

环境试验与观测

电容式湿度传感器温-湿-盐雾耦合 环境损伤效应与机理研究

李晗^{1,2,3}, 魏小琴^{1,2,3}, 邓家卫⁴, 滕俊鹏^{1,2}, 赵阳^{1,2,3},
赵方超^{1,2}, 刘世乡^{1,2}, 周雪鹏¹, 刘伟^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.中国兵器装备集团 弹药贮存环境效应重点实验室, 重庆 400039; 3.漠河大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 黑龙江 漠河 165301; 4.陆军装备部驻重庆地区军事代表室, 重庆 400042)

摘要: 目的 研究电容式湿度传感器在温-湿-盐雾耦合环境作用下的性能退化规律和失效机理。方法 将电容式湿度传感器放置在三因素循环 ($85^{\circ}\text{C}+85\%\text{RH} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}+0.05\%\text{NaCl}$ 中性盐雾 $\rightarrow 35^{\circ}\text{C}+50\%\text{RH}$ 干燥) 环境下进行加速老化试验, 定期取样, 分析响应时间和测量精度退化规律, 研究温-湿-盐雾对电容式湿度传感器的环境损伤机制。结果 在三因素环境下老化 7 d, 湿度传感器在标准湿度 ($>50\%\text{RH}$) 环境下感应异常; 老化 14 d, 湿度传感器在每种标准湿度环境下感应异常。测试发现, 湿敏电容的电容量偏大, 绝缘电阻偏小, 损耗角正切偏大, 确定湿敏电容失效。湿度传感器在温-湿-盐雾环境下, 在盐雾阶段, 盐粒子沉积在湿敏材料表面, 在干燥阶段水分挥发, 最终在湿敏材料表面形成不规则颗粒物, 造成湿敏电容绝缘性能降低。在通电测试时, 不规则颗粒物在电场作用下易发生尖端放电, 使得感湿材料绝缘性能下降, 同时伴随有腐蚀和击穿烧蚀, 使湿敏电容发生失效。结论 湿度传感器在温-湿-盐雾环境下, 盐粒子易附着在感湿材料上, 在通电环境下发生击穿烧蚀, 造成湿度传感器功能失效。

关键词: 电容式湿度传感器; 温-湿-盐雾; 加速老化; 环境损伤; 损伤机理

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0161-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.020

Environmental Damage Effect and Mechanism of Capacitive Humidity Sensor under the Coupling of Temperature-Humidity-Salt Spray

LI Han^{1,2,3}, WEI Xiao-qin^{1,2,3}, DENG Jia-wei⁴, TENG Jun-peng^{1,2}, ZHAO Yang^{1,2,3},
ZHAO Fang-chao^{1,2}, LIU Shi-xiang^{1,2}, ZHOU Xue-peng¹, LIU Wei^{1,2}

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. CSGC Key Laboratory of Ammunition Storage Environmental Effects, Chongqing 400039, China; 3. Mohe Material Atmospheric Corrosion Station of National Outdoor Scientific Observation and Research, Heilongjiang Mohe 165301, China; 4. Military Representative Office of Army Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400042, China)

收稿日期: 2022-11-10; 修訂日期: 2022-12-26

Received: 2022-11-10; Revised: 2022-12-26

作者简介: 李晗 (1987—), 男, 硕士。

Biography: LI Han (1987-), Male, Master.

引文格式: 李晗, 魏小琴, 邓家卫, 等. 电容式湿度传感器温-湿-盐雾耦合环境损伤效应与机理研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 161-167. LI Han, WEI Xiao-qin, DENG Jia-wei, et al. Environmental Damage Effect and Mechanism of Capacitive Humidity Sensor under the Coupling of Temperature-Humidity-Salt Spray[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 161-167.

ABSTRACT: The work aims to study the degradation law and failure mechanism of capacitive humidity sensor under the coupling environment of temperature-humidity-salt spray. The capacitive humidity sensor was placed in the three-factor ($85^{\circ}\text{C} + 85\%\text{RH} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} + 0.05\%\text{NaCl}$ neutral salt spray $\rightarrow 35^{\circ}\text{C} + 50\%\text{RH}$ drying) cycle environment for accelerated aging test and sampled regularly to analyze the degradation law of response time and measurement accuracy and study the environmental damage mechanism of temperature-humidity-salt spray on capacitive humidity sensor. After aging for 7 days in the three-factor environment, the humidity sensor in the standard humidity ($> 50\%\text{RH}$) environment had abnormal induction. After aging for 14 days, the humidity sensor in every standard humidity environment had abnormal induction. When the humidity sensitive capacitor was tested, it was found that the capacitance was rather large, the insulation resistance was rather small, and the loss angle tangent was rather large, which determined the failure of the humidity sensitive capacitor. In temperature-humidity-salt spray environment, particles deposited on the surface of humidity sensitive material in salt spray phase. In drying stage, moisture volatilized and irregular particles formed on the surface of humidity sensitive material, which reduced the insulation performance of humidity sensitive capacitor. In the current test, irregular particles were prone to generating power at the tip under the action of electric field, which degraded the insulation performance of humidity sensitive material, accompanied by corrosion, breakdown and ablation, and eventually the failure of humidity sensitive capacitor. When humidity sensor is in temperature-humidity-salt spray environment, salt particles are easy to adhere to the humidity sensitive material and breakdown and ablation occur in the current environment, resulting in the function failure of humidity sensor.

KEY WORDS: capacitive humidity sensor; temperature-humidity-salt spray; accelerated aging; environmental damage; damage mechanism

传感器技术是现代电子信息技术三大核心技术之一，已广泛应用于航空、航天、船舶等装备上，起视觉、触觉、嗅觉等关键作用^[1-2]。湿度传感器作为最常用的一种传感器，广泛应用于部队危险品库房环境、装备内部微环境、气象站环境因素监测等行业中^[3-8]。其中，电容式传感器由于具有灵敏度高、线性度好、响应时间短等优点而被广泛应用^[9-15]。

目前，国内外对湿度传感器的环境适应性、性能退化和失效机理方面的研究报道较少^[16-17]。张广学等^[16]研究了湿敏元件在热循环（ $-20\sim60^{\circ}\text{C}$ ）和真空热循环（ $-20\sim60^{\circ}\text{C}$ /压力 $\leq 100\text{ Pa}$ ）试验后样品的失效机理，得出主要是由于湿敏材料上杂质的引入引起失效。行业对电容式湿度传感器相关研究报道的重点在湿度敏感材料和电路设计研究，如庄庄^[18]通过以磺化聚醚酮类材料作为湿敏材料，通过掺杂 CaCl_2 可以提高湿度传感器的灵敏度和降低湿度传感器的湿滞。黄宜明^[19]以常规聚酰亚胺为感湿材料，通过纳米二氧化钛的掺杂，设计出的电容式湿度传感器不仅灵敏度高、湿滞低，还可降低输出误差。郑昊^[20]利用 γ 相 Al_2O_3 纳米粉体制备出 Al_2O_3 感湿材料，在通过 H_2O_2 亲水性处理后，制得的湿度传感器具有响应区间广、低湿环境下敏感性高、稳定性好等优点。郑丽等^[21]通过对湿敏材料的选型、工艺参数和结构设计等方面的优化，设计出的湿度传感器具有湿滞小的优异特性。还有很多研究者^[22-24]通过其他手段来提升湿度传感器的性能。

本文利用三因素循环（ $85^{\circ}\text{C} + 85\%\text{RH} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} + 0.05\%\text{NaCl}$ 中性盐雾 $\rightarrow 35^{\circ}\text{C} + 50\%\text{RH}$ 干燥）环境下的加速老化试验，分析响应时间和测量精度退化规

律，研究温-湿-盐雾对电容式湿度传感器的环境损伤机制，揭示湿度传感器在温-湿-盐雾环境下失效机制，为提升湿度传感器环境适应性提供支撑。

1 试验

试验样品为电容式湿度传感器，量程为 10%~90%，在 0~50 °C 范围内的测量精度 $\pm 3\%$ ，响应时间 $< 45\text{ s}$ 。采用自研的大气腐蚀环境试验箱（专利号：ZL201911366403.7^[25]），开展三因素循环加速试验：湿热（ $85^{\circ}\text{C} + 85\%\text{RH}$, 8 h） \rightarrow 中性盐雾（ $40^{\circ}\text{C} + 0.05\%\text{NaCl}$, 8 h） \rightarrow 干燥（ $35^{\circ}\text{C} + 50\%\text{RH}$, 8 h） $\rightarrow \dots$ ，单个循环时长为 24 h。

1) 响应时间与测量精度测试。按照湿度传感器技术文件，采用湿度发生器、精密露点仪设备，在湿度传感器全量程范围内选择均匀分布的 5 个测试点（ $10\%\pm 2\%、30\%\pm 2\%、50\%\pm 2\%、70\%\pm 2\%、90\%\pm 2\%$ ）。在各湿度点平衡 40~60 min 后，测试并记录传感器的电压信号输出值，然后经过数据处理，得到响应时间和测量精度。

2) 外观检测。采用基恩士 VHX-700 型立体显微镜检查外表面腐蚀形貌，放大倍率为 30~200 倍。

3) 微观分析。采用 Nordson Dage XD 7500 型 X 射线透视仪分析基底的破损情况。采用 Thermo Scientific Apreo 2S 型冷场发射扫描电子显微镜观察湿敏电容的微观形貌，放大倍率为 400~2 000 倍。采用 Oxford UltimMax40 型能谱仪分析湿敏电容的成分，加速电压为 20 kV。

4) 电性能测试。采用 HIOKI IM3536 型 LCR 测

试仪检测湿敏电容的电性能, 测试电压为 3 V, 频率为 1 kHz。

2 结果与讨论

2.1 样品性能退化规律

根据不同标准湿度环境下的输出电压, 通过转换公式, 计算响应时间和测量精度, 结果见表 1。由表 1 可知, 电容式湿度传感器在三因素环境下进行加速

老化 7 d, 在 10%、30% 和 50% 标准湿度环境下, 电压信号输出值正常。当标准湿度环境超过 50% 时, 整个电路中电压信号无输出。当老化 14 d 时, 传感器在 10%、30%、50%、70%、90% 的标准湿度环境下, 电压信号输出值为 0.03~0.4 mV, 远小于正常的电压信号输出值。电容式湿度传感器在温度-湿度-盐雾的环境下, 响应时间和测量精度性能在短期内就会快速发生衰退至失效。

表 1 试验样品的测试结果
Tab.1 Test results of sample

试验时间/d	不同标准湿度环境下电压信号输出值/mV					响应时间/s	测量精度/%
	10%±2%	30%±2%	50%±2%	70%±2%	90%±2%		
0	0.49	1.53	2.45	3.32	4.19	23.3	1.0
7	0.46	1.51	2.36	*	*	/	/
14	0.03	0.04	0.03	0.03	0.38	/	/

注: *表示无输出信号值, /表示通过测量不能计算得出结果。

2.2 失效分析

2.2.1 失效定位

采用湿度发生器、精密露点仪对试验后样品按照产品技术条件进行复核测试, 发现样品湿度输出电压值为 0。对湿度传感器的电路进行测试, 其中 CAPA 和 CAPB 的数值分别对应着湿度敏感元件震荡频率和参比电容震荡频率。由测试数据可知, 参比电容频率为 4.7 kHz 左右, 湿度敏感元件输出频率小于 4.0 kHz, 超出了正常震荡频率的范围 (4.5~4.7 kHz), 初步推断为湿度敏感电容器件出现了异常。

采用 LCR 测试仪对传感器上的湿敏电容元件进行复核测试, 发现湿敏电容元件容值为 6.84×10^3 pF,

比正常元件电容值 (180~210 pF) 偏大; 绝缘电阻为 0.62 MΩ, 比正常元件绝缘电阻值 (1.0×10^4 MΩ) 偏小; 损耗角正切值为 1.380, 比正常元件 (0.003) 偏大。由此可以说明, 湿敏电容为失效部位。

2.2.2 外观检测

采用 3D 测量显微镜 (放大倍数为 30 倍) 观测失效湿度传感器和完好样湿度传感器上湿敏电容的外观 (见图 1a、b) 与金相形貌 (见图 1c—h)。从图 1a、b 的光学形貌和图 1c—h 金相形貌看, 失效的湿敏电容器件表面存在多处腐蚀痕迹, 且在器件左侧存在几个过电烧蚀形貌, 而完好的湿敏电容器件表面虽存在污迹, 但未见明显腐蚀和烧蚀形貌。

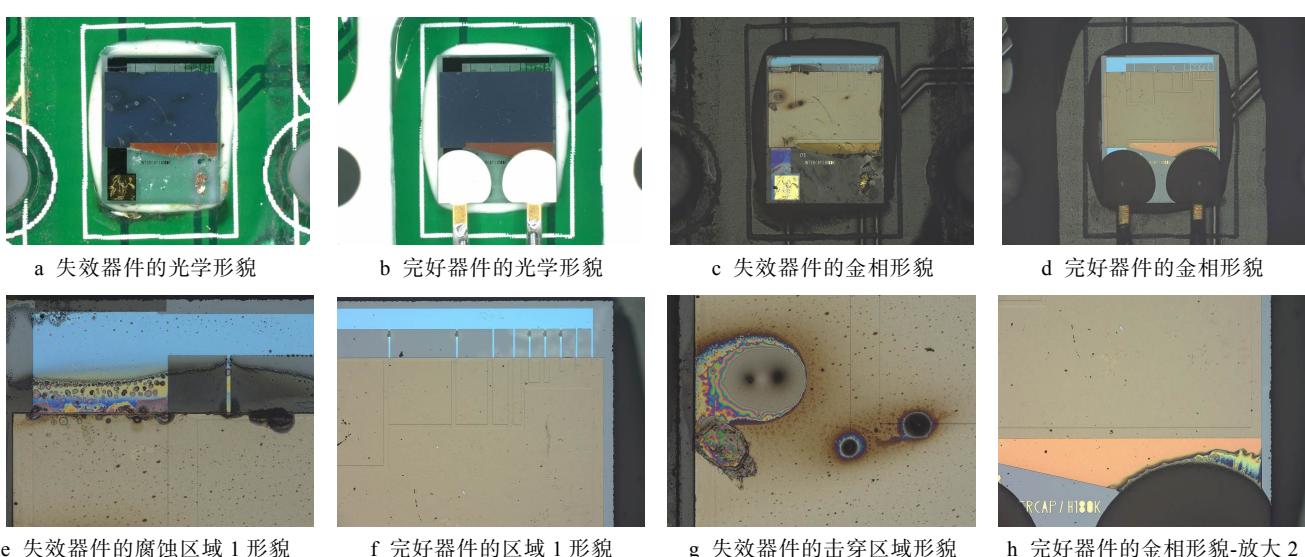


图 1 湿敏器件的立体显微镜形貌

Fig.1 Stereomicroscope morphology of humidity sensitive device: a) optical morphology of the failed device; b) optical morphology of intact devices; c) metallographic morphology of the failed device; d) metallographic morphology of the intact device; e) morphology of corrosion zone 1 of the failed device; f) morphology of corrosion zone 1 of the intact device; g) morphology of breakdown zone of the failed device; h) metallographic morphology of the intact devices-magnified at 2

2.2.3 微观分析

采用 X 射线透视仪对湿敏电容器件底部完整性进行检查(见图 2), 未发现器件基底有明显破损痕迹。

图 3a—c 为失效的湿敏电容器件腐蚀区域和电击穿区域的扫描形貌图, 图 3d 为完好湿敏电容器件相同区域的扫描形貌。在扫描电镜下可以清晰地看见, 失效湿敏电容介质层存在击穿烧蚀点, 且下边缘的腐蚀区域也存在明显的熔融形貌, 击穿区域能观察到镀层裂纹生成; 完好的湿敏电容基材在扫描电镜下呈现得十分光滑。采用 EDS 对湿敏电容表面进行成分分析, 结果见表 2。

由表 2 可知, 失效湿敏电容腐蚀区域 1 的 C、O 元素明显高于完好湿敏电容的相同区域, 推测可能是由于表面存在一定程度的烧蚀和氧化。再结合失效湿敏电容击穿形貌处的 SEM 结果, 击穿区域的介质层

被烧蚀, 但其表面仅有龟裂状形貌, 推测器件表面存在一层保护层, 使击穿烧蚀区域无法完全暴露出来, 同时也在一定程度上阻挡了介质污染区域的检测与分析。

2.3 失效机理分析

湿敏电容的结构见图 4。从图 4 可知, 湿敏电容以湿度敏感材料(如高分子材料、多孔陶瓷、多孔氧化物等等)作为电容介质层, 玻璃基板为基底, 通过溅射金并光刻制成下电极和上下电极引线, 以高分子材料作为湿敏敏感材料, 通过溅射金将电极与电极引线实现连接, 再加上保护层形成湿敏电容器件。当在潮湿的环境中, 湿敏材料吸收环境中的水蒸气后, 引起材料的介电常数发生变化, 表现出敏感器件的电容量发生变化, 从而可以换算出环境中的相对湿度^[20-21]。

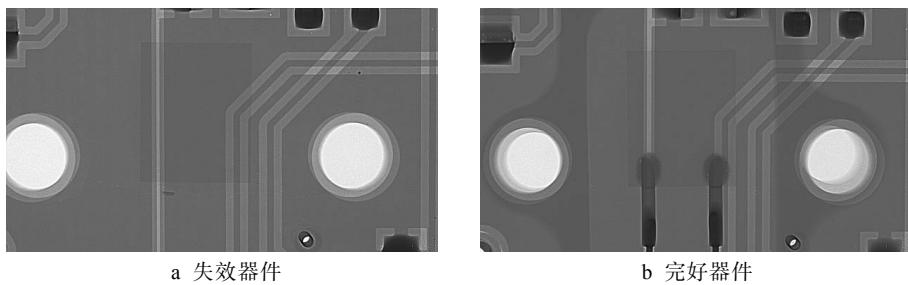


图 2 湿敏电容器件基底的 X 射线图
Fig.2 X-ray of the bottom of humidity sensitive capacitor: a) failed capacitor; b) intact capacitor

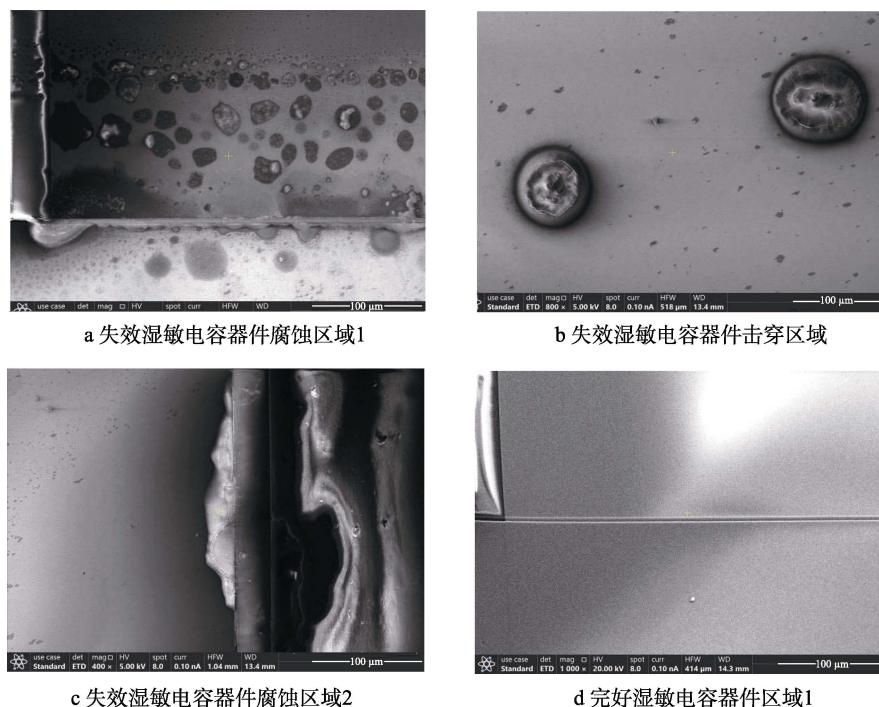


图 3 湿敏电容器件 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphology of humidity sensitive capacitor: a) corrosion zone 1 of failed humidity sensitive capacitor; b) breakdown zone 1 of failed humidity sensitive capacitor; c) corrosion zone 2 of failed humidity sensitive capacitor; d) zone 1 of intact humidity sensitive capacitor

表 2 湿敏电容的成分分析结果 (质量分数, %)
Tab.2 Composition analysis results of humidity sensitive capacitor (mass fraction, %)

测试区域	C	O	Si	Ti	Br	Sn	Sb
腐蚀区域 1	43.46	42.66	11.68	0.93	0.13	0.16	0.14
	33.54	62.13	3.95	0.24	0.15	/	/
	35.48	34.08	25.23	2.32	2.54	/	0.35
	23.38	30.74	37.90	3.53	4.06	/	0.38
腐蚀区域 3	24.97	69.78	4.17	0.85	/	/	0.24
	46.35	32.58	17.13	0.11	0.16	0.20	0.17
击穿区域 1	38.69	61.03	0.15	0.03	0.09	0.11	0.01
	43.46	42.66	11.68	0.93	0.13	0.16	0.14
完好样品区域 1	28.47	29.98	35.10	2.59	3.75	/	0.10
	35.75	55.97	7.73	0.54	0.01	0.27	0.27

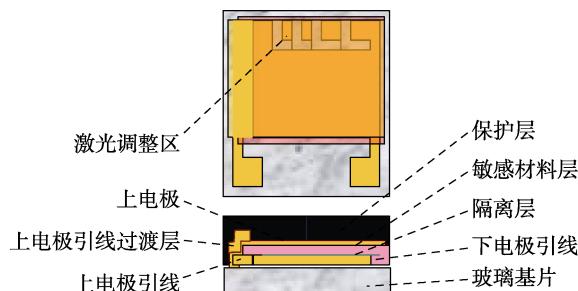


图 4 湿敏电容结构
Fig.4 Structure of the humidity sensitive capacitor

根据试验结果, 湿敏电容是湿度传感器的薄弱环节。在温-湿-盐雾的试验环境下, 在湿热阶段试验箱体内的水蒸气会将整个湿度传感器表面润湿, 包括湿敏电容内部。当试验程序进入到盐雾阶段时后, 实验箱体内部充满盐雾气氛, 盐雾粒子(主要为钠粒子、氯粒子)又会将整个湿度传感器包裹, 部分盐雾粒子会溶解在湿敏电容的感湿材料表面的水分子中。当在试验程序转入干燥阶段后, 感湿材料上的水分在温度的作用下挥发掉, 剩下少量的固体盐颗粒沉积在湿敏电容内部的湿敏材料表面上, 随着老化时间的增加, 盐粒子最终形成颗粒物。

带钠粒子和氯粒子的颗粒物是具有导电性的, 这将会引起湿敏电容内部绝缘层的绝缘性能下降。同时, 由于这些颗粒物呈现出不规则的形状, 当通电测试时会产生电场, 导电颗粒物带有尖端放电(如图 5 所示)的特点, 使得杂质周边具有极高的电场强度,

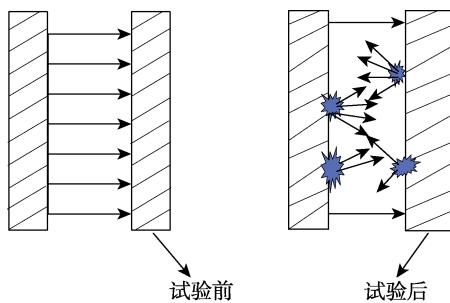


图 5 颗粒物尖端放电
Fig.5 Tip discharge of particle

导致整个感湿膜的绝缘性能降低, 最终会伴随着腐蚀和烧蚀的发生, 又产生了新导电介质。随着老化试验和测试循环的进行, 最终导致湿敏电容失效。

3 结论

1) 电容式湿度传感器在三因素($85^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/8\text{ h} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}/0.05\%\text{NaCl}$ 中性盐雾/ $8\text{ h} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}/50\%\text{RH}$ 干燥/ 8 h)环境下进行加速老化试验, 7 d 时样品出现异常, 14 d 后完全失效。

2) 在温度-湿度-盐雾等多因素耦合环境作用下, 盐雾环境中的盐粒子会附着在感湿材料上。当感湿材料处于干燥环境时, 水分挥发后, 盐粒子便沉积在感湿材料表面。随着老化时间的持续, 盐粒子会在感湿材料上形成盐颗粒, 降低湿敏电容的绝缘耐压性能。当有电流通过时, 盐颗粒出现尖端放电, 发生击穿烧蚀, 最终导致器件功能失效。

参考文献:

- [1] 刘超. 敏感材料及传感器发展探析[J]. 新材料产业, 2022(3): 2-6.
LIU Chao. Analysis on the Development of Sensitive Materials and Sensors[J]. Advanced Materials Industry, 2022(3): 2-6.
- [2] 段成丽, 齐文杰. 军用传感器的发展趋势与对策[J]. 传感器技术, 2003, 22(11): 4-8.
DUAN Cheng-li, QI Wen-jie. Development Trend and Countermeasure of Military Sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(11): 4-8.
- [3] 顾菊芬, 许卫洪. 危险品库房监控系统设计[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(6): 106-107.
GU Ju-fen, XU Wei-hong. Design of Monitoring System of Dangerous Goods Depot[J]. Industrial Control Computer, 2015, 28(6): 106-107.
- [4] 刘琦, 杨芳, 陆蔺辉, 等. 特种装备内部环境气氛传感系统设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(10):

- 108-110.
- [5] LIU Qi, YANG Fang, LU Lin-hui, et al. Design and Implementation of Gas Sensing System for Internal Environment of Special Equipment[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(10): 108-110.
- [6] 赵昊, 彭泽亚, 陈选龙, 等. 气密封元器件内部气氛分析方法发展研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(3): 92-94.
- [7] ZHAO Hao, PENG Ze-ya, CHEN Xuan-long, et al. Research on the Development of the Analysis Method for Internal Atmosphere of Hermetically Sealed Components[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2022, 40(3): 92-94.
- [8] NAJEEB M A, AHMAD Z, SHAKOOR R A. Organic Thin-Film Capacitive and Resistive Humidity Sensors: A Focus Review[J]. Advanced Materials Interfaces, 2018, 5(21): 1800969.
- [9] TRUNG T Q, DUY L T, RAMASUNDARAM S, et al. Transparent, Stretchable, and Rapid-Response Humidity Sensor for Body-Attachable Wearable Electronics[J]. Nano Research, 2017, 10(6): 2021-2033.
- [10] BALAKRISHNAN V, DINH T, FOISAL A R M, et al. Paper-Based Electronics Using Graphite and Silver Nanoparticles for Respiration Monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(24): 11784-11790.
- [11] 王成杨, 王亚彬, 金建东, 等. 电容式聚酰亚胺湿敏元件保护膜研究[J]. 信息技术, 2016, 40(4): 69-72.
- [12] WANG Cheng-yang, WANG Ya-bin, JIN Jian-dong, et al. Study on Protecting Layer of Capacitive-Type Polyimide Humidity Sensor[J]. Information Technology, 2016, 40(4): 69-72.
- [13] 郑丽, 金建东, 司良有, 等. 降低高分子电容式湿敏元件湿滞的实验研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(6): 27-29.
- [14] ZHENG Li, JIN Jian-dong, SI Liang-you, et al. Experimental Study on Humidity Hysteresis Reducing of Polymer Capacitive Humidity Sensitive Element[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(6): 27-29.
- [15] 陈博, 陈伟香, 唐丽荣, 等. 基于硝化纳米纤维素/琼脂的高灵敏度湿度传感器[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2604-2614.
- [16] CHEN Bo, CHEN Wei-xiang, TANG Li-rong, et al. A Highly Sensitivity Humidity Sensor Based on Nitrocellulose Nanocrystals/Agar[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(5): 2604-2614.
- [17] CHOI K H, SAJID M, AZIZ S, et al. Wide Range High Speed Relative Humidity Sensor Based on PEDOT: PSS-PVA Composite on an IDT Printed on Piezoelectric Substrate[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 228: 40-49.
- [18] LUO Li-ming, YUAN Ming-liang, SUN Hong-juan, et al. Effect of Calcination Temperature on the Humidity Sensitivity of TiO₂/Graphene Oxide Nanocomposites[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2019, 89: 186-193.
- [19] TANG Yong-liang, LI Zhi-jie, MA Jin-yi, et al. Highly Sensitive Surface Acoustic Wave (SAW) Humidity Sensors Based on Sol-Gel SiO₂ Films: Investigations on the Sensing Property and Mechanism[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 215: 283-291.
- [20] 程军. 传感器及实用检测技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [21] CHENG Jun. Sensor and Practical Detection Technology[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008.
- [22] 张广学, 司良有, 金建东, 等. 湿敏元件在恶劣环境下的失效机理分析[J]. 信息技术, 2010, 34(5): 17-19.
- [23] ZHANG Guang-xue, SI Liang-you, JIN Jian-dong, et al. Analysis of Humidity Sensors Failure Mechanism under Harsh Environment[J]. Information Technology, 2010, 34(5): 17-19.
- [24] 刘若望, 李扬, 杨慕杰. 高分子电阻型湿敏材料的老化机理[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(1): 106-109.
- [25] LIU Ruo-wang, LI Yang, YANG Mu-jie. Aging Mechanism of Polymer Resistive-Type Humidity Sensitive Material[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2010, 28(1): 106-109.
- [26] 庄庄. 碘化聚醚酮类湿敏材料的设计及其湿度传感器的性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [27] ZHUANG Zhuang. The Design and Performance Study of Polymeric Humidity Sensors Based on Sulfonated Poly(Ether Ether Ketone)s[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [28] 黄宜明. 基于聚酰亚胺薄膜的电容式湿度传感器研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [29] HUANG Yi-ming. Research on Capacitive Humidity Sensor Based on Polyimide Film[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [30] 郑昊. 基于氧化铝薄膜的湿度传感器及其湿敏特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [31] ZHENG Hao. Research of Humidity Sensitivity Characteristics of Humidity Sensors Based on Alumina Film[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [32] 郑丽, 金建东, 卢崇考. 电容式高分子湿敏材料功能设计[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(S1): 66-67.
- [33] ZHENG Li, JIN Jian-dong, LU Chong-kao. Function Design on Capacitive Humidity Sensitive Polymer[J]. Micro-nanoelectronic Technology, 2007, 44(S1): 66-67.
- [34] 田海军, 薛家兴, 薛彦杰. 电容式湿度传感器的设计

- [J]. 现代电子技术, 2017, 40(14): 128-131.
- TIAN Hai-jun, XUE Jia-xing, XUE Yan-jie. Design of Capacitive Humidity Sensor[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(14): 128-131.
- [23] 黄宜明, 丁书聪, 梁峻阁, 等. TiO₂/PI 复合薄膜对湿度传感器性能的影响[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(8): 49-52.
- HUANG Yi-ming, DING Shu-cong, LIANG Jun-ge, et al. Effect of TiO₂/PI Composite Thin Film on Performance of Humidity Sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(8): 49-52.
- [24] 王冰梅, 高翔, 杨恒祥, 等. 电容式湿度传感器响应特性研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 27-29.
- WANG Bing-mei, GAO Xiang, YANG Heng-xiang, et al. Research on Response Characteristics of Capacitive Humidity Sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 27-29.
- [25] 魏小琴, 李晗, 蒲亚博, 等. 2A12 铝合金动态腐蚀-疲劳耦合失效机理研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 359-365.
- WEI Xiao-qin, LI Han, PU Ya-bo, et al. Study on Dynamic Corrosion-Fatigue Coupling Failure Mechanical of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 359-365.

责任编辑: 刘世忠