Journal of Applied Acoustics

纪念应崇福院士诞辰100周年

# 液电冲击波在液固介质中的传播观测\*

# 廉国选节 胡中韬 王小民

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

**摘要** 冲击波是一种高速瞬态的强烈非线性波动现象,在流体力学和材料力学、国防军工等领域有重要的学术意义和应用价值。冲击波在液体和固体介质中的清晰观测比较困难,但这种研究又不可或缺。该文采用高压电火花放电技术在水中产生厘米级的球形空泡,空泡膨胀后接着收缩崩塌,在极短时间和极小空间内释放出的能量在水中产生冲击波。结合纹影法和动态光弹法,使用高速摄像机和脉冲激光器组成的纹影-动态光弹法冲击波观测系统,可实现冲击波在液固介质中传播过程的高分辨率观测,为进一步研究冲击波的相关理论和应用技术提供了一种实验手段。

关键词 液电冲击波,纹影-动态光弹法观测系统 中图法分类号:O426.3 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2018)05-0701-05 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.014

### Observation of hydroelectric shock wave propagating in liquid and solid

LIAN Guoxuan HU Zhongtao WANG Xiaomin

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Shock wave is a kind of extremely fast, strong, and nonlinear phenomenon and its cliffy wavefront is hard to be observed clearly in liquid or solid. However, it has been paid much attention because of the great values in fluid and material mechanics, defense, military or other application. Here a hydroelectric bubble produced by a high voltage discharge spark is recommended as a shock wave source with good repeatability, easy maneuverability and enough safety. During the first end of the bubble's expand-contract period, it will collapse suddenly within a tiny space and burst an outgoing shock wave spherically. The diameter can reach several centimeters when the cavitation bubble expands to its maximum volume. Depending on the Schlieren method and dynamic photo-elastic principles, a shock wave observation system is constructed with a high-speed camera and a pulse laser together. The new system successfully captures a series of clear snap-shots of shock wavefront propagating in liquid and solid in our experiments. It shows a promising tool for the further shock wave research and application.

Key words Hydroelectric shock wave, Schlieren and dynamic photo-elastic system

<sup>2018-07-02</sup> 收稿; 2018-08-02 定稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金委重大科研仪器研制项目(11427809)

作者简介: 廉国选(1969-), 男, 山西人, 博士, 研究员, 研究方向: 检测超声, 无损检测, 超声换能器, 超声相控阵成像。

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通讯作者 E-mail: lian@mail.ioa.ac.cn

## 1 引言

冲击波是一种强烈的瞬态非线性波动现象,在 自然界中广泛存在,相关研究一直是学术和工程领 域的热点。在军事领域,爆炸冲击波是武器效应的 主要损毁方式之一<sup>[1-5]</sup>。在医学领域,自20世纪80 年代末起,冲击波碎石术开始应用,相应的理论和技 术研究一直在持续<sup>[6-9]</sup>。

产生冲击波有多种方法,但从安全性、可控制 性等角度而言,在实验室利用爆炸产生冲击波具有 一定难度。水下高压放电技术在静止液体中产生 电火花空泡,空泡在急剧压缩时会发生崩塌,崩塌 时气泡内部会产生"三高":高密度、高压强和高温, 这些是声致发光、声化学等声空化现象的作用机 理<sup>[10-11]</sup>,同时会向外部辐射冲击波,称为液电冲击 波。电火花空泡的产生可精确触发,重复性好,是一 种安全的冲击波产生手段,适宜进行实验研究。由 于气泡崩塌是一个瞬时发生的复杂物理过程,很多 研究采用数值仿真和实验方法。数值仿真计算一般 采用各种有限元软件<sup>[1-4]</sup>,研究冲击波的传播、聚 焦以及与固体结构的作用等。实验方法主要采用压 力传感器探针或水听器<sup>[5,8,12-15]</sup>、纹影法<sup>[16-18]</sup>和 动态光弹法<sup>[19-22]</sup>,用于测试和观察冲击波的压力 载荷、在流固介质中的波动场或应力场。纹影法和 动态光弹法可对透明液体和固体介质中的冲击波 进行全场成像,且对波场无干扰,是研究冲击波的重 要实验手段。

本文采用自主研发的纹影-动态光弹冲击波观 测系统,实现了液电冲击波在液体和固体介质中传 播过程的高分辨率观测。

#### 2 水下电火花空泡冲击波源

本文采用中科院声学所和中科院电工所合作 研发的高压脉冲放电空泡发生系统,如图1所示。水 下放电电极采取两根细铜丝搭接的方式连接,当施 加高电压时,由于两个电极间的接触电阻很小,在触 点处产生很高的电流密度。脉冲电流瞬间产生的大 量电阻热使触点处的温度骤然升高,附近的液体被 迅速汽化产生蒸汽空泡。空泡中的两个铜丝在高温 中被熔断,使两个电极分离,产生缝隙,形成空载电 压。空载电压在电极间建立的电场具有很大的电场 强度,可使空泡内的水蒸气发生电离,产生高温等离 子体脉冲电弧,使空泡进一步变大。脉冲放电结束 后,两极间介质进行消电离,恢复绝缘状态,球形空 泡也随之溃灭。

水下电火花放电能量的瞬间释放形成空泡,在 空泡体积膨胀到最大时,空泡的泡壁速度虽然为零, 但是空泡处于力学的不平衡状态,此时加速度最大。 空泡内外的巨大压差促使空泡开始向内迅速坍缩。 当空泡溃缩至空泡的平衡半径时,虽然内外压差为 零,但此时空泡的泡壁速度最大,周围液体的惯性力 促使空泡进一步向内坍缩,直至崩塌,空泡内部以及 周围液体的压力迅速升高,形成一个很高的压力脉 冲,即冲击波,并向外传播,如图1所示。



图 1 电火花空泡发生系统示意图 Fig. 1 A schematic diagram of electric spark bubble system

#### 3 纹影-动态光弹法冲击波观测系统

纹影法利用流体密度变化引起介质的光学折 射率变化,可对流体中的波动场进行成像观测。动 态光弹法是基于光的暂时双折射效应,可观测透明 固体中超声波的传播和散射现象<sup>[23]</sup>。本文采用图2 所示的纹影-动态光弹冲击波观测系统,可同时观测 电火花空泡产生的冲击波在液体和固体介质中的 传播现象。

在图2中,当检偏器与起偏器夹角垂直时(偏振 方向1和3),即是动态光弹系统,能够对透明固体 介质中的波动应力场进行动态成像。调整检偏器, 使其与起偏器不垂直(偏振方向1和2,夹角为80°), 有部分照射光得以透射。透射光遵从纹影法成像原 理,可对水中冲击波进行暗场成像;未透射的部分仍 旧遵从动态光弹法成像原理,对固体中的应力波场 进行亮场成像。由于使用的是部分偏振光,减弱了 纹影成像的照射光强度,还增加了动态光弹法的背 景光,虽然能够实现液固介质中波动场的一次成像, 但降低了系统的观测灵敏度或图像对比度。

传统的纹影法或者动态光弹法由于需要"冻结"快速传播的声波,一般单独采用高速相机或者脉冲光源。在本文的实验中,由于电火花的发光时刻与冲击波之间存在毫秒级的时间间隔,普通

相机难以精确避开电火花的强光,因此无法对其 后的冲击波拍照。本系统使用日本 Photron 公司的 FASTCAM SA1.1高速摄像机,拍摄速度最快可到 675000 帧/s,快门速度最高可达370 ns,可通过控 制同步信号避开电火花的强光干扰,对冲击波的纹 影图像和动态光弹图像进行拍摄。另外,即使摄像 机在最高帧率和最高快门速度模式工作,介质中的 声波也有毫米级的行程,不能够对陡峭的冲击波波 前进行清晰成像,因此在使用高速摄像机的同时,系 统采用脉冲宽度为7.6 ns、峰值功率达到兆瓦级的 脉冲激光器进行照射,瞬时"冻结"快速传播的冲击 波,实现纹影-动态光弹法的清晰成像。



图 2 纹影-动态光弹观测系统 Fig. 2 Schlieren-photoelastic observation system

#### 4 实验结果

采用上文所述的高压电火花放电装置和纹影-动态光弹法冲击波观测系统,我们对电火花空泡产 生的冲击波在液体和固体中的传播现象进行了观 测。实验采用两根0.05 mm的导电铜丝搭接,放电 电容的充电电压设置为500 V,瞬时放电电流可达 到上万安培。图3是一个典型的电火花空泡的膨 胀和溃灭过程,其中图3(a)是电火花空泡产生、溃 灭、回弹和产生一次与二次冲击波的时间历程示意 图,对应的高速摄影图像如图3(b)所示,拍摄帧率 为20000帧/s。电火花放电后在空泡迅速膨胀初期, 形成一次冲击波,空泡在惯性力的作用下继续膨胀 到最大体积(1.10 ms, 直径约9 mm), 然后在空泡内 外压差的作用下迅速坍缩,在溃灭到最小体积时产 生二次冲击波(1.95~2.05 ms)。因为放电火花的强 光干扰,难以对一次冲击波进行有效拍摄,本实验将 对空泡溃灭时产生的二次冲击波进行拍摄。

值得说明的是,虽然实验中采用导电铜丝搭接

的电火花放电方式,相对于固定电极有更好的一致 性和重复性,但因为充电电压的误差以及铜丝搭接 的紧密程度的差异,致使空泡体积及其溃灭时间产 生微小的差异,整个过程存在约微秒级的时间误差, 即使采用高精度的同步延时电信号将激光与放电 过程同步,也难以准确地重复实验,因此需要进行 多次重复试验,才能在冲击波产生后抓取到所需时 刻的图像。同时由于脉冲激光器的重复频率只有 10 Hz,单次实验也只能拍摄一张图像。后期考虑采 用多脉冲激光器或至少两路可控延迟同步脉冲激 光器,类似于多点序列电火花光源的照射方式,对一 次冲击波进行多次拍摄。

图4为经过多次重复实验获得的电火花空泡第 一次溃灭时产生的冲击波传播图像,每幅图像拍摄 的是各自的放电空泡产生的冲击波,并不是一次冲 击波不同时刻的传播图像。电火花放电位置位于图 像上边缘的中心处,图像中间位置的水平黑线是上 方水介质和下方K9玻璃的界面。K9玻璃中有一个 人工裂缝缺陷。图4(a)、图4(b)是冲击波产生后在







(b) 空泡运动的高速摄影



Fig. 3 The formation and collapse process of electric spark bubble





水中的传播过程,波前清晰、陡峭,呈空间点源辐射的标准圆弧状。图4(c)~图4(e)是冲击波达到固体介质后的传播图像,可清楚观测到冲击波在液固界面的反射、在固体介质中辐射的强度分布以及在人工刻槽尖端的反射现象。图4(f)是冲击波经过固体上下界面多次反射形成的应力混响场。在图4(d)中,当冲击波到达人工刻槽的尖端时,机械加工残余

应力场和尖端衍射应力场与冲击波场叠加,共同作 用形成了暗点,进一步的详细研究将结合数值仿真 技术,在后续的研究工作中进行。

#### 5 结论

采用电火花空泡溃灭的方式可以在实验室条件下产生稳定的液电冲击波。通过将纹影法和动态 光弹法结合起来,同时采用高速摄像机和脉冲激光 器,组成了纹影-动态光弹冲击波观测系统。系统可 以有效避开电火花放电的强光干扰,实现了液固介 质中冲击波传播图像的观测,成像效果清晰,可用于 液固介质中冲击波理论和应用技术的实验研究。

**致谢** 本文在研究和实验过程中得到了白立新博士的大力帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献

 任鹏,张伟,刘建华,等.高强度水下爆炸等效冲击波加载特 性研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 716-722. Ren Peng, Zhang Wei, Liu Jianhua, et al. Characteristics of high strength underwater explosion equivalent shock loading[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(4): 716–722.

- [2] 贾则, 刘建兵, 权琳, 等. 球形炸药水下爆炸的舰船空化效应研究 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40(5): 14–18.
  Jia Ze, Liu Jianbing, Quan Lin, et al. Research on cavitation effect of warship underwater explosion by spherical explosive[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(5): 14–18.
- [3] 张艺凡,宗智,张文鹏.水下冲击波作用下结构损伤的数值预 报误差分析 [J].中国舰船研究, 2011, 6(6): 38-44. Zhang Yifan, Zong Zhi, Zhang Wenpeng. Error analysis of numerical prediction of structure damages subjected to underwater shock[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(6): 38-44.
- [4] 张振华,朱锡,白雪飞.水下爆炸冲击波的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 182–188.
  Zhang Zhenhua, Zhu Xi, Bai Xuefei. The study on numerical simulation of underwater blast wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 182–188.
- [5] 杨志焕, 朱佩芳, 蒋建新, 等.水下冲击波的生物效应 [J]. 爆 炸与冲击, 2003, 23(2): 134–139.
  Yang Zhihuan, Zhu Peifang, Jiang Jianxin, et al. Bioeffects of underwater blast waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 134–139.
- [6] Chaussy C, Schmiedt E, Jocham D, et al. First clinical experience with extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves[J]. The Journal of Urology, 1982, 127(3): 417–420.
- [7] 何申戌, 孟广栋, 张禄逊, 等. 液电冲击波膀胱碎石的原理及 其临床应用中的几个问题 [J]. 北京医学院学报, 1983, 15(4): 279–282.
- [8] Smith N, Zhong P. Stone comminution correlates with the average peak pressure incident on a stone during shock wave lithotripsy[J]. Journal of Biomechanics, 2012, 45(15): 2520–2525.
- [9] Donaldson J F, Lardas M, Scrimgeour D, et al. Systematic review and meta-analysis of the clinical effectiveness of shock wave lithotripsy retrograde intrarenal surgery, and percutaneous nephrolithotomy for lower-pole renal stones[J]. European Urology, 2015, 67(4): 612–616.
- [10] 应崇福,安宇. 声空化气泡内部的高温和高压分布 [J]. 中国科学(A辑), 2002, 32(4): 305–313.
- [11] 应崇福.新世纪内声空化声致发光的研究进展——兼论声 致热核聚变和声(致)化学[J].中国科学(G辑),2007,37(2): 129-136.
- [12] 宁心,李晓炎,杨志焕,等.水下冲击波和空气冲击波传播速 度及物理参数的对比研究 [J]. 解放军医学杂志, 2004, 29(2): 97-99.

Ning Xin, LI Xiaoyan, Yang Zhihuan, et al. A comparative study on the propagation speed and physical parameters of underwater blast wave and air blast wave[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2004, 29(2): 97–99.

[13] 张振福,曾新吾,王一博,等. 基于水下脉冲放电的冲击波聚

焦实验研究 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(4): 54–57. Zhang Zhenfu, Zeng Xinwu, Wang Yibo, et al. Experimental study of the focusing property of underwater pulsed discharge shock wave[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(4): 54–57.

- [14] 胡杨,陈永涛,金山.用于冲击波速度测量的自检式光纤传感系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2444-2448.
  Hu Yang, Chen Yongtao, Jin Shan. Self-check fiber-optic sensor system in shock-wave velocity detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2444-2448.
- [15] 刘小龙,黄建国,雷开卓.水下等离子体声源的冲击波负压特性 [J]. 物理学报, 2013, 62(20): 1–7.
  Liu Xiaolong, Huang Jianguo, Lei Kaizhuo. Shock wave negative pressure characteristics of underwater plasma sound source[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 1–7.
- [16] 李斌, 王雨, 周志强, 等. 爆炸冲击波威力高速纹影测量方法 [J]. 光学与光电技术, 2018, 16(2): 43-49.
  Li Bin, Wang Yu, Zhou Zhiqiang, et al. High-speed schlieren photography for measuring the explosive blast wave power[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(2): 43-49.
- [17] Martí-López L, Ocaña R, Piñeiro E, et al. Laser peening induced shock waves and cavitation bubbles in water studied by optical schlieren visualization[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 442–451.
- [18] Vaisakh S, Muruganandam T M. Schlieren measurement of 'normal-spanwise length' of a bifurcated normal shock wave in a rectangular duct[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 96: 43–47.
- [19] 吴春平, 钟冬望. 动光弹原理及其在爆破理论研究中的应用 [J]. 武汉科技大学学报:自然科学版, 2006, 29(1): 55-58.
  Wu Chunping, Zhong Dongwang. Dynamic photoelastic method and its application to blasting research[J]. Journal Of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 29(1): 55-58.
- [20] 张宏梅, 陆渝生, 储伟俊, 等. 冲击荷载作用下球壳形遮弹板应 力场的动光弹试验研究 [J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 335–338. Zhang Hongmei, Lu Yusheng, Chu Weijun, et al. Study on stress field of spherical anti-penetration plate acted by impulsive load using dynamic photo elasticity[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 335–338.
- [21] 朱振海. 爆炸波与地下结构物相互作用的动光弹性探讨 [J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(3): 276-280.
  Zhu Zhenhai. Studies on the interaction of blasting stress waves with a underground structure by dynamic photoelasticity[J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(3): 276-280.
- [22] 武伟.用动光弹法研究瞬态表面载荷的破坏作用 [J].北京科技大学学报, 1991, 13(3): 202-206.
  Wu Wei. Dynamic photoelastic analysis of breakage action of transient contact loads[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1991, 13(3): 202-206.
- [23] 应崇福. 超声在固体中的散射 [M]. 北京:国防工业出版社, 1994.