

技术专论

基于Ansys/LS-DYNA的缓冲气囊着陆过程仿真研究

齐明思, 刘守君, 赵奇, 张峰
(中北大学, 太原 030051)

摘要: **目的** 以冲压式快速空投硬式气囊为研究对象,对气囊以特定角度着陆时的缓冲过程进行仿真分析。**方法** 使用SolidWorks软件建立气囊的仿真模型,然后使用Ansys/LS-DYNA有限元分析软件,分别从气囊的材料定义、有限元模型的构建和仿真结果分析等方面进行仿真研究,并得出冲压式快速空投气囊着陆过程中应力应变的动态参数,以及货物和气囊的冲击加速度波动曲线。**结果** 气囊在偏离竖直轴 15° 着陆缓冲过程中,在0.077 207 s时,地面与气囊的棱接触处受到的最大应力为1.47 MPa,此时对应的最大应变为0.479 614 m。**结论** 冲压式快速空投气囊在偏离竖直轴 15° 着陆时,气囊所受的最大冲击应力以1.47 MPa为标准,可更好地确定空投物体的质量,并且可以针对性地加强对气囊应力应变较大区域的防护,防止气囊在冲击过程中破坏。

关键词: 硬式气囊;缓冲;仿真;Ansys/LS-DYNA

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)11-0013-05

Simulation Research of the Cushioning Airbag during the Landing Process Based on Ansys/LS-DYNA

QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, ZHANG Feng
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: Objective This paper took a punched quick airdrop airbag as the research object, and simulated its cushioning process during the landing process at a certain angle. **Methods** The paper established a simulation model of the airbag through SolidWorks software and used the finite element analysis software Ansys/LS-DYNA to simulate the landing process from the aspects of airbag material definition, construction of finite element model and simulation results analysis. The dynamic parameters of the stress and strain of the airbag during the landing process of the punched quick airdrop airbag as well as the impact acceleration curve of the goods and airbag were obtained. **Results** During the landing process of the punched quick airdrop airbag with 15° deviation from the vertical shaft, the maximum stress value of the airbag was 1.47 MPa and the corresponding maximum strain value was 0.479 614 m at the contacting edge of the airbag with the ground at 0.077 207 s. **Conclusion** When the punched quick airdrop airbag landed at an angle of 15° deviated from the vertical shaft, the biggest impact should use 1.47 MPa as a standard. As a result, the mass of airdrop body can be better specified, and the protection of the area with great stress and strain to the airbag from being damaged during the process of impact could be strengthened.

KEY WORDS: rigid airbag; cushion; simulation; Ansys/LS-DYNA

气囊具有质量轻、折叠性能良好、制作成本低等优势,使气囊缓冲技术广泛应用于货物空投、航天器着陆和回收、乘员安全与保障等领域^[1-3]。空投是一种非常重要的部队投送及物资补给手段,在紧急救护、

收稿日期: 2014-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275486)

作者简介: 齐明思(1979—),男,河南周口人,博士,中北大学副教授,主要研究方向为机械系统动态测试与仿真、缓冲技术。

抗震救灾和现代战争中发挥着不可或缺的作用^[4-6]。物资空投到地面时,会受到比较强烈的冲击,为了不损坏物资,必须采取适当的保护措施。随着计算机技术和有限元技术的高速发展,数值模拟方法在缓冲气囊设计及其特性研究中的作用越来越大,可用于气囊缓冲过程的仿真^[7-8]。应用仿真技术可以减少试验次数,降低试验成本,可以对气囊的优化设计进行更加全面的分析和了解。

目前,国内外在缓冲气囊的仿真研究中建立了很多仿真模型,而有限元方法是应用非常广泛的建模方法^[9-10]。Ansys软件具有强大的有限元分析和优化设计功能,非常适合对包装工程中相关产品和结构进行有限元分析、运动仿真和可靠性设计等^[11-13]。由于缓冲气囊着陆时会受到冲击,着陆缓冲时间较短,气囊变形又是非线性的,所以采用动态非线性有限元分析软件LS-DYNA对气囊着陆缓冲进行仿真研究。LS-DYNA软件特别适合求解各种非线性结构的高速碰撞、爆炸等非线性动力冲击问题。为了提高空投质量,文中以冲压式快速空投硬式气囊为研究对象,所保护物体为精密仪器,建立气囊仿真模型,采用有限元方法,对气囊偏离垂直轴 15° 着陆缓冲过程进行仿真,分析气囊着陆过程中应力应变的动态参数。

1 气囊模型的建立

硬式气囊实际结构由16个缓冲单元以 4×4 的方式装配而成,每一个缓冲单元为长方体,其尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,缓冲单元壁厚为 10 mm ,每个单元的底面有一个直径为 150 mm 的进气孔,与底面相邻的4个侧面各有一个直径为 120 mm 的排气孔,气囊单元的棱、进气孔和排气孔的边都有倒角,用SolidWorks软件建立的缓冲单元模型见图1。缓冲气囊每2个相邻单元之间以通道相连,由此缓冲气囊底面共有16个进气孔,气囊的侧面均匀分布16个排气孔,用SolidWorks建立硬式缓冲气囊的结构见图2。

实际应用时,硬式气囊的进气孔是可控的,因为进气孔装有可调节直径的进气道,采用电磁铁作为原动机,通过调节电阻来调节电磁力的大小,再通过弹簧随力拉伸压缩的特点来调节进气道直径的大小^[14]。

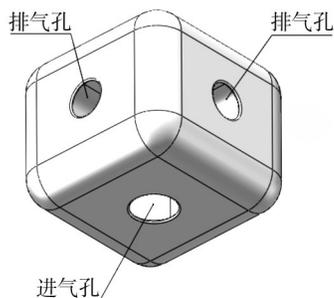


图1 缓冲单元模型

Fig.1 Model of cushioning cell

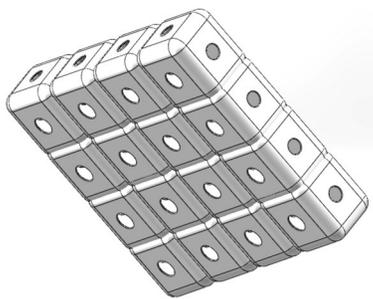


图2 硬式缓冲气囊模型

Fig.2 Model of rigid cushioning airbag

当空投系统投放后,气囊借助空投装备的下落速度从进气孔集气,在货物着陆之前通过控制使进气孔关闭,下落过程中排气孔是封闭的。当货物着陆受到冲击时,气囊内的气体受到急剧压缩,气囊通过压力顶开排气孔的搭扣开始排气,直到气囊内的气体被全部排完,着陆缓冲过程完成。在货物受到着陆冲击时,所有的缓冲单元构成一个缓冲系统,实现缓冲功能。

2 着陆缓冲过程的仿真分析处理

2.1 气囊缓冲过程和仿真假设

仿真过程从气囊刚接触地面的一瞬间开始的,随着空投载荷对气囊的压缩,气囊内气体压力增大。当气囊内压达到一定值时,排气孔开始排气,直至着陆完成。在整个着陆缓冲过程中,影响因素复杂繁多,为了突出仿真计算的结果和气囊缓冲效果,对缓冲过程作近似处理^[15-16]:着陆缓冲过程持续时间很短,不考虑和外界进行热交换,由此假设气囊压缩为绝热压缩

过程;气囊材料气密性良好,在仿真过程中,假设气囊完全不透气;为提高仿真速度,假设货物及货台为刚体,且地面也为刚体。

2.2 缓冲气囊有限元模型的处理

进行有限元仿真研究时,在保证气囊缓冲效果和精确度的前提下,为了提高仿真速度,简化有限元模型是经常使用的方法^[17-18],由此可以将气囊上的货台和货物简化为固连在一起的刚体。缓冲气囊由16个缓冲单元组成,其整体结构和各个气囊单元都为对称结构。缓冲气囊的底面有16个进气孔,侧面有16个排气孔,平均每个缓冲气囊只有1个进气孔和1个排气孔。根据有限元理论的对称原则,可用一个尺寸为600 mm × 600 mm × 500 mm的缓冲气囊代替整体气囊,简化的气囊底面有一个直径为150 mm的进气孔,相邻的某个侧面上有一个直径为120 mm的排气孔。为了简化结构并减少出错概率,假设缓冲气囊上表面整体受压,并且将货物和货台简化为一个尺寸为800 mm × 800 mm × 300 mm的刚体。将简化后的缓冲气囊模型导入到Ansys/LS-DYNA中进行实体填充并加载,以最大空投质量为907 kg、最高速度为160 km/h的原则对所加载物体进行密度、重力加速度的设计,使其达到着陆时的逼真效果。物体与气囊的接触类型定义为surface-surface,即面面接触,气囊的弹性模量为70 GPa,泊松比为0.5,气囊初始内压为0.11 MPa(约等于1个标准大气压)。

3 气囊偏离竖直轴15° 着陆时的仿真和分析

3.1 气囊和货物的应力应变分析

将建好的模型导入 Ansys/LS-DYNA 中进行前处理,将前处理的材料、模型和接触等生成关键子文件“Airbag Dropdown”,并用LS-DYNA Solver求解器进行求解计算。为了便于分析和计算,笔者对着陆缓冲过程中气囊和货物受到的冲击情况进行分析。缓冲气囊偏离竖直轴15° 着陆时气囊和货物的应力和应变云图分别见图3—4,图3显示的是在0.016 540,0.044 120,0.077 207,0.159 935 s等4个关键时刻的应力云图。由图3可知在0.077 207 s时刻,气囊触地底面和棱受到的应力最大,准确值为1.47 MPa,气囊中间表面受

到较大的应力,其应力值小于气囊受到的最大应力。在0.159 935 s时刻,对应于图4d气囊的最大应变值为0.479 614 m,与垂直着陆不同,其会在重力的作用下进行二次着陆,气囊会自动进行姿态调整,整个底面会全部触地,从而减小最大冲击数值。另外,气囊和货物的冲击加速度波动曲线见图5,气囊在刚触地时,货物和气囊的加速度波动较大,由图5可知,加速度在0.15 s内变化了800 mm/s²,对气囊产生了较大的冲击,随着时间推移,冲击会继续累积,直到最大值。同时

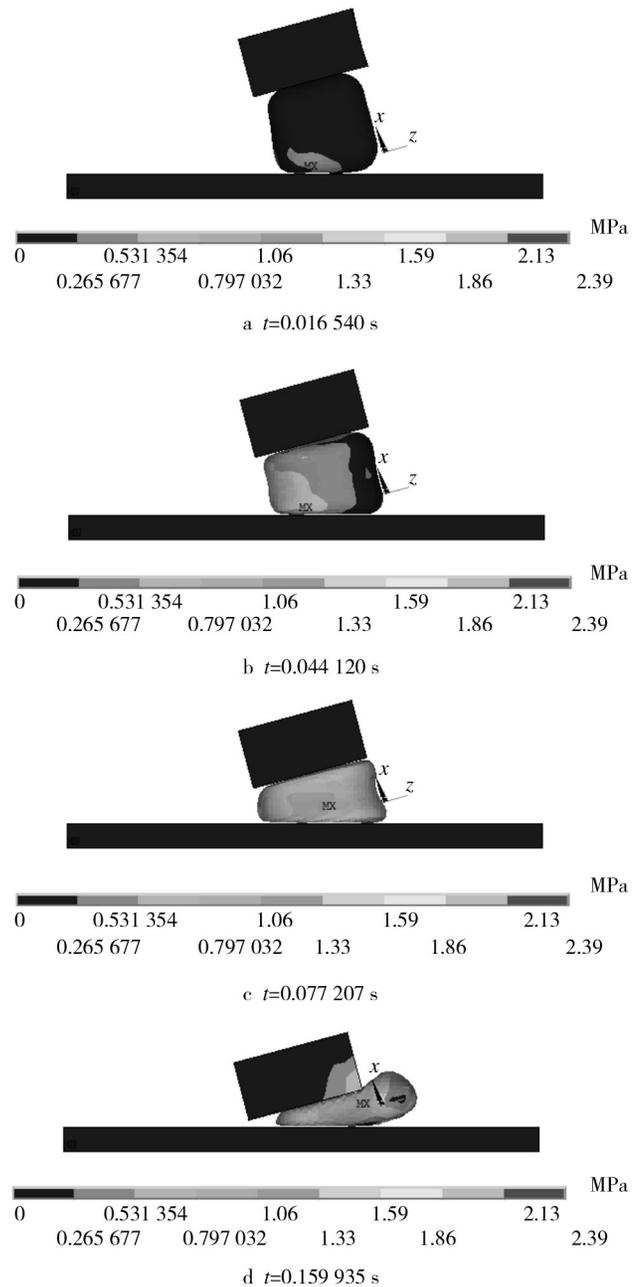


图3 缓冲气囊的应力云图

Fig.3 Stress nephogram of cushioning airbag

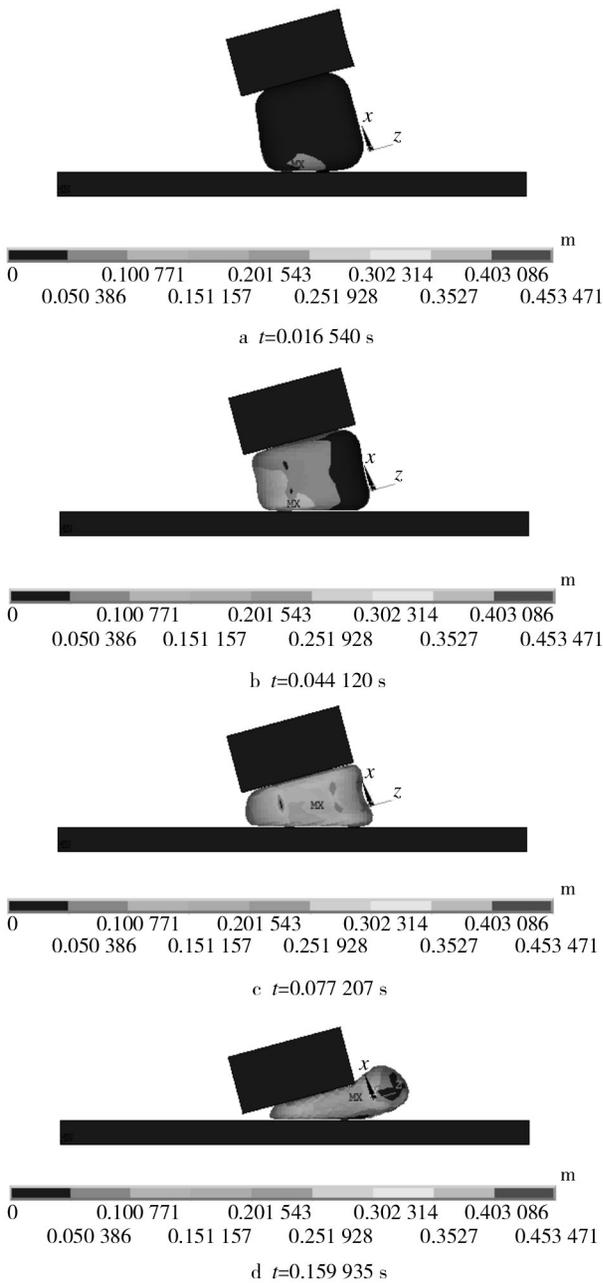


图4 缓冲气囊的应变云图

Fig.4 Strain nephogram of cushioning airbag

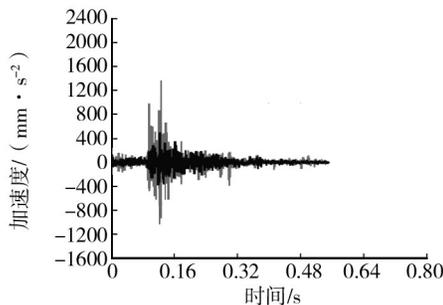


图5 货物和气囊的加速度波动曲线

Fig.5 The impact acceleration curve of the goods and airbag

可以看出,在0.15 s以后,加速度波动变化趋缓,表明气囊具有较好的缓冲能力。

3.2 有限元分析

1) 由于气囊是偏离竖直轴 15° 着陆,所以气囊先是其底面的一条棱边触地。由图3—4可以看出,在缓冲过程的开始阶段,随着时间推移,气囊受到的应力从先触地的底面棱边开始向气囊各个面扩展,并且气囊所受的应力一直增大,到0.077 207 s时,气囊整个表面都受到应力作用,尤其是气囊底面与中间表面受力较大,但最大值出现在气囊底面与地面接触处。在缓冲即将结束阶段,货物底部一端向气囊内凹陷,导致此时刻气囊变形出现最大值。

2) 在整个缓冲过程中,气囊应变大小的改变与应力大小的变化基本一致,应力大的地方应变也大。由此,当气囊以一定角度着陆时,加之气囊着陆时的地形比较复杂,气囊底面和棱边很容易受到大的冲击力而遭到破坏,在设计气囊时可以通过加厚等措施来对该区域进行保护。

3) 通过对气囊应力应变进行分析,以气囊受到的最大应力为 1.47 MPa 为选择气囊的标准之一,并根据此标准确定空投载荷质量、着陆区域和具体空投任务。由于这只是计算机对变量的分析结果,因此还须进行实体空投试验进行验证。从图3可知,底面和周围的棱需要较强的防护措施,防止其在冲击过程中被破坏。

4 结语

文中建立了冲压式快速空投气囊模型,通过 Ansys/LS-DYNA 软件对气囊在特定角度下的着陆过程进行了仿真研究,得到了缓冲气囊在着陆缓冲中随时间变化的应力应变云图。对气囊在着陆缓冲过程中所受的应力应变情况进行了分析,得出了气囊的最大应力和应变值,最大应力和应变出现的区域,由此确定了气囊需要加强保护的区域。在仿真分析过程中,货物受到的冲击应力较小,气囊在仿真实验中满足要求,说明气囊结构设计和材料选择能够承受较大的冲击,吸能效果好,具有良好的动态缓冲特性。实际空投着陆缓冲是一个非常复杂的过程,文中只是仿真研究了气囊偏离竖直轴 15° 着陆时的应力应变状

态,气囊的位移、速度和加速度等运动参数将是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] 李良春,黄刚,李文生,等. 基于ANSYS/LS-DYNA的新型着陆缓冲气囊仿真分析[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 16—20.
LI Liang-chun, HUANG Gang, LI Wen-sheng, et al. Simulation Analysis of New Type Landing Cushion Airbag Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 16—20.
- [2] 齐明思,刘守君,赵奇,等. 缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 5—8.
QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research on Landing Process of Cushioning Airbag[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 5—8.
- [3] 温金鹏,李斌,杨智春. 缓冲气囊冲击减缓研究进展[J]. 宇航学报, 2010, 31(11): 2438—2447.
WEN Jin-peng, LI Bin, YANG Zhi-chun. Progress of Study on Impact Attenuation Capability of Airbag Cushion System[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2438—2447.
- [4] 徐诚方. 排气式气囊最大过载特性研究[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(5): 9—15.
XU Cheng-fang. Study of the Characteristics of Peak Overload of Airbag with Vent[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(5): 9—15.
- [5] 邵志建,刘志扩. 新型自充气气囊研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S): 84—88.
SHAO Zhi-jian, LIU Zhi-kuo. Study on New Self-inflating Airbag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(S): 84—88.
- [6] 吕航. 自充气式缓冲气囊的设计与分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LYU Hang. Research on Ambient Inflated Cushion Airbag Design and Analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [7] EWING, LIEUTENANT C B. Precision Parachute Capabilities and Their Potential Employment in the Land Force[J]. Canadian Army Journal, 2005, 8(3): 83—92.
- [8] WEN Jin-Peng, LI Bin, YANG Zhi-chun. Study on Cushioning Characteristics of Soft Landing Airbag with Elastic Fabric[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(3/4): 1535—1545.
- [9] 杨卫,齐明思,张皎. 冲压式快速空投硬式气囊缓冲技术研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 106—108.
YANG Wei, QI Ming-si, ZHANG Jiao. Research on Punched Quick Airdrop Cushion[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 106—108.
- [10] 黄刚,李良春. 精确空投缓冲气囊材料研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 66—70.
HUANG Gang, LI Liang-chun. Study of Cushion Airbag Material for Precison Airdrop[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 66—70.
- [11] 牛四波,王红岩,迟宝山. 空投设备缓冲气囊的优化设计[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(5): 36—40.
NIU Si-bo, WANG Hong-yan, CHI Bao-shan. Optimal Design of Airbag Cushion Process for Airdropping Equipment[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(5): 36—40.
- [12] 于成果,李良春. 空投安全着陆的实现途径[J]. 包装工程, 2007, 28(10): 135—137.
YU Cheng-guo, LI Liang-chun. Ways of Air-drop Safety Landing[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 135—137.
- [13] AUDREY H D, FREDERIC R, PASCAL D, et al. Determination of Pre-impact Occupant Postures and Analysis of Consequences on Injury Outcome—Part II: Biomechanical Study[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(1): 75—81.
- [14] 齐明思,张晋宁,杨卫,等. 冲压式快速空投缓冲装置进气道及测压机构设计[J]. 包装工程, 2012, 33(21): 74—77.
QI Ming-si, ZHANG Jin-ning, YANG Wei, et al. Structure Design of Air Inlet and Manometry Mechanism of Ram-type Quick Airdrop Cushioning Device[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 74—77.
- [15] 衣敬强,郝贵祥,王红岩,等. 高原条件下空投设备气囊系统缓冲过程研究[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(3): 364—368.
YI Jing-qiang, HAO Gui-xiang, WANG Hong-yan, et al. Cushioning Process Study on Airbag System of On-plateau-airdropped Equipments[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(3): 364—368.
- [16] 齐明思,于丽娜,殷强,等. 基于ANSYS的冲压式快速空投硬式气囊应力分析[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 69—72.
QI Ming-si, YU Li-na, YIN Qiang, et al. Stress Analysis on Ram Rigid Airbag for Quick Airdrop Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 69—72.
- [17] ZHANG Jun-yuan, LI Dong-jun, BI Ying, et al. Optimization of Vehicle Side Curtain Airbag Module Based on Computer Aided Engineering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(4): 521—527.
- [18] 黄国. 双圆柱气囊缓冲性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
HUANG Guo. Study on Impact Attenuation Capability of Bicylinder Airbags[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.