

航空航天装备

平流层飞艇囊体材料老化测试研究概述

段春莲, 李永祥*, 冯慧, 李琛

(中国科学院空天信息创新研究院, 北京 101416)

摘要: 基于对国内外有关囊体材料老化测试研究文献的充分调研, 综述了囊体材料老化机理、老化试验方法、试验对象的选取、性能影响表征与评价等方面的研究现状, 老化后的囊体材料常用形貌表征、拉伸测试、透氦率表征及化学结构表征等 4 种表征方法。鉴于当前对平流层飞艇囊体老化研究缺乏统一的评价指标, 且大多研究在囊体材料老化性能验证方面存在不足, 提出了后续研究的手段和方向, 为浮空器囊体材料的可靠性测试研究和发展提供参考。

关键词: 平流层飞艇; 囊体材料; 复合材料; 性能表征; 老化试验方法; 氙灯老化

中图分类号: TJ04

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)03-0024-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.004

Research Review on Aging Test Methods of Stratospheric Airship Capsule Materials

DUAN Chunlian, LI Yongxiang*, FENG Hui, LI Chen

(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101416, China)

ABSTRACT: Based on a full investigation of literature on aging test of capsule materials at home and abroad, the research status of aging mechanism of capsule materials, aging test methods, selection of test objects, characterization and evaluation of performance effects were reviewed. There are four methods commonly used to characterize the aged capsule materials: morphology characterization, tensile testing, helium permeability characterization and chemical structure characterization. At present, there is a lack of unified evaluation index for the aging of stratospheric airship capsules, and most studies are insufficient in the aging performance verification of the capsule materials. The means and direction of follow-up research are proposed to provide a reference for the reliability testing research and development of the aeroplane capsules materials.

KEY WORDS: stratospheric airship; capsule material; composite material; properties characterization; aging test methods; Xenon lamp aging

随着“流浪气球”事件进入大众视线, 浮空器越来越引起大众的关注。本文研究的主要内容是浮空器的一种——平流层飞艇, 是一种能在平流层长时间悬浮的无人飞艇, 一般包括艇体、能源、推进、飞控等

分系统^[1], 能够依靠动力推进实现定向航行、定点驻空, 具有重要的应用价值。如今已广泛应用于气象观测、对地观测和科学试验等领域^[2]。

平流层飞艇有长时驻空的需求, 艇体分系统中囊

收稿日期: 2024-01-03; 修订日期: 2024-02-26

Received: 2024-01-03; Revised: 2024-02-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3901805, 2022YFB3207300)

Fund: National Key R&D Program of China (2022YFB3901805, 2022YFB3207300)

引文格式: 段春莲, 李永祥, 冯慧, 等. 平流层飞艇囊体材料老化测试研究概述[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 24-31.

DUAN Chunlian, LI Yongxiang, FENG Hui, et al. Research Review on Aging Test Methods of Stratospheric Airship Capsule Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 24-31.

*通信作者 (Corresponding author)

体承压时间的长短直接决定了飞艇的驻空时长。由于平流层环境复杂多变,对飞艇囊体材料产生老化的影响,囊体的老化又会对飞艇性能产生显著影响,囊体材料老化会导致囊体的强度、韧性和阻氮率等性能下降,这会引发各种问题,例如囊体的破裂、变形或者断裂、漏气等,从而影响飞艇的稳定性和安全性^[3]。因此,对平流层飞艇的囊体材料进行老化试验,并掌握老化后材料的性能对飞艇的飞行可靠性计算具有重要意义。

1 囊体材料老化机理及老化试验的研究

1.1 囊体材料老化机理

目前平流层飞艇囊体材料主要原料是复合薄膜^[1],主要由焊接层、承力层、阻隔层、耐候层和黏接层组成。平流层飞艇的工作高度一般为 18~24 km,服役期间主要受太阳辐射的影响。结合囊体材料单因素老化试验研究结果发现,太阳辐射对囊体材料老化的影响最大,太阳辐射的时间和辐照度直接影响囊体材料的性能。太阳辐射量的数值与天顶角及辐射度有关,天顶角的变化是由时间、纬度决定的,辐射度的变化是由地日距离变化决定的。一般来说,随着纬度的增

加,太阳辐射减小。

平流层中的紫外线频谱主要分布在 285~385 nm,虽然只占有太阳总辐射的 7%左右,但能促使囊体材料形成光老化降解,导致高分子材料的键断裂,使材料性能下降,如使材料分解、裂析、变色,弹力和抗拉强度降低等。同时,研究表明^[4-5],囊体材料的耐候层受紫外线影响,会减弱反射光线的能力,增加材料吸收的太阳辐射量,也会加速材料性能的降低。因此,对于需长时服役的浮空器,其设计必须考虑太阳辐照对囊体材料的影响。

目前,国内对囊体材料老化性能的研究刚刚起步,对囊体材料的老化的性能评估体系还不完善^[6-7]。材料辐照老化试验分为自然老化、实验室加速老化 2 类,开展自然老化试验,需要的时间长,但是试验结果相对准确;实验室加速老化试验时长可以根据加速当量进行控制,但是加速当量的计算是一个复杂的过程,目前没有相应的标准、规范可供参考。其中,人工加速老化模拟试验主要利用氙弧灯进行老化试验,氙灯可以发出波长范围宽广的光,并且在短的波长范围内有较高的相对强度,故用氙灯做光源和评估高分子材料在户外的实际使用寿命具有更高的可行性。

目前,研究囊体材料老化的对象多为对系留气球囊体材料,少有对平流层环境飞艇材料的研究。平流层与对流层环境区别见表 1。

表 1 平流层与对流层的区别
Tab.1 Difference between stratosphere and troposphere

类型项目	高度	紫外线	气象特征	大气运动	环境温度	臭氧	湿度
对流层	地表到十几千米	较弱	气象要素水平分布不均匀	大气的垂直混合作用强	大气温度随高度降低,对流层顶处温度在-50~-55℃	臭氧含量少	存在高温、潮湿等
平流层	对流层顶向上到 50 km ^[8]	较强	平流层内存在逆温,使大气很稳定,垂直运动很微弱,	多为大尺度平流运动,平均风速为 10 m/s,最大风速可达 40 m/s	温度随高度升高,在 50 km 左右平流层顶附近达到最大值,平流层底部 20 km 处温度约-50℃,昼夜温差大	在 20~30 km 处臭氧密度高达 5×10 ¹² cm ⁻³	干燥

1.2 囊体材料老化试验注意事项

辐照老化试验设置中经常被忽视的一个问题——试验材料非耐候层面需遮挡。笔者将 3 种平流层飞艇囊体材料进行拉伸测试:设置未经过辐照试验的为 0 号材料,实际经过服役的为 1 号材料,氙灯辐照后等效 1 号实际服役天数的囊体材料为 2 号材料(未进行内层材料遮挡)。结果表明,2 号材料试验件纵向、横向拉伸强度下降 45%,与 1 号材料性能相差较大。这是因为材料背面没有保护,使得材料承力层经过长时间氙灯的折射光照,遭到了破坏。在设置试验条件时,此项经常被忽视。从张志富^[9]的氙灯测试囊体老化论文图 3 中可以看出,没有将材料背部遮挡,会影响测试结果。

囊体材料老化试验对象的选择应包括热合缝。在飞艇加工过程中,2 块裁片之间连接是由焊接手段处理,得到的节点存在缝隙,通常被称为焊缝或热合缝,焊缝直接决定了囊体的气密性和力学特性。对于大尺寸囊体结构,其焊缝分布于艇的主气囊、尾翼和副气囊等位置,多达数千米。目前,对热合缝力学行为的研究较少,对因焊缝改变的囊体结构和不同焊缝之间的力学性能、焊缝微观结构、焊缝受拉破坏机理缺乏深入讨论。

囊体材料加速辐照需考虑的试验因素最重要的是对光源和辐射强度进行选择与控制。光源如上所述一般选用氙灯。辐照度的设置,根据 ASTM G155-05a 《非金属材料的氙灯老化测试方法》^[10],结合飞艇的使用环境,设置试验条件。采用等效辐

照能量换算法, 氙灯老化和户外曝晒的曝露辐射能等效, 其表达式为:

$$H = \int E dt \quad (1)$$

式中: H 为曝露辐射能, W/m^2 ; E 为辐照度, W/m^2 ; t 为曝露时间, s 。

2 囊体材料老化试验后的性能表征

当前对经过辐射后的囊体材料进行测试研究主要从外观形貌表征、拉伸测试、透氮率测试及化学结构表征展开, 整个测试过程如图 1 所示。

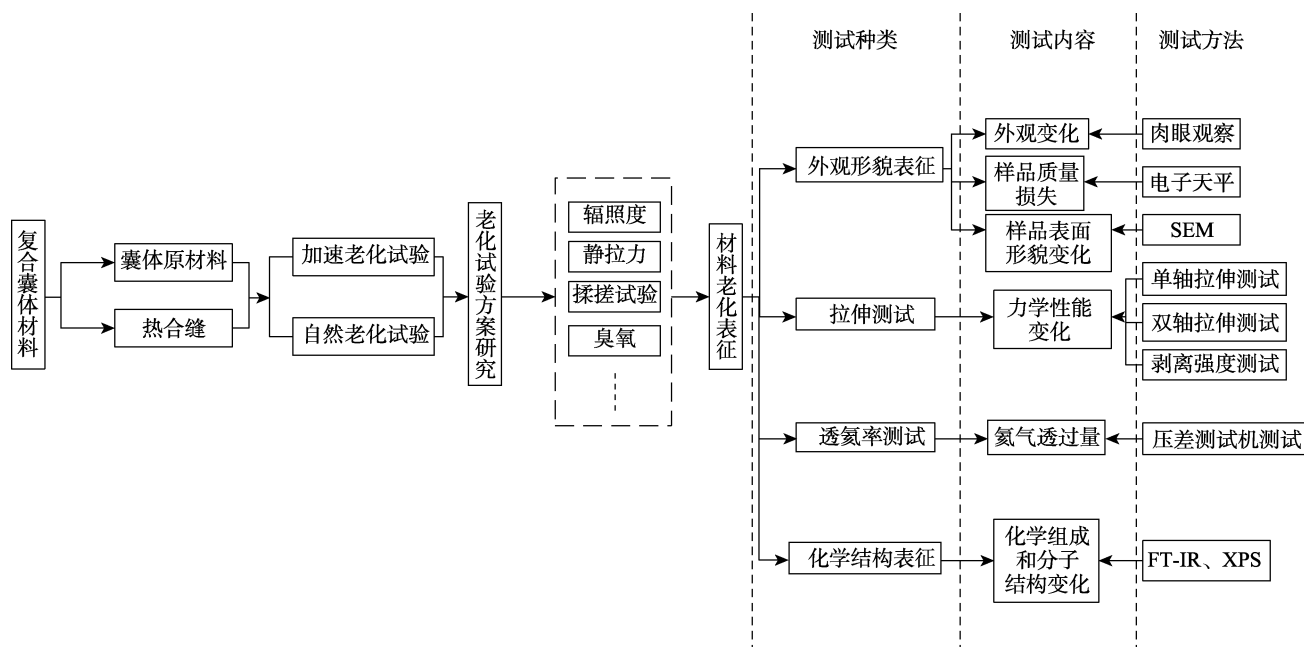


图 1 囊体材料老化研究流程

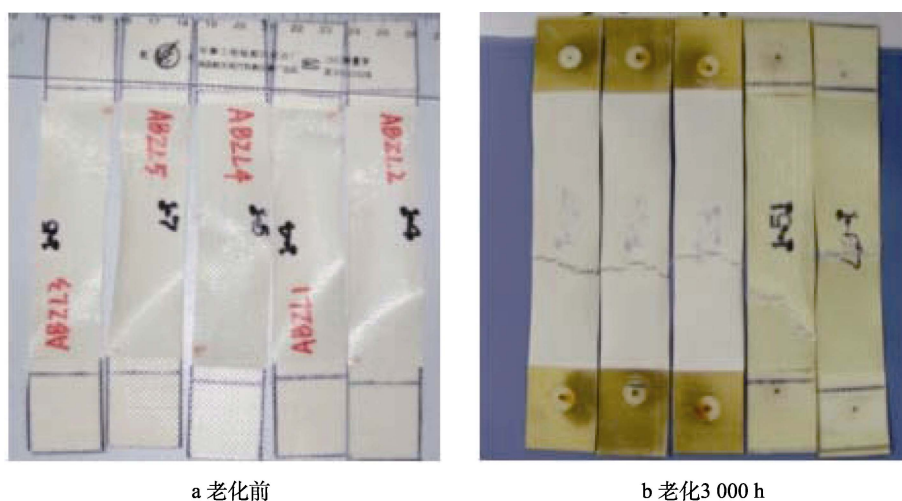
Fig.1 Research process of aging of capsule materials

2.1 宏观及微观形貌表征

囊体材料在老化过程中发生复杂的物理化学变化, 导致其内部发生改变。对囊体材料进行外观形貌检查, 观察试验前后材料的颜色变化, 是否发生黄变, 褪色, 等变色问题, 表面是否有粉末、斑点、裂纹产生, 如图 2 所示。囊体材料密度参数常以面密度表征,

试验前后材料的面密度可反映材料试验前后质量的变化, 进而反应材料是否粉化、剥落等。对试验前后材料进行称量, 可计算质量损失以及面密度的变化。

目前常用来进行微观表面形貌表征的手段为扫描电镜 (SEM), 其成像范围大, 速度快, 可观察数纳米到毫米范围内的形貌, 被广泛应用于囊体材料老化后的微观形貌表征。SEM 的观察对象要求具有导



a 老化前

b 老化3 000 h

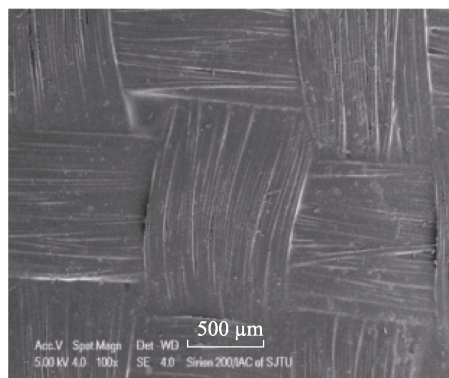
图 2 囊体材料老化前后表面状态^[9]

Fig.2 Surface state before and after aging of capsule materials^[9]: a) before aging; b) aging for 3 000 h

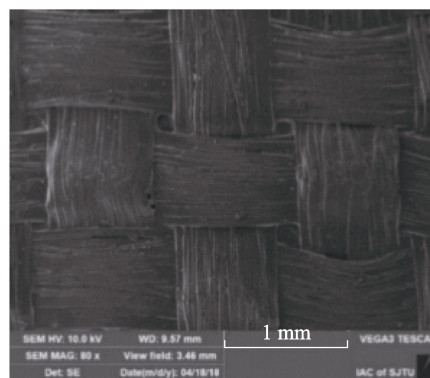
电性,所以对复合材料进行表面喷金处理后才能观察其表面形貌。

张云浩等^[11]利用电子显微镜观察揉搓后的 Uretex 3216-LV 材料,材料在经过老化试验 12 月后,囊体材料防护层的微观结构基本没有发生变化,见图 3。吕静等^[12]选取 3 种原材料(室内储存 3 a 的 a 试样、平流层飞艇短时飞行后的囊体回收材料 b 试样、自然老化的 c 试样)进行 SEM 扫描,b 试样的表面存在褶皱和亮点,无明显的裂纹,其他 2 份试样表面并无

明显变化。飞艇实际服役过程是经过辐照、拉伸、揉搓、臭氧等多因素作用。试验结果表明,单一因素影响下,短期的老化辐照对囊体材料的影响较小^[11]。这一结论也得到了实际验证,笔者选用某一曾经短期在中国西部真实服役于临近空间飞行任务的飞艇的囊体结构作为取材对象,观察其服役前后的电镜图像变化,测量其力学性能。与初始材料性能相比,材料表面前后变化不明显,下降百分比均不超过 3%,在材料测试正常浮动范围内。



a 新材料



b 老化12个月材料

图 3 老化 12 个月前后对比^[11]Fig.3 Comparison before and after aging for 12 months^[11]: a) before aging; b) aging for 12 months

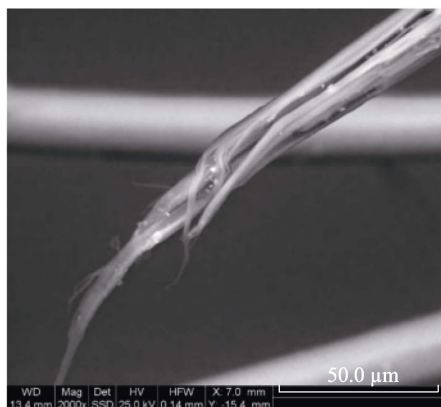
在囊体老化试验过程中,使用加载应力测试进行验证,相较于无应力加载测试,更接近于材料的实际使用情况。方坦等^[13]选用一种进口囊体材料,进行自然老化并承力 10 kg/cm 的拉力,采用电镜观察断口形貌(见图 4),发现囊体材料老化后的承力层纤维断裂形貌有明显差别,拉伸断口的断裂口表面平滑,呈熔融状。材料的折皱损伤直接影响囊体的气密性,通过电镜观察不同揉搓次数下材料的微观形貌^[14],见图 5。

以上老化试验条件设置时,综合序列仅考虑 1 项或者 2 项,得出的试验结果也仅仅是受限因素影响下

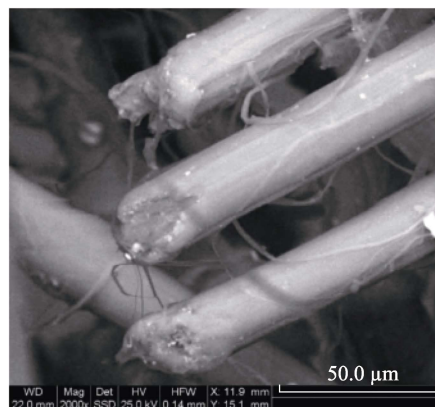
的结果。材料选择方面,应该根据实际情况对囊体材料进行揉搓试验,从囊体材料的全生命周期角度(生产、入所、储存、加工、储存、服役等多个子周期^[15])进行揉搓次数换算。综合序列加速老化测试结果与平流层飞艇实际户外运行结果的一致性非常重要,查询现有资料,关于平流层飞艇囊体材料老化的试验条件综合序列设置鲜有研究。

2.2 拉伸测试

目前国内外学者已经对老化后囊体材料的力学性能进行了一定的研究探讨^[16-17]。囊体复合材料中,



a 老化前



b 老化后

图 4 老化前后纤维断裂 SEM 形貌^[13]Fig.4 SEM images of fiber fracture before and after aging^[13]: a) before aging; b) after aging

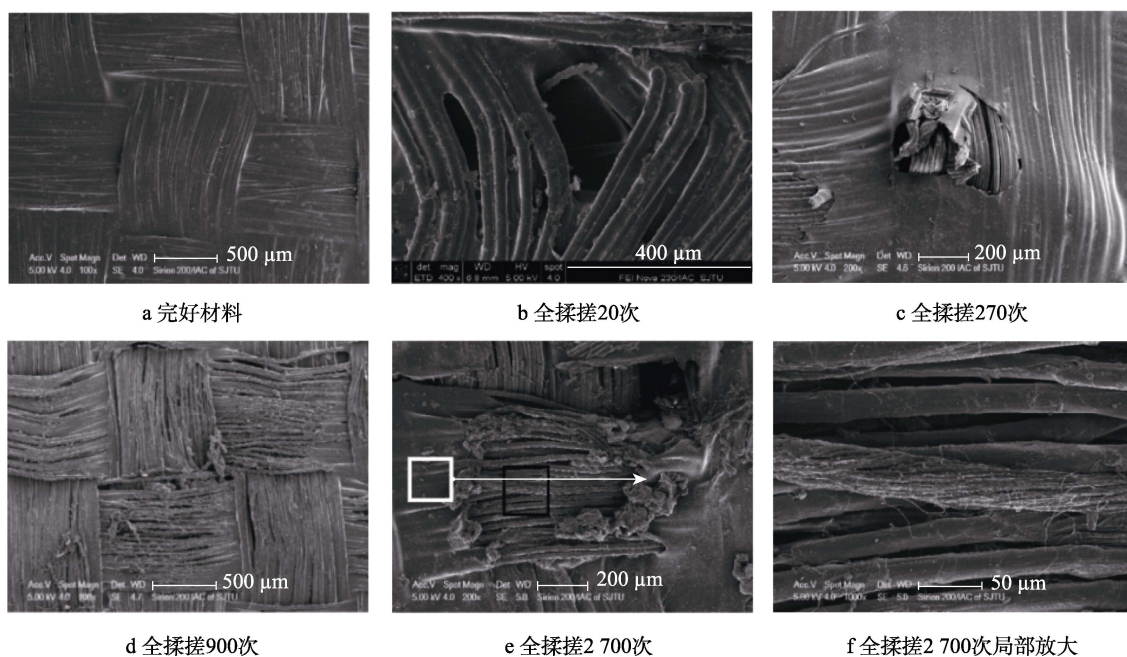
图5 不同揉搓次数揉搓下的 SEM 形貌^[14]

Fig.5 SEM images of rubbing for different rubbing times^[14]: a) intact materials; b) rubbing for 20 times; c) rubbing for 270 times; d) rubbing for 900 times; e) rubbing for 2 700 times; f) locally enlarge of Fig.e)

承力层是囊体材料的关键功能层,是提供囊体材料力学性能的主要材料。对以囊体材料为代表的各类织物复合柔性薄膜材料,其力学性能测试一般包括拉伸强度测试、热合区域剥离强度测试、中心撕裂强度测试。试验后,绘制应力应变曲线、中心撕裂强度曲线等,用来分析材料的性能及预测其性能损失趋势等。目前最常用的测试手段就是单轴拉伸试验^[18-19]。针对材料进行单轴拉伸、双轴拉伸,拉伸试验样条的制备参照相关标准^[20-21]。

拉伸强度公式:

$$F = \frac{\bar{X}}{b} \quad (2)$$

式中: $\bar{X}$ 为试样的平均破断强力, N; F 为试件的拉伸强度, N/cm; b 为试件的宽度, cm。

拉伸后计算材料的强度损失率为:

$$F_{\text{loss}} = \frac{F_{\text{before}} - F_{\text{after}}}{F_{\text{before}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: F_{loss} 为拉伸强度损失率; F_{before} 为老化前拉伸断裂强度; F_{after} 为老化后拉伸断裂强度。

断裂伸长率按式(4)计算:

$$\varepsilon = \frac{L_t - L}{L} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ε 为断裂伸长率, %; L_t 为试验 t 时间后的断裂长度, mm; L 为试件的初始长度, mm。

对高分子织物复合薄膜材料功能层在高温、高湿及紫外线作用下进行为期 13 d 的老化试验,试件力学性能下降超过 40%^[22]。Gu 等^[23]对囊体材料进行了 720 h 自然老化,试验后测试了材料的力学性能,性

能均有所下降。吕静等^[12]对承力层为 Vectran 丝的囊体材料进行了拉伸性能分析,参照 GB/T 13022—1991^[24],得到了不同环境条件下的应力-应变曲线。曲线表明,自然老化与实际飞行样件拉伸强度均有所下降。李云仲等^[6]对高分子复合材料本体与热合部分进行自然老化的囊体材料,采用万能拉伸试验机进行了拉伸测试。结果表明,经过热合加工后,试件的断裂强度损失率增大了 8.3%。囊体材料经过热合加工件,抗老化性能有所下降。通过对飞艇囊体材料 Urettek3216-LV 进行短期老化试验和揉搓损伤试验,研究材料的单轴拉伸性能退化规律^[14]。结果表明,当老化和揉搓共同作用于材料时,随着揉搓次数的增加,老化时间对材料单轴拉伸力学性能的影响逐渐减弱,证明了另一单一因素——揉搓试验对材料的影响。张金奎等^[17]根据某飞艇的使用环境,对 URETEK-3216LV 和 HD-150 等 2 种飞艇蒙皮材料进行了实验室加速老化组合试验,得到了不同环境条件下 2 种飞艇蒙皮材料加速老化后断裂强力退化规律。

目前相关研究多围绕试验后的材料进行单轴拉伸试验,一是实验设备的限制,二是双轴拉伸试验条件的设置没有统一的标准。大尺寸飞艇囊体材料在服役时的受力状态接近于平面,但是囊体材料为纵横交织的复合材料,单轴拉伸试验显然存在一定局限性。对此,国内外学者陆续完善双轴测试方法,对囊体材料的经、纬向施加不同比例的载荷,得出不同复合载荷加载的力学性能^[25]。

2.3 透氦率表征

氦气渗透会引起浮空器体积、内外压差的变化,

净浮力随之变化。当净浮力不足以克服浮空器自重时, 浮空器将失去驻留状态^[26]。囊体复合材料中起到阻氦作用的主要为复合材料的阻隔层。飞艇囊体材料的氦气泄漏率可以表征透气性^[27], 是评判平流层飞艇续航能力的一个重要因素。对老化试验后的飞艇材料进行渗透性变化分析, 能够直观地反应同材料飞艇的驻空能力。囊体材料在加工、运输、存放和服役过程中产生老化和折皱, 易使飞艇囊体形成损伤、产生空气泄漏, 但目前尚缺少此方面的研究^[11], 有必要展开老化及折皱损伤对囊体材料空气泄漏率影响规律的研究。

结合气体的渗透原理, 参考 GB/T 5453—1997《纺织品织物透气性的测定》^[28]展开实验。气体渗透原理是, 通过材料两侧的压力变化量来计算气体的渗透率。气体扩散过程处于非稳定状态, 费克比照傅里叶的方式导出了非稳态扩散的基本方程, 用费克第二定律来描述:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (5)$$

式中: D 为决定于物质本性的常数, 即扩散系数; X 为气体体积分数降低的方向。

只考虑渗透的情况下, 可对同材料飞艇的寿命进行预测, 飞艇寿命取决于其表面积、内部压力范围以及渗透率的大小, 计算公式^[29]为:

$$t = \Delta P V T_0 D / [S P_0 T (P_1 - P_2)] \quad (6)$$

式中: t 为飞艇剩余寿命; ΔP 为内部压力变化量; V 为平流层飞艇体积; T_0 、 P_0 为标准状态下温度 (273.15 K) 和压力 (1.033×10^5 Pa); D 为飞艇蒙皮厚度; S 为平流层飞艇表面积; T 为飞艇实际温度; P_1 、 P_2 为飞艇内部和外部压力。

吕静等^[30]从加工条件 (加工温度、揉搓过程) 和试验条件 (试验气体、试验温度) 几个方面研究了其对飞艇囊体材料渗透性的影响, 得出加工过程和试验条件均会造成平流层飞艇囊体材料渗透性的改变。通过对实际服役的短期老化材料进行泄漏率试验, 得出短期老化对材料的空气泄漏率几乎没有影响。

在平流层高度 18~30 km, 存在一个臭氧和紫外辐射 2 种作用共同起作用的过渡区^[31-33]。但是目前的老化研究少有二者共同作用下的试验。可以尝试采用多因素共同作用的试验方法, 来替换单一影响因素测试的不足, 以期能够精准表征平流层飞艇囊体材料老化的性能。

2.4 化学结构表征

囊体材料在室外自然老化时会经受温度、湿度和光照等因素的综合影响, 其机理较为复杂。采用差示扫描量热仪 (DSC) 测试观察应力对纤维的影响, 对比测得 DCS 曲线吸热放热峰值, 得出囊体材料长期受应力作用, 诱导纤维结晶。采用广角 X-射线衍射

仪 (XRD) 观察囊体材料老化前后的衍射峰位置是否发生偏移, 衍射峰位置没有发生偏移, 说明纤维材料晶胞参数没有发生明显改变。采用傅里叶红外光谱仪 (FT-IR) 来测试表征高分子材料的化学结构, 验证囊体材料在自然老化时非纤维部分结晶度的增加是否由化学结构变化引起的。

囊体材料承力层纤维是 Vectran 时, 该纤维是热致液晶纤维材料。已有文献表明, 该纤维材料在疲劳老化后, 导致其内部晶胞结构发生了改变^[34]。方坦等^[13]将承力层纤维同样是 Vectran 的囊体材料进行施加 10 kg/cm 的拉力, 放置在室外自然老化 4 a, 囊体材料纤维结构的有序性在自然老化条件下有所减小。XRD 和 DSC 也表明了承力纤维层存在应力诱导结晶。同时综合红外光谱的数据还可得出, 囊体材料耐候层表面化学结构在老化前后变化不大。

3 综合测试的研究、老化模型的建立

虽然对囊体材料老化后的老化性能研究已经逐步开展, 但目前的研究还存在以下 2 点的不足。

1) 实验室加速老化和自然老化试验条件的设置与临近空间存在一些偏差, 如辐照作用强度、多种空间环境影响因素设置, 导致试验后的材料与真实临近空间作用的材料性能存在差异。为准确获得囊体材料在各因素相互作用下的结果, 数据处理过程中增加对照组, 获得加速试验系数。先进行自然老化与加速老化的相关性研究, 将多组自然老化和加速老化数据进行样本皮尔逊相关系数的计算。皮尔逊相关系数用来反映 2 个数据集合之间的线性相关程度, 是最常用衡量 2 组数据之间相关性的方法, 其数学表达式为:

$$\rho_{X,Y} = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (7)$$

通过多次试验比对, 不断迭代, 建立自然老化与加速老化更加准确的联系。以此类推, 条件允许下, 可继续获得自然老化、加速老化分别与实际服役数据的对比系数。

2) 对于囊体材料, 经过老化试验^[27]不同条件下的作用, 各类性能均有不同程度的下降。为此, 建立囊体材料的老化折减函数 $X \in (0, 1]$ 。设置未经老化试验的囊体材料性能参数为 A 、 B 、 C , 老化后的囊体材料参数设置为 A' 、 B' 、 C' 等, 其中 A 、 B 、 C 表示材料的性能如拉伸强度、透氦率、经纬向强度损失等, 则可通过老化折减函数建立联系:

$$(A', B', C' \cdots) = (A, B, C \cdots) \times X(a, b, c \cdots) \quad (8)$$

式中: a 、 b 、 $c \cdots$ 为老化函数 X 的自变量, 可选定为囊体在服役期间的影响因素, 如辐照度、揉搓次数、臭氧含量、温度 (高低温变化)、湿度等参数。通过大量的数据比对, 量化材料老化前后的性能,

确定材料的折减系数,并将研究结论用于计算飞艇的可靠性。

4 结语

对于平流层飞艇囊体材料的老化,是一种非常新的研究领域,许多问题仍待解决。对于这种飞行器的长期可靠性和稳定性研究,仍需进行大量的研究和试验。囊体材料的抗老化是平流层飞艇实现长航时必须研究的课题,以期寻找更耐久、更适应平流层环境的材料。本文通过综述国内外学者进行的囊体材料老化研究发现,虽然已有大量关于老化机理、模拟试验方法、材料特性影响以及抗老化方法的研究,但仍在诸如老化机理理论深度不足、老化实验条件过于单一等问题,之后有关于囊体材料老化的研究可在以下方面进一步开展:

1) 囊体材料老化是多种物理化学反应综合作用的结果,其老化机理较为复杂。现有的机理理论均是在简化老化过程的基础上建立的,不足以支撑更一步的研究。以后可对囊体材料老化中间反应环节的机理进行更深入的研究,以更完整地表现出化学结构和组分在老化中的变化过程,为解决囊体材料老化问题提供更多的切入点和理论基础。

2) 现阶段的囊体老化与试验时加速老化没有建立更加准确的联系,研究多为室内的模拟试验,目前研究手段多为单一环境因素,导致研究偏离真实状态,不能准确反映飞艇在服役期间的状态,因此需大量的自然老化和实际飞艇数据为加速老化的换算提供数据支撑。

3) 目前针对平流层飞艇囊体材料模拟试验均为研究人员在已有设备和自身需求的情况下自行设计的,并没有统一的测试和评价标准。因此,需在明确老化机理和总结现有试验方法的基础上,对试验的条件、试样、设备、手段和检测方法等方面做出统一规范的要求。

4) 实验室加速老化试验是囊体材料进行老化试验的发展趋势,但是需要大量的实际老化数据及材料自然老化数据,建立老化折减函数,为编制材料老化试验规范提供依据。开发新型的材料和技术,以提高飞艇的耐久性和稳定性,也是当前研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 甘晓华,郭颖. 飞艇技术概论[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
GAN X H, GUO Y. Introduction to Airship Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [2] 顾逸东,甘晓华. 中国浮空器发展路线图[M]. 北京:中国科学技术出版社,2021.
GU Y D, GAN X H. Roadmap of China's Aerostat Development[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2021.
- [3] 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.
SHI T B. Experimental Study and Strength Model for Envelope Materials and Structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [4] 杨秉,杨健,李小将,等. 临近空间飞艇运行环境及其影响[J]. 航天器环境工程,2008,25(6): 555-557.
YANG B, YANG J, LI X J, et al. The Operating Environment of Near-Space and Its Effects on the Airship[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(6): 555-557.
- [5] HARADA K, EGUCHI K, SANO M, et al. Experimental Study of Thermal Modeling for Stratospheric Platform Airship[C]// Proceedings of the AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Forum. Denver: AIAA, 2003.
- [6] 李云仲,熊伟. 系留气球囊体材料光老化试验研究[J]. 航空标准化与质量,2012(3): 49-51.
LI Y Z, XIONG W. Experimental Study on Photoaging of Tethered Balloon Sac Materials[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2012(3): 49-51.
- [7] 白向红,谭惠丰,韩春苗. 飞艇蒙皮材料的损伤与寿命预报研究[C]// 2011年中国浮空器大会论文集. 北京:航空工业出版社,2011.
BAI X H, TAN H F, HAN C M. Research on Damage and Life Prediction of Airship Skin Material[C]// Proceedings of the 2011 China Aerostat Conference. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.
- [8] 童靖宇,向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程,2012,9(3): 1-4.
TONG J Y, XIANG S H. Near Space Environment and Environment Tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 1-4.
- [9] 张志富. 系留气球囊体材料快速老化试验研究[J]. 装备环境工程,2019,16(7): 23-26.
ZHANG Z F. Experimental Study on Rapid Aging of Tethered Balloon Envelope Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 23-26.
- [10] ASTM G155-01a, 非金属材料曝晒用氙弧灯设备操作规程[S].
ASTM G155-01a, Operating Practice for Xenon Arc Lamp Equipment for Exposure of Non-Metallic Materials[S].
- [11] 张云浩,阿力木·安外尔,米翔,等. 短期老化与折皱损伤对飞艇囊体材料空气泄漏性能的影响[J]. 上海交通大学学报,2020,54(11): 1189-1199.
ZHANG Y H, ALIMU A, MI X, et al. Effects of Short-Term Aging and Creasing Damage on Air Leakage Properties of Airship Envelope Materials[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(11): 1189-1199.
- [12] 吕静,高衡,张远平,等. 平流层飞艇囊体材料的环境适应性研究[C]// 第四届高分变率对地观测学术年会论文集. 武汉:[出版者不详],2017.

- LYU J, GAO H, ZHANG P Y. Environmental Adaptability of Stratospheric Airship Capsule Materials[C]// Proceedings of the 4th Annual Conference on Earth Observation with High Partial Variability. Wuhan: [s. n.], 2017.
- [13] 方坦, 陈利. 系留气球囊体材料环境老化性能评估[J]. 西安航空学院学报, 2016, 34(5): 46-50.
- FANG T, CHEN L. Aging Evaluation of the Envelop Material Used for Tethered Balloon[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2016, 34(5): 46-50.
- [14] 程书通, 张云浩, 杜嘉豪, 等. 老化与折皱损伤对飞艇囊体材料单轴拉伸力学性能影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(2): 194-201.
- CHENG S T, ZHANG Y H, DU J H, et al. Effects of Aging and Creasing on Uniaxial Tensile Properties of Airship Envelope Materials[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(2): 194-201.
- [15] KHOURY G A, GILLET J D. Airship Technology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [16] 朱辰, 邢新侠, 蔡舒阳, 等. 飞艇蒙皮缝线光老化试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 56-59.
- ZHU C, XING X X, CAI S Y, et al. Research on Airship Envelope Suture by Light Aging Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 56-59.
- [17] 张金奎, 刘涛, 鲁国富. 飞艇蒙皮材料加速老化性能试验研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 93-97.
- ZHANG J K, LIU T, LU G F. Research on Accelerated Aging Test of Airship Envelop Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 93-97.
- [18] CHEN J W, CHEN W J, ZHANG D X. Experimental Study on Uniaxial and Biaxial Tensile Properties of Coated Fabric for Airship Envelopes[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(7): 630-647.
- [19] 陈永霖, 王凤欣, 徐文, 等. 高强超薄膜材单轴拉伸试验夹持段加固方法研究[J]. 空间结构, 2016, 22(3): 44-50.
- CHEN Y L, WANG F X, XU W, et al. Research on the Method of Reinforcing Clamped Side in Uniaxial Tensile Experiment on High-Strength and Ultrathin Membrane[J]. Spatial Structures, 2016, 22(3): 44-50.
- [20] ISO 1421:2016, Fabrics Coated with Rubber or Plastics-Determination of Breaking Strength and Elongation at Break[S].
- [21] ASTM D4851-07, Standard Test Methods for Coated and Laminated Fabrics for Architectural Use[S].
- [22] DAVIS R, CHIN J, LIN C C, et al. Accelerated Weathering of Polyaramid and Polybenzimidazole Firefighter Protective Clothing Fabrics[J]. Polymer Degradation and Stability, 2010, 95(9): 1642-1654.
- [23] GU Y C, LIU L B, CAO S, et al. Natural Aging Mechanics Characteristics on Fiber Reinforced High Altitude Airship Envelope Composite[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1049/1050: 73-76.
- [24] GB/T 13022—1991, 塑料薄膜拉伸试验性能试验方法[S].
- GB/T 13022—1991, Test Method for Tensile Test Performance of Plastic Film[S].
- [25] 宋林, 姜鲁华, 张远平, 等. 飞艇囊体薄膜材料的双向拉伸试验及结构仿真[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2543-2550.
- SONG L, JIANG L H, ZHANG Y P, et al. Biaxial Tensile Test and Structure Simulation for Airship Envelope Material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2543-2550.
- [26] 刘东旭, 樊彦斌, 马云鹏, 等. 氦气渗透对高空长航时浮空器驻空能力影响[J]. 宇航学报, 2010, 31(11): 2477-2482.
- LIU D X, FAN Y B, MA Y P, et al. Effect of Helium Permeability on Working Endurance High Altitude Long Duration LTA Vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2477-2482.
- [27] ASTM D5427-09(2019), 充气约束织物加速老化的标准实施规程[S].
- ASTM D5427-09(2019), Standard Practice for Accelerated Aging of Inflatable Confinement Fabrics[S].
- [28] GB/T 5453—1997, 纺织品 织物透气性的测定[S].
- GB/T 5453—1997, Textiles-Determination of the Permeability of Fabrics to Air[S].
- [29] 李天骐, 潘雁频, 陈联, 等. 温度对平流层飞艇蒙皮渗透的影响研究[J]. 真空与低温, 2014, 20(2): 120-124.
- LI T Q, PAN Y P, CHEN L, et al. The Influence of the Temperature on the Penetrability of Stratosphere Airship Envelope Materials[J]. Vacuum and Cryogenics, 2014, 20(2): 120-124.
- [30] 吕静, 张远平, 高衡, 等. 平流层飞艇囊体材料的渗透性研究[C]// 第六届高分辨率对地观测学术年会论文集. 成都: [出版者不详], 2019.
- LYU J, ZHANG Y P, GAO H, et al. Permeability of Stratospheric Airship Capsule Materials[C]// Proceedings of the 6th Annual Conference on High Resolution Earth Observation. Chengdu: [s. n.], 2019.
- [31] BINGEN C, FUSSEN D, VANHELLEMONT F. A Review of Stratospheric Aerosol Characterization[J]. Advances in Space Research, 2006, 38(11): 2433-2445.
- [32] SRIDHARAN S, RAGHUNATH K, SATHISHKUMAR S, et al. First Results of Warm Mesospheric Temperature over Gadanki (13.5°N, 79.2°E) during the Sudden Stratospheric Warming of 2009[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2010, 72(14/15): 1139-1146.
- [33] LOWE D, MACKENZIE A R. Polar Stratospheric Cloud Microphysics and Chemistry[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70(1): 13-40.
- [34] RIEKEL C, DIEING T, ENGSTRÖM P, et al. X-Ray Microdiffraction Study of Chain Orientation in Poly(p-phenylene terephthalamide)[J]. Macromolecules, 1999, 32(23): 7859-7865.