

文章编号: 1003-1480 (2024) 02-0041-05

双环境力耦合作用下小口径弹药引信火工品装药的力学响应

王光宇¹, 王雨时¹, 陈建宇¹, 王嘉伟¹, 罗定²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京, 210094; 2. 重庆望江工业有限公司, 重庆, 400071)

摘要: 为探究轴向过载和由高转速引起的离心过载耦合作用下小口径弹药引信火工品装药的力学响应, 采用 ANSYS 软件对实际发射情况和简化情况下药剂最大等效应力和最大静水压力的变化进行了数值模拟研究。结果表明, 采用静态等效方法分析时, 离心过载对药剂最大等效应力影响很小, 基本可以忽略不计, 但其对最大静水压力有一定影响; 当药剂处于弹性变形阶段时, 其最大等效应力基本由最大轴向过载决定, 而由高转速产生的离心过载和轴向过载曲线周期对最大等效应力的影响很小; 最大等效应力、最大静水压力均与最大轴向过载呈明显的线性关系。

关键词: 引信火工品; 小口径弹药; 力学响应; 数值模拟; 轴向过载; 离心过载

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.008

The Mechanical Response for the Explosive in Small-Caliber Projectile Fuze Initiator under the Coupling of Dual Acting Forces

WANG Guang-yu¹, WANG Yu-shi¹, CHEN Jian-yu¹, WANG Jia-wei¹, LUO Ding²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2. Chongqing Wangjiang Industry Co. Ltd., Chongqing, 400071)

Abstract: In order to investigate the mechanical response for the explosive in small-caliber projectile fuze initiator under the coupling effect of axial overload and centrifugal overload caused by high rotational speed, ANSYS software was used to numerically simulate the variation of the maximum effective stress and maximum hydrostatic pressure of the explosive under actual launch and simplified conditions. The results show that when using the static equivalent method for analysis, the effect of centrifugal overload on the maximum effective stress of the explosive is very weak and can be basically ignored, but it has a certain effect on the maximum hydrostatic pressure; When the explosive is in the stage of elastic deformation, its maximum effective stress is basically determined by the maximum axial overload, while the centrifugal overload induced by high rotational speed and axial overload curve period have little effect on the maximum effective stress; There is a clear linear relationship between maximum effective stress, maximum hydrostatic pressure, and maximum axial overload.

Key words: Fuze initiator; Small-caliber projectile; Mechanical response; Numerical simulation; Axial overload; Centrifugal overload

小口径弹药引信中的火工品在膛内发射过程中面临着高轴向过载(可高达 66 000 g)、由高转速带来的离心过载(转速可达 7 650 rad·s⁻¹)、弹带挤进等带来的径向震动等严酷的力学环境, 上述耦合力学环境

收稿日期: 2023-08-29

作者简介: 王光宇(1985-), 男, 副教授, 主要从事引信总体技术研究。

基金项目: 装备预研共用技术项目; 国家自然科学基金青年基金项目(No.12202203); 江苏省自然科学基金青年基金项目(No. BK20210319)。

引用本文: 王光宇, 王雨时, 陈建宇, 等. 双环境力耦合作用下小口径弹药引信火工品装药的力学响应[J]. 火工品, 2024(2): 41-45.

会对火工品的发射安全性造成严重威胁。因此，在火工品设计、应用过程中必须充分考虑耦合力学环境的影响。目前，火工品发射安全性研究的常用方法包括锤击试验法、靶场试验法、数值模拟法。其中，锤击试验法和靶场试验法成本高、周期长，具有一定危险性，并且需要设备、场地、测试仪器的支持。数值模拟法则可弥补试验法的上述缺点。Bennett 等^[1-2]提出了一种适用于 PBX-9501 的简化的粘弹性本构模型 (Visco-SCRAM 模型)，可较好地模拟 PBX-9501 在非冲击作用下的力学和温度响应。邓琼等^[3]通过霍普金森压杆试验，发现高过载导致火工品破坏的加速度临界值不仅与加速度幅值有关，还与其脉冲宽度有很大关系。王娜^[4]研究发现弹丸动态着靶时的火工品受力情况不同于静态受力情况，并采用霍普金森压杆测量了冲击波加载下火工品组件上的动态力学响应。刘虎^[5]、麻宏亮等^[6]通过分离式霍普金森压杆、空气炮研究了高过载冲击条件下半导体桥火工品的损伤过程及力学响应。M Liu 等^[7]采用改进的 Visco-SCRAM 模型预测了奥克托今基/三氨基三硝基苯基聚合物粘结炸药在复杂应力状态下的力学响应。李计林等^[8]对侵彻过程中弹载火工品的过载特性进行了数值模拟研究。上述研究主要是针对典型炸药和侵彻弹弹载火工品在高过载下的力学响应，未涉及小口径弹药引信火工品。此外，对于高过载和由高转速带来的离心过载所形成的耦合力学环境对火工品安全性的影响研究也很少。在工程实践中，对小口径弹药引信火工品发射安全性进行计算时，也常常忽略离心过载，该简化所造成的影响一直缺乏定量分析和计算。

针对上述问题，本文分别对实际发射情况和简化情况下，某小口径弹药引信火工品装药在轴向过载和离心过载耦合作用下的力学响应进行了数值模拟分析，以为小口径弹药引信火工品的发射安全性设计提供参考。

1 模型建立和网格无关性验证

1.1 模型建立

某小口径弹药引信火工品由铝片、铝壳和药剂组

成，铝片和铝壳均为纯铝材料，安装在不锈钢底座上，其结构如图 1(a) 所示。火工品及底座为轴对称结构，发射过载作用于对称轴方向。在 ANSYS LS-DYNA 中建立相应的轴对称有限元模型，如图 1(b) 所示。仿真过程中约束底座底部节点的径向位移。模型中各零件材料均采用理想弹塑性本构模型，不考虑材料的塑性强化等效效应，模型参数如表 1 所示。

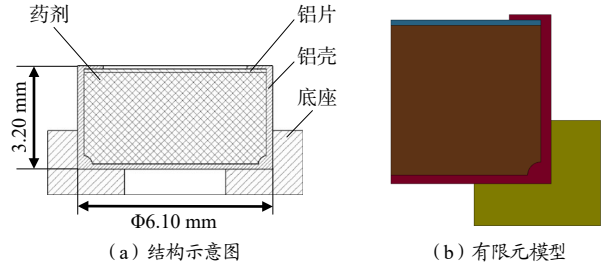


图 1 某火工品结构示意图及相应有限元模型

Fig.1 Scheme of structure and corresponding finite element model of an initiator

表 1 材料本构模型参数

Tab.1 Parameters of constitutive models of materials

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
纯铝	2 710	72	0.320	40
某药剂	2 700	1.013	0.350	200
不锈钢	7 850	207	0.269	241

1.2 网格无关性验证

为确定单元尺寸对仿真结果的影响，进行网格无关性分析。将药剂的单元尺寸分别设为 0.2, 0.1, 0.05, 0.025 mm。根据等效原理，仿真过程中对所有零件同时施加恒定的 66 000 g 轴向过载和 7 650 rad·s⁻¹ 转速下的离心过载，以此模拟发射过程中最大轴向过载和离心过载耦合作用下的力学环境。当药剂单元尺寸为 0.025 mm 时，药剂中的等效应力和静水压力分布如图 2 所示。

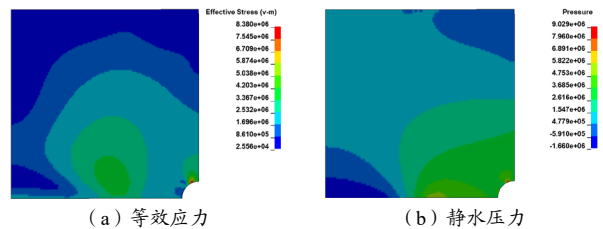


图 2 耦合作用下药剂等效应力和静水压力分布 (药剂单元尺寸为 0.025 mm)

Fig.2 Distribution of effective stress and hydrostatic pressure of the explosive under coupling effect (element edge length is 0.025 mm)

选取药剂底部中心点为参考点。计算不同单元尺寸下参考点处的等效应力和轴向位移，结果如表 2 所

示。由表2可见, 药剂单元尺寸对仿真结果影响较大。当药剂单元尺寸为0.05 mm时, 参考点处的等效应力和轴向位移值与单元尺寸为0.025 mm时的仿真结果分别相差-4.9%、2.8%, 因此, 可以认为药剂单元尺寸为0.05 mm时仿真结果已经收敛。

表2 不同单元尺寸下参考点处等效应力和轴向位移

药剂单元尺寸/mm	等效应力/MPa	轴向位移/ μm
0.2	0.33	-8.20
0.1	1.45	-8.79
0.05	1.93	-8.85
0.025	2.03	-8.61

2 离心过载对火工品装药力学响应的影 响

在进行小口径弹药引信火工品发射安全性校核时, 常采用等效原理, 将发射过程中的最大过载转换为恒定的惯性力作用于研究对象上, 并忽略离心过载的作用, 这种分析方法可认为是静态的。为分析这种简化对最终计算结果的影响, 分别对恒定的66 000 g轴向过载以及66 000 g轴向过载与7 650 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 转速下的离心过载耦合2种力学环境下药剂的最大/最小等效应力和静水压力进行仿真。仿真中药剂单元尺寸设置为0.05 mm, 仿真结果如表3所示。

表3 2种力学环境下药剂最大/最小等效应力和静水压力

仿真工况	最大等效应力/MPa	最大静水压力/MPa	最小等效应力/MPa	最小静水压力/MPa
66 000 g 轴向过载+7 650 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 转速下的离心过载	6.41	5.17	0.033	-1.48
66 000 g 轴向过载	6.40	5.43	0.094	-1.47

由表3可见, 在当前模型中, 离心过载对药剂最大等效应力的影响很小, 基本可以忽略; 但其对最大静水压力有一定影响, 这可能是由于该火工品尺寸较小, 且火工品旋转轴与其对称轴重合, 从而导致离心过载对药剂内部应力分布的影响较小。然而, 上述结果并不意味着离心过载对所有火工品的影响都很小。在某些引信中, 可能存在火工品旋转轴与其自身对称轴不重合的情况, 因此, 必须根据具体情况考虑离心过载对火工品安全性的影响。

3 轴向过载和离心过载耦合作用下火工品装药的力学响应

3.1 实际情况

实际发射过程中, 火工品经受的载荷是随时间变化的。假设某小口径弹药引信火工品发射过程中的轴向过载和转速变化如图3所示, 忽略后效期的过载和转速变化, 轴向过载最大值为66 000 g。

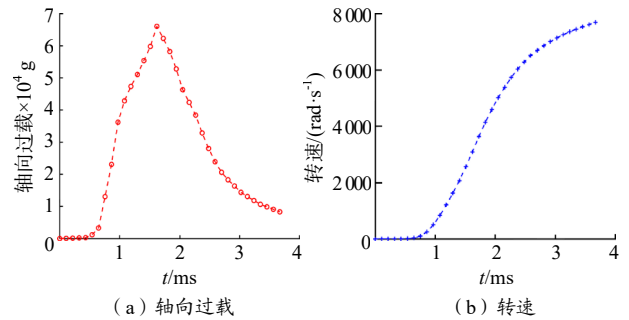


图3 某小口径弹药引信火工品轴向过载和转速变化曲线

将上述双环境力曲线输入模型中, 计算不同时刻药剂内部的等效应力分布, 结果如图4所示。

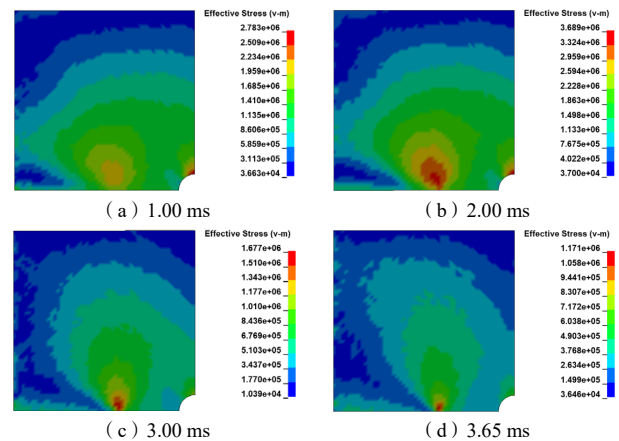


图4 不同时刻药剂内部等效应力分布

轴向过载和离心过载耦合条件下药剂内部最大等效应力和最大静水压力随时间的变化如图5所示。由图5可见, 药剂最大等效应力(4.85 MPa)远低于其屈服应力(200.00 MPa), 表明药剂处于弹性变形阶段。并且, 该最大等效应力也低于表3中的最大等效应力(6.41 MPa), 说明表3中最大等效应力的计算方法偏保守。该火工品装药为混合药剂, 难以确定

其感度、许用应力等参数。若采用类比方法，以黑火药的许用应力（14.70 MPa）为标准，则该火工品在当前仿真工况下处于安全状态。此外，图5中2条曲线的形状与图3(a)轴向过载曲线的形状接近，说明本模型中的药剂内部应力对轴向过载的变化更为敏感。

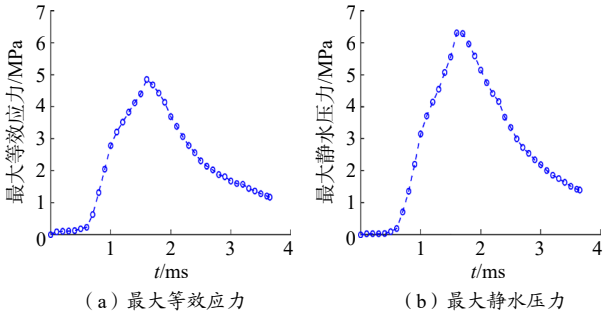


图5 轴向过载和离心过载耦合条件下药剂最大等效应力和最大静水压力随时间的变化

Fig.5 Variation of maximum effective stress and hydrostatic pressure of the explosive under coupling effect of axial overload and centrifugal overload

3.2 简化情况

引信火工品设计过程中常用的强度校核方法是将膛压曲线简化为余弦函数曲线^[4]，据此计算发射过程中作用在引信零部件上的惯性力和力学响应。简化的膛压曲线为：

$$p = \frac{p_m}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_m} t\right) \right] \quad (1)$$

式(1)中： p 为膛压； p_m 为最大膛压； t_m 为最大膛压对应的时刻。

简化的轴向过载为：

$$a_z = \frac{a_m}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_m} t\right) \right] \quad (2)$$

式(2)中： a_z 为轴向过载； a_m 为最大轴向过载。

为研究不同简化环境力耦合作用下火工品的力学响应，进行了多组仿真研究。仿真输入的轴向过载曲线如图6所示。通过将轴向过载曲线对时间进行积分，可得到相应的轴向速度变化曲线。根据膛线缠角，可进一步计算转速随时间的变化曲线。将轴向过载变化曲线和计算得到的转速变化曲线作为输入条件施加至模型，分别得到最大轴向过载恒定($a_m=66\,000\text{ g}$)和轴向过载曲线周期恒定($T=3.2\text{ ms}$)条件下药剂内部最大等效应力和最大静水压力随时间的变化，如图

7~8所示。对数据进行整理，如表4~5所示。

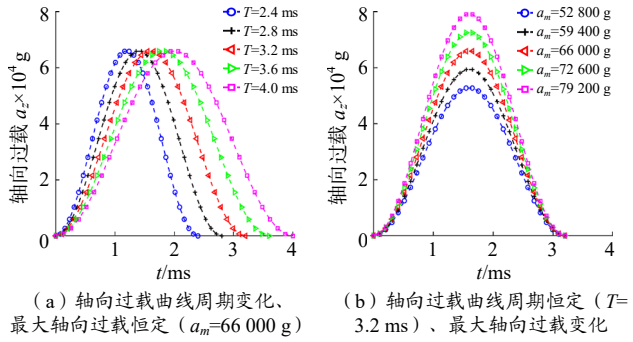


图6 仿真所需轴向过载变化曲线

Fig.6 Axial overload variation curves for simulation input

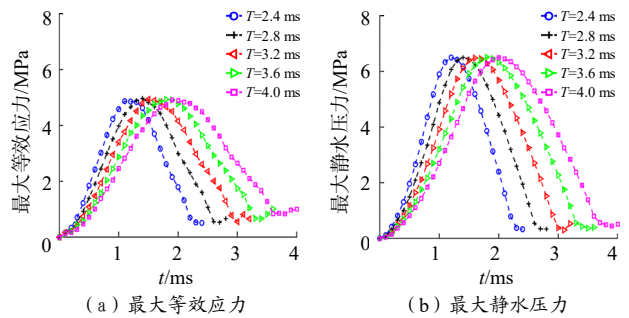


图7 最大轴向过载恒定($a_m=66\,000\text{ g}$)条件下药剂最大等效应力和最大静水压力变化曲线

Fig.7 Curve of maximum effective stress and hydrostatic pressure variation of the explosive under constant maximum axial overload ($a_m=66\,000\text{ g}$)

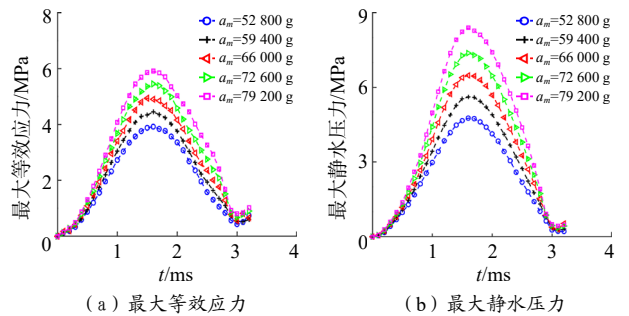


图8 轴向过载曲线周期恒定($T=3.2\text{ ms}$)条件下药剂最大等效应力和最大静水压力变化曲线

Fig.8 Curve of maximum effective stress and hydrostatic pressure variation of the explosive under constant period of axial overload curve ($T=3.2\text{ ms}$)

表4 最大轴向过载恒定($a_m=66\,000\text{ g}$)条件下药剂最大等效应力和最大静水压力数据

Tab.4 Data of maximum effective stress and hydrostatic pressure of the explosive under constant maximum axial overload ($a_m=66\,000\text{ g}$)		
工况	最大等效应力/MPa	最大静水压力/MPa
$T=2.4\text{ ms}$, $a_m=66\,000\text{ g}$	4.870 (-1.4%)	6.497 (0.3%)
$T=2.8\text{ ms}$, $a_m=66\,000\text{ g}$	4.961 (0.4%)	6.497 (0.3%)
$T=3.2\text{ ms}$, $a_m=66\,000\text{ g}$	4.939	6.476
$T=3.6\text{ ms}$, $a_m=66\,000\text{ g}$	4.934 (-0.1%)	6.508 (0.5%)
$T=4.0\text{ ms}$, $a_m=66\,000\text{ g}$	4.906 (-0.7%)	6.495 (0.3%)

表5 轴向过载曲线周期恒定($T=3.2$ ms)条件下药剂最大等效应力和最大静水压力数据

Tab.5 Data of maximum effective stress and hydrostatic pressure of the explosive under constant period of axial overload curve ($T=3.2$ ms)

工况	最大等效应力/MPa	最大静水压力/MPa
$T=3.2$ ms, $a_m=52$ 800 g	3.920 (-20.6%)	4.760 (-26.5%)
$T=3.2$ ms, $a_m=59$ 400 g	4.450 (-9.9%)	5.609 (-13.4%)
$T=3.2$ ms, $a_m=66$ 000 g	4.939	6.476
$T=3.2$ ms, $a_m=72$ 600 g	5.452 (10.4%)	7.374 (13.9%)
$T=3.2$ ms, $a_m=79$ 200 g	5.911 (19.7%)	8.392 (29.6%)

由表4~5可见,由于药剂处于弹性变形阶段,其最大等效应力基本由最大轴向过载决定,而轴向过载曲线周期对最大等效应力的影响很小。

分别对表5中最大等效应力、最大静水压力与最大轴向过载间的关系进行拟合,如图9所示。由图9可见,最大等效应力和最大静水压力均随最大轴向过载的增大而线性增加。因此,就本模型而言,可利用上述结论计算不同轴向过载下药剂的最大等效应力和静水压力。

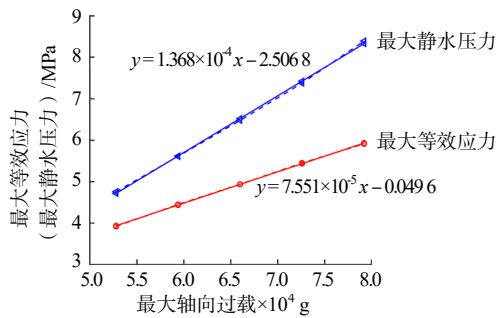


图9 药剂最大等效应力和最大静水压力随最大轴向过载的变化

Fig.9 The variation of maximum effective stress and hydrostatic pressure of the explosive with maximum axial overload ($T=3.2$ ms)

4 结论

(1) 在当前模型中,采用静态等效方法分析时,离心过载对药剂最大等效应力影响很小,基本可以忽略不计,但其对最大静水压力有一定的影响。原因可能是该火工品尺寸较小,且旋转轴与其自身对称轴重合,导致离心过载对药剂内部应力分布影响较小。但

上述结果并不意味着离心过载对所有火工品的影响都很小,必须根据具体情况考虑离心过载对火工品安全性的影响。

(2) 药剂处于弹性变形阶段时,其最大等效应力基本由最大轴向过载决定,而由转速产生的离心过载和轴向过载曲线周期对最大等效应力影响很小。最大等效应力、最大静水压力均与最大轴向过载呈明显的线性关系。可利用上述结论计算不同轴向过载载荷下药剂内最大轴向过载和静水压力。

参考文献:

- [1] J G Bennett, K S Haberman, J N Johnson, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives[J]. J. Mech. Phys. Solids, 1998(46): 2 303-2 322.
- [2] B W Asay, G W Laabs, B F Henson, et al. Speckle photography during dynamic impact of an energetic material using laser-induced fluorescence[J]. J. Appl. Phys., 1997, 82(3): 1 093-1 099.
- [3] 邓琼,李玉龙,索涛,陈春林,常兴敏. 火工品高过载动态力学性能测试方法研究[J]. 火工品, 2007(1): 28-31.
- [4] 王娜. 冲击波加载过程中火工品的受力分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [5] 刘虎,张蕊,付东晓,等. 半导体桥火工品力学过载下的结构失效研究[J]. 火工品, 2012(1): 30-33.
- [6] 麻宏亮, 付东晓, 张蕊, 等. 半导体桥火工品多脉冲力学过载响应[J]. 兵工学报, 2020, 41(2): 176-182.
- [7] M Liu, X Huang, Y Wu, et al. Numerical simulations of the damage evolution for plastic-bonded explosives subjected to complex stress states[J]. Mechanics of Materials, 2019(139): 103 179.
- [8] 李计林, 徐文峥, 王晶禹, 等. 侵彻过程中弹载火工品过载特性数值模拟[J]. 火工品, 2009(6): 30-34.