

文章编号: 1001-1455(2002)04-0363-05

水中电爆炸的实验研究*

张寒虹¹, 陈志福², 张弛³

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学自动化系, 安徽 合肥 230026;

3. 中国科学技术大学近代物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 利用冲击大电流通过水中的一段金属丝进行水中电爆炸实验, 通过对水中电爆炸的放电电压、电流波形测量以及高速阴影摄影和扫描摄影, 记录了冲击波的传播、汽泡增长和等离子体半径的时间特性; 由不同充电参数的实验, 得到了一些基本规律。比较了水中电爆炸和空中电爆炸的异同, 揭示了水中电爆炸存在的放电模式。

关键词: 电爆炸; 水下爆炸; 高速摄影

中图分类号: O384 文献标识码: A

1 引言

近来关于水中高压放电的研究向机理性研究深入, 如刘晓春等^[1]研究了水中脉冲高压放电的光辐射性质, 刘烈峰等^[2]、W. M. Lee 等^[3]研究了放电过程中金属与水的化学反应等。然而, 由于水中高压放电过程的非线性、不稳定性及分散性, 对其规律和机理的研究还很不系统。至今人们还是沿用空中高压放电的方法, 用线性微分方程来描述水中高压放电的过程^[2]。

本文中, 用高速摄影和电测相结合方法对几种参数下的水中电爆炸进行了实验研究, 发现了水中电爆炸存在着完全不同于 RLC 线性电路的放电模式。

2 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示, 金属丝作为冲击大电流装置的负载安装在有透明观察窗的水箱内, 水箱置于纹影仪视场中, 纹影仪的图象通过附加光学系统由高速摄影机记录。

2.1 冲击大电流装置

利用电容器长时间充电, 瞬时放电产生冲击大电流。冲击大电流装置由充电回路、脉冲电容器(图中未画出)、放电回路、隔离间隙及电压、电流测量部分组成。最大充电电容 360 μ F, 最高充电电压 50kV。

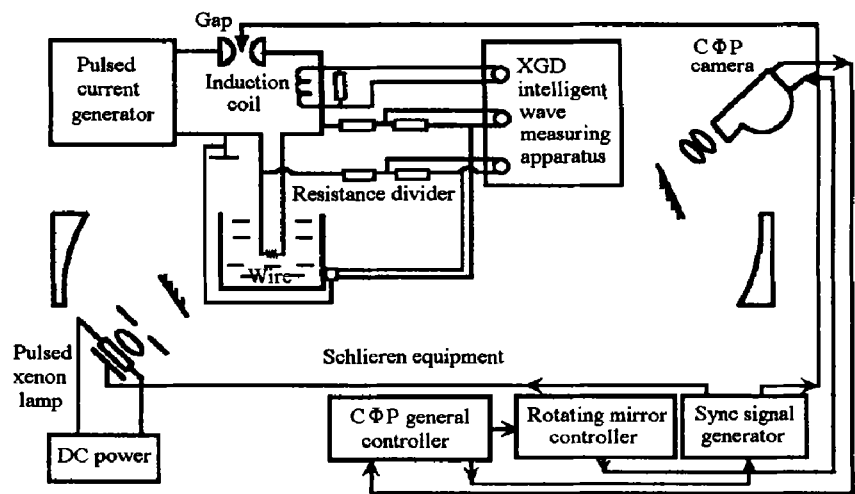


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of the apparatus

* 收稿日期: 2001-08-01; 修回日期: 2001-11-27

作者简介: 张寒虹(1945—), 女, 教授级高级工程师。

2.1.1 冲击大电流的电流、电压波形测量

以罗果夫斯基线圈与冲击大电流通过的电缆组成电流互感器,冲击大电流在线圈中产生感应电流,该电流流过信号电阻,测量信号电阻上的电压即可换算成冲击大电流;在爆炸丝两端各接一个高频响的电阻分压器(另一段接地),由分压器的低压臂上测得爆炸丝两端对地的电压波形,再相减得到爆炸丝两端的电压波形^[4]。

2.1.2 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。用电流波形触发各通道。

2.2 光学测量系统

CФP 转镜同步型高速摄影机用作光学测量的记录装置,包括摄影箱、主电控箱、转镜速度控制箱及同步脉冲发生器。摄影机可工作在分幅和扫描两种状态。分幅高速摄影机用于测量冲击波波速;扫描高速摄影机用于记录等离子体。

2.2.1 冲击波波速测量

当冲击大电流通过水中的金属丝时,由于电阻的过热效应,使金属丝迅速融化、汽化形成高温、高压的金属蒸气。金属蒸气以极高的速度向周围扩散,强烈地压缩着相邻的水介质,使其压力、密度、温度突跃式地升高,形成初始冲击波^[5]。纹影仪可把水介质密度变化变为可见的图像,与分幅高速摄影机组成高速纹影摄影系统,可以拍摄空中冲击波传播过程。由于水的散射等效应使象散严重,平行光通过水介质后不再聚焦为一点。为解决这个问题,把刀口去掉,变成高速阴影摄影装置,得到的是冲击波的阴影照片。由此测得冲击波速度。

CФP 转镜同步型高速摄影机的转镜电压由转镜速度控制箱提供,主电控箱接受摄影箱传送的转镜上方发讯器的信号,测量其周期(即为转镜转速)。当发讯器信号周期与预置值相同时给出符合脉冲至同步脉冲发生器,该发生器即产生一高压脉冲加至冲击大电流装置隔离间隙的触发极和纹影仪的光源脉冲氙灯的触发极,确保爆炸与脉冲氙灯闪光的同步。当发讯器的角度使转镜位置与胶片相匹配时,爆炸、脉冲氙灯闪光与拍摄时刻就实现了同步。

2.2.2 气泡运动观测

高温高压的金属蒸气膨胀到极限体积时,其压力与周围的水介质压力相等。由于惯性,金属蒸气的运动不会立即停止,会过度膨胀,使压力低于周围的水介质,水反过来压缩金属蒸气,使其体积缩小。同样,当两者压力相等时,水也不会立即停止运动,会过度压缩金属蒸气。这样金属蒸气在水中过度膨胀、压缩、过度压缩再膨胀的循环就形成了气泡(亦称空泡)的脉动^[5]。气泡的运动发生在起爆后毫秒量级的时刻,不可能在记录冲击波传播的同时拍摄。为此,增加脉冲氙灯直流电源的充电电容使闪光脉宽增加,调节高速相机转镜上方发讯器的角度使拍摄时刻延迟毫秒量级,从而记录到气泡运动的图象。

2.2.3 等离子体半径测量

转镜高速摄影机工作在扫描状态。狭缝垂直于电流方向,视场为放电通道的中部,不使用光源。当转镜旋转时,由放电产生等离子体的狭缝像在胶片上扫描,记录下等离子体半径随时间变化的轨迹。从而观察等离子体的不稳定性,测量等离子体半径的时间特性。

3 实验结果与分析

3.1 充电电压较高、容量较小时的放电特性

当充电电压较高(如 10kV 以上)、容量较小(如 10 μ F 左右)时放电特性与空中相似,电压、电流波形是衰减的正弦振荡,见图 2,其等效电路可用 RLC

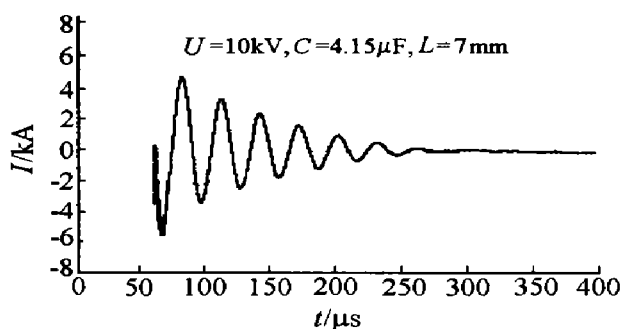


图 2 水中丝爆炸的一种电流波形图
Fig.2 Time characteristic of current
for the discharging in water

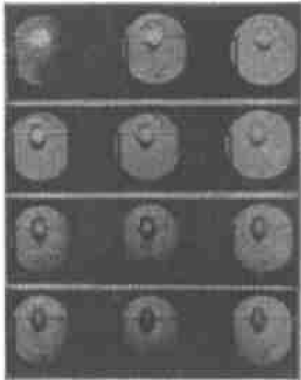
线性电路表示^[6-7]。所不同的是冲击波速度高、汽泡明显、等离子体有断裂现象。为了对比起见,图3给出了空中丝爆炸的高速纹影照片。拍摄频率12.5万幅/s,照片间隔 $16\mu\text{s}$,电容储能200J(电容 $4.15\mu\text{F}$,充电电压10kV)。由照片测得冲击波速度为590m/s。

3.1.1 水中丝爆炸的冲击波传播特性

图4是水中丝爆炸的高速阴影摄影照片,拍摄频率为25万幅/s,照片间隔 $8\mu\text{s}$,充电能量100J(电容 $4.15\mu\text{F}$,充电电压7kV)。照片图4显示出了水中丝爆炸形成的冲击波传播、衰减、反射及波阵面弥散的过程。由高速阴影照片测量出电容储能为100~200J时水中丝爆炸的冲击波速度为1560~2190m/s,比相同能量的空中丝爆炸冲击波速度大数倍。这一点从比较图3和图4的波阵面扩展速度亦可看出。入射冲击波到达容器底面的滞留时间约 $10\mu\text{s}$ 。照片还显示从水-空气界面的反射波后的介质密度发生了明显变化。由于照片是在尺寸有限的容器拍摄的,容器壁对反射波及介质的运动影响复杂,有些现象还需要进一步研究。

3.1.2 水中电爆炸的汽泡

图4显示出起爆后汽泡逐渐增大(纹影仪光路与爆炸丝平行)。图5为丝爆炸后 $500\mu\text{s}$ 汽泡的高速阴影照片,拍摄频率为6.25万幅/s,纹影仪光路与爆炸丝相垂直。照片显示了起爆后0.5ms的汽泡扩张过程,测得汽泡扩张速度约为30~40m/s。而空中电爆炸无明显空泡现象(见图3)。



3 空中丝爆炸高速阴影照片
Fig.3 High speed shadow picture for the discharging in the air

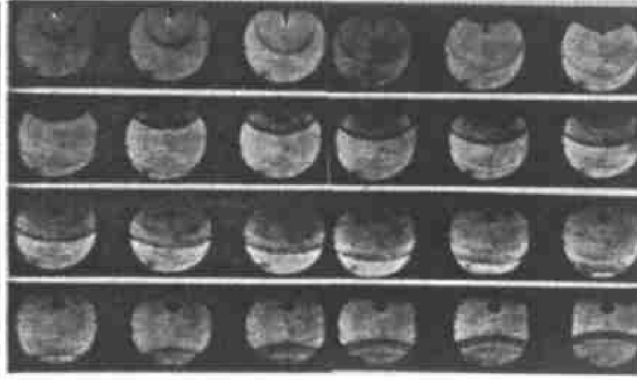


图4 水中丝爆炸高速阴影照片
Fig.4 High speed shadow picture for the discharging in water

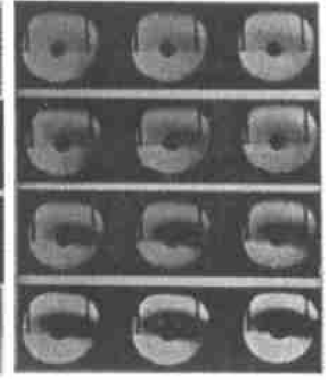


图5 汽泡扩张的阴影照片
Fig.5 High speed shadow picture of the bubble for the discharging in water

3.1.3 电爆炸的等离子特性

图6为空中电爆炸的高速扫描摄影照片,扫描速度375m/s,充电电压10kV,电容 $4.15\mu\text{F}$,电极间距为7mm。照片显示出等离子体脉宽约 $200\mu\text{s}$,连续但有明显的螺旋不稳定。图7(a)~(c)是扫描速度为1500m/s的水中电爆炸的高速扫描摄影照片,横向放大率为0.32。照片显示:对于充电电容较小、电压较高的情况,当放电开始时立即产生半径很小的等离子体,约 $3\mu\text{s}$ 以后断裂。几至几十微秒以后再产生较稳定的等离子体,直至放电完毕。断裂时间与极间距关系密切,极间距越大断裂时间越长;等离子体脉宽较短,亮度均匀,比空中电爆炸稳定。

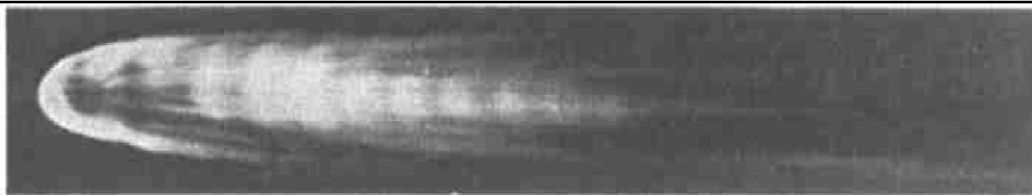


图6 空中电爆炸的高速扫描摄影照片
Fig.6 Smear pictures of plasma for the discharging in the air

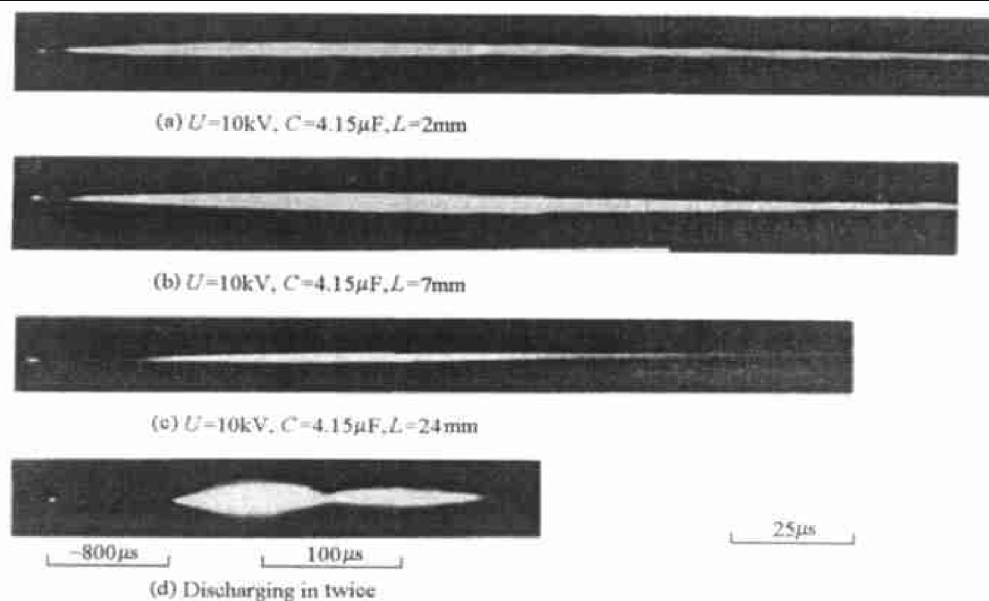


图 7 水中丝爆炸等离子体扫描照片

Fig.7 Smear pictures of plasma for the discharging in water

3.2 充电电压较低、容量较大时的放电特性

当电容容量较大,电压较低的情况下,水中丝爆炸按照电极间距的大小存在着三种模式:第一种,当极间距较小时,电流波形有振荡,但不规则,从放电的电压、电流波形看,放电回路表现出明显的非线性,见图 8;第二种,当极间距较大时,电流波形没有振荡,上升至峰值后,缓慢单调衰减至零,放电时间长,类似于 RC 放电回路;第三种,当极间距在上两种之间的某个范围,出现二次放电现象^[8],见图 9。电流波形第一次振荡后回到零点,电压维持在稍低一点的水平上,在毫秒量级的时间后电流又出现较规则的振荡,约一个周期后再单调衰减至零。二次放电的出现有一定随机性,但概率相当大。例如电容容量为 $180\mu\text{F}$,充电电压 1.42kV ,极间距(爆炸丝长) 24mm 时,出现二次放电的概率大于 50% 。作者拍摄到很多二次放电的高速摄影照片,曾对该放电现象进行了较详细的描述^[8]。第二次放电发生在气泡增长较大的时刻,而且只存在于气泡内,也不形成冲击波,其放电通道与第一次放电完全不同。第一次放电是金属丝熔断汽化前通过导电介质的放电,第二次放电是等离子体放电。值得重视的是,第二次放电的电流峰值可大于第一次放电。扫描照片(见图 7(d))显示,第二次放电的等离子体径向尺寸比第一次大数倍,脉宽长、均匀而稳定。为了节省篇幅,该图是把原始底片中熄弧部分剪短拼接而成的,时间比例在图的下方已标明。

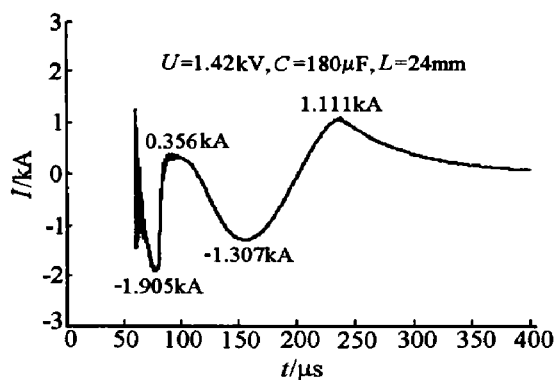


图 8 水中电爆炸的一种电流波形图

Fig.8 Time characteristic of current for underwater discharging

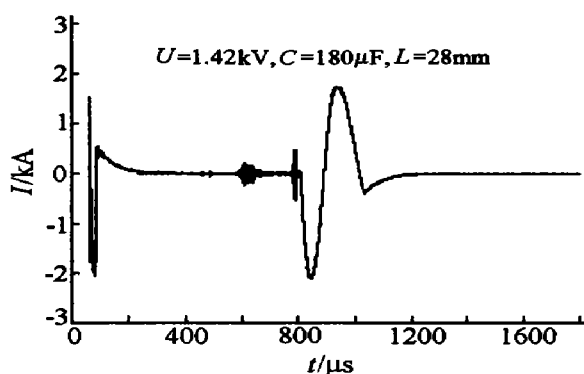


图 9 水中电爆炸的二次放电电流波形图

Fig.9 Time characteristic of current for underwater discharging in twice

参考文献:

- [1] 刘晓春,冯长根,朱祖良,等.水中高压脉冲放电的光辐射研究[J].北京理工大学学报,1999,19(1):8-12.
LIU Xiao-chun, FENG Chang-gen, ZHU Zu-liang, et al. Light Radiation from Pulsed Discharges in Water[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 19(1): 8-12.
- [2] 刘烈峰,周之奎.水中铝丝电爆炸反应的研究[J].爆炸与冲击,1997,17(1):57-62.
LIU Lie-feng, ZHOU Zhi-kui. Investigation of the Aluminum/Water Chemical Reaction Driven by Pulsed Power[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1): 57-62.
- [3] Lee W M, Ford R D. Metal/Water Chemical Reaction Coupled to a Pulsed Electrical Discharge[J]. J Appl Phys, 1991, 69: 6945.
- [4] 清华大学电力系高电压技术专业.冲击大电流技术[M].北京:科学出版社,1978:138-143.
The Department of Electrical Power, Tsinghua University. Technique About Institute Pulse Current[M]. Beijing: Science Press, 1978: 138-143.
- [5] 中国大百科全书·力学[M].北京:中国大百科全书出版社,1985:103-104.
Encyclopaedia of China·Mechanics[M]. 1985: 103-104.
- [6] 刘宗德,丰树平,孙承纬,等.冲击大电流高加热率实验装置研究[J].爆炸与冲击,1995,15(4):315-321.
LIU Zong-de, FENG Shu-ping, SUN Chen-wei, et al. Studies on High Heating Rates Apparatus[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(4): 315-321.
- [7] 高顺受,杨礼兵,陈英石,等.电感储能脉冲功率调节系统的研究[J].爆炸与冲击,1997,17(1):50-56.
GAO Shun-shou, YANG Li-bing, CHEN Ying-shi, et al. An Inductive Energy Pulsed Power Conditioning System[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1): 50-56.
- [8] 张寒虹,陈志福.水中高压放电的二次放电现象[J].物理学报,2001,50(4):748-751.
ZHANG Han-hong, CHEN Zhi-fu. The Phenomenon of Discharging in Twice of Underwater Wire Exploding[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(4): 748-751.

Experimental Reserches on Underwater Wire Exploding

ZHANG Han-hong, CHEN Zhi-fu, ZHANG Chi

(Univercity of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: High speed shadow photography and streak photography are used to study underwater wire exploding. The exploding and its effects such as shock wave, plasma and cavity pictures are obtained and shown. Some regularities are obtained according to those pictures and the time characteristics of the current and the voltage for discharging. The differences between underwater and in air wire exploding and some mode of discharging underwater are introduced in this paper.

Key words: exploding by discharging; exploding underwater; high speed photography