

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202506001

系留气球刚柔耦合系统应变集中效应仿真分析

邬军¹, 罗海波^{1,2}, 杨燕初^{1,3}, 马子非^{1,3}, 刘晓勇^{1,3}

(1. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 海南空天信息研究院 海南省地球观测重点实验室, 海南 文昌 571300;

3. 中国科学院大学 星际航行学院, 北京 100040)

摘 要: 针对系留气球与吊舱之间存在刚柔耦合连接而引起的应变集中问题, 采用 ABAQUS 与理论模型相结合的方式对其进行力学分析, 提出一种加强过渡层策略来降低结构连接处的应变集中效应, 从而提高系留气球系统的安全性及实用性。首先, 基于经典力学理论得到了系留气球囊体结构的应力分布理论解, 并结合本构方程提出织物材料正交模量设计准则; 然后, 对刚柔耦合系统力学仿真模型的计算结果进行分析, 提出等效应变集中因子, 研究了附加重载质量、囊体内外压差及材料对应变集中效应的影响机理; 最后, 为缓解应变集中效应, 提出一种局部加厚的囊体过渡层设计策略。仿真结果表明: 对于无吊舱的系留气球, 其环向应力约为轴向应力的 2 倍, 因此采用正交方向模量比为 2 的各向异性织物材料更为合适; 采用 Vectran 纤维复合材料作为囊体材料和碳纤维材料作为吊舱结构件材料时, 其综合承载能力最佳; 在承载 1 t 重载荷情况下, 采用加强过渡层设计策略的系留气球刚柔耦合系统的应变集中因子下降 11.3%, 可有效提高系留气球的承载能力与结构可靠性, 为未来新型浮空器系统的设计提供了理论参考, 从而推动系留气球的安全应用。

关键词: 系留气球; 刚柔耦合模型; 应变集中效应; 有限元仿真; 参数分析

中图分类号: O34

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)06-0001-12



听语音
与作者
聊科研

Simulation Analysis of Strain Concentration Effect in Rigid-Flexible Coupling System of Tethered Balloon

WU Jun¹, LUO Haibo^{1,2}, YANG Yanchu^{1,2},

MA Zifei^{1,3}, LIU Xiaoyong^{1,3}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Hainan Aerospace Information Research Institute, Wenchang 571300, China;

3. School of Space Exploration, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China)

收稿日期: 2025-06-13

修回日期: 2025-08-01

录用日期: 2025-08-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB390180502, 2022YFB3901805); 国家自然科学基金青年基金 C 类 (12402206);

中国博士后科学基金 (2024M753305); 海南省自然科学基金面上项目 (523MS115)

第一作者: 邬军 (1996—), 男, 博士, 主要从事浮空器结构设计研究。E-mail: wujun@aircas.ac.cn

引用格式: 邬军, 罗海波, 杨燕初, 等. 系留气球刚柔耦合系统应变集中效应仿真分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (6): 1-12. WU Jun, LUO Haibo, YANG Yanchu, et al. Simulation analysis of strain concentration effect in rigid-flexible coupling system of tethered balloon[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (6): 1-12.

ABSTRACT: To address the strain concentration caused by a rigid-flexible coupling connection between a tethered balloon and compartment, a mechanical analysis was conducted by combining ABAQUS with theoretical models. A strategy for strengthening the transition layer was proposed to effectively reduce the strain concentration at the structural connection, thereby enhancing the safety and practicality of the tethered balloon system. First, based on the classical mechanical theory, a theoretical solution for stress distribution of the bladder structure of the tethered balloon was obtained, and a design criterion for the orthogonal modulus of fabric materials was proposed in combination with constitutive equations. Subsequently, the calculation results of the mechanical simulation model of the rigid-flexible coupling system were analyzed, and an equivalent strain concentration factor was introduced. The influence mechanisms of additional heavy-load mass, internal-external pressure difference of the bladder, and material on the strain concentration effect were investigated. Finally, to alleviate the strain concentration effect, a locally thick-ened bladder transition layer design strategy was proposed. Simulation results show that for tethered balloons without compartment, the circumferential stress is approximately twice the axial stress, making anisotropic fabric materials with an orthogonal modulus ratio of two more suitable. Using Vectran fiber composites as the bladder base material and carbon fiber as the compartment structural components yields the best overall load-bearing capacity. Under a 1-ton heavy load, the strain concentration factor of the rigid-flexible coupling system of the tethered balloon with the reinforced transition layer design decreases by 11.3%, effectively improving the load-bearing capacity and structural reliability of the tethered balloon. The proposed optimization strategy can provide theoretical guidance for the design of new types of aerostat systems in future, and promote the safe application of tethered balloons.

KEYWORDS: tethered balloon; rigid-flexible coupling model; strain concentration effect; finite element simulation; parameter analysis

系留气球是一类新型浮空器,采用系留缆绳与地面设施相连^[1],依靠球体内氦气产生的浮力悬停在空中,并可以控制其在大气中漂浮的高度^[2]。系留气球具有滞空时间长、部署简单灵活、成本低廉等特点^[3-4],同时使用维护方便,易于搭载各类载荷系统,安全性好、场地需求简单,可用于通信中继、海洋观测、空中遥感、环境监测、气象预警等领域^[5-6]。例如,中国科学院空天信息创新研究院负责研发的“极目一号”系留气球,多次深入青藏高原腹地开展科考工作,不断刷新系留气球驻空高度的世界纪录,在填补国内空白的同时,获取到了大量珍贵的科研成果,被誉为“国之重器”^[7-8]。

系留气球上的载荷系统通常包括光学相机、雷达、传感装置等精密仪器设备,用于收集飞行数据以分析系留气球的驻空状态,同时采集大气环境数据用于科学研究,具有十分重要的作用^[9-10]。这些精密的载荷设备通常安装在系留气球腹部的吊舱处,而吊舱框架则通过绳缆和拉索结

构牢牢绑缚在腹部囊体表面。由于柔性囊体与刚性吊舱间存在刚度不匹配的问题,会导致其连接处出现应变集中,从而引起结构过早发生破坏及失效,威胁系留气球的使用安全^[11]。因此,开展系留气球刚柔耦合系统应变集中效应仿真分析,对系留气球的大规模应用与可靠性研究具有重要意义。

近年来,国内外学者对于刚柔耦合系统中的应变集中效应开展了大量的研究工作,发现其主要发生在材料或者结构的几何不连续处,如界面^[12-13]、孔洞^[14-15]、裂纹^[16-17]等,尤其在刚柔耦合结构的连接处,材料刚度差异会导致该处的应力和应变水平显著高于其他区域^[18]。在柔性电子领域,柔性器件的失效主要发生在刚柔界面处^[19],Ko等^[20]研究了刚性薄膜厚度变化导致的结构失效模式转变;Meitl等^[21]研究了硅薄膜/聚二甲基硅氧烷组成系统的相对滑移现象及失效模式;Chen等^[22]提出硬薄膜/软衬底界面失效的强度理论。在此基础上,Ma等^[23]提出一种应变隔离设计,能够

保护无机电子器件在柔性衬底受到拉伸的情况下不发生失效与破坏。与柔性电子器件类似, 刚柔耦合结构及其对应的应变集中效应广泛存在于以系留气球为代表的浮空器领域^[24]。但是, 在浮空器系统中, 柔性囊体衬底的厚度和弯曲刚度远小于刚性的吊舱结构或阀门结构, 这与柔性电子的硬薄膜/软衬底界面存在差异。目前, 关于系留气球刚柔耦合系统应变集中效应的理论模型和分析研究较少, 对于其中的影响参数和调控机理尚不清楚, 还未形成适用于浮空器刚柔耦合应变集中效应的有效缓解策略。

因此, 本文将系留气球与吊舱组成的刚柔耦合系统作为研究对象, 研究了囊体-吊舱系统的应变集中效应产生机理, 提出应变集中因子, 分析了内外压差、附加荷载、材料对应变集中效应的影响并建立了参数之间的联系, 结合柔性电子器件应变隔离设计策略, 提出了过渡层方法, 有效降低界面处的应变集中程度, 为系留气球平台载荷设计与安装连接提供参考。

1 仿真分析模型

1.1 模型介绍

为简化模型, 本文忽略系留气球尾翼和其他载荷部件的影响, 仅保留与腹部载荷舱连接的主气囊结构, 得到头部、主体和尾部组成的回转体, 其总长约 42.196 m, 最大直径为 10 m。其中, 头部为直径 10 m 的半圆球, 主体为长 30 m 的圆柱体, 尾部的圆锥母线与回转轴的夹角为 30° 。考虑实际加工, 尾部末端椎体母线为圆心角 60° 、半径 2 m 的圆弧, 尾部与主体部分衔接处椎体母线为圆心角 30° 、半径 2 m 的圆弧, 从而保证系留气球主气囊尾部椎体母线处处光滑连续。

基于 ABAQUS 优异的非线性力学仿真能力^[25], 本文采用 ABAQUS 6.14 对系留气球刚柔耦合系统进行建模, 并对其载荷形变进行仿真计算。将系留气球主气囊建模为回转壳体, 采用膜单元 M3D4R 划分网格, 其实体网格模型如图 1 所示。囊体厚度为 0.2 mm, 选取 3 种常用于浮空器的囊体材料进行对比, 包括芳纶纤维 Vectran、超高分子量聚乙烯纤维 UHMWPE、聚对苯撑苯并二噁唑纤维 PBO-AS。

吊舱部分为桁架结构, 其三维实体模型如图 2 所示。载荷设备通过螺栓与绑扎的方式安装在

$2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的长方体框架内部, 并通过 6 根纵向长度约为 0.2 m 的竖杆采用挂耳的方式与共形圆弧曲面框架 (通常称为过渡架) 相连。圆弧曲面框架的曲率半径与系留气球主体曲率半径一致, 弦长为 3.919 18 m, 宽度为 2.4 m。在 ABAQUS 中将吊舱建模为梁模型, 采用梁单位 B31 划分网格。梁截面均为圆管, 沿着重力方向的纵向竖杆为主承力管, 外径为 32 mm, 壁厚为 2 mm; 其余为次承力管, 外径为 32 mm, 壁厚为 1.5 mm。本文中, 吊舱所选材料包括铝合金 Al7075、钛合金 TC4 和碳纤维 T700 (主承力管)/T300 (次承力管), 材料的主承力方向与梁的轴向一致。

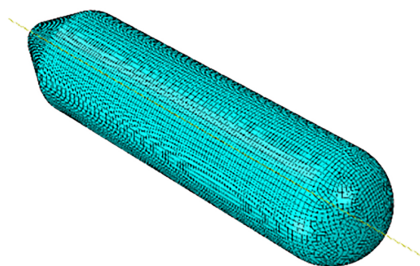


图 1 系留气球 ABAQUS 实体网格模型

Fig. 1 ABAQUS solid mesh model of the tethered balloon

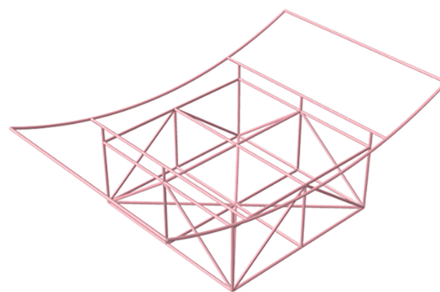


图 2 吊舱的三维实体模型

Fig. 2 Three dimensional solid model of the compartment

最终组合后的模型如图 3 所示, 吊舱位于系留气球主体腹部正下方。

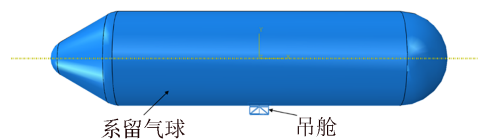


图 3 刚柔耦合模型

Fig. 3 Rigid-flexible coupling model

1.2 材料参数

本文主要研究内容之一为材料对刚柔耦合系统应变集中效应的影响, 在模拟分析中涉及到 3 类囊体织物材料和 3 类吊舱承力材料。

1) 囊体织物材料

系留气球囊体所用织物材料一般由纤维正交编织而成,力学上表现为正交各向异性,同时因纤维增强和交织结构的限制,其泊松比通常较低,纬向(环向)应力一般大于经向(轴向)应力,因此,所选用织物材料的环向模量一般大于轴向模量,材料参数如表 1 所示。其中,下标 1 代表经向(轴向),2 代表纬向(环向),3 代表厚度方向。

表 1 织物材料参数

Table 1 Parameters of fabric materials

材料名称	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	$v_{12} = v_{13} = v_{23}$	G/GPa
Vectran	1 410	53	120	2.28	0.12	0.5
UHMWPE	980	45	102	4.00	0.12	2.5
PBO-AS	1 540	78	177	5.00	0.12	2.5

注: ρ 为材料密度; E_1 、 E_2 、 E_3 为材料正交方向的弹性模量; v_{12} 、 v_{13} 、 v_{23} 为正交方向的泊松比; G 为剪切模量。

2) 铝合金与钛合金

吊舱材料若选用铝合金或钛合金这类金属材料时,在受力较大的情况下可能会产生塑性变形,因此采用理想弹塑性本构模型。为了简化分析,除了定义弹性模量以外,还定义了塑性应变分别为 0% (塑性形变刚发生时,对应材料的屈服应力)、2% 和 5% 对应的应力水平,其材料参数如表 2 所示。

表 2 铝合金 Al7075 和钛合金 TC4 的材料参数

Table 2 Parameters of Al7075 and TC4

材料名称	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_0/MPa	$\sigma_{0.02}/\text{MPa}$	$\sigma_{0.05}/\text{MPa}$
Al7075	2 800	71	0.33	455	520	570
TC4	4 510	110	0.34	825	950	1050

注: E 为材料弹性模量; ν 为泊松比; σ_0 、 $\sigma_{0.02}$ 、 $\sigma_{0.05}$ 分别为塑性应变达到 0、0.02 和 0.05 时对应的应力水平。

3) 碳纤维

碳纤维材料具有优异的力学性能和理化性能^[26-27],吊舱材料的碳纤维化是目前浮空器载荷系统设计的主要趋势。吊舱材料若选用碳纤维这类复合材料时,其遭到破坏后多为脆性断裂,具有正交各向异性。为了简化分析,其本构模型与织物材料类似,但由于采用的是梁单元,应当定义梁的轴向为材料主承力方向。本文选用 T700 为主承力管所用材料, T300 为次承力管所用材料,其材料参数如表 3 所示。其中,下标 1 代表梁的轴向, 2、3 代表梁的径向。

表 3 碳纤维材料参数

Table 3 Parameters of carbon fibers

材料名称	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	$v_{12} = v_{13} = v_{23}$	G/GPa
T700	1 550	230	15.0	15.0	0.3	5
T300	1 550	121	8.6	8.6	0.3	5

1.3 接触与载荷设置

在系留气球工作过程中,为减小由于绑缚方式导致应力集中而造成的囊体损坏,将吊舱过渡架的圆弧曲面与囊体表面采用 8 mm 绳缆和拉袂结构穿插连接,每个拉袂间距约为 5 cm,绳缆采用如图 4 所示的方式穿过所有拉袂,最终将吊舱过渡架与囊体表面绑紧。由于拉袂数量足够多,吊舱的重力近似均匀地施加在拉袂上。在 ABAQUS 中可以将几百个拉袂等效为连接点,将吊舱过渡架与囊体连接。

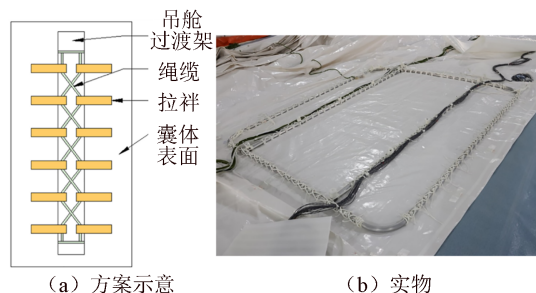


图 4 吊舱过渡架与囊体表面的绑扎

Fig. 4 Binding of the compartment transition frame and bladder surface

如图 4 所示,通过绳缆与拉袂结构将吊舱上端共形弧面的圆管完全绑扎在系留气球表面,在 ABAQUS 中通过 Tie 接触实现,其中系留气球主体下腹部表面为主面,吊舱弧面为从面。载荷方面,系留气球与载荷舱受重力和浮力影响,重力通过 Gravity 定义,重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;浮力通过 Aqua 模块定义,由于系留气球一般位于低空,假设空气密度 $\rho_{\text{air}} \approx 1.21 \text{ kg/m}^3$,系留气球内部气体等效密度 ρ_{in} 可以根据浮力平衡公式计算得到,数学表达式为

$$(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{in}}) V_{\text{balloon}} g = (m_{\text{balloon}} + m_{\text{compartment}} + m_{\text{load}}) g \quad (1)$$

式中: V_{balloon} 为系留气球主气囊充气后的体积,约为 $2\,845 \text{ m}^3$;囊体质量 $m_{\text{balloon}} \approx 0.251 \rho_{\text{balloon}}$;吊舱质量 $m_{\text{compartment}} \approx 9.77 \times 10^{-3} \rho_{\text{compartment}}$; m_{load} 为施加的载荷质量。其中, ρ_{balloon} 和 $\rho_{\text{compartment}}$ 分别为囊体材料和吊舱材料的密度,均为设计参量。

系留气球内外存在压差 ΔP , 通过 Pressure 定义, 范围为 1~10 kPa。由于本文主要研究材料属性和过渡层对应变集中效应的影响, 因此忽略风力和阻力对系留气球的干扰, 即系留气球静止悬停在空中。同时, 将载荷的附加重力通过集中力分散施加到吊舱的 9 个节点上, 其中面中心点承受 $\frac{1}{4} m_{\text{load}} g$, 线中心点承受 $\frac{1}{8} m_{\text{load}} g$, 角点承受 $\frac{1}{16} m_{\text{load}} g$ 。

2 应变集中效应机理

2.1 压差与囊体应变关系

本文构建的主气囊实体模型具有旋转对称性, 以 x 轴为旋转轴, 原点为尾端, 首端坐标为 $(37 + 3\sqrt{3}, 0)$ 。不考虑载荷舱的影响, 仅考虑囊体在不同压差条件下的应变, 根据经典力学理论与文献[28], 系留气球在 x 点处的轴向应力 σ_1 和环向应力 σ_2 应满足

$$\sigma_1 = \begin{cases} \frac{\Delta P \cdot r}{2t}, 0 \leq x < 1 \\ \frac{\Delta P (r \cdot \cos \alpha + x \cdot \tan \alpha - r \cdot \tan \alpha + r \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha)}{2t \cdot \cos \alpha}, \\ 1 \leq x < 1 + 3\sqrt{3} \\ \frac{\Delta P r [\sqrt{r^2 - (x - r - R \cdot \cot \alpha + r \cdot \cot \alpha)^2} - r + R]}{2t \sqrt{r^2 - (x - r - R \cdot \cot \alpha + r \cdot \cot \alpha)^2}}, \\ 1 + 3\sqrt{3} \leq x < 2 + 3\sqrt{3} \\ \frac{\Delta P \cdot R}{2t}, 2 + 3\sqrt{3} \leq x < 37 + 3\sqrt{3} \end{cases}$$

$$\sigma_2 = \begin{cases} \frac{\Delta P \cdot r}{2t}, 0 \leq x < 1 \\ \frac{\Delta P (r \cdot \cos \alpha + x \cdot \tan \alpha - r \cdot \tan \alpha + r \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha)}{t \cdot \cos \alpha}, \\ 1 \leq x < 1 + 3\sqrt{3} \\ \frac{\Delta P r [r^2 - (x - r - R \cdot \cot \alpha + r \cdot \cot \alpha)^2 - (R - r)^2]}{2t r^2 - (x - r - R \cdot \cot \alpha + r \cdot \cot \alpha)^2}, \\ 1 + 3\sqrt{3} \leq x < 2 + 3\sqrt{3} \\ \frac{\Delta P \cdot R}{2t}, 2 + 3\sqrt{3} < x \leq 32 + 3\sqrt{3} \\ \frac{\Delta P \cdot R}{2t}, 32 + 3\sqrt{3} \leq x \leq 37 + 3\sqrt{3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R 为系留气球主体的半径; t 为系留气球囊体材料的厚度; r 为过渡圆弧倒角的半径; α 为尾部椎体母线与 x 轴的夹角, 本文中为 30° 。

由式 (2) 可得, 在任意位置处, 系留气球囊体的环向/轴向应力与内外压差成正比, 与囊体厚度成反比; 在主体区域以及尾部圆锥体区域, 环向应力约为轴向应力的 2 倍; 在头部和尾部的球形

表面, 环向应力与轴向应力始终相等; 在尾部与主体连接处, 环向应力为负, 材料存在收缩效应, 与囊体其他部位的受力结果相反, 可能产生褶皱。

根据以上的公式推导, 可以计算出系留气球在受到压差作用下的应力分布。以 $\Delta P = 5000 \text{ Pa}$ 为例, 轴向应力与环向应力的理论值与仿真值对比结果如图 5 所示, 系留气球应力分布的仿真结果如图 6 所示。

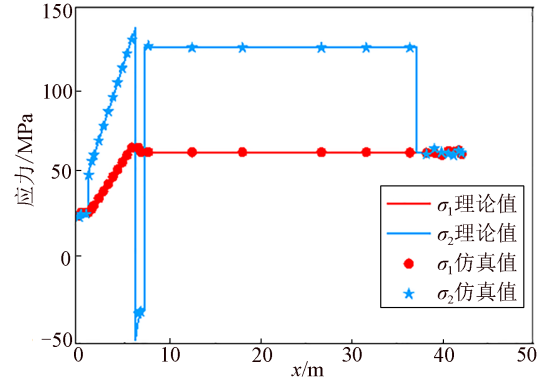


图 5 轴向应力与环向应力在系留气球上的分布曲线 ($\Delta P = 5000 \text{ Pa}$)

Fig. 5 Distribution curves of axial and circumferential stresses on the tethered balloon ($\Delta P = 5000 \text{ Pa}$)

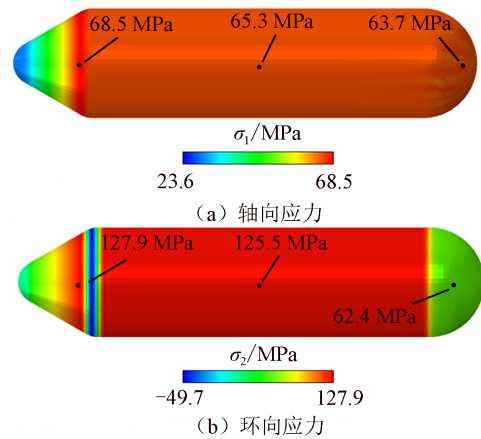


图 6 系留气球应力分布云图 ($\Delta P = 5000 \text{ Pa}$)

Fig. 6 Stress distribution cloud maps of the tethered balloon ($\Delta P = 5000 \text{ Pa}$)

如图 5 和图 6 所示, 理论结果与有限元仿真结果吻合良好。根据理论结果, 系留气球尾部的最大环向应力与轴向应力分别等于 136.6 MPa 和 68.3 MPa; 主体部分的最大环向应力与轴向应力分别等于 125 MPa 和 62.5 MPa; 头部最大环向应力与轴向应力均为 62.5 MPa。由此可得, 对于系留气球整体, 最大环向应力是轴向应力的 2 倍, 因此在纤维丝的断裂应变保持不变的情况下, 可以

通过调整纤维丝的密度来控制正交方向模量。根据正交各向异性材料本构关系^[29], 当 E_3 远小于 E_1 、 E_2 时, 应力应变关系可简化为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - v_{12}\sigma_2}{E_1} = \frac{\sigma_1(1 - 2v_{12})}{E_1} \\ \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 - v_{21}\sigma_1}{E_2} = \frac{2\sigma_1}{E_2} - \frac{\sigma_1 v_{12}}{E_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v_{21} = v_{12} \cdot E_2 / E_1$ 。

为了保证结构在正交方向上尽可能同时失效, 最大化结构承载效率, 囊体材料的环向模量与轴向模量之间应满足

$$E_2 = \frac{2E_1}{1 - v_{12}} \quad (4)$$

当 $v_{12} = 0$ 时, 环向模量应设计为轴向模量的 2 倍。对于本文所选材料, $v_{12} = 0.12$, 计算得到在加工生产过程中, 应当保证环向模量是轴向模量的 2.273 倍, 从而印证了上一节材料参数设置的合理性, 可指导系留气球囊体材料的设计与加工。

2.2 刚柔耦合结构与应变集中因子

本节主要研究重载吊舱对系留气球应变分布的影响。其中, 应变分量是判定囊体材料是否失效的重要指标。重载吊舱主要安装于主气囊中心正下方位置处, 根据上节结论, 在无载荷舱连接情况下, 该位置的轴向应力与环向应力较大, 是易发生失效的位置。对于上一节的算例 ($\Delta P = 5\,000\text{ Pa}$), 可计算得到当采用 Vectran 纤维作为囊体材料时主体部分的轴向应变和环向应变理论值分别为 0.000 896 和 0.000 900, 仿真值分别为 0.000 898 和 0.000 885, 理论值与仿真值吻合良好, 从而验证了理论预测的精准性和材料力学参数设计的合理性。

挂载重载吊舱后, 由于刚柔耦合所引起的模量失配问题, 会导致在耦合节点附近出现应力水平畸高, 这便是应变集中现象。同时, 根据圣维南原理, 在远离节点的位置, 结构的变形场几乎不受刚柔耦合效应影响。图 7 为挂载重载吊舱后的主气囊应变分布云图, 其中囊体材料为 Vectran 纤维材料, 吊舱为碳纤维材料, 内外压差为 5 000 Pa, 附加重载为 1 t。

从图 7 中可以看出, 吊舱安装位置处出现了明显的应变集中现象, 由于轴向模量低于环向模量, 因此在轴向上引起的应变集中程度略高于环向。为量化应变集中现象的恶劣程度, 定义刚柔耦合区域范围内的最大主应变与无载荷情况下的该区域

应变最大值之比为应变集中因子 K , 即

$$K = \frac{\max(\varepsilon_{1,\max}, \varepsilon_{2,\max})}{\varepsilon_{1,\text{free}}} = \frac{2E_1 t \max(\varepsilon_{1,\max}, \varepsilon_{2,\max})}{\Delta P \cdot R \cdot (1 - 2v_{12})} = \frac{2E_1 t \varepsilon_{1,\max}}{\Delta P \cdot R \cdot (1 - 2v_{12})} \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_{1,\text{free}}$ 为无载荷情况下该区域的最大应变; $\varepsilon_{1,\max}$ 和 $\varepsilon_{2,\max}$ 分别为挂载情况下该区域的最大轴向应变和环向应变。经计算, 该工况下的系留气球主体区域的应变集中因子 $K = 1.57$ 。

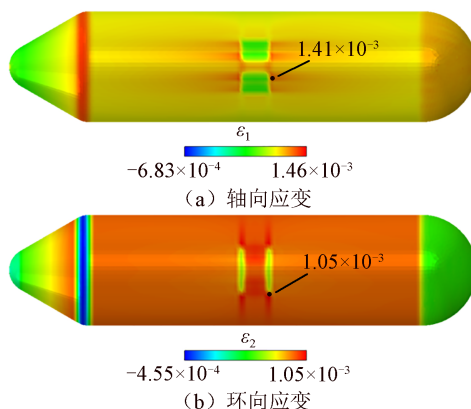


图 7 附加 1 t 重载情况下的系留气球应变分布云图

Fig. 7 Strain distribution cloud maps of the tethered balloon with an additional heavy load of 1 t

刚柔耦合结构在受力过程中的应变集中效应会导致结构过早地发生失效。以系留气球为例, 在重载情况下, 结构的耐压能力下降了 36.3%, 从而降低了系留气球的安全性与使用寿命。因此, 研究应变集中效应规律并提出相应的缓解方法对系留气球的设计与使用具有重要意义。

3 应变集中效应规律研究

3.1 不同载荷下的应变集中效应

本节主要研究不同载荷情况下的应变集中效应规律, 控制囊体材料为 Vectran 纤维材料, 吊舱采用碳纤维材料, 内外压差为 5 000 Pa, 附加重载为 0~2 t, 仿真计算结果如图 8 和图 9 所示。

如图 8 所示, 应变集中因子 K 随着附加重载质量的增加而逐渐增大, 从 1.33 增加至 1.84, 说明刚性载荷的增加会加剧应变集中效应的产生, 且增长趋势接近于线性, 拟合可得经验公式为 $K = 0.28m + 1.27$ 。其中, m 表示附加重载的质量, 单位为 t。对比图 7 和图 9 可以发现, 当施加重载为 2 t 时, 吊舱安装位置处的应变明显增加。在系留气球

工作过程中, 为了保证系留气球的安全性及可靠性, 应当控制并核算挂载载荷设备的质量。

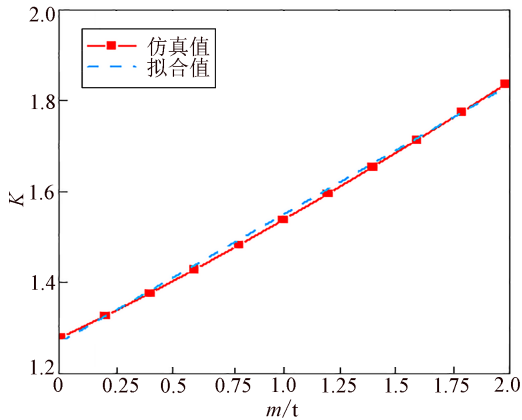


图 8 应变集中因子与附加重载之间的关系

Fig. 8 Relationship between the strain concentration factor and additional load

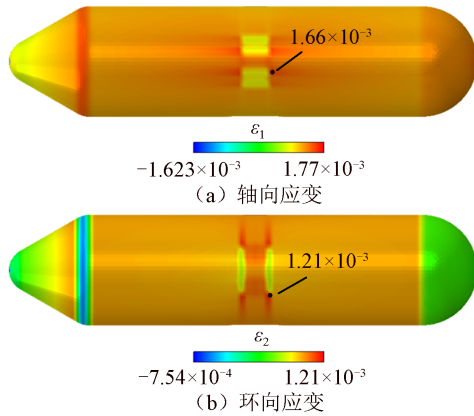


图 9 附加 2 t 重载情况下的系留气球应变分布云图

Fig. 9 Strain distribution cloud maps of the tethered balloon with an additional heavy load of 2 t

3.2 不同压差下的应变集中效应

在确定应变集中因子与附加重载之间的线性关系后, 本文还研究了压差对应变集中效应的影响。本节中的囊体与吊舱材料选取同 3.1 节, 附加重载控制为 1 t, 压差范围为 2~12 kPa, 仿真计算结果如图 10 和图 11 所示。从图中可以看出, 虽然刚柔耦合导致的应变集中效应是一种局部非均匀效应, 但该区域内应变最大值 $\varepsilon_{1,\max}$ 和囊体内外压差 ΔP 呈线性正相关, 其经验公式为 $\varepsilon_{1,\max} = 0.000\,214\,\Delta P + 0.000\,35$, 将其代入到公式 (5) 即可得到应变集中因子 K 。尽管应变集中因子会随着内外压差的增大而减小, 但考虑到囊体刚柔耦合区域内应变最大值仍然处于线性增长状态, 囊体被破坏的风险是不断增加的。因此, 在系留气球实际工作过程中, 在利用内外压差保证囊体刚度的

同时, 仍需要控制内外压差在一定范围内, 避免因环境温度波动导致压差增大引起囊体爆炸或撕裂。

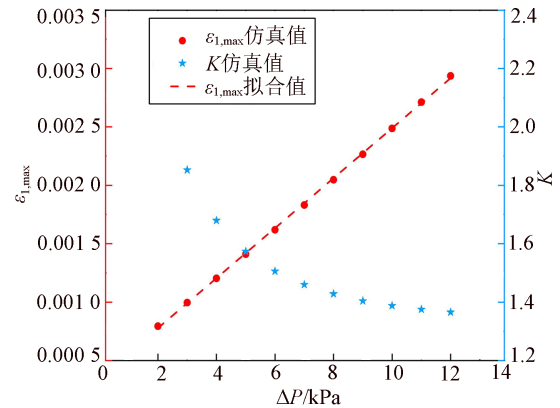


图 10 应变集中因子与应变最大值随内外压差的变化关系

Fig. 10 Variations of the strain concentration factor and maximum strain with the internal-external pressure difference

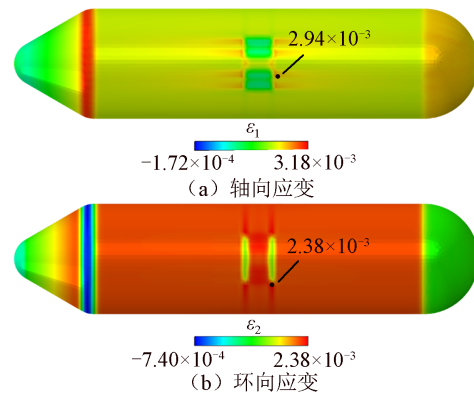


图 11 内外压差 12 kPa 情况下的系留气球应变分布云图

Fig. 11 Strain distribution cloud maps with the internal-external pressure difference of 12 kPa

3.3 不同材料的应变集中效应

囊体与吊舱材料的选择同样会影响刚柔耦合系统的应变集中程度及其应变分布, 本节主要考察了 3 种常见囊体纤维复合材料 (Vectran、UHMWPE 和 PBO-AS) 和 3 种常见吊舱材料 (碳纤维、Al7075 和 TC4)。选取吊舱材料为碳纤维, 内外压差为 5 kPa, 附加重载质量为 1 t, 利用有限元软件分别计算刚柔耦合结构区域的最大应变值和应变集中因子, 计算结果如图 12 和图 13 所示。

从图 12 和图 13 可以看出, PBO-AS 纤维由于极高的弹性模量, 在刚柔耦合区域的应变最大值相对最小, 仅为 0.001 05, 但由于其本身弹性模量较大, 由模量失配导致的应变集中程度反而加深, 应变集中因子为 1.74。对于 UHMWPE 纤维, 由

于其模量较低, 应变值是 3 种材料中最高的, 刚柔耦合区域囊体的应变最大值为 0.001 66, 在结构承载能力上最弱。相应地, 模量适中的 Vectran 纤维的应变集中程度最低, 仅为 1.57, 同时其应变最大值仅为 0.001 41, 考虑到其断裂应变为 0.040, 高于 PBO-AS 的 0.035 和 UHMWPE 的 0.036^[30], 因此 Vectran 纤维是承载能力较为优异的囊体材料

料, 可广泛用于系留气球的设计与研制。

此外, 考察吊舱材料对刚柔耦合系统应变集中效应的影响, 选取系留气球囊体材料为 Vectran 纤维, 内外压差为 5 kPa, 附加重载质量为 1 t, 利用有限元软件分别计算刚柔耦合结构区域的最大应变值和应变集中因子, 计算结果如图 14 和图 15 所示。

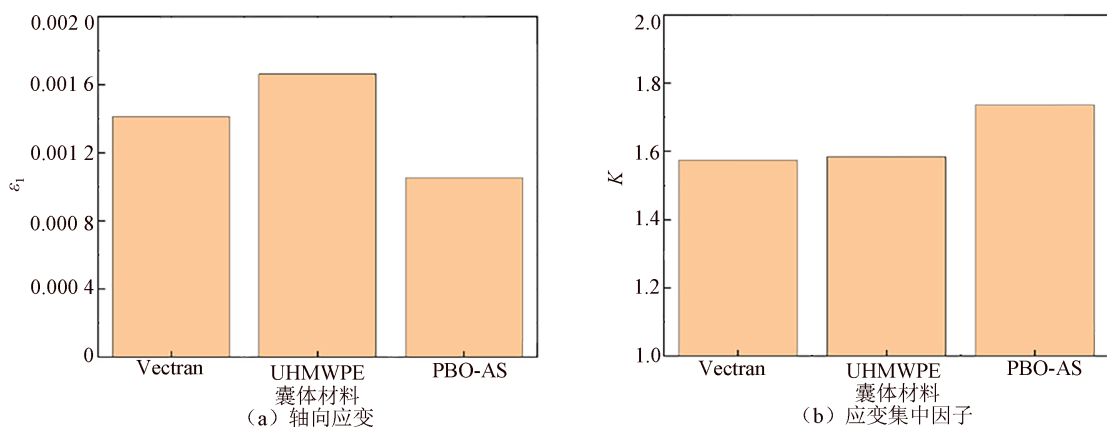


图 12 不同材料囊体应变集中效应的横向对比

Fig. 12 Lateral comparison of strain concentration effects of bladders of different materials

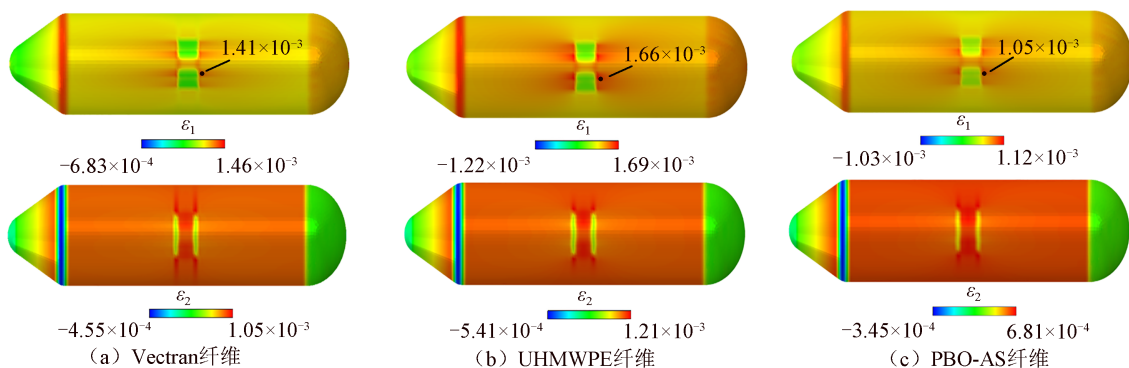


图 13 不同材料囊体的应变云图

Fig. 13 Strain cloud maps of bladders of different materials

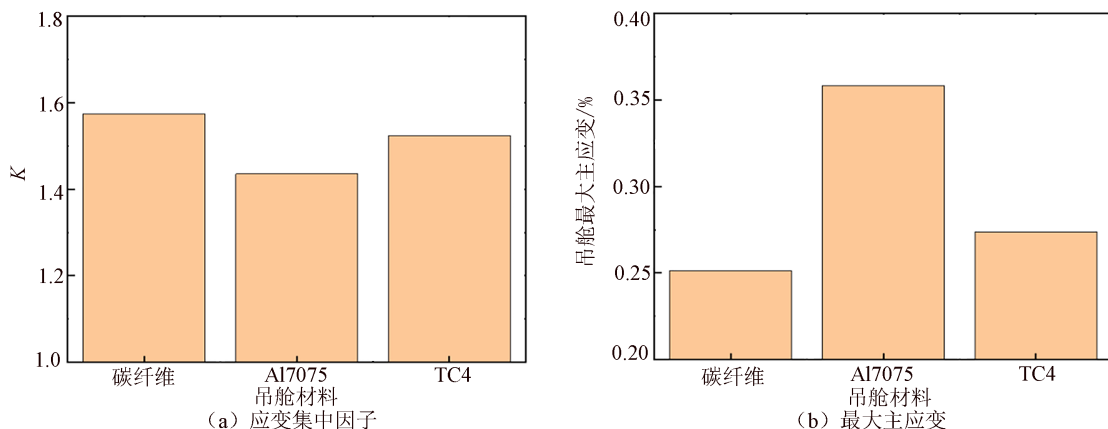


图 14 不同材料吊舱应变集中效应的横向对比

Fig. 14 Lateral comparison of strain concentration effects of compartments of different materials

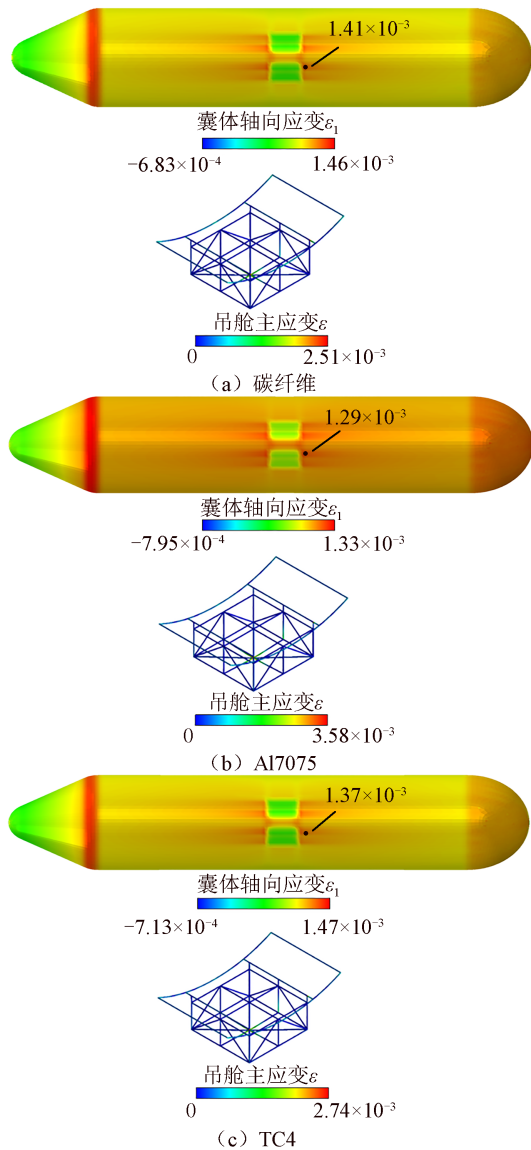


图 15 囊体及不同材料吊舱的应变云图

Fig. 15 Strain cloud maps of a bladder and compartments of different materials

此时, 应变集中因子与刚柔耦合区域内应变最大值规律一致, 因此只横向对比应变集中因子。吊舱材料除了会影响囊体中的应变集中效应外, 也会影响吊舱自身的变形, 因此图中也展示了吊舱的应变分布来进行比较, 当吊舱承力结构达到屈服应变或者断裂应变的时候, 此时吊舱就容易发生失效或者破坏。可以发现, 吊舱材料的弹性模量越小, 越接近囊体材料轴向模量时, 应变集中因子越小, 模量失配引起的应变集中程度就会越低, 说明在设计刚柔耦合结构时应尽可能使 2 种异质材料模量接近。但由于吊舱自身兼具承载功能, 若其结构刚度过低, 在承受载荷的过程中反而容易导致吊舱自身的破坏。仿真结果发现, 高

强度铝合金吊舱的最大主应变高达 3.58×10^{-3} , 约为塑性应变起始点 ($\varepsilon_0 = \sigma_0 / E \approx 6.41 \times 10^{-3}$) 的一半; 同理, 高强度钛合金吊舱的最大主应变为 2.74×10^{-3} , 塑性应变起始点为 0.075; 轻质碳纤维吊舱最大主应变为 2.51×10^{-3} , 其本身属于脆性材料, 断裂应变可以达到 0.012~0.015。综上所述, 碳纤维吊舱的承载能力相对更高, 不易发生破坏。此外碳纤维的密度远低于铝合金和钛合金, 在综合比较这 3 项性能的情况下, 碳纤维吊舱具有显著的优势, 新型碳纤维复合材料吊舱是轻量化高承载系留气球的发展趋势。

4 缓解应变集中效应的方法

应变集中效应会放大刚柔耦合结构的局部应力, 降低结构的承载能力。为了缓解应变集中效应, 本文提出了一种过渡层策略, 通过在应变集中区域或刚柔耦合的连接区域贴附一层新的囊体材料, 减小该区域的应变集中程度。过渡层薄膜为圆弧面形状, 曲率半径为 5 m, 弦长为 5.68 m, 宽度为 3 m, 采用膜单元 M3D4R 划分网格, 如图 16 所示。

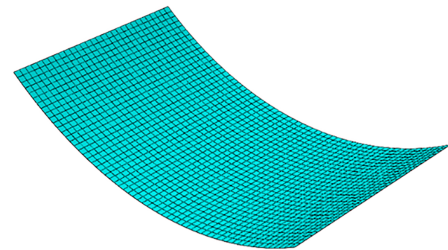


图 16 过渡层 ABAQUS 实体网格模型

Fig. 16 ABAQUS solid mesh model of the transition layer

本文考虑在囊体 (Vectran) 与吊舱 (碳纤维) 间增加一小块囊体材料 (Vectran), 内外压差设置为 5 kPa, 附加重载 1 t, 计算结果如图 17 所示。

可以发现, 添加过渡层后, 囊体主体的最大轴向应变 $\varepsilon_1 = 0.00125$, 应变集中因子 $K = 1.39$, 相比于无过渡层设计 ($\varepsilon_1 = 0.00141$, $K = 1.57$), K 下降了 11.3%; 囊体主体的最大环向应变 $\varepsilon_2 = 0.000904$, 相比于无过渡层设计 ($\varepsilon_2 = 0.00105$) 下降了 13.9%; 吊舱主应变 $\varepsilon = 0.00197$, 相比于无过渡层设计 ($\varepsilon = 0.00251$) 下降了 21.5%; 同时, 过渡层的最大轴向应变和环向应变也分别只有 0.000713 和 0.000828, 小于囊体本体应变, 结构整体更加安全可靠。由此可知, 过渡层的引入

可以有效缓解刚柔耦合结构的应变集中效应,降低囊体和吊舱的应变,大大提高系统的结构安全性与可靠性。

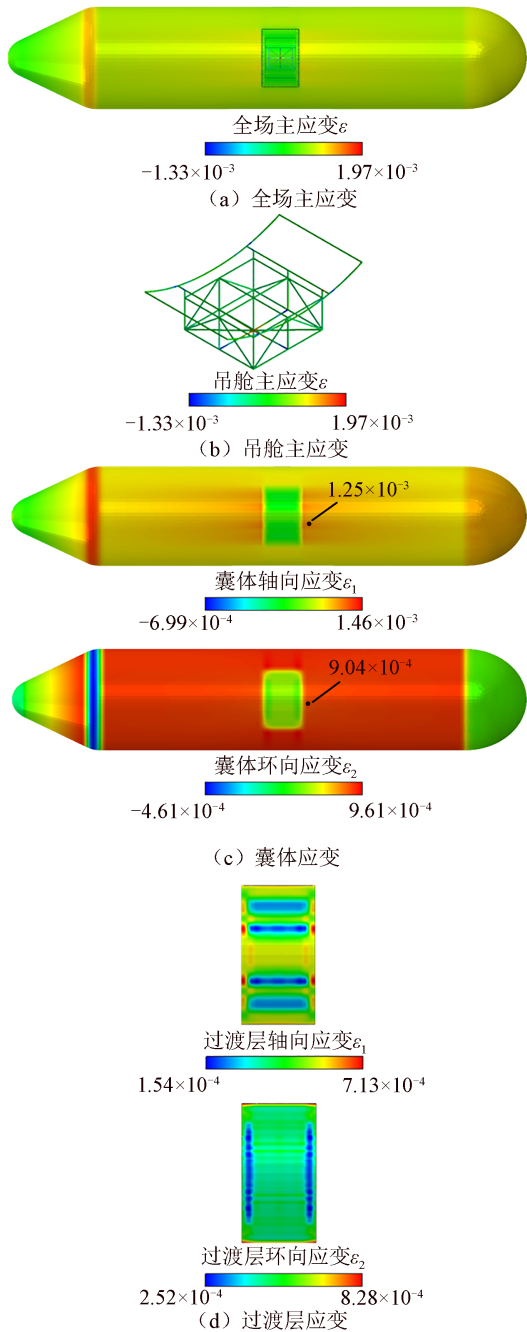


图 17 添加过渡层后的应变分布云图

Fig. 17 Strain distribution cloud maps after utilizing the transition layer

5 结论

为有效缓解系留气球在使用过程中的应变集中效应,提高其工作安全性与可靠性,本文对系留气球刚柔耦合系统的应变集中效应进行了有限

元仿真模拟研究,分析其中的关键影响因素,并提出了相应的优化策略,得到以下结论。

1) 系留气球在受到内外压差作用下应力应变分布存在解析解,主体柱形区域的环向应力约为轴向应力的 2 倍,在囊体材料力学性能设计时可参考本文建立的设计准则,将环向弹性模量设计为轴向弹性模量的 2 倍。

2) 由于模量失配导致刚柔耦合系统存在应变集中效应,提出应变集中因子,其与附加重载质量存在线性正相关;内外压差与刚柔耦合区域的应变最大值呈线性正相关,在系留气球执行任务过程中,应控制附加重载质量与内外压差,从而保证结构的使用安全。

3) 囊体材料采用 Vectran 纤维复合材料,吊舱采用碳纤维,具有轻质高强的特点,仿真结果的综合性能最优。

4) 通过附加过渡层可以有效缓解应变集中效应,经仿真计算可得,系留气球囊体主体部分的最大轴向应变、最大环向应变和吊舱最大主应变分别下降 11.3%、13.9% 和 21.5%,大大提高了结构的安全性与承载能力。

本文为了简化分析,聚焦考察了吊舱与系留气球主体之间刚柔耦合应变集中效应,在实际系留气球工程应用中,需要考虑尾翼、系缆、阀门等装置的相互作用,同时还需要考虑风载的影响,工况条件远比该模型复杂。在后续的研究中,可以建立全系统模型开展仿真分析,能够对系留气球的结构受力情况进行全方位分析。

参考文献

- [1] LAI Z H, TANG M, HU X J, et al. Dynamics modeling and motion evaluation of a near-ground tethered balloon cable system under severe wind environments[J]. Actuators, 2024, 13(10): 402.
- [2] 倪勇, 许军. 浮空器研究及应用展望[J]. 中国航天, 2024(11): 32-42.
- [3] NI Y, XU J. Research and application prospects of aerostatics[J]. Aerospace China, 2024(11): 32-42.
- [4] PANG C, HE Z Q, SONG K Y, et al. Analysis of wind field response characteristics of tethered balloon systems[J]. Aerospace, 2024, 11(5): 360.
- [5] ZHANG D H, LUO H B, CUI Y X, et al. Tandem, long-duration, ultra-high-altitude tethered balloon and its system characteristics[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(10): 2446-2465.

- [5] ALSAMHI S H, ALMALKI F A, MA O U, et al. Performance optimization of tethered balloon technology for public safety and emergency communications[J]. *Telecommunication Systems*, 2020, 75(2): 235-244.
- [6] GUAN M Y, FENG Z X, JIANG S M, et al. Tethered balloon cluster deployments and optimization for emergency communication networks[J]. *Entropy*, 2024, 26(12): 1071.
- [7] 王莱, 徐柏青, 杨松, 等. 基于系留气球的藏东南大气黑碳垂直分布[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2949-2958.
- WANG M, XU B Q, YANG S, et al. Black carbon profiles from tethered balloon flights over the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2949-2958.
- [8] WANG Z C, HUANG M, HAN W, et al. Optical sensing in Tibet Plateau wildlife observation based on tethered balloon[J]. *Optik*, 2021, 243: 167425.
- [9] 朱玉平. 系留浮空平台力学分析及载荷系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 1-11.
- ZHU Y P. Mechanical analysis and load system design of tethered floating platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 1-11.
- [10] YANG C Y, ZHANG Q H, HE Z Q. Tethered balloon wind probability prediction based on LSTM: QRNN[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 176199-176209.
- [11] 张志富. 系留气球雷达系统空中结构总体设计[J]. *西安航空学院学报*, 2019, 37(1): 37-41.
- ZHANG Z F. Overall design of aerial structure for tethered balloon radar system[J]. *Journal of Xi'an Aeronautical Institute*, 2019, 37(1): 37-41.
- [12] FU X L, WU J Q, ZHOU Z, et al. Interfacial strain concentration and relaxation along crystalline-amorphous boundaries of B2-reinforced bulk-metallic-glass-composites during loading[J]. *Acta Materialia*, 2025, 287: 120787.
- [13] YAN J, ZHANG C S, MENG Z J, et al. Atomic strain concentration induced by interfaces in extruded carbon nanotube reinforced 2024Al matrix composite[J]. *Materials Characterization*, 2024, 214: 114094.
- [14] CHEN Y Q, ZHANG J, YU P S, et al. Strain-rate effect on the stress and strain concentration in a visco-plastic plate with an elliptic hole[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(4): 1256-1267.
- [15] JIANG Y F, JIN L H, HUO Y Z. Unusual stress and strain concentration behaviors at the circular hole of a large monodomain liquid crystal elastomer sheet[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, 156: 104615.
- [16] LI W J, HAMADA S, NOGUCHI H. Interaction analysis between strain concentration and strain localization in cracked body[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2022, 45(5): 1406-1420.
- [17] WANG W Y, LIU Y X, DING M K, et al. From network to channel: crack-based strain sensors with high sensitivity, stretchability, and linearity via strain engineering[J]. *Nano Energy*, 2023, 116: 108832.
- [18] MA Z F, LI T, LIU X Y, et al. Theoretical model of the island effect in flexible electronics under equal biaxial stretching[J]. *Small*, 2025, 21(19): e2409632.
- [19] LI K, SHUAI Y M, CHENG X, et al. Island effect in stretchable inorganic electronics[J]. *Small*, 2022, 18(17): e2107879.
- [20] KO H C, BACA A J, ROGERS J A. Bulk quantities of single-crystal silicon micro-/nanoribbons generated from bulk wafers[J]. *Nano Letters*, 2006, 6(10): 2318-2324.
- [21] MEITL M A, ZHU Z T, KUMAR V, et al. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp[J]. *Nature Materials*, 2006, 5: 33-38.
- [22] CHEN H, FENG X, CHEN Y. Slip zone model for interfacial failures of stiff film/soft substrate composite system in flexible electronics[J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 79: 35-44.
- [23] MA Y J, PHARR M, WANG L, et al. Soft elastomers with ionic liquid-filled cavities as strain isolating substrates for wearable electronics[J]. *Small*, 2017, 13(9): 1602954.
- [24] 陆晓, 李昕虹, 李辉. 某型浮空器自动阀门研究[J]. *西安航空学院学报*, 2023, 41(3): 15-20.
- LU X, LI X H, LI H. Study on automatic valve of a certain aerostat[J]. *Journal of Xi'an Aeronautical Institute*, 2023, 41(3): 15-20.
- [25] 姚怡帆, 王伟, 刘渊, 等. 粘滞人工可控塑性铰抗震性能分析[J]. *火箭军工程大学学报*, 2025, 39(2): 89-101.
- YAO Y F, WANG W, LIU Y, et al. Seismic performance analysis of viscous artificial controllable plastic hinge[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2025, 39(2): 89-101.

- [26] 王首豪, 余安南, 张兆甫, 等. 细编穿刺 C/C-SiC 复合材料的抗烧蚀性能[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(2): 29-38.
- WANG S H, YU A N, ZHANG Z F, et al. Ablative resistance of fine-weave pierced C/C-SiC composites[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(2): 29-38.
- [27] 聂婷, 王焕春, 李瑞怡, 等. 热固性碳纤维复合材料回收技术研究进展[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(4): 108-118.
- NIE T, WANG H C, LI R Y, et al. Research progress of thermosetting carbon fiber composites recycling technology[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(4): 108-118.
- [28] 何泽青, 顾逸东, 王生, 等. 系留气球压差与球体应力变化关系研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(2): 96-100, 117.
- HE Z Q, GU Y D, WANG S, et al. Research on the relation between the change of membrane stress arises and the change of interior differential pressure of tethered aerostats[J]. Computer Simulation, 2009, 26(2): 96-100, 117.
- [29] HE Y M, ZHOU J Q, JIAO Y N, et al. Effect of mechanical properties of UHMWPE composite on its bulletproof performance[J]. International Journal of Impact Engineering, 2025, 201: 105275.
- [30] 赵海涛, 陈吉安, 陈务军, 等. 平流层飞艇结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021: 9-10.
- (编辑: 刘建民)