

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.002

射流侵彻截面为六边形的液态复合密闭结构力学特点仿真分析*

赵昌方^① 赵昌兴^② 任 杰^① 祖旭东^① 张克斌^① 卢炯彪^③

①南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

②湘潭大学材料科学与工程学院(湖南湘潭,411105)

③湖北三江航天江河化工科技有限公司(湖北远安,444299)

[摘 要] 截面为六边形的液态复合密闭结构抗射流侵彻性能与其受力变形、应力、应变、能量变化息息相关。为了解密闭结构受射流侵彻的力学特点,采用理论分析与数值仿真相结合的方法,开展了研究。理论分析中,推导了射流的剩余头部速度;分析了密闭结构的受压情况,密闭结构微元的柯西(Cauchy)应变、格林(Green)应变、本构关系,侵彻系统的能量变化。数值仿真结果表明:射流侵彻进入液态复合密闭结构后,面板的等效应力从内到外呈环状逐渐递减;竖壁面的等效应力从上到下逐渐增大,在棱边上衰减,在底部集中;射流带动液体运动,进一步扩大背板孔口,并导致液体出现壅塞而产生逆流,使竖壁面产生附加应变;冯·米塞斯(Von Mises)应变集中在液态复合结构孔壁上,Green等效应变集中在密闭结构底部的内棱边上、以及面板和背板的孔口处;射流25 μs时开始侵彻液态复合密闭结构,射流、密闭结构、液体的能量均发生明显变化。

[关键词] 力学特点;截面为六边形的结构;液态复合密闭结构;射流侵彻;有限元仿真

[分类号] O385;TJ413.2

Simulation Analysis on Mechanical Characteristics of Jet Penetration onto Liquid Composite Sealed Structure with Hexagon Section

ZHAO Changfang^①, ZHAO Changxing^②, REN Jie^①, ZU Xudong^①, ZHANG Kebin^①, LU Jiongbiao^③

① School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University (Hu'nan Xiangtan, 411105)

③ Hubei Sanjiang Aerospace Jianghe Chemical Technology Co., Ltd. (Hubei Yuanan, 444299)

[ABSTRACT] Anti-jet penetration performance of liquid composite sealed structure with hexagon section is closely related to applied force, deformation, stress, strain, and energy variation. In order to understand the mechanical characteristics of sealing structure subjected to jet penetration, theoretical analysis and numerical simulation were used. In theoretical analysis, the residual head velocity of the jet was derived. Pressure, Cauchy strain, Green strain, constitutive relation, and energy of the penetration system were analyzed. The numerical simulation results show that the equivalent stress decreases from inside to outside on the panel, increases of from upside to downside on the vertical wall, attenuates at the edge and concentrates at the bottom upon the jet penetration onto the liquid composite sealed structure with hexagon section. The jet drives the liquid to move, to expand further the orifice of back plate, leading to the choking of liquid and subsequent countercurrent, and additional strain on vertical wall. Von Mises equivalent strain is concentrated on the hole wall of the liquid composite structure, and the Green equivalent strain is concentrated on the inner edge of the bottom of the sealed structure, as well as on the orifice of the panel and the back plate. The jet begins to penetrate the liquid composite structure at 25 μs, and the energy of jet and sealing structure and liquid are all change significantly.

[KEYWORDS] mechanical characteristics; structure with hexagon section; liquid composite closed structure; jet penetration; finite element simulation

* 收稿日期:2019-07-07

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX19_0327)

第一作者:赵昌方(1995-),男,博士研究生,研究方向为兵器发射理论与技术。E-mail:lackychang@njust.edu.cn

通信作者:任杰(1982-),男,副教授,硕士,研究方向为兵器发射理论与技术。E-mail:renjie@njust.edu.cn

引言

侵彻与防护,一直是矛与盾的关系,互相克制,却又互相促进。正是由于这种关系,使得关于侵彻和防护的科学技术不断进步、不断革新。目前,在射流侵彻多层间隔靶和复合靶方面的研究非常多,涉及陶瓷-橡胶复合靶、间隙靶、织物纤维靶、爆炸反应靶、液态复合靶、强磁场靶等^[1-2]。

就液态复合装甲的研究而言,赵昌方等^[3-5]开展了液体密度、液体声速、液体动力黏度对单胞液态复合结构抗射流侵彻性能的研究;通过截面为圆形、四边形、六边形的密闭结构抗射流侵彻性能的对比分析,指出截面为六边形的密闭结构液态复合胞元受力稳定、吸能较多、力学特点优良^[6];还开展了截面为六边形结构壁厚、内腔高度、内接圆半径的尺寸效应分析^[7],得出了许多可供参考的结论。此外,截面为六边形的蜂窝结构具有比强度高、比刚度、隔音能力优秀、芯层密度小等特点^[8-9],是液态复合装甲胞元结构的较佳选择。文献^[10-11]开展了射流侵彻饱含水或其他液体的复合密闭结构的实验研究,指出了液体具有一定的抗射流侵彻能力。

关于截面为六边形结构的力学问题,Gredia^[12]采用有限元仿真的方法研究了结构胞元的壁厚对外等效剪切模量的影响。Gibson等^[13]考虑了截面为六边形结构孔壁的轴向变形和弯曲变形,提出G-A细观力学方法。朱易等^[14]进行了爆炸载荷作用下蜂窝夹层复合结构吸能特性的研究,得出了蜂窝结构横向、纵向放置时的吸能特性。然而,蜂窝结构的单元——截面为六边形的结构(见图1),其液态复合密闭胞元受射流侵彻时力学特点的研究却鲜有报道。

本文中,建立了射流剩余头部速度模型、截面为六边形结构的压力及应力应变模型、侵彻系统的能量变化模型,开展了流固耦合(ALE)有限元仿真,分析了截面为六边形的液态复合密闭结构抗射流侵彻的力学特点。

1 理论分析

根据Dipersio和Simon重新定义的虚拟原点理论,射流经虚拟原点 O 生成,穿过空气后侵彻面板,侵彻过程采用准定常侵彻模型^[15],见图2。

基本假设:

- 1) 仅考虑第一个冲击波的影响,并假定冲击波的传播速度不变,不考虑波的衰减;
- 2) 整个过程为绝热过程,即不考虑温度带来的影响;
- 3) 射流垂直侵彻截面为六边形的密闭结构,假设射流在到达密闭结构前无任何损失;
- 4) 假设未受扰动的区域内液体声速小于射流侵彻速度。

1.1 射流剩余头部速度

不考虑空气等外界因素的影响,设发生侵彻前射流剩余头部速度为 v_{j0} ,则该速度为射流成型后的头部速度。设面板壁厚为 d ,密度为 ρ_m ,射流密度为 ρ_j , Z_0 为图2所示距离,可得射流侵彻面板后的剩余头部速度 v_{j1} 为

$$v_{j1} = v_{j0} \left(\frac{Z_0}{Z_0 + d} \right) \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_j}} \quad (1)$$

该速度即为射流侵彻复合密闭结构中液体的初始速度。

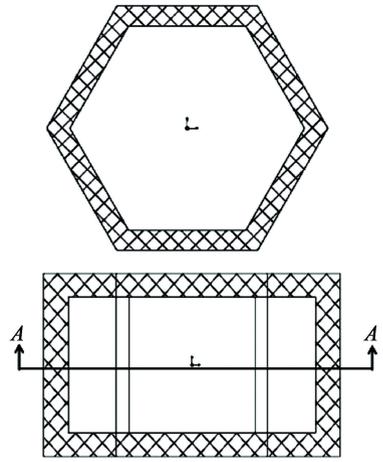
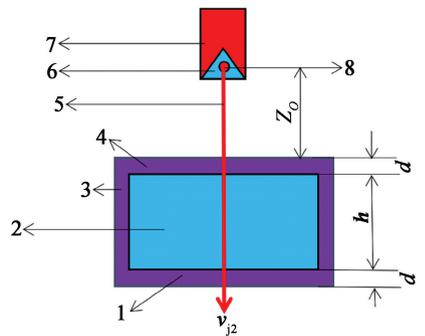


图1 截面为六边形的密闭结构

Fig. 1 Sealing structure with hexagon section



1 - 背板; 2 - 柴油; 3 - 截面为六边形的密闭结构; 4 - 面板;
5 - 射流; 6 - 药型罩; 7 - 炸药; 8 - 虚拟原点。

图2 射流侵彻模型

Fig. 2 Jet penetration model

设液体厚度为 h , 密度为 ρ_1 , 可得射流侵彻液体后的剩余头部速度 v_{j1}' 为

$$\begin{aligned} v_{j1}' &= v_{j1} \left(\frac{Z_0 + d}{Z_0 + d + h} \right)^{\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_j}}} \\ &= v_{j0} \frac{Z_0 \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_j}} (Z_0 + d)^{\frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_m}}{\sqrt{\rho_j}}}}{(Z_0 + d + h)^{\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_j}}}}. \end{aligned} \quad (2)$$

该速度即为射流侵彻背板的初始头部速度。

同理, 射流侵彻背板后的剩余头部速度 v_{j2} 为

$$\begin{aligned} v_{j2} &= v_{j1}' \left(\frac{Z_0 + d + h}{Z_0 + d + h + d} \right)^{\sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_j}}} \\ &= v_{j0} \frac{Z_0 \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_j}} (Z_0 + d)^{\frac{\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_m}}{\sqrt{\rho_j}}} (Z_0 + d + h)^{\frac{\sqrt{\rho_m} - \sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_j}}}}{(Z_0 + d + h + d)^{\sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_j}}}}. \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 内壁压力

当射流的侵彻速度大于材料声速时, 会在其内部产生冲击波, 并传递到密闭结构内壁, 然后反射回来的冲击波会带动液体反向运动作用于射流, 从而干扰射流的稳定性。由应力波原理可知, 射流侵彻截面为六边形的液态复合密闭结构面板后开始侵彻液体, 所形成的冲击波经液体衰减到达密闭结构内壁的压强 p 为^[16]

$$p = \frac{\rho_j (v_{j1} - u)^2}{2(r - r_j)^\alpha}. \quad (4)$$

式中: u 为冲击波影响下的射流侵彻速度; r 为密闭结构的内切圆半径; r_j 为射流头部半径; α 为冲击波的衰减系数。

根据肖强强^[16]的理论, 冲击波影响下射流侵彻的速度 u 为

$$\begin{aligned} u &= \frac{(2\lambda\rho_j v_{j1} - \rho_m c)}{2[\lambda\rho_j - (1 + \lambda)\rho_m]} - \\ &= \frac{\sqrt{4\lambda\rho_j \rho_m v_{j1} [(1 + \lambda)v_{j1} - c] + 8\lambda R_1 [\lambda\rho_j - (1 + \lambda)\rho_m] + \rho_m^2 c^2}}{2[\lambda\rho_j - (1 + \lambda)\rho_m]}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: c 为柴油声速; λ 为柴油的 Hugoniot 参数; R_1 为柴油的动态屈服强度。

1.3 应变方程

取密闭结构的六面体微元分析^[17], 受外力作用时, 在小变形的情况下, 其几何方程为

$$\vec{\Gamma} = \frac{1}{2}(\vec{u}\nabla + \nabla\vec{u}). \quad (6)$$

式中: $\vec{\Gamma}$ 为柯西 (Cauchy) 应变张量, \vec{u} 为位移矢量。当变形为非线性大变形时, 弹性体的几何方程需要

用格林 (Green) 应变张量 \vec{G} 描述, 即

$$\vec{G} = \vec{\Gamma} + \frac{1}{2}(\nabla\vec{u} + \vec{u}\nabla). \quad (7)$$

1.4 能量变化

根据能量守恒定律, 系统能量不论怎样转化, 都应保持不变。设射流成型后总能量为 W_j , W_j 包括动能 $W_{j,v}$ 和内能 $W_{j,q}$ 。射流侵彻背板结束时, 能量的存在形式有射流的动能 $E_{j,v}$ 和内能 $E_{j,q}$, 液体的动能 $E_{1,v}$ 和内能 $E_{1,q}$, 胞元的动能 $E_{c,v}$ 和内能 $E_{c,q}$ 。忽略势能的变化和空气的影响, 并设系统与外界绝热, 有能量守恒方程

$$\begin{aligned} W_j &= W_{j,v} + W_{j,q} = \\ &= E_{j,v} + E_{j,q} + E_{1,v} + E_{1,q} + E_{c,v} + E_{c,q}. \end{aligned} \quad (8)$$

炸药引爆后, 总能量 W_b 的一部分传递到外界环境, 另一部分转化为射流的动能和内能 W_j 。能量的分配存在比例关系, 定义比例系数 k , 则有 $W_j = kW_b$ 。由于仿真过程为绝热过程, 不存在温度的变化, 侵彻过程中做的功转化为射流、液体、密闭结构的应变能 $E_{j,s}$ 、 $E_{1,s}$ 、 $E_{c,s}$, 从而上述方程可改写为

$$kW_b = E_{j,v} + E_{1,v} + E_{c,v} + E_{j,s} + E_{1,s} + E_{c,s}. \quad (9)$$

2 有限元仿真模型

射流侵彻截面为六边形复合密闭结构的有限元模型, 包括炸药、药型罩、空气域、液体、金属结构 5 个部分。其中, 炸药、空气域、药型罩、液体采用三维欧拉网格建模, 金属结构采用三维拉格朗日建模, 属于典型的大变形非线性气-液-固耦合 (流固耦合 ALE) 分析。参考文献[6, 18], 炸高设为 80 mm, 截面为六边形的密闭结构的壁厚为 $d = 5$ mm, 内腔的内切圆半径 $r = 20$ mm, 内腔高度 $h = 30$ mm。

数值仿真中, 聚能装药为 J-H2 炸药, 采用高能炸药爆轰材料模型 Mat_High_Explosive_Burn 和 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程来描述。

药型罩为紫铜, 金属结构为 LC4 铝合金, 采用 Johnson_Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程进行描述。

液体为柴油, 采用 Null 空材料模型和 Gruneisen 状态方程进行描述。

空气域也采用 Null 空材料模型描述, 但是状态方程采用线性多项式 Linear_Polynomial 描述。仿真模型中所用到的材料参数见文献[8]中的表 1。

3 仿真结果分析

根据仿真结果, 可得出射流侵彻密闭结构后的

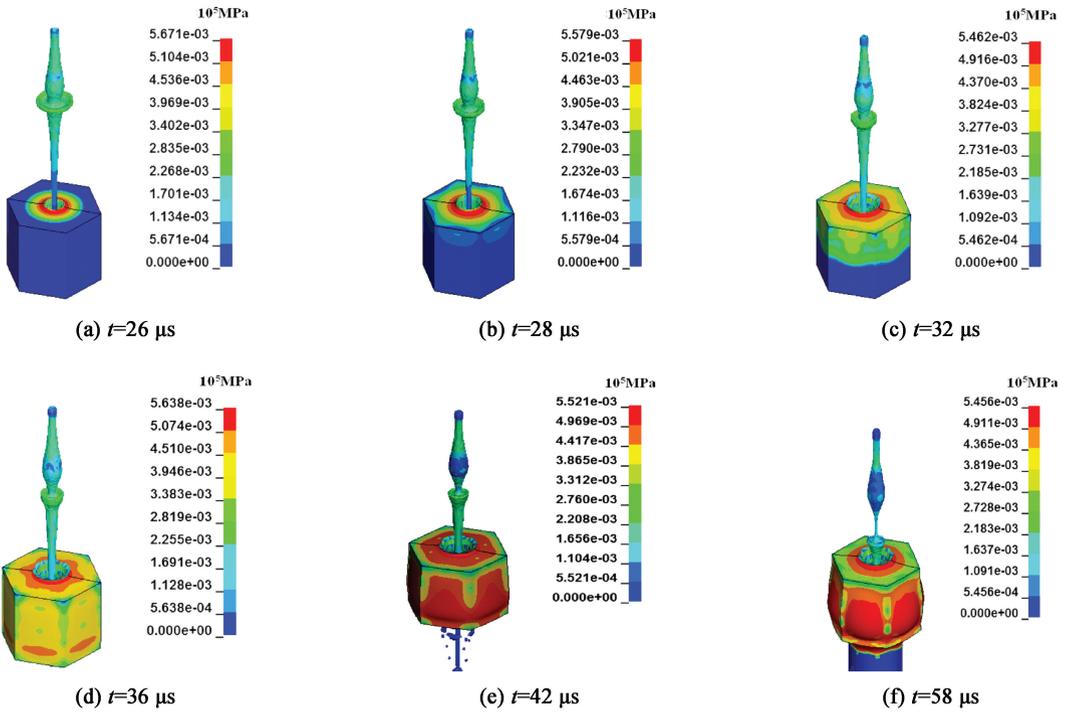


图3 侵彻过程经典时刻 Mises 等效应力云图

Fig. 3 Mises equivalent stress cloud at classical time of penetration process

剩余头部速度为 5 780 m/s、壁面压力为 297 MPa; 根据文献[6, 18], 理论计算得出的剩余头部速度为 5 799 m/s、壁面压力为 249 MPa。由此可知, 理论与仿真结果基本相同, 故采用这种仿真方法得出的结果可靠。

3.1 等效应力

由图3、图4可见, 射流侵彻饱和液体截面为六边形密闭结构的过程中, 密闭结构面板上冯·米塞斯(Von Mises)等效应力出现的规律是从内到外呈环状逐渐递减; 竖壁面上等效应力出现的规律是从上到下(面板为上方, 背板为下方)逐渐增大, 在两竖壁面的交界处(棱边)衰减, 在底部出现集中。竖壁面受到的力来自于密闭结构内液体受射流冲击波作用产生的压强, 结构受力情况反映了液体的受力情况。

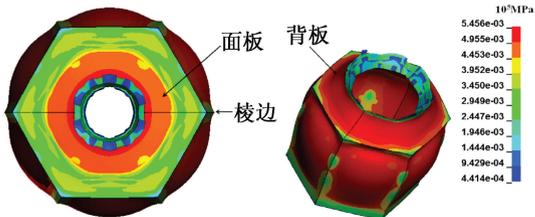


图4 58 μs 时六边形截面密闭结构的等效应力云图

Fig. 4 Equivalent stress cloud of hexagon section structure at 58 μs

高速射流侵彻进入截面为六边形的密闭结构后, 带动液体一起运动, 导致液体在底部累积, 引起竖壁面发生不规则变形, 表现为竖壁面变形从上到下呈增大趋势, 且密闭结构六个竖壁面的变形量相同, 使得变形后的俯视图轮廓呈一个南瓜形。此外, 由于射流带动液体一起运动, 还导致射流在密闭结构出口处(背板上)的扩孔半径增大。

3.2 等效应变

Von Mises 等效应变集中出现在液体孔壁和背板及面板的孔壁上, 截面为六边形密闭结构底部液体的等效应变沿壁面集中分布。原因是射流侵彻进入液体后, 带动大量液体向背板上的孔口运动, 出现壅塞现象, 导致液体逆流, 进一步作用于竖壁面, 使其产生附加变形。见图5。

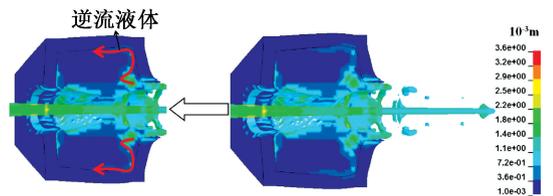


图5 42 μs 时 Mises 等效应变云图

Fig. 5 Mises equivalent strain cloud at 42 μs

Green 等效应变是描述大变形非线性的应变状态。从图6中可以看出, 截面为六边形密闭结构底部的内棱边及竖壁面内棱边上、面板和背板的孔口

处存在 Green 等效应变,其他地方应变极小,甚至可以说是不存在的。原因在于:一是射流对面板、背板的直接侵彻造成的大变形;二是液体堵塞造成的大变形。

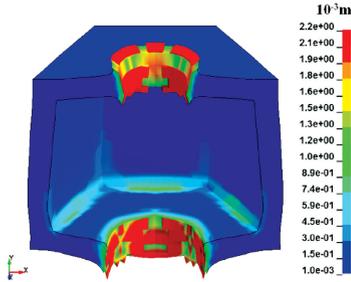


图 6 42 μs 时 Green 等效应变云图

Fig. 6 Green equivalent strain cloud at 42 μs

3.3 截面为六边形密闭结构的变形

图 7 为截面为六边形的密闭结构变形量的仿真结果。射流开始侵彻复合密闭结构的时间在 25 μs 左右,此时开始产生变形,并随着时间的增加而增大。在 25 ~ 32 μs 之间,其变形量增加很缓慢;该阶段射流未侵彻贯穿背板,所以仅有面板的扩孔和竖壁面受液体挤压而发生的变形。在 32 ~ 40 μs 阶段,背板受射流侵彻而开孔、受射流带动液体一起运动而扩孔,且堵塞引起的逆流液体对密闭结构竖壁面造成附加变形,从而使得变形量基本呈直线递增。

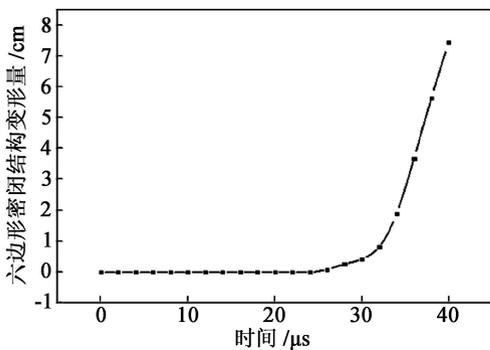


图 7 截面为六边形的密闭结构变形曲线

Fig. 7 Deformation curve of the closed structure with hexagon section

3.4 侵彻过程中的能量变化

通过仿真结果导出系统能量变化关系,如图 8 所示。聚能装药起爆后迅速压垮药型罩,使其形成高速金属射流,25 μs 时开始侵彻液态复合密闭结构,故能量瞬间下降。此后 25 ~ 32 μs 间,密闭结构受到侵彻开始变形,但变形量较小,其能量变化波动不大;液体受侵彻后能量骤升,原因在于射流与液体

的相互作用时间长、接触面积大,从而能量交换多。32 μs 以后,射流贯穿密闭结构背板,由于射流带动液体运动,导致液体喷出密闭结构进行卸载,从而储存的能量下降;密闭结构受射流及液体的共同扩孔作用,其能量再次上升,上升幅度大于第一次,并保持最大值不变;射流能量消耗为零,停止侵彻。在发生侵彻的区间内,液体的吸能作用明显大于密闭结构,这是液态复合装甲的防护特点。

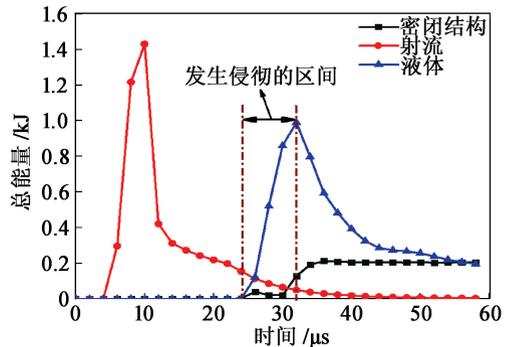


图 8 系统能量曲线

Fig. 8 System energy curve

4 结论

通过理论建模与有限元仿真的方法,从等效应力、等效应变、变形及能量等几个方面分析了截面为六边形液态复合密闭结构受射流侵彻时的力学特点。数值仿真得出的结果互相印证,与理论分析中的数学模型一一对应,为液态复合装甲的设计提供科学参考。

主要的研究结论有:

1) 根据 Von Mises 等效应力、应变和 Green 应力、应变的分布情况可知,截面为六边形密闭结构的受力变形与射流的直接侵彻和液体的流动挤压相关;射流的直接侵彻体现为面板和背板的扩孔,液体的挤压表现在密闭结构侧壁的变形。

2) 聚能装药爆炸后,成型的射流获得部分能量而高速运动,射流的能量先转移到空气,再转移到密闭结构和液体;液体的吸能作用大于密闭结构,是造成射流侵彻能力下降的主要因素。

参考文献

[1] 高振宇,黄正祥,郭敏,等. 饱含柴油密闭结构抗射流侵彻性能分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(14): 176-181.

- penetration performance analysis of diesel oil filled airtight structures against shaped charge jet[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(14):176-181.
- [2] MA B, HUANG Z X, XIAO Q Q, et al. Effect of external magnetic field loaded at the initial period of inertial stretching stage on the stability of shaped charge jet[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(5): 875-881.
- [3] 赵昌方, 祖旭东. 液体声速对单胞结构抗射流侵彻性能影响研究[J]. *中国科技论文*, 2017, 12(22): 2565-2568.
ZHAO C F, ZU X D. Effect of liquid sound velocity on anti jet penetration performance of single cell structure [J]. *Chinese Science Paper*, 20117, 12(22): 2565-2568.
- [4] 赵昌方, 祖旭东. 液体密度对单胞结构抗射流侵彻性能的影响[J]. *弹箭与制导学报*, 2018, 38(1): 65-68.
ZHAO C F, ZU X D. Effect of liquid density on the anti jet penetration performance of single cell structure [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2018, 38(1): 65-68.
- [5] 赵昌方, 刘长瑞. 动力黏度对液态复合胞抗射流侵彻影响研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(6): 88-91.
ZHAO C F, LIU C R. Effect of dynamic viscosity on jet penetration resistance of liquid composite cell[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(6): 88-91.
- [6] 赵昌方, 单锋, 俞江, 等. 结构形状对密闭胞元抗射流侵彻性能的影响[J]. *工程爆破*, 2017, 23(6): 22-25.
ZHAO C F, SHAN F, YU J, et al. Effect of structural shape on anti-jet penetration performance of closed cell [J]. *Blasting*, 2017, 23(6): 22-25.
- [7] 单锋, 赵昌方, 祖旭东. 尺寸效应对密闭结构抗射流侵彻性能影响分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(3): 68-71.
SHAN F, ZHAO C F, ZU X D. Analysis of size effect on anti penetration performance of confined structure [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(3): 68-71.
- [8] 张延昌, 王自力. 蜂窝式夹层板耐撞性能研究[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 21(3): 1-5.
ZHANG Y C, WANG Z L. Study on Crashworthiness of honeycomb sandwich panels[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 21(3): 1-5.
- [9] NGUYEN M Q, JACOMBS S S, THOMSON R S, et al. Simulation of impact on sandwich structures[J]. *Composite Structures*, 2005, 67(2): 217-227.
- [10] WHITE J J, WAHLL J M. Shaped charge jet interactions with liquids [C]// *Proceedings of the 6th International Symposium on Ballistics*. Orlando, FL, US: International Ballistics Society, 1981: 305-311.
- [11] ANDERSSON G, KARLSSON S, WATTERSTAM A. Shaped charge jet interaction with confined water [C]// *Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics*. Midrand, South Africa: The South Africa Ballistics Organisation, 1998: 183-190.
- [12] GREDAE M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb core[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1993, 30(13): 1777-1788.
- [13] GIBSON L J, ASHBY M F. *Cellular solids: structure and properties* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 487-488.
- [14] 朱易, 黄正祥, 祖旭东, 等. 爆炸载荷下蜂窝夹层复合结构吸能特性研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(3): 194-198.
ZHU Y, HUANG Z X, ZU X D, et al. Research on energy absorption properties of honeycomb sandwich composite structures under explosive loading[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(3): 194-198.
- [15] 黄正祥, 祖旭东. 终点效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 136-183.
- [16] 肖强强, 黄正祥, 顾晓辉. 冲击波影响下的聚能射流侵彻扩孔方程[J]. *高压物理学报*, 2011, 25(4): 333-338.
- XIAO Q Q, HUANG Z X, GU X H. Equation of penetration and crater growth by shaped charge jet under the influence of shock wave[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(4): 333-338.
- [17] 王敏中, 王炜, 武际可. *弹性力学教程* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2002: 23-79.
- [18] 高振宇. 周期胞结构复合装甲抗射流侵彻性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 15-20.