

包装技术与工艺

基于 AAO/PTFE 复合薄膜封装的湿度传感器应用

马晶晶¹, 欧文¹, 罗九斌¹, 吴健¹, 刘东²

(1.江苏物联网研究发展中心, 无锡 214135; 2.上海三一重机股份有限公司, 上海 201413)

摘要: **目的** 研究多孔阳极氧化铝/聚四氟乙烯 (AAO/PTFE) 复合薄膜应用于湿度传感器封装窗口的水蒸气输运特性和抗污染能力。**方法** 通过旋涂法在双通阳极氧化铝薄膜上制备 PTFE 微孔膜, 将该复合薄膜用作湿度传感器的封装窗口, 在定温变湿的环境和油漆喷涂房中分析相对湿度测量的静态误差和动态响应, 研究 AAO/PTFE 复合薄膜对传感器测量的影响和保护功能, 并将其与 PTFE 和 PVDF 滤膜进行对比。**结果** 定温变湿环境下静态和动态的测量结果表明, AAO/PTFE 复合薄膜对湿度传感器造成的测量误差最大可达 15%, 且误差曲线可以分为 30%~50% 的低相对湿度区间、50%~80% 的中相对湿度区间和大于 80% 的高相对湿度区间。静态测量的差异是由不同相对湿度区间内试验箱中空气流动速率不同造成的, 而动态响应的差异主要源于不同区间内管壳内、外的相对湿度差不同。**结论** PTFE 薄膜的涂覆不仅保留了 AAO 滤膜优异的水蒸气输运性能, 还有效提高了其表面抗污染能力。

关键词: 多孔阳极氧化铝; 聚四氟乙烯; 复合薄膜; 水蒸气输运; 抗漆雾污染

中图分类号: TB43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0064-07

Application Research of AAO/PTFE Composite Membrane Encapsulated Humidity Sensor

MA Jing-jing¹, OU Wen¹, LUO Jiu-bin¹, WU Jian¹, LIU Dong²

(1.Jiangsu R&D Center for Internet of Things, Wuxi 214135, China;

2.Shanghai SANY Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 201413, China)

ABSTRACT: The vapor transportation properties and surface anti-pollution abilities of AAO/PTFE composite membrane encapsulated humidity sensor were researched. PTFE thin films with porous structures were prepared on the bi-pass AAO template using spin coating method, and used on the package windows of the humidity sensor. The static error and dynamic response were studied to evaluate the influence and protective effect of the AAO/PTFE composite membrane on the sensors in environments with constant temperature and varying humidity and in paint room, which were then compared to those of PTFE and PVDF films. According to static and dynamic response results from humidity sensor testing, the maximum relative error reached 15% in the AAO/PTFE composite membrane encapsulated humidity sensor and three regimes could be identified: low humidity regime (30%~50%), medium humidity regime (50%~80%), and high humidity regime (>80%). Different air flow rates in different humidity regimes resulted in the differences of static measurements while the differences of dynamic measurements were resulted from the humidity difference between the inner and exterior of the tube in different humidity regimes. PTFE thin film not only kept the high porosity of AAO template but also improved its surface anti-pollution ability.

KEY WORDS: AAO; PTFE; composite membrane; vapor transportation; anti-mist pollution

收稿日期: 2015-11-16

基金项目: 国家 863 计划 (2013AA041101); 江苏省科技支撑计划 (BE2014003-1)

作者简介: 马晶晶 (1986—), 男, 硕士, 江苏泰兴人, 工程师, 主要研究方向为 MEMS 封装技术开发。

油漆喷涂作为最重要的表面涂覆技术,已广泛应用于机械、电气、家电、汽车、船舶等行业。喷涂工艺中温度、湿度和空气流速等是影响油漆涂覆质量的关键环境参数,因此对喷涂房内温度、湿度和气压等参数的实时监测和控制尤为重要。由于油漆喷涂过程中会产生大量漆雾废气,废气中含有的漆雾颗粒粘度大、粒径小($<10\text{ }\mu\text{m}$),容易穿透传统的防尘罩并粘附在传感器感应膜上导致传感器失效^[1]。此外,喷涂房中空气湿度较高,液化的水蒸气容易覆盖在传感器封装窗口表面形成水膜,阻挡气体流动导致测量误差。相对于传统的防尘保护性封装,油漆喷涂房中气体传感器窗口的选择性透过和抗污染技术,正受到业界越来越多的关注。

作为新型无机分离膜,多孔阳极氧化铝膜(AAO)以其独特的孔结构优点在气体、液体等分离领域有很大的应用潜力。通过改变电解条件并辅以适当的化学后处理,它可在 $0\sim 400\text{ nm}$ 范围内自由调节孔径大小,制备出具有各种用途的精密过滤膜^[2-7]。在国内,王志高等^[8]利用多孔氧化铝薄膜过滤牛初乳,分析了不同孔径薄膜过滤阻力的形成及其对渗透通量和蛋白截留率的影响。吴少华等^[9]利用自制的 AAO 膜过滤聚乙二醇溶液,分析了溶液浓度和浸泡时间对过滤通量和截留率的影响。黄肖容等^[10]利用梯度氧化铝膜过滤空气,研究了操作压力和错流速度对膜过滤通量的影响。由于其表面亲水,AAO 膜不能直接用于潮湿环境中气体的分离,需要对其表面进行疏水和抗污染处理^[11-12]。赵坤等^[13]采用乙基三氯硅烷对经过化学刻蚀的氧化铝表面进行硅烷化处理,制备出具有超疏水性质的表面,并研究了溶液浓度、修饰时间和环境湿度对表面疏水效果的影响。樊占国等^[14]在阳极氧化的 TC_4 钛合金表面涂覆聚四氟乙烯(PTFE)乳液,提高了钛合金零件的表面硬度和抗摩擦磨损性能。郑宇飞等^[15]通过在电解液中添加 PTFE 乳液的方法,直接制备出 PTFE/氧化铝复合膜。这里采用旋涂法将可溶性 PTFE 溶液均匀涂覆于 AAO 薄膜表面制备出具有疏水性能的微孔结构,并将其应用于油漆喷涂房中气体传感器的封装窗口,系统研究了该复合薄膜对湿度传感器测量的影响和抗污染性能。为了将此复合薄膜与传统多孔滤膜进行对比,这里同时研究了 PTFE 滤膜、PVDF 滤膜在湿度传感器封装上的性能表现。

1 实验

1.1 试剂与仪器

试剂与仪器:双通多孔阳极氧化铝薄膜,直径

47 mm ,厚度 $120\text{ }\mu\text{m}$,标称孔径 400 nm ,Whatman Anopore 公司提供;可溶性聚四氟乙烯浓缩分散液,上海三爱富公司提供,固含量质量分数为 30%,平均粒径 50 nm ;N,N-二甲基乙酰胺(DMF),分析纯,韩国三星公司提供;200X 旋涂仪,美国 CEE 公司提供;PVDF 滤膜,上海名列化工科技有限公司提供,厚度 $120\text{ }\mu\text{m}$,标称孔径 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,无纺布支撑;PTFE 滤膜,美国唐纳森公司提供,厚度 $120\text{ }\mu\text{m}$,标称孔径 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,聚酯纤维支撑; Σ IGMA/VP 型场发射电子显微镜,德国 ZEISS 提供;AM2303 湿度传感器,广州奥松电子提供;GDJS-100 高低温交变湿热试验箱,无锡贝尔实验室公司提供;传感器封装管壳,自制。

1.2 AAO/PTFE 复合薄膜的制备

以 AAO 为衬底,旋涂法制备 PTFE 多孔薄膜。旋涂前用 N,N-二甲基乙酰胺将可溶性 PTFE 溶液稀释至质量分数为 15%后,置于恒温磁力搅拌器中在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下搅拌 8 h 至匀相并静置脱泡 24 h^[16]。将双通 AAO 薄膜置于旋涂仪的样品台上,以 180 r/min 的低速启动旋涂机在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下预热 300 s,预热过程中使用微量进样器将配置好的 PTFE 溶液滴在 AAO 薄膜中央;提高旋涂仪的转速至 2500 r/min 并保持 60 s,PTFE 溶胶颗粒在离心力的作用下向外扩散,在微孔膜表面形成一层致密的粘胶层;将旋涂仪的转速提高至 3500 r/min 并保持 60 s,以减薄 PTFE 粘胶层的厚度。最后将覆有 PTFE 粘胶层的 AAO 薄膜置于真空恒温干燥箱中进行固化成膜,真空度为 0.05 Pa ,先以 $2\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的速率升温至 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 并恒温 20 min,然后以 $4\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的速度升温至 $370\text{ }^\circ\text{C}$ 并恒温 60 min,自然冷却至室温。通过扫描电子显微镜观察复合薄膜的表面和截面形貌,并用能谱仪进行元素分析。

1.3 AAO/PTFE 复合薄膜分离实验

将所制得的 AAO/PTFE 复合薄膜作为湿度传感器的封装窗口,对进入传感器的气体进行分离。实验从 2 个方面研究窗口薄膜的性能,即水蒸气的通量和抗污染性能。首先将经过校准的湿度传感器进行密闭封装,以 AAO/PTFE 复合薄膜、PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜作为窗口与环境进行气体交换,通过对比封装管壳中湿度传感器在一定条件下的测量数据与环境实际湿度的差异来间接评估窗口的水蒸气输运特性。将以 AAO/PTFE 薄膜、PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜为封装窗口的湿度传感器置于上

海三一重机股份有限公司油漆喷涂房中连续工作 600 h, 通过对比工作前、后传感器测量数值的变化和窗口薄膜的污染情况, 来评估窗口水蒸气通量的变化和抗漆雾污染能力。

2 结果与讨论

2.1 AAO/PTFE 复合薄膜表面形貌及能谱分析

经过旋涂和真空高温固化后的 AAO/PTFE 复合薄膜的表面形貌见图 1a, 可以看出复合薄膜保持了 AAO 薄膜六边紧密堆积排列的膜胞结构, 孔径约为 200 nm, 与 AAO 薄膜相比, 孔径缩小约 200 nm, 且孔形状保持了较好的圆度。AAO/PTFE 复合薄膜截面形貌见图 1b, 可以看出 AAO 薄膜表面均匀覆盖 1 层厚度约 1.5 μm 的薄膜, AAO 薄膜内部约 10 μm 范围内有较明显的介质渗入和侧墙覆盖。为了验证表面所覆盖薄膜为有机聚四氟乙烯, 采用能谱仪对薄膜表面进行分析, 除了衬底 AAO 中所含有的 Al 和 O 元素以及制样蒸镀的 Pt 外, 谱图中出现了较强的 C 和 F 元素, 表明 PTFE 以熔融固化的方式覆盖于 AAO 表面。此外, AAO 多孔薄膜内部的侧墙覆盖物是高温和真空条件下熔融的聚四氟乙烯渗入膜孔内部, 在降温过程中固化而成。由于熔融的 PTFE 具有一定的粘度且流动性较差, 所以渗入深度与固化温度和时间有关^[17]。

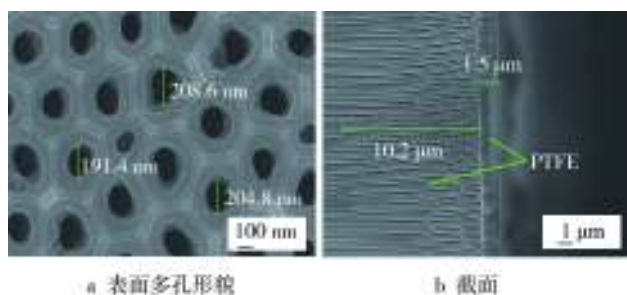


图 1 AAO/PTFE 复合薄膜表面形貌和截面形貌
Fig.1 Surface morphology, cross-section morphology of AAO/PTFE composite membrane

2.2 AAO/PTFE 复合薄膜水蒸气输运特性研究

室温下采用不同窗口薄膜封装的标准湿度传感器的测量值与试验箱中实际相对湿度的对比曲线见图 2a, 可以看出, 封装后的湿度传感器测量值比实际湿度低, 且随着测量相对湿度点的增大测量差值变大。其中 AAO/PTFE 复合薄膜封装的传感器测量值与实际相对湿度最接近, PVDF 滤膜封装的湿度传感器测量值与实际相对湿度差值最大。

由此可见, 与 PTFE 和 PVDF 滤膜相比, AAO/PTFE 复合薄膜具有较大的水蒸气通透率。

为了更准确反映不同湿度条件下的测量差值, 引入相对湿度测量的相对误差进行评估:

$$\Delta R\% = \frac{R_{\text{环境}} - R_x}{R_{\text{环境}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_x 为不同窗口薄膜封装的湿度传感器测量的相对湿度值; $R_{\text{环境}}$ 为环境实际相对湿度值; $\Delta R\%$ 为湿度传感器测量的相对误差。不同窗口薄膜封装的湿度传感器测量相对误差曲线见图 2b, 可以看出, AAO/PTFE 复合薄膜封装的湿度传感器测量的相对误差最小, PTFE 滤膜封装的湿度传感器次之, PVDF 滤膜封装的湿度传感器测量的误差最大。随着测量相对湿度点的增大, AAO/PTFE 复合薄膜、PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜封装的湿度传感器测量相对误差由 2% 分别增大到 15%, 17% 和 22%。相对误差曲线可以分为 3 段: 在 30%~50% 的低相对湿度区间, 测量相对误差随相对湿度的上升而变大; 在 50%~80% 的中相对湿度区间, 测量相对误差与试验箱相对湿度无关且保持较高水平; 在大于 80% 的高相对湿度区间, 相对误差逐渐变小。

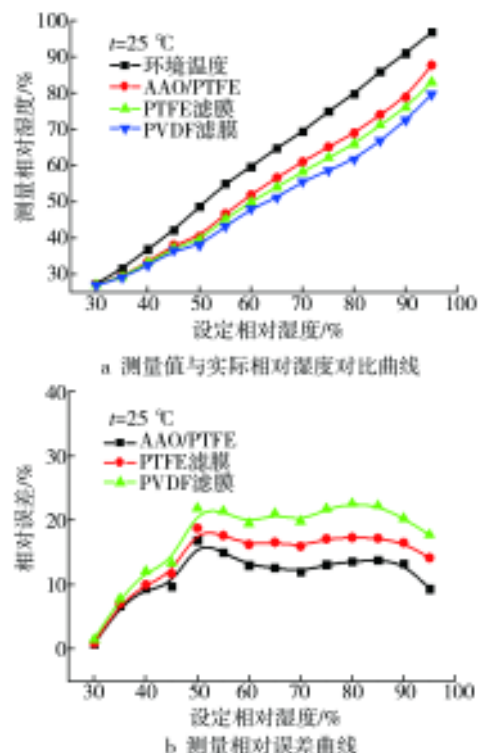


图 2 传感器测量值与实际相对湿度对比曲线及测量误差曲线
Fig.2 Humidity tested by sensors with different packaging windows versus actual humidity at room temperature and relative errors of measurement

测量时实验室温度约为 25 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度约为 65%, 湿度传感器通过封装窗口与试验箱内交换气

体。当试验箱相对湿度大于传感器腔体内相对湿度时,水蒸气通过窗口进入传感器腔体,传感器测量数值变大;当试验箱相对湿度小于传感器腔体内相对湿度时,水蒸气通过窗口逸出,传感器测量数值相应变小。窗口对水蒸气的输运性能,与试验箱中的空气流速相关。空气流速越快,水蒸气输运速率越快,湿度越均匀;空气流速越慢,水蒸气输运速率越慢,越容易产生湿度梯度。在 30%~50%的低相对湿度测量区间,试验箱工作于冷凝除湿模式。由于试验箱内设定相对湿度与外界相对湿度差值较大,试验箱处于高功率冷凝送风状态,且风速与相对湿度差成正比例关系。当测量相对湿度为 30% 时,试验箱内风速最高,水蒸气通过薄膜窗口的输运最快,故管壳内、外测量的相对湿度值差异最小。随着相对湿度测量点由 30% 上升到 50%,试验箱工作功率降低,风速变小引起箱内水蒸气输运放缓,从而导致腔体内、外水蒸气浓度不均匀,传感器测量数值误差变大。在 50%~80%的中相对湿度区间,由于试验箱内、外相对湿度相近,试验箱工作于除湿/加湿的低功率模式,箱内空气流动速率较低,窗口薄膜对水蒸气的输运效率显著降低,传感器测量误差较大。当测量相对湿度进入 80%以上的高相对湿度区间时,试验箱工作于蒸发加湿模式。由于试验箱内、外相对湿度差较大,试验箱处于高功率蒸发和送风状态,较高的风速加速水蒸气在窗口薄膜两侧的流动,降低了传感器腔体内外的湿度梯度,传感器测量误差相应变小。

此外,通过相对湿度测量误差的对比曲线可以发现:在 30%~50%的低相对湿度区间,AAO/PTFE 复合薄膜的水蒸气通透效率与传统的 PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜相近;但在大于 50%的中、高相对湿度区间内,采用 AAO/PTFE 复合薄膜封装的湿度传感器测量误差显著小于 PTFE 和 PVDF 滤膜封装的传感器,表现出优异且稳定的水蒸气输运特性。

将不同窗口薄膜封装的湿度传感器放置于恒温、变湿的环境中,通过比较湿度传感器的动态响应来定性分析薄膜窗口的水蒸气输运特性。在环境相对湿度由 30% 上升至 95% 的条件下,不同窗口薄膜封装的湿度传感器的时间响应曲线见图 3,可以看出,在环境相对湿度变化之前,湿度传感器读数与环境相对湿度基本一致。当环境相对湿度以较快速率变大时,传感器读数在约 20 s 的延时后同时迅速上升。其中 AAO/PEFE 复合薄膜封装的传感器读数上升最快,PTFE 滤膜次之,PVDF 滤膜封

装的传感器读数上升最慢。当传感器读数增大至约 50% 后,上升趋势显著放缓,并在 PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜封装的传感器测量曲线上观察到饱和现象。相对湿度变化的时间响应曲线也可分为 3 个部分:30%~50%的快速上升区,50%~80%的指数增长区和大于 80%的饱和区。在环境相对湿度变化之前,试验箱工作于冷凝除湿状态,传感器腔体内的水蒸气不断通过窗口抽出。试验箱内相对湿度的突变需要试验箱工作模式由冷凝除湿切换为蒸发加湿,在冷凝关闭和蒸发开启的双重驱动下,传感器腔体内的水蒸气由流出转为流入,导致腔体内相对湿度突变,故腔体内传感器读数迅速上升。当相对湿度上升至 50% 时,试验箱内、外相对湿度相当,试验箱工作于低功率状态,此时箱内空气流速较慢,传感器腔体内的相对湿度变化率取决于腔体内、外的相对湿度差。相对湿度差越大,腔内变化率越快;相对湿度差越小,变化率越慢。由相对湿度差驱动的腔体内部相对湿度变化满足指数变化规律。

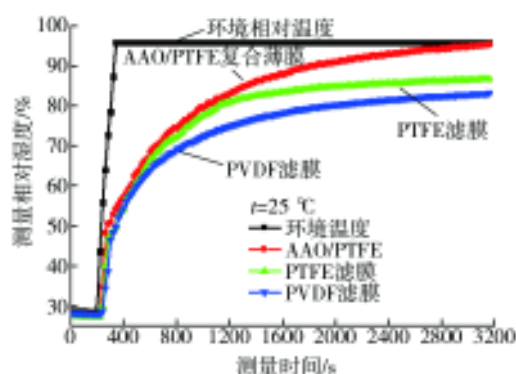


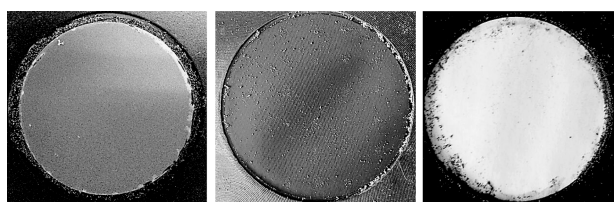
图 3 不同窗口薄膜封装的湿度传感器的时间响应曲线
Fig.3 Time response curves of humidity sensors with different packaging windows at room temperature

窗口薄膜对水蒸气的输运可分为导通和抑制 2 个方面。当传感器腔体内、外湿度梯度较大时,抑制较弱,导通起主导作用;当封装腔体内、外湿度梯度较小时,导通较弱,抑制起主导作用。在大于 80%的高相对湿度区间,传感器腔体内部相对湿度较高,与腔体外恒定的相对湿度 95% 差异较小,此时窗口对水蒸气的输运表现为抑制作用,阻碍腔体内、外的水蒸气进一步交换,从而出现腔体内部传感器测量值趋于饱和的现象。AAO/PTFE 复合薄膜的微孔形状规整且垂直于薄膜表面,相对于 PTFE 和 PVDF 滤膜的多层无规则微孔,AAO/PTFE 复合薄膜通孔长度较短,从而减小了气体与薄膜的接触面积和扩散距离,提高了薄膜对水蒸气通量和输运速率。采用 AAO/PTFE 复合薄膜作为窗口的

湿度传感器测量值与实际值较接近,且相对湿度变化的时间响应速率更快。

2.3 AAO/PTFE 复合薄膜抗漆雾污染研究

将分别用 AAO/PTFE 复合薄膜、PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜作为窗口封装的湿度传感器安装于上海三一重机油漆喷涂房中连续工作 600 h, 观察传感器窗口薄膜的污染状况, 见图 4, 通过对比窗口污染前、后湿度传感器测量差值来评估窗口薄膜对传感器的保护性能, 可以看出 AAO/PTFE 复合薄膜表面粘附颗粒较少, 保持着较高的洁净度。PTFE 滤膜表面均匀粘附着漆雾颗粒, PVDF 滤膜表面粘附的颗粒主要集中在薄膜边缘。分别将湿度传感器在窗口污染前、后的静态测量值和动态时间响应曲线进行对比, 以评估薄膜表面污染对湿度传感器测量的影响。



a AAO/PTFE复合薄膜 b PTFE滤膜 c PVDF滤膜

图 4 传感器窗口薄膜在油漆喷涂房中工作 600 h 后的表面污染状况

Fig.4 Surface contamination of films on humidity sensor window after 600 hours working in paint room

经过三一重机油漆喷涂房漆雾污染前后, 3 种窗口薄膜 (AAO/PTFE 复合薄膜、PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜) 封装的湿度传感器在不同相对湿度点 (30%~90%) 的测量差值见表 1。可以看出, AAO/PTFE 复合薄膜封装的传感器测量差异最小, 对应着其表面粘附的漆雾颗粒最少, 表面最洁净; PVDF 滤膜封装的传感器测量差异最大, 对应着其表面粘附的漆雾颗粒最多。窗口薄膜的表面漆雾污染程度对湿度传感器测量的准确性有较大影响。

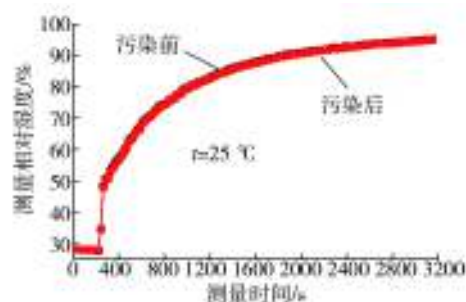
随着环境相对湿度的突变, 封装腔体内传感器测量值也快速上升, 当相对湿度接近 50% 时, 上升速率逐渐变缓, 见图 5。AAO/PTFE 复合薄膜封装的传感器对环境相对湿度变化具有较高的灵敏度, PTFE 滤膜封装的传感器次之, PVDF 滤膜封装的传感器测量延迟时间较长, 且饱和值与实际相对湿度差异较大。AAO/PTFE 复合薄膜、PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜封装的传感器在薄膜污染前、后的动态时间响应曲线对比如图 5。AAO/PTFE 复合薄膜由于其表面漆雾颗粒粘附较少, 对其水蒸气输运性能

影响较小, 故窗口薄膜污染前、后湿度传感器在相同条件下的测量具有较好的重复性。对于 PTFE 和 PVDF 滤膜封装的传感器, 其测量时间响应曲线有较明显的迟滞, 单位相对湿度变化的迟滞时间分别为 4 s 和 6 s。由于窗口薄膜粘附大量的漆雾颗粒, 薄膜的微孔具有不同程度的堵塞, 阻碍了薄膜两侧水蒸气的输运, 导致平衡时腔体内相对湿度比污染前小, 差值分别为 3.5% 和 7.5%。

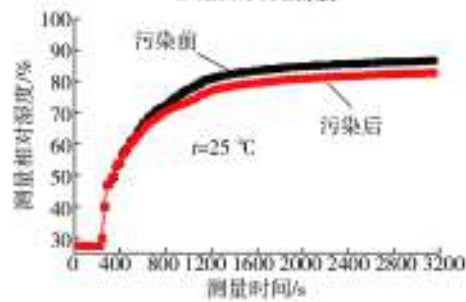
表 1 不同窗口薄膜封装的湿度传感器在漆雾污染前后的测量差值

Tab.1 Measurement offset at different humidity from sensors with different packaging windows before and after painting contamination

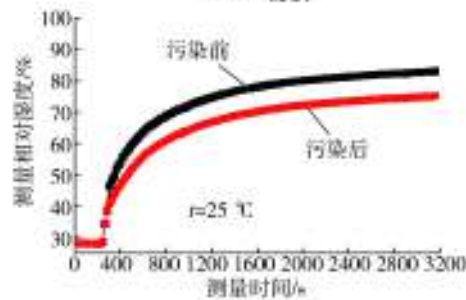
窗口薄膜	不同相对湿度点的测量差值						
	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
AAO/PTFE	0.4	0.4	1.1	1.8	2.4	3.2	3.2
PTFE	0.7	0.9	2.0	3.2	4.5	6.1	6.4
PVDF	1.2	1.8	2.9	3.9	6.8	9.8	10.6



a AAO/PTFE薄膜



b PTFE滤膜



c PVDF滤膜

图 5 不同薄膜封装的湿度传感器污染前后时间响应曲线对比
Fig.5 Comparison of time response curves of humidity sensors with different thin film packaging before and after pollution

3 结语

通过旋涂法在双通 AAO 薄膜上制备 PTFE 微孔膜, 并将该复合薄膜应用于湿度传感器的抗漆雾污染封装中。扫描电镜显示, 经过高温熔融的 PTFE 薄膜均匀覆盖于 AAO 表面孔隙处, 并保持着 AAO 薄膜原有的六边紧密堆积的膜胞结构。作为湿度传感器的封装窗口, 相对于传统的 PTFE 滤膜和 PVDF 滤膜, AAO/PTFE 薄膜表现出更优异的水蒸气输运特性和更强的抗污染能力。静态和动态测量结果表明, AAO/PTFE 复合薄膜对湿度传感器造成最大 15% 的测量误差, 且误差曲线可以分为 30%~50% 的低相对湿度区间、50%~80% 的中相对湿度区间和大于 80% 的高相对湿度区间。静态测量的差异主要是因为在不同相对湿度区间内试验箱中空气流动速率不同, 而动态响应的差异源自不同区间内管壳内、外不同的相对湿度差。油漆喷涂现场试验结果表明, PTFE 薄膜的涂覆不仅保留了 AAO 薄膜较大的水蒸气通量, 还有效提高了其表面抗污染能力。鉴于 AAO/PTFE 复合薄膜优异的水蒸气输运性能和抗化学污染能力, 可将其应用于复杂环境中传感器的防尘、抗化学粘附封装以及气体分离领域。

参考文献:

- [1] 周先达. 应用 PTFE 覆膜脉冲除尘器对漆雾进行高效分离[J]. 广州化工, 2011, 39(12):52—54.
ZHOU Xian-da. The Application of PTFE Membrane Impulse Filter in High Efficient Separation of Painting Mist[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(12): 52—54.
- [2] LI Yi, LING Zhi-yuan, CHEN Shou-shou, et al. Novel AAO Films and Hollow Nanostructures Fabricated by Ultra-High Voltage Hard Anodization[J]. Chemical Communications, 2010, 46(2):309—311.
- [3] AHN K H, SONG J H, CHA H Y. Application of Tubular Ceramic Membranes for Reuse of Wastewater from Building[J]. Water Science & Technology, 1998, 38(4): 373—382.
- [4] LAITINEN N, LUONSI A, LEVANEN E, et al. Modified and Unmodified Alumina Membranes in Ultrafiltration of Board Mill Wastewater Fractions[J]. Desalination, 1998, 115(1):63—70.
- [5] SHARMA G, SHON H K, PHUNTSHO S. Electrocoagulation and Crossflow Microfiltration Hybrid System: Fouling Investigation[J]. Desalination & Water Treatment, 2012, 43(1):253—255.
- [6] 陈一. 表面改性纳米氢氧化铝及复合体系阻燃聚丙烯的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(3):18—21.
CHEN Yi. Study on the Flame-retardancy of Surface Modified Nano-Al(OH)₃ and Its Composite in PP[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3):18—21.
- [7] 丁云飞, 伍彬, 吴会军. 柱状微结构超疏水表面制备及其结霜性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 106—111.
DING Yun-fei, WU Bin, WU Hui-jun. Preparation of Super-hydrophobic Surface with Cylindrical Microstructure and the Research of the Surface Frost Characteristics[J]. Surface Technology, 2015, 44(1):106—111.
- [8] 王志高, 邢卫红, 徐南平. 陶瓷膜过滤牛初乳过程的污染阻力分析[J]. 膜科学与技术, 2004, 24(1):28—31.
WANG Zhi-gao, XING Wei-hong, XU Nan-ping. Resistance of Fouling Materials in Bovine Colostrum Filtration Via Ceramic Membrane Process[J]. Membrane Science and Technology, 2004, 24(1):28—31.
- [9] 吴少华. 阳极氧化铝膜新型制备工艺及其过滤性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
WU Shao-hua. Study of New Preparation and Characterization on AAO Film[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2010.
- [10] 黄肖容, 隋贤栋, 刘悦晖. 用梯度氧化铝膜净化空气[J]. 环境工程, 2001, 19(6):32—35.
HUANG Xiao-rong, SUI Xian-dong, LIU Yue-hui. Cleaning Air by Filtration of Gradient Alumina Membranes[J]. Environmental Engineering, 2001, 19(6): 32—35.
- [11] 汪佛池, 李成榕, 吕玉珍. 憎水性涂层对铝单丝表面覆冰性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 123—128.
WANG Fo-chi, LI Cheng-rong, LYU Yu-zhen. Influence of Hydrophobic Coating on Ice Accretion on Aluminum Conductor[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(10):123—128.
- [12] 韩永生, 郝利荣, 郭利春. 聚四氟乙烯、硅油共同改性聚苯乙烯包装材料的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(3):33—35.
HAN Yong-sheng, HAO Li-rong, GUO Li-chun. Study on PTFE and Silicone Oil Modified Polystyrene Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3):33—35.
- [13] 赵坤, 杨保平, 张俊彦. 铝合金基体上超疏水表面的制备及其性能[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(3): 448—452.

- ZHAO Kun, YANG Bao-ping, ZHANG Jun-yan. Preparation and Performance of Super-Hydrophobic Surface on an Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2010, 28(3):448—452.
- [14] 樊占国, 衣晓红, 苏海, 等. TC₄ 钛合金表面 TiO₂-PTFE 复合膜层的制备[J]. 功能材料, 2010, 41(1):169—172.
- FAN Zhan-guo, YI Xiao-hong, SU Hai, et al. Preparation of TiO₂-PTFE Compound Coating on TC₄ Titanium Alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(1):169—172.
- [15] 郑宇飞, 旷亚非, 周海晖, 等. 铝高压阳极氧化制备 Al₂O₃-PTFE 复合氧化膜[J]. 电镀与环保, 2005, 25(6): 41—43.
- JIA Yu-fei, KUANG Ya-fei, ZHOU Hai-hui, et al. Preparation of Al₂O₃-PTFE Composite Anodizing Film on Al by High Voltage Anodization[J]. Electroplating & Pollution Control, 2005, 25(6):41—43.
- [16] YU Li-yun, XU Zhen-liang, SHEN Hong-mei, et al. Preparation and Characterization of PVDF-SiO₂ Composite Hollow Fiber UF Membrane by Sol-Gel Method[J]. Journal of Membrane Science, 2009(1):257—265.
- [17] 邹洪庆, 刘爱民, 吴厚昌, 等. 铝及铝合金含氟聚合物协和涂层技术研究[J]. 材料保护, 2002, 35(10):9—11.
- ZOU Hong-qing, LIU Ai-min, WU Hou-chang, et al. Synergistic Fluoropolymer Coatings on Aluminum and Its Alloys[J]. Materials Protection, 2002, 35(10):9—11.