

流场耦合作用下柱状薄膜充气过程的流场

王从磊, 孙建红, 许常悦, 侯 斌

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 采用 Euler-Lagrangian 方法, 重点研究了柱状薄膜充气过程的流场特性. 研究表明: 在入口气流速度为 50~90 m/s, 入口气流压力为 1.0~1.4 MPa 条件下, 柱状薄膜在充气初始阶段, 两端会出现上下摆动的鼓包现象. 通过分析柱状薄膜内部流场中的气流组织、涡量输运以及旋涡与激波相互作用, 发现气流在充气口附近形成弧形激波, 使流动发生偏转. 偏转气流在充气口两侧形成旋涡, 和激波相互作用形成局部超声速区. 另一方面, 对柱状薄膜应力分布的研究发现, 充入气流造成柱状薄膜顶部与两端的局部应力集中, 是影响稳定性与安全性的的重要因素. 不同入口气流压力与速度条件下柱状薄膜应力分布与摆动情况表明, 入口气流压力的变化对安全性的影响相对重要, 而入口气流速度对稳定性的影响更加显著.

关 键 词: 柱状薄膜; 流场耦合; 可压缩流动; 充气; 旋涡; 激波

中图分类号: V244

文献标志码: A

Flow field of cylindrical membrane inflation under the fluid-structure interaction

WANG Cong-lei, SUN Jian-hong, XU Chang-yue, HOU Bin

(College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Numerical research on the flow field characteristics of the cylindrical membrane inflation was performed by the Euler-Lagrangian method. The results show that bumps are formed at two ends of the cylindrical membrane, swinging vertically during the inflation within inlet velocity range (50—90 m/s) and inlet pressure range (1.0—1.4 MPa). With the analysis on the flow structure, vorticity transportation and the mechanism of vortex/shock interaction in the flow field inside the cylindrical membrane, it is found that there is a curved shock adjacent to the inlet tube, making flow deflection. Vortexes formed by the deflected flow interact with shock, resulting in local supersonic zones. Based on the discussion about cylindrical membrane stress distribution, the local stress concentrations at the top and two ends of the cylindrical membrane are considered as important factors influencing the safety and stability. Comparing the results of different inlet pressures and velocities, it is found that the influence on safety caused by the inlet velocity is less than the inlet pressure, and the influence on stability caused by the inlet velocity is greater than the inlet pressure.

Key words: cylindrical membrane; fluid-structure interaction; compressible flow; inflation; vortex; shock

收稿日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(11202100); 江苏省自然科学基金(BK2011723); 航空科学基金(20142952026);

江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 王从磊(1978—), 男, 江苏南京人, 博士生, 主要从事可压缩流动的直接数值模拟与大变形结构的流场耦合作用研究.

飞机水上助浮气囊、飞艇、气球、充气天线、航天器缓冲气囊、可充气建筑等均属于薄膜结构,由于其具有结构简单、便携性好和造价低廉等优点,被广泛应用于航空、航天以及环境保护等领域。而薄膜结构的充气过程是一个非线性大变形的流构耦合过程,通常无法通过解析方法来描述。目前常用的研究方法有实验方法和数值方法。但实验方法获取薄膜与流场耦合作用的具体数据与细节还相当困难。因此,采用数值方法了解薄膜充气过程中的流构耦合作用一直是学术研究和工程应用上的有效手段。

对于柱状薄膜这一典型薄膜结构的研究,有助于了解薄膜结构的工作机理。在 Anwar^[1]研究了柱状薄膜在空气与水作用下的静态充满形态后, Hsieh 等^[2]采用理论和实验手段研究了柱状薄膜在充满状态下的振动情况。Habler 和 Schweizerhof^[3]采用有限元方法对气液载荷下多室系统在不同载荷条件下的大变形情况进行了静态分析。Ghavanloo 等^[4]发展了一种针对流体与柱状薄膜之间在不同载荷分布和边界条件下的静态相互作用,进行非线性分析的解析方法,该方法利用薄膜单元的几何与平衡关系来求解薄膜形态的显式闭合解。

由于柱状薄膜是一种典型的气动成型的结构,其结构表面在内外流体压力作用下变形而产生的应力变化,对于结构工作的安全性有重要的影响。由于充气过程是一个快速大变形的过程,结构在流体作用下发生的运动,同样对系统工作的稳定性也会有一定的影响。

对柱状薄膜的研究主要集中在其平衡状态的确定以及不同外部条件下的振动和变形情况,主要采用实验、理论求解以及有限元方法。而对于考虑流构耦合作用的柱状薄膜充气过程,现有的相关研究较少,并且关注重点主要集中在结构部分,因此,有必要对柱状薄膜充气过程中,流构耦合作用的相关机理以及流场结构进行数值研究,并对充气过程中气源参数对安全性与稳定性影响进行深入的分析。

目前,对于柱状薄膜充气过程这类大变形流构耦合问题,常用的数值研究方法有3种:一种是控制体积方法,该方法简便且计算需求较少,但无法准确计算结构变形和流场变化过程。另一种是基于有限元技术的 ALE(arbitrary Lagrangian-Euler)方法,它可以准确描述薄膜内外气体与薄膜材料的相互作用,但方法较复杂且计算需求大,

计算精度提高困难^[5-6]。第3种是 Morano 提出的 E-L(Euler-Lagrangian)^[7]方法,它有别于以上两种方法,在整体计算区域中可压缩流场采用 Euler 方法求解,而对大变形结构则采用 Lagrangian 方法计算。它能够将现有流场和结构计算程序进行连接。相对控制体积方法及 ALE 方法, E-L 方法的程序编制简单、计算量小,避免了 ALE 方法中由任意速度的网格带来的处理困难,并且流场求解易于达到较高的精度。

因此,本文采用 E-L 方法,自主开发流构耦合数值模拟计算程序,模拟柱状薄膜充气过程的流构耦合现象,主要分析柱状薄膜内部流场对充气过程影响的机理,并讨论不同入口气流压力及速度对于柱状薄膜工作的安全性与稳定性的影响。

1 数值计算方法

由于柱状薄膜充气过程是一个气流高速喷射的过程,因此假设流体为可压缩无黏理想气体,连续性方程、动量方程以及能量方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial u_i E}{\partial x_i} = -\frac{\partial p u_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

其中 ρ, u, p, E, x_i, t 分别为流体的密度、速度、压力、总能、 i 方向坐标及时间。

将柱状薄膜简化为二维空间内的厚度可忽略的一维弹性结构,根据计算动力学原理,其结构动力学控制方程为

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{C}\mathbf{u}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (4)$$

其中 $\mathbf{a}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{x}(t)$ 分别为加速度、速度和位置向量; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{Q}(t)$ 为载荷向量。

针对流场与结构控制方程的特点,采用不同的求解方案。对于可压缩流动问题,为了更好地捕捉界面变化及流场细节,采用基于有限差分特征分解方法的 5 阶 WENO(weighted essentially non-oscillatory)算法^[8]直接求解流动控制方程。而针对柱状薄膜展开过程的非线性大变形问题,采用 Newmark 方法^[9]求解结构动力学方程。为了将流场与结构进行耦合求解,本文采用基于 level set 函数^[10]的 ghost fluid 方法^[11]进行流构耦合界面信息的交换和传递,自主开发流构耦合

数值模拟计算程序.同时,为提高计算速度,采用多机计算集群进行分块并行运算.

2 算例及实验验证

为了验证当前采用的数值计算方法的可靠性,由于在高压气体充气过程中,内部流场会出现激波等流动结构,因此,首先对两个典型的有激波存在的可压缩流动界面耦合问题进行计算:

1) 由马赫数为 1.22 的左行激波掠过氦气泡的算例结果对比(图 1)可以看出,本文计算结果与文献[12]的结果相符较好,数值计算的结果能够捕捉到可压缩流动条件下多相界面的变化情况.

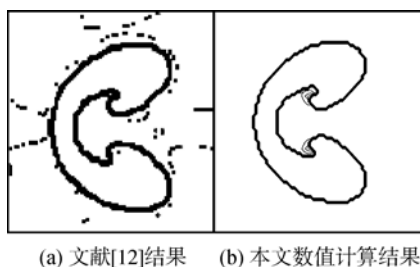


图 1 激波掠过氦气泡数值计算结果对比
Fig. 1 Comparison of numerical calculated results for shock past helium bubble

2) 从马赫数为 3 的右行激波与柱状薄膜相互作用的算例对比(图 2)显示,当前采用的数值方法能够很好地追踪可压缩流动作用下的结构大变形情况.

最后,在与定压条件下柱状薄膜充满状态的

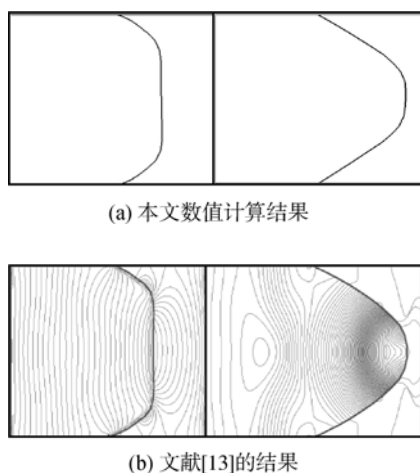


图 2 激波掠过柱状薄膜数值计算结果对比
Fig. 2 Comparison of numerical calculated results for shock past cylindrical membrane

实验结果的对比中(表 1)可以看出,数值模拟计算程序对柱状薄膜充气外形的界面追踪具有较好的准确度.同数值与实验结果的比较均表明,数值模拟计算程序适用于此类可压缩流动中的流构耦合界面追踪问题.

表 1 柱状薄膜充满状态的数值计算结果与实验结果的对比

Table 1 Comparison of the numerical calculated and experimental results under the condition of cylindrical membrane inflation

内部压头/cm	柱状薄膜最大高度/cm	
	本文计算结果	实验结果
46.7	24.9	25.1
66.1	26.1	25.9
88.4	26.8	26.7

3 计算结果分析与讨论

由于柱状薄膜材料具有不抗压和不抗弯的特点,其在可压缩气流作用下的充气过程,是一个非线性大变形的流构耦合作用问题,有必要对其充气过程中内部流场进行分析.本文借鉴 Cirak 等^[14]的研究,选取柱状薄膜的材料参数:密度为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $6.0 \times 10^9 \text{ Pa}$,泊松比为 1.4,厚度为 $7.3 \times 10^{-4} \text{ m}$.在前期工作^[15]中,对其在表 2 所示的气流作用下的充气过程,进行了数值计算.文中未标注单位的物理量均已量纲归一化.

表 2 气体状态参数

Table 2 Gas physical parameters

参数	数值
初始气流密度 $\rho_{\text{air}}/(\text{kg/m}^3)$	1.3
初始气流压力 $p_{\text{air}}/\text{MPa}$	0.1
比热比 γ	1.4
入口气流密度 $\rho_{\text{inlet}}/(\text{kg/m}^3)$	16.0
入口气流压力 $p_{\text{inlet}}/\text{MPa}$	1.2
入口气流速度 $u_{\text{inlet}}/(\text{m/s})$	70.0

充气过程中柱状薄膜在气流压力作用下充气展开,柱状薄膜形态与流场压力分布在不同时刻 t 的变化如图 3 所示.充气过程开始时,在充入气体压力作用下,柱状薄膜顶部迅速拱起.其两端随后逐渐展开,同时,由于充气管口横向附近柱状薄

膜结构未及时展开,在两端形成明显的鼓包(图3(c)).随着充气过程的继续进行,柱状薄膜两端的鼓包出现下垂现象(图3(d)),类似的鼓包与下垂现象也出现在气囊的展开过程中^[16-17].最终,下垂部分开始向上回升,膜内气体压力波经多次反射,形成复杂波系,直至柱状薄膜完全展开,如图3(e)所示.

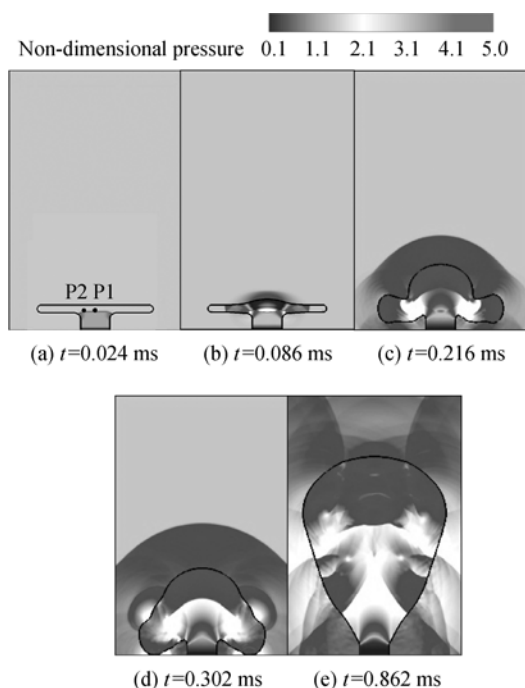


图3 柱状薄膜形态与流场压力分布演化图

Fig. 3 Shapes of cylindrical membrane and evolution map of pressure distribution of flow field

为了解柱状薄膜充气过程中横向两端的运动情况,在图4给出了柱状薄膜左侧端点垂直方向位移随时间的变化曲线.柱状薄膜两端的下垂在时刻 $t=0.413$ ms 结束,此阶段的流耦合作用

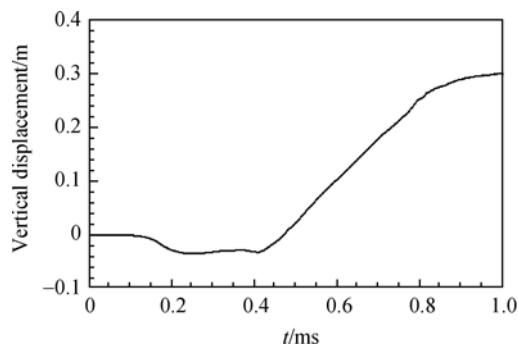


图4 柱状薄膜左侧端点垂直方向位移变化

Fig. 4 Vertical displacement variation of left side point on cylindrical membrane

处在充气过程的初始状态,内部气体压力与柱状薄膜自身应力未达到平衡状态.

3.1 充气过程中的流动特性分析

为了更直观地反应柱状薄膜内气体压力的变化情况,在充气口中线上设置了一个探测点 P1,在充气口靠近管壁一侧设置了探测点 P2(见图3(a)),其瞬时压力随时间的变化曲线如图5所示.在充气过程进行到 $t=0.024$ ms 时,P1 与 P2 点处的压力相继出现阶跃.由图3(a)可以看出,此时有高压气流经过.在 $t=0.086$ ms,P1 点的压力再度出现快速升高,P2 点的气体压力在第1次跃升后,快速回落,并基本保持稳定.对应图3(b)可以发现,此时有两道压力波在 P1 点处交汇,P2 点位于交汇区外.而相交的压力波经过探测点后,由于柱状薄膜在气体作用下逐步展开,膜内气体压力波的反射与交汇逐渐远离充气口,导致 P1 点的压力逐渐下降至接近第1次压力跃升值,直至 0.235 ms 后,压力开始缓慢回升,并基本保持稳定.类似的压力变化也存在于高压高速气流通过狭缝后的流场中^[18].

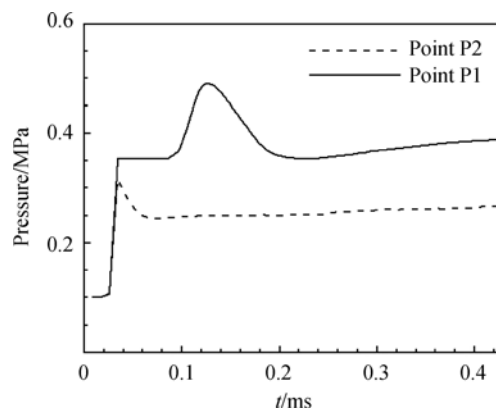
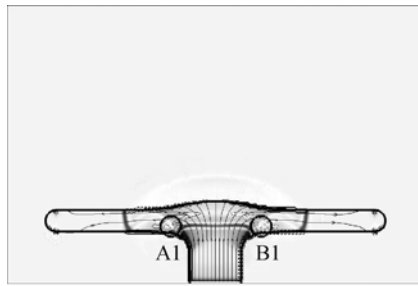


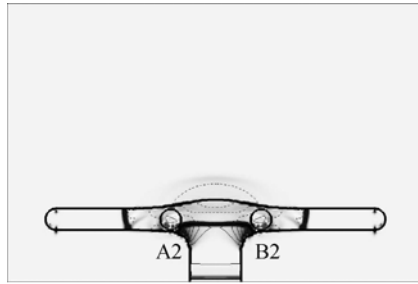
图5 探测点 P1 与 P2 处压力变化曲线

Fig. 5 Pressure variation curves of probe points P1 and P2

从图5可以看出,柱状薄膜内压力分布在充气过程中经历了剧烈的变化,而可压缩流动中压力场的变化往往是由于激波的存在,为了更准确地认识流场内的激波结构,利用密度的2阶导数 $\nabla^2 \rho$ 和速度的散度 ϑ 来联合判定激波的位置: $S = \{S_1 | \nabla^2 \rho = 0, -\vartheta = -\vartheta_0\}$.图6中分别给出了流场的速度散度、涡量流线及当地马赫数等值线图.从图中可以看出,在充气口上方形成了一道弧形的激波,气流在 A1 与 B1 处通过激波向柱状薄膜两端偏转,并在两端附近形成激波.另外,气流在



(a) 速度散度、涡量与流线



(b) 瞬时涡量场与当地马赫数分布

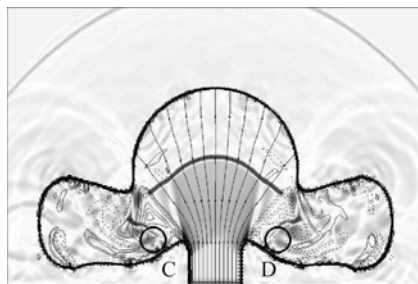
图 6 $t=0.086$ ms 时流场变量分布图

Fig. 6 Variables distribution of flow field at

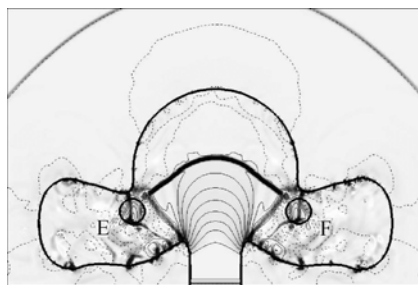
 $t=0.086$ ms

发生偏转后,受压力梯度作用加速,在区域 A2 和 B2 处形成局部超声速区。

图 7 中给出了 $t=0.25$ ms 时刻的瞬时流动形态。图 7(a) 表示速度散度,带箭头的实线表示



(a) 速度散度、涡量与流线



(b) 瞬时涡量场与当地马赫数分布

图 7 $t=0.25$ ms 时流场变量分布图

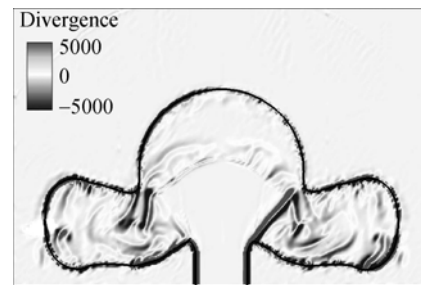
Fig. 7 Variables distribution of flow field at

 $t=0.25$ ms

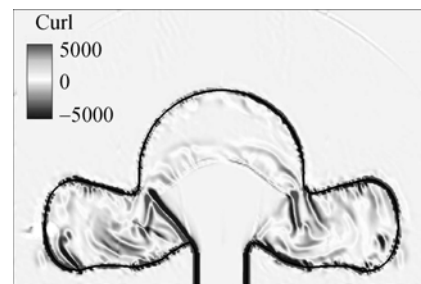
流线,虚线表示顺时针旋转的涡量,实线表示逆时针旋转的涡量。图 7(b)中的云图表示采用 Q 准则表述的瞬时涡量场,虚线表示当地马赫数小于 1,实线对应当地马赫数大于 1。区域 C 和 D 处形成了射流中^[19]常见的两个逆向旋转的旋涡,并在 E 和 F 区域出现了局部超声速区,经过仔细观察发现,该局部超声速区由旋涡与激波相互作用形成,相同的局部超声速区形成机理也出现在圆柱跨声速绕流^[20]中。此外,旋涡与激波的相互作用使得柱状薄膜两端的气流向内偏转,进而出现鼓包和鼓包下垂现象。

上面的分析表明,旋涡的发展和演化是影响柱状薄膜充气过程的重要因素。可以用 Lamb 矢量 $L(L=\omega \times u, \omega$ 为涡向量, u 为速度向量)的散度和旋度来研究流场的动力学特性。当 Lamb 矢量散度发生正负改变时,流场中的动量运输机制将会发生改变。正的 Lamb 矢量表示动量运输以变形拉伸运动为主,负的 Lamb 矢量散度则表示以涡旋运动为主。从图 8(a)中可以看出在充气管中线附近流动以拉伸运动为主,充气管两侧激波位置处,出现涡旋与拉伸运动交替出现的现象。同时,动量交换主要出现在柱状薄膜附近与鼓包内。

另外,Lamb 矢量的旋度与涡量的输运有关。从图 8(b)中可以发现,柱状薄膜内部流场的涡量输运同动量输运类似,主要发生在两侧鼓包和柱



(a) 散度



(b) 旋度

图 8 流场的 Lamb 矢量散度与旋度分布图

Fig. 8 Lamb vector divergence and curl distribution of flow field

状薄膜材料附近. 这显示出, 柱状薄膜面附近与鼓包内为流场演化最为剧烈的区域, 也是影响柱状薄膜性能最主要的区域.

上述流动分析表明, 充气过程中, 气体在充气口附近形成的弧形激波, 使气流偏转, 在充气口两侧形成两个逆向旋转的旋涡, 是柱状薄膜充气过程中产生鼓包与上下摆动现象的主要原因, 此类现象的出现将影响柱状薄膜的性能.

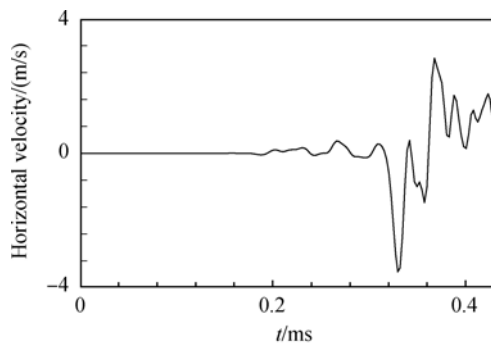
3.2 充气过程中柱状薄膜材料动力学特性

柱状薄膜由于其由柔性材料构成的特点, 导致其在充气过程中受内部复杂流场作用会发生剧烈运动与变形, 而影响其工作性能, 通过分析柱状薄膜的动力学参数的变化情况, 能够获得充气过程中, 柱状薄膜性能在流场耦合作用下的演化特性.

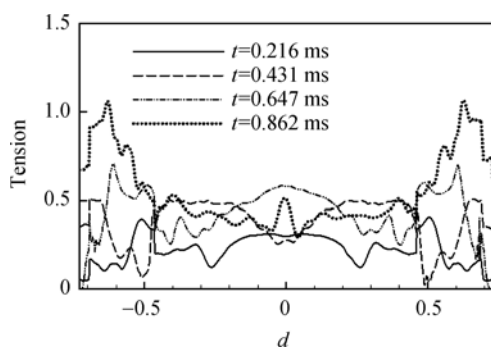
如同直升机应急气囊展开过程^[21], 由体积与能量变化曲线(图9(a)), 可将充气过程大致分为3个阶段: ①当 $t < 0.08 \text{ ms}$ 为等容增压阶段, 此阶段高压气体开始充入柱状薄膜内部, 尚未造成柱状薄膜变形; ②当 $0.08 \text{ ms} < t < 0.36 \text{ ms}$ 为快速膨胀阶段, 此阶段柱状薄膜受气体作用快速膨胀展开, 而产生的应变较小; ③ $t > 0.36 \text{ ms}$ 为深度膨胀阶段, 此阶段由于柱状薄膜应变增大, 导致其体积增速明显下降.

前期研究中^[15], 由柱状薄膜顶部探测点水平速度变化曲线(图9(b))发现, 柱状薄膜两端的下摆引起顶端的水平摆动, 最大速度为 3.5 m/s , 影响稳定性. 同时, 从柱形薄膜动能与应变能变化曲线中可以发现, 两端鼓包形成及下摆的过程中, 动能(图9(a))变化较小, 而应变能快速增大, 系统出现较大拉伸变形.

充气过程中, 柱状薄膜展开的不均匀及两端下摆导致柱状薄膜出现局部的应力集中现象^[15], 如图9(c)所示, 图中横坐标 d 为柱形薄膜表面位



(b) 顶部探测点水平速度变化曲线



(c) 柱状薄膜张力分布

图9 柱状薄膜充气过程的动力学参数变化

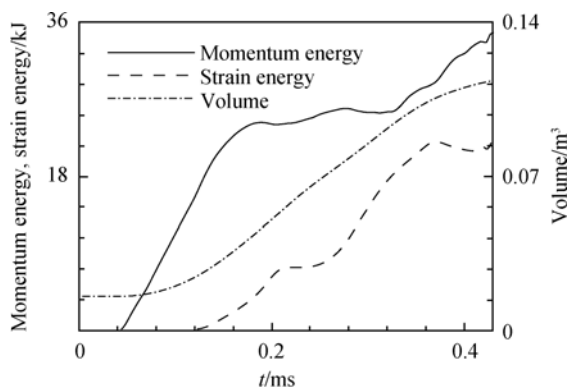
Fig. 9 Variation of dynamic parameters of cylindrical membrane inflation

置点. 在无变形状态下距柱形薄膜顶部的量纲一距离). 应力集中主要出现在柱状薄膜顶部和两端鼓包处, 且应力集中的现象, 随着两端向下摆动而加剧, 应力最大值达到 76 MPa , 超过材料抗拉强度的 70% , 将影响到柱状薄膜的安全性. 由此可以看出, 充气过程中出现的摆动及鼓包现象, 是影响柱状薄膜安全性与稳定性的重要因素.

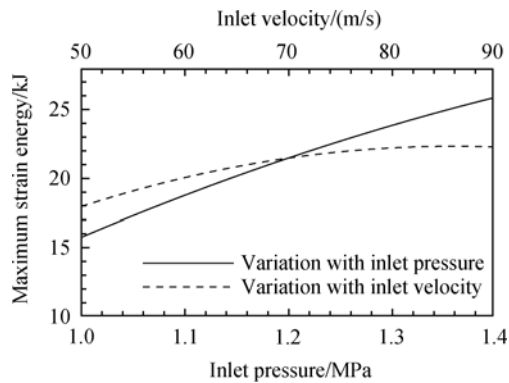
3.3 入口气流参数对安全性与稳定性的影响

充气结构的充气过程, 与其入口气流参数密切相关, 如入口气流压力和入口气流速度. 根据计算结果, 得到了固定入口气流速度 (70 m/s)、不同入口气流压力 ($1.0 \sim 1.4 \text{ MPa}$), 及固定入口气流压力 (1.2 MPa)、不同入口气流速度 ($50 \sim 90 \text{ m/s}$) 条件下, 柱状薄膜动力学参数随入口气流压力与入口气流速度的变化情况, 并分析了充气过程安全性与稳定性, 随充气参数的变化情况 (如图10所示).

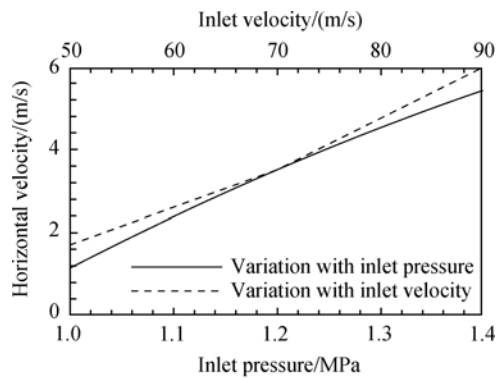
从图10中可以看出: 随着入口气流压力从 1.0 MPa 增加到 1.4 MPa , 系统最大应变能随之增大到 25.7 kJ , 而其随入口气流速度的增大发生的变化较小, 并逐渐趋缓. 在入口气流速度大于 79 m/s 后, 系统最大应变能基本稳定在 22 kJ , 说



(a) 体积、动能及应变能变化曲线



(a) 应变能



(b) 水平速度

图 10 柱状薄膜动力学参数随进口气流压力和速度的变化
Fig. 10 Dynamic parameters of cylindrical membrane varying with inlet pressure and inlet velocity

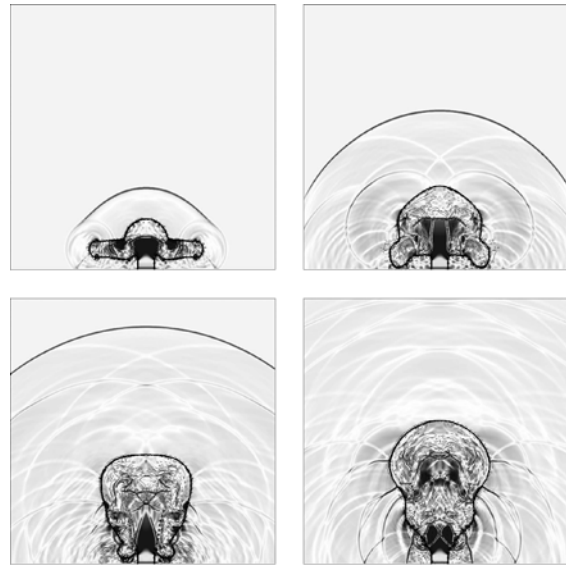
明柱状薄膜拉伸变形情况(破裂可能性)受入口气流压力影响较大. 柱状薄膜顶部水平最大速度随入口气流压力及入口气流速度的增加而增大, 水平摆动加剧, 摆动速度增大约 4 倍, 稳定性变差.

由此以上分析可见, 充气过程中, 由入口气流压力增加引起的安全性变差, 大于入口气流速度增大的影响, 而引起的稳定性变差, 则小于入口气流速度增大的影响.

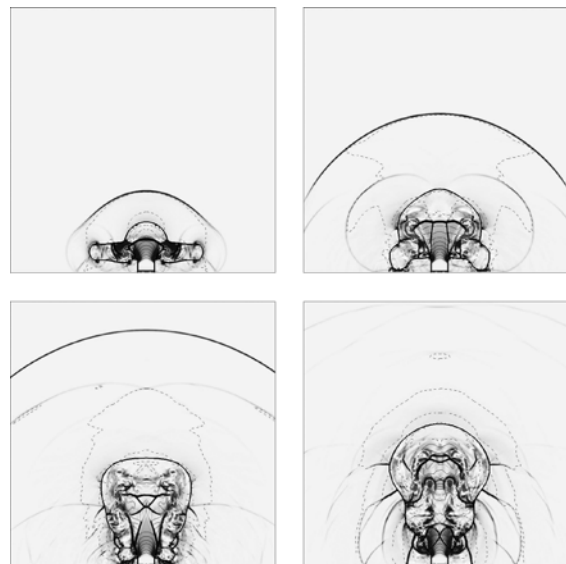
3.4 入口气流总压给定条件下的充气过程

由于实际工程应用中, 充气结构的入口气流参数随着充气过程的进行而不断变化, 为了对实际使用条件下, 柱状薄膜的充气过程进行研究, 根据表 2 中的入口气流参数条件, 给定入口气流总压, 对其充气过程进行了数值计算. 根据计算结果, 得到了给定入口气流总压条件下, 流场结构(如图 11 所示)以及柱状薄膜动力学参数(如图 12 所示)的变化情况. 并分析了其与固定入口气流压力、密度及速度条件下的流场结构及柱状薄膜动力学特性的区别.

从图 11 中可以看出: 在给定入口气流总压条

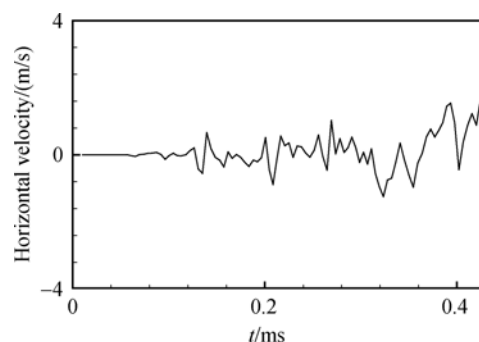


(a) 速度的散度和旋度

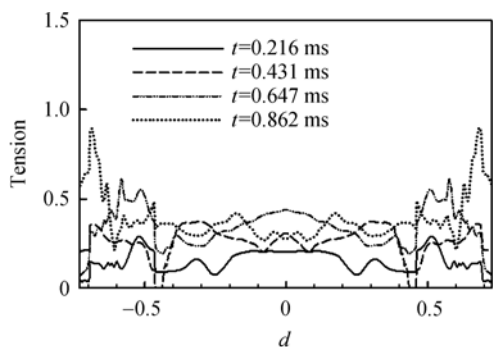


(b) 瞬时涡量场与当地马赫数分布

图 11 柱状薄膜内部流场结构变化
Fig. 11 Flow field variation inside the cylindrical membrane



(a) 顶部探测点水平速度时程变化



(b) 柱状薄膜张力分布

图12 柱状薄膜的速度与张力变化

Fig. 12 Variation of velocity and tension of cylindrical membrane

件下,入口气流的压力及速度随着充气过程的变化而变化。在充气过程中鼓包的出现以及鼓包的摆动等现象均与给定入口气流参数条件下的充气过程相似。充气口上方同样形成了弧形激波和局部超声速区。

上述流动分析表明,给定入口气流总压条件下,由于入口气流速度存在先增大再减小的过程,导致柱状薄膜的展开速度较给定入口气流参数条件下慢,而同时,其内部激波及涡运动等流动结构的发展运动速度也相应较慢。而气体在充气口附近形成的弧形激波,导致气流偏转,在充气口两侧形成逆向旋转的旋涡,导致柱状薄膜充气过程中产生鼓包与上下摆动现象,均与3.1节中的研究结果相类似。

由柱状薄膜顶部探测点水平速度变化曲线(图12(a))发现,柱状薄膜顶端的水平摆动最大速度约为1.5 m/s,相比给定入口气流参数条件下小。应力集中同样主要出现在柱状薄膜顶部和两端鼓包处(图12(b)),且整体张力小于入口气流压力为1.2 MPa,入口气流速度为70 m/s条件下的张力。随着充气过程的进行,柱状薄膜顶部的应力集中现象有所缓解,而两端的应力集中情况明显大于顶部,且其应力最大值为入口气流压力为1.2 MPa,入口气流速度为70 m/s条件下的应力最大值的80%。由此可以看出,实际充气过程中,摆动及鼓包现象出现,同样是影响柱状薄膜安全性与稳定性的重要因素。

4 结论

1) 采用基于5阶WENO算法的E-L方法,对柱状薄膜的充气过程进行数值研究发现,充气过程中,存在与气囊展开相似的鼓包与摆动现象。

其产生的机理是由于气体在充气口附近形成的弧形激波,导致气流发生偏转,在充气口两侧形成两个逆向旋转的旋涡。

2) 旋涡与激波的相互作用造成展开不稳定,在柱形薄膜顶部与两端出现应力集中,影响充气过程的稳定性与安全性。入口气流压力及入口气流速度增大,使安全性与稳定性变差。入口气流速度的增大对安全性的影响小于入口气流压力的增加,但对稳定性有更大的影响。

3) 给定入口气流总压条件下,充气口下部流动结构与给定入口气流原始变量条件下略有区别,后期流动发展以及柱状薄膜变形过程相似,充气过程的稳定性与安全性均有改善。

参考文献:

- [1] Anwar H O. Inflatable dams[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1967, 93: 99-119.
- [2] Hsieh J C, Plaut R H, Yucel O. Vibrations of an inextensible cylindrical membrane inflated with liquid[J]. Journal of Fluids and Structures, 1989, 3(2): 151-163.
- [3] Habler M, Schweizerhof K. On the static interaction of fluid and gas loaded multi-chamber systems in large deformation finite element analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, 197(19): 1725-1749.
- [4] Ghavanloo E, Daneshmand F. Analytical analysis of the static interaction of fluid and cylindrical membrane structures[J]. European Journal of Mechanics: A Solids, 2010, 29(4): 600-610.
- [5] 王晓冬, 张金换, 黄世霖. 气囊模拟计算技术综述[J]. 汽车技术, 2000(9): 4-7.
WANG Xiaodong, ZHANG Jinhuan, HUANG Shilin. Summary of simulation calculation techniques for airbag[J]. Automobile Technology, 2000(9): 4-7. (in Chinese)
- [6] 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 simulation folded airbag deployment[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(8): 676-680. (in Chinese)
- [7] Morano E, Arienti M, Hung P, et al. A level set approach to Eulerian-Lagrangian coupling[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 185(1): 213-251.
- [8] Grob A, Fasel H F. High-order WENO schemes based on the Roe approximate Riemann solver[R]. AIAA-2002-2735, 2002.
- [9] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The finite element method: Volume 2 solid mechanics [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [10] Osher S, Fedkiw R P. Level set methods: an overview and

- some recent results[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 169(2): 463-502.
- [11] Fedkiw R P, Aslam T, Merriman B, et al. A non-oscillatory Eulerian approach to interfaces in multimaterial flows: the ghost fluid method[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 152(2): 457-472.
- [12] 刘儒勋, 王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [13] Grétarsson J T, Fedkiw R. Fully conservative leak-proof treatment of thin solid structures immersed in compressible fluids [J]. Journal of Computational Physics, 2013, 245: 160-204.
- [14] Cirak F, Radovitzky R. A Lagrangian-Eulerian shell-fluid coupling algorithm based on level sets[J]. Computers and Structures, 2005, 83(6): 491-498.
- [15] WANG Conglei, SUN Jianhong, XU Changyue. Numerical investigation of bumps and oscillation in the cylindrical membrane inflation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 444/445: 1335-1339.
- [16] Hoffmann J, Freisinger M, Schmehl R. CFD analysis of the flow from an airbag inflator module [R]. Bordeaux, France: International Pyrotechnic Automotive Safety Symposium, 2007.
- [17] Van der Veen W A, Sadeghi R S. Simulation of a compartment airbag deployment using an explicit, coupled Euler/Lagrange method with adaptive Euler domains[R]. Florida, US: 16th Annual Symposium Science and Engineering, 2003.
- [18] 郝莉, 马天宝, 王成. 爆炸冲击波绕流的三维数值模拟研究[J]. 力学学报, 2010, 42(6): 1042-1049.
- HAO Li, MA Tianbao, WANG Cheng. Three dimensional numerical simulation study on the flow of the explosion shock wave around the wall[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(6): 1042-1049. (in Chinese)
- [19] 许常悦. 圆柱可压缩绕流机器流动控制的大涡模拟研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2009.
- XU Changyue. Large eddy simulation of the compressible flow past a circular cylinder and its flow control [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [20] Sun J H, Zhao L Q, Hsu C T. Experimental and numerical study on the flapping motion of submerged turbulent plane jet[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(10): 2391-2397.
- [21] 孙建红, 周涛, 李名琦, 等. 直升机应急气囊充气及冲击着水过程数值分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(5): 713-717.
- SUN Jianhong, ZHOU Tao, LI Mingqi, et al. Numerical analysis of emergent airbag deployment and ditching crashworthiness process[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(5): 713-717. (in Chinese)

(编辑: 陈越)