

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.008

射流穿透导引头起爆反应装甲计算方法

崔卫超,徐伟华,杨赵兵,周亮,陈福红

(四川航天系统工程研究所,成都 610000)

摘要: 为了得到一种前级战斗部射流穿透导引头起爆反应装甲的准确可行计算方法。首先采用 ALE 方法计算了射流形成以及穿透导引头干扰的过程。然后提出 SPH 模型重构方法,把穿透导引头干扰后的头部射流转化为三维 SPH 计算模型,采用 SPH 方法对前级战斗部穿透导引头引爆反应装甲进行了研究,并通过引爆爆炸反应装甲试验验证了仿真方法的可行性。结果表明:这种计算方法能够准确的预测射流穿透导引头后对反应装甲的起爆能力,得到了材料界面清晰的引爆反应装甲的过程,发现反应装甲是被射流侵略彻盖板时产生的前驱波引爆的,验证了前驱波起爆反应装甲的起爆理论。

关键词: 反应装甲; SPH 方法; 导引头干扰; 射流

中图分类号: TJ410 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)02-0051-07

Explosive Reactive Armor Detonation Calculation Method of Jet after Penetrating Seeker

CUI Wei-chao, XU Wei-hua, YANG Zhao-bing, ZHOU Liang, CHEN Fu-hong

(Sichuan Aerospace System Engineering Institute, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to obtain an accurate and feasible explosive reactive armor (ERA) detonation calculating method of pre-warhead jet after penetrating seeker. , First the processes of jet formation and passing interference through the equivalent interference of seeker are calculated by the using ALE method. Afterward, a SPH model reconstruction method was proposed, and the head jet after penetrating seeker interference was transformed into a three-dimensional SPH calculation model. Using the SPH model, a study research of the front warhead penetrating seeker detonating reactive armor was carried out. Furthermore, Then using the SPH model reconstruction method, the head jet after penetration of seeker is translated into 3D SPH calculation model, the pre-warhead jet detonation to ERA is performed by using SPH method. And the feasibility of the simulation results is was verified by an ERA detonation experiment. The results show that this calculation method can accurately predict the initiation ability of jet to ERA after penetrating the seeker. The clear material interface process of ERA detonation is got. Meanwhile, the process of detonating reactive armor with clear material interface was obtained. More importantly, it was found that The the ERA which is was detonated by the generated the precursor wave generated when the jet penetratesd the cover plate, and which proved . The detonation theory of precursor wave ERA detonation is was proved.

Key words: ERA; SPH method; seeker interference; jet

反坦克导弹常采用串联破甲战斗部打击披挂爆炸反应装甲(ERA)的装甲目标,其中前级战斗部用

来穿透导引头引爆目标表面所披挂的反应装甲,并为主级战斗部射流开辟通道。前级战斗部形成的射流穿透导引头内部干扰件后头部速度会有较大的下降,因此需要研究干扰后的射流对 ERA 的起爆能力。

收稿日期:2021-02-06

作者简介:崔卫超(1981-),男,硕士,工程师,从事弹药高效毁伤技术研究,(E-mail) yuanhang621@163.com。

前级战斗部起爆爆炸反应装甲涉及到射流形成、射流冲击夹层炸药、炸药爆轰驱动飞板等复杂过程,动力学计算方法是研究射流起爆 ERA 的有效方法,目前多采用基于网格的计算方法对战斗部射流直接起爆反应装甲进行研究。主要有武海军通过 ALE 算法对不同角度放置的反应装甲起爆对射流的干扰过程进行了数值模拟^[1];吴成利用 Autodyn 仿真计算了实际尺寸的一代爆炸反应装甲盒在起爆后各飞板的运动规律以及相互作用的特点^[2];拜云山利用 Autodyn 对射流侵彻“三明治”爆炸反应装甲及爆轰压力驱动飞板切割射流过程进行了三维数值模拟^[3];朱越亭利用 Autodyn 分析了不同参数的 SiC-Al 射流成型规律以及对新型反应装甲的侵彻效果^[4];吴鹏运用 LS-DYNA 模拟了不同横向飞行速度和侵彻角度情况下聚能战斗部对披挂反应装甲后效靶板的侵彻过程^[5]。刘蓓蓓利用 LS-DYNA 对射流侵彻爆炸反应装甲和等效靶的模型进行了仿真^[6];万清华等利用 ALE 算法得到了新型多三明治结构反应装甲对射流的干扰效果^[7]。

无网格光滑粒子算法 (SPH) 能够克服基于网格方法存在的网格畸变和材料界面等问题,特别适合于求解爆炸和侵彻等动态大变形问题^[8,9]。相关研究有陈杰利用 SPH 算法计算了聚四氟乙烯-铜射流成型过程及侵彻带壳装药穿而不爆的过程^[10];杨刚应用 FE-SPH 自适应耦合算法对长杆弹斜侵彻反应装甲冲击起爆进行了模拟分析^[11]。但射流穿透干扰件引爆 ERA 方面的研究较少,首先利用 ALE 算法计算了射流成型以及穿透导引头干扰的过程,然后通过模型重构把剩余头部射流转化为三维 SPH 模型,利用 SPH 方法对剩余头部射流侵彻反应装甲冲击起爆过程进行研究,并对射流起爆爆炸反应装甲机理进行了分析。

1 ERA 起爆理论

射流对爆炸反应装甲 (ERA) 冲击引爆机理方面最具有代表性的是 Held 引爆准则^[12],M. Held 提出射流引爆裸装装药的临界起爆常数 $k = v_0^2 d$, 式中: k 为临界起爆常数; v_0 为射流的着靶速度; d 为射流的直径,但该准则没有充分考虑 ERA 覆盖板的影响。

Chick. M 指出裸露的炸药要比有覆盖板炸药敏感得多^[13],因为通过覆盖板率先进入炸药的射流前驱波对炸药产生了冲击压缩作用,导致炸药中的空穴闭合,从而趋于更均匀,并在作用区域内使炸药发生了不同程度的化学反应,达到更加钝感的作用效

果。与文献[14]提出的前驱波较弱时的作用效果相同。

朱鹤荣利用脉冲 X 光照相技术研究了射流引爆薄钢板覆盖炸药时引爆的临界条件^[14],并指出首先传入炸药的前驱波才是起爆炸药的真正原因,当作用于炸药上的前驱波强度足够强时,它将会引起炸药爆炸。

采用常用欧拉方法无法得到清晰的材料界面,只能得到射流侵彻引爆反应装甲过程,使得前驱波引爆机理并没有被广泛的应用。而采用光滑粒子计算方法 (SPH) 可以直观得到前驱波引爆反应装甲的过程,验证了爆炸反应装甲的前驱波引爆机理。

2 仿真计算

2.1 光滑粒子方法

光滑粒子算法将计算体离散成带物理量 (质量、动量、能量) 的粒子,根据流体动力学基本原理建立偏微分方程组,利用“核函数”积分近似估值得到粒子的变量函数及其导函数的近似值,从而将偏微分方程组转化为积分形式进行求解,从而得到粒子的各个场变量。

变量函数 $f(x)$ 在空间某一点 x 上的核估值都可以通过函数 $f(x)$ 在域 Ω 中的积分获得

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

式中: $W(x-x', h)$ 为核函数; h 为光滑长度; x 为空间点坐标; x' 为支持域内空间点坐标。

对函数导数采用核函数近似估值,并进行数学推导得到在计算域内或自由边界的函数导数近似核估值为

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \int_{\Omega} f(x') \cdot \nabla W(x-x', h) dx' \quad (2)$$

可见函数导数的核估值值可以通过支持域内空间点的函数的值和核函数的导数积分来确定。

将计算域粒子化后,变量函数 $f(x)$ 和函数导数 $\nabla f(x)$ 在粒子 i 上的核估值的离散式为

$$\langle f(x) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot W_{ij} \quad (3)$$

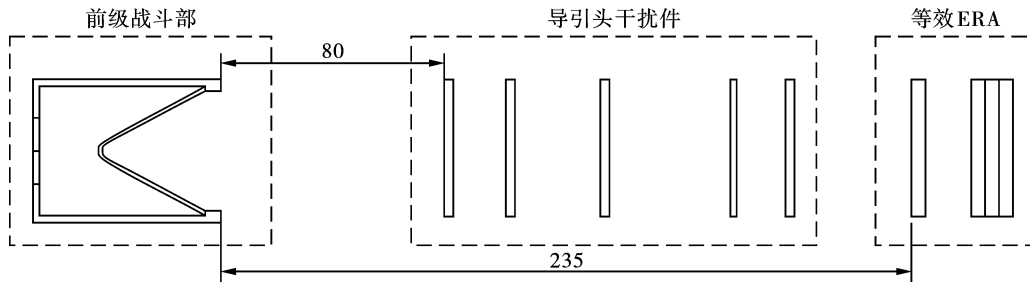
$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla W_{ij} \quad (4)$$

式中: $W_{ij} = W(x-x_j, h)$; $\nabla W_{ij} = \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_j}$; N 为空间点 i 的支持区域内的粒子数; m_j 为粒子 j 的质量; ρ_j 为粒子 j 的密度^[15]。

2.2 计算模型

计算模型包含了炸药、药型罩、壳体、导引头干扰件和爆炸反应装甲(见图 1)。根据某型导引头的实际结构布局,前级战斗部射流通道的干扰件主要有探测器组件、光学镜片和头罩,利用强度等效公式,探测器组件等效为 4.1 mm 厚的纯铜,其它干扰

件可等效为不同厚度的树脂玻璃。爆炸反应装甲由 3 mm 厚的护板、盖板、夹层炸药、背板组成,护板、盖板和背板均采用 4340 钢材料,炸药采用钝感 B 炸药,根据 ERA 的布置倾角换算射流通道上的护板、面板、夹层炸药、背板的垂直侵彻厚度为 4.6 mm。



1—前级战斗部, 2—导引头干扰件, 3—等效 ERA

1 - front warhead; 2 - seeker resistant items; 3 - equivalent explosive reactive armor

图 1 计算模型分布(单位:mm)

Fig. 1 Calculation model distribution(unit:mm)

战斗部采用 JH-2 炸药,装药直径为 40 mm,采用单锥紫铜药型罩和 2024 铝合金壳体,战斗部结构示意图见图 2。首先利用 ALE 计算射流形成以及射流穿透导引头干扰件的过程;然后利用 SPH 计算射流穿透 ERA 护板、面板后起爆 ERA 的过程。有限元网格尺寸为 0.2 mm,SPH 粒子初始光滑长度为 0.2 mm。

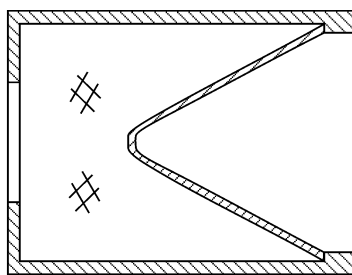


图 2 战斗部结构示意图

Fig. 2 Diagram of warhead structure

JH-2 炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能燃烧模型和 JWL 状态方程^[16]

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (5)$$

式中: P 为爆轰压力; E 为炸药的比内能; V 为相对比容;状态方程参数 A 为 854.5 GPa; B 为 20.5 GPa; R_1 为 4.6; R_2 为 1.35; ω 为 0.25;炸药密度为 1.70 g/cm³;C-J 爆速 0.83 cm/ μ s;C-J 爆压 29.5 GPa^[16]。

金属材料采用 Johnson-Cook 本构模型和 GRUNEISEN 状态方程,材料参数见参考文献[17];

树脂玻璃采用流体弹塑性模型和 GRUNEISEN 状态方程,材料参数见参考文献[18];ERA 炸药层采用 ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 模型与点火增长 IGNITION_AND_GROWTH_OF_REACTION_IN_HE 方程,材料参数见参考文献[19]。

2.3 计算结果

战斗部起爆后,形成爆轰波和爆轰产物压垮药型罩,药型罩在对称轴发生碰撞,形成高速的射流和低速的杵体,射流形成计算结果见图 3,可见射流头部速度达到 0.7856 cm/ μ s。图 4 为射流形成过程中的动能历程,可见压合过程中能量急剧增加,最后趋于稳定。

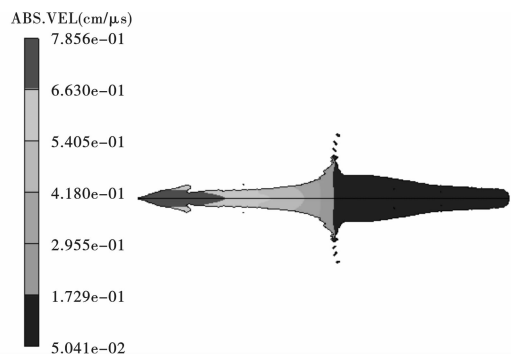


图 3 射流形成计算结果

Fig. 3 The calculation result of jet forming

金属射流穿透导引头干扰件仿真计算结果见图 5,射流头部最大速度降低为 0.663 cm/ μ s。图 6 为射流穿透导引头干扰件过程中射流动能历程计算

结果,可见 16 ~ 20 μs 是射流动能和头部速度下降最快的区间,可见离战斗部最近的探测器组件对射流干扰最大。

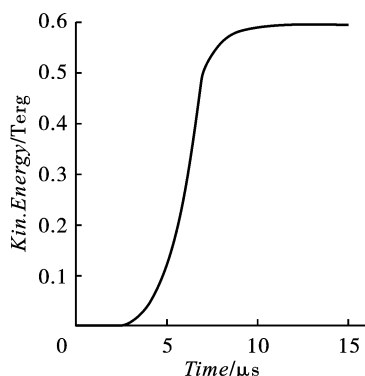


图 4 射流形成动能历程

Fig. 4 The kinetic energy history of jet forming

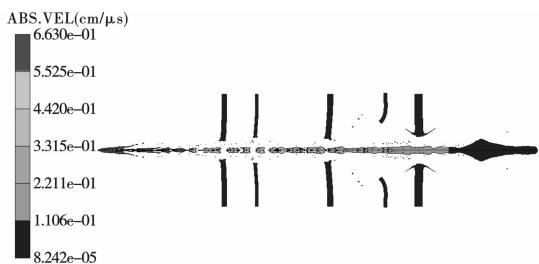


图 5 射流穿透导引头计算结果

Fig. 5 The calculation result of jet pass through seeker

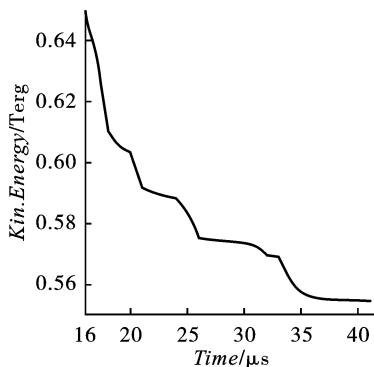


图 6 射流动能历程计算结果

Fig. 6 The calculation result of jet kinetic energy history

速度较高的头部射流用来引爆反应装甲,取速度范围为 5000 ~ 6630 m/s 的有效射流为研究对象(如图 7),通过模型重构得到 1/4 对称三维 SPH 模型如图 8,SPH 粒子间距为 0.3 mm,这段有效射流共画得 1944 个粒子。模型重构具体方法为首先将二维射流头部计算结果映射为三维计算模型,然后将三维射流头部计算模型离散成 SPH 粒子,并施加粒子速度完成模型重构。然后建立爆炸反应装甲 1/4 对称三维 SPH 模型,开展射流引爆反应装甲仿

真计算。

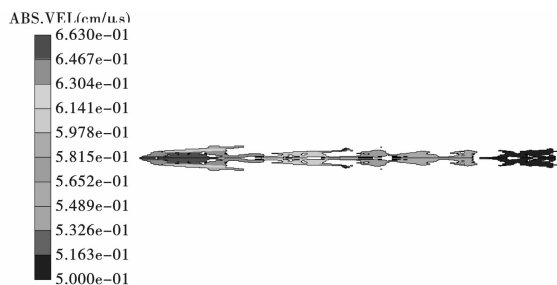


图 7 头部有效射流

Fig. 7 The top effective jet

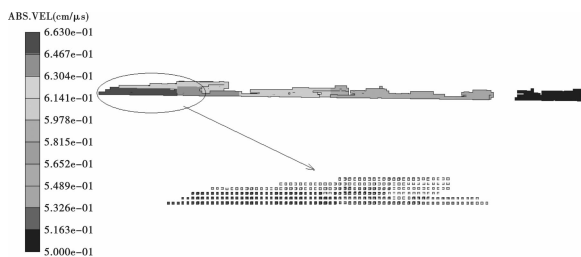


图 8 头部有效射流 SPH 模型

Fig. 8 The SPH model of top effective jet

射流穿透反应装甲面板计算结果见图 9,射流头部速度下降到 6162 m/s,射流头部直径近似为 2.5 mm,则此时起爆常数 $K = v_0^2 d = 94.93 \text{ mm}^3/\text{us}^2$ 。当射流侵彻反应装甲夹层炸药盖板时,夹层炸药的应力计算结果见图 10,反应率解算结果见图 11,可见此时射流还没有与反应装甲的钝感炸药接触,前驱冲击波在炸药中产生的波阵面压力达到了 22.4 GPa,并且夹层炸药中反应率为 1 的爆炸区域与前驱冲击波的作用区域很接近,稍许差异是由爆轰滞后效应引起的,说明前驱冲击波成功引爆了反应装甲中的钝感炸药。当射流穿过覆盖板开始侵彻钝感夹层装药时的压力计算结果见图 12,钝感夹层装药反应率计算结果见图 13,可见此时射流作用于已经爆炸过的爆轰产物,钝感装药已经处于稳定爆炸的传爆阶段。

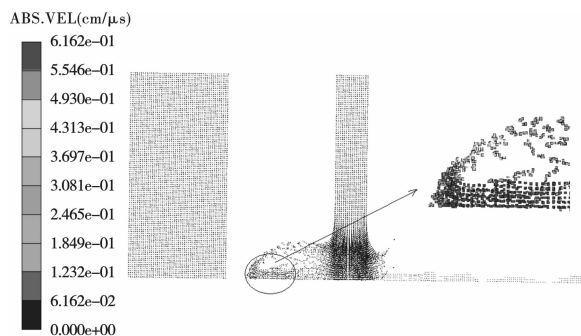


图 9 射流穿透 ERA 面板计算结果

Fig. 9 The calculation result of jet pass through ERA face plate

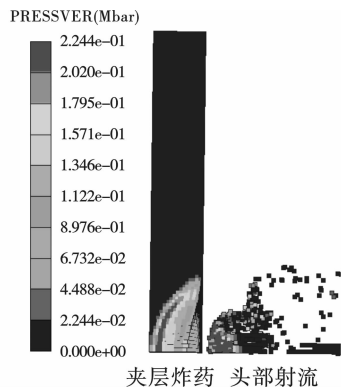


图 10 射流侵彻 ERA 盖板时夹层炸药的压力
Fig. 10 The pressure of sandwich explosive when jet penetrating ERA cover plate

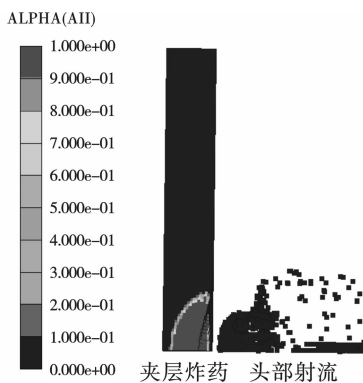


图 11 射流侵彻 ERA 盖板时夹层炸药的反应率
Fig. 11 The Alpha of sandwich explosive when jet penetrating ERA cover plate

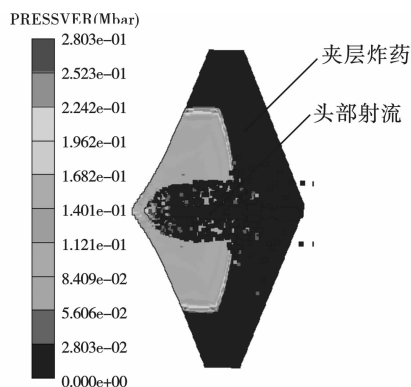


图 12 射流侵彻 ERA 夹层炸药时压力计算结果
Fig. 12 The pressure calculation result when jet penetrating ERA sandwich explosive

域,可见塑性碰撞区域形状规则且明显,推测前驱冲击波起爆夹层炸药后,爆轰波驱动完整的背板撞击靶板,而剩余射流被爆轰产物和反弹回来的背板所消耗。如果射流直接冲击起爆夹层炸药,由于夹层炸药只有 3 mm 厚度,还存在爆轰滞后,则背板被炸药驱动时将会被射流破坏,靶板上很难形成规则的塑形碰撞区。另由于试验条件所限,夹层炸药位于 ERA 内部,夹层炸药起爆过程难以捕捉,本次试验可以从侧面验证前驱冲击波起爆了 ERA。

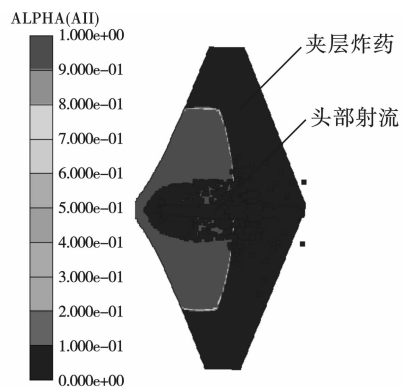


图 13 射流侵彻 ERA 夹层炸药时反应率计算结果
Fig. 13 The Alpha calculation result when jet penetrating ERA sandwich explosive

图 16 为反应装甲起爆后收集的飞板碎片,可见飞板已经破碎并严重变形,由此可得出该战斗部已经成功引爆一代爆炸反应装甲,与仿真计算可以成功起爆 ERA 的结果一致,说明本文提出的射流穿透导引头引爆 ERA 的计算方法是可行性。

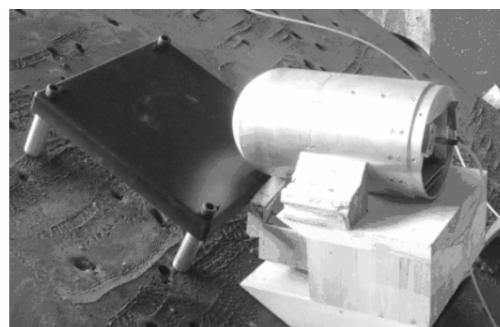


图 14 引爆反应装甲试验布置
Fig. 14 The arrangement of experiment for detonating ERA

3 试验验证

开展前级战斗部引爆一代爆炸反应装甲试验,现场试验布置见图 14,前级战斗部安装在导引头模拟件中,导引头模拟件平放在固定支座上并与反应装甲接触保证战斗部炸高。图 15 为爆炸反应装甲起爆后反应装甲背板拍打靶板形成的塑性碰撞区

4 结论

主要对前级战斗部聚能射流经过导引头干扰后起爆爆炸反应装甲的能力进行研究,主要研究成果有:

- (1) 提出一种利用 ALE 与 SPH 相结合开展射

流引爆爆炸反应装甲仿真计算的新方法,首先利用 ALE 对战斗部形成射流、射流穿透导引头干扰件的过程进行了仿真,然后转换成 SPH 模型计算穿过导引头干扰后的射流起爆爆炸反应装甲的过程,提高了计算效率,避免了欧拉算法材料边界不清晰问题。



图 15 反应装甲爆炸的靶板塑性变形
Fig. 15 The plastic deformation of target plate under ERA explosion



图 16 反应装甲爆炸飞板碎片
Fig. 16 The fragments of ERA explosion

(2) 建立了考虑导引头内部干扰件的计算模型,得到大炸高下穿透导引头干扰件后的射流起爆 ERA 的过程,并且开展了带导引头干扰件的前级战斗部起爆 ERA 试验,试验结果验证了该装药结构能够起爆 ERA 的仿真结果。

(3) 验证了前驱波引爆 ERA 机理,计算结果得到先于射流传入夹层钝感炸药中的前驱冲击波已经起爆了夹层钝感炸药。前级战斗部起爆 ERA 试验发现靶板上形成了形状规则的塑形碰撞区,从侧面推断出是前驱波起爆了 ERA,验证了前驱波起爆 ERA 的计算结果。

参考文献 (References)

- [1] 武海军,陈利,王江波. 反应装甲对射流干扰的数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报,2006,26(7):565-605.
- [1] WU Hai-jun, CHEN Li, WANG Jiang-bo. Numerical simulation on reactive armor disturbing jet[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 565-605. (in Chinese)
- [2] 吴成,蒋建伟,冯顺山. 爆炸反应装甲运动规律的数值仿真及研究[J]. 兵工学报,2002,23(1):35-38.
- [2] WU Cheng, JIANG Jian-wei, FENG Shun-shan. A study on the moving features of explosive reactive armor by numerical simulation and experiments[J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(1): 35-38. (in Chinese)
- [3] 拜云山,冯晓伟,梁斌,等. 基于正交数值试验的反应装甲干扰射流参数敏感性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 9(36): 86-92.
- [3] BAI Yun-shan, FENG Xiao-wei, LIANG Bin, et al. Parametric sensitivity of explosive reactive armor disturbance jet based on orthogonal numerical tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 9(36): 86-92. (in Chinese)
- [4] 朱越亭,马铁华,沈大伟,等. 碳化硅-铝射流侵彻新型反应装甲的仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(3): 95-99.
- [4] ZHU Yue-ting, MA Tie-hua, SHEN Da-wei, et al. Simulation of silicon-aluminum jet penetrating new reactive armor[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(3): 95-99. (in Chinese)
- [5] 吴鹏,李如江,雷伟,等. 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[J]. 高压物理学报, 2018, 32(2): 025107-1-025107-7.
- [5] WU Peng, LI Ru-Jiang, LEI Wei, et al. Numerical simulation of shaped warhead penetrating the target with reactive armor in motion state[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(2): 025107-1-025107-7. (in Chinese)
- [6] 刘蓓蓓,黄正祥,祖旭东,等. 单层爆炸反应装甲的间隔等效靶研究[J]. 中国科技论文, 2015, 10(4): 488-494.
- [6] LIU Bei-bei, HUANG Zheng-xiang, ZU Xue-dong, et al. Single spaced equivalent target of explosive reactive armor[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(4): 488-494. (in Chinese)
- [7] 万清华,李如江,杨玥,等. 多三明治结构反应装甲干扰射流的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2018, 32(6): 065107-1-065107-8.
- [7] WAN Qing-hua, LI Ru-jiang, YANG Yue, et al. Numerical simulation of interference effect of multi sandwich struc-

- ture reaction armor to jet [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(6): 065107-1-065107-8. (in Chinese)
- [8] YANG G, FU Y K, HU D A, et al. Feasibility analysis of SPH method in the simulation of condensed explosives detonation with ignition and growth model [J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 51-59.
- [9] 张伟, 胡德安, 韩旭. 陶瓷/金属复合装甲冲击响应的三维 SPH 法分析 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(4): 373-379.
- [9] ZHANG Wei, HU De-an, HAN Xu. Three-dimensional SPH analysis of impact responses of ceramic/metal composite armors [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(4): 373-379. (in Chinese)
- [10] 陈杰. 基于 SPH 算法的 PTFE-Cu 粒子流侵彻性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [10] CHEN Jie. Study on penetration performance of PTFE-Cu particle jet based on SPH method [D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [11] 杨刚, 傅奕轲, 郑建民, 等. 基于 FE-SPH 自适应耦合算法对长杆弹侵彻反应装甲的模拟研究 [J]. 工程力学, 2016, 33(1): 223-231.
- [11] YANG Gang, FU Yi-ke, ZHENG Jian-min, et al. Simulation of long-rod projectile penetrating reactive armor using the FE-SPH adaptive coupling method [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 223-231. (in Chinese)
- [12] HELD M. Discussion of the experimental findings from the initiation of covered but unconfined high explosive charges with shaped charge jets [J]. Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 1987, 12: 167-174.
- [13] CHILK M, BUSSELL T. Initiation of munitions by shaped charge jets [J]. Proceedings of Ninth International Symposium on Ballistics, Shnivewham V K, 1986, 2: 421-430.
- [14] 朱鹤荣, 陶钢. 关于射流引爆薄钢板覆盖炸药临界条件的实验测定和分析 [J]. 兵工学报弹箭分册, 1992(2): 10-23.
- [14] ZHU He-rong, TAO Gang. Experimental determination and analysis of critical conditions for jet initiation of sheet metal covered explosive [J]. Projectile and Arrow Volume of Acta Armamentarii, 1992(2): 10-23. (in Chinese)
- [15] SWEGLE J W, ATTAWAY S W. On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations [J]. Computational Mechanics, 1995, 17(3): 151-168.
- [16] 纪冲, 龙源, 余道强, 等. 切割式双模战斗部毁伤元成型及侵彻钢靶特性研究 [J]. 高压物理学报, 2012, 26(5): 508-516.
- [16] JI Chong, LONG Yuan, YU Dao-qiang, et al. Experimental and numerical study on the formation and penetration properties of dual-mode warhead [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(5): 508-516. (in Chinese)
- [17] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 345-384.
- [18] 张世文, 龙建华, 贾宏志, 等. 平面冲击波在有机玻璃中的衰减测试及数值模拟 [J]. 兵工学报, 2016, 37(7): 1214-1219.
- [18] ZHANG Shi-wen, LONG Jian-hua, JIA Hong-zhi, et al. Measuring and numerical simulation of attenuation of planar shock wave in PMMA [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7): 1214-1219. (in Chinese)
- [19] 梁斌, 冯高鹏, 魏雪婷. 多枚破片冲击引爆带盖板炸药数值模拟分析 [J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 62-69.
- [19] LIANG Bin, FENG Gao-peng, WEI Xue-ting. Numerical simulation on shock initiation of composition explosive of cover board subjected to multi-fragment [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 62-69. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方

(上接第 50 页)

- [9] 侯辉, 姚文进, 李文彬, 等. 新型双层反应装甲金属板运动分析与研究 [J]. 弹道学报, 2017(2): 34-38.
- [9] HOU H, YAO W J, LI W B, et al. Motion analysis and research of new double layer reactive armor plate [J]. Journal of Ballistics, 2017(2): 34-38.
- [10] 李小笠, 赵国志, 杜忠华. 爆炸式反应装甲对长杆体侵彻的干扰作用 [J]. 弹道学报, 2006(3): 74-78.
- [10] LI X L, ZHAO G Z, DU Z H. Interference effect of explosive reactive armor on long rod penetration [J]. Acta Ballistics, 2006(3): 74-78. (in Chinese)
- [11] 武竞雄, 何煌, 曾首义. 杆式穿甲弹侵彻金属靶板的试验与数值模拟研究 [C] // 全国结构工程学术会议, 2008: 277-281.
- [11] WU J X, HE H, ZENG S Y. Experimental and numerical simulation of rod penetrator penetrating metal target [C] // National Conference on Structural Engineering, 2008: 277-281. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚