

水中高压放电的二次放电现象

张寒虹 陈志福

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026)

(2000 年 8 月 7 日收到, 2000 年 11 月 2 日收到修改稿)

通过测量水中铜丝电爆炸的电流、电压波形发现水中高压放电存在着二次放电现象. 利用高速摄影拍摄了二次放电过程的高速阴影和高速扫描照片. 直观的图象证实了这一奇特的放电现象的存在. 比较了二次放电与一次放电的不同并简要分析了原因.

关键词: 高压放电, 等离子体, 高速摄影

PACC: 5280, 5290

连接^[2]. 见图 1.

2.2 光学测量系统

CFP 高速摄影机包括摄影箱、主电控箱、转镜速度控制箱及同步脉冲发生器. 纹影仪的平行光通过水箱中央的有机玻璃观察窗, 不用刀口. 放电过程的阴影图象通过附加光学系统后在高速摄影机焦平面上成象. 高速分幅摄影的拍摄频率为 6.25 万幅/s, 高速扫描摄影的扫描速度为 375m/s.

2.3 记录仪器

波形记录仪器使用 XGD 智能波形测量仪及 TDS3014 Tektronix 数字实时示波器, 记录并存储电流、电压波形.

2.4 负载

冲击大电流装置的负载为置于水箱中的一段铜丝, 电阻为 0.03Ω . 水箱中注蒸馏水, 体积为 0.04m^3 . 当电极间距为 24mm 时, 箱内水的电阻为 $33\text{--}39\text{k}\Omega$.

3 实验结果

通过大量实验发现, 当充电电容为 $180\mu\text{F}$, 充电电压为 1.4kV , 极间距为 20—30mm 时, 易产生二次放电.

3.1 典型的二次放电电流、电压波形

见图 2.

1 引言

当负载为空中的一段金属丝(或箔)时, 冲击大电流装置的主放电回路等效为 RLC 串联回路. 按照 RLC 串联回路的零输入响应, 回路电流 $i(t)$ 的波形取决于衰减系数 β 的大小($\beta = R/2L$). 当 β 很小时为衰减振荡; 当 β 增大到临界阻尼时为临界振荡. 当 β 进一步增大到过阻尼时电流不再产生振荡, 而是如同 RC 回路零输入响应, 成单调下降^[1]. 然而水中高压放电比空中复杂得多, 本文述及的一种现象是空中所没有的, 就是放电分两次完成. 放电开始时电流有一次振荡, 然后回零, 经过一段较长时间后, 又发生振荡. 我们用电测方法发现这一现象后, 再利用高速摄影捕捉到了二次放电的分幅和扫描的直观图象.

2 实验装置

2.1 冲击大电流装置

最大充电电容 $360\mu\text{F}$, 最高充电电压 50kV . 装置包括充电回路、放电回路、隔离间隙、电流测量线圈和两个电阻分压器. 电流测量线圈绕在环形铁屏蔽盒内, 流过放电电流的铜杆从环形盒的中央穿过, 线圈与铜杆组成电流互感器. 根据电磁感应原理和全电流定律测量冲击大电流; 两个电阻分压器分别接在铜丝两端, 所测波形相减即为铜丝两端的放电电压波形. 所有测量信号都采用屏蔽电缆与记录仪器

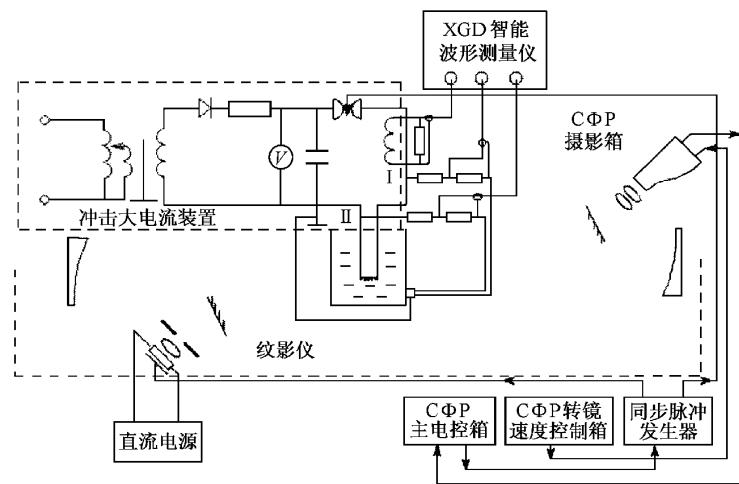


图 1 实验装置示意图

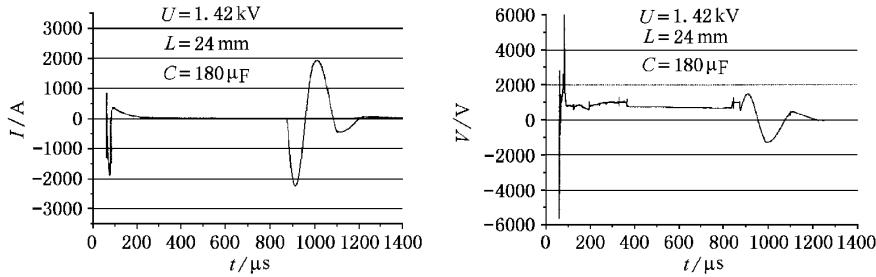


图 2 二次放电电流、电压波形图

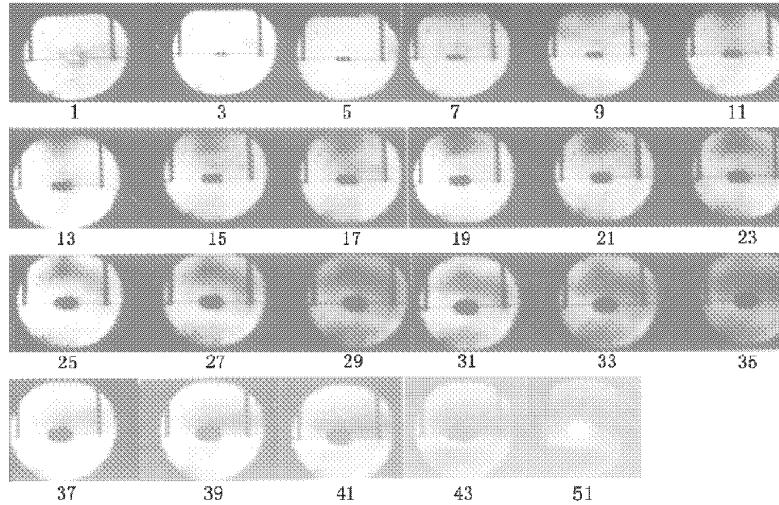


图 3 二次放电现象的高速阴影照片

3.2 高速摄影照片

1. 图 3 为二次放电现象的高速阴影照片. 拍摄频率为 6.25 万幅/s. 照片的第一幅是第一次放电，

频率为 6.25 万幅/s. 照片的第一幅是第一次放电，

铜丝已气化发光,铜丝周围的阴影区是冲击波传播的痕迹。(因为冲击波速度高而拍摄频率相对较低,冲击波不能清晰成象。)第三幅显示出电极间已经熄弧,冲击波传播的阴影直径已经扩大了数倍。水下爆炸的爆炸气体形成高压气团,亦称气球、气泡^[3]。从第三幅起气泡逐渐扩大,至第 51 幅时,气泡中出现光团,这是第二次放电的结果。两次放电相隔 50 个画幅,即 800 μ s。

2. 图 4 为第二次放电全过程的高速阴影照片。拍摄频率 6.25 万幅/s,相邻照片的时间间隔 32 μ s,第一幅照片在起爆后 750 μ s。第一幅气泡已增长较大,从第二幅开始,在气泡中央出现光团,迅速扩大、变小、再次扩大,然后逐渐熄弧,持续时间约 200 μ s。图 4 说明二次放电发生在气泡增长较大的时刻并且电弧只存在于气泡内。

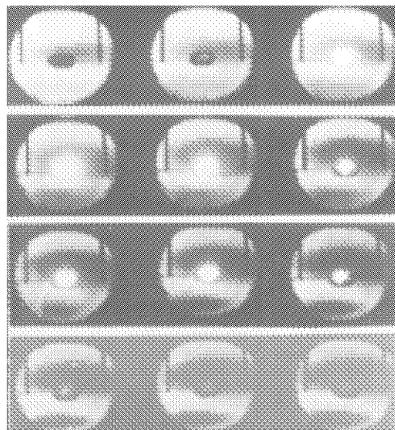


图 4 二次放电全过程的高速阴影照片

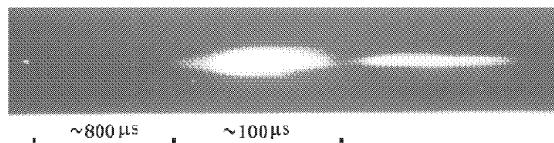


图 5 二次放电过程的高速扫描照片

3. 图 5 为二次放电过程的高速扫描照片。扫描速度 375m/s。照片显示第一次放电等离子体直径约为 1mm,持续时间 1—2 μ s;而第二次放电等离子体最大直径为 10mm,时间约为 200 μ s,两次放电间隔接近 800 μ s。为了节省篇幅,图 5 是把原始底片中熄弧部分剪短拼接而成的。时间比例在图 5 中已标明。

4. 图 6 为相同充电参数但放电一次完成的高速阴影照片。拍摄频率 6.25 万幅/s,相邻照片的时间间隔 32 μ s。照片显示一次放电的等离子体尺寸大

于气泡,不同于二次放电的等离子体始终存在于气泡内。

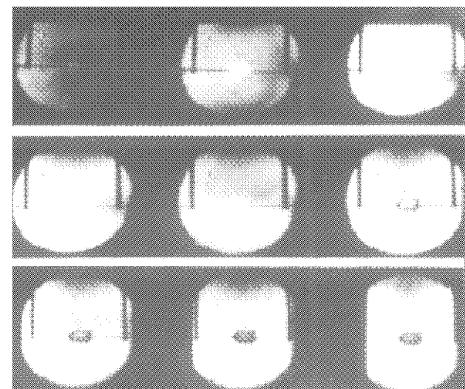


图 6 相同充电参数放电一次完成的高速阴影照片

4 结论与分析

综上所述,水中高压放电在充电电容较大、充电电压较低的情况下,对于一个特定的极间距范围存在二次放电现象。当放电分两次完成时,第一次放电时间短,等离子体半径小;第二次放电时间长,约为前者 100 倍以上;等离子体半径大,是前者 10 倍以上;两者电流峰值相近,后者稍大。两次放电的间隔为亚毫秒至毫秒。第一次放电铜丝刚刚气化形成高温、高压、高速的爆炸气体,等离子体在密度很高的爆炸气体中产生。由于充电电压较低,第一次放电后电离很难维持,放电中断,电压维持在 1000V 左右,缓慢下降。这时,由于爆炸气体膨胀形成气泡,随着爆炸气体高速运动气泡体积不断扩大,密度、压力下降^[4],当压力降至气体击穿电压对应的临界压力时,再次产生等离子体,形成第二次放电。亦即二次放电现象是由于气泡的存在和扩张。第二次放电的波形、周期与第一次放电不同,因为形成的条件不同,放电回路参数也不相同。

水中高压放电的物理过程非常复杂,由于比空气中高压放电的冲击波速度高,等离子体稳定性好,水中高压放电的应用研究成为众多学者关注的领域之一。本文发现水中高压放电存在的二次放电现象以及相关的等离子体形成、箍缩、稳定性等问题值得深入研究^[5,6]。

中国科学院合肥等离子体物理研究所任兆杏研究员,中国科学技术大学朱世尧教授对本文的完成给予了热情的帮助和有益的指导,作者表示衷心的感谢。

[1] H. S. Li , Basic of Circuits Analysis(3rd.)(Higher Education Publishing House ,Beijing ,1997), Chap. 8(in Chinese) [李瀚荪 电路分析基础(第三版) (高等教育出版社 ,北京 ,1997), 第八章].

[2] The Department of Electrical Power , Tsinghua University , Technique About Intense Pulse Current (Science Press , Beijing ,1978), Chap. 8(in Chinese) [清华大学电力系高电压技术专业编著 ,冲击大电流技术(科学出版社 ,北京 ,1978), 第八章].

[3] Encyclopediad of China Mechanics (1985), p. 441(in Chinese) [《中国大百科全书》力学卷(中国大百科全书出版社 ,北京 ,1985) 第 441 页].

[4] T. Zhang ,Technique of Measurement of Shock by Explosion (National Defence Industry Press ,Beijing ,1984), Chap. 1 (in Chinese) [张挺 爆炸冲击波测量技术 (国防工业出版社 ,北京 ,1984) 第一章].

[5] X. C. Liu *et al.* , *Journal of Beijing Institute of Technology* , 19(1999) 8(in Chinese) [刘晓春、冯长根等 北京理工大学学报 ,19(1999) 8].

[6] J. Y. Liu *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , 49(2000), 502(in Chinese) [刘金远等 物理学报 ,49(2000) 502].

THE PHENOMENON OF DISCHARGING IN TWICE OF UNDERWATER WIRE EXPLoding

ZHANG HAN-HONG CHEN ZHI-FU

(Department of Mechanics and Mechanical Engineering , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 ,China)

(Received 7 August 2000 ; revised manuscript received 2 November 2000)

ABSTRACT

The phenomenon of discharging in twice of underwater wire exploding is discovered by investigating the time characteristics of pulsed discharging current and voltage. Pictures taking by high-speed shadow photography and streak camera have testified the existence of the phenomenon. Parameters related to the phenomenon are presented in this paper.

Keywords : electronic discharging , plasma , high speed photography

PACC : 5280 , 5290