

线列式破片战斗部对导弹目标毁伤效能分析

罗俊豪¹, 张克钊^{2*}, 王 硕¹, 李翔宇¹,

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学试验训练基地, 陕西 西安 710010)

摘 要: 为探究线列式破片战斗部对导弹目标的毁伤效能, 通过数值计算方法, 研究了线列式战斗部破片排布方式及炸药材料类型对破片威力场分布特性的影响规律, 分析了不同着靶姿态对破片侵彻导弹舱段等效靶板的影响, 得到破片侵彻不同厚度靶板的极限速度; 对导弹目标整体及各舱段毁伤程度进行定义, 并对不同弹目交会条件下线列式战斗部对导弹目标的毁伤效能进行了研究。结果表明: 弹目交会时, 战斗部俯仰角的变化主要影响破片命中导弹时的轴向位置; 战斗部偏航角的变化会影响破片聚焦带的方向; 弹目距离主要影响导弹目标附近的破片密度。

关键词: 破片毁伤; 战斗部设计; 导弹防御; 毁伤效能评估; 破片威力场; 数值模拟

中图分类号: GJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-026-012

Damage Effectiveness Analysis of Linear Warhead to Missile Target

LUO Junhao¹, ZHANG Kefan^{2*}, WANG Shuo¹, LI Xiangyu¹

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan;

2. Test Center, National University of Defense Technology, Xi'an 710010, Shaanxi)

ABSTRACT: To explore the damage effectiveness of the linear warhead on missile targets, effects of the fragment arrangement and explosive material types of linear warheads on the distribution of the fragment power field were studied by simulative calculation. Furthermore, the influence of fragment landing posture on the equivalent target of the missile compartment was analyzed. Thereby, limiting velocities of penetration into target plates of different thickness were obtained, and damage degree of the overall as well as compartments of the missile were defined. Additionally, the damage effectiveness of linear warheads on missile targets under various interception conditions was explored. Results showed that during missile-target engagements, changes of the warhead's pitch angle primarily affect the axial position of the fragment field on impact with the missile, variations of the yaw angle of the warhead influence the direction of the fragment focus zone, and the distance between the missile and the target mainly affects the density of fragments near the missile target.

KEYWORDS: fragment damage; warhead design; missile defense; damage effectiveness assessment; fragment power field; numerical simulation

收稿日期: 2023-12-11

第一作者: 罗俊豪 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事高效毁伤战斗部技术研究。E-mail: 1411927322@qq.com

***通信作者:** 张克钊 (1994—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事毁伤评估与易损性分析方法研究。E-mail: kfzhang-v@163.com

引用格式: 罗俊豪, 张克钊, 王硕, 等. 线列式破片战斗部对导弹目标毁伤效能分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 26-37.

提高破片战斗部对导弹目标的毁伤能力是提升防空反导技术的主要途径。为寻求高效的破片毁伤方式, 破片战斗部经历了多次更新迭代, 破片毁伤技术逐渐向定向、聚焦、线列式方向发展^[1]。早期对战斗部毁伤效能的研究主要基于实弹射击实验^[2-3], 但因其成本过于高昂, 加之计算机技术的发展与成熟, 利用计算机进行数值模拟仿真的方法逐渐成为毁伤效能分析的主要方式^[4]。

破片战斗部的毁伤主要依靠破片的穿透及引燃、引爆作用。为研究破片作用机理, 于滨^[5]探究了破片对某巡航导弹战斗部舱段的引爆规律, 得出其能够引爆带壳 PBX-9520 装药的临界速度; 曹兵^[6]得出了钢球不同入射角度冲击下, 导弹燃油箱的引燃判据。普通破片战斗部的破片威力场分布较为均匀, 对导弹的毁伤效能较为低下, 而聚焦式破片战斗部的破片有明显的聚焦效应, 能够对目标实现“带切割”式毁伤, 效果好于普通破片战斗部^[7]。在此基础上, 线列式破片战斗部通过合理设计破片毁伤元排布结构, 实现破片周向 360° 均匀、连续分布, 能够对目标实现“线切割”式毁伤, 是实现高效毁伤的主要手段之一。王宝成^[8]、舒张忆南^[9]等将线列式战斗部与聚焦式战斗部进行了对比研究, 发现线列式战斗部作用后的目标最大应力值有所增加, 剩余强度系数与屈服载荷均有所减少, 说明线列式战斗部对目标的毁伤效能优于聚焦式战斗部。

以上研究缺乏对线列式战斗部作用下的导弹舱段及导弹整体的毁伤效能分析。为此, 本文通过数值模拟的方法, 建立战斗部仿真模型及某型导弹目标等效模型, 考察炸药类型、破片排布方式等因素对破片分布的影响, 得到线列式战斗部破片威力场分布特性, 并研究破片威力参数对导弹制导舱、战斗部舱等结构的毁伤特性, 分析线列式战斗部威力场对导弹目标的毁伤效能。

1 线列式战斗部威力场分析

1.1 线列式战斗部实现原理

线列式战斗部具有与聚焦式战斗部相同的破片聚焦效应, 即通过战斗部外曲线设计, 使爆炸产生的绝大多数破片环向均匀分布在一定宽度的聚焦带中且速度一致。但由于端面稀疏波的影响, 靠近战斗部上下端面的破片速度较低、飞散角较大, 最终这些落点穿孔会分布于聚焦带之外。

如图 1 所示, 在聚焦式结构的基础上, 线列式战斗部的破片环向上均匀分布, 轴向上布置破片的质心连线与战斗部轴线成夹角 θ , 称为均布角^[10], 从而实现周向 360° 均匀、连续分布, 其周向与轴向落点分布如图 2、图 3 所示。图中: R_n 代表第 n 列破片; L_m 代表第 m 行破片; L 代表战斗部组合体长度; D 代表战斗部下端面直径。

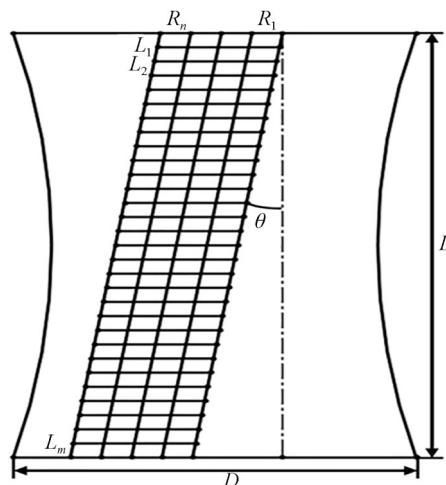


图 1 破片排布坐标

Fig. 1 Coordinates of the fragment layout

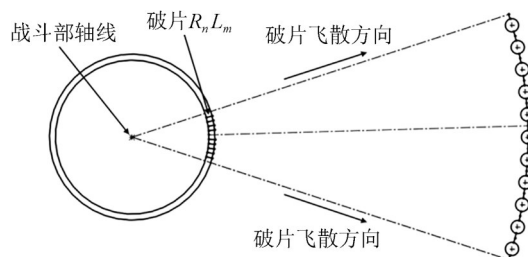


图 2 破片周向落点示意

Fig. 2 Schematic diagram of circumferential landing points of fragments

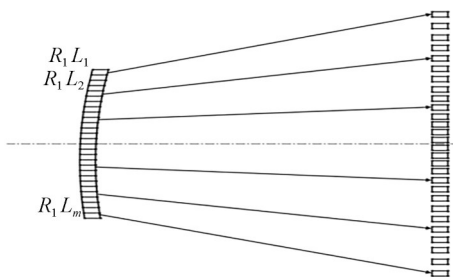


图 3 破片轴向落点示意

Fig. 3 Schematic diagram of axial landing points of fragments

1.2 线列式战斗部威力场数值模拟

1.2.1 模型建立

假设战斗部轴向破片数目为 m , 周向破片数

目为 n ，战斗部破片组合体长度为 L ，平均直径为 d ，则经推导可以得到破片质心连线与战斗部轴线夹角 θ 的计算公式^[11]为

$$\theta = \arctan \left[a \frac{m \pi d}{n (m - 1) L} \right]$$

式中： a 为线列式破片周向连续、均布修正系数。

利用 SolidWorks 软件对战斗部进行建模，结构如图 4 所示。破片类型采用离散杆式，周向破片共 20 列，轴向共 28 行，战斗部组合体高度 122.8 mm，最大直径 153.6 mm。

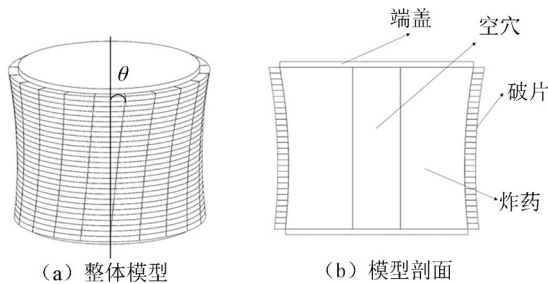


图 4 线列式战斗部模型

Fig. 4 Linear warhead model

仿真计算软件采用 LS-DYNA。炸药选用 RDX/Al，采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型以及 EOS_JWL（Jones-Wilkins-Lee）状态方程进行描述。JWL 状态方程的具体形式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_v}{V}$$

式中： A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为试验拟合参数； V 为比容； e 为内能； E_v 为单位初始体积的内能。所有材料参数来源参照文献[12]，炸药材料与状态方程基本参数如表 1 所示。

破片和战斗部端盖采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 随动硬化模型进行描述，其基本参数如表 2 所示。

空气采用 MAT_NULL 空材料模型以及 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程进行描述，密度取为 $1.293 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，内能取 0.25 MPa，多项式系数 C_4 与 C_5 均取 0.4。

模拟计算过程采用 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler) 方法，炸药与空气采用 Euler 网格，破片与端盖采用 Lagrange 网格。二者之间通过 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 进行流固耦合。战斗部起爆方式选择中心起爆，单位制采用 cm-g- μs 。

1.2.2 均布角对破片飞散规律的影响

从线列式战斗部作用原理可以看出，轴向上破片质心的连线与战斗部轴线的夹角 θ （均布角）是战斗部结构设计的一个重要参数。为探究均布角对破片飞散规律的影响，在保持战斗部高度、直径、壳体外曲线曲率半径以及材料模型不变的前提下，选择 θ 为 5.94° 、 13.14° 、 16.06° 、 18.77° ，分别建立战斗部模型，爆炸后 600 μs 时的破片飞散情况如图 5 所示。破片空间分布与阮喜军等^[13]建立的线列式离散杆战斗部相似，可见模型建立具有较好的合理性。

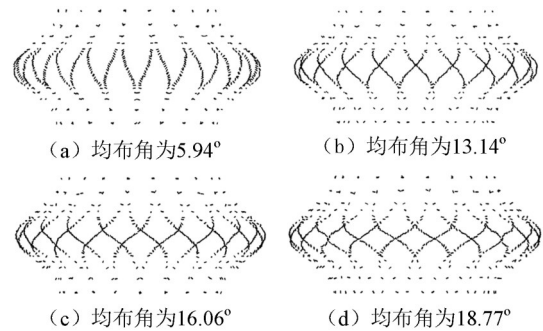


图 5 不同均布角下战斗部爆炸后 600 μs 时的破片飞散情况

Fig. 5 Fragment dispersions at different uniform angles at 600 μs after warhead explosion

由图 5 可以看出：由于端面稀疏波的影响，3 种战斗部爆炸所产生的破片中，靠近端面的几排破片飞散的角度较大，而靠近中心的破片飞散的角度较小，且呈现出首尾相连的状态；随着均布角的增大，聚焦带内破片质心连线逐渐倾斜，实现周向 360° 连续分布。

表 1 炸药材料模型基本参数

Tab. 1 Basic parameters of RDX/Al material model

装药	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$P_{\text{cl}} / \text{GPa}$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
RDX/Al	1.823	8 058	31.5	752	12	4.4	1.3	0.33	12.8
TNT	1.583	6 880	19.4	307	3.898	4.485	0.79	0.3	6.968 4
LX-19	1.92	9 104	43	1 596.65	177.41	6.5	2.7	0.55	11.33

注： ρ 为密度； D 为爆速； P_{cl} 为 C-J 压力； E_0 为炸药内能。

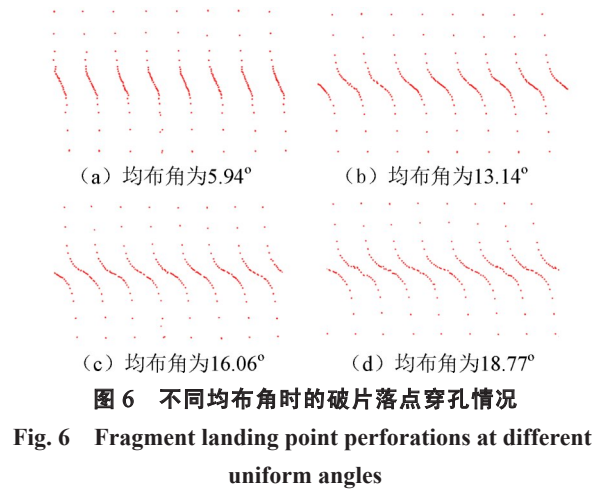
表 2 破片与端盖材料模型基本参数

Tab. 2 Basic parameters of fragments and end cap material models

部件	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	σ_0/MPa	ν	E_t/GPa
破片	7.89	206.9	724	0.3	28
端盖	7.8	211	235	0.284	0.33

注: ρ 为密度; E 为杨氏模量; σ_0 为屈服应力; ν 为泊松比; E_t 为切线模量。

通过记录 500 μs 时每一个破片单元和节点的位置及速度信息, 忽略破片在空气中的速度衰减及重力影响, 通过推导计算可以得到爆炸产生的所有破片在距战斗部 6 m 远处环形靶上的落点分布, 如图 6 所示。



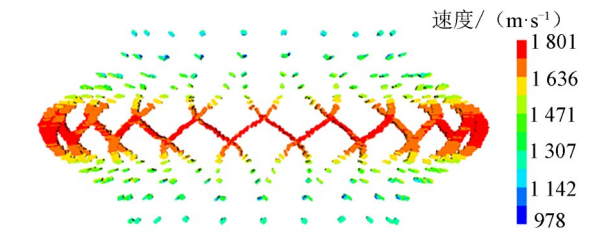
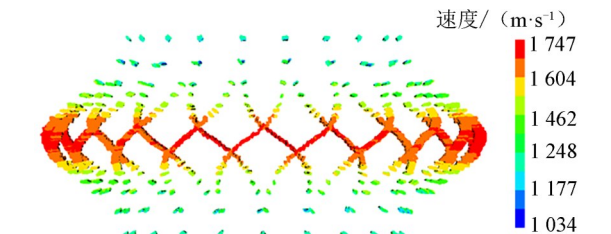
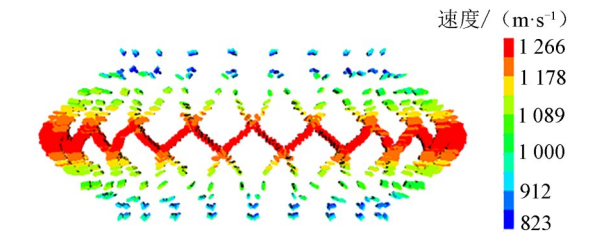
通过图 6 可以直观地看出: 当 θ 为 5.94° 时, 破片质心连线斜率较大, 临近两列破片之间存在较大间隔, 破片整体分布无法实现周向连续分布, 与设计理念相差甚远; 随着 θ 的逐渐增大, 战斗部聚焦性能逐渐增强, 破片分布趋于周向均匀、连续; 但当 θ 增大至 18.77° 时, 破片落点在中心线上的投影出现大量重叠, 对于线列式战斗部而言并不理想。比较 θ 为 13.14° 与 16.06° 时的破片飞散情况, 可以发现后者破片倾斜度稍大于前者, 且首尾相连特性更加明显。故本文选定 16.06° 为所用战斗部均布角。

1.2.3 装药对破片飞散规律的影响

选定均布角后, 在已有模型的基础上, 改用 TNT 以及 LX-19 作为装药进行仿真计算, 通过比较破片飞散情况选择合适的战斗部装药材料。炸药材料模型与状态方程基本参数如表 1 所示。

战斗部结构以及材料模型沿用前文所述, 选

定均布角为 16.06° , 对 RDX/Al、TNT 和 LX-19 装药的战斗部分别进行仿真计算, 起爆后 600 μs 时破片飞散情况分别如图 7、图 8、图 9 所示。



由图 7~9 可知, 不同装药战斗部爆炸后所产生的破片的空间分布情况基本相同, 破片质心连线的线性度和斜率大体一致。由 3 种装药战斗部所产生的破片速度分布区间可见: 随着装药爆速与爆压的增加, 破片速度亦有所增加; 尽管 LX-19 装药的爆速、爆压最大, 却并不意味着它在所有情况下都能产生最高的破片速度; RDX/Al 装药可能在特定的战斗部设计中表现出更高的爆炸效率, 从而使得破片速度更高。对于 3 种不同的炸药材料, 在相同的状态方程下表现出不同的爆炸特性, 推测 RDX/Al 装药在该状态方程描述下的爆炸特性可能更有利于提高破片速度。因为 RDX/Al 装药具有高爆热, 且包含铝的混合物, 可能在爆炸时释放更多的能量, 从而提供了更高的 TNT 当量。通过比较可知, RDX/Al 装药战斗部爆炸所产生的破片速度较高、速度极差值较小, 故本文

战斗部选取 RDX/Al 为装药材料。

2 单枚破片对导弹舱段的毁伤分析

2.1 导弹舱段等效模型建立

在建立导弹等效模型时，可将等效靶分为 3 部分，最外层为导弹蒙皮，蒙皮内为部件或部件壳体。破片穿透蒙皮和壳体后，要对部分舱段和部件造成毁伤，往往还需要一定的剩余速度，在等效靶上表现为后效穿深。可将蒙皮、部件壳体和后效穿深这 3 部分材料等效为不同厚度的同种材料，而后叠加形成某一厚度的等效靶板，其构建过程如图 10 所示。

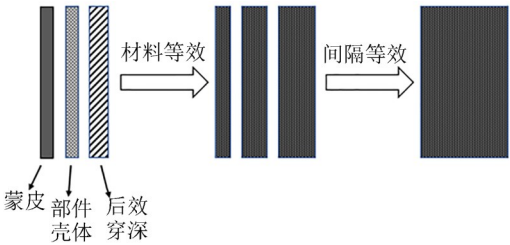


图 10 等效靶模型构建过程

Fig. 10 Construction process of the equivalent target model

由于导弹的具体材料及结构厚度未知，通常采用 2A12 铝合金作为导弹壳体的等效材料，假定导弹制导舱、战斗部舱段、燃料舱、发动机舱等效模型厚度依次为 15、20、10、15 mm，导弹舱体外直径均取为 520 mm。

对导弹各舱段进行等效建模，模型横截面为部分圆环，取圆心角为 20°，高度为 100 mm。破片沿用前文所述材料模型进行描述，靶板采用 MAT_ELASTIC_PLAS - TIC_HYDRO_SPALL 弹塑性流体材料模型和 EOS_GRUNEISEN 状态方程描述。材料模型与状态方程参数如表 3 所示。

表 3 2A12 铝合金材料模型及状态方程基本参数

Tab. 3 Basic parameters of 2A12 aluminum alloy material model and state equation

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	σ_0/MPa	FS/cm	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	GAMAO
2.73	265	295	0.6	5 240	1.4	1.97

注：FS 为侵蚀破坏应变；C、S₁、GAMAO 均为状态方程中的常数。

靶板与破片之间的接触方式选用 CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 面面

侵蚀接触。

2.2 着靶姿态对破片侵彻靶板的影响

将破片前面、侧面、顶面分别以 A 面、B 面、C 面表示，如图 11 所示。取破片周向入射角为 0°、30°、45°、60°，分别研究破片在不同着靶姿态和入射角下穿透不同厚度靶板的极限速度。

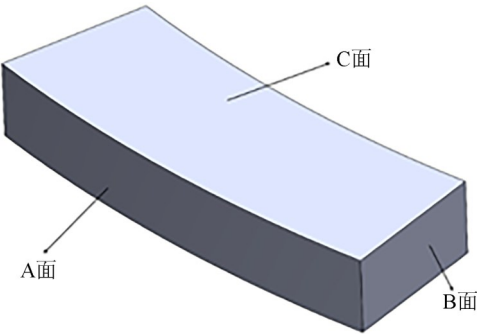


图 11 破片着靶面划分

Fig. 11 Division of fragment landing surface

计算得到破片在不同着靶姿态下侵彻不同厚度靶板的极限速度如表 4 所示。

表 4 不同入射角、着靶姿态下破片侵彻不同厚度靶板的极限速度

Tab. 4 Limiting velocities of penetration into target plates of different thickness at different incidence angles and landing postures

着靶面-入射角/ (°)-靶板厚度/ mm	侵彻极限 速度/ (m·s ⁻¹)	着靶面-入射角/ (°)-靶板厚度/ mm	侵彻极限 速度/ (m·s ⁻¹)
A-0-10	500	B-45-10	540
A-0-15	800	B-45-15	780
A-0-20	1 050	B-45-20	1 050
A-30-10	650	B-60-10	730
A-30-15	920	B-60-15	1 150
A-30-20	1 300	B-60-20	1 600
A-45-10	800	C-0-10	600
A-45-15	1 150	C-0-15	950
A-45-20	1 800	C-0-20	1 300
A-60-10	1 180	C-30-10	780
A-60-15	2 200	C-30-15	1 250
A-60-20	—	C-30-20	1 800
B-0-10	350	C-45-10	1 100
B-0-15	520	C-45-15	1 950
B-0-20	610	C-45-20	2 650
B-30-10	400	C-60-10	1 750
B-30-15	580	C-60-15	—
B-30-20	770	C-60-20	—

由表4可以看出, 由于本文所建立战斗部爆炸产生的破片速度分布于1 000 m/s至1 750 m/s之间, 若破片对靶板的侵彻极限速度远大于该范围时, 则表4中未给出。

进一步分析表4可得: (1) 不同着靶姿态下, 破片与靶板的接触面积不同, 侵彻极限速度随接触面积的增加而增大; (2) A面着靶时, 由于破片与靶板接触面均为弧形, 破片斜入射时, 极易发生偏转, 消耗部分动能, 致使破片侵彻能力下降; (3) 随着破片入射角的增大, 侵彻极限速度逐渐增大, B面着靶时破片入射角与侵彻极限速度大致呈线性关系, A、C面着靶时, 随入射角的增加, 靶板厚度对破片侵彻过程的影响越来越明显, 以至于破片无论以多大速度入射均无法进入靶板内部。

3 破片威力场对导弹目标的毁伤效能

3.1 毁伤效能分析方法

3.1.1 弹目交会计算原理^[5]

在探讨破片对导弹目标的毁伤效果时, 首先需要理解破片的飞行轨迹是如何被计算和模拟的。在已知破片的初始位置 (x_0, y_0, z_0) 和初始速度 (v_x, v_y, v_z) 的基础上, 可以推导出破片在空间中的飞行路径模型:

$$\frac{x-x_0}{v_x} = \frac{y-y_0}{v_y} = \frac{z-z_0}{v_z}$$

在现实情况中, 破片的运动受到空气阻力和地球重力的作用, 这会导致破片速度逐渐降低。然而, 在本研究背景下, 为了专注于分析不同交会条件对破片场毁伤效果的影响, 可以简化模型, 忽略破片的减速效应。计算过程中, 采用战斗部爆炸后500 μ s时的破片场位置及速度分布作为破片初始位置和初始速度。取战斗部俯仰角和偏转角分别为 α 和 β , 则初速度为 v_0 的破片在笛卡尔坐标系下的3个方向的分速度为

$$\begin{cases} v_x = v_0 \sin \alpha \cos \beta \\ v_y = v_0 \cos \alpha \cos \beta \\ v_z = v_0 \sin \beta \end{cases}$$

假设破片初始位置为 O , 方向为 N (N 的模为1), 则破片的空间射击线可以表示为

$$R(t) = O + Nt \quad (1)$$

式中: t 为破片飞散时间, 恒有 $t \geq 0$ 。

为了精确地评估破片与导弹目标的交会情况,

引入三角形面元模型来表示导弹的表面。确定三角形的3个顶点 P_1 、 P_2 、 P_3 即可定义构成目标的三角形面元, 每一个三角形面元内的点可表示为

$$T(u, v) = (1-u-v)P_1 + uP_2 + vP_3 \quad (2)$$

式中: $1-u-v$ 、 u 、 v 分别为顶点 P_1 、 P_2 、 P_3 的“权重”, 且同时满足 $0 \leq 1-u-v \leq 1$, $u \geq 0$, $v \geq 0$ 。如图12为导弹三角形面元仿真模型。

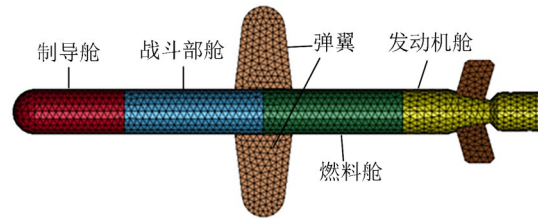


图12 导弹三角形面元仿真模型^[5]

Fig. 12 Missile Triangle Panel Simulation Model^[5]

通过判断破片射击线是否与三角形面元存在交点, 可以确定破片是否命中目标。联立式(1)与式(2)可得

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{P \cdot E_1} \begin{bmatrix} Q \cdot E_2 \\ P \cdot T \\ Q \cdot N \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $E_1 = P_2 - P_1$, $E_2 = P_3 - P_1$, $T = O - P_1$, $P = N \times E_2$, $Q = T \times E_1$ 。若方程(3)有实数解, 则代表破片命中目标。

3.1.2 毁伤准则

本文进行以下假设:

(1) 在计算过程中发现, 当破片以1 800 m/s速度入射时, 侵彻导弹战斗部等效靶板的最大剩余速度约为900 m/s, 远远达不到引爆战斗部装药的临界速度^[6]。因此, 本文不考虑破片对战斗部的引爆作用;

(2) 对于制导舱而言, 其中布置有大量精密仪器, 认为破片穿透靶板即可造成有效毁伤;

(3) 发动机舱内有大量高压气体, 燃料舱内有液态燃料, 认为破片在靶板上造成一定开口即为有效毁伤。

(4) 考虑到战斗部爆炸所产生的破片速度较高, 认为破片命中后均可穿透目标舱段。

故本文以命中导弹目标各舱段的破片数量作为划分毁伤程度的依据。某反辐射导弹各舱段毁伤所需破片数目如表5所示^[14]。

参照表5可近似规定制导舱、战斗部舱段与发动机舱等各舱段在不同毁伤程度下的破片数目。相比于反辐射ARM导弹而言, 巡航导弹更加依赖

弹翼进行巡航阶段的姿态控制。由于弹翼面积较大,若只有少量破片命中,导弹的气动特性所受影响不大;但若命中破片数目较多,可能造成弹翼断裂,致使导弹失去飞行稳定性。因此,必须考虑弹翼的毁伤程度。至于燃料舱,破片的命中及穿透可能导致燃料的泄漏,因而破片命中数目将改变燃料泄漏速度,进而影响导弹射程。综上,制定巡航导弹各舱段的毁伤准则如表6所示。

表 5 某反辐射导弹各舱段毁伤所需破片数目^[14]

Tab. 5 Amount of fragments required for damage on different compartments of anti-radiation missile^[14]

舱室	破片数目要求/枚		
	破片质量 10 g	破片质量 3.3 g	破片质量 1 g
导引头	6	6	7
制导舱	5	5	6
战斗舱	6	7	无效
控制室	5	6	10
发动机室	8	10	无效
弹翼	无效	无效	无效
舵片	无效	无效	无效

表 6 巡航导弹各舱段不同毁伤程度所需破片数

Tab. 6 Amount of fragments required for different damage levels of different missile compartments

舱室	破片数目要求/枚		
	轻度毁伤	中度毁伤	重度毁伤
制导舱	3	5	7
战斗部舱段	5	7	10
燃料舱	1	3	5
发动机舱	3	5	8
弹翼	6	12	18

若命中舱段的破片数未达到轻度毁伤的标准,则认为该舱段未被毁伤。对于导弹整体而言,某一舱段的毁伤即代表导弹整体的毁伤。为探究破片场作用下导弹目标整体的易损性,确定导弹整体毁伤程度与单个舱段毁伤程度之间的关系,如表7所示。

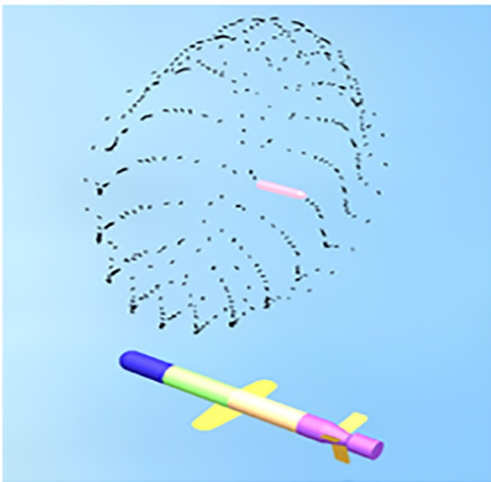
3.1.3 工况设计

将导弹模型及破片初始分布场导入计算软件,效果如图13所示。导弹目标轴线水平,战斗部位于导弹目标正上方,假设战斗部与导弹相向而行,战斗部轴线与导弹目标轴线平行时的俯仰角与偏航角均为0°。

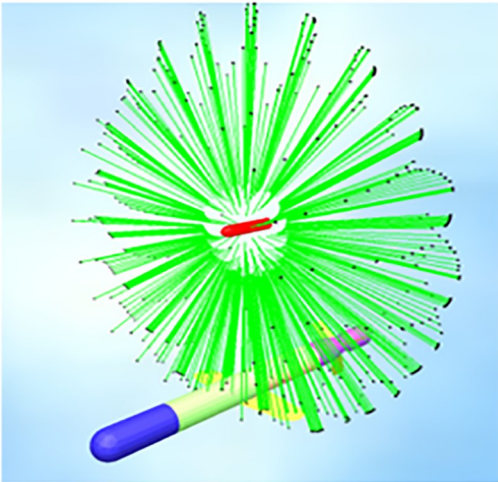
表 7 导弹整体与各舱段毁伤程度关系表

Tab. 7 Relationship between the overall damage degree of the missile and each cabin segment

整体毁伤程度	舱段毁伤程度
整体未被毁伤	各舱段无轻度毁伤
整体轻度毁伤	3个及以下舱段轻度毁伤,无舱段中度、重度毁伤
	4个及以上舱段轻度毁伤,无舱段中度、重度毁伤
整体中度毁伤	1个舱段中度毁伤,3个及以下舱段轻度毁伤
	2个舱段中度毁伤,2个及以下舱段轻度毁伤
整体重度毁伤	1个舱段中度毁伤,4个舱段轻度毁伤
	2个舱段中度毁伤,3个及以上舱段轻度毁伤
	3个及以上舱段中度毁伤
	至少一个舱段重度毁伤



(a) 初始分布



(b) 破片飞散

图 13 导弹目标与战斗部破片分布

Fig. 13 Distributions of missile targets and warheads

线列式战斗部破片分布为轴向聚焦、周向连续，破片在空间中的分布密度较低，因此，战斗部姿态及弹目交会距离对于破片场整体空间位置分布有明显影响。为探究战斗部俯仰角、偏航角以及与目标之间的距离对目标毁伤效能的影响，设置了7种工况，如表8所示。

表 8 不同工况下战斗部的位置姿态参数设置

Tab. 8 Position and attitude parameter settings of warhead under different operating conditions

工况	弹目距离/m	俯仰角/(°)	偏航角/(°)
1	3	0	0
2	3	30	0
3	3	60	0
4	6	0	0
5	6	0	30
6	6	0	60
7	9	0	0

计算过程中，在某一确定的弹目交会条件下，规定战斗部俯仰角、偏航角、滚转角误差范围，认为误差范围内的角度是均匀分布，在误差范围内随机抽样进行多次计算，基于弹目交会计算方法判定每一枚破片与导弹目标的交会情况，统计命中导弹各舱段的破片数，利用毁伤准则确定导弹舱段及整体毁伤程度，记录每一次打击后导弹的毁伤情况，以表7中4种毁伤程度发生的频率代表毁伤概率。

3.2 俯仰角影响下的导弹毁伤效能分析

3.2.1 单次打击下对导弹目标的毁伤效能

由于线列式战斗部壳体外曲线的设计，爆炸所产生的破片场具有轴向聚焦能力，破片分布带宽度较窄。随着战斗部俯仰角的变化，破片聚焦带对导弹目标的作用位置也会随之改变，因而不同俯仰角下必然造成导弹各舱段及整体毁伤情况的不同。为探究战斗部俯仰角对导弹目标毁伤效能的影响，按照本文毁伤效能分析方法对工况1、2、3打击下的破片场毁伤效果进行计算，各舱段及整体毁伤情况见表9。

比较工况1、2、3的毁伤情况可以看出：随着战斗部俯仰角的增加，多数舱段的破片命中数逐渐降低，尤以弹翼上破片命中数变化幅度最大，其毁伤程度由重度毁伤骤降至未毁伤；另外，战斗部俯仰角由0°变为60°的过程中，破片命中导

弹时沿轴线方向的位置变化较大，几乎跨越一个舱段的长度，因而导弹发动机舱的破片命中数目呈现先增后减的趋势。

表 9 工况1、2、3下导弹各舱段命中破片数及毁伤程度

Tab. 9 Amount of hit fragments and damage degrees of each missile compartment under operating conditions 1, 2, and 3

舱段	工况1		工况2		工况3	
	命中数/枚	毁伤程度	命中数/枚	毁伤程度	命中数/枚	毁伤程度
制导舱	2	未毁伤	0	未毁伤	0	未毁伤
战斗部	7	中度	2	未毁伤	0	未毁伤
燃料舱	7	重度	7	重度	2	轻度
发动机舱	0	未毁伤	5	中度	2	未毁伤
弹翼	28	重度	3	未毁伤	0	未毁伤
整体	44	重度	17	重度	4	轻度

3.2.2 俯仰角对导弹目标毁伤概率的影响

按照本文毁伤效能分析方法对工况1、2、3打击下的导弹目标毁伤概率进行计算。基于蒙特卡洛方法，在设定的弹目交会条件误差范围内，进行多次抽样计算，最终得到某一弹目交会条件下，导弹目标不同毁伤程度发生的概率。本文中俯仰角、偏航角、滚转角误差范围设置为2°，并认为误差范围内的角度是均匀分布的，计算时在误差范围内随机抽样2 000次。

工况1、2、3打击下，导弹目标毁伤概率如表10所示。

表 10 工况1、2、3下导弹目标毁伤概率

Tab. 10 Damage probabilities of missile targets under operating conditions 1, 2, and 3

毁伤程度	毁伤概率		
	工况1	工况2	工况3
未毁伤	0.000 0	0.000 0	0.000 0
轻度毁伤	0.000 0	0.000 1	0.921 5
中度毁伤	0.000 0	0.000 3	0.078 5
重度毁伤	1.000 0	0.999 6	0.000 0

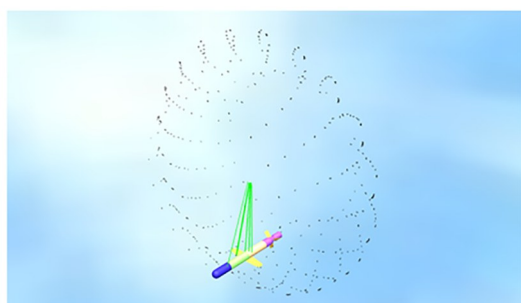
对比分析工况1、2、3下的计算结果可以发现：由于以上3种工况下的弹目距离均较小，破片密度较高，当战斗部俯仰角小于某一临界值时，聚焦带内破片大部分得以命中目标，因此在工况1与工况2下，导弹发生重度毁伤的概率几乎为1；

而工况 3 下的战斗部俯仰角已超过上述临界值, 破片聚集带内的破片无法命中目标, 仅有破片场边缘的少量破片可以命中, 因此战斗部发生轻度毁伤的概率较高。

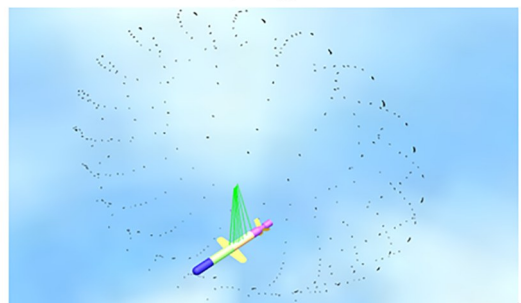
3.3 偏航角影响下的导弹毁伤效能分析

3.3.1 单次打击下对导弹目标的毁伤效能

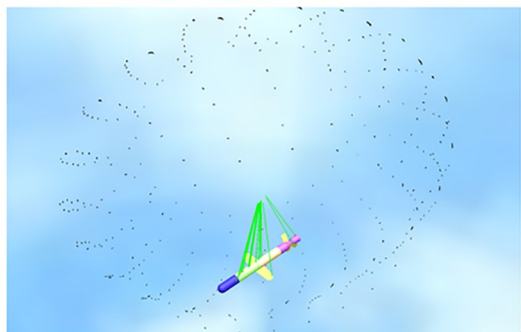
与战斗部俯仰角的影响类似, 偏航角的变化也会导致聚焦带对导弹目标作用位置的改变。为探究这种改变对导弹目标毁伤效能的影响, 对工况 4、5、6 打击下的导弹目标毁伤效果进行计算, 结果如图 14 所示。以上 3 种工况打击下各舱段的毁伤情况如表 11 所示。



(a) 工况 4



(b) 工况 5



(c) 工况 6

图 14 不同工况下弹目交会及毁伤结果

Fig. 14 Missile-target intersections and damages under different operating conditions

比较工况 4、5、6 的毁伤情况可以得到: (1) 由于破片主要分布于聚焦带内, 战斗部偏航角的变化将会使聚焦带与导弹目标轴线的夹角发生改

变, 随着战斗部偏航角的增大, 两者趋于平行, 因而整体破片命中数逐渐增加; (2) 相比于工况 4, 工况 5 下的弹翼处于破片聚焦带外, 未被破片毁伤, 而工况 6 下战斗部舱段位于破片聚焦带作用范围之内, 因此破片命中数大幅增加; (3) 以上 3 种工况下的燃料舱破片命中数均达到中度以上毁伤标准, 原因是导弹燃料舱位于战斗部正下方, 因此偏航角变化时, 破片场在燃料舱附近的分布情况变化不大。

表 11 工况 4、5、6 下导弹各舱段命中破片数及毁伤程度
Tab. 11 Amount of hit fragments and damage degrees of each missile compartment under operating conditions 4, 5, and 6

舱段	工况 4		工况 5		工况 6	
	命中数/枚	毁伤程度	命中数/枚	毁伤程度	命中数/枚	毁伤程度
制导舱	1	未毁伤	0	未毁伤	1	未毁伤
战斗部	2	未毁伤	3	未毁伤	13	重度
燃料舱	4	中度	7	重度	4	中度
发动机舱	0	未毁伤	1	未毁伤	1	未毁伤
弹翼	3	未毁伤	0	未毁伤	2	未毁伤
整体	10	中度	11	重度	21	重度

3.3.2 偏航角对导弹目标毁伤概率的影响

同样地, 按照本文毁伤效能分析方法, 可得工况 4、5、6 下导弹目标毁伤概率, 结果如表 12 所示。

表 12 工况 4、5、6 下导弹目标毁伤概率

Tab. 12 Damage probabilities of missile targets under operating conditions 4, 5, and 6

毁伤程度	毁伤概率		
	工况 4	工况 5	工况 6
未毁伤	0.000	0.000	0.000
轻度毁伤	0.195	0.000	0.002
中度毁伤	0.301	0.000	0.010
重度毁伤	0.504	1.000	0.988

对比分析工况 4、5、6 下的导弹目标毁伤概率不难看出: 工况 5 与工况 6 相对于工况 4 而言, 导弹目标重度毁伤概率大幅度增加, 近似为 1。可能的原因是线列式战斗部破片场由数十条倾斜的破片“切割线”组成, 当战斗部偏航角为 30° 以及 60° 时, 切割线与战斗部轴线之间的夹角均较小, 有足够多的破片命中导弹。

3.4 不同弹目交会距离下的导弹毁伤效能分析

3.4.1 单次打击下对导弹目标的毁伤效能

线列式战斗部爆炸所产生的破片将会首尾相连，形成一定数量的“切割线”，随着破片的飞散，“切割线”之间的间距以及“切割线”内破片之间的距离都将逐渐增大。因而不同弹目交会距离下，命中导弹目标的破片数目必然有所不同。为探究不同弹目交会距离下的导弹毁伤效能，按照本文毁伤效能分析方法对工况7打击下的破片场毁伤效果进行计算，结果见表13。

表 13 工况7下导弹各舱段命中破片数目及毁伤程度
Tab. 13 Amount of hit fragments and the damage degree of each missile compartment under operating condition 7

舱段	命中数/枚	毁伤程度
制导舱	0	未毁伤
战斗部	2	未毁伤
燃料舱	3	中度
发动机舱	0	未毁伤
弹翼	0	未毁伤
整体	5	中度

比较工况1（表9）、工况4（表11）、工况7（表13）下的导弹目标毁伤情况可以得到：（1）工况1下，战斗部距离导弹目标最近，破片场作用于导弹时的破片密度最高，因此导弹整体及各舱段的破片命中数量最多，导弹毁伤程度最为严重；（2）工况4在工况1的基础上，弹目距离增加了3 m，命中战斗部及弹翼的破片数量大幅下降，多个舱段毁伤程度未达到轻度毁伤标准，导弹整体毁伤程度由重度毁伤降为中度毁伤；（3）工况7在工况4的基础上，弹目距离再次增加3 m，各舱段破片命中数有所下降，但毁伤程度并未改变；（4）无论在以上何种工况下，导弹动力舱的破片命中数均为0，可能的原因是弹目距离较近时的破片轴向飞散距离不够，弹目距离较远时的两端破片密度较低。

3.4.2 弹目交会距离对导弹目标毁伤概率的影响

计算工况7下导弹目标的毁伤情况，结果如表14和图15所示。

对比分析工况1（表10）、工况4（表12）、工况7（表14）下的计算结果可以发现：（1）工况1下由于弹目距离较近，破片密度较高且大多作用于燃料舱，因此导弹目标重度毁伤的概率几乎为

1；（2）工况4的弹目距离较工况1增加了3 m，导弹重度毁伤概率降至0.5左右，轻度和中度毁伤概率有所增加，可能的原因是弹目距离为6 m时，破片场密度降低，作用于燃料舱的破片数目摇摆于重度毁伤标准附近；（3）工况7的弹目距离较之工况4再次增加了3 m，目标轻度毁伤概率大幅增加，与重度毁伤概率相当，但中度毁伤概率相当低。通过图14可以看出，可能的原因是命中导弹目标的破片分为两束，其中一束位于燃料舱与战斗部舱分界处，结合毁伤准则分析，当战斗部的姿态变化时，若其命中燃料舱将足以造成整体重度毁伤，而若其命中战斗部舱则仅能造成整体轻度毁伤。

表 14 工况7下导弹目标毁伤概率
Tab. 14 Damage probability of missile targets under operating condition 7

毁伤程度	毁伤概率	与工况4对比的毁伤概率变化
未毁伤	0.000	不变
轻度毁伤	0.489	+0.294
中度毁伤	0.019	-0.282
重度毁伤	0.492	-0.012

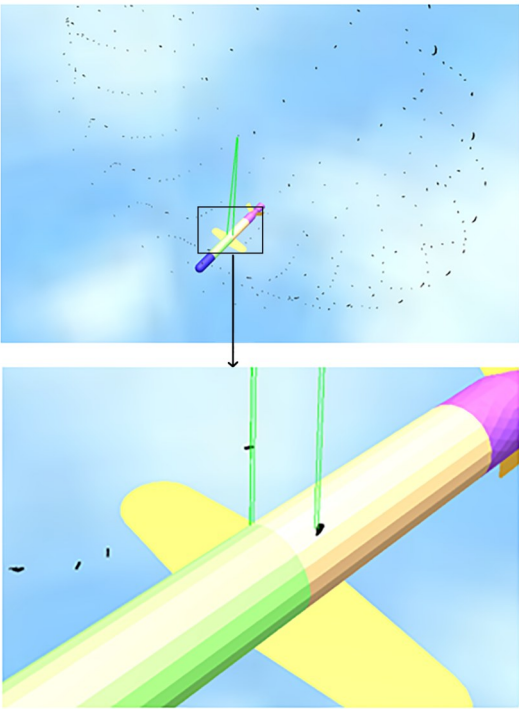


图 15 工况7下弹目交会及毁伤结果
Fig. 15 Missile-target intersection and damage under operating condition 7

4 结论

本文通过分析线列式战斗部结构参数及装药材料对破片威力场分布的影响,构建了合适的破片战斗部仿真模型;同时建立了导弹舱段等效模型,分析了单枚破片在不同入射角和着靶姿态下的侵彻极限速度;对导弹目标整体及各舱段毁伤严重程度进行定义,研究了不同弹目交会条件下导弹目标毁伤情况,主要结论如下。

(1) 过小的均布角将导致破片分布周向间隔过大,过大的均布角将导致破片分布周向重叠;装药类型对破片的空间位置分布影响较小,但破片速度随装药爆速爆压的提高而提高。

(2) 获得了破片侵彻导弹各舱段等效靶板的临界参数。

(3) 弹目交会时,战斗部俯仰角的变化主要影响破片命中导弹时的轴向位置,战斗部偏航角的变化会影响破片聚焦带的方向,弹目距离主要影响的是目标周围破片密度。

在实际战斗环境中,破片的飞行轨迹和毁伤效果可能会受到多种因素的影响,如空气阻力、风速、湿度等环境,这些因素在数值模拟中难以完全考虑,因此,在实际应用中可能会存在一定的偏差。另外,对于某些特殊材料或结构的导弹目标,其毁伤机理可能与常规目标有所不同,需要针对性地开展更细致的研究。因此,建议在未来的研究中,考虑更多实际战斗环境因素,以提高模拟的准确性。针对不同类型的导弹目标,可以开展更为细致的结构毁伤机理研究,以便更精确地评估战斗部的毁伤效能。

参考文献:

- [1] 唐娇姣, 梁争峰, 陈元建. 防空反导毁伤技术现状与发展[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1): 35-39, 45.
TANG J J, LIANG Z F, CHEN Y J. Present situation and development of air defense and anti-missile damage technology[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 35-39, 45.
- [2] 张凌. 聚焦战斗部对巡航导弹的毁伤及引战配合研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 3-4.
- [3] National Research Council of the United States. Vulnerability assessment of aircraft: A review of the department of defense live fire test and evaluation program[R]. USA: National Academy Press, 1993.
- [4] KLOPCIC J T, REED H L. Historical perspectives on vulnerability/lethality analysis[R]. USA: U. S. Army Research Laboratory, 1999.
- [5] 于滨. 破片战斗部对导弹目标的毁伤效能分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020: 27-31, 37-39.
YU B. Damage assessment of fragmentation warhead against missile target[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020: 27-31, 37-39.
- [6] 曹兵. 破片对巡航导弹燃油舱冲击引燃的实验研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 45-49.
CAO B. Experimental study on the impact inflame damage to simulative fuel tank of cruise missile by fragments[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(6): 45-49.
- [7] 李向荣, 刘宗伟, 周世海. 聚焦战斗部与普通杀爆战斗部毁伤效能比较[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5): 100-102.
LI X R, LIU Z W, ZHOU S H. Comparison of damage effect between focusing warhead and ordinary blast fragmentation warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(5): 100-102.
- [8] 王宝成, 程淑杰, 梁争峰, 等. 线列式战斗部对目标结构毁伤效应研究[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 34(6): 15-17, 24.
WANG B C, CHENG S J, LIANG Z F, et al. Study on structure damage effect of target for linear distribution fragmentation warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2015, 34(6): 15-17, 24.
- [9] 舒张忆南, 梁争峰, 程淑杰, 等. 线列式结构毁伤在弯曲载荷下的增益[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6106-6112.
SHU Z Y N, LIANG Z F, CHENG S J, et al. Damage gain of linear structure damage under bending load[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6106-6112.
- [10] 李向东, 苏义岭, 韩永要. 导弹目标在破片式战斗部作用下的易损性评估[J]. 爆炸与冲击, 2007(5): 468-472.
LI X D, SU Y L, HAN Y Y. Vulnerability assessment of the missile subjected to the fragment warhead[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 468-472.
- [11] 梁争峰, 袁宝慧, 程淑杰, 等. 动态线列式破片战

- 斗部技术探索[J]. 火炸药学报, 2011, 34(3): 42-44.
- LIANG Z F, YUAN B H, CHENG S J, et al. Engineering design of dynamic linear distribution fragmentation warhead[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(3): 42-44.
- [12] 辛春亮, 朱星宇, 薛再清, 等. 有限元分析常用材料参数手册第2版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022: 144-146, 376.
- [13] 阮喜军, 梁争峰, 李广嘉, 等. 线列式离散杆战斗部可行性仿真分析[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(2): 37-40, 44.
- RUAN X J, LIANG Z F, LI G J, et al. Feasibility analysis of linear discrete rod warhead by numerical simulation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(2): 37-40, 44.
- [14] 焦晓娟. AHEAD弹对典型目标毁伤的计算机模拟与仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2002: 25.

“复杂视频监控场景图像分析与数据挖掘”专题征稿

随着当前安全形势的日益严峻以及军事斗争的迫切需要, 利用先进前沿的图像分析、数据挖掘等技术实现复杂视频监控场景的智能感知、智能决策等智能化分析, 对提高高效、准确、实时的监控服务质量, 增强安全性、提高效率和优化资源利用具有重要意义, 为此, 亟需利用相关理论方法开展相关技术研究。其中涉及了诸多关键科学问题, 具有典型的多学科交叉融合特色, 必须充分借鉴前沿科技成果, 研究解决复杂视频监控场景图像分析与数据挖掘需要解决的突出矛盾和现实问题。

本专题聚焦复杂视频监控场景图像分析与数据挖掘领域的前沿热点问题, 围绕恶劣环境降质图像增强、多摄像机网络监控视频处理、遥感建筑物智能三维测图、视频数据深度挖掘分析、典型区域景象匹配适配、人员情绪智能分析处理等领域问题, 诚邀相关基础理论研究、实际工程应用和前沿科学问题探究等方面的国内专家、学者和科研人员积极投稿。

投稿方式

军网网址: <http://xb.epgc.mtn>

电子邮箱: depbxb@126.com

联系电话: 029-84744009

通信地址: 陕西省西安市灞桥区同心路2号学报编辑部

邮政编码: 710025

网 址: <http://www.epgc.mil.cn/catalog-98.shtml>

《火箭军工程大学学报》编辑部