

物资空投包装缓冲设计与分析

杜振杰, 高万玉, 孙晓军, 田丰
(军事医学科学院卫生装备研究所, 天津 300161)

摘要: **目的** 介绍空投包装缓冲方案设计, 包括钢丝绳隔振缓冲系统设计和泡沫衬垫缓冲系统设计, 便于更好地选取适宜的缓冲材料和缓冲形式, 确保空投的安全可靠。 **方法** 针对物资在空投时开伞与着陆等2种冲击工况进行有限元分析计算。根据2种工况所受最大冲击, 开展空投包装缓冲方案设计。 **结果** 着陆瞬间的最大应力为4.8 MPa, 最大位移为0.666 mm; 反弹过程中的最大应力为13.3 MPa, y向最大位移为5.49 mm; 冲击隔振计算和缓冲衬垫结构校核均通过。 **结论** 采用内部泡沫衬垫缓冲、外部钢丝绳隔振的空投包装缓冲方案, 缓冲性能优良, 满足空投后内装物资完好的设计要求。

关键词: 缓冲设计; 空投; 减震分析; 有限元仿真

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)01-0029-04

Design and Analysis of Materials Airdrop Packaging Cushioning

DU Zhen-jie, GAO Wan-yu, SUN Xiao-jun, TIAN Feng

(Institute of Medical Equipment Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China)

ABSTRACT: This paper introduced airdrop cushioning packaging design, including wire rope vibration isolation and cushioning system design and foam pad buffer system design, in order to select appropriate cushioning material and buffer form, to ensure safety and reliability of airdrop. Targeting at the two impact conditions of materials during airdrop, namely parachute opening and landing, finite element analysis and calculation were conducted. And airdrop cushioning packaging design was conducted according to the maximum impact in the two conditions. The maximum stress of touchdown instant was 4.8 MPa, and the maximum displacement was 0.666 mm. The maximum stress of the rebound process was 13.3 MPa, and the maximum y directional displacement was 5.49 mm. The shock isolation calculation and buffer pad structure check both passed. The drop packing buffer scheme using an internal foam pad buffer system and an external wire rope vibration isolation system had excellent buffer performance, and could meet the design requirements of maintaining packaged materials intact after airdrop.

KEY WORDS: buffer design; airdrop; vibration reduction analysis; finite element simulation

物资空投包装缓冲设计直接涉及空投方案的可行性。在整个空投过程中,对装备威胁最大的是在开伞和着陆等2个阶段产生的动载^[1]。地面跌落试验能够模拟装备着陆冲击的实际情况,其着陆冲击试验结果能够体现系统的抗着陆冲击能力。开伞过载由于受到试验条件的限制,无法模拟试验,项目通过理论计算进行分析。文中通过钢丝绳隔振缓冲系统设计和泡沫衬垫缓冲系统设计,以及采用分级建模的方法对货台物资出舱运动进行有限元分析^[2-3],便于更好地选取适宜的

缓冲材料和缓冲形式,确保空投的安全可靠。

1 钢丝绳隔振缓冲系统设计

1.1 隔振缓冲系统结构设计

设备与货台刚性连接,专用箱内装B超仪,专用箱下面布置4个钢丝绳隔振器与挂车地板连接固定。空投着陆产生的冲击经过钢丝绳隔振器传递给专用箱。

收稿日期: 2015-08-17

基金项目: 全军后勤科研计划(BS311C027)

作者简介: 杜振杰(1973—),女,山东莱州人,硕士,军事医学科学院卫生装备研究所副研究员,主要研究方向为急救器材与军品包装。

1.2 隔振缓冲系统工作原理

由于钢丝绳隔振器受到冲击会产生较大变形,多股钢丝绳圈之间的相对滑移会产生摩擦阻力,因此属于具有非线性刚度和非线性阻尼的弹性元件^[4]。选用的钢丝绳隔振器系统必须保证在承受最大安全冲击条件下,具备良好的隔振和环境适应性。选用的隔振器具有以下优点:可多向弹性变形和多向隔振缓冲,具备xyz等3个方向的隔振能力,阻尼大,抗冲击能力强,宽频吸振性能优良,组装拆卸方便^[5-6]。钢丝绳隔振器型号为GS-15,总承载质量为1000 kg,主承载方向刚度(k_z),45°,y分别为33.8,16.6,42 N/mm,平均阻尼比为0.12,系统固有频率为9.45 Hz。

空投着陆瞬间产生的冲击力由于地面软硬不同、作用时间不同等各种因素会形成冲击信号。冲击信号通过钢丝绳隔振器带动专用箱进行衰减振动。振动过程中,由于钢丝绳隔振器的刚度和阻尼的作用,衰减了挂车振动信号,使专用箱内装物的安全可靠提高^[7-8]。钢丝绳隔振系统工作原理见图1。

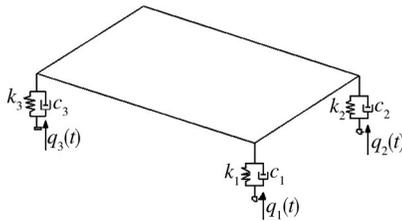


图1 钢丝绳隔振缓冲系统工作原理

Fig.1 Working principle of wire rope vibration isolation buffer system

钢丝绳隔振器通过定义力和力矩的6个分量 $F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$ 施加相互作用力^[9],其计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{R}_x \\ \dot{R}_y \\ \dot{R}_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \\ T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix}$$

式中: F, T 分别为力和力矩; $R_x, R_y, R_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别为相对位移和相对转角; K, C 分别为刚度系数和阻尼系数; $F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}, T_{x0}, T_{y0}, T_{z0}$ 分别为力和力矩的初始值。

在空投冲击的整个过程中,位移是一个重要参数。整个冲击过程,隔振系统内部有严密的能量转换。由于隔振器的活动空间有限,只能用较小的位移去满足较大的冲击。隔振缓冲系统从开始变形到发生最大变形量为止,内装物资所具有的全部动能将转换成缓冲元件的变形能^[10]。由于能量转换发生在很小的时间区间内,故可近似看作缓冲系统的响应是瞬态的,其响应的大小首先取决于跌落高度,同时也取决于隔振器系统本身的质量、弹性、阻尼等物理特性。

1.3 隔振缓冲系统的简化计算

专用箱包装件配降落伞从高空跌落,系统在接触地面的瞬间匀速着地,等同于从某一高度作自由落体运动,缓冲系统的简化模型见图2。跌落触地的瞬间($t=0$)时刻,跌落与受迫振动的合成运动方程为:

$$(m_2 s^2 + c_2 s + k_2) X_2(s) = [-m_1 s^2 + (c_2 s + k_2)] X_1(s) + m_2 \sqrt{2gH}$$

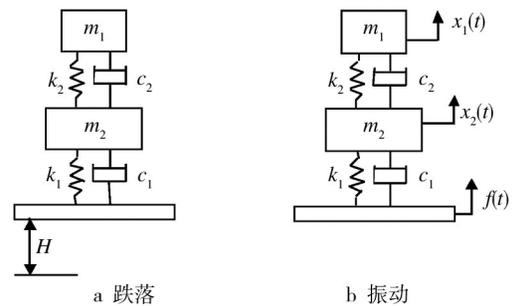


图2 缓冲系统简化模型

Fig.2 Simple model of buffer system

根据专用箱包装件跌落冲击工况,输入加速度脉冲 $y_{s0}=5g$,冲击时间 $\tau=10$ ms,激励响应公式为:

$$y_s = \begin{cases} 49 \sin(\alpha \frac{\pi}{\tau} t) & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases}$$

响应位移 y_r 、隔振系统变形量 y 与系统加速度脉冲的关系式为 $y=y_r-y_s$,用运动微分方程^[11-12]可表示为:

$m\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = -m\ddot{y}_s$,解得:

$$y(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t (-m\ddot{y}_s) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau$$

其中, $w_n = \sqrt{\frac{K}{m}}, \zeta = \frac{C}{2\sqrt{kM}}, \omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$

通过求解相对位移 $y(t)$ 和加速度 $\ddot{y}(t)$,型号GS-15专用箱包装件的冲击响应结果:最大相对位移为12 mm,最大加速度为 3.925 m/s^2 ,隔振效率为93.4%。可见钢丝绳隔振系统的冲击响应位移在允许的安全范围内(不大于40 mm)。

2 泡沫衬垫缓冲系统设计

2.1 缓冲结构模型

衬垫缓冲通常分为全面缓冲和局部缓冲。这里以内装B超仪的全面缓冲为例^[13]。专用箱实装质量 m 为14 kg,底面积 A 为 1260 cm^2 ,B超仪脆值 G_m 为25g。根据运输包装件冲击跌落高度标准,确定等效跌落高度 H 为120 cm,整个缓冲系统包装模型见图3。

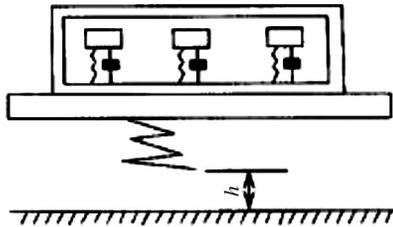


图3 缓冲包装结构模型

Fig.3 Buffer packaging structure model

2.2 缓冲材料选择

泡沫材料的选择沿用公式法和经验图表法^[14-15],图表采用权威数据的缓冲系数-最大应力($C-\sigma_m$)曲线。根据所采集到的数据,可得B超仪最大应力值:

$$\delta_m = \frac{G_m W}{A} = 0.278 \text{ kg/cm}^2$$

查常用缓冲材料 $C-\sigma_m$ 曲线,选用密度为 0.032 g/cm^3 的聚乙烯泡沫材料。

2.3 缓冲结构设计

缓冲衬垫结构设计原则是保证B超仪受到安全防护的前提下,尽可能地节省泡沫衬垫材料。首先采用经验图表法确定泡沫衬垫的厚度^[15-16]。通过查阅最大加速度-静应力($G_m-\sigma_s$)曲线,计算缓冲材料静应力 $\delta_s = \frac{W}{A} = 1.27 \text{ kPa}$,再查聚乙烯泡沫(0.032 g/cm^3 ,跌落高度120 cm)的 $G_m-\sigma_s$ 曲线,选择衬垫厚度 $t=12.5 \text{ cm}$ 。选取缓冲衬垫厚度 $t=12.5 \text{ cm}$ 曲线的谷底点进行设计。根据该点对应的静应力值,得到最佳缓冲面积值。

2.4 缓冲衬垫结构校核

在设计冲击防护包装后,还应通过缓冲材料振动加速度-频率曲线和振动传递率曲线-频率特性(T_r-f)曲线进行振动防护设计,完成缓冲衬垫结构校核。

当 $\delta_s=1.27 \text{ kPa}$,选 $t=12.5 \text{ cm}$ 时,查聚乙烯泡沫(0.032 g/cm^3) $\delta_{s1}=0.63 \text{ kPa}$ 和 $\delta_{s2}=1.28 \text{ kPa}$ 两组合并率曲线,得共振频率 $f_{n1}=78 \text{ Hz}$, $f_{n2}=44 \text{ Hz}$ 及最大传递率 $T_{r1}=5.8$, $T_{r2}=4.2$ 。根据实际静应力 $\delta_s=1.27 \text{ kPa}$ 进行插值,得到 $f_n=62 \text{ Hz}$, $T_r=5.1$ 。进而得到共振时的最大响应加速度 $a_p=T_r a_s < G_m$,所以由冲击防护选定的衬垫可以提供足够的振动防护。

3 有限元分析计算

空投包装件模型属多级缓冲,分别对货台、钢丝绳减震器、专用箱、泡沫缓冲等各级进行简化建模,并赋予边界约束条件后进行有限元分析。着陆瞬间的应力和位移结果见图4。与地面撞击1.5 ms时,反弹过程中垂直方向的应力和位移见图5。

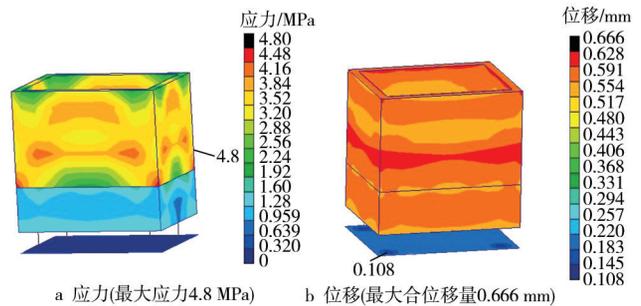


图4 着陆瞬间的应力和位移

Fig.4 Stress and displacement of landing moment

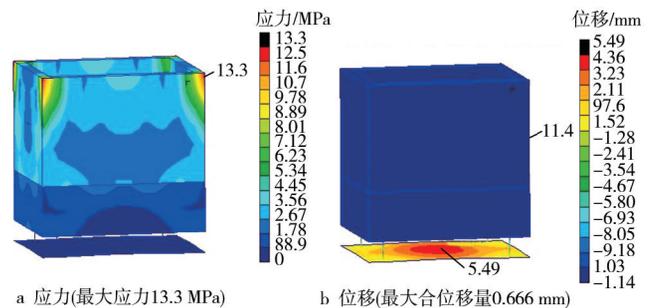


图5 反弹过程中垂直方向的应力和位移分布

Fig.5 Stress and displacement distribution in vertical direction during the rebound process

4 结语

通过对物资空投包装件隔振缓冲系统进行设计与计算,着陆时及着陆后反弹过程中的应力应变结果显示各部位应力均小于材料允许的应力极限,位移云图显示空投包装件整体刚度较好。泡沫衬垫缓冲的防振设计通过校核。结果表明,空投包装件缓冲设计满足要求,缓冲性能优良,内装物资受跌落冲击后不会发生破损。

参考文献:

- [1] LIU Ri, SUN Xiu-xia, DONG Wen-han. Dynamics Modeling and Control of a Transport Aircraft for Ultra-low Altitude Air-drop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 478—487.
- [2] 林轶群,张海妮,方自立. 运输机重装空投系统仿真与分析[J]. 飞机设计, 2015, 35(4): 67—71.
LIN Yi-qun, ZHANG Hai-ni, FANG Zi-li. Simulation and Analysis of the Transport-airplane Heavy Cargo Air-drop[J]. Aircraft Design, 2015, 35(4): 67—71.
- [3] 汪琰,黄少方,盛锋. 工程车空投模拟试验跌落瞬态分析[J]. 工程机械, 2013, 44(9): 15—19.
WANG Yan, HUANG Shao-fang, SHENG Feng. Falling-down Transient Analysis of a Engineering Vehicle in a Simulated Air-drop Test[J]. Construction Machinery and Equipment, 2013, 44(9): 15—19.
- [4] 王红霞,龚宪生,刘巍,等. 环形钢丝绳隔振器动态特性建模与参数识别[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 53—57.
WANG Hong-xia, GONG Xian-sheng, LIU Wei, et al. Modeling and Parametric Identification for Dynamic Behavior of a Circular Wire-cable Vibration Isolator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(23): 53—57.
- [5] 龚宪生,骆意,王红霞. 钢丝绳隔振器弹性元件空间曲线模型分析[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(2): 7—13.
GONG Xian-sheng, LUO Yi, WANG Hong-xia. Analysis on Study of Spatial Curve Model of Steel Wire Isolator with Circle Elastic Element [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(2): 7—13.
- [6] 王斌,王璐,王正. 一种组合式隔振器减振性能分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53(6): 1—4.
WANG Bin, WANG Lu, WANG Zheng. Experimental Study of a Piecewise Nonlinear Composite Vibration Isolator[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015, 53(6): 1—4.
- [7] LIU Ri, SUN Xiu-xia, DONG Wen-han. Dynamics Modeling and Control of a Transport Aircraft for Ultra-low Altitude Air-drop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 478—487.
- [8] 饶进军,黄锦辉,冯俊兴. 可空投系留平台空投跌落冲击响应研究[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 20—24.
RAO Jin-jun, HUANG Jin-hui, FENG Jun-xing. Airdropped Impact Effect of Airdropped Tethered Balloon Platform[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 20—24.
- [9] 侯宗团,荆志伟,郭兆电,等. 运输机空投飞行载荷分析[J]. 飞行力学, 2013, 10(5): 416—419.
HOU Zong-tuan, JING Zhi-wei, GUO Zhao-dian. Analysis of Flight Loads for Transport Aircraft Air-drop[J]. Flight Dynamics, 2013, 10(5): 416—419.
- [10] 曲普,史锐,李锦红,等. 空投着陆气囊缓冲系统环境适应性研究[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 64—68.
QU Pu, SHI Rui, LI Jin-hong, et al. Cushioning Property and Environmental Adaptability of Airbag Landing System[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 64—68.
- [11] 张炜,薛飞,卢富德. 考虑易损件物品—EPE缓冲系统冲击响应分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 116—119.
ZHANG Wei, XUE Fei, LU Fu-de. Impact-response Analysis of the System Composed of Critical Component and EPE Cushion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(9): 116—119.
- [12] 石慧荣,李宗刚,张军平. 基于传递矩阵法的车辆振动特性分析[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(6): 115—118.
SHI Hui-rong, LI Zong-gang, ZHANG Jun-ping. The Vibration Characteristic Analysis of Vehicle Based on Transfer Matrix Method[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33(6): 115—118.
- [13] 刘继飞,韩雪山,王伟. 蠕变对发泡聚乙烯缓冲性能影响的研究[J]. 包装工程, 2014, 35(2): 48—51.
LIU Ji-fei, HAN Xue-shan, WANG Wei. Effects of Cushion Property of Foamed Polyethylene EPE Cushioning Material Exerted by the Creep[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(2): 48—51.
- [14] 肖雯娟,郝阳. 常用密度EPE的静态压缩缓冲特性试验研究[J]. 包装工程, 2014, 35(2): 48—51.
XIAO Wen-juan, HAO Yang. Experimental Study on Static Compression Buffer of Common Density EPE[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(2): 48—51.
- [15] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(4): 149—155.
LIU Ji-fei. Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(4): 149—155.
- [16] 杨帅,康勇刚,齐菲. 低温对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2015, 36(4): 21—25.
YANG Shuai, KANG Yong-gang, QI Fei. Effect of Low Temperature upon Dynamic Cushioning Properties of EPE Foam Material[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(4): 21—25.