

折叠气囊展开过程仿真与分析

王晓祺, 王刚, 张柄楠, 高紫阳, 许国润

(中北大学 机电工程学院, 太原 030051)

摘要: **目的** 研究操雷上浮装置中折叠气囊在水下充气展开的动态特性行为。**方法** 根据热力学定理, 构建质量流计算模型, 获取气囊入口处的气体质量流曲线, 通过有限元分析软件 LS-DYNA, 采用控制体积法 (Control Volume, CV), 考虑不同水深带来的外部压力差异, 对折叠气囊的展开过程进行仿真分析。**结果** 随着水下深度的增加, 在其他条件相同的条件下, 气囊内气体质量流入的初始速率递减, 气瓶内部压强下降速度减缓, 充气时间相应延长, 在陆上为 0.008 s, 水下 100 m 为 1.392 1 s。同一水深, 较小通径的管道会导致流入气囊气体的质量流速降低, 从而显著增加达到工作压力所需的时间, 4 mm 通径为 0.365 7 s, 12 mm 通径为 0.040 6 s。多次折叠气囊在充气初期, 压力变化较为剧烈, 最大压力峰值为 0.447 MPa, 接近工作压力 0.453 MPa。**结论** 整个充气过程分为初期、中期和后期 3 个阶段, 气囊的初始折叠状态对初期影响最大。仿真计算得出, 气囊完全展开所需时间与通径呈指数型函数关系。

关键词: 折叠气囊; 水下; 质量流速; 充气过程; 折叠建模; 有限元模型

中图分类号: TJ630

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0034-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.005

Simulation and Analysis of Folding Airbag Deployment Process

WANG Xiaoqi, WANG Gang, ZHANG Bingnan, GAO Ziyang, XU Guorun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to study the dynamic characteristic behavior of folding airbag in underwater inflatable deployment of mine-manipulating floating device. According to the thermodynamic theorem, a mass flow calculation model was constructed, and the gas mass flow curve at the inlet of the airbag was obtained. Through the finite element analysis software LS-DYNA, the control volume (CV) method was used to consider the external pressure difference caused by different water depths. The simulation analysis of the deployment process of the folding airbag was carried out. With the increase of underwater depth, under the same other conditions, the initial rate of gas mass inflow in the airbag decreased, the pressure drop rate inside the cylinder slowed down, and the inflation time was prolonged accordingly, which was 0.008 s on land and 1.392 1 s at 100 m underwater. At the same water depth, the smaller diameter of the pipeline would lead to a decrease in the mass flow rate of the gas flowing into the airbag, thereby significantly increasing the time required to reach the working pressure. That for 4 mm diameter was 0.365 7 s, and that for the 12 mm diameter was 0.040 6 s. In the initial stage of inflation, the pressure of the multi-folded airbag changed sharply, and the maximum pressure peak was 0.447 MPa, which was close to the working pressure of 0.452 MPa. The whole inflation process is divided into three stages: the initial stage, the middle stage and the later stage. The initial folding state of the airbag has the greatest influence on the initial stage. The simulation results show that the relationship

收稿日期: 2024-07-15; 修订日期: 2024-09-30

Received: 2024-07-15; Revised: 2024-09-30

引文格式: 王晓祺, 王刚, 张柄楠, 等. 折叠气囊展开过程仿真与分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 34-41.

WANG Xiaoqi, WANG Gang, ZHANG Bingnan, et al. Simulation and Analysis of Folding Airbag Deployment Process[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 34-41.

between the time required for the airbag to fully unfold and the path is an exponential function.

KEY WORDS: folding airbag; underwater; mass velocity; gas replenishment process; folding modeling; finite element model

当今气囊的应用非常广泛, 例如汽车的安全气囊^[1]、航天器着陆缓冲气囊^[2]、船舶水下气囊^[3]等。文中介绍的气囊主要应用在操雷^[4]上, 其主要功能是, 当操雷完成任务或意外停车时, 需要通过高压气瓶为气囊充气, 及时展开, 将雷体上浮至水面, 防止其沉入海底^[5]。

现在对气囊的仿真分析方法主要有控制体积法 (CVM)、任意 Lagrange-euler 法 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 和粒子法 (Consistent Particle Method, CPM)^[6-8]等 3 种模拟方法。现有商业模拟软件大多是针对汽车行业安全气囊所开发的仿真方法, 没有专门针对高压气瓶^[9]为气囊充气开发的仿真模块。

对于气瓶为气囊充气展开过程, 很多学者提出许多不同方法。甄文强等^[10]通过构建环形气囊充气过程的数学模型, 分析了充气深度对充气时间的影响。程文鑫等^[11]建立了气囊充气过程模型, 获得了气瓶压力、气囊受力等各参数的变化规律。孙元等^[12]通过上浮装置充气时间计算模型, 获得了充气时间与质量流速等。上述文献中所用到的数学模型方法, 虽然能够获得质量流曲线和气囊体积随时间变化曲线, 但是并不能直观体现气囊折叠后开展的动态过程。笔者将数学模型与有限元模型相结合, 既能得到质量流曲线, 又能直观地体现出折叠气囊的动态展开过程。通过仿真分析可以更好地了解折叠气囊在地面和水下充气的展开过程, 研究其受力特性和动态响应规律, 为之后的设计优化提供参考。

1 气囊充气展开过程模型基本假设

气囊在水下的充气展开过程非常复杂, 而且充气过程较短^[13]。根据初始条件的不同, 从充气开始到充气结束, 时间为几十毫秒到十几秒不等, 为方便问题的研究, 作出如下假设:

1) 假设高压气瓶中的气体经管路给气囊充气的过程是一个绝热膨胀的节流过程, 忽略在充气过程中气体与外界环境的热交换损失。

2) 气囊内部气压均匀, 外部所受的海水压强均为同一深度海水压强, 不考虑在膨胀过程外界环境压强的微小变化。

3) 忽略在整个充气过程中气体的泄漏。

2 流入气囊的质量流速计算模型

不论是使用哪种方法, 最关键的是需要流入气囊的质量流速曲线, 但是通过实验获取曲线难度较大,

成本较高, 并且实验周期长, 所以通过数学模型来获得质量流曲线是最为省时稳妥的办法, 其数学模型的建立过程如下^[14]。

1) 基于时间步长 0.001 s 对气囊充气过程进行离散, 在 t_0 时刻, 气瓶内气体的状态参数为: 压力 P_0 , 体积 V_0 , 温度 T_0 。

2) 经过 Δt 后, 部分气体从气瓶充入气囊, 此时气囊入口处气体的状态参数为 P_u 、 V_u 、 T_u 。

3) 更新气瓶内气体的状态参数 (P 、 T)。

4) 重复步骤 1)~3), 直至气瓶内压力下降到规定压力。

2.1 质量流速模型

质量流速模型为:

$$Q_m = SP_0 \sqrt{\frac{2\gamma}{RT_0(\gamma-1)} \left[\left(\frac{P_s}{P} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_s}{P} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \frac{P_s}{P} > \sigma^* \quad (1)$$

$$S = \mu A \quad (2)$$

$$\sigma^* = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

式中: R 为气体常数; S 为管路的有效面积; μ 为管路截面系数; A 为管路最小截面积; γ 为气体的绝热系数 (比热容比); P 为气瓶更新状态后压力; P_s 为外界环境压力。

当 $P=P_s$ 时, 保持平衡状态; 当 $P_s/P \leq \sigma^*$ 时, 管路中气流为亚声速流; 当 $P_s/P \geq \sigma^*$ 时, 管路中气流为声速流。

在经过 Δt 后, 气囊入口处的压力为:

$$P_u = \begin{cases} \sigma^* P, & \frac{P_s}{P} \leq \sigma^* \\ P_s, & \frac{P_s}{P} > \sigma^* \end{cases} \quad (4)$$

在 $t + \Delta t$ 时刻, 气囊入口处气体的体积和温度为:

$$\begin{cases} V_u = \frac{Q_m \Delta t}{\rho_u} \\ T_u = \frac{P_u}{\rho_u R} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\rho_u = \rho \left(\frac{P_u}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (6)$$

式中: ρ_u 为管路内气体的密度; ρ 为气瓶内气体的密度。

2.2 气瓶内气体状态模型

气瓶内压力和温度为:

$$P' = \frac{\left[\left(\frac{PV_0}{T} - \frac{P_u V_u}{T_u} \right) \frac{T}{V_0} \right]^\gamma}{P^{\gamma-1}} \quad (7)$$

$$T' = T \left(\frac{P'}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (8)$$

先计算出在 Δt 时间后气囊入口处气体的压力、温度和密度,再用上一个 Δt 结束时气瓶内状态参数计算出下一个 Δt 开始时的状态参数,通过不断地对上述方程进行迭代计算,即可得到质量流曲线以及相关各项参数。

2.3 充气完成时气瓶内压强

气瓶内压强为:

$$P_2 = \frac{P_0 V_0 + (P_s + P_g) V_1}{V_0} \quad (9)$$

式中: P_2 为气瓶内剩余气体压强; P_g 为气囊工作压力; V_1 为气囊充满后的体积。

通过计算得到的 P_2 值来作为迭代计算停止的条件,认为气瓶内的压力下降到 P_2 的时候气囊就达到工作条件,进而停止计算。

3 气囊有限元模型

3.1 模型建立

目前,折叠气囊模型主要有3种建模方法:直接建模法、直接折叠法和初始矩阵法^[15]。直接建模法是通过三维软件直接建立物理模型。直接折叠法建模是在未充气前气囊的平铺状态下划分有限元网格,保证节点在折叠线上,并且在折叠线两侧各有1条平行线,避免折叠过程中单元的变形,根据划分好的网格定义折叠线、折叠方向以及 Scale 值(控制折叠宽度及折叠中心线)。初始矩阵法是通过对比气囊的折叠前后形状进行分析,建立初始网格和映射网格,从而建立气囊模型。常用的商业软件如 LS-DYNA^[16]、MADYMO^[17]均可以采用初始矩阵法对折叠气囊建立有限元模型^[18]。

气囊的折叠方式^[19]对于气囊展开的过程有直接的影响。为了便于气囊前处理中的折叠操作,在建立片体后,使用 HyperMesh^[20]划分网格时,按照折叠线进行网格划分,之后将模型导入 LS-PrePos^[21]中进行边界节点缝合。这样做的好处是可以保证上下2部分片体的节点能够保持一致,在进行节点缝合时,保证模型的完整性和封闭性,膨胀过程中不会出现局部模型区域大变形的情况,保证模型完全封闭以及单元法向朝向封闭的外部。

在定义气囊材料参数时采用材料 34 模型,该材料模型为织物模型^[22],在参与计算时忽略弯曲刚度。织物力学行为为非线性和各向异性,在经纬度上的弹性模量相差不宜过大,否则会导致不稳定。模型是由长 1 200 mm、宽 500 mm 的 2 片片体上下缝合而成,使用 Thin 折叠方式进行折叠,之后将 2 部分片体设置为壳体,厚度为 1.76 mm,使用膜单元^[23]模型参与计算。折叠前、后的模型如图 1 所示。模型的基本参数见表 1。

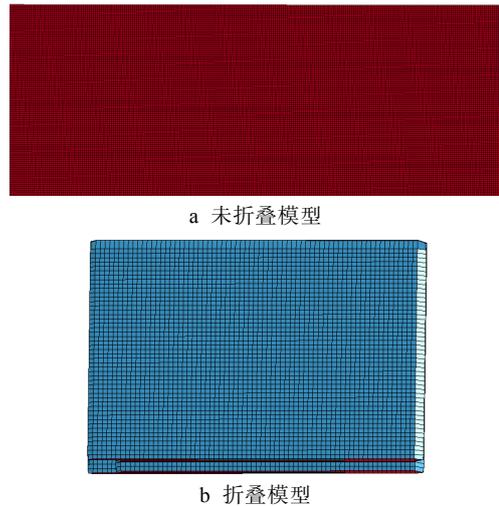


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model: a) unfolded airbag; b) folded airbag

表 1 气囊模型参数

Tab.1 Parameters of airbag model

| 名称 | 参数 |
|--------------------------|-----|
| 单元类型 | 膜单元 |
| 弹性模量/MPa | 500 |
| 泊松比 | 0.3 |
| 密度/(kg·m ⁻³) | 780 |

气囊折叠次数^[24]示意图如图 2 所示,按照折叠线 1、2、3、4 的折叠顺序对气囊模型进行折叠。

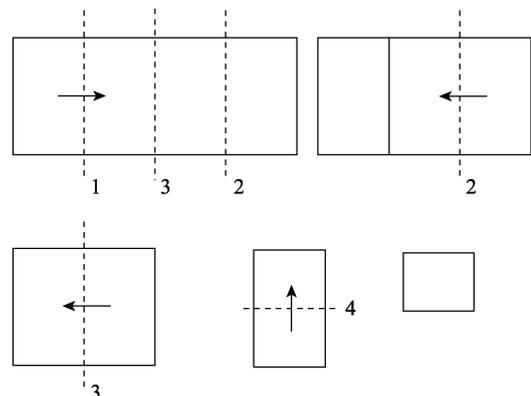


图 2 气囊折叠示意图

Fig.2 Schematic diagram of airbag folding

3.2 模型验证

在孙元等^[12]的上浮装置大深度上浮试验中, 气囊达到 90 L 时所用时间为 12 s 和 41 s。将初始条件设定与其一致, 带入模型进行计算, 结果如图 3 所示。在 102 m 深度, 气囊体积达到 90 L 所用时间为 11.820 s; 在 145 m 深度所用时间为 41.417 s。仿真时间与实测时间基本一致, 最大误差不超过 1.5%, 说明模型是准确的。

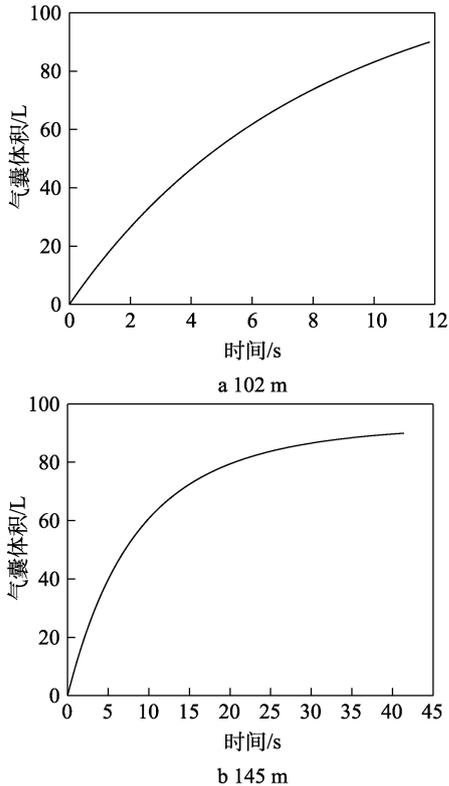


图 3 不同深度下气囊体积随时间的变化曲线
Fig.3 Curve of airbag volume changing with time at different depth

4 仿真结果分析

为便于建模和计算, 在以下所有算例中将 2 个 50 L 的气囊模型进行归一化处理, 合并成一个带有 2 个充气入口的 100 L 气囊模型^[25]。

4.1 水深对充气质量流速的影响

基于第 2 节的质量流模型, 在计算质量流曲线时, Δt 取 0.1 ms, 因为在计算第一个 Δt 前的数据并没有参与到迭代计算当中, 所以气瓶内压力并不是从给定初始压强开始下降, 而是从第一个状态开始。只要 Δt 给得足够小, 对于整个的计算过程和结果影响可以忽略不计。当然 Δt 越小, 计算所需要的时间越长, 消耗的计算机资源越多, 在计算时选取合适的 Δt 即可。

对气瓶容积为 4 L, 初始充气压力为 30 MPa, 0、30、60、100 m 水深的气囊流入质量流和气瓶内压强变化进行计算, 得到的结果如图 4 所示。图 4a 为不同水深流入气囊的质量流曲线, 可以看出, 随着水深的增加, 环境压强逐渐增大, 流入气囊的初始质量流速逐渐减小的同时, 充入气囊中达到工作压力所需的气体量也逐渐增多。因此, 在充气过程中, 气瓶内的压强下降速度将随之减缓, 并且相应的充气时间也随之延长, 如图 4b 所示。这一结果表明, 在不同水深环境下, 气囊充气过程受到环境压力的显著影响, 直接影响着充气效率和时间。

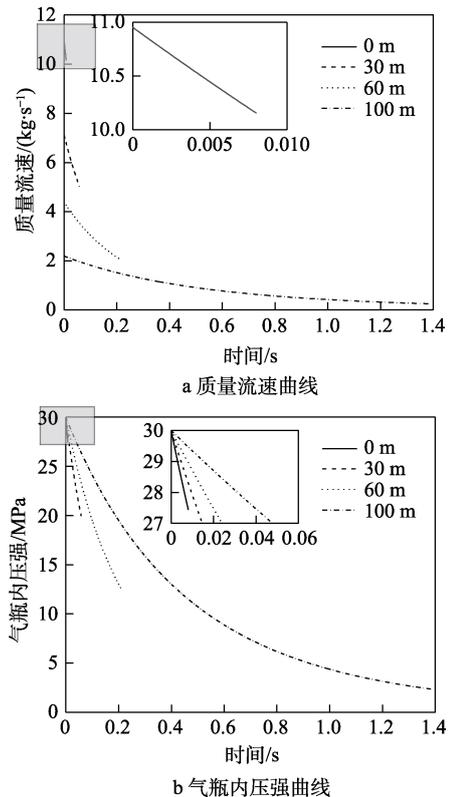


图 4 不同水深的质量流速和气瓶压强变化情况
Fig.4 Changes of mass flow rate and cylinder pressure in different water depth: a) mass flow velocity curves; b) pressure curves in cylinders

4.2 管径对充气质量流速的影响

充气管路的管径大小对于流入气囊的气体质量流速和充气时间也有着较大的影响, 进而会影响到气囊的展开过程。

如图 5 所示, 管径为 4、8、10、12 mm 时, 初始流速分别为 1.14、4.56、7.12、10.25 kg/s, 气囊达到工作压力的充气时间分别为 0.365 7、0.091 4、0.058 4、0.040 6 s。在给定的充气压力下, 较小管径的管道会使流入气囊的质量流速减小, 气囊达到工作压力的时间会随着管径的减小成倍增加。由图 6 可知, 管径对充气时间呈现出指数型的影响, 通过拟合后可得到充

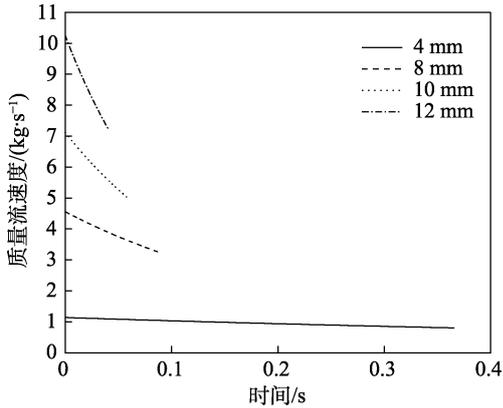


图 5 不同通径质量流速曲线
Fig.5 Mass flow rate curves of different diameter

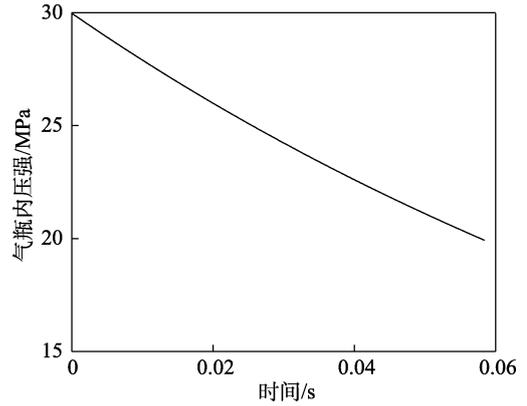


图 8 气瓶内压强随时间变化曲线
Fig.8 Pressure change curve with time in cylinder

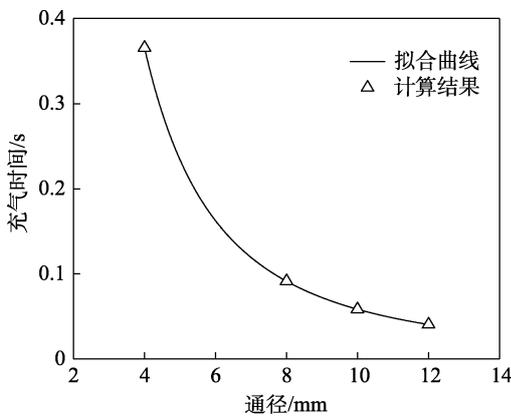


图 6 通径对气囊展开时间影响规律
Fig.6 Influence law of diameter on airbag deployment time

气时间与通径的函数关系为 $t = 5.860 9d^{-2.001}$ ，故可近似认为充气时间与通径的平方成反比。

4.3 气囊展开过程分析

在水下 30 m 深环境下的充气过程为例，环境压力为 0.403 MPa，海水密度为 1.025 kg/L，高压气瓶容积为 4 L，初始压强为 30 MPa，气囊工作压力为 0.05 MPa，通径为 10 mm。该条件下流入气囊的质量流速和气瓶内压强变化曲线如图 7、8 所示。

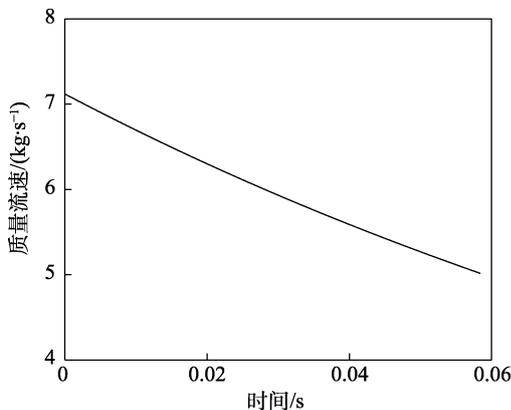


图 7 质量流曲线
Fig.7 Mass flow curve

由图 9 可以看出，在充气开始后 0~10 ms 为充气初期，因为气囊处于被折叠状态，压力变化较为迅速，并出现峰值。随着气囊的不断膨胀，内部容积不断扩大。在 11 ms 时，进入充气中期，气囊已经完全展开，内部压力逐渐降低，趋于外界环境压力，与外界环境压力处于动态平衡的状态。在 30 ms 时进入充气后期，内部压力开始明显上升。在 44 ms 时，气囊体积也接近最大值，直至达到气囊工作压力。气囊经过 4 次折叠，平面上变为折叠之前的 1/8，所以在充气初期出现 4 个峰值 A(0.299 ms, 0.447 MPa)、B(0.698 ms, 0.419 MPa)、C(4.1 ms, 0.431 MPa)、D(9.6 ms, 0.420 MPa)。

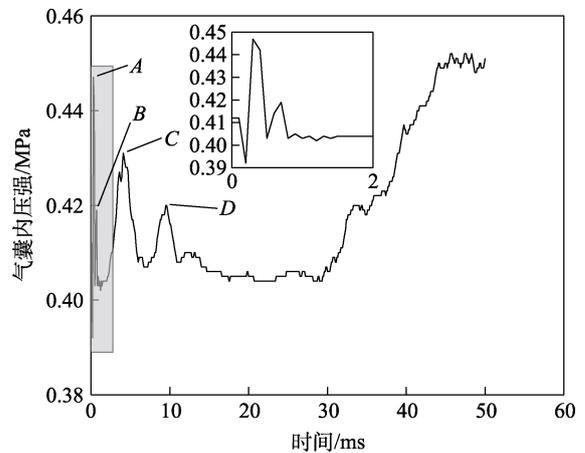


图 9 气囊内压强随时间的变化
Fig.9 Variation diagram of pressure in airbag with time

通过 CV 法得到的每个时刻的气囊内部压力都是相同的，气囊容体随时间变化的曲线比较光滑，如图 10 所示。因为在折叠时，折叠线两侧的网络会发生不同程度的变形（如原本为正方形的 2D 网格可能会成长方形 2D 网格），所以最终膨胀体积会有误差。在图 11f 中可以看到，折叠线 4 右侧的气囊模型要比左侧大一些。在该模型中，最终体积达到了 102 L，误差为 2%。在 43.4 ms 时已经达到了 100 L，气囊内压力为 0.449 MPa。

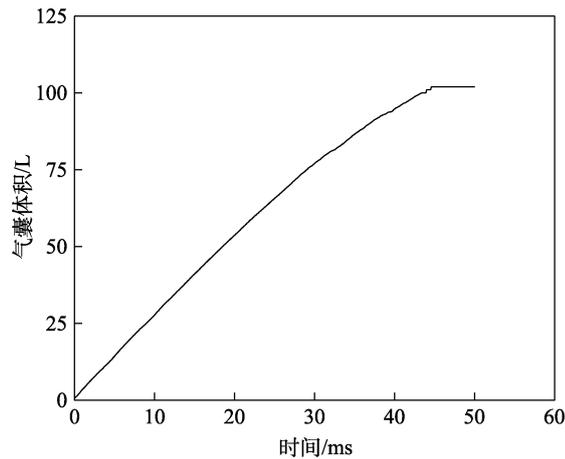


图 10 气囊体积随时间变化曲线
Fig.10 Airbag volume change curve with time

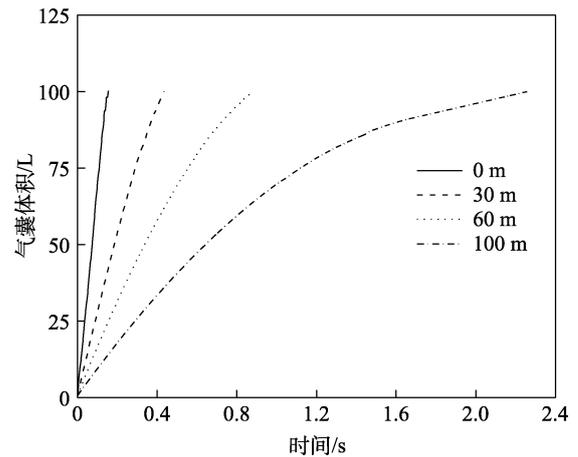


图 12 不同水深气囊体积随时间变化情况
Fig.12 Change of airbag volume with time in different water depth

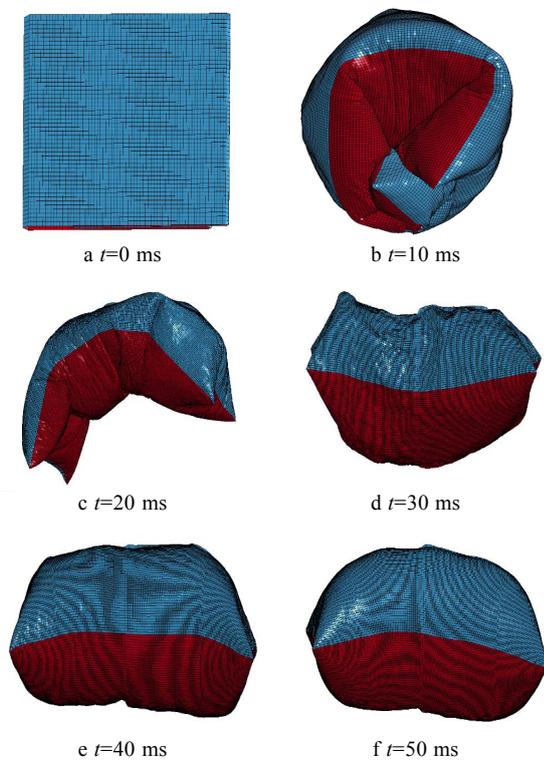


图 11 气囊充气展开变化图
Fig.11 Airbag inflation expansion change

根据流入气囊的质量流计算模型获得的质量流速曲线, 结合有限元模型, 在不同水下深度进行仿真计算得到各个工况下气囊体积随时间变化情况, 如图 12 所示。在其他条件不变的情况下, 随着充气深度的增加, 充气时间也在不断增加, 并且体积变化率越来越小。为获得较为明显的对比结果, 在陆地的充气展开过程也使用了在最深处高压气瓶的初始条件, 这会导致充气时间太短。在现实情况中, 可能会因为控制装置反应不及时, 进而使气囊内部压力超过工作压力, 所以较难实现。在进行实验时, 应该减小气瓶初始压力或者增大气瓶体积, 避免这种情况的出现。

5 结论

1) 理论模型计算结果表明, 在相同环境条件下, 较小通径的管道会使流入气囊的质量流速减小, 气囊达到工作压力时间与通径呈现出指数型函数关系。以第 4 节水下 30 m 条件为例, 系数为 5.860 9。通过该函数关系, 可以估算在该条件下使用其他通径的充气时间, 为之后相关的充气途径选取提供参考。

2) 折叠气囊有限元模型的动态仿真结果表明, 气囊充气过程大致可以分为 3 个阶段。在充气初期, 气囊内压力变化较为剧烈, 气囊的多次单侧内向折叠导致气囊第一次压力峰值接近于气囊的工作压力, 同时气囊快速展开; 在充气中期, 完全展开后会有一段较为平缓的充气过程, 内部压力接近于环境压力; 在充气后期, 气囊体积变化较小, 内部压力会快速上升直至达到工作压力。

参考文献:

- [1] 陈昕, 阮永娇, 曹景胜, 等. 基于 Python 的汽车安全气囊跌落实验数据分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2021, 41(4): 232-235.
CHEN X, RUAN Y J, CAO J S, et al. Experimental Data Analysis of Automotive Airbag Drop Based on Python[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 41(4): 232-235.
- [2] 廖航, 竺梅芳, 雷江利, 等. 大质量航天器气囊着陆缓冲过程研究[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(1): 28-38.
LIAO H, ZHU M F, LEI J L, et al. Airbag Landing Research of Massive Spacecraft[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(1): 28-38.
- [3] 余龙, 刘经京, 蔡智媛. 船用气囊下水技术研究[J]. 船舶工程, 2021, 43(5): 133-139.
YU L, LIU J J, CAI Z Y. Review on Technical Development of Ship Launching with Airbags[J]. Ship Engineer-

- ing, 2021, 43(5): 133-139.
- [4] 吕汝信. 鱼雷上浮装置研究[J]. 鱼雷技术, 2000, 8(2): 8-11.
LYU R X. Research on Torpedo Floating Device[J]. Torpedl Tochnology, 2000, 8(2): 8-11.
- [5] 王锐, 谢武俊, 洪涛. 模拟大型气囊火药充气试验技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(4): 39-44.
WANG R, XIE W J, HONG T. Research on the Simulation of Large Airbag Gunpowder Inflation Tests[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(4): 39-44.
- [6] 车凯凯, 王美松. 安全气囊展开的三种数值模拟方法的对比[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(3): 250-256.
CHE K K, WANG M S. Comparison on Three Methods for Simulating Safety Airbag Deployment[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2013, 4(3): 250-256.
- [7] 谢昭男, 张凯, 温金鹏, 等. 基于燃气发生器的环形浮囊展开过程模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 20-25.
XIE Z N, ZHANG K, WEN J P, et al. Simulation Study on Unfolding Process of Annular Floating Bag Based on Gas Generator[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2021, 42(5): 20-25.
- [8] 王伟. 烟火式燃气发生器的气囊充气过程研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
WANG W. Study on Airbag Inflation Process of Pyrotechnic Gas Generator[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [9] 齐超, 门凯, 刘拓, 等. 高压气瓶充气过程和静置过程的动态特性分析[J]. 化工装备技术, 2024, 45(1): 29-34.
QI C, MEN K, LIU T, et al. Dynamic Characteristics Analysis of High-Pressure Gas Cylinder Inflation Process and Static Process[J]. Chemical Equipment Technology, 2024, 45(1): 29-34.
- [10] 甄文强, 杨奇, 温金鹏, 等. 环形气囊地面及水下充气试验及仿真分析[J]. 工程设计学报, 2020, 27(2): 263-268.
ZHEN W Q, YANG Q, WEN J P, et al. Test and Simulation Analysis of Inflation Process of Annular Collar on the Ground and Underwater[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(2): 263-268.
- [11] 程文鑫, 蔡卫军, 杨春武, 等. 鱼雷浮囊充气过程建模与仿真[J]. 鱼雷技术, 2014, 22(2): 87-90.
CHENG W X, CAI W J, YANG C W, et al. Modeling and Simulation of Inflation Process for Torpedo Inflatable Collar[J]. Torpedo Technology, 2014, 22(2): 87-90.
- [12] 孙元, 王广平, 李春雨, 等. 航行器水下充气正浮力建立时间研究[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(4): 514-518.
SUN Y, WANG G P, LI C Y, et al. Research on the Establishment Time of Underwater Inflatable Positive Buoyancy for Vehicle[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2022, 30(4): 514-518.
- [13] 叶慧娟, 王昕晔, 张宁. 环形气囊水下充气展开过程仿真与分析[J]. 鱼雷技术, 2015, 23(3): 166-171.
YE H J, WANG X Y, ZHANG N. Simulation on Underwater Inflation Process of Annular Bladder[J]. Torpedo Technology, 2015, 23(3): 166-171.
- [14] 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, 2008.
DAI X F. Numerical Simulation of Airbag Deployment Based on Fluid-Solid Coupling Method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [15] 薛登辉. 基于折纸理论的汽车安全气囊折叠方法研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
XUE D H. Research on Folding Method of Automobile Airbag Based on Origami Theory[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023.
- [16] 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 Q W, WANG X T, HE Y Q, et al. Simulation of the Deployment Process of Different Folded Cylindrical Airbags[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 161-170.
- [17] 姜强. 驾驶员侧侧面碰撞帘式气囊仿真研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2021.
JIANG Q. Simulation Study of Curtain Airbag in Driver's Side Collision[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2021.
- [18] 李建阳, 王红岩, 芮强, 等. 空投缓冲气囊有限元模型修正方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 752-757.
LI J Y, WANG H Y, RUI Q, et al. Finite Element Model Updating Method of Airdrop Airbag[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(4): 752-757.
- [19] 孙潘, 李斌, 温金鹏, 等. 水下无人飞行器折叠气囊充气展开特性模拟[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2540-2549.
SUN P, LI B, WEN J P, et al. Simulation of Inflatable Deployment Characteristics of Folding Airbags for Underwater Unmanned Vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(12): 2540-2549.
- [20] 裴洋, 乌秀春, 赵洪波. 帘式气囊的计算机仿真建模研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2008, 28(4): 253-256.
PEI Y, WU X C, ZHAO H B. Study of Building of Simulating Model on Curtain Airbag[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 28(4): 253-256.
- [21] 吴凡, 宋向华, 王敏毅. 某型舰载发射装置后坐缓冲仿真分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(1): 76-81.
WU F, SONG X H, WANG M Y. Simulation Analysis of Recoil Buffer for a Ship-Borne Launcher[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2021, 4(1): 76-81.
- [22] 诸文旋, 祝国成. 安全气囊织物发展现状[J]. 现代纺织技术, 2021, 29(3): 40-44.
ZHU W N, ZHU G C. Development Status of Airbag Fabric[J]. Advanced Textile Technology, 2021, 29(3):

- 40-44.
- [23] 卢焯华, 何正志, 罗运强, 等. 直升机安全气囊约束系统仿真及试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 14014-14020.
- LU C H, HE Z Z, LUO Y Q, et al. Experimental Research of Helicopter Airbag Restraint System[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(32): 14014-14020.
- [24] 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 P, XUE Q W, ZHANG Y, et al. Simulation of the Expansion Process of Folded Spherical Airbag[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 562-568.
- [25] 余建新, 卫剑征, 谭惠丰. 大型反射面的充气展开动力学研究[J]. 宇航学报, 2020, 41(8): 1008-1014.
- YU J X, WEI J Z, TAN H F. Inflation Deployment Dynamics Analysis on Large Reflector[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(8): 1008-1014.