

金屬电火花加工

高亨德、楚振斌編譯

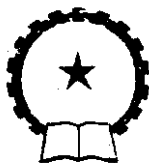


机械工业出版社

金屬电火花加工

高亨德、楚振斌編譯

熊大蓮校訂



机械工业出版社

1959

出版者的話

本書是將蘇聯現有的金屬電火花加工資料加以彙編的，還編入了我國在這方面已有的部分經驗。其中，先介紹有關金屬電火花加工的物理本質、所使用的各種直流電源和綫路以及電火花加工機床的自動控制問題，然後系統地介紹了金屬電火花加工的各种方法和設備。

本書可供工程技術人員參考。

NO. 2822

1959年5月第一版 1959年5月第一版第一次印刷

787×1092 1/25 字數 258 千字 印張 13³/25 00,001—10,150 冊

機械工業出版社(北京阜成門外百萬莊)出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號 定價(11) 2.05 元

序 言

在技术飞跃發展的情况下，要求利用高机械性能和耐热性能的特种鋼和合金。这些鋼和合金很难用普通的机械加工方法进行加工，因此在科学技术人員面前提出了一項新的任务——研究各种新的金屬加工方法。

金屬电火花加工法是苏联学者B. P. 拉扎連科和H. M. 拉扎連科夫妇在1943年發明的。由于他們發明了这种新穎的金屬加工方法，曾荣获斯大林奖金。金屬电火花加工法主要是利用金屬电腐蝕現象，因而可以加工各种硬度和不同物理性能的导电材料和合金。利用这种方法可以加工淬火鋼，也可以加工硬質合金。这种新穎的金屬加工法在苏联工业上已經获得了广泛的应用。在苏联的許多科学研究机关和工厂中正在作进一步的研究，使它更为完善。

金屬电火花加工法約在1952年开始傳入我国。目前許多工厂已进行了一些試驗，有的工厂已將此法正式应用到生产上去了。

別尔烏辛同志在苏联共产党第二十次代表大会的报告中指出：“在冶金、化学、机器制造和其他工业部門中将广泛采用依靠电流的化学作用和热作用的最完善的电气工艺規程”。由此可見，作为依靠电流的热作用的电火花加工，必将日益显示其优越性，且将更加广泛地被运用于机械制造业。

目前我国在建設社会主义总路綫的光芒照耀下，工农业正以万馬奔騰的形势向前發展。刘少奇同志在中共第八屆第二次全国代表大会的报告中指出：“技术革命方面，主要的任务是：把包括农业和手工业在內的全国經濟有計劃有步驟地轉到新的技术基础上，轉到現代化大生产的技术基础上，使一切能够使用机器的劳动都使用机器，实现全国城市和农村的电气化；……”。在这偉大

而艰巨的技术革命中，电火花加工法必将承担起極其重要的任务。例如，各种模具制造的机械化問題，就有賴于电火花加工来实现。

为了把这一先进加工方法更有系統地介紹給大家，以滿足工农业建設的需要，笔者特將苏联現有的金屬电火花加工資料加以彙編而成此書，書中还編入了我国在这方面已有的部分經驗。本書先介紹有关金屬电火花加工的物理本質、所使用的各种直流电源和綫路以及电火花加工机床的自动控制問題，然后系統地介紹了金屬电火花加工的各种方法和設備，以供工程技術人員参考。本書的序言、第一章、第四章、第五章和第六章是高亨德同志編譯的。而第二章、第三章、第七章和第八章是楚振斌同志編写的。由于取材于不同文献，書中采用的符号，在各章中可能不尽一致。笔者对金屬电火花加工法缺乏深入研究，書中难免会有不尽妥善的地方，希望和讀者共同研究并得到指正。

目 录

序言	3
第一章 概論	7
第二章 电火花加工的物理本質	11
第一节 放电与电蝕	11
第二节 脉冲放电中电蝕的基本規律	15
第三节 电蝕的極效应	18
第四节 脉冲放电中金屬电蝕的机构	27
第三章 直流电源和綫路	41
第一节 直流發电机	41
第二节 半导体整流器	43
第三节 机械整流器	46
第四节 R 綫路	53
第五节 RC 綫路	54
第六节 LC 綫路	64
第七节 RLC 綫路	66
第八节 RLCL 綫路	68
第九节 RCR 綫路	71
第十节 其他綫路	74
第四章 电火花加工机床的自动控制	75
第一节 电極工具的进給方法	75
一、主軸悬浮的自动控制系统 (87) 二、电極工具的剛性进給 (88)	
三、利用液压傳动的控制系统 (90) 四、利用可逆电动机的可逆控制系统 (92)	
五、利用不可逆电动机的可逆控制系统 (96) 六、不可逆的双位置控制系统 (105)	
七、不可逆的步进制控制系统 (109)	
第二节 自动控制、自动檢查和自动保护	110
一、机床的自动接通和断开 (110) 二、电極工具从加工孔中的自动退出装置 (119)	
三、自动調換加工規准的装置 (122) 四、电火花加工时的灭弧方法 (125)	
五、电火花加工机床控制系统的自动調整 (126)	
第五章 电火花穿孔和制模具	133
第一节 总論	133

一、金屬電腐蝕的強烈度 (134)	二、表面質量 (138)	三、加工精度 (142)	四、電極工具 (145)	五、工作液 (150)
第二节 電火花穿孔和制模具的設備	150			
一、固定式電火花穿孔機床 (151)	二、可移式電火花加工機床 (170)			
三、穿小孔的電火花加工機床 (182)				
第三节 電火花穿孔和制模具的實例	209			
第六章 金屬電火花表面強化	216			
第一节 概論	216			
第二节 電強化的物理現象	218			
第三节 電火花強化層的性質	222			
第四节 電火花強化的工藝規律	231			
一、加工規准的功率和強化層深度、硬度間的關係 (231)	二、電極材料對強化層深度和硬度的影響 (235)	三、電容量對強化層深度和硬度的影響 (236)	四、單位強化時間對強化層深度和硬度的影響 (238)	
第五节 電火花強化設備	239			
一、設備 (239)	二、強化過程的機械化 (250)			
第六节 安全技術	255			
第七节 電火花強化的實際應用	257			
一、刀具的電火花強化 (258)	二、模具的電火花強化 (262)			
第七章 電火花切割	265			
第一节 低壓電火花加工原理	265			
第二节 電火花切割的工藝圖	267			
第三节 工作液	268			
第四节 電火花切割時的基本工藝規律和電規准	269			
第五节 切割機床	278			
第六节 電火花切割的應用	288			
第七节 技術經濟指標	292			
第八章 電火花磨削	296			
第一节 緒言	296			
第二节 高壓電火花磨削的工藝規律及其最適宜的加工規准	296			
第三节 低壓電火花磨削的工藝規律及其加工規准	303			
第四节 電火花磨削機床	309			
第五节 電火花磨削的應用舉例	317			
參考文獻	325			

第一章 概 論

当我们开闭电門或电閘时，在閘刀和它的接触部分可以發現金屬瘤或表面不整齐的火山口狀的缺口。这种接触部分的损坏是由于开闭电門时發生放电現象而引起的。电极的这种损坏叫做电腐蝕。

电腐蝕現象早在一百年前就被發現了。它經常發生在电气設備的接触处，使电气設備遭受破坏。由于自动控制和遙远控制的日益發展，減輕或消灭电腐蝕現象，保証电气設備正常而長时期的工作，成为非常迫切的問題。这就給科学技术界提出了一个重要的研究任务。

最近20年来，对于电腐蝕現象确定了两个研究方向。其一是从研究金屬的性能着手，以便選擇抗蝕性最强的金屬作为接触点。另一是从研究放电的物理現象着手，以便确定它的原因，提出熄灭电弧的基本方法。苏联斯大林獎金获得者Б. Р. 拉扎連科(Б. Р. Лазаренко)和 Н. И. 拉扎連科(Н. И. Лазаренко)夫妇在这方面作了極大的努力。他們旨在研究电腐蝕現象的本質，从而掌握了电腐蝕現象的某些規律。研究結果証明，所有导电材料，不管它的物理化学性質如何，都要遭受电腐蝕作用。

在他們的研究工作中，进一步明确了电腐蝕極性、电腐蝕程度和放电特性的关系。二位拉扎連科指出，在純电阻負荷和純电感負荷的直流电路中，發生普通的稳定电弧放电。电弧存在的時間取决于接点分离的速度和接点离开的距离。在电弧放电中，阴極遭受破坏。若在气体介質中發生电弧放电，金屬微粒从阴極移向阳極，电极激烈地被加热而表面受到氧化。在电容和电极并联的直流电路中，放电現象从普通的电弧放电轉变为不稳定的脉冲

放电，即火花放电。电极损坏的现象亦发生改变：当电极断开时的电流小于某临界值时，电腐蚀现象从阴极转向阳极，金属微粒从阳极移向阴极。电极几乎不加热，电极表面亦不氧化。当改变电极的工作介质成分或改变电极的化学成分时，同样可以得到上述现象。因此，总结起来讲：金属电腐蚀程度和电腐蚀极性，乃是取决于工作电路参数间的相互关系，同时还取决于工作介质和电极金属的成分。

以上所叙述的都是在气体介质中得到的电腐蚀特性。1941年，二位拉扎连科利用这种金属转移的现象进行金属镀盖。目前这一方法在苏联工业上已经广泛地加以利用，也就是利用硬质合金和石墨在机器零件和工具上进行电火花强化，提高它们的耐磨性，延长它们的使用寿命。近年来我国也开始学习和使用了这一方法。

二位拉扎连科接着研究液体介质中的电腐蚀现象。最初利用的液体介质大部分是矿物油。油经过长时间试验后变成黑色。经过化学分析证明，油变黑是因为油中存在无数1至60~80公忽的球状金属微粒，这些微粒是火花放电时从电极上抛射出来的金属颗粒。B. P. 拉扎连科等人曾经建议利用这种方法来制造金属粉末。

在液体介质中发生电弧放电时，由于阴极大量损耗，阳极的轮廓近似地刻划在阴极上。在液体中发生火花放电时，阳极上非常精确地刻制出阴极的轮廓。

根据上述电腐蚀特性，过去被认为有害的不可避免的电腐蚀现象，现在加以控制后，给金属加工开辟了新的道路，成了新颖的金属电火花加工法。

1943年初B. P. 拉扎连科和H. И. 拉扎连科提出了一种电火花加工的电路图（图1.1）。这种电路图简单而实用。共分为两部分：供电线路（图中细线部分）和工作线路（亦称放电线路，图中粗线部分）。工作线路的电阻和电感都很小，使电容器C能够顺利地放电。电容器C可以从0改变到400微法拉。供电线路接在

直流电源上，鎮定电阻 R 用来調整綫路电流。工件 1 接在工作綫路的阳極，电极工具 2 接在阴極。工作时两个电极都沉沒在液体电介質中（电火花强化鍍盖除外），例如煤油、变压器油等等。

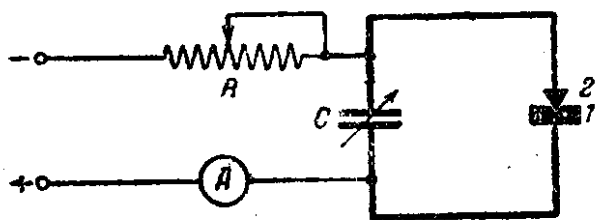


圖1.1 电火花加工的綫路圖。

这一綫路的作用原理从圖 1.1 中可以很明显地看出：电容器 C 經過鎮定电阻

R 从电源获得充电。在充电过程中，电容器 C 的电压，也就是电极間的电位差逐漸上升，直到电极空隙間發生火花放电为止。在放电过程中，电极金屬被除去。在这綫路中，周期性地充电和放电，就完成了金屬电火花加工过程。

根据金屬电火花加工法的原理，可以利用改变綫路参数 (R 、 C 、 L) 的方法来控制加工过程。金屬电火花加工法可以加工任何硬度和任何韌性的导电材料。所以金屬电火花加工法發明以来的時間虽然很短，但它在工业上却已占据了很重要的地位。目前在苏联已广泛利用在以下操作中：

1. 制造冲模、鍛模和金屬压印模等；
2. 制造拉絲模子、中心綫为曲綫形状的孔道、小直徑的孔（达 10 公忽）以及在硬質合金上制螺紋等；
3. 金屬的直綫或曲綫形切割；
4. 加工窄縫（达 100 公忽）；
5. 磨削平面和圓面；
6. 磨制車刀和多刃刀具；
7. 电火花切割；
8. 金屬表面的电火花强化；
9. 各种輔助工作（如取出折断的工具等等）。

以上所列举的加工种类，还远沒有全部發揮金屬电火花加工法的潜在力量。

应该注意，这种金属加工法主要是适用于加工淬火钢、硬质合金以及其他韧性大的金属。但是在许多情况下也适用于加工普通钢料。例如在普通钢上用机械加工法钻中等大小的孔（从1~40公厘），极为便利。但是直径小于1公厘或大于50公厘的孔，用电火花加工法就显得有利了。再如电火花切割，在任何情况下，不论是淬火钢还是普通钢都胜于机械切割。许多操作（例如制造中心线为曲线形的孔道）在电火花加工法未发明前都没法实现。刀具电火花强化后比强化前的寿命要提高1~1.5倍。

在大多数操作中（除电火花切割和磨削外），电火花加工的基本缺点是生产率低，平均不超过300~600公厘³/分。另一缺点是电极工具同样遭受电腐蚀作用而损耗，在加工过程中，使电极很快地变形，影响加工精度。生产率低和电极工具的损耗，大大地缩小了电火花加工的应用范围，使得在许多情况下不能利用电火花加工法。因此，解决这些问题，就决定着电火花加工法的发展前途。

和电火花加工法几乎同时出现的还有阳极机械加工法。阳极机械加工法应用在刃磨刀具、切割金属以及精磨金属等方面具有很大的优越性，所以到目前为止电火花加工法主要应用在强化和制孔穴等方面。

最近几年来，在电火花加工的基础上又发展了电脉冲加工法，它的生产率可以提高到1000~5000公厘³/分，电极工具的损耗也大大减小。

第二章 电火花加工的物理本質[●]

金屬电火花加工是脉冲放电时电蝕的結果。金屬的电蝕乃是一种复杂的綜合的現象。这种現象的實驗和理論研究是十分困难的，因为火花間隙非常小（10~200公忽）、电路系統是非綫性的以及放电在液体中进行等等。

大多数的文献只研究了脉冲放电时电蝕过程的物理本質的个别現象。第一本全面和系統地分析这种現象的文献，要算是卓洛迪赫(Б. Н. Золотых)的著作 [10]。尽管如此，关于电蝕过程的动力学，特别是液体介質中放电时的热化学过程和某些其他方面的問題，目前研究得还十分不够。在我国不但还没有进行这方面的研究，甚至连一本系統地介紹电火花加工理論和实际的文献也沒有。下面根据苏联有关电火花加工物理本質的文献，就几个主要問題进行介紹。

第一节 放电与电蝕

电流通过气体，在某些情况下通过非导电的液体和固体（电解液和电介質）的現象叫做介質击穿或放电。

放电有稳定放电和不稳定放电之分。其特性不随時間而改变的放电形式，叫做稳定放电。放电特性随時間而改变的，叫做不稳定放电。

放电又有自激与被激之分。

在气体或在电解液中的放电，仅在电极間隙中有电荷（电子或离子）存在时，即形成导电状态时才能發生。

在气体或电解液中形成离子的現象，叫做离子化或游离。为了發生放电，电极間隙中的游离或自由电子的存在是完全必要的

● 主要参考文献[10][37][16][35]。

条件。气体或电解液的游离是依靠所谓摧离素或游离因子：如宇宙线， x 射线，紫外线，高温或高电场等的作用。

假如放电的产生是由于上述外界游离因子的作用，那么这种放电叫做被激放电。如果没有外界游离因子的作用而能自己维持的放电叫做自激放电。

根据压力的不同、电源能量的大小、电极形状、间隙的大小、伏安特性曲线的不同以及放电持续时间的长短，可以有不同形式的放电：电晕放电、辉光放电、火花放电和电弧放电。我们最感兴趣的是最后两种，即火花放电和电弧放电。

火花放电到目前为止，还没有统一的完全确定的定义。在电火花加工的条件下，根据卓洛迪赫的见解[10]，“火花放电”这一术语可理解为“脉冲放电”。或者当采用弛张线路时，理解为“容电火花”。

现在让我们讨论后两种放电的主要区别。

1. 电弧放电是稳定的放电，而火花放电则是断断续续的不稳定的放电。这两种放电均为自激放电。

2. 它们的放电通道形状也不同。根据文献[10]的介绍，电弧放电的通道是截头圆锥台形的(图2.1)。阳极和阴极上的斑点大小不同，因此在阳极和阴极上的电流密度几乎相差10倍($I_K = 2800$

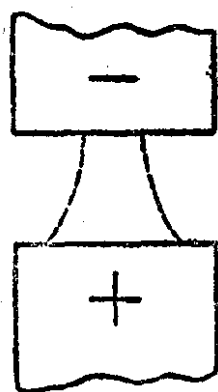


图2.1 电弧放电通道的形状简图。

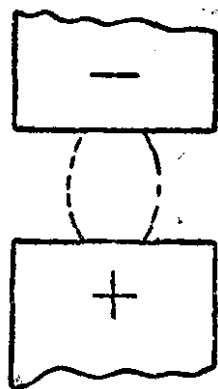


图2.2 火花放电通道的形状简图。

安/公分², $I_a = 300$ 安/公分²)。火花放电的通道是鼓形的(图2.2)。阳极和阴极上的斑点大小实际上相等。两极上的电流密度也是一样的，并且达到 $10^5 \sim 10^6$ 安/公分² 的数量。这要比电弧放电大得多。

3. 火花放电的温度比电弧放电高得多。根据同一文献的介绍，例如在钨电极之间燃起电弧时，阴极斑点的温度近于 3000° 而阳极斑点的温度近于 4000° 。而火花放电通道中的温度根据许多作者的介绍高达 10000° 以上。

4. 伏安特性曲线不同。在大气压力下，电弧放电的伏安特性的一般情况如图 2.3 所示[10]。而经验公式如下：

$$U = a + bl + \frac{c + dl}{I^n} \quad (2.1)$$

式中 U ——电弧电压； a, b, c, d ——与电极材料和介质有关的常数； I ——电弧中的电流； l ——弧长； n ——对于不同金属由 $0.34 \sim 1.38$ 。

火花放电的伏安特性曲线如图 2.4 所示[10]。它与图 2.3 比较，可以证明脉冲放电——“容电火花”与稳定的电弧放电有本质的区别。



圖2.3 稳定电弧放电的伏安特性曲线。

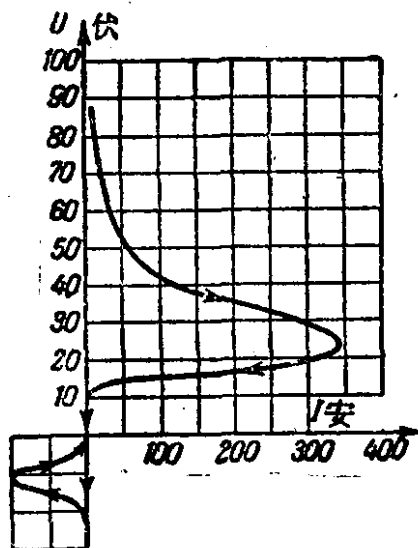


圖2.4 脉冲（火花）放电的伏安特性曲线。

5. 放电持续时间不同。电弧放电的持续时间为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 秒[3]而火花（脉冲）放电的持续时间为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 秒[10]。也就是说火花放电的持续时间要比电弧放电短许多倍。

现在让我们讨论上述两种放电的电蚀特性问题。

在自激放电作用下电极金属毁坏的现象叫做电蚀。随着放电

形式的不同，电蝕特性也不同。

在电弧放电中，阴極腐蝕占优势（圖2.5）。在气体中进行电弧放电时，观察到金屬的轉移現象是从阴極到阳極。随着电弧所消耗功率的提高，金屬轉移方向可以改变[10]。此外根据塔卡諾夫(К. И. Таканов)利用光譜所进行的研究[32]确定：放电間隙的大小也可以促成电弧放电中电蝕过程（金屬轉移方向）的轉化。

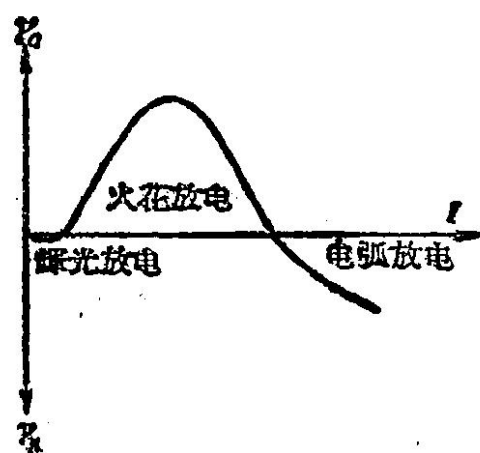


圖2.5 不同放电形式的电蝕特性圖。

火花放电中，在大多数的情况下阳極腐蝕占优势（如果两个电極材料相同）。此外火花放电的电蝕現象的最大特点是：它与电極間介質成分有重大的关系。例如用相同的电参数进行火花放电时，在液体介質中的电蝕量比在气体介質中要大得多。另外由于火花放电的持續時間短，电極整体受热很少，不会高于 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ ；而在电弧放电过程中电極受热厉害。

电火花放电能够使阴極的輪廓精确地复制在阳極上，这是实现金屬的「尺寸加工」的重要条件。圖2.6是在圓盘銑刀碎片上用电弧（左）和电火花（右）制出的八角形孔的例子。从圖中看

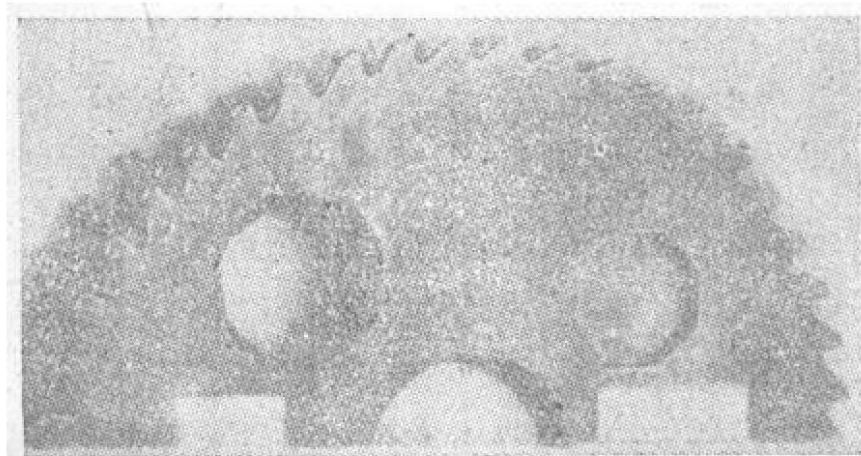


圖2.6 用电弧（左）和电火花（右）制出的八角形孔。

出：用电火花放电穿出的孔的輪廓十分清晰，而用电弧放电穿出的孔的周圍呈熔化現象。

因此，我們采用保証發生脉冲（火花）放电的綫路，以便实现金屬的尺寸加工。

第二节 脉冲放电中电蝕的基本規律

叠加原則 Б. П. 拉扎連科曾指出：电火花加工时电蝕量是單个脉冲电蝕量的簡單总和，即

$$\gamma = \sum_i \gamma_u \quad (2.2)$$

式中 γ ——电蝕量的总和； γ_u ——單个脉冲的电蝕量。

这一原則对于电蝕过程研究方法的發展具有重要的意义。借助于研究單个脉冲，可以获得电火花加工物理学的基本資料。經驗証明[37]：这种研究电蝕現象的途徑是非常有效的，并且得到了广泛地采用。然而必須指出：公式(2.2)是在脉闊系数(скважность) $n_c = \frac{t_n}{t_u}$ 足够大时（如 $n_c \geq 2$ ），才是正确的。

这里 t_n ——脉冲周期； t_u ——脉冲持續時間。

同样还須指出[37]：公式(2.2)中 γ_u 值必須采用單个脉冲电蝕的平均值，因为电火花装置綫路是非綫性系統。

电蝕量与脉冲能量的关系 根据卓洛迪赫的實驗[37]确定：

$$\begin{aligned} \gamma_{ua} &= K_a W_u \\ \gamma_{uk} &= K_k W_u \end{aligned} \quad (2.3)$$

式中 γ_{ua} 和 γ_{uk} ——單个脉冲作用下阳極和阴極的电蝕量； W_u ——脉冲中的儲能； K_a 和 K_k ——比例系数，与电極材料的热学性能和脉冲持續時間有关。

总电蝕量为：

$$\begin{aligned} \gamma_a &= \sum_n n K_a W_u = N K_a W_u \quad (n = 1, 2, \dots, N), \\ \gamma_k &= \sum_n n K_k W_u = N K_k W_u \quad (n = 1, 2, \dots, N), \end{aligned} \quad (2.4)$$

式中 N ——脉冲次数。

卓洛迪赫的实验结果[37]如图 2.7 所示。研究 $\gamma_{a,\kappa} = f(W_u)$ 的规律后得出下列结论：在其他条件相同时，电蚀量与间隙中放出的能量成比例。

每一脉冲在间隙中放出的能量由下式表示：

$$W_u = \int_0^{t_u} U_n(t) I_n(t) dt \quad (2.5)$$

式中 t_u ——脉冲持续时间； $U_n(t)$ ——火花间隙上的电压； $I_n(t)$ ——放电电流。

将 (2.5) 式代入 (2.4) 式得出一般形式：

$$\gamma_{a,\kappa} = K_{a,\kappa} N \int_0^{t_u} U_n(t) I_n(t) dt \quad (2.6)$$

电火花加工的生产率（电极蚀除速度） $\gamma'_{a,\kappa}$ 乃是单位时间内的电蚀量，即：

$$\gamma'_{a,\kappa} = \frac{d}{dt} \left[K_{a,\kappa} N \int_0^{t_u} U_n(t) I_n(t) dt \right]$$

或

$$\gamma'_{a,\kappa} = K_{a,\kappa} f \int_0^{t_u} U_n(t) I_n(t) dt \quad (2.7)$$

式中脉冲频率 $f = \frac{dN}{dt} = \frac{1}{t_u}$

因为

$$\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} U_n(t) I_n(t) dt = P_{cp}$$

式中 P_{cp} ——间隙中放出的平均功率。

因此

$$\gamma'_{a,\kappa} = K_{a,\kappa} P_{cp} \quad (2.8)$$

由此可知，电火花加工生产率（更确切些说，电极蚀除速度）与火花间隙中放出的平均功率成比例。

电蚀量与金属热学常数的关系 根据卓洛迪赫的实验 [37]：