

空降空投中的气囊缓冲包装技术

张红英, 杨璐瑜, 李姝磊

(南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

摘要: **目的** 对目前缓冲着陆气囊的发展状况进行总结分析, 对重装空投气囊着陆缓冲系统的性能进行评估。**方法** 通过建立某重型装备气囊缓冲系统的 LS-DYNA 有限元模型, 对该模型进行缓冲仿真计算, 对着陆装备的速度历程和加速度历程进行分析。**结果** 在重力加速度作用下, 0.15 s 时间内, 仿真模型从 4.8 m/s 加速到触地速度为 5.4 m/s; 在气囊缓冲作用下加速度减为 0 时, 继续加速到速度最大值, 之后模型在反向加速度作用下急剧减速后产生反向速度, 经过几次波动后最终速度基本为 0, 即着陆成功。**结论** 仿真模型的速度和加速度的变化情况等都满足气囊安全着陆应有的规律, 体现了仿真的可行性。

关键词: 气囊; 缓冲技术; 空降空投

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)17-0020-05

Airbag Cushion Packaging Technology in Airborne Airdrop

ZHANG Hong-ying, YANG Lu-yu, LI Shu-lei

(Ministerial Key Discipline Laboratory of Advanced Design Technology of Aircraft, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the current development situation of the cushion landing and assess the performance of heavy equipment airdrop airbag landing system. The LS-DYNA finite element model of an airbag buffer system for a heavy equipment was established. Simulation calculation was carried out for the model. Velocity history and acceleration history of the landing gear were analyzed. The results showed that under the action of gravity acceleration, the speed of the simulation model accelerated from 4.8 m/s to 5.4 m/s in 0.15 s. The model continued to accelerate to the maximum speed as acceleration was reduced to zero under the cushion of the airbag, and then under the action of reverse acceleration, reverse speed was generated after a sharp deceleration. After several fluctuations, the final speed was basically zero, which meant successful landing. In conclusion, the change process of both the velocity and the acceleration satisfies the rule of airbag safety landing, and the feasibility of simulation is reflected.

KEY WORDS: airbag; cushion technology; airborne airdrop

军事实力乃衡量一个国家是否强大的重要标志, 随着全球各国军事化实力竞争的较量愈演愈烈, 我国急需对军事空降作战相关技术领域进行大量研究, 增强我国的现代战争实力。在军事作战中, 食品、医药品、生活用品的及时运输补给是非常重

要的, 作战战车、坦克和作战士兵的准确空降空投更是相当重要。由于空降空投极易受到气流的影响, 因此如何在不同的环境条件下实现空投目标的准确定点安全着陆, 一直是困扰着各国相关研究人员的问题^[1-3]。战车和坦克属于重型空投件, 在空降

收稿日期: 2016-06-11

作者简介: 张红英 (1976—), 女, 四川仁寿人, 博士, 南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为空降空投系统仿真、降落伞技术。

到地面时, 会遭受地面极大的反作用力, 如不加以保护, 将会导致战车和坦克的损坏, 造成极大的损失, 更会影响军事作战的进度和成败。缓冲气囊具有质量轻、可折叠、制作成本低等特点, 在空降空投、航天器登陆及回收着陆等方面都得到了广泛的应用^[4-7]。美国和欧空局早在 20 世纪就已成功实现了航天探测器的气囊缓冲着陆。目前, 国内对缓冲气囊的研究更多地停留在理论研究、投放试验及仿真分析阶段^[8], 文中将对目前缓冲着陆气囊的发展状况进行总结分析。

1 缓冲着陆的实现

缓冲着陆是实现空降空投定点着陆、航天器登陆以及各类飞行器回收着陆等的重要方式^[9]。目前, 国内外研究的着陆缓冲技术主要有以下 2 种实现途径。

1) 瞬时降低垂直下降速度。这种方法可以利用滑翔伞、着陆缓冲火箭和收缩式制动器实现。滑翔伞的气动滑降操纵较为复杂, 也容易受到侧风等的影响, 而且空投物速度并不能单纯依靠滑翔伞降得很低, 难以实现定点软着陆。着陆缓冲火箭在理论上可以实现空投物的零速度着陆, 但是它成本高, 研发周期长, 有效应用范围不够广, 也不能成为优选。收缩式制动器包括气动强力制动器和钢缆收缩技术, 可以显著降低空投作战装备的着陆速度, 但是它的原理复杂, 实现途径繁琐, 也并不能得到广泛的应用。

2) 在有限距离内耗散能量。这包括利用材料或结构的弹性变形(橡胶、弹簧减振器、减振筒等)、非弹性变形(固体材料或者结构的变形和缓冲气囊等)来实现。由于气囊具有折叠性能良好、质量小、成本低等优点, 因此缓冲气囊以其巨大的优势成为空降空投定点着陆防护、无人机回收以及航天器软着陆等领域实现缓冲着陆的研究重点。

2 气囊缓冲的方式

从缓冲机理方面划分, 缓冲气囊可分为 3 类: 密闭式气囊、排气型气囊和组合式气囊^[10]。在空降空投中, 战车和坦克等作战装备的定点软着陆一般依靠降落伞先减速到 5~8 m/s 后, 连接降落伞和被投物的脱离锁被激活, 降落伞与被投货物之间实现

分离, 再利用缓冲气囊实现软着陆。当然, 不同的缓冲气囊的缓冲机理和效果并不相同。

2.1 密闭式气囊

此类气囊在缓冲过程中通过内部气体的压缩流动以及系统的多次弹跳来消耗冲击能量, 而不是依靠对外界排气来释放冲击能量。由于不涉及到排气的控制问题, 且结构简单、加工制造方便, 具有一定的可靠性, 在航天探测领域有着广泛的应用前景。美国的火星探路者(MPF)和火星漫游者(MER)探测登陆都是采用密闭式气囊实现缓冲的。

此类气囊缓冲系统对着陆点环境的适应性很强, 无论在哪个方向受到冲击, 都能发挥足够大的减缓效果。由于采用此类缓冲系统的着陆器在着陆后容易产生反弹和翻滚, 因此很容易造成被投物的损毁。另外, 当被投物成功实现着陆后, 气囊和被投物之间如何有效地实现分离也是一大难题。

2.2 排气式气囊

此类气囊在受到冲击时, 气囊先压缩, 囊内气压增大。当压力增至排气口的预定开启压力时, 排气口打开, 气囊内的气体通过排气口外排来耗散能量, 直到缓冲过程结束。此类气囊是目前重装空投缓冲防护领域研究的重要方向, 根据不同的设计方法, 可将它再细分为 3 类: 固定排气口面积的缓冲气囊、可控排气口的缓冲气囊、增压型缓冲气囊。

可控排气口的缓冲气囊与固定排气口的缓冲气囊相比, 其缓冲加速度峰值比后者低很多, 大概 40%, 冲击过载更为平缓。前者的最大优势在于: 气囊内的最大压力可维持的时间较长, 减缓作用明显, 效率高。由于排气口控制装置的机构复杂, 达不到可靠性的要求, 因此应用还很少。

增压型缓冲气囊是在第 1 类气囊的基础上, 增设了 1 个压力进气口。在气囊缓冲过程中, 外界气体以一定速度通过进气口进入气囊, 使得气囊内压增大, 并能维持在一定的压力水平, 使得减缓效率得到提高。此类气囊相比于可控排气口气囊, 实施起来更为容易。

2.3 组合式气囊

此类气囊是由密闭式气囊和排气式气囊组合而成, 通常为双气式气囊: 外气囊有固定的排气口,

内气囊为密闭式。着陆缓冲时,当外侧气囊受压后的压力达到排气口预定值,排气口开启,开始向外排气耗散能量,内侧气囊则始终保持密闭状态,起到弹性支撑的作用,避免了缓冲结束时的二次冲击。

组合式气囊相比于前2类气囊,具有压缩行程小、缓冲效率高等特点,能够有效避免反弹,有效载荷的重心低,可对气囊因翻倒造成的空投物件损坏实现有效保护和防止。由于组合式气囊的设计复杂,结构组成多样,有一定的研发困难。

3 气囊缓冲仿真计算

文中利用 CATIA 软件建立了某重型装备物件及其缓冲气囊的几何模型,在 Hypermesh 软件中划分网格,完成网格模型的建立,然后将网格模型导入 LS-DYNA 定义好相应的关键字,进行气囊缓冲仿真。网格模型见图1,该缓冲系统由8个小的气囊单元缝合而成,各相邻气囊单元之间通过隔膜连接在一起,隔膜上有圆形排气孔,气体可以通过它在各气囊单元之间自由流动,并且最终达到平衡。

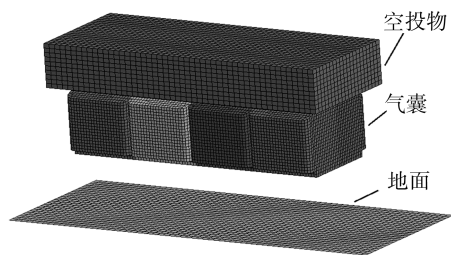


图1 有限元模型
Fig.1 Finite element model

文中研究的气囊为冲压式气囊,气囊材料选择织物材料,在整个研究过程中关注气囊的缓冲性,因此不考虑气囊织物的强度。假设在整个着陆缓冲过程中,气囊不发生破坏。在 LS-DYNA 软件中采用控制体积法定义气囊,空投物和缓冲气囊以 -5 m/s (速度正方向为竖直向上) 左右的速度一起自由下落。

通过计算,得到了气囊缓冲着陆过程中下落方向(即 z 向)的速度和加速度变化曲线,见图2—3。由速度曲线可知:在重力作用下,0.15 s 时间内,着陆空投物由初始速度 -4.8 m/s 加速下落到气囊触地速度 -5.4 m/s 。之后物件继续加速,在加速度减为 0 时,速度达到最大。空投物在气囊缓冲作用下开始急剧减速,减速到 0 后产生反向速度,

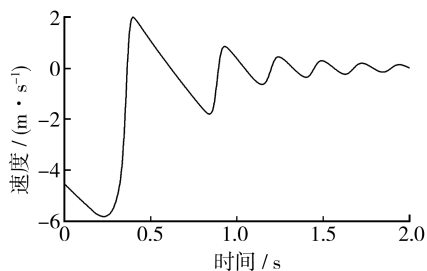


图2 速度曲线(速度方向向上为正)
Fig.2 Velocity history (up speed is positive)

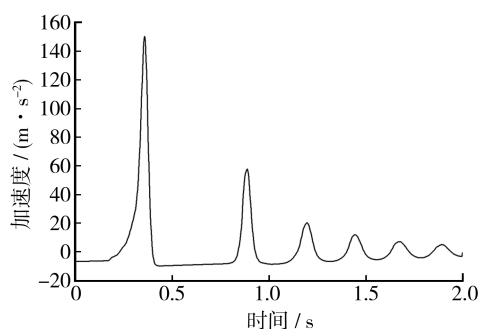


图3 加速度曲线(加速度方向向上为正)
Fig.3 Acceleration history (up acceleration is positive)

发生了轻微的反弹。经历几次波动后,速度基本恢复到 0,即空投物着陆成功。

由加速度曲线可知:着陆空投物的初始加速度为重力加速度 -9.8 m/s^2 ,经过 0.15 s 后,气囊接触地面,在气囊缓冲作用下,着陆空投物的加速度开始减小直至为 0。之后加速度反向迅速增大至峰值 150 m/s^2 ($15g$),随后又急剧减小至 -9.8 m/s^2 。接下来,在空投物的微小反弹和竖直方向上下移动时,加速度都会出现反向,但峰值都远小于第1次的加速度峰值,最后加速度逐渐消失,基本稳定在 0。除此之外,着陆空投物的最大过载满足要求,因此气囊满足缓冲要求。

4 缓冲技术的发展趋势

由于空投缓冲气囊在充气展开方面的功能局限,可以利用空投物在下落过程中产生的高速空气流作为充气来源,使气囊实现自动充气展开^[11—14]。除此之外,虽然有伞空投仍是如今主流的空投方式,但有伞空投受气流影响较大,难以保证着陆点的准确,着陆前降落伞与空投物若不能成功分离,也会造成空投物侧翻、损毁等后果,因此无伞空投^[15]也逐渐成为空降空投的研究方向之一。

4.1 自动充气式缓冲气囊技术

此类气囊也可称为冲压式快速空投气囊^[16],它在缓冲系统启动后,利用冲压式气源,借助于空投设备的下降速度直接从大气中获取工作能源,从充气展开到缓冲着陆都能自发完成,减少了空投物的自重,也减少了控制过程。其实现过程如下所述。

1) 将气囊固定在空投物底部,在空降过程中,整个系统在重力作用下加速下降。

2) 加速过程中,气囊受到的气动阻力也越来越大。当气动阻力达到预定值,气囊进气孔打开,开始充气。

3) 当气囊充满气体,气囊内的气压达到一定值时着陆,气囊受到空投物冲击,在排气孔的参与下完成缓冲着陆。

相比于目前的主流缓冲气囊,自动充气式气囊结构简单,可搭配使用阻尼特征更小的降落伞,使得整个缓冲系统空降时间更短。它还实现了气囊缓冲能力与空投物质量的自适应匹配:空降系统质量越大,降速越快,气动阻力越大,进入气囊内的气体就越多,缓冲效果越好,并且能实现空降空投的系列化、通用化。由此可见,在实际应用中,此类气囊有很好的应用前景,值得进一步进行研究。

4.2 无伞空投缓冲技术

无伞空投是指空投物不使用降落伞减速的空投,具有包装简单、受气流影响小、着陆点更准确、成本低等特点。无伞空投克服了传统有伞空降空投方式的缺陷,无需搭载降落伞和货台,避免了捆绑和叠伞等一系列繁杂的过程,大幅度提高了空降空投保障的环境适应能力和着陆点准确性。鉴于无伞空投难以提供足够的气动阻力,并不是所有空投物都适合无伞空投,对于重型空投物,目前仍然需要依靠降落伞进行减速。

总的来说,在空降空投中结合无伞空降空投技术能降低空投的成本,提高空降空投的有效性,因此它仍然是一大发展趋势。

5 结语

空降空投缓冲气囊仍然迫切需要更多的深入研究,包括在气囊构型的选择、材料的选择、充气方式的选择优化、气囊缓冲的可靠性等方面。可以

利用 LS-DYNA, Abaqus 等有限元分析软件进行气囊充气分析、着陆碰撞分析,并结合加入材料的选择和优化。另外,随着控制技术在各个领域的快速发展,在缓冲气囊中加入主动控制技术仍然是有前景的发展方向。

参考文献:

- [1] 丁毅,王嘉宁,贾向丽. 重装备空投系统的缓冲包装设计[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 96—97.
DING Yi, WANG Jia-ning, JIA Xiang-li. Cushion Design of Air Drop System for Heavy Equipment [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 96—97.
- [2] 黄刚,李良春,林健. 着陆气囊的缓冲机理与技术分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 86—89.
HUANG Gang, LI Liang-chun, LIN Jian. Analysis of Cushion Mechanism and Technology of Landing Airbag [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(4): 86—89.
- [3] CLIFF E W, CHARLES S, JOSEPH W, et al. Impact Attenuating Airbags for Earth and Planetary Landing Systems[C]. AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition, California, 2007: 6172.
- [4] 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.
- [5] ANTHONY P T, BENNEY R, BAGDONOVICH B. Investigation of the Application of Airbag Technology to Provide a Softlanding Capability for Military Heavy Airdrop[R]. AIAA 2001-2045, 2001.
- [6] WARRICK J C, LEE C K. Advanced Airbag System for Cargo Airdrop[C]. 16th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Boston, 2001: 293—303.
- [7] 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—71.
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—71.
- [8] 卫剑征,谭惠丰,万志敏,等. 缓冲气囊展开与缓冲着陆过程的仿真分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5): 1—8.
WEI Jian-zheng, TAN Hui-feng, WAN Zhi-min, et al. Simulation for Airbag Deployment and Landing Process of Inflatable Landing Vehicles[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(5): 1—8.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨旭, 贾钰, 张俊强. 新型自充气式缓冲气囊结构和特性研究[J]. 机械管理开发, 2015(10): 7—9.
YANG Xu, JIA Yu, ZHANG Jun-qiang. Study on the Structure and Characteristics of a New Type of Self-filled Cushion Airbag[J]. Mechanical Management and Development, 2015(10): 7—9.
- [12] 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(S1): 84—88.
SHAO Zhi-jian, LIU Zhi-kuo. Study on New Self-Inflating Airbag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(S1): 84—88.
- [13] 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 & Astronautics, 2012.
- [14] 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.
- [15] 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(1): 54—57.
ZHAO Xi-you, WANG Hong, XU Tao, et al. Free Drop Buffering Packing Material and Technology[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 54—57.
- [16] 许鑫. 自动充气式空投缓冲气囊设计与分析[J]. 机械工程及自动化, 2015(6): 87—88.
XU Xin. Design and Analysis of Auto-inflatable Airdrop Cushion Airbag[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(6): 87—88.