

海洋大气环境对封套防护材料性能影响

徐豪, 杨森, 杨欢, 邢东桢, 周松山, 戴文俊

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 探究铝塑型封套防护材料在湿热海洋大气自然环境贮存条件下性能衰退规律。**方法** 通过优化铺层结构, 采用 SiO_x 蒸镀双向拉伸聚酯膜作为外增强层, PA6 共挤 EVOH 双向拉伸膜作为内增强层制备新型封套防护材料。在海洋大气环境试验站库内、棚下 2 种贮存条件下开展贮存试验, 跟踪测试水蒸气透过率、氧气透过率、剥离力、拉断力和表面电阻率等关键性能, 建立时间-性能影响曲线, 同时记录材料内部湿度曲线和内置的金属圆片的锈蚀状态, 以此评价海洋大气环境对铝塑型封套防护材料性能影响趋势。**结果** 在经过 180 d 的贮存后, 水蒸气透过率仍小于 $0.3 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot 24 \text{ h})$, 自研的新型封套防护材料在库内和棚下贮存环境下的阻湿能力分别提高了 29.8% 和 31.5%, 且剥离力和拉断力未发生明显降低, 表面电阻率处于 $10^9 \sim 10^{11} \Omega$ 。**结论** 通过降低水分子与外增强层分子的相互作用, 可有效提高封套防护材料的阻隔能力, 验证了多级防潮理念的科学性。

关键词: 海洋大气环境; 封套防护材料; 贮存试验; 水蒸气透过率; 棚下贮存; 库内贮存; 多级防潮; 长贮性能

中图分类号: TJ410.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0131-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.016

Effect of Marine Atmospheric Environment on the Properties of Envelope Protective Materials

XU Hao, YANG Sen, YANG Huan, XING Dong-hui, ZHOU Song-shan, DAI Wen-jun

(Southwest Institute of Technique and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the performance degradation law of aluminum-plastic envelope protective materials under long-term storage in hygrothermal marine atmospheric environment. By optimizing the layer structure, new envelope protective materials were prepared with SiO_x evaporated biaxially stretched polyester film as the outer reinforcement layer and PA6 coextruded EVOH biaxially stretched film as the inner reinforcement layer. Then, storage tests were carried out in the warehouse and shelter of Marine Atmosphere Environmental Test Station. By testing critical properties such as water vapor transmission, oxygen transmission, peeling force, breaking force and surface resistivity, the time-performance effect curve was established. Meanwhile, the internal humidity curve of materials and corrosion state of carbon steel disc were recorded, so as to evaluate the effect trend of marine atmospheric environment on the performance of envelope protective materials. After 180 days of storage, the water vapor transmission was still less than $0.3 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot 24 \text{ h})$, the moisture resistance of the self-developed new envelope protective materials in the shelter storage and warehouse storage environment were improved by 29.8% and 31.5% respectively, and peeling force and breaking force did not decrease significantly and surface resistivity was at a range of

收稿日期: 2023-02-16; 修订日期: 2023-04-18

Received: 2023-02-16; Revised: 2023-04-18

引文格式: 徐豪, 杨森, 杨欢, 等. 海洋大气环境对封套防护材料性能影响[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 131-138.

XU Hao, YANG Sen, YANG Huan, et al. Effect of Marine Atmospheric Environment on the Properties of Envelope Protective Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 131-138.

$10^9 \sim 10^{11} \Omega$. By reducing the interaction between moisture molecules and outer enhancement layer molecules, the barrier ability of the envelope protective material can be effectively improved, which verifies the scientific nature of the multi-level moisture transmission concept.

KEY WORDS: marine atmospheric environment; envelope protective materials; storage test; water vapor transmission; shelter storage; warehouse storage; multi-level moisture transmission; long-term storage performance

按照选用材料的不同,军用封套材料可大致分为塑料、塑/塑复合材料、塑料金属复合材料、真空镀铝复合材料等类型^[1-2]。随着新材料的开发和设备的更新换代,封套防护材料由单层材料向着多层复合材料的方向发展,实现军用封套材料从具有防潮密封等基本功能发展到抗静电与电磁屏蔽^[3]、红外伪装^[4-6]等特殊功能的材料。常用军用封套材料主要由基材层、阻隔层和热封层组成^[7-8]。铝塑封套材料因其具有良好的阻隔性能、抗电磁干扰性能等而广受欢迎,其中透湿率作为影响封套材料封存武器装备的最关键因素^[2],因此研究装备封存长贮期间铝塑封套材料“微环境”^[9]湿度变化规律对评估其封存可靠性、优化封套结构具有积极意义^[10-11]。

美、法等国采用铝塑封套材料封存坦克、装甲车、运输车、炸药、发射药、舰艇等装备,均取得了不错的效果^[12]。国内采用铝塑封套材料封存车辆^[13]、物资^[14]、关键零件^[15-16]、导弹、鱼雷等装备上取得了显著的成效。1968 年美军选用 6 种典型防护包装技术封装弹药,在 8 个不同气候条件下进行了为期 9 a 的洞库和地面库贮存试验,研究了 6 种典型防护包装的环境适应性以及对弹药贮存的防护可靠性。国内近些年有学者^[13,17-21]在封套防护材料内部采用除氧、除湿、除锈、气相缓蚀等技术手段封存军事装备,并进行了野外封存效果验证与评价。结果表明,铝塑封套材料封存技术可在野外环境中大幅提高装备野外的储存限期和战备完好率。某海洋地区自然环境具有高温、高湿、高盐雾等特点,对装备封套封存技术提出了更高的要求,然而关于铝塑封套材料在典型海洋大气自然环境关键性能变化规律鲜有报道。因此,本文以优化铝塑封套防护材料内外增强层材料为基础,制备 2 种新型铝塑型封套防护材料,并开展自然环境贮存试验,探究其在湿热海洋环境下长贮性能衰退规律,为提高舰载弹药长效贮存性能提供有力数据支撑。

1 试验

1.1 结构设计

依据 Graham 的溶解-扩散理论,小分子在封套防护材料中的渗透大部分是由于材料两侧表面产生的浓度差和小分子与材料分子的相互作用^[22],即材料两侧表面的浓度差驱动了小分子由高浓度侧向低浓度侧作定向移动。水蒸气在封套防护材料中的渗透过程

可以分为吸附、溶解、扩散、解吸 4 步,其中吸附和溶解基本同时完成。一般情况下,解吸速度很快,对整个水蒸气渗透过程的影响不大。研究发现,水蒸气在材料中的扩散过程,成为决定材料阻隔性能的主要因素,扩散能力越强,透湿性越大^[23]。因此,本文通过弱化水分子与外基材层材料分子的相互作用,增加水分子透过内增强层材料的难度,来提高封套防护材料的阻隔性能。本文采用的封套防护材料铺层结构如图 1 所示。

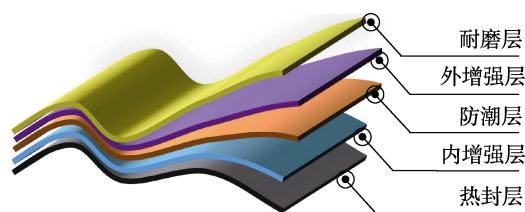


图 1 典型铝塑封套材料铺层结构^[24]
Fig.1 Typical aluminum-plastic envelope material layer structure^[24]

基于此,本文在典型铝塑封套材料铺层结构的基础上,引入多级防潮理念,优化铺层结构,降低阻隔性能失效风险,开展自然环境贮存试验性能验证,考核 3 种铝塑封套材料在海洋大气环境下长贮性能变化规律。具体地,通过气相沉积技术^[25]在聚酯薄膜蒸镀 SiO_x ,降低其表面分子极性,减弱水分子与外增强层分子的相互作用,提高水蒸气在封套防护材料外表面的吸附和溶解难度。通过流延共挤技术^[26]制备 PA6/EVOH/PA6 多层异性阻隔薄膜,增加水分子通过内增强层的路径,从而降低由于铝箔针孔产生的阻湿能力失效的风险。市售与自制封套防护材料铺层结构的区别见表 1。

表 1 3 种铝塑封套防护材料铺层结构主要区别
Tab.1 Main differences in the layer structure of three types of aluminum-plastic envelope protective materials

结构	市售	自制 1#	自制 2#
外增强层	双向拉伸 聚酯膜	SiO_x 蒸镀双向 拉伸聚酯膜	SiO_x 蒸镀双向 拉伸聚酯膜
内增强层	双向拉伸 尼龙膜	PA6 共挤 EVOH 双向拉伸膜	双向拉伸 尼龙膜

1.2 样品制备

将主剂缓慢加入乙酸乙酯中,搅拌均匀后,将固

化剂加入其中继续搅拌均匀, 完成胶黏剂的配制。将配制的胶黏剂倾入胶槽内, 安装施胶辊。随后将聚酯薄膜、铝箔、尼龙薄膜、防静电聚乙烯薄膜和无纺布卷料依次装载于上料辊, 设置复合参数, 启动 BGF-1050 型全自动干式复合机, 待收卷完成后得到复合薄膜, 最后进行复合薄膜熟化, 即完成铝塑型封套防护材料的制备。

1.3 贮存试验设计

将上述铝塑型封套防护材料裁剪为 $260\text{ mm} \times 510\text{ mm}$, 抽真空热封后形成约 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 的试验样件, 内置金属圆片, 其中第 6 个取样周期的试验样件中内置 Testo 174-H 型湿度计。然后将制备投试样品分别贮存于海洋大气环境试验站库内和棚下(如图 2 所示), 取样周期为 30 d。观察并记录金属圆片表面状态, 测试封套防护材料的透过率、力学性能和表面电阻率。



a 投试前

b 棚下贮存

c 库内贮存

图 2 海洋大气环境试验站投试样品

Fig.2 Test samples at marine atmosphere environmental test station: a) test samples; b) shelter storage; c) warehouse storage

1.4 测试方法

1) 水蒸气透过率测试。根据 GB/T 26253—2010《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 红外检测器法》^[27], 使用水蒸气透过率测试系统 (C390H 型,

济南兰光机电技术有限公司) 进行封套防护材料水蒸气透过率实验, 评价其在 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $90\%\text{RH}$ 下的阻湿能力, 透过方向为无纺布面至防静电聚乙烯膜面。

2) 氧气透过性测试。根据 GB/T 19789—2021《包装材料 塑料薄膜和薄片氧气透过性试验》^[28], 使用氧气透过率测试系统 (C230H 型, 济南兰光机电技术有限公司) 进行封套防护材料的氧气透过性试验, 评价其在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的阻氧能力, 透过方向为无纺布面至防静电聚乙烯膜面。

3) 拉断力测试。根据 GB/T 1040.3—2006《塑料 拉伸性能的测定 第 3 部分: 薄膜和薄片的试验条件》^[29], 使用电子万能材料试验机 (INSTRON 5969 型, 美国 INSTRON 公司) 测试封套防护材料的拉伸性能, 样条尺寸为 $150\text{ mm} \times 15\text{ mm}$, 标距为 100 mm , 拉伸速率设置为 100 mm/min 。

4) 剥离力测试。根据 GB/T 8808—1988《软质复合塑料材料剥离试验方法》^[30], 使用电子万能材料试验机 (INSTRON 5969 型, 美国 INSTRON 公司) 测试无纺布/聚酯膜的层间剥离力, 样条尺寸为 $200\text{ mm} \times 15\text{ mm}$, 测试前将无纺布/聚酯膜预先剥离 50 mm , 将两端材料分别夹持到上下夹具上, 以 300 mm/min 速率剥离。

5) 表面电阻率测试。根据 GB/T 31838.3—2019《固体绝缘材料 介电和电阻特性 第 3 部分: 电阻特性 (DC 方法) 表面电阻和表面电阻率》^[31], 使用体积表面积电阻率测试仪 (ATI-212 型, 北京航天纵横检测仪器有限公司) 测试试样的表面电阻率, 试样尺寸约 $\phi 100\text{ mm}$ 。

2 结果及分析

2.1 透过率

阻湿能力和阻氧能力是封套防护材料阻隔性能的关键技术指标, 跟踪测试了市售和 2 种自制封套防护材料贮存 180 d 的水蒸气透过率和氧气透过率变化, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 3 种封套防护材料的水蒸气透过率随着贮存时间的增加先升高、后逐渐趋于平稳。市售、自制 1#、自制 2# 的初始水蒸气透过率分别为 0.17 、 0.09 、 $0.07\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{ h})$ 。在贮存 60 d 时, 3 种封套防护材料的水蒸气透过率骤升。棚下贮存时, 市售、自制 1#、自制 2# 分别达到 0.75 、 0.29 、 $0.20\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{ h})$; 库内贮存时, 市售、自制 1#、自制 2# 分别达到 0.79 、 0.30 、 $0.20\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{ h})$ 。随着贮存时间继续增加, 自制的 2 种封套防护材料的水蒸气透过率逐渐呈现平缓趋势, 且基本在 $0.3\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{ h})$ 以下, 仍然满足 GB/T 21302—2007《包装用复合膜、袋通则》中对包装复合膜水蒸气透过量一级的防护要求^[32], 同时也满足 GJB 1444—1992《弹药包装通用规范》对于弹药防潮包装一级要求^[33]。

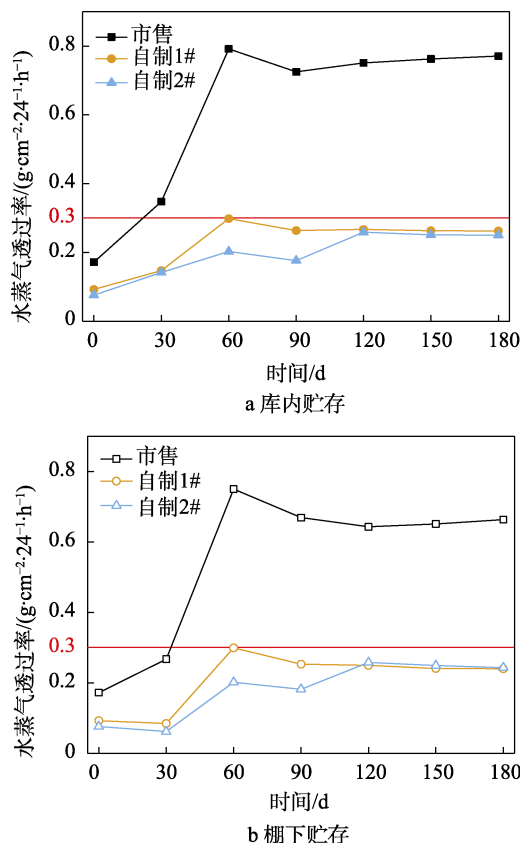


图3 水蒸气透过率随时间变化趋势

Fig.3 Variation of water vapor transmission with time: a) shelter storage; b) warehouse storage

由图4可知,3种封套防护材料氧气透过率随着贮存时间的增加并未出现明显的变化规律,但总体有着增加的趋势。为了探究氧气透过率变化趋势的规律,对3种封套防护材料的氧气透过率在2种贮存条件下随时间增加的变化进行线性拟合。结果表明,3种封套防护材料的透氧率沿着一条趋势线在 $0.004 \sim 0.008 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 波动上升。这表明了不同贮存环境对封套防护材料阻氧能力的衰减速度有较大的影响。由于高湿环境下尼龙膜的阻隔能力变差, EVOH膜易吸湿^[34]的特性,以至于自研封套防护材料的透氧率并未小于市售产品,且自制1#和自制2#的透氧率几乎没有差距。尽管如此,3种封套防护材料的氧气透过率均远小于 $0.122 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$, 满足 GB/T 21302—2007《包装用复合膜、袋通则》对包装复合膜对氧气透过量一级防护的要求^[32]。

2.2 力学性能

本文考核了3种封套防护材料在海洋大气环境贮存180 d后拉断力和剥离力的变化趋势,结果如图5和图6所示。由图5可知,3种封套防护材料拉断力随着贮存时间的增加并未出现明显的降低,但总体来看有缓慢下降的趋势。在180 d的贮存期内,3种材料的拉断力均不小于 $100 \text{ N}/15 \text{ mm}$, 满足 GB/T 21302—2007《包装用复合膜、袋通则》对包装袋拉

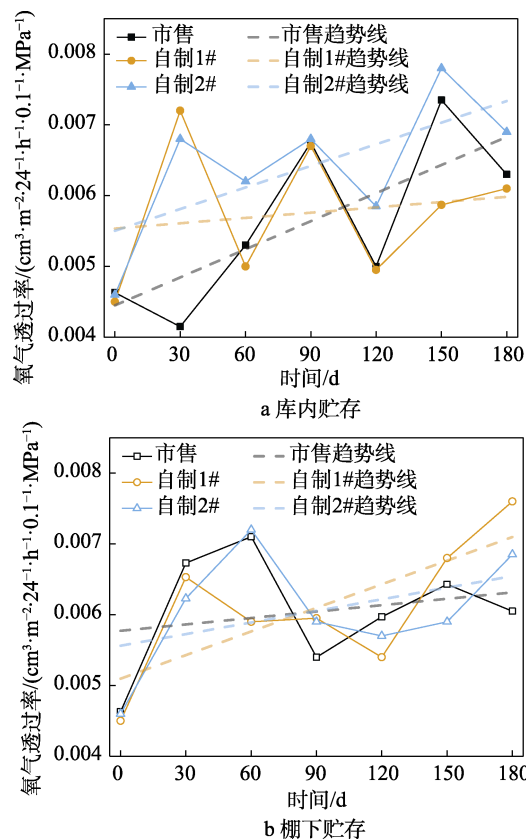


图4 氧气透过率随时间变化趋势

Fig.4 Variation of oxygen transmission with time: a) shelter storage; b) warehouse storage

断力一级要求^[32]。市售、自制1#和自制2#等3种封套防护材料的初始纵向拉断力分别为 $146.19 \text{ N}/15 \text{ mm}$ 、 $138.95 \text{ N}/15 \text{ mm}$ 、 $141.69 \text{ N}/15 \text{ mm}$, 初始横向拉断力分别为 $118.43 \text{ N}/15 \text{ mm}$ 、 $103.28 \text{ N}/15 \text{ mm}$ 、 $128.64 \text{ N}/15 \text{ mm}$ 。经过180 d的贮存期后,自制2#在2种贮存环境下横向拉断力的下降幅度最大,自制1#在库内贮存环境下拉断力的下降幅度最小,在棚下贮存环境下时,纵向拉断力几乎没有变化。这可能是因为封套材料复合过程中,在牵引力的作用下,迫使薄膜分子链在纵向上重新排列,这会提高封套材料的纵向拉伸强度。同时,由于 SiO_x 具有陶瓷特性^[35],在牵引力作用下, BOPET 复合膜表面致密氧化物层会产生微裂纹,这会降低 BOPET 复合膜强度,因此自制封套防护材料纵向拉断力会略低于市售产品。又因为 PA6/EVOH/PA6 流延共挤膜强度低于 BOPA 膜^[26],所以自制1#纵向拉断力会小于自制2#和市售产品。 SiO_x 与 BOPET 基材表面存在较强的结合力,可以对薄膜起到增强作用^[36]。当横向拉应力产生时, SiO_x 能及时传递,因而自制2#横向拉断力强于自制1#和市售产品。长期的湿热环境、静载荷可能加速了 SiO_x 硬化脆化进程,再在横向拉应力作用下, SiO_x 在 BOPET 分子链间产生滑移^[37],对复合膜横向上强度产生不利影响,因而自制2#横向拉断力下降幅度最大。得益于 PA6/EVOH/PA6 流延共挤膜复合增强作用,自制1#拉断力并未在贮存实验期间发生较明显下降。

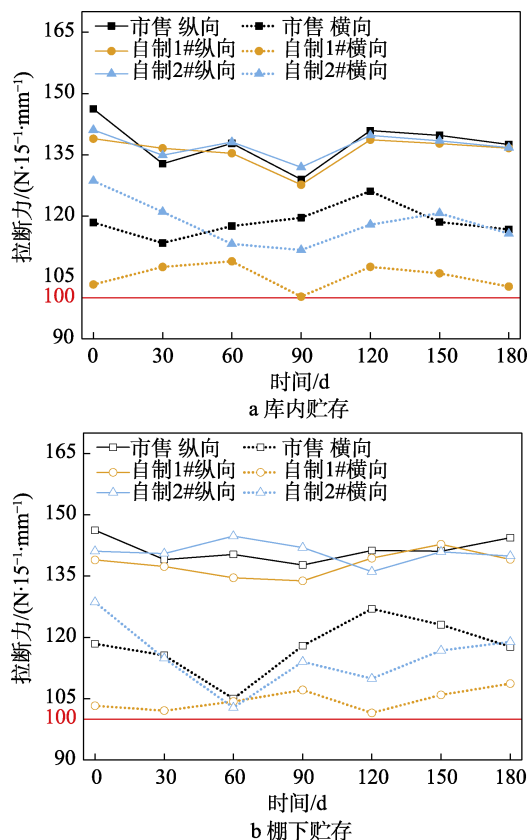


图5 拉断力随时间变化趋势

Fig.5 Variation of breaking force with time: a) shelter storage; b) warehouse storage

无纺布/聚酯膜层直接与外界环境接触,其层间结合力受环境的影响最大,因此以无纺布/聚酯薄膜之间剥离力作为评价贮存环境对封套防护材料层间结合能力影响的指标。由图6可知,3种封套防护材料的剥离力大于6 N/15 mm。市售材料的纵向剥离力远大于另外2种,同型材料的纵向剥离力大于横向剥离力。贮存180 d与最初时相比,3种封套防护材料在纵、横2个方向剥离力均未发生明显下降,表明180 d的贮存期内自然环境未对3种封套防护材料无纺布/聚酯薄膜层间的黏接强度产生明显损伤。

2.3 表面电阻率

通常使用表面电阻率作为材料抗静电性能的重要考核指标之一。本文跟踪测试了3种封套防护材料在180 d贮存期内表面电阻率的变化,以考核封套防护材料的抗静电性能受贮存时间的影响情况,结果如图7所示。由图7可知,封套防护材料初始表面电阻率平均值为 $1.120 \times 10^{10} \Omega$,经过海洋大气环境贮存后,3种封套防护材料的内表面电阻率在 $10^9 \sim 10^{11} \Omega$ 浮动。这表明湿热海洋大气环境未对封套防护材料的抗静电能力产生明显损伤,满足GJB 2605A—2021《可热封柔韧性防静电阻隔材料规范》对柔韧防静电阻隔材料的表面电阻率 $< 10^{12} \Omega$ 要求^[38]。

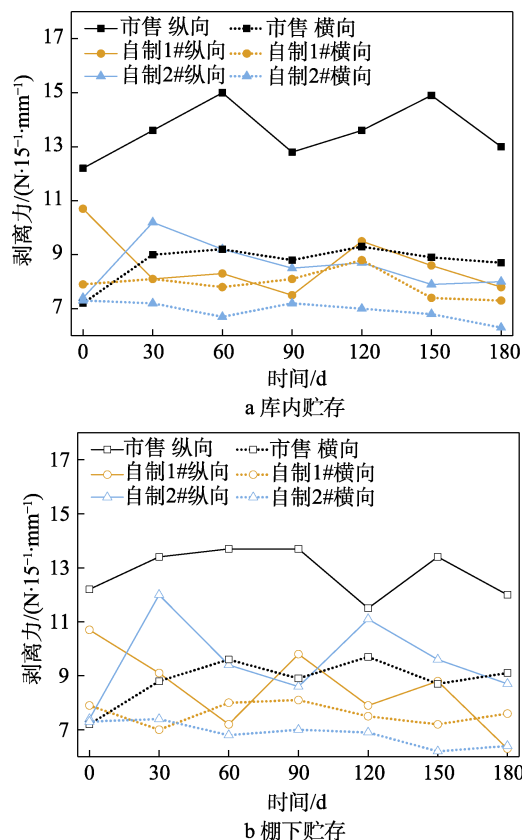


图6 剥离力随时间变化趋势

Fig.6 Variation of peeling force with time: a) shelter storage; b) warehouse storage

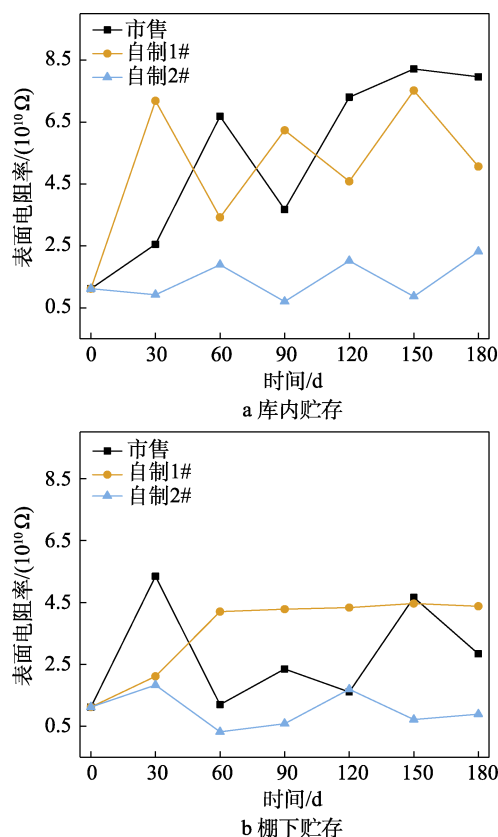


图7 表面电阻率随时间变化趋势

Fig.7 Variation of surface resistivity with time: a) shelter storage; b) warehouse storage

2.4 贮存试验

为了量化封套防护材料的阻湿性能,使用湿度计记录其内部湿度变化曲线。投试样品内部的相对湿度数据如图8所示。任一贮存环境下,市售产品内部的相对湿度均最大。库内贮存环境下,3种封套防护材料内部相对湿度的变化曲线呈现明显区别,市售产品内部相对湿度从最初的62.0%,短期内缓慢升至63.3%,随后下降至62.4%;自制1#在180 d的贮存期内,其内部相对湿度基本维持在52%;自制2#的初始相对湿度为50.3%,经历180 d贮存后缓慢降低至43.8%。在棚下贮存环境下,自制的2种封套防护材料内部相对湿度的变化曲线未呈现明显区别,但它们和市售产品仍旧区别明显,市售产品内部相对湿度从初始的60.8%,逐渐缓慢上升并稳定至62.6%;自制1#从初始的50.2%,经历180 d贮存后,缓慢降低至42.9%,并且呈现下降趋势;自制2#从初始的47.5%,在180 d的贮存期内,其内部相对湿度基本稳定在45.0%。长贮试验结果表明,在高湿热海洋大气环境下,BOPET表面蒸镀 SiO_x 作为外增强层,能有效提高封套材料的阻湿能力,而PA6/EVOH/PA6多层流延共挤膜作为内增强层,并未提高封套防护材

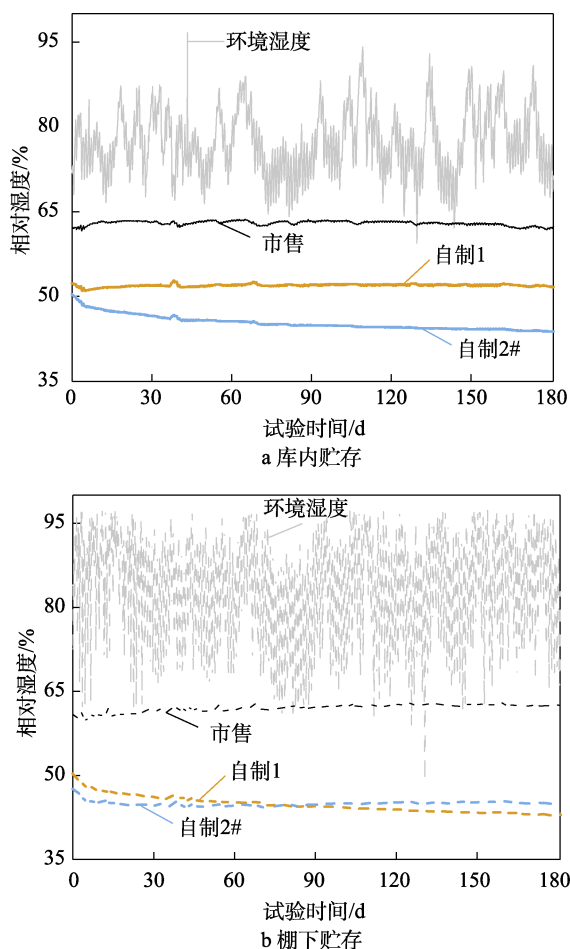


图8 湿度变化曲线

Fig.8 Humidity with time curve: a) shelter storage; b) warehouse storage

料的阻湿能力,可能是因为长期高湿高热环境大大弱化了其阻隔小分子穿透的能力。

金属圆片锈蚀情况的变化能直观体现封套防护材料的性能变化。由图9可知,市售封套防护材料在不同的贮存环境下贮存30 d时,金属圆片均已产生1枚微小的锈斑。随着贮存时间的增加,锈斑逐渐增大,直至180 d时,样片已然锈迹斑斑,反面也如此。反观自制1#和自制2#两型封套防护材料,经过180 d贮存试验后,金属圆片均光洁如初。这和图6曲线结果一致。

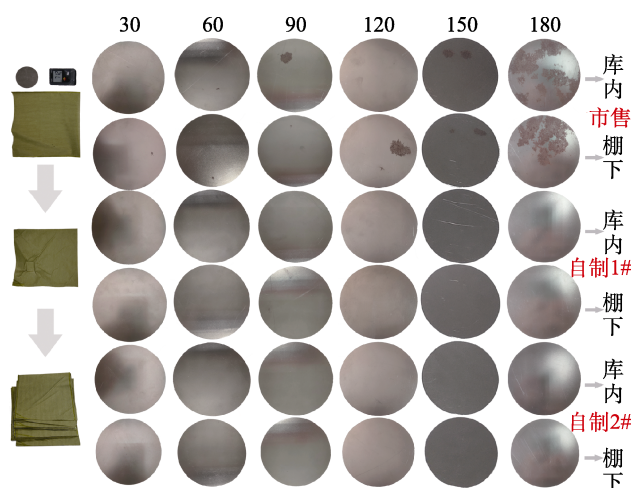


图9 金属圆片的表面状态
Fig.9 Surface state of metal discs

3 结论

1) 2种自制封套防护材料内相对湿度在库内与棚下环境分别降低16.7%、29.8%和31.5%、28.1%,封套防护包装内相对湿度保持在40%~55%。

2) 封套防护材料在海洋大气环境贮存后,其抗静电性能和力学性能未出现明显衰减。贮存试验期间,封套防护材料表面电阻率均处于 $10^9 \Omega \sim 10^{11} \Omega$,拉断力 $\geq 100 \text{ N/15 mm}$,耐磨层/外增强层间剥离强度 $\geq 6 \text{ N/15 mm}$,满足相关标准要求。

3) BOPET表面蒸镀 SiO_x 膜材料作为外增强层,能有效降低封套材料的水蒸气透过率。经180 d贮存试验后,其阻湿能力仍是市售产品的2倍以上。

4) 在60 d贮存期时,发生的水蒸气透过率骤升的原因尚未明确。

5) 考虑到武器装备的贮存期通常在10 a及以上,需要持续进行自然环境试验,或者采取热氧加速、湿热加速实验探究封套防护材料的失效机制与预测防护寿命。

参考文献:

[1] 杨世坚. 后勤车辆装备封存管理与实施研究[J]. 装备

- 环境工程, 2006, 3(6): 70-73.
- YANG Shi-jian. Study on Seal Packaging Management and Implementation in Logistics Vehicles and Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 70-73.
- [2] 吴灿伟, 封彤波, 阎旭, 等. 封套材料在军用装备封存包装中的应用及发展趋势[J]. 包装工程, 2009, 30(9): 53-57.
- WU Can-wei, FENG Tong-bo, YAN Xu, et al. Application and Development Trend of Envelope Materials in Military Equipment Preservative Packaging[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 53-57.
- [3] 宣兆龙, 易建政, 于新龙. 防静电封存封套材料研究[J]. 包装工程, 2007, 28(3): 37-38.
- XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng, YU Xin-long. Study of Antistatic Envelope Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(3): 37-38.
- [4] 段志强, 祁立雷, 廖亚立. 封套材料红外反射降温技术研究[J]. 价值工程, 2012, 31(16): 301-302.
- DUAN Zhi-qiang, QI Li-lei, LIAO Ya-li. Study on Infra-red Reflect Cooling Technique of Envelop Material[J]. Value Engineering, 2012, 31(16): 301-302.
- [5] 段志强, 易建政, 滕利才. 伪装隔热封套材料研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 59-61.
- DUAN Zhi-qiang, YI Jian-zheng, TENG Li-cai. Study of Camouflage and Heat-Shielding Envelop Material[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 59-61.
- [6] 张敬慧, 胡毅钧. 战场目标特性与燃烧弹装药结构特性分析[J]. 科学技术创新, 2018(27): 21-22.
- ZHANG Jing-hui, HU Yi-jun. Analysis of Battlefield Target Characteristics and Incendiary Bomb Charge Structure Characteristics[J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(27): 21-22.
- [7] 宣兆龙, 易建政, 段志强. 野战装备封存封套材料研究[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 53-54.
- XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng, DUAN Zhi-qiang. Study of Envelope Materials Used to Seal up Field Equipment[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 53-54.
- [8] 唐艳秋, 张建伟, 王福成. 防锈防护组合技术在装备器材防锈封存中的应用[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 117-122.
- TANG Yan-qiu, ZHANG Jian-wei, WANG Fu-cheng. Application of the Rust Protection Combination Technology in the Equipment Preservation[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 117-122.
- [9] 刘振华, 罗少锋, 彭薇. 封存包装技术在装备防护中的应用及对策[J]. 包装工程, 2013, 34(19): 123-125.
- LIU Zhen-hua, LUO Shao-feng, PENG Wei. Application and Counterplan of Seal Packaging for Equipment Protection[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19): 123-125.
- [10] 宣兆龙, 易建政, 段志强, 等. 封套封存环境透湿模型及应用[J]. 军械工程学院学报, 2004, 16(2): 25-28.
- XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng, DUAN Zhi-qiang, et al. The Penetrating Model of Damp in Protective Cover and Its Application[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2004, 16(2): 25-28.
- [11] 段志强, 易建政, 宣兆龙, 等. 封套材料透湿率影响因素分析[J]. 包装工程, 2003, 24(4): 18-19.
- DUAN Zhi-qiang, YI Jian-zheng, XUAN Zhao-long, et al. Research on Influential Factor of the Moisture Permeability of Envelop Materials[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(4): 18-19.
- [12] 田森, 彭钧. 舰船封存技术的现状与发展[J]. 包装工程, 2002, 23(2): 31-33.
- SEN tian, JUN Peng. Status and Development of Ship Preservation Technology[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(2): 31-33.
- [13] 张春和, 郭健杰, 张众杰. 后勤装备整装封套封存技术与防护效果评价[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 164-167.
- ZHANG Chun-he, GUO Jian-jie, ZHANG Zhong-jie. Evaluation of Integral Sealing and Storage Technology and Protective Effect of Logistical Equipment[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 164-167.
- [14] 牛正一, 李良春, 高飞, 等. 基于复合防护材料的模块组合式柔性封套设计[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 55-60.
- NIU Zheng-yi, LI Liang-chun, GAO Fei, et al. Design of Modular Combined Flexible Envelope Based on Composite Protective Materials[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 55-60.
- [15] 刘茂林, 刘彭, 赵尚. 陆军船艇装备中空压机封套的设计与技术研究[J]. 南方农机, 2018, 49(15): 20, 23.
- LIU Mao-lin, LIU Peng, ZHAO Shang. Design and Technical Research of Air Compressor Envelope in Army Boat Equipment[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(15): 20, 23.
- [16] 王拥军, 缪忠辉. 船用压缩机的三年免维护封存保养技术研究[J]. 压缩机技术, 2015(5): 30-33.
- WANG Yong-jun, MIAO Zhong-hui. Research on the Three Years of Free Maintenance Storage Technology for Compressor Used in Ships[J]. Compressor Technology, 2015(5): 30-33.
- [17] 杨世坚, 沈咏梅. 外军军事装备封存包装技术研究[J]. 包装工程, 2006, 27(3): 74-76.
- YANG Shi-jian, SHEN Yong-mei. Study of Seal and Storage Packaging Technology of Foreign Military Equipment[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(3): 74-76.
- [18] 陈文阁, 李娅菲, 罗少锋. 气囊封口式封套野外封存应用验证[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 252-256.
- CHEN Wen-ge, LI Ya-fei, LUO Shao-feng. Verification of Field Sealing Application of Airbag Sealing-Type Envelope[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 252-256.
- [19] 罗少锋, 陈文阁, 李娅菲. 军事装备野外封存封套材料选择[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 197-201.
- LUO Shao-feng, CHEN Wen-ge, LI Ya-fei. Selection of Envelop Materials for Field Sealing of Military Equip-

- ment[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 197-201.
- [20] 吴会博, 陈祥军, 岳巍强. 东南沿海车辆装备整体封存设计与验证[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(10): 32-35.
WU Hui-bo, CHEN Xiang-jun, YUE Wei-qiang. Design and Verification of Vehicle Equipment Overall Sealing in Southeast Coast Area[J]. Journal of Military Transportation University, 2016, 18(10): 32-35.
- [21] 郑铁军, 张会奇, 孟凡金. 湿热环境下装甲装备封存方法应用研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 93-96.
ZHENG Tie-jun, ZHANG Hui-qi, MENG Fan-jin. Application Research of Armored Equipment Seal Methods for Wet & Hot Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(4): 93-96.
- [22] HANSEN C M. Diffusion in Polymers[J]. Polymer Engineering & Science, 1980, 20(4): 252-258.
- [23] 王波, 易建政, 祁立雷, 等. 弹药包装高阻隔防潮封套材料透湿性研究[J]. 包装工程, 2010, 31(13): 47-51.
WANG Bo, YI Jian-zheng, QI Li-lei, et al. Vapor Transmission Study of High Barrier Moistureproof Envelop Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13): 47-51.
- [24] 侯辉, 赵春燕, 蔡建. 高防潮阻隔性封套包装复合材料设计探讨[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 145-149.
HOU Hui, ZHAO Chun-yan, CAI Jian. Design of Envelope Packaging Composite Materials with Highly Efficient Moisture Barrier Performance[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 145-149.
- [25] 贝荣华. SiO_x/PET 复合薄膜的制备、性能及抗迁移能力的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
BEI Rong-hua. Preparation, Properties and Migration Resistance of SiO_x/PET Composite Film[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [26] 李思德. PA/EVOH 多层共挤流延阻隔薄膜结构—性能—加工工艺研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
LI Si-de. Study on Structure-Properties-Processing Technology of PA/EVOH Multilayer Co-Extrusion Casting Barrier Film[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [27] GB/T 26253—2010, 塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 红外检测器法[S].
GB/T 26253—2010, Determination of Water Vapour Transmission Rate for Plastics-Film and Sheet—Infrared Detection Sensor Method[S].
- [28] GB/T 19789—2021, 包装材料 塑料薄膜和薄片氧气透过性试验 库仑计检测法[S].
GB/T 19789—2021, Packaging Material—Test Method for Oxygen Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and Sheet—Coulometric Sensor[S].
- [29] GB/T 1040.3—2006, 塑料拉伸性能的测定第 3 部分: 薄膜和薄片的试验条件[S].
GB/T 1040.3—2006, Plastics-Determination of Tensile Properties—Part 3: Test Conditions for Films and Sheets[S].
- [30] GB/T 8808—1988, 软质复合塑料材料剥离试验方法[S].
GB/T 8808—1988, Test Method for Peel Force of Flexible Laminated Plastics[S].
- [31] GB/T 31838.3—2019, 固体绝缘材料 介电和电阻特性 第 3 部分: 电阻特性[S].
GB/T 31838.3—2019, Solid Insulating Materials—Dielectric and Resistive Properties—Part 3: Resistive Properties (DC Methods)—Surface Resistance and Surface Resistivity[S].
- [32] GB/T 21302—2007, 包装用复合膜、袋通则[S].
GB/T 21302—2007, General Rules of Laminated Films & Pouches for Packaging[S].
- [33] GJB 1444—1992, 弹药包装通用规范[S].
GJB 1444—1992, General Specification for Ammunition Packaging[S].
- [34] 江谷. 软包装材料及复合技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2008.
JIANG Gu. Flexible Packaging Materials and Composite Technology[M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2008.
- [35] 张际亮, 孙学鹏, 郇剑, 等. 铝表面改性 SiO_x 薄膜力学性能研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(S1): 275-278.
ZHANG Ji-liang, SUN Xue-peng, LI Jian, et al. Mechanical Properties of SiO_x Film on Aluminum Substrate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(S1): 275-278.
- [36] 丁燕鸿. 微/纳米二氧化硅形貌结构调控及其复合材料研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
DING Yan-hong. Morphology and Structure Control of Micro/Nano Silica and Its Composites[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [37] 杜阳. 基于有机硅溶胶制备 LDPE/ SiO_x 纳米复合材料的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
DU Yang. Study on Preparation of LDPE/ SiO_x Nanocomposites Based on Organic Silica Sol[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
- [38] GJB 2605A—2021, 可热封柔韧性防静电阻隔材料规范[S].
GJB 2605A—2021, Specification for Heat Sealable Flexible Electrostatic Protective Barrier Materials[S].

责任编辑: 刘世忠