DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0959-07

破片高速侵彻中厚背水钢板的剩余特性*

陈长海[1],侯海量[1],张元豪[1],戴文喜[2],朱 锡[1],方志威[1]
(1.海军工程大学舰船工程系,湖北 武汉 430033;
2.中国舰船研究设计中心,湖北 武汉 430064)

摘要:为探讨破片高速侵彻中厚背水钢板的剩余特性,通过弹道实验,分析了弹体和靶板的破坏模式,比较了破片侵彻垂直和倾斜背水钢板后的瞬时余速和运动轨迹,以及由此引起的初始冲击波的压力特性。结果表明,破片在高速侵彻下,头部产生了严重的镦粗变形,钢板背后水介质的动支撑作用不容忽视;背水钢板的破坏模式主要为剪切冲塞破坏,背弹面穿孔存在绝热剪切效应;破片穿透背水钢板初期,会产生空泡和射流,空泡大小和射流强度与破片入水初速有关,而空泡形状和射流方向则受背水钢板的倾斜角度影响;破片穿透背水钢板后,在水中的运动轨迹会发生偏转,偏转方向与破片入水初速有关;由于水介质的动支撑作用和动能耗散效应,破片穿透背水钢板后的动能损失要大于穿透背空钢板的情形;水中初始冲击波的压力特性应考虑稀疏波的影响;相同初速下,破片侵彻垂直背水钢板引起的初始冲击波的峰值压力较侵彻倾斜背水钢板要大。

关键词:高速侵彻;背水钢板;剩余特性;初始冲击波
中图分类号:O385 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

液舱结构在弹丸侵彻下的动态响应问题近年来受到工程界广泛关注。战斗部接触爆炸会产生大量高速破片,对舰船舷侧防护液舱结构的侵彻会造成严重毁伤。针对高速弹体侵彻液舱结构的破损问题已开展了大量研究工作。J. H. McMillen 等[1]早在 20 世纪 40 年代就针对弹体入水冲击波传播等问题通过实验进行了分析。D. Townsend 等[2]则结合实验对高速破片侵彻薄壁水箱结构引起的水锤效应做了细致的研究,并提出了衰减冲击波压力的初步构想。随后,R. J. Disimile 等[3]通过实验分析了钢质和铝质球形弹丸穿透背水薄铝板后在水中引起的水锤效应。D. Varas 等[4]则从压力变化和管壁变形等方面对球形弹丸侵彻注水方管引起的水锤效应进行了研究,并分析了注水液面的影响。E. Deletombe 等[5]比较了密闭和敞开水箱两种情形下水锤效应引起的冲击波压力差异。沈晓乐等[6]、徐双喜等[7]、李典等[8]针对高速破片侵彻液舱问题也开展了大量研究。通过分析可知,目前针对破片侵彻液舱问题的研究大多集中于穿透背水钢板后引起的水锤效应,对于破片穿透后的剩余特性研究较少,且研究对象大多为垂直背水薄板。本文中通过弹道实验,分析破片高速侵彻中厚背水钢板后的剩余特性,从弹体和靶板的破坏模式以及破片穿透背水钢板后的瞬时余速等方面,探讨破片高速侵彻倾斜和垂直背水钢板后的剩余特性的差异,力图揭示中厚背水钢板的抗高速侵彻机理,为后续的理论分析和数值模拟研究提供数据支撑。

1 实验设计

实验采用 15 mm 口径滑膛弹道枪,通过火药发射。破片初速采用激光测速系统(1# 和 2# 光幕靶)得到。实验弹丸采用质量 3.3 g、边长 7.5 mm 的立方体破片。破片材料为经淬火处理的 45 钢。实验靶板为 5 mm 左右的 Q235 船用低碳钢。为模拟破片垂直和斜侵彻背水钢板的情形,制作了垂直 90°和倾斜 60°两种水箱结构,分别如图 1~2 所示。

* **收稿日期**:2016-04-12;**修回日期**:2016-09-06
基金项目:国家自然科学基金项目(51409253,51479204)
第一作者:陈长海(1985—),男,博士,讲师,chenchanghai0746@163.com。

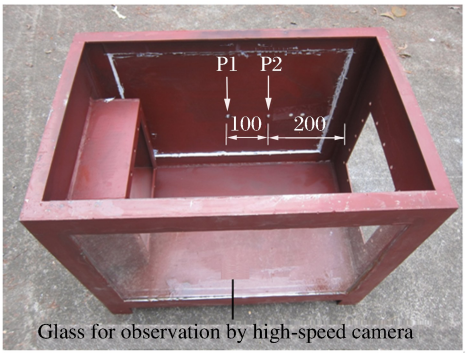

图 1 垂直 90°水箱结构(水箱Ⅰ)

Fig. 1 Water tank with an incident angle of 90° (WT-Ⅰ)

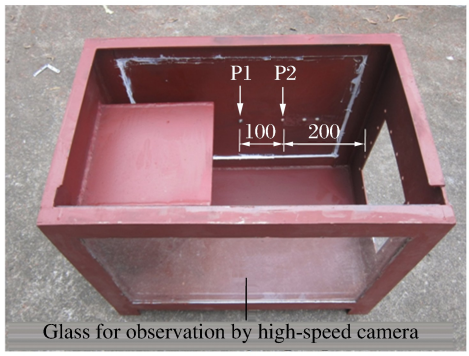

图 2 倾斜 60°水箱结构(水箱Ⅱ)

Fig. 2 Water tank with an incident angle of 60° (WT-Ⅱ)

2 弹道实验结果

采用高速摄影机对破片穿透背水钢板后在水中的运动过程进行了观测,得到背水钢板情形下破片余速即弹丸穿透钢板入水瞬间的速度。表 1 中给出了弹道实验结果及主要参数。

表 1 实验结果及主要参数

Table 1 Experimental results and main parameters

工况	靶板厚度/mm	靶后介质	入射角/(°)	破片初速/(m·s^{-1})	破片余速/(m·s^{-1})	破坏情况
1	4.98	水(水箱Ⅰ)	90	1 105.0	229.3	穿透
2	4.96	水(水箱Ⅰ)	90	1 231.2	347.1	穿透
3	4.98	水(水箱Ⅱ)	60	1 058.1	167.8	穿透
4	4.94	水(水箱Ⅱ)	60	1 290.3	310.5	穿透
5	4.92	空气	90	1 029.0	384.0	穿透
6	4.96	空气	60	1 029.9	224.1	穿透

3 实验结果及分析

3.1 弹体破坏模式分析

图 3 给出了实验后收集的破片变形破坏形貌。由图可知,立方体破片不管是侵彻背水钢板还是背空钢板,头部均发生了严重的镦粗变形。对于垂直侵彻情形,破片头部近似呈圆形;而对于 60°斜侵彻情形,破片头部虽然也近似呈圆形,但圆形中心向入射速度反方向偏移。进一步观察可知,立方体破片基本上是以面接触的形式侵彻靶板,且能够较好地保持侵彻姿态。

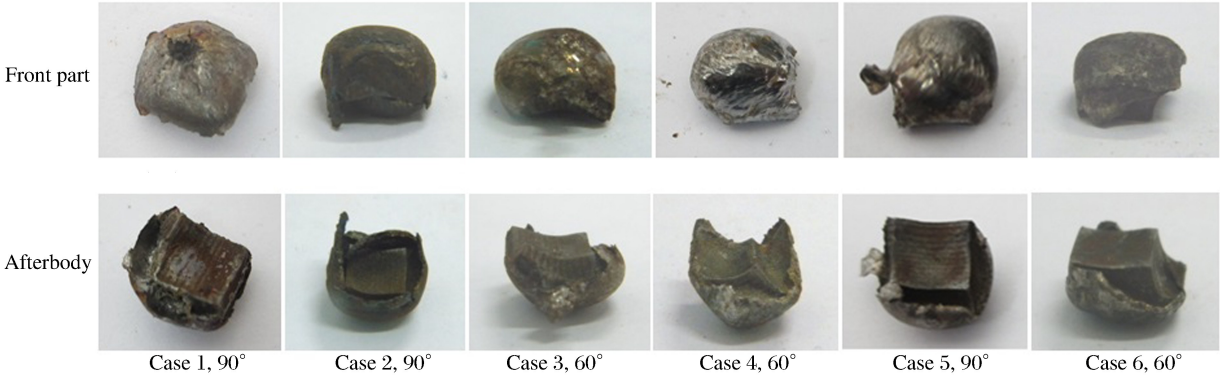

图 3 实验后弹体变形破坏形貌

Fig. 3 Deformation and damage of projectiles after tests

3.2　靶板破坏模式分析

由于钢板背后有液体存在，使得背液钢板的抗侵彻过程及耗能机制与背空钢板[9]差异较大。图 4 中给出了中厚背水钢板的典型破坏形貌。由图 4 可知，高速侵彻下，中厚背水钢板的穿甲破坏模式主要是剪切冲塞破坏。对于垂直和 60°斜侵彻两种侵彻情形，主要区别在于穿孔形状。进一步观察图 5 可知，背水钢板在厚度方向存在一定的绝热剪切现象。这说明高速侵彻背水钢板过程中，绝热剪切效应不容忽视。而未考虑绝热剪切效应的弹体侵彻背水钢板的能量耗散理论计算[7]是不符合实际情况的。

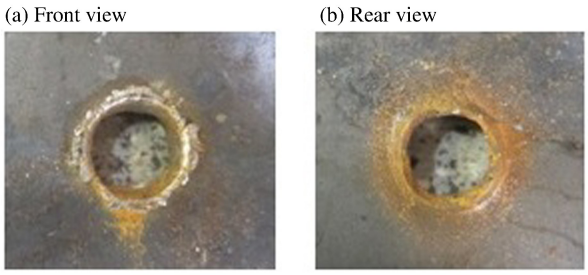

图 4　工况 1 背水钢板破坏形貌

Fig. 4　Damage of water-backed steel plate in case 1

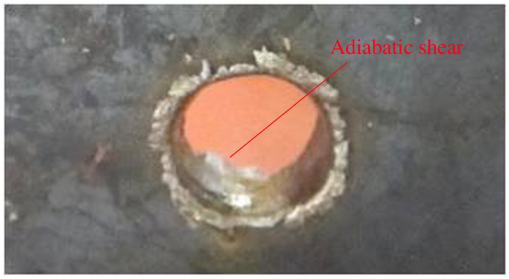

图 5　工况 2 背水钢板绝热剪切形貌

Fig. 5　Damage of adiabatic shear for water-backed steel plate in case 2

3.3　破片在水中运动轨迹分析

破片在水中运动的过程主要包括拖曳和空化两个阶段[3-4]。破片在水中运动过程中，垂直方向则受到水动升力和重力及低压效应的共同作用[10]。

结合图 6～9 可知，破片初速较大时，即穿透背水钢板后的瞬时余速较大时，破片在水中的运动轨迹向上偏，如工况 2(图 7)和工况 4(图 9)；相反，则向下偏，如工况 3(图 8)；若破片速度能使水动升力和重力及低压效应保持平衡，则破片的水中运动轨迹近似成水平，如工况 1(图 6)。进一步比较可看出，破片在水中运动轨迹的偏转主要还是受入水初速的影响，钢板倾斜角度对轨迹偏转的影响较小。

结合图 6～7 可看出，破片入水初期即产生了明显射流，射流方向与水平方向夹角均为约 45°。这与弹体低速入水深闭合所产生的铅垂方向的射流[10]有较大差异。进一步分析图 8～9 可看出，虽然破片在穿透倾斜背水钢板后也产生了上下方向的射流，但由于倾斜钢板的影响，向上射流的方向平行于钢板平面，与水平方向成 60°夹角；向下射流的方向仍与水平方向成 45°夹角。进一步结合图 6～9 可知，破片入水初期形成的射流强度与破片入水初速有关，破片入水初速越大，射流越强。



图 6　工况 1 破片在水中的运动轨迹

Fig. 6　Moving trajectory of fragment in water for case 1

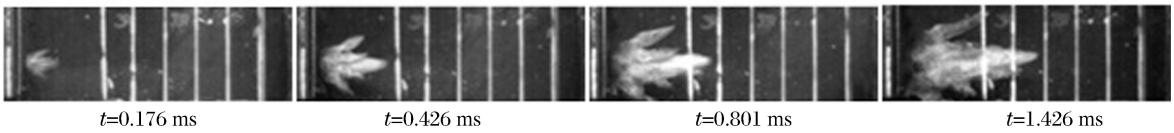

图 7　工况 2 破片在水中的运动轨迹

Fig. 7　Moving trajectory of fragment in water for case 2

进一步分析图 6～9 中空泡的相关特性可知，破片穿透垂直背水钢板后的空泡形状比较对称，而穿透 60°倾斜背水钢板后形成的空泡则往下偏。从空泡的大小来看，主要还是取决于破片穿透背水钢板后的余速即破片入水初速。

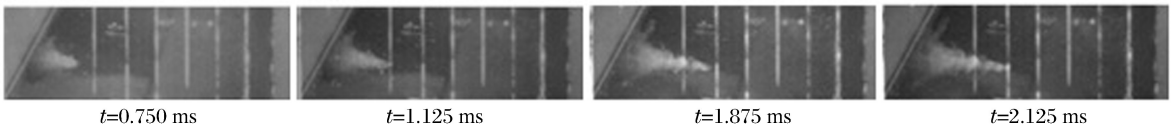

图 8 工况 3 破片在水中的运动轨迹

Fig. 8 Moving trajectory of fragment in water for case 3

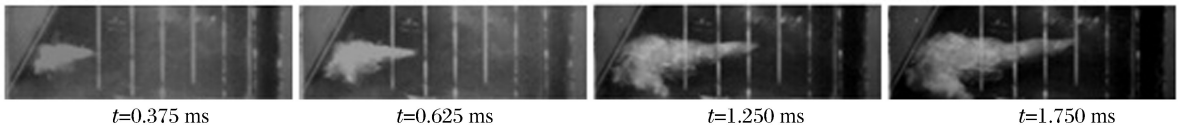

图 9 工况 4 破片在水中的运动轨迹

Fig. 9 Moving trajectory of fragment in water for case 4

3.4 破片穿透背水钢板后的余速分析

通过分析高速摄影图片得到破片穿透背水钢板后的瞬时余速。通过拟合求导得到各工况破片穿透背水钢板后的瞬时余速，如表 1 所示。由表 1 通过计算可知，随着破片初速提高，背水钢板单位面密度吸能值相应提高。破片初速越高，提高值越大。相对于背空钢板而言，相同破片初速下，背水钢板的单位面密度吸能要稍大。

3.5 初始冲击波压力特性分析

大量研究结果表明[2,5,8]，弹体高速侵彻水介质时形成的冲击波压力峰值较大。因此，本节主要分析初始冲击波压力特性。假设稀疏波以对称于自由液面虚拟镜像波源为起点向外传播，则初始冲击波和稀疏波的传播过程如图 10 所示。以初始冲击波产生时刻为起点，得到初始冲击波传播至压力测点的时间 t_1 为

$$t_1=\sqrt{L_{\mathrm{h}}^2+B^2+(D+h-H)^2}/c_{\mathrm{w}} \tag{1}$$

式中：L_{h} 为压力测点离撞击点的水平距离，B 为压力测点离轨迹线的水平横向距离，D 为撞击点离自由液面的高度，h 为压力测点离水底高度，H 为自由液面高度，c_{w} 为水中声速。

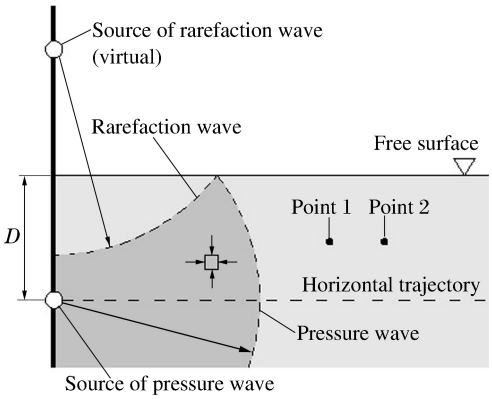

图 10 稀疏波的传播示意图

Fig. 10 Sketch of rarefaction wave propagation

稀疏波到达压力测点所需的时间 t_2 为

$$t_2=\sqrt{L_{\mathrm{h}}^2+B^2+(D+H-h)^2}/c_{\mathrm{w}} \tag{2}$$

由于 $H>h$，因此 t_2 始终要大于 t_1，但随着水平距离 L_{h} 的增大，t_2 与 t_1 的差值变小。

考虑到初始冲击波有一定的持续作用时间 Δt，若稀疏波在初始冲击波持续作用时间内到达，则需考虑稀疏波对初始冲击波的影响；反之，稀疏波对初始冲击波无影响。由此得到以下判据：

$$\begin{cases} t_2<t_1+\Delta t & \text{稀疏波对初始冲击波有影响} \\ t_2\geqslant t_1+\Delta t & \text{稀疏波对初始冲击波无影响} \end{cases} \tag{3}$$

对于线性可压缩介质而言，波传播具有频率恒定的特性[11]。因此，初始冲击波在水中传播时，距离上的几何衰减仅对冲击波载荷幅值即峰值压力大小产生影响，对载荷的持续作用时间没有影响[4]。因而某一压力测点上，初始冲击波持续作用时间 Δt 可按下式计算[12]：

$$\Delta t = 3Rv_{0w}/(2c_w) \tag{4}$$

式中：R 为被压缩水介质的区域半径，v_{0w} 为弹丸(破片)入水初速。

若压力测点位于水平弹道轨迹上，则稀疏波和初始冲击波传播至该点的时间差 ΔT 为

$$\Delta T = t_2 - t_1 = (\sqrt{L_h^2 + 4D^2} - L_h)/c_w \tag{5}$$

假设该压力测点的初始冲击波峰值压力与距离的平方成反比，且近似呈三角形脉冲形式，则考虑稀疏波的影响下，该压力测点的比冲量 I 近似等于：

$$I \approx \frac{1}{2}P(L_h)\Delta T = P(L_0)\left(\frac{L_0}{L_h}\right)^2 \frac{\sqrt{L_h^2 + 4D^2} - L_h}{2c_w} \tag{6}$$

式中：$P(L_0)$ 为距离撞击点 L_0($L_0 < L_h$)处的峰值压力值。

将上式对 D 求导得到：

$$\frac{\partial I}{\partial D} = P(L_0)\left(\frac{L_0}{L_h}\right)^2 \frac{4D}{c_w\sqrt{L_h^2 + 4D^2}} \tag{7}$$

由上式可以看出，撞击点水深 D 对压力测点比冲量 I 的影响与该点离撞击点距离 L_h 的 3 次方成反比，即稀疏波对初始冲击波的影响程度随距离的 3 次方倒数下降，说明距离越远，稀疏波的影响越小。

图 11 中给出了典型工况(工况 2)中压力测点 1～2 的初始冲击波压力时程曲线。采用式(1)～(4)计算得到：工况 2 中初始冲击波到达测点 2 和测点 1 的时间差约为 49 μs，而实验得到两测点峰值时间差约为 51 μs，两者吻合较好。结合式(3)的判据可得，对于测点 1，稀疏波无影响；而对于测点 2，稀疏波有影响。而实际情况是，测点 2 受到了稀疏波影响，测点 1 未见明显影响。因此，考虑破片后续运动和空化效应影响，本文中对测点 1～2 中稀疏波是否影响的预测判别还是比较符合实验结果的。

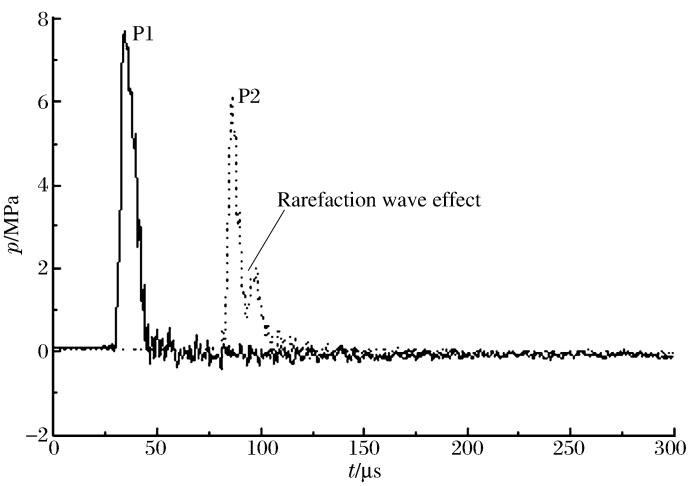

图 11 工况 2 中初始冲击波压力时程曲线

Fig. 11 Pressure time history of incipient shock wave in case 2

表 2 中给出了各工况下压力测点 1～2 各自的初始冲击波峰值压力大小。由表 2 可知，各工况中测点 1 和测点 2 处的初始冲击波峰值压力大小顺序是相同的，即工况 2＞工况 4＞工况 1＞工况 3。由于初始冲击波峰值压力大小与破片的入水初速近似呈线性增大[2,4,8,12]，因而由峰值压力大小顺序可反推得到破片入水初速即破片穿透背水钢板后的瞬时余速的大小顺序应该相同，这与上一节的分析结果是一致的。

表 2 破片侵彻背水钢板各工况测点 1～2 的峰值压力测量结果

Table 2 Measured peak pressures of test points 1 and 2 for cases of water-bakced steel plates penetrated by fragments

工况	破片初速 v_0/(m·s^{-1})	入射角/(°)	破片余速 v_{rl}/(m·s^{-1})	峰值压力 P_{1max}/MPa	峰值压力 P_{2max}/MPa
1	1 105.0	90	286.0	6.184	4.580
2	1 231.2	90	462.7	7.707	6.132
3	1 058.1	60	202.9	4.322	3.894
4	1 290.3	60	385.9	6.432	5.563

4 结 论

通过弹道实验,从弹体和靶板的破坏模式、破片穿透背水钢板后的瞬时余速等方面,分析了破片高速侵彻中厚背水钢板的剩余特性,得出主要结论如下:

(1)破片高速侵彻中厚背水钢板过程中,头部会发生严重镦粗变形,而镦粗变形主要发生在侵彻背水钢板阶段,但背部水介质的"动支撑"作用不可忽视;

(2)破片高速侵彻下,中厚背水钢板的主要破坏模式为剪切冲塞,迎弹面出现靶材的反向飞溅,而背弹面穿孔则存在绝热剪切现象;

(3)破片穿透背水钢板初期,会产生空泡和射流,空泡大小和射流强度主要与破片入水初速有关,而空泡形状和射流方向则受背水钢板的倾斜角度影响;

(4)破片穿透背水钢板后,在水介质中的运动轨迹会发生偏转,偏转方向主要与破片入水初速有关,破片初速较大时,运动轨迹向上偏,反之则向下偏;

(5)由于水介质的"动支撑"作用和动能耗散效应,破片穿透背水钢板后的瞬时余速较穿透背空钢板后的余速要低,动能损失要大;

(6)由于有自由液面的存在,水介质中初始冲击波压力特性需考虑稀疏波的影响,而稀疏波影响的可能性随离撞击点的距离的增大而提高,但影响程度会大大降低;

(7)相同初速条件下,破片侵彻垂直背水钢板引起的初始冲击波的峰值压力大小较侵彻倾斜背水钢板要大,但峰值压力的提高幅度随破片初速的增大或离撞击点距离的增大均相应减弱。

参考文献:

[1] 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.

[2] Townsend D, Park N, Devall P M. Failure of fluid filled structures due to high velocity fragment impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29(1-10):723-733.

[3] Disimile P J, Swanson L A, Toy N. The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(6):821-829.

[4] Varas D, Lopez-Puente J, Zaera R. Experimental analysis of fluid-filled aluminium tubes subjected to high-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(1):81-91.

[5] Deletombe E, Fabis J, Dupas J, et al. Experimental analysis of 7.62 mm hydrodynamic ram in containers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2013,37(2):1-21.

[6] 沈晓乐,朱锡,侯海量,等.高速破片侵彻防护液舱试验研究[J].中国舰船研究,2011,6(3):12-15.
Shen Xiaole, Zhu Xi, Hou Hailiang, et al. Experimental study on penetration properties of high velocity fragment into safety liquid cabin[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011,6(3):12-15.

[7] 徐双喜,吴卫国,李晓彬,等.舰船舷侧防护液舱舱壁对爆炸破片的防御作用[J].爆炸与冲击,2010,30(4):395-400.
Xu Shuangxi, Wu Weiguo, Li Xiaobin, et al. Protective effect of guarding fluid cabin bulkhead under attacking by explosion fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(4):395-400.

[8] 李典,朱锡,侯海量,等.高速杆式弹体侵彻下蓄液结构载荷特性的有限元分析[J].爆炸与冲击,2016,36(1):1-8.
Li Dian, Zhu Xi, Hou Hailiang, et al. Finite element analysis of load characteristic of liquid-filled structure subjected to high velocity long-rod projectile penetration[J]. Explosion and Shock Waves, 2016,36(1):1-8.

[9] 王晓强,朱锡.高速钝头弹侵彻中厚金属靶板的机理研究[J].工程力学,2010,27(12):213-218.
Wang Xiaoqiang, Zhu Xi. Study on high-velocity blunt-nosed projectiles penetrating moderate thickness metallic targets[J]. Engineering Mechanics, 2010,27(12):213-218.

[10] 顾建农,张志宏,郑学龄,等.弹体入水弹道研究综述[J].海军工程大学学报,2000,12(1):18-23.
Gu Jiannong, Zhang Zhihong, Zheng Xueling, et al. A review of the body's water-entry ballistic research[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000,12(1):18-23.

[11] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，2010.

[12] Dear J P, Field J E. High-speed photography of surface geometry effects in liquid/solid impact[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(4): 1015-1021.

Residual characteristics of moderately thick water-backed steel plates penetrated by high-velocity fragments

Chen Changhai[1], Hou Hailiang[1], Zhang Yuanhao[1],
Dai Wenxi[2], Zhu Xi[1], Fang Zhiwei[1]

(1. *Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei, China*;
2. *China Ship Development and Design Center, Wuhan* 430064, *Hubei, China*)

Abstract: In this study we carried out ballistic tests to explore the residual characteristics of moderately thick water-backed steel plates penetrated by high-velocity fragments. Damage modes of projectiles as well as targets were analyzed. We compared the vertical and inclined water-backed steel plates penetrated by fragments in terms of instantaneous fragment velocities, moving trajectories and the pressure characteristics of induced incipient shockwaves. The results show that serious mushrooming deformation occur on the noses of the fragments during high-velocity penetration, and the dynamic supporting effect of water in the back of the steel plate should be considered in its examination. Damage modes of the water backed steel plates are mainly shear plugging, together with adiabatic shear effect available on the distal side of the perforation holes. In the earlier stage after the fragment perforating the water-backed steel plates, cavities and jets are produced. The cavity size and the jet intensity are both related to the initial velocities of the fragments entering the water, whereas both the cavity shape and the jet direction are affected by the inclined angle of the water-backed steel plates. After the perforation of the water-backed steelplates, the moving trajectories of the fragments will deflect, and the deflection direction is related to the initial velocities. Due to the dynamic supporting as well as the kinetic energy dissipation effects of water, the kinetic energy loss of the fragment perforating water-backed steel plates is greater than that perforating air-backed steel plates. The influence of the rarefaction wave on the pressure characteristics of incipient shock waves should be considered. Under the condition of the same initial fragment velocity, penetration of the vertical water-backed steel plates result in incipient shock waves with higher peak pressures than those resulting from the penetration of the inclined water-backed steel plates.

Keywords: high-velocity penetration; water-backed steel plate; residual characteristic; incipient shock wave

（责任编辑　曾月蓉）