

降载空心球和防爆小球对水锤冲击的衰减作用

*

金键, 王鹏飞, 柯发伟, 米俊亦

(中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 燃油箱系统在高速射弹撞击下面临水锤效应和燃爆效应毁伤威胁。为降低燃油箱结构易损性, 采用混合填充降载空心球和防爆小球的方法以实现“冲击-燃爆”耦合损伤的协同抑制。重点围绕降载空心球和防爆小球对水锤冲击载荷的衰减作用, 开展了系列对比试验。试验结果表明: 当直径 12.7 mm 球形钢弹丸以约 1100 m/s 速度撞击蓄液容器时, 混合填充 36 个降载空心球和满箱防爆小球方案使得冲击波压力峰值降低了 92.9%, 蓄液容器前/后面板最大变形量分别减小了 53.6% 和 65.3%。容器内填充物仅以 6% 的体积代价, 实现了对水锤冲击载荷的显著衰减, 相应的结构变形损伤得到有效缓解。这可为燃油箱的结构防护设计提供参考。

关键词: 燃油箱; 水锤冲击; 降载空心球; 防爆小球; 衰减作用

中图分类号: O383 E920.8

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Attenuation effect of hydrodynamic ram by load-reducing hollow spheres and explosion-proof spheres

JIN Jian, WANG Pengfei, KE Fawei, MI Junyi

(Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan, 621000, China)

Abstract: Fuel tanks of vehicles are vulnerable to both hydrodynamic ram (HRAM) and fuel explosion when subjected to high-speed projectile impacts. To mitigate this coupled mechanical-activation damage, a novel protection method was proposed, in which load-reducing hollow spheres (LRHS) and explosion-proof spheres (EPS) are filled in a hybrid manner inside the tank. The attenuation effect of these fillers on HRAM was investigated experimentally. A series of comparative tests were conducted using a 25 mm two-stage light gas gun. A 12.7 mm spherical steel projectile with a mass of about 8.45 g was launched at approximately 1100 m/s to impact a fluid-filled container under five different filling conditions: fully water-filled (T1, baseline), 94% water-filled with a free surface (T2), fully water-filled with EPS (T3, about 5% in volume), fully water-filled with 36 preset LRHS (T4, about 1% in volume), and mixed filling with both LRHS and EPS (T5, about 6% in volume). The impact velocity was measured by laser screens, the cavitation evolution inside the container was recorded by a high-speed camera, and the pressure-time histories were recorded by underwater free-field pressure sensors. After the tests, the failure modes of the two fillers were examined, and the maximum deformations of the front and rear panels were obtained by three-dimensional scanning. The results demonstrate that the mixed filling scheme (T5) achieves the most significant attenuation: the peak pressure of the shock

*收稿日期: 2026-07-17; 修回日期: 2026-10-01;

第一作者: 金键 (1990—), 男, 博士, 助理研究员, E-mail: nuejinjian@163.com;

通信作者: 柯发伟 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: kefawei2@163.com。

wave is reduced by 92.9%, and the maximum deformations of the front and rear panels are decreased by 53.6% and 65.3%, respectively, compared to the baseline. In contrast, the free surface condition (T2) shows negligible effects. The EPS alone (T3) and LRHS alone (T4) also provide considerable attenuation, with peak pressure reductions of 87~90% and 79~85%, respectively. The analysis indicates that the LRHS attenuates the HRAM loading via reflect shock wave and provides expansion space, while the EPS dissipates energy through plastic deformation and restricts cavitation development by compartmentalizing the fluid domain. Their combination yields a synergistic effect. The proposed method provides a promising integrated design for enhancing the survivability of fuel tank against coupled HRAM and explosion threats at a low volumetric penalty.

Keywords: fuel tank; hydrodynamic ram; load-reducing hollow sphere; explosion-proof sphere; attenuation effect

燃油箱作为武器平台的关键部件，在战场环境下面临严峻的毁伤威胁。当受到高速侵彻体（射弹、破片等）撞击时，燃油箱可能出现以下两类损伤模式：一是由水锤效应引起的机械性损伤，即高速撞击导致液体内产生强烈的冲击波和压力流，造成箱体结构发生鼓胀变形甚至大面积撕裂；二是由燃爆效应引发的激活性损伤，即撞击过程中产生的高温火花点燃喷溅的燃油粒子，诱发剧烈的燃烧爆炸反应。这些损伤不仅会造成供油系统功能丧失，其产生的次生力学环境还易造成运载平台发生灾难性破坏。因此，发展新型降载抑爆燃油箱设计技术对于降低燃油箱易损性、提高运载平台生命力具有重要意义。

针对易燃易爆液态燃料的阻隔防爆技术，目前工程中普遍采用在油箱内填充聚氨酯泡沫材料、网状铝合金材料或球形非金属阻隔防爆材料等，如图 1 所示。其中，近年来发展的球形非金属阻隔防爆材料（简称防爆小球）因其化学性质稳定、燃油置换率低、机械强度良好，且具备优异的阻燃性能，受到了广泛的研究与应用关注^[1]。该材料由高分子基材经注塑成型为球形薄壁中空骨架结构。填充后，防爆小球将油箱内腔分割分隔为大量相互独立的微小空间，从而有效阻隔火焰的传播路径、抑制爆炸能量的瞬间释放。同时，材料自身的结构特性、表面效应和热传导作用有助于破坏可燃蒸汽的爆炸条件，进而降低油箱发生燃烧爆炸的风险。

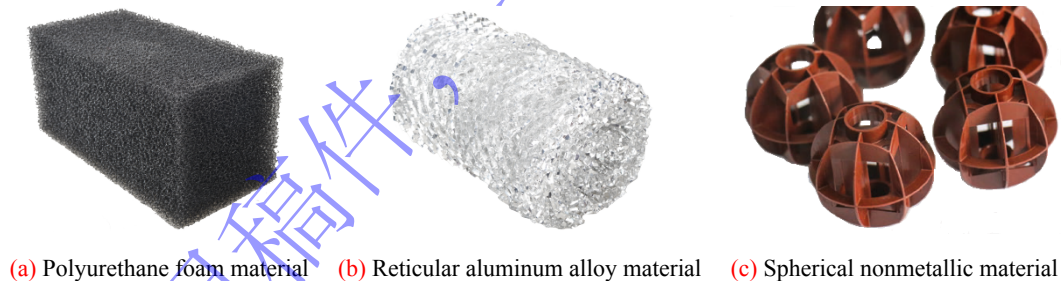


图 1 三种典型的阻隔防爆材料

Fig.1 Three typical explosion suppression materials

为了减弱弹丸撞击造成的水锤冲击载荷，进而降低油箱结构的变形损伤，研究人员已提出多种抑制措施^[2-8]。其中，通过引入气体增强液体的可压缩性被证明是衰减效果较为显著的途径之一。这是因为水锤效应损伤的根源在于液体近乎不可压缩的特性。液体中的原子和分子紧密排列，它们之间有很强的相互作用，这使得液体成为传递压力波和液体流的良好介质。侵彻体的动量和动能通过液体最终传递给周围结构，结构壁面承受的能量相比相同结构无水情况下要大很多^[9]。因此，在液体中增加气体含量，提高容器内液体的可压缩性是针对水锤效应毁伤机理的直接抑制方法。Seyfang^[10]最早提出使用高压气瓶向容器内均匀释放大量的动态上浮的小气泡，以提高容器内液体的可压缩性，如图 2

(a) 所示。Townsend 等^[11]对此开展了破片冲击试验，同时也测试了容器内设置的空气薄层对水锤冲击载荷的衰减效果（见图 2 (b)）。试验结果表明：在 3.5 g 和 7 g 立方体钢破片以 1000~3000 m/s 速度撞击时，持续充气（单个小气泡直径在毫米级，总体积占比约为满液容积的 5%）方法和设置有 4 层空气薄层（单层厚度约为 2~3 mm）的降载措施使容器中心区域的冲击波压力峰值平均下降了约

40~60%，蓄液结构的损伤由大面积开裂降低至仅出现轻微整体变形。在这项研究工作的启发下，作者们^[12]在前期采用预置气泡方式（体积占比为 7.63%，见图 2（c）），使得作用在后壁面上的冲击波载荷显著衰减（压力峰值和比冲量分别下降了 78%和 88%），前壁面最大变形减小了 15%。数值仿真结果表明，气泡尺寸越大、距离前板越近，对水锤效应载荷的衰减效果越好。然而，进一步的研究却发现^[13]，当弹速足够穿透容器时，单个中心预置气泡反而造成了更加严重的结构损伤。原因在于弹丸穿越气泡时速度几乎未减小，随后以较高速度二次撞击入水，造成后板出现花瓣状撕裂破坏。在容器内预置气泡总体积一定的情况下，气泡数量越多（均匀分布），对水锤效应载荷的衰减效果越好，相应的结构变形也越小。综上，持续充气法需附加主动气源系统、工程实现较为复杂；空气薄层法需分层布置、占用容积较大；预置气泡法虽简便有效，但在弹丸穿透容器的工况下，单一大气泡反而可能加重结构损伤。因此，发展被动式、低容积占比的水锤载荷衰减方法，仍是油箱防护设计中亟待解决的问题。

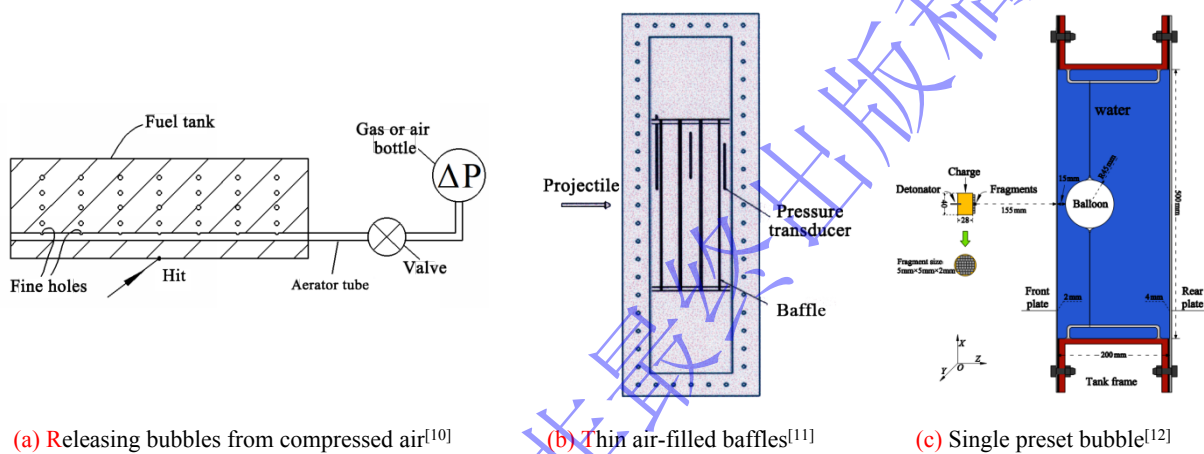


图 2 三种提高容器内液体可压缩性的措施

Fig.2 Three measures to increase the compressibility of the liquid in the tank

当前，针对燃油箱结构的毁伤防护多为单一措施，考虑到油箱在高速射弹撞击下潜在的机械性和激活性两种损伤模式，本文提出一种混合填充降载空心球和防爆小球的新型防护方法，旨在实现对“冲击-燃爆”耦合毁伤的协同抑制。与既有措施相比，该方法无需主动气源系统、容积占比低，分布式的降载空心球阵列还可规避单一大气泡在弹丸穿透下加重结构损伤的风险。本文重点通过试验研究该方法对水锤冲击载荷的衰减作用：设计 5 种不同填充状态蓄液容器的弹丸冲击试验，通过对比载荷衰减和结构变形情况，定量分析内部填充物对水锤冲击的具体衰减效果，并揭示其协同作用机理。

1 试验设计

1.1 发射器

本试验采用 25 mm 口径二级轻气炮作为发射器，如图 3 所示。其运行机制为：火药燃烧驱动活塞，活塞随后压缩存储在压缩管内的氮气，产生高温高压气体进而推动弹丸。通过调节火药量与氮气压强，可实现对弹丸发射速度的精确控制^[14]。发射时，弹丸由弹托包裹进入靶室，在分离段内与弹托分离；弹托被拦截装置拦截，弹丸则继续飞行并撞击目标靶标。

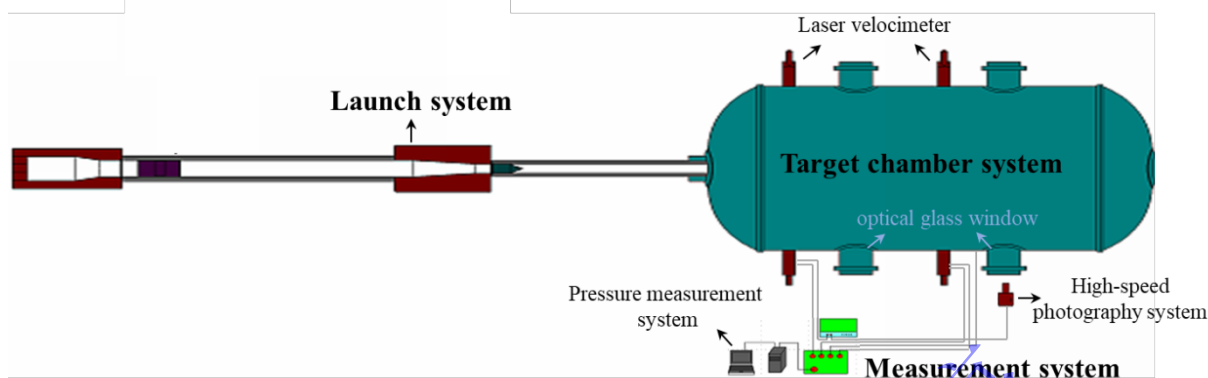


图 3 发射器设备与测试系统示意图

Fig.3 Schematic of the launch system and measurement system

试验所用弹丸为 $\Phi 12.7$ mm 的 45 号钢球形弹丸。球形弹丸阻力合力通过质心，侵彻姿态稳定，可减少弹丸姿态这一随机变量，便于对比不容填充方案对水锤载荷的衰减作用。弹托采用四瓣分离式结构，直径为 25 mm，以匹配发射器口径。弹丸与弹托实物如图 4 所示。

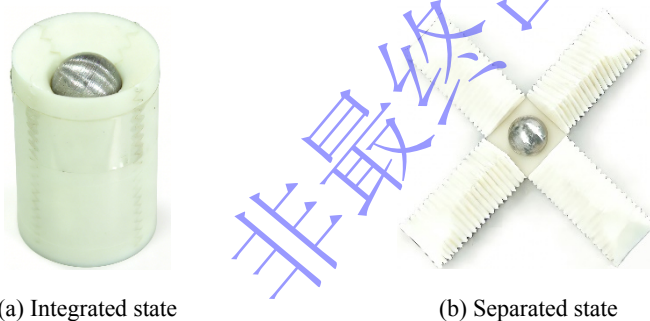


图 4 弹丸/弹托实物图

Fig.4 Photograph of the projectile and its sabot assembly

1.2 蓄液容器

本试验蓄液容器依据文献[15]所述燃油箱等效靶模型设计，其外形尺寸为 500 mm×340 mm×300 mm，总容积为 51 L，如图 5 所示。容器由水箱框架、前后面板等部件组装而成（图 3）。前/后面板采用 2 mm 厚的 2024-T3 铝合金，水箱框架则使用 10 mm 厚的 Q235 钢，可视为刚性支撑结构。二者之间设置有一圈回形密封胶条，并通过外侧压板与周向螺栓紧固连接，以确保整体密封性。

为便于观测，容器顶部与一侧侧壁分别装有 30 mm 厚的光学玻璃。其中，顶部玻璃用于向内部补充照明，侧面玻璃则为高速摄影设备提供观察窗口，用以记录弹丸在箱内的侵彻过程。此外，为减少液体杂质对成像的干扰，容器内灌注去离子水作为实验介质。

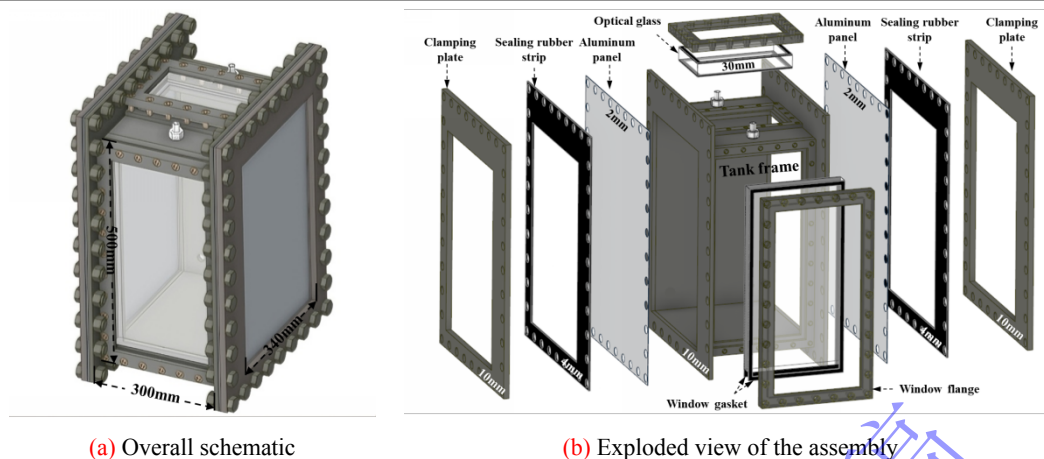


图 5 蓄液容器结构示意图

Fig.5 Schematic of the fluid-filled container

1.3 测试系统

测试系统由激光测速仪、高速摄影系统和压力测量系统组成，如前文图 3 所示。激光测速仪用于测量弹丸撞击蓄液容器前的飞行速度，其原理是通过记录弹丸飞越各测试站时遮挡激光束的时间，结合站间距离计算得出速度。该系统同时兼具触发控制功能，用于同步启动高速摄影与动态力学测试系统。

高速摄影系统用于捕捉弹丸在蓄液容器内的侵彻过程，重点观测弹丸在液体中开坑形成的空化现象及气泡形态演化过程。所采用的高速摄影机最高拍摄频率为 100 kHz，最短曝光时间为 0.5 μ s。试验中可根据视场与成像清晰度需求，调整拍摄频率与分辨率，以获取高质量序列图像。

蓄液容器内部布置两支量程为 30 MPa 的水下自由场压力传感器，具体位置如图 6 所示。传感器位置以弹丸速度方向为 z 轴，相对于水箱撞击点，其坐标表示分别为：传感器#1 (100 mm, -120 mm, 210 mm)，传感器#2 (130 mm, 120 mm, 160 mm)。

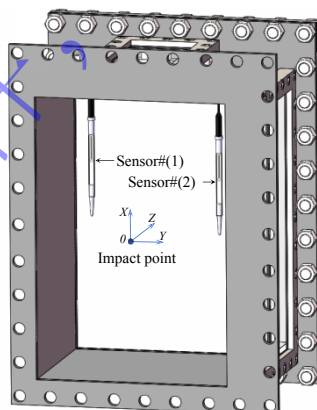


图 6 水下自由场压力传感器位置图

Fig.6 Location of underwater free-field pressure sensors

1.4 试验工况

共计对 5 种不同填充状态的蓄液容器开展了弹丸冲击对比试验，依次编号为 T1~T5，具体工况如表 1 所列。5 次试验的弹丸撞击速度介于 1077 m/s 至 1160 m/s 之间，速度均值为 1129 m/s，标准差为 35 m/s，变化系数仅为 3.1%。表明在相同装填参数下，发射器具有较高的可重复性，各试验工况的初始速度基本处于同一水平。

各工况对应的填充状态见图 7。其中，T1 为满水状态，作为空白对照组；T2 容器内装水 94%，留有 30 mm 高的无水空间；T3 在满水基础上填充有满箱防爆小球（单个质量约 1.8 g），其总体积占

比约为 5%（测量方法参照文献[16]）；T4 在满水基础上预置 36 个降载空心球，该球体由橡胶薄膜包裹防爆小球制成、内部充入惰性气体 N_2 ，直径为 30 mm，在容器长、宽、高方向按 3×4×3 阵列布置，总体积占比约 1%；T5 为混合填充工况，同时包含 36 个降载空心球和满箱防爆小球，总体积占比约 6%。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

试验 编号	弹丸尺寸/mm	弹丸质量/g	撞击速度 $/(m \cdot s^{-1})$	填充状态
T1	12.70	8.4396	1154	满水
T2	12.70	8.4431	1160	装水 94%
T3	12.72	8.4498	1157	满水，填充满箱防爆小球，体积总占比约 5%
T4	12.72	8.4552	1077	满水，预置 36 个空心球（ $\Phi 30$ mm），体积总占比为 1%
T5	12.70	8.4438	1096	满水，混合填充 36 个空心球和满箱防爆小球，体积总占比约 6%

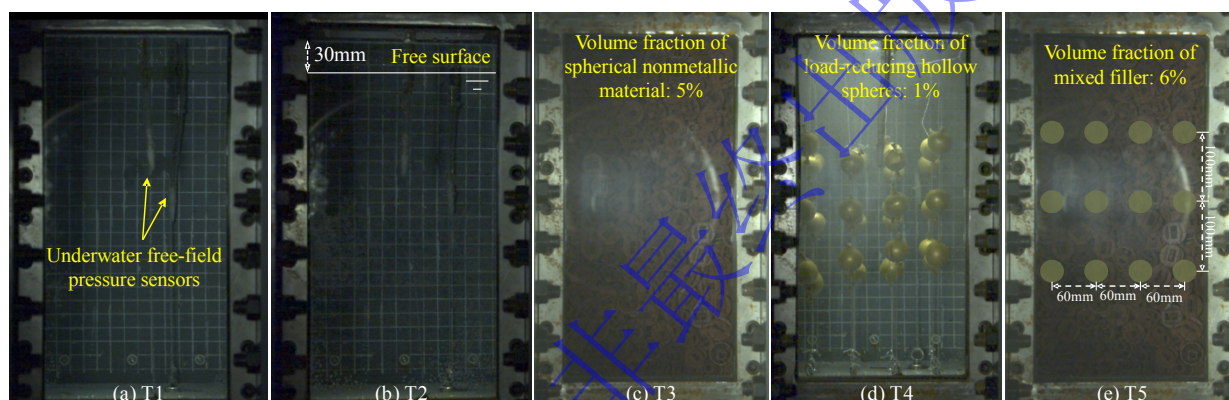


图 7 各试验工况中蓄液容器内填充状态

Fig.7 Filling state in fluid-filled container under various test conditions

2 试验结果

2.1 空化演化过程

高速摄影清晰记录了各工况下弹丸侵彻蓄液容器时的空化演化过程，如图 8~12 所示。所有工况均以弹丸撞击容器前板的瞬间为时序起点（ $t=0 \mu s$ ），图中白色正方形网格的边长为 20 mm，用于尺度标定。

T1 工况（满水状态，基准工况）展示了典型的水锤效应空泡演化过程，如图 8 所示。弹丸击穿前板后进入水中向前不断开坑，并在容器内形成锥形空化气泡。弹丸约在 450 μs 时刻撞击后板，随后在 883 μs 时刻贯穿后板，弹丸后方有少量液体跟随。在空泡膨胀过程中，后板穿孔处未见明显液体外喷。3550 μs 时刻，空泡膨胀至最大尺寸，其径向直径达到 201.3 mm。随后，空泡开始收缩，容器顶部和侧壁因空化效应产生了大量微小气泡。与此同时，容器内的液体开始从弹丸穿孔处向外喷溅。当空泡发生溃灭时（7650 μs 时刻），液体向外的喷射强度（喷射速度与喷射量）达到最大。

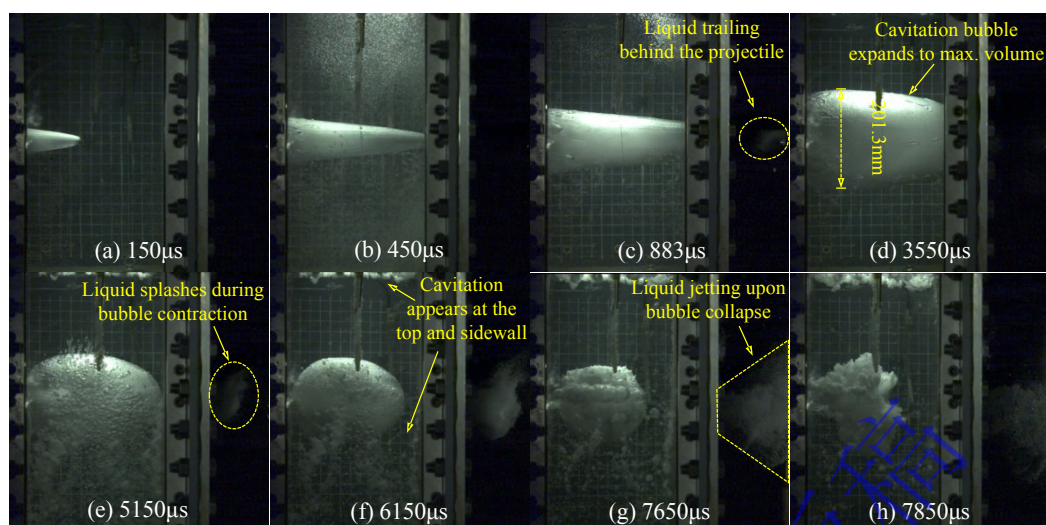


图 8 T1 工况下的高速摄影序列图像

Fig.8 High speed sequence images under T1 test condition

T2 工况（装水 94%）空化气泡的演化过程与 T1 工况基本相同，如图 9 所示。但由于顶部存在 30 mm 高的空气间隙，空泡发生区所处静水压力低于满液状态，其空泡最大膨胀尺寸比 T1 工况略大，达到约 225.4 mm。

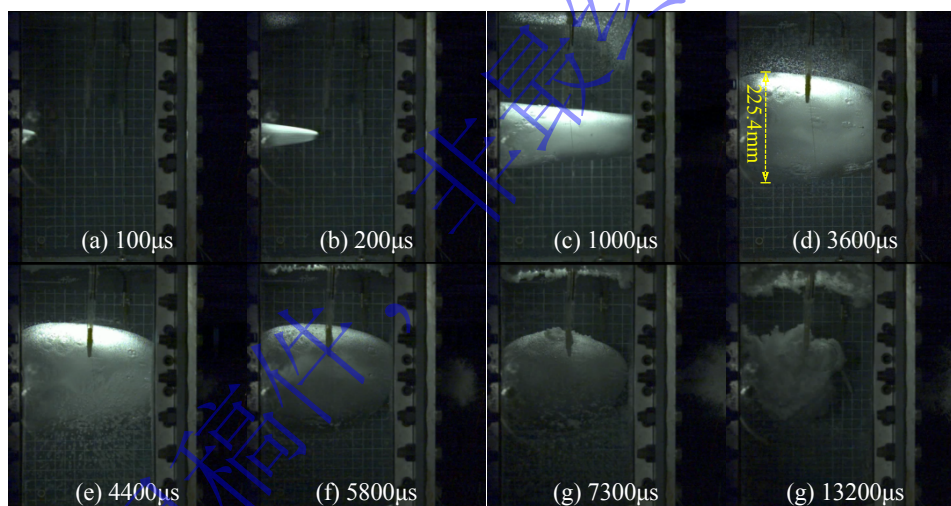


图 9 T2 工况下的高速摄影序列图像

Fig.9 High speed sequence images under T2 test condition

T3 工况（满水，仅填充防爆小球）的高速摄影结果如图 10 所示。弹丸撞击前板瞬间产生了强烈的火光。然而，满箱的防爆小球遮蔽了监视窗口，无法直接观察弹丸的运动路径和空泡形态。尽管如此，仍可捕捉到一个关键现象：在 7300 μs 时刻，大量微气泡附着于侧壁，同时可见水花从后板穿孔处向外喷溅。结合 T1 和 T2 工况中空泡演化与液体喷溅的对应关系，可推断此时正处于空泡开始收缩时刻。与基准工况 T1 相比（约 3600 μs），T3 工况空泡收缩的起始时间明显延后，表明防爆小球大幅延缓了空泡的膨胀-收缩动力学过程。



图 10 T3 工况下的高速摄影序列图像

Fig.10 High speed sequence images under T3 test condition

T4 工况（满水，预置降载空心球）的高速摄影结果如图 11 所示。弹丸侵入过程中，降载空心球由前至后依次发生破坏。大约在 $700 \mu\text{s}$ 时，容器内所有空心球均已破裂。 $4200 \mu\text{s}$ 时刻，弹丸水中开坑形成的空化气泡膨胀至最大尺寸，空泡随后进入收缩阶段。 $12100 \mu\text{s}$ 时刻，空泡收缩至最小尺寸并发生溃灭。在降载空心球的影响下，空化总体积明显小于满水状态。降载空心球通过提供分布式的可压缩空间，有效抑制了空泡的生长。

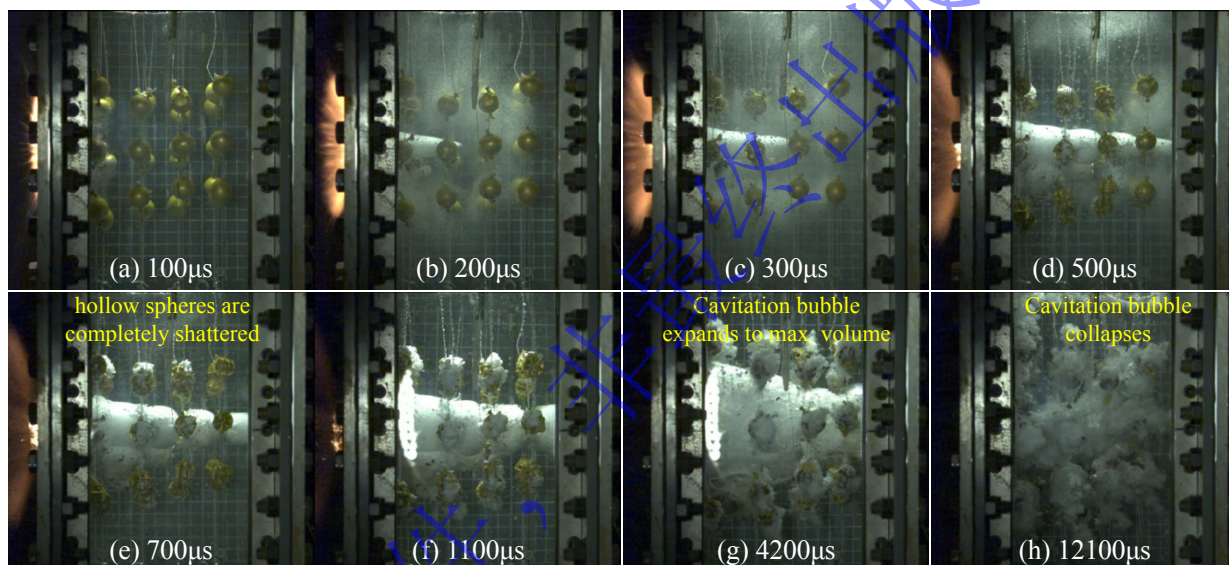


图 11 T4 工况下的高速摄影序列图像

Fig.11 High speed sequence images under T4 test condition

T5 工况（混合填充降载空心球和防爆小球）的高速摄影结果如图 12 所示。与 T3 工况类似，容器内部视野被防爆小球遮挡。然而，可观测事件的发生时间提供了关键信息。根据侧壁微气泡活动和喷溅现象判断，空泡开始收缩的时刻进一步延迟至 $t=9300 \mu\text{s}$ 。此外，侧壁上微气泡覆盖的区域相较于 T3 工况明显减少。这些观测结果表明：降载空心球提供初始冲击衰减和可压缩空间，而防爆小球则通过分隔流体和耗散能量进一步抑制空泡膨胀。二者的联合作用不仅延缓了空泡的演化进程，还有效抑制了空化效应的空间范围。

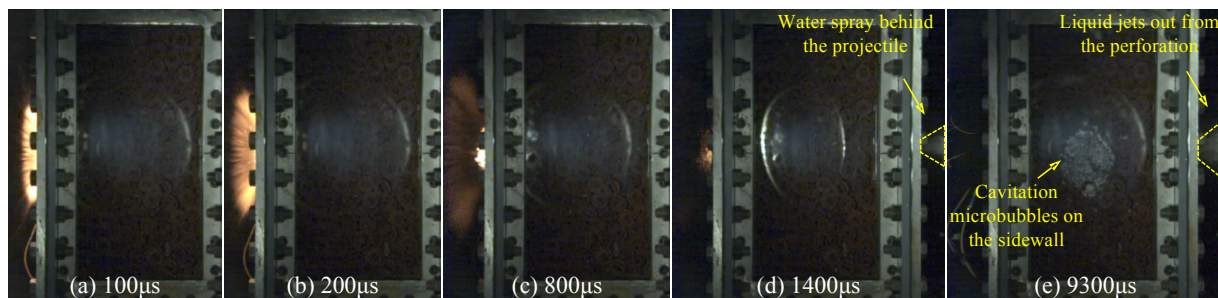


图 12 T5 工况下的高速摄影序列图像

Fig.12 High speed sequence images under T5 test condition

2.2 填充物的损伤情况

试验后的检查显示，T4 和 T5 工况中所有降载空心球的外层薄膜均发生撕裂，绝大部分薄膜的破坏模式都是撕裂为上下两部分（图 13）。如图 14 所示为 T3、T5 试验后防爆小球的典型破坏情况。其损伤程度可根据骨架结构的完整性分为三级：（1）轻微破损，防爆小球整体形态保持完整，其骨架出现局部屈曲或轻微失稳；（2）中度破损，骨架发生断裂，但未完全散开；（3）严重破坏，骨架材料严重破碎。这表明两种填充材料均通过自身结构变形与破坏吸收了部分冲击能量。



图 13 空心球在水锤效应载荷下的破坏情况

Fig.13 Damage condition of hollow spheres under hydrodynamic ram loading

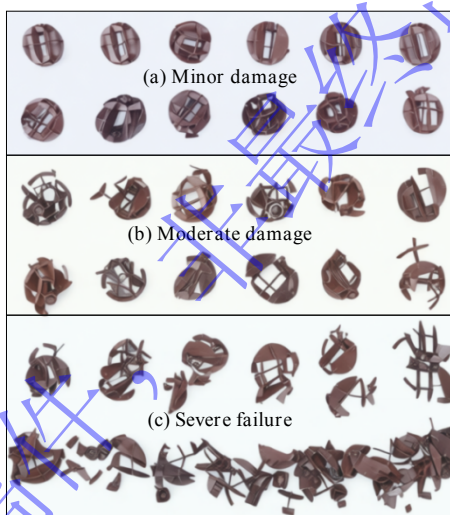


图 14 防爆小球典型破坏模式

Fig.14 Typical failure modes of spherical nonmetallic material

2.3 载荷衰减情况

图 15 展示了不同工况下两个测点所记录的压力时程曲线。在波形特征上，T1 和 T2 工况呈现出典型的陡升速降冲击脉冲特征。相比之下，内部含有填充物的工况（T3~T5）则表现为脉冲上升沿变缓、下降阶段更为平缓，且峰值压力显著降低。这反映了填充物对冲击波传播的干扰与耗散作用。

图 16 定量对比了各工况的冲击波压力峰值。相比 T1 基准工况，T3 工况（仅填充防爆小球）使两个测点的压力峰值分别下降 90.3%和 87.6%；T4 工况（仅预置降载空心球）则分别下降 79.4%和 85.1%；而 T5 混合填充工况表现出最优的衰减效果，压力峰值降幅均达到 92.9%。这表明，降载空心球与防爆小球均能有效衰减水锤冲击载荷，且二者组合使用时呈现明显的协同增强效应。

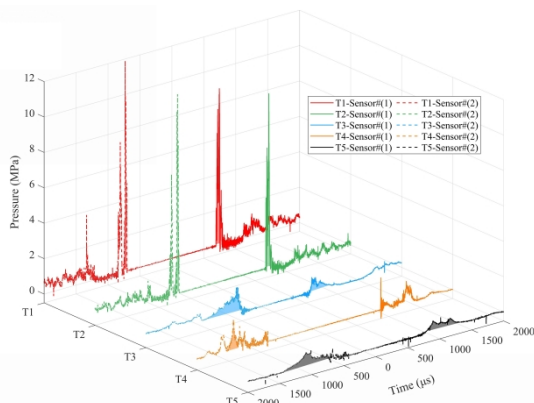


图 15 压力时程曲线

Fig.15 Pressure-time histories

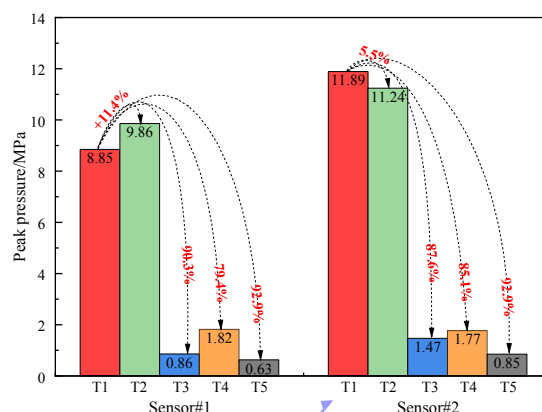


图 16 冲击波压力峰值对比

Fig.16 Peak pressure comparison

2.4 结构变形情况

在高速弹丸冲击作用下，各工况中蓄液结构的整体破坏形貌基本相同，前后板均呈现鼓胀变形破坏模式。其中，前面板的损伤为弹丸撞击造成的绝热剪切穿孔（孔径约 13 mm）。弹丸入水后，液体中形成的冲击波和压力流作用于前板内侧，造成前板产生反方向（与弹丸速度方向相反）塑性变形。图 17（a）展示了 T1 工况前面板的变形损伤情况。

蓄液结构后面板所受的损伤更为严重。但弹丸抵达前，冲击波与压力流已对其施加预载；随后弹丸高速撞击，导致穿孔边缘发生撕裂，并扩展出多条径向裂纹，整体呈现显著的花瓣状破坏与塑性变形，如图 18 所示。这种“预载-穿透”耦合作用是后面板变形量普遍大于前面板的主要原因。

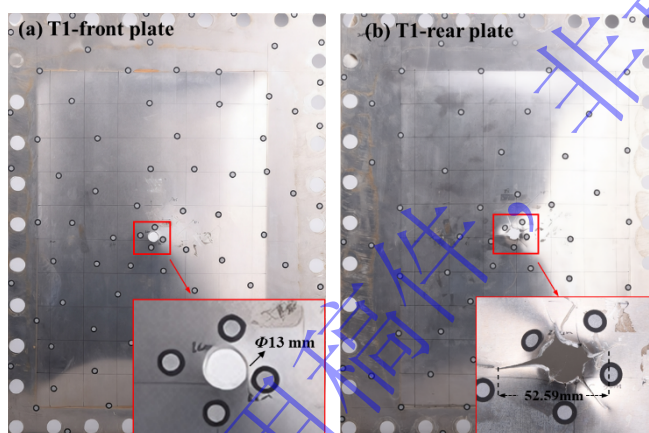


图 17 T1 工况前后板整体破坏形貌

Fig.17 Damage morphology of the front and rear plates (T1)

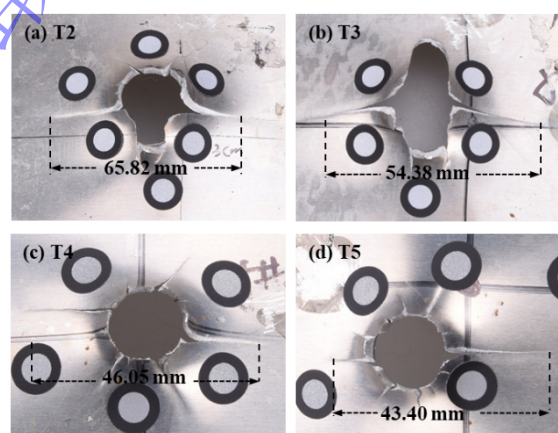


图 18 各工况后板穿孔处局部破坏情况

Fig.18 Localized failure at the rear plate penetration sites

通过对试验后面板结构进行三维扫描，获得了前、后面板沿短边方向的横截面挠度分布，如图 19 所示。各工况下面板最大变形量的对比如图 20 所示。其中，前面板的最大变形量取其短边横截面上的最大位移值。后面板因破坏模式复杂（部分工况在穿孔处出现花瓣状翘曲），不同位置变形差异显著，为便于统一比较，其后板变形量均以图 19 中所示的固定参考坐标线上的位移值为准进行提取和对比。

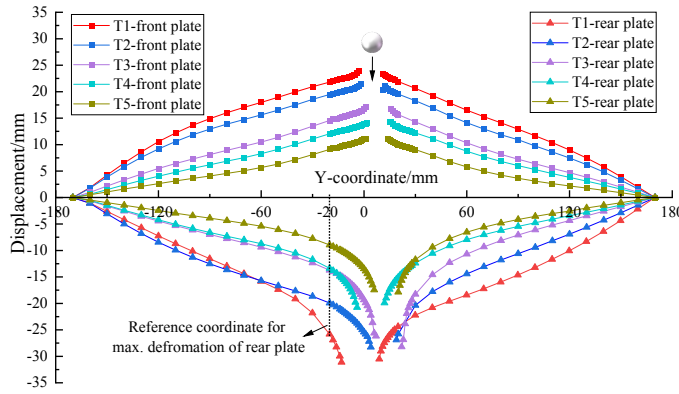


图 19 前/后面板横截面挠度曲线

Fig.19 Cross-sectional deflection profiles

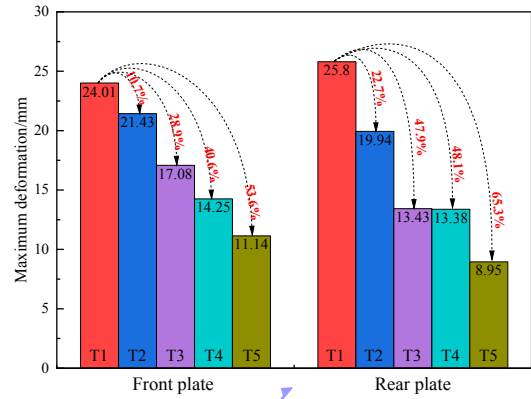


图 20 前/后面板最大变形量

Fig.20 Maximum deformation in front and rear plates

从 T1 至 T5 工况，其前后板的最大变形量依次下降。相比 T1 基准工况，T2 工况前、后面板最大变形量的降幅仅分别为 10.7% 和 22.7%，说明单纯预留顶部气体空间对前面板变形的抑制效果有限。所有填充方案（T3、T4、T5）均显著降低了前后板的最大变形量，证实了降载空心球与**防爆小球**在缓解结构损伤方面的有效性。尤其是 T4 工况，降载空心球在仅占用容积 1% 的情况下，使得前后板最大变形分别降低了 40.6% 和 48.1%。T5 工况（混合填充）的变形量降幅远大于 T3 与 T4 工况的单独效果，表明两种措施在变形抑制上存在显著的协同增强作用。

3 分析与讨论

(1) 真实使用场景下，燃油箱在绝大部分时间内都是部分充液情况，容器上层存在可压缩空间。对比 T1 和 T2 工况的试验结果可以看出，上层可压缩空间对水锤冲击损伤的缓解作用非常有限。弹丸侵彻过程很快（小于 1000 μs ），自由液面还来不及抬升，能量传递过程就已基本完成。而当可压缩空间以预置空心球形式存在时（T4 工况），仅 1% 的体积占比，就使冲击波压力峰值衰减了近 80%，结构变形下降了 40% 以上。

(2) 混合填充方案（T5 工况）展现出卓越的水锤冲击载荷衰减效能。容器内的填充物以 6% 的体积占比（降载空心球 1%+防爆小球 5%），使冲击波压力峰值降低 92.9%，衰减效果优于单一填充方案（仅防爆小球时降幅 87.6%~90.3%，仅降载空心球时降幅 79.4%~85.1%），证实了两种措施在载荷衰减方面的协同增强效应。

(3) 各试验工况的弹丸质量和撞击速度存在一定的波动，弹丸初始动能的差异会影响水锤冲击载荷的强度和结构的变形程度。为消除该差异对工况间对比的影响，以 T1 工况弹丸动能为基准，定义动能修正系数 $k_i = (m_i v_i^2) / (m_1 v_1^2)$ 。式中， m_i 为 Ti 工况弹丸质量； v_i 为 Ti 工况弹丸撞击速度。经计算，T1~T5 的 k_i 分别为 1.000、1.011、1.006、0.873、0.902。按动能比对冲击波压力峰值和结构最大变形量进行一阶归一化修正。T2 和 T3 工况的载荷衰减率和变形量降幅基本不变；T4 工况的载荷衰减率为 76.4%~82.9%，变形量降幅为 32.0%~40.6%；T5 工况的载荷衰减率为 92.1%，变形量降幅为 48.6%~61.5%。结果表明归一化修正后的降载规律不变，对比结论稳健。

(4) 降载空心球与防爆小球通过多机制协同实现损伤抑制。降载空心球薄膜破裂后再液体中形成分布式气泡群，其物理过程与冲击波同气泡群之间的耦合作用问题相似^[17]。冲击波在气泡表面会发生复杂的折射、透射和反射，气泡群通过自身的破碎、脉动和射流吸收冲击波能量。防爆小球则通

过分割流体域抑制空泡膨胀、散射冲击波、骨架塑性变形吸能实现载荷耗散。二者耦合形成多模式的能量耗散机制。

(5) 除对水锤冲击载荷的衰减作用外,混合填充方案对燃爆效应的抑制潜力同样可以预想:降载空心球内部充有惰性气体,当外层薄膜在水锤载荷作用下破坏时,释放出的惰性气体可稀释局部可燃油气浓度,与防爆小球阻隔火焰传播、破坏可燃蒸汽爆炸条件的功能形成协同,有望进一步降低油箱发生燃烧爆炸的风险。

4 结论

本文探索了一种针对燃油箱结构受弹丸撞击毁伤威胁的防护新方法,重点研究了降载空心球和抑爆材料对水锤冲击的衰减作用。通过对比弹道试验,结果表明:

(1) 内部填充物仅以 6% 的低体积代价 (1% 降载空心球 + 5% 防爆小球),即可将水锤冲击引起的峰值冲击压力降低 92.9%,并将前、后板的最大变形量分别减少 53.6% 和 65.3%;

(2) 降载空心球和抑爆材料各自对衰减均有显著贡献,但它们的组合在载荷降低和结构变形缓解方面产生了协同增强效应。

未来研究可进一步优化降载空心球的材料参数 (如薄膜厚度、内部充气压力) 与防爆小球的混合比例,探究不同射弹类型、非规则形状破片、更高撞击速度下的防护效能变化规律,并拓展该方法在燃爆效应抑制方面的试验验证,为其工程化应用提供更全面的技术支撑。

致谢 作者们衷心感谢海军工程大学的侯海量教授、李典和吴蒙蒙博士在实验设计方面给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] 王栋,解立峰,韩志伟,等. 非金属球形抑爆材料抗氧化能力和抑爆性能研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 66-70. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2013.12.014.
WANG D, XIE L F, HAN Z W, et al. Study on antioxidant ability and explosion suppression performance of nonmetallic spherical explosion suppression materials [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(12): 66-70. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2013.12.014.
- [2] BLESS S J, FRY P F, BARBER J P, et al. Studies of hydrodynamic ram induced by high velocity spherical fragment simulators: AFML-TR-77-11[R]. USA: University of Dayton Research, 1977.
- [3] 仲强, 侯海量, 李典. 陶瓷/液舱复合结构抗侵彻机理试验研究[J]. 船舶力学, 2017, 21(10): 1282-1290. DOI: CNKI:SUN:CBLX.0.2017-10-012.
ZHONG Q, HOU H L, LI D. Experimental study on anti-penetration mechanism of ceramic/fluid cabin composite structure[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(10): 1282-1290. DOI: CNKI:SUN:CBLX.0.2017-10-012.
- [4] GAO S Z, LI D, HOU H L, et al. Investigation on dynamic response of liquid-filled concave cell structures subject to the penetration of high-speed projectiles[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 107119. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107119
- [5] DISIMILE P J, DAVIS J, TOY N. Mitigation of shock waves within a liquid filled tank[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(2-3): 61-72. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.006.
- [6] FRY P F. A review of the analyses of hydrodynamic ram: AFFDL-TR-75-102 [R]. USA: Wright-Patterson Air Force Base, 1976.
- [7] BLESS S J. Fuel tank survivability for hydrodynamic ram induced by high-velocity fragments: Part I. experimental results and design summary: AFFDL-TR-78-182, Part I [R]. USA: University of Dayton Research Institute, 1979.
- [8] COPLAND A. Hydrodynamic ram attenuation: ARBRL-MR-03246 [R]. USA: US Army Ballistic Research Laboratory,

- 1983.
- [9] DISIMILE P J, SWANSON L A, NORMAN T. The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 821-829. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.009
- [10] SEYFANG G R. Improvements relating to liquid reservoirs: EP0689991B1 [P]. 1999-01-20.
- [11] 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.10.019
- [12] JIN J, LI D, HOU H L, et al. Attenuation effect of a preset bubble on hydrodynamic ram induced by fragments impacting fluid-filled tank[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 192: 111085. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111085
- [13] WU M M, JIN J, HOU H L, et al. Experimental study on the anti-penetration characteristics of liquid-filled structure with air layer[J]. *Defence Technology*, 2025, 50(1): 185-202. DOI: 10.1016/j.dt.2025.03.023.
- [14] 倪克松, 焦德志, 宋强, 等. 25mm 口径二级轻气炮的优化与应用[J]. *火炮发射与控制学报*, 2025, 46(3): 10-17. DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.20240527.
- NI K S, JIAO D Z, SONG Q, et al. Optimization and application of 25mm two-stage light gas gun[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2025, 46(3): 10-17. DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.20240527.
- [15] GJB767-89. 小口径炮弹对飞机、直升机毁伤试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会, 1990.
- GJB767-89. The method of test of kill for small caliber ammunition against aircraft and helicopter[S]. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1990.
- [16] GJB8455-2015. 油箱油罐填充用阻隔防爆材料通用规范[S]. 中国人民解放军总装备部, 2015.
- GJB8455-2015. General specification for explosion suppression materials used in fuel tanks[S]. The General Armament Department of the People's Liberation Army of China, 2015.
- [17] 韩蕊. 多气泡（气泡群）非线性耦合作用及融合特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- HAN R. Study on the nonlinear interaction and coalescence of multiple bubbles[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.