

高压物理学报

超空泡射弹水下侵彻靶板三相耦合数值模拟

李昕 严平 谭波 秦一平

Three-Phase Coupling Numerical Simulation of Underwater Penetration of Supercavitating Projectile into Target Plate

LI Xin, YAN Ping, TAN Bo, QIN Yiping

引用本文:

李昕, 严平, 谭波, 等. 超空泡射弹水下侵彻靶板三相耦合数值模拟[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1):015103. DOI: 10.11858/gywlb.20190798

LI Xin, YAN Ping, TAN Bo, et al. Three-Phase Coupling Numerical Simulation of Underwater Penetration of Supercavitating Projectile into Target Plate[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1):015103. DOI: 10.11858/gywlb.20190798

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190798>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于FEM/SPH算法弹丸侵彻多孔陶瓷板的数值模拟

Numerical Simulation of Projectile Penetration into Porous Ceramic Plates Based on FEM/SPH Algorithm

高压物理学报. 2017, 31(1): 35 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.01.006>

破片模拟弹侵彻船用钢靶板的计算模型

Numerical Calculation on Penetration of Ship Steel Plate by Fragment Simulated Projectile

高压物理学报. 2019, 33(1): 015105 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180614>

旋转对卵形弹侵彻钢板影响的FEM-SPH耦合模拟

Effect of Rotation on Penetration of Steel Plate by Ogival Projectile Using Coupled FEM-SPH Simulation

高压物理学报. 2019, 33(5): 055103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180675>

运动状态下聚能战斗部侵彻披挂反应装甲靶板的数值模拟

Numerical Simulation of Shaped Warhead Penetrating the Target with Reactive Armor in Motion State

高压物理学报. 2018, 32(2): 025107 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170604>

基于SPH的分层钢板抗半球头弹侵彻的数值模拟

Numerical Simulation of Anti-Penetration of Laminated Steel Plate by Hemispherical-Nosed Projectile Using SPH

高压物理学报. 2018, 32(5): 055102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170664>

大着速范围长杆弹侵彻深度变化及其影响因素的数值模拟

Depth of Penetration and Its Influence Factors of Long Rod Projectile Impacting on Semi Infinite Target with Elevated Velocity

高压物理学报. 2018, 32(2): 025103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170592>

超空泡射弹水下侵彻靶板三相耦合数值模拟

李 昕, 严 平, 谭 波, 秦一平

(海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 超空泡射弹侵彻问题的实质是特殊水下结构受到高速冲击载荷作用下的动态响应。对 12.7 mm 口径超空泡射弹侵彻典型水下目标壳体的毁伤效果开展研究, 基于 LS-DYNA 有限元分析软件建立水环境中超空泡射弹垂直侵彻曲面靶板的等效模型, 探讨射弹侵彻过程中动能侵彻和气泡溃灭对靶板联合毁伤效果, 获得了靶板在各阶段的应力变化和结构变形规律。结果表明: 侵彻靶板前, 射弹着靶速度为 200 m/s 时的头部表面水介质压力峰值达 768 N, 靶板表面有明显下凹变形; 侵彻靶板时, 伴随着射弹动能侵彻和气泡溃灭冲击, 水介质造成的影响不足动能侵彻的 2%; 侵彻靶板后, 在靶板正面形成峰值速度为 42 m/s 的水射流进一步作用于破口; 靶板整体弯曲变形, 在 200~300 m/s 范围内, 随着射弹着靶速度的增加, 靶板弯曲形变量减小; 靶板局部发生延性穿孔, 射弹在水环境中具有更好的破口效果, 射弹速度变化对破口尺寸影响不大。

关键词: 超空泡射弹; 水下侵彻; LS-DYNA; 三相耦合

中图分类号: O385; TJ411

文献标识码: A

传统弹丸受限于水下环境, 在水中速度衰减很快, 且弹道不稳定, 难以有效打击水下目标。超空泡射弹在水下高速航行时, 随着来流速度的增加, 其锥形头部表面的液体压力下降至水介质的蒸汽压力以下, 液体发生汽化, 产生并发展为包裹弹体的空泡, 从而大幅减小水下运动阻力, 增加弹丸的有效射程^[1], 可对水下目标实施有效硬杀伤, 未来可能成为海军水下近防系统的一种重要手段。

国外水下超空泡武器研究进展较快。挪威 DSG 公司研发的“多环境”超空泡射弹, 能够兼顾水下和陆上射击使用环境, 已形成多种口径系列装备, 其利用 30 mm 次口径超空泡射弹进行了反鱼雷测试, 射弹在水中航行 125 m 后成功命中毁伤目标。2004~2005 年, 美国海军机载快速灭雷系统集成演示验证表明, 机载火炮发射的超空泡射弹可成功摧毁试验水雷, 该系统在 2007 年已形成初始作战能力^[2]。国内相关研究工作主要集中在数值模拟和实验室试验方面。施红辉等^[3]建立了射弹二维 CFD 计算模型, 结合实验工况分析了水下连发射弹的超空泡流场相互作用及其变化机理。严平等^[4]对超空泡射弹侵彻鱼雷结构等效靶进行了数值模拟, 研究了弹丸在不同弹着角和攻角侵彻靶板时的弹道、极限速度、破口形状和尺寸的变化规律。邓环宇^[5]对比分析了高速射弹在水、空气两种介质环境下垂直侵彻靶板的过程中弹体和靶板的差异性, 给出了靶板厚度变化对水环境下高速射弹侵彻过程的影响规律。章启成^[6]开展了 4.5 mm 水下枪弹发射试验, 有效弹道达 17 m, 水深 5 m、距离枪口 8 m 处存速可达 186 m/s。熊天红^[7]利用露天水池开展了 16 mm 多椎体模型射弹水下发射试验, 入水后能产生稳定超空泡, 航行 5.5 m 后仍具有一定杀伤威力。

侵彻是超空泡射弹最典型的毁伤模式, 其物理现象表现为: 射弹侵彻靶板前, 射弹稳定航行表面生成纺锤形超空泡, 射弹和靶板结构间的两相区压力变化影响靶板表面应力; 射弹侵彻靶板时, 射弹穿甲侵彻和空泡冲击以及坍塌形成的微射流对靶板造成联合毁伤^[8]; 射弹侵彻靶板后, 射弹尾部气泡溃灭会在靶板外表面产生负压区, 形成高速水射流作用于靶板破口内壁。整个过程涉及射弹与靶板、水介质

* 收稿日期: 2019-06-27; 修回日期: 2019-07-11

作者简介: 李 昕(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事武器系统运用与保障研究. E-mail: 276377954@qq.com

通信作者: 严 平(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事弹药毁伤与安全研究. E-mail: daer2004@sina.com

和空泡之间的能量转换,是典型的固-液-气三相耦合问题,涉及超空泡现象^[1]、流固耦合分析^[9]以及穿甲侵彻效应^[10]。

本工作针对超空泡射弹水下侵彻的物理过程,基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,建立水环境中超空泡射弹垂直侵彻靶板的仿真模型,分析射弹动能侵彻和空腔环境压力、气泡溃灭冲击以及后效水射流对靶板的联合毁伤作用,定量描述各阶段空泡对靶板毁伤程度,并给出射弹速度对靶板整体弯曲变形的影响和局部塑性破口的规律。

1 仿真建模

1.1 模型建立

几何模型由水、空气、超空泡射弹以及靶板 4 个部分组成。该型超空泡射弹为圆柱形铝合金弹体和锥形钨合金弹头组成,弹径为 12.7 mm。靶板(硬铝)为曲面,尺寸为 16 cm × 16 cm × 6 mm,曲率为 3.75 m⁻¹。靶板上方为水环境,下方为空气环境。相关试验表明,超空泡射弹着靶速度为 200~300 m/s 时,在目标终点具有显著的毁伤效果。仿真采用 cm-g-μs 单位制,具体几何模型如图 1 所示,并建立空间直角坐标系。

1.2 参数设置

水介质和空气介质采用欧拉网格建模,单元使用多物质 ALE 算法。超空泡射弹和靶板采用拉格朗日网格建模,射弹和靶板与水与空气采用多物质材料流固耦合算法。对于该型锥头弹体,流固耦合罚函数因子 PAFC 取值为 0.1。射弹与壳体间的侵蚀采用 3D Surface to Surface Eroding 算法,水和空气施加三维透射边界来模拟无限域环境。对于水和空气选用 Null 材料模型,对于射弹和靶板选用 Johnson-Cook 材料失效模型,均采用 Grüneisen 绝热熵增状态方程^[11],具体参数如表 1 所示。其中, ρ 为材料密度, G 为剪切模量, E 为弹性模量, ν 为泊松比, D 为失效参数。

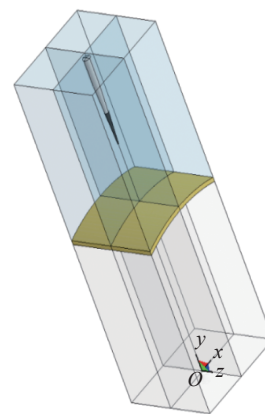


图 1 超空泡射弹水下侵彻靶板几何模型

Fig. 1 Geometric model of underwater penetration of supercavitating projectile into target plate

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Part	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	E/GPa	ν	D
Water	1.02				
Air	0.001 25				
Projectile head	17.60	136	350	0.28	1.5
Projectile body	2.77	26	69	0.33	1.0
Target	2.85	21	71	0.69	0.8

1.3 模型假设

(1) 射弹侵彻靶板试验表明,射弹形变量相对较小,故仿真射弹采用 Constrained Nodal Rigid Bodies 关键字约束成刚体。

(2) 射弹着靶速度为 200~300 m/s,作用过程仅为 4 ms 左右,不考虑重力影响。

(3) 整个射弹侵彻靶板过程视为绝热过程,不考虑射弹与空气及水之间的热量交换。

(4) 建模时忽略水下目标常见的加强筋等结构,靶板简化为匀质金属板。

2 仿真结果与分析

2.1 靶板应力变化

2.1.1 射弹侵彻前靶板应力变化

射弹在接触靶板之前以超空泡形态航行, 当射弹着靶速度为 200 m/s 时, 其生成的纺锤形空腔及周围水环境压力分布等值面^[12] 如图 2 所示。计算得到稳定超空泡状态下, 射弹头部水环境压力约 538 N, 射弹尾部水环境压力约 178 N, 水环境压力从射弹头部逐渐递减到尾部; 当射弹即将接触靶板时, 射弹头部水环境压力峰值可达到 768 N。

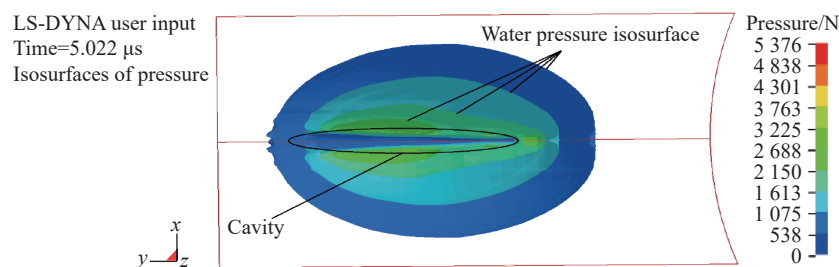


图 2 纺锤形空腔及水环境压力等值面

Fig. 2 Fusiform cavity and the iso-surface of water environment pressure

为研究空腔效应对目标靶板应力值的影响, 沿曲面靶板对角线取 Element 1~Element 5 共 5 个测试单元, 坐标分别为靶板侵彻部分点 (0,26.7,0), 靶板近端测试点 (1,26.7,1)、(2,26.6,2), 靶板远端测试点 (5,26.3,5)、(8,25.5,8), 具体位置如图 3 所示。测量数据经过 Origin 平滑滤波处理, 得到各测试单元范式应力变化, 如图 4 所示。

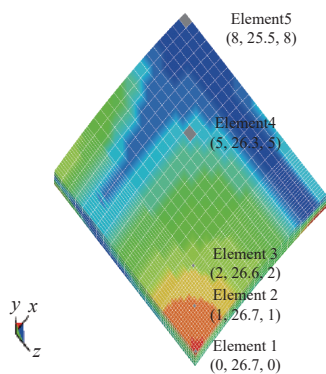


图 3 Element 1~Element 5 五个测试单元

Fig. 3 Five test units of Element 1 – Element 5

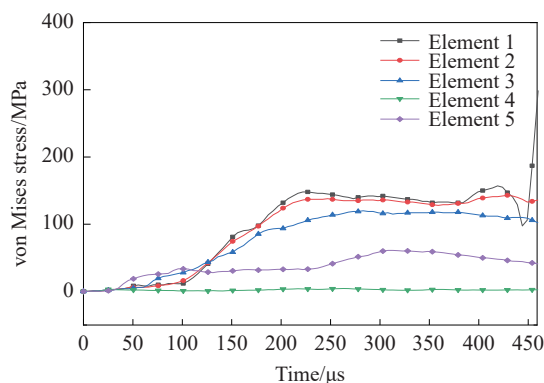


图 4 5 个测试单元的范式应力时程曲线

Fig. 4 von Mises stress time-history curves of five test units

由上述图表可知, 越靠近侵彻部分的靶板区域, 应力越大; 靶板远端 Element 4、Element 5 的表面应力值稳定在 0~50 MPa 区间, 无明显形变发生; 靶板近端 Element 2、Element 3 的表面应力值逐渐增大, 待空腔体接近靶板时, 靶板表面应力值稳定在 100~150 MPa 区间, 有微小形变; 靶板侵彻部分, 随着空腔体的航行, 水压力边界靠近靶板, 表面应力值增加至约 150 MPa。当密度减小的气液两相区行进至钢板时, 腔内压力小于外环水介质压力, 使得靶板表面应力值下降, 最低为 97 MPa。纺锤形空腔继续行进, 射弹速度很快, 腔内空气短时间无法迅速排开, 导致靶板应力重新升高, 峰值达到 299 MPa, 超过硬铝的屈服极限 280 MPa, 靶板表面有明显下凹变形, 如图 5 所示。

2.1.2 射弹侵彻时靶板应力变化

水环境下超空泡射弹侵彻靶板时, 伴随着射弹动能侵彻和气泡溃灭冲击过程, 如图 6 所示。射弹

开坑、贯穿金属薄靶板,使靶板发生局部耗能和整体形变。空泡产生的冲击压力波和空泡坍塌形成的微射流均会对结构产生二次载荷作用,整个溃灭过程极其短暂,且释放的压力很小。

侵彻过程中,靶板材料在不断失效和删除,导致单元应力数据不易测得。取靶板应力最大值点,认为是靶板正在被侵彻的部位。为更好地对比分析水环境对侵彻过程的影响,在相同模型、初始条件下进行空气环境下的仿真试验,整合得到空气和水环境中靶板侵彻部位应力时程曲线,见图7。水环境下射弹在开坑阶段($459 \sim 505 \mu\text{s}$)和贯穿阶段($505 \sim 1287 \mu\text{s}$)两个过程中,靶板侵彻部位应力基本不变,稳定在540 MPa左右。射弹行进到 $989 \mu\text{s}$ 时,射弹圆柱形尾部通过侵彻部位,靶板破口延伸量相对减小,表面应力下降至490 MPa左右。空气中,靶板侵彻部位应力变化趋势和大小与水中基本相似。对两条曲线通过平均差分取绝对值,得到二者的应力平均值相差7.78 MPa,即水介质造成的影响不足动能侵彻的2%,气泡溃灭造成的毁伤效果并不显著。

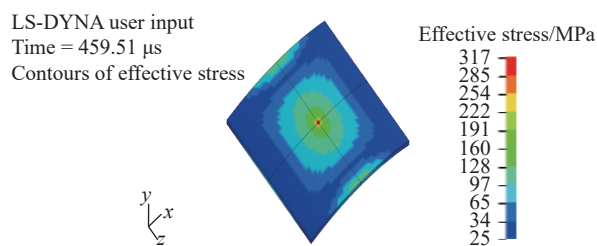


图5 侵彻前靶板的应力

Fig. 5 Stress of the target plate before penetration

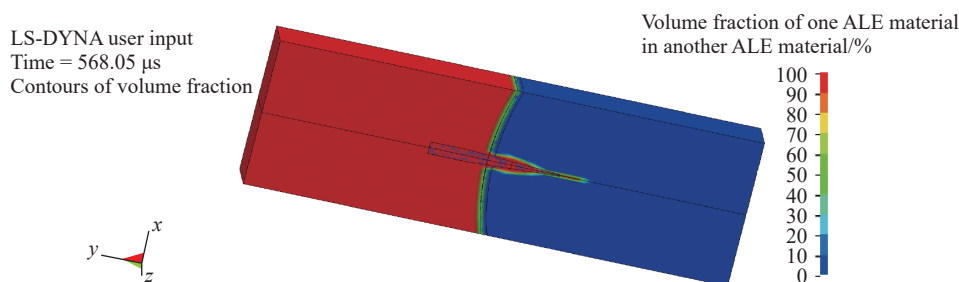


图6 超空泡射弹侵彻靶板

Fig. 6 Supercavitating projectile penetrating target plate

2.1.3 射弹侵彻后靶板应力变化

仿真结果表明,射弹贯穿靶板后,气泡溃灭在靶板表面产生负压区,射弹尾部形成一束弹道中心汇聚的内聚稀疏波,从而生成高速水射流^[13]。本研究中,射弹速度为200 m/s时,形成的水射流形状为垂直于靶板平面的倒锥体,长10.9 cm,持续时间为 $1287 \sim 3568 \mu\text{s}$,水射流形状见图8。为研究水射流对靶板的毁伤情况,在靶板侵彻内壁上等距离取Element 6~Element 8共3个测试单元,坐标分别为(0.5,26.7,0.5)、(0.5,26.4,0.5)、(0.5,26.1,0.5),观察靶板内壁应力均值的变化,分析得到水射流的影响,见图9。

由图10可知,射弹贯穿前期,射弹形成后效水射流能量主要集中在第一次冲击靶板,没有发生类似于爆炸产生的气泡脉动现象。测量得到水射流速度峰值为42 m/s,水中最大靶板应力为377 MPa,空气中最大靶板应力为352 MPa。射弹贯穿后期,靶板材料内部范氏应力依然存在且较大,是因为单元之间形变残留,依然存在挤压应力。水环境中靶板内壁应力平均值为219 MPa,与空气中靶板内壁应力平均值222 MPa相差无几,且二者应力下降速率基本保持一致。由于靶板一侧水介质的存在,阻碍了靶板的回弹,使得水中靶板应力振荡范围小于空气中应力振荡范围。

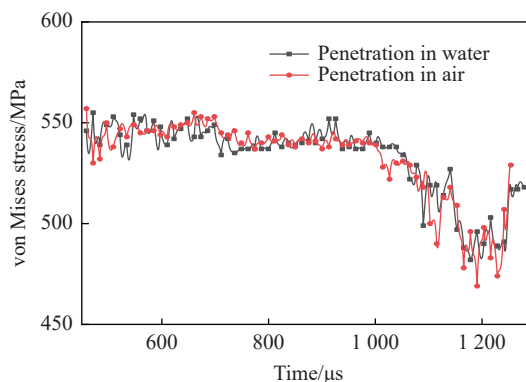


图7 空气和水环境中侵彻部位应力时程曲线

Fig. 7 Stress time-history curves of penetrating site in air and water environments

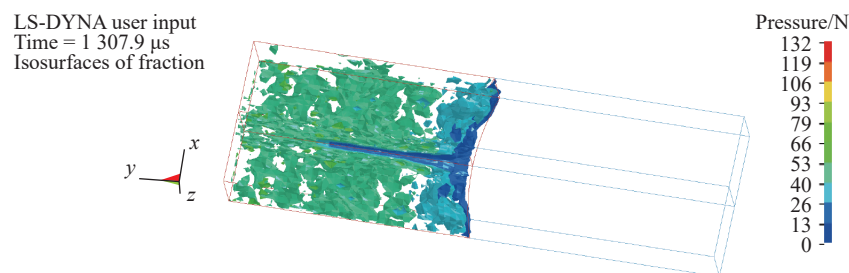


图 8 超空泡射弹侵彻靶板后效水射流横截面

Fig. 8 Cross section of after effect water jet of supercavitating projectile penetrating target plate

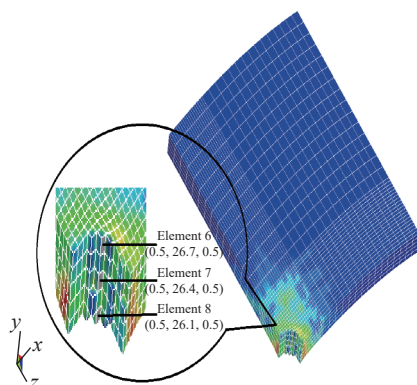


图 9 Element 6~Element 8 三个测试单元位置

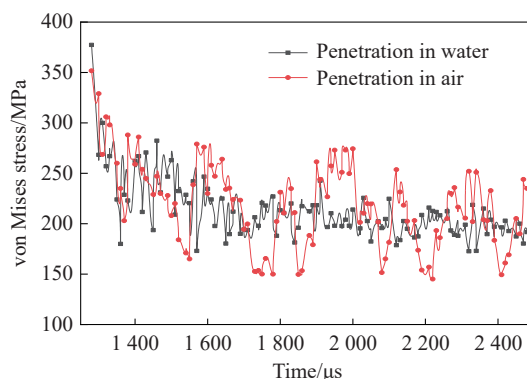
Fig. 9 Locations of three test units of
Element 6 – Element 8

图 10 空气和水环境中靶板内壁应力时程曲线

Fig. 10 Stress time-history curves of target inwall
in air and water environments

2.2 靶板结构变形

射弹侵彻金属薄靶板时,忽略热效应以及射弹质量损失等次要影响,根据能量守恒定律,射弹消耗的动能一部分导致靶板整体弯曲变形,另一部分造成靶板局部毁伤形成破口。

2.2.1 整体弯曲变形

为定量描述靶板在射弹侵彻下整体弯曲形变量,观察破口横截面,在靶板中面两侧取 Element 9、Element 10 两个测试点,测量其沿 y 轴负方向发生的位移,具体位置见图 11。对两点位移改变量取平均值,定义为靶板破口中面挠度^[14]。当射弹在水介质和空气介质中以不同着靶速度侵彻时,靶板破口中面挠度变化规律如图 12 所示。由图 12 可以看出,空气中靶板破口中面挠度稳定在 0.40 mm 左右,由于水介质的阻力缓冲作用,消耗部分射弹动能,使得水中靶板破口中面挠度变小,稳定在 0.14 mm 左右。

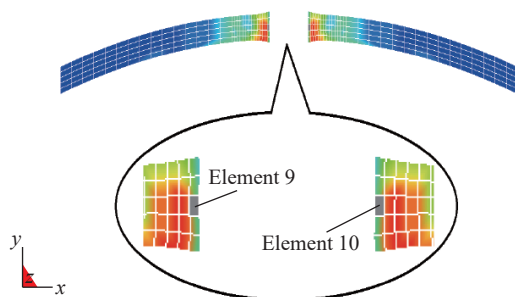


图 11 Element 9、Element 10 两个测试单元

Fig. 11 Two test units of Element 9 and Element 10

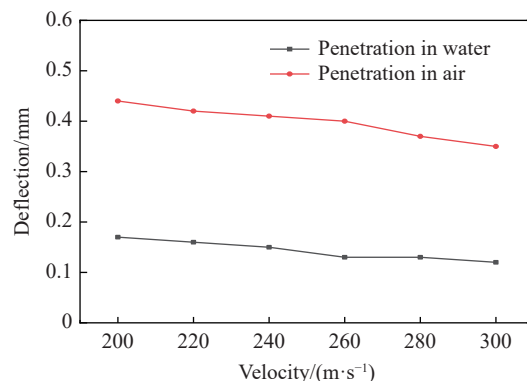


图 12 空气和水环境中靶板破口中面挠度变化曲线

Fig. 12 Variations of mid-plane deflection of target plate
in air and water environments

随着射弹着靶速度的增加,射弹作用于靶板破口边缘的塑性变形区和破口附近的弹性区时间缩短,且各本构区的作用力大小基本不变,使得靶板破口中面挠度在两种介质环境下均有所下降,即靶板整体弯曲变形量变小。由于仿真模型靶弹径比为13,考虑到靶板的边界效应,发现靶板在弯曲变形过程中,均有一定回弹现象,最后振荡趋于上述稳定的破口中面挠度值。

2.2.2 局部塑性破口

侵彻过程中,因为硬铝靶板具有一定的韧性和延性,穿孔后被超空泡射弹扩开,锥头弹和尖头弹易产生延性穿孔^[15]。当射弹垂直侵彻到机械强度不高的韧性靶板时,靶板金属单元向表面流动,然后沿穿孔方向由前至后挤开,靶板内侧形成圆形穿孔,靶板背面有破裂的凸缘,两种介质下靶板破口形状见图13。进一步观察发现,水中靶板破口圆度稍大,金属单元外翻量少,内壁光滑;空气中靶板破口圆度小,金属单元外翻量稍大,内壁粗糙。

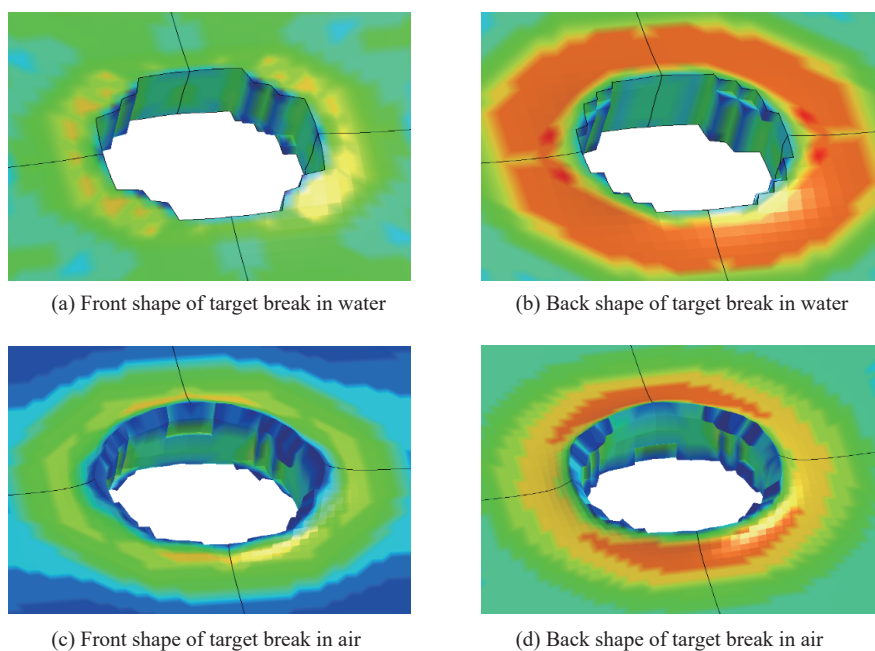


图13 两种介质下靶板破口正背面形状

Fig. 13 Front and back shapes of target breaks in two media

为减少随机误差,分别在纵向和横向测量圆孔内壁距离,取平均值作为靶板破口尺寸,如图14所示。当射弹以200 m/s着靶速度贯穿靶板后,靶板破口口径为13.57 mm,经水射流冲击后靶板破口口径依然为13.57 mm,水射流冲击靶板内壁有轻微形变,对破口尺寸进一步扩开无明显影响。

取射弹着靶速度的200~300 m/s区间,每隔20 m/s等距离提取6个样本点进行试验,研究不同着靶速度下靶板破口尺寸变化规律,如图15所示。由于射弹侵彻靶板后,在水中的存速小于空气中的存速,射弹动能更多地传递到靶板的结构变形能中,具有更强的毁伤效应。测量得到水中靶板破口尺寸平均值为13.49 mm,大于空气中靶板破口尺寸平均值13.01 mm。计算二者曲线方差,均为0.01,说明破口尺寸变化波动不大,即提高射弹着靶速度对靶板局部塑性破口无明显增益。

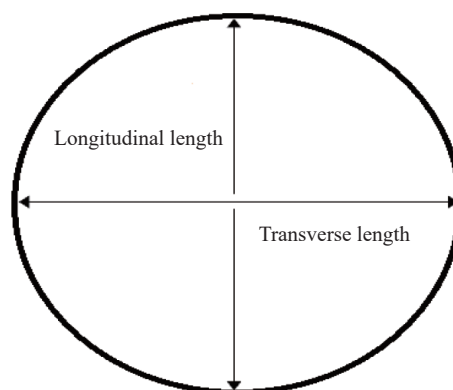


图14 靶板破口尺寸测量方法

Fig. 14 Measuring method of the target break size

3 结 论

通过对 12.7 mm 口径超空泡射弹水下侵彻靶板数值模拟分析, 得到以下结论。

(1) 射弹侵彻靶板前, 超空泡射弹航行生成稳定的纺锤形空腔, 射弹周围水环境压力从头部到尾部逐渐递减, 接触靶板前弹尖处峰值压力达到 768 N。靶板应力峰值达到 299 MPa, 靶板表面靠近侵彻中心部分有明显下凹变形。

(2) 射弹侵彻靶板时, 空气环境下靶板侵彻部位应力变化全过程的趋势和大小与水中基本相似。水介质造成的影响不足动能侵彻的 2%, 气泡溃灭造成的毁伤效果并不显著。

(3) 射弹侵彻靶板后, 气泡溃灭在射弹尾部形成 42 m/s 的高速水射流, 能量主要集中在第一次冲击靶板, 作用时间持续 2.3 ms, 使靶板内壁峰值应力增加 25 MPa, 对靶板破口口径的扩开影响不大。

(4) 射弹侵彻贯穿曲面薄靶板后, 靶板结构发生整体弯曲变形, 并伴有回弹现象。水介质中靶板破口挠度为 0.14 mm, 小于空气介质中靶板破口挠度 0.40 mm。随着射弹着靶速度的增加, 靶板弯曲变形量减小。

(5) 在射弹锥形头部作用下, 靶板局部发生延性穿孔。水中靶板平均破口尺寸 13.49 mm, 大于空气中靶板平均破口尺寸 13.01 mm, 射弹在水环境中具有更好的破口效果。当射弹着靶速度在 200~300 m/s 范围时, 提高射弹着靶速度对靶板破口尺寸无明显增益。

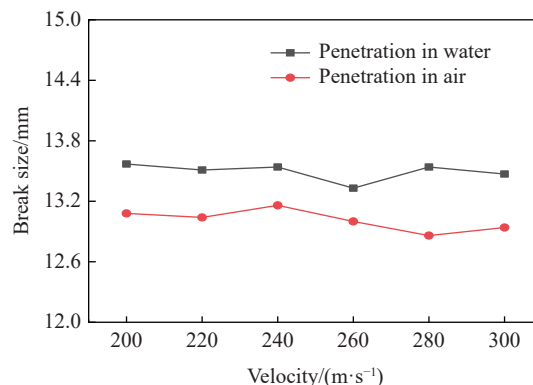


图 15 不同射弹着靶速度下靶板破口尺寸变化曲线

Fig. 15 Variations of target break size at different target velocities

参考文献:

- [1] 张宇文, 袁绪龙, 邓飞. 超空泡航行体流体动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 17-32.
ZHANG Y W, YUAN X L, DENG F. Hydrodynamics of supercavitating vehicle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 17-32.
- [2] 姚忠, 王瑞, 徐保成. 超空泡射弹火炮武器应用现状研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(3): 92-96.
YAO Z, WANG R, XU B C. Research on application status of supercavitating projectile gun weapon [J]. Journal of Artillery Launch and Control, 2017, 38(3): 92-96.
- [3] 施红辉, 周东辉, 孙亚亚, 等. 水下连发射弹的超空泡流动特性研究 [J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2228-2234.
SHI H H, ZHOU D H, SUN Y Y, et al. Study on supercavity flow characteristics of underwater continuous launch projectile [J]. Journal of China Ordnance, 2018, 39(11): 2228-2234.
- [4] YAN P, LI X. Numerical simulation of underwater supercavitating projectile penetrating structure equivalent of torpedo [C]// CHANG G F, CLIVE W, BAO M L. 2018 International Conference on Defence Technology Proceedings. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2018: 629-633.
- [5] 邓环宇. 高速射弹侵彻行为及跳弹机理数值计算 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 23-35.
DENG H Y. Numerical calculation of penetration behavior and jump mechanism of high speed projectiles [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2016: 23-35.
- [6] 章启成. 水下高速运动体运动特性分析与试验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 31-40.
ZHANG Q C. Analysis and experimental study on motion characteristics of underwater high-speed moving body [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011: 31-40.
- [7] 熊天红. 水下高速射弹超空泡减阻技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005: 95-108.
XIONG T H. Research on super-cavitation drag reduction technology of underwater high speed projectile [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005: 95-108.

- [8] 潘森森, 彭晓星. 空化机理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 122–124.
PAN S S, PENG X X. Physical mechanism of cavitation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 122–124.
- [9] 康德, 严平. 基于 LS-DYNA 的高速破片水中运动特性流固耦合数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(5): 534–538.
KANG D, YAN P. Fluid-solid coupling numerical simulation of motion characteristics of high-speed fragments in water based on LS-DYNA [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5): 534–538.
- [10] 钱伟长. 穿甲力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 289–290.
QIAN W C. Armor piercing mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 289–290.
- [11] CHEN X W, LI Q M. Perforation of a thick plate by rigid projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(7): 743–759.
- [12] 黄超, 汪斌, 张远平, 等. 柱形装药自由场水中爆炸气泡的射流特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(3): 263–267.
HUANG C, WANG B, ZHANG Y P, et al. Jet characteristics of explosive bubbles in free field of cylindrical charge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(3): 263–267.
- [13] 唐一华, 权晓波, 谷立祥, 等. 水下垂直发射航行体空泡流 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2017: 76–111.
TANG Y H, QUAN X B, GU L X, et al. Cavity flow of vertical underwater launched vehicle [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2017: 76–111.
- [14] 王元博. 纤维增强层合材料的抗弹性能和破坏机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 47–51.
WANG Y B. Study on bubble dynamic characteristics and jet impact damage of cylindrical charge [D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2006: 47–51.
- [15] FORRESTAL M J, LUK V K. Perforation of aluminum armor plates with conical-nose projectiles [J]. *Mechanics of Materials*, 1990, 10(1): 97–105.

Three-Phase Coupling Numerical Simulation of Underwater Penetration of Supercavitating Projectile into Target Plate

LI Xin, YAN Ping, TAN Bo, QIN Yiping

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430032, Hubei, China)

Abstract: The essence of supercavitating projectile penetration is the dynamic response of a special underwater structure subjected to high-speed impact load. In this paper, the damage effect of 12.7 mm supercavitating projectile penetrating typical underwater target shell is studied. Based on LS-DYNA finite element analysis software, the equivalent model of supercavitating projectile penetrating into curved surface target vertically in water environment is established. The combined damage effect of kinetic energy penetration and bubble collapse on target plate during penetration is simulated, and the stress variation and structural deformation law of target plate at different stages are obtained. The results show that the peak pressure of water medium on the head surface reaches 768 N when the velocity of projectile is 200 m/s before penetrating the target, and the surface of the target exhibits obvious concave deformation; with projectile kinetic energy penetration and bubble collapse impact during penetrating process, the impact effect of water medium is less than 2% of that by kinetic energy penetration. After penetrating the target, a water jet with a peak velocity of 42 m/s is formed on the front of the target and further acts on the break. The overall bending deformation of the target plate occurs. In the range of 200 m/s to 300 m/s, the bending deformation decreases with the increase of projectile impact velocity. Ductile perforation occurs locally on the target plate, and the projectile has better perforation effect in water environment. The change of projectile velocity has little effect on the size of the perforation.

Keywords: supercavitating projectile; underwater penetration; LS-DYNA; three-phase coupling