

doi: 10.7690/bgzdh.2023.07.019

考虑地面特性的箱装弹药跌落响应研究

张鑫磊, 王 婷, 曹庆国, 邹 坚, 马文国, 白一帆
(中国人民解放军 32228 部队 25 分队, 南京 211133)

摘要: 为更好地分析复杂环境中箱装弹药跌落过程的动力学响应, 基于非线性有限元理论建立箱装弹药动力学有限元模型。建立 5 种典型特性地面有限元模型; 仿真计算得到不同地面特性下的箱装弹药关键部件的应力和加速度数据, 分析不同地面特性对应力和加速度的影响。分析结果表明: 该方法可为摔箱弹等事故处理提供参考依据, 也可为弹药包装箱优化提供一种设计思路。

关键词: 箱装弹药; 跌落; 地面特性; 有限元; Abaqus

中图分类号: TJ410.89 **文献标志码:** A

Research on Drop Response of Boxed Ammunition Considering Ground Characteristic

Zhang Xinlei, Wang Ting, Cao Qingguo, Zou Jian, Ma Wenguo, Bai Yifan
(No. 25 Team, No. 32228 Unit of PLA, Nanjing 211133, China)

Abstract: In order to better analyze the dynamic response of ammunition dropping in complex environment, the dynamic finite element model of ammunition was established based on nonlinear finite element theory. 5 kinds of typical ground finite element models were established, and the stress and acceleration data of the key components of the boxed ammunition under different ground characteristics were obtained by simulation calculation, and the influence of different ground characteristics on the stress and acceleration was analyzed. The analysis results show that this method can provide a reference for the accident treatment of ammunition falling box, and also provide a design idea for the optimization of ammunition packing box.

Keywords: boxed ammunition; drop; ground characteristic; finite element; Abaqus

0 引言

弹药是一种平时大量贮存、战时大量消耗且具有一定危险性的军事装备, 当其承受一定的冲击时, 会发生发火或爆炸事故^[1], 给生产、勤务、训练、作战等带来巨大风险隐患。弹药的跌落分析, 一直是弹药领域学者一个重要的研究点, 谷智国等^[1]采用传感器、陀螺仪和计算机辅助测试技术, 对弹药包装跌落测试系统进行了研究; 周彬等^[2]将箱装弹药简化为二自由度系统, 基于 Matlab 软件对跌落过程中的冲击响应进行了分析; 安彦飞等^[3]基于 ADAMS 软件对某导弹惯性敏感装置的跌落进行了仿真分析。随着有限元技术的发展和普及, 各行业特别是包装行业基于有限元法开展了大量跌落仿真分析工作^[4-9], 但在弹药领域, 运用有限元仿真技术对弹药跌落过程所做的研究较少且不充分^[10]; 周彬等^[11]使用 ANSYS/LS-DYNA 软件对箱装弹药跌落过程进行了仿真分析, 获取了引信的冲击加速度值; 高碧祥等^[12]使用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟某筒装导弹跌落过程, 获取关键部件应力和加速度数据,

为产品的改进优化提供依据; 袁惠群等^[13]采用有限元技术, 研究了某弹药箱装结构跌落冲击动力学行为, 并通过试验验证了有限元分析结果的可靠性; 段良雷等^[10]运用 ANSYS/LS-DYNA 软件对某型箱装弹药跌落过程进行了仿真, 并经试验证明仿真结果可信。

由以上文献可知, 采用有限元方法对弹药跌落过程进行仿真分析, 可较为准确地获得弹药及其关键元件的应力和加速度等数据, 且避免了实物试验所存在的费时费事成本高且危险性大等缺点; 同时, 在对弹药跌落过程进行分析时, 均未考虑地面特性对跌落过程弹药响应的影响, 简单将地面看成刚体。随着部队实战化训练的推进, 弹药在勤务保障和实战训练中, 面临的环境越来越复杂多变, 仅仅将地面简化为刚体去分析弹药跌落问题, 势必无法满足实际需求。针对这一问题, 笔者基于非线性有限元理论, 建立某型弹药有限元模型, 在考虑不同地面(土壤)特性的情况下, 对弹药跌落进行仿真分析, 获得了弹药及关键元件的应力和加速度数据。

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-04-22

作者简介: 张鑫磊(1989—), 男, 内蒙古人, 硕士, 工程师, 从事弹药工程研究。E-mail: triston@msn.cn。

1 有限元模型建立

使用 3 维绘图软件 UG 建立箱装弹药模型，如图 1 所示。

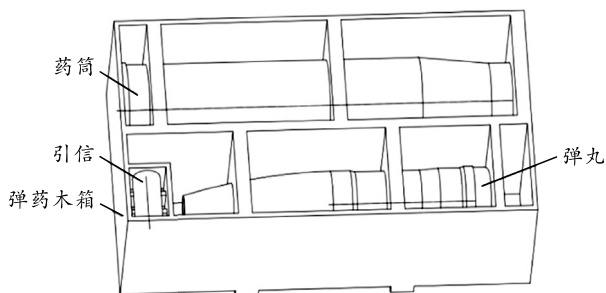


图 1 箱装弹药 3 维模型

为提高有限元仿真效率，对模型做如下假设：

- 1) 忽略圆角、斜角等结构对响应的影响。
- 2) 忽略弹药木箱上的卡扣、装订贴片等结构，将木箱本体、箱盖、弹药卡板视为一个整体，不考虑它们之间的间隙、接触等影响。

3) 对药筒以及引信模型做简化处理，药筒视为空心圆柱体，药筒内的发射药视为实心圆柱体，引信视为实心圆柱体^[10]。

- 4) 忽略弹药各元件与弹药箱之间的接触间隙。

将建立好的 3 维模型导入有限元仿真软件 Abaqus 中，进行材料属性添加、网格划分、接触设置、载荷及边界条件添加等工作。

为获取更为准确的分析结果，弹药各元件及包装箱均按柔体考虑。除地面以外的材料属性如表 1 所示。

表 1 材料参数

部件	材料	密度/(kg/mm ³)	弹性模量/MPa	泊松比
弹药箱	松木	5.00E-07	13 500	0.24
弹体	钢	7.80E-07	200 000	0.30
炸药		1.92E-06	10	0.30
药筒	钢	7.80E-06	200 000	0.30
发射药		1.88E-06	10	0.30

结构的离散化即将连续体模型转化为由有限个单元组成的离散模型。将无限自由度问题转换为有限自由度问题，是有限元方法的本质^[14]。网格数量、网格质量、单元类型及阶次选择，影响着模型计算的效率与精确性。考虑到弹药木箱与弹药各部件、弹药木箱与地面之间存在的接触行为，且地面、弹药木箱、引信模型结构较为简单，通过分割等操作，选择规整的六面体单元对它们进行网格划分，单元类型选择为减缩一阶六面体单元(C3D8I)。弹丸、药筒等模型较为复杂，选择规整的四面体单元对它们进行网格划分，考虑到二阶四面体单元(C3D10)

在角点处的接触力为零，会导致接触预测失效，弹丸、药筒等模型的单元类型选择为修正二阶四面体单元(C3D10M)。笔者建立的箱装弹药跌落分析有限元模型如图 2 所示。

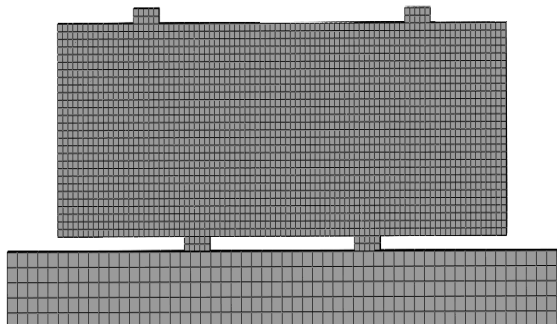


图 2 箱装弹药有限元模型

为更真实地模拟箱装弹药的跌落过程，在有限元建模过程中，要考虑弹药箱与地面、弹药箱与弹药各元件之间的碰撞，亦即在它们之间均要建立接触关系。接触问题是跌落等非线性动力学问题的难点之一，在有限元法中，接触是一种特殊的不连续约束，它可以使力在模型的不同部分之间传递，但传递的前提是各部分之间必须发生接触，当接触分离时，约束也同时消失，不再进行力的传递。在有限元接触分析中，选择合理的主控表面和从属表面、选择适当的接触算法是保证分析可靠性的重点。针对笔者所分析的问题，选用有限滑移算法，在木箱与地面的接触中，选取地面作为主控表面，选取木箱与地面接触面作为从属表面；在弹丸、药筒、引信与木箱的接触中，选取弹丸、药筒、引信为主控表面，选取木箱作为从属表面。文献[15]的研究表明，为得到满足精度要求的分析结果，地面 3 维实体有限元模型的尺寸需大于结构尺寸的 1.5 倍，笔者建立的模型，地面 3 维实体有限元模型尺寸为弹药箱接触面尺寸的 3.13 倍，满足条件。

2 地面特性参数

地面是弹药跌落的主要支撑物，弹药跌落过程中产生的冲击载荷都会传递至地面，使地面承受动载荷作用，地面的动力特性反过来也影响着弹药的跌落冲击响应。地面是一种复杂的多相材料，从理论角度来说，其具有普遍意义的特性参数是很难确定的，大多是基于试验数据得出某一种土壤的特性参数^[16]。借用文献[16]给出的 5 种地面特性参数，汇总于表 2 所示。

从下表可看出，由地面一至地面五，其弹性模

量越来越大，即地面变得越来越刚硬。

在动力学有限元仿真分析中，地面的模拟主要有集中参数模型和 3 维实体地面模型 2 种方法。集中参数模型可在节省计算资源的同时，获得较为准确的响应数据；但考虑到跌落过程中存在的弹药与地面之间的复杂接触情况，采用将地面特性简化为 6 个自由度方向的弹性、阻尼参数的集中参数模型，很难对其进行模拟。鉴于上述情况，采用 3 维实体地面模型。

表 2 地面特性参数

工况	地面类型	密度/(kg/mm ³)	弹性模量/MPa	泊松比
地面一	轻亚粘土	2.10E-06	25	0.33
地面二	较密实粘土	1.80E-06	54	0.30
地面三	某-1.5℃冻土	1.85E-06	2 400	0.29
地面四	某-5℃冻土	1.83E-06	13 901	0.22
地面五	C20 混凝土	2.50E-06	25 000	0.17

3 跌落仿真结果分析

3.1 箱装弹药自 1.0 m 高度垂直跌落

首先模拟分析箱装弹药自 1.0 m 高度垂直跌落的情况。为节省计算资源，将箱装弹药与地面之间的间隙设置为一个极小值，将初始速度 v 施加到箱装弹药模型上，其中 $v = \sqrt{2gh}$ ，同时对整个模型赋予重力场。跌落冲击是一个作用时间极短的复杂动力学过程，为更好地分析跌落响应，将整个求解时间设置为 20 ms，并将最大增量限定在 0.1 ms。

仿真求解得到箱装弹药各部件的应力和加速度数据。以地面一工况为例，弹丸和药筒出现最大应力时刻的应力分布云图如图 3、4 所示。由表 3 可以看出，在每种工况下，药筒的最大应力均大于弹丸，即对于此种箱装弹药而言，药筒受跌落冲击载荷作用发生变形、开裂的风险更高，在处理摔箱弹等问题时，需重点关注药筒；此外，弹药设计生产部门可以考虑优化包装箱卡板结构尺寸和分布位置，优化药筒受力情况。由地面一至地面五，随着地面变得越来越刚硬，总体上弹丸和药筒的最大应力随之增大，而出现最大应力的时间随之缩短，这说明跌落过程中，箱装弹药与地面之间力的传递存在一个作用过程，地面越松软，传递过程越长，出现最大应力的时间越延后。地面软硬情况对箱装弹药受力有较大影响，以弹丸为例，可以看出，在最刚硬的地面五工况下，其最大应力是最柔软的地面一工况下的 7.50 倍。在实际处理弹药跌落相关问题时，技术人员往往将地面简化为刚性体进行分析，这样虽然可以保证分析结果具有较大的安全系数，但却容

易导致事故处理效率低下的问题。

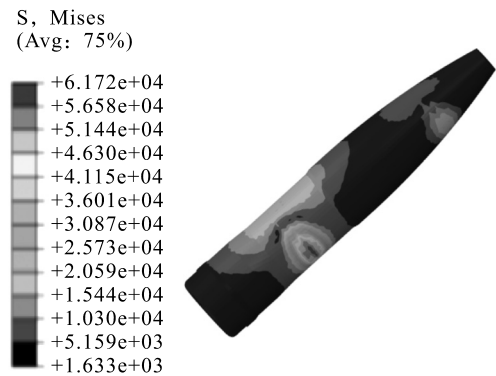


图 3 弹丸应力云图

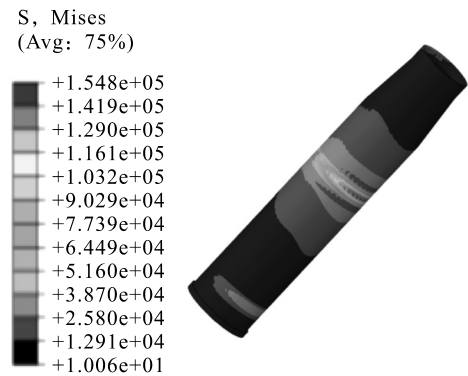


图 4 药筒应力云图

由上图可以看出，弹丸和药筒最大应力均位于其与弹药木箱卡板接触的下侧。5 种工况下弹丸、药筒的最大应力及最大应力出现时间如表 3 所示。

表 3 最大应力及时间

工况	弹丸		药筒	
	弹丸最大应力/MPa	时间/ms	药筒最大应力/MPa	时间/ms
地面一	61.72	3.2	154.80	4.2
地面二	102.50	2.2	209.95	3.2
地面三	367.00	0.9	587.23	2.2
地面四	454.10	0.7	641.00	1.5
地面五	462.90	0.7	628.11	1.4

各工况下跌落过程中引信的加速度时间曲线如图 5—9 所示，最大加速度及最大加速度时间如表 4 所示。

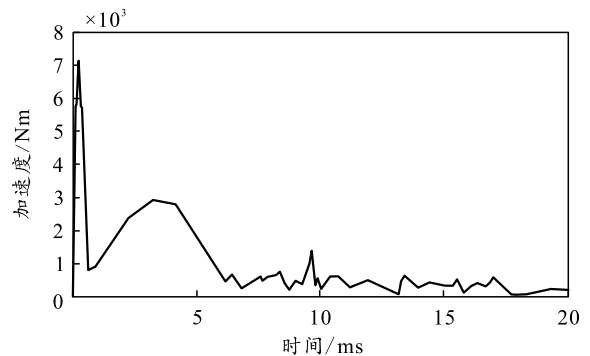


图 5 地面一工况加速度-时间曲线

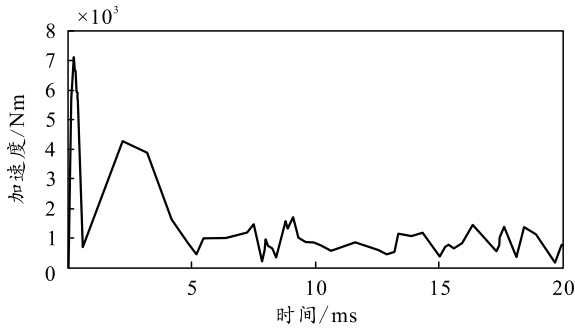


图 6 地面二工况加速度-时间曲线

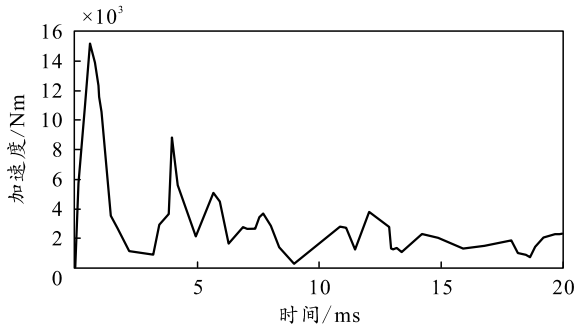


图 7 地面三工况加速度-时间曲线

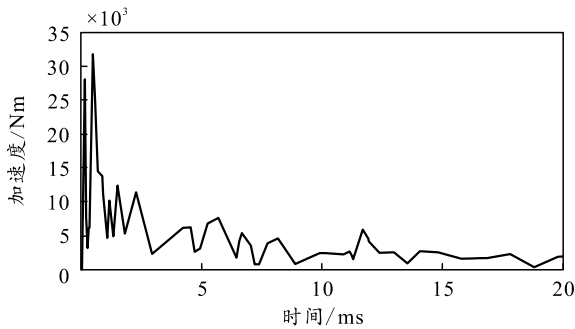


图 8 地面四工况加速度-时间曲线

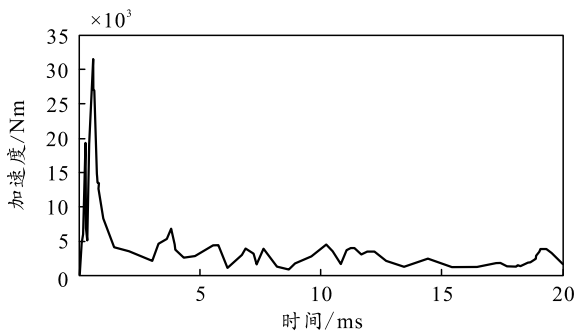


图 9 地面五工况加速度-时间曲线

表 4 最大加速度及时间

工况	最大加速度/Nm	时间/ms
地面一	7 139.93	0.2
地面二	7 131.75	0.2
地面三	15 201.00	0.6
地面四	31 810.40	0.5
地面五	31 639.00	0.5

由图 5—9 及表 4 可以看出, 总体而言, 地面越刚硬, 引信加速度最大值越大, 最大值出现时间越

延后, 加速度波动越剧烈。

将 2 种极限工况, 地面一和地面五的加速度响应进行比较, 绘制加速度-时间曲线如图 10 所示。

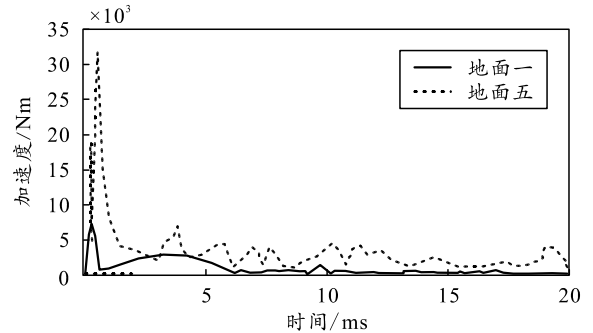


图 10 加速度-时间对比曲线

由上图可以看出, 跌落在刚硬地面与松软地面相比, 引信的最大加速度更大(4.43 倍), 且在整个 20 ms 的过程中, 刚硬地面的加速度基本上始终大于松软地面。基于本文中分析结果可以看出, 当箱装弹药在较为刚硬的地面上发生跌落事故时, 不仅弹药关键部件的受力更大, 而且其加速度情况也更为恶劣, 更容易出现因引信解除保险而引发重大安全事故的风险。

3.2 箱装弹药自 0.5 和 2.0 m 高度垂直跌落

有限元模型一旦建立完成, 通过改变施加到箱装弹药模型上的初始速度 v 的大小, 便可以快速分析获得不同高度下箱装弹药跌落的动态响应。选取箱装弹药自 0.5 和 2.0 m 高度垂直跌落 2 个条件, 分别分析计算获得了地面一至地面五工况下的动力学响应。垂直跌落条件下, 弹丸与药筒的受力变化趋势基本一致, 获得的弹丸应力和引信加速度数据如表 5、6 所示。

表 5 最大应力、加速度及时间(0.5m)

工况	弹丸		药筒	
	弹丸最大应力/ MPa	时间/ms	药筒最大应力/ MPa	时间/ms
地面一	43.09	3.2	5 122.41	0.2
地面二	71.64	2.2	5 122.41	0.2
地面三	264.50	0.9	10 462.40	0.9
地面四	294.20	0.9	10 557.80	0.9
地面五	294.50	0.9	10 647.40	0.6

表 6 最大应力、加速度及时间(2.0 m)

工况	弹丸		药筒	
	弹丸最大应力/ MPa	时间/ms	药筒最大应力/ MPa	时间/ms
地面一	88.11	3.5	10 231.34	0.1
地面二	135.50	1.9	10 241.52	0.1
地面三	487.90	0.7	29 299.50	0.5
地面四	589.60	0.6	42 003.10	0.5
地面五	606.60	0.6	42 077.10	0.4

结合表 3—6 可以看出,当跌落高度一定时,随着地面变得越来越刚硬,最大应力和加速度随之增大,最大应力出现时间随之缩短,最大加速度出现时间随之变长,这与 3.1 节中自 1.0 m 高度垂直跌落的情况一致;当跌落高度变化时,随着跌落高度越来越高,最大应力和最大加速度随之增大,出现的时间随之变长。由表 5 可以看出,跌落高度较低时,当地面刚度增大到某一程度后,地面刚度变化对最大应力和最大加速度的影响减弱。

3.3 箱装弹药自 1.0 m 高度棱边着地跌落

调整箱装弹药与地面的相对位置关系,便可分析获得不同姿态下跌落的动态响应。在地面一至地面五工况下,分析当弹药箱与水平地面成 45° 角时棱边着地跌落的动态响应。调整后的有限元模型如图 11 所示。以地面一工况为例,弹丸和药筒出现最大应力时刻的应力分布云图如图 12、13 所示。获得的应力和加速度数据如表 7、8 所示。

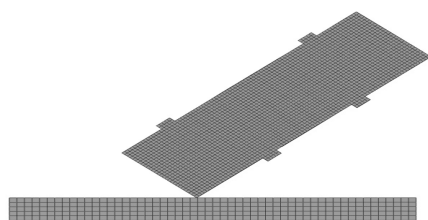


图 11 棱边着地跌落有限元模型

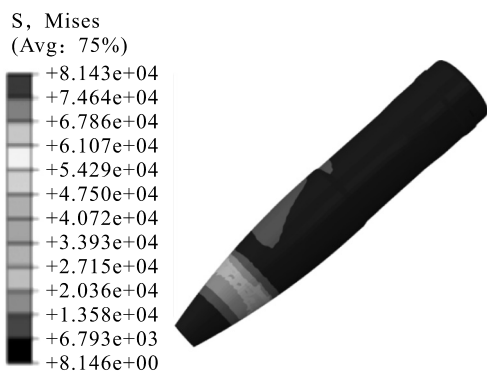


图 12 棱边着地跌落弹丸应力云图

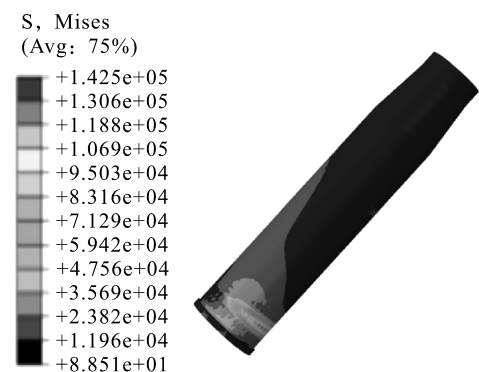


图 13 棱边着地跌落药筒应力云图

表 7 棱边着地跌落最大应力及时间

工况	弹丸		药筒	
	弹丸最大应力/ MPa	时间/ms	药筒最大应力/ MPa	时间/ms
地面一	81.43	6.3	142.50	7.4
地面二	127.00	3.9	199.00	5.7
地面三	277.90	2.5	405.05	1.6
地面四	271.70	2.5	471.10	1.6
地面五	270.30	2.5	475.20	1.6

表 8 棱边着地跌落最大加速度及时间

工况	最大加速度/Nm	时间/ms
地面一	7 305.13	0.2
地面二	7 305.13	0.2
地面三	24 919.90	1.3
地面四	32 416.30	1.3
地面五	33 186.80	1.3

对比图 3、4 与图 11、12 可以发现,跌落姿态不同,应力分布存在较大差异。由表 7 和 8 可看出,与 3.1 节中垂直跌落的情况类似,随着地面变得越来越刚硬,最大应力和加速度随之增大,最大应力出现时间随之缩短,最大加速度出现时间随之变长。

由表 8 可以看出,与垂直跌落相比,棱边着地跌落时,最大加速度的出现时间明显延后。

结合表 3、7 和 8 可以看出,不论在哪一种地面条件下,棱边着地跌落的最大应力和最大加速度均大于垂直跌落。这说明对于箱装弹药的棱边跌落较垂直跌落而言,弹药各元件承受的冲击更剧烈,弹药发生事故的概率更高。这就要求弹药技术人员在实际处理摔箱弹等问题时,必须要重点考虑弹药的跌落姿态。

4 结束语

基于非线性有限元理论建立的弹药-地面有限元模型可在考虑不同地面特性参数的情况下,快速获得弹药以不同高度、不同姿态跌落过程的动力学响应。地面特性以及跌落高度、跌落姿态均对弹药跌落响应存在较大影响,总体上地面上越刚硬,跌落高度越大,应力和加速度越大。仅仅将地面简化为刚性体分析弹药跌落问题,难以真实反映其动力学响应。地面作为复杂的多相材料,其本构关系很难用某一数学模型定义,为提高弹药跌落事故处理效率,技术人员可在平时通过实验等方法收集典型地面的特性参数,当发生跌落事故时,通过有限元仿真分析快速获取其动力学响应,为事故处理提供参考依据。

本文中的分析方法,也可为弹药包装箱的优化设计提供依据,以及应用于其他领域类似问题的跌

落分析和包装优化。

参考文献:

[1] 谷智国, 张怀智, 郭胜强, 等. 弹药包装跌落实验研究[J]. 包装工程, 2009, 30(6): 14-15, 20.

[2] 周彬, 安振涛, 甄建伟, 等. 跌落条件下箱装弹药安全性的数值评估[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 50-62.

[3] 安彦飞, 王雨时, 闻泉. 某导弹惯性敏感装置跌落仿真分析[J]. 信息技术, 2014, 43(3): 111-114.

[4] 路乐意, 孙忠伟, 卢强, 等. 电机包装件跌落分析及仿真[J]. 微电机, 2021, 54(4): 108-110, 114.

[5] 张海龙. 基于 ABAQUS 的服务器跌落仿真与实验研究[J]. 机械工程师, 2021, 54(4): 128-129, 133.

[6] 常江, 孙鹏达. 空气净化器缓冲包装跌落仿真分析及优化[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(5): 68-73.

[7] 林丽. 头戴式耳机跌落冲击的仿真分析与实验[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 37-43.

[8] 华丽, 钱静. 洗衣机运输包装件的跌落仿真分析[J].

(上接第 68 页)

4 结束语

针对装备作战效能实际评估活动中的少数据问题, 笔者提出一种面向作战效能评估的基于灰靶的综合靶心度模型。该方法在构建标准模式时综合利用了原始评估数据参数的最优和最劣信息, 模型建立过程的物理意义明显, 算例结果表明: 该方法简单有效, 能更好地指导装备的作战运用。后续工作是对面向装备作战运用的作战效能评估指标体系、敏感指标的权重向量等进行深入分析, 并进行相关模型与算法的实际运用工具化。

参考文献:

[1] 代耀宗, 沈建京, 郭晓峰. 作战效能评估方法研究[J]. 国防科技, 2017, 38(5): 104-109.

[2] 亢瑾. 航天电子侦察系统作战效能评估技术综述[J]. 新型工业化, 2019, 9(6): 120-123, 128.

[3] 董彦非, 王曦. 多种方法结合的作战效能评估研究[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(7): 10-13.

[4] 柯宏发, 赵继广, 祝冀鲁. 基于矩阵序列的武器装备作战效能评估模型[J]. 装备学院学报, 2016, 27(5): 107-112.

[5] 余苗, 王娟, 李静, 等. 基于改进 AHP-TOPSIS 法天波雷达作战效能评估[J]. 现代雷达, 2019, 41(11): 51-56.

[6] DAGDEVIREN M, YAVUZ S, KILINC N. Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under

包装工程, 2008, 29(4): 61-62, 80.

[9] 贾杏歌, 孙伟, 周俊丽, 等. 液晶显示屏包装件跌落仿真分析及结构优化[J]. 包装工程, 2021, 42(1): 143-149.

[10] 段良雷, 钱建平. 某型箱装弹药跌落过程动力学特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(4): 37-40, 185.

[11] 周彬, 安振涛, 秦翔宇, 等. 跌落条件下箱装弹药关键部件冲击加速度的数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(9): 51-52.

[12] 高碧祥, 徐诗峰, 张镇麟, 等. 某带泡沫护帽的筒装导弹跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2020, 41(9): 149-154.

[13] 袁惠群, 付凡, 杨淑良, 等. 某型包装箱跌落动力学仿真分析[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 72-77.

[14] 王力. 大口径火炮结构动强度设计与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[15] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 361-392.

[16] 张鑫磊. 大口径火炮发射过程的结构刚强度问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

fuzzy environment[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 8143-8151.

[7] 程呈, 高敏, 程旭德, 等. 基于组合赋权的反坦克导弹武器系统作战效能评估研究[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(1): 241-251.

[8] 李妮, 李玉红, 龚光红, 等. 基于深度学习的体系作战效能智能评估及优化[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(8): 1425-1435.

[9] CONNORS C D, MILLER J O, LUNDAY B J. Using agent based modeling and a designed experiment to simulate and analyze a new air-to-air missile[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2015, 13(3): 321-330.

[10] 柯宏发, 祝冀鲁, 王保顺, 等. 电子装备灰色试验与评估理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 6.

[11] LIU S F, JEFFREY F, YANG Y J. A brief introduction to grey systems theory[J]. GreySystems: Theory and Application, 2012, 2(2): 89-104.

[12] 张壮, 李琳琳, 魏振华, 等. 基于变权-投影灰靶的指控系统动态效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 801-809.

[13] 杜焯, 张正涛, 刘振波, 等. 基于灰靶理论的坦克陆上机动性评估[J]. 中北大学学报, 2008, 29(6): 501-504.

[14] 尹建平, 张洪成, 王志军, 等. 基于灰靶理论的智能雷毁伤效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(3): 41-44.

[15] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进[J]. 数学的认识与实践, 2002, 32(4): 572-575.