

## 技术专论

## 着陆气囊的缓冲机理与技术分析

黄刚<sup>1,3</sup>, 李良春<sup>2</sup>, 林健<sup>1</sup>(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 石家庄 050000;  
3. 中国人民解放军75234部队, 广东 东莞 523638)

**摘要:** 对着陆气囊缓冲的作用机理和缓冲技术进行了对比分析, 并且按照对着陆气囊的排气控制的形式、气囊集气方式以及2种方式相结合的形式对着陆缓冲气囊进行了分类; 对当前国内外主要的着陆气囊进行了总结, 并对其相应的着陆缓冲技术进行了分析; 对着陆气囊缓冲技术的发展现状进行了分析总结, 并提出了着陆气囊缓冲技术的发展趋势。

**关键词:** 着陆气囊; 缓冲技术; 发展趋势

**中图分类号:** U244.2      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2011)04-0086-04

## Analysis of Cushion Mechanism and Technology of Landing Airbag

HUANG Gang<sup>1,3</sup>, LI Liang-chun<sup>2</sup>, LIN Jian<sup>2</sup>(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Ordnance Engineering institute, Shijiazhuang 050000, China;  
3. Unit 75234 of PLA, Dongguan 523638, China)

**Abstract:** The main cushion mechanisms and cushion technologies of landing airbag were analyzed and compared. Landing cushion airbag was classified by control of outlet, style of air collection and the combination of two methods. The main cushion technologies of landing airbag in the world were summarized, and the corresponding landing cushion airbag technologies were analyzed. The development status of cushion technology of landing airbag were analyzed and summarized. The development trends of landing airbag cushion technology were put forward.

**Key words:** landing airbag; cushion technology; development status

着陆缓冲是实现精确空投、无人机回收和航天器登陆及回收等安全顺利着陆的重要方式和手段。目前国内外研究的着陆缓冲技术主要有2种: 1) 瞬时降低垂直下降速度, 包括利用滑翔伞、着陆缓冲火箭、收缩式制动器; 2) 在有限距离内耗散能量, 包括

利用材料或结构的弹性变形、非弹性变形(固体材料或结构的变形和缓冲气囊)<sup>[1]</sup>。由于气囊具有超小的质量, 良好的折叠性能、低廉的成本等独特优势, 因此气囊缓冲技术成为精确空投防护、无人机回收、航天器软着陆等领域的重点发展方向。

收稿日期: 2011-03-26

作者简介: 黄刚(1985—), 男, 四川安岳人, 硕士研究生, 主要研究方向为通用装备物流工程及其应用。

## 1 着陆缓冲气囊的作用机理及其分类

气囊缓冲的基本机理是依靠气囊在压缩载荷下的变形吸收能量<sup>[2]</sup>,因此缓冲特性主要取决于气囊的变形特性,即气囊的刚度。刚度过小将造成气囊高度增加或剩余高度不足,刚度过大使得回收物体易出现反弹和不允许的二次冲击,因此气囊的结构对于着陆缓冲有着十分重要的作用。当气囊的结构确定后,气囊的刚度完全由囊内气体的压力(初始内压)即特征内压决定。特征内压主要取决于气囊尺寸,气囊尺寸越大特征内压越小。不同类型气囊的缓冲机理并不完全相同,适用范围也不一样。通过几种不同的分类方式对主要的缓冲气囊进行了分类,并对其相应的缓冲作用机理进行了分析总结。

### 1.1 按气囊排气孔的形式分类

按气囊排气孔的形式分类,着陆缓冲气囊可分为不具有排气孔的气囊、排气孔面积固定的气囊、具有可控排气孔的气囊3种形式。

#### 1.1.1 不具有排气孔的气囊

不具有排气孔的气囊是使用最早、结构最简单的一种气囊。它在缓冲过程中不排气,依靠着陆冲击时压缩气囊内的气体来吸收动能,并最终通过周围环境的塑性变形和与地表的摩擦来耗散能量。缓冲过程的加速度峰值大致与气囊的初始高度成反比,气囊内的最大压力和减加速度大致与初始速度的平方成正比。美国喷气实验室(JPL)在研制“火星探路者”着陆器的着陆缓冲系统时,使用的就是一种新型的不具有排气孔的气囊系统。这种气囊系统是一种全向缓冲系统,不论着陆点的地貌情况如何,不

论受到冲击的方向如何,都有足够的缓冲减震作用;而且还允许着陆器在着陆后反弹和翻滚若干次才静止不动,达到了很好的缓冲着陆的效果。

#### 1.1.2 排气孔面积固定的气囊

排气孔面积固定的气囊,是指气囊在缓冲过程中具有排气能力,它的排气孔面积为固定值。在受到着陆冲击时,充气气囊受到向下的压力,压缩囊内气体以吸收能量,当压力达到设计的极限压力值时排气孔开启,囊内气体通过排气孔向外排泄来耗散能量。气囊通过对冲击能量的吸收与释放来实现缓冲着陆。这种气囊对着陆地点的要求较高,如果着陆区地形较为崎岖且有坡度较高的小坡或者岩石,将会损坏气囊和空投物资。

#### 1.1.3 具有可控排气孔的气囊

具有可控排气孔的气囊,是相对于排气孔面积固定的气囊而言的,其作用机理依然是通过压缩囊内气体吸收能量和通过排气孔排出气体释放吸收能量来实现缓冲着陆。由于该气囊设计了一种新型的排气阀,从而能够利用着陆时气体压力的增加来调节排气阀气体的流量,达到控制有效载荷着陆冲击加速度峰值的目的,其缺点是排气阀的设计与安装复杂,控制排气流量比较困难。

3种气囊形式的优缺点对比见表1。

## 1.2 按气囊的集气方式分类

按气囊的集气方式分类,着陆缓冲气囊又可分为自充气气囊、自带气源气囊和自带气源与自充气相结合的3种形式。

#### 1.2.1 自充气气囊

自充气气囊不需要外带充气气源,而是通过对气囊结构的设计以实现通过吸收外界大气来对气囊

表1 不同排气孔形式气囊对比

Table 1 Comparison of airbag in different style of the outlet

气囊形式	优点	缺点
不具有排气孔的气囊	结构简单,经济性好	缓冲效果不理想,易导致多次反弹和冲击,对缓冲物造成损坏
排气孔面积为固定的气囊	结构较简单,缓冲效果较好	气囊对着陆地点的要求较高
具有可控排气孔的气囊	能够实现平滑缓冲,缓冲效果好	结构复杂,排气控制比较困难

进行充气的一种气囊形式。其作用机理是通过设计机械结构或其他方式将气囊支撑起来,由于下落速度产生气囊内外压力差,从而利用设计在气囊底部

迎风的进气孔吸入空气将气囊充满。该种气囊的优点是不用另带气源,从而使得整个缓冲系统更加简单、轻便,但由于只是利用外界大气充气,对环境条

件的依赖较大,而且气囊的内压无法得到充足的保证,使得空投或者航天器登陆及回收的质量范围有所限制。

### 1.2.2 自带气源气囊

自带气源气囊就是囊内充填的气体完全靠系统自带的储气容器,而不需要从外界环境吸收气体;充填气囊的压缩空气一般采用高压贮气罐贮存的压缩气体,小型气囊也可使用气体发生器产生气体(利用化学反应)。该种形式的缓冲气囊结构设计相对简单,而且只要气源足够,囊内气体压力可以得到充分保证,再结合排气孔的泄气释放能量,就能够达到良好的着陆缓冲的目的。由于该种气囊完全自带气源,对整个着陆缓冲系统的载荷质量就有很大的增加,而且储气容器与气囊的连接以及气体充气的过程相对比较复杂,充气控制也比较困难。

### 1.2.3 自带气源与自充气相结合的气囊

这种气囊形式既能通过自带气源进行充气,又能通过结构上的设计从外界环境吸收气体来充气。通过这样的设计,能够发挥自带气源和自充气2种形式的优势,即在满足囊内气体压力充足的同时,又在一定程度上减小了质量。通过自充气的结构设计,可以大大减小对自带气源的依赖,只需携带较小的储气容器就可以达到囊内气压的要求。虽然这种气囊能够较好地满足着陆缓冲对气压的要求,但结构设计更加复杂,可操作性有所下降。

3种气囊形式优缺点的对比见表2。

表2 不同集气方式气囊对比

Table 2 Comparison of airbag in different gas collection methods

气囊形式	优点	缺点
自充气气囊	结构简单,经济性好	囊内气压不足,对缓冲重量限制较高
自带气源气囊	囊内压力得到保证,对缓冲重量没有限制,缓冲效果好	由于自带气源,增加缓冲系统自身重量,经济性不好
自带气源与自充气相结合的气囊	结构较简单,能减小缓冲系统自身重量,缓冲效果较好	结构相对复杂,控制比较困难

囊缓冲系统经过折叠后安装于主登陆舱和底部隔热板之间。在登陆舱着陆过程中,当速度达到设定值时,隔热板被分离,着陆缓冲气囊通过自带气源进行充气,形成工作状态。它是由6个首尾相连而又相互独立的月牙形气囊构成的一个环状形式的缓冲气囊系统(如图1a所示),这种结构设计使得该系统不仅在稳定性和可靠性上有了提高,而且由于各个气

## 1.3 2种分类方式气囊的组合

按照2种分类方式对气囊形式进行组合,即可形成9种适应不同应用需求的新型气囊形式:不具排气孔的自充气气囊、不具排气孔的自带气源气囊、不具排气孔的自带气源与自充气相结合的气囊、排气孔固定的自充气气囊、排气孔固定的自带气源气囊、排气孔固定的自带气源与自充气相结合的气囊、排气孔可控的自充气气囊、排气孔可控的自带气源气囊、排气孔可控的自带气源与自充气相结合的气囊。这9种气囊形式基本涵盖了着陆气囊的所有种类和形式。

## 2 国内外主要着陆气囊缓冲技术分析

### 2.1 国外主要着陆气囊缓冲技术

国外着陆气囊缓冲技术主要以美国的联合精确空投系统(JPADS)的着陆缓冲系统以及美国航空和宇航局(NASA)研制的猎户座登陆舱(CM)着陆缓冲系统为代表。

美国航空和宇航局兰利研究中心(LaRC)设计研制了一种新型航天器着陆缓冲气囊,即第二代猎户座登陆舱着陆缓冲系统<sup>[3-4]</sup>。该系统是在第一代缓冲系统的基础上针对一些原先设计上的不足和实际测试使用中出现了的问题进行了改进和创新。该气

囊是首尾相连、相互制约,在一定程度上提高了气囊的刚度,从而可以承受可能增加的载荷。每个月牙形气囊又由一个外部的主气囊和内部不靠底的一个顶置气囊(AB气囊)构成。外部的主气囊是一种月牙状的圆柱形气囊,在其外侧上方设有2个可控排气孔,排气孔位置相对于第一代缓冲系统有了改变,从外侧中央改至外侧的侧上方,有效避免了登陆舱

下落时水平速度过高使得排气孔无法排泄气体的问题。内部的顶置气囊相对于第一代着陆缓冲气囊没有了安全阀(三通阀)的设计,安全阀的作用是在前期用来对主气囊充气,在主气囊的控制阀关闭之前直接充入少量的气压。在第二代缓冲系统中,只有和内气囊直接相通的阀门起作用,通过顶置气囊的安全阀对主气囊进行充气,从而可以控制主气囊的气压。在第二代设计中,由于主气囊和内气囊都有独立的充气口,所以内气囊上不再需要安全阀。另外在外部主气囊和内部气囊的外围都设计了一种高强度聚芳脂纤维所制成的限制带,纵向和横向的限制带共同形成了气囊的缓冲保护网(如图1b所示)。这样的设计使限制网在气囊之前受力以承担主要的着陆负荷,减少了气囊的负荷,使得缓冲气囊的强度得到了保证。该气囊系统通过多次试验,其着陆缓冲的效果良好,并且解决了第一代系统中气囊固定不牢和缝合强度的问题。

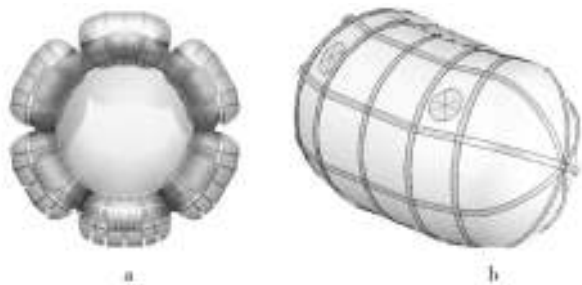


图1 第二代猎户座登陆舱着陆缓冲系统

Fig. 1 The second generation airbag landing system for the Orion crew module

## 2.2 国内着陆气囊缓冲技术

国内着陆气囊缓冲技术主要集中在空投、无人机回收和航天登陆舱的登陆和回收等领域。典型的有智能气囊缓冲技术、硬式气囊缓冲技术以及自充气气囊缓冲技术。

### 2.2.1 智能气囊缓冲技术

智能气囊缓冲技术以戈嗣诚等提出的缓冲特性可控的智能气囊为代表<sup>[5]</sup>。这种气囊属于排气孔可控的新型智能气囊,它针对传统气囊在缓冲过程中存在的内部压力变化剧烈、缓冲效率不高、缓冲过程排气孔面积固定、缓冲过程不可控、受外界条件影响大等不足,提出了一种在传统气囊中集成传感、控制和驱动功能元件,根据缓冲过程气囊内部的压力变

化和外界过载变化,实时控制气囊的排气,实现主动缓冲的气囊装置。该技术应用一维的模糊控制方法并采用独立的压力传感器、加速度传感器、排气驱动机构、微机测控系统对排气孔的面积进行实时控制,合理调节囊内的压力载荷,使缓冲过载更为平缓,从而达到智能缓冲的目的。然而,该缓冲系统设计为简化中间环节,采用了一维模糊控制,使得控制系统设计过于简单,动态控制性能不佳,控制的精度也不能保证。

智能缓冲气囊技术由于采用了智能材料和传感控制技术,理论上可以较好地控制排气孔的面积来调节囊内气压,实现更平缓的着陆缓冲。这种智能缓冲气囊结构十分复杂,对于控制技术的要求很高,特别是对排气孔的控制精度要求更高。

### 2.2.2 硬式气囊缓冲技术

硬式气囊缓冲技术以中北大学齐思明等所提出的冲压式快速空投硬式气囊技术为代表<sup>[6]</sup>,属于排气孔面积可控的自充气囊。整个缓冲气囊系统是由16个单元缓冲气囊组成,并利用固定结构来支撑从而形成硬式气囊。气囊的表面有一个可控的进气孔和4个排气孔,进气孔与排气孔的总面积比为2:1。当货物从空中下落时,缓冲气囊会从进气孔充气,气囊内外压强相等时,进气孔关闭。着陆冲击时,气囊内的气体受到压缩,达到一定压力值时,排气孔开启开始排气。先将排气阀迅速开启到最大位置,然后通过控制随时间线性地减小到关闭。两两相邻的气囊中间以通道相连。着陆冲击时,所有的气囊构成一个缓冲系统,实现缓冲功能。

这种冲压式硬式气囊通过设计固定结构实现自充气 and 可控排气,从而达到着陆缓冲的目的。其优点是不用自带气源,能借助于空投设备的飞行速度直接从大气中获取工作能源,能缩短空投时间、实现快速空投。由于固定结构的硬式气囊所占据的空间相对较大,作为军事用途,暴露的目标就过大;而且由于结构固定,适用范围也相对较窄。

### 2.2.3 自充气气囊缓冲技术

自充气气囊缓冲技术以南京航空航天大学邵志建等人提出的新型自充气气囊为代表<sup>[7]</sup>。这种新型自充气气囊则是通过将气囊内部设计为多空间,其中一部分空间形成支撑气囊外形的框架,利用压缩

(下转第108页)

修补构型尺寸。

参考文献:

[1] 褚林塘,吴有金,孙玉祥,等. 海军飞机结构腐蚀控制设计指南[M]. 北京:航空工业出版社,2005:1—33.

[2] 陈绍杰. 复合材料结构修补指南[M]. 北京:航空工业出版社,2001:5—8.

[3] 罗文琳,许陆文,许鹿麟. 金属结构损伤复合材料微波修复的试验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2005,12(6):736—740.

[4] 孙洪涛. 损伤金属板复合材料胶接修补的热-力分析与试验研究[D]. 西安:西北工业大学,1998:2—10.

[5] 王向明,林锋,梁晶红,等. 复合材料补片胶接金属机体结构损伤修补方法设计研究[J]. 飞机设计,1996,6(3):

40—44.

[6] 任三元. 金属结构损伤件复合材料修补设计技术方法[R]. 荆门:中国特种飞行器研究所,2006.

[7] 任三元. 典型结构修理件腐蚀环境试验要求[R]. 荆门:中国特种飞行器研究所,2008.

[8] 任三元. 典型结构修理件腐蚀环境试验总结分析报告[R]. 荆门:中国特种飞行器研究所,2009.

[9] 徐建新,刘艳红,周焯,等. 损伤金属结构的复合材料胶接修补实验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2001,11(1):96—99.

[10] 孙洪涛,刘元镛,彭俊. 复合材料胶接修补问题的试验研究和分析[J]. 实验力学,1999,14(4):132—136.

[11] 王遵. 复合材料单面补强含裂纹铝合金薄板的残余热应力及其影响研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007:2—10.

(上接第 89 页)

空气充填这部分气囊来支撑气囊的外形,再通过气囊进气口的设计,吸入外部环境中的空气充填其余部分。由于没有机械结构的部分,因而不会大幅度增加气囊结构的质量;而且由于大部分充填气囊的空气来自于外部环境,这样就可以大大减少了对压缩气体的需求,从而达到减小气源系统质量的目的。这种气囊的设计能够大大减小着陆缓冲的负荷,并且通过结构的设计来简化整个缓冲系统。气囊结构设计的要求较高,而且对材料也有一定限制,在可操作性上还需要进一步的验证。

3 结语

精确空投将是我国、我军装备物资快速精确保障的主要方式,着陆气囊作为着陆缓冲可采用的一种重要方式也将会得到更加长足的发展。目前对气囊着陆缓冲技术的研究还比较分散,采取的控制方法各有特色,未形成体系。因此,对于该领域的进一步研究方向是系统化、体系化,并融合多学科、多领域控制技术和方法,达到简化结构、降低成本、提高

缓冲效率的目的<sup>[8]</sup>。

参考文献:

[1] 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.

[2] 肖军,章玮玮. 靶机回收减震气囊参数设计[J]. 四川兵工学报,2009,30(10):19—21.

[3] BEN Tutt, CHARLES Sandy, JAMES Corliss. Status of the Development of an Airbag Landing System for the Orion Crew Module[R]. AIAA, 2009:2009—2923.

[4] LAUREN S, RICHARD B. Second Generation Airbag Landing System for the Orion Crew Module[R]. AIAA, 2009:2009—2989.

[5] 戈嗣诚,陈斐. 缓冲特性可控的智能气囊装置实验研究[J]. 振动工程学报,2004,17(4):376—380.

[6] 齐明思,于丽娜. 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.

[7] 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,2009,41:84—88.

[8] 文桂林,乐永祥. 双气室缓冲气囊多学科设计优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2010,31(7):29—31.