海岛应急保障设备防潮防尘防盐雾一体化微环境控制技术及性能验证

刘元海[1]，陈川[2]，李秋平[1]，张鑫[1*]

（1.中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室，湖北 荆门 448035；
2.中国电器科学研究院有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室，广州 510663）

摘要：目的 研发防潮防尘防盐雾一体化微环境控制技术与过滤设备，为延长海岛应急保障设备寿命提供技术支撑。**方法** 通过对比过滤器入口与出口湿度的变化情况，评估其防潮性。在试验棚下测试开启和未开启过滤设备过程中灰尘浓度的变化情况，测试其防尘性。利用吸气法采集过滤器前后端盐雾浓度，对比其过滤效率。利用高精度铜腐蚀片还原法，表征过滤前后盐雾浓度对腐蚀性的影响情况。**结果** 采用防潮防尘防盐雾一体化控制技术后，相对湿度由 94%降至 72%，粉尘质量浓度降低至 3 μg/m^3 以下，环境腐蚀等级由 G2 降至 G1，盐雾浓度水平由 Sc3 降至 Sc1。**结论** 防潮防尘防盐雾一体过滤技术具有良好的防潮、防尘以及防盐雾效果，可为海洋服役环境下的应急保障设备优化使用环境，保障其安全运行。

关键词：防潮；防尘；防盐雾；过滤性能；一体化设备；应急保障设备

中图分类号：TG174.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1672-9242(2024)01-0135-07

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2024.01.018

Integrated Micro-environment Control Technology and Performance Verification of Island Emergency Support Equipment Against Moisture, Dust and Salt Spray

LIU Yuanhai[1], *CHEN Chuan*[2], *LI Qiuping*[1], *ZHANG Xin*[1*]

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Protection and Control, China Special Vehicle Research Institute, Hubei Jingmen 448035, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: The work aims to study the integrated micro-environment control technology and filter equipment against moisture, dust and salts pray, so as to provide technical support for extending the life of island emergency support equipment. The moisture resistance of filter was evaluated by comparing the humidity change at the filter inlet and outlet. The dust resistance was evaluated by testing the change of dust concentration in the natural environment when the filter system was opened or not opened under the test shed. The concentration of salt spray at the front and back end of the filter was

收稿日期：2023-09-03；**修订日期：**2023-11-12

Received：2023-09-03；**Revised：**2023-11-12

基金项目：民机科研项目（MJZ5-3N21）

Fund：Civil Aircraft Research Project (MJZ5-3N21)

引文格式：刘元海，陈川，李秋平,等. 海岛应急保障设备防潮防尘防盐雾一体化微环境控制技术及性能验证[J]. 装备环境工程，2024, 21(1): 135-141.

LIU Yuanhai, CHEN Chuan, LI Qiuping, et al.Integrated Micro-environment Control Technology and Performance Verification of Island Emergency Support Equipment Against Moisture, Dust and Salt Spray[J]. Equipment Environmental Engineering, 20243, 21(1): 135-141.

*通信作者（Corresponding author）

collected by suction method to compare its filtration efficiency, and the effect of salt spray concentration on corrosion before and after filtration was characterized by high-precision copper corrosion sheet by reduction method. After the integrated control technology against moisture, dust and salt spray was adopted, the humidity was reduced from 94% to 72%, the dust was reduced to less than 3 μg/m^3, the environmental corrosion grade was reduced from G2 to G1, and the salt spray concentration level was reduced from Sc3 to Sc1.The integrated filtration technologyhas excellent moisture, dust and salt spray prevention effects, which can optimize the application environment for the emergency support equipment used in marine service environment and ensure the safe operation.

KEY WORDS: moisture prevention; dust prevention; salt spray prevention; filtration performance; integrated equipment; emergency support equipment

海洋大气环境影响金属设备腐蚀或故障的主要因素包括温度、湿度、盐雾、灰尘等。当温度较高时，分子活性增大，扩散加快，从而导致金属腐蚀速率加快；当环境中湿度较大时，潮湿环境易促使设备生霉生锈、产生凝露等问题的发生，严重影响电气设备的安全运行；灰尘因吸水性、尘粒电荷性等特征使其很容易在设备的周围凝集沉降，从而破坏设备的正常运行；盐雾环境则能增加金属材料的腐蚀速率，并且促进钝性金属点蚀的发生和发展，对设备的安全运行危害极大[1-5]。

由于我国某海域具有高温、高湿、高盐雾和强辐照的“三高一强”热带海洋环境特点，服役于该环境中的海岛应急保障设备，因缺少有效合理的防护和存储方法，其腐蚀老化和功能失效问题十分突出，而频繁地更换备品备件与设备维护则会造成较大的经济损失[6-9]。因此，有必要对海洋环境下应急保障设备的运行或存储环境进行有效控制。由于这些应急保障设备相对精密、结构复杂、种类繁多，从材料或部件自身提高环境适应性，牵涉面广，难度大，且成本高，通过控制设备服役环境减缓其腐蚀，相对更为经济高效。

目前，海洋环境控制技术主要包括控温、控湿、除尘、除盐雾等。常用的除湿方式包括机械除湿、吸附除湿及加热除湿等；常用的灰尘过滤模块有滤袋式过滤模块、波纹板孔过滤模块等；目前除盐雾技术主要有分离除盐雾技术、电除盐雾技术及过滤除盐雾技术[10-13]。由于环境优化控制因素较多，单向控制较为复杂，为精密设备服役环境优化控制带来一定的困难。因此，本文针对上述问题，设计开发出一种适用于海洋环境的具有防潮除尘防盐雾多功能一体化的微环境处理技术与设备，并进行了优化控制效果评估，为服役于海洋环境的电气设备安全运行提供保障[14-15]。

1　基于渐进结构的防潮防尘防盐雾过滤设备设计与开发

针对防尘、防潮以及防盐雾需求，渐进结构的防潮防尘防盐雾过滤技术核心在于过滤模组，选用经超疏水处理的粗细纤维掺混的渐进结构，能良好地过滤潮气、尘粒和盐粒的同时，又减少了风阻。过滤模组由 2 个滤芯和 2 个压差传感器构成。初效滤芯主要是过滤灰尘等较大粒度固体杂物，渐进式超疏水性盐雾过滤模块用于过滤空气中盐雾，压差传感器主要是为了预警过滤模块正常工作时的过滤模块阻塞，即时监测第一初效过滤模块入口与出口的压力变化值，以及渐进式盐雾过滤模块的入口和出口的压力变化值。2 级滤芯组合使用，大大提高了过滤模块的过滤效率。同时，初效过滤模块的使用延长了渐进式过滤模块的使用寿命，大气盐雾净化的流程如图 1 所示。

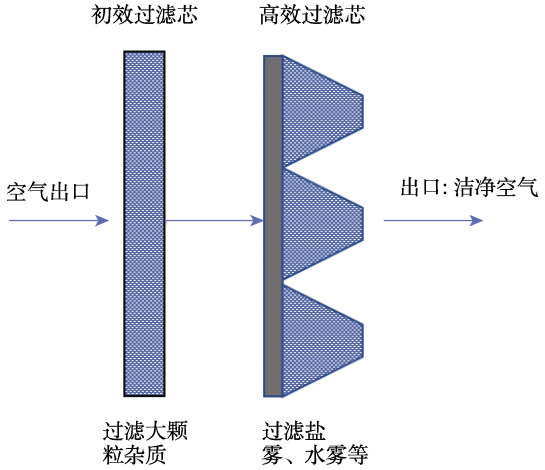


图 1　大气盐雾净化流程

Fig.1 Atmospheric salt spray purification process

基于上述原理，设计了一种小型防潮防尘防盐雾集成化过滤系统。该过滤系统可直接置于机柜内，水平或垂直固定于设备机箱/机柜内，在设备箱柜内取风，净化后再次送入箱柜内，实现箱柜内自循环。它具备良好的集成性，可以选配监测传感器，对柜内温湿度、盐雾浓度等进行实时监测，实现智能控制[16-17]，其外观如图 2 所示。

2　防潮防尘防盐雾同步控制效果试验研究

防潮、防尘、防盐雾一体化过滤设备过滤效果的验证主要包括防潮性验证、防尘性验证及盐雾过滤效

图 2 防潮防尘防盐雾一体过滤器
Fig.2Integrated filter against moisture, dust and salt spray

果验证。防潮性主要在室内验证，利用加湿器从过滤器入口源源不断地输送水汽，通过对比过滤器入口与出口湿度的变化情况，评估其防潮性。防尘性测试主要在试验棚下进行，测试开启和未开启过滤设备过程中灰尘浓度的变化情况。盐雾过滤性能评价主要通过对比设备在室内模拟盐雾及试验棚对流状态下的盐雾过滤效果，利用吸气法采集过滤器前后端盐雾浓度，对比其过滤效率。同时，利用高精度铜腐蚀片还原法，考察过滤前后对盐雾浓度腐蚀性的影响[18-22]。

2.1　防潮性验证

开启过滤设备，利用加湿器在过滤器前端提供稳定的潮气来源，待稳定后，记录前端、后端相对湿度数据，并观察前端、后端凝结水情况，防潮性验证过程如图 3 所示。湿度稳定后，分别记录过滤设备前端和后端的相对湿度，观察过滤器前端外部、内部，发现过滤器外壳上均有明显水珠凝结。过滤开启 10 min 内，过滤前后相对湿度测试数据结果如图 4 所示。可以看出，过滤器前端的相对湿度一直保持在 90%以上，而过滤后端的相对湿度保持在 75%左右。表明潮气经过该过滤设备时被有效拦截，使得相对湿度大幅度降低，该过滤设备具有良好、稳定的防潮效果。

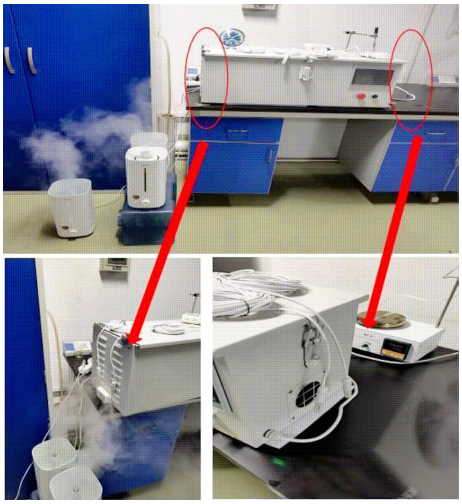


图 3　防潮性验证过程
Fig.3 Verification process of moisture prevention

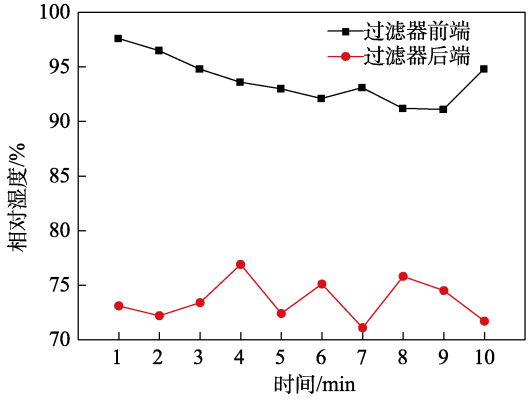


图 4　过滤设备开启 10 min 过程中前后端相对湿度的变化情况
Fig.4 Humidity change at the front and back ends of the filtration equipment within 10 min after starting

2.2　防盐雾效果试验

2.2.1　室内

在过滤器前端喷洒浓度为 0.1 mol/L 的 NaCl 溶液，喷雾速率为 200 mL/h，收集过滤器前后大气盐雾含量以及测试过滤器前后铜片的腐蚀速率。其中，吸气法的采气时间为 1 h，还原法铜片的监测时间为 1 d，并与普通高效、初效过滤模块组成的过滤器进行对比。过滤前/后盐雾浓度的比值越大，表明前后差异越大，即比值越大，防护效果越好。盐雾浓度测试数据见表 1，腐蚀速率测试数据见表 2，盐雾过滤前后铜表征片的外观如图 5 所示。

表 1　盐雾过滤前后盐雾浓度测试数据
Tab.1 Test data of salt spray concentration before and after salt spray filtration

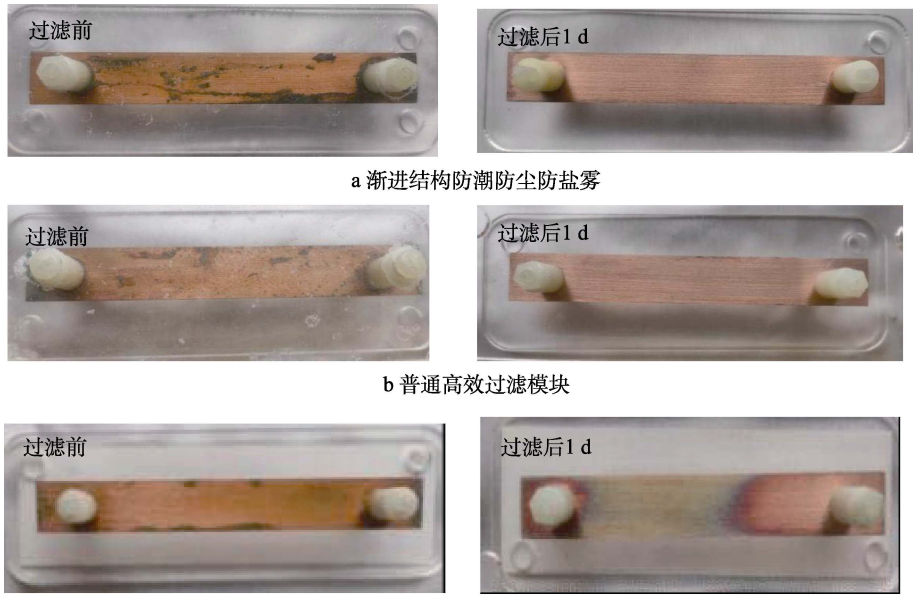
	定量限/ ($mg·L^{-1}$)	测试结果/ ($mg·L^{-1}$)	环境等级
渐进结构防潮防尘防盐雾过滤前	0.1	31.00	ScX
渐进结构防潮防尘防盐雾过滤后	0.1	0.14	Sc2
普通高效过滤模块过滤前	0.1	28.88	ScX
普通高效过滤模块过滤后	0.1	4.01	Sc3
普通初效过滤模块过滤前	0.1	29.12	ScX
普通初效过滤模块过滤后	0.1	6.55	ScX

由表 1 可以看出，该防潮防尘防盐雾一体过滤设备将盐雾浓度从 ScX 等级降至 Sc2 等级，而普通高效、初效过滤设备过滤后，盐雾浓度依旧较高。腐蚀速率分析结果表明，采用防潮防尘防盐雾一体过滤技术后，还原片腐蚀速率的降低幅度最大，即其过滤效果最好。通过室内盐雾过滤效率研究发现，该渐进式防潮防尘防盐雾一体化过滤设备具有良好的过滤效果，结合往期灰尘、潮气测试结果，表明其综合性能良好。

表 2　盐雾过滤前后铜表征片测试数据

Tab.2 Test data of copper sheet before and after salt spray filtration

	Cu_2O 膜厚度/nm	CuO 膜厚度/nm	腐蚀膜总厚度/nm	过滤器前/后腐蚀膜厚度比值
渐进结构防潮防尘防盐雾过滤前	46.35	756.22	802.57	38.27
渐进结构防潮防尘防盐雾过滤后	11.59	9.39	20.97	
普通高效过滤模块过滤前	231.73	530.17	761.90	13.87
普通高效过滤模块过滤后	21.25	33.67	54.92	
普通初效过滤模块过滤前	312.21	329.76	641.97	6.76
普通初效过滤模块过滤后	48.95	46.05	94.99	



a 渐进结构防潮防尘防盐雾

b 普通高效过滤模块

c 普通初效过滤模块

图 5　盐雾过滤前后铜表征片外观照片

Fig.5 Appearance photos of copper sheet before and after salt spray filtration: a) progressive structure against moisture, dust and salt spray; b) ordinary high-efficiency filtration module; c) ordinary initial filtration module

2.2.2　海洋环境盐雾效果验证

对防潮防尘防盐雾一体过滤设备在海南某试验棚内进行盐雾过滤效果验证实验，在环境试验棚内进行内循环过滤，利用纳米级腐蚀铜还原法表征片评估过滤效果[15-16]，测试现场如图 6 所示。高精度铜腐蚀片还原法数据分析结果见表 3，腐蚀片外观如图 7 所示。利用吸气法采集过滤前端、后端盐雾浓度，分析数据见表 4。

由表 3 和表 4 的数据结果可以看出，在海洋环境开启该过滤器后，腐蚀等级由 G2 降至 G1。有过滤设备的铜片在腐蚀 63 d 后，累积平均总腐蚀膜厚约为 38.31 nm，而无过滤设备的铜片，仅腐蚀 35 d 后，累积平均总腐蚀膜厚达到了 44.37 nm。表明有过滤设备环境明显较无过滤设备更好，大气采样法数据分析表明，过滤后平均盐雾浓度水平 0.2 mg/m^3 降低至 0.04 mg/m^3，环境等级由 Sc3 降至 Sc1，表明该过滤设备具有良好的盐雾过滤效果。通过盐雾、灰尘及潮气过滤，环境的腐蚀性降为 G1，即温和环境。

2.3　防尘效果验证

在试验棚下利用灰尘传感器实时记录某一监测日灰尘浓度的变化情况，数据如图 8 所示。可以看出，

表 3　有过滤设备投放的还原法铜表征片数据分析结果

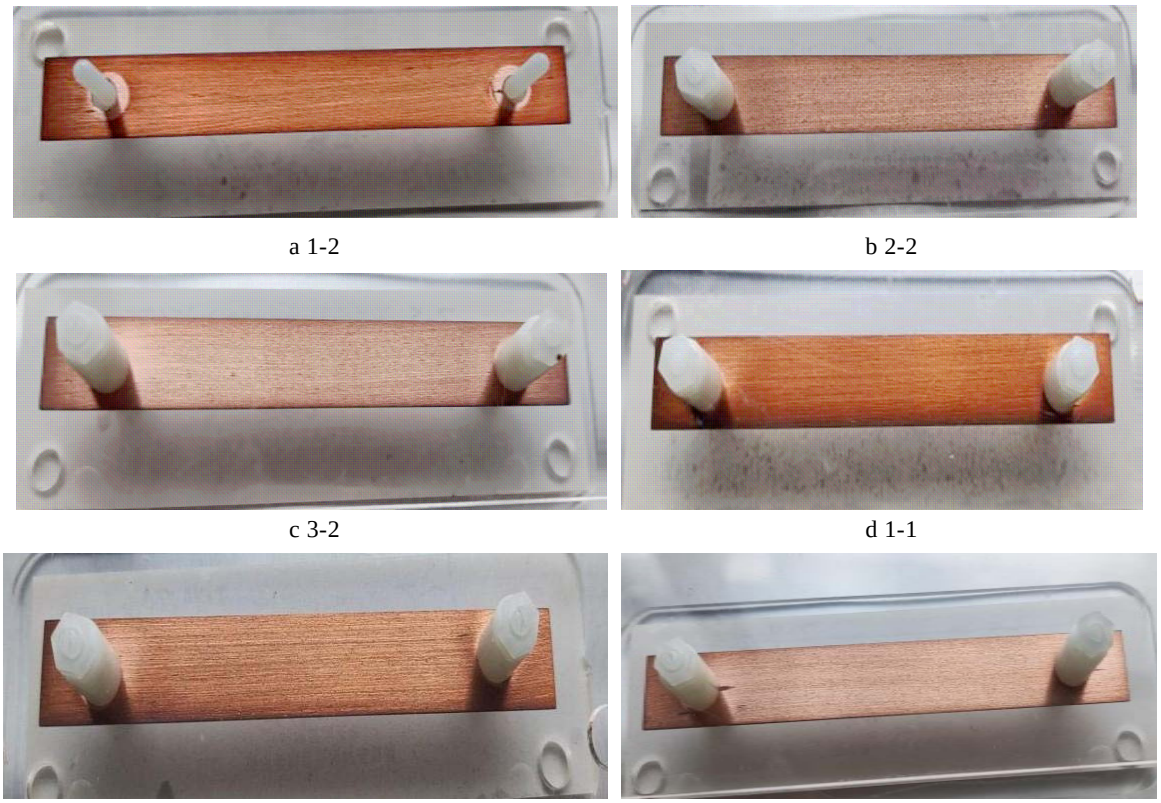
Tab.3 Results of data analysis of copper sheet by reduction method under the condition withthe filtration equipment

样品编号	Cu_2O 膜厚度/nm	CuO 膜厚度/nm	监测天数/d	腐蚀膜总厚度/nm	腐蚀膜厚/(nm·month^{-1})	环境等级
1-2	14.15	22.06	63	36.21	28.98	G1
2-2	15.64	24.33	63	39.97	29.79	G1
3-2	15.02	23.74	63	38.76	28.89	G1

a 有过滤设备　　b 无过滤设备

图 6　海南某试验棚下盐雾过滤效果验证实验

Fig.6 Verification test of salt spray filtration effect under a test shed in Hainan: a)with filtration equipment; b)withoutfiltration equipment



a 1-2　　b 2-2

c 3-2　　d 1-1

e 2-1　　f 3-1

图 7　有无过滤系统还原法铜表征片外观照片

Fig.7 Appearance photos of copper sheet by reduction method under the condition with or without filtration system

表 4　无过滤系统投放的还原法铜表征片数据分析结果

Tab.4 Results of data analysis of copper sheet by reduction method under the condition without the filtration equipment

样品编号	Cu_2O 膜厚度/nm	CuO 膜厚度/nm	监测天数/d	腐蚀膜总厚度/nm	腐蚀膜厚/(nm·month^{-1})	环境等级
1-1	19.31	15.79	35	35.10	32.50	G2
2-1	24.53	24.97	35	49.50	45.83	G2
3-1	17.37	31.15	35	48.52	44.92	G2

无过滤系统时，环境中灰尘浓度较高，以粒径为 0.3 μm 的灰尘为例，其质量浓度超 20 000 μg/m^3；有过滤系统的场所，所有灰尘的粒径范围均在 3 μg/m^3 以下，表明该过滤系统具有良好的灰尘过滤效果。

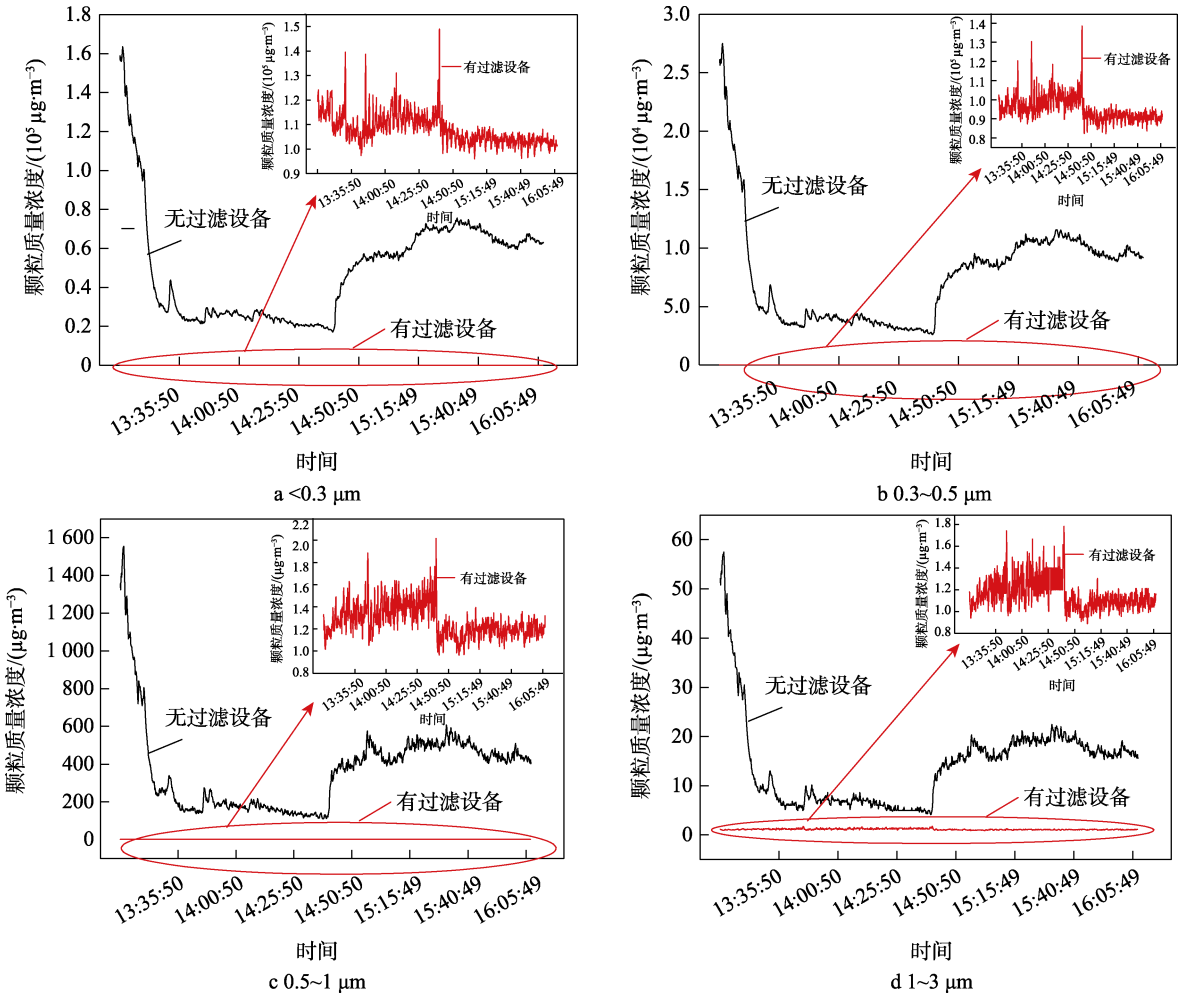


图 8　灰尘过滤效果

Fig.8 Dust filtration effect

3　结论

本文针对海洋环境优化需求，研制出防潮防尘防盐雾一体化过滤设备，并利用吸气法、还原铜表征片法在实验室及海洋环境进行了过滤性能验证，得出以下结论：

1）通过初效过滤模组与渐进结构疏水性过滤模组、压差传感器等集成设计出一种具有防潮防尘防盐雾一体化过滤系统，其体积小巧，可置于设备机箱机柜内部，实现小空间内循环。

2）采用防潮防尘防盐雾一体化控制技术后，相对湿度由 94%降至 72%，粉尘降低至 3 μg/m^3 以下，环境腐蚀等级由 G2 降至 G1，盐雾浓度水平由 Sc3 降至 Sc1。

防潮性、防盐雾及防尘效果验证实验结果表明，该防潮防尘防盐雾一体过滤技术具有良好的防潮、防尘以及防盐雾效果，可为海洋服役环境下的应急保障设备提供环境优化，保障其安全运行。

参考文献：

[1]　战贵盼，张安琪. 海洋环境下机载电子设备腐蚀防护与控制技术[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(4): 181-185.
ZHAN G P, ZHANG A Q. Corrosion Protection and Control Technology of Airborne Electronic Equipment in Marine Environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(4): 181-185.

[2]　曲晓雷，王海燕，杨大海，等. 空气除湿技术的研究进展[J]. 家电科技, 2022(S1): 612-615.
QU X L, WANG H Y, YANG D H, et al. Research on the Progress of Gas Dehumidification Technology[J]. Journal of Appliance Science &Technology, 2022(S1): 612- 615.

[3]　何雷. 氯离子盐雾及除雾设备综述[J]. 河南化工, 2012, 29(10): 7-9.
HE L. Summary of Chloride Ion Salt Spray and Defogging Equipment[J]. Henan Chemical Industry, 2012, 29(10): 7-9.

[4]　刘元海，张幸. 舰载机载设备腐蚀环境适应性要求的剪裁[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 61-67.
LIU Y H, ZHANG X. Tailoring of Corrosion Environmental Adaptability Requirement for the Shipboard Airborne Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 61-67.

[5]　郁大照，张代国，王琳，等. 南海海洋环境下机载电子设备的腐蚀及外场防护对策[J]. 装备环境工程, 2019,

16(7): 8-12.
YU D Z, ZHANG D G, WANG L, et al. Corrosion of Airborne Electronic Equipment and Field Protection Measures in Marine Environment of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 8-12.

[6] 王哲, 雍兴跃, 范林, 等. 典型非金属材料海洋环境适应性技术研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 60-64.
WANG Z, YONG X Y, FAN L, et al. Technical Research on Ocean Environmental Adaptability of Typical Non-metal Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 60-64.

[7] 刘振华, 王程, 赵吉敏. 长效封存技术应用于岛礁环境下器材装备防护研究[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 253-257.
LIU Z H, WANG C, ZHAO J M. Long-Acting Packaging Technology for Equipment Protection in Islands[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 253-257.

[8] 冯立超, 贺毅强, 乔斌, 等. 金属及合金在海洋环境中的腐蚀与防护[J]. 热加工工艺, 2013, 42(24): 13-17.
FENG L C, HE Y Q, QIAO B, et al. Corrosion and Protection of Metal and Alloy in Marine Environment[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(24): 13-17.

[9] 侯保荣. 海洋环境中的腐蚀问题[J]. 世界科技研究与发展, 1998, 20(4): 72-76.
HOU B R. Problems of Corrosion in the Oceanic Environment[J]. World Sci-tech R & D, 1998, 20(4): 72-76.

[10] 曾瑞璇, 颜承初, 李梅. 除湿等级划分及深度除湿技术研究进展[J]. 制冷学报, 2020, 41(6): 12-21.
ZENG R X, YAN C C, LI M. Dehumidification Classification and Advanced Research in Deep Dehumidification Technology[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(6): 12-21.

[11] 崔少云, 宋媛, 李志勇. 除湿技术研究综述与展望[J]. 机械管理开发, 2021, 36(10): 288-291.
CUI S Y, SONG Y, LI Z Y. Review of Recent Process in Dehumidification Technology[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(10): 288-291.

[12] 胡鹏, 王海桥, 陈世强, 等. 高温烟尘除尘技术现状及趋势[J]. 广州化工, 2022, 50(8): 21-26.
HU P, WANG H Q, CHEN S Q, et al. Current Situation and Trend of High Temperature Dust Removal Technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(8): 21-26.

[13] 毛宏智, 向正林, 刘亚南, 等. 近海和海上工程室内盐雾控制探讨[J]. 建筑科学, 2020, 36(10): 140-146.
MAO H Z, XIANG Z L, LIU Y N, et al. Discussion on the Control of Sea-Salt Aerosols on Indoor Environment of Inshore and Offshore Projects[J]. Building Science, 2020, 36(10): 140-146.

[14] 张梦龙, 赵志敏. 东南海域岛礁环境对武器装备的影响及对策研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 20-25.
ZHANG M L, ZHAO Z M. The Influence and Countermeasures Study of Weapon Equipment Influenced by Island-Reef Environment in the Southeastern Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 20-25.

[15] 向永华, 王争荣, 曹京宜,等. 岛礁装备设施腐蚀现状及腐蚀控制策略研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 28-34.
XIANG Y H, WANG Z R, CAO J Y, et al. Study on Corrosion Status and Corrosion Control Strategy for Equipment and Facilities Serving on Islands and Reefs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 28-34.

[16] 王受和, 陈川, 曾文波, 等. 一种盐雾净化智能防腐设备的开发与研制[J]. 环境技术, 2018, 36(6): 116-119.
WANG S H, CHEN C, ZENG W B, et al. Development of an Intelligent Anti-Corrosion Equipment for Salt Fog Purification[J]. Environmental Technology, 2018, 36(6): 116-119.

[17] 阮红梅, 黄建业, 陈川, 等. 南海海洋环境下关键电器设备腐蚀环境净化技术研究[J]. 环境技术, 2016, 34(5): 110-113.
RUAN H M, HUANG J Y, CHEN C, et al. Research on Corrosion Environment Purifi Cation Technology on the Electrical Equipment in the South Marine Environment[J]. Environmental Technology, 2016, 34(5): 110-113.

[18] GB/T 19292.1—2018, 金属和合金的腐蚀大气腐蚀性 第 1 部分: 分类、测定和评估[S].
GB/T 19292.1—2018, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Part 1: Classification, determination and Estimation[S].

[19] ISA 71.04—2013, 空气中的污染物: 过程测量和控制系统环境条件[S].
ISA 71.04—2013, Airborne Contaminants: EnvironmentalConditions for Process Measurement and Control systems[S].

[20] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 59-63.
MU S, LI J N, WANG L. Corrosion Control Technology of Electronic Facility in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 59-63.

[21] 闫杰, 刘丽红, 纪春阳, 等. 国内外自然大气环境试验的发展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(1): 69-75.
YAN J, LIU L H, JI C Y, et al. Development of Natural Atmospheric Environmental Test in the World[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(1): 69-75.

[22] 唐其环. 海洋大气腐蚀性分类分级[J]. 环境技术, 2003, 21(1): 2-4.
TANG Q H. Classification and Rating of Corrosiveness of Marine Atmosphere[J]. Environmental Technology, 2003, 21(1): 2-4.