

液电效应

Л. А. 尤特金

科学出版社

53.6452
136

液 电 效 应

Л. А. 尤特金 著

于 家 珊 译

3-6
科 学 出 版 社

1962

Л. А. ЮТКИН

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Государственное научно-техническое
издательство машиностроительной литературы
1955

内 容 简 介

书中简要地叙述了液体中高压放电伴生的现象。这一现象（作者称为“液电效应”）的实质在于：在液体内部建立专门形成的脉冲放电时，在放电区域内产生极高的压力，这一高压可以广泛地利用在实践中。

液电效应颇为新颖，已得结果的各种应用前途很大，因此本书可能会引起研究放电物理和研究高压与脉冲弹性冲击利用以及其它各种专业的广大科学技术人员的兴趣。

液 电 效 应

Л. А. 尤特金 著

于 家 珊 译

*

科学出版社出版（北京朝阳门大街 117 号）

北京市书刊出版业营业登记证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经销

*

1962 年 11 月 第 一 版

书号：2638 字数：42,000

1962 年 11 月 第一次印刷

开本：850×1168 1/32

(京) 0001—2,100

印张：1 3/4

定价：0.32 元

序 言

在液体内部建立专门形成的高压脉冲放电时，在放电区域内产生极高的压力，这一压力的表现形式是多种多样的，例如，位于液体附近的物体遭到强烈的机械破坏，液体被抛起等等。

这种现象我们叫做“液电效应”，用实验方法得以确定这一现象的性质和结果的某些规律，大体上确定了这一现象实际应用的可能性。

本书简要地叙述了液电效应，它的研究方法和所进行实验的结果以及应用这一现象的前景。

目前，液电效应在实质上是处于开始阶段，显然，只有科学和工程技术界积极参加这一新方法的实现，才能加速液电效应的发展和实际应用。

书中所叙述的新颖而不寻常的原理、因素和结论，可能会引起个别读者的异议和怀疑。作者的个别说法可能不正确，作者并不一定坚持，欢迎读者提出认真的原则性批评。

最后，作者向协助进行该项工作和出版本书的有关单位和人员致以深深的谢意。

作者

目 录

序言	v
第一章 液体中放电区域附近的現象	1
1. 基本綫路	1
2. 液电效应的特点	4
3. 液电效应的形式	5
第二章 实验数据	13
4. 实验设备和仪器	13
5. 被研究的放电的特征及其作用	15
6. 研究液电效应的塑料显示法	22
第三章 液电效应的装置	30
7. 液电效应菌和钻孔装置	30
8. 液电效应切削装置	36
9. 液电效应喷射器和泵	38
10. 其它装置	42
第四章 液电效应的利用远景	45

第一章

液体中放电区域附近的現象

1. 基本綫路

作者从 1938 年开始研究液体介质中高压火花放电区域内所产生的現象。

在开始阶段,这些研究就証实了原有的說法,即在离子导电的液体中,这种放电或者根本不产生,或者只有在火花間隙很短时才产生,同时还总是随伴着产生大量气体和蒸气。

在介电液体中容易产生放电,并且亦有大量气体和蒸气产生。

图 1 是研究液体击穿的綫路图。按照这种綫路,在离子导电的液体中,液体对放电通道附近物体的机械作用实际上是微乎其微的,仅在介电液体中才稍有察觉。

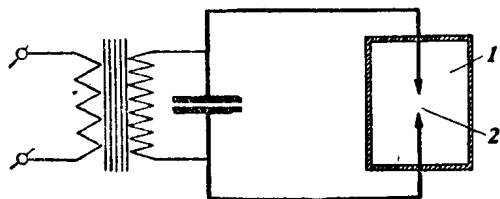


图 1 研究液体击穿的装置綫路图:

1——液箱; 2——火花間隙

(两极整流管未画出;放电迴路用粗綫表示)

不論在导电的液体中或是介电的液体中,机械作用力决定于放电区域周围蒸气和气体的气泡内部的压力大小。根据文献資料,这些压力值是不大的。

在上述情况下,液体中所产生的液力脉冲的波前不陡,而且延

續時間很长,因而功率不大。

作者面臨的任務是尋找一種條件,使液力脈沖的作用大大加強。看來,內部具有高壓的放電通道不可能直接與液體接觸,造成高壓,而是通過某種氣體和蒸氣層。因此,為了提高壓力和加強液體對於物體的機械作用力,必須尋找減小氣體和蒸氣層厚度和縮短放電延續時間的方法。同時還應當提高單個脈沖的功率。

為此,選擇了兩種最簡單的電氣線路。

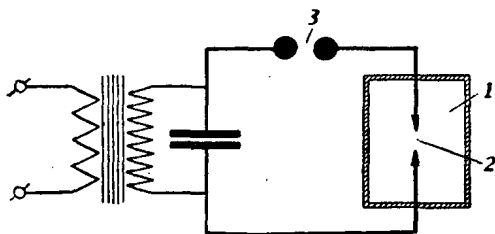


圖 2 帶有一個附加火花間隙的裝置線路:

1——液箱; 2——基本火花隙; 3——附加火花間隙
(兩極整流管未畫出)

圖 2 的線路中有一個附加火花間隙,這樣便可在離子導電的液體中得到火花放電和大大加強機械效應,並且幾乎完全消除了氣體和蒸氣的產生。

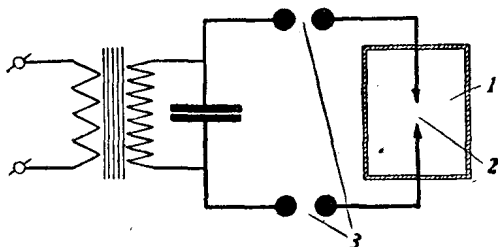


圖 3 用以產生液電效應的帶有两个附加火花間隙的主要裝置線路:

1——液箱; 2——基本火花隙; 3——附加火花間隙
(兩極整流管未畫出)

圖 3 是後來採用的基本線路,在此線路中有兩個附加火花間隙,以後我們叫做“輔助間隙”,輔助間隙串接在基本間隙的兩邊。實驗表明,適當選擇輔助和基本間隙的長度可以進一步加強放電的

机械作用,而且在任何情况下肉眼是看不到有气体和蒸气产生的。

实验表明,继续增加间隙的数目会降低液电效应的强烈程度。

上述线路系弛张式线路,在基本间隙长度不变条件下,改变辅助间隙的长度可以得到任意的放电频率。

上述各线路中放电的脉冲波形的特征是不一样的,而遵守电工学中的已知规则。

液体放电所产生的液力脉冲由两部分冲击所组成:主要的——液力冲击;次要的——穴蚀冲击。

液力冲击(或叫做“液电冲击”)的波形与脉冲电流的波形类似。

脉冲电流愈短,其波前愈陡、幅值愈高,则液力冲击愈短、愈强,其爆炸作用愈激烈。与此相反,脉冲电流愈长、幅值愈低,则液力冲击愈长,其破坏作用愈弱。

在电气线路中加入两个辅助火花间隙就具备了建立液电效应所必需具有的特性。

辅助间隙的作用在于:

- 1) 聚集一定能量,而后以脉冲状态送向基本间隙;
- 2) 大大缩短脉冲的延续时间,防止振荡过程产生,并且在一次循环中实际上得到一个大功率瞬时脉冲;
- 3) 使脉冲波前变陡,从而消除转为电弧放电的可能性;
- 4) 在给定的基本间隙情况下,得到该电源装置所容许的电流和电压值;
- 5) 对称或非对称调节其长度可以改变基本间隙中的放电脉冲波形和特征;
- 6) 确定间隙击穿次序,首先是辅助间隙,而后是基本间隙,以便在基本间隙中放出最大部分的能量。

这一线路具有上述的及其它优点,而且简单,因而获得了采用;但这并不是说,它是产生液电效应唯一适用的线路。

利用辅助火花间隙来调节装置时,可以获得很宽的稳定工作规范的范围。当间隙是闭合的,则基本间隙尖端之间的液体便自

由地通过电流。

如果輔助間隙逐漸地移开，則在开始时基本間隙中沒有击穿产生，尽管此时兩輔助間隙已經开始击穿。这是因为在基本間隙中电压下降非常迅速，致使击穿所需的电压和脉冲波形来不及形成。

稳定工作规范的下限是由輔助間隙的这样的长度所决定的，这一长度不仅能保証脉冲的形成，而且还能保証产生足以击穿基本間隙的电压。当繼續移开輔助間隙，致使电压不足以击穿所有三个間隙（两个輔助間隙，一个基本間隙）时，这便是稳定工作规范的上限。

由此可見，可以广泛調节送向基本間隙的电压、功率和脉冲波形。

2. 液电效应的特点

应当指出，液电效应法与金属电火花加工有本質的区别。这种区别不仅在于两者的电气綫路、物理过程和能量参数不同，而且在于液电效应对物体的机械作用不是直接由放电造成的，而是間接地由介質造成的。

在金属电火花加工中是利用低电压和短时延的脉冲放电的綫性（对放电方向而言）热作用。

与此相反，液电效应法是利用高压和瞬时脉冲放电的扩展通道对周围液体介質的径向（垂直于放电方向）机械作用，而后将这一机械作用传递給被加工物体。

由此可見，液电效应对加工物体並沒有热作用，而机械作用則是通过液体介質在沒有电接触的情况下实现的。

为发展广泛流传的关于电火花加工热本質的观点，作者在自己实验的基础上认为，电火花加工中脉冲电流所熔化的金属不是在电动力作用下抛出的，而很可能是在热爆炸力及其随后的穴蝕冲击作用下抛出的。

任何液体都可作为液电效应的介質。最方便的是工业用水。

液体可压缩性愈小,得到的压力愈高,液电冲击作用便愈强。

放电通道周围的液体介质接受通道中的高压,而后在一定程度上将此高压传递给附近的物体。

液体介质与放电通道之间的薄层愈薄、这些薄层的总厚度愈小,则高压传递的愈快、其幅值愈高。

放电通道周围的液体密度愈大、可压缩性愈小,则液体中产生的压力便愈接近火花通道中的压力值。

因为液体介质实际上可以认为是不可压缩的(例如,水的压缩系数为 0.000048),所以在液电效应装置中可以得到很大的机械力。

利用普通的技术方法可以任意改变脉冲放电的时间和特性。因而,液体中压力的性质亦可是各不相同的,这样便可以利用液电效应达到各式各样的目的。

3. 液电效应的形式

在充满任意液体的开口容器中,即可容易地观察到液电效应。

此时可以看到预先形成脉冲具有怎样的意义。

例如,大功率的,但不是专门形成的脉冲击穿 100—150 毫米的液层时,并不产生明显的外部机械效应,而只是看到液体表面稍有波动。

与此同时,如果采用功率较小的,但却是专门形成的脉冲,则在同样的火花长度条件下,可将 10—15 升的液体抛至数米高度,或者将 16 毫米厚有机玻璃做的、用螺栓拧紧的坚固容器(约 400 升)破坏。

液电冲击的声效应亦超过同样功率、但不是专门形成的放电的声效应。

由此可见,液电效应乃是电能变成机械能的一种原理上新的形式,这种转换无需中间环节,且转换效率很高,适于工业应用。

大家知道¹⁾,在数千大气压下,液体中的击穿电压与压力无关,

1) Бриджмен. 高压物理学,译自英文, ГТТИ. 1949.

而对所有液体而言渐近线接近差不多同样的极限。

可以认为,在这种压力下工作时,液电装置的效率可以很高。以此便可解释在大气压力下液电冲击给能很高的原因。

放电区域周围的液体对放电区域的扩展阻力很大。

由于过程初始阶段放电通道的截面很小,通道中的能量密度和截面的增加非常迅速,所以液电现象具有爆炸特性。

这样,放电通道扩展的阻力便成了一种特殊的电阻,但与通常的欧姆电阻不同,这种阻力与电流方向并非线性关系,而是径向垂直于电流的方向。

这个电阻非常之大——在数微秒内可以放出数千焦耳的能量。因此,回路电容器向基本间隙作的功已经不同于击穿时瞬间短路的功。

在通道扩展初期,非稳定的火花放电是在压缩激剧的液体“管”内部发展的,而对通道的继续扩展给予很大的阻力。这种现象是在大大超过上述临界压力情况下发生的,因此能量转换系数和有效功率都非常大。

按我们的基本线路放电时,水和其它离子导电液体的性质如同绝缘体一样,而通常的绝缘体不仅不失去绝缘性能,而且好象改善了绝缘性能。

在液电效应中,离子导电液体具有很高的耐电强度是与击穿过程非常迅速有关的,此时液体中离子移动很慢,来不及在击穿过程中离开原位。

实验中发现,增加不导电液体中某些离子的浓度与金属导体相比,会突然增加它的导电性。

实验中还发现,随着脉冲波前陡度的增加和宽度的减小,脉冲击穿电解液浓溶液的能力显著提高。显然,当脉冲波前很陡和宽度很短时,任意浓度的电解液都会被击穿。

研究表明,按上述线路液体击穿时,放电通道周围产生高压区域,其典型形状如图4所示。为了清楚起见,我们将这一区域划分几个部分。

A——火花放电区；

B——破坏区；几乎所有材料都要破坏成粉末，而液体，看来是具有固态脆性体性质¹⁾。

B——硬化区；许多材料被破坏，金属硬化，液体，看来是处于固态弹性体状态。

Г——弹性作用区；微粒抛出，产生强大的推力，液体，看来是处于液态弹性体状态。

Д——压缩区；离放电通道愈远，压力迅速降低。可以看到大量液体移动。

在小于火花长度一半的地方向破坏区(B)放置金属是不可能的，因为会产生击穿(金属造成短路)。

利用金属对象作电极亦不能将其放入破坏区。

如图4所示，导体电极仅受硬化区(B)边缘压力的影响，此时在电极上在放电下降点附近产生深度不大的杯状凹穴。

从图4中可以看出，当电极处于直线位置时，它们的端部实际上不会受到机械作用，只是在很粗的电极时，其尖端部分在液流作用下变成圆角。

破坏区的直径与脉冲功率成比例。例如，对起电盘和感应线圈而言，当电容量 $C = 0.05$ 微法、液体中火花长度为 8 毫米时，破坏区直径为 2—3 毫米。

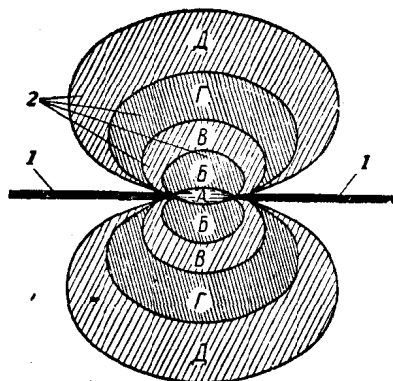


图4 在开始时期火花放电通道周围压力区域的形状和分布：

1——电极；2——压力区

1) 根据 М. Корнфельд 资料 (见他的著作“液体的弹性和强度” ГТТИ, 1951 年)，液体抗剪弹性模数比以前提出的 10^{10} 达因/厘米² 小得多，而液体松弛时间比以前提出的 10^{-10} — 10^{-12} 秒大得多。

由此可见，在放电区域附近的液体获得固体性质的可能性是存在的。

Корнфельд 认为，“在大大超过 10^{-10} — 10^{-12} 秒的松弛作用期间液体行为如同固体一样”。

当采用 10 万伏爱克斯射线用变压器经过 KP-110 两极管整流作电源时,破坏区的直径如表 1 所列。

破坏区周围的 B, T, A 区域具有较大的尺寸。单个脉冲的瞬时功率是非常大的。例如,对功率为 1 仟瓦的装置而言,在 5—7 万伏电压下单个脉冲功率即达 100000 仟瓦以上。

表 1 标准磨轮上破坏区的直径

实验编号	电压仟伏	电容量微法	放电长度毫米	破坏区直径毫米
1	30	0.2	10	5
2	30	0.7	10	7
3	30	0.7	30	15
4	50	0.7	50	26
5	50	0.7	70	38
6	50	0.7	90	45
7	50	0.7	110	57
8	70	0.7	130	69
9	70	0.7	150	75
10	70	0.7	170	82
11	70	0.7	190	95
12	70	0.7	210	105

电极的腐蚀是很小的,只有在大电容和基本间隙很短时才比较显著,同时在任何情况下选择线路参数可以在实际上避免基本间隙电极的腐蚀。这对液电效应的利用是极为重要的。

实验表明,采用铁电极时放电的发展和进行要比铜电极容易些,可见,电极材料对击穿过程有影响。

研究还表明,对电极为“尖端—尖端”情况下在水中放电时放电在发展途径中几乎不产生分支,而对电极为“尖端—圆盘”情况下,在放电端部常常出现分支,且在放电分支进入圆盘表面处产生轻微的腐蚀。在某些放电中发现有 5—8 个不同截面的分支,从腐蚀点面积不同这一事实上便可证实这一点。

不论有分支的或是没有分支的放电,其结果是一样的。

液电效应不伴有气体和蒸气产生。在水中工作时可以认为,在放电瞬间,可能产生极少量的气体和蒸气;在放电末期,被同一

放电所“烧掉”；或者在放电结束后，冷凝和溶于液体中。

看来，基本間隙的击穿过程对导电和非导电介质是不相同的。

在击穿之前，水在基本間隙中的作用如同导体一样，因此在綫路(图3)整个右半部，即輔助間隙后面的电位是相等的。

当一个輔助間隙击穿时，水立刻变成絕緣体，而不再是导体。此时，在水的内部，在基本間隙中由一极向另一极开始出现一定极性的游离始点(由此决定击穿的类型)。

当游离始点达到某一极限时，第二間隙便开始击穿，于是游离始点将两电极閉合，即基本間隙开始击穿。此时迴路中聚集的全部能量便放在綫路的右半部，即实际上放在基本間隙中。

此后，火花通道扩展，扩展程度决定于电流功率，而后伴随基本冲击产生空腔，并且在穴蝕冲击作用下，空腔被液体填充。

如果液体是介电液体，那么它总是絕緣体，在附加間隙击穿前是不良絕緣体，而在其击穿后是良好的絕緣体。在一个輔助間隙击穿之前，迴路右半部的电位将不一样，放电球将具有不同的电位。

看来，第二个間隙的击穿亦是在游离始点到达第二个电极之前开始的。

实验表明，在介电液体内部基本間隙中放出的能量比在水中要少，看来，这不能仅用水的密度大这一点来解释。

放电通道的扩展速度是很大的，在过程的末期速度減慢。在与液体直接接触的初期发生热传递，并且经过火花区域周围的气体和蒸气层将压力传递给液体。而后，液体运动的速度超过放电通道扩展的速度，当液体扩散至某一平衡极限时，即形成空腔。

在空腔扩展到极限时，其壁处于压力之下，因为空腔内存在一定数量的气体和蒸气，这一压力可以产生穴蝕气泡。

然后，气体和蒸气扩展、冷却，空腔閉合，气体和蒸气冷凝和溶解，至此全部过程結束。

基本間隙中放出的热量极少，电极和加工对象不发热。

但是，当液体容量很少、基本間隙很小和电容量很大时，放出

的热量(放电频率高时)便可感觉到了。

如上所述,液电效应伴有穴蚀现象产生。

放电时液体质点分子的结合力被克服,从而破坏了液体中的连续性,而形成空腔。

放电结束后空腔的壁立即闭合,其闭合速度可达声速或超声速;此时伴有穴蚀现象产生。

在液电冲击作用下液体中所形成的空腔大小可以达到相当大的尺寸。

例如,当火花长度为 45 毫米、电容量 $C = 0.7$ 微法、电压为 5 万伏时,空腔具有纱锭状,长度为 80 毫米,最大直径为 70 毫米,而体积可达 100 厘米³以上。

当形成这种空腔时,空腔充满强放电时所不可避免产生的气体和蒸气产物。

放电区周围产生的少数气体和蒸气在扩展的过程中充满整个空腔。此时它们剧烈地冷却和凝结。

空腔壁的闭合引起穴蚀冲击,加强了放电的基本冲击。

如果放电是在某一物体表面附近进行的,那么产生的空腔便变形,而呈单面半球状。液体单面充满空腔导致对物体表面的穴蚀冲击,从而在一定程度上加强了对表面的破坏作用。

空腔的产生和随后被液体充满,证明在放电区域内存在极高的压力。

实验表明,产生的压力值与脉冲功率成正比,与脉冲延续时间成反比,且与液体的体积压缩系数有关。

就各种材料在破坏区内的破坏特点来看亦可断言,产生的压力是极大的。

产生液电效应所必需的液体量可以是很少的。例如,在两张迭起的玻璃板之间水层厚度为百分之几毫米,但这已足可以利用发电机放电而导致的液电冲击将玻璃板击碎,而在空气中即使数百次冲击之后亦不会得到这种效应。

这里亦可看出不存在气体和蒸气的事实:当玻璃板很厚、数次

冲击不能击碎时,在玻璃板之間的水中看不到有气泡存在。

单个冲击所产生的压力在一定范围内取决于电容量大小。

增加电容量,一方面,增加了脉冲的时延,就是說使脉冲“软化”,减小压力,但另一方面,会增加火花通道中放出的能量,这就意味着增加上述各区域的尺寸和增高其压力。

我們采用的綫路是可調的,可以得到不同的脉冲重复頻率,然后相当准确地維持不变。

采用交流工作时可以在电压幅值最大时产生击穿,其頻率等于供电迴路的頻率。

但是,为了得到所需的效果,起决定性作用的是脉冲波前的陡度。

为了增加脉冲波前的陡度和减小脉冲寬度,可以采用現有的方法,其中包括点燃間隙的方法。研究表明,加入点燃可以大大提高脉冲的強烈程度。

在 1951 年进行的一次实验中曾采用电压可达 50 万伏的冲击波发生器作为电源。

似乎这种发生器应当比以前的各种电源产生更为強烈的液电效应。但是,如果在迴路中没有附加的輔助間隙和专用的电容器,那么尽管在水中会有长达 80 毫米的放电,也决不会有液电效应产生。

加入一个輔助間隙(球径为 50 毫米)之后,液体表面出現不大的波动。放电长度約 80 毫米,輔助間隙——30 毫米,电压 20 万伏,浸入水中的深度——200 毫米。

在加入第二个間隙(球径 30 毫米)之后,在同样的参数下,当附加間隙为 20 和 30 毫米时,每次冲击后容积达 250 厘米³的液体会被抛至平均达半米的高度。

这些实验表明,脉冲波前陡度对产生液电效应具有很大意义,而且需要有特殊的放电迴路。

冲击波发生器在空气中放电具有足够的波前陡度,而在水中放电时,則減小了它的陡度。

加入輔助火花間隙增加了陡度,但是效应达不到最大值,尽管裝置功率很大。然而放电迴路尚未最后完成,为了得到最大的效应,还需要加入单独的电容。第一类放电,即功率大、但不产生液电效应的放电,我們叫做“柔和”放电。这种放电的波前不陡,脉冲很长,且脉冲功率不大。

在很少的情况下,大約一千次中有一次,我們在利用帶有附加間隙和电容的一般綫路中,即发现有微弱的放电。这种放电伴有很弱的声效应,而且在实际上液电效应是非常微弱的。

以后查明,只有在击穿电压最小和輔助間隙之間长度相差很大的情况下,利用一般綫路才会产生这种柔和放电。

在迴路調整至基本間隙稳定工作时,这种柔和放电便不再出現。

繼續增加脉冲波前陡度和减小脉冲长度,看来,可能出現金属击穿的情况。

按我們的綫路用发电机作电源对水銀进行击穿实验的結果証实了这一点。