

金屬的电火花切割

B · K · 聶維仁著

施永立 等譯

目 录

引言	3
第一章 金屬的电火花切割的电工过程	6
概 論	9
1. 白瓷土悬浮液介質中的切割加工	9
2. 水玻璃介質中的切割加工	16
3. 在其它介質中的切割加工	18
4. 固定电極的焊接	25
5. 切割加工装置用直流电机的供电	27
数 据	30
1. 直流电源电压的影响	30
2. 切割加工生产率与形成放电的关系	34
3. 电路电能的析出	34
4. 电流强度和放电电阻与电極电压的关系	39
第二章 金屬的电火花切割用極間介質	42
1. 煤油和滑油	43
2. 水和水溶液	43
3. 电極材料对圆盘-阴極磨耗的影响	54
4. 水胶液和悬浮液	59
5. 圆盘-阴極的磨耗与極間介質成份的关系	66
第三章 实际应用的評介	71
1. 極間介質	71
2. 电的用量	71
3. 切割加工用装置	81
4. 直流电源	91
5. 电火花切割加工的应用	92
6. 技术經濟指标	97
参考文献	100

引 言

近十年以来，材料的电加工方法得到很大發展。电火花方法就是其中之一。电火花加工方法是斯大林奖金获得者 Б·Р·拉察連柯和 Н·И·拉察連柯（Лазаренко）發明的。各种导电材料，且不論其硬度、韌性以及对于机械加工性有所影响的其它性質如何，皆可用这种方法加工。这种程序的效果是十分显著的。

冲击放电在金屬的电火花加工中起着重要的作用。加工的速度由电極上析出的电能来确定。在这种放电中，电極电能的析出引起了电極金屬拋射的爆炸效力。

由于熔化过程和熔化金屬从被加工表面被去除的时间很短（由 10^{-6} 到 10^{-2} 秒），以及由于使用冷却液，热来不及透入工件；因此，被加工金屬的組織变化是不大的。由于电的冲击作用而被拋射出的熔化金屬，落入極間介質，在里边冷却并形成碎小的球形粉末从加工区域被帶走。

在电火花加工中，工具和零件分別是放电綫路上的阴極和阳極。具有一定功率和延續时间的直流电冲击这些电極。从阳極-零件拋射出的金屬的量最大；阴極-工具的损坏程度是很小的。

电火花加工装置的供电电路必須保証在極間只产生冲击放电。因此，在通常采用的电路（圖1）上有与極間串联接通的电阻和并联接通的电容。

电容和电压的大小决定着放电的能量，同时也决定着加工生产率 and 加工后的表面光潔度。

另一种获得冲击放电的方法也为大家所熟知，这就是使用低电压和使电極作快速的相对运动。

电路上因为未装电容而簡化（圖2）在工作中由于电压的降低而使加工装置安全且能在各种导电介質中加工的可能



圖1 “高”电压电火花加工
装置供电线路原理圖

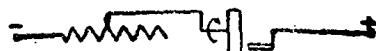


圖2 “低”电压电火花加工
装置供电线路原理圖

性，这三者决定了在低电压下使用电火花加工的显著优点。

必須指出，如果說，按圖1所示的线路，在“高”电压(100~200伏特)下进行电火花加工的規律，曾被許多專家研究过，那么到目前为止，对在“低”电压下进行的电火花加工的研究还是很少的。

金屬的切割加工是在低电压下进行的生产率很高的工序之一。切割加工装置的线路原理圖示于圖3。

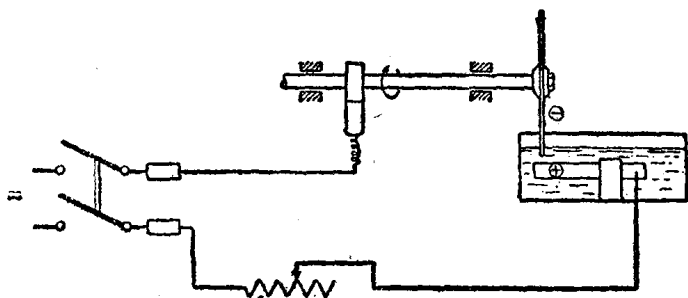


圖3 金屬电火花切割加工装置线路原理圖

电火花方法与机械方法相比，具有下列的优点：

- 一、能够加工任何硬度和韧性的金屬和合金；
- 二、能用形状簡單的低碳鋼电极代替昂貴的專用切削工具；
- 三、由于切削寬度减小而节省金屬（切削寬度为1.5~2.5公厘）；

四、在某些情况下所达到的生产率比机械切割的为高。

本書著者的研究确定：

使用110伏特的直流电压，电流强度为50~70安培，电路电

容到 2500 微法拉，在水中切割加工时，电极-阴极的相对磨耗率很大（200~300%），切割加工后，零件的表面质量低劣，生产率低（2~3克/分钟）；

如若用水玻璃代替水，进行阳极机械加工，则在其它的条件相同的情况下，生产率提高，铁制圆盘-阴极的相对磨耗率下降到40~30%，但是由于电解液的导电率大，使电能的损失过多；

在水玻璃中工作时，当电极电压下降到 25 伏特和电流强度增加到 200 安培，铁制圆盘-阴极的磨耗相同，但生产率高。由于电压低，导电的损失下降。电容器与切割加工件和工具并联地接通，在这种条件下，生产率并不提高。于是引起在以后使用图 2 所示的电路图。

试验确定，极间介质——水玻璃具有某些使用上的缺点：水玻璃能使装置的活动机构粘滞，刺激皮膚等。此外，根据图 2 的线路图，在低电压下加工时所出现的各种现象的物理实质长期以来仍尚未阐明。

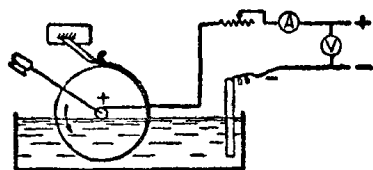


圖 4 金屬阳极机械加工装置
线路原理图

斯大林奖金获得者，B·H·顧雪夫，利用在特殊的电解液中的阳极氧化现象和随后用中性机械刮刀从产品上去除阳极氧化层的方法，制订了金属的阳极机械加工方法。图 4 所示即为金属的阳极机械加工方法线路原理。因为生产率低，这种方法未能得到推广。后来，他便更改了电路图，用活动的电极-阴极来代替中性刮刀。同时，B·H·顧雪夫创制了图 2 所示的电路图。电路图由低压直流电供电。以新的方式使用水玻璃作为极间介质。

对于在阳极机械加工中出现的现象的实质，有着各式各样的不同的解释。譬如，在一部著作中强调阳极机械加工方法是基于电化学和机械对工件的复合作用。而在另一部著作[●]中，则给出了

● H·P·切德爾金（Четыркин）著的“金屬的阳极机械切削”，苏联机械制造科技書籍出版社 1949 年版。

新的定义。根据此定义，說金屬的阳極机械切割是基于綜合使用同时作用在被切割零件的电化学作用和电流的热作用。

在第三部著作中說，阳極机械加工过程的开始的特点如下：

“当强力地刮除阳極層时，阳極表面上个别显微凸部的阳極層电阻变得非常小，而在这段非常短的时间里，电流的密度达到了最高值。結果，在这些地方析出了大量的热，阳極的金屬熔化，并以紅热的球形从加工区域抛射出去。这些單次放电在被加工表面的許多点上同时产生，杂乱的一个压在另一个上面，形成連續振动电流，它的数值超过安培表示出平均值的 0.5~1 倍” ●。

但是引述的見解实际上并不能說明过程的規律。因此，电極上形成放电的作用完全沒有确定。可是在电火花加工操作中，这种过程却有着决定性的意义。

苏联学者的研究表明，阳極-零件上形成氧化層的 速度較之金屬去除的速度，是不可比拟的小，因而在去除金屬处（切割底部）此層完全不会形成。已經确定，电化学的現象在金屬的去除中所起的作用是微乎其微的。

这表明，按圖 3 所列举的綫路圖，在使用低电压下切割装置工作时的电的現象，实际上尚未弄清楚。电火花方法和阳極机械方法的界限还不明确，而众人仍然混淆不清。

本書討論金屬的电火花切割的主要規律。分析切割时产生的电工过程以及确定極間介質的成份对于电極-工具的磨耗和切割生产率的影响。金屬的电火花加工中央科学研究所所进行的工作的分析，针对金屬的电火花切割，做出了实际应用上的評介。

第一章 金屬的电火花切割的电工过程

电的用量是金屬的电火花切割的重要指标。电的用量决定着

● Г·А·季莫里曼 (Гиммельман) 著“阳極机械机床用电源”，苏联机械制造科技書籍出版社 1949 年版。

加工生产率和加工后的表面光潔度。

曾經进行了研究，其目的在于探討下列各項主要問題：

1. 極間放电的形成；
2. 放电的电压、电流和时间；
3. 电極-工具运动的作用；
4. 电火花切割装置的电路电能和放电电能；
5. 極間介質的成份对于規定指标的影响；
6. 上述因素对生产效率的影响。

曾根据带有整流子的电子示波器的示波，对在电極上迅速变化的电的現象进行了分析。电子整流子将射綫分为两部分，使能同时記錄电压和电流强度。由于惰性大的緣故，回綫示波器不能够全面反映出电極上正在迅速进行的电工过程。

所討論的电流和电压，經過整流子，傳給示波器的垂直导电板。为了按时展开电工过程而采用示波器的装置。在規定电流电压特性曲綫时，删除時間曲綫；往示波器的水平导电板上傳导电压，而往垂直导电板上傳导电流。

电路电流和电極电压示波圖，帮助我們确定極間放电开始的时刻、放电時間以及通过特性曲綫来表示电工过程。

放电开始时，电極电压要比电極接触时的相应电压高好几倍。但在放电过程中，它和电路电流却有着非綫性的关系。

当电極不接触时，放电的依据是电極上的电压由无負荷曲綫跳跃式的下降到某些稳定的数值。放电的电压与电流强度保持非綫性的关系。电流示波圖是一条光滑而不特別曲折的曲綫。曲折表示在电極断接后产生放电。在电流示波圖上，在接触后放电时曲綫曲折的原因，是由于放电电阻太大，从而引起了該段电路內电阻的跳跃式的增加。

根据示波圖測量：

- 1) 放电的最大电压和最小电压(振幅值 $V_{\text{pasp,max}}$; $V_{\text{pasp,min}}$);
- 2) 电流的最大值(振幅值 $I_{\text{pasp,max}}$);

3) 放电的时间。

为了检验电火花切割的电的用量，在工业中通常采用能示出被测量数值平均值的电磁仪表（电流表和电压表）。

因此，在示波的同时，用电磁仪表进行测量。这样便能比较这些指标，并做出必需的结论，以便在实际工作中进行电工测量。

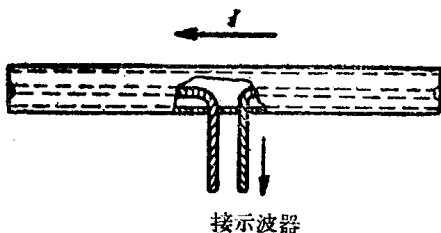


圖 5 电流示波用分流器

根据以前所进行的研究工作，可以设想，当电极不接触时，借助于自动电子的幅射而产生放电是可能的。这样，当在經過两次蒸馏的純淨变压器油中，用显微镜观察小的間隔被击穿的情形（Б·Н·佐洛托夫和 И·П·克罗伯娃观察的）証明，当电压在60伏特以下时，間隔被击穿的情形确实是存在的。

为了使电流示波，放电中应用特殊的分流器（圖 5）。分流器是一根銅管，經過它来傳导全部电流。分流器的两端头（电位引出端）是釐焊的。为了减少干扰的影响，釐焊的端头穿过分流器，經過中間的孔道伸向示波器。未按规定屏蔽的分流器划不出正确的电流示波圖来。分流器的电阻小（0.003958欧姆）能在强烈的切割加工用量下示波电流，但对电的用量則无显著的影响。

当加工装置用 BCT-3 型硒整流器供电时，进行了电工过程的分析。电压在由 2 到 70 伏特的范围之內。加工装置用直流电机供电时的电工过程的特点，将在后面叙述。

下面就是所采用的一些代号：

$V_{c.x}$ ——电磁仪表所指示的无負荷电压；

$V_{max.x}$ ——电压的振幅值（由計算得出）；

$I_{c.p}$ ——电磁仪表指示的工作电流强度；

$I_{c.k}$ ——电磁仪表所指示的短路电流强度。

概 論

1. 白瓷土悬浮液介質中的切割加工●

电路电流和电极电压示波圖的分析表明，切割时电极上产生冲击放电。

当电压低于 12 伏特时，电极靠攏而产生短路。放电仅在断接后形成，这是由于在电路的短路断接后，电极上产生过电压的結果。

从电压低于 12 伏特的典型示波圖（圖 6）可以看出，在一个正弦波綫半周期內，由无負荷电压到短路电压，电极上的电压降低。由于圓盘-阴極的运动和圓盘表面的不平，电极的接触是不稳定的，并且經常损坏。断接时，电极上出現过电压到 15 伏特，形成極間放电，放电的延續時間約为 10^{-4} 秒。放电期間，电极电压的下降不低于 12 伏特。与短路的延續時間相比較，放电的延續時間并不長。放电电流要比短路的电流稍小一些。

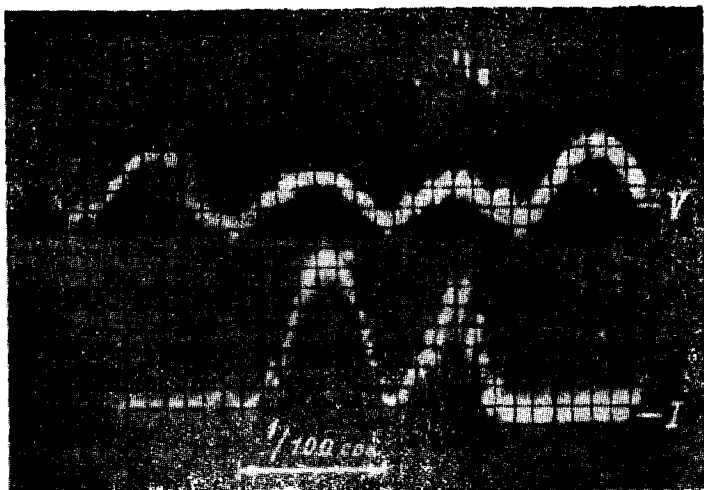
工艺測量表明，当电压低于 12 伏特时，切割的生产率很低，这是因为在此种条件下形成放电的能量小的緣故。

随着电路电压的增加大于 12 伏特，形成无接触的放电。当电压在由 12 到 15 伏特（圖 7）的範圍內时，放电情况不稳定，經常中斷，同时电路也断接（或者形成短路）。在一个正弦波綫半周期內，这种过程重复好几次。圖 7 所示示波圖表明，正弦波綫周期的大部分表示放电。

● 極間介質的成分：

白瓷土.....	400~450克/立升
硼砂.....	40克/立升
硼酸.....	50克/立升
溶剂.....	水

为了簡便起見，我們称这种介質为白瓷土悬浮液。



圖中的“сек”为秒。

圖 6 在白瓷土悬浮液中切割时的电路电流和电极电压示波圖

$$V_{c.x.x} = 3.8 \text{ 伏特}$$

比例: 17.5安培/分度; 1.7伏特/分度。

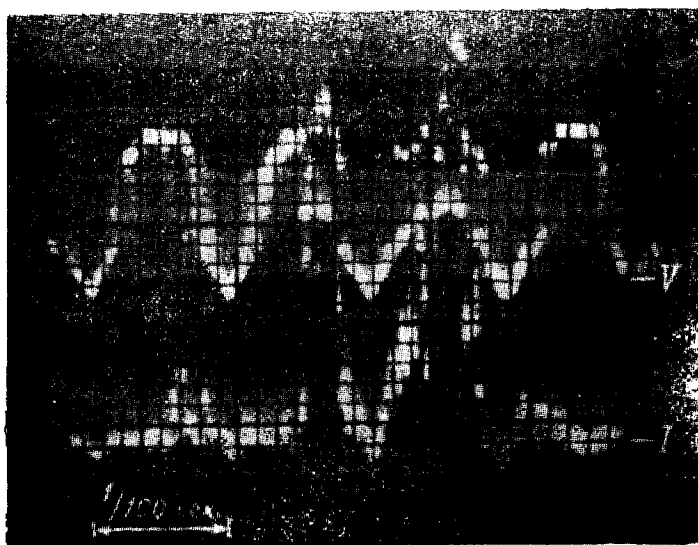


圖 7 在白瓷土悬浮液中切割时的电路电流和电极电压示波圖

$$V_{c.x.x} = 7.75 \text{ 伏特}$$

比例: 69.1安培/分度; 1.7伏特/分度。

圖 8 所示为当电压 $V_{c.x} = 25.8$ 伏特时，形成稳定放电的电流和电压示波圖。圖上的电流强度（沿垂直綫）和电極电压（沿水平綫）是同步的。在圖 8 上，沿水平綫可以看見一条光亮的直綫，这条直綫符合无負荷电压的振幅值。这条直綫是前次产生无負荷冲击时遺留下来的，它是銅管屏極殘余發光的結果。示波圖上的电压振幅值減輕了电压比例数的計算。根据示波圖可以确定，放电是在电压为 18 伏特时形成的，而后在电路內产生了激增电流。放电因电極电压的下降而停止。当形成放电时，在电压下降到短路数值的同时，看不到电極接触。

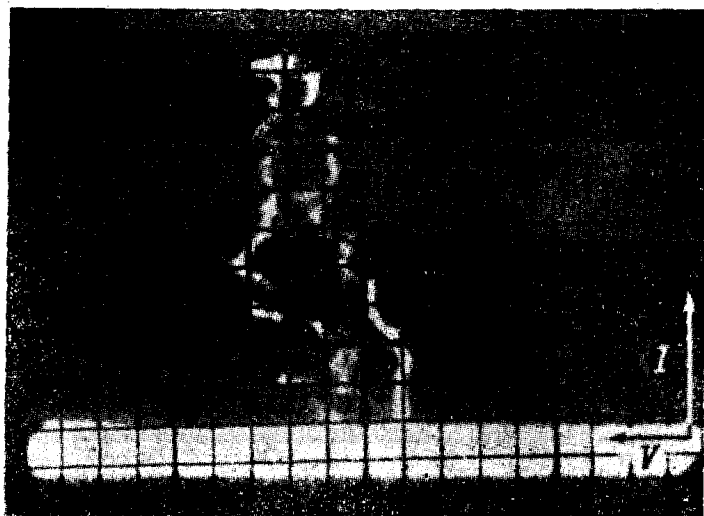


圖 8 白瓷土悬浮液中切割时的电路电流和电極电压示波圖（电流电压特性曲綫）

$$V_{c.x} = 25.8 \text{ 伏特,}$$

比例: 82.4 安培/分度; 2.5 伏特/分度。

当电路电压繼續增加时，形成放电的程序在品質上是不变的。在較高电压下（ $V_{c.x} = 42$ 伏特）形成的放电，可以列于圖 9 的电压和电流示波圖來說明。这个示波圖表明了（从左边看第二半周期）无接触放电的形成；此时电極的电压驟然下降。放电稳定，当电源电压降低时放电停止。



圖 9 白瓷土悬浮液中切割加工时的电路电流和电极电压示波圖

$$V_{c-x} = 42 \text{ 伏特}$$

比例: 69.1安培/分度; 5.5伏特/分度。

必須指出, 在描繪用整流器供电时的切割过程的特性曲綫的同时, 电源电压按整流后的正弦波綫的改变, 取得由零到最大值。因此, 当电极电压还未达到 12 伏特时, 电极可能發生接触。由于圆盘-阴极的运动, 在此时經常發生断接。假如电源电压于断接时达不到 12 伏特, 則由于电极上出現过电压, 形成短时间的放电。在电源电压充分的情况下, 断接时形成稳定放电。由接触轉为放电时, 电流示波圖特別曲折。电极电压下降到 12 伏特时, 放电經常中断。

放电所必需的电极电压, 与極間的距离有关; 电极間的距离愈大, 則在其它条件相同的情况下, 电压应愈大。放电中止时, 电压同样与極間距离有关, 通常大于 12 伏特。

圖 10 所示为形成接触放电时的电流示波圖。圖上的第一、第三和第四半周期表示在电极断接后形成了放电。在第二次冲击中, 电流示波圖是光滑的, 这說明电极未預先接触而形成了放电。

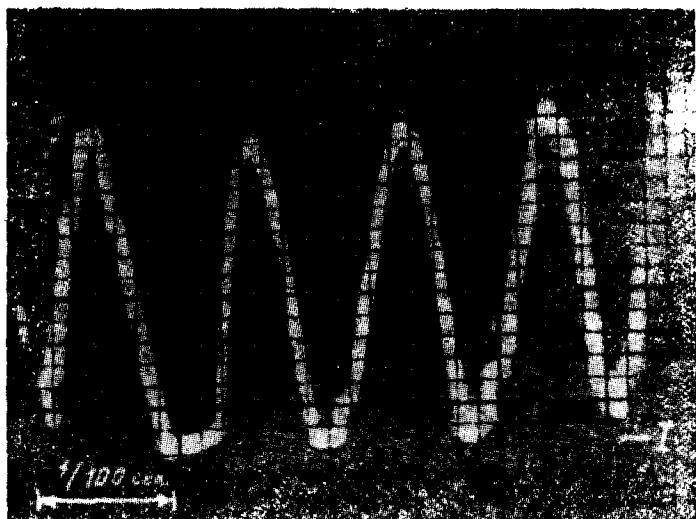


圖10 白瓷土悬浮液中切割时的电路电流示波圖（形成接触放电）

$$V_{c_{x,x}} = 42 \text{ 伏特}$$

比例：52.4安培/分度。

所列举的示波圖表明，放电的最大延續時間（按圖2所示，由整流器供电），由电極上保持12伏特以上的电压的时间来确定；电压为15~70伏特时，这个时间为 $(5 \sim 8) \cdot 10^{-3}$ 秒。在这种情况下，放电的最大頻率为每秒鐘一百次冲击。

介質的导电性的影响 为了确定白瓷土悬浮液的导电性的影响，划出了电極靠攏和沒有放电时的电路电流和电压示波圖（圖11）。从示波圖上看出，电路的电流强度与电極电压相应地改变。当电压为66伏特时，电路电流的振幅值借助于白瓷土悬浮液的导电性的作用为69安培。假如考虑到形成放电时的电極电压通常为20~25伏特，則振幅电流相应地为15~20安培。仪表所記錄的电流的平均值为3~5安培。这种电流对于切割过程的影响可以略而不計。

放电沿电極的运动 电火花加工装置工作的时候，圆盘-阴極处于不断的旋轉中。

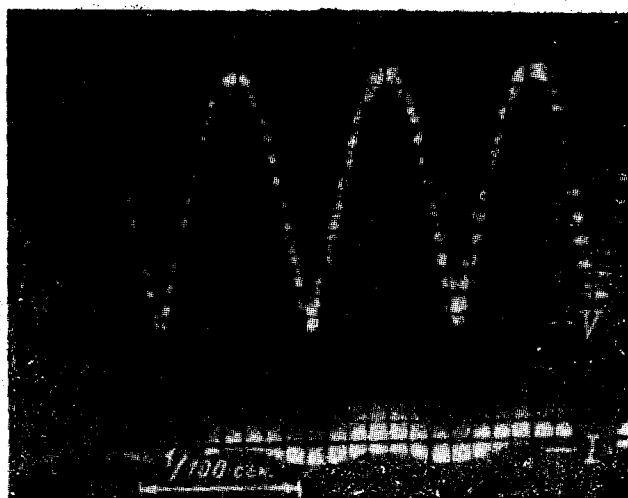


圖11 電極靠攏和沒有放電時的電路電流和電極電壓示波圖

介質——白瓷土懸浮液

比例：69.1安培/分度；6伏特/分度。

為了研究圓盤-陰極旋轉時的放電情況，進行了如下的試驗。使用在上面制有寬為4~5公厘的徑向槽的圓盤-陰極進行切割。選定圓盤上徑向槽的數量和圓盤的旋轉速度時，要使在 10^{-2} 秒的時間里，圓盤轉動3~4個扇形面，即圓盤每旋轉一個扇形面的時間約為 $0.25 \cdot 10^{-2}$ 秒。在放電沿圓盤-陰極運動的情況下，當經過槽時，由於極間距離增大，電極電壓增長，放電停止。假如許多的槽放電，且新的放電在已經開始的放電停止以前產生，則在經過槽時，電路不斷接；儘管一個放電中止，經過其它的槽電流仍能流通。

在規定條件下得到的電壓示波圖（圖12）表明，放電的中斷是存在的。放電的延續時間，從形成放電時起到放電終止，符合圓盤-陰極轉一個扇形面的時間。放電中斷時電極上出現大量的過電壓，這說明在放電終止時的放電拖延了。加工裝置用整個圓盤工作時作出的電極電壓示波圖表明，放電既未中斷，也未拖延。

電極靠攏時產生放電，在電壓下降時放電停止。

根據陽極-零件表面上單次放電作用的痕迹的討論，使我們了解到痕迹按圓坑的形狀趨向周邊。因而，沿陽極-零件表面的放電是不運動的。沉附在電極表面上的白瓷土粉粒促使放電固定在它所產生的地方。因為在沒有白瓷土的水中切割時，熔化的痕迹是很明顯的，痕迹的方向與圓盤-陰極運動的方向一致。

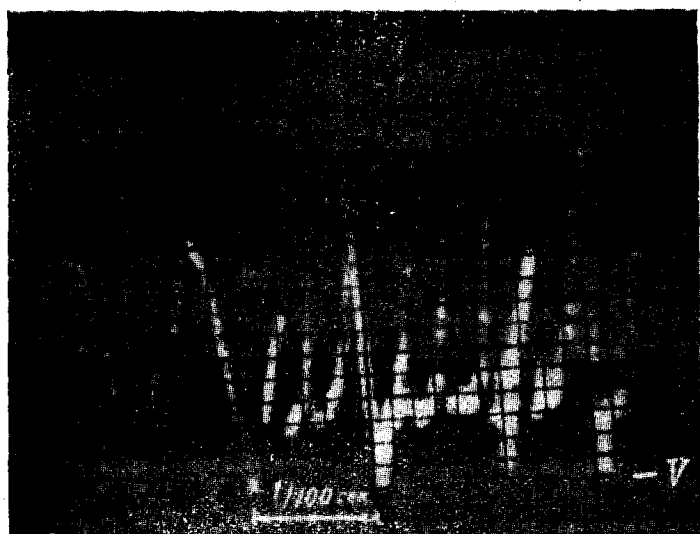


圖12 用帶有徑向的槽的圓盤裝置在白瓷土懸浮液中切割加工時的電極電壓示波圖

比例：6.5伏特/分度。

對得到的圓坑體積的測量和按該體積對一次沖擊時拋射出的金屬量的計算，証實了這樣的結論，即在一个正弦綫半周期內，電極上形成一次放電。

根據上述的情況得知，在工作時，于切割過程中，放電沿着鋼制圓盤-陰極滑動。

電火花裝置用交流電的供电 為了確定電極的極性對形成放電的影響，我們討論一下，用交流電在白瓷土懸浮液介質中切割時的電流和電壓示波圖（圖13）。這些示波圖表明，在極間沖擊

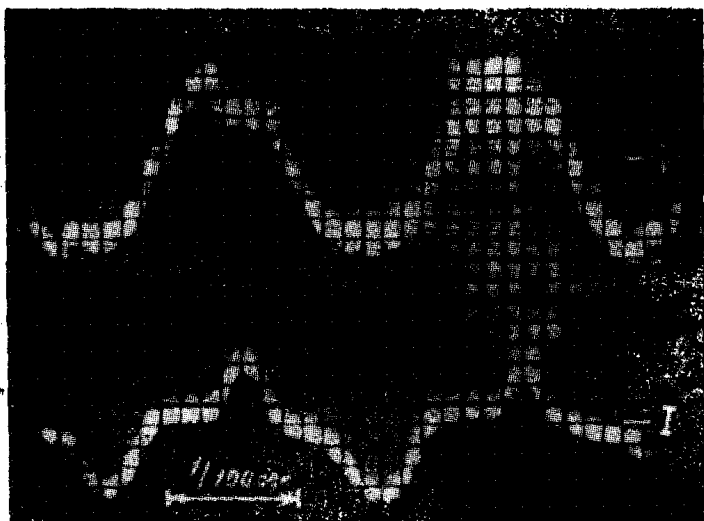


圖13 在白瓷土悬浮液中用交流电切割时的电路电流和
电极电压示波圖

比例: 105.8安培/分度; 7.5伏特/分度。

放电是在电极的各种极性下形成的。放电在任一极性下的形成和保持的时间相同。

用带缺口的圆盘-阴极所做的試驗表明, 当用交流电供电时, 放电同样良好地沿着圆盘-阴极滑动。

2. 水玻璃介質中的切割加工

有人認為用阳极机械方法切割时, 金属从电极上去除并不是放电的结果。为了弄清这个问题, 討論一下, 在密度为 1.3 的水玻璃中切割时的示波圖。

电路电流和电极电压示波表明了, 在水玻璃介質中, 用圆盘加工装置工作时形成冲击放电。在白瓷土悬浮液和水玻璃中, 形成放电的性质和放电的时间, 没有任何的区别。

像在白瓷土悬浮液中一样, 在水玻璃中切割时, 电压低于12伏特时, 电极發生接触。当电极的接触中止时, 由于在短路断接

时电极上过电压的缘故，形成了弱功率的放电。当电压高于12伏特和电极充分靠攏时，在极间形成无接触放电。

像在白瓷土悬浮液中一样，稳定放电子电压高于15伏特时形成。这样，从圖14 ($V_{c,x,x}=26.3$ 伏特)得知，在记录的时间里，形成了电极不接触的放电。也像在其它介质中一样，当用整流器供电时，如果电极的接触先于电压升到高于12伏特时，则在断接后，出现放电的情况。

研究证明，在水玻璃介质中切割过程中，金属从电极上的去除是电极间形成冲击放电的结果。



圖14 水玻璃中切割时的电路电流和电极电压示波圖

$$V_{c,x,x}=26.3\text{伏特}$$

比例：28.6安培/分度；3伏特/分度。

H·P·切德尔金[●]证明，“……在这种情况下，电流强度围绕某些平均值变动而不降到零，指出了，在正常程序时去除金属的連續性”的說法是錯誤的。

● H·P·切德尔金著的“金属的阳极机械切削”，苏联机械制造科技書籍出版社1949年版。