输出能量为30焦耳的放电, 输出功率约为1500千瓦, 时间的变化率(能量梯度)为 1.5×10^6 瓦/秒, 能量的变化率是极高的。因此放电点成为高温时, 产生很强的机械压力。放电时产生的机械压力, 是作为从放电点产生的带电粒子(电的)或中性粒子(热的)的反作用而产生的, 所以此力与带电粒子的产生量和能量梯度成正比例地增大。

当转移到稳定的放电状态, 即电弧放电(d-e)后, 在放电柱的内部经常进行气体分子的电离(原子或分子的电中性状态受到电子的碰撞, 而分解成带电粒子的离子和电子的状态)和再结合(电离了的离子和电子结合成中性的状态), 发生强烈的电磁波。把这样的电离气体叫做等离子体。电弧放电就是这种等离子体状态的稳定放电。这种电弧放电很早就工业上应用了, 主要用途是热源、光源、电弧焊接、等离子体焊接以及金属的切断、熔化等。

如果降低电源电压, 使之低于电弧的维持电压或者增大回路的电阻, 减少电弧电流, 则放电经 e-f-g 路线而结束。

以上所述是放电在绝缘体中进行时的现象, 绝缘破坏无论是在固体中或液体中进行, 只要能满足产生放电现象的电气条件, 就能发生与气体情况相同的放电现象。由于气体和液体每单位体积的分子数之比为气体/液体 $\approx 1/1000$, 所以在同一电压值下, 虽然放电间隙会有变化, 但是可以认为放电特性本身是基本相同的。

1.3 放电的加工特性

1.3.1 放电加工与机械加工

在实际的放电加工中, 能量供给的时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 秒,

是利用伴随火花放电的短弧放电（短时间的电弧放电）现象进行加工的。也有把这种放电叫做瞬时电弧放电或过渡电弧放电的。为了使放电集中，放电加工是利用脉冲式火花放电或继火花放电的短弧放电进行的，而不是利用连续的电弧放电。

如果把脉冲宽度，即流过放电电流的时间定为 τ ，则放电点的范围与 $\tau^{0.5}$ 成比例，放电柱的粗细也随之增加。采用长脉冲放电时，放电柱粗，放电点大，将造成较大范围的破坏现象，从保持尺寸精度的角度来看是不适宜的。另外，放电柱粗，电流密度必然低，受热影响的范围也大。相反，脉冲宽度窄时，放电柱的范围小，电流密度高，能进行局部加工，由于加工能量密度增大，使加工速度提高。就是说，在微小的范围内，因为是强力作用下的加工，所以能实现高精度加工的目的。在短时间里，脉冲式地把能量施于加工部位，就是基于上述两个理由。

放电加工位置的最小分辨率（指放电痕的大小，放电起始电压为20伏左右），虽然随工件材料的不同而变化，但放电痕的直径为0.5~1微米左右，判别力（指单面加工间隙尺寸）为0.1微米。因此，相对于加工电极（工具）的形状精度可达1微米左右。

放电加工时，因为是通过放电现象直接把电能转换成机械力进行加工的，所以最小分辨率和判别力可以用放电痕的形状和加工间隙表示。也就是说，不可能得到比最小放电痕直径和放电痕深度更高的精度。

以往的机械加工是通过对切削工具（车刀、铣刀、砂轮等）施加力量，并使之移动进行加工的。为此，表示最小分辨率和判别力，有必要考虑包括切削工具在内的机械系统。机械加工的形状精度，按加工方法不同而不同，仿型铣床为50~100微米，投影磨床为10~20微米左右。在机械加工中，如果是圆形工件，也能达到0.1微米左右的分辨率。

如上所述，放电加工最小放电痕直径可达0.5微米左右，而且可以忽略机械加工中的机械力，这是有利因素，可能有很高的分

辨率和判别力。

在放电这种能量转换形态中，大部分能量转换为热能，产生 $6000\sim 10000^{\circ}\text{C}$ 的高温，将使放电电极的放电点部位熔化或汽化，同时，由于放电引起静电场及磁场的急剧变化。在放电点区域所消耗的能量 ε 中，大约有 $50\sim 60\%$ 的能量以压力（机械力）的形式被消耗掉，这个压力的大小基本上与 $\varepsilon^{0.5}$ 成比例。另外，在间隙中也有被转换成电磁波形式的，不过大部分成了直接热量，除此之外，分解被加工体电极（工件）及另一个电极和分解加工液也消耗能量。

受到如此之高温和高压作用，大部分物质（固体）都会发生变质变形破坏。所谓加工就是按照目的进行的破坏，所以用控制施加能量的方法来控制“破坏-加工”的过程是重要的。也就是说，对放电加工而言，控制施加电能的时间就能控制“放电-加工”的过程，可以说，适宜地控制这种关系，就是放电加工中的软件。

如上所述，放电加工中的放电与以往所利用的放电现象比较，其特点是放电间隙极为狭窄，电极对向面积（电极和工件间的对向面积）很大。以往所研究的放电，其放电间隙一般为1毫米以上，对向面积比（两极对向面积与放电间隙距离之比）在 $10^{-1}\sim 10$ 以下，而放电加工的间隙为0.01毫米左右，极为狭窄，对向面积比为 $10^3\sim 10^4$ ，与以往的放电现象相比是相当大的。另一方面，放电加工中的放电有很高的放电重复数。这意味着，前一放电的结果对下一放电会有影响，这和以前所研究的放电是根本不同的。

1.3.2 放电加工机床的必要条件

把上述有关放电的特性，最大限度地应用到材料加工方面的机构是放电加工机床，也就是放电加工的硬件。

把这些整理起来，可归纳如下。

① 不是破坏而是达到加工的目的，即是把可控制形和量的能量，以放电的形式施加于加工部位上。

- 脉冲宽度的宽窄——放电点的大小与 $\tau^{0.5}$ 成比例变化。
- 脉冲能量强度（放电能量大小）——加工量与放电能量 ε 成比例，而机械压力与 $\varepsilon^{0.5}$ 成比例变化。
- 脉冲宽度与脉冲能量强度之比——影响电极损耗。
- 放电间隙极短——介质的脏污程度对放电有很大影响（或为火花放电，或为电弧放电）。
- ② 增大加工量，即进行多次重复放电。
- 通过控制使放电间隙大小稳定——控制伺服进给电极追踪机构。
- 加工屑的排出和放电点（热点）的冷却——使介电液体（冷却液）流动，以防止介质分解物集中，并进行冷却。
- 对介电液体（冷却液）的污染和加工时产生的分解气体的处理——过滤装置及循环机构。
- ③ 使用方便，即有机械位置显示装置。
- 作为装置——使机械强度稳定。
- 避免电弧放电的措施——对放电重复次数的控制（平均加工电流的控制），对放电能量的控制（放电电流峰值的控制），通过电极振动、往复运动或对冷却液加压、抽吸等排除加工屑和放电产物（冷却液热解的碳黑、气体）。
- 对放电加工进行适应控制，使其成为自动加工机床。

上面指出了放电加工机床的主要组成部分，为了维持加工效率、加工精度，首先应该满足这些条件。

2. 加工特性的实际研究

2.1 表面光洁度

本章根据放电加工的实际加工特性，通过实验试求其表面光洁度、加工速度、电极损耗比、加工间隙等。有关定量值将因电极材料、工件材料不同而有差异。这里主要是把用铜电极、石墨电极加工钢材料（工件）作为研究对象。

2.1.1 放电痕与表面光洁度

加工电源提供的电能，在电极与工件之间的狭窄间隙中被消耗掉，并在两极上产生放电痕。加工面上放电痕的聚集就是表面光洁度。

通常在日本，表面光洁度用 $R_{\max}$ （微米）表示。外国还有用RMS、 μ_{in} 或 H_{CLA} 表示的。由于放电加工本身就几何学来看，是加工不出整齐的表面的，而是非常不规则的表面，所以光洁度的各种表示方法之间的换算是困难的，严格地说，应该把同一个工件用各种测量器进行实测后再作比较。

放电加工的表面光洁度 $R_{\max}$ 值的范围，是从精加工表面的0.1微米到粗加工表面的300微米以上。实际上，考虑到加工效率问题，加工表面光洁度 $R_{\max}$ 值多用于10~40微米的范围内。

因为放电痕的形状，即放电痕重迭深度的平均值可以表示表面光洁度，所以作为形成放电痕形状的影响因素有：工件材料和电极材料的物理机械性能、加工液的物理性质和喷射压力，以及放电能量的大小等。

2.1.2 放电能量与表面光洁度

作为影响表面光洁度的主要因素，首先要求出与放电能量的关系。如实际上用脉冲电源加工的结果进行归纳，并作出

图 2.1 那样的曲线。此图示出了用电解铜作电极材料，反极性加工淬火碳素钢工件的结果。

由图可见，当脉冲宽度增加或者放电电流峰值增加，即放电能量增加时，表面光洁度呈变粗的倾向。

把表面光洁度 R_{a1} 用脉冲宽度 τ_{on} 和放电电流峰值 I_p 的函数来表示，有如下实验式：

$$R_{a1} = K_R \cdot \tau_{on}^{0.3} \cdot I_p^{0.4} \quad (1)$$

式中 R_{a1} ——实测的表面光洁度 (R_{max} 微米)；
 K_R ——常数，Cu $\oplus$ —St $\ominus$ 时为 2.3；
 I_p ——放电电流峰值 (安)；
 τ_{on} ——脉冲宽度 (微秒)。

同样，用工具显微镜观察放电加工面放电痕的直径，测量其平均直径 D ，进而求出与放电能量的关系 (图2.2)。

由图导出放电痕直径 D 的实验式如下：

$$D = K_D \cdot \tau_{on}^{0.4} \cdot I_p^{0.5} \quad (2)$$

式中 D ——实测的放电痕的平均直径 (微米)；

K_D ——常数，Cu $\oplus$ —St $\ominus$ 时为 7；

τ_{on} ——脉冲宽度 (微秒)。

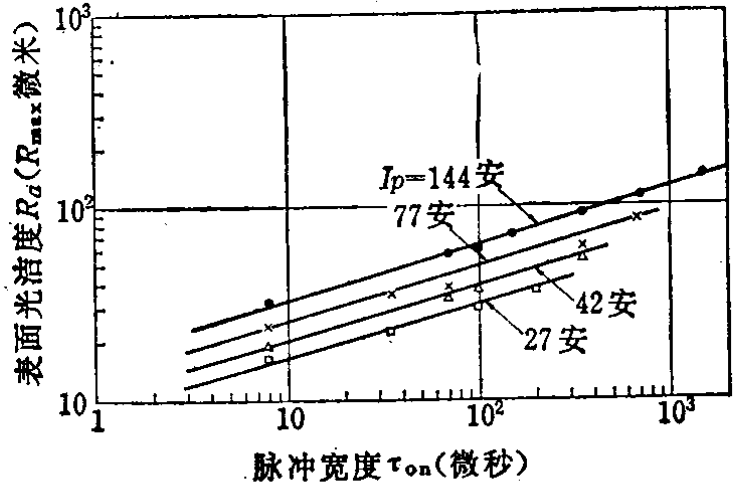


图2.1 表面光洁度与脉冲宽度、放电电流峰值的关系
 电极：铜，工件：碳素钢 (S45C)，极性：反

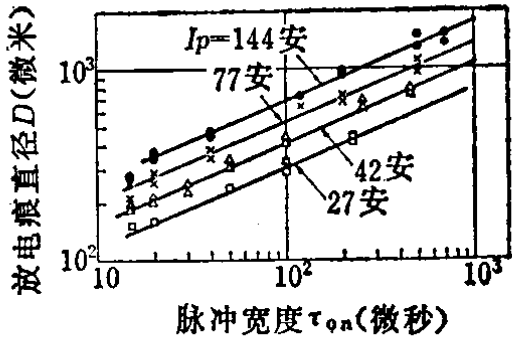


图2.2 放电痕直径与放电能量的关系