

文章编号: 1003-1480(2024)03-0071-06

机载点源红外干扰弹跌落动力学特性研究

白玉帅, 王倩妮, 王鹏飞, 张日来, 孙鹏, 赵耘晨

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津, 300308)

摘要: 针对点源机载红外干扰弹运输、装载等勤务处理过程中可能存在意外跌落的安全性问题, 采用试验、仿真等方法对干扰弹跌落时的动力学特性进行研究。对机载点源红外干扰弹进行了跌落试验, 并建立干扰弹跌落的有限元动力学模型, 开展典型工况下的跌落仿真。跌落试验表明干扰弹从 3.5 m 跌落, 弹壳仅在着地点周围出现了塑性变形, 弹体整体结构保持完整。仿真表明弹内零部件会在跌落时发生弹塑性变形, 但是这些变形对发射时的同轴度影响较为有限; 冲击动力学响应分析发现, 不同工况下的冲击加速度时间历程曲线特征基本相同, 峰值范围为 6 430 g~1 200 000 g, 并且跌落方向和零部件位置会影响该点冲击加速度的大小。

关键词: 红外干扰弹; 跌落特性; 动力学仿真; 勤务安全

中图分类号: TJ530 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.03.012

Study on Drop Dynamic Characterization of Airborne Point Source Infrared Jamming Projectile

BAI Yu-shuai, WANG Qian-ni, WANG Peng-fei, ZHANG Ri-lai, SUN Peng, ZHAO Yun-chen

(Academy of Opto-Electronic, China Electronic Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin, 300308)

Abstract: To address concerns related to the safety and logistical management of point source infrared jamming projectiles, the dynamic characteristics exhibited during the descent of infrared jamming projectiles were investigated by test and simulation. Drop tests were conducted on the point source infrared jamming projectiles, a finite element dynamic model was established and the impact response during the decoy's descent was explored in more detail. After a 3.5 meter descent, it is noted that only the casing shows noticeable plastic deformation near the impact point, while the overall structural integrity of the decoy remains intact. Simulation results indicate that internal components within the decoy undergo elastoplastic deformation upon descent, although this has limited effects on the coaxial alignment during launch. The impact dynamic response analysis show that the acceleration versus time history curves exhibit fundamentally similar characteristics, and the peak value ranges from 6 430 g to 1 200 000 g, the impact acceleration is influenced by both the drop direction and the position of parts.

Key words: Infrared jamming projectile; Drop characteristic; Dynamics simulation; Service safety

红外干扰弹是机载平台光电对抗系统的重要组成部分, 主要用于对抗红外制导导弹, 几乎装备了所有机载平台^[1]。机载红外干扰弹按作用原理可分为点源红外干扰弹、多点源红外干扰弹、面源红外干扰弹等^[2]。其中 MTV 体制点源红外干扰弹的出现时间最早、应用最为广泛, 其通过含能烟火药剂燃烧产生强烈的红外辐射, 用以干扰诱骗红外导引头, 使得导弹

脱靶^[3-4]。

机载点源红外干扰弹作为一种搭载于飞机上的火工品, 一旦发生安全问题, 会对载机飞行安全和飞行员生命安全产生重大影响^[5]。相关学者针对弹药的跌落分析开展了大量研究, Furmanek 等^[6]对现役坦克弹药进行了跌落试验, 发现坠落高度、角度, 撞击位置以及结构特性都会影响弹药跌落后的损坏程度, 弹

收稿日期: 2023-10-29

作者简介: 白玉帅 (1996-), 男, 工程师, 主要从事光电对抗技术研究。

引用本文: 白玉帅, 王倩妮, 王鹏飞, 等. 机载点源红外干扰弹跌落动力学特性研究[J]. 火工品, 2024(3): 71-76.

壳的损坏和其内部零部件的错位都会造成故障,使得弹药无法在战斗中使用。金路轩等^[7]根据弹塑性力学理论,推导了弹药垂直跌落时的冲击加速度峰值和作用时间理论计算公式,并通过有限元数值仿真验证了理论模型的正确性。米巧丽等^[8]通过有限元数值仿真研究了发射装药老化对于跌落安全性的影响,发现随着贮存年限的增长,发射药力学性能减弱、摩擦感和撞击感度升高,使其跌落安全性明显降低。

跌落冲击问题属冲击动力学范畴,目前针对跌落时的复杂结构冲击动力学问题主要有试验研究、理论研究和数值分析3种研究方法^[9-10]。本文首先对机载点源红外干扰弹进行了跌落试验,然后建立了跌落动力学仿真模型,详细分析了跌落后零部件的结构变形程度和跌落时的动力学响应特性。

1 跌落试验

为模拟机载点源红外干扰弹在运输、装卸等勤务处理过程中的意外跌落场景,将干扰弹从3.5 m高度释放,分别进行端盖向上、端盖向下和水平3个方向的跌落试验。干扰弹在下落过程中出现小角度翻转,最后与地面发生碰撞,试验过程如图1所示。

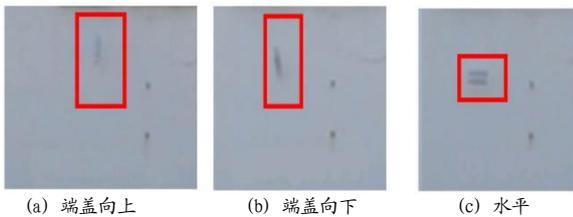


图1 干扰弹跌落试验过程

Fig.1 Test process of jamming projectile dropping

端盖向上和端盖向下跌落的干扰弹在两个底面圆边一侧出现磕碰变形。水平跌落时圆柱侧面的磕碰痕迹呈现横向分布,受力较为均匀。试验结果说明干扰弹在跌落后,弹体整体结构保持完整,仅出现磕碰痕迹,无大范围变形,未发生意外发火作用。随后使用跌落后的干扰弹进行发射试验,诱饵从跌落后的干扰弹中顺利发射并正常工作,未出现发射解体现象。这说明干扰弹跌落后其内部结构部件保持完整,内部载荷强度满足设计要求。

为了进一步了解机载红外干扰弹在跌落时的动

力学响应和内部零部件的变形程度,需要进行有限元数值仿真。

2 有限元动力学仿真模型

2.1 仿真模型的建立

跌落是干扰弹自由落体及与刚性地面相碰撞的过程,需在干扰弹下方增加刚性平面部件以模拟地面。跌落动力学仿真模型和其坐标定义如图2所示,由干扰弹和地面组成。

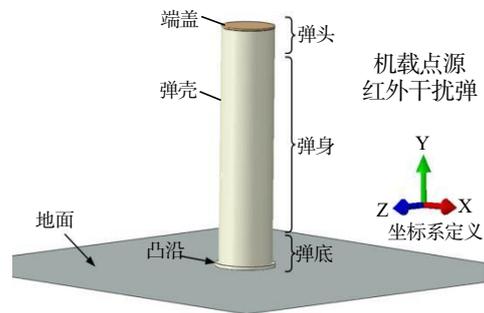


图2 干扰弹跌落仿真模型

Fig.2 Simulation model of jamming projectile dropping

点源红外干扰弹一般是由弹壳、抛射管、活塞、药柱和端盖等零部件组成^[11]。为提高计算效率,建模时对模型圆角、孔洞、螺纹、销孔等细节特征进行简化,只保留主要受力结构,将端盖处定义为弹头,弹壳底部的凸沿处定义为弹底。

在ABAQUS软件中建立干扰弹跌落的有限元动力学仿真模型^[12],惯性参考系的Y轴正方向与地面法相相同,XZ平面与地面重合。干扰弹的零部件均为实体部件,单元类型为C3D8R(八结点线性六面体单元),共划分212 041个单元;地面不会发生变形,将其设置为离散刚体部件,单元类型为R3D4(四结点三维双线性刚性四边形单元),共划分6 400个单元。将零部件间的螺纹连接更改为绑定约束,各个零部件间的相互作用采用通用接触,摩擦系数为0.2。仿真采用Dynamain Explicit分析步,对地面刚体部件施加完全固定边界,赋予干扰弹 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 的重力加速度。干扰弹从3.5 m的高度跌落,接触地面前一瞬间的速度 $v = \sqrt{2hg} = 8.28 \text{ m/s}$,通过设置预定义场赋予初始速度模拟跌落状态。

2.2 仿真工况

为研究不同跌落方向和跌落角度的冲击效果,对6种工况进行仿真计算,如图3所示。前3种工况为不同方向的理想状态跌落。后3种工况为模拟勤务工作环境中的真实跌落效果,将干扰弹绕X轴旋转 15° ,使得跌落面变化为跌落点。

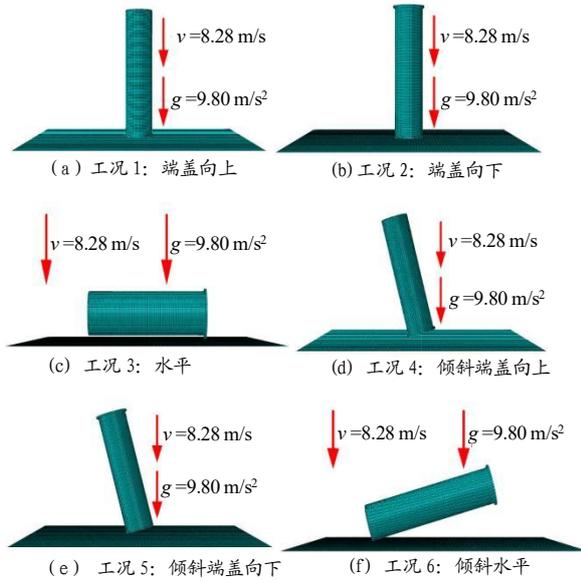


图3 跌落仿真的工况定义

Fig.3 Definition of different working conditions

2.3 材料模型及参数

为了使仿真计算尽可能反映真实的跌落过程,需要对干扰弹的各个零部件赋予相应的材料属性。端盖和弹壳的材料为2A12铝;抛射管的材料为45钢;密封组件、发射组件、支架的材料为尼龙。红外诱饵弹的药柱(MTV)是由聚四氟乙烯粉粒和镁粉按一定比例混合并添加少量氟橡胶粘接剂在一定温度下压制成型,材料参数参考文献[13]。基本材料参数如表1所示。

表1 基本材料参数

Tab.1 Physical properties of the workpieces

材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
45钢	7850	180	0.30
2A12铝	2770	71.7	0.33
尼龙	1140	3.30	0.40
药柱	1900	0.621	0.40

2A12铝、45钢采用在冲击动力学仿真中最常用的金属材料模型:Johnson-Cook动态本构模型和断裂破坏准则^[14-15]。Johnson-Cook本构模型利用 von Mises

屈服面及其流动法则,考虑材料的应变、应变率硬化和温升软化等因素,假设材料的各向同性应变、应变率硬化和温升软化因子是解耦的,即:

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T) = f_1(\bar{\varepsilon}^p) f_2(\dot{\bar{\varepsilon}}^p) f_3(T) \quad (1)$$

模型中应变硬化和温度软化采用幂函数形式,应变率硬化因子采用对数形式,即:

$$\bar{\sigma} = \left[A + B (\bar{\varepsilon}^p)^n \right] \cdot \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right]}_{\text{strain rate effect}} \cdot \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]}_{\text{temperature effect}} \quad (2)$$

式(2)中: A 为初始动态屈服强度; B 为应变率硬化系数; n 为应变率硬化指数; C 为应变率敏感系数; m 为温升软化指数; T_{melt} 为材料熔点温度; T_{room} 为环境温度; $\bar{\sigma}$ 为 von-Mises 屈服应力; $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\varepsilon}}^p$ 为塑性应变率; $\dot{\bar{\varepsilon}}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$,为参考应变率。

Johnson-Cook破坏准则给出了材料应变率、应力三轴度以及温度与材料失效应变率的关系,其表达式为:

$$\bar{\varepsilon}^f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma} \right) \right] \cdot \underbrace{\left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right]}_{\text{strain rate effect}} \cdot \underbrace{\left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]}_{\text{temperature effect}} \quad (3)$$

金属材料的断裂失效通过单元删除来实现,即在输出设置 status,则失效单元会被隐藏,2A12铝和45钢的材料本构模型参数如表2所示,表2中参数物理意义同式(1)~(2)。

表2 2A12铝和45钢的材料本构模型参数^[14-15]

Tab.2 Parameters of the Johnson-Cook model for 2A12 aluminum and 45 steel

本构模型	材料	A/MPa	B/MPa	n	C	m
	2A12铝	324	114	0.42	0.002	1.34
45钢	410	280	0.0037	0.47	1.1	
破坏模型	材料	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
	2A12铝	-0.77	1.45	-0.47	0	1.6
45钢	0	1.3	-0.17	0.063	2.8	

尼龙作为一种非金属材料,采用弹塑性模型,其塑性变形采用应力-应变曲线,损伤模型采用柔性损伤(Ductile damage)和剪切损伤(Shear damage),最大塑性失效应变为 $0.6^{[6]}$ 。

3 仿真结果分析

3.1 结构变形分析

干扰弹跌落后的应力云图如图4所示。

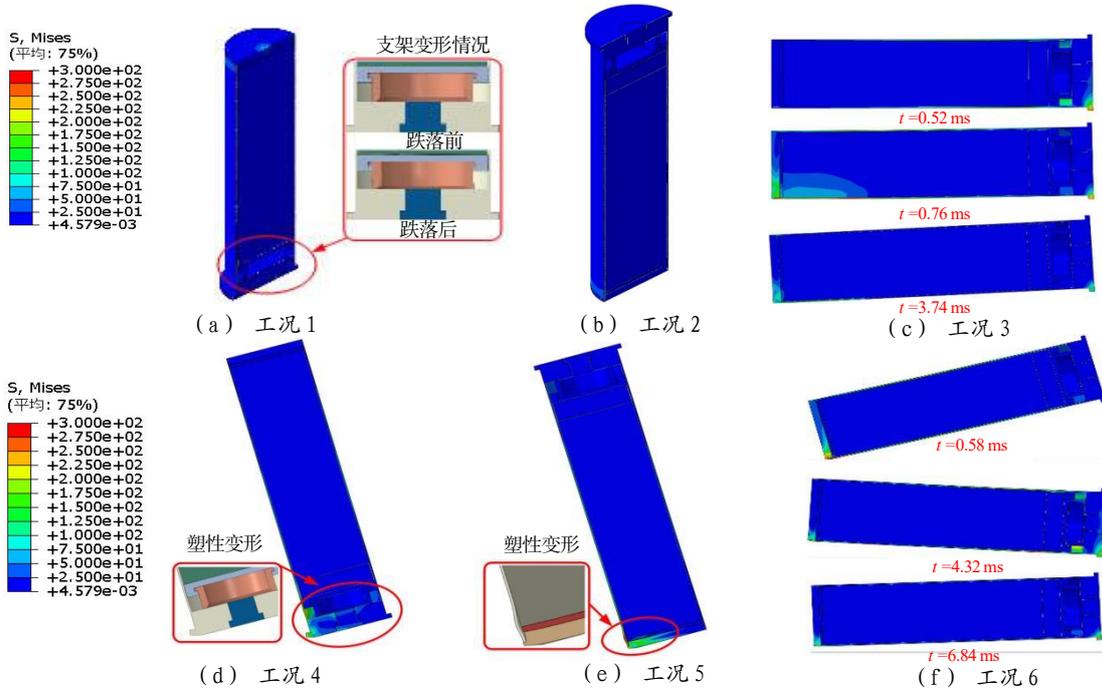


图4 不同跌落工况下的应力云图

Fig.4 Stress cloud diagrams of different working conditions

工况1和工况2为理想状态下的面跌落,弹壳跌落时跌落面整体受力,干扰弹与地面接触时由于惯性干扰弹整体被轴向压缩,随后回弹恢复,弹壳和端盖几乎没有发生塑性变形,最大塑性应变分别为 0.10% 和 0.27% 。但是工况1中的尼龙支架由于支撑面积较小,跌落时的瞬间冲击导致支架底部被瞬时压缩,直径由 18.50 mm 增加到 18.85 mm ,由于其变形较小,所以基本不会影响发射时的同轴度。干扰弹弹底凸沿直径比弹壳直径更大,所以工况3中弹底先接触地面,接着弹体发生翻转,弹体头部与地面发生碰撞,最后干扰弹被弹起。但支架和活塞没有发生明显变形及位移,同样不会影响发射时的同轴度。

真实的勤务环境中,干扰弹与地面接触的前一瞬间普遍为倾斜状态,所以工况4~6更符合实际工作中的跌落。工况4~5中的干扰弹跌落后被竖直弹起,工况6跌落时弹体头部先着地,接着发生翻转,弹体底部着地,随后再次翻转,头部再次与地面接触,最后被弹起。弹壳和端盖在着地点周围出现明显塑性变形,

最大塑性应变分别为 27.12% 、 24.87% 和 24.42% ,明显大于工况1和工况2,但是其塑性变形的区域较小,并不影响弹壳和端盖整体结构的完整性。综上,干扰弹从 3.5 m 高度以各种工况跌落,弹壳整体结构保持完整,变形主要集中于弹壳着地周围,弹壳没有发生断裂或弯曲变形,所以干扰弹的外形结构满足刚度、强度要求。干扰弹跌落后的内部零部件状态良好,没有发生大范围变形或位移,对发射时的同轴度影响较为有限。

3.2 药柱

点源红外干扰弹跌落时在撞击、摩擦、热等外部激励下会引起药柱局部的应力应变变化,造成药柱局部压力升高、能量积聚,引起化学反应,随后引发爆炸,因此研究MTV药柱在跌落过程中的压力非常必要。6种工况下MTV药柱的压力仿真云图如图5所示,可以看到药柱最大压力为十兆帕级,压力较小,所以跌落过程中药柱不会由于局部压力升高导致意外燃爆。

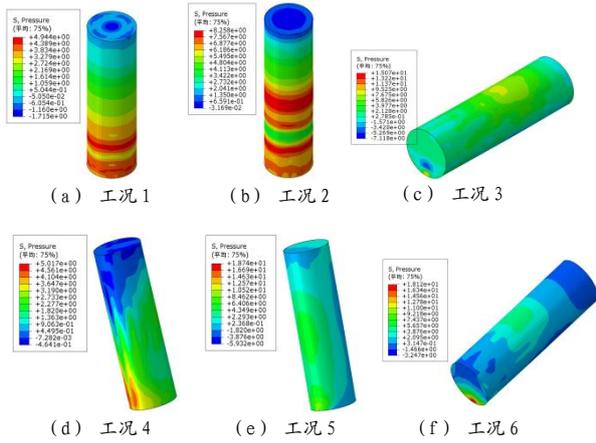


图 5 MTV 药柱的压力云图

Fig.5 Pressure cloud map of MTV charge

3.3 冲击响应分析

底部的电点火具与内部的红外药柱是点源红外干扰弹的敏感部件，跌落时这两个部位最容易引起意外发射或燃爆，需对这两个部件在不同工况下跌落的动力学响应进行详细分析。干扰弹跌落时的冲击加速度时间历程曲线如图 6 所示。

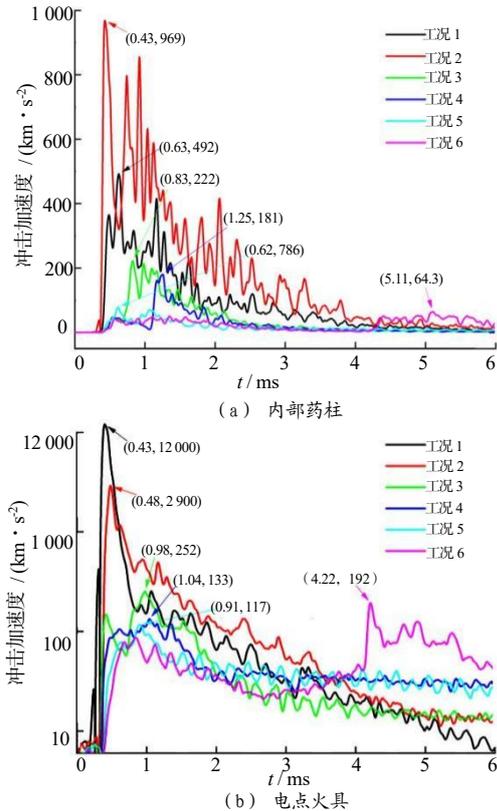


图 6 干扰弹跌落时的冲击加速度时间历程曲线

Fig.6 Impact acceleration curve during the jamming projectile descent

由图 6 可见，干扰弹在接触地面时冲击加速度会

瞬间增大。而随着干扰弹被弹起，冲击加速度快速衰减至较低水平。这表明跌落时的冲击加速度是一个瞬间冲击，峰值高，但作用时间极短，峰值基本上会出现在接触到地面后的 1 ms 以内。由于干扰弹整体为弹塑性体，应力波在弹内来回传播，所以冲击加速度时间历程曲线在衰减阶段会出现来回波动。

工况 1 和工况 2 跌落时为面受力，其加速度峰值明显高于其他工况。这是因为点着地时弹壳着地点处发生了塑性变形，具有明显的缓冲作用，有效降低了加速度峰值。这表明干扰弹在实际勤务工况中的冲击加速度要低于理想工况的冲击加速度。

上述工况下内部药柱的冲击加速度峰值范围为 6 430 g~96 900 g，电点火具的冲击加速度峰值范围为 13 300 g~1 200 000 g。这是因为药柱被填装在弹壳内部，而电点火具通过螺纹固定在弹壳底部，直接与跌落面接触，所以内部药柱的冲击加速度峰值均小于同一工况下电点火具的峰值。但是两者冲击加速度峰值的发生时刻基本均处于干扰弹与地面接触的时间内，发生时刻相差不大，出现的先后顺序主要与跌落方向相关。这表明干扰弹跌落时不同位置的冲击加速度并不相同，跌落方向会显著影响不同位置处的跌落动力学特性。

干扰弹跌落时，地面会对干扰弹施加一个反作用力，地面反作用力随时间变化曲线如图 7 所示。

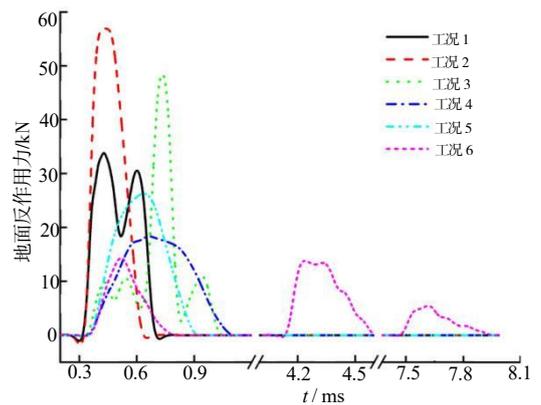


图 7 地面反作用力时间历程曲线

Fig.7 Ground reaction force curve

工况 1 中尼龙支架发生的塑性变形使得地面反作用力出现 2 个波峰，而工况 6 出现时间间隔较长的波峰是由于干扰弹被弹起后出现翻转，弹头和弹底依次

着地。

地面反作用力峰值基本与加速度峰值出现的时刻相同,但与冲击加速度曲线不同的是地面反作用力曲线是一条平滑连贯的曲线。干扰弹跌落时由于惯性接触地面的弹壳局部被不断压缩,地面反作用力不断上升,出现弹性塑性形变。而随着干扰弹向下的跌落速度降低为0,弹壳的变形及地面反作用力达到最大值。随后弹性形变恢复,干扰弹开始被反方向弹起,地面反作用力开始卸载,而当干扰弹弹起后地面反作用力降为零。

4 结论

本文通过试验和有限元仿真的方法对机载点源红外干扰弹跌落的动力学特性开展了研究,得到结论:

(1) 机载点源红外干扰弹从3.5 m高度跌落后弹体整体结构保持完整,无大范围变形,仅有弹壳出现磕碰痕迹,干扰弹的外形结构满足刚度、强度要求,并且整弹跌落后未作用,没有自行发射或燃爆。

(2) 干扰弹跌落后药柱没有出现断裂损伤,仅有个别尼龙零部件会发生塑性变形,但是内部零部件没有发生大范围变形和位移,甚至对发射时的同轴度影响较为有限。

(3) 跌落时的冲击加速度是一个瞬间冲击,峰值高,不同工况下药柱的冲击加速度峰值范围为6 430 g~96 900 g,电点火具的为13 300 g~1 200 000 g,但作用时间极短。干扰弹在实际勤务工况中的冲击加速度要低于理想工况下面跌落的冲击加速度,并且跌落方向和零部件位置会影响该点冲击加速度的大小。

参考文献:

[1] 过凯,吴越,王亮,等. 机载点源红外诱饵运动特性仿真研究[J]. 光电技术应用,2021,36(3): 53-61.
 [2] 赵非玉,王亮,过凯,等. 点面复合红外诱饵空中动态散布特性仿真及使用研究[J]. 红外与激光工程,2023,52(4):

40-48.

- [3] 王冰,马冬晓,陈宗胜,等. 葱对Pb₃O₄/Mg/PTFE红外诱饵剂远红外辐射性能的影响[J]. 火工品,2018(6): 25-29.
 [4] 孙华为,周俊,冯颖. 基于红外干扰弹特征的目标综合复杂度算法研究[J]. 光电技术应用,2022(3): 43-47.
 [5] 高成金,高贺松,宋金雷. 军机机上火工品适航性研究[J]. 火工品,2021(1): 56-60.
 [6] Furmanek W, Kijewski J J. Constructional aspects for safe operation of 120 × 570 mm ammunition [J]. Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpiecze ń stwa,2021,4(46): 83-104.
 [7] 金路轩,闻泉,王雨时,等. 裸态平底榴弹底向下垂直跌落时弹丸和引信的冲击特性[J]. 兵工学报,2022,43(2): 260-272.
 [8] 米巧丽,卢明章,李本威,等. 发射装药老化对于跌落安全性的影响[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(2): 8-14.
 [9] 谢涛,吕红超,郝陈朋. 基于LS-DYNA的导弹战斗部跌落安全性分析[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(8): 26-29.
 [10] 程翔,黄少波,唐顺厚,等. 某点火器点火药柱耐冲击性分析与试验研究[J]. 火工品,2020(1): 10-13.
 [11] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社,2004.
 [12] 白玉帅,岳帅,林轻,等. 动能毁伤弹丸撞击多层靶板的区域性毁伤特性研究[J]. 弹道学报,2021,33(03): 75-81,96.
 [13] 赵敬泽,赵非玉. 镁/聚四氟乙烯/氟橡胶(MTV)药柱环境适应性分析[J]. 光电技术应用,2018,33(04): 22-24,57.
 [14] Akram S, Jaffery S H I, Khan M, et al. Numerical and experimental investigation of Johnson-Cook material models for aluminum (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(9): 1-14.
 [15] Sherov K T, Sikhimbayev M R, Sherov A K, et al. Mathematical modeling of thermos frictional milling process using ANSYS WB Software[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 47 (2): 24-33.
 [16] 程申申,陶如意,王浩,等. 弹丸不同结构尼龙弹带挤进过程的阻力特性[J]. 兵工学报,2021,42(9): 1 847-1 857.