中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0599-10 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 599-608.

杀爆弹跳弹过程分析与空爆多源证据融合判定

惠军卫[1]，吴 越[2*]，李 淦[3]，吴 攀[4]，杨佳浩[2]

（1. 中国人民解放军69089部队，新疆 库尔勒 841000；2. 中北大学 机电工程学院，山西 太原 030051；
3. 中国人民解放军32703部队，山西 太原 030000；4. 重庆长安工业（集团）有限责任公司，重庆 401120）

摘 要：针对高原实弹射击训练中某型轮式自行迫榴炮发射的杀伤爆破弹发生跳弹空爆事故的成因分析需求，本文首先通过解析计算、现场残骸勘验与高速摄像分析，对杀爆弹的跳弹行为进行弹道重建与过程复现，揭示了弹丸以大落角触地后，引信隔爆机构虽受压变形但未触发，跳飞后因速度矢量突变激发惯性保险二次作用的损伤机制。在此基础上，融合弹道参数重建、破片特征量化分析、现场残骸空间分布测量、理论推导与数值仿真等多源证据，对该弹的空爆行为进行了综合判定。结果表明，该弹空爆高度为11～13 m，仿真所得破片散布直径与实测值的误差小于2%。本文提出了“动态挤压—弹体失稳—引信二次触发”的耦合失效模型，构建了以空爆高度(11～13 m)、破片密集区直径(约140 m)、核心区破片面密度(约19片/m^2)为一级判据，引信残骸损伤特征及破片表面痕迹为二级判据的多维加权判定体系，明确了各项判据在逻辑因果链中的权重，弥补了传统仅依赖现场残骸经验判断的不足，为弹道参数修正及未爆弹处置规程的优化提供了理论依据，有助于提升弹药安全性与排爆作业的效率。

关键词：自行迫榴炮；跳弹空爆；破片分析；未爆弹处置

中图分类号：TJ012 **文献标识码：**A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.01.0016

引用格式：惠军卫，吴越，李淦，等. 杀爆弹跳弹过程分析与空爆多源证据融合判定[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：599-608.

Hui Junwei, Wu Yue, Li Gan, et al. Analysis of ricochet process and multi-source evidence fusion determination for airburst of high-explosive projectile[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 599-608.

Analysis of Ricochet Process and Multi-Source Evidence Fusion Determination for Airburst of High-Explosive Projectile

Hui Junwei[1], Wu Yue[2*], Li Gan[3], Wu Pan[4], Yang Jiahao[2]

(1. Unit 69089, PLA, Korla 841000, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Unit 32703, PLA, Taiyuan 030000, China;
4. Chongqing Chang'an Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: To address the attribution analysis of a ricochet-induced airburst accident involving a high-explosive (HE) fragmentation projectile launched from a wheeled self-propelled mortar-howitzer during a plateau live-fire exercise, this study first reconstructs the ricochet trajectory and analyzes the process dynamics through analytical calculations, on-site debris examination, and high-speed photographic analy-

收稿日期：2026-01-22

作者简介：惠军卫(1982—)，男，工程师，主要从事弹药销毁处置方面的研究。

*通信作者：吴 越(1973—)，男，副教授，博士，主要从事高效毁伤与目标防护方面的研究。E-mail：wy@nuc.edu.cn。

sis. The analysis reveals the injury mechanism that after impacting the ground at a high incident angle, the fuze's safety and arming device undergo compressive deformation without activation; the subsequent ricochet induces a significant velocity vector change, and triggers the secondary action of inertial fuze. This provides an evidential foundation for the attribution of the subsequent airburst. Furthermore, a multi-source evidence fusion approach—integrating trajectory reconstruction, fragment characterization, debris field mapping, mathematical derivation, and numerical simulation—was employed to assess the airburst event. The results indicate an airburst height of approximately 11-13 m, and the simulation error of fragment dispersion diameter relative to field measurements is less than 2%. The study proposes a coupled failure model of "dynamic compression-projectile destabilization-secondary fuze triggering" and establishes a multi-dimensional weighted determination system that takes airburst height (11-13 m), fragment concentration zone diameter (about 140 m), and core-zone fragment areal density (about 19 fragments/m^2) as primary criteria, and fuze debris damage characteristics together with fragment surface marks as secondary criteria. It clarifies the weight of each criterion in the logical causal chain, thereby overcoming the limitations of traditional methods that rely solely on empirical judgment of on-site debris. This provides a theoretical basis for ballistic parameter correction and optimization of unexploded ordnance (UXO) disposal procedures, contributing to enhanced ammunition safety and explosive ordnance disposal efficiency.

Key words: self-propelled mortar-howitzer; ricochet airburst; debris analysis; unexploded ordnance (UXO) disposal

0 引 言

随着部队实战化训练强度与弹药消耗量的持续增长，未爆弹(Unexploded Ordnance，UXO)事故风险日益凸显。其中，跳弹空爆因其触发机制涉及复杂的弹目交汇动力学与引信多步响应过程，且其危害范围具有不确定性，已成为排爆作业的重点与难点。传统的事故分析主要依赖于排爆人员的现场经验对残骸分布进行定性研判，缺乏定量化、标准化的判据支撑。尤其在高原低压、低氧及复杂地质条件下，弹丸终点效应与引信作用环境发生显著变化，依赖单一经验的方法易导致对事故机理的误判，进而影响后续处置的安全性。

当前，在未爆弹探测领域，陈栋等[1]综述了基于电磁感应与成像技术的地表未爆弹检测方法，黄启东等[2]则提出了基于轻量化深度学习模型的快速识别算法，为现场高效搜索提供了技术储备。在引信动力学方面，陆俊桦等[3]研究了多姿态下的惯性发火行为，揭示了过载方向对发火时机的影响规律。针对跳弹轨迹预测，吴应祥等[4]建立了考虑斜碰撞的预测模型，验证了轨迹逆推的可行性。此外，魏万里等[5]与赵港桥等[6]利用LS-DYNA及S-ALE/FEM-SPH耦合方法分别开展了弹丸空爆与终点效应数值模拟，验证了高保真仿真技术在复现爆炸与侵彻过程中的有效性。

尽管上述研究在单项技术上取得了显著进展，但针对"跳弹空爆"这一涉及"撞击失效—弹体失稳—二次触发"跨尺度耦合过程的特殊事故形态，尚缺乏系统性的多源证据融合判定方法[7]。特别是在高原特殊环境下，相关机理分析与判据研究更为匮乏[8]。本文以某高原实弹射击中发生的典型跳弹空爆事故为研究对象，旨在通过融合视频解析、残骸逆向分析、破片统计特征与数值仿真等多维数据，揭示其空爆触发的动力学机理，并构建一套基于多源证据相互印证的跳弹空爆判据体系，以期为弹药安全性设计边界界定及智能化排爆规程优化提供科学依据。

1 跳弹过程弹道重建及初步分析

1.1 弹道重建与初步分析

某型轮式自行迫榴炮直瞄实弹射击后，杀爆弹并未立即发生爆炸，将其定位为疑似未爆弹，需进行排爆作业。查阅《弹丸终点效应》[9]等资料初步判断该疑似未爆弹可能的落点及情况，依据现场高速摄像视频分析(见图1)，弹丸着地瞬间引信头部(圆锥角45°)与硬质岩层发生碰撞，弹体仰角由32°急剧增至68°，飞行轨迹呈现非稳态摆动。疑似未爆弹于A点着地，0.36 s后飞出摄像

机视场（C点），随后飞行至东北侧山顶B点耗时0.24 s。经视频标定，A、B两点间高差为20 m。考虑到AB段飞行距离较短，暂忽略空气阻力影响，其运动学公式为

$$v^2 = v_0^2 + 2g\Delta h, \tag{1}$$

式中：v为弹丸的末速度（即AB段中B点速度）；v_0为弹丸的初速度（AB段中A点的速度）；g为重力加速度，取9.8 m/s^2；Δh为AB段的高度差。计算可得弹丸从A点运动至B点处时，速度为83.33 m/s。此理论计算值与视频帧率分析预测的约80 m/s速度量级高度吻合。该一致性验证了在短距跳飞阶段忽略空气阻力这一简化假设的工程合理性，从而为下文利用抛体运动规律推算弹丸跳飞高度与空爆位置提供了可靠的运动学基础。

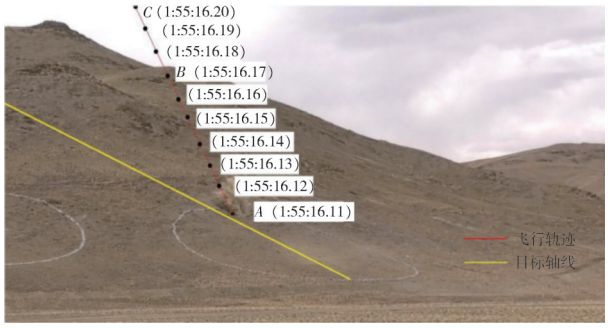


图 1　跳弹飞行轨迹图

Fig. 1　Trajectory of ricochet flight

1.2　多源数据采集与残片勘察分析

在跳弹现场划定半径3 km的警戒区，并利用无人机开展网格化搜索。在根据视频中跳飞角度与速度估算的弹着点范围内未发现完整弹体，仅发现大量金属碎片，初步判定弹丸在跳飞后发生空中爆炸[10]。

1）破片回收与质量配准。采用差分GPS定位技术对破片分布进行标定[11]，共回收有效破片437块，总质量6.2 kg（见图2）。根据该型杀伤爆破弹随箱技术说明书中的装药与结构配重关系推算，弹体（含引信）金属件理论质量约为7 kg。回收质量与理论值基本吻合，进一步佐证了弹体已发生整体性解体爆炸。

2）引信残骸识别。在东北象限距初落点约306 m处发现刻有“11E”字样的引信碎片，经鉴定为该弹的引信部件，外形尺寸约为45 mm×31 mm×32 mm（见图3）。引信残片包括黄铜齿轮（厚度约1.2 mm）、隔爆销（直径约3 mm）及转子片。图4中左一为中间引信碎片，其余为外围引信碎片，外围引信碎片外形尺寸分别约为39 mm×30 mm×32 mm，43 mm×27 mm×27 mm，19 mm×20 mm×12 mm（从左到右），碎片均为铝制碎片。



图 2　弹体部件质量

Fig. 2　Weight of projectile component

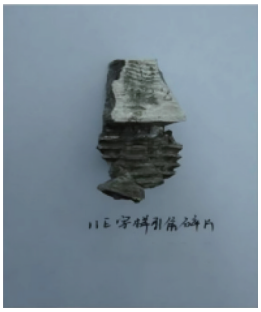


图3　机械撞击引信

Fig. 3　Mechanical impact fuze

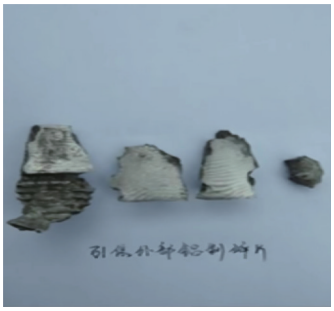


图4　外围引信碎片

Fig. 4　Peripheral fuse fragments

3）内部机构损伤特征。在引信碎片区域发现了引信内部结构碎片，包括1个黄铜齿轮碎片和2个黄铜销碎片（见图5）。图5（左）为黄铜齿轮碎片，其余为黄铜销。黄铜齿轮碎片与一块铝制引信外壳碎片粘连，圆心角度为146°。图5（中）所示黄铜销轴较完整，整体呈圆柱形，端面圆半径9 mm，长度22.8 mm。图5（右）所示黄铜销轴发生弯曲，塑性变形量达2.3 mm。两黄铜销轴变形程度不一致，说明跳弹瞬间引信受到非轴向冲击载荷。

引信内部转子隔爆机构的黄铜片（见图6）碎裂为4个小块。



图5 黄铜齿轮片和销

Fig. 5 Brass gear and pin fragments



图6 隔爆机构黄铜片及其尺寸

Fig. 6 Brass fragments and the size of explosion-isolating mechanism

这些碎片基本上在直径12 m的圆圈范围内被发现，黄铜片呈圆形，直径约43 mm，整体黄铜片较为平整，没有任何反向阻力挤压痕迹。一般情况下，命中目标区很难发现引信内部这样的黄铜片，即使发现也是因为反向阻力挤压严重变形甚至卷曲，不会出现以上的平整状态[12]。

1.3 分析结果

综合上述对引信残片的分析，初步判定该杀爆弹发射后在首次触地瞬间，由于引信受到非轴向冲击载荷，导致机械引信首层保险(即撞击作用保险)失效，在该弹跳飞后由于运动速度方向变化使机械引信二级保险(即惯性保险机构)作用，弹丸发生爆炸[13]。由惯性保险的作用机理可大致推断，惯性保险作用时段极大概率为该弹跳飞后飞至最高点处时，因为在此时段该弹运动速度方向变化最大。弹丸跳飞高度为

$$H=\frac{v_0^2\sin^2\theta}{2g}, \tag{2}$$

式中：H为弹丸达到的最高点高度；v_0为弹丸跳飞后速度的大小；θ为弹丸跳飞后速度方向与水平方向夹角；g为重力加速度，取9.8 m/s^2，忽略空气阻力的作用，可计算出弹丸跳飞后运动至最高点时距离地面高度为12.5 m，即该弹丸极有可能在跳飞后发生空爆，空爆点距地面12.5 m。

2 空爆触发机制多维证据分析

本次综合判定共提取四类独立证据源：弹道运动学参数、破片空间统计特征、引信及弹体残骸损伤形态、数值仿真复现结果。根据各证据源与空爆事件的因果紧密程度及测量不确定性，将判据划分为两级：一级判据直接决定空爆高度及爆炸属性，包括弹道重建所得起爆高度H_K、破片密集区直径D_f和核心区破片面密度ρ_f，其综合权重占70%；二级判据为辅助排除触地爆炸的痕迹学条件，包括引信隔爆机构变形状态、破片表面擦痕缺失、极小破片(约5 mm)存在及远距抛散破片(>360 m)，其综合权重占30%。一级判据中，弹道重建与破片飞散特征因物理过程直接耦合，被赋予较高(各30%)的判定权重；数值仿真作为对破片散布的独立复现手段，与破片实测形成互验，权重占10%。在逻辑关系上，一级判据以定量阈值的满足作为空爆成立的必要条件，二级判据则以痕迹特征的一致性进一步排除触地爆炸的备择假设。

2.1 弹道参数重建

采用运动分析软件对现场高速摄像视频数据进行逐帧解析，提取弹丸跳飞后的运动轨迹(见图1)。本次拍摄所用高速摄像机的关键参数设置如下：帧率f=100 000帧/s(相邻帧时间间隔Δt=0.05 ms)，该帧率设置能够满足对速度约80 m/s的跳飞弹丸进行精确运动捕捉的需求[4]，分辨率1 280×720像素，曝光时间10 μs[5]。

采用运动分析软件(Tracker等)对视频序列中弹丸特征点进行逐帧标定与自动跟踪，获取各时刻弹丸质心的像素坐标[8-9]。通过预先布设的标定杆(间距已知)建立像素坐标与物理空间坐标之间的映射关系，将像素位移转换为实际空间位移。弹丸的运动速度通过位移-时间数据的线性回归斜率确定：以时间为自变量，以位移为因变量，拟合简单线性回归模型，其斜率即为该飞行段的平均速度，该方法可有效抑制因拍摄环境中光源波动等因素引起的单点跟踪噪声[6]。

定义着地点A为坐标原点(0,0)，空爆点B坐标为(12.72 m,15.43 m)，飞行时间0.24 s。据此计算水平速度分量$V_x\approx$53.0 m/s，垂直速度分量$V_y\approx$64.3 m/s。

2.2　破片分布特征分析

通过对现场破片残骸分布的统计分析进行破片密度估计，结果显示空爆区破片密度约为 19 片/m^2，显著高于正常爆炸区（约为 3 片/m^2）[14]。破片尺寸分布符合 Rosin-Rammler 函数：

$$Q(d)=1-\exp\left[-\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^{n}\right], \tag{3}$$

式中：$Q(d)$为粒径小于 d 的颗粒所占的比例；d 为颗粒的直径；d_{50} 为中位径，即粒径小于 d_{50} 的颗粒占总数的 50%，d_{50} 取值 12 mm；n 为分布指数，表示粒径分布的均匀性，n 取值 1.2。

由于弹丸在空爆时相比地面爆炸缺少土壤或岩层对弹体的约束，导致破片数量更多，分布范围更广。实测破片密集区呈近似圆形分布，直径约 140 m，核心区破片面密度约 19 片/m^2，远超同一弹药地面正常爆炸的 3 片/m^2。这一显著量差源于空爆条件下破片飞散丧失了地面对弹体的约束及弹坑对破片的截获效应。据此，将破片密集区直径 D_f 和核心区面密度 ρ_f 作为一级判据，其判定权重约占 30%。该判据的物理基础在于：爆炸高度 H_b 与破片落地散布范围之间存在由重力与初速共同决定的定量映射关系，可以用下文式（4）和式（6）描述。对破片残骸分布特征的分析再次印证了该弹出现跳弹空爆现象的判断。

2.3　空爆特征判据

量取图 14 中的破片分布区域，分布区域基本为圆形区域，表明弹丸在爆炸时未受到非对称约束的影响，破片密集区直径约为 140 m，根据以往爆破经验[15-16]，该弹爆炸产生的破片初速通常为 35～45 m/s。若弹丸空爆高度为 H_b，破片密集区半径为 R_f（70 m），破片初速为 v_{f0}，则根据抛体运动关系有

$$H_b=\frac{1}{2}g\left(\frac{R_f}{v_{f0}}\right)^{2}。 \tag{4}$$

将 v_{f0}=35～45 m/s 代入式（4），得 H_b 的估算范围为 11.8～19.6 m。这一估算结果与前述基于引信惯性保险作用时段推算的空爆高度（约 12.5 m）基本相同。此处，破片密集区半径 R_f 为实测一级判据（权重 30%），破片初速 v_{f0} 为经验约束参数，两者通过式（4）共同构成对空爆高度 H_b 的破片动力学反演环节，与弹道运动学推算（权重 30%）和数值仿真验证（权重 10%）共同完成对关键参数 H_b 的多源交叉标定[17-20]。

目标区部分破片表面军绿色涂漆保存完好。弹体上定心部至引信端口的区域在发射过程中受膛内高温高压影响较小，其表面油漆通常保存完好；而下定心部至弹带位置直接接触高温燃气，其表面油漆在发射时会被灼伤脱落（见图 7）。对比命中目标区的破片和疑似跳弹空爆区的破片，命中目标区并在地面爆炸产生的破片（图 7 第一排）通常一面或两面带有明显的土壤擦痕，而该起空爆事故产生的破片（图 7 第二排）两面金属色泽完整，未发现任何土壤附着痕迹。

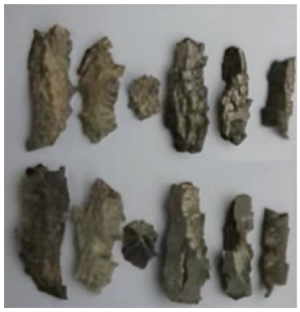


图 7　正常破片与空爆破片对比

Fig. 7　Comparison of normal shrapnel and air-exploded shrapnel

目标区域发现 4 块弹丸紫铜弹带碎片（见图 8），其表面膛线摩擦形成的旋转痕迹清晰，未发现明显的额外擦痕。



图 8　紫铜弹带碎片

Fig. 8　Fragments of copper cartridge belts

目标区域发现若干尺寸约如黄豆般大小（粒径约 5 mm）的弹体破片，而正常入地爆炸的弹丸不会出现如此小的破片，因土壤阻力很难飞出弹坑，基本上都在命中目标区的弹坑内，而且有明显的土壤擦痕，但发现的破片均无擦痕，表面都很干净，属于正常的金属色泽（见图 9）。

在疑似跳弹空爆区域发现该弹弹丸引信头部较大的破片一枚（见图 10），其外表面有明显的擦痕，说明该弹丸引信头部首先着地（引信头部为圆锥形）且着地时引信撞击力度不够，没有达到机械引信触发的撞击力度，导致弹丸抬高飞行，与影

像视频显示的跳弹状态吻合。



图9 粒径约5 mm的弹体碎片

Fig. 9 Projectile fragments with the size about 5 mm

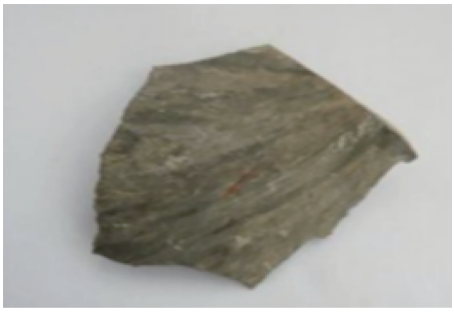


图10 弹丸引信头部较大的破片

Fig. 10 Larger shrapnel in the head screw

在距离目标区直线距离约362 m的位置发现带有弹带的较大破片，破片表面干净无任何擦痕，只在落地着地一侧表面有少量沾土，而目标区产生的正常爆炸破片无法飞落至这个位置(见图11)。



图11 带有弹带的较大破片

Fig. 11 Larger shrapnel with straps

综合上述判据，可以判断该弹在图1中A点落地后，由于撞击引信未被正常触发，弹丸发生跳弹现象，弹丸跳飞至距离目标落点直线距离约360 m处时，由于惯性引信被触发而发生空爆现象。

2.4 数值仿真验证

为进一步验证该弹在空爆时距地面的高度，对该弹爆炸时的破片飞散情况进行数值模拟。

2.4.1 仿真模型构建与基本假设

采用LS-DYNA仿真平台，建立杀爆弹空爆数值模型。模型主要包括杀爆弹壳体(含预制刻槽)、内部装药及空气域。壳体几何模型如图12所示，壳体采用6061铝合金材料，壳体厚度依据残骸测量结果设定为8 mm。刻槽深度为壳体厚度的1/3，呈菱形网格分布，以引导破片形成。内部装药简化为圆柱体，与壳体内部轮廓贴合[21]。

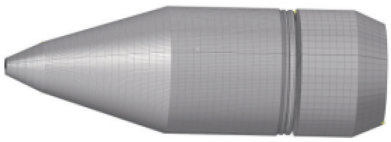


图12 杀爆弹壳体模型

Fig. 12 Shell body model of the high-explosive projectile

需指出的是，为聚焦于空爆后破片飞散规律与爆炸高度的关联性分析，本仿真对初始条件进行了合理简化：假定弹体于静止状态下在指定高度垂直起爆，暂未引入弹体触地跳飞后的残余速度与弹轴倾角。实际跳弹空爆中，弹体姿态通常与地面呈一定倾角，导致破片在水平面上的散布呈椭圆形而非理想圆形，这一点在实测破片分布图(见图14)中亦有所体现。然而，本文判定空爆高度的核心依据是破片在重力作用下的垂直下落时间(见式(6))，该时间仅取决于爆炸高度，与破片水平飞散的方向性分布无关。仿真所得散布直径与实测密集区直径的高吻合度(误差<2%)，表明弹体姿态的简化并未对空爆高度的反演精度产生实质性影响。关于弹体姿态对破片空间分布形态的具体影响规律，将在后续研究中予以深入探讨。

2.4.2 材料模型与参数设置

壳体材料采用6061铝合金，其在高应变率下的塑性流动、应变硬化和热软化效应采用Johnson-Cook本构模型描述；在高压下的体积响应采用Gruneisen状态方程描述。适用于高速冲击及爆炸载荷下的材料响应。壳体材料具体参数如表1所示[22]。表1中，ρ为密度，A、B、N、C、m均为Johnson-Cook本构模型流动应力公式(已省略)中的常数，T_m为熔点，T_0为室温，C、S_1、S_2、S_3、γ_0均为状态方程中的常数。

炸药材料：装药(减变6号)采用HIGH_EXPLOSIVE_BURN模型模拟，并搭配JWL状态方程描述爆轰产物的膨胀做功过程。炸药材料具体参数见表2[23]。

表 1　6061铝合金材料参数

Tab. 1　Material parameters of 6061 aluminum

ρ/(kg•m^{-3})	A/MPa	B/MPa	N	C	m	T_m/℃	T_0/℃	C/(km•s^{-1})	S_1	S_2	S_3	γ_0
2.78×10^3	265	426	0.34	0.015	1.0	775	19.85	5.328	1.338	0	0	2.0

表 2　装药材料参数

Tab. 2　Explosive material parameters

ρ/(kg•m^{-3})	D/(m•s^{-1})	p_{CJ}/MPa	$BETA$	E_0/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1 631	6 717.4	18 503	0.0	7.0	373.8	3.75	4.15	0.90	0.35

表 2 中，ρ 为炸药密度，D 为炸药爆速，p_{CJ} 为爆轰时CJ面压强，$BETA$ 为相关常数，E_0 为单位体积炸药的内能，R_1、R_2、A、B 和 ω 为相关系数。

2.4.3　仿真过程与结果输出

在杀爆弹空爆过程中，带有一定初速的破片在水平方向只受到空气阻力的影响，而在竖直方向上受到空气阻力和重力的双重影响。因此，为了聚焦于空爆后破片的飞散规律并简化分析过程，仿真中暂未考虑弹体触地与跳弹的动态过程，而是直接设定弹体于静止状态下在指定高度起爆。同时，忽略重力对破片水平飞散的影响，但在后续高度计算中单独考虑其垂直下落。图 13 展示了空爆发生后 0.3，0.6，0.9，1.2 和 1.5 s时，破片在水平面上的飞散范围（图中标注直径为模拟试验观测值）。



（a）空爆发生后0.3 s壳体碎片飞散情况（直径1.4 m）



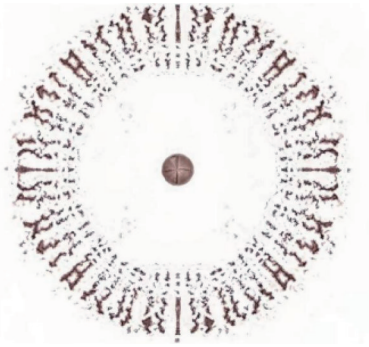
（b）空爆发生后0.6 s壳体碎片飞散情况（直径6 m）



（c）空爆发生后0.9 s壳体碎片飞散情况（直径21 m）



（d）空爆发生后1.2 s壳体碎片飞散情况（直径64 m）



（e）空爆发生后1.5s壳体碎片飞散情况（直径142 m）

图 13　空爆发生后不同时间壳体碎片飞散情况

Fig. 13　Distribution of shell fragments at different times after airburst

2.4.4　结果分析与对比验证

关键结果量化后如表 3 所示。仿真显示，破片飞散范围随时间的平方关系扩大，破片初始速度主要分布在300～800 m/s范围内，与杀爆战斗部设计特征相符。

表3 空爆后不同时间对应的破片飞散直径

Tab. 3 Fragment dispersion diameters at different times after airburst

时间/s	直径/m
0.3	1.4
0.6	6
0.9	21
1.2	64
1.5	142

将仿真获得的最终破片飞散范围(t=1.5 s时，直径D_{sim}=142 m)(见图13)与现场勘察测量的实际破片密集区直径(D_{field}≈140 m)(见图14)进行对比。误差计算公式为

$$\text{误差}=\frac{|D_{sim}-D_{field}|}{D_{field}}\times 100\%。\tag{5}$$

计算得到误差为1.4%(小于2%，通常认为误差在可接受范围内)。该极小误差验证了仿真模型在预测破片水平飞散规律方面的有效性。由仿真结果可以看出，破片从爆炸中心飞散至覆盖直径142 m区域用时1.5 s。



图14 疑似跳弹空爆区引信及破片分布图

Fig. 14 The distribution of fuze and shrapnel in the area of suspected unexploded ordnance

$$H=\frac{1}{2}gt^2。\tag{6}$$

将时间t=1.5 s代入式(6)计算可得，破片在此时间段(1.5 s)内自由下落的距离H大致为11.025 m，该计算结果与之前通过理论计算的结果基本吻合，再次证实了该杀爆弹的空爆高度位于距地面11~13 m处。

需要说明的是，在弹丸空爆时会有一部分破片向上方飞散，但杀爆弹壳体沿周向的刻槽设计使得破片主飞散方向集中在垂直于弹轴的侧向扇区，向上(沿弹轴方向)飞散的破片质量占比相对较小。加之向上飞散的破片在经历长时飞行后落地更为分散，其落地后的面密度远低于侧向主飞散破片，对密集区边界判定的干扰可忽略不计，故不考虑弹丸空爆时破片向上飞散的情况。

3 结 论

本文以某高原实弹射击中发生的跳弹空爆事故为案例，综合弹道重建、残骸分析与数值仿真，得到以下研究结果：

1) 揭示弹丸的“动态挤压—弹体失稳—引信二次触发”失效机制。弹丸以大入射角触地时，引信隔爆机构受非轴向冲击发生塑性变形但未达发火阈值；跳飞后弹体姿态失稳，在弹道顶点附近速度矢量突变，诱发惯性保险二次触发，导致空爆发生。

2) 建立了跳弹空爆的多源证据加权判据体系。一级判据(权重约70%)包括：破片密集区呈圆形散布(直径约140 m)、核心区破片面密度约为19片/m^2、弹道重建所得空爆高度为11~13 m；二级判据(权重约30%)包括：破片表面无土壤附着、紫铜弹带旋转痕迹清晰、引信隔爆机构黄铜片平整且销轴呈非对称弯曲、存在粒径约5 mm的极小破片及远距离抛散破片(最远约362 m)。一、二级判据在逻辑上构成“必要条件筛选—排除备择假设”的递进验证结构，能够以可量化的方式实现对跳弹空爆与非触地爆的有效区分。

3) 确定了事故弹丸空爆高度区间。基于运动学计算、破片飞散时间反演及数值仿真，三方结果相互印证，空爆高度为11~13 m。仿真所得破片散布直径(142 m)与实测值(约140 m)的相对误差小于2%。

4) 提出了装备优化与处置规程改进方向。明确该弹引信在非轴向冲击下的临界失效模式，为优化隔爆机构刚度匹配提供了数据支撑；判据体系可直接用于高原未爆弹处置流程优化。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] 陈栋，闫小伟，石胜斌. 地表未爆子弹药检测与识别定位技术研究综述[J]. 航空兵器，2023，30(5)：1-10.

Chen Dong，Yan Xiaowei，Shi Shengbin. Review on detection and identification positioning technology of

surface unexploded submunitions [J]. Aero Weaponry, 2023, 30(5): 1-10. (in Chinese)

[2] 黄启东，张彬彬，夏良. 基于改进YOLOv8n的轻量化未爆弹检测方法[J]. 兵器装备工程学报，2024，45(10)：309-316.
Huang Qidong, Zhang Binbin, Xia Liang. Lightweight unexploded ordnance detection method based on improved YOLOv8n [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(10): 309-316. (in Chinese)

[3] 陆俊桦，岳明凯，张骢，等. 航空炸弹引信多姿态惯性发火性能研究[J]. 兵器装备工程学报，2024，45(11)：73-82.
Lu Junhua, Yue Mingkai, Zhang Cong, et al. Research on the multi-attitude inertial ignition performance of aerial bomb fuze [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(11): 73-82. (in Chinese)

[4] 吴应祥，秦有权，卢云柯. 基于弹靶斜碰的跳弹轨迹预测模型研究[J]. 兵器装备工程学报，2023，44(3)：131-136.
Wu Yingxiang, Qin Youquan, Lu Yunke. Prediction model of the ricochet trajectory based on oblique collision of projectile targets [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(3): 131-136. (in Chinese)

[5] 魏万里，李述涛，陈叶青. 高速弹丸空爆过程数值模拟研究[C]//第十七届中国CAE工程分析技术年会，2021：461-465.

[6] 赵港桥，程良玉，李克杰. 某型制导杀爆弹终点效应数值模拟研究[J]. 计算机仿真，2025，42(3)：16-22.
Zhao Gangqiao, Cheng Liangyu, Li Kejie. Numerical simulation of terminal effect of certain type of guided killing explosive bomb [J]. Computer Simulation, 2025, 42(3): 16-22. (in Chinese)

[7] 罗曦，张昊春，汤欣卓，等. 高能激光对小型无人机塑料蒙皮材料的毁伤效果研究[J]. 应用光学，2025，46(3)：515-521.
Luo Xi, Zhang Haochun, Tang Xinzhuo, et al. Research on damage effects of high-energy lasers on plastic skin materials of small UAVs [J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 515-521. (in Chinese)

[8] 杨刚，梁超，刘平，等. 基于三维FE-SPH自适应耦合算法的子弹侵彻混凝土靶跳飞问题模拟[J]. 工程力学，2013，30(9)：276-282.
Yang Gang, Liang Chao, Liu Ping, et al. Numerical simulation of ricochet problem of projectile penetrating into concrete target based on 3d fe-sph adaptive coupling algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 276-282. (in Chinese)

[9] 王儒策，赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京：北京理工大学出版社，1993.

[10] 谢兴博，周向阳，李裕春，等. 未爆弹药处置技术[M]. 北京：国防工业出版社，2019.

[11] Bassindowa H, Farouk B, Segletes S B. Impact and ricochet of a high speed projectile from a plate [J]. Defence Science Journal, 2021, 71(6): 737-747.

[12] Curran D R. Simple fragment size and shape distribution formulae for explosively fragmenting munitions [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20(1/2/3/4/5): 197-208.

[13] 陈智群，王克勇，李惠元，等. 某弹药中引信失效机理分析[J]. 火工品，2008(1)：49-52.
Chen Zhiqun, Wang Keyong, Li Huiyuan, et al. Analysis on the failure mechanism of fuze in some cartridge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(1): 49-52. (in Chinese)

[14] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(3): 1498-1504.

[15] Nguyen V T, Phan T H, Park W G. Modeling and numerical simulation of ricochet and penetration of water entry bodies using an efficient free surface model [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 182: 105726.

[16] 侯俊亮，蒋建伟，李应波，等. 杀爆战斗部破片和冲击波对目标的耦合作用[J]. 火炸药学报，2020，43(3)：335-340.
Hou Junliang, Jiang Jianwei, Li Yingbo, et al. Study on the coupling effect of fragments and shock wave of the blast-fragmentation warhead on typical targets [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(3): 335-340. (in Chinese)

[17] 李剑. 爆炸与防护[M]. 北京：中国水利水电出版社，2014.

[18] Bruschini C. Commercial systems for the direct detection of explosives for explosive ordnance disposal tasks [J]. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2001, 2(3): 299-336.

[19] 尚雅玲，彭艳垒，梁捷. 引信抗大过载技术研究及方案设计[J]. 舰船电子工程，2012，32(6)：121-124.
Shang Yaling, Peng Yanlei, Liang Jie. Research of fuze resisting high g-load technology and scheme design [J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(6): 121-124. (in Chinese)

[20] 解江，高斌元，甄婷婷，等. 爆炸载荷下机织物的动态响应与失效行为[J]. 复合材料学报，2022，39(10)：4949-4960.
Xie Jiang, Gao Binyuan, Zhen Tingting, et al. Dynamic response and failure behaviors of woven fabrics under blast load [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4949-4960. (in Chinese)

[21] 朱继业，郑纯，孙晓晖，等. 杀爆弹破片与冲击波对地面人员目标综合毁伤[J]. 兵器装备工程学报，2016，37(4)：1-4.
Zhu Jiye, Zheng Chun, Sun Xiaohui, et al. Integration lethal probability of fragment and shock wave of explosive projectile on attacking personalities[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(4): 1-4. (in Chinese)

[22] 刘再德，王冠，冯银成，等. 6061铝合金高应变速率本构参数研究[J]. 矿冶工程，2011，31(6)：120-123.
Liu Zaide, Wang Guan, Feng Yincheng, et al. High-strain-rate constitutive parameters of 6061 aluminum alloys [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(6): 120-123. (in Chinese)

[23] 师燕超. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应行为与损伤破坏机理[D]. 天津：天津大学，2009.