

严酷海洋大气环境下玻璃纤维复合材料 腐蚀老化规律研究

丁康康, 杜建平, 王振华, 刘少通, 苗依纯, 侯健, 孙明先

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: **目的** 研究严酷海洋大气环境下, 玻璃纤维增强树脂基复合材料的腐蚀老化规律。**方法** 通过实海大气环境试验, 分析了南海岛礁大气环境下, 复合材料暴露不同周期后的腐蚀形貌特征以及力学性能变化规律, 建立了腐蚀老化性能预测灰色模型 GM (1,1), 并与青岛、厦门和三亚等典型海洋大气环境进行对比研究。**结果** 随暴露时间的增长, 南海岛礁大气环境下的复合材料发生严重的纤维裸露, 其弯曲强度呈下降趋势, 基于弯曲强度建立的灰色模型 GM (1,1) 精度达到 1 级; 与其他典型海洋大气环境相比, 随着纬度的降低, 复合材料的弯曲强度呈下降趋势。**结论** 灰色模型 GM (1,1) 对复合材料在岛礁等严酷海洋大气环境下的腐蚀老化性能预测精度较高。影响复合材料性能的最主要环境因素为辐照, 其次为相对湿度和温度。

关键词: 玻璃纤维; 复合材料; 南海岛礁; 海洋大气; 腐蚀老化

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)11-0010-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.002

Study on Corrosion Aging Behavior of Glass Fiber Reinforced Composites in Severe Marine Atmospheric Environment

DING Kang-kang, DU Jian-ping, WANG Zhen-hua, LIU Shao-tong, MIAO Yi-chun, HOU Jian, SUN Ming-xian

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: The objective of this work is to investigate the corrosion aging behavior of glass fiber reinforced resin matrix composites in the severe marine atmospheric environment. Field exposure test on composite materials in the atmospheric environment of South China Sea reef was carried out for different periods. The corrosion aging morphology characteristics and mechanical properties evolution rules were analyzed. Based on the accumulated data, the grey prediction model GM (1,1) was established. Furthermore, the results were compared with that in other typical marine atmospheric environments of Qingdao, Xiamen and Sanya. With the extension of the exposure time, the fibers of the composites were exposed seriously in the atmospheric environment of the South China Sea reef, and the flexural strength of the composites decreased. The accuracy of the grey model GM (1,1) established based on the flexural strength data reached grade 1. Compared with other typical marine atmospheric environments, the flexural strength of the composites showed a downward trend with the decrease of latitude. Using

收稿日期: 2021-04-14; 修订日期: 2021-06-07

Received: 2021-04-14; Revised: 2021-06-07

作者简介: 丁康康 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: DING Kang-kang (1990—), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion and protection of materials.

引文格式: 丁康康, 杜建平, 王振华, 等. 玻璃纤维复合材料严酷海洋大气环境腐蚀老化规律研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 010-017.

DING Kang-kang, DU Jian-ping, WANG Zhen-hua, et al. Study on corrosion aging behavior of glass fiber reinforced composites in severe marine atmospheric environment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(11): 010-017.

the grey model GM (1,1) to predict the aging behavior of the composites in the severe marine atmospheric environment can achieve high prediction accuracy. The main environmental factors affecting the mechanical properties of the composites are irradiation, followed by relative humidity and temperature.

KEY WORDS: glass fiber; composite materials; South China Sea reef; marine atmosphere; corrosion aging

“21 世纪是海洋世纪”，海洋是人类、社会和国家长久发展的主要资源来源和空间保障。由于海洋在政治、经济等方面的特殊地位，世界各国均把海洋的开发和利用作为一项重要战略规划，海洋权益争斗日趋尖锐。为保障我国国家安全和海洋权益，获取各类海洋资源，各种新型船舶装备的研制和生产飞速发展。轻量化、长寿命、高航速、高负载和高防腐性能成为船舶未来的发展方向，而这离不开先进材料的支撑。

复合材料具有轻质、高强、耐蚀、无磁等特性^[1]；对降低船舶装备质量，增加有效载荷，提高船舶稳定性、航速及运载能力等具有重要意义，是未来船舶装备追求更大的有效载荷、更低全寿命周期费用的最佳材料选择之一^[2]。20 世纪中叶，美国率先在船舶制造领域应用复合材料，随后，世界各国争相开展船用复合材料的相关研制工作。目前，复合材料在船舶装备上的应用已成为衡量船舶技术先进性的重要标志。

复合材料在船舶装备中的广泛应用对其在海洋环境中的耐久性性能提出了更高要求。尤其是在南海岛礁等严酷海洋大气环境下，装备受高温、高盐、高辐照等恶劣环境因素的影响^[3]，腐蚀失效问题突出。目前，我国对南海等海洋环境适应性的研究主要集中在金属材料^[4-6]，针对复合材料及其连接结构的海洋环境效应数据积累明显不足，限制了新型复合材料的推广应用，导致新型船舶设计选材缺少数据支撑，进而影响到船舶装备的维护和长期安全性。因此，开展复合材料的海洋环境适应性试验及评价技术研究，能够为复合材料在船舶装备上的应用提供基础保障，具有重要意义。

在我国国民经济中，玻璃纤维增强树脂基复合材料依靠电绝缘性能好、传热慢、热绝缘性好、介电性能不随频率产生明显改变等特点，现已在舰船船体、雷达天线罩、仪表设备等领域内得到了应用。然而，玻璃纤维增强树脂基复合材料在南海岛礁海洋大气环境下的长期环境效应数据缺失，影响了岛礁相关设备以及舰船装备的维护保养计划的制定，进而影响到装备的长期安全性。为此，中国船舶重工集团公司第七二五研究所首次在南海岛礁严酷海洋大气环境下开展了该复合材料长周期的环境适应性试验，积累了与其应用相关的关键性能参数数据，弥补了南海环境适应性数据缺失的缺陷，为装备设计选材和后续维护保养提供了指导。同时，考虑到自然环境试验时间长、成本高等固有问题^[7]，开展了腐蚀老化预测模型研究^[8-9]，为复合材料的快速推广应用和使用寿命设计提供数据支撑。

1 试验方法

试验材料为玻璃纤维增强树脂基复合材料，树脂基体种类为环氧丙烯酸。样品的长宽均为 150 mm，厚度为 4 mm，四周使用基体环氧丙烯酸树脂封边。选择南海某岛礁开展大气环境暴露试验，试验地点年平均温度为 27.3 ℃，相对湿度大于 80%。试验参照 GJB 8893.2—2017 进行，试验前对试样进行拍照记录。试样通过绝缘瓷柱固定在面向赤道的大气暴晒架上，呈 45°（相对水平面）。试样投放 0.5、1、1.5、2 a 后分别进行回收，获取在南海岛礁大气环境下，复合材料的环境适应性数据和老化行为规律。

试样回收后，使用数码相机进行拍照，记录试样宏观老化形貌，并借助于显微镜观察其微观老化情况。参照 GB/T 1449—2005，获取试样暴露不同周期后的弯曲强度数据，弯曲试样规格为 80 mm×15 mm×4 mm，加载试验速度为 2 mm/min。基于获取的这些数据，建立了玻璃纤维增强树脂基复合材料腐蚀老化灰色预测模型 GM (1,1)，并验证了模型精度。此外，文中与青岛、厦门和三亚等典型海域大气环境下的同种复合材料老化数据进行了对比，采用灰关联分析方法探究了主要的环境影响因素。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀老化形貌

岛礁大气环境下，复合材料试样暴露不同周期后的宏观形貌如图 1 所示。暴露 0.5 a 后，复合材料表面发生了一定程度的纤维裸露，暴露时间超过 1 a 后，几乎整个表面都发生了纤维裸露，且外露纤维量明显增加。结合图 2 的微观形貌可知，暴露 1 a 时，纤维裸露主要发生在一个方向（见图 2b），暴露 2 a 时，两个方向的纤维均发生了较为严重的裸露（见图 2c），这表明富含树脂的表层几乎被彻底腐蚀。由图 2d—f 可以发现，暴露 1 a 的复合材料树脂基体表面破坏严重，呈坑洼状，随着暴露时间的进一步推移，树脂基体老化脱落现象进一步加重，表面坑洼尺寸增大。

2.2 力学性能分析

岛礁大气环境下，复合材料试样暴露在不同周期下的弯曲强度数据如图 3 所示。随着暴露时间的推移，弯曲强度整体呈下降趋势，前期下降较快，后期趋缓。弯曲强度随时间的变化与树脂基体的吸湿性等

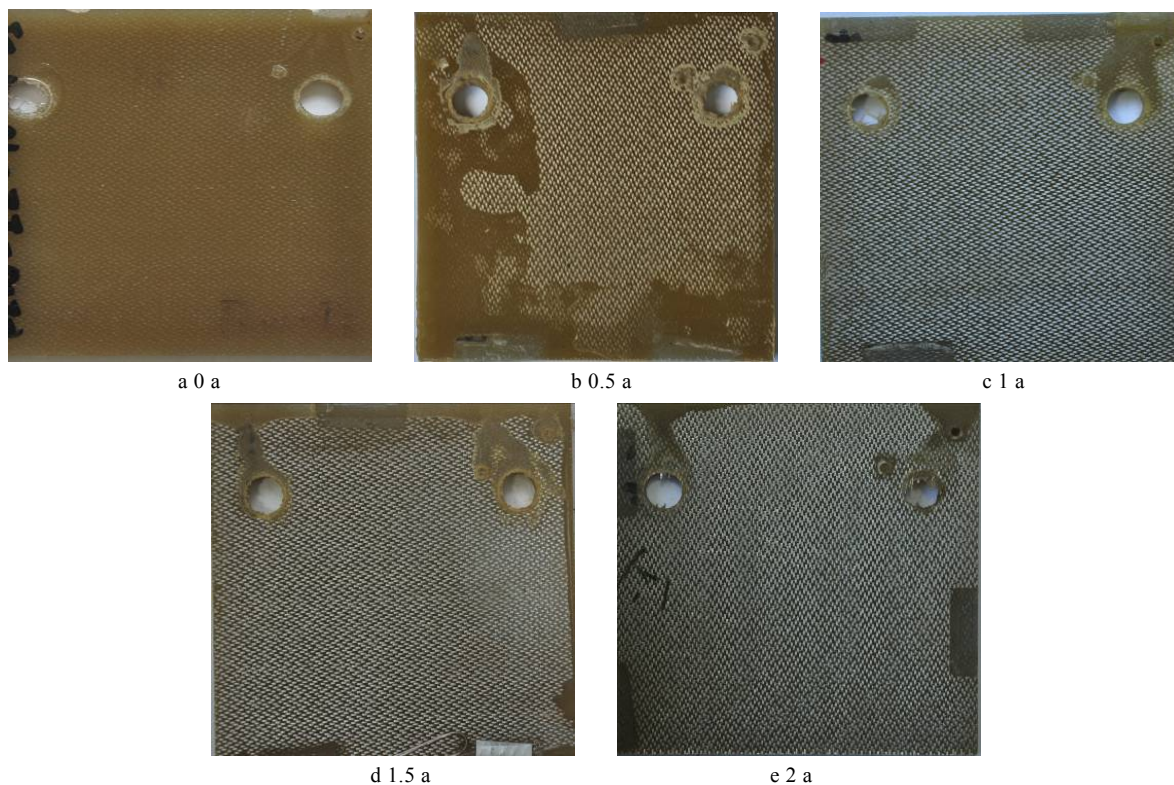


图1 复合材料在岛礁大气环境下暴露不同周期后的宏观形貌

Fig.1 Macro-morphologies of composite materials exposed for different periods in the atmospheric environment of South China Sea reef

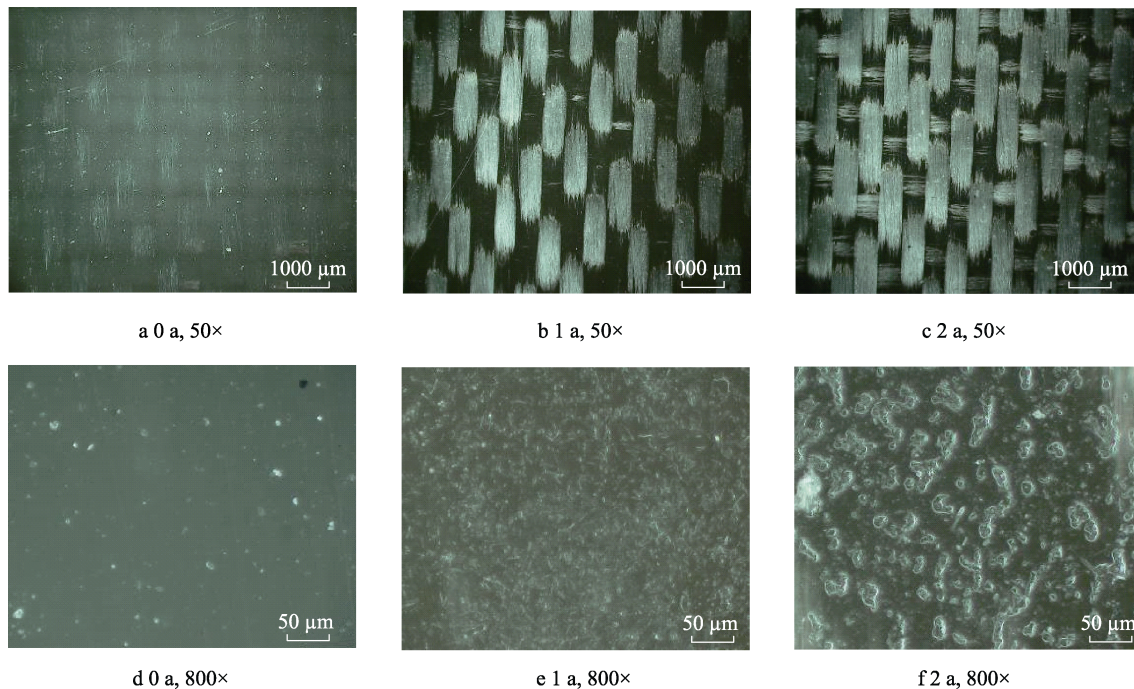


图2 复合材料在岛礁大气环境下暴露不同周期后的微观形貌

Fig.2 Micro-morphologies of composite materials exposed for different periods in the atmospheric environment of South China Sea reef

特性密切相关。Gellert 等人^[10]用玻璃纤维与不饱和聚酯、环氧丙烯酸酯和酚醛树脂分别制成复合材料,研究了其在海洋环境下的耐腐蚀性能与老化性能。结果表明,三种树脂均发生不同程度的吸湿以及弯曲强度

下降,且弯曲强度损失与吸湿率呈正相关。Gellert 等的试验结果中,环氧丙烯酸树脂基复合材料的弯曲强度性能优于其他两种树脂基复合材料,而 Kootsookos 等^[11]采用碳纤维增强树脂基复合材料则

得到相反的结果, 这表明复合材料在海洋环境中的耐腐蚀性能不只与树脂的性能有关, 还与界面等因素有关。此外, 辐照等因素造成的光老化也会对其性能产生重要影响。结合图 2 的微观腐蚀老化形貌可知, 岛礁大气环境下长期的暴露会导致树脂基体的老化减薄, 大量纤维外露, 进一步加重纤维的吸湿作用, 在纤维/基体的界面中产生失配应力, 进而导致复合材料的力学性能下降^[12]。

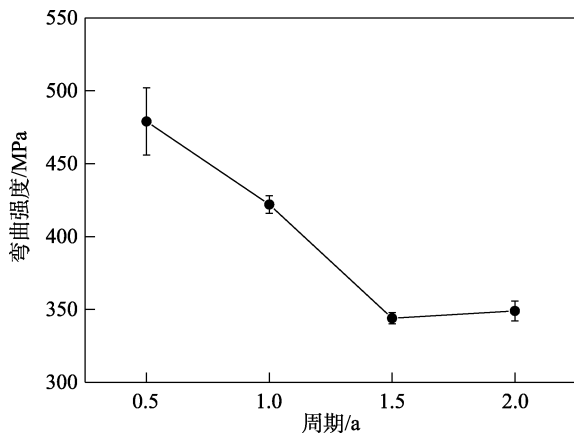


图 3 南海岛礁大气环境下复合材料暴露不同周期的弯曲强度

Fig.3 Flexural strength data of composite materials exposed for different periods in the atmospheric environment of South China Sea reef

为实现复合材料在岛礁大气环境下的腐蚀老化预测, 基于不同周期的弯曲强度数据, 建立灰色预测模型 GM (1,1)。采用数据累加方式, 使原始数据生成有规律的数列, 再进行运算。该方法对数据的要求量少 (4 个即可), 便于精度检验, 非常适于材料在不同周期内的腐蚀老化预测^[13-14]。

选取复合材料在岛礁大气环境下暴露 0.5、1、1.5、2 a 的弯曲强度 (单位 MPa) 为原始数列, 建立腐蚀老化灰色预测模型。令 $x^{(0)}(k)$ 等于复合材料在各个周期的弯曲强度值, 其中 $k=1、2、3、4$, 分别对应 0.5、1、1.5、2 a, 即得原始数列 $x^{(0)}=(479, 422, 344, 349)$ 。

1) 级比判断。计算数列的级比 $\lambda(k)=(1.135, 1.227, 0.986)$, 符合 $(e^{-2/(n+1)}, e^{2/(n+1)})$ 区间要求, 可以进行模型建立^[15]。

2) 构建累加数列。对原始数列 $x^{(0)}$ 作一次累加, 即 $x^{(1)}=(479, 422, 344, 349)$

3) 构造数据矩阵 B 及数据向量 Y :

$$B = \begin{bmatrix} -690 & 1 \\ -1073 & 1 \\ -1419.5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 422 \\ 344 \\ 349 \end{bmatrix}$$

4) 计算 $u^{[16]}$:

$$u = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} 0.1019 \\ 479.7455 \end{bmatrix}$$

5) 建立模型:

$$dx^{(1)}(t) / dt + 0.1019x^{(1)}(t) = 479.7455$$

求解得:

$$x^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - b/a)e^{-ak} + b/a = -4229.880 e^{-0.1019k} + 4708.877$$

6) 生成模型还原值 $x^{(0)}(k)$ 。由上面的时间响应函数求导可算得 $x^{(0)}$, 即腐蚀老化预测模型:

$$x^{(0)}(k) = 453.6619e^{-0.1019(k-1)}$$

取 $k=1、2、3、4$, 最终得到复合材料在南海岛礁大气环境下暴露 0.5、1、1.5、2 a 后弯曲强度预测值 $x^{(0)}(1)=(454, 410, 370, 334)$ 。

7) 模型检验。将上述复合材料试样在不同周期下的弯曲强度预测值与原始数据作差 (残差), 计算相对误差, 模型精度检验结果见表 1。依据后验差比值和小误差频率^[17], 模型精度达到 1 级 (见表 2), 不需要作残差修正, 可直接使用该预测模型进行腐蚀老化预测。

表 1 复合材料灰色预测模型 GM (1,1) 精度检验

Tab.1 Accuracy check for grey prediction model GM (1,1) of composite materials

周期/a	实测值 $x^{(0)}(k)$	预测值 $x^{(1)}(k)$	残差 $x^{(0)}(k)-x^{(1)}(k)$	相对误差 $\Delta_k = \varepsilon(k) / X^{(0)}(k)$
0.5	479	454	25	5.22%
1	422	410	12	2.84%
1.5	344	370	-26	7.56%
2	349	334	15	4.30%
后验差比值			C=0.347	
小误差频率			P=1.000	

表 2 GM(1,1)预测模型精度分级

Tab.2 Accuracy classification for grey prediction model GM (1,1)

精度等级	P	C
1 级(好)	≥ 0.95	≤ 0.35
2 级(合格)	[0.80,0.95)	(0.35,0.50]
3 级(勉强)	[0.70,0.80)	(0.50,0.65]
4 级(不合格)	< 0.70	> 0.65

2.3 典型海域腐蚀老化对比研究

我国典型海域大气环境下, 复合材料试样暴露不同周期的宏观形貌如图 4—图 6 所示。暴露 1 a 后, 三个地点的复合材料表面均发生不同程度的纤维外

露，其中，青岛试样的腐蚀老化程度最低，仅少量纤维外露；厦门和三亚试样的老化程度较高。暴露 2 a 后，腐蚀老化程度进一步增大，整体上，随纬度降低，纤维裸露现象呈加重趋势。

进一步对比了岛礁与其他典型海洋大气环境下的复合材料弯曲强度数据，如图 7 所示。由青岛、厦门、三亚到岛礁，随着纬度降低，弯曲强度整体呈下降趋势，这与不同站点的辐照量、温湿度等环境差异

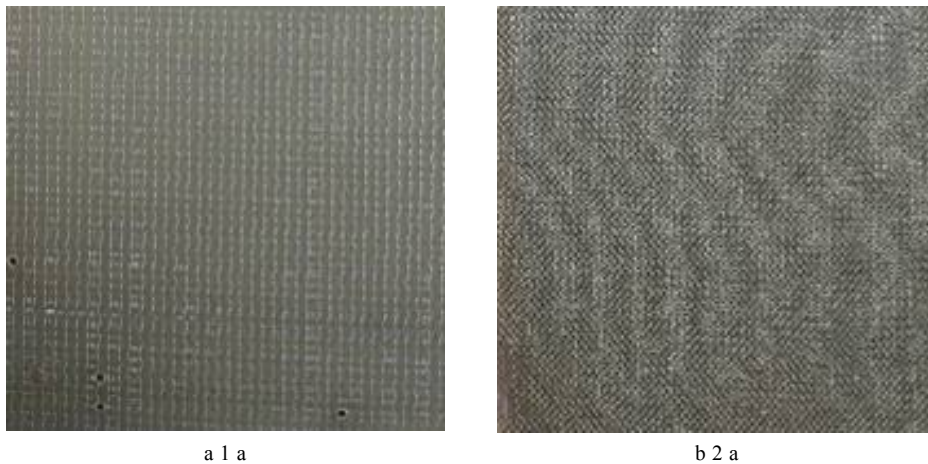


图 4 复合材料在青岛海洋大气环境中暴露不同周期后的宏观形貌

Fig.4 Macro-morphologies of composite materials exposed for different periods in the atmospheric environment of Qingdao

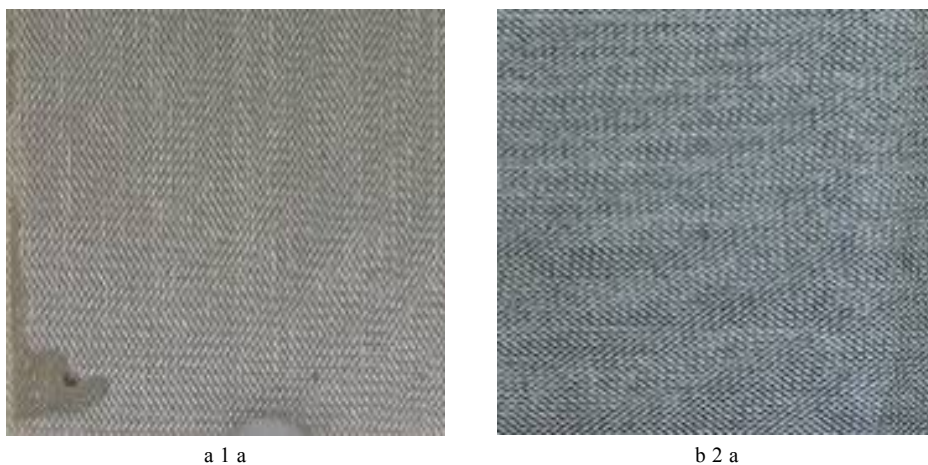


图 5 复合材料在厦门海洋大气环境中暴露不同周期后的宏观形貌

Fig.5 Macro-morphologies of composite materials exposed for different periods in the atmospheric environment of Xiamen

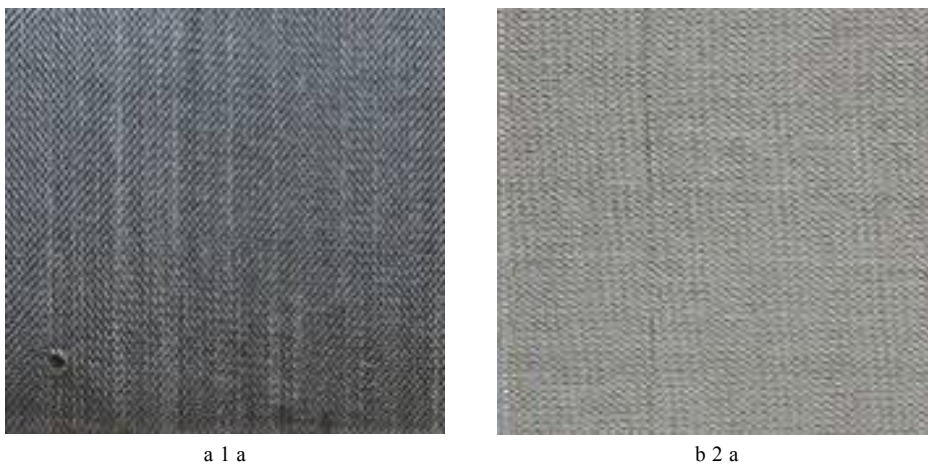


图 6 复合材料在三亚海洋大气环境中暴露不同周期后的宏观形貌

Fig.6 Macro-morphologies of composite materials exposed for different periods in the atmospheric environment of Sanya

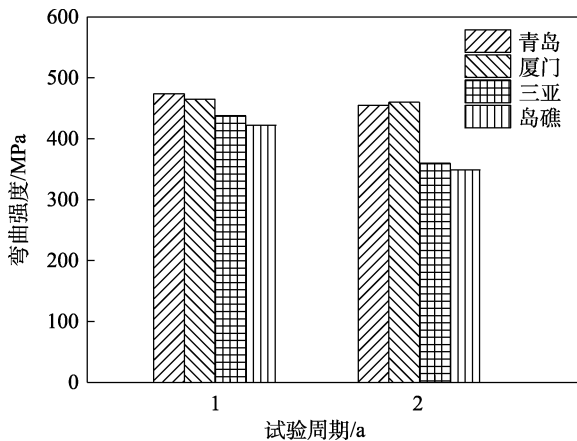


图 7 典型海域大气环境中复合材料暴露不同周期后的弯曲强度
Fig.7 Flexural strength data comparison of composite materials exposed for different periods in the atmospheric environment of typical sea areas

密切相关。随暴露时间的增长,弯曲强度呈下降趋势,三亚和岛礁大气环境下性能下降尤为明显。

如前所述,该树脂基复合材料的力学性能演变规律是由不同海域的大气环境因素决定。可能造成影响的环境因素包括降雨量、相对湿度、温度、辐照和盐沉积等^[18-19],为确定这些环境因素(设为比较数列)对复合材料力学性能(弯曲强度,设为参考数列)影响的主次关系,文中采用灰色关联分析方法^[20-21]确定出最主要的作用因素。表 3 列出了青岛、厦门、三亚和南海岛礁的大气环境因素年平均值与复合材料弯曲强度数据。所有数据均采用均值法进行了无量纲化处理(弯曲强度采取倒数化处理),按式(1)计算出环境因素与弯曲强度的灰关联度(γ_{0i} 越接近 1,相关性越好),并进行排序(见表 4)。

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \frac{\text{Min}_i \text{Min}_k \Delta_i(k) + \rho \text{Max}_i \text{Max}_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \text{Max}_i \text{Max}_k \Delta_i(k)} \quad (1)$$

式中: i 取值 1~5,依次对应 5 种环境因素; k 取值 1~4,对应不同海域大气试验条件; $\Delta_i(k)$ 为比较数列与参考数列绝对差值; $\text{Min}_i \text{Min}_k \Delta_i(k)$ 为 $\Delta_i(k)$ 值的两级最小差; $\text{Max}_i \text{Max}_k \Delta_i(k)$ 为两级最大差;分辨

表 3 不同海域大气环境因素与弯曲强度数据列表(无量纲化)

Tab.3 Data list of atmospheric environment factors and flexural strength of composite materials at different sea areas (dimensionless)

地点	降雨量	相对湿度	温度	总辐射	盐沉积	弯曲强度
青岛	0.487	0.914	0.662	0.869	1.326	0.892
舟山	1.098	0.989	0.953	0.900	0.045	0.883
三亚	1.470	1.028	1.166	1.054	1.473	1.128
岛礁	0.945	1.069	1.219	1.177	1.155	1.163

表 4 不同海洋大气环境因素与复合材料弯曲强度性能的灰关联度及排序

Tab.4 Gray relational degree of atmospheric environment factors to flexural strength of composite materials at different sea areas

环境因素	弯曲强度	
	γ	排序
降雨量	0.606	4
相对湿度	0.860	2
温度	0.841	3
总辐射	0.950	1
盐沉积	0.600	5

系数 ρ 取值 0.5。

由表 4 可知,辐照是影响复合材料不同海域下弯曲强度的最主要的环境因素。辐照会诱发环氧树脂基体光氧老化^[22],在富含氧的海洋大气环境下,光照中的紫外线会激发树脂分子链段生成活性自由基,进而与空气中的氧反应发生光氧老化降解。光氧降解是在紫外光线作用下,基体树脂本身所产生的复杂物理化学反应,根据 Einstein 光化学当量定律,光氧降解的发生与高分子化学键能和其吸收单个光子的能量之间的关系密切。当树脂高分子化学键能小于吸收光子能量时,树脂分子链会发生断裂或分子电子轨道会由稳态变为激发态,与氧反应生成活性自由基,并发生链增长和一系列链支化。当生成的活性自由基浓度较高时,活性自由基相互间会发生碰撞,导致链式反应停止,同时生成的小分子化合物会流失^[23],最终表现为表面树脂减薄,伴随有变色、龟裂、失光等现象,这与复合材料腐蚀老化形貌一致(图 2)。长时间的暴露使原来富含树脂的表层彻底腐蚀,下层的纤维也暴露出来。

此外,相对湿度和温度对复合材料的力学性能也有较大影响,能够诱发复合材料树脂基体湿热老化^[24]。湿热对复合材料的作用机理主要包括以下几个方面:1)水汽向树脂基体内部扩散时形成渗透压,产生微裂纹等缺陷(见图 8),而裂纹的扩展会进一

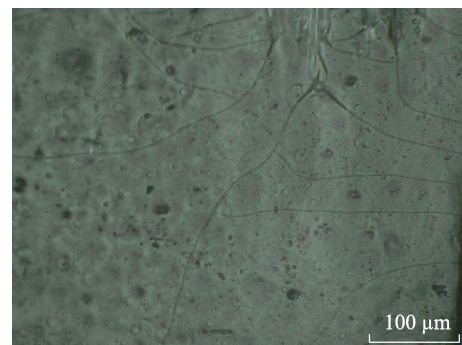


图 8 复合材料在岛礁大气环境下暴露 2 a 的金相显微形貌
Fig.8 High magnification metallographic micrographs of composite materials exposed for 2 year in marine atmospheric environment of South China Sea reef

步促进吸湿性, 加剧失效进程; 2) 高温环境会加剧树脂基体链段松弛运动, 减弱分子间的作用力并形成空隙, 增大树脂的吸湿量; 3) 在高温条件下, 水汽与树脂基体中的亲水基团发生水解反应, 导致断链和解交联。

3 结论

1) 玻璃纤维增强树脂基复合材料在南海岛礁严酷海洋大气环境下长期暴露后, 表层树脂发生明显腐蚀老化破坏, 造成纤维裸露, 其弯曲强度随暴露时间增长呈下降趋势。

2) 基于不同周期的弯曲强度数据建立复合材料腐蚀老化灰色预测模型 GM(1,1), 该模型的后验差比值为 $C=0.347$, 小误差频率为 $P=1.000$, 预测模型精度达到 1 级, 不需要作残差修正, 可直接用于复合材料腐蚀老化预测。

3) 与其他典型海洋大气环境相比, 随着纬度的降低, 复合材料弯曲强度呈下降趋势; 最主要的环境影响因素为辐照, 其次为相对湿度和温度, 分别对应的腐蚀老化形式为光氧老化和湿热老化。

参考文献:

- [1] 张国腾, 陈蔚岗, 唐桂云. 复合材料轻量化化技术在舰船制造领域的应用[J]. 纤维复合材料, 2010, 27(1): 31-35.
ZHANG Guo-teng, CHEN Wei-gang, TANG Gui-yun. Application of lightweight composite technology in manufacturing naval ship[J]. Fiber composites, 2010, 27(1): 31-35.
- [2] 黄晓艳, 刘源, 刘波. 复合材料在舰船上的应用[J]. 江苏船舶, 2008, 25(2): 13-17.
HUANG Xiao-yan, LIU Yuan, LIU Bo. Application of composite materials in ships[J]. Jiangsu ship, 2008, 25(2): 13-17.
- [3] 李颖虹, 黄小平, 岳维忠. 西沙永兴岛环境质量状况及管理对策[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 50-53.
LI Ying-hong, HUANG Xiao-ping, YUE Wei-zhong. Environmental quality and management measures in Yongxing Island of Xisha, South China Sea[J]. Marine environmental science, 2004, 23(1): 50-53.
- [4] 丁康康, 郭为民, 张彭辉, 等. 几种典型金属材料西沙海洋飞溅区腐蚀行为规律研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 51-57.
DING Kang-kang, GUO Wei-min, ZHANG Peng-hui, et al. Corrosion behavior of typical metal materials in Xisha marine splash zone[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(2): 51-57.
- [5] MA Y T, LI Y, WANG F H. The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment[J]. Corrosion science, 2010, 52(5): 1796-1800.
- [6] CUI Z Y, LI X G, MAN C, et al. Corrosion behavior of field-exposed 7A04 aluminum alloy in the Xisha tropical marine atmosphere[J]. Journal of materials engineering and performance, 2015, 24(8): 2885-2897.
- [7] 林臻, 李国璋, 白鸿柏, 等. 金属材料海洋环境腐蚀试验方法研究进展[J]. 新技术新工艺, 2013(8): 68-74.
LIN Zhen, LI Guo-zhang, BAI Hong-bai, et al. Review of research on experimental methods for marine environmental corrosion of metal materials[J]. New technology & new process, 2013(8): 68-74.
- [8] LI S X, AKID R. Corrosion fatigue life prediction of a steel shaft material in seawater[J]. Engineering failure analysis, 2013, 34: 324-334.
- [9] 丁康康, 刘亚强, 顾良华, 等. E420 在南海岛礁海水环境腐蚀行为规律研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 1-7.
DING Kang-kang, LIU Ya-qiang, GU Liang-hua, et al. Corrosion behavior of E420 in seawater environments of the reef in the South China Sea[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(10): 1-7.
- [10] GELLERT E P, TURLEY D M. Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications[J]. Composites part A: applied science and manufacturing, 1999, 30(11): 1259-1265.
- [11] KOOTSOOKOS A, MOURITZ A P. Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites[J]. Composites science and technology, 2004, 64(10-11): 1503-1511.
- [12] 周灿. 含损伤树脂基复合材料的吸湿行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
ZHOU Can. Hygroscopic behavior study on resin matrix composite involving damages[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [13] 牟献良, 田月娥, 汪学华. 碳钢和低合金钢模拟加速试验与大气腐蚀试验的相关性[J]. 环境技术, 2001, 19(4): 14-17, 41.
MU Xian-liang, TIAN Yue-e, WANG Xue-hua. The relativity of the simulated accelerated test of carbon steel and low alloy steel and atmospheric corrosion test[J]. Environmental technology, 2001, 19(4): 14-17.
- [14] XING S B, LI L, WANG X M. Research of accelerated corrosion test method of 7A04 aluminium alloy in Xisha atmospheric environment[J]. Advanced materials research, 2013, 850-851: 111-114.
- [15] 陈根霞, 刘皓升. 灰色模型对舟山市国内生产总值的研究和预测[J]. 昆明民族干部学院学报, 2016, 000(4): 73-75.
CHEN Gen-xia, LIU Hao-sheng. Research and forecast for GDP of Zhoushan applying grey model[J]. Journal of Kunming National Cadres Academy, 2016, 000(4): 73-75.
- [16] 刘成臣, 徐胜, 王浩伟, 等. 基于灰色模型和神经网络的铝合金腐蚀预测对比[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 1-4, 31.
LIU Cheng-chen, XU Sheng, WANG Hao-wei, et al. Comparative study of prediction models of aluminum

- alloys based on gray model and artificial neural network[J]. *Equipment environmental engineering*, 2013, 10(3): 1-4, 31.
- [17] 刘安强. 严酷海洋大气环境腐蚀模拟与加速试验方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2012.
LIU An-qiang. The research on corrosion simulation and accelerated test method in harsh marine atmosphere[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2012.
- [18] 王琦, 檀琳琳, 王洁. 碳纤维环氧复合材料盐雾老化试验研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(5): 39-42.
WANG Qi, TAN Lin-lin, WANG Jie. On salt fog weathering of carbon fiber epoxy composite material[J]. *Equipment environmental engineering*, 2011, 8(5): 39-42.
- [19] STARTSEVA L T. Climatic aging of organic-fiber-reinforced plastics[J]. *Mechanics of composite materials*, 1994, 29(6): 620-626.
- [20] MU Z T, SU W G, CHEN W J. Research of environmental factors of aluminum alloys atmospheric corrosion based on grey relational analysis[J]. *Advanced materials research*, 2010, 152-153: 756-763.
- [21] DING K K, FAN L, YU M J, et al. Sea water corrosion behaviour of T2 and 12832 copper alloy materials in different sea areas[J]. *Corrosion engineering, science and technology*, 2019, 54(6): 476-484.
- [22] 左晓玲, 张道海, 罗兴, 等. 长玻纤增强复合材料老化研究进展及防老化研究[J]. *塑料工业*, 2013, 41(1): 18-21, 66.
ZUO Xiao-ling, ZHANG Dao-hai, LUO Xing, et al. Advances in the study of aging and anti-aging of long glass fiber reinforced composites[J]. *China plastics industry*, 2013, 41(1): 18-21, 66.
- [23] 代礼葵, 孙耀宁, 王国建. 玻璃纤维/环氧乙烯基酯树脂复合材料环境综合因素下的冲蚀行为及机制[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(9): 2059-2066.
DAI Li-kui, SUN Yao-ning, WANG Guo-jian. Erosion behavior and mechanism of glass fiber/epoxy vinlester composites under multiple environmental factors[J]. *Acta materiae compositae sinica*, 2019, 36(9): 2059-2066.
- [24] 肖迎红, 汪信, 陆路德, 等. 玻纤增强热塑性聚酯复合材料湿热老化研究[J]. *工程塑料应用*, 2001, 29(9): 35-37.
XIAO Ying-hong, WANG Xin, LU Lu-de, et al. Study on the hygrothermal ageing of glass fiber reinforced thermoplastic polyester composite[J]. *Engineering plastics application*, 2001, 29(9): 35-37.