文章编号：1001-1455(2014)03-0334-06

非药式水下爆炸冲击波加载装置研究*

任 鹏，张 伟，黄 威，叶 楠，蔡宣明
（哈尔滨工业大学高速撞击研究中心，黑龙江 哈尔滨 150080）

摘要：非药式水下爆炸冲击波加载装置作为实验室范围内一种新型水下爆炸冲击波加载技术，具有耗费低、危险性小、可重复性高等优点，对进一步研究水下冲击波毁伤效应具有重要意义。该装置通过一级轻气炮发射飞片正撞击水舱端部活塞在水舱中产生呈指数型衰减的水下冲击波。本文中采用实验与数值模拟相结合的方法对该装置产生的冲击波可靠性进行了研究，确定了一定工况内的初始冲击波强度及衰减时间常数，实验结果表明，该装置能够有效模拟水下爆炸冲击波载荷。

关键词：爆炸力学；冲击波加载装置；非药式水下爆炸；水下冲击波强度；衰减时间常数
中图分类号：O383 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

随着现代精确制导武器和高速水中兵器的快速发展，舰艇受到的威胁越来越多，虽然对舰艇结构抗爆抗冲击性能的研究很多，但由于炸药爆炸实验存在危险性高、花费大、数据采集精度和广度无法全部保证等，因此冲击波载荷作用下舰艇结构的抗爆抗冲击性能实验无法大规模展开。基于此，V. S. Deshpande 等[1]基于 Taylor 水下一维冲击波理论设计了一种圆柱形水下爆炸冲击波模拟装置，该装置能较好模拟呈指数型衰减的水下爆炸冲击波，但对测试结构尺寸存在一定的限制。为克服这个缺点，H. D. Espinosa 等[2]设计了类锥型非药式水下爆炸模拟器，结合高速摄影技术进行了水下大当量爆炸冲击波加载实验[3]；任鹏等[4-5]研制出了非药式水下爆炸冲击波加载装置并进行了水下爆炸冲击波加载实验。

本文中运用实验与数值模拟相结合的方法对非药式水下爆炸冲击波加载装置的工作原理及产生的水下冲击波参数进行研究，确定非药式水下爆炸冲击波加载装置的有效性及实验特性，为后续舰艇结构的水下抗冲击实验研究奠定基础。

1 基本原理及主体设计

1.1 基本原理

炸药在水中爆炸会产生以水中声速传播的高强度冲击波，该冲击波以球面的形式向四周扩散。二战后，R. P. Cole 等[6]结合大量实验数据，总结出了广泛应用于工程实践的计算水下爆炸冲击波的经验公式，认为 TNT 等药包产生的水中爆炸冲击波以指数形式衰减

$$p(t)=p_0\mathrm{e}^{-\frac{t}{\theta}} \tag{1}$$

式中：$p(t)$ 为冲击波瞬时压力，p_0 为冲击波峰值压力，θ 为指数衰减的时间常数，即压力从峰值 p_0 衰减到 p_0/e 所需的时间。非药式水下爆炸冲击波加载装置的主要目的即为产生如式(1)的冲击波压力。

图 1(a)为非药式水下爆炸冲击波加载实验装置原理图，由一级轻气炮发射飞片正撞击活塞，根据声学近似理论，在水舱中 $x=0$ 处产生呈指数型衰减的冲击波压力，该冲击波在水舱中沿 x 方向传播，可以近似为半无限水域的一维传播问题，该冲击波在 $x=0$ 处的强度仅与飞片的撞击速度有关：

$$p_0=k\rho_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}}v_{\mathrm{f}} \tag{2}$$

式中：$k=1.01$，ρ_{w}为水的密度，c_{w}为水中声速，v_{f} 为飞片的撞击速度[5]。

* **收稿日期**：2012-11-13；**修回日期**：2013-03-10
基金项目：国家自然科学基金项目(11372088)
作者简介：任 鹏(1984—)，男，博士。

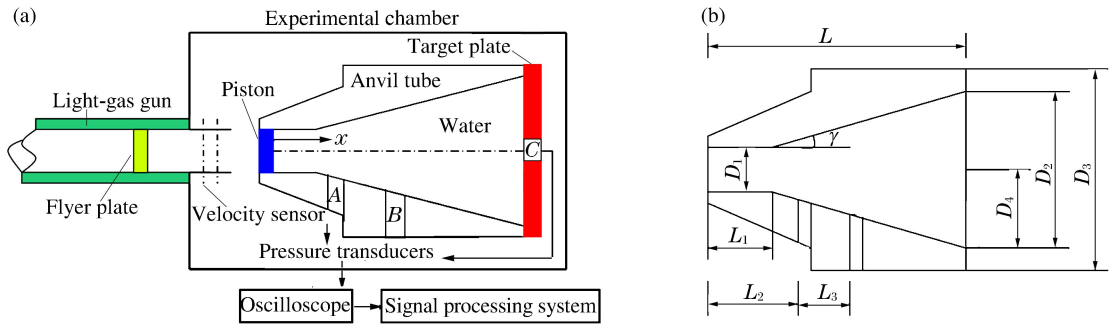


图 1　水下爆炸冲击波加载装置

Fig. 1　Experimental setup of non-explosive underwater shock simulation

1.2　非药式水下爆炸冲击波加载实验装置主体设计

1.2.1　主体尺寸及材料

非药式水下爆炸冲击波加载实验装置的整体布局如图 1(a)所示，由一级轻气炮、激光测速装置、活塞、水舱等组成，其中一级轻气炮可将飞片加速到 1 400 m/s[7]。该装置采用设定速度的飞片与水舱端部活塞正撞击的方法，在水舱中产生呈指数型衰减的水下冲击波载荷。

水舱的具体尺寸如图 1(b)所示，其中 $L=406$ mm，水舱内柱形部分长 $L_1=76$ mm，压力传感器位置 $L_2=89$ mm，$L_3=140$ mm，水舱内部散射角 $\gamma=7°$，活塞直径 $D_1=66$ mm，活塞上附有 O 型圈对水舱进行密封，如图 2 所示。靶板通过 12 个 M24×3 的螺栓固定在水舱与活塞相对的一端，其中靶板的整体直径 $D_3=256$ mm，靶板受冲击部分直径 $D_2=152$ mm，标定靶板中传感器竖直位置 $D_4=76$ mm，标定靶板厚度为 25.4 mm，如图 3 所示。标定靶板及水舱的主体材料均为 4340 钢，飞片及活塞选用强度较高的 S-7 钢，具体材料参数见表 1，其中 n 为硬化指数，C 为应变率常数。

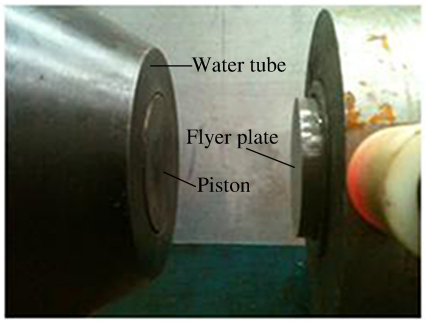


图 2　实验用活塞和飞片

Fig. 2　Photograph of piston and flyer plate



图 3　标定靶板

Fig. 3　Photograph of calibration plate

表 1　数值模拟相关材料参数

Table 1　The material parameters of material model

材料	ρ_0/(kg·m^{-3})	σ_0/MPa	K/MPa	n	C	c_0/(m·s^{-1})	s_1	Γ_0
4340 钢	7 830	792	510	0.26	0.014			
S-7 钢	7 750	1 539	477	0.18	0.012			
水	998					1 490	1.92	0.1

1.2.2　散射角对平面性的影响

V. S. Deshpande 等[2]设计的圆柱形水下爆炸冲击波加载装置可以很好地模拟平面波加载，但是由于发射的飞片直径有限，圆柱形水舱的直径仅为 45 mm，这对于靶板的结构尺寸提出了很多限制。因此，为了增加靶板的实际受测尺寸，本文中所用的实验装置在增加了发射飞片直径的同时，也对水舱内部进行了改进，将水舱内部由圆柱形改为带散射角的类锥形结构，如图 1 所示。为了确定该散射角对冲

击波平面性的影响，利用 Z. Wei[8] 等提出的平面因子，对冲击波是否为平面波进行检验，其中平面因子

$$\lambda=\frac{c_{\mathrm{w}}\theta}{R-r} \tag{3}$$

式中：r 为起爆点到目标靶板的距离，R 为起爆点到达靶板边缘的距离，如图 4 所示。当 $\lambda<1$ 时，冲击波到达目标靶板边缘，靶板中心位置的冲击波强度已经低于初始着靶冲击波强度的 37%，此时认为该冲击波为非平面波；反之，当 $\lambda\geqslant1$ 时，则认为该冲击波近似为平面波。

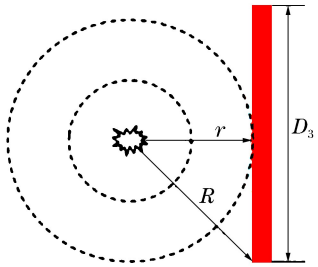


图 4 球形冲击波加载靶板示意图

Fig. 4 Schematic of a panel subject to a spherical blast

如图 1 所示，本文中所用水舱左端部有一长76 mm的圆柱形结构，在该结构中，冲击波近似保持了平面性[6]。因此，将式(3)中的起爆点设置为散射角起始位置，即圆柱形结构终止位置，即 $R=332.79$ mm，$r=330$ mm。有

$$\lambda=534\,050.18\theta \tag{4}$$

当 $\lambda\geqslant1$，即 $\theta\geqslant1.87$ μs 时，冲击波即可近似为平面波。

1.2.3 压力测试系统

水下爆炸冲击波具有压力峰值大、特征时间短、且峰值上升时间在 1 μs 之内等特点[1]。基于此，选用 QSY8109 型高频压电式压力传感器对该系列实验的水下爆炸冲击波载荷进行测量，该传感器响应时间小于 1 μs，固有频率大于 150 kHz，测量范围为 0～400 MPa。传感器通过螺纹固定于标定水舱及靶板上，如图 1(a)、图 3 所示。

2 非药式水下爆炸冲击波特性

为了进一步研究非药式水下爆炸模拟装置的冲击波特性，首先对标定靶板进行冲击波加载实验，用以测量达到靶板位置的初始冲击波强度，即着靶冲击波强度。水舱初始处于满水无空气的密封状态，在冲击波加载过程中，刚性厚标定靶不会出现明显变形，因此在靶板附近不会出现空泡现象。

2.1 非药式水下爆炸模拟器有效性验证

实验获得的典型冲击波压力曲线如图 5 所示，其中图 5(a)和图 5(b)分别为传感器 A 测得的质量 0.282 kg、速度 60.27 m/s 和质量 0.572 kg、速度 70.55 m/s 的飞片分别正撞击 12 mm 厚活塞产生的水中压力波历程曲线。从该图可见，压力波在 10 μs 之内从零点到达峰值，然后以指数形式进行衰减。其中，速度为 70.55 m/s 的飞片正撞击活塞对应的压力峰值(98 MPa)高于速度是 60.27 m/s 的飞片正撞击活塞产生的压力峰值(69.2 MPa)；质量为 0.572 kg 的飞片对应的冲击波压力峰值衰减时间(约 0.13 ms)大于质量为 0.282 kg 飞片对应的冲击波压力峰值衰减时间(0.1 ms)。由此可见，在该质量范围内的飞片撞击活塞产生的水下冲击波衰减时间常数均远大于 1.87 μs，因此，可以认为该水下冲击波近似为平面波。同时由图 5 可以发现，冲击波在衰减过程中出现了一定程度的波动，这是由于冲击波加载装置中的环境并非无限自由水域，冲击波到达管壁会产生反射；同时由于飞片撞击活塞后，活塞出现移动，导致在第 1 次撞击后的极短时间内产生一系列相对轻微的接触碰撞，这些碰撞会导致在冲击波主脉冲之后出现一些峰值相对很小的冲击波，这些因素导致主冲击波的衰减曲线出现一定的波动，但这并不会影响冲击波按照式(1)的形式衰减。

为了验证该实验方法的有效性，对图 5 所示实验进行了数值模拟，采用 Euler-Lagrange 耦合算法，对流体介质的波动与水舱的相互作用进行耦合计算。其中，水介质及附近区域定义为 Euler 网格，舱壁结构定义为 Lagrange 网格，水介质采用均布网格划分。数值模拟所需材料参数如表 1 所示。

数值模拟结果与实验结果的对比如图 5 所示。数值模拟得到的压力历程曲线和实验测量得到的曲线基本符合良好。重要特征如：第 1 个压力峰值及其指数衰减过程均与实验结果保持了良好的一致性，从而验证了实验结果的可靠性，说明该装置能够有效地模拟水下爆炸冲击波载荷。同时结果也表明，本

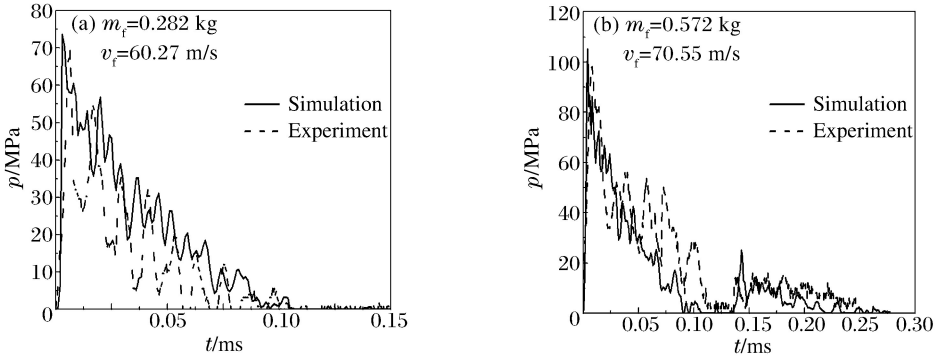


图 5　数值模拟结果和实验结果对比

Fig. 5　Comparison of the results between calculations and experiments

文中所建立的数值模型能够较好地模拟非药式水下爆炸冲击问题。图 6 给出了飞片质量为 0.282 kg、速度为 60.27 m/s 时，撞击活塞得到的压力波波阵面数值模拟进程，其中时间零点为飞片撞击活塞时，由该图可见，冲击波波阵面在传播过程中保持了良好的平面性，证明了理论分析的可靠性。

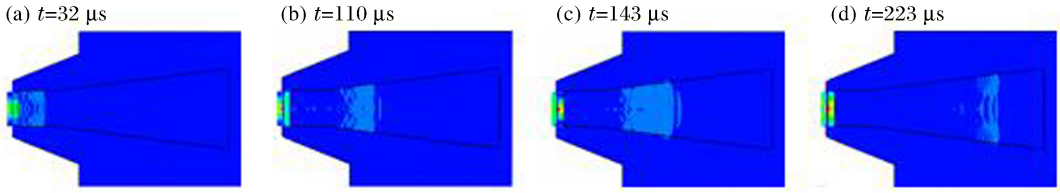


图 6　冲击波波阵面历程(m_f=0.282 kg，v_f=60.27 m/s)

Fig. 6　The histories of shock wave(m_f=0.282 kg，v_f=60.27 m/s)

2.2　冲击波特性

2.2.1　冲击波强度

由于飞片及活塞的材料相同，飞片在一定速度条件下正撞击活塞的过程中会使活塞发生墩粗变形，活塞的变形会对水舱端部造成损伤，因此将活塞的厚度增至 23 mm。图 7 为 0.267 kg 飞片正撞击 23 mm厚活塞对标定靶板进行加载在传感器 C 位置测得的冲击波初始压力峰值与飞片速度的关系。由该图可见，该处的压力波初始峰值与飞片的速度呈线性关系，结合式(2)拟合得到靶板位置冲击波初始峰值与飞片速度的关系为

$$p = ak\rho_w c_w v_f \tag{5}$$

式中：a =3.3×10^{-7}。

图 8 为 0.267 kg 飞片以 47.73 m/s 的速度正撞击 23mm 厚活塞在传感器 C 测得的典型压力曲线，

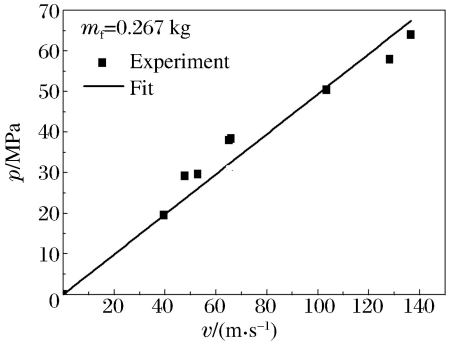


图 7　传感器 C 位置初始压力峰值随飞片速度变化关系

Fig. 7　Relationship between shock wave strength and flyer velocities

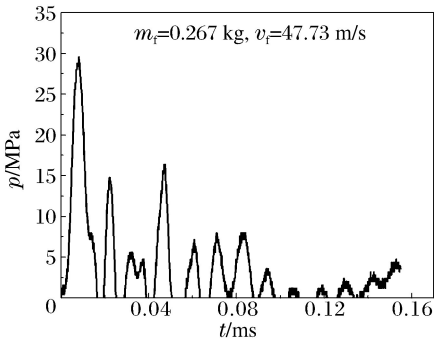


图 8　传感器 C 测得的典型压力曲线

Fig. 8　The typical pressure history measured by sensor C

对比图 5 和图 8 可见传感器 C 相对传感器 A 测得的冲击波压力历程曲线要杂乱得多，这是由于冲击波到达刚性靶后反射导致的冲击波叠加造成的。

2.2.2 冲击波衰减时间常数

冲击波的衰减时间常数是水下爆炸冲击波的另一个重要参数，非药式水下爆炸冲击波加载装置产生的水下冲击波衰减时间常数与飞片的撞击速度无关，仅与飞片及活塞的质量有关[5]。在已知冲击波初始压力峰值时，如果获得对应冲击波的衰减时间常数便可得到该处的冲击波冲量，进而对结构在水下冲击波载荷作用下的变形与损伤机理进行分析。图 9 为数值模拟得到的 0.267 kg 飞片以不同速度正撞击 23 mm 厚活塞，在传感器 A 处产生的冲击波历程曲线。由图 9 可见，飞片以 45、75 和 120 m/s 的速度撞击相同活塞得到的压力波均随时间呈指数型衰减，且由于飞片撞击速度不同导致冲击波峰值不同，但冲击波在 0.15 ms 之后均趋于 0。曲线拟合得到对应的衰减时间常数分别为 44.62、42.39 和 44.64 μs，可见飞片撞击活塞的速度并不影响对应的冲击波衰减时间常数，基于以上分析，0.267 kg 的飞片撞击 23 mm 厚活塞产生的水下冲击波在某一位置的衰减时间常数可取为 3 个工况的平均值 43.88 μs。

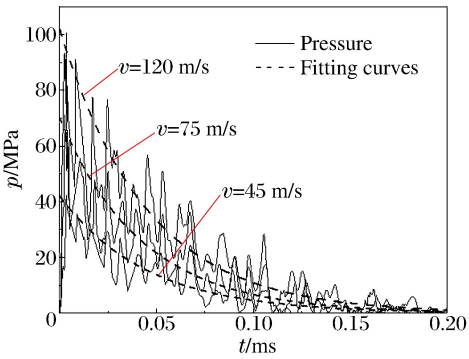


图 9 不同速度飞片对应冲击波比较

Fig. 9 Comparison among different pressure histories

3 非药式水下爆炸冲击波加载效果验证

利用非药式水下爆炸冲击波加载装置对 2.5 mm 厚的 5A06 铝合金进行冲击波加载实验，其中飞片质量为 0.267 kg，活塞厚度为 23 mm，靶板通过螺栓固定于水舱后部，如图 10(a)所示。飞片的加载速度为 140.24 m/s。由公式(5)可得，靶板受到的初始冲击波压力为 68.72 MPa，冲击波的衰减时间常数由上可知约为 43.88 μs。冲击波作用后靶板的变形情况如图 10(b)～(c)所示，靶板出现了明显的冲击变形，测量得到靶板的最大变形 $\delta=15.62$ mm，量纲一化后最大变形 $\delta/D_2=0.103$，同时可以看到靶板螺栓孔径向并未出现拉伸变形，因此并未出现因夹持边界拉伸而导致的靶板整体变形增大，这说明该固定方式能够较好地模拟固支边界条件，同时也说明非药式水下爆炸冲击波加载装置能够较好实现对结构的水下冲击波加载。

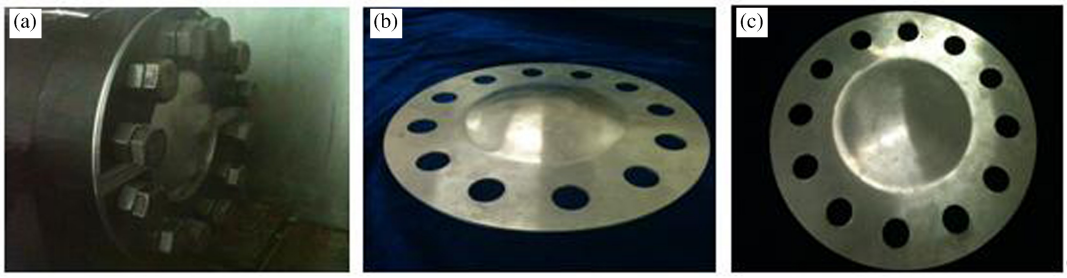


图 10 5A06 铝合金靶板加载前后形貌

Fig. 10 The appearance of the 5A06 aluminium alloy plate

4 结 论

针对非药式水下爆炸冲击波加载实验装置的研制与应用开展了实验和数值模拟研究，通过实验与数值模拟结果的对比验证了该装置的可靠性，并得到以下结论：

(1)实验和数值模拟均表明，在本文研究的工况范围内，该非药式水下爆炸冲击波加载装置能够有效模拟水下爆炸冲击波载荷，为实验室范围内结构与材料的水下冲击波加载提供一种可靠的实验方法。

(2)确定了 0.267 kg 飞片正撞击 23 mm 厚活塞的着靶冲击波载荷峰值与飞片速度的关系，并确定了对应的衰减时间常数，为后续进行大当量水下爆炸冲击波加载实验奠定了基础。

参考文献：

[1] Deshpande V S, Heaver A, Fleck N A. An underwater shock simulator[J]. Proceeding of The Royal Society A, 2006,462(2067):1021-1041.

[2] Espinosa H D, Lee S, Moldovan N. A novel fluid structure interaction experiment to investigate deformation of structural elements subjected to impulsive loading[J]. Experimental Mechanics, 2006,46(6):805-824.

[3] Latourte F, Wei X D, Feinberg Z D, et al. Design and identification of high performance steel alloys for structures subjected to underwater impulsive loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012,49(13):1573-1587.

[4] Ren Peng, Zhang Wei, Guo Zi-tao, et al. Numerical simulation for deformation of multi-layer steel plates under underwater impulsive loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012,19(2):99-103.

[5] 任鹏,张伟,黄威,等.水下爆炸冲击波载荷作用下气背固支圆板的变形及应变场分析[J].船舶力学,2013,17(11):1339-1344.
Ren Peng, Zhang Wei, Huang Wei, et al. Deformation mode and strain field analysis of clamped air-back circular plate subjected to underwater explosive loading[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013,17(11):1339-1344.

[6] Cole R P. Underwater Explosions[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1948.

[7] 林俊德.弹速 1400 m/s 的 57 毫米气炮阀门[J].爆炸与冲击,1985,5(3):60-67.
Lin Jun-de. A firing valve for 57 mm gas gun with 1400 m/s projectile velocity[J]. Explosion and Shock Waves, 1985,5(3):60-67.

[8] Wei Z, Deshpande V S, Evans A G, et al. The resistance of metallic plates to localized impulse[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008,56(5):2074-2091.

Research on non-explosive underwater shock loading device*

Ren Peng, Zhang Wei, Huang Wei, Ye Nan, Cai Xuan-ming

(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *Heilongjiang, China*)

Abstract: A non-explosive underwater shock loading device exhibits many advantages as a new lab-scale research method of underwater explosion, including high reliability, low cost. This method has an important role on further research on underwater explosion. To generate impulsive loading similar to blast, the exponentially decaying underwater pressure was produced by a flyer plate struck a piston at one end of the water tank. The shock wave strength and decay constant in a certain working condition were determined. The reliability of the non-explosive underwater explosion shock loading device was investigated by experiment and numerical simulation. The results indicate that the device can effectively simulate underwater explosive shock wave.

Key words: mechanics of explosion; shock loading device; non-explosive underwater explosion; shock wave strength; decay constant

---

* Received 13 November 2012; Revised 10 March 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372088)

Corresponding author: Ren Peng, r_peng@126.com

(责任编辑　曾月蓉)