

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.02.007

聚氨酯/聚乙烯水袋无伞空投跌落仿真

习赵军¹, 胡麟¹, 李毅超¹, 朱景山²

(1. 华中科技大学航空航天学院, 武汉 430074; 2. 空降兵研究所, 孝感 432100)

摘要: 基于 Abaqus 软件中的拉格朗日-欧拉耦合算法, 对一种双层聚氨酯/聚乙烯水袋 50 m 高空无伞空投跌落冲击过程进行数值仿真, 并对聚乙烯材料的厚度进行参数化研究。重点分析水袋以水平、垂直和 45° 倾斜姿态冲击地面时袋体的瞬态应力、位移变化以及破损情况。通过与已有实验数据的对比验证了该数值方法的有效性。仿真结果表明, 2 mm 聚乙烯/0.5 mm 聚氨酯层可以抵御水平姿态冲击但无法抵御垂直姿态冲击, 水体对袋体侧面的剧烈拉伸是引起水袋破裂的主要原因。进一步优化发现, 4 mm 聚乙烯/0.5 mm 聚氨酯层可以抵御水袋沿水平、垂直及 45° 倾斜姿态冲击地面, 保证水袋的跌落安全性。结果表明, 本文的计算方法可以应用于针对无伞空投的液体及固体食品包装材料的参数化设计。

关键词: 无伞空投; 水袋; 有限元仿真; 抗冲击

中图分类号: TP302.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2021)02-0211-05

Numerical Investigation of Free Drop of Polyurethane/Polyethylene Water Bag

XI Zhaojun¹, HU Lin¹, LI Yichao¹, ZHU Jingshan²

(1. School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Institute of Paratroops, Xiaogan 432100, China)

Abstract: Based on the Lagrange-Euler coupling algorithm of Abaqus software, the free drop impact process of a double-layer polyurethane/polyethylene water bag at an altitude of 50 m is numerically simulated, and the thickness of the water bag is parameterized analyzed. In specific, the transient stress, displacement and damage characteristics of the water bag under horizontal, vertical, and 45° directions hitting ground are studied. The results show that 2 mm polyethylene / 0.5 mm polyurethane layer configuration can resist horizontal drop but cannot resist vertical drop. Severe stretching from water to the bag is the main cause for the rupture. Further optimization find that 4 mm polyethylene/0.5 mm polyurethane layer can resist the impact of the water bag no matter it is under horizontal, vertical or 45° posture, ensuring the safety of the water bag. The above results indicate that the proposed method can be applied to the parametric design of liquid and solid food packaging materials.

Key words: free drop; water bag; finite element simulation; impact resistance

无伞空投是指不使用降落伞系统消减重力对空投对象的坠落加速作用, 将空投对象从航空器上直接投送着陆的一种空投作业方式。相比有伞空投, 无伞空投具有包装简单、受气象影响小、着陆散布小、成本低、利用率高以及快速高效等优点^[1-5],

特别适用于地面支援受阻时的作战保障和救灾补给, 尤其在医用水、饮用水、食品、药品以及血液等紧急需求物资的快速补给中可发挥突出作用。然而, 空投尤其是无伞空投时, 空投件着陆时所承受的冲击非常大, 因此, 研究空投冲击对空投物资及

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806404)资助项目。

收稿日期: 2020-08-05; **修订日期:** 2020-12-30

通信作者: 朱景山, 男, 工程师, E-mail: 514466868@qq.com。

引用格式: 习赵军, 胡麟, 李毅超, 等. 聚氨酯/聚乙烯水袋无伞空投跌落仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 211-215. XI Zhaojun, HU Lin, LI Yichao, et al. Numerical investigation of free drop of polyurethane/polyethylene water bag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 211-215.

其包装材料的影响是解决无伞空投关键技术难题的重要切入点^[6-13]。本文以一种双层聚氨酯/聚乙烯水袋在50 m高空无伞空投跌落冲击过程为研究对象,通过Abaqus软件中的拉格朗日-欧拉耦合算法进行参数化研究,对2 mm和4 mm两种不同厚度的聚乙烯材料水袋分别在水平、垂直和45°倾斜3种姿态下着陆冲击情况进行有限元仿真计算,分析聚氨酯/聚乙烯双层水袋在典型的无伞空投工况下抗冲击性能,探寻聚氨酯/聚乙烯双层水袋的厚度与无伞空投性能的关系,从而为无伞空投包装的设计开发与应用提供参考。

1 建模与仿真

1.1 几何模型与材料参数

本文选取2 kg饮用水作为无伞空投物质设计缓冲水袋,尺寸为200 mm×150 mm×60 mm,如图1所示。为了最大限度降低跌落冲击对水袋结构造成的损伤,参考已有文献,将水袋设计成双层材料结构。内层选用满足食品包装安全,同时具有良好力学性能的热塑性聚氨酯(Thermoplastic urethanes, TPU)膜材料,厚度设定为0.5 mm,单元类型为膜单元;外层作为加强层选用具有优良抗冲击性能的聚乙烯(Polyethylene, PE)材料,选取厚度分别为1~4 mm进行跌落安全性参数化分析,单元类型为各向同性壳单元。两种材料选用的模型均是弹塑性模型中的各向同性硬化模型。材料参数如表1所示。水袋中的饮用水采用流体模型中的Mie-Grüneisen状态方程描述,单元类型为欧拉单元,相关材料参数如表2所示。地面为600 mm×600 mm尺寸面单元,刚体约束。在网格划分方面,水袋选取的网格类型为4节点的正四面体膜单元,单元尺寸为5 mm,单元数为3 422;内部液体选取的网格类型为10节点的二次四面体单元,单元尺

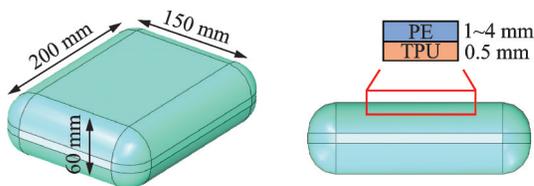


图1 双层缓冲水袋模型及尺寸

Fig.1 Model and dimensions of double buffer water bag

表1 系统参数

Table 1 System parameters

水袋材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	断裂应变
TPU	60	7.5	0.33	1.90
PE	876	903	0.39	0.59

表2 水体基本参数

Table 2 Basic parameters of water body

液体	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏度/($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)	声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
水	1 000	0.01	1 450

寸为5 mm,单元数为67 841;液体运动区域的网格类型为8节点的正六面体欧拉单元,单元尺寸为5 mm,单元数为144 000。

1.2 边界条件与求解设置

水袋跌落接触地面时的姿态具有随机性,为了全面评估水袋落地时的安全性,本文选取水平、垂直与45°倾斜3种典型情况进行模拟计算,如图2左图所示。图中地面为刚性体,所有自由度均被约束。设定水袋从50 m高空无伞空投,自身重力加速度取 9.8 m/s^2 ,根据能量守恒计算得到接触地面时的碰撞速度为30 m/s,设定为初始速度,碰撞模拟为水泥地面。

采用拉格朗日-欧拉耦合算法计算水袋在冲击水泥地面时的变形与损伤破坏过程,以及内部水体与壁面的相互作用,如图2右图所示。仿真时将水袋在内的 $400 \text{ mm}\times 400 \text{ mm}\times 400 \text{ mm}$ 正方体空间设定为欧拉单元网格,可以有效克服在网格畸变的条件下受到强烈外界冲击下物体外形的大变形过程;将欧拉网格区域与水袋轮廓进行布尔操作,可以得到组成水体的欧拉网格初始位置及其相应的网格体积分数。在每个时间步长内程序会自动计算水体的欧拉网格在正方体空间内的位置变化,从而捕捉水体的形态与受力状态。整个有限元仿真采用Abaqus软件中的Dynamic Explicit模块进行。

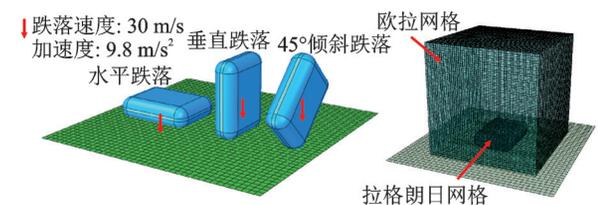


图2 边界条件与网格类型设置

Fig.2 Boundary conditions and grid type settings

1.3 实验测试

为了验证仿真结果的准确性,对尺寸为 $200 \text{ mm}\times 150 \text{ mm}\times 60 \text{ mm}$ 的2 kg水袋进行实际跌落实验并测试跌落过程中袋体的加速度。加速度传感器固定于袋体上表面中部进行测量。采用MSV3000加速度传感器,采样频率为1 000 Hz,同时配备基于ARM7架构的STM32主控芯片及其采样和存储控制器。

2 结果与讨论

2.1 水平跌落仿真分析

为了能够使水袋承受落地地面时受到的强烈冲击,同时最大限度减轻水袋重量,需对其材料厚度进行参数优化设计。本文水袋采用的是内层聚氨酯薄膜/外层聚乙烯抗冲击层的组合。内层聚氨酯材料主要用于包裹、密封饮用水,确保其饮用安全性,外层聚乙烯材料主要承担抗地面冲击的作用。因此,外层聚乙烯材料的厚度为主要优化对象。由于聚氨酯材料的质量仅为外层聚乙烯层质量的约 1/150,可忽略不计,不需要进一步参数优化。因此,本研究将内层聚氨酯材料的厚度根据文献[5]中的建议固定为 0.5 mm。图 3 所示为水袋以水平姿态落地时的样品顶端中部的加速度随时间变化值,可以看出仿真结果的准确度得到了较好地验证,为后续模拟水袋以不同姿态跌落地面并分析其破坏形态奠定了良好的基础。

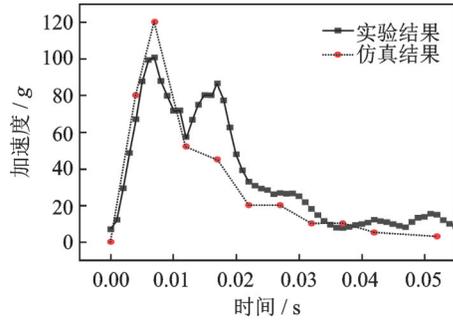


图 3 水袋水平姿态下降加速度实验与仿真结果对比图
Fig.3 Comparison of experimental and numerical results of sag acceleration at horizontal posture

如图 4 所示为考察外层聚乙烯层为 0、1 和 2 mm 时水袋冲击地面时刻的应力与位移变化结果。从图 4(a1~a3)可以看出,当水袋没有外层聚乙烯保护时,跌落水泥地面后,其外形瞬间向四周摊开,强烈的拉伸与撕扯作用使水袋底部产生局部大应力并发生破裂与开口。

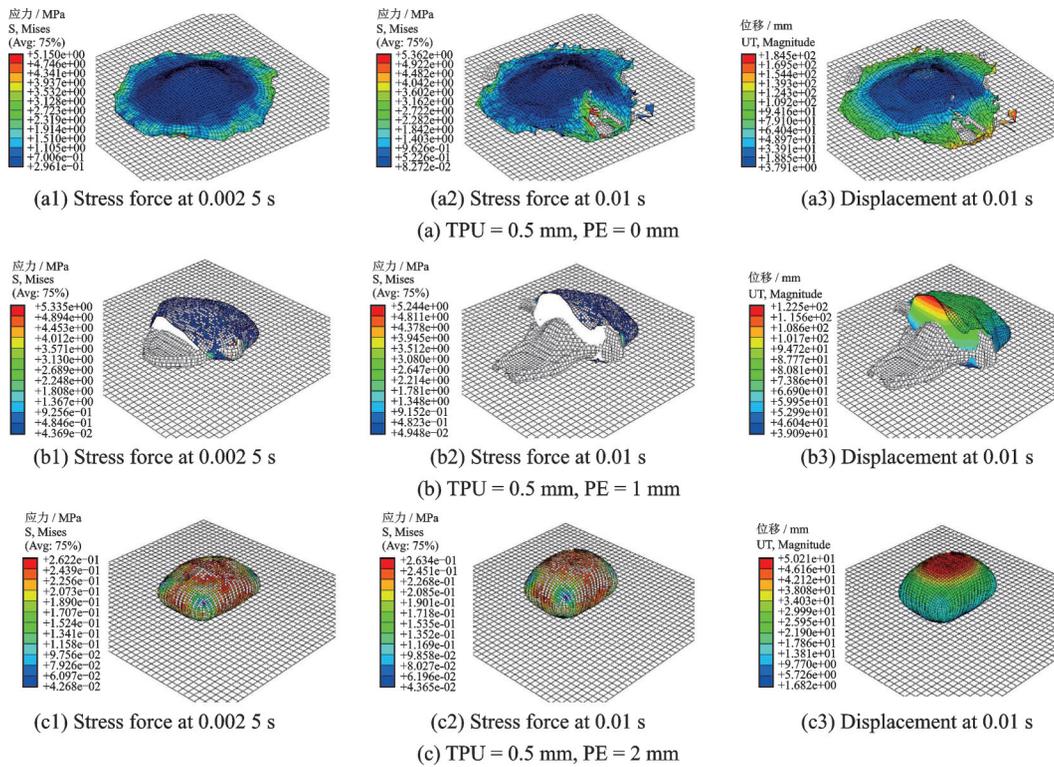


图 4 不同厚度水袋水平跌落应力与位移状态

Fig.4 Horizontal dropping stress and displacement state of water bags of different thickness

如图 4(b1~b3)所示,当包裹 1 mm 聚乙烯材料冲击地面时,可以发现水袋已可保持较完整的轮廓外形。但由于水袋内部水体与壁面的强烈相互作用仍然导致水袋左侧产生巨大开口,显示水体从袋内流出袋体。进一步将外层聚乙烯材料加至 2 mm 时可以看到水袋结构完整,没有出现破裂与液体渗出的现象,说明 0.5 mm 聚氨酯/2 mm 聚乙烯的材料搭配可以保证水袋以水平姿态安全跌落地面而不产生破损。由于水袋的结构完整性,使其

表面产生的应力在袋体表面分布均匀,最大应力较前两种情况减小 20 倍以上。位移分布也由向四周扩散转变成沿厚度方向分布。以上结果表明聚乙烯材料可以很好地提高水袋的抗冲击能力。

2.2 垂直跌落仿真分析

2.1 节分析表明 2 mm 聚乙烯层可以有效保护水袋沿水平姿态跌落地面,但并不能因此断定这种结构可以有效保护水袋以其他姿态跌落地面。如图 5(a1~a3)所示,当水袋以垂直姿态跌落地面时可以看

出2 mm聚乙烯层不足以保护水袋,而在其四周均出现了大裂口并伴随内部水体的大量溢出。分析认为,水袋垂直冲击地面时内部水体瞬间聚集到下部较狭窄的角落区域引起局部应力集中,导致底部四周出现开裂。通过不同条件仿真表明水袋不同的跌落姿态会引发不同的破坏形式。为了全面评估水袋的安全性,需要同时考察不同姿态下水袋冲击地面时是否产生破坏。显然2 mm聚乙烯层不能确保水袋的安全性。如图5(b1~b3)所示为3 mm聚乙烯层水袋垂直跌落仿真结果。可明显观察到,由于内部水体的挤压作用,水袋接触地面瞬间其下部红色区

域产生了局部应力极值状态。图中显示水袋依然在应力极值处发生了开口并伴随着水体的喷出,但相比2 mm情况已有很大改善,只出现了两处破口。当把聚乙烯材料的厚度增加到4 mm时,由图5(c1~c3)可以看出,水袋可承受自身变形与内部水体冲击带来的打击。虽然底部依然会出现最大应力,但材料并没有出现破裂,而是弹起同时伴随着应力的减弱,说明材料正经历的弹性变形过程,没有到达材料的起始损伤阈值。以上仿真结果表明,0.5 mm聚氨酯/4 mm聚乙烯的材料搭配可以保证水袋以垂直姿态安全跌落地面而不产生破损。

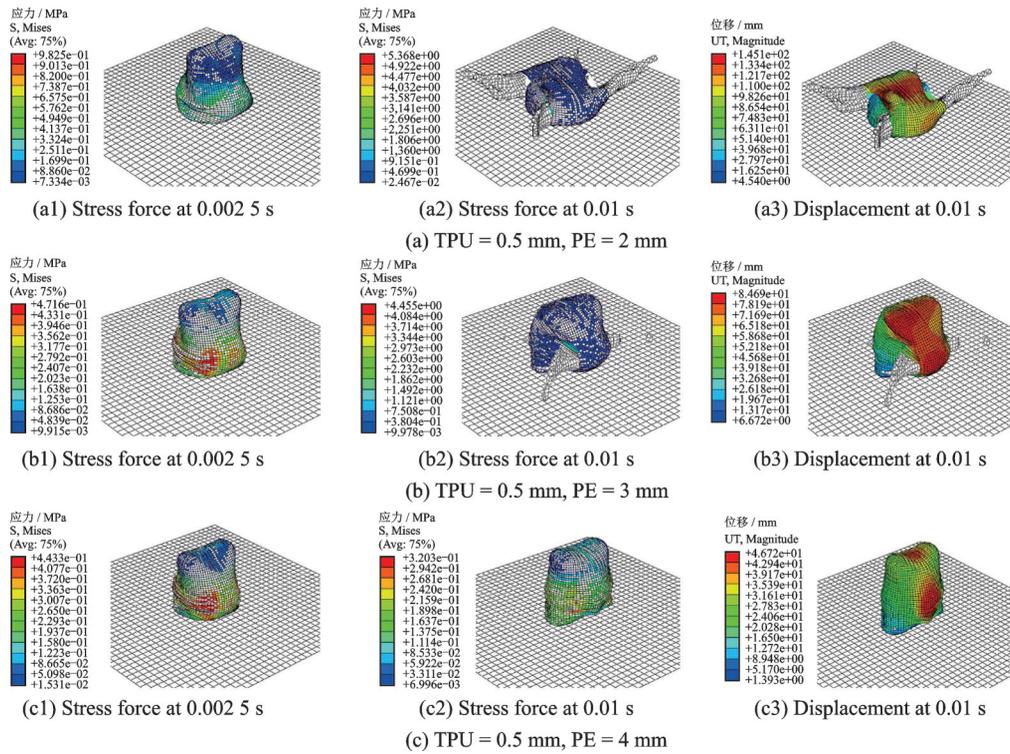


图5 不同厚度水袋垂直跌落应力与位移状态

Fig.5 Vertical dropping stress and displacement state of water bags of different thickness

2.3 45°倾斜跌落仿真分析

为了进一步验证0.5 mm聚氨酯/4 mm聚乙烯

层的安全性,将这种类型的水袋进行45°倾斜方向的跌落仿真分析,如图6所示。可以看出水袋在接

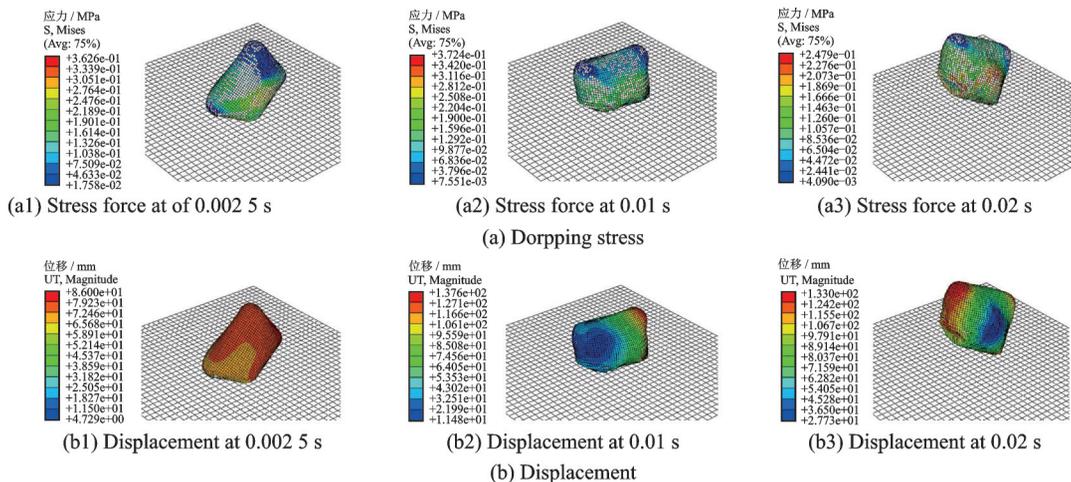


图6 0.5 mm聚氨酯/4 mm聚乙烯水袋45°倾斜跌落应力与位移状态

Fig.6 45° tilt dropping stress and displacement state of 0.5 mm polyurethane and 4 mm polyethylene water bag

触地面瞬间下部已完全压平,但并没有出现破口和流体流出,而是在旋转一定角度后从地面弹起。最大应力出现在被压平角的边缘处,但随着水袋的弹起应力值逐渐降低。而根据位移图的变化也可以断定水袋在撞击地面后发生了向前旋转,但并没有出现破损。由此可见,4 mm 聚乙烯层可以有效保护水袋以水平、垂直和45°倾斜3种典型姿态从50 m高度无伞跌落地面。

3 结 论

本文基于Abaqus软件中的拉格朗日-欧拉耦合算法对盛装2 kg饮用水的双层聚氨酯/聚乙烯水袋50 m高空无伞空投跌落过程进行了有限元仿真分析。研究结果发现水袋跌落姿态与其冲击失效形态存在明显联系,设计包装缓冲材料时需充分考虑跌落物体的各种可能跌落姿态。仿真结果表明2 mm聚乙烯/0.5 mm聚氨酯层虽然可以抵御水平姿态的冲击但无法承受垂直姿态的冲击。而4 mm聚乙烯/0.5 mm聚氨酯层水袋则无论以水平、垂直还是45°倾斜方向冲击地面均可确保其安全性与完整性。本文采用的方法可应用于无伞空投包装材料的安全性设计与评估。

参考文献:

- [1] 赵西友,李彦平,王静伟,等.滚塑无伞空投储水罐的设计与分析[J].中国塑料,2019,33(1):111-115,132.
ZHAO Xiyu, LI Yanping, WANG Jingwei, et al. Design and analysis of air-drop water storage tank without umbrella[J]. China Plastics, 2019, 33(1): 111-115, 132.
- [2] 王铁宁,刘磊.陆军装备物资无伞空投系统设计[J].装甲兵工程学院学报,2019,33(2):5-9.
WANG Tiening, LIU Lei. Design of the army equipments and materials airdrop without parachute system[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2019, 33(2): 5-9.
- [3] 郭海军.特种空投概述[C]//第八届中国航空学会青年科技论坛论文集.[S.l.]:中国航空学会,2018:13-19.
- [4] 易方,孟浩龙.新型空投橡胶油囊的设计[J].橡胶工业,2018,65(10):1146-1149.
YI Fang, MENG Haolong. Design of a new type of airdrop rubber fuel drum[J]. China Rubber Industry, 2018, 65(10): 1146-1149.
- [5] 赵西友,王宏,许涛,等.无伞空投缓冲包装材料及技术研究[J].包装工程,2016,37(3):54-57,84.
ZHAO Xiyu, WANG Hong, XU Tao, et al. Free drop buffering packing material and technology[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 54-57, 84.
- [6] 曹洪义.空投油料软体容器的试制与应用[J].特种橡胶制品,1990(3):52-57.
CAO Hongyi. Trial-produce and application of soft container for airdrop[J]. Special Purpose Rubber Products, 1990(3): 52-57.
- [7] 戴俊超,周云波,张进成,等.载人空投着陆冲击下不同乘员姿态的损伤影响[EB/OL].(2020-01-21)[2020-07-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.O3.20200708.1530.036.html>.
DAI Junchao, ZHOU Yunbo, ZHANG Jincheng, et al. The damage effect of different crew posture under the impact of manned airdrop landing [EB/OL]. (2020-01-21) [2020-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.O3.20200708.1530.036.html>.
- [8] 张孝宝,管群生,李心宇.美军空中投送力量建设与启示[J].军事交通学院学报,2020,22(5):13-16.
ZHANG Xiaobao, GUAN Qunsheng, LI Xinyu. Construction and enlightenment of US army air projection force[J]. Journal of Military Transportation University, 2020, 22(5): 13-16.
- [9] 张晓阳,王璐.基于中小件空投系统的低成本化控制技术[J].科技经济导刊,2020,28(6):68-69.
ZHANG Xiaoyang, WANG Lu. Research on low cost control technology for airdrops with small or medium size[J]. Technology and Economic Guide, 2020, 28(6): 68-69.
- [10] 李强,于存贵,秦予铮.基于气囊缓冲的某火箭炮着陆冲击分析[J].装备环境工程,2019,16(11):90-94.
LI Qiang, YU Cungi, QIN Yuzheng. Landing impact analysis of a rocket launcher based on airbag buffering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(11): 90-94.
- [11] 俞垚魏,王新晴,王东,等.基于ANSYS Workbench的空投步履式挖掘机多腿步行式机构动力学分析[J].建筑机械,2019(1):53-58.
YU Yaowei, WANG Xinqing, WANG Dong, et al. Dynamics analysis of multi-leg walking mechanism of air-dropped walking excavator based on ANSYS Workbench[J]. Construction Machinery, 2019(1): 53-58.
- [12] 杨雨,陆宇平.飞机超低空牵引空投动力学响应研究[J].南京航空航天大学学报,2012,44(3):294-300.
YANG Yu, LU Yuping. Dynamics modelling for super low attitude parachute extraction system on transport airplane[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(3): 294-300.
- [13] 韩艳铤,陆宇平.运输机超低空空投重物动力学分析与 H_∞ 鲁棒控制设计[J].南京航空航天大学学报,2012,44(1):75-80.
HAN Yanhua, LU Yuping. Dynamics analysis for transport airdropping heavy cargo at super-low-altitude and design of H_∞ robust control[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(1): 75-80.