

文章编号:1674-8190(2019)04-562-07

# 折叠球形气囊展开过程仿真

梁鹏<sup>1</sup>, 薛齐文<sup>1</sup>, 张岩<sup>1</sup>, 刘旭东<sup>2</sup>, 李慧通<sup>2</sup>

(1. 大连交通大学 土木工程学院, 大连 116028)

(2. 北京机械设备研究所, 北京 100854)

**摘要:** 球形气囊展开和折叠过程复杂, 采用实验手段研究其展开过程存在诸多不便。建立以单侧内折方式折叠的球形气囊数值分析模型, 研究球形气囊折叠后充气展开的动态应用特性, 比较相同充气条件不同折叠层数和相同折叠层数不同充气条件下气囊展开动态特性的差异; 对影响气囊展开过程中体积和内压曲线变化的因素进行分析, 分别讨论折叠层数、充气速率和充气量对球形气囊动态特性的影响。结果表明: 单侧内折折叠次数增多会导致气囊内压最大值增大, 应用时设定气囊折叠次数应考虑气囊材料最大内压承受能力; 充气速率和充气量均会影响气囊展开的稳定性, 充气速率的影响主要在充气及气囊展开初期阶段, 而充气量的影响主要在充气完成后的自由展开阶段。

**关键词:** 球形气囊; 单侧内折; 展开过程; 模拟仿真

中图分类号: V214.9

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Simulation of the Expansion Process of Folded Spherical Airbag

Liang Peng<sup>1</sup>, Xue Qiwen<sup>1</sup>, Zhang Yan<sup>1</sup>, Liu Xudong<sup>2</sup>, Li Huitong<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** The unfolding and folding process of spherical balloon is complex, so it is inconvenient to study its unfolding process by experimental means. A numerical analysis spherical airbag model with unilateral folds is constructed to explore the dynamic application characteristics of the folding spherical airbag. The dynamic characteristics of airbag expansion under different folding times and different inflating conditions are researched. The factors affecting the volume and internal pressure curves of the airbag during expansion are discussed by comparing the volume and internal pressure curves of the airbag during expansion. The results show that the more folding times on one side, the higher maximum internal pressure of the airbag. The maximum internal pressure bearing capacity of the airbag material should be considered when setting folding times of the airbag. Inflation rate and volume will affect the stability of airbag expansion. Inflation rate mainly affects the initial stage of airbag expansion, while inflation volume mainly affects the free expansion stage after inflation.

**Key words:** spherical airbag; unilateral fold; expansion process; analogue simulation

收稿日期:2018-10-10; 修回日期:2019-01-21

通信作者:梁鹏, 294671016@qq.com

引用格式: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 expansion process of folded spherical airbag[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 562-568. (in Chinese)

## 0 引言

气囊应用范围广泛,涉及航空航天、汽车工程等多个领域,具有广阔的应用前景和研究价值。球形气囊是气囊在应用时的一种特殊形态,其展开过程复杂,折叠过程繁琐,采用实验手段对其进行研究存在诸多不便,运用有限元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,还能大量节省时间和财力,解决实验手段中相对难以处理的问题<sup>[1]</sup>。

气囊模拟理论研究方面,气囊缓冲约束系统及通用气囊数学建模工具的创建,为气囊的数值模拟计算奠定了基础。在通用气囊模型基础上考虑非理想气体的影响,由此提出了控制体积法<sup>[2]</sup>(CV法)。ALE法<sup>[3-5]</sup>即任意拉格朗日欧拉法,结合了拉格朗日和欧拉方法,在大变形问题处理上有较强的适用性,但求解时需要建立气体流动环境的细化网格,对计算机硬件要求较高。代小芳等<sup>[6-7]</sup>对折叠气囊展开过程的实现方法进行对比,指出了CV法和ALE法的优缺点,并细致研究了气囊建模和折叠阶段可能遇到的问题。

气囊模拟应用研究是体现气囊理论应用价值的途径。李旭波<sup>[8]</sup>对航空器着陆气垫进行探究,建立了航空器着陆的有限元模型,模拟了气垫式起落系统,完成了航空器整体着陆过程的仿真分析;喻先勇<sup>[9]</sup>对自适应压力气囊在航空零件加工中的应用进行了仿真分析,证明了自适应压力气囊可以提高航空零件的加工精度且精度可控;张九阳<sup>[10]</sup>在无人机回收方法研究中考虑了气囊的减震效果,但并没有对气囊的折叠方式进行探讨;吴军亭等<sup>[11]</sup>设计出环形气囊的一种新的折叠方法,没有针对球形气囊进行研究;卫剑征等<sup>[12]</sup>对“Z”型折叠缓冲气囊进行了仿真分析,其着眼点主要在气囊的缓冲性能,对充气速率和折叠次数对气囊展开的影响没有进行深入讨论。气囊的展开过程是气囊能否正常进行工作的关键,因为气囊在应用时通常需要被折叠进狭小空间内,在充气结束后展开到特定体积或形状,折叠和充气方式的不同会导致气囊展开效果的差异,对气囊展开效果的影响不可忽略。对于此类非线性大变形结构的动力学问题,进行模拟仿真能有效规避实体实验过程中的诸多不确定因素,可重复性高,针对性强。

鉴于目前国内外对折叠球形气囊的研究较少,本文构建单侧内折球形气囊模型,对折叠球形气囊充气展开过程动态特性进行分析。通过数值仿真模拟得到气囊在不同折叠次数、充气速率以及不同充气量情况下展开过程的计算结果,探讨上述因素对气囊展开效果的影响。

## 1 气囊 CV 展开方法

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,整个充气过程绝热。控制表面和控制体积可由格林定理相互联系:

$$\iiint_V \phi \frac{\partial \psi}{\partial x} dx dy dz = - \iiint_V \psi \frac{\partial \phi}{\partial x} dx dy dz + \oint_S \phi \psi n_x d\Gamma \quad (1)$$

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 $\phi=1, \psi=x$ ,则体积积分可表示为

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

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。

## 2 球形气囊模型

所建气囊模型可看作气囊未充气时折叠后水平铺展。以将半径为500 mm的球形气囊平均分为4瓣的模型为例,介绍建模方法。点坐标计算示意图如图1所示,边缘线如图2所示,网格单元如图3所示。

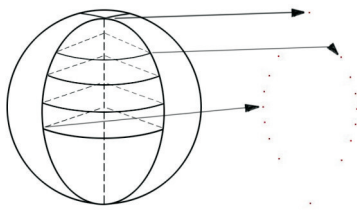


图 1 点坐标计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram for calculating point coordinates

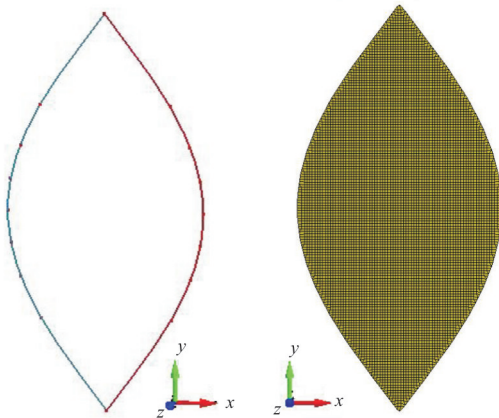


图 2 边缘线

Fig. 2 Edge line

图 3 网格单元

Fig. 3 Mesh elements

根据球形气囊的半径,计算球体表面四分之一的尺寸。以 500 mm 为半径所建点的坐标为  $(0, \pm 785.4), (\pm 259.8, \pm 424.0), (\pm 340.1, \pm 261.8), (\pm 380.23, \pm 126.35), (\pm 392.7, 0)$ , 将点顺次连接成每瓣气囊的边缘线,边缘线内部划分网格,沿  $z$  方向复制网格三次,上下相邻网格间的距离为 2 mm,四瓣球体表面就按顺序依次排列,如图 4 所示。沿  $y$  轴方向看去,效果如图 5 所示,按照图中的形式将气囊边界缝合。缝合方法是将需要缝合的点按图示方向移动至同一坐标位置,两点缝合为一点,使网格组成一个闭合的球体。

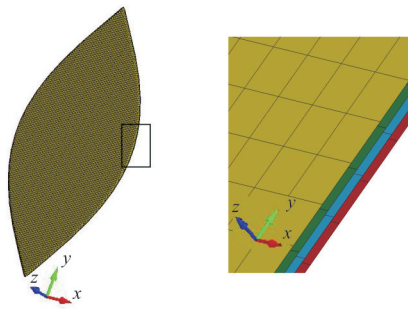
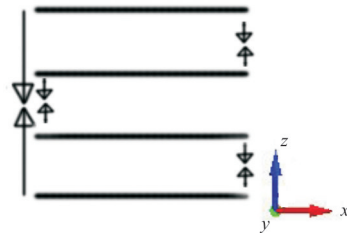
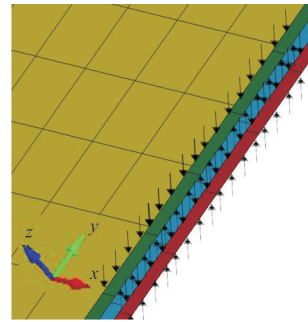


图 4 单元排列

Fig. 4 Elements arrangement



(a) 整体示意图

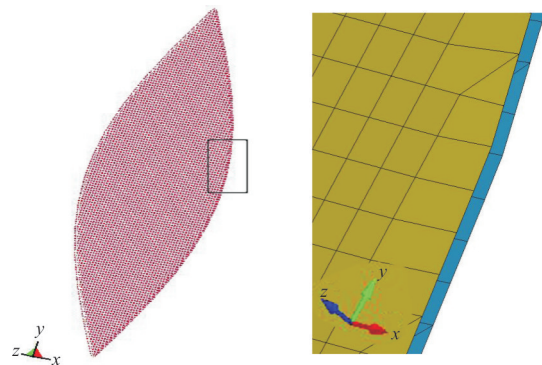


(b) 局部示意图

图 5 气囊缝合方式

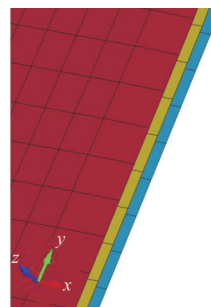
Fig. 5 Way of merging airbag

采用同样的方法,建立 4 组模型进行对比,分别是将气囊表面分成 4 瓣、6 瓣、8 瓣、10 瓣。相当于将球形气囊模型按单面内折的方法分别折叠了 1、2、3、4 次。建模完成后的折叠气囊模型侧面效果图及展开效果图如图 6 所示。

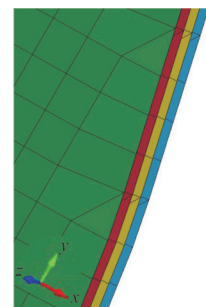


(a) 放大区域

(b) 折叠 1 次气囊边缘



(c) 折叠 2 次气囊边缘



(d) 折叠 3 次气囊边缘

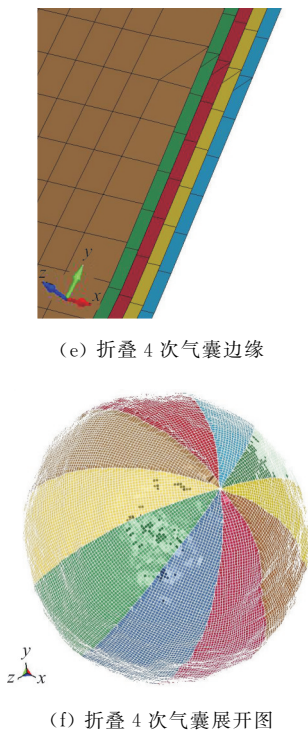


图 6 单侧折叠/展开气囊模型  
Fig. 6 Folded airbag model

此方法直接构建单侧内折后的球形气囊模型,可以省去对气囊进行二次折叠。气囊二次折叠会使折叠区域单元变形,折叠次数越多,整体变形量越大,导致气囊展开后数据产生误差,此方法可以有效避免因折叠变形带来的误差。

### 3 数值模型计算

针对同一种材料的球形气囊进行探究,就气囊折叠层数、充气速率和充气量的不同对气囊内压和体积的影响进行对比分析。计算时所设定的大气温度为 98 K,大气压强为 0.101 MPa,大气密度为 1.29 g/L。气囊相关参数如下:单元类型为薄膜单元,质量密度 870 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 500 MPa,泊松比 0.3,厚度 0.38 mm,球体展开后半半径 500 mm,划分的网格边长为 10 mm,每层之间的距离为 2 mm。

#### 3.1 折叠次数

不同折叠次数下,充气速率与时间曲线统一为加载曲线,如图 7 所示。图中,曲线中有标识“A”

处为转折点,转折点坐标分别为(0,0),(1,0.5),(3,0.93),(3,0),其物理含义表示 0~1 s 内,充气速率从 0 均匀增加到 0.5 g/s,1~3 s 内,充气速率由 0.5 均匀增加到 0.93 g/s,3 s 后停止充气。整个充气过程中气囊完全自由展开。

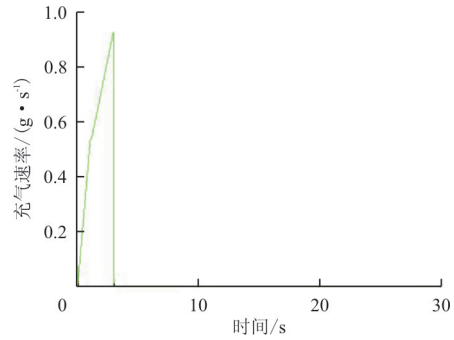
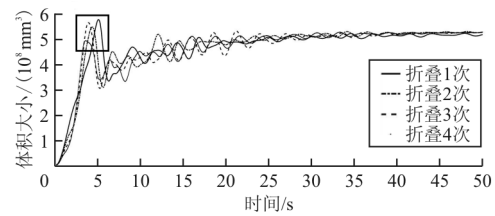
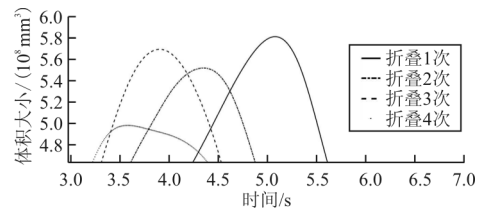


图 7 加载曲线  
Fig. 7 Load curve

球形气囊体积和内压变化曲线如图 8~图 9 所示。

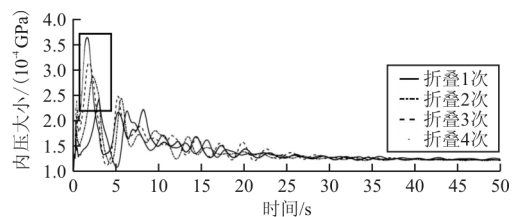


(a) 曲线整体



(b) 局部放大

图 8 气囊体积与时间关系曲线  
Fig. 8 Airbag volume and time relation curve



(a) 曲线整体

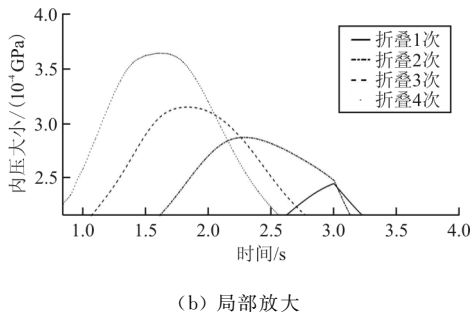


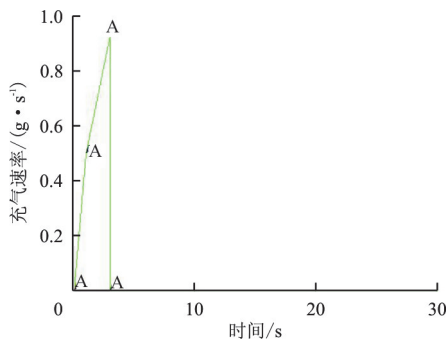
图 9 气囊内压与时间关系曲线

Fig. 9 Airbag internal pressure and time relation curve

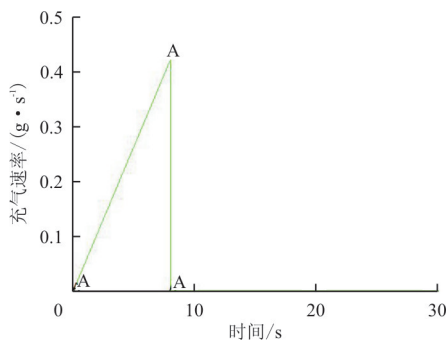
从图 8~图 9 可以看出:随着折叠次数的增加,球形气囊首次达到体积极大值的时间提前,首次达到内压最大值的时间亦提前,而且内压最大值增大。由此可以推断,充气条件相同时,单侧内折折叠次数与内压最大值成正相关。

### 3.2 充气速率

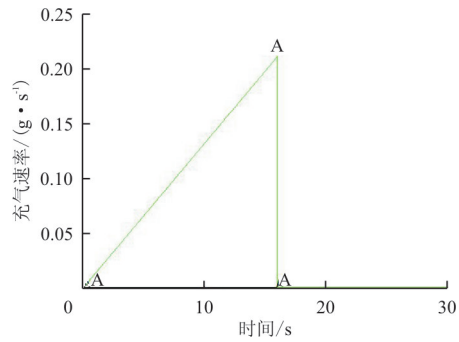
在充气量相同的情况下,针对同一模型,给出充气速率不同时,气囊内部体积和压力随时间变化的曲线。各加载情况下充气速率与时间的关系如图 10 所示。



(a) 加载曲线 1



(b) 加载曲线 2



(c) 加载曲线 3

图 10 加载曲线

Fig. 10 Load curve

从图 10 可以看出:曲线 1 与图 7 的加载曲线相同,图中加载曲线与横坐标轴所围成的面积便是充气总量,三种加载情况充气总量相同;曲线 2 表示在 0~8 s 内,充气速率从 0 均匀增加至 0.42 g/s 后停止充气;曲线 3 表示在 0~16 s 内,充气速率从 0 均匀增加至 0.21 g/s 后停止充气。

球形气囊对应的体积和内部压力随时间的变化曲线如图 11~图 12 所示。

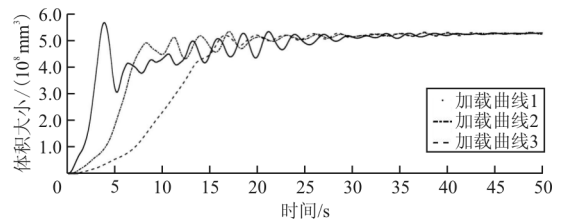


图 11 气囊体积与时间关系曲线

Fig. 11 Airbag volume and time relation curve

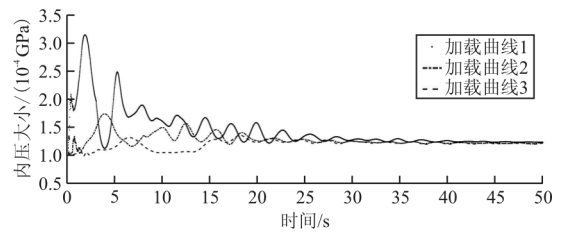


图 12 气囊内压与时间关系曲线

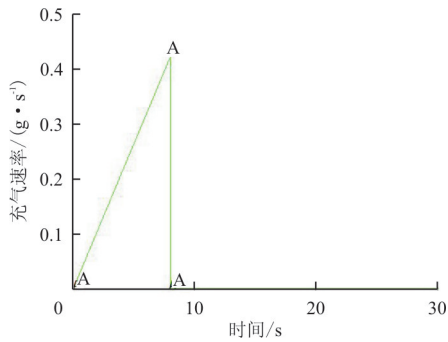
Fig. 12 Airbag internal pressure and time relation curve

从图 11~图 12 可以看出:在充气速率较快的情况下,体积与内压曲线变化幅度更大,全部气体充入气囊后,需要更长的时间才能稳定;气囊内压会更快到达峰值,而且峰值和充气速率成正相关。充气速率稍慢的情况下,气囊变化曲线较平缓,虽

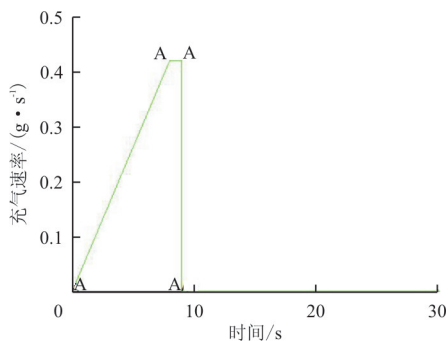
延长了充气时间但气囊体积和内压曲线波动明显减小。

### 3.3 充气量

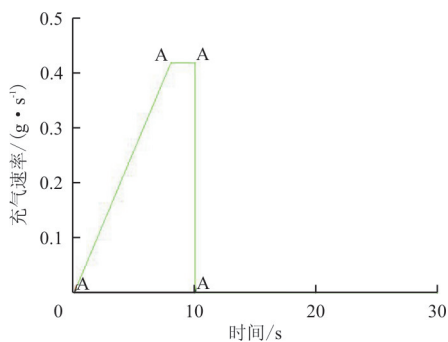
针对同一模型,通过延长充气时间来保证充气量增大,加载曲线如图 13 所示。



(a) 加载曲线 1



(b) 加载曲线 2



(c) 加载曲线 3

图 13 加载曲线

Fig. 13 Load curve

从图 13 可以看出:三种加载情形中,前 8 s 加载情况相同,充气速率由 0 均匀增加至 0.42 g/s;曲线 1 在 8 s 后停止充气,曲线 2 在 8 s 后按 0.42 g/s 的速率充气至 9 s,曲线 3 充气至 10 s,由

此区分充气量大小。

球形气囊对应的体积和内部压力随时间的变化曲线如图 14~图 15 所示。

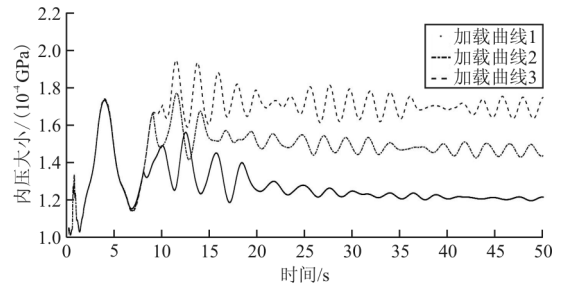


图 14 气囊内压与时间关系曲线

Fig. 14 Airbag internal pressure and time relation curve

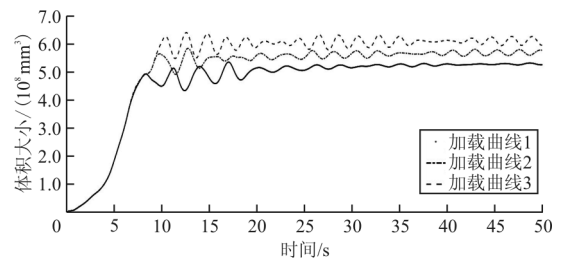


图 15 气囊体积与时间关系曲线

Fig. 15 Airbag volume and time relation curve

从图 14~图 15 可以看出:就该模型而言,0~8 s 充气过程中各曲线没有明显差别,差别出现在 8~10 s 之间,持续加载阶段,随着充气量的增加,曲线波动愈发明显,难以稳定到固定数值。

为了更清晰地表示出不同充气量时气囊平衡阶段体积与内压的关系,以气囊展开 30~50 s 时间段内的平均值作为平衡数据,计算三种加载情况下气囊体积与内压的相对大小,如表 1 所示。

表 1 计算结果比例关系

Table 1 Proportional relation of results

编号	充气量/g	球体平衡体积/m³	球体平衡内压/MPa	充气量相对大小/%	体积相对大小/%	内压相对大小/%
1	1.68	0.526	0.123	100	100	100
2	2.10	0.568	0.149	125	107.98	121.14
3	2.52	0.610	0.171	150	115.97	139.02

从表 1 可以看出:以加载情况 1 作为参考,当充气量增加 25% 时,体积增大 7.98%,内压增大 21.14%;当充气量增加 50% 时,体积增大 15.97%,内压增大 39.02%。

## 4 结 论

(1) 对于单侧内折方式折叠的球形气囊,随着折叠次数的增多,气囊首次展开到体积极大值的时间缩短,层与层之间相互作用增多,充气初始阶段的内压最大值增大。若对气囊应用此折叠方法,应注意折叠次数对内压最大值的影响,避免折叠次数过多使内压最大值超过气囊材料承受极限而造成破坏。

(2) 在保证气囊材料不被破坏的前提下,充气速率和充气量对气囊产生的影响主要在稳定性方面,但两者对稳定性的影响产生在不同阶段。充气速率的影响产生在气囊充气和初期展开阶段,充气量的影响产生在充气完成后的自由展开阶段。充气量相同的情况下,充气速率越高,气囊展开初期的内压和体积曲线波动越明显,而且内压最大值显著升高;充气速率相同,充气量越高,充气完成后气囊体积和内压曲线的波动幅度越大。

### 参考文献

- [1] 徐静静. 基于流-固耦合模型的气囊织物动态力学仿真研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.  
Xu Jingjing. Numerical simulation of airbag dynamic mechanical performance based on fluid-structure interaction approach[D]. Shanghai: Donghua University, 2010. (in Chinese)
- [2] 王喜军. 气囊展开及其与环境相互作用计算技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
Wang Xijun. Numerical study of the airbag deployment and interaction with the environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] Huang Jing, Hu Lin. A comparative study on airbag inflation properties using CV and ALE-based approaches[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Digital Manufacturing & Automation(ICDMA2012), 2012.
- [4] 岳宝增, 李笑天. ALE 有限元方法研究及应用[J]. 力学与实践, 2002, 24(2): 7-11.  
Yue Baozeng, Li Xiaotian. Study of the ALE finite element method and it's applications[J]. Mechanics and Engineering, 2002, 24(2): 7-11. (in Chinese)
- [5] Wang Xijun, Zong Zhi, Zhao Yong, et al. A numerical study of passenger side airbag deployment based on arbitrary Lagrangian-Eulerian method[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(3): 397-404.
- [6] 代小芳. 基于流固耦合方法的气囊展开数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
Dai Xiaofang. Numerical simulation of airbag deployment based on fluid-structure interaction methodology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] 代小芳, 宗智, 王喜军, 等. 折叠气囊展开过程 CV 和 ALE 数值模拟方法对比研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(8): 676-680.  
Dai Xiaofang, Zong Zhi, Wang Xijun, et al. A comparative study on the CV and ALE methods for simulating folded airbag deployment[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(8): 676-680. (in Chinese)
- [8] 李旭波. 气垫式起落系统方案设计及其着陆仿真分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
Li Xubo. Scheme design and landing simulation of air cushion landing system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [9] 喻先勇. 航空薄壁零件工装优化及自适应研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.  
Yu Xianyong. Optimization of aviation thin-walled parts tooling and it's adaptive research[D]. Shenyang: North-eastern University, 2015. (in Chinese)
- [10] 张九阳. 无人机发射与回收技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
Zhang Jiuyang. Launch and recovery technology of unmanned aerial vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [11] 吴军亭, 吴俊, 曹立波, 等. 新型客车安全气囊匹配设计与折叠方法[J]. 中国机械工程, 2017, 24(16): 2995-3012.  
Wu Junting, Wu Jun, Cao Libo, et al. Matching design and folding method for new type airbags in coaches[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 24(16): 2995-3012. (in Chinese)
- [12] 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 Jianzheng, Tan Huifeng, Wan Zhimin, et al. Simulation for airbag deployment and landing process of inflatable landing vehicles[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2010, 31(5): 1-8. (in Chinese)

### 作者简介:

梁 鹏(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:道路与铁道工程。

薛齐文(1976—),男,博士,教授。主要研究方向:计算力学。

张 岩(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:道路与铁道工程。

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。

李慧通(1988—),男,博士,工程师。主要研究方向:航空宇航科学与技术。

(编辑:马文静)