

系留式观光气球气囊快速设计方法与应用

陈卫卫^{*}, 李尼亞, 朱丹

中国特种设备检测研究院 国家市场监督管理总局技术创新中心(大型游乐设施健康管控), 北京 100029

DOI: 10.61369/SSSD.2025060033

摘要: 在航空航天等诸多领域中, 气球的应用日益广泛, 而气球气囊作为气球的关键组成部分, 其结构型式和相关参数的研究具有重要意义。本文聚焦于气球气囊的典型结构型式展开深入研究。在对气囊结构型式的探究过程中, 通过对多种已有的气球气囊设计方案进行分析、比较, 以及对实际应用场景和需求的考量, 总结出了较为典型的结构型式。同时, 针对气囊和副气囊体积的估算这一重要问题, 提出了相应的估算方法。这一方法的提出是基于对气囊物理特性、内部填充气体性质以及外部环境因素等多方面的综合考量。接着, 依据超压气球表面张力模型进一步深入研究。超压气球表面张力模型是在众多科学理论和实际试验数据基础上建立起来的, 它能够很好地描述超压气球在不同工况下的表面张力情况。基于此模型, 建立起了气囊表面张力与多个关键因素的解析关系, 这些因素包括气囊体积、填充氦气质量、环境大气密度、环境气压和环境温度等。通过这种解析关系的建立, 使得我们能够更加全面地理解气囊表面张力在不同条件下的变化规律, 进而提出了气囊表面张力计算方法。这种计算方法综合考虑了各个因素之间的相互影响, 能够较为准确地计算出气囊表面张力的数值。随后, 将以上所提出的气囊和副气囊体积估算方法以及气囊表面张力计算方法在某型气球上开展了应用研究。在该型气球的研究过程中, 进行了一系列有针对性的试验。通过试验获取了气囊材料的抗拉强度这一关键数据, 同时利用前面提出的计算方法得到了气囊表面张力的数值。然后, 依据这些数据对气囊强度进行了校核。校核结果表明, 该型气球气囊材料强度符合设计要求。这一结果与实际情况基本一致, 说明本文所提出的研究方法和计算方法在实际应用中具有一定的可靠性和有效性。这不仅为该型气球的进一步优化设计提供了理论依据和数据支持, 也为其他类似气球的研究和设计提供了有价值的参考。在未来的研究中, 可以进一步拓展这些方法的应用范围, 探索更多影响气囊性能的因素, 不断完善气球气囊的设计理论和方法。

关键词: 系留式观光气球; 气囊; 表面张力; 安全系数

Rapid Design Method and Application of Tethered Sightseeing Balloon Airbag

Chen Weiwei^{*}, Li Niya, Zhu Dan

China Special Equipment Inspection and Research Institute, Technology Innovation Center of State Market Regulation Administration (Health Control of Large Amusement Rides), Beijing 100029

Abstract: In many fields such as aerospace, the application of balloons has become increasingly widespread. As a key component of balloons, the research on the structural type and related parameters of balloon airbags is of great significance. This paper focuses on the typical structural types of balloon airbags for in-depth research. In the process of exploring the structural types of airbags, through the analysis and comparison of various existing balloon airbag design schemes, as well as the consideration of actual application scenarios and needs, the more typical structural types are summarized. At the same time, a corresponding estimation method is proposed for the important problem of estimating the volume of the main airbag and auxiliary airbag. The proposal of this method is based on the comprehensive consideration of various aspects such as the physical characteristics of the airbag, the properties of the internally filled gas, and external environmental factors. Then, further research is carried out based on the surface tension model of superpressure balloons. The surface tension model of superpressure balloons is established on the basis of many scientific theories and actual test data, which can well describe the surface tension of superpressure balloons under different working conditions. Based on this model, the analytical relationship between the surface tension of the airbag and several key factors is established, including the volume of the airbag, the mass of filled helium, the density of the ambient atmosphere, the ambient air pressure, and the ambient temperature. Through the establishment of this analytical relationship, we can more comprehensively understand the change law of the

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(项目编号: 2021MK179)

作者简介: 陈卫卫(1982.12—), 男, 汉族, 博士, 高级工程师, 中国特种设备检测研究院, 主要从事大型游乐设施检验检测新技术、新方法和标准法规等方面的研究工作, 为本文通讯作者, 通讯邮箱: chenweiwei@buaa.edu.cn。

surface tension of the airbag under different conditions, and then propose a method for calculating the surface tension of the airbag. This calculation method comprehensively considers the interaction between various factors and can accurately calculate the value of the surface tension of the airbag. Subsequently, the above-proposed methods for estimating the volume of the main airbag and auxiliary airbag, as well as the method for calculating the surface tension of the airbag, were applied in a certain type of balloon. In the research process of this type of balloon, a series of targeted tests were carried out. The key data of the tensile strength of the airbag material was obtained through the tests, and the value of the surface tension of the airbag was obtained using the calculation method proposed earlier. Then, the strength of the airbag was checked based on these data. The check results show that the strength of the airbag material of this type of balloon meets the design requirements. This result is basically consistent with the actual situation, indicating that the research methods and calculation methods proposed in this paper have certain reliability and effectiveness in practical applications. This not only provides a theoretical basis and data support for the further optimization design of this type of balloon but also provides valuable references for the research and design of other similar balloons.

Keywords : tethered sightseeing balloon; airbag; surface tension; safety factor

与固定翼或旋翼飞行器不同，系留式观光气球（简称“气球”）主要依靠轻于空气的填充气体在大气环境中产生浮力实现长时间驻空^[1]。1783年11月28日，蒙戈菲尔斯利用热气球进行了第一次载人飞行。1915年，法国的卡科特上尉设计了第一个系留气球。在气球诞生的前100年里，气球填充的浮力气体以氢气为主，因此发生了两次重大事故。1922年，美国一艘氢气飞艇撞上电线并着火。1937年，德国兴登堡飞艇在新泽西停靠时爆炸^[2-4]。由于氢气容易爆炸，目前主要充填氦气^[1]。浮力由内部浮力气体与大气的密度差产生，气球的结构及质量分布比其他飞行器更为敏感，设计不当可能导致结构失效^[5]。气球的荷载主要由气囊材料承担，因此气囊材料需要具备卓越的力学性能^[6]。本文将提出一种气囊快速设计方法，并以某型气球为例开展应用。

一、气囊结构设计

气囊的典型结构如图1所示，其外形为球形，内部分隔为气囊和副气囊。球形是气球最常用的外形，该外形比较简单、易于制造且成本较低，对外壳的内部压力最小，是加压系统的理想形状。球形具有最低的表面积与体积比，相同体积下质量最轻，这种形状使气球具有最佳的升重比^[7]。

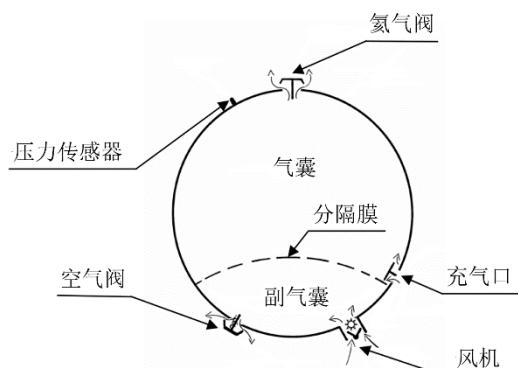


图1 气囊结构示意图

外壳一般是由织物层压复合材料设计加工成特定形状的裁片，裁片之间通过熔接热合或高频热合工艺连接在一起，制作形

成密闭的容器^[5]。气囊内充填氦气，副气囊由风机注入空气。在气囊欠压时，副气囊通过风机注入空气，增加气囊压力；在气囊超压时，副气囊通过空气阀排出空气，减少气囊压力；以平衡气球内外压力和保持气球外形。

以某型气球为例，进行气囊和副气囊体积估算。其空载自重（含气囊、氦气和吊舱）为2248 kg，系留缆绳自重为2.4 kg/m，乘客载荷为77 kg/人（共30人），安装地海拔高度为0 m，升空高度为140 m，工作环境温度为-10 °C ~ 40 °C。

(一) 气囊体积估算

为了使气球漂浮在一个恒定的高度或缓慢上升，根据阿基米德定律，气球所排开的空气质量必须大于等于气球质量加上额定负载质量。气球浮力 F_{total} 可由式(1)表示：

$$F_{total} = \rho_{air} \times V_{air} \quad (1)$$

式中， ρ_{air} 为大气密度， V_{air} 为气球排开的空气体积。

根据前文中某型气球具体参数，可计算得到气球满载起飞质量 M_{total} 为：

$$M_{total} = 2248 + 2.4 \times 140 + 77 \times 30 = 4894 \text{ kg} \quad (2)$$

为了抵抗运营风的影响，还需要2800 kg的额外浮力，求得总浮力 F_{total} 为：

$$F_{total} = 4894 + 2800 = 7694 \text{ kg} \quad (3)$$

气球升空后海拔高度140 m，大气密度^[9] ρ_{air} 为1.2102 kg/m³。气球排开空气的体积 V_{air} 为：

$$V_{air} = F_{total} / \rho_{air} = 7694 / 1.2102 = 6357.6 \text{ m}^3 \quad (4)$$

假设该状态氦气体积最大，气囊体积 $V_{envelope}$ 约等于气球体积 $V_{balloon}$ ，约等于气球排开空气的体积 V_{air} ，取整后为6400 m³。

根据球体体积计算公式 $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ ，求得气球半径 r 约为11.5 m。

(二) 副气囊体积估算

气球受太阳辐射导致气囊内部氦气温度改变、氦气补充周期内氦气的缓慢泄漏和升空或回收过程中海拔高度变化导致的环境大气压力变化都会引起气囊内部氦气体积和压力变化。副气囊的设置就是为了补偿这些变化。

根据气体定律^[7]：

$$\frac{p_1 V_1}{t_1} = \frac{p_2 V_2}{t_2} \quad (5)$$

式中：

p_1 —— 状态1气球内氦气压力，单位为 Pa；

V_1 —— 状态1气球内氦气体积，单位为 m³；

t_1 —— 状态1气球内氦气温度，单位为 K；

p_2 —— 状态2气球内氦气压力，单位为 Pa；

V_2 —— 状态2气球内氦气体积，单位为 m³；

t_2 —— 状态2气球内氦气温度，单位为 K。

(1) 温度变化需要副气囊补偿的体积

假设：状态1是指氦气温度升高至40 °C (312.2 K)，气球内氦气体积 V_1 最大，副气囊内空气体积接近为0的状态，即气球体积 $V_{balloon} = V_{envelope} = V_1$ ；状态2是指氦气温度降低至-10 °C (262.2 K)，气球内氦气体积 V_2 最小，副气囊内空气体积最大的状态，即副气囊体积 $V_{balloont} = V_1 - V_2$ ；同时在这两种状态下，通过副气囊内空气量的调节，气球内氦气压力保持不变，即 $p_1 = p_2$ ；式(5)两边可消除氦气压力项，得到：

$$\frac{V_1}{t_1} = \frac{V_2}{t_2} \quad (6)$$

$t_1 = 312.2K$ ， $t_2 = 262.2K$ ，由式(6)可得：

$$V_2 = \frac{t_2}{t_1} V_1 = (1 - 16\%) V_1 \quad (7)$$

因此，气球工作环境温度为-10 °C ~ 40 °C时，需要副气囊补偿的体积应不小于气球体积 $V_{balloon}$ 的16%。

(2) 海拔高度变化需要副气囊补偿的体积

假设：状态1是指气球上升至海拔140 m高度，环境大气压力^[8]为99.7 kPa；状态2是指气球位于海平面，环境大气压力^[9]为101.4 kPa；不考虑温度变化，即 $t_1 = t_2$ ；式(5)两边可消除温度项，得到：

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (8)$$

$p_1 = 99.7 \text{ kPa}$ ， $p_2 = 101.4 \text{ kPa}$ ，由式(8)可得：

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} V_1 = (1 - 1.7\%) V_1 \quad (9)$$

因此，气球在海拔高度0 m ~ 140 m之间运行时，需要副气囊补偿的体积应不小于气球体积 $V_{balloon}$ 的1.7%。

(3) 氮气泄漏需要副气囊补偿的体积

据某型气球使用手册数据，氦气月泄漏量约为70 m³，每3个月补充1次氦气，在1个补氦周期内的氦气泄漏量约为210 m³，约占气球体积 $V_{balloon}$ 的3.3%，即氦气泄漏需要副气囊补偿的体积。

综合以上3个因素，需要副气囊补偿的体积之和约为气球体积 $V_{balloon}$ 的21%。考虑到以上3个因素不可能同时达到极限，故副气囊体积 $V_{balloont}$ 取为气球体积 $V_{balloont}$ 的20%，即1280 m³。

二、气囊强度校核

(一) 气囊表面张力计算

假设气球初始位于海平面处，环境温度为15 °C，环境大气压力为101.4 kPa，氦气密度^[9] ρ_{He} 为0.179 kg/m³ (4.003 g/mol)。留出由于温度升高或降低需要副气囊补偿的体积，这里取为副气囊体积 $V_{balloont}$ 的一半，即气球体积 $V_{balloont}$ 的10%。因此，充填氦气量为气球体积 $V_{balloont}$ 的90%，即5760 m³，则氦气质量：

$$M_{He} = \rho_{He} \cdot 5760 = 1031 \text{ kg} \quad (10)$$

求得摩尔数：

$$Mol_{He} = M_{He} / 4.003 = 257557 \text{ mol} \quad (11)$$

气球升至海拔140 m时高度，大气压力 P_{out} 为99.7 kPa^[8]，假设氦气温度为30 °C，气体常数 $R = 0.008314472 \text{ m}^3 \cdot \text{kPa} / \text{mol} \cdot \text{K}$ ，计算得到气囊内压 P_{in} 为：

$$P_{in} = Mol_{He} \cdot R \cdot t / V_{envelope} = 101.1 \text{ kPa} \quad (12)$$

从而求得气囊表面张力 T 为：

$$T = (P_{in} - P_{out}) \cdot r / 4 = 4 \text{ kN/m} \quad (13)$$

(二) 安全系数校核

中华人民共和国交通运输部令2022年第21号《载人自由气球适航规定》“第31.25条 安全系数”规定“球囊设计应当使用至少为5的安全系数。如果能表明所选择的系数将能防止由于缺少止裂带而发生渐进或者瞬时撕裂造成的失效，则安全系数可以减小，但不得小于2。所选用的系数，应当应用于最大工作压力或者球囊应力（取较临界者）”^[10]。欧洲航空安全局 (European Aviation Safety Agency, 简称“EASA”) 发布的 “Easy Access Rules for Tethered Gas Balloons” (文件编号“CS-31TGB”) “CS 31TGB.25 Factors of safety” 一节中规定了“气囊安全系数为5”^[11]。国家市场监督管理总局发布的特种设备安全技术规范 TSG 71—2023《大型游乐设施安全技术规程》8.7节系留式观光气球中规定“气囊、网罩等重要非金属零部件安全系数在正常运行工况下应当不小于10，在非正常运行工况和极限状态工况下应当不小于3.5”^[12]。因此，气囊强度安全系数校核结果应不小于10。

气囊材料为一种典型的薄膜材料，为获取其抗拉强度，依据

GB/T 3923.1—2013中的有关规定开展单轴拉伸试验^[13]。采用50吨万能试验机（型号：WDW-50G）进行拉伸试验，平行于试件长边的纱线应与夹钳侧边平行对齐，夹钳宽度为50 mm，夹具为液压驱动夹具。以 100 ± 4 mm/min的速度匀速加载，直至试件断裂，通过试验机自动记录位移和载荷数据。

试验后，进行数据处理，获得经向拉伸强度平均值为82.97 kN/m，纬向拉伸强度平均值为67.47 kN/m。进而求得：经向拉伸强度安全系数 $S_f = 82.97 \div 4 = 20.74$ ，纬向拉伸强度安全系数 $S_f = 67.47 \div 4 = 16.87$ 。因此，气囊经向和纬向两个方向的安全系数均大于10，符合强度设计要求。

三、结论

在本次研究工作中，本文以某型气球已有的技术参数作为重要依据，深入地开展了针对气囊设计方法的研究工作，并且从中得到了以下一系列的结论：

（1）针对气囊的典型结构型式展开了细致的研究。在研究过程中，充分考虑气囊在实际应用中的各种需求和特性，对其结构

进行多方面的剖析，从而提出了关于气囊和副气囊的体积估算方法^[14]。这一估算方法的提出，是在对气囊结构深入理解以及对各种相关因素综合考量的基础上完成的，它能够为气囊和副气囊的设计在体积方面提供有效的参考依据，有助于在后续的生产、使用等环节中更好地把握气囊的规格和性能。

（2）把充满氦气的气囊等效为球形超压气球，这一处理方式是基于对氦气在气囊内的物理特性以及气囊在工作状态下的力学表现等多方面因素的综合考虑。在此基础上，提出了气囊表面张力的计算方法，并且进一步将该方法应用到实际的研究和相关工作中^[15]。这种计算方法的提出和应用，有助于深入理解气囊在充满氦气后的表面力学特性，对于优化气囊的设计、确保气囊在不同工况下的稳定性等有着积极的意义。

（3）对某型气球气囊材料实施了经向和纬向的单轴拉伸测试。通过精心设计测试方案、严格按照测试标准进行操作，获取了该气囊材料的抗拉强度数据。然后，依据这些数据对气囊的安全系数进行了细致的校核工作。这一过程对于评估气囊在实际使用过程中的安全性至关重要，能够为气囊的合理使用以及可能的改进提供重要的数据支持。

参考文献

- [1] 甘晓华, 郭颖. 飞艇技术概论 [M]. 国防工业出版社, 2005.
- [2] Kotar S. L., Gessler J. E. Ballooning A History, 1782 – 1900 [M]. McFarland & Company, Inc., Publishers, 2009.
- [3] John Swinfield. Airship Design, Development and Disaster [M]. Anova Books Company Limited, 2012.
- [4] Bain A., Vorst W. D.V. The Hindenburg tragedy revisited: the fatal flaw found [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24 (5): 399–403.
- [5] 石泰百. 囊体材料与囊体结构强度模型及试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [6] Miller T., Mandel M. Airship Envelopes: Requirements, Materials and Test Methods [J]. 2000.
- [7] Khouri G.A., Gillett J.D. Airship Technology [M]. Cambridge University Press, 1999.
- [8] National Aeronautics and Space Administration, U.S. Standard Atmospheres [S]. 1962.
- [9] Super-pressure skin tension estimation [EB/OL]. https://ukhas.org.uk/doku.php?id=ideas:super-pressure_balloon_skin_tension_calculations, (2024-07-20)[2024-07-20].
- [10] 中华人民共和国交通运输部令2022年第21号, 载人自由气球适航规定 [S].
- [11] European Aviation Safety Agency, Easy Access Rules for Tethered Gas Balloons [S].
- [12] 国家市场监督管理总局, 大型游乐设施安全技术规程 [S].
- [13] GB/T 3923.1—2013纺织品织物拉伸性能 第1部分: 断裂强力和断裂伸长率的测定条样法 [S].
- [14] 谭剑波, 郭立俊. 系留气球尾翼变形检测方法的研究与应用 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(2):3.DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2010.02.014.
- [15] 杨天祥, 曾腾辉, 杨潇文. 系留气球测控系统设计 [J]. 测控技术, 2016, 35(3):4.DOI:CNKI:SUN:IKJS.0.2016-03-022.