弹体侵彻作用下液舱舱壁压力载荷的试验研究

张玮¹, 张小强^{2,3}, 陈子豪^{2,3}, 任宪奔^{2,3}, 李营^{2,3*}

1. 海军研究院, 北京 100161;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 北京理工大学先进结构技术研究院, 轻量化多功能复合材料与结构北京市重点实验室, 北京 100081

*联系人, E-mail: bitliying@bit.edu.cn

收稿日期: 2020-09-16; 接受日期: 2021-03-04; 网络出版日期: 2021-11-15

国家自然科学基金(编号: 11802030, 11802031)资助项目

摘要 弹体打击作用下的瞬态压力波是舰艇防护液舱、飞机燃油舱等液舱面临的重要威胁. 本文通过开展不同弹头形状的弹体侵彻液舱的试验, 获得了前后壁板的压力曲线, 分析了舱壁不同位置的应力分布现象, 研究了舱壁不同位置、不同弹头形状、不同弹体入射速度对冲击波峰值和冲量的影响. 结果表明, (1) 距离弹道中心距离相当位置处, 后壁板上的冲击波峰值和冲量明显大于前壁板, 且存在明显的二次加载现象, 其中角隅处最明显; (2) 液舱前后壁板冲击波峰值、冲量均随弹体入射速度增加而线性增大; (3) 平头弹形成的冲击波峰值及冲量最大, 半球头弹次之, 卵形弹最小, 且卵形弹较容易发生弹道偏转.

关键词 高速入水, 防护液舱, 液舱, 冲击波载荷

PACS: 02.70.Dh, 02.60.Cb, 02.50.Cw

1 引言

弹体高速进入液舱造成舱壁产生明显塑性变形, 甚至发生破坏^[1,2]. 舰艇防护者应用该机制在多层防护结构中引入液舱, 能在吸收鱼雷或者反舰导弹爆炸产生的高速破片方面起到显著效果^[3]. 另外, 为防止燃油舱被子弹等击中后发生整体失效^[4], 飞机燃油舱设计工作者也特别关注液舱的防护应用与研究.

弹体进入液舱后产生冲击波、巨大的气穴等复杂载荷, 复杂的瞬态冲击载荷与结构发生流固耦合作用, 这些都是学者的重点研究内容. Varas等人^[5,6]采用球形

破片冲击铝质容器, 观察到含有液体的结构变形明显大于空容器. Deletombe等人^[7]采用子弹射击的方法开展试验, 并观察到气穴溃灭的物理过程. Lee等人^[8,9]分析了弹体入水作用下空泡变化规律和水中压力的变化规律, 但相关规律主要基于对自由液体的分析. Disimile等人^[4]采用纹影法分析了三角棒对水中冲击波的引导作用, 分析了液体中冲击波的传播规律. Lecysyn等人^[10,11]开展试验研究了子弹在原型容器中的速度衰减规律. Ren等人^[12]通过试验观察了液舱板的终点变形, 分析了不同因素对变形的影响. 李营等人分析了液舱吸能机理^[13], 给出了液舱内弹体速度衰减的预测

引用格式: 张玮, 张小强, 陈子豪, 等. 弹体侵彻作用下液舱舱壁压力载荷的试验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 124613
Zhang W, Zhang X Q, Chen Z H, et al. Experimental study on pressure load of tank bulkhead under penetration of projectile (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 124613, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0363

公式^[14], 并分析了内置空气层的防护效果^[15]. 现有研究重点关注液舱结构变形等规律, 对弹体进入液舱后形成的载荷特性研究不够, 缺乏相应的试验数据, 对影响因素规律掌握也不清楚, 给液舱防护设计带来了一定的困难.

本文开展了不同弹头形状的弹体侵彻液舱的试验, 获得了前后舱壁的压力曲线, 分析了舱壁的压力分布特征, 对比了舱壁不同位置、不同弹头形状、不同弹体入射速度对冲击波峰值和冲量的影响.

2 试验装置与工况

2.1 试验装置

如图1(a)所示, 试验基于一级轻气炮开展, 包含发射系统、靶板系统、测试系统等分系统. 如图1(b)所示, 靶板系统由液舱与前后壁板组成, 液舱内装入水, 宽度为30 mm. 前后壁板材料为Q235钢, 厚度设置均为10 mm. 本试验重点关注舱壁载荷, 为控制靶板变形, 在壁板弹道轴线处开圆孔(直径20 mm)并用薄膜密封.

前后壁板安装有压力传感器基座, 并采用PCB113B22型压力传感器测量液舱前后壁板的压力. 1, 2号压力传感器设置在液舱前壁板, 距离弹道中心50 mm; 3-5号传感器设置在液舱后壁板, 分别距离弹道中心50, 50和70 mm.

试验过程中采用遮挡式激光测速仪结合高速相机(100000帧/s)测量弹体速度. 为了获得清晰的试验过程, 采用2个专用高速摄影灯打光. 在靶架上安装加速度传感器为高速相机提供触发信号.

为了对比不同弹头形状对液舱前后壁板压力载荷的影响, 制备了平头、半球头和卵形三种形状的弹体(图2), 为确保弹体在水中运动过程中保持刚性, 取材12.9级高强螺栓(SCM435合金钢)并加工, 质量均控制为17.09 g. 为了确保弹道稳定性, 尾部做局部挖空处理.

2.2 试验工况

为了分析速度和弹头形状对液舱前后壁板载荷特性的影响规律, 共开展了13组试验. 具体如表1所示.

图1 (网络版彩图)试验装置. (a) 整体试验系统; (b) 靶板组成

Figure 1 (Color online) Experimental device. (a) Experimental system; (b) target plate composition.

图 2 三种不同弹头形状的弹体(单位: mm). (a) 平头弹; (b) 半球头弹; (c) 卵形弹

Figure 2 Three kinds of projectiles with different shapes (unit: mm). (a) Flat-nosed projectile; (b) spherical-nosed projectile; (c) ogive-nosed projectile.

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

序号	v_i (m/s)	v_r (m/s)	弹体类型
1	146.04	129.73	平头弹
2	179.73	164.70	平头弹
3	129.29	115.03	平头弹
4	111.83	97.52	平头弹
5	100.65	81.69	平头弹
6	97.36	93.74	半球头弹
7	130.85	122.81	半球头弹
8	143.79	134.20	半球头弹
9	143.52	134.20	半球头弹
10	115.27	111.83	卵形弹
11	125.60	118.57	卵形弹
12	214.72	211.89	卵形弹
13	170.33	157.30	卵形弹

3 试验结果及分析

3.1 弹体侵彻物理过程

弹体侵彻液舱的过程如图3所示. 平头弹侵彻液舱过程中, 在液舱前后壁板均造成明显的液体飞溅, 形成雾状液滴, 且基本保持弹道稳定性(图3(a)). 半球头弹侵彻液舱过程中, 溅飞的液滴数量明显变少^[16](图3(b)). 而卵形弹不仅造成的液体飞溅现象最弱, 且发生了明显的弹道偏转, 与文献^[17]研究结论一致(图3(c)).

3.2 压力载荷时域特征

平头弹以146.04 m/s的初速度撞击液舱时, 各测点

压力及冲量时间历程曲线如图4所示. 各测点的冲击波脉宽约为1 ms. 前壁板测点1, 2的冲击波峰值分别为3.18和3.35 MPa, 而后壁板对应位置测点4和5的冲击波峰值分别为5.0和4.8 MPa. 距离中心较远处的测点3峰值较小, 但脉宽更宽. 在最大峰值过后, 均经历了若干次峰值较小的冲击作用, 推测为反射冲击波或空泡溃灭冲击波. 对比测点5与1、4与2的结果, 在前后壁板上距离弹道中心相当位置处, 液舱后壁板的冲击波峰值明显大于液舱前壁板; 由测点3结果可知, 距离弹道中心较远的点峰值明显降低, 但当测点位于液舱边缘时, 可能发生冲击波汇聚, 使得入射冲击波与侧壁发射冲击波发生叠加, 形成较宽的脉宽.

从冲量角度来看, 各测点在经历初始冲击波后冲量值迅速增加, 液舱前壁测点1, 2的冲量在经历第一次冲击波后分别达到0.58和0.57 kPa s, 对应后壁测点3和4的冲量值分别为0.63和0.78 kPa s. 后壁较远处测点3在第一次冲击波到达后达到0.69 kPa s, 说明远端角隅处冲量值衰减并不明显. 在经历第一次冲击波后各测点的冲量均有一定程度增加.

半球头弹撞击液舱时, 前后壁板各测点的压力时程曲线如图5所示. 可以看出, 液舱前壁板处(图5(a))在0.81 ms处达到冲击波峰值1.53 MPa, 此后迅速降低, 并经历了若干幅值较低但脉宽较宽的压力峰, 分析为液舱内多次反射造成的叠加效应. 对应的, 压力对时间积分获得的冲量载荷也在经历了初始峰值以后, 迅速降低, 并随后(2.24, 2.72和3.84 ms)经历若干次增长.

液舱后壁板角隅处(图5(b))压力峰值略滞后于液舱前壁板测点, 且初始冲击波峰值也较前壁板低. 但2.1 ms左右出现了一次明显的二次冲击波, 且持续作

图 3 (网络版彩图)不同弹体侵彻液舱的过程. (a) 工况1: 平头弹侵彻液舱; (b) 工况7: 半球头弹侵彻液舱; (c) 工况11: 卵形弹侵彻液舱

Figure 3 (Color online) Process of different projectiles penetrating tank. (a) Flat-nosed projectile penetrates tank (Condition 1); (b) spherical-nosed projectile penetrates tank (Condition 7); (c) ogive-nosed projectile penetrates tank (Condition 11).

用时间甚至长于初始冲击波, 对应的冲量曲线出现一次显著的增长. 分析此处为冲击波在角隅处发生明显汇聚.

液舱后壁板处(图5(c))压力峰值略滞后于液舱前壁板测点, 波形与液舱前壁板类似, 有一个主要的初始冲击波及若干较弱的后续冲击波. 但显著不同的是, 初始冲击波峰值明显高于液舱前壁板及角隅处测点.

卵形弹(初速度170.33 m/s)撞击液舱时, 前后壁板及角隅处的压力测点时域曲线分别如图6所示. 在弹体入射速度更高的情况下, 前壁板测点1处的冲击波峰值仅为1.18 MPa, 小于平头弹和半球头弹作用时的峰值. 而且此后二次加载作用并不明显, 表现为积分得到的冲量值并没有明显的跃升.

后壁板处测点4在0.76 ms经历一个峰值为

1.66 MPa的冲击波峰值, 此后在3.9 ms时经历一个峰值仅为0.12 MPa的载荷. 角隅处测点3则仍然经历两次加载作用, 第1次峰值为1.33 MPa、第2次峰值为0.18 MPa, 均弱于平头弹和半球头弹作用.

3.3 弹体初速度对压力峰值的影响

为了分析弹体入射速度对液舱前后壁板压力的影响, 将不同工况测得的压力载荷峰值汇总, 并进行拟合处理, 如图7所示. 液舱前壁板处压力峰值(图7(a))表明, 三种弹体速度对冲击波峰值影响规律类似, 均呈现出线性规律, 即随着弹体初速度增加, 冲击波峰值线性增加. 但相同速度下, 平头弹形成的冲击波峰值明显大于其他两种弹体, 卵形弹形成的冲击波峰值最小. 液舱后壁板冲击波峰值与弹体初速度的规律类似.

图 4 (网络版彩图)平头弹各测点的压力与冲量(工况1, 初速度146.04 m/s). (a) 前壁板-测点1; (b) 前壁板-测点2; (c) 后壁板角隅处-测点3; (d) 后壁板-测点4; (e) 后壁板-测点5

Figure 4 (Color online) Pressure and impulse results of all gauges of flat-nosed projectile (Condition 1 with initial velocity of 146.04 m/s). (a) Front plate-gauge 1; (b) front plate-gauge 2; (c) rear plate's corner-gauge 3; (d) rear plate-gauge 4; (e) rear plate-gauge 5.

3.4 弹体初速度对冲量的影响

冲量对结构变形有显著影响, 分析不同弹体速度对冲量的影响十分必要. 不同弹体初速度对液舱前后壁板冲量的影响的试验数据如图8所示. 对于液舱前壁板而言(图8(a)), 平头弹、半球头弹和卵形弹三种不同弹体均呈现类似的规律, 前壁板测点处的冲量随着入射速度增加而线性增大, 且平头弹引起的冲量值最

大, 卵形弹最小. 液舱后壁板呈现类似规律, 但相同弹体入射速度下, 后壁板冲量幅值略大于前壁板.

4 结论

瞬态压力波是弹体高速进入液舱并造成其破坏的主要原因. 本文采用试验方法研究了液舱前后壁板上

图 5 (网络版彩图)半球头弹各测点的压力与冲量(工况9, 初速度143.52 m/s). (a) 前壁板-测点1; (b) 后壁板角隅处-测点3; (c) 后壁板-测点4

Figure 5 (Color online) Pressure and impulse results of all gauges of spherical-nosed projectile (Condition 9 with initial velocity of 143.52 m/s). (a) Front plate-gauge 1; (b) rear plate's corner-gauge 3; (c) rear plate-gauge 4.

的压力分布, 分析了冲击波波形特性, 对比了壁板不同位置、不同弹头形状、不同弹体入射速度对冲击波峰值和冲量的影响. 得到以下主要结论: (1) 后壁板上的冲击波峰值和冲量明显大于前壁板, 且舱内各测点均存在明显的二次加载现象, 其中角隅处测点的二次加

图 6 (网络版彩图)卵形弹各测点的压力与冲量(工况13, 初速度170.33 m/s). (a) 前舱壁-测点1; (b) 后壁板角隅处-测点3; (c) 后壁板-测点4

Figure 6 (Color online) Pressure and impulse results of all gauges of ogive-nosed projectile (Condition 13 with initial velocity of 170.33 m/s). (a) Front plate-gauge 1; (b) rear plate's corner-gauge 3; (c) rear plate-gauge 4.

载效应最为明显; (2) 对不同弹头形状的弹体而言, 液舱前后壁板压力均存在冲击波峰值、冲量随弹体入射速度增加而线性增大的规律; (3) 相同速度下, 平头弹形成的冲击波峰值与冲量最大, 半球头弹次之, 卵形弹最小, 且卵形弹较容易发生弹道偏转.

图 7 (网络版彩图)弹体初速度对冲击波峰值的影响. (a) 前壁板-测点1; (b) 后壁板-测点4

Figure 7 (Color online) Effects of projectile velocity on pressure. (a) Front plate-gauge 1; (b) rear plate-gauge 4.

图 8 (网络版彩图)弹体初速度对冲量的影响. (a) 前壁板-测点1; (b) 后壁板-测点4

Figure 8 (Color online) Effects of projectile velocity on impulse. (a) Front plate-gauge 1; (b) rear plate-gauge 4.

参考文献

- Ji Y, Li X, Zhou L, et al. Experimental and numerical study on the cumulative damage of water-filled containers impacted by two projectiles. *Thin-Walled Struct*, 2019, 135: 45–64
- Townsend D, Park N, Devall P M. Failure of fluid filled structures due to high velocity fragment impact. *Int J Impact Eng*, 2003, 29: 723–733
- Li Y, Zhang L, Du Z P, et al. Influence of core strength on protection efficiency for new safety liquid cabin (in Chinese). *J Ship Mech*, 2019, 23: 58–67 [李营, 张磊, 杜志鹏, 等. 夹芯强度对新型液舱防护效能的影响. *船舶力学*, 2019, 23: 58–67]
- Disimile P J, Davis J, Toy N. Mitigation of shock waves within a liquid filled tank. *Int J Impact Eng*, 2011, 38: 61–72
- Varas D, Zaera R, López-Puente J. Numerical modelling of the hydrodynamic ram phenomenon. *Int J Impact Eng*, 2009, 36: 363–374
- Varas D, López-Puente J, Zaera R. Experimental analysis of fluid-filled aluminium tubes subjected to high-velocity impact. *Int J Impact Eng*, 2009, 36: 81–91
- Deletombe E, Fabis J, Dupas J, et al. Experimental analysis of 7.62 mm hydrodynamic ram in containers. *J Fluids Struct*, 2013, 37: 1–21
- Lee M, Longoria R G, Wilson D E. Cavity dynamics in high-speed water entry. *Phys Fluids*, 1997, 9: 540–550
- Lee M, Longoria R G, Wilson D E. Ballistic waves in high-speed water entry. *J Fluids Struct*, 1997, 11: 819–844
- Lecysyn N, Bony-Dandrieux A, Aprin L, et al. Experimental study of hydraulic ram effects on a liquid storage tank: Analysis of overpressure and cavitation induced by a high-speed projectile. *J Hazard Mater*, 2010, 178: 635–643

- 11 Lecysyn N, Dandrieux A, Heymes F, et al. Ballistic impact on an industrial tank: Study and modeling of consequences. *J Hazard Mater*, 2009, 172: 587–594
- 12 Ren P, Zhou J, Tian A, et al. Experimental investigation on dynamic failure of water-filled vessel subjected to projectile impact. *Int J Impact Eng*, 2018, 117: 153–163
- 13 Li Y, Wu W G, Zheng Y Z, et al. Study on mechanism of explosive fragments absorbed by vessel protective tank (in Chinese). *Shipbuild China*, 2015, 56: 38–44 [李营, 吴卫国, 郑元洲, 等. 舰船防护液舱吸收爆炸破片的机理. *中国造船*, 2015, 56: 38–44]
- 14 Li Y, Zhang L, Zhu H Q, et al. Velocity attenuation of blast fragments in water tank (in Chinese). *Shipbuild China*, 2016, 57: 127–137 [李营, 张磊, 朱海清, 等. 爆炸破片在液舱中的速度衰减特性研究. *中国造船*, 2016, 57: 127–137]
- 15 Li Y, Zhao P D, Zhang C H, et al. Influences of air-contain structure on dynamic responses of liquid-filled structures under spherical projectile penetration (in Chinese). *J Vib Shock*, 2018, 37: 186–194 [李营, 赵鹏铎, 张春辉, 等. 空气夹层对含液结构在球形弹体侵彻作用下动态响应的影响. *振动与冲击*, 2018, 37: 186–194]
- 16 Lecysyn N, Dandrieux A, Heymes F, et al. Preliminary study of ballistic impact on an industrial tank: Projectile velocity decay. *J Loss Prev Proc Indust*, 2008, 21: 627–634
- 17 Guo Z, Zhang W, Xiao X, et al. An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes. *Int J Impact Eng*, 2012, 49: 43–60

Experimental study on pressure load of tank bulkhead under penetration of projectile

ZHANG Wei¹, ZHANG XiaoQiang^{2,3}, CHEN ZiHao^{2,3}, REN XianBen^{2,3} & LI Ying^{2,3*}

¹ Naval Research Institute, Beijing 100161, China;

² State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

³ Beijing Key Laboratory of Lightweight Multi-functional Composite Materials and Structures, Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Hydrodynamic ram is an important threat to the liquid containing structures such as the ship's protective liquid tank and the aircraft's fuel tank. Through the experiments of different projectiles penetrating liquid tank, the pressure curves of the front and rear plates are obtained, the pressure distribution characteristics of the plates are analyzed, and the effects of different positions, shapes and velocities on the peak value and impulse of the shock wave are compared. The results show that: (1) the peak value and impulse of the shock wave on the rear plate are obviously larger than that on the front plate, and there is an obvious secondary loading phenomenon, among which the corner's is the most obvious; (2) the peak value and impulse of the shock wave on the front and rear plates of the liquid tank increase linearly with the increase of the incident velocity of the projectile; (3) the peak value and impulse of the shock wave formed by the flat-nosed projectile are the largest, while the spherical-nosed projectile is the second, and the ogive-nosed projectile is the smallest. In addition, ballistic deflection of the ogive-nosed projectile is more likely to occur.

high-speed water entry, protective liquid tank, liquid structure, shock wave load

PACS: 02.70.Dh, 02.60.Cb, 02.50.Cw

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0363](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0363)