文章编号：1000-5773(2009)05-0332-06

一种水中爆炸气泡脉动实验研究方法*

汪 斌，张远平，王彦平

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室，四川绵阳 621900）

摘要：在 2 m×2 m×2 m 的实验水箱中开展小当量 PETN 炸药水中爆炸气泡脉动实验时，利用弹性波从声阻抗高的物质传入声阻抗低的物质时的“减震缓冲”原理，采用在水箱壁贴低声阻抗材料的方法，有效降低了水箱壁反射冲击波对气泡脉动过程的影响，获得了清晰的气泡脉动过程图像、气泡水射流形成过程图像和气泡脉动压力曲线。将水箱实验结果与 8 kg TNT 当量爆炸水池实验结果对比，得到的最大相对误差仅为 5.1%，验证了水箱实验方法的准确性，为炸药水中爆炸气泡脉动现象研究提供了一种简便有效的实验方法。

关键词：爆炸力学；水中爆炸；气泡脉动；实验方法；气泡图像
中图分类号：O382.1 **文献标识码**：A

1 引 言

炸药水中爆炸后，爆炸产物以气泡的形式不断膨胀收缩，称为气泡脉动。气泡能占炸药水中爆炸总能量的一半左右，爆炸产生的气泡脉动对舰船有很强的破坏作用。当气泡脉动频率与船体固有频率相同时，会引起舰船船体鞭状振荡响应，导致舰艇纵向总体屈曲破坏和大变形，引起舰船上的低频率设备损坏，使舰船失去战斗力。气泡在靠近舰船附近脉动时，会与舰船相互作用产生水射流，造成船体局部严重破坏，与船体受到聚能装药攻击具有相似性[1]。随着非理想炸药在水中兵器战斗部中的广泛使用，气泡能占炸药水中爆炸总能量的比例越来越高。如何充分利用气泡能产生的气泡脉动现象对舰船目标进行毁伤打击，已经成为各国水中兵器战斗部设计人员越来越关心的问题[2]。

获得水中爆炸气泡直观图像是开展气泡脉动相关研究的基础。由于水的密度是空气的 800 多倍，而压缩系数仅为空气的 1/30 000，因此水中爆炸现象有别于空中爆炸[3]。在宽阔水域中进行实验时存在很多问题：大药量炸药水中爆炸产生的强冲击波对高速相机有很强的破坏作用；炸药和压力传感器的固定、高速相机入水拍摄等都存在一定的困难；宽阔水域水质条件较差，高速相机难以获得清晰的气泡图像。法国[4]、澳大利亚[5]等国家的科研人员曾尝试在透明度较好的水池中开展气泡脉动实验研究，但其高速相机幅频只能达到 1 000 s^{-1}。由于气泡脉动过程的关键细节（如气泡收缩再膨胀过程、水射流形成过程等）在 1 ms 内完成，相机幅频过低则不能得到气泡脉动过程的细节图像，实验结果不尽人意。目前，炸药水中爆炸气泡脉动研究主要在水箱中进行。这是因为：水箱实验可以使用清洁度很高的自来水，利用照明氙灯等强光源增加水中光线强度，同时提高相机的拍摄幅频，获得更多气泡脉动过程的细节图像。为了降低爆炸冲击波对实验装置和气泡脉动过程的影响，W. Lauterborn[6]、G. L. Chahine[7]、S. Menon[8]等在实验水箱中采用激光、电火花、充可燃气体的玻璃球等作为气泡产生源，得到了气泡脉动过程的一些基本规律。张颖等人在实验水箱中采用微型 PETN 炸药球研究水中爆炸气泡脉动现象，

* **收稿日期**：2008-09-03；**修回日期**：2008-12-15
基金项目：国家安全重大基础研究项目(51335010202)；中国工程物理研究院科学技术基金(20060101)
作者简介：汪 斌(1980－)，男，硕士，助理研究员，主要从事水下爆炸研究. E-mail：wbin98221@163.com

发现水箱壁面反射冲击波对气泡脉动过程影响很大,实验结果与理论计算结果存在一定差异[9]。

根据应力波原理,本研究提出了一种在水箱壁贴低声阻抗材料的方法,有效地降低了水箱壁反射冲击波对气泡脉动过程的影响,得到了气泡自由脉动过程和气泡与固壁相互作用水射流形成过程的清晰图像,水箱实验结果与宽阔水域实验结果基本一致。

2　实验原理

由应力波理论可知[10],当入射冲击波扰动 $\Delta\sigma_{\mathrm{I}}$ 从介质 0 进入介质 1 时,在两种介质的界面上分别传播反射波 $\Delta\sigma_{\mathrm{R}}$ 和透射波 $\Delta\sigma_{\mathrm{T}}$,反射波和透射波强度的计算公式为

$$\Delta\sigma_{\mathrm{R}}=F\,\Delta\sigma_{\mathrm{I}} \tag{1}$$

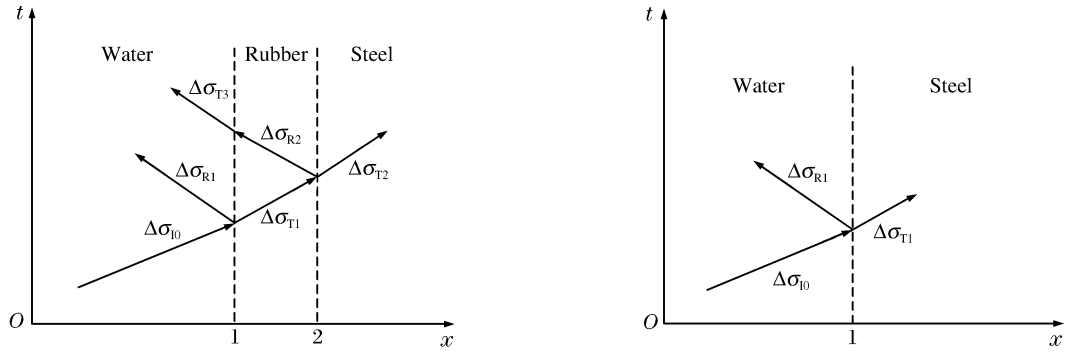
$$\Delta\sigma_{\mathrm{T}}=T\,\Delta\sigma_{\mathrm{I}} \tag{2}$$

式中:$F=(1-n)/(1+n)$,$T=2/(1+n)$,$n=\rho_0 c_0/(\rho_1 c_1)$,其中,$\rho_0$、$\rho_1$ 分别为介质 0 和介质 1 的密度,c_0、c_1 分别为介质 0 和介质 1 的声速。

由(1)式和(2)式可知,如果 $n>1$,则 $F<0$,此时入射冲击波会在界面上向介质 0 反射稀疏波,并向介质 1 传入透射冲击波,该透射冲击波强度低于入射冲击波,即各种软垫起到了减震缓冲作用。这里以水箱壁贴橡胶层为例进行说明。计算时各材料参数如下:水的密度 $\rho_{\mathrm{w}}=1\,000\ \mathrm{kg/m^3}$,声速 $c_{\mathrm{w}}=1.45\ \mathrm{km/s}$;钢的密度 $\rho_{\mathrm{s}}=7\,800\ \mathrm{kg/m^3}$,声速 $c_{\mathrm{s}}=5.19\ \mathrm{km/s}$;橡胶密度 $\rho_{\mathrm{r}}=930\ \mathrm{kg/m^3}$,声速 $c_{\mathrm{r}}=0.046\ \mathrm{km/s}$。计算时,假设水中爆炸冲击波传播方向垂直于材料界面。

在水箱壁贴一层橡胶时,爆炸冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{I0}}$ 在水-橡胶层界面 1 发生透射和反射,形成反射稀疏波 $\Delta\sigma_{\mathrm{R1}}$ 和透射冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{T1}}$;当 $\Delta\sigma_{\mathrm{T1}}$ 到达橡胶-钢界面 2 时,向橡胶层反射冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{R2}}$;$\Delta\sigma_{\mathrm{R2}}$ 到达橡胶-水界面 1 时,向水中传入透射冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{T3}}$,如图 1(a)所示。

根据(1)式和(2)式计算得到:水-橡胶声阻抗比 $n_{\mathrm{wr}}=\rho_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}}/(\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}})=35.1$,透射波 $\Delta\sigma_{\mathrm{T1}}=0.055\Delta\sigma_{\mathrm{I0}}$;橡胶-钢板声阻抗比 $n_{\mathrm{rs}}=\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}}/(\rho_{\mathrm{s}}c_{\mathrm{s}})=0.001\,1$,反射波 $\Delta\sigma_{\mathrm{R2}}=\Delta\sigma_{\mathrm{T1}}=0.055\Delta\sigma_{\mathrm{I0}}$;橡胶-水声阻抗比 $n=\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}}/(\rho_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}})=0.03$,透射波 $\Delta\sigma_{\mathrm{T3}}=1.94\Delta\sigma_{\mathrm{R2}}=0.11\Delta\sigma_{\mathrm{I0}}$。不采用橡胶作为缓冲层时,爆炸冲击波在水-钢板界面处的反射过程如图 1(b)所示,由(1)式可知:水-钢板声阻抗比 $n_{\mathrm{wr}}=\rho_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}}/(\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}})=0.036$,反射波 $\Delta\sigma_{\mathrm{R1}}=0.97\Delta\sigma_{\mathrm{I0}}$。



(a) Water-rubber-steel　　(b) Water-steel

图 1　弹性波在不同材料中的反射和透射

Fig. 1　Transmission and reflection of elastic wave in different materials

计算结果表明:如果不加橡胶缓冲层,则水箱内反射冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{R1}}$ 与爆炸冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{I0}}$ 相当;加入橡胶缓冲层以后,水箱壁反射冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{T3}}$ 仅为入射冲击波 $\Delta\sigma_{\mathrm{I0}}$ 的 0.11 倍,水箱内反射冲击波幅度降低了 88%。也就是说,橡胶起到了明显的缓冲“吸能”作用。

3 实 验

实验在 2 m×2 m×2 m 的实验水箱中进行,钢制水箱壁四周贴一层 20 mm 厚的橡胶层,采用光学和压力测试的方法来研究气泡脉动过程,实验装置示意图如图 2 所示。PETN 炸药安装在实验水箱中央,球形超高压短弧氙灯发出的光线通过光源窗口进入水箱内部。高速相机与起爆台、示波器等同步,记录炸药爆炸后气泡的产生、膨胀和收缩过程。PCB-138 水下压力传感器在距离炸药 0.4 m 处记录冲击波和气泡脉动压力。在气泡脉动水射流实验中,用 6 mm 厚的钢板模拟固壁,观察气泡与钢板相互作用时产生的水射流现象。为了更好地模拟实际船体结构,钢板背面采用空气夹层结构。

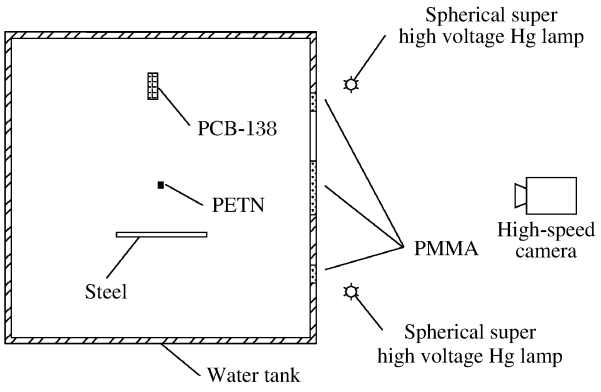


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

4 实验结果及分析

实验得到的气泡自由脉动过程如图 3 所示。在脉动的大部分时间内气泡形状保持球形,这与已有的实验结果基本一致[4-5]。从图中可以清晰地观测到气泡的产生、膨胀和收缩过程。

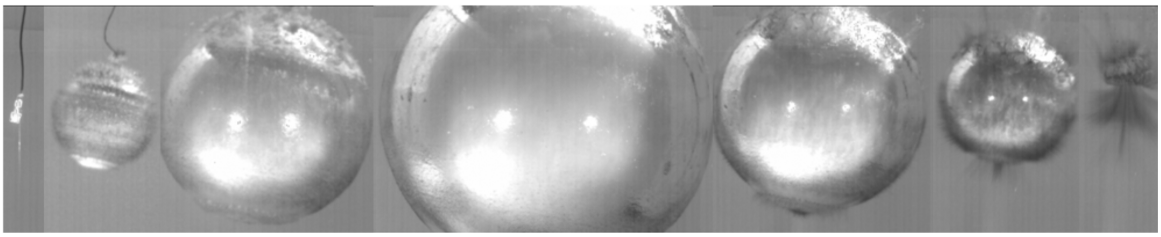


图 3 4.5 g PETN 炸药水中爆炸后气泡脉动过程图像

Fig. 3 Experimental pictures of bubble pulse for 4.5 g PETN underwater explosion

气泡与固壁相互作用产生的水射流现象如图 4 所示。受钢板边界条件的影响,气泡不能充分膨胀,在 $t=10.3$ ms 时形成半球形结构;当气泡收缩时,靠近钢板的一侧向内收缩不明显;在 $t=34.3$ ms 时,形成水射流现象;水射流作用于钢板,导致钢板变形,从图中可以清晰地看到钢板背面空气夹层中的空气向外溢出($t=36.7$ ms)。

水下压力传感器记录的冲击波和气泡脉动压力如图 5 所示。水下压力传感器没有记录到明显的水箱壁反射冲击波信号,说明橡胶层有效地吸收了爆炸冲击波能量。

水中爆炸气泡脉动周期的经验公式为[11]

$$T=2.064\frac{m^{1/3}}{p^{5/6}} \tag{3}$$

式中:m 为炸药质量,单位为 kg;p 为静水压力,单位为 MPa。

4.5 g PETN 炸药水中爆炸气泡脉动周期的实验结果与(3)式的计算结果分别为 44.46 ms 和 52.00 ms,两者之间误差达到 14%。由于(3)式是根据 TNT 炸药的实验结果导出的,不同炸药的冲击波能和气泡能不同,因此将 TNT 炸药的经验公式用于 PETN 炸药水中爆炸实验必然会存在一定误差。为了验证水箱结果的准确性,在 8 kg TNT 当量爆炸水池进行了水下爆炸实验。采用与水箱实验相同规格的炸药,爆炸水池上口径为∅48 m,水深 h 为23 m,实验时炸药放置在水面以下5 m处,可以认为气

泡脉动过程不受边界条件影响。4.5 g PETN 炸药水中爆炸的压力测试结果如图 6 所示。从图中可以很清楚地分辨出冲击压力、第一次气泡脉动压力、第二次气泡脉动压力以及周期,实验中没有明显的干扰信号。

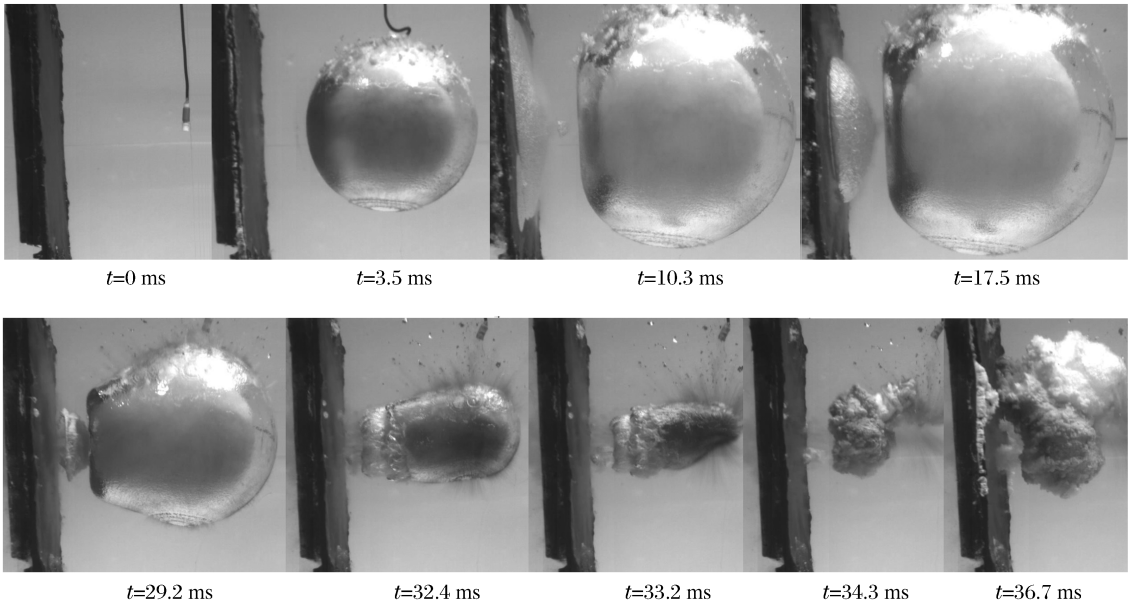


图 4　气泡脉动水射流过程图像

Fig. 4　Experimental pictures of water jet formed by bubble oscillation

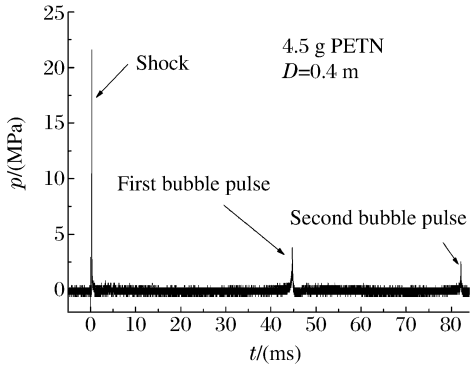


图 5　水箱实验水下爆炸压力

Fig. 5　Pressure of underwater explosion in water tank

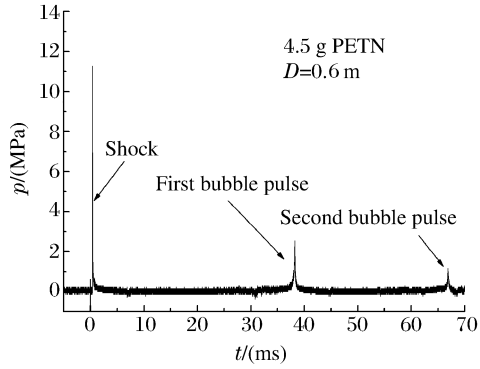


图 6　水池实验水下爆炸压力

Fig. 6　Pressure of underwater explosion in water pond

由(3)式可以看出:在炸药质量 m 一定的条件下,水箱实验得到的气泡脉动周期 T_t^* 仅与静水压力 p(水压与大气压力之和)的 5/6 次方成反比,即

$$T_t^* = \frac{p_p^{5/6}}{p_t^{5/6}} T_p \tag{4}$$

式中:p_p、T_p 分别为水池实验测量得到的静压和周期,p_t 为水箱实验的静压。如果水箱实验结果准确可靠,则由(4)式计算得到的水箱实验气泡脉动周期 T_t^* 和实际水箱实验测量周期 T_t 相同。表 1 列出了不同质量的炸药对应的水箱实验测量结果与计算结果之间的相对误差。

从表 1 可以看出,1.5 g PETN 炸药水中爆炸后,由(4)式计算得到的气泡周期 T_t^* 与实际测量周期 T_t 之间的相对误差仅为 0.27%。3.0 g 和 4.5 g PETN 炸药水箱实验的气泡脉动周期偏小,说明随着炸药当量的增加,水中爆炸冲击波强度增加,水箱壁面反射冲击波强度也随之增加,导致水箱内水的静

压增大,误差增大。对于 3 种不同规格的炸药,其水箱实验结果的相对误差均小于 6%,可以认为,在此水箱中开展的质量小于 5 g 的 PETN 炸药水中爆炸气泡脉动相关实验研究结果准确可靠。

表 1 计算结果与实验结果的对比

Table 1 Calculation and experimental results

m_{PETN}/(g)	T_p/(ms)	p_t/(MPa)	p_p/(MPa)	T_t^*/(ms)	T_t/(ms)	Error/(%)
1.5	27.08	0.155 87	0.201 326	33.52	33.43	0.27
3.0	33.42	0.155 91	0.201 682	41.46	40.10	3.39
4.5	37.83	0.155 71	0.201 762	46.95	44.67	5.10

5 结 论

采用在钢制水箱壁贴低阻抗材料的方法可以有效降低水箱壁反射冲击波对气泡脉动过程的影响,实验得到了准确清晰的气泡自由脉动过程图像、与固壁相互作用产生的水射流形成过程图像以及水下爆炸压力曲线。实验结果与 8 kg TNT 当量爆炸水池实验结果基本一致,为研究炸药水中爆炸气泡脉动现象提供了一种可靠实用的实验技术手段。

感谢孙永强、龚晏青、何 智、张光昇、林 俊、李 强等在实验工作中给予的合作和帮助。

References:

[1] Liu J H. Theory and Its Applications of Ship Dynamic Responses to Non-Contact Underwater Explosions [D]. Wuxi:China Ship Scientific Research Center,2002. (in Chinese)
刘建湖. 船舶非接触水下爆炸动力学的理论与应用 [D]. 无锡:中国船舶科学研究中心,2002.

[2] Strahle W C. Conventional Weapons Underwater Explosions [R]. AD-A201814,1988.

[3] Yun S R,Zhao H Y. Explosion Mechanics [M]. Beijing:National Defence Industry Publishing Company,2005:219-232. (in Chinese)
恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 北京:国防工业出版社,2005:219-232.

[4] Klaseboer E,Hung K C,Wang C W,et al. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of an Underwater Explosion Bubble near a Resilient/Rigid Structure [J]. J Fluid Mech,2005,537:387-413.

[5] Lu J P,Clarke T. Studies of Underwater Explosions [A]//The 21st International Symposium on Ballistics [C]. Adelaide,Australia,2004:955-963.

[6] Lauterborn W,Bolle H. Experimental Investigations of Cavitations-Bubble Collapse in the Neighborhood of a Solid Boundary [J]. J Fluid Mech,1975,72:391-399.

[7] Chahine G L,Frederick G S,Lambrecht C J,et al. Spark-Generated Bubbles as Laboratory Scale Models of Underwater Explosions and Their Use for Validation of Simulation Tools [A]//Proceedings of the 66th Shock and Vibration Symposium [C]. Biloxi,MS,1995:265-277.

[8] Menon S,Lal M. On the Dynamics and Instability of Bubbles Formed during Underwater Explosions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,1998,16(4):305-321.

[9] Zhang Y,Zhou G. Experimental Study on Small Scale Underwater Explosion [A]//Proceedings of the 7th Detonation Symposium [C]. Beijing,2006:222-227. (in Chinese)
张 颖,周 刚. 小当量水下爆炸实验研究 [A]//第七届全国爆轰学术会议文集 [C]. 北京,2006:222-227.

[10] Song B,Hu S S,Wang L L. Influence on the Transmitted Intensity of Shock Wave Through Different Tacticorders of Layered Materials [J]. ACTA Armamentarii,2000,21(3):272-274. (in Chinese)
宋 博,胡时胜,王礼立. 分层材料的不同排列次序对透射冲击波强度的影响 [J]. 兵工学报,2000,21(3):272-274.

[11] Cole P. Underwater Explosions [M]. Princeton:Princeton University Press,1946:162-169.

An Experimental Method of Studying Underwater Explosion Bubble Oscillation

WANG Bin, ZHANG Yuan-Ping, WANG Yan-Ping

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Dynamics of bubble oscillation formed during underwater explosions were studied in a 2 m×2 m×2 m water tank. The theory of shock absorption when elastic wave transmits from high acoustic impedance material to low acoustic impedance material was used. The walls of the water tank were covered with a layer of material having low acoustic impedance. With this set up, the bubble oscillates without influence of the shock waves that reflected from the walls of the water tank. The pressure was measured by piezoelectric pressure transducers, and the explicit pictures of the bubble oscillations and water jet were captured by a digital high speed camera. Another experiment was carried out in an 8 kg test pond to validate the water tank experimental data. The results of the underwater explosion in a water tank are in good agreement with the results getting from the test pond, and the maximal relative deviations between two experimental results is 5.1%. This method is simple and efficient for studying bubble oscillation phenomena.

Key words: mechanics of explosion; underwater explosion; bubble oscillation; experimental method; bubble picture

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物,在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果,读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术,人工合成新材料,高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究,动态及静态高压研究中的测试技术,高温高压下的相变,高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性,论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6 000～8 000 字以内,请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用电子邮件投稿(gaoya@caep.ac.cn),也可提供软盘。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密,投稿时请附本单位保密审查意见,由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在 20 字以内。文中图、表应有自明性,所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照,图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名,请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等),以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等),以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号),简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性,严禁抄袭,文责自负,请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要　摘要用第三人称书写,语言要简练,应有具体内容。要求:(1) 拥有与论文同等量的主要信息,重点包括 4 个要素:即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的,不得评论、解释论文内容。中文摘要应在 200～400 个字之间,英文摘要不少于 120 个实词。为便于 Ei Compendex 以及国外其它数据库收录,英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式;第一句不要与英文题名重复;尽量用短句子并避免句形单调;用过去时态叙述主要工作,用现在时态叙述结论,尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献　参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献,引用条数不宜太少,并尽量引用近期国内外文献,采用"顺序编码制"著录。中文参考文献必须附英译文,著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬　《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群 、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等,并被 Ei Compendex 光盘收录。凡经本刊录用的稿件,其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部,编辑部不再另行通知。来稿一经发表,即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念,慎重对待每一篇来稿,尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道,重大创新性成果可在 3 个月内刊出。

通信地址: 四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部,邮政编码: 621900

电子邮件: gaoya@caep.ac.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话:(0816)2490042; 传真:(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部