

回收用缓冲气囊关键技术研究进展

周宇¹, 李建阳¹, 邢伟², 洪煌杰³

(1. 航天工程大学士官学校, 北京 102249; 2. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028;

3. 工程兵科研一所, 无锡 214035)

摘要: **目的** 综述国内外回收用缓冲气囊关键技术研究进展, 为缓冲气囊在大型舱体回收中的应用与研究提供基础。**方法** 通过对国内外研究现状和研究成果的分析和总结, 介绍国内外在缓冲气囊的关键技术(气囊充气技术、排气孔爆破压力控制技术、排气孔面积控制技术和气囊增压技术)方面的研究进展, 最后对气囊试验验证技术进行分析梳理。**结论** 国内在回收用缓冲气囊关键技术上的研究, 尤其是在大型舱体回收中的应用研究较少, 还需要借鉴国外成功经验, 进一步深入研究回收用缓冲气囊的关键技术, 为缓冲气囊在重型装备和航天器回收中的应用提供支持。

关键词: 回收; 缓冲气囊; 关键技术; 研究进展

中图分类号: V244.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)01-0080-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.012

Research Progress of Key Technologies of Airbag for Recovery

ZHOU Yu¹, LI Jian-yang¹, XING Wei², HONG Huang-jie³

(1. Space Engineering University, School of Non-Commissioned Officer, Beijing 102249, China; 2. Beijing Special Engineering and Design Institute, Beijing 100028, China; 3. Wuxi First Research Institute, Wuxi 214035, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the research progress of key technologies of the airbag for recovery at home and abroad to provide a basis for the application and research of the airbag in large-scale cabin recovery. Through the analysis and summary of the present research situation and research results at home and abroad, the research progress of key technologies (gas-charging technology, control technology of airbag venting pressure, control technology of airbag vent area and airbag pressurization technology) of airbag at home and abroad was introduced. Finally, the experimental verification technology of airbag was analyzed and combed. Domestic research on the key technologies of the airbag for recovery, especially the applied research in the large-scale cabin recovery, is few, and such key technologies need to be further studied with reference to foreign successful experiences to provide support for the application of the airbag in the recovery of heavy equipment and spacecraft.

KEY WORDS: recovery; airbag; key technologies; research progress

缓冲气囊以其高可靠性, 良好的缓冲性能, 低廉的成本优势在设备物资空投、无人机回收、重型装备空投及航空航天器的着陆回收等领域得到广泛的应用。经过多年的气囊研究, 科研工作者们设计出了多种结构型式的气囊以适应不同领域的缓冲保护要求。在地外星球探测器的应用中, 美国的“火星探路者”^[1]

和欧空局的水星探测器^[2]均使用了缓冲气囊作为探测器软着陆的缓冲系统。在无人机回收应用方面^[3-4], 美国、加拿大等国的无人机气囊缓冲减震技术较为成熟, 而在我国无人机回收领域, 该项技术还不成熟。在重型装备空投应用中, 俄罗斯空降兵部队采用的 P-7 (或 PP-128) 型空投货台和 PBS 无货台空

收稿日期: 2018-09-03

作者简介: 周宇 (1971—), 男, 航天工程大学副教授, 主要研究方向为装备保障。

投系统(“舍里夫”空投系统)均采用自充气式气囊缓冲,采用“舍里夫”空投系统的 BMD-1 和 BMD-3 伞兵战车还成功实现了载人空投试验。缓冲气囊技术在民用工程中的应用还有汽车安全气囊、船舶气囊下水和助浮打捞等。

我国空投装备采用的缓冲气囊是自然充气式气囊,该气囊系统不用携带充气装置,结构简单、轻便,但由于是利用外界大气进行充气,对环境条件依赖性强,高原空投时容易出现空投装备的倾覆现象^[5]。国外在载人航天器回收中应用了缓冲气囊(主要是组合型气囊)作为着陆缓冲装置,而国内仅有北京空间机电研究所为某大型载荷设计了一款组合型气囊,这是我国首次将气囊缓冲方式运用在载人航天领域^[6],对缓冲气囊的关键技术研究仍有较大发展空间。

文中首先简要介绍气囊的分类,在此基础上,综述国内外在缓冲气囊的关键技术(气囊充气技术、排气孔爆破压力控制技术、排气孔面积控制技术和气囊增压技术)方面的研究进展,最后对气囊试验验证技术进行分析梳理,为缓冲气囊在重型装备和载人航天器回收等方面的应用提供参考。

1 气囊的分类

缓冲气囊根据其充气方式可分为自然充气式气囊和高压充气式气囊;根据气囊气室的多少又可以分为单气室气囊、双气室气囊和多气室气囊;根据在缓冲过程中是否具有排气能力,可分为密闭式气囊、排气式气囊和组合型气囊,而排气式气囊又分为固定排气孔气囊、可控排气孔气囊和增压型气囊 3 种,见图 1。由于温金鹏^[7]、黄刚^[8]、于成果^[9]等已经对国内外缓冲气囊进行了详细的分类和总结,文中不再赘述。

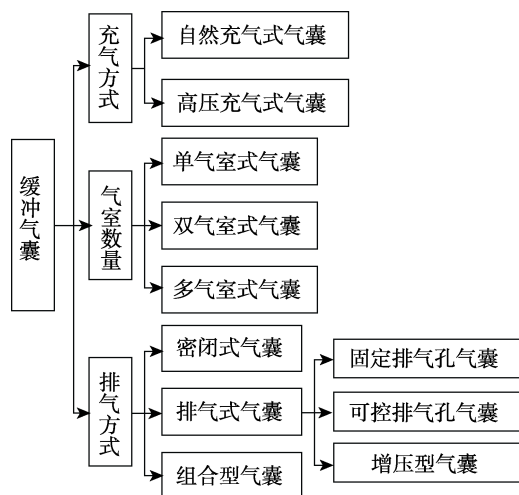


图 1 气囊的分类

Fig.1 Categories of airbags

2 着陆缓冲气囊关键技术研究现状

随着科学技术的进步和社会经济的发展,许多新型气囊产品概念不断被提出,推动了气囊产品的技术进步和应用研究,气囊逐步向更轻、更强、更复杂的方向发展,使其能满足复杂、严酷环境下的应用需求。在空投装备、航天器回收等领域,需要研究并运用相应的气囊关键技术来保障复杂着陆条件下的着陆安全性,因此,迫切需要研究气囊充气技术、排气孔爆破压力控制技术、排气孔面积控制技术和气囊增压技术等来满足回收载荷在多地域、复杂环境条件下的安全训练和使用的要求。

2.1 气囊充气技术

缓冲气囊根据其充气方式可分为自然充气式气囊和高压充气式气囊。所谓自然充气式气囊是指回收系统不需要携带充气装置,而是通过气囊结构的合理设计以实现通过吸收大气来对气囊充气。俄罗斯的“舍里夫”空投系统使用的气囊是典型的自然充气式气囊,该气囊底部设计有一个进气口,在气囊下落过程中利用气囊的自重展开并充气。自充气式气囊的优点是不用携带充气装置,结构简单、轻便,但由于是利用外界大气进行充气,对环境条件依赖性强,无法用于重型装备高原空投或航天器登陆等。郝贵祥^[5,10]提到使用该类型气囊的空投系统在高原环境下空投容易出现空投装备倾覆的现象。经过理论分析发现,在高原环境下由于空气密度和大气压力等气体参数不同,导致自然充气式气囊缓冲效能降低,这是造成空投装备倾覆现象的重要原因之一。自充气式气囊由于自身结构型式限制了其广泛使用,因此,在复杂环境条件下就需要采用高压充气式气囊。

高压充气式气囊是指通过携带的气体发生器或高压气瓶对气囊进行充气。气囊的充气要满足设计要求的时间、压力、体积、可控性和稳定性,并需控制充气系统的总重量。气囊在载荷着陆前开始充气展开,充气过程几乎要在瞬间完成,因此一般采用化学反应充气方式。气囊充气系统的组成见图 2。高压充气的关键在于气体发生剂的选用、准确的发生时间和充气历程,还需要对生成气体迅速冷却防止气囊织物温度过高。

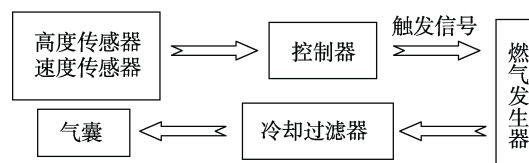


图 2 气囊充气系统示意

Fig.2 Schematic diagram of airbag inflation system

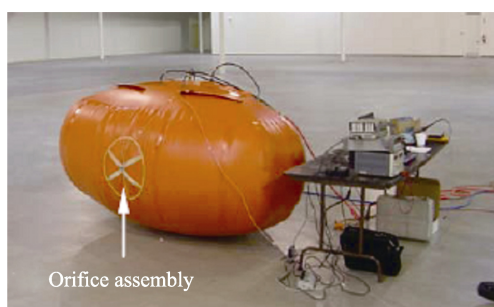
目前气体发生剂主要选用叠氮化钠合剂(NaN_3)和硝基纤维。叠氮化钠合剂在燃烧后产生高温、高压

的氮气,氮气占比达到99%,其余为氧气和水蒸气。气体最高温度可达到500℃,但持续时间很短,产生的气体在高温条件下,有良好的化学稳定性。火星探路者的气体发生器^[11-13]的设计要求是必须能够在真空极端温度(-45~+45℃)下正常工作,能够承受进入火星大气层时受到的45g过载冲击和在火星地面着陆时5次连续弹跳过程中高达62.5g的冲击,该气体发生器需要在(1.5±0.5)s产生(50±4)m³的气体。

2.2 排气孔爆破压力控制技术

国内外许多学者通过试验和仿真模拟的方式分析了气囊排气孔爆破压力对气囊缓冲特性的影响^[14]。研究表明,爆破压力基本不影响达到爆破压力前的压缩变形阶段和之后的泄气缓冲阶段的加速度变化,其只决定冲击加速度峰值。爆破压力越高,冲击加速度峰值越大,对应整个缓冲过程,速度减小量越大,最终的减速效果越好。

为了控制气囊的爆破压力值,常采用在排气孔上覆盖爆破膜的方式,爆破压力值可由爆破膜的材料特性进行初步估计,但是确切的爆破压力值还需要通过气囊充气爆破试验获得。当气囊内压力超过爆破膜破坏强度时,爆破膜变形直至破裂,气囊开始排出气体,达到控制气囊爆破压力的目的。国内某型无人机缓冲气囊^[15]就是采用爆破膜来控制气囊爆破压力的。Irvin Aerospace Inc 的 Cooper^[16]等采用火工品开启气囊排气孔,气囊开启前后的对比见图3。以爆破膜覆盖排气孔的方式无法实现排气时机的主动控制,而火工品可以通过传感器控制触发时机以实现排气时机的主动控制,因此火工品控制排气常被用于航天器回收气囊中。



a 爆破前



b 爆破后

图3 气囊排气孔爆破前后对比

Fig.3 Comparison of airbag vent before and after blasting

2.3 排气孔面积控制技术

排气孔面积是影响气囊缓冲效果最主要的参数之一,在气囊缓冲过程中,可以通过对气囊排气孔面积的控制来提高气囊缓冲效果。其工作原理是通过排气孔面积控制机构,实时调节气囊排气孔大小控制气体流量,从而控制气囊内压力。排气孔面积控制技术的难点是控制机构的设计和安装复杂,载荷着陆时气囊缓冲过程极短,难以实时控制气体流量。

Snyder^[17]等推导了在气囊固定、缓冲物体运动的情况下,要获得理想缓冲效果排气孔的变化规律。戈嗣诚^[18]和陈帅^[19]从解析分析方法的基本物理原理出发,推导得出可控排气孔气囊设计时的排气孔面积变化规律,根据解析计算结果分析固定排气孔气囊和可控排气孔气囊的缓冲性能,以此评价设计的优劣。

国内外专家在主动控制气囊的研究上取得了一定的成果。Lee^[20-21]通过理论分析和试验研究对比了固定排气孔气囊和可控排气孔气囊的缓冲特性。气囊排气孔面积变化曲线^[20]见图4,由图4可以看出,理想的排气孔面积需在缓冲开始时迅速开启至最大位置,然后线性地减小至关闭。研究结果表明,通过实时控制排气孔面积,缓冲特性曲线趋于平缓,冲击加速度峰值明显减小,缓冲特性对比见图5^[21]。

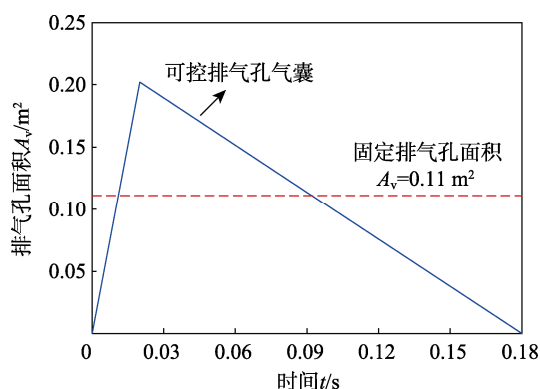


图4 气囊排气孔面积变化曲线

Fig.4 Airbag vent area change curve

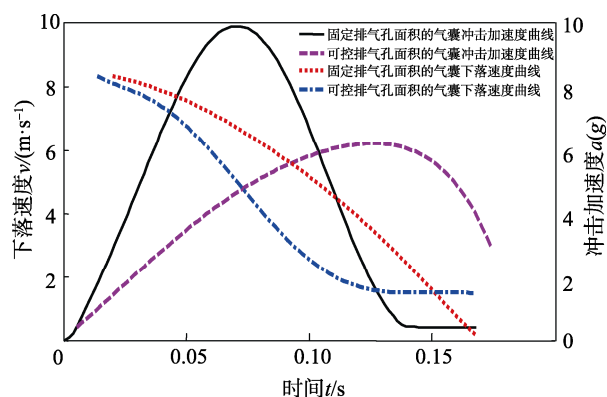


图5 固定与可控排气孔面积的气囊缓冲特性对比

Fig.5 Performance comparison between constant-vent and vent-control airbags

Rosato^[22]设计了3种单向阀(包括2种不同的线性弹簧单向阀和1种静磁单向阀)作为气囊排气孔控制机构,通过气囊缩比模型跌落试验研究单向阀的对气囊缓冲性能的改进作用。试验结果表明,3种单向阀均能减小缓冲过程中的气囊内压幅值,缩短气压脉冲时长。

南京航空航天大学的戈嗣诚^[23-24]提出了智能气囊的概念,排气孔采用智能材料设计而成,能在缓冲过程中实现主动判断,使得缓冲过载变得平缓。该主动控制装置由压力传感器、加速度传感器、排气驱动机构以及微机控制系统组成。排气控制系统能够根据传感器获得的信号给动作机构发出信号,控制其调节排气孔面积,排气孔面积的变化导致瞬时排气流量变化,以此起到控制缓冲过载的作用。通过图6所示的传统气囊与智能气囊的冲击加速度曲线对比可以看出,智能气囊能够使得冲击过载曲线变得平缓,提高气囊缓冲效率。戈嗣诚还将智能气囊作为直升机抗坠毁座椅缓冲器^[25],提高直升机的安全性。由于气囊缓冲时间极短,对排气孔面积控制技术的理论研究较多,实现理想的排气孔面积变化规律对作动机构要求非常高,在工程应用中尚未见到相关报导。

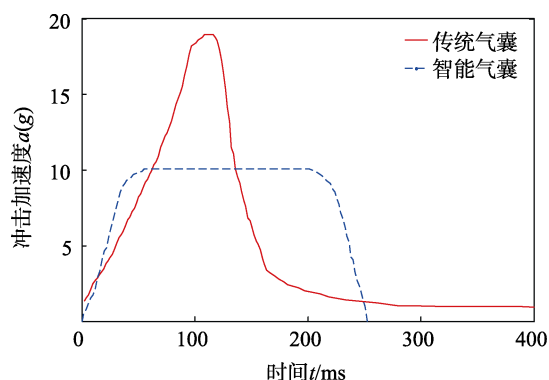


图6 传统气囊与智能气囊的冲击加速度曲线对比
Fig.6 Comparison of impact acceleration curves between traditional and intelligent airbags

2.4 气囊增压技术

气囊增压技术是指在缓冲过程中,以一定的质量流率向气囊内充入气体,使气囊内的压力变化平缓,提高缓冲效果。Lee^[20-21]在研究排气孔面积控制技术的同时,研究了气囊增压技术来改进气囊缓冲性能。通过理论分析和试验研究,采用增压缓冲气囊时,与可控排气孔气囊的缓冲性能曲线相当。气囊增压技术实施起来相比可控排气孔气囊较为容易,但是受限于缓冲过程时长,在缓冲过程实现实时增压也是非常困难的。

3 气囊试验验证技术

气囊试验验证技术包括多个方面,总体而言分为充气试验技术、缓冲试验技术以及泄气试验。气囊式

软着陆器原理样机先进行快速充气试验,测试气囊是否能在程序规定的时间内完成充气过程,以及验证气囊折叠和捆绑的方式的有效性。

进行气囊缓冲试验首先需要研制一个能够真实地模拟气囊实际着陆工况的试验平台,以实现各项气囊缓冲试验研究和验证。尽管气囊通常会采用类似于芳纶织物这种密度低、强度高、易于加工成型材料,仍然需要通过缓冲试验测试气囊的压缩过程和冲击载荷,确保气囊内压引起的织物应力小于气囊材料强度极限,确保有效载荷结构缓冲过程中的冲击过载小于最大允许过载。完成缓冲试验后,一些特殊用途的气囊还需要进行泄气测试,确保气囊在泄气收缩后有效载荷能够顺利展开,进行下一步的作战、探测等任务。

3.1 充气试验

进行气囊充气试验的目的是研究气囊充气展开时间、验证气囊的折叠捆绑方法的有效性以及验证气囊充气展开过程的可靠性。第1代猎户座探测车气囊缓冲系统原理样机^[26]在进行快速充气展开试验4个时刻的截图见图7。通过充气展开试验表明,气囊能够在20s内完成展开和充气。

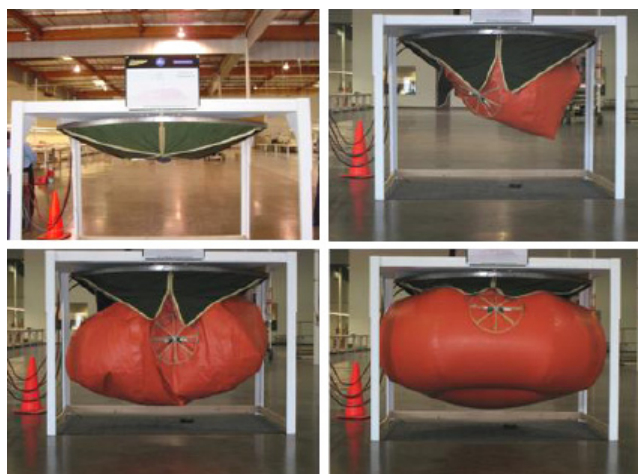


图7 快速充气展开试验
Fig.7 Rapid inflation testing

南航^[11]进行了不同充气速度的气囊充气展开试验,利用试验数据验证数值模拟的准确性和预见性。试验结果表明,气囊折叠对气囊展开过程有影响,一定程度上阻碍了气囊的展开,使气囊初期压力分布不均匀,各部分展开程度各不相同,影响了气囊工作稳定性。随着气囊压力的升高,气囊充气流量有所减小,而且流量越大,减小的幅度也越大。在充气时,应当适量提高充气流量以保证气囊的展开时间。

3.2 缓冲试验

装备或航天器回收时通常会采用气动减速装置

将载荷下降速度减小至 8 m/s 左右, 水平速度主要受当时风速影响, 因此, 为研究气囊缓冲特性, 可以通过建立不同的跌落试验平台, 将载荷吊高后垂直或抛物线自由下落模拟其垂直和水平速度。美国的 Jet Propulsion Laboratory^[27-29]为火星探路者建立了跌落试验平台, 该试验平台是建立在 NASA Plum Brook Station 世界最大的真空室内(内部直径约 30 m, 圆屋顶高度约 37 m)。着陆地面上有一个可调节的斜坡, 用于模拟火星地面坡度, 斜坡表面还布置了高度为 0.1~0.5 m、大小不等的火山岩石, 用于模拟一个更为真实的着陆环境。

猎户星座探测器着陆缓冲气囊试验主要是在 NASA 兰利研究中心^[26,30-34]。该塔架采用钢架结构, 高度约 73 m。高塔能够将载荷-气囊吊高, 垂直投放或模拟一定的水平速度投放。在地面上放置一定高度的带网格的白板, 用于观察气囊最后离地高度和下落速度。

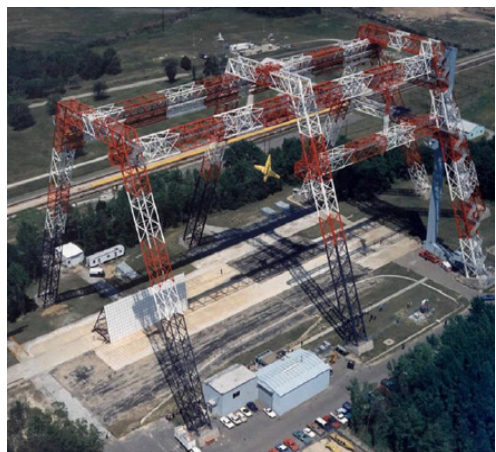


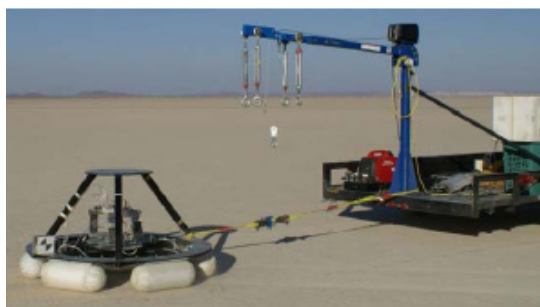
图8 NASA 兰利研究中心着陆冲击试验设备
Fig.8 NASA LaRC LandIR facility

除了高塔投放实验, 波音公司的 Lee^[35]设计了一种移动式气囊投放平台, 见图 9a。该平台能够进行垂直投放和具有水平速度的投放试验, 同时可以进行地面阻力系数测量试验, 见图 9b。

万志敏^[36]设计和研制了用于飞行器模型着陆试验的动态投放装置和测试系统, 该系统主要由刚性支架和一套由光控开关、电磁离合、机械脱钩装置组成的光-电-机控制系统组成。通过该系统对 2 种飞行器模型进行不同的垂直速度、水平速度、落地姿态的模拟试验。牛四波^[37]进行了自充气式气囊室内垂直投放试验, 试验数据用于验证空投装备回收气囊有限元模型的可信性。近几年国内的跌落试验平台发展较快, 但是在重载跌落试验的条件建设方面还需要投入, 为了适应未来新型航天器的发展方向, 要求我国尽快建立既能模拟载荷下落垂直、水平速度, 又能模拟不同地面环境的大载重跌落试验平台。



a



b

图9 移动式气囊投放平台
Fig.9 Mobile airbag test facility

4 结语

缓冲气囊是装备空投及航天器回收技术的一个重要组成部分, 随着缓冲气囊技术的发展, 对它提出了更高更苛刻的要求。在载人航天领域, 组合型气囊是国内外研究的一种较有前景的着陆缓冲方式, 它能在舱体回收着陆时有效吸收系统动能并在缓冲后期避免舱体与着陆地面的硬冲击。在保证的航天员不受过大冲击过载的同时, 还力求返回舱能够重复使用, 因此需要运用缓冲气囊关键技术以尽可能提高气囊缓冲效能, 减小冲击过载, 保障回收着陆的安全性。

参考文献:

- [1] CADOGAN D, SANDY C, GRAHNE M. Development and Evaluation of the MARS Pathfinder Inflatable Airbag Landing System[J]. Acta Astronautica, 2002, 50(10): 633—640.
- [2] BOWN N W, DARLEY M G. Advanced Airbag Landing Systems for Planetary Landers[C]// 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Arlington. Munich, Germany, 2005, AIAA2005-1615: 1—16.
- [3] TURNER C T, RYAN T, GIRARD L A, et al. Airbag Impact Attenuation System for the AQM-34V Remote Piloted Vehicle[C]// 7th Aerodynamic Decelerator and Balloon Technology Conference, San Diego, California, October 1981, AIAA81-1917: 1—7.

- [4] STIMLER F J. A Loading Prediction Technique for Designing Impact Bag Systems with Predictable Performance[C]// 5th Aerodynamic Decelerator Systems Conference, Albuquerque, New Mexico, November 1975, AIAA 75-1378: 1—8.
- [5] 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(3): 173—178.
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(3): 173—178.
- [6] 李建阳, 周宇, 王红岩, 等. 组合型气囊参数对缓冲特性的影响分析[J]. 载人航天, 2018, 25(5): 568—573.
LI Jian-yang, ZHOU Yu, WANG Hong-yan, et al. Effects of Combined Airbag Parameters on Cushioning Characteristics[J]. Manned Spaceflight, 2018, 25(5): 568—573.
- [7] 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.
- [8] 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—108.
HUANG Gang, LI Liang-chun, LIN Jian. Analysis of Cushion Mechanism and Technology of Landing Airbag[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(4): 86—108.
- [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 Airdrop Safety Landing[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 135—137.
- [10] 郝贵祥. 空降车空投着陆响应分析及缓冲气囊系统参数优化方法研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2011.
HAO Gui-xiang. Research on Impact Responses of Airborne Tracked Vehicle and Parameter Optimization for Airbag System[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2011.
- [11] 周涛. 某型气囊展开过程数值模拟及试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
ZHOU Tao. Numerical and Experimental Study of an Airbag[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [12] MCGRATH D K, KIRSCHNER T J, MIONSKE G L, et al. Mars Pathfinder Airbag Gas Generator Development[C]// 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cleveland, OH, July 1998, AIAA1998-3845: 1—7.
- [13] 赵秋艳. 火星探路者的可膨胀气囊着陆系统综述[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(4): 6—12.
ZHAO Qiu-yan. Inflatable Airbag Landing System of Mars Pathfinder[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2001, 22(4): 6—12.
- [14] 方康寿. 无人机回收气囊减震性能的有限元研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
FANG Kang-shou. The FEA Research On Aseismic Performance of Recovery Airbag on UAV[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [15] 侯大军. 某型无人机气囊系统设计及动态性能测试[J]. 应用天地, 2012, 31(3): 68—78.
HOU Da-jun. UAV Cushion Airbag Design and Dynamic Performance Testing[J]. Application Notes, 2012, 31(3): 68—78.
- [16] COOPER M, SINCLAIR R, SANDERS J, et al. Design and Testing of an Airbag Landing Attenuator System for a Generic Crew Return Vehicle[C]// 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Arlington Munich, Germany, 2005, AIAA2005-1616: 1—23.
- [17] SNYDER T, SITTER J, CHUNG J N. Design and Testing of an Airbag System for High-mass, High-velocity Deceleration[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1997, 119(4): 631—637.
- [18] 戈嗣诚, 陈斐. 智能气囊的冲击主动控制原理实验研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 600—603.
GE Si-cheng, CHEN Fei. Experimental Study on Theory of Impact Active Control of Intelligent Airbag[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 600—603.
- [19] 陈帅, 李斌, 温金鹏, 等. 软着陆气囊缓冲特性与参数设置的理论研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(4): 25—28.
CHEN Shuai, LI Bin, WEN Jin-peng, et al. Cushioning Characteristic and Parameter Design of a Soft Landing Airbag[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(4): 25—28.
- [20] LEE C, ROSATO N, LAI F. An Investigation of Improved Airbag Performance by Vent Control and Gas Injection[C]// 11th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, San Diego, CA, April 1991, AIAA91-0892: 455—464.
- [21] LEE C. Methods for Improved Airbag Performance for Airdrop[R]. Technical Report Natick/TR-93/002, Natick, MA: U S Army Natick Research, Development and Engineering Center, 1992.
- [22] ROSATO N P. Passive Airbag Vent Control Valve Study[R]. Technical Report Natick/TR-00/010, Natick, Massachusetts: U S Army Soldier and Biological Chemical Command Soldier Systems Center, 1999.
- [23] 戈嗣诚, 陈斐. 缓冲特性可控的智能气囊装置试验研究[J]. 振动工程学报, 2004, 17(4): 377—381.
GE Si-cheng, CHEN Fei. Experimental Study on Intelligent Airbag Device with Controllable Cushioning

- Characteristics[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(4): 377—381.
- [24] GE Si-cheng. Characteristic of Intelligent Air Bag Venting Structure Actuating by Electrostrictive Stack Actuator[J]. Journal of Southeast University, 2002, 18(2): 119—122.
- [25] 戈嗣诚, 黄礼耀. 直升机抗坠毁座椅用智能气囊缓冲器初步研究[J]. 洪都科技, 2002(3): 12—17.
GE Si-cheng, HUANG Li-yao. Preliminary Study on Intelligent Airbag Cushioning Device for Anti-Crash Seat of Helicopter[J]. Hongdu Science and Technology, 2002(3): 12—17.
- [26] TUTT B, GILL S, WILSON A. A Summary of the Development of a Nominal Land Landing Airbag Impact Attenuation System for the Orion Crew Module[C]// 20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, Seattle, WA, 2009, AIAA2009-2922: 1—18.
- [27] ADAMS D S. Mars Exploration Rover Airbag Landing Loads Testing and Analysis[C]// 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Palm Springs, California, 2004, AIAA2004-1795.
- [28] STEIN J, SANDY C. Recent Developments in Inflatable Airbag Impact Attenuation Systems for Mars Exploration[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structure, Structural Dynamic, and Materials Conference, Norfolk, Virginia, 2003, AIAA2003-1900: 1—6.
- [29] SALAMA M, DAVIS G, KUO C P, et al. Simulation of Airbag Impact Dynamics for Mars Landing[C]// AIAA Dynamics Specialists Conference, Salt Lake City, UT, 1996, AIAA96-1209: 78—86.
- [30] SMITH T R, SANDY C R, WILSON D, et al. CEV Airbag Landing System Design[C]// 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Williamsburg, VA, 2007, AIAA2007-2523: 1—10.
- [31] WELCH J V. CEV Airbag Landing System Modeling[C]// 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Williamsburg, VA, 2007, AIAA2007-2533: 1—9.
- [32] WILLEY C E, SANDY C, WELCH J, et al. Impact Attenuating Airbags for Earth and Planetary Landing Systems[C]// AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition, Long Beach, California, 2007, AIAA2007-6172: 1—13.
- [33] BARROWS D A, BURNER A W, BERRY F C, et al. Photogrammetric Measurements of CEV Airbag Landing Attenuation Systems[C]// 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2008, AIAA2008-846: 1—14.
- [34] SHOOK L S, TIMMERS R B, HINKLE J. Second Generation Airbag Landing System for the Orion Crew Module[C]// 20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Seattle, Washington, 2009, AIAA2009-2989: 1—8.
- [35] LEE T J, MCKINNEY J, FARKAS M A. Airbag Landing Impact Test/Analysis for the Crew Exploration Vehicle[C]// 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamic, and Materials Conference, Schuamburg, IL, 2008, AIAA2008-1745: 1—20.
- [36] 万志敏, 王莉, 谢志民, 等. 缓冲气囊的特征内压[J]. 力学与实践, 1998, 20(6): 18—20.
WAN Zhi-min, WANG Li, XIE Zhi-min, et al. Characteristic Pressure of Airbag[J]. Mechanics in Engineering, 1998, 20(6): 18—20.
- [37] 牛四波. 空降车空投过程仿真及气囊参数匹配与优化研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2012.
NIU Si-bo. Simulation on Airdrop Process of Airborne Vehicle & Research on Matching and Optimization for Airbag Parameters[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2012.