

文章编号: 1674-8190(2021)03-161-10

# 不同折叠形式的柱状气囊展开过程数值模拟

薛齐文<sup>1,3</sup>, 王霄腾<sup>1,2</sup>, 何宜谦<sup>1,2</sup>, 郭敏<sup>1,2</sup>, 刘旭东<sup>4</sup>, 鄂智佳<sup>4</sup>

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

(2. 大连理工大学 工程力学系, 大连 116024)

(3. 大连交通大学 土木工程学院, 大连 116028)

(4. 北京机械设备研究所, 北京 100854)

**摘要:** 柱状气囊的折叠与充气展开过程复杂, 采用实验手段研究其展开过程存在诸多不便。针对柱状气囊提出两种不同的折叠方式并分别建立相对应的数值分析模型, 利用非线性动力学软件 LS-DYNA 研究柱状气囊折叠后充气展开的动态应用特性, 对影响气囊展开过程中蒙皮应力、体积和内压曲线变化的因素进行分析, 分别讨论不同折叠方式和外界环境参数对柱状气囊动态特性的影响。结果表明: 两种折叠方式在收纳空间与材料强度上各有优势; 此外, 环境参数中的外界压强对气囊展开后的稳定状态有较大影响, 而温度对气囊展开的影响相对不明显。

**关键词:** 柱状气囊; 折叠方式; 展开过程; 模拟仿真

中图分类号: V244

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.03.20

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Simulation of the Deployment Process of Different Folded Cylindrical Airbags

XUE Qiwen<sup>1,3</sup>, WANG Xiaoteng<sup>1,2</sup>, HE Yiqian<sup>1,2</sup>, GUO Min<sup>1,2</sup>, LIU Xudong<sup>4</sup>, E Zhijia<sup>4</sup>

(1. State Key Lab of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(3. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

(4. Beijing Mechanical Equipment Institute, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The process of folding and inflating the cylindrical airbag is complicated, and there are many inconveniences in using experimental methods to study its deployment process. Two different folding methods are proposed for the cylindrical airbag and the corresponding numerical analysis models are established respectively. The nonlinear dynamics software LS-DYNA is used to study the dynamic application characteristics of the cylindrical airbag after being folded, which will affect the skin stress during the airbag deployment process. The factors of volume and internal pressure curve change are analyzed, and the influence of different folding methods and external environmental parameters on the dynamic characteristics of the cylindrical airbag is discussed. The results show that the two folding methods have their own advantages in storage space and material strength. In addition, in the environmental parameters, the external pressure has a greater impact on the stable state of the airbag after deployment, while the temperature has no obvious effect.

**Key words:** cylindrical airbag; folding method; deployment process; simulation

收稿日期: 2020-09-28; 修回日期: 2021-01-04

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2019KF0204); 辽宁省高等学校创新人才支持计划;  
大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室开放课题(GZ19204)

通信作者: 何宜谦, heyiqian@dlut.edu.cn

引用格式: 薛齐文, 王霄腾, 何宜谦, 等. 不同折叠形式的柱状气囊展开过程数值模拟[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 161-170.

XUE Qiwen, WANG Xiaoteng, HE Yiqian, et al. Simulation of the deployment process of different folded cylindrical airbags[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 161-170. (in Chinese)

## 0 引言

气囊作为膜结构的一种典型代表,具有体积小、重量轻、便于收纳等优点,广泛应用于航空航天<sup>[1-2]</sup>、汽车工程<sup>[3-4]</sup>等多个领域,是一种常见的柔性缓冲系统。气囊蒙皮大多完全使用柔性材料,在未充气时可将其折叠收纳进一个较小的空间内,这也是气囊应用最为显著的优势之一。气囊结构具有广阔的应用前景和研究价值。

针对气囊结构,研究手段主要是实验和仿真,但采用实验手段对气囊充气过程展开研究存在诸多不便。对于大尺寸的柱状气囊,采用全尺度实验会耗费大量时间,且实验成本过高;而缩尺实验则无法真实地观察其展开形态与内部体积压强变化过程。数值模拟方法不仅可以减少不确定因素对实验效果的影响,还能缩短研发周期、降低成本,解决实验手段中相对难以处理的问题<sup>[5]</sup>,应用较多。控制体积法(Control Volume, 简称 CV)是当前气囊充气展开数值模拟中的一种常用理论方法<sup>[6-7]</sup>,具有计算效率高的显著优点。何文<sup>[8]</sup>采用 CV 法进行气囊仿真,并通过实验验证了算法的有效性;马春生等<sup>[9]</sup>利用 CV 法研究 5 种不同安全气囊的折叠方式,综合多个指标对安全气囊的折叠进行了优化设计;万鑫铭等<sup>[10]</sup>建立三种折叠方式的安全气囊,通过虚拟实验得出三种气囊各自在冲击力方面的优势;李斌等<sup>[11]</sup>采用 CV 法计算了多次 Z 形折叠管的展开过程,得出充气速率对扰动的影响;陈洋等<sup>[12]</sup>利用 CV 法模拟环形气囊,结合 ALE 法模拟某弹体及气囊在多工况下的入水和上浮过程,得到影响入水和回收效果的多种因素。但上述研究各自所针对的研究对象不同,气囊的结构形态也不相同。

针对气囊结构的研究,目前常见的工作大多围绕着汽车安全气囊展开。梁鹏等<sup>[5]</sup>对球形气囊的展开进行了相关研究,讨论了折叠次数对球形气囊展开的影响,但是球形气囊折叠方式单一且结构简单。柱状气囊在船舶下水<sup>[13]</sup>、深水打捞与救援<sup>[14]</sup>、空降装甲车的缓冲着陆<sup>[15]</sup>等民用与军事领域有着广泛的应用。在航空航天领域,毕格罗航空公司于 2016 年发射了一个可扩展迷你太空站“BEAM”与国际空间站对接,并进行了充气展开验证工作。该舱体的本质就是一个柱状气囊,而对应放大版的 B330 充气展开舱则被视为是未来在

月球以及火星上建立人类常驻基地的可靠平台;此外,柱状气囊在太空柔性展开天线以及卫星捕获方面都有着巨大的潜在应用价值<sup>[16-17]</sup>。柱状气囊作为一种主要的气囊结构,其折叠方式多样化,而大体积柱状气囊的折叠与充气展开过程更为繁琐复杂,现有文献中尚未系统地提出柱状气囊有效的折叠方式,针对不同折叠方式对其充气展开过程影响的讨论也很少。

本文针对柱状气囊,在其长轴与横截面方向上进行折叠与缝合,提出两种不同的折叠方式;在介绍折叠过程与缝合方法的基础上,建立两种折叠状态下柱状气囊的有限元模型,利用非线性动力学软件 LS-DYNA 对折叠状态下柱状气囊的充气展开过程进行数值模拟;通过数值模拟,完整复现两种折叠方式柱状气囊的充气展开过程,在不同环境条件下,对比分析气囊蒙皮应力、气囊内部体积、压强等主要参数在展开过程中的变化情况,比较两种折叠方式对柱状气囊充气展开的影响;通过数值结果的分析与对比,归纳总结两种折叠方式的柱状气囊的展开规律,给出两种折叠方式更为适用的空间环境以及可能存在的问题,以期柱状气囊的折叠收纳与应用提供有益建议。

## 1 气囊展开基础理论

针对柔性气囊结构,采用控制体积法进行分析。气囊在碰撞缓冲过程中绝热,与外界无热量交换,所满足方程组如下:

将气囊看成不断扩大的控制体积(Control Volume),组成气囊的壳单元作为控制表面,控制表面所包围的体积即为气囊的控制体积。此方法假定:气囊内部处处等压,充气过程为准静态,气体惯性不予考虑<sup>[5]</sup>。控制表面和控制体积可由格林定理相互联系:

$$\iiint \phi \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx dy dz = - \iiint \varphi \frac{\partial \phi}{\partial x} dx dy dz + \int \phi \varphi n_x d\Gamma \quad (1)$$

式中: $n_x$ 为表面法线与  $x$  轴夹角的余弦值, $y$  和  $z$  方向也可类似表示。

选择任意函数  $\phi = 1$ ,  $\varphi = x$  则体积积分可表示为

$$V = \iiint dx dy dz = \iint_S x n_x dS \quad (2)$$

式(2)中表面积分用组成气囊的壳单元来

估算:

$$\iint_S x n_x dS \approx \sum_{i=1}^N \bar{x}_i n_{ix} A_i \quad (3)$$

式中: $i$ 为单元号; $N$ 为单元总数; $\bar{x}_i$ 为第 $i$ 个单元坐标的平均值; $n_{ix}$ 为第 $i$ 个单元表面法向量与 $x$ 轴夹角的余弦值; $A_i$ 为第 $i$ 个单元的表面积。

由式(3)得到气囊控制体积,内部压力由理想气体 Gramm 状态方程得到:

$$P = (k - 1) \rho e \quad (4)$$

式中: $P$ 为气囊内部压力; $k$ 为热容比常数, $k = C_p / C_v$ ; $\rho$ 为气体密度; $e$ 为气囊内气体比内能。

对于气囊结构,采用有限元法进行动力学求解,其运动方程为

$$N\ddot{D} + C\dot{D} + KD = F^{\text{ext}} \quad (5)$$

式中: $N$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为气囊的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $F^{\text{ext}}$ 为包括内压和外部载荷的力矢量; $\ddot{D}$ 、 $\dot{D}$ 、 $D$ 分别为加速度、速度、位移矢量。

## 2 柱状气囊折叠模型

本文所设计气囊完全展开后的形态为圆柱状,柱状横截面为外接圆半径是 1 000 mm 的正六边形,侧面高 6 000 mm。针对柱状气囊,分别沿长轴方向和横截面方向采用两种不同的折叠方式进行折叠,并按照对应的折叠方式建立有限元分析模型。折叠方式 1 是沿长轴线方向折叠收纳,最终折叠形式为长条片状,横截面为“王”字型;折叠方式 2 是在横截面进行折叠收纳,最终折叠状态为扁平型,横截面为六边形。

在确定折叠模式后,采用有限元软件进行建模。参照文献[1]和文献[6]对常见气囊数值模拟的参数取值,气囊采用单层薄膜材料,薄膜厚度取 0.2 mm,质量密度为 1 100 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 0.9 GPa,泊松比 0.3,有限元分析采用单元类型为 shell 单元。

所充入的气体为氮气,充气量以气囊完全展开后的体积按照质量体积关系折算为标准充气质量,其摩尔质量为 0.028 8 kg/mol。充气速率与时间曲线统一为加载曲线,充气时间为 100 s,充气完成后继续计算 100 s,总的计算时间为 200 s,以观察气囊稳定后的状态,充气曲线如图 1 所示。为了比较外界环境对气囊充气展开的影响,设计两组工况对气囊分别进行模拟分析,工况参数如表 1 所示。工况 1 模拟常温常压环境,工况 2 模拟高温高

压环境,由于 CV 法中的温度为开氏温度,大气环境有记录的最高气温为 60 °C(333.15 K)左右,与 25 °C(298.15 K)差异不大(开氏温度)。为了观察温度对气囊展开的影响程度,工况 2 温度取 100 °C(373.15 K)以考虑更为极端的气温环境。

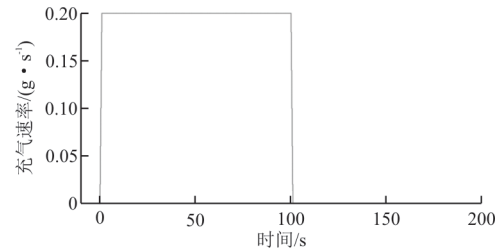


图1 充气曲线

Fig. 1 Curve of inflation

表1 环境参数

Table 1 Environmental parameters

工况	大气压强/kPa	环境温度/°C	充气量
工况 1	1个标准大气压	25	标准充气量
工况 2	2个标准大气压	100	标准充气量

### 2.1 折叠方式 1

折叠方式 1 保持长轴方向尺寸不变,将气囊侧面均匀分割成 12 份且延伸至横截面,正六边形横截面沿环向对折后向内收缩,形似一个“王”字,其余的表面随之层层内折,侧面与横截面蒙皮根据展开后的状态进行缝合。折叠方式 1 展开示意图与折痕如图 2 所示,整体折叠后的有限元模型如图 3 所示,横截面缝合如图 4 所示,几何要素网格如图 5 所示。使用三角形和四边形混合单元网格,以四边形为主,在完成分析模型几何建模后选取合适的网格尺寸通过 LS-Prepost 自动划分。折叠方式 1 有限元模型共有 101 607 个节点,单元数为 101 616。

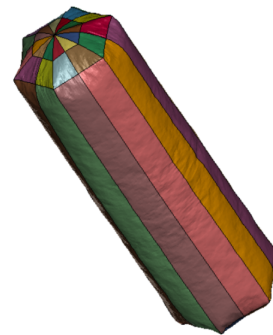


图2 折叠方式1气囊展开示意图

Fig. 2 Deployed airbag of folding mode 1

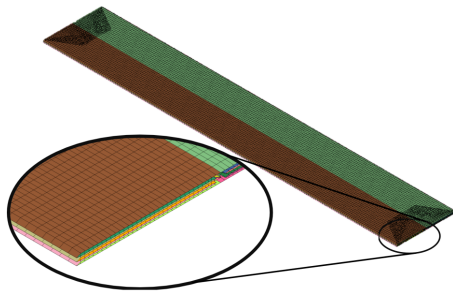


图3 折叠方式1整体示意图  
Fig. 3 Folded airbag of folding mode 1

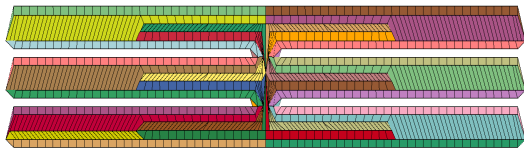
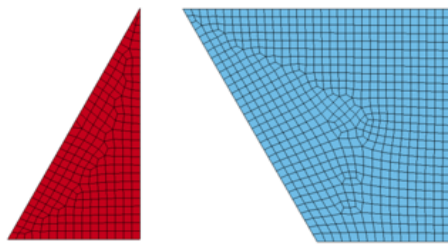
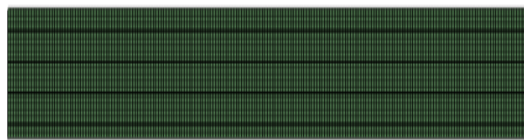


图4 折叠方式1横断面缝合示意图  
Fig. 4 Cross-sectional of folding mode 1



(a) 顶面与底面网格



(b) 侧面网格

图5 折叠方式1三种几何要素网格图  
Fig. 5 Geometric essential and element grid of folding mode 1

## 2.2 折叠方式2

折叠方式2类似于手风琴的风箱结构,横截面正六边形保持尺寸不变,侧面呈锯齿状折叠。折叠方式2展开示意图如图6所示,整体折叠后的有限元模型如图7所示,剖面示意图如图8所示,锯齿状侧面内外交替缝合如图9所示(一个交替循环缝合),几何要素网格单元如图10所示,网格划分与折叠方式1一致,折叠方式2有限元模型共有22 293个节点,单元数为22 290。为了避免对气囊展开后的尺寸产生影响,侧面六边形环的宽度不宜过大。

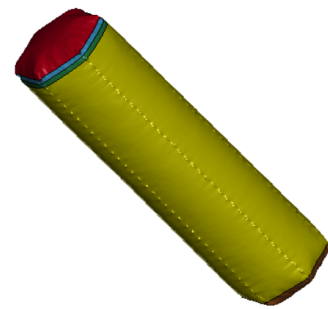


图6 折叠方式2气囊展开示意图  
Fig. 6 Deployed airbag of folding mode 2

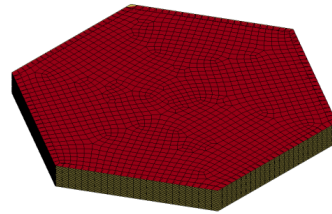


图7 折叠方式2整体示意图  
Fig. 7 Folded airbag of folding mode 2

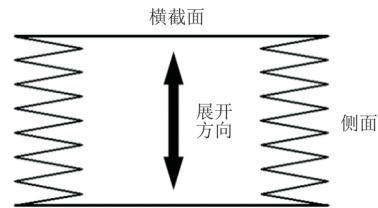


图8 折叠方式2剖面示意图  
Fig. 8 Cross-sectional of folding mode 2

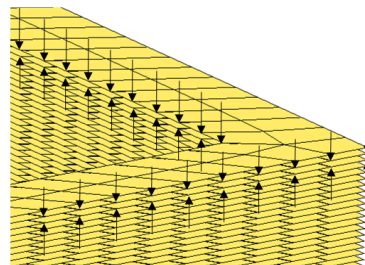
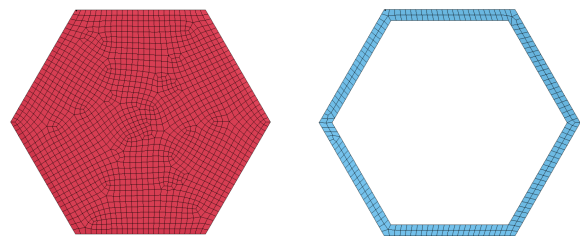


图9 折叠方式2侧面模型与缝合  
Fig. 9 Profile of folding mode 2



(a) 顶面与底面网格 (b) 侧面网格

图10 折叠方式2两种几何要素网格图  
Fig. 10 Geometric essential and element grid of folding mode 2

### 3 数值模拟结果

为了更加直观地比较折叠方式与不同环境参数对柱状气囊的展开影响,给出在相同工况下对不同折叠方式的数值分析结果,并将结果进行对比。

#### 3.1 工况 1

截取工况 1 两种折叠方式下的气囊在 20、40、60、80 s 时的 Mises 应力云图,并对比两种折叠方式下气囊完全展开时刻的 Mises 应力云图。各对应时刻的 Mises 应力云图如图 11 所示,完全稳定后的 Mises 应力云图如图 12 所示。

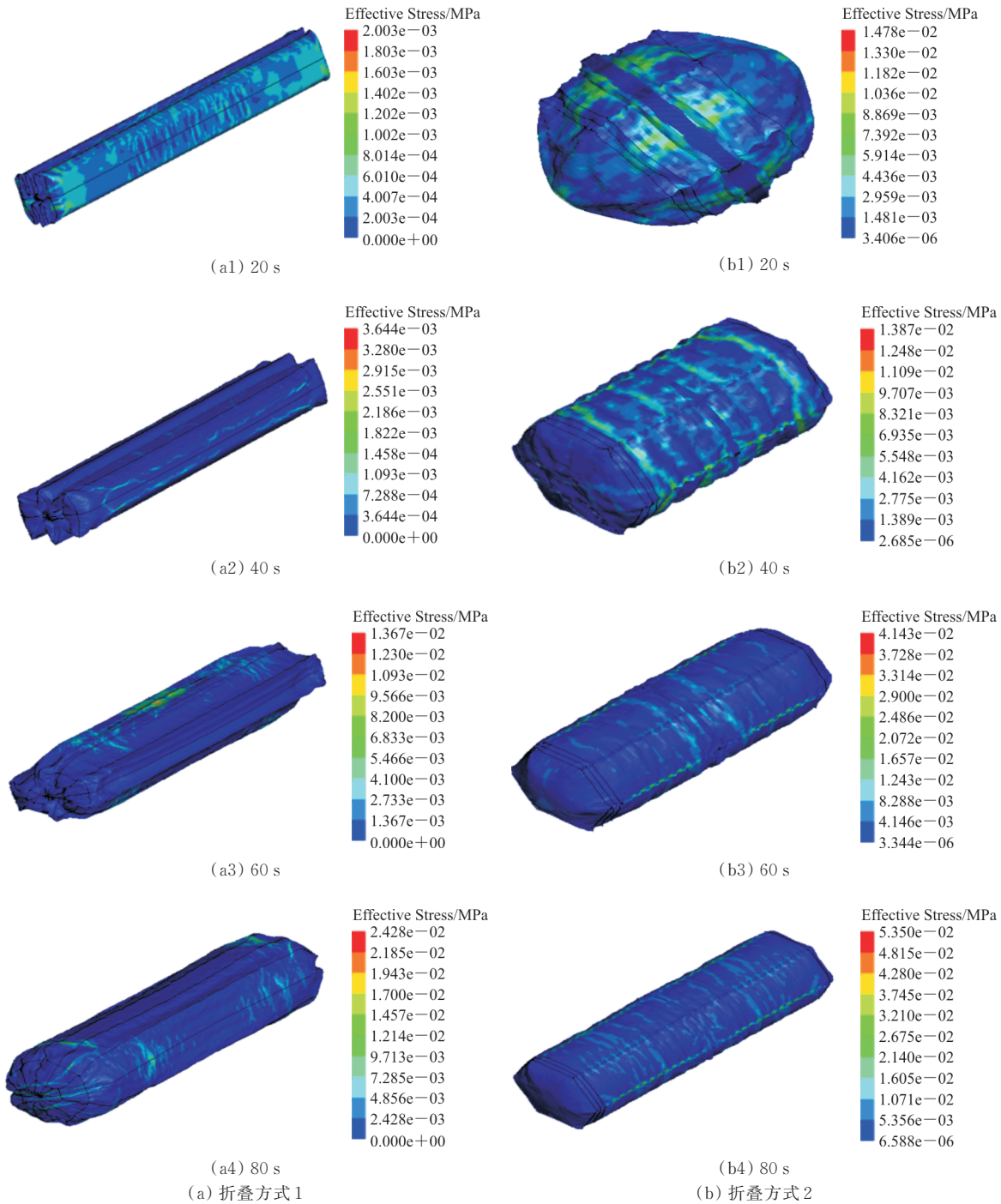


图 11 工况 1 两种折叠方式气囊的 Mises 应力云图

Fig. 11 Different folding modes' Mises stress cloud pictures of working condition 1 at different tim

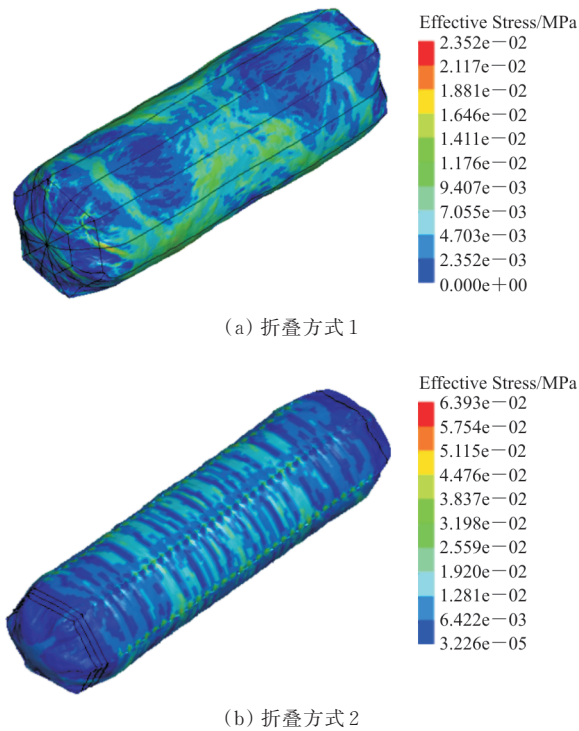


图 12 工况 1 完全展开后两种折叠方式气囊的 Mises 应力云图  
Fig. 12 Different folding modes' Mises stress cloud pictures of working condition 1 after full deployment

工况 1 两种折叠方式下 4 个时刻与最终状态下气囊表面最大应力值如表 2 所示。

表 2 工况 1 两种折叠方式对应时间节点最大应力  
Table 2 Different folding modes' maximum Mises stress of working condition 1 at different time

时刻/s	工况 1 最大应力/MPa	
	折叠方式 1	折叠方式 2
20	$2.000 \times 10^{-3}$	$1.478 \times 10^{-2}$
40	$3.644 \times 10^{-3}$	$1.387 \times 10^{-2}$
60	$1.367 \times 10^{-3}$	$4.143 \times 10^{-2}$
80	$2.428 \times 10^{-3}$	$5.350 \times 10^{-2}$
最终	$2.352 \times 10^{-2}$	$6.393 \times 10^{-2}$

从图 11~图 12、表 2 可以看出:从开始充气到最终稳定状态,工况 1 下折叠方式 2 的最大应力始终大于折叠方式 1,同时最终状态下折叠方式 2 的应力较大值均出现在缝合点处。

工况 1 两种不同折叠方式下气囊的体积和内压与时间的变化曲线如图 13~图 14 所示。

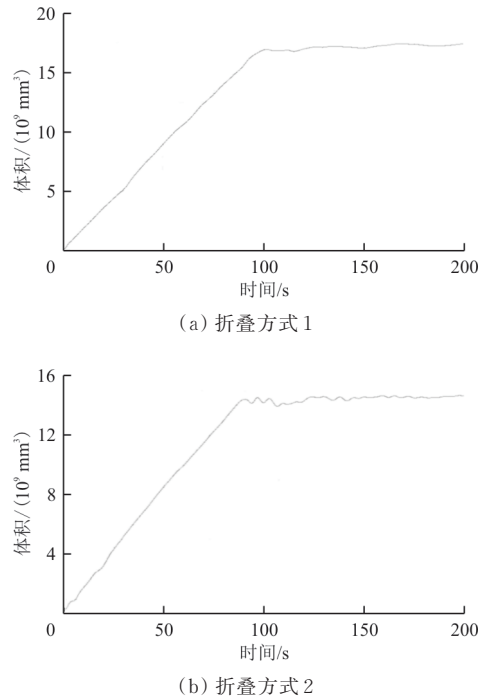


图 13 工况 1 气囊体积—时间变化曲线  
Fig. 13 Curves of volume-time in working condition 1

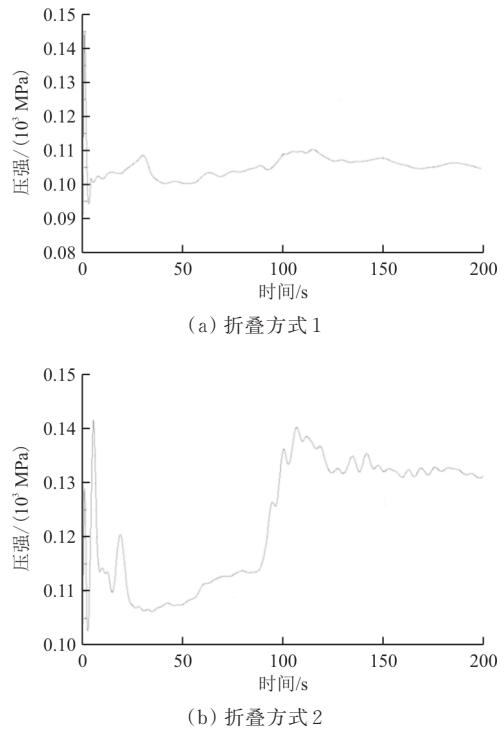


图 14 工况 1 气囊压强—时间变化曲线  
Fig. 14 Curves of pressure-time in working condition 1

### 3.2 工况 2

截取工况 2 两种折叠方式下的气囊在 20、40、

60、80 s 时的 Mises 应力云图,并对比两种折叠方式下气囊完全展开时刻的 Mises 应力云图。20、40、60、80 s 时的 Mises 应力云图如图 15 所示。

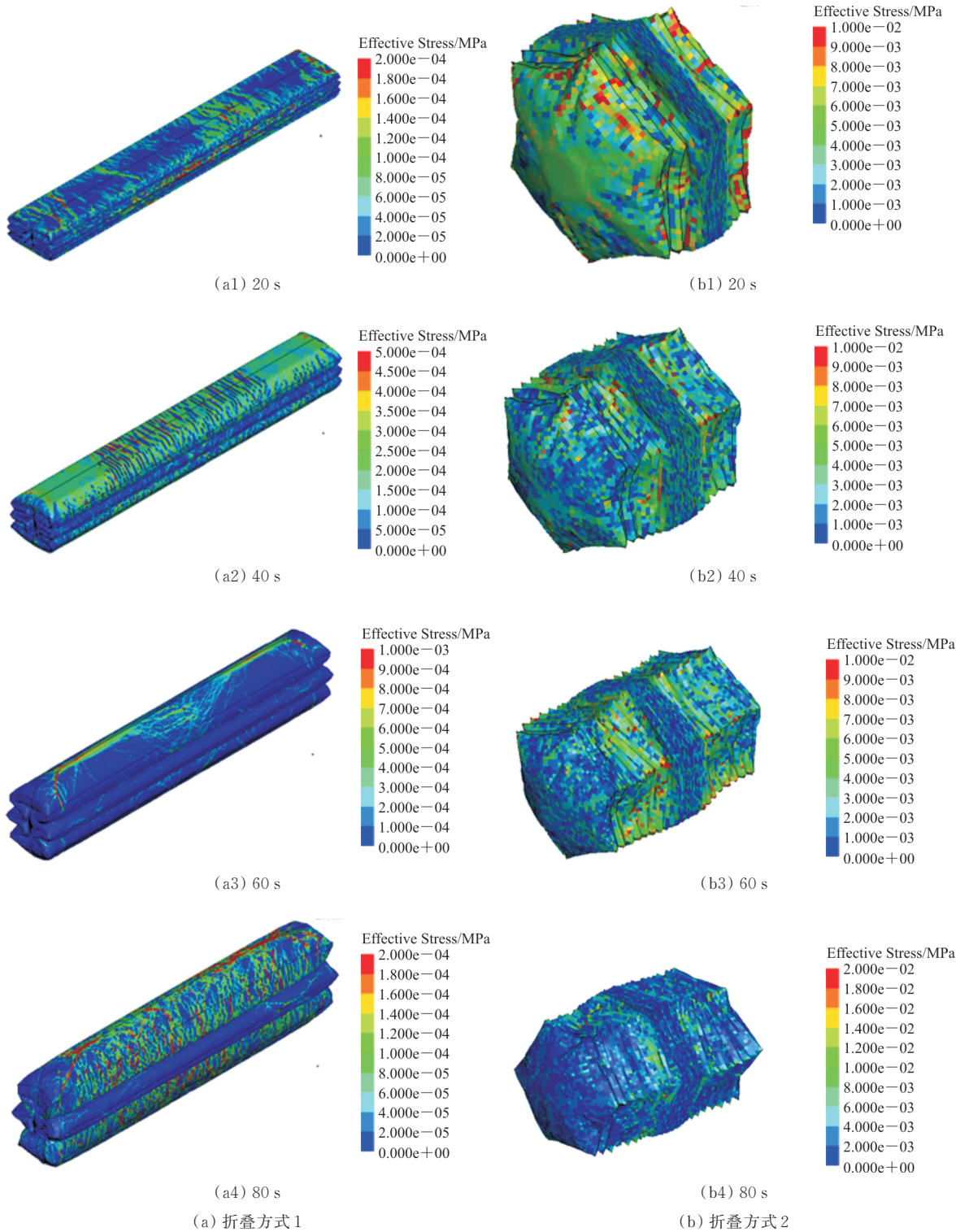


图 15 工况 2 两种折叠方式气囊的 Mises 应力云图

Fig. 15 Different folding modes' Mises stress cloud pictures of working condition 2 at different time

完全展开时刻的 Mises 应力云图如图 16 所示。

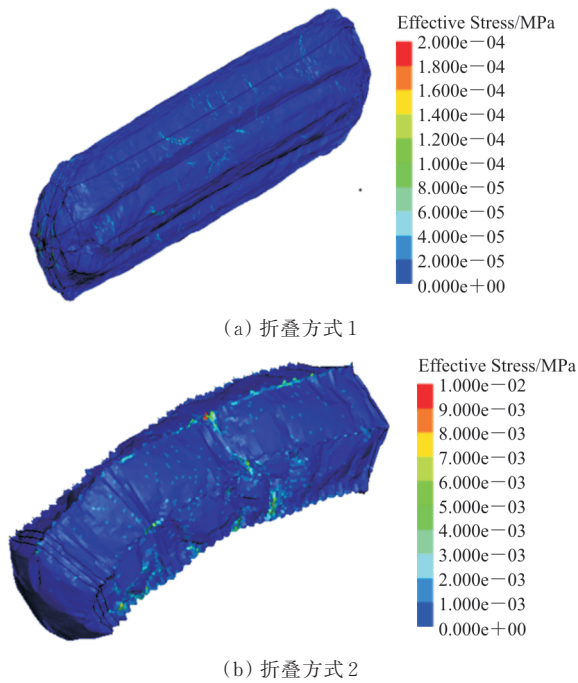


图 16 工况 2 完全展开后两种折叠方式气囊的 Mises 应力云图

Fig. 16 Different folding modes' Mises stress cloud pictures of working condition 2 after full deployment

工况 2 两种折叠方式下 4 个时刻与最终状态下气囊表面最大应力值如表 3 所示。

表 3 工况 2 两种折叠方式对应时间节点最大应力  
Table 3 Different folding modes' maximum Mises stress of working condition 2 at different time

时刻/s	工况 2 最大应力/MPa	
	折叠方式 1	折叠方式 2
20	$2.000 \times 10^{-4}$	$1.000 \times 10^{-2}$
40	$5.000 \times 10^{-4}$	$1.000 \times 10^{-2}$
60	$1.000 \times 10^{-3}$	$1.000 \times 10^{-2}$
80	$2.000 \times 10^{-4}$	$2.000 \times 10^{-2}$
最终	$2.000 \times 10^{-4}$	$1.000 \times 10^{-2}$

从图 15~图 16、表 3 可以看出:从开始充气到最终稳定状态,工况 2 下折叠方式 2 的最大应力始终大于折叠方式 1,同时最终状态下折叠方式 2 的应力较大值均出现在缝合点处。

工况 2 两种不同折叠方式下气囊的体积和内压与时间的变化曲线如图 17~图 18 所示。

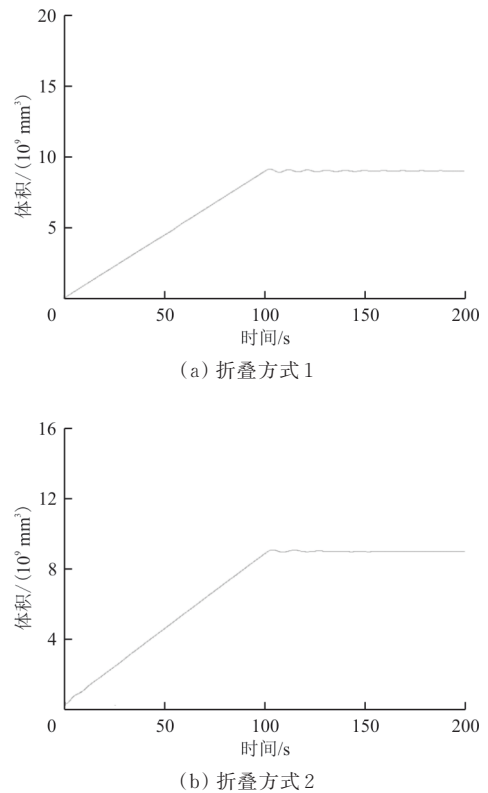


图 17 工况 2 气囊体积—时间变化曲线  
Fig. 17 Curves of volume-time in working condition 2

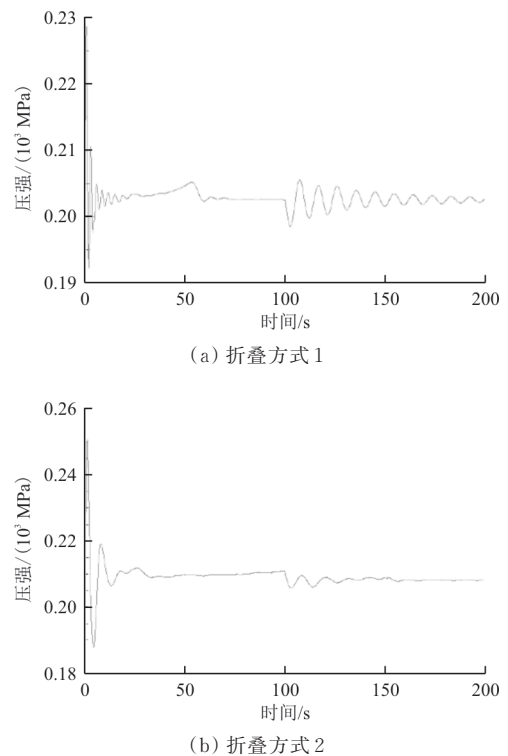


图 18 工况 2 气囊压强—时间变化曲线  
Fig. 18 Curves of pressure-time in working condition 2



根据上述数值模拟结果可以发现:在同一工况下,两种折叠方式气囊展开过程的体积时间变化曲线整体相似,气囊在刚开始充气时,压强变化都比较剧烈,展开速度基本一致。折叠方式2的应力云图中,缝合点处出现了较多的应力集中现象,而折叠方式1的应力分布比较均匀。两种工况下折叠方式2各个时刻的表面最大应力均大于折叠方式1。

在同一种折叠方式下,外界环境气压对气囊的展开影响很大,相同充气量的情况下,大气压强越大气囊越不容易展开,气囊表面在展开过程中产生的内力偏小。根据理想气体状态方程,温度越高,相同质量的气体体积越大,但在大气环境中,气温差异不会过大(开氏温度),环境温度对气囊展开的影响不如外界气压明显。

## 4 结 论

(1) 采用折叠方式1的气囊形状狭长扁平,适合放在狭长空间内;采用折叠方式2的气囊所占面积较小,但是在收纳状态下较厚,适合放在占地不大但具有一定高度的空间内。折叠方式2的缝合方式较为简单且为重复性操作,而折叠方式1的横截面缝合相对复杂且需要注意缝合顺序。

(2) 根据充气展开过程的应力云图和各时刻的气囊表面最大应力值可以发现,采用折叠方式2的气囊在充气展开过程中表面应力明显大于折叠方式1,折叠方式2在缝合处会产生较大的应力集中现象,对缝合质量以及气囊侧面材料整体的强度要求相对较高,而折叠方式1在展开过程中的应力偏小且分布更均匀。

(3) 外界气压对气囊展开影响显著,在相同充气量下,外界气压越大气囊越不容易展开,因此在极端环境下,如深水打捞(高压)或高空投掷(低压)时,使用气囊需要考虑到外界气压的影响,适当调整充气量,防止发生气囊充爆或气囊未完全展开的现象,从而影响气囊的正常使用。在大气环境内,气温差异(开氏温度)很难达到两倍以上,对气囊展开程度的影响,环境温度仅需作为次要因素考虑。

## 参 考 文 献

- [1] GOZMAN P C, SIMOIU D, CRĂȘTIU I, et al. Dynamic analysis of satellites used for side-airbag system[C]// 7th International Conference on Advanced Materials and Structures. Romania: AMS, 2018: 112-118.
- [2] SAKAGAMI R, TAKAHASHI R, WACHI A, et al. Integral design method for simple and small Mars lander system using membrane aeroshell [J]. Acta Astronautica, 2018, 144: 103-118.
- [3] FAROOQ I S M, JARADI D M, FARUQUE M O. Vehicle table with deployable airbag: US, 15/068681 [P]. 2018-03-14.
- [4] FU Xinhua. Analysis on characteristics of structural impact response of airborne armored vehicle in landing process[C]// The 5th Annual International Conference on Material Engineering and Application. Wuhan, China: ICMEA, 2019: 27-35.
- [5] 梁鹏, 薛齐文, 张岩, 等. 折叠球形气囊展开过程仿真[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 562-568.  
LIANG Peng, XUE Qiwen, ZHANG Yan, et al. Simulation of the deployment process of folded spherical airbag[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 562-568. (in Chinese)
- [6] GROENENBOOM P, LASRY D, SUBBIAN T, et al. A diffusive gas jet model in PAM-SAFE for airbag inflation [C]// International Congress & Exposition. USA: SAE, 1993: 175-183.
- [7] KHAN M U, MOATAMEDI M. A review of airbag test and analysis [J]. International Journal of Crashworthiness, 2008, 13(1): 67-76.
- [8] 何文. 汽车安全气囊工作过程计算机仿真理论与试验验证技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2002.  
HE Wen. Research on computer simulation and experimental validation of working process of automobile airbag [D]. Changsha: Hunan University, 2002. (in Chinese)
- [9] 马春生, 岳卉, 黄世霖, 等. 基于提高乘员保护效能的安全气囊折叠方法研究[J]. 汽车工程, 2005(3): 350-353.  
MA Chunsheng, YUE Hui, HUANG Shilin, et al. A study on airbag folding patterns for improving occupant protection effectiveness [J]. Automotive Engineering, 2005(3): 350-353. (in Chinese)
- [10] 万鑫铭, 杨济匡, 沈斌. 气囊折叠方式对展开作用力影响的仿真[J]. 机械工程学报, 2005(12): 162-166.  
WAN Xinming, YANG Jikuang, SHEN Bin. Influence of airbag folding pattern on deployment loads using virtual testing technique [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005(12): 162-166. (in Chinese)

- [11] 李斌, 谭德伟, 杨智春. Z形折叠薄膜充气管充气展开过程仿真[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(7): 930-935.  
LI Bin, TAN Dewei, YANG Zhichun. Simulation of inflation deployment of Z-folded membrane tube[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(7): 930-935. (in Chinese)
- [12] 陈洋, 吴亮, 曾国伟, 等. 带环形密闭气囊弹体入水冲击过程的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1155-1164.  
CHEN Yang, WU Liang, ZENG Guowei, et al. Numerical analysis of the water entry process of a projectile with a circular airbag[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(5): 1155-1164. (in Chinese)
- [13] 张芳亮. 船舶气囊下水通航风险分析及安全保障措施[J]. 珠江水运, 2020(15): 99-100.  
ZHANG Fangliang. Risk analysis and safety safeguard measures of ship airbag launching navigation[J]. Pearl River Water Transport, 2020(15): 99-100. (in Chinese)
- [14] 马俭. 一种沉船打捞用气囊: 中国, CN208198777U[P]. 2018-12-07.  
MA Jian. The utility model relates to an airbag for salvaging a sunken ship: China, CN208198777U [P]. 2018-12-07. (in Chinese)
- [15] 洪煌杰, 王红岩, 郝贵祥. 空降车-气囊系统着地缓冲过程仿真分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(4): 33-36.  
HONG Huangjie, WANG Hongyan, HAO Guixiang. Simulation and analysis of landing cushion process for airborne vehicle and airbag [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(4): 33-36. (in Chinese)
- [16] 李苇. 充气结构在大型星载天线中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
LI Wei. Application of inflatable structures in large spaceborne antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
- [17] 刘晓峰, 谭惠丰, 杜星文. 充气太空结构及其展开模拟研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004(4): 508-512.  
LIU Xiaofeng, TAN Huifeng, DU Xingwen. Inflatable space structures and deployment simulation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004(4): 508-512. (in Chinese)

#### 作者简介:

薛齐文(1976—),男,博士,教授。主要研究方向:计算力学。

王霄腾(1991—),男,博士研究生。主要研究方向:计算力学。

何宜谦(1976—),男,博士,教授。主要研究方向:计算力学。

郭敏(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:工程力学。

刘旭东(1976—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:发射技术与空间。

鄂智佳(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:空间柔性体释放。

(编辑:马文静)