

浮空器蒙皮材料老化后透氦率实验研究

刘帅^{1a}, 朱仁胜^{1a}, 张金奎^{2a}, 鲁国富^{2a,2b}, 王国栋^{1a}, 赵红玲^{1b}

(1. 合肥工业大学 a. 机械工程学院; b. 汽车与交通工程学院, 合肥 230009; 2. 中航工业特种飞行器研究所 a. 浮空器与地效飞行研究中心; b. 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035)

摘要: **目的** 研究紫外辐射作用对浮空器蒙皮材料透氦率的影响。**方法** 根据某型号浮空器的使用环境, 对其蒙皮材料进行 1~3 个月的自然老化实验, 并用压差法透气性测试仪器测量新材料和老化后材料的透氦率。**结果** 得到了透氦率和自然老化时间及老化因素的关系。**结论** 老化 1 个月材料的透氦率略高于新材料, 而在老化 1~3 个月过程中, 透氦率有一个快速上升的过程。紫外线照射会使蒙皮材料的透氦率上升。

关键词: 浮空器; 蒙皮材料; 透氦率; 自然老化

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.07.006

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)07-0025-04

Experiment on Helium Permeability of Aerostat Aging Envelope Material

LIU Shuai^{1a}, ZHU Ren-sheng^{1a}, ZHANG Jin-kui^{2a}, LU Guo-fu^{2a,2b}, WANG Guo-dong^{1a}, ZHAO Hong-ling^{1b}

(1. a. School of Mechanical Engineering, b. School of Automobile and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. a. The R&D Center of Aerostat and Ground Effect Vehicle; b. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Prevention and Control, AVIC Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Objective To study effects of ultraviolet radiation on helium permeability of aerostat envelope material. **Methods** According to the use environment of certain aerostat, a natural aging experiment of the envelope material for 1-3 months was carried out. And the helium permeability of the material was measured with the pressure difference method. **Results** The relationship between the helium permeability and the natural aging time and the aging factors was obtained. **Conclusion** The helium permeability of materials aged for one month was slightly higher than that of new materials. There is a rapid rise in the helium permeability during the course of 1-3 months. Ultraviolet radiation increases the helium permeability of material.

KEY WORDS: aerostat; envelope material; helium permeability; natural aging

目前浮空器蒙皮材料多采用层合多功能复合材料, 这种材料的综合性能(面密度、强度、气体阻隔性能等)比较好。由于浮空器的工作环境十分恶劣, 工作环境温度低(最低温度约为 -55°C), 昼夜温差大, 大气密度稀薄, 约为 0.0889 kg/m^3 , 仅为地表的 $1/14$, 紫外辐射作用和臭氧作用强^[1-2]。在这种环境下工作, 其各项性能指标会发生很大的变化, 会严重影

响浮空器的单次工作时长、使用寿命和安全性能等。因此, 要求蒙皮材料须具有较强耐候性^[3-5]。Liu^[6]等实验研究了紫外线对蒙皮材料强度的影响, 并通过扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)检测了蒙皮材料的表面形态。Yao^[7-8]等通过研究柔性复合材料不同损伤模式的氦气泄漏模型, 得到了内部损伤是主要泄漏源的结论。Tomohiro^[9-10]提出了一种包括

损伤和载荷组合效应的扩散模型,并验证了其正确性。因此为验证各种老化因素对蒙皮材料性能指标的影响,进行老化实验很有必要。

浮空器蒙皮材料的氦气阻隔性能(透氦率)对浮空器的单次工作时长有很大影响,是评价蒙皮材料的一项重要指标。马寅佶^[11]等研究了氦气透过柔性蒙皮材料的微观机制,验证了溶解扩散模型和多层渗透模型的正确性。李天骥^[12]等研究了温度对平流层浮空器蒙皮透氦率的影响,得到了透氦率关于温度的数学模型。然而,目前老化因素对蒙皮材料透氦率影响的研究较为匮乏,因此开展材料老化实验并测试材料老化后的透氦率对保障浮空器结构安全具有重要意义。文中对不同老化因素的蒙皮材料及新的蒙皮材料进行了透氦率实验,为浮空器设计中蒙皮材料的选择和改进提供了依据。

1 蒙皮材料结构及实验件的制备

浮空器蒙皮材料一般由以下几部分组成,如图1所示。耐候层位于蒙皮的最外层,主要用来防止太阳辐射作用、臭氧作用等复杂环境作用带来的老化问题,同时具有一定的气体阻隔性。阻氦层能够有效地阻止氦气泄漏,提高浮空器的单次工作时长。粘接层一般在纤维基布上粘接薄膜材料,同样具有一定的气体阻隔性。承力层一般采用高强度织物,以满足蒙皮材料较高比强度的要求。

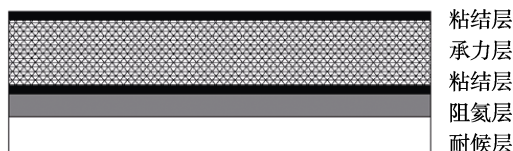


图1 蒙皮材料

实验材料为某型号浮空器研制中采用的蒙皮材料 URETEK-3216LV。该材料由美国 URETEK 公司生产,其耐候层材料为 Polyurethane,承力层材料为 Vectran,密度为 205 g/m^2 。由于浮空器在大气飞行过程中大部分外表面会直接受到紫外辐射作用,所以为了验证紫外辐射作用对蒙皮材料透氦率的影响,将实验件的老化方式分为阳面老化和阴面老化两种。

以某型号浮空器的使用环境为依据,实验前进行1个月和3个月的自然老化实验,其中老化方式又分为两种,即阳面老化和阴面老化。具体实施方式为,将一件实验件(阳面实验件)耐候层朝上置于实验架上,另一件实验件(阴面实验件)耐候层朝上置于前一件的下方,待到1个月和3个月后将上下两层分别取样^[13],即为阳面老化实验件和阴面老化实验件,如图2所示。用这种方法确保在其他条件(温度,湿度等)相同的情况下,阳面老化实验件能受到紫外线照射,阴面老化实验件不能受到紫外线照射。待老化1

个月和3个月,将老化后的实验件和没有老化的实验件用取样器裁成直径97 mm的圆形,如图3所示。实验条件见表1。



图2 老化实验



图3 部分实验件

表1 实验条件

实验件材料	老化时间/月	老化方式	数量
URETEK-3216LV	0	无	8
URETEK-3216LV	1	阳面老化	8
URETEK-3216LV	1	阴面老化	8
URETEK-3216LV	3	阳面老化	8
URETEK-3216LV	3	阴面老化	8

2 实验

2.1 实验原理

透氦率测试属于一种气体透过率测试,也称作气体阻隔性测试或透气性测试,主要是考察薄膜、薄片对常见无机性气体的阻隔性能。氦气阻隔性能的测试方法采用 GB/T 1038—2000《塑料薄膜和薄片气体透过性实验方法——压差法》。

如图4所示,把实验件置于低压室和高压室中间,密封后用真空泵将低压室和高压室进行抽真空,达到一定真空度后,高压室充入 $1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的实验气体。气体在压差梯度的作用下,由高压室向低压室渗透,通过对低压室内压强的监测处理,从而得出所测试样的气体透过率。

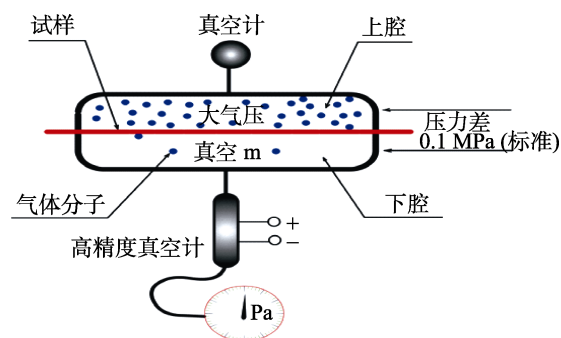


图 4 实验原理

气体透过率计算公式为：

$$Q_g = \frac{\Delta p}{\Delta t} \times \frac{V}{S} \times \frac{T_0}{T p_0} \times \frac{24}{p_1 - p_2} \tag{1}$$

式中： Q_g 为材料的气体透过率， $\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ ；

$\frac{\Delta p}{\Delta t}$ 为在稳定透过时，单位时间内低压室气体压力变化的算术平均值， Pa/h ； V 为低压室体积， cm^3 ； S 为试样的实验面积， m^2 ； T 为实验温度， K ； p_1 ， p_2 为实验两侧的压差， Pa ； T_0 ， p_0 为标准状态下的温度（ 273.15 K ）和压力（ $1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$ ）。

2.2 实验方法

依据实验原理，开发了压差法透气测试装置，主要由温度控制系统、透气性测试系统、数据采集和处理系统组成，如图 5 所示。实验方法根据 GB/T 1038

—2000《塑料薄膜和薄片气体透过性实验方法——压差法》，实验步骤如下：

- 1) 将储有氮气的储气瓶打开，并将出口压力调到 0.5 MPa，依次打开温度控制系统（调节到 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ），透气性测试系统，真空泵。
- 2) 将实验件放置到测试下腔上，并用真空油脂做好密封，之后旋紧测试上腔。
- 3) 在透气性测试系统上根据实验要求修改实验参数，设定抽真空时间为 12 h，以达到测试腔压力小于 27 Pa。
- 4) 实验结束后，记录相关数据。



图 5 实验装置

3 结果分析

材料的实验测量结果见表 2。

表 2 实验数据

编号	透氮率/(cm ³ ·m ⁻² ·24 ⁻¹ h ⁻¹ ·0.1 ⁻¹ MPa ⁻¹)								平均值
1	460.167	499.107	531.888	457.770	475.328	496.714	485.436	488.047	486.807
2	499.281	494.705	538.989	478.294	507.539	497.855	476.316	483.193	497.022
3	496.366	537.035	517.127	536.615	523.072	437.951	457.543	510.899	508.762
4	665.307	633.562	640.76	646.026	636.100	690.398	685.313	633.852	653.915
5	610.55	627.204	711.931	657.587	702.323	699.576	663.946	687.326	670.055

注：编号 1 代表新材料实验件；编号 2 代表阴面老化 1 个月实验件；编号 3 代表样阳面老化 1 个月实验件；编号 4 代表阴面老化 3 个月实验件；编号 5 代表阳面老化 3 个月实验件

由实验数据可得：未经老化处理的新材料平均透氮率为 $486.807 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ ；老化 1 个月的阴面老化实验件平均透氮率为 $497.022 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ ；老化 1 个月的阳面老化实验件平均透氮率为 $508.762 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ ；老化 3 个月的阴面老化实验件平均透氮率为 $653.915 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ ；老化 3 个月的阳面老化实验件平均透氮率为 $670.055 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 。

由此可以得到以下结论。

1) 新材料的透氮率略低于老化 1 个月的材料，明显低于老化 3 个月的材料。这说明此种浮空器的蒙皮材料 URETEK-3216LV 经过紫外线照射和自然老化 1 个月内，透氮率变化不大，但是在 1~3 个月过程

中，透氮率有一个快速上升的过程。

2) 比较阴面老化和阳面老化材料的透氮率可以发现，阳面老化的透氮率略高于阴面，但是差别不大，并且这种差别随时间变化不大。可以判断紫外线照射对蒙皮材料的透氮率性能有一定影响，但是在照射 1 个月和 3 个月条件下，透氮率上升不明显。

参考文献：

[1] 刘军虎, 刘振辉, 纪雪梅, 等. 平流层浮空器蒙皮材料的研究现状[J]. 信息记录材料, 2016, 17(2): 1-5.
[2] 张洪彬, 刘雅智, 蔡汝山, 等. 非金属材料紫外光老化试验方法与标准研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,

- 2016, 34(1): 6-10.
- [3] 谭惠丰, 刘羽熙, 刘宇艳, 等. 临近空间飞艇蒙皮材料研究进展和需求分析[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 1-8.
- [4] LIAO L, PASTERNAK I. A Review of Airship Structural Research and Development[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2009, 45(4-5): 83-96.
- [5] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境实验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1-4.
- [6] LIU Y, ZHANG C, LIU Y, et al. Accelerated Ultraviolet Aging Study of the Vectran Fiber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124(4): 3286-3292.
- [7] YAO X F, LEI Y M, XIONG C, et al. Experimental Study on Damage-induced Helium Leakage in Flexible Composites[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2010, 29(19): 2936-2945.
- [8] YAO X F, LEI Y M, XIONG C, et al. Experimental Study of Helium Leakage Parameters in Flexible Composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116(6): 3562-3568.
- [9] YOKOZEKI T, AOKI T, ISHIKAWA T. The Effect of Matrix Cracks on Gas Permeability through CFRP Laminates[J]. Advanced Composite Materials, 2004, 13(3-4): 227-236.
- [10] YOKOZEKI T, OGASAWARA T, ISHIKAWA T. Evaluation of Gas Leakage through Composite Laminates with Multi-layer Matrix Cracks: Cracking Angle Effects[J]. Composites Science & Technology, 2006, 66(15): 2815-2824.
- [11] 马寅佺, 吴清, 姚学锋, 等. 柔性蒙皮材料氦气渗透的细观机制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011(5): 646-650.
- [12] 李天骐, 潘雁频, 陈联, 等. 温度对平流层浮空器蒙皮渗透的影响研究[J]. 真空与低温, 2014(2): 120-124.
- [13] 江博水, 张金奎. 浮空器囊体材料自然老化实验方案探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2016(4): 29-29.