# 某带泡沫护帽的筒装导弹跌落仿真分析

### 高碧祥,徐诗峰,张镇麟,廖波,周建平,郭敏华

(四川航天电子设备研究所,成都 610100)

摘要:目的 验证某肩扛发射的筒装导弹在 0.5 m 跌落工况下聚氨酯泡沫护帽的缓冲效能。方法 对筒弹 进行 0.5 m 无损跌落试验,发现挡销块被剪切破坏,通过固定在弹体上的加速度传感器,得到弹体加速 度数据;然后通过有限元仿真软件 Ansys/LS-DYNA 模拟筒装导弹的跌落过程,分别得到挡销块应力分 布及弹体加速度数据。结果 挡销块某区域应力超过其材料强度极限,从而发生单元失效,与试验现象 一致;弹体在弹轴方向上的加速度最大值为 200g,与试验值 183g 的误差为 9.3%,表明建立的仿真模型 合理有效。根据此模型对提出的 2 种改进优化方法的有效性进行了仿真验证。结论 通过试验与仿真对 比建立合理有效的有限元仿真,验证了更改挡销块材质及加厚护帽,均可满足在 0.5 m 跌落环境下的强 度要求,为产品下一步的改进优化提供了有效建议,可提升产品的研制效率,节约试验成本。 关键词:泡沫护帽;筒装导弹;跌落试验;仿真分析

中图分类号:TJ765.4 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2020)09-0149-06 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.09.022

#### Drop Simulation Analysis of the Barreled Missile with Foam Helmet

GAO Bi-xiang, XU Shi-feng, ZHANG Zhen-lin, LIAO Bo, ZHOU Jian-ping, GUO Min-hua

(Electronic Equipment Research Institute of Sichuan Aerospace, Chengdu 610100, China)

**ABSTRACT:** The work aims to verify the buffer effectiveness of shoulder-fired barreled missile's polyurethane foam helmet in 0.5 m drop test. The test show that the stopper pin block was shear failure and the test obtained the missile acceleration data by acceleration sensor fixed on the projectile. Then, the drop process was simulated by the finite element simulation software Ansys/LS-DYNA to respectively obtain the stress distribution of stopper pin block and the acceleration data of missile body. The stress in some area of the stopper pin block exceeded its material strength limit, resulting in the element failure, which was consistent with the test phenomenon. The maximum acceleration of missile body in the axis direction was 200g, with a deviation of 9.3% compared with the test value (183g), which indicated that the established simulation model was reasonable and effective. According to this model, the effectiveness of the two improved optimization methods was verified by simulation. Finally, a reasonable and effective finite element model is built through the comparison of experiment and simulation, and it is verified that changing the block material and thickened helmet can meet the strength requirement of 0.5 m drop, so as to provide effective suggestions for the further optimization of the product, improve the product development efficiency and save the test cost.

KEY WORDS: foam helmet; barreledmissile; drop test; simulation analysis

某肩扛发射的筒装导弹在运输和行军等过程中, 不可避免地会受到如跌落、碰撞等外界因素的影响, 为保证导弹在受到瞬时强冲击下的产品强度及安全性,在导弹发射筒前后两端设计具有缓冲吸能功能的

收稿日期:2019-07-31 作者简介:高碧祥(1991—),男,硕士,工程师,主要研究方向为结构总体设计。 泡沫护帽,且通过 0.5 m 无损跌落试验对发射筒护帽的缓冲效能及弹体挡销块的强度进行验证。

聚氨酯泡沫塑料、聚苯乙烯泡沫塑料、聚丙乙烯 泡沫塑料、聚乙烯泡沫塑料、成型橡胶塑料等缓冲材 料均大量用于导弹的包装<sup>[1-4]</sup>。聚氨酯泡沫是一种合 成材料,其相对密度较小、比强度高、化学稳定性好, 具有优异的弹性性能及防水、防震、吸能的优点,且 价格较低,易于成型<sup>[5]</sup>,故发射筒的前后护帽材料均 选用聚氨酯泡沫塑料。

运用显示动力学有限元分析软件 Ansys/LS-DYNA 来模拟仿真筒弹的跌落过程,并将仿真结果与 试验结果进行对比,从而评估发射筒护帽的缓冲吸能 性能,对后续筒弹的改进和优化提供一定依据。

## 1 跌落试验

试验样品为某肩扛式筒装导弹,其中发射筒为正 式品状态,弹体为模装弹,即弹体仅保留结构外形及 质量特性与正式产品一致。试验设备包括记录仪、三 轴冲击传感器、试验延长电缆、直流稳压电源及 0.5 m 跌落工装,其中记录仪和传感器固定安装于弹体内 部,用于采集和保存试验数据;试验延长电缆将外部 直流稳压电源提供给弹体内部记录仪,保证记录仪在 试验过程中能正常工作。

根据 GJB 5895.21—2006《反坦克导弹试验方 法》<sup>[6]</sup>中的相关要求,对该试验样品进行 0.5 m 无损 跌落试验。在空旷平整的水泥地面,将试验样品竖直 垂吊于跌落工装上,其底部距离水泥地面 0.5 m,通 电后释放吊绳,使样品自由落体。试验后发现弹体从 发射筒中脱落。将导弹与发射筒分离后检查弹体表 面,发现挡销块断裂(发射筒上用于固定弹体的零 件),观察断裂口,可以判断是受到剪切破坏,挡销 块断裂情况见图 1。





通过测试计算机读取弹体记录仪内的跌落试验数据,试验数据处理后见图 2。导弹在弹轴方向上的最大加速度峰值达到-183g,在达到峰值后存在较大波动,这是由于挡销块被破坏后,弹体二次跌落后形成的。



图 2 跌落试验弹体在弹轴方向上的加速度曲线 Fig.2 Missile body acceleration curve in the axis direction during the drop test

# 2 跌落仿真分析

LS-DYNA 是世界上最著名的以显示动力学为 主、隐式动力学为辅的通用非线性有限元仿真软件, 能模拟分析现实世界中的各类复杂问题<sup>[7]</sup>。采用 Ansys/LS-DYNA 软件对该筒装导弹进行 0.5 m 跌落仿 真分析,复现跌落中出现的相关问题并提出改进建议。

## 2.1 建立有限元模型

为提高计算效率,将导弹模型进行简化处理,仅 保留挡销块及安装固定挡销块的舱段,其余舱段简化 为等效质量的连接环,保证质心位置与实际产品保持 一致;同时,由于产品对称,使用 1/2 仿真模型进行 分析。利用 Pro/E 软件建立简化后的三维模型,主要 由发射筒、前护帽、后护帽、挡弹销、等质量连接环 1、舱段、等质量连接环 2 和挡销块构成,导弹模型 见图 3;然后将模型导入 Hypermesh 软件中进行六面 体网格划分,有限元模型见图 4;最后导出 LS-DYNA 可识别计算的 K 文件。

## 2.2 模型材料参数

文中前后护帽的材料采用低密度聚氨酯泡沫塑料,密度为 0.171 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 1000 MPa,材料模型选用\*Low Density Foam,其应力-应变曲线<sup>[8—14]</sup>见图 5。









图 5 低密度聚氨酯泡沫塑料应力应变曲线 Fig.5 Stress-strain curve of low density polyurethane foam

筒弹主要零部件材料参数见表 1,其中等效连接环 1、等效连接环 2 和地面设置为刚体 (\*rigid)。

## 2.3 跌落仿真工况

为了节省时间,提高计算效率,忽略跌落过程。 利用自由落体速度计算公式 $v = \sqrt{2gh}$ ,将 0.5 m 跌 落过程等效成初速度为 3.13 m/s 的跌落,即直接设置 整个筒弹模型的速度为 3.13 m/s,且在距离后护帽 0.01 cm 处添加刚性墙(\*rigidwall\_planar)。因为跌落 工况复杂,无法准确预知各个零件与地面之间的接触 关系,所以各零件与地面采用自动单面接触。跌落碰 撞历程极短,根据多次计算经验,将仿真计算时间设 置为 0.8 ms。

# 3 仿真结果及分析

利用 Ansys/LS-DYNASolver 进行计算求解,将 计算得到的结果 d3plot 提交于 LS-PrePost 软件,查看 并提取所需的仿真计算结果。

整个跌落过程中挡弹销受力最严峻,其最大应力 达到 500 MPa 左右,强度满足要求,但超过了其屈服 极限,即在此跌落工况中,挡弹销会产生塑性变形, 见图 6。

表 1 简弹主要零部件材料参数 Tab.1 Parameters of major parts of barreled missile

<b>5 1</b>						
部件名称	材料	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	断裂伸长率/%
发射筒	碳纤维	3.35	0.2	230	350	1.5
挡弹销	钢	7.83	0.28	207	355	16
挡销块	镁合金	2.4	0.35	45	235	6
舱段	镁合金	2.4	0.35	45	235	6
等效连接环 1	钢	736.36	0.28	207		
等效连接环 2	钢	689.9	0.28	207		
地面	钢	7.83	0.28	207		



Fig.6 Maximum stress in the drop process

舱段最大受力云图及提取舱段中受最大应力单 元的应力曲线见图 7。从图 7 可以看出,与挡销块接 触配合的表面受力最大,应力达到了 260 MPa,即 舱段强度满足跌落要求,仅局部产生微小的塑性 变形。

对比图 8 不同时刻的应力云图,可以看出挡销块 中与挡弹销配合接触的单元发生失效,即此处的最大 应力超过了材料的强度极限产生了破坏。提取的部分 失效单元的应力曲线见图 9, 明显可以看出这些单元 在达到强度极限 305 MPa 的瞬间,应力跌至 0。

跌落试验中,加速度传感器固定于弹体内部,记 录值即认为是舱段加速度值。作为对比,在仿真结果 中提取舱段在跌落方向上的加速度值,见图 10。舱 段的最大加速度值为 2000 m/s<sup>2</sup>,即 200g。对比试验 最大值 183g,误差仅为 9.3%,误差在合理范围内, 试验加速度值与仿真加速度值对比见图 11。



图 7 舱段最大应力 Fig.7 Maximum stress of the missile body





Fig.9 Stress curve of part of failure elements in the stopper pin block



图 10 舱段在弹轴方向的加速度曲线 Fig.10 Acceleration curve of the missile body



图 11 弹体在弹轴方向上加速度试验值与仿真值对比 Fig.11 Comparison between the test value and the simulation value of the missile body's acceleration in the axis direction

通过对比舱段加速度试验值与仿真值、对比跌落 仿真中挡销块的失效现象与跌落试验中挡销块的断裂 现象,可认为建立的全弹跌落有限元模型合理有效。

# 4 结构改进优化分析

简弹结构强度应满足 0.5 m 无损跌落试验要求, 可从增加挡销块结构强度和加强护帽缓冲性能 2 个 方面进行改进优化。依据现有建立的仿真模型对改进 结构进行分析,根据分析结果提出有效建议,改进优 化简弹结构的环境适应性。 4.1 挡销块强度

在现有模型中,仅改变挡销块的材料属性,赋予 其钢性材料,增加挡销块强度,其余条件均保持不变 再进行仿真计算。

挡销块受到的最大应力达到 500 MPa,小于钢材 的强度极限,说明当改变挡销块材料,增加其强度, 即能达到 0.5 m 无损跌落强度要求,见图 12。在更改 挡销块材料属性后,舱段加速度峰值下降到 1500 m/s<sup>2</sup>,即 150g,说明在挡销块不被破坏的提前下,筒 弹在 0.5 m跌落工况下的力学环境有所改善,见图 13。



图 12 钢材挡销块的最大应力 Fig.12 Maximum stress of the steelstopper pin block

#### 4.2 护帽缓冲性能

在现有模型中,将护帽厚度增加 2 cm,改善护 帽的缓冲性能,其余的条件均保持不变,再进行仿真 计算。

挡销块最大应力仅为 275 MPa,小于镁合金强度 极限,说明护帽加厚后,缓冲效能得到提高,弹体受 到的冲击能量减少,挡销块强度满足 0.5 m 跌落要求, 见图 14。舱段加速度峰值降至 800 m/s 以下,即 80g, 说明加厚护帽的方法对降低跌落冲击能量,提高筒弹 可靠性,更加有效,见图 15。



#### 图 13 舱段在弹轴方向的加速度曲线

Fig.13 Acceleration curve of the missile body in the axis direction









# 5 结语

某肩扛发射的筒装导弹在进行 0.5 m 无损跌落试 验后,发现弹身的挡销块被剪切破坏,通过安装加速 度传感器得到弹身加速度试验值。利用三维建模软件 Pro-E 及 Ansys/LS-DYNA 有限元软件建立该筒弹跌 落的有限元仿真模型,复现了筒弹在 0.5 m 跌落环境 下挡弹销的损坏现象,且仿真加速度值与试验值基本 吻合,验证了该有限元模型在模型建立、材料参数的 选择及边界条件上的施加方面,均符合实际情况。在 此模型基础上分别进行挡销块材料参数更改及增加 护帽厚度的仿真分析,可以看出均能满足 0.5 m 跌落 试验的结构强度要求,且加大护帽厚度的改进方法对 减少冲击加速度、增强结构的可靠性更为有效。

在产品设计过程中引入有限元仿真分析,再与试 验对比验证其可行性和有效性后,可通过更改仿真模 型中某些参数来提供产品改进优化的方法,保证产品 质量,提高研制效率,节约试验费用。

#### 参考文献:

- 邱莎莎,蔡建,张恒翔.导弹缓冲包装设计与选材
   [J]. 包装工程, 2011, 32(9): 44—46.
   QIU Sha-sha, CAI Jian, ZHANG Heng-xiang. Missile Cushion Packaging Design and Material Selection[J].
   Packaging Engineering, 2011, 32(9): 44—46.
- [2] 陈马旭,乐贵高.带泡沫缓冲的导弹跌落仿真[J].兵 工自动化,2014(3):34—35.
  CHEN Ma-xu, LE Gui-gao. Simulation of Missile Drop with Foam Cushions[J]. Ordnance Industry Automation, 2014(3):34—35.
  [3] 申展,陈东,罗俊杰.聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击
- [5] 中展,陈示,多後然: 家乙烯泡沫缓冲东统跃落冲击 过载仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 128—131. SHEN Zhan, CHEN Dong, LUO Jun-jie. Simulation and Analysis of Dropping Impact Acceleration of Polyethylene Foam Buffer System[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 128—131.

- [4] 雷鹏, 付志强, 张莉伟, 等. 基于 Johnson-cook 本构 模型的 EPE 包装跌落冲击模拟[J]. 包装工程, 2018, 39(19): 70—74.
  LEI Peng, FU Zhi-qiang, ZHANG Li-wei, et al. EPE Package Drop Impact Simulation Based on Johnson-cook Constitutive Model[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(19): 70—74.
- [5] 张云华,李珊,刘冠玉,等. 红外镜头跌落冲击仿真 及缓冲包装方法选择研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24):133—137.
  ZHANG Yun-hua, LI Shan, LIU Guan-yu, et al. Dropping Simulation and Selecting of Cushion Packaging Methods for a Infrared Lens[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24):133—137.
- [6] GJB 5895.21—2006,反坦克导弹试验方法[S].
- GJB 5895.21—2006, Test method of Anti-tank missile[S]. [7] 李裕春,时党勇,赵远. Ansys 11.0/LS-DYNA 基础理论与
- 工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2008,40—53. LI Yu-chun, SHI Dang-yong, ZHAO Yuan. Ansys 11.0/LS-DYNA Theoryand Practice[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008: 40—53.
- [8] 刘瑛. 泡沫塑料可压缩的塑性力学性能研究[D]. 天 津: 天津大学, 2006: 30—37.
   LIU Ying. Investigations on Compressible Plastic Mechanical Properties of Foam Plastic[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006: 30—37.
- [9] 朱吕民,刘益军.聚氨酯泡沫塑料[M].北京:化学工 业出版社,2005:553—554.
   ZHU Lyu-min, LIU Yi-jun. Polyurethane Foam[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 553—554.
- [10] 林玉亮,卢芳云,王晓燕,等.低密度聚氨酯泡沫压缩 行为实验研究[J]. 高压物理学报,2006,20(1):88—92.
  LIN Yu-liang, LU Fang-yun, WANG Xiao-yan, et al. Experimental Study of the Compressible Behavior of Low-Density Polyurethane Foam[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(1): 88—92.
- [11] 卢子兴,王仁,黄筑平. 泡沫塑料力学性能研究综述
  [J]. 力学进展, 1996, 26(3): 306—323.
  LU Zi-xing, WANG Ren, HUANG Zhu-ping. Summary of Research on Mechanical Properties of Foam Plastics[J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(3): 306—323.
- [12] 卢子兴,朱汪鲲,寇长河,等.聚氨酯泡沫塑料的强度与断裂韧性[J]. 力学学报, 2002, 32(5): 627—631.
  LU Zi-xing, ZHU Wang-kun, KOU Chang-he, et al. Investigation on the Fracture Properties of Polyurethane Rigid Foam Plastics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2002, 32(5): 627—631.
- [13] 卢子兴,谢若泽,田常津.聚氨酯泡沫塑料剪切力学性能的研究[J].北京航空航天大学学报,1999,25(5):561—564.
  LU Zi-xing, XIE Ruo-ze, TIAN Chang-jin. Investigation into Shear Mechanical Properties of PUR Foamed Plastics[J]. Journal Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(5):561—564.
  [14] GOODS S H, NEUSCHWANNGER C L, WHINNERY
- [14] GOODS S H, NEUSCHWANNGER C L, WHINNERY L L, et al. Mechanical Properties of a Particle-strengthened Polyurethane Foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74(11): 2724—2736.