

基于水下脉冲放电的冲击波聚焦实验研究*

张振福¹, 曾新吾², 王一博², 蔡清裕²

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南长沙 410073;

2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:冲击波的聚焦可以在聚焦区域形成局部较高的压力。基于能产生较强冲击波的水中脉冲放电声源和具有会聚作用的旋转椭球面反射罩建立了水下冲击波聚焦系统,开展了水下冲击波聚焦的实验研究,分析了水下冲击波的聚焦过程。对压力历史、轴线上的压力分布及峰值压力进行了分析,研究了旋转椭球面反射罩的聚焦特性。实验发现聚焦区域会产生负压,并导致局部空化。基于冲击动力学理论对这一现象进行了分析。实验结果表明,水下冲击波聚焦系统具有显著的聚焦效果。

关键词:冲击波聚焦;实验研究;椭球面反射罩;负压

中图分类号: O382.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1011-2486(2012)04-0054-04

Experimental study of the focusing property of underwater pulsed discharge shock wave

ZHANG Zhenfu¹, ZENG Xinwu², WANG Yibo², CAI Qingyu²

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Opto-electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Shock wave focusing can produce higher pressure in the focal region. An underwater shock wave focusing system was set up based on the pulsed discharge in water and the focusing characteristics of ellipsoidal reflector. The focusing of shock wave was studied experimentally; the focusing process of shock wave was analyzed. The pressure-time history and the peak pressure along the axial position were presented, the distributing characteristics of the focusing shock wave were revealed. Negative pressure and cavitation phenomenon was induced by shock wave focusing, and the phenomenon was analyzed based on shock dynamic theory. The experimental results indicate that the focusing effect of the ellipsoidal reflector is remarkable.

Key words: shock wave focusing; experimental study; ellipsoidal reflector; negative pressure

水中脉冲放电所产生的冲击波与水下爆炸所产生的冲击波具有相似的特性,水中脉冲放电是将电能极短时间内转化为冲击波能。水中脉冲放电声源具有连续发射、安全高效、频率覆盖范围宽等特点^[1-2]。

水中脉冲放电声源属于点状声源,它一般不具有方向性或者具有弱方向性。而水下冲击波聚焦系统是一种水中脉冲放电声源与旋转椭球面相结合形成的水下声能定向装置。通过水下脉冲放电产生冲击波并经反射会聚可以得到高能量密度的超压脉冲。水下冲击波聚焦系统具有压力峰值高、频响范围宽和信号易控制等众多优点,广泛应用于冲击波碎石、水中空化、医学治疗等医学领域以及水下远程通信、水声遥测遥控、海洋勘探探测等军事领域。水下冲击波聚焦系统由置于椭球

第一焦点的脉冲放电电极及旋转椭球面反射罩组成(如图1)。脉冲放电电极位于椭球第一焦点 F_1 处,按照线性声学原理,声波在椭球面上反射后将在第二焦点 F_2 处聚焦^[3]。

本文以水中脉冲放电声源为基础,结合旋转椭球面反射罩建立了水下冲击波聚焦系统。应用该系统及NI公司的压力测量系统对水下冲击波聚焦行为进行了研究。通过测量声场中不同位置处的声脉冲波形和峰值压力,研究了聚焦声场的分布特性。实验结果发现,通过旋转椭球面反射罩可以在局部形成较高的冲击波压力。

1 实验装置

1.1 水中脉冲放电声源

图2为水中脉冲放电声源原理性示意图,它

* 收稿日期:2011-09-23

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:张振福(1982—),男,河北唐山人,博士研究生,E-mail:zhangzhenfu198206@163.com;

曾新吾(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xinwuzeng@nudt.edu.cn.

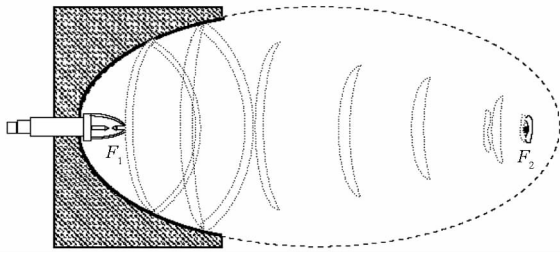


图1 水下冲击波聚焦系统

Fig. 1 Underwater shock wave focusing system

由升压器 T 、储能电容 C 、场畸变开关 S 和水中放电间隙 G 构成。储能电容 C 上充有高压 U ，当开关 S 接通时，电容 C 上的高压 U 突然加到水中放电间隙 G 上，使 G 击穿，电容 C 就经过 S 和 G 迅速放电（放电时间为数微秒），由于巨大能量瞬间注入 G 的放电通道内，并产生极强的放电电流（可以达到数千安到数百千安），同时伴随较强的电磁辐射。通道中的水就迅速转化为高温放电等离子体，从而在水中产生高强度的冲击波。

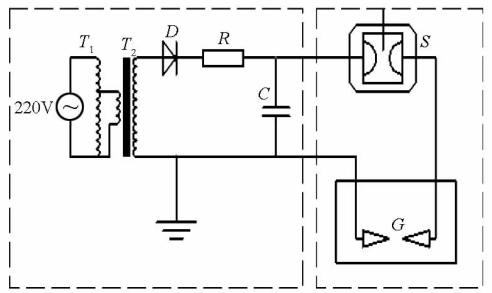


图2 水中脉冲放电声源

Fig. 2 Pulsed discharge in water sound source

实验装置中储能电容采用 $1\mu\text{F}$ 的高压脉冲电容器，升压器输出电压为 $12 \sim 20 \text{ kV}$ ；放电极为铜电极，放电间隙为 2mm 。

1.2 旋转椭球面反射罩

用于水下冲击波聚焦的旋转椭球面反射罩实物模型及聚焦原理如图3所示。旋转椭球面材料为特种钢，长半轴 a 为 500mm ，短半轴 b 为 250mm

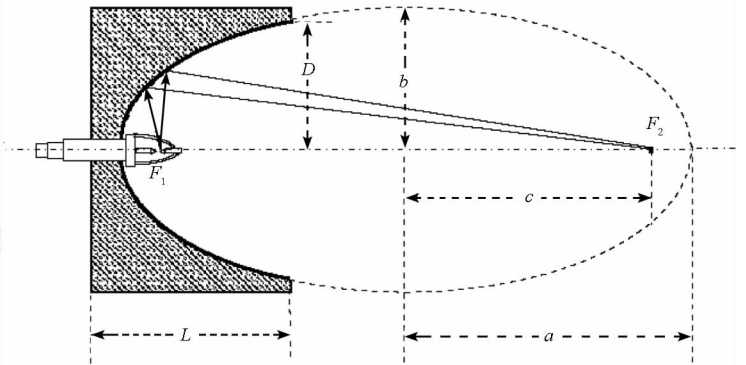
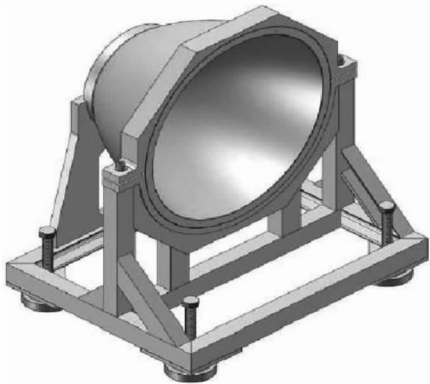


图3 旋转椭球面反射罩

Fig. 3 Configuration of ellipsoidal reflector

半焦距 c 为 433mm ，长度 L 为 300mm ，出口半径 D 为 230mm 。放电电极位于第一焦点 F_1 处。基于线性声学理论可知，声线经椭球面反射时，发生线性反射，反射角等于入射角，由椭球面性质，反射射线就会通过第二焦点 F_2 。这样就可以把原来不具有指向性的水中脉冲放电声源变为具有能量聚束作用的装置，并在焦区附近形成局部的高能量密度，得到具有指向性的高能量超压脉冲。冲击波在反射罩表面会发生非线性反射，但由于水的非线性较小，并且本文主要是研究聚焦区域的动力学行为，因此忽略了冲击波在反射罩内表面上非线性反射对冲击波聚焦的影响。

1.3 测量系统

为了研究旋转椭球面反射罩的聚焦性能和冲击波压力场分布特性，我们搭建了水下冲击波测量系统，如图4所示。包括水中压力传感器、信号

调理仪、数据采集系统及高速摄影系统。冲击波波形及幅值由 PCB 公司的 138A05 型水中压力传感器测得，其最大量程 34.5MPa （ 5V 输出），响应时间 $\leq 1.5\mu\text{s}$ 。压力信号先通过信号调理仪器，然后送入数据采集系统，显示、观察并储存压力波形数据；高速摄影系统用于实时记录实验现象。

2 实验结果及分析

实验在长 2m ，宽 1m ，高 1m 的金属水箱中进行，实验用水为自来水。在实验中，为了得到旋转椭球面反射罩的聚焦性能，在旋转椭球面中轴线上布置 7 个压力传感器，与电极的距离依次为 233mm （1#）， 433mm （2#）， 643mm （3#）， 723mm （4#）， 800mm （5#）， 866mm （6#，第二几何焦点处）及 953mm （7#），如图4所示。实验时升压器输出电压分别为 17kV 和 18kV ，由于水中脉冲放电具

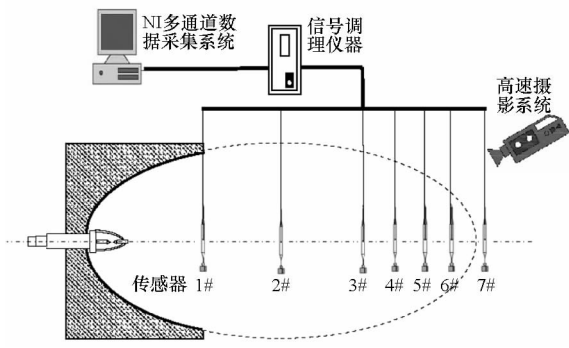


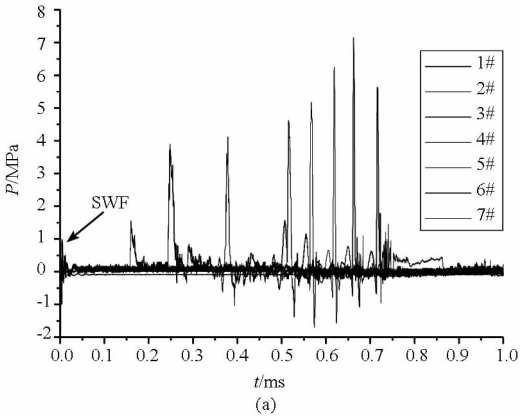
图 4 测量系统

Fig. 4 Measuring system

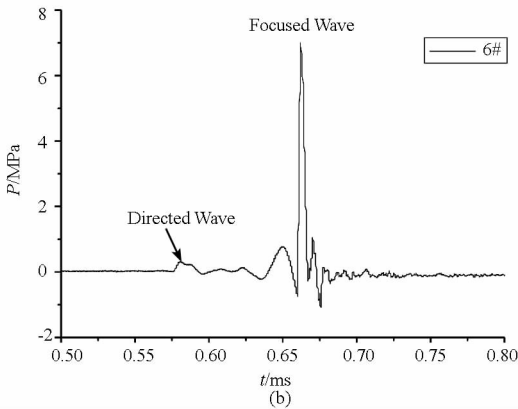
有较强的随机性,实验采用多次重复测量,最后结果采用平均值以提高测量结果的精度和可靠性。

2.1 压力历史曲线

图 5(a)为升压器输出电压 17kV 时所得各测点处的压力历史曲线,图 5(b)为几何焦点处的压力历史曲线。从图 5(a)可以看出聚焦波在传播过程中波形及幅值的变化过程。直达波幅值逐渐减小,而会聚波先增大并在几何焦点处达到最大值而后减小,可以看出冲击波在几何焦点前是



(a)



(b)

图 5 压力历史曲线

Fig. 5 Pressure-time history

会聚的,而在几何焦点后开始发散。会聚波后面的拉伸波(负压)的幅值也是先增大后减小,但最大值不出现在几何焦点处。图 5(a)中标记 SWF

为水中脉冲放电时产生较强的电磁辐射耦合到测量系统中形成的电磁干扰,这一时刻也恰好是冲击波产生的时刻。

从图 5(b)图可以看出第一个波峰为水中脉冲放电声源产生的球面冲击波直接传播到第二几何焦点形成的直达波,而后的第二个波峰为水中脉冲放电声源产生的球面冲击波经旋转椭球面反射后形成的会聚波,两者传播距离存在差异,因此导致时间上的分离。从压力峰值上看,直达波的峰值压力为 0.2817MPa,而会聚波的峰值压力为 7.12MPa,聚焦增益约为 25 倍,聚焦效果明显。由此可见,通过旋转椭球面反射罩可以在局部形成较高的冲击波压力。

会聚波后面的拉伸波(负压)的幅值最大约为 2MPa,这是由于水存在抗拉极限。在自来水中,超声方法得到的拉力极限小于 2MPa,动态加载条件下,一般为 1~4 MPa^[4]。因此,当初始冲击波强度较强时,在焦点附近会出现空化现象^[5],作者通过高速摄影系统已经观测到了这一现象。图 6 给出了焦点附近空化气泡产生及发展的过程,从空化气泡形成到湮灭持续的时间约为 0.67ms,空化气泡产生时刻与拉伸波到达后负压

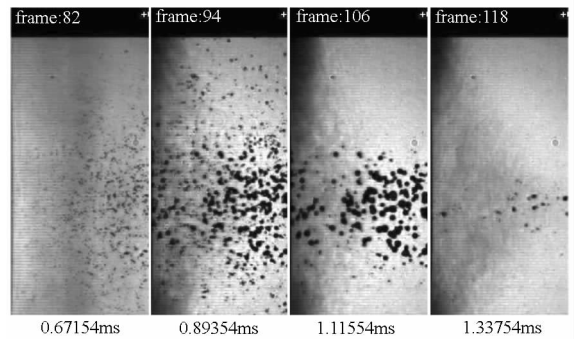


图 6 聚焦区域附近的空化气泡

Fig. 6 Cavitation bubbles in the focal region

产生的时刻较为一致。

2.2 压力峰值分布

图 7 为升压器输出电压 17kV 时轴线上的压力峰值分布,图中的竖直线为几何焦点所处位置。传感器采集到的直达波峰值压力(D_P_m)随与声源距离的增加而逐渐减小,并且衰减规律符合球面波的衰减规律。而会聚波正峰值压力($F_P_m^+$)随距离的增加呈现出先增大后减小的过程,最大值出现在第二几何焦点处。由于水中脉冲放电声源近似为球状声源,产生的冲击波为球面波,因此能量随传播距离的增加而衰减,导致未经反射的直达波的峰值压力随传播距离逐渐衰减。而转向旋转椭球面反射罩的球面波,由于特种钢与水的

声阻抗比约为 30,所以绝大部分能量被反射。根据旋转椭球面的性质和线性声学原理,反射后的冲击波将在第二几何焦点处会聚,而传过第二几何焦点后又变为发散波,这样就在第二几何焦点处形成较高的峰值压力。但由于冲击波之间的相互作用,冲击波的聚焦不会形成传统意义上的焦点而是具有一定大小的焦斑。这就使得在几何焦点附近的峰值压力不会出现突变。

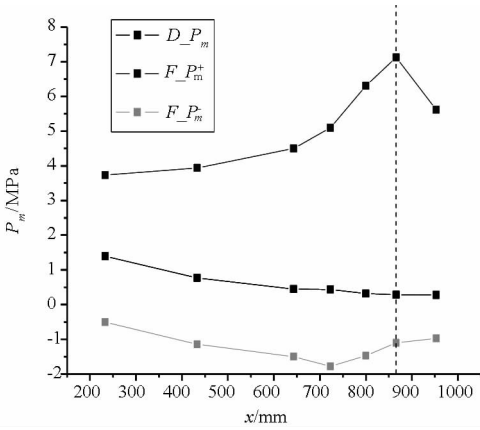


图7 轴线上的压力峰值

Fig.7 Peak pressure along the axial position

而会聚波后面的拉伸波(负压)可能是由于反射罩边缘的衍射作用形成的发散波在轴线上会聚引起的;也可能是会聚波阵面过后,波阵面上的水运动加快,会聚波阵面后面的水由于惯性不易迅速跟上,从而在会聚波阵面后形成拉伸区即负压区,此时的水处于亚稳态^[4]。会聚波负峰值压力($F_{P_m^-}$)随距离的增加呈现出先增大后减小,但最大值出现在第二几何焦点前。

2.3 聚焦增益与充电电压的关系

图8为升压器输出不同电压下测得的轴线上

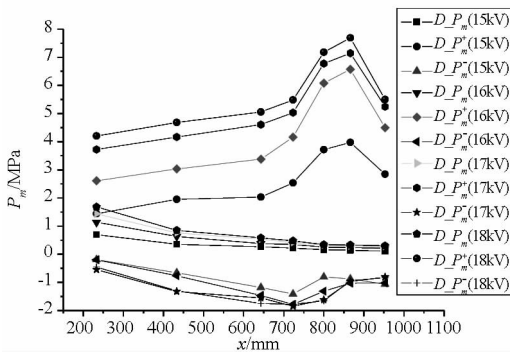


图8 不同输出电压轴线上的压力峰值

Fig.8 Peak pressure along the axial position under different discharge voltages

的压力峰值分布,每种工况重复 10 次实验,取其平均值绘图。由于升压器输出电压越高,所提供的能量就越大,因此直达波的峰值压力也越大,反

射会聚冲击波也有相似的规律。但会聚波后面的拉伸波(负压)差别不大,这是由于在 16 ~ 18 kV 电压下所提供的能量转化的冲击波会聚后在焦区附近都出现空化现象,致使会聚后所得到的会聚波负峰值压力相差不大。

3 结论

水下冲击波聚焦的应用主要为焦区的高能量密度的超压脉冲以及动态破坏性能。因此,冲击波聚焦增益及焦区附近的压力波形成为研究的重点。通过采用水中脉冲放电声源与旋转椭球面反射罩相结合的技术方案,开展了冲击波聚焦的实验研究,得到了以下结论:

- (1) 水中脉冲放电声源与旋转椭球面反射罩相结合可以有效提高局部冲击波强度,在本文的声源条件及反射罩形状和尺寸的前提下聚焦增益可达 25 倍。
- (2) 水下冲击波聚焦在焦区附近形成较高强度的冲击波的同时,还会形成拉伸波,产生负压。由于水存在抗拉极限,因此,当初始冲击波强度较强时,在焦区附近会出现空化现象。
- (3) 旋转椭球面反射罩对冲击波聚焦后的峰值压力随测点与声源距离的增加先增加后减小;在现有压力传感器布置的情况下,测得的最大峰值压力出现在椭球的第二几何焦点处。
- (4) 提高升压器输出电压可以增大第二几何焦点处会聚冲击波的峰值压力。

参考文献 (References)

- [1] Sunka P. Pulse electrical discharges in water and their applications[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2587 - 2594.
- [2] Touya G, Reess T, Pécastaing L, et al. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39: 5236 - 5244.
- [3] Müller H M. Experimental investigations of focusing of weak spherical shock waves in water by shallow ellipsoidal reflectors[J]. *Acustica*, 1987, 64: 85 - 93.
- [4] Temperley H N V, D H Trevenag. Metastable effects associated with the reflection of a pressure pulse at the free surface of water[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1979, 12: 1887 - 1894.
- [5] Chilibon I, Wevers M, Lafaut J P, et al. Cavitation role in extracorporeal shock wave lithotripsy [J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2006, 8(1): 235 - 237.
- [6] Cleveland R O, Sapozhnikov O A, Bailey M R, et al. A dual passive cavitation detector for localized detection of lithotripsy-induced cavitation in vitro[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, 107 (3): 1745 - 1758.
- [7] Pishchalnikov Y A, Sapozhnikov O A, Bailey M R, et al. Cavitation selectively reduces the negative-pressure phase of lithotripter shock pulses [J]. *Acoustics Research Letters Online*, 2005, 6(4): 280 - 286.