doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.04.006

高速弹体水平入水产生冲击波特性

张 伟,黄 威,任 鹏,叶 楠,李达诚

(哈尔滨工业大学 航天学院,150080 哈尔滨)

摘 要:高速弹体入水产生的冲击波对弹体的水下运行与毁伤性能有着至关重要的作用.为得到高速弹体入水产生的冲击波及其传播特性,利用一级轻气炮高速发射平头和球形两种不同弹体水平入水,通过以不同方式分布于水下的压力传感器测量因此而形成冲击波峰值压力衰减特性.实验结果表明:初始冲击波峰值压力随着距离和角度以不同的方式衰减;在波的传播方向上,其满足指数衰减的形式,压力介于距离的倒数与距离平方的倒数之间的曲线之间.在球形波阵面上则以正弦曲线的形式衰减,这种沿距离和角度衰减的冲击波峰值不受弹体的初始速度的影响.

关键词:高速弹体;水平入水;初始冲击波;衰减特性

中图分类号:O347 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2016)04-0037-05

The underwater shock wave characteristics caused by high speed horizontal water entry projectiles

ZHANG Wei, HUANG Wei, REN Peng, YE Nan, LI Dacheng

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China)

Abstract: The shock waves caused by the high-speed water entry projectiles have significant effects on the trajectory and damage performance of under-water projectiles. In this paper, the light-gas gun based system was exploited to accelerate the flat and spherical projectiles into a water-filled vessel at different initial velocities horizontally. The impact induced underwater shock waves caused by the two typical projectiles were investigated on the characteristics of propagation and attenuation. The pressure history captured by the transducers installed with different distributions in water column was analyzed in terms of the attenuate characteristics according to the distances and angles. The results indicate that the peak pressure of initial shock waves undergoes an exponential decay and the pressure among the curves $1/x$ and $1/x2$ according to the distance. The decay characteristics of pressure on the spherical surface comply with the sine curve. The attenuation experienced by the pressure for different experimental conditions are independent with initial velocity of projectiles.

Keywords: high-speed projectile; horizontal water-entry; initial shock wave; pressure attenuation

弹体高速入水问题作为一个经典的流体力学问题,最早于1900年被Worthington等[1]进行了相关的实验研究.水下武器的攻击能力及液体容器的防护性能都是典型的弹体入水问题,以其复杂性得到了众多学者的关注.Von Karman[2]在1929年提出了经典的弹体入水问题的理论模型,为该问题的研究提供了很好的基础.从第二次世界大战之后,各国海军在水下武器的毁伤性能和舰艇结构的抗冲击能力方面投入了大量的资金进行研究.然而,大量的研究仍然是集中于对弹体入水后的超空泡特性分析[3-4],而弹体入水后产生的冲击波的研究作为一个附属而没有得到重视.对空泡问题的越来越深入的分析使得弹体入水产生的冲击波在整个过程中的重要作用凸显出来.随着"水锤效应"(hydrodynamic ram)的提出和文献[5-7]对于不同弹体在不同速度下的冲击波的压力场的理论与实验分析,各种理论与经验模型被提出.McMillen等[8]首次得到了弹体入水侵彻的实时动态过程,结合阴影拍摄技术文章实现了球形弹体垂直侵入自由水面的动态过程.利用传感器测得沿球面分布的不同点的压力值得到冲击波压力峰值沿球面是按照 $P=P_{90°}\sin(\theta-7°)$ 的方式进行衰减的.而在弹道方向上,冲击波强度与距离

收稿日期:2014-10-20.
基金项目:国家自然科学基金(11372088).
作者简介:张 伟(1964—),男,教授,博士生导师.
通信作者:张 伟,zhdawei@hit.edu.cn.

的倒数成正比.近年来,Varas 等[9]利用水下冲击波的特性,研究了不同因素对冲击波对于容器的毁伤性能进行了研究.Luke[10]从实验角度对水锤效应的各个阶段进行分析,并采用多种方法来缓解冲击波对水下结构的损伤,并得到冲击波沿其波阵面是按照 $P=P_{90°}\sin(\theta+7°)$ 的方式进行衰减的.在国内,文献[11-13]利用冲击波的特性设计出了模拟爆炸冲击波传播的实验装置,并对结构损伤进行了大量的分析工作.文献[14]利用了平头、截卵形、半球形和锥形 4 种质量相同头型不同的弹体针对不同弹体头型侵彻不同厚度靶板形成的水下冲击波的峰值强度以及衰减也进行了相关的实验分析.

本文从实验的角度,分析了两种典型弹体(平头和球形弹体)高速入水产生的初始冲击波沿着传播距离和角度变化的变化规律进而获取高速弹体入水形成的压力场.并研究了多种不同的变量对冲击波的峰值强度及衰减特性的影响.实验表明,在球形冲击波在容器中传播的过程中,初始的峰值随着距离和角度按照不同的方式进行衰减,这种衰减独立于弹体的初始速度.

1 高速弹体水平入水实验

1.1 实验装置

弹体入水实验在哈尔滨工业大学高速撞击研究中心的一级轻气炮上进行,实验示意如图 1 所示.水容器尺寸为 600 mm×310 mm×310 mm,一侧为透明聚碳酸酯板窗口相机可通过它观察弹体在水中飞行的弹道轨迹与冲击波的形态变化.水容器的弹体入射口端用在不同的实验中,分别由不同厚度的 T6061 铝板或聚乙烯薄膜来进行容器的密封.本文所用高速摄像机型号为 Photron Ultima APX-RS,光源为两个 1 200 W 的照明灯.实验弹体分为球形弹与平头弹,材料为 45#钢.弹体入水产生的冲击波的持续时间很短,根据已有文献参考可得持续时间在 25 μs~0.5 ms 之间.本文利用的压电式压力传感器型号为 QSY8109,其测量范围为 0~400 MPa,其测得的冲击波的上升时间在 4 μs 左右使得其性能优于一般的传感器.

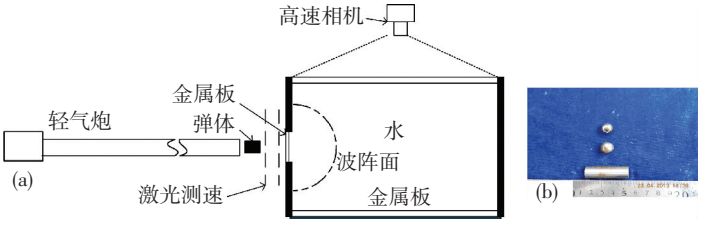
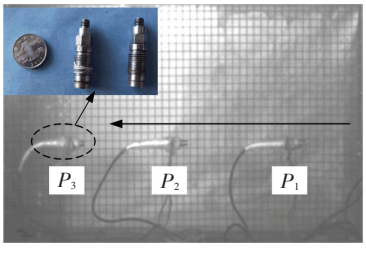


图 1 实验装置示意

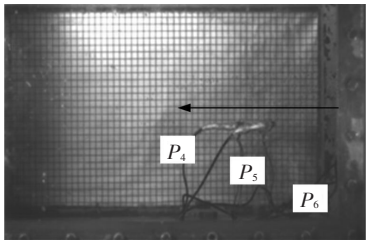
1.2 实验方法

本文主要通过两种典型的弹体高速入水实验获取了其入水产生的冲击波的形态变化和压力场.

为了测得两种典型弹体产生的水下冲击波的压力场,水下固定的压力传感器按不同的分布方式来得到冲击波的压力时间曲线信号,如图 2 所示.



(a) 等距离分布



(b) 沿半球面分布

图 2 传感器的不同分布方式

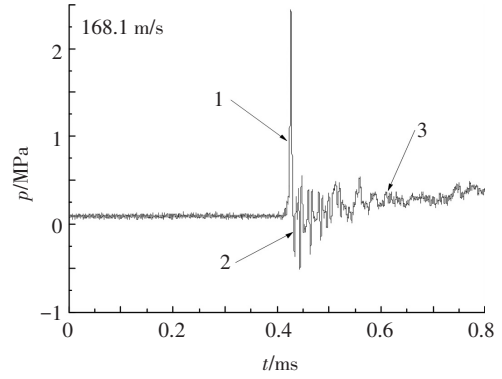
图 2(a)为 150 mm 等距离分布进而测量冲击波沿距离衰减特性,图 2(b)是压力传感器按一定角度沿球面分布进而测量冲击波的球形波阵面上的压力场特性.所有传感器的感应面垂直于波阵面.同时,为了防止高速弹体直接撞击传感器而毁伤设备,所有测量位置低于弹体弹道 20 mm.此过程利用强可见光源记录弹体入水的整个过程,相机为 3 000 帧/s,分辨率为 600×376.

2 结果及分析

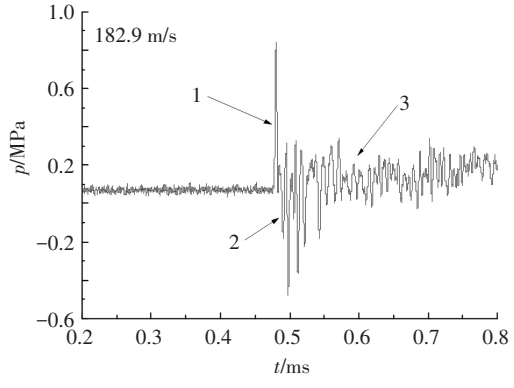
2.1 典型的冲击波信号

当弹体高速撞击水容器时,在本文的速度范围内,将会形成半球形的冲击波[14].当冲击波经过安置在水容器内部的传感器时,传感器会采集到相应的冲击波的信号.图 3 显示了两种不同的弹体在不同速度下侵彻 0.5 mm 铝板时,在不同观察点采集到的冲击波的压力信号.该信号作为典型的弹体侵彻产生的冲击波压力信号,与 Shi 等[15]描述的非常一致.冲击波的压力时程曲线显示了弹体入水产生冲击波的特性的 3 个阶段.如图 3 所示,第 1 阶段的压缩波单脉冲信号是由弹体撞击水容器初始时刻通过

容器壁传递到液体中的压力信号；第 2 阶段是压力迅速变为负值的阶段，这个负值是由初始的压缩波经由自有界面的反射后形成的拉伸波信号；第 3 阶段是幅值基本稳定于 0 MPa 的平台压力信号，这种基本稳定的压力是由冲击波波阵面后方的质点的运动导致的.该压力时程是典型的弹体入水产生的冲击波信号.在文献[14]后续研究中发现了不同于这种典型冲击波型号的冲击波时程曲线关系.



(a) 平头弹产生的冲击波信号



(b) 球形弹产生的冲击波信号

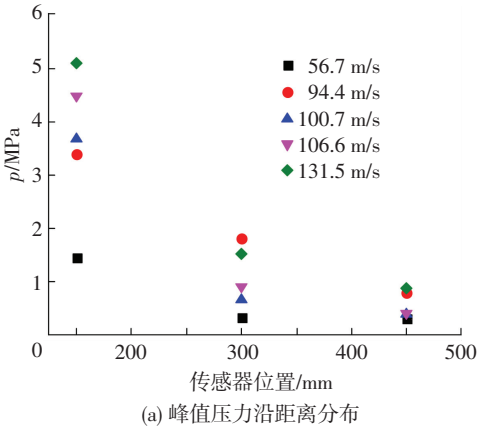
图 3　典型的冲击波信号

2.2　初始冲击波沿距离衰减特性

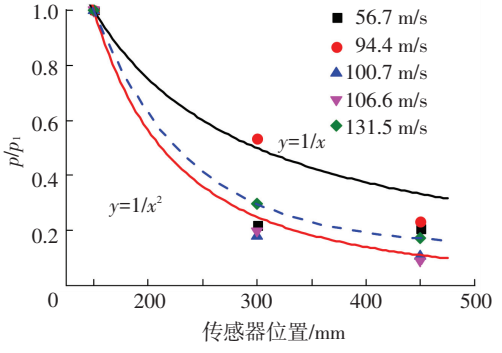
依据上述实验方法，分别用两种弹体以不同的速度侵彻分别装有铝板和聚乙烯薄膜的水容器分析了初始冲击波强度沿距离变化趋势.

2.2.1　平头弹侵彻 0.5 mm 靶板

平头弹体以不同速度撞击水容器得到的初始冲击波峰值压力沿测量距离的分布如图 4(a)所示.利用不同位置测得的峰值压力与 150 mm 处的压力值的比值的变化趋势来分析初始冲击波峰值压力沿距离的衰减趋势，如图 4(b)所示.测量位置相同，峰值压力随撞击速度的增加而增长.引入曲线 $1/x$ 与 $1/x^2$，可以发现不同位置处测得的压力分布基本位于这两条曲线之间，并更多的分布在曲线 $1/x^2$ 曲线附近.这种变化反映了压力降低的速率，即曲线斜率，随距离逐渐减小.这是典型的弹体侵彻产生冲击波特征，同时这也展示了与声波不同的衰减特性.采用指数衰减的形式对 131.5 m/s 的平头弹体侵彻入水时各点处的峰值压力进行拟合，指数函数形式为 $y=A\times\exp(-x/t)+y_0$，其中 $A=4.810\ 23$，$t=86.844\ 71$，$y_0=0.144\ 85$. 可见拟合曲线能够非常好的表现出该速度下峰值压力的衰减，并且可以看出其他速度下的峰值压力分布也符合这种变化趋势.



(a) 峰值压力沿距离分布



(b) 量纲一的压力衰减趋势

图 4　平头弹侵彻实验结果

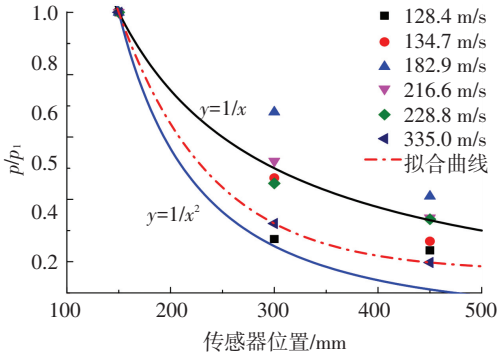
2.2.2　球形弹侵彻实验

如图 5 所示，球形弹侵彻由铝板和聚乙烯薄膜密封的水容器所产生的峰值压力随距离衰减平头弹侵彻结果基本一致.不同的是，在相似的速度条件下，球形弹产生的压力峰值均远小于同速度下的平头弹产生的压力.相似的，对实验数据采用 $y=A\times\exp(-x/t)+y_0$ 形式的指数拟合形式.不同与平头弹的衰减特性同样呈现在量纲一的图 5(a)中，更多的压力点趋近于曲线 $1/x$.还可以看出，弹体侵彻速度的变化只是对冲击波的强度产生较大的影响，而对于其强度沿距离的衰减的影响不大.当球形弹侵彻聚乙烯薄膜时，得到了图 5(b)显示的压力衰减曲线图.不同于侵彻铝板时点的分布更趋于 $1/x$，此时的点的分布都集中于 $1/x^2$ 附近.即相较于弹体对铝板的侵彻，弹体侵彻由薄膜密封的水容器时其冲击波峰值沿距离衰减速度更快.

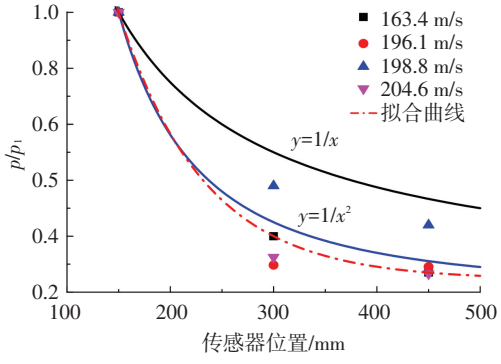
2.3　初始冲击波随角度衰减特性

冲击波是以球面向前运动的，为了研究球面上压力的分布情况，利用不同组的实验分别测量了 7°、30°、45°、62°和 83°处的压力.其中，角度定义为 θ

沿球面顶点到最下方点逐渐减小,弹道角度为 90°.为了更清晰的了解压力沿角度的衰减趋势,在量纲一的图中引进曲线 $\sin(\theta-7°)$、$\sin\theta$、$\sin(\theta+7°)$.



(a) 撞击铝板后压力衰减趋势



(b) 撞击薄膜后压力衰减趋势

图 5 球形弹体撞击不同靶板形成冲击波强度衰减关系

2.3.1 平头弹侵彻实验

利用多组不同的实验结果,得到图 6 所示的压力点随角度的分布结果.与上述结果相似,弹体侵彻速度越大,各点处的峰值压力越高.角度越大,即测量点越靠近弹道初始冲击波的峰值就越大,该峰值随着角度的减小而减小,减小速度随着角度的减小而增加.从量纲一的点的分布可以看出,各个值都分布在 $\sin(\theta-7°)$ 与 $\sin(\theta+7°)$ 之间,与文献[5]的 $\sin(\theta-7°)$ 和文献[10]的 $\sin(\theta+7°)$ 都不相符.

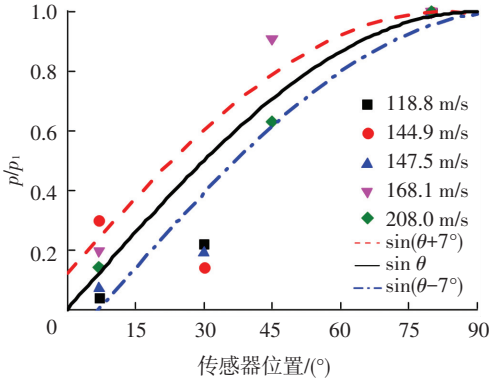
2.3.2 球形弹侵彻实验

图 6(b) 展示了 5 组有效的数据,前 4 组为直径 12.3 的球形弹体撞击铝板的实验结果,第 5 组容器以薄膜密封.相较于平头弹体实验结果的相对离散,球形弹体入水产生的球形冲击波阵面上的压力值更趋于稳定,量纲一后的结果几乎全都介于 $\sin(\theta-7°)$ 与 $\sin(\theta+7°)$ 之间,并基本分布在 $\sin\theta$ 的曲线上下.相对于冲击波峰值强度对冲击速度的敏感程度,实验结果表明弹体的侵彻速度对压力衰减的影响很小,在本文其他工况下能发现同样的结论.

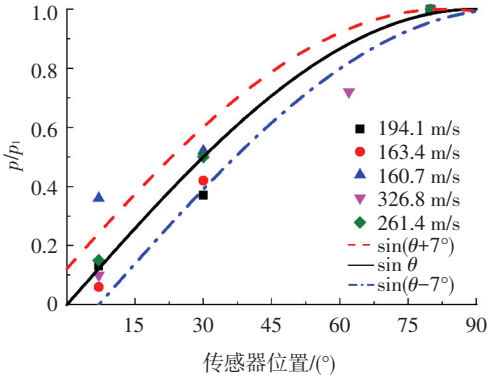
2.4 初始冲击波峰值影响因素

2.4.1 弹体初始速度

随着弹体速度的增加,不同头型的弹体入水产生的冲击波的初始峰值压力都随之变大.以不同速度的球形弹入水为例,综合上述沿距离和角度测量的初始冲击波的峰值压力,如图 7(a) 所示.从图 7(a)中可以明显的看出,各点处测量得到的初始冲击波的压力峰值与速度呈现较好的线性关系.并且各个点处的斜率各不相同,距离弹道越近的点的分布的斜率越大.



(a) 平头弹产生的冲击波衰减趋势



(b) 球形弹产生的冲击波衰减趋势

图 6 峰值压力沿角度衰减趋势

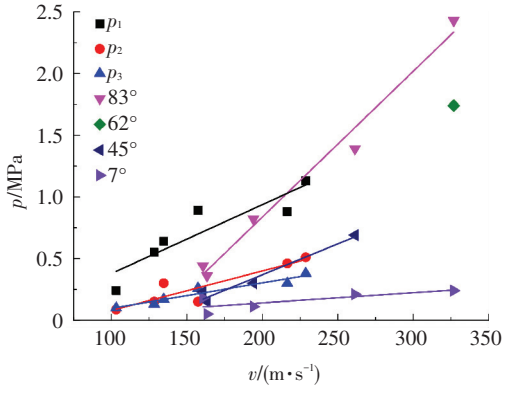
2.4.2 靶板厚度

通过弹体高速垂直射入上端开口的水容器中,文献[5]通过对不同点压力的检测提出初始冲击波峰值随角度以 $\sin(\theta-7°)$ 的趋势衰减的.本文实验结果显示,这种衰减趋势并不能适用于不同的入水条件下因高速弹体而产生的初始冲击波的衰减特性.对比两者可以发现,这个区别主要是由弹体入水前的水容器的边界条件导致,因为本文的实验中弹体通过侵彻薄板或薄膜后才入水.而本文实验所得发现压力多数分布在 $\sin(\theta-7°)$ 和 $\sin(\theta+7°)$ 曲线之间,由此可见,弹体所撞击的靶板的厚度对冲击波的衰减特性造成一定程度的影响.这种影响可能是,峰值压力在薄板的作用下增加了沿角度衰减的速度而增大了其在弹道方向上的幅值.在弹体初始速度相同,用薄板和薄膜密封的水容器中的峰值压力同样也显示出前者较于后者要大很多.

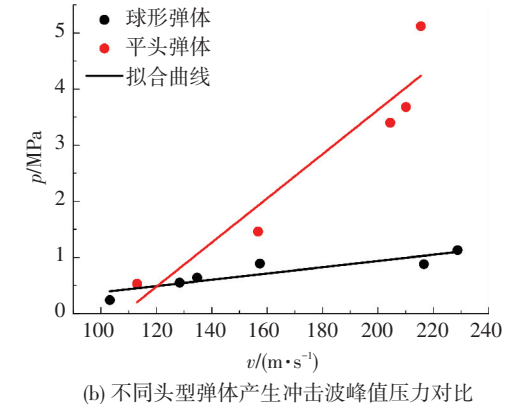
2.4.3 弹体

球形和平头弹体这两种质量和头型都差异较大的条件下以相同的速度入水,平头弹体因此产生的冲

击波峰值压力要远大于球形弹的压力值，如图 7(b). 与图 7(a)一样不同弹体侵彻造成的峰值压力与速度呈现线性关系，并且平头弹形成的点的分布的斜率是球形弹的 7 倍左右. 造成这种明显差异的原因主要有两个：一方面是弹体的初始动能，速度相同，截然不同的初始动能作为初始能量部分在液体中以压力波的形式传播，这就导致了压力波会拥有明显不同的能量. 而初始冲击波的峰值压力的差异则是能量不同的一个重要表现；另外一个原因是弹头头型(CRH)的不同. 关于弹体头型对冲击波强度的影响，在进一步研究中利用不同头型的弹体侵彻水容器，对水中冲击波的强度及衰减特性进行了分析.



(a) 球形弹产生冲击波压力随速度变化



(b) 不同头型弹体产生冲击波峰值压力对比

图 7　速度和头型对冲击波峰值压力的影响

3　结　论

1) 初始冲击波峰值随着波的传播距离而衰减，不同距离得到的压力介于距离的倒数与距离平方的倒数之间；初始冲击波在波阵面上沿着角度衰减，波阵面上各点的峰值压力以类正弦的趋势变化.

2) 靶板不仅对冲击波的强度有一定的影响，还影响冲击波强度的衰减快慢程度. 无论弹体头型如何，弹体速度与初始冲击波的峰值强度呈明显的线性关系，但是对衰减率趋势的影响不大.

参考文献

[1] WORTHINGTON A M, COLE R S. Impact with a liquid surface studied by the aid of instantaneous photography[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1900, 194: 175-199.

[2] Von KARMAN T. The impact of seaplane floats during landing[M]. Washington, DC: Technical Report Archive & Image Library, 1929.

[3] GUO Zitao, ZHANG Wei, WANG Cong. Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(2): 217-225.

[4] GUO Zitao, ZHANG Wei, XIAO Xinke, et al. An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49(2): 43-60.

[5] MCMILLEN J H. Shock wave pressures in water produced by impact of small spheres[J]. Physical Review, 1945, 68(9/10): 198-209.

[6] LESLIE C B. Underwater noise produced by bullet entry [J]. The Journal of the Ascoustical Society of America, 1964, 36(6): 1138-1144.

[7] MAY A. Review of water-entry theory and data[J]. Journal of Hydronautics, 1970, 4(4): 140-142.

[8] MCMILLEN J H, HARVEY E N. A spark shadowgraphic study of body waves in water [J]. Journal of Applied Physics, 1946, 17(7): 541-555.

[9] VARAS D, ZAERA R, LÓPEZ-PUENTE J. Experimental study of CFRP fluid-filled tubes subjected to high-velocity impact[J]. Composite Structures, 2011, 93 (10): 2598-2609.

[10] LUKE A S. A Detailed examination of the pressure produced by a hydrodynamic ram event[D]. Cincinnati: The University of Cincinnati, 2007.

[11] 任鹏，张伟，叶楠，等. 非药式水下爆炸冲击波特性数值模拟研究[J]. 船舶力学，2014，18(11)：1353-1360.

[12] 张伟，任鹏，黄威，等. 非药式水下爆炸冲击波加载装置研究[J]. 爆炸与冲击，2014，34(3)：334-339.

[13] 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.

[14] HUANG W, ZHANG W, REN P, et al. An experimental investigation of water-filled tank subjected to horizontal high speed impact[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6): 1123-1138.

[15] SHI H H, KUME M. An experimental research on the floew flied of water entry by pressure measurements[J]. Physics of Fluids, 2001, 13(1): 347-349.

(编辑　张　红)