青岛海洋环境碳纤维复合材料与 低合金钢电偶腐蚀研究

丁康康*,白雪寒,彭文山,李显超,范林,任海滔,侯健

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室,山东 青岛 266237)

摘要:目的 探究碳纤维复合材料在舰船应用时与金属材料的电偶腐蚀问题。方法 针对一种典型舰船用碳 纤维增强乙烯基树脂复合材料,在青岛海洋大气环境下开展 0.5、1、1.5、2 a 期的自然曝晒试验,进而采用 电化学分析手段考察其与低合金钢的电偶腐蚀效应,结合老化机制探究碳纤维复合材料的老化行为对其与 钢电偶腐蚀的影响。结果及结论 在青岛大气环境曝晒不同周期的复合材料试样,开路电位与低合金钢相 差较大,存在较高的电偶腐蚀倾向。随曝晒时间的延长,复合材料表面微裂纹不断产生、扩展,导致电化 学反应活性点增多,两者电偶电流密度随之增大。在青岛海洋大气环境下暴露 2 a 后,碳纤维增强乙烯基树 脂复合材料与低合金钢的电偶电流为 0.356 9 μA/cm²,两者的电偶腐蚀敏感性达到 B 级。 关键词:舰船;海洋大气;碳纤维复合材料;低合金钢;腐蚀老化;电偶电流;腐蚀敏感性 中图分类号:TG172.5 文献标志码:A 文章编号:1672-9242(2024)02-0097-07 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2024.02.013

Galvanic Corrosion of Carbon Fiber Reinforced Composites and Low Alloy Steel in Marine Environment of Qingdao

DING Kangkang^{*}, BAI Xuehan, PENG Wenshan, LI Xianchao, FAN Lin, REN Haitao, HOU Jian

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

ABSTRACT: The work aims to investigate the galvanic corrosion problem faced by the combined application of carbon fiber reinforced composites with metal materials in the shipbuilding industry. A kind of typical carbon fiber reinforced vinyl resin composite was chosen as the research object and the natural exposure test was carried out in the marine atmospheric environment of Qingdao for 0.5 a, 1 a, 1.5 a and 2 a. Then, the galvanic corrosion effect of the carbon fiber reinforced composite and low alloy steel was studied by electrochemical analysis methods. Furthermore, the effect of aging behavior of the carbon fiber reinforced composite on their galvanic corrosion to steel was investigated based on aging mechanism analysis. The open circuit potentials of the composite samples exposed for different periods in the atmospheric environment of Qingdao were significantly different from that of low alloy steel, indicating a high tendency for galvanic corrosion. With the prolongation of exposure time, micro-cracks on the surface of the composite samples continued to

收稿日期: 2023-11-17;修订日期: 2023-12-26

Received: 2023-11-17; Revised: 2023-12-26

引文格式:丁康康,白雪寒,彭文山,等.青岛海洋环境碳纤维复合材料与低合金钢电偶腐蚀研究[J]. 装备环境工程,2024,21(2): 97-103.

DING Kangkang, BAI Xuehan, PENG Wenshan, et al. Galvanic Corrosion of Carbon Fiber Reinforced Composites and Low Alloy Steel in Marine Environment of Qingdao[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 97-103.

^{*}通信作者(Corresponding author)

generate and expand, leading to an increase in the active points of electrochemical reactions. As a result, the galvanic current increased accordingly. After exposure for 2 a in the marine atmospheric environment of Qingdao, the galvanic current between the carbon fiber reinforced composites and low alloy steel is 0.356 9 μ A/cm², reaching Class B for the galvanic corrosion sensitivity.

KEY WORDS: ship; marine atmosphere; carbon fiber reinforced composites; low alloy steel; corrosion aging; galvanic current; corrosion sensitivity

复合材料由于具有质轻、无磁、力学性能优良、 耐蚀性好及材料的可设计性强等一系列优良特性,对 于降低船舶装备质量,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,是未来追求更 大有效载荷、更低全寿期费用船舶装备的极佳材料选 择之一^[1-2]。自 20 世纪 50 年代美国将复合材料用于 船舶建造以来,世界各国相继开始研制船用复合材 料,其在船舶装备上的应用情况已成为衡量其先进性 的重要标志。尤其是碳纤维增强复合材料,在杆塔、 显控台等上层建筑以及螺旋桨、推进轴系、方向舵等 舰船关键部位获得或者正在推广应用^[3-4],未来随着 碳纤维复合材料科学的发展和制造工艺的改进,其在 舰船上的应用将得到更加蓬勃的发展。

由于碳纤维独特的电化学特性,其电极电位较 正。研究表明,碳纤维与钢等金属的电位差可以达到 850 mV 以上,其在腐蚀介质中与金属材料电连接后, 会导致电极电位较负的金属材料腐蚀速率加快。因 此,碳纤维复合材料在与金属材料接触使用时,往往 存在电偶腐蚀现象^[5-7]。在这方面,国内外研究机构 开展了大量的研究工作,通过模拟浸泡试验、电化学 试验及腐蚀形貌分析等手段,发现碳纤维复合材料与 LY12 铝合金、LB733 防锈铝、10CrNiCu 等金属在 NaCl 溶液中接触时,金属材料均会发生严重的电偶 腐蚀^[8-12]。以钢为例,当碳纤维与钢的面积比为 1:1 时,两者偶接会使钢的腐蚀速率至少增大 1.5 倍^[10]。 因此,必须采取相应的保护措施以保证钢结构物的实 际使用寿命。

碳纤维是复合材料表面(阴极)电化学反应的主要场所^[13],而树脂基体本身是绝缘的,其对碳纤维的包覆保护作用本身会降低电偶腐蚀效应。在实际应用环境下,碳纤维复合材料表面的树脂基体因恶劣海洋环境因素的影响,发生光氧老化和/或湿热老化而不断降解^[14-15],导致碳纤维外露,进而引发与金属结构连接部位的电偶腐蚀。目前,大多数关于碳纤维复合材料与金属电偶腐蚀的研究均是在实验室内采用打磨表面刻意暴露碳纤维的方式进行,对实际工况下两者电偶腐蚀情况的针对性不强,无法为后续舰船防腐及裕量设计、寿命预测等提供可靠数据。为此,本文选择了一种典型舰船用碳纤维增强树脂复合材料作为研究对象,其应用背景为舰船上层建筑及部分船体承力部件,应用时除了受到严酷海洋大气曝晒环境作

用外,航行中还会面临风浪飞溅、干湿交替等工况, 在海水浸润/泡作用下,电偶腐蚀效应凸显。为综合 评价近工况条件下碳纤维与船体钢的电偶腐蚀效应, 首先在海洋大气环境下开展了长周期的自然曝晒试 验,然后考察了处于不同老化阶段的碳纤维复合材料 与低合金钢在海水浸润条件下的电偶腐蚀情况,结合 电化学与微观结构分析手段,探究了碳纤维复合材料 老化过程对电偶腐蚀敏感性的影响,为碳纤维复合材 料在实船上推广应用提供数据支撑。

1 试验

试验材料为碳纤维增强树脂基复合材料,该复合 材料以溴化双酚 A 型环氧乙烯基酯树脂作为基体, 碳纤维通过双轴向编织方式与乙烯基酯树脂交替层 叠。试样规格为 50 mm×50 mm×4 mm。试验地点选 择为青岛海洋环境试验站大气曝晒场,处于黄海之 滨。参照 GJB 8893.2—2017,试验前对复合材料试样 进行了拍照记录,然后通过绝缘瓷柱固定在面向赤道 的大气曝晒架上,呈 45°,曝晒 0.5、1、1.5、2 a 后 分别进行回收。

复合材料试样回收后,使用数码相机对主曝晒面 进行拍照,记录试样宏观老化形貌,借助于 Hirox 8700 显微镜观察其微观老化情况。利用 ULTRA 55 扫描电子显微镜,从其微观损伤行为特征方面分析其 老化机制。

同时,针对经曝晒不同周期的复合材料试样,开 展其与 10CrNi3MoV 低合金钢电偶腐蚀效应的研究。 使用环氧腻子将曝晒试样及未经曝晒的空白复合材 料试样背面及四周密封绝缘(曝晒面外露),低合金 钢空白试样采用同样的封装方法,在复合材料及低合 金钢试样靠近边缘一侧钻孔,通过螺栓固定连接铜导 线,连接处同样采用环氧腻子绝缘,最终制成暴露面 积为 20 cm² 的电化学测试试样。将复合材料试样作 为工作电极,低合金钢为对电极,饱和甘汞电极为参 比电极,试验溶液青岛天然海水,使用 CT4-7 多通道 电偶腐蚀仪监测两者相对参比电极的开路电位(1h) 和耦合后的电偶电流(12 h)。此外,为探究两者电 偶腐蚀电化学机制,分别将曝晒不同周期复合材料 试样以及空白复合材料、低合金钢试样作为工作电 极,铂铌丝作为对电极,饱和甘汞电极为参比电极, 在青岛天然海水中开展极化曲线测试,电位扫描速率 0.5 mV/s。

2 结果与分析

2.1 开路电位

在青岛海洋大气环境下曝晒 0.5、1、1.5、2 a 的 碳纤维复合材料试样在海水中的开路电位如图 1 所 示。其开路电位在-174.9~43.6 mV,随曝晒时间增 加略有升高。复合材料空白试样由于表面绝缘,开路 电位未检出。低合金钢在海水中浸泡 1 h 后的开路电 位为-637.1 mV,与经曝晒的复合材料试样相差 462.2 mV 以上。当两者连接形成电偶对时,存在较 高的电偶腐蚀倾向。





and composite samples exposed for different periods in the atmospheric environment of Qingdao

2.2 极化曲线

为进一步研究碳纤维复合材料与低合金钢连接 时的电偶腐蚀效应,分别对青岛大气环境曝晒不同周 期的复合材料试样以及空白复合材料、低合金钢试样 在海水中进行了极化曲线测试,结果如图2所示。对 于空白复合材料试样,其表面由于树脂包覆,处于绝 缘状态,基本不发生电化学反应,极化曲线较为杂乱, 阴极电流极小。经曝晒试验后,复合材料表面树脂基 体由于发生了不同程度的老化,外部介质通过微裂纹 等缺陷可以渗入内部导电碳纤维,进而促进了阴极极 化反应。该阴极极化反应主要是溶解氧的还原过程, 复合材料只是为溶解氧提供一个反应载体,本身不参 与反应。随着电位负移,复合材料阴极电流一开始呈 增大趋势,但电位低于一定值后,电流增加趋缓,趋 于稳定。此时, 阴极反应速率的控制因素主要为表面 电化学活性面积的大小。 随暴露时间的增加,复合材 料表面由于老化开裂加剧,更多碳纤维裸露,电化学活



图 2 在青岛大气环境暴露不同周期的复合材料试样 与低合金钢在海水中的极化曲线

Fig.2 Polarization curves in seawater of low alloy steel and composite samples exposed for different periods in the atmospheric environment of Qingdao

性点增加, 故该电位区间的腐蚀电流整体呈增大趋势。

对于低合金钢空白试样,其阳极和阴极极化电流 密度整体上大于复合材料试样,其阳极曲线的线性或 弱极化区与经曝晒后的复合材料试样阴极曲线相交, 两者的耦合电位将会略高于低合金钢的开路电位。由 于在耦合电位范围内,曝晒不同周期的复合材料的阴 极电流均已达到稳定值,故电偶电流基本等同于复合 材料的阴极电流大小,进而与复合材料老化程度密切 相关。

2.3 电偶电流

参考 HB 5374—1987,评价了碳纤维复合材料与 低合金钢连接后的电偶腐蚀敏感性。由图 3 可知, 复合材料空白试样与低合金钢在海水中偶接后,电 偶电流密度仅为 0.001 8 μA/cm²,基本不发生电偶腐 蚀,表明复合材料表面绝缘状态良好。复合材料在 青岛大气环境曝晒 0.5、1、1.5、2 a 后,其与低合金



图 3 在青岛大气环境暴露不同周期的复合材料试样 与低合金钢在海水中的电偶电流密度



钢的电偶电流密度分别为 0.026 7、0.095 1、0.247 1、 0.356 9 μA/cm²。曝晒 2 a 时,两者电偶腐蚀敏感性达 到了 B 级,其余仍为 A 级。随曝晒时间的延长,电 偶电流密度呈增大趋势,可以预见到,随曝晒时间进 一步增加,两者的电偶腐蚀敏感性也会随之提升。电 偶腐蚀敏感性与复合材料曝晒时间的量化关系,还需 要更长周期环境试验数据的支撑。

2.4 老化与电偶效应分析

已有研究结果表明,碳纤维复合材料与金属电偶 电流的大小与其表面缺陷(碳纤维外露)面积密切相 关,两者近似满足正线性相关^[16-17]。因此,研究复合 材料与低合金钢的电偶腐蚀效应,其本质在于探究复 合材料经自然曝晒后的老化状态,明确老化损伤造成 碳纤维外露的缺陷程度。

碳纤维复合材料空白试样及在青岛大气环境暴露于不同周期后试样的宏观形貌如图 4 所示。曝晒 0.5 a 后,复合材料试样表面即出现明显的纤维外露;随曝晒时间的增加,纤维裸露现象呈加重趋势。结合 图 5 微观形貌可以发现,空白试样表面被树脂完全覆盖;到 0.5 a 时,纵向纤维开始外露,随曝晒时间推移,纵向纤维外露面积增大;到 2 a 时,已经出现明显横向纤维外露,这表明复合材料试样曝晒面树脂基体在青岛大气环境因素作用下逐渐降解减薄。在富含氧的海洋大气环境下,光照中的紫外线会破坏基体树脂分子链中的化学键,引发光氧老化^[18]。一般认为,



图 4 青岛大气环境暴露不同周期复合材料试样宏观形貌

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



图 5 在青岛大气环境暴露不同周期复合材料试样微观形貌

Fig.5 Micro-morphologies of composite samples exposed for different periods in the atmospheric environment of Qingdao

高聚物表面吸收紫外光子后,会引发或诱导基体树脂 产生自由基,进而引起游离基的链式降解反应^[19-20]。 对于乙烯基树脂,在紫外作用下,羟基—OH的伸缩 振动、羧基中 C—O的伸缩振动、苯环上 C—C的弯 曲振动以及三元取代苯环上 C—H的面外弯曲振动均 减弱^[21],表明化学键乃至分子链发生断链,而断链的 自由基处于不稳定的激发态分子,又很容易发生氧化 反应。反复断链和吸氧使光敏感点越来越多,从而开 始聚合物分子的自动氧化反应,随着时间推移逐步向 材料内部发展,最终导致基体树脂老化降解^[22]。

进一步利用 SEM 对曝晒不同周期的碳纤维复合 材料表面基体老化形貌进行分析,如图 6 所示。复合 材料空白试样树脂基体表面较为平整光洁,无明显缺 陷。曝晒 0.5 a 后,表面存在降解痕迹,整体减薄不均, 起伏度增大,局部还可见微裂纹。随曝晒时间的延长, 微裂纹开裂尺寸及数量均呈增大趋势。在长期的紫外 光照射下,材料表面分子链断裂,使较长的分子断裂 形成短的分子链,在内聚力作用下,基体树脂局部分子 链在某一方向上被大量拉断而逐渐形成微细裂纹^[23]。 随着老化发展,表层树脂脱落造成自由体积减小,受 损的表层会试图收缩,但底部未受损层会阻止其收缩, 该约束在受损层中引入拉伸应力,在未损伤层引入压缩 应力,这种拉伸应力导致表面裂纹进一步拓展^[24-25]。这 些微裂纹的存在,导致电解质溶液可以渗透到复合材料 试样基体内的碳纤维表面,形成电化学反应活性点。微 裂纹尺寸和数量随曝晒时间的延长,导致电化学反应活 性点增多,复合材料阴极电流密度以及与低合金钢电 偶电流密度随之增大,这与电化学分析结果相一致。



图 6 青岛大气环境暴露不同周期复合材料试样基体 SEM 形貌

Fig.6 SEM photos (2 000×) of composite samples exposed for different periods in the atmospheric environment of Qingdao

3 结论

1)在青岛大气环境曝晒不同周期的碳纤维复合材 料试样在海水中的开路电位与低合金钢相差 462.2 mV 以上,当两者连接形成电偶对时,存在较高的电偶腐 蚀倾向。两者耦合电位略大于低合金钢开路电位, 电偶电流接近耦合电位下复合材料试样的阴极电流 大小。

2)未曝晒前,碳纤维复合材料表面绝缘,与低 合金钢不存在电偶腐蚀。随曝晒时间的延长,复合材 料与低合金钢电偶电流呈增大趋势。曝晒2a时,电 偶电流为 0.356 9 μA/cm²,两者电偶腐蚀敏感性达到

B级。

3)随曝晒时间的延长,碳纤维复合材料表面树 脂基体降解减薄,纤维外露,并伴随大量微裂纹。微 裂纹尺寸和数量随曝晒时间的延长而增加,导致电化 学反应活性点增多,复合材料与低合金钢电偶电流密 度随之增大。

参考文献:

 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 X Y, LIU Y, LIU B. Application of Composite Materials in Ships[J]. Jiangsu Ship, 2008, 25(2): 13-17.

- [2] 杨升山,周鑫磊,张猛. 舰船用轻型复合装甲研究与应用[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(1): 74-76.
 YANG S S, ZHOU X L, ZHANG M. Application and Research of Light Composite Armor for Naval Ship[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(1): 74-76.
- [3] 牛峰,王建平,马春草,等.碳纤维复合材料在舰艇显控台上的应用[J].舰船科学技术,2019,41(11):85-88.
 NIU F, WANG J P, MA C C, et al. The Application of Carbon Fiber Composite Material in Naval Vessel Console[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(11):85-88.
- [4] 程航涛,戴高乐,段晔鑫,等.碳纤维复合材料在船舶 螺旋桨推进器上的应用研究[J]. 军民两用技术与产品, 2015(7): 12-13.
 CHENG H T, DAI G L, DUAN Y X, et al. Study on Application of Carbon Fiber Composites in Marine Propeller Propeller[J]. Dual Use Technologies & Products, 2015(7): 12-13.
- [5] 龚文化,杜姝婧,高晓进,等.碳纤维/环氧复合材料与 不同金属材料的电偶腐蚀行为研究[J].玻璃钢/复合材 料,2019(9):52-57.
 GONG W H, DU S J, GAO X J, et al. Study on Galvanic Corrosion Behavior between Carbon/Epoxy Composites

and Different Metal Materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(9): 52-57. 邵昭. 排水管系统中碳纤维偶接碳钢的耐蚀性能研究

[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(1): 58-62. SHAO Z. Study on Corrosion Resistance of Carbon Fiber Coupled Carbon Steel in Drainage System[J]. Development and Application of Materials, 2019, 34(1): 58-62.

- [7] TUCKER W C, BROWN R, RUSSELL L. Corrosion between a Graphite/Polymer Composite and Metals[J]. Journal of Composite Materials, 1990, 24(1): 92-102.
- [8] 苏培博, 吴晓宏, 姜兆华, 等. 碳纤维复合材料与LY12 铝合金的电偶腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(1): 37-39.
 SU P B, WU X H, JIANG Z H, et al. Galvanic Corrosion of Carbon Fiber Epoxy Composite Coupled with LY12 Al Alloy[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(1): 37-39.
- [9] 陈龙, 吴晓宏, 姜兆华. 防锈铝与碳纤维复合材料电偶 腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(2): 59-61. CHEN L, WU X H, JIANG Z H. Galvanic Corrosion Behavior between Corrosion-Resisting Aluminum Alloy and Carbon Fiber Composite[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(2): 59-61.
- [10] 孙巍, 胡裕龙, 王智峤. 碳纤维复合材料-钢电偶腐蚀 研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 106-113. SUN W, HU Y L, WANG Z Q. Study of Galvanic Corrosion between Steel and Carbon Fiber Composite[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 106-113.
- [11] 苏培博, 吴晓宏, 姜兆华, 等. T700 碳纤维复合材料与 30CrMnSiA 高强钢在 NaCl 溶液中的电偶腐蚀行为[J]. 材料保护, 2013, 46(10): 30-32.
 SU P B, WU X H, JIANG Z H, et al. Galvanic Corrosion

Behavior of Carbon Fiber Epoxy Resin Composite and High Strength Steel in Sodium Chloride Solution[J]. Materials Protection, 2013, 46(10): 30-32.

- [12] 陆峰, 钟群鹏, 曹春晓. 碳纤维环氧复合材料与金属电 偶腐蚀的研究进展[J]. 材料工程, 2003, 31(4): 39-43.
 LU F, ZHONG Q P, CAO C X. Progress of Galvanic Corrosion between the Graphite Epoxy Composite Materials and Metals[J]. Journal of Materials Engineering, 2003, 31(4): 39-43.
- [13] TAVAKKOLIZADEH M, SAADATMANESH H. Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environments[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(3): 200-210.
- [14] HAN H C, GONG X L, ZHOU M, et al. A Study about Silane Modification and Interfacial Ultraviolet Aging of Hemp Fiber Reinforced Polypropylene Composites[J]. Polymer Composites, 2021, 42(5): 2544-2555.
- [15] QI X, TIAN J W, XIAN G J. Hydrothermal Ageing of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Applied for Construction: A Review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 1017-1045.
- [16] 陈跃良,王安东,卞贵学,等. CF8611/AC531 复合材料 性能及与 7B04 铝合金电偶腐蚀的电化学研究[J]. 材料 工程, 2019, 47(1): 97-105.
 CHEN Y L, WANG A D, BIAN G X, et al. Electrochemical Study on Performance of CF8611/AC531 Composite and Galvanic Corrosion Coupled with 7BO4 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 97-105.
- [17] 陈跃良,王安东,卞贵学,等. CF8611/AC531 复合材料的电化学特性及其与7B04-T74铝合金的电偶腐蚀仿真
 [J]. 材料导报, 2018, 32(16): 2889-2896.
 CHEN Y L, WANG A D, BIAN G X, et al. Electrochemical Characteristic of CF8611/AC531 Composite and the Galvanic Corrosion Simulation when Coupled with 7B04-T74 Aluminum Alloy[J]. Materials Reports, 2018, 32(16): 2889-2896.
 [18] 丁康康,杜建平,王振华,等. 严酷海洋大气环境下玻
- [18] 丁康康, 杜建平, 王振华, 等. 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[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 10-17.
 DING K K, DU J P, WANG Z H, et al. Study on Corrosion Aging Behavior of Glass Fiber Reinforced Composites in Severe Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 10-17.
- [19] 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.
 ZUO X L, ZHANG D H, LUO X, 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.
- [20] 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.

[6]

• 103 •

DAI L K, SUN Y N, WANG G J. Erosion Behavior and Mechanism of Glass Fiber/Epoxy Vinlester Composites under Multiple Environmental Factors[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(9): 2059-2066.

 [21] 代礼葵,孙耀宁,王国建.紫外辐照对玻纤增强树脂基 复合材料冲蚀性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2019, 27(5): 52-58.
 DAI L K, SUN Y N, WANG G J. Effects of UV Irradiation on the Erosion Performance of Glass Fiber Rein-

forced Resin-Based Composites[J]. Materials Science and Technology, 2019, 27(5): 52-58.

- [22] 裴利刚. 泡沫夹克管聚乙烯防护层的老化机理和解决 方案[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(8): 95-97.
 PEILG Aging Mechanism and Solutions of the Polyethylene Protective Layer in Foam Jacket Tubes[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37(8): 95-97.
- [23] 于淑娟, 韦德麟, 郑广俭, 等. PVC/改性剑麻纤维木塑

复合材料的紫外加速老化性能研究[J]. 中国塑料, 2016, 30(3): 54-59.

YU S J, WEI D L, ZHENG G J, et al. UV Accelerated Aging Properties of PVC/Modified Sisal Fiber Composites Materials[J]. China Plastics, 2016, 30(3): 54-59.

[24] 时中猛, 邹超, 周飞宇, 等. 碳纤维增强树脂基复合材
 料紫外老化机理及寿命预测[J]. 压力容器, 2022, 39(5):
 8-15.

SHI Z M, ZOU C, ZHOU F Y, et al. Ultraviolet Aging Mechanism and Life Prediction of Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Composites[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(5): 8-15.

[25] GOEL A, CHAWLA K K, VAIDYA U K, et al. Effect of UV Exposure on the Microstructure and Mechanical Properties of Long Fiber Thermoplastic (LFT) Composites[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(13): 4423-4432.