

DOI:10.11784/tdxbz202412017

P 类织物膜材在海洋环境下的自然老化试验

刘红波^{1,2,3}, 韩颖¹, 练继建^{1,2,4}, 刘洋¹, 陈志华^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072;

3. 河北工程大学土木工程学院, 邯郸 056038;

4. 天津理工大学海洋能源学院, 天津 300384)

摘要: 针对漂浮式光伏结构中的 P 类织物膜材在海洋环境下的老化性能, 在天津某港口进行了 10 个月的膜材自然老化试验。研究了膜材强度等级和表面处理类型对 P 类织物膜材老化性能的影响, 分析了膜材的生物污损状况和老化后的力学性能, 其中生物污损分析包括膜材表面的污损生物种类、单位面积污损生物质量、膜材表面状况和透光性, 力学性能分析包括膜材经向和纬向的单轴拉伸强度、断裂伸长率和撕裂强度。结果表明: 膜表面污损生物主要为藤壶和海藻, 单位面积污损生物质量在不同位置的差异性较大, 其范围为 22.2~356.0 g/m², 平均值约为 143.9 g/m²; 污损生物使膜材涂层表面轻微变黄, 透过光可见由于老化造成的黄褐色斑点, 透光性变差, 且藤壶生物对膜材涂层表面颜色和透光性的影响相较于海藻更为严重; 膜材在海洋中暴露 10 个月后, 经向和纬向的单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率总平均值分别为 98.5%、98.7%、97.8%和 98.2%, 经向和纬向的撕裂强度的老化保持率总平均值分别为 95.3%和 95.2%; 建立了 P 类织物膜材在海洋环境下的老化预测模型, 并对膜材老化 25 年后的力学性能保持率进行预测, 发现经向和纬向的单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率均大于 50.0%, 表明膜材在海洋环境下具有较好的抗老化性能。本文研究结果为海上漂浮式光伏膜结构的工程应用提供一定参考。

关键词: 漂浮式光伏结构; P 类织物膜材; 老化试验; 生物污损; 老化预测模型

中图分类号: TU383

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)11-1182-10

Natural Aging Tests of P-Type Fabric Membrane Material in Marine Environment

Liu Hongbo^{1,2,3}, Han Ying¹, Lian Jijian^{1,2,4}, Liu Yang¹, Chen Zhihua^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

4. School of Ocean Energy, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Aimed at the aging properties of P-type fabric membrane material in floating photovoltaic structures in a marine environment, natural aging tests were conducted at one port in Tianjin for 10 months. The effects of strength grade and surface treatment type on the aging properties of P-type fabric membrane material were studied, and the aged material's biological fouling statuses and mechanical properties were analyzed. The biological fouling analysis included the types of fouling organisms on the membrane surface, the mass of fouling organisms per unit area, the statuses of membrane surface and the light transmittance, while the analysis of mechanical properties for the material

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-04-30.

作者简介: 刘红波(1983—), 男, 博士, 教授, hbliu@tju.edu.cn.

通信作者: 刘洋, yangliu_0516@tju.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4200700); 河北省自然科学基金资助项目(E2024402047).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB4200700), the Hebei Natural Science Foundation (No. E2024402047).

consisted of the uniaxial tensile strength, the elongation rate at break and the tear strength in the warp and weft directions. Results showed that the fouling organisms on the membrane surface were mainly barnacles and seaweeds, and the mass of fouling organisms per unit area varied greatly at different locations, with a range of 22.2—356.0 g/m² and an average value of 143.9 g/m². The fouling organisms caused slight yellowing of the membrane coating surface, the yellow brown spots resulting from aging can be seen through light, and the light transmittance became worse. In addition, the influences of barnacle organisms on the membrane coating surface color and light transmittance were more serious than those of seaweeds. After 10 months of exposure to the ocean, the membrane material's total average aging retention rates of uniaxial tensile strength and elongation rate at break in the warp and weft directions were 98.5%, 98.7%, 97.8% and 98.2%, respectively, and the total average aging retention rates of tear strength in the two directions were 95.3% and 95.2%, respectively. An aging prediction model of P-type fabric membrane material in the marine environment was established, and the mechanical property retention rates of the material after 25 years of aging were predicted. It was found that the aging retention rates of the uniaxial tensile strength and elongation rate at break in both the warp and weft directions were higher than 50.0%, indicating the material's excellent anti-aging performance in the marine environment. The research results of this paper provide some reference for the engineering applications of offshore floating photovoltaic membrane structures.

Keywords: floating photovoltaic structure; P-type fabric membrane material; aging test; biological fouling; aging prediction model

在双碳目标的指引下,清洁、可再生能源的探索和发展变得尤为重要^[1].海上漂浮式光伏电站浮于水面,节约了土地资源,开发了海上充足的太阳能资源,是开发绿色能源的良好选择^[2-4].

常用的漂浮式光伏电站的结构形式主要有高密度聚乙烯(high-density polyethylene, HDPE)浮块结构^[5]、浮管-支架结构^[6-7]、薄膜结构等^[8-9],其中挪威的 Ocean Sun 公司^[9]提出的柔性薄膜浮体结构由外围的 HDPE 管和内部的薄膜结构组成,具有发电效率高^[10]、抗风抗浪能力强^[11-13]、运输和安装成本低^[9]等诸多优势,在海面上宛若一片睡莲.该结构目前已在全球多个国家和地区得到了广泛应用,如挪威、西班牙、阿尔巴尼亚、新加坡、中国等.

P 类织物膜材具有强度高、变形能力好、造价低廉等诸多优点^[14],可应用于漂浮式薄膜结构光伏电站当中.然而,漂浮式薄膜结构在海洋环境中面临着光照、海浪拍击、持续起伏、海水高湿高盐、海生物附着等不利影响,这可能使膜材存在着老化和生物附着的问题,造成力学性能的改变和质量的增加,并进一步影响整个漂浮式光伏结构的力学性能^[15].因此,P 类织物膜材在海洋环境下的耐久性值得重点研究与关注.

目前,许多学者对建筑结构中使用的 P 类织物膜材进行了老化性能的相关研究,发现膜材长期暴露在室外环境下,热、光、氧、有害金属原子、辐射等外界因素的影响使其发生物理或化学变化,逐渐性能劣化^[16],表面涂层出现变黄、褪色、开裂等现象,力学性

能表现为抗拉强度降低、断裂伸长率降低、撕裂强度降低、弹性模量降低等问题^[17-22].然而,目前鲜见 P 类膜材耐久性在更为复杂的海洋环境下的相关研究.

为保障漂浮式薄膜结构光伏电站的耐久性和安全性,笔者在天津某港口的海洋环境下进行了 10 个月的 P 类织物膜材的老化试验,研究了强度等级和表面处理类型对膜材耐久性的影响,对老化后的膜材进行了生物污损状况和力学性能的分析.

1 耐久性试验方案

1.1 试验概况

膜材耐久性试验场地位于天津市某港口.试验膜材为由聚酯纤维基布和聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)涂层组成的 P 类织物膜材,表面采用聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)或二氧化钛(TiO₂)进行处理以提高耐久性.试验共进行了 8 块三角形膜材的海洋暴露试验,按照强度等级(P4、P5 和 P7)和表面处理类型(PVDF + TiO₂ 和 PVDF)分为 4 组,每组包括 2 块相同的膜材,如表 1 所示.

膜材老化试验具体流程如图 1 所示.试验中将膜材裁剪为三角形试样,使用绳索将膜材绑扎到由 HDPE 管组成的边长约 1.6 m 的三角形框架上,组成 8 个三角形结构,每 4 个三角形结构绑扎组装成 1 个大的正方形,如图 1(a)所示.随后,将 2 个大的正方形的 4 个角点都连接绳索固定在岸边,使浮体漂浮在港口开阔区域,如图 1(b)所示.

表 1 P 类织物膜材老化试验设计及原始力学性能

Tab.1 Aging test design and original mechanical properties of P-type fabric membrane material

试件编号	强度等级	表面处理类型	厚度/mm	单轴拉伸试验结果				梯形撕裂试验结果	
				经向强度 (N/(5 cm))	纬向强度 (N/(5 cm))	经向断裂 伸长率/%	纬向断裂 伸长率/%	经向 强度/N	纬向 强度/N
P4-TiO ₂ -1, P4-TiO ₂ -2	P4	PVDF + TiO ₂	0.76	5 037	4 948	18.26	23.70	683	697
P5-TiO ₂ -1, P5-TiO ₂ -2	P5	PVDF + TiO ₂	0.84	5 224	5 067	20.20	26.69	750	743
P7-TiO ₂ -1, P7-TiO ₂ -2	P7	PVDF + TiO ₂	1.00	7 781	7 719	20.75	23.32	1 284	1 291
P7-PVDF-1, P7-PVDF-2	P7	PVDF	1.00	8 013	7 916	22.55	23.14	1 155	1 230

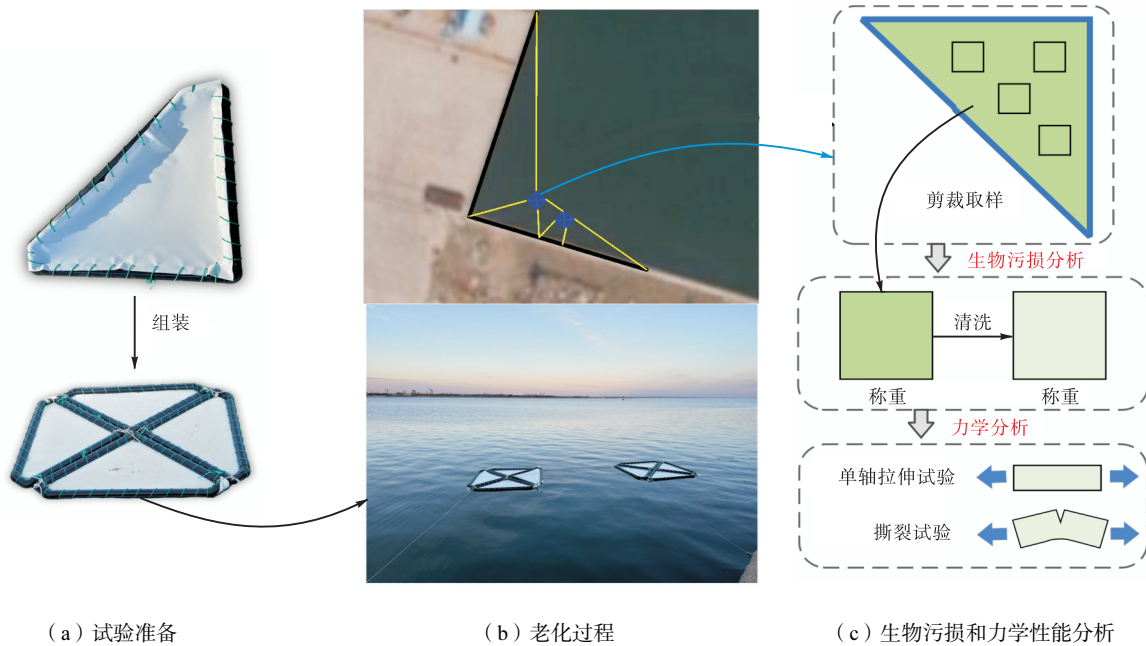


图 1 膜材老化性能试验流程

Fig.1 Test process of aging properties of membrane material

老化试验结束后取回膜材样品, 观察并记录表面污渍状况, 随机选取几个区域裁剪取样并称取清洗前后的质量, 进行海洋生物污损分析. 从老化后的膜材中裁剪取样, 进行单轴拉伸试验和撕裂试验, 对比老化前后膜材的拉伸强度和撕裂强度, 如图 1(c) 所示.

1.2 膜材海洋污损分析方法

根据 GB/T 12763.6—2007^[23] 的相关规定进行膜材海洋生物污损分析. 如图 1(c) 所示, 生物污损分析包括以下步骤: 从每块海洋暴露后的膜材中随机选取 4 块 30 cm × 30 cm 的样本并裁剪下来, 8 块膜材共计裁剪 32 块样本; 观察并记录膜材老化后表面污渍状况, 称取质量; 使用清水将表面污渍物清洗干净并风干, 观察并记录膜材老化后表面老化状况, 并称取清洗后的质量; 根据清洗前后两次的质量计算海洋生物污损质量.

1.3 膜材力学性能测试方案

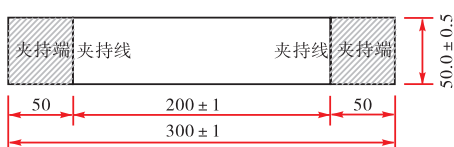
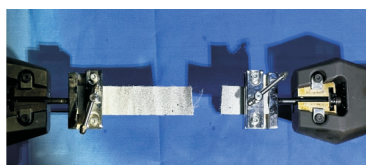
参考 DG/TJ 08—2019—2019^[24] 和 ISO 1421:

2016^[25], 采用万能试验机和数字图像相关法 (digital image correlation, DIC) 进行膜材的单轴拉伸试验和梯形撕裂试验. 将膜材试样夹持在带有波纹面的夹具上, 夹具安装在万能试验机上进行拉伸试验, 并采用 DIC 记录拉伸过程中的应变, 如图 2(a) 所示.

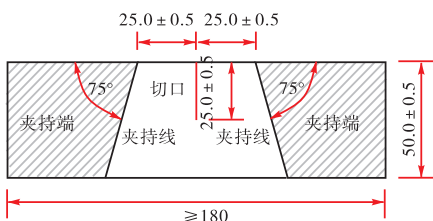
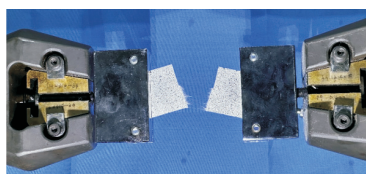
膜材单轴拉伸试验和梯形撕裂试验均包括膜材经向和纬向这两个方向的测试, 剪取试样的长度方向应平行于膜材的经向或纬向, 每组进行 5 次重复试验. 单轴拉伸试样为宽 50 mm、长 300 mm 的长条形, 夹持间距 200 mm, 拉伸速度为恒定伸长速率 100 mm/min, 如图 2(b) 所示. 梯形撕裂试样为宽 (50.0 ± 0.5) mm、长不小于 180 mm 的长条形, 在试样上标记等腰梯形, 梯形两腰为夹持线, 在等腰梯形上底边中央处与边垂直方向切开切口, 切口长度 (25.0 ± 0.5) mm, 拉伸速度为恒定伸长速率 100 mm/min, 如图 2(c) 所示. 表 1 为未老化膜材的力学性能试验结果, 表中数据为 5 次重复试验的平均值.



(a) 膜材拉伸试验装置



(b) 单轴拉伸试验(单位:mm)



(c) 梯形撕裂试验(单位:mm)

图2 膜材力学性能试验

Fig.2 Tests of mechanical properties of membrane material

2 生物污损分析

2.1 生物污损随时间变化情况

膜材耐久性试验自 2023-11-28 至 2024-08-28, 经历了冬、春、夏 3 个季节, 由于试验场地和试验条件的限制, 导致试验在进行 10 个月后终止. 试验过程中, 膜表面在冬季出现积雪, 在春季出现了少量生物污损, 在夏季出现了大量藤壶和海藻生物污损, 具体情况如表 2 所示.

表 2 膜表面生物污损状况

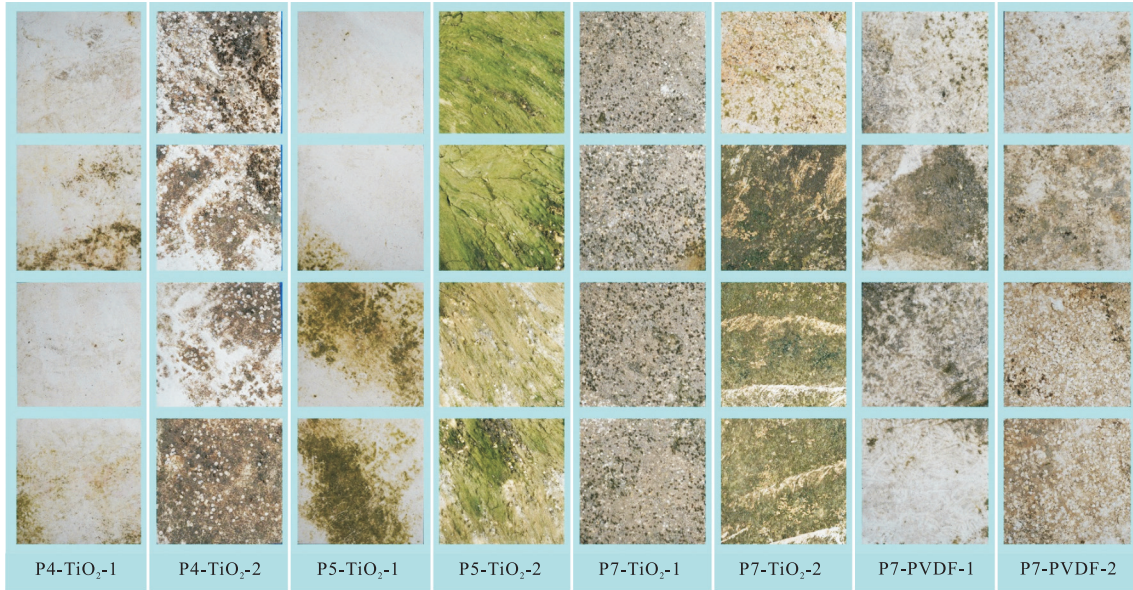
Tab.2 Biological fouling status of membrane surface

日期	生物污损状况	图片
2023-11-28	膜材放到海面 上的初始状 态, 表面清 洁光滑, 无 污物	
2023-12-28	冬季天津市降 雪, 海面出 现浮冰, 膜 表面存在大 量积雪	
2024-04-28	春季膜表面出 现少量灰尘 堆积及海藻 生长, 表面 光滑度较好, 污物易清 洁	
2024-08-28	将膜取回, 夏 季膜表面附 着有大量藤 壶生物	
	夏季膜表面附 着有大量海 藻生物	
	HDPE 管壁侧 面水位线附 近主要附着 海藻生物, 水 位线以下主 要附着藤 壶生物	

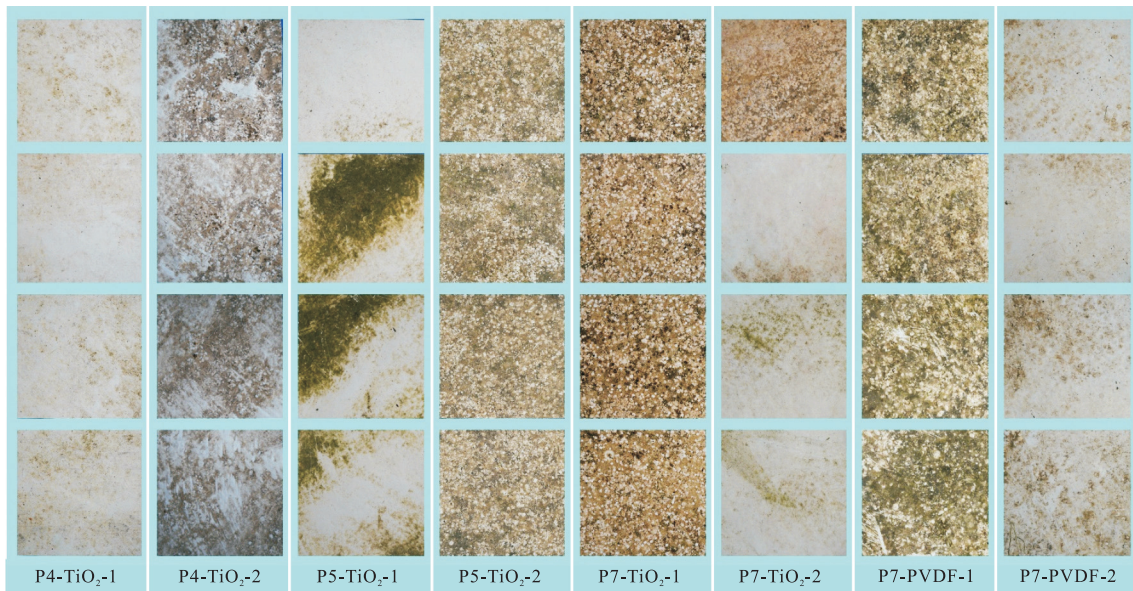
2.2 生物污损质量分析

图 3 为从海洋暴露后膜材中裁剪下来样本的
单位面积污损生物质量和表面污物状态. 在试验的 8
块膜材中, 每块裁剪下 4 个尺寸为 30 cm × 30 cm 方
形样本, 共计 32 块样本. 膜表面单位面积污损生物
质量在不同位置的差异性较大, 其范围为 22.2 ~
356.0 g/m², 平均值约为 143.9 g/m².

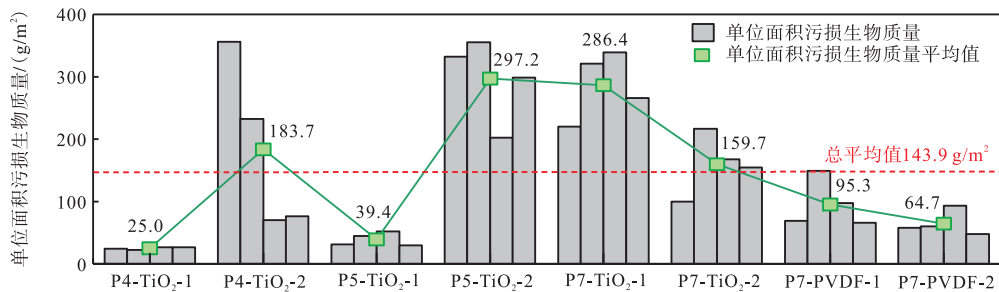
膜表面污损生物主要为海藻和藤壶. P4-TiO₂-1
和 P5-TiO₂-1 两组膜材表面附着少量海藻, 单位面积
污损生物质量偏低, 平均值分别为 25.0 g/m² 和



(a) 膜正面生物污损状态(尺寸为 30 cm × 30 cm)



(b) 膜背面生物污损状态(尺寸为 30 cm × 30 cm)



(c) 膜材单位面积污损生物质量

图 3 膜材单位面积污损生物质量和表面污物状态

Fig.3 Mass of fouling organisms per unit area and fouling status of membrane surface

39.4 g/m²; P7-PVDF-1 和 P7-PVDF-2 两组膜材表面附着少量的藤壶和海藻,单位面积污损生物质量平均

值分别为 95.3 g/m²和 64.7 g/m²; P7-TiO₂-2 膜材表面附着藤壶和海藻,单位面积污损生物质量平均值为

159.7 g/m²; P4-TiO₂-2 膜材表面附着大量藤壶生物, 单位面积污损生物质量平均值为 183.7 g/m²; P5-TiO₂-2 和 P7-TiO₂-1 两组膜材表面分别附着大量藤壶和海藻生物, 单位面积污损生物质量平均值分别为 297.2 g/m² 和 286.4 g/m².

2.3 生物污损的老化作用

图 4 所示为膜材正反两面的生物污损状况、清洗后表面状况和透光性. 图中选取了生物污损较多的 P5-TiO₂-2 和 P7-TiO₂-1 两组膜材进行分析, 样本尺寸 10 cm × 10 cm. 综合来看, 藤壶生物对 P 类织物膜材表面涂层颜色以及透光性的影响较大, 海藻生物的影响较小.

P5-TiO₂-2 膜材正面附着大量海藻生物, 绿色的

丝状海藻黏连并覆盖在膜表面, 背面附着有少量藤壶和海藻, 表面呈深绿色. 膜材清洗后涂层表面轻微变黄, 透过光可见由于老化造成的黄褐色斑点, 透光性变差.

P7-TiO₂-1 膜材正面和反面均附着大量藤壶生物, 正面藤壶小而密集, 背面藤壶大而稀疏. 从膜材正面和背面分别取 10 cm × 10 cm 的 3 个样区进行藤壶生物的计数分析. 正面藤壶生物直径约为 4 ~ 5 mm, 高度约为 3 mm, 平均密度为 17 900 个/m; 背面藤壶生物直径约为 7 ~ 8 mm, 高度约为 6 mm, 平均密度为 12 100 个/m. 膜材清洗过后涂层表面可见黄色的藤壶附着痕迹, 透过光可见大量由于老化造成的黄褐色斑点, 透光性变差.

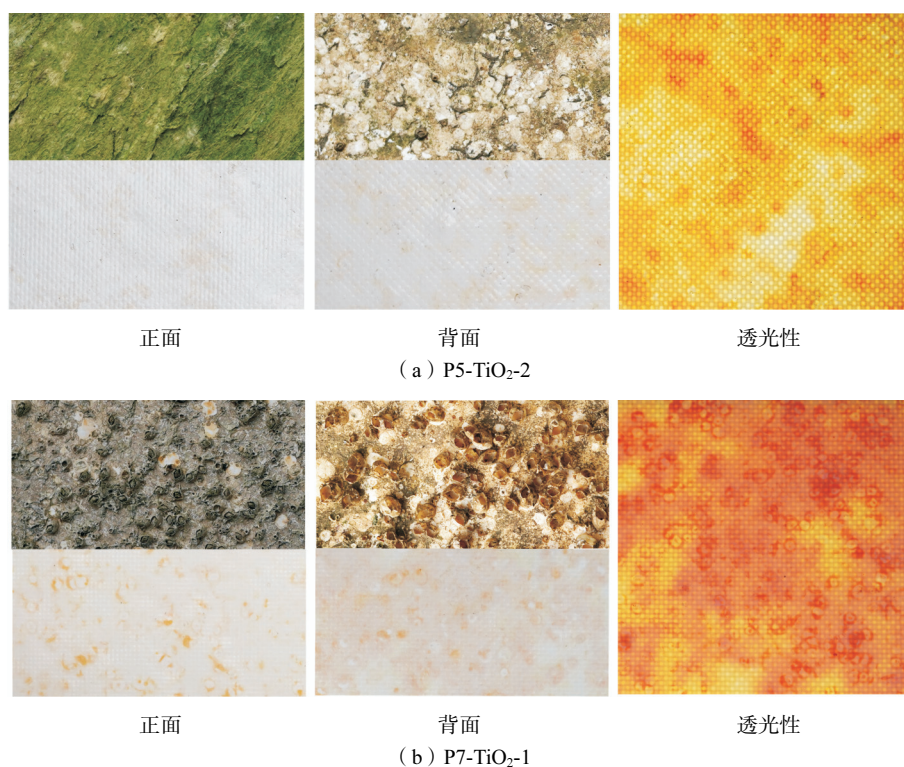


图 4 老化后膜材表面生物污损及清洗后表面状况和透光性(尺寸为 10 cm × 10 cm)

Fig.4 Biological fouling, surface condition after cleaning and light transmittance of aged membrane material (with size of 10 cm × 10 cm)

3 力学性能分析

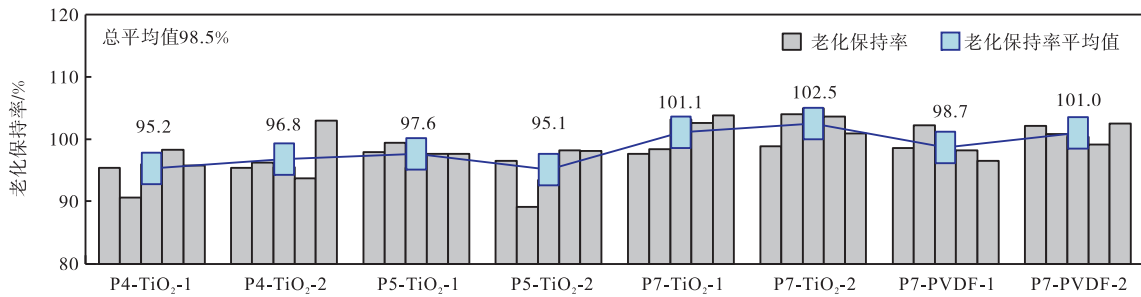
3.1 单轴拉伸试验结果

图 5 为膜材单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率. 膜材在海洋中暴露 10 个月后, 经向和纬向的单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率总平均值分别为 98.5%、98.7%、97.8% 和 98.2%. 这表明 P 类织物膜材在海洋环境下具有较好的耐久性, 可应用于海洋结构当中.

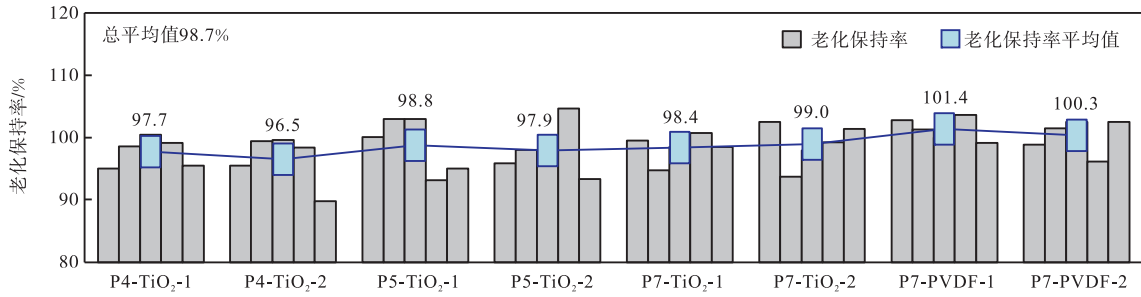
P4 和 P5 类膜材相较于 P7 类膜材的单轴拉伸强度降低得更多, 表明强度对膜材的老化性能具有一定影响. 对比 P7-TiO₂ 和 P7-PVDF 两组膜材, 表面处理类型对膜材老化性能没有明显影响. 膜材强度等级和表面处理类型对断裂伸长率的影响较小.

3.2 撕裂试验结果

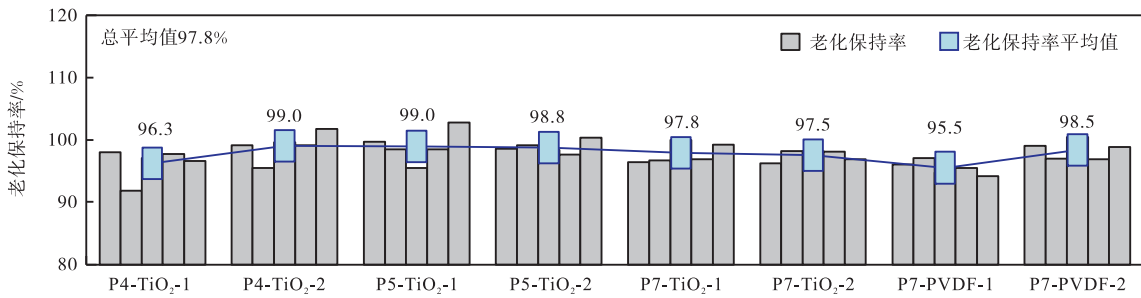
图 6 为 PVC 膜材撕裂强度的老化保持率. 膜材在海洋中暴露 10 个月后, 经向和纬向的撕裂强度的保持率总平均值分别为 95.3% 和 95.2%. 相较于单轴拉伸强度, 膜材撕裂强度退化得稍多.



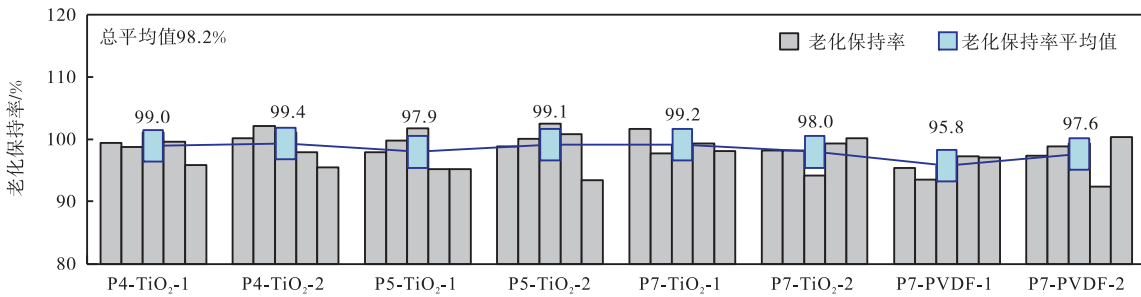
(a) 经向单轴拉伸强度



(b) 纬向单轴拉伸强度



(c) 经向断裂伸长率



(d) 纬向断裂伸长率

图 5 膜材单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率

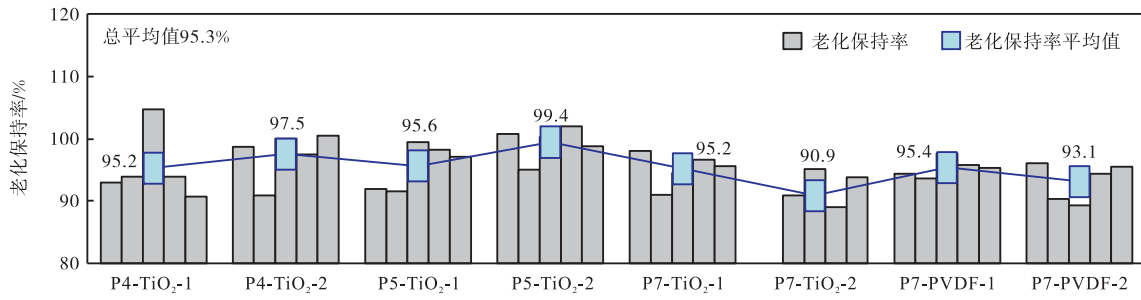
Fig. 5 Aging retention rates of uniaxial tensile strength and elongation rate at break of membrane material

3.3 膜材老化预测模型

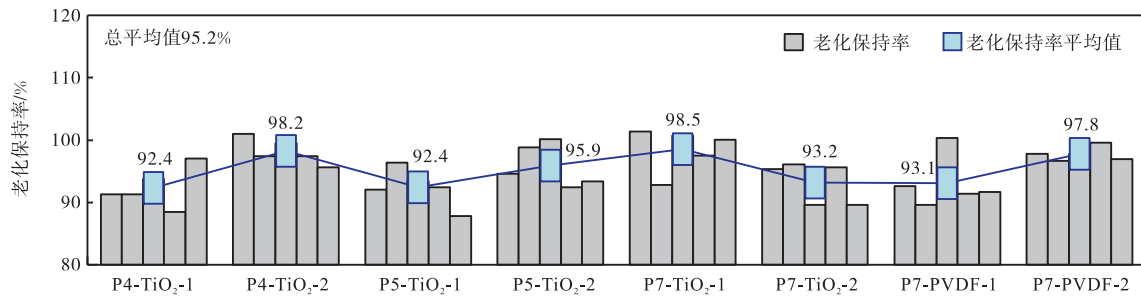
Toyoda 等^[19]和 Yang 等^[26]通过膜材在大气环境下的老化试验研究,发现膜材强度保持率与老化时间之间呈指数关系,提出了指数函数的膜材老化预测模型.

因此本文采用指数函数建立 P 类织物膜材在海洋环境下的老化预测模型.力学性能保持率(Y)和老化时间(t)之间满足指数函数关系,依据膜材在海洋环境下的 10 个月的实测老化试验数据进行参数拟合,

得到单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率预测模型,如表 3 和图 7 所示.模型预测显示,P 类织物膜材在海洋环境下老化 25 年后,经向和纬向的单轴拉伸强度的老化保持率和断裂伸长率的老化保持率均大于 50.0%,表明膜材具有较好的抗老化性能,为海上漂浮式光伏膜结构的工程应用提供一定参考.在未来研究中还需通过膜材室内加速老化试验为寿命预测模型提供更多的数据依据以及结合具体工程实例进行验证.



(a) 经向撕裂强度



(b) 纬向撕裂强度

图 6 P 类织物膜材撕裂强度的老化保持率

Fig.6 Aging retention rate of tear strength of P-type fabric membrane material

表 3 膜材老化预测模型和结果

Tab.3 Aging prediction models and results of membrane material

评价指标	老化预测模型	老化保持率(10 个月)/%	老化保持率(25 年)/%
经向单轴拉伸强度	$Y = 100e^{-0.018 1t}$	98.5	63.6
纬向单轴拉伸强度	$Y = 100e^{-0.015 7t}$	98.7	67.5
经向断裂伸长率	$Y = 100e^{-0.026 7t}$	97.8	51.3
纬向断裂伸长率	$Y = 100e^{-0.021 8t}$	98.2	58.0

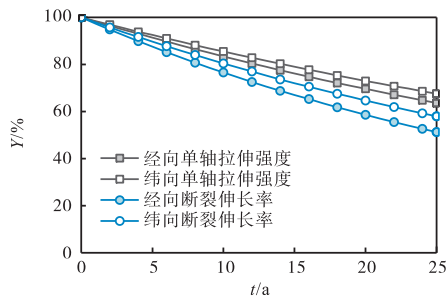


图 7 膜材老化预测模型(老化保持率-老化时间)

Fig.7 Aging prediction models of membrane material (aging retention rate vs aging time)

4 结 论

笔者在天津某港口的海洋环境下进行了 10 个月的 P 类织物膜材自然老化试验。对老化后的膜材进行了生物污损状况和力学性能的分析,具体结论如下。

(1) 在海洋环境下膜表面污损生物主要为藤壶和

海藻,单位面积污损生物质量在不同位置的差异性较大,范围为 22.2 ~ 356.0 g/m²,平均值约为 143.9 g/m²。

(2) 污损生物使膜材涂层表面轻微变黄,透过光可见由于老化造成的黄褐色斑点,透光性变差,且藤壶对膜材表面颜色和透光性的影响更大。

(3) 膜材在海洋中暴露 10 个月后,经向和纬向的单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率总平均值分别为 98.5%、98.7%、97.8% 和 98.2%,经向和纬向的撕裂强度的老化保持率总平均值分别为 95.3% 和 95.2%;材料的力学性能退化小于 5.0%,受到了材料离散性和材料性能退化的共同影响。

(4) 本文建立了 P 类织物膜材在海洋环境下的老化预测模型,并对膜材老化 25 年后的力学性能保持率进行预测,发现经向和纬向的单轴拉伸强度和断裂伸长率的老化保持率均大于 50.0%,表明膜材在海洋环境下具有较好的抗老化性能,为海上漂浮式光伏膜结构的工程应用提供一定参考。

参考文献

- [1] Das U K, Tey K S, Seyedmahmoudian M, et al. Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 912-928.
- [2] Ranjbaran P, Yousefi H, Gharehpetian G B, et al. A review on floating photovoltaic(FPV) power generation units[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 110: 332-347.
- [3] Sahu A, Yadav N, Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 66: 815-824.
- [4] Kumar M, Niyaz H M, Gupta R. Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 233: 111408.
- [5] Silvério N M, Barros R M, Filho G L T, et al. Use of floating PV plants for coordinated operation with hydro-power plants: Case study of the hydroelectric plants of the São Francisco River basin[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 339-349.
- [6] Lee Y G, Joo H J, Yoon S J. Design and installation of floating type photovoltaic energy generation system using FRP members[J]. *Solar Energy*, 2014, 108: 13-27.
- [7] Kim S H, Yoon S J, Choi W. Design and construction of 1 MW class floating PV generation structural system using FRP members[J]. *Energies*, 2017, 10(8): 1142.
- [8] Trapani K, Millar D L. The thin film flexible floating PV (T3F-PV) array: The concept and development of the prototype[J]. *Renewable Energy*, 2014, 71: 43-50.
- [9] Ocean Sun. Our Projects[EB/OL]. <https://oceansun.no/our-projects/>, 2024-12-07.
- [10] Nisar H, Janjua A K, Hafeez H, et al. Thermal and electrical performance of solar floating PV system compared to on-ground PV system—An experimental investigation[J]. *Solar Energy*, 2022, 241: 231-247.
- [11] Aas-Hansen T. Evaluation of Seakeeping Capabilities of a Floating Solar Plant[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [12] Grøn P K. Modal Analysis of a Flexible Membrane in Waves[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2022.
- [13] 吴勇虎, 李元芳, 朱建赫, 等. 波浪对柔性薄膜式海上漂浮式光伏结构作用的试验研究[J]. *海洋工程*, 2025, 43(1): 40-47.
- Wu Yonghu, Li Yuanfang, Zhu Jianhe, et al. Experimental study on the effect of waves on flexible membrane-type offshore floating photovoltaic structures[J]. *The Ocean Engineering*, 2025, 43(1): 40-47 (in Chinese).
- [14] Ambroziak A, Kłosowski P. Mechanical properties for preliminary design of structures made from PVC coated fabric[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 74-81.
- [15] 龚方玉. 污染网衣水动力及流场特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2023.
- Gong Fangyu. Study on Hydrodynamic and Flow Field Characteristics of Hydroid-Fouled Net[D]. Harbin: College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, 2023 (in Chinese).
- [16] Berdahl P, Akbari H, Levinson R, et al. Weathering of roofing materials—An overview[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(4): 423-433.
- [17] Yang B, Yang Y H, Huo Z T, et al. Advances in research on aging properties of polyvinyl chloride and polyvinylidene fluoride membranes[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 367: 130292.
- [18] Asadi H, Uhlemann J, Stranghoener N, et al. Tensile strength deterioration of PVC coated PET woven fabrics under single and multiplied artificial weathering impacts and cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 127843.
- [19] Toyoda H, Sakabe H, Itoh T, et al. Weatherability of membrane structure materials as determined by their exposure conditions[J]. *Sen'i Gakkaishi*, 1994, 50(10): 484-488.
- [20] Eichert U. Residual tensile and tear strength of coated industrial fabrics determined in long-time tests in natural weather conditions[J]. *Journal of Coated Fabrics*, 1994, 23(4): 311-327.
- [21] Razak H A, Chua C S, Toyoda H. Weatherability of

- coated fabrics as roofing material in tropical environment[J]. *Building and Environment*, 2004, 39(1): 87-92.
- [22] 杨彬, 吴梦琳, 吕冰, 等. PVDF膜材在自然老化和人工加速老化下力学性能变化的相关性研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(23): 48-53, 60.
Yang Bin, Wu Menglin, Lü Bing, et al. Study on the correlation of mechanical properties of PVDF membrane materials under natural aging and accelerated aging[J]. *Building Structure*, 2021, 51(23): 48-53, 60 (in Chinese).
- [23] GB/T 12763.6—2007 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
GB/T 12763.6—2007 Specifications for Oceanographic Survey—Part 6: Marine Biological Survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007 (in Chinese).
- [24] DG/TJ 08—2019—2019 膜结构检测标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2020.
DG/TJ 08—2019—2019 Standard for Inspection of Membrane Structures[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2020 (in Chinese).
- [25] ISO 1421:2016 Rubber- or Plastics-Coated Fabrics—Determination of Tensile Strength and Elongation at Break[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2016.
- [26] Yang X D, Yan Y S, Qiu W C. Photo-oxidation of PVC-coated membrane material[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 650: 238-244.
- (责任编辑: 武立有)