

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.04.014

## 多孔自适应变口径排气型气囊缓冲特性研究

高春鹏<sup>1,2</sup>, 姚裕<sup>3</sup>, 吴仲达<sup>4</sup>, 习赵军<sup>4</sup>, 李毅超<sup>4</sup>

(1. 航空工业航宇救生装备有限公司, 襄阳 441100; 2. 航空防护救生技术航空科技重点实验室, 襄阳 441100;  
3. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 4. 华中科技大学航空航天学院, 武汉 430074)

**摘要:** 针对传统排气式气囊缓冲性能受限及主动控制技术复杂的问题, 提出一种基于梯度材料调控的变口径多孔排气气囊, 提升其缓冲性能与适应性。构建单孔、双孔及三孔排气结构仿真模型, 采用显式瞬态算法求解气囊跌落冲击过程中的流固耦合作用, 并通过试验验证其准确性。结果表明: 优化变口径的三层参数可降低排气孔撑开时的撕裂风险, 负载平台最大加速度较优化前降至 14.9g, 双孔与三孔气囊的峰值加速度较单孔设计分别降低 32.2% 和 40.3%。三层变口径织物通过材料强度梯度变化实现应力分级承载, 应力集中于第三层外围以及排气孔上端区域。研究结果揭示了变口径多孔结构对不同载重空投任务的适应性, 为空投装备缓冲系统的轻量化设计与排气孔自适应调节提供了理论依据。

**关键词:** 气囊; 多孔; 重载空投; 变口径; 缓冲

中图分类号: V244

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)04-0723-09

## Research on Buffering Characteristics of Multi-hole Variable-Caliber Vented Airbag

GAO Chunpeng<sup>1,2</sup>, YAO Yu<sup>3</sup>, WU Zhongda<sup>4</sup>, XI Zhaojun<sup>4</sup>, LI Yichao<sup>4</sup>

(1. AVIC Aerospace Life-Support Industries, Ltd., Xiangyang 441100, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Life-Support Technology, Xiangyang 441100, China; 3. College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 4. School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To address the limitations of traditional vented airbags in cushioning performance and the complexity of active control, this study proposes a variable-caliber multi-hole vented airbag based on gradient material regulation, aiming to enhance cushioning efficiency and adaptability. Simulation models of single-, double-, and triple-vent structures are constructed, explicit transient algorithms are employed to solve fluid-structure interactions during impact, and its accuracy is verified through experiments. Results indicate that optimized three-layer parameters can effectively reduce the risk of tearing, with the maximum platform acceleration decreasing to 14.9g compared with that before optimization. Peak accelerations for double- and triple-vent designs are 32.2% and 40.3% lower than the single-vent model, respectively. Gradient-strength fabrics enables stress gradation, concentrating stress on the third-layer periphery and upper vent regions. This study demonstrates the adaptability of the variable-caliber multi-hole structure to airdrop missions with different load capacities, providing a theoretical basis for the lightweight design of the buffer system of airdrop equipment and the adaptive adjustment of vented holes.

**Key words:** airbag; multi-hole; heavy equipment airdrop; variable-caliber; buffering

基金项目: 航空科学基金 (20230029079002)。

收稿日期: 2025-03-27; 修订日期: 2025-05-05

通信作者: 李毅超, 男, 副教授, E-mail: liyichao@hust.edu.cn。

引用格式: 高春鹏, 姚裕, 吴仲达, 等. 多孔自适应变口径排气型气囊缓冲特性研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(4): 723-731. GAO Chunpeng, YAO Yu, WU Zhongda, et al. Research on buffering characteristics of multi-hole variable-caliber vented airbag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(4): 723-731.

气囊缓冲技术是空投、汽车、航天等领域中的核心缓冲技术,是基于材料或结构的弹性或非弹性变形来吸收重力势能<sup>[1-2]</sup>。相较于机械弹簧、液压阻尼、泡沫材料等缓冲方式<sup>[3-4]</sup>,气囊具有轻量化和强适应性的特点,分为封闭式气囊与开放式气囊<sup>[5-7]</sup>,封闭式气囊无排气孔,适用于低冲击载荷场景,但容易发生反弹;开放式气囊通过排气孔排气实现能量释放。目前大多数气囊的排气孔面积固定,这种结构形式较为简单、成本较低,广泛使用<sup>[8]</sup>;另外还有一种可控排气型气囊,这类气囊通过调节排气孔面积实现可控排气,从而延长缓冲时间,降低峰值加速度<sup>[9]</sup>,例如一种双腔串联气囊通过主辅气室间的气体交换分散冲击力,从而被动调节排气孔面积<sup>[10]</sup>;智能控制气囊通过排气口控制装置来调控排气口张开面积,实时监测气囊内部压力,实现排气缓冲过程的主动控制<sup>[11]</sup>。以上这些设计虽然可以解决传统固定排气孔的性能局限,但无论是两个或多个独立气室组合而成的气囊,还是在排气口安装控制机构的气囊,都存在结构过于复杂,成本较高等问题,给工程应用造成一定障碍。

为了降低试验成本,研究者们广泛采用理论计算或有限元仿真的方法对跌落缓冲过程进行研究<sup>[2,12-16]</sup>。Wen等<sup>[17]</sup>建立了考虑气囊织物弹性的软着陆模型,并与LS-DYNA仿真结果比较,验证了该解析模型的正确性,研究织物弹性、气囊初始压力、排气口尺寸等因素对缓冲性能的影响。李忠东等<sup>[18]</sup>利用任意拉格朗日欧拉算法对织物制作的软体容器进行注水的流固耦合仿真,容器变形过程与实际相似度较高。程涵等<sup>[19]</sup>建立织物流固耦合模型,对展开的织物进行分段折叠计算,能有效模拟柔性织物的复杂褶皱现象。张全学等<sup>[20]</sup>利用LS-DYNA软件对某气囊的缓冲过程进行仿真计算,探讨排气孔面积及初始接触时刻对气囊缓冲性能的影响。张宇<sup>[21]</sup>通过数值模拟方法研究设计了一种标准化组合型气囊,对气囊设计参数与着陆工况进行了分析,得到载荷装置的运动特性与气囊特性,以及各因素对气囊系统缓冲性能的影响规律。从以上研究可以看出,现有研究虽通过参数调节提升了气囊缓冲性能,但仍存在两大瓶颈:(1)排气孔面积的主动控制技术成熟度不足,无法实现复杂工况下的动态自适应调节;(2)不同空投载重下的气囊缓冲特性与多参数优化策略缺乏系统性探索。

为此,提出一种变口径多孔排气型缓冲气囊,通过调控排气孔周围囊体材料的梯度特性实现基于排气压力的排气孔自适应扩张功能,以此实现将该气囊应用于不同载重和落速的空投任务。通过

有限元仿真研究变口径单孔、双孔、三孔排气型缓冲气囊跌落冲击地面时囊压与平台加速度的变化规律,探索不同孔数变口径排气孔气囊的缓冲特性,比较不同载重下气囊着陆冲击地面时的瞬态变形特征及其变口径区域应力变化规律,为变口径多孔排气型气囊的设计提供理论参考和技术支撑。

## 1 建模与仿真

### 1.1 几何模型

采用的气囊模型根据某典型缓冲气囊的尺寸进行建模,尺寸为1300 mm×1000 mm×1200 mm。排气孔形状为长260 mm,宽5 mm的长方形缝,分别位于气囊前后两面。单孔、双孔和三孔气囊分别表示气囊含有1条、2条和3条该种形状的开缝,双孔距离气囊上下端的距离相等,双孔间的间距与之至左右端一致。三孔的中间孔位于气囊中间位置,两边孔距中间孔距离为208 mm。每条排气缝隙周围设置有3层不同梯度属性的织物材料,具体结构形式如图1所示。图2为变口径三孔排气型气囊跌落冲击地面的装配图。配重平台与气囊以一定的初速度跌落冲击地面,配重平台长宽为3000 mm×1200 mm,厚度为40 mm,底面设置为刚性地面。

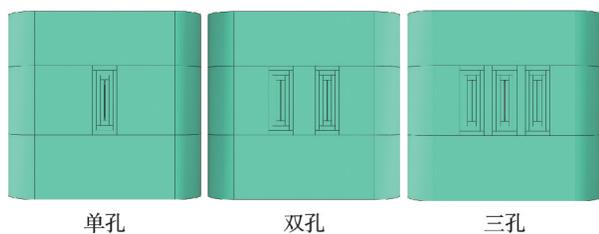


图1 单孔、双孔和三孔变口径气囊示意图

Fig.1 Schematic diagrams of single-vent, double-vent and triple-vent variable-caliber airbags

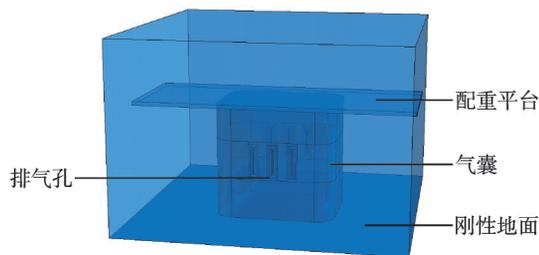


图2 变口径三孔排气型气囊跌落冲击地面示意图

Fig.2 Schematic diagram of the drop impact on the ground of the triple-vent variable-caliber airbag

### 1.2 变口径排气孔微观特征及力学性能

图3为变口径排气孔与三层织物结构,在排气缝隙周围设置3层不同材料参数的囊布,3层排气孔处材料的微观结构如图3(b)所示。从图中可以

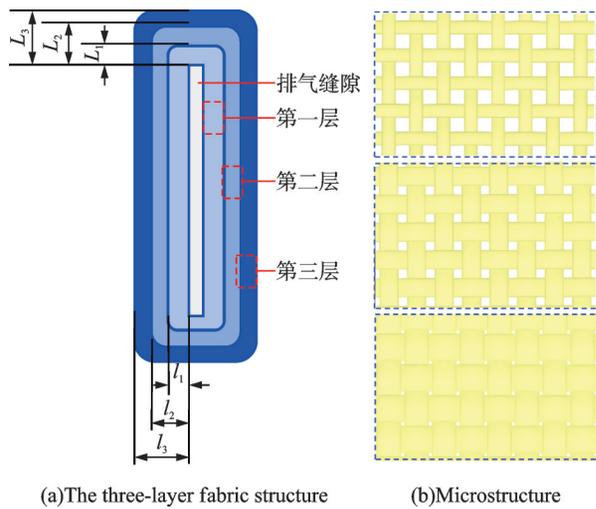


图 3 变口径排气孔与 3 层织物结构

Fig.3 Variable caliber exhaust vent and three-layer fabric structure

得知,变口径排气孔周围的 3 层织物结构是通过纵横交织的纱线编织而成,第一层纱线较细,纱线与纱线之间的间距较大,第二层和第三层纱线逐渐变粗且其间距也在减小。图 4 为排气孔周围 3 层织物单元结构及详细几何结构示意图,编织纱线的横截面形状为透镜状,定义为两个等圆的共同面积,经向纱线截面的两个圆半径( $r_w$ )、内凹角( $\alpha_w$ )和截面积( $A_w$ )计算如下<sup>[22]</sup>

$$r_w = \frac{t_w}{4}(1 + a_w^2) \quad (1)$$

$$\alpha_w = 2 \arcsin\left(\frac{2a_w}{a_w^2 + 1}\right) \quad (2)$$

$$A_w = r_w^2(a_w - \sin\alpha_w) \quad (3)$$

式中:下标  $w$  表示经向纱线参数, $a_w$  和  $t_w$  分别为经向纱线的横截面形状系数和厚度。

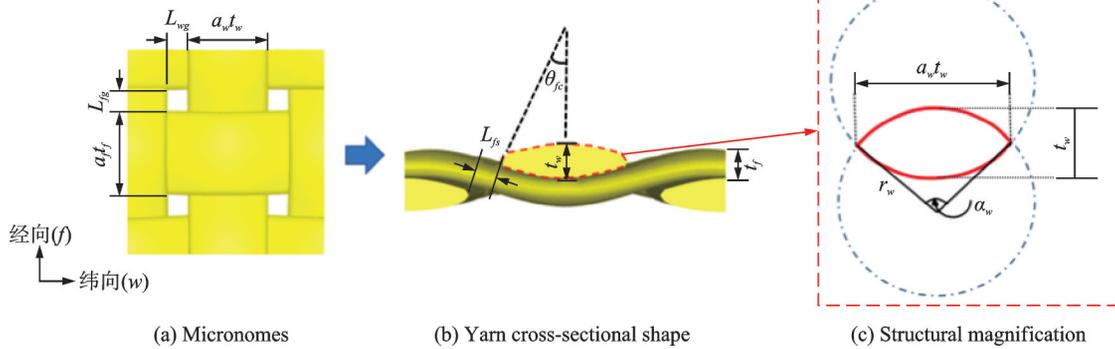


图 4 织物单元结构及详细几何结构示意图

Fig.4 Schematic diagrams of the fabric unit structure and detailed geometric structure

每根复合纱线由经向和纬向两根纱线交织形成的卷曲部分和由于纱线中空隙造成的直线部分组成,如图 3 所示。纬向编织纱线的卷曲角  $\theta_{fc}$  计算如下

$$\theta_{fc} = \arcsin\left(\frac{2r_w + t_f}{\sqrt{(L_{wg} + a_w t_w)^2 + (2r_w + t_f - t_w)^2}}\right) - \arctan\left(\frac{2r_w + t_f - t_w}{L_{wg} + a_w t_w}\right) \quad (4)$$

式中:下标  $f$  表示纬向纱线参数, $L_{wg}$  为相邻经向编织纱线之间的间隙。同理可得经向纱线的卷曲角  $\theta_{wc}$ 。

假设应力或应变在整个组合的宏观水平上是均匀的,通过沿每根纱线的卷曲角度(见图 4)对无穷小纱段的变换柔度矩阵( $S_w$  和  $S_f$ )进行平均,得到卷曲纱线段的有效柔度矩阵。结合卷曲和直线部分,经向和纬向纱线的有效柔度矩阵  $S_w^e$  和  $S_f^e$  等于纱线卷曲段和直线段的柔度矩阵按照其长度所占比例进行求和所得,即

$$S_w^e = \lambda_{wc} \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta_{wc}} S_w d\theta + (1 - \lambda_{wc}) S_w \quad (5)$$

$$S_f^e = \lambda_{fc} \frac{1}{\theta_{fc}} \int_0^{\theta_{fc}} S_f d\theta + (1 - \lambda_{fc}) S_f \quad (6)$$

式中: $\lambda_{wc}$  和  $\lambda_{fc}$  分别为经纱和纬纱总长度的卷曲部分占比,可通过总长度减去经线和纬线直线部分的长度( $L_{ws}$  和  $L_{fs}$ ,如图 4(b)所示)得到。另外, $S_w^e$  和  $S_f^e$  是局部坐标系下单向纱线的柔度矩阵,将其转换为基于全局坐标系下的柔度矩阵  $S'_w$  和  $S'_f$ ,分别为

$$S'_w = T_w^T S_w^e T_w \quad (7)$$

$$S'_f = T_f^T S_f^e T_f \quad (8)$$

式中: $T$  表示建立的编织纱线卷曲变换矩阵, $T^T$  表示其逆矩阵。 $T$  为

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & 0 & n^2 & 0 & 2mn & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n^2 & 0 & m^2 & 0 & -2mn & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 & -n \\ -mn & 0 & mn & 0 & m^2 - n^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & 0 & m \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $m = \cos \theta$ ,  $n = \sin \theta$ 。

根据  $S'_w$  和  $S'_j$  计算出编织物的柔度矩阵  $S^e$ 。气囊排气口编织布的力学性能如下

$$\begin{cases} E_{xx} = 1/S_{11}^e & E_{yy} = 1/S_{22}^e & E_{zz} = 1/S_{33}^e \\ G_{yz} = 1/S_{44}^e & G_{xz} = 1/S_{55}^e & G_{xy} = 1/S_{66}^e \\ v_{xy} = -(S_{12}^e/S_{11}^e) & v_{xz} = -(S_{13}^e/S_{33}^e) \\ v_{yz} = -(S_{23}^e/S_{22}^e) \end{cases} \quad (10)$$

以此设计变口径排气孔 3 层囊布编织材料的参数,通过改变经向和纬向纱线的材料种类、截面积、间距等参数,可以得到第一层至第三层材料强度逐渐增加织物类型。由于织物材料交织而成,使得织物在面内(经向和纬向)具有较大的变形能力,调节 3 层材料的力学性能,可使该 3 层材料有不同的变形能力,使织物从第一层至第三层材料强度逐渐增强,从而实现第一层至第三层随着跌落冲击力的增加而使撑开面积逐渐增大,以此实现根据空投质量不同的排气孔口径自适应调节。

### 1.3 材料属性

气囊是各向异性和非线性的织物材料,采用关键字定义材料属性,密度为  $783 \text{ kg/m}^3$ ,通过拉伸试验确定织物材料各方向的应力应变曲线,最后得到气囊织物材料的力学性能参数,如表 1 所示,仿真中除变口径 3 层区域外的其他部分气囊材料使用这些参数属性。变口径排气孔周围 3 层的材料采用弹性“工程材料”参数定义,根据织物材料特性,设计参数使之满足 3 层变口径区域材料强度由内至外逐渐递增,如表 2 所示,由表 1 和表 2 共同构成一个完整气囊的全部材料参数。大气压强取一个标准大气压,空气密度取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,气体温度取  $293 \text{ K}$ ,重力取值为标准重力加速度,由于为自充气气囊,着陆时已经充气张开,囊内初始压强与大气压一致,设为  $0.1 \text{ MPa}$ 。气囊采用壳单元,厚度设定为  $1 \text{ mm}$ 。气囊上面配重平台的质量为可调,可以通过更改材料的密度来改变负载的质量。

表 1 气囊材料参数

Table 1 Material parameters of the airbag

囊布横向参数	应变/mm	-1.0	-0.9	-0.5	0	1.6	5.8	10.3	15	30	35
	应力/MPa	-22.2	-17.6	-0.02	0	0.32	1.32	6.32	13.2	22.5	46.1
囊布纵向参数	应变/mm	-1.0	-0.9	-0.5	0	5.2	10.7	20.9	30.2	40.7	52.6
	应力/MPa	-28.1	-22.5	-0.02	0	1.9	8.08	13.9	28.5	43.9	52.3
囊布面内剪切参数	应变/mm	0	0.52	6.1	10.6	15.7	25.4	38.3			
	应力/MPa	0	3.58	8.1	20.5	34.4	48.5	64.3			

表 2 变口径气囊材料参数

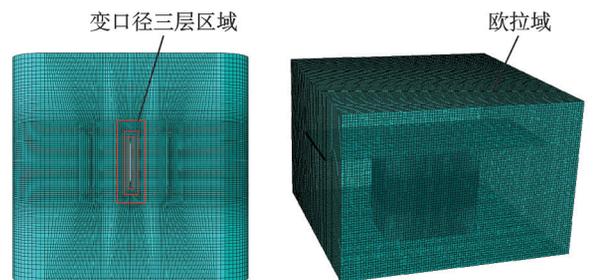
Table 2 Material parameters of the variable-caliber airbag

层	$E_1/\text{MPa}$	$E_2/\text{MPa}$	$E_3/\text{MPa}$	$Nu_{12}$	$Nu_{13}$	$Nu_{23}$	$G_{12}/\text{MPa}$	$G_{13}/\text{MPa}$	$G_{23}/\text{MPa}$
第一层	100	100	10	0.01	0.33	0.01	10	5	2.5
第二层	200	200	20	0.01	0.33	0.01	20	10	5
第三层	300	300	30	0.01	0.33	0.01	30	15	10

### 1.4 边界条件确定

采用 ABAQUS 显示动力学模块进行气囊的跌落仿真。首先,对气囊跌落系统进行简化,采用单囊跌落,除气囊外,系统包括配重平台、地面和外部包裹的空气域,配重平台为长方体,地面为刚性地面,气囊为均质壳单元,配重平台与气囊上表面绑定,其他均设为通用接触。按照自下而上的顺序介绍模型约束和边界条件:为空投配重平台(含单个气囊)施加一定的初速度,约束地面平动转动自由度。

图 5 为三孔排气型气囊以及整个气囊跌落系统的网格划分示意图。模型外围将气囊以及配重平台完全包裹在里面的正方体为空气域,采用欧拉单元,划分标准的正六面体网格,单元大小为  $25 \text{ mm}$ ,类型为 EC3D8R。气囊内空气部分通过外



(a) The grid of the airbag (b) The grid of the airbag drop system

图 5 气囊跌落系统网格划分示意图

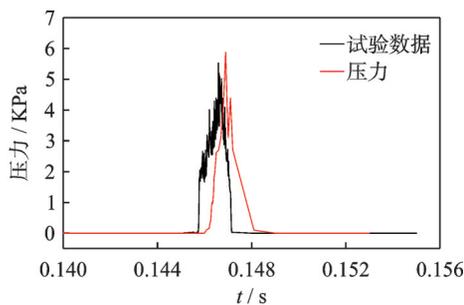
Fig.5 Schematic diagrams of the grid division of the entire airbag drop system

部空气域网格与气囊内部区域进行布尔操作得到。配重平台为正六面体网格,类型为 C3D8R。气囊划分单个网格单元大小  $25 \text{ mm}$ ,靠近排气孔缝隙处网格大小为  $5 \text{ mm}$ ,类型为 S4R。气囊越靠近

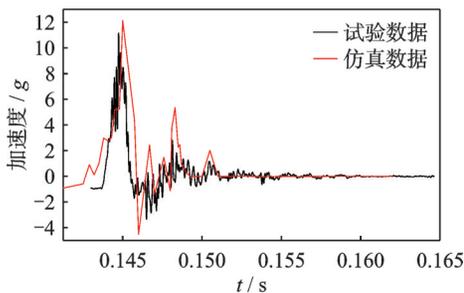
缝隙网格越密,通过加密排气孔缝隙周围的网格以便更好地监测排气孔缝隙区域的应变和应力。同时,经过网格无关性分析,采用的网格大小可以满足计算精度,节省计算时间。

### 1.5 模型验证

为了验证仿真模型的准确性,采用四开缝的双气囊进行跌落试验。先将气囊内部充气到鼓起,然后采用吊车将整个空投单元吊起 2.025 m 的高度,释放后到气囊接触地面的速度大约为 6.3 m/s。在配重平台上绑上加速度传感器,气囊内部插入压力传感器监测空投跌落冲击地面过程的加速度和囊内压力变化。图 6(a)为空投气囊跌落过程囊内压力与仿真对比。整个跌落过程中,试验与仿真的曲线较为重合,试验的最高囊压为 5.53 kPa,仿真的最高囊压为 5.88 kPa,两者相差 0.35 kPa。图 6(b)为空投气囊跌落配重平台加速度与仿真对比,可以看出整个跌落过程,两者加速度曲线波动趋势基本相似,试验的最大加速度为 11.2g,仿真的最大加速度为 12.1g,两者相差 0.9g,误差约为 8%。综上所述,仿真结果的误差在可接受范围内,准确度得到了较好的验证。



(a) Comparison of airbag pressure



(b) Comparison of load platform accelerations

图 6 空投气囊试验与仿真对比

Fig.6 Airdrop airbag test and simulation comparisons

## 2 气囊缓冲特性分析

### 2.1 单孔 3 层变口径排气孔气囊缓冲特性仿真分析

在气囊排气孔缝隙周围设置 3 层不同结构参数的织物囊布,采用变口径单孔排气结构研究第一层至第三层变口径排气孔的尺寸大小对囊体跌落缓冲特性的影响规律。3 层变口径排气孔尺寸长度示意图如图 3(a)所示,  $l_1$ 、 $l_2$  和  $l_3$  分别表示第一层、第二层和第三层变口径排气孔距离排气缝隙的距离,  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  分别是其上下距离,具体数值如表 3 所示,其中,气囊 1 表示没有添加 3 层变口径囊布的气囊。将这几种气囊以负载 1 350 kg、速度为 6.3 m/s 冲击地面,仿真得到孔被撑开的最大面积如表 3 所示,气囊 1 在排气过程中排气孔面积从 13 cm<sup>2</sup> 膨胀到 1 474 cm<sup>2</sup>,气囊孔撑开并发生撕裂,而其他变口径气囊排气孔撑开最大面积只有气囊 1 的 15%~22%,可以看出变口径 3 层织物囊布可以防止撕裂,很好地控制排气过程,保持均匀稳定地排气。

图 7 为变口径气囊 4 不同时刻囊体变化图,可以看出,整个跌落过程气囊形态变化比较符合实际,排气口附近 3 层区域形成明显的应力集中区域,能承受更大应力而不撕裂。图 8 为气囊 1~4 跌落冲击地面排气孔撑开面积最大时刻应力损伤图,气囊 1 跌落到最后排气孔周围囊布撕裂开来,形成较大的排气孔,而变口径气囊 2、3 和 4 排气口附近 3 层区域形成明显的应力集中区域,较气囊 1 应力更加集中,能承受更大应力而不撕裂。

图 9 为 4 种变口径气囊排气孔缝隙处囊压随时间变化曲线图,从图中可以看出,整个曲线过程有 2 个小峰值,前面表示排气孔开始被撑开的压力,后面表示排气孔被撑开后排气过程的压力峰值。4 种气囊排气孔处囊压最大的是气囊 1,为 5.21 kPa,气囊 1 在这股压力下排气孔被撑大撕裂,囊内气体快速被排出;气囊 1 压力加载速度较快,前后 10~15 ms,而变口径气囊 2、3 和 4 囊压始终保持在较高水平,压力加载时间也较长,为 30~40 ms,这就给了其较长的缓冲时间,从而降低跌落冲击的加速度。根据表 3 负载平台最大加速度可知,气囊 4 缓冲效果最好,负载平台最大加速度为 14.9g (g 表

表 3 3 层变口径排气孔尺寸表

Table 3 Three-layer variable-caliber vent hole size

气囊编号	$l_1$ /mm	$l_2$ /mm	$l_3$ /mm	$L_1$ /mm	$L_2$ /mm	$L_3$ /mm	孔撑开最大面积/cm <sup>2</sup>	负载平台最大加速度/g
1	0	0	0	0	0	0	1 474	27.5
2	5	10	15	10	15	20	291	22.8
3	15	30	45	25	45	60	226	16.2
4	25	50	75	30	60	90	194	14.9

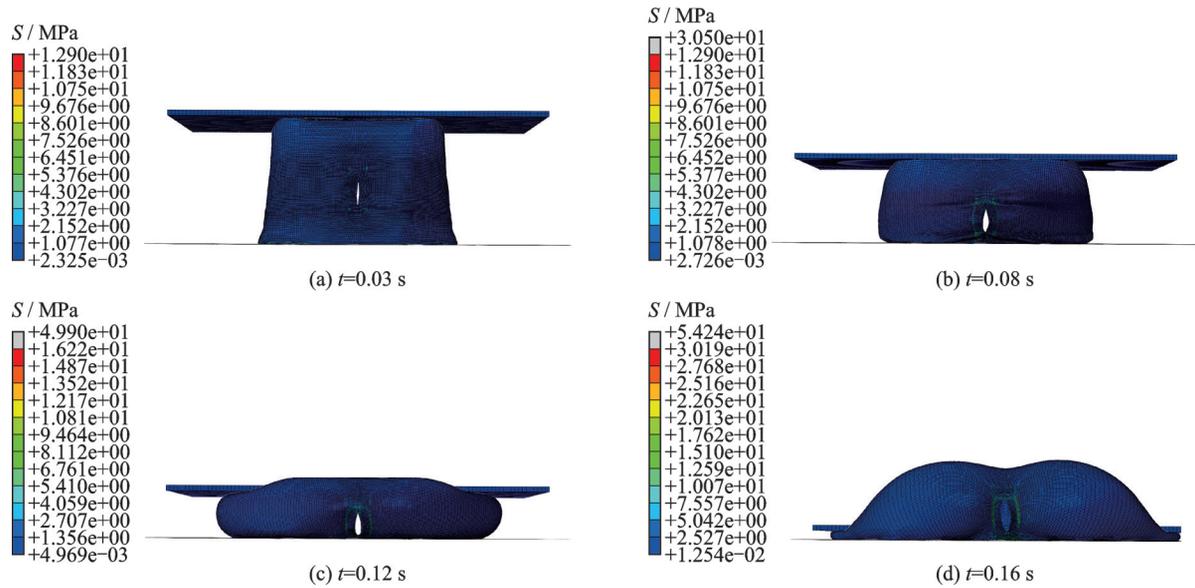


图 7 气囊 4 不同时刻囊体图

Fig.7 Diagrams of airbag 4 at different time

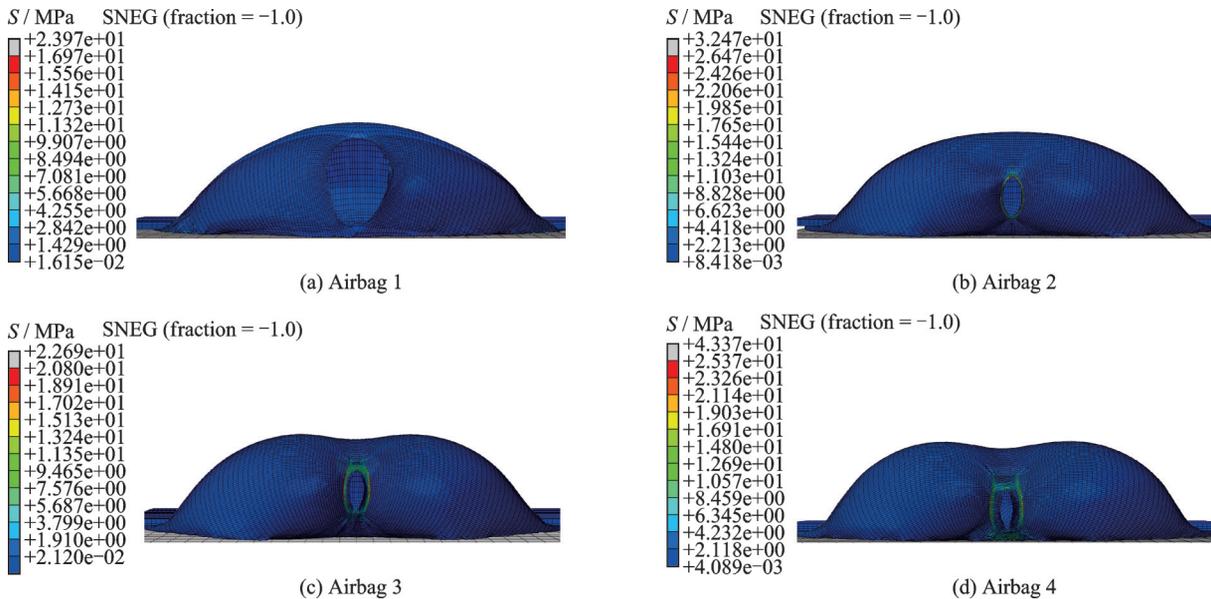


图 8 气囊 1~4 应力损伤图

Fig.8 Stress damage diagrams of airbags 1—4

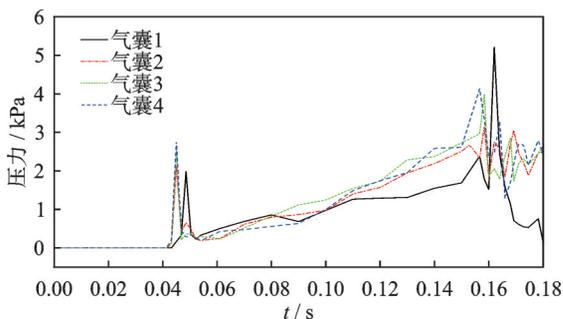


图 9 变口径气囊排气孔缝隙处囊压随时间变化曲线图

Fig.9 Pressure of the variable-caliber airbag at the gap of the exhaust vent varies over time

示重力加速度),气囊 2 与气囊 3 之间最大加速度相差 6.6g,气囊 3 与气囊 4 之间相差 1.3g,继续扩大变口径尺寸缓冲效果减弱,因此后续选用气囊 4 的

尺寸作为基础继续研究。

### 2.2 多孔变口径排气孔气囊缓冲特性仿真分析

图 10 为单孔、双孔及三孔变口径排气型气囊的跌落冲击动力学响应特性,仿真以质量 1 350 kg 的配重平台、6.3 m/s 跌落速度作为初始条件。结果表明:单孔气囊的配重平台最大加速度为 14.9g,双孔与三孔气囊分别降至 10.1g 和 8.9g,峰值过载较单孔设计降低 32.2% 和 40.3%。多孔变口径结构显著改善缓冲性能的机制在于:双孔与三孔设计通过协同排气效应提升气体动态排放效率,结合囊压时程曲线(图 11)分析可知,多孔结构在维持较高囊压稳态值(0.14 s 之后)的同时,将能量耗散时长延长 28%~42%,有效降低冲击载荷瞬态幅值。

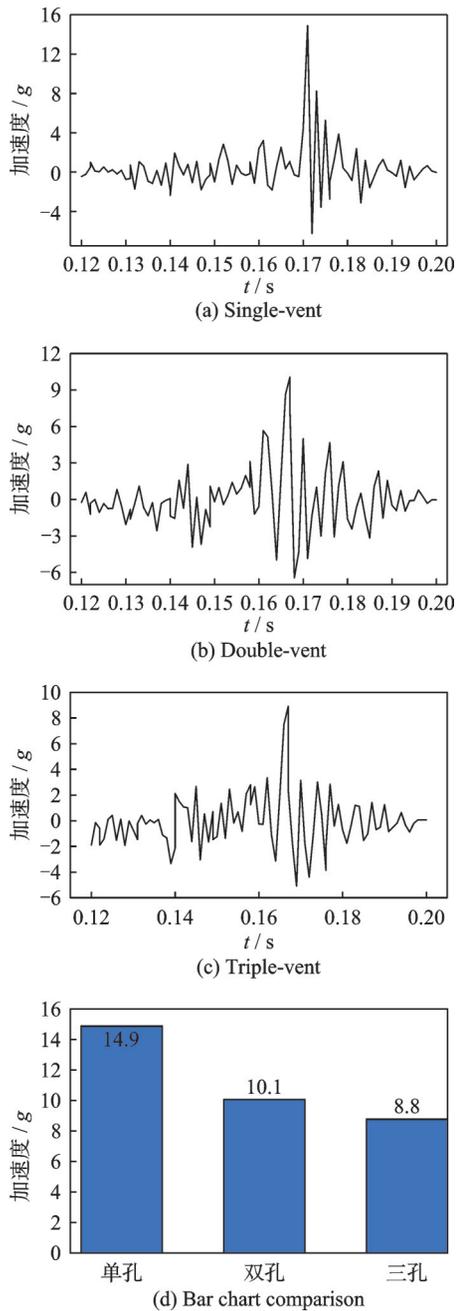


图 10 3 种气囊配重平台加速度变化及对比

Fig.10 Acceleration variations and comparisons of the load-bearing platforms of three types of airbags

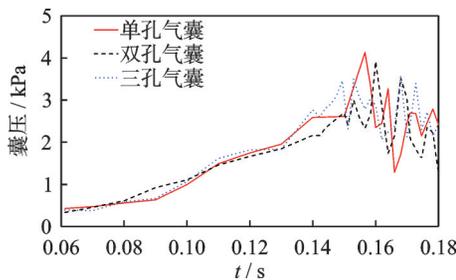


Fig.11 Pressure of airbag changes over time

对比柱状图进一步揭示,排气孔数量与峰值加速度呈负指数关系 ( $R^2=0.987$ ),表明多孔参数优化是提升气囊能量吸收效率的关键技术路径。

### 2.3 不同重量负载下三孔变口径排气孔气囊缓冲特性仿真分析

为了比较不同重量下,多孔变口径排气型气囊的缓冲性能,验证其不同重量空投任务的适应性。取缓冲效果最佳的三孔变口径气囊,分别用 500 kg、1 350 kg、2 000 kg、3 000 kg 的配重负载,以相同的速度 (6.3 m/s) 跌落冲击地面,比较不同重量负载下三孔变口径排气型气囊的跌落过程中变口径区域应力变化、配重平台加速度变化以及囊压变化情况。图 12(a,b)分别为原气囊 1 和变口径气囊 4 在 3 000 kg 配重触地时刻气囊应力分布云图,对比可以发现,变口径气囊载重增加到 3 000 kg,排气孔没有撕裂,应力集中区域维持在排气孔上端和第三层区域,而原气囊应力分布平缓,反映变口径结构调整对局部载荷传递路径有较大影响。另外在 500 kg、1 350 kg 及 2 000 kg 负载工况下,两类气囊的应力分布规律与 3 000 kg 工况相似,最大应力区域始终锁定于变口径外层区域,表明变口径设计可以适应不同载重空投任务。

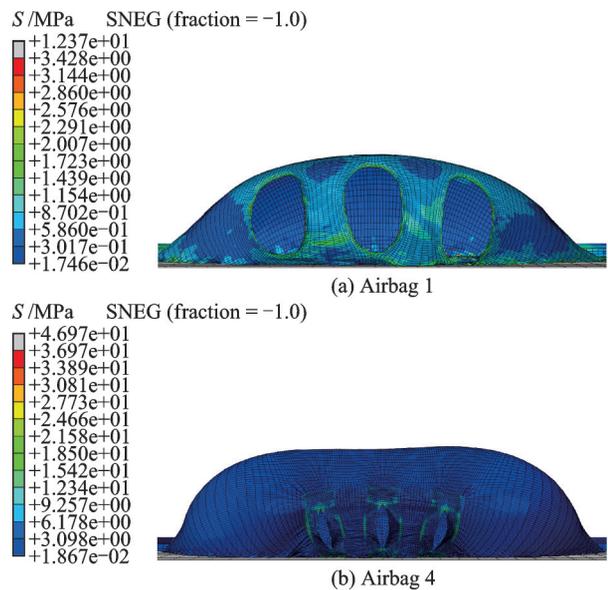


图 12 载重 3 000 kg 气囊触地时刻应力分布云图  
Fig.12 Stress distribution of airbags with a 3 000 kg load-bearing platform touching the ground

为了比较 3 层变口径区域的应力随时间变化,根据图 12 应力分布,取 3 条路径如图 13 所示,图 14 (a) 为 500 kg 配重触地瞬间变口径气囊 3 条路径的应力分布特征。结果表明:Path 1(水平最外层变口径区域)呈现单峰分布特征,最大应力值为 14.35 MPa,表明该区域因径向扩张主导载荷传递;Path 2(排气缝纵向延伸区)呈现 3 峰分布特征,最大应力值为 8.86 MPa,两侧应力值显著高于中心区域,反映层间剪切与弯曲耦合效应;Path 3(双排气缝过渡区)呈现双峰分布特征,最大应力值为 9.26 MPa,对应双缝协同变形引起的应力叠加。

图 14(b~d)展示了变口径区域不同质量条件

下最大应力时程曲线。结果表明:Path 1 与 Path 3 在触地瞬间达到应力峰值,与气囊排气缝最大扩张状态同步;进入排气阶段后,二者应力值因侧向结

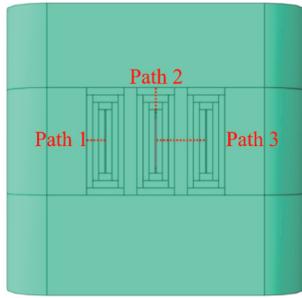
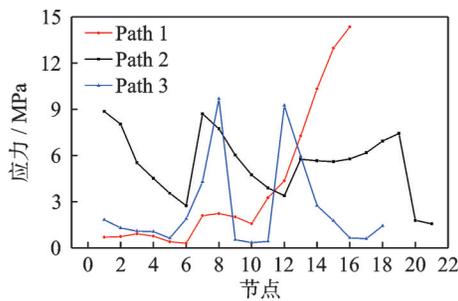
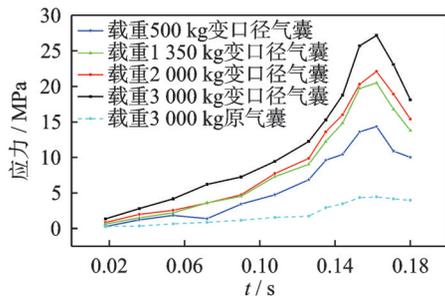


图 13 3层变口径气囊应力路径

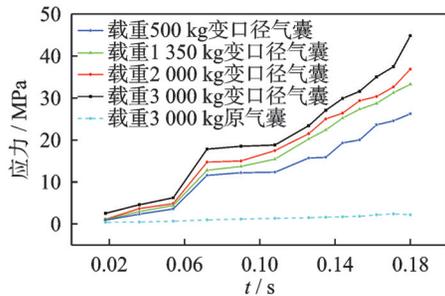
Fig.13 Stress path of three-layer variable-caliber airbag



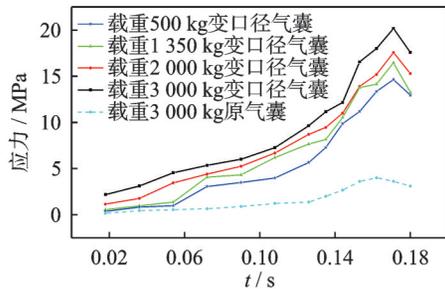
(a) Stress variations at the nodes of the three paths at the moment of touchdown



(b) Maximum stress of Path 1 varies over time under different payload



(c) Maximum stress of Path 2 varies over time under different payload



(d) Maximum stress of Path 3 varies over time under different payload

图 14 变口径区域不同路径上应力变化曲线

Fig.14 Stress variation curves on different paths in the variable-caliber area

构收缩作用呈现指数型衰减特征,而Path 2 应力持续递增,体现能量沿纵向路径的延时传递特性。总之,变径结构的梯度设计通过调控应力分布的空间差异性,单峰区(Path 1)的高应力集中驱动主排气缝快速撑开,多峰区(Paths 2,3)的应力振荡抑制局部撕裂风险,实现撑开面积与负载重量的自适应匹配。

### 3 结 论

基于 ABAQUS 软件中的显示动力学分析揭示了多孔变口径排气型气囊的空投缓冲机理。得出的主要结论有:优化 3 层变口径参数( $L_3=75\text{ mm}$ ,  $L_3=90\text{ mm}$ )后,负载平台最大加速度由  $27.5g$  降至  $14.9g$  (降幅  $45.8\%$ ),双孔与三孔气囊的峰值加速度较单孔设计分别降低  $32.2\%$  和  $40.3\%$ 。多孔协同排气通过提升气体动态排放效率并维持囊压缓慢减小(延长能量耗散时长  $28\%\sim 42\%$ )。三孔变口径气囊在  $500\sim 3\ 000\text{ kg}$  负载范围内均保持稳定应力分布,通过梯度弹性模量( $100/200/300\text{ MPa}$ )实现应力分级承载,最大应力集中于第一层排气缝纵向延伸区( $44.84\text{ MPa}/3\ 000\text{ kg}$ ),有效避免囊体撕裂,证明该设计具备不同重量空投任务的适应性。相较于传统单孔固定孔径设计,创新性提出多孔协同排气与梯度材料调控方法,解决了传统气囊撕裂风险高、自适应能力不足的问题,为空投装备轻量化设计及可控排气系统开发提供了关键技术路径。后续研究可拓展至多材料梯度组合优化、动态孔径主动调控策略。

#### 参考文献:

- [1] 乔芳,冯志杰,周昊,等.航空装备缓冲气囊设计与缓冲特性研究[J].航空科学技术,2024,35(7):120-126.  
QIAO Fan, FENG Zhijie, ZHOU Hao, et al. Research on the design and cushioning characteristics of aviation equipment cushion airbag[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(7): 120-126.
- [2] 卫剑征,王滢,甄铎,等.气囊着陆缓冲过程仿真分析[J].载人航天,2018,24(4):530-535.  
WEI Jianzheng, WANG Ying, ZHEN Duo, et al. Simulation analysis of airbag cushioning process during landing[J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(4): 530-535.
- [3] 韩雨莹,房兴波,陈虎,等.组合式起落架缓冲器耐坠毁性能仿真与分析[J].南京航空航天大学学报,2022,54(2):239-244.  
HAN Yuying, FANG Xingbo, CHEN Hu, et al. Crashworthiness performance simulation and analysis of oleo-pneumatic and foam-aluminum combined-type landing gear buffer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 239-244.
- [4] 聂宏,王宸,陈金宝,等.航天器着陆缓冲机构技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2022,54(5):751-770.

- NIE Hong, WANG Chen, CHEN Jinbao, et al. Review of aerospace landing mechanism technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 751-770.
- [5] 周强, 谭百贺. 可控排气式气囊着陆缓冲特性研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(3): 687-690.
- ZHOU Qiang, TAN Baihe. Study on landing buffer characters of a controllable vent airbag[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(3): 687-690.
- [6] 沈超, 杜建国, 李万华, 等. 气囊缓冲技术研究现状与应用启示[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 1-8, 42.
- CHEN Chao, DU Jianguo, LI Wanhua, et al. Research status and application inspiration of airbag buffer technology[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 1-8, 42.
- [7] XU Y, YANG Y, HUANG H, et al. Multi-objective optimization design of an origami-inspired combined cushion airbag[J]. Aerospace, 2024, 11(3): 169.
- [8] 温金鹏, 薛江, 张思才, 等. 固定排气口径气囊冲击减缓特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 388-393.
- WEN Jinpeng, XUE Jiang, ZHANG Sicai, et al. Study on cushioning characteristics of the airbag with constant venting area[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(2): 388-393.
- [9] 李博, 高树义. 排气式气囊缓冲主动控制技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(3): 39-47.
- LI bo, GAO Shuyi. Study of active airbag vent control technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(3): 39-47.
- [10] 周强, 谭百贺. 双气室气囊缓冲系统着陆缓冲性能分析[J]. 科技视界, 2018, 34: 81-83.
- ZHOU Qiang, TAN Baihe. Landing buffering performance analysis of a double air chamber airbag buffer system[J]. Science & Technology Vision, 2018, 34: 81-83.
- [11] 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 Sicheng, CHEN Fei. Experimental study on theory of impact active control of intelligent air bag[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 600-603.
- [12] 何欢, 孙东阳, 马常亮, 等. 多腔体气囊式回收系统的着陆冲击动力学建模与分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1): 8-13.
- HE Huan, SUN Dongyang, MA Changliang, et al. Modeling and simulation of landing procedure of multi-cavity airbag cushion recovery system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(1): 8-13.
- [13] WANG H, HONG H, LI J, et al. Landing attenuation system for heavy airdrop study on multi-objective optimization of airbag[J]. Defense Technology, 2013, 9(4): 237-241.
- [14] 习赵军, 胡麟, 李毅超, 等. 聚氨酯/聚乙烯水袋无伞空投跌落仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 211-215.
- XI Zhaojun, HU Lin, LI Yichao, et al. Numerical investigation of free drop of polyurethane/polyethylene water bag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 211-215.
- [15] ZHOU X, ZHOU S, LI D, et al. Research on design and cushioning performance of combined lunar landing airbag[J]. Acta Astronautica, 2022, 191: 55-78.
- [16] 李正达, 郭海军, 陈勇, 等. 舟船空投入水姿态与过载特征分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 194-201.
- LI Zhengda, GUO Haijun, CHEN Yong, et al. Analysis of entry attitude and overload characteristics of ships in water[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 194-201.
- [17] WEN J, LI B, YANG Z. Study on cushioning characteristics of soft landing airbag with elastic fabric[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(3): 1535-1545.
- [18] 李忠东, 王兆军, 张宁. 复合织物软体容器非线性流固耦合[J]. 材料导报, 2009, 23(4): 55-57.
- LI Zhongdong, WANG Zhaojun, ZHANG Ning. Research on flexible tanks of composites fabrics for non-linear fluid-structure interaction[J]. Materials Reports, 2009, 23(4): 55-57.
- [19] 程涵, 余莉, 姜南. 特种充气展开织物折叠建模方法[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第8届学术年会. 上海: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2011: 632-637.
- CHEN han, YU Li, JIANG Nan. Special inflatable deployable fabric folding modeling method[C]//Proceedings of the 8th Academic Annual Conference of CDSET-CSA. Shanghai: Committee of Deep Space Exploration Technology, Chinese Society of Astronautics, 2011: 632-637.
- [20] 张全学, 杨威, 黄恩光, 等. 冲击载荷作用下某型气囊缓冲性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 117-123.
- ZHANG Quanyue, YANG Wei, HUANG Enguang, et al. Effect of impact load on the buffering performance of a certain type of airbag[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 117-123.
- [21] 张宇. 组合式气囊缓冲性能研究及优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- ZHANG Yu. Study on cushion performance and optimization design of combined airbag[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [22] KIM D S, KIM S W. Estimation of effective mechanical properties of plain woven composites using direction-selective micromechanical models[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2022, 23(3): 521-532.