

文章编号: 1002-1582(2025)04-0474-05

镜片吸湿行为对镜头性能的影响及改善

杨俊成¹, 张变^{2*}, 张芳²

(1. 宁波职业技术大学 阳明学院, 浙江 宁波 315800)

(2. 浙江舜宇光学有限公司, 浙江 宁波 315400)

摘 要: 树脂镜片的吸湿行为会导致镜头性能随时间变化的问题。在特定温湿度条件下, 镜头性能处于动态变化状态, 其主要原因是镜片吸水产生湿应力, 导致镜片表面形状发生变化, 从而影响整体光学性能。为解决这一问题, 提出了两种改进方向: 一是通过优化光学系统以降低对镜片面型变化的敏感度, 然而对于特定光学规格, 调整空间有限; 二是通过缩短性能变化的时间来快速恢复系统的稳定性。为了实现后者, 需要深入分析和仿真树脂镜片的吸湿行为, 研究镜片结构与吸湿平衡时间之间的关系, 为光学系统设计提供指导。文章首先实验测定了树脂镜片的吸水特性, 结果表明温湿度显著影响吸湿速率及饱和吸水率。基于实验数据并结合菲克扩散模型, 建立了树脂镜片的吸湿模型, 并进行了验证。最终研究了镜片结构参数与吸湿平衡时间的关系, 结果显示镜片的比表面积与吸湿平衡时间呈负相关, 即比表面积越大, 吸湿平衡时间越短, 进而缩短镜头性能的动态变化时间。

关 键 词: 树脂镜片; 吸湿率; 吸湿平衡时间; 比表面积; 有限元分析

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

Influence and improvement of lens hygroscopic behavior on lens performance

YANG Juncheng¹, ZHANG Bian^{2*}, ZHANG Fang²

(1. Yangming Institute, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China)

(2. Zhejiang Sunny Optics Co., Ltd, Ningbo 315400, China)

Abstract: The moisture absorption behavior of resin lenses can cause time-dependent performance issues of the lenses. Under specific temperature and humidity conditions, the performance of the lens is in a dynamic state of change. The primary reason is that the lens absorbs moisture, generating hygroscopic stress, which causes the surface shape of the lens to deform, thereby affecting overall optical performance. To solve these problems, there are two improvement directions. Scheme one is to optimize the optical system to reduce the surface shape sensitivity, but for specific optical specifications, the adjustment space is very limited. Scheme two is to shorten the duration of the time-dependent performance and quickly restore the system's time-dependent performance. Shortening the dynamic change time requires the analysis and simulation of the moisture absorption behavior of resin lenses, and studying the relationship between the lens structure and the moisture absorption equilibrium time to provide a direction for the design of the optical system scheme. The water absorption characteristics of resin lenses first experimentally is tested. The results show that temperature and humidity have a significant impact on the moisture absorption rate and saturation water absorption rate. Based on the experimental data and Fick's model, a moisture absorption model of resin lenses was established and verified. Finally, the relationship between the lens structure parameters

收稿日期: 2025-01-22; 收到修改稿日期: 2025-03-11

基金项目: 宁波职业技术学院科研基金资助项目 (NZ25JW001)。

作者简介: 杨俊成 (1989—), 男, 工程师, 从事产品结构研究。nbujc@163.com

张变 (1991—), 女, 工程师, 从事光学系统设计研究。

* 通讯作者: 1520635881@qq.com

and the moisture absorption equilibrium time was studied. The results show that the specific surface area of the lens is inversely proportional to the moisture absorption equilibrium time. The larger the specific surface area, the shorter the moisture absorption equilibrium time, and the shorter the dynamic change time of the lens performance.

Keywords: resin lenses; moisture absorption rate; hygroscopic equilibrium time; specific surface area; finite element analysis

0 引言

树脂具有绝缘性能优, 粘接性高, 强度高、硬度高、耐高温、耐化学腐蚀, 光学透明性高, 收缩性低等优点, 被广泛用于电力设备绝缘封装领域、金属裂损修补领域、航空航天领域及光学领域。但因其含有吸引水分子的亲水化合物, 对各类产品的可靠性均有影响, 且失效形式及失效机理各不相同。在电力设备绝缘封装领域, 谢耀恒等研究了环氧树脂的湿热老化过程分子模拟仿真^[1], 李光茂等研究了环氧树脂吸湿后的老化特性及失效机理^[2]; 侯思祖等模拟仿真了高压复合绝缘子在高温高湿环境下材料内部的吸湿应力变化^[3]。在金属裂损结构修补领域, 王跃研究了复合材料修补结构的失效原因^[4]; 在航空航天领域, 王德等运用Abaqus软件模拟了碳纤维增强树脂基复合材料吸湿过程^[5]; 喻健等建立了环氧树脂及复合材料加筋板结构的non-Fickian吸湿模型^[6]; 徐伟伟等发现改变湿热条件会影响材料的吸湿速率和平衡吸湿量^[7]; 康沁莹, 陈淑仙等研究了湿热环境对环氧树脂基复合材料拉伸性能的影响^[8]; 周松, 贾耀熊等研究了湿热环境对环氧树脂基复合材料力学性能的影响^[9]; 马少华, 王勇刚等研究了湿热环境对环氧树脂基复合材料弯曲性能的影响^[10]; 欧洋俊杰, 王付胜等研究了湿热环境对环氧树脂基复合材料冲击后压缩剩余强度的影响^[11]。在光学领域, 本文研究了树脂镜片吸湿行为对镜头性能的影响。

树脂镜片的吸湿行为引起了镜头性能的时效性问题, 即在一定的温湿度条件下, 镜头的性能在一段时间内动态变化。如图1所示, 实验前镜头的中心像散为0, 而在85℃, 85%RH的条件下, 镜头的中心像散变为80μm, 在静置过程中慢慢恢复, 造成该问题的原因为镜片因吸水导致湿应力变化而引起镜片的面型变化, 最终导致镜头性能变化。如图2所示为镜片在实验过程中不同时间的应力图, 该应力使用内应力检测仪测试, 其测试原理主要是基于镜片应力导致双折射, 使镜片的折射率变化, 最终体现为光程差的变化。由图2可得, 镜片在高温高湿实验后, 内应力增大, 是

因为镜片吸湿后, 撑开分子链间距, 导致镜片体积膨胀, 产生湿应力。绘制镜片实验前后及静置时间过程中不同时间段的光程差与时间关系, 可得镜片应力的时效性变化图, 如图3所示。对比图1及图3可得, 镜头的性能时效性与镜片的应力时效性具有相似的变化规律。

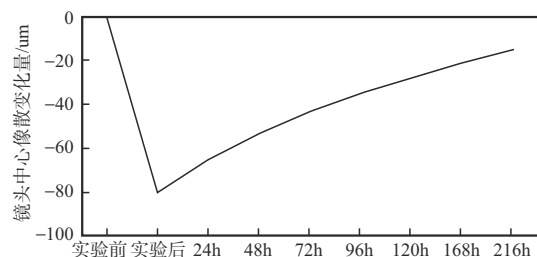


图1 镜头在85℃,85%RH条件下的像散时效性变化

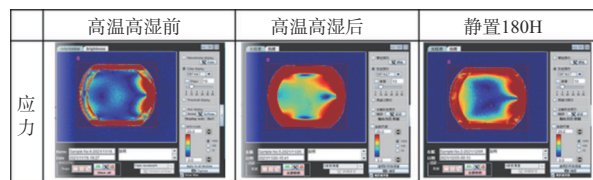


图2 镜片在实验过程中不同时间的应力图

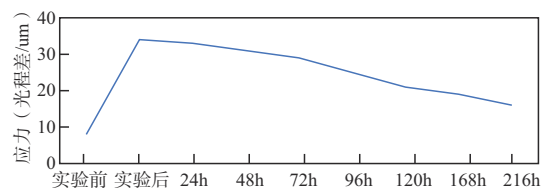


图3 镜片在85℃,85%RH条件下的应力时效性变化

解决此类问题, 主要有两种改善方向, 方案一通过优化光学系统降低面型感度, 但对特定的光学规格, 调整空间非常有限; 方案二通过缩短时效性的持续时间, 快速恢复系统时效性。若要缩小时效性持续时间, 需要研究树脂镜片的吸水行为, 包括不同条件对树脂镜片吸水特性的影响, 吸湿过程的有限元分析, 最终需要探究镜片的结构参数与吸湿平衡之间的关系, 这样才能指导光学设计时的系统的架构选型, 为镜头的可靠性优化设计提供改善方向。

1 实验验证

1.1 树脂标准片吸水率测试实验

基于COMSOL软件模拟的吸湿扩散, 需要湿相关的吸水率等物性参数, 对吸水率的测试过程

及原理进行简述。本文采用EP4500树脂材料注塑成型的直径6.1mm，厚度0.5mm的圆形标准片进行吸湿测试如图4所示。



图4 树脂标准片样品示意图

吸水率测试：采用称重法测定标准片的吸湿能力。参考ASTMD5229标准将待测试的样品置于85℃的烘箱中去除初始水分，用天平秤记录初始重量 M_0 ，然后将测试样品置于温湿试验箱中，实验条件分别为20℃，55%RH，模拟常温常湿的状态，85℃，85%RH，模拟高温高湿的状态，每隔一段时间记录一次重量，直至试样的重量稳定不变为止。则试样的在某实验条件下的吸水率

$$W_t = \frac{M_t - M_0}{M_0} \quad (1)$$

式中， M_t 和 M_0 分别为 t 时刻和初始时刻试样的质量。

1.2 实验结果分析

两组实验样品的吸水率随时间的变化规律如图5所示，经干燥后的样品在25℃，50%RH条件及静置过程中，在24H之内，一直处于缓慢吸水的状态，24H之后与环境条件达到平衡；在85℃，85%RH条件及静置过程中，样品在实验过程中完成饱和吸湿，在静置过程中因与环境湿度存在湿度差，故样品处于慢慢的解吸状态，在24H后达到与环境条件的动态平衡。对比以上两组在不同实验条件下的样品的吸水率，在85℃，85%RH条件下的样品的饱和吸水率高于25℃，50%RH条件，由此可得实验条件影响材料的吸湿速率及饱和吸水率。

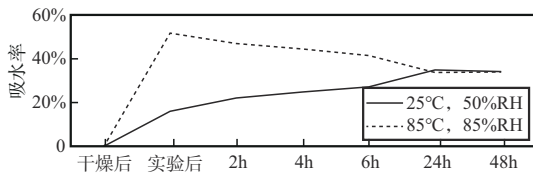


图5 树脂标准片吸湿实验数据

2 理论仿真

镜头的像散时效性变化与镜片的应力时效性变化具有相似的变化规律，说明扩散现象的快慢与镜头内部的光学镜片有关；根据标准片吸水率测试实验结果可得，标准片重量的时效性与实验条件（温度及湿度）相关。对于解决实际问题，只能聚焦于研究光学镜片与时效性变化之间的

关系。

2.1 吸湿仿真模型建立

湿气进入镜头的过程是一种扩散现象，属于质量传递过程。基于费克第一定量和质量守恒定量，得到质量传递微分方程

$$\rho \nabla \cdot u + \frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + r \quad (2)$$

因扩散速度非常缓慢，可忽略压缩流体的影响^[12]，即 $\nabla \cdot u = 0$ ，且其内部无化学反应发生，即 $r = 0$ ；故将上式简化为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (3)$$

湿度不具有连续性，而相对湿度则是连续的，为了仿真模型的建立，将式（2）转化为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (4)$$

边界条件设定：基于材料各向同性及初始状态干燥两个条件，吸湿扩散的边界条件为

$$C_{(x,y,0)} = 0 \quad t = 0 \quad (5)$$

$$C_{(x,y,t)} = M_\infty \quad t > 0 \quad (6)$$

式中， $C_{(x,y,0)}$ 为初始时刻的吸水率； $C_{(x,y,t)}$ 为 t 时刻的吸水率； M_∞ 为材料的饱和吸水率。下面以25℃，50%RH条件下是的实验数据进行仿真建模。根据饱和吸水率计算公式可得该条件下树脂标准片的饱和吸水率为0.19。其他物性参数见表1。

表1 树脂标准片的物性参数表

属性	值	单位
泊松比	0.367	
密度	1240	kg/m ³
杨氏模量	2.849×10 ⁹	Pa
吸湿膨胀数	5×10 ⁵	m ³ /kg

采用COMSOL软件中的稀物质传递模块建模仿真树脂标准片在该条件下的吸湿过程，重量变化结果如图6所示。从仿真结果来看，理论仿真与实验测试的重量随时间的变化差异较小，仿真模型准确。

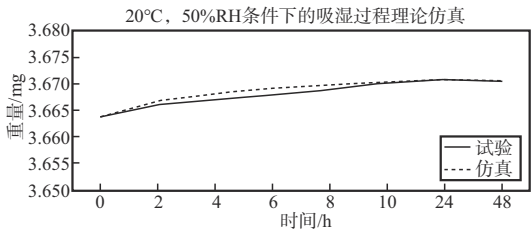


图6 实验测试结果与模型预测结果对比

2.2 吸湿平衡时间与镜片结构关系

根据吸湿扩散仿真方法，实现吸湿平衡时间与树脂镜片结构之间的关系研究。常见手机镜头中镜

片的形状及结构参数如图7所示,通过对以上不同镜片形状的外径,中厚,边厚等结构参数调整,模拟平衡时间,通过拟合镜片的结构参数与吸湿平衡时间关系,所得规律如图8所示。镜片的比表面积与吸湿平衡时间成反比。比表面积是指单位质量材料所具有的总表面积,包括外表面积和内表面积。对于树脂镜片,属无孔结构,这里的比表面积仅指外表面积,其计算公式为表面积与体积的比值。根据这一结论,可以指导光学系统设计选型。

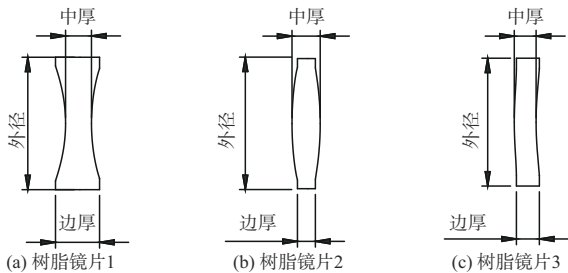


图7 树脂镜片示意图

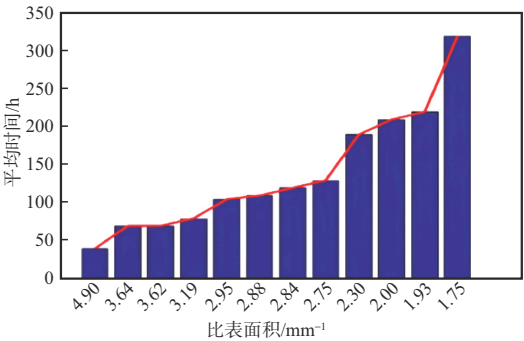


图8 吸湿平衡时间与镜片结构参数之间的关系

3 成果应用

运用以上仿真结论,可以指导镜头的光学方案优化设计,选择对可靠性有利的光学镜片结构,即比表面积小的镜片结构,如图9所示。

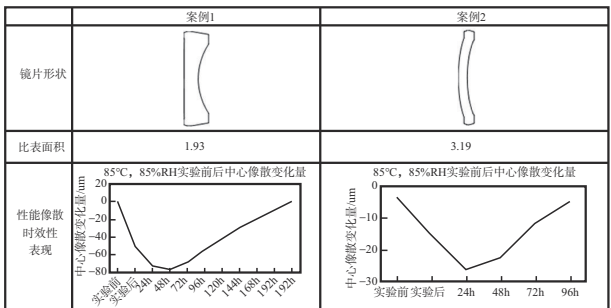


图9 吸湿平衡时间的理论与实验对比

案例1为比表面积小的镜片,从实际验证的吸湿平衡时间看,在224h时性能恢复至实验前的状态,从仿真的结果看,220h时达到平衡状态;通过改变镜片的结构参数,使其表面积加大至案例2

所示状态,从实际验证的吸湿平衡时间看,在84h时性能恢复至实验前的状态,从仿真的结果看,80h时达到平衡状态。通过有方向性的调整镜片结构参数,使得案例2的吸湿平衡时间较案例1明显缩短,可将该结论用于指导实际的可靠性改善优化。

4 结论

通过重量分析实验,研究了树脂材料在不同实验条件下的吸水变化规律,确定了树脂标准片在不同条件中的饱和吸湿量,并利用菲克定律构建仿真模型,结合测试数据,验证了仿真模型的准确性,实现了吸湿平衡时间的模拟。进一步地,研究了镜片的结构参数与吸湿平衡时间之间的关系,仿真结果表明,树脂镜片的比表面积与吸湿平衡时间呈反比例关系,比表面积越大,吸湿平衡时间越短;反之,比表面积越小,吸湿平衡时间越长。可以通过比表面积来衡量吸湿平衡时间,为镜头可靠性设计提供优化方向。

参考文献:

[1] 谢耀恒,雷红才,黄海波,等.环氧树脂湿热老化过程分析模拟仿真研究[J].绝缘材料,2019,52(09):70—77.
Xie Yaoheng, Lei Hongcai, Huang Haibo, et al. Molecular simulation on hygrothermal ageing process of epoxy resin[J]. Journal of Electrical Insulating Material, 2019, 52(09):70—77.

[2] 李光茂,杜钢,周鸿铃,等.环氧树脂在湿热环境中的老化特性与失效机理[J].高压电器,2022,58(06):87—92.
Li Guangmao, Du Gang, Zhou Hongling, et al. Aging characteristics and failure mechanism of epoxy resin in humid and hot environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(06):87—92.

[3] 侯思祖,钟正,刘云鹏,等.高压复合绝缘子用GFRP材料吸湿特性及湿应力分布数值模拟[J].电工技术学报,2022,37(04):1010—1019.
Hou Sizu, Zhong Zheng, Liu Yunpeng, et al. Numerical simulation of hygroscopic characteristic and wet stress distribution of GFRP material used in high voltage composite insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(04):1010—1019.

[4] 王跃.复合材料修补金属裂纹结构吸湿老化的试验与有限元分析[J].国防科技大学学报,2020,42(04):64—70.
Wang Yue. Experimental study and finite element analysis on hygroscopic aging of adhesively bonded composite repaired metallic structures with cracks[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(04):64—70.

[5] 王德,张泰峰,高茜,等.湿热环境下CFRP复合材料吸湿过程的仿真分析[J].计算机仿真,2021,38(07):236—240.
Wang De, Zhang Taifeng, Gao Xi, et al. Simulation analysis of moisture absorption process of CFRP composites in hygrothermal environment[J]. Computer Simulation, 2021, 38(07):236—240.

236—240.

- [6] 喻健, 何宇廷, 冯宇, 等. 环氧树脂基复合材料加筋板结构吸湿行为研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(09): 1908—1917.
- Yu Jian, He Yuting, Feng Yu, et al. Moisture absorption behavior of epoxy resin matrix composite stiffened panel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(09): 1908—1917.
- [7] 徐伟伟, 文友谊, 顾轶卓, 等. 航空用国产碳纤维/双马树脂复合材料湿热特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(01): 86—94.
- Xu Weiwei, Wen Youyi, Gu Yizhuo, et al. Hygrothermal property of domestic carbon fiber bismaleimi resin composites for aeronautic application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(01): 86—94.
- [8] 康沁莹, 陈淑仙, 等. 湿热环境对环氧树脂基复合材料拉伸性能的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(09): 117—124.
- Kang Qinying, Chen Shuxian, et al. Effects of the hygrothermal environment on the tensile properties of epoxy resin composites[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(09): 117—124.
- [9] 周松, 贾耀雄, 等. 湿热环境对 T800 碳纤维/环氧树脂基复合材料力学性能的影响[J]. 材料工程, 2021(49): 138—143.
- Zhou Song, Jia Yaoxiong, et al. Effect of hygrothermal environment on mechanical properties of T800 carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2021(49): 138—143.
- [10] 马少华, 王勇刚, 等. 湿热环境对碳纤维环氧树脂复合材料弯曲性能的影响[J]. 材料工程, 2016(02): 81—87.
- Ma Shaohua, Wang Yonggang, et al. Influence of hygrothermal environment on flexural property of carbon fiber epoxy composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2016(02): 81—87.
- [11] 欧阳俊杰, 王付胜, 等. 湿热环境对环氧树脂复合材料冲击后压缩剩余强度的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2021(09): 31—37.
- Ouyang Junjie, Wang Fusheng, et al. The Influence of the residual compressive strength of epoxy composites in wet and hot environments after impact[J]. Journal of Composites Science and Engineering, 2021(09): 31—37.
- [12] 丁祖荣. 流体力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- Ding Zurong. Fluid mechanics (volume1) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.

(上接第 473 页)

参考文献:

- [1] 张淳民, 相里斌, 赵葆常, 等. 干涉成像光谱仪技术的新发展[J]. 光学技术, 2000, (03): 232—234.
- Zhang Chunmin, Xiang Libin, Zhao Baochang, et al. The latest developments of technique of interference imaging spectrometer[J]. Optical Technique, 2000, (03): 232—234.
- [2] 周天, 杨照清, 马军山, 等. 双激发波长拉曼光谱仪的双光路集成设计[J]. 光学技术, 2023, 49(02): 150—155.
- Zhou Tian, Yang Zhaoqing, Ma Junshan, et al. Integrated design of dual optical path for dual excitation wavelength Raman spectrometer[J]. Optical Technique, 2023, 49(02): 150—155.
- [3] 尤泽樟. 宽波段微型光谱仪光学系统设计与优化研究[D]. 武汉大学, 2018.
- You Zezhang. Design and optimization of optical system for wide band micro spectrometer[D]. Wuhan University, 2018.
- [4] Dochow S, Ma D, Latka I, et al. Combined fiber probe for fluorescence lifetime and Raman spectroscopy (Conference Presentation)[J]. Analytical and Bioanalytical chemistry, 2015, 407(27): 8291—8301.
- [5] Michael A. Short, Stephen Lam, Annette McWilliams, et al. Development and preliminary results of an endoscopic Raman probe for potential in vivo diagnosis of lung cancers[J]. Optics Letters, 2008, 33(7): 711—713.
- [6] 杨照清, 杨洁, 方晨霆, 等. 多波长激发高分辨率微型拉曼光谱仪设计[J]. 光学仪器, 2020, 42(03): 36—44.
- Yang Zhaoqing, Yang Jie, Fang Chenting, et al. Design of miniature Raman spectrometer with multi-wavelength excitation and high resolution[J]. Optical Instruments, 2020, 42(03): 36—44.
- [7] 杨洁, 杨照清, 方晨霆, 等. 低波数高分辨率宽光谱拉曼光谱仪的集成化设计[J]. 光学技术, 2021, 47(06): 647—653.
- Yang Jie, Yang Zhaoqing, Fang Chenting, et al. Integrated design of low wavenumber and high-resolution Broad-Spectrum Raman spectrometer[J]. Optical Technique, 2021, 47(06): 647—653.
- [8] 范欣雨. 消像散 Czerny-Turner 光谱成像系统的研究[D]. 河南师范大学, 2020.
- Fan Xinyu. Study on anastigmatic Czerny-Turner spectral imaging system[D]. Henan Normal University, 2020.
- [9] Shafer A B, Megill L R, Droppleman L. Optimization of the Czerny-turner spectrometer[J]. JOSA, 1964, 54(7): 879—886.
- [10] 林中, 范世福. 光谱仪器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- Lin Zhong, Fan Shifu. Spectroscopic instruments[M]. Beijing: China Machine Press, 1989: 262—270.
- [11] May J, Li Y S. Fiber Raman background study and its application in setting up optical fiber Raman probes[J]. Applied Optics, 1996, 35(15): 2527—2533.