

海洋风电重防腐涂料环氧玻璃鳞片的性能研究

张瑞珠, 刘晓东, 蒲亚博, 卢伟

(华北水利水电大学 机械学院, 郑州 450045)

摘要:目的 研究重防腐涂料环氧玻璃鳞片耐蚀耐磨性能。方法 对环氧玻璃鳞片与其它3种环氧类涂层进行磨耗实验,通过紫外线老化、低温暴露和盐雾等系列力学和耐腐蚀性能检测,研究环氧玻璃鳞片的耐腐蚀性能。结果 各涂层都符合磨耗性能指标(1000转的磨耗量小于1.8 g),环氧玻璃鳞片的耐磨性比环氧树脂涂层较差,但是比另外两种环氧类涂层耐磨性都好;耐蚀循环2400 h后,4种不同环氧类涂层表面均出现粉化、锈点,变色明显;环氧玻璃鳞片的结合力好于其他3种达到6.7 MPa,并且划线处的起泡数目最少,单边扩蚀只有2.5 mm,失光率最小。结论 环氧玻璃鳞片涂层中由于鳞片的层状分布,延缓了腐蚀介质的渗透,具有良好的耐磨耐蚀性能,可以作为一种高效的重防腐涂料,应用于海洋、船舶等环境中。

关键词: 环氧玻璃鳞片; 磨耗实验; 紫外线老化实验; 盐雾实验; 低温暴露实验; 重防腐涂料

中图分类号: TG174.46 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)07-0097-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.018

Performance of the Heavy-duty Coating Epoxy Glass Flake

ZHANG Rui-zhu, LIU Xiao-dong, PU Ya-bo, LU Wei

(Mechanics Institute, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the corrosion and wear resistance of epoxy glass flakes. **Methods** Epoxy glass flakes and the other three kinds of epoxy coatings were analyzed by abrasion experiment, ultraviolet aging test, low temperature exposure test and salt spray test and a series of mechanical and corrosion resistance tests to explore the corrosion resistance property of the epoxy glass flakes. **Results** All the coatings accorded with wear performance index (quality changes after abrasion 1000 r less than 1.8 g), the abrasion resistance of epoxy glass flakes was inferior compared to epoxy resin coating, but higher than the other two kinds of epoxy coatings. After the cycle test of corrosion for 2400 h later, pulverization, rust and obvious color changes appeared on the surface of all coatings. The adhesion strength of the epoxy glass flake still reached 6.7 MPa which was better than the other three, and the epoxy glass had the least number of foaming lines with the unilateral corrosion of only 2.5 mm and the minimal light loss rate. **Conclusion** Due to the layer distribution of flakes, the epoxy glass flake coating delays the penetration of corrosive medium and has

收稿日期: 2015-03-11; 修订日期: 2015-04-02

Received: 2015-03-11; Revised: 2015-04-02

基金项目: 水利部科技推广项目计划(TG1420); 2013 地方高校国家级大学生创新创业训练计划(201310078057); 华北水利水电大学 2014 年大学生创新创业基金项目(HSCX2014103)

Fund: Supported by Ministry of Water Resources of Science and Technology Promotion Program (TG1420), National College Students' Innovative Entrepreneurial Training Local Colleges of 2013 Meter (201310078057), and North China University of Water Conservancy and Hydropower College Students Entrepreneurial Innovation Fund Project in 2014 (HSCX2014103)

作者简介: 张瑞珠(1962—), 女, 河南人, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面防护。

Biography: ZHANG Rui-zhu (1962—), Female, from Henan, Ph. D., Professor, Research focus: direction of material surface protection.

good wear-resisting corrosion resistance, which can be used as an efficient heavy-duty coating for application in the marine and navigating environment.

KEY WORDS: epoxy glass flake; abrasion test; ultraviolet aging test; salt spray test; low temperature exposure experiments; heavy-duty coating

工程材料在环境中由于受到磨粒磨损、化学腐蚀及腐蚀磨损的作用,往往直接导致材料失效,间接导致安全、经济和环境等问题。在日常生活和科学实验中人们积累了许多防腐蚀方法,如金属钝化膜、抗氧化膜、电极保护和耐蚀涂层等。其中,将涂料喷涂在基材表面固化成耐蚀涂膜是一种简单而有效的耐蚀方法^[1-2]。

在耐蚀涂层中,环氧玻璃鳞片相对其它树脂混合物涂层具有独特的耐蚀效果。1953—1955 年间,美国欧文斯-康宁玻璃纤维公司制造出玻璃鳞片并应于涂料领域。在随后的半个多世纪中,玻璃鳞片因其优异的耐蚀性能,已经成为重防腐涂料中极具潜力的品种,并且在国内外的电力、海洋工程、石油化工等领域迅速发展。

环氧玻璃鳞片是一种高效新型的重防腐涂料。片状玻璃鳞片由于在环氧树脂中处于层状重叠分布,延缓了腐蚀介质的渗透,使涂层具有小的固化收缩率,能够增加使用寿命且适应多种腐蚀环境下的防腐

要求^[3]。环氧玻璃鳞片可以作为一种耐蚀涂料,尤其是在重防腐领域^[4-6]比其他环氧类涂料能起到更好的防护作用,将会在更多的场合得到引用。随着现代海洋事业的蓬勃发展,船舶和海洋钢结构材料的耐蚀要求逐年提高,环氧玻璃鳞片无疑是一种经久耐用的涂料^[7-8]。未来它将会向高耐久性、高防腐性、无污染、低成本、易施工等方向持续发展^[9]。

本文以耐磨环氧漆、环氧树脂漆、改性环氧树脂漆、环氧玻璃鳞片制成的涂层试样为对象,通过对涂层进行磨耗、附着力测定、盐雾、人工老化、低温以及耐阴极剥离等实验,比较涂层的耐磨耐蚀性能。

1 实验

实验原材料主要为不同厂家的 PPG 环氧树脂漆、洛阳七维环氧耐磨防锈树脂、阿克苏 954 改性环氧树脂、阿克苏 505 环氧玻璃鳞片制成的涂层样本。

实验所用试样规格和数量见表 1。

表 1 测试样本规格及数量
Tab.1 Specifications of test samples and quantity

| 测试项目 | 样本形状及尺寸 | 基 材 类 型 | 数量要求 |
|-------------|--|--------------|------|
| 漆膜厚度测定 | 漆膜厚度测定不另行制备试板,仅开展非破坏性实验,试板即其他测试项目用试板 | | |
| 耐冲击性 | 150 mm×76 mm×4.75 mm | Q235 或其他普通钢材 | 3 |
| 耐磨性 | 100 mm×100 mm×4.75 mm; 中心开 6.35 mm 直径圆孔 | Q235 或其他普通钢材 | 3 |
| 耐海水浸渍及腐蚀性蔓延 | 150 mm×76 mm×4.75 mm; 中部采用圆切刀划一道纵向划痕,划痕长 90 mm,宽 2 mm | Q235 或其他普通钢材 | 3 |
| 耐人工循环老化实验 | 150 mm×76 mm×4.75 mm | Q235 或其他普通钢材 | 3 |
| 耐阴极剥离性实验 | 150 mm×70 mm×2 mm,在其中一短边 中部距边缘 6 mm 处钻直径 4 mm 的连接孔。 | Q235 或其他普通钢材 | 3 |

耐磨性实验主要检测涂层摩擦机械的抵抗能力,本实验采用旋转橡胶轮法,检测标准参考 GB/T 1768—2006《色漆和清漆耐磨性的测定》。

采用拉拔法检测漆膜附着力,检测标准参照 GB/T 5210—2006《色漆和清漆拉开法附着力实验》。

耐冲击性测试参照 GB/T 1732—1993《漆膜耐冲击测定法》。

漆膜的耐久性通过紫外线老化实验检测,检测标准参照 GB/T 1865—2009《色漆和清漆 人工气候老化

和人工辐射曝露 滤过的氙弧辐射》。

低温暴露实验,参考 GB/T 13893—2008《色漆和清漆耐湿性的测定连续冷凝法》进行。

盐雾实验,参考 GB/T 1771—2007《色漆和清漆耐中性盐雾性能的测定》进行。

耐海水浸渍及腐蚀性蔓延按照下述过程进行。按照表 2 配制海水,将试样悬挂在容器中,彼此不接触,温度设为 40 ℃,持续 4200 h,结束后检测涂层附着力。

表 2 人造海水配方
Tab.2 Artificial seawater recipe

| 组分 | 质量浓度/(g · L ⁻¹) |
|--|-----------------------------|
| MgCl ₂ · 6H ₂ O | 9.8 |
| Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O | 8.9 |
| CaCl ₂ | 1.2 |
| NaCl | 23.0 |

2 结果与讨论

2.1 耐磨性分析

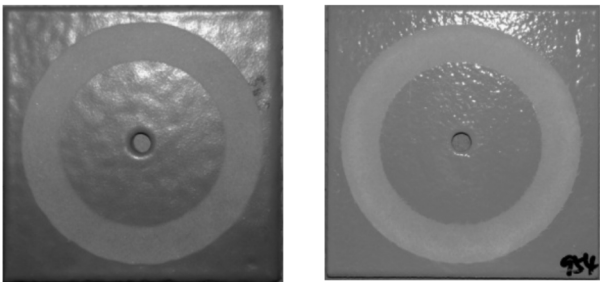
工程材料在自然环境中受到磨粒磨损,因此涂层表面的力学性能显得尤为重要,尤其是涂层的耐冲击性、附着力和耐磨性,它们是衡量涂层耐磨性能的重要依据。

表 3 是各类涂层的耐冲击性和附着力的实验数据。从实验数据来看,环氧玻璃鳞片涂层的附着力都达到检测标准要求(≥5 MPa),且附着力要比其它环氧树脂涂层较好;但相对于其它环氧树脂类涂层,玻璃鳞片的耐冲击性能较低,相同实验环境下出现了剥落现象。这主要是因为环氧玻璃鳞片的存在降低了涂膜与基材之间的热膨胀系数,使基体与漆膜粘结性提高,所以附着力增加;玻璃鳞片属于层状分布,层间结合力小,出现层状剥落,导致耐冲击性也较差^[11-12]。因此在配置环氧玻璃鳞片漆时可以适当添加效果更好的偶联剂和粘结剂,增强漆膜的层间结合力。

表 3 各涂层耐冲击性和附着力实验比较
Tab.3 Comparison of impact resistance and adhesion experimental results of all coatings

| 各涂层性能 | 环氧 树脂漆 | 环氧耐磨 防锈漆 | 改性环氧 树脂漆 | 环氧玻璃 鳞片 |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 耐冲击性 | 无裂纹皱纹 及剥落 | 无裂纹皱纹 及剥落 | 无裂纹皱纹 及剥落 | 无裂纹皱纹 有剥落 |
| 附着力 /MPa | 19.5 (面漆) | 13.8 (层间) | 13.5 (层间) | 16.1 (层间) |

图 1 分别是环氧玻璃鳞片涂层和环氧树脂漆涂层磨耗 500 转后的照片,从图中看出试样磨损量较少。表 4 为各涂层磨损 1000 转后的称量结果。



a 环氧玻璃鳞片 b 环氧树脂漆膜

图 1 环氧玻璃鳞片和环氧树脂漆膜磨耗 500 r

Fig.1 Epoxy glass flake and epoxy resin paint wearing 500 r

表 4 涂层磨耗 1000 r 前后质量变化

Tab.4 Quality changes before and after abrasion 1000 r

| 各涂层性能 | | 环氧树 脂漆 (PPG) | 环氧耐磨 防锈树脂 漆(七维) | 改性环 氧树脂 漆(954) | 环氧 玻璃 鳞片 |
|-------------|---------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| 耐 磨 性 | 实验前/g | 123.36 | 240.32 | 165.06 | 158.37 |
| | 实验后/g | 122.41 | 239.88 | 163.64 | 157.76 |
| | 质量损失/mg | 953.3 | 436.3 | 1416.7 | 606.7 |

从表 4 看出,各涂层都符合磨损性能指标(1000 转的磨耗量小于 1.8 g),其中环氧耐磨防锈树脂的耐磨最好,这是因为在树脂中添加了二氧化硅填料,二氧化硅的耐磨性非常好,添加到环氧树脂中可以提高树脂基体的耐磨性能;由于改性环氧树脂中添加的颜填料是云铁材料,云铁材料在环氧树脂中润湿性能较二氧化硅差,这样就会使其在树脂内部分散不均匀,对分子结构的连续性能也有一定的影响,所以在这几种环氧树脂中它的耐磨性较差;环氧玻璃鳞片的耐磨性要好于环氧树脂和改性环氧树脂,因为经过偶联剂处理过的玻璃鳞片将环氧树脂与玻璃鳞片两类性质差别很大的材料,以化学键偶联起来,整个涂层结构比较整齐连续,并且玻璃鳞片本身具有很好的耐磨性能,玻璃鳞片与环氧树脂有很好的粘结性,增强了涂膜的坚韧程度,并且玻璃鳞片表面光滑,摩擦系数小还有很高的硬度,有效降低了磨耗量所以环氧玻璃鳞片的耐磨性能要好于环氧树脂漆和改性环氧云铁涂料。所以玻璃鳞片总体上也具有很好的耐磨性。

2.2 防腐蚀性能

涂层的耐蚀性能是评定涂层耐用的一个重要依据。本文通过开展循环紫外线老化实验、低温暴露实验和盐雾实验,在进行 2500 h 后观测漆膜的变化。

表 5 各涂层耐蚀循环实验结果对比

Tab. 5 Comparison of corrosion cycle test results of each coating

| 性能检测 | 环氧树脂漆 | 环氧耐磨防锈漆 | 改性环氧树脂漆 | 环氧玻璃鳞片漆 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 粉化 | 明显 | 较重 | 严重 | 明显 |
| 变色 | 明显 | 明显 | 明显 | 明显 |
| 起泡 | 边缘少数小泡 | 边缘少数气泡 | 边缘少数气泡 | 无 |
| 附着力 /MPa | 实验前 14.3 实验后 7.1 | 实验前 13.9 实验后 6.5 | 实验前 13.3 实验后 5.3 | 实验前 14.7 实验后 9.8 |

表 6 涂层人工循环老化粉化和锈点数量等级

Tab. 6 Aging and dusting cycles of artificial coatings and the quantity grade of rust

| 漆膜 | 粉化等级 | 锈点(斑)数量等级 |
|---------|------|-----------|
| 环氧树脂漆 | 3 | 4 |
| 环氧耐磨防锈漆 | 4 | 3 |
| 改性环氧树脂漆 | 5 | 4 |
| 环氧玻璃鳞片漆 | 3 | 3 |

从表 5 和表 6 中可以看出,4 种不同环氧类涂层在 2400 h 的耐蚀循环实验后,涂层表面均出现粉化、锈点,并且变色明显,这些变化是由涂层中的环氧树脂的性能造成的,树脂中的 C=C 键和 C=O 键吸收紫外线会引起光氧老化^[13]产生泛黄、变脆,但是环氧玻璃鳞片的粉化程度明显低于环氧树脂和改性环氧树脂漆。在涂层起泡方面,玻璃鳞片也优于其它环氧类涂层。在同期进行的耐海水浸渍及腐蚀性蔓延实验中,相同环境条件下无论在单边扩蚀、起泡还是附着力方面,环氧玻璃鳞片涂层的性能仍然高于其它环氧类涂层,结果见表 7。

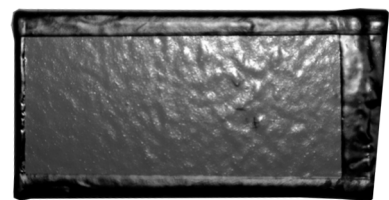
表 7 各涂层耐海水浸渍及腐蚀性蔓延实验结果对比

Tab. 7 Comparison of test results of corrosion resistance to sea water immersion and the corrosivity spread results of each coating

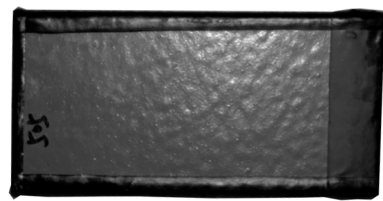
| 性能检测 | 环氧树脂漆 | 环氧耐磨防锈漆 | 改性环氧树脂漆 | 环氧玻璃鳞片漆 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 附着力 /MPa | 实验前 19.5 实验后 3.4 | 实验前 13.8 实验后 1.5 | 实验前 13.5 实验后 5.6 | 实验前 15.1 实验后 6.7 |
| 光泽度 /Gs | 实验前 43.9 实验后 3.2 | 实验前 49.3 实验后 3.7 | 实验前 17.9 实验后 2.8 | 实验前 30.8 实验后 2.1 |
| 划线处腐蚀 | 一般评价 单边扩蚀/mm | 划线处起少有大泡 大量气泡 | 划线处起少 泡较少 | 划线处起少 泡较少 |

环氧玻璃鳞片具有这些良好耐蚀性能是因为环氧玻璃鳞片涂层中含有约 20% ~ 30% 的玻璃鳞片,它们在环氧树脂内互相连接,平行排列,多层重叠,形成高密度的防护层,具有不透气和高抗渗透性能,对腐蚀介质的深入起到屏障作用;并且,鳞片的存在也使得树脂内的微裂纹微气孔相互分离,延缓腐蚀介质如大气、水份、盐雾等到达基材的速度,延长材料的使用寿命^[10,14],同时玻璃鳞片的存在把树脂内部的缺陷(气孔)相互隔离并抑制了毛细管作用的渗透。由于玻璃鳞片具有热膨胀系数小,固化收缩率低,玻璃鳞片的无规律分布对减小各接触面的残余应力有一定效果,致使涂层不易与基材剥离起泡,附着力也高于其它类涂层。涂层在经过耐海水浸渍及腐蚀性蔓延后,划线处玻璃鳞片层状分布被破坏,起不到“迷宫效应”,但是玻璃鳞片本身具有弱碱性^[15]在一定程度上减缓腐蚀,所以环氧玻璃鳞片的单边扩蚀要优于普通环氧类涂层。

涂层在进行老化实验后光泽度降低,出现明显的色差,主要原因是涂层受到了紫外线的破坏,高分子中的化学键被破坏,粉化严重,但是玻璃鳞片与树脂之间的折光率相差较大,鳞片的层状分布可以使紫外线等有害光源被反射,大大减缓了涂层的粉化腐蚀。如图 2 所示,环氧玻璃鳞片涂层在经过 168 h 后的人工循环老化实验后有明显的颜色变化。



a 老化实验原始试样



b 老化实验168 h试样

图 2 环氧玻璃鳞片紫外线老化实验原始和 168 h 试样

Fig. 2 The original sample of epoxy glass flakes in the ultraviolet aging experiment

图 3 是根据各类环氧树脂涂层经过 840 h 人工循环老化实验后试样失光率变化,从图中可以看到各类环氧树脂涂层的变色程度。实验前期(840 h),玻璃

鳞片涂层的失光率大,而环氧树脂涂层的失光率较小,这是因为漆膜表面是承受紫外光辐射的主要载体,并且表面鳞片较少;而环氧树脂漆膜表面光洁度高,能够大量反射紫外光,减少辐射造成的粉化。840 h后,环氧树脂的失光率逐渐增大,而其它涂层失光率的变化逐渐变缓,尤其是环氧玻璃鳞片,更是趋于平缓。因为在经历盐雾、低温暴露等循环实验后,随着介质小分子的渗入涂层,破坏了涂层表面的光洁度,环氧树脂的表面光洁度下降,粉化加剧;玻璃鳞片虽然表面失光率较大,但是在涂层中处于表面下层的鳞片要比表层多很多且层状叠加排列,形成的“迷宫效应”大大增加了腐蚀介质的渗入途径,使得玻璃鳞片涂层具有很好的耐腐蚀性能,同时由于玻璃鳞片的层状分布使得紫外光的反射和散射加剧,进而失光率降低,抗老化性能优异稳定。

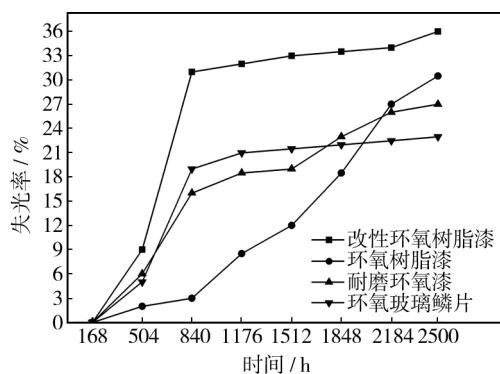


图3 紫外线老化实验失光率变化

Fig. 3 Changes in light loss rate in the ultraviolet aging experiment

综合以上实验结果和分析,可以得出环氧玻璃鳞片在耐蚀方面因为自身的结构具有其独特的防腐蚀性能。

3 结论

通过对4种不同环氧树脂类涂层进行耐磨和耐蚀性能的检测,各涂层都符合磨损性能指标,环氧玻璃鳞片的耐磨性比环氧耐磨防锈树脂涂层较差,但是好于另外两种环氧类涂层;4种不同环氧类涂层在进行2400 h后的耐蚀循环实验后,涂层表面均出现粉化、锈点,并且变色明显,但环氧玻璃鳞片的结合力依然能达到6.7 MPa,并且划线处的起泡数目最少,单边扩蚀只有2.5 mm,失光率最小。环氧玻璃鳞片具有较好的耐磨性和优良的耐蚀性,其特有的组织结

构决定了它在耐蚀方面独特的防腐蚀机理。

参考文献

- [1] BRIGHAM A, SIMON J, WATKINSON, et al. Understanding and Use of Glass Flake [J]. Paint & Coatings Industry, 2009, 25(3): 22—24.
- [2] 石森森. 耐磨耐蚀涂膜材料与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
SHI Miao-sen. Wear-resisting Corrosion Resistant Coating Material and Technology [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2003.
- [3] 李敏, 王秀娟, 刘宝成, 等. 海洋环境防腐蚀玻璃鳞片涂料的研制 [J]. 涂料工业, 2010, 40(1): 49—50.
LI Min, WANG Xiu-juan, LIU Bao-cheng, et al. The Development of the Marine Environment Corrosion Resistance of Glass Flake Coating [J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(1): 49—50.
- [4] GONZÁLEZ-GUZMÁN J. Resistance of Metallic Substrates Protected by an Organic Coating Containing Glass Flakes [J]. Progress in Organic Coatings, 2010, 68(3): 240—243.
- [5] MASANORI H, ATUSHI N. Influence of Residual Rust on Underlying Steel Surface on Performance of Heavy-duty Coating [J]. Zairyo to Kankyo, 2011, 60(1): 15—21.
- [6] 陈中华, 石亚军. 水性环氧玻璃鳞片重防腐涂料的研制 [J]. 涂料工业, 2009, 39(6): 14.
CHEN Zhong-hua, SHI Ya-jun. Waterborne Epoxy Glass Flake Heavy-duty Coating Development [J]. Journal of Coatings Industry, 2009, 39(6): 14.
- [7] 彭金华. 环氧玻璃鳞片涂料在重防腐领域中的应用 [J]. 涂料, 2009, 23(34): 32—34.
PENG Jin-hua. Epoxy Glass Flake Coating Application in the Field of Heavy-duty [J]. Journal of Coatings, 2009, 23(34): 32—34.
- [8] 杜新胜, 于晓灵, 杨威洁, 等. 防腐涂料的研究与发展 [J]. 上海涂料, 2009, 47(7): 26—28.
DU Xin-sheng, YU Xiao-ling, YANG Wei-jie, et al. Research and Development of Anticorrosive Coatings [J]. Shanghai Coatings, 2009, 47(7): 26—28.
- [9] 刘新. 海上风电场的防腐涂装 [J]. 中国涂料, 2009, 24(11): 17—25.
LIU Xin. The Anticorrosion Coating of Offshore Wind Farm. [J]. China Coating, 2009, 24(11): 17—25.
- [10] 王玖玖, 张卫群. 风电叶片涂料检测方法的研究 [J]. 上海涂料, 2013, 51(8): 53—55.
WANG Jiu-jiu, ZHANG Wei-qun. Wind Power Blade Coat-

- ing Test Method Research [J]. The Shanghai Coatings, 2013, 51(8): 53—55.
- [11] 秦国治, 田志明. 防腐蚀技术及应用实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- QIN Guo-zhi, TIAN Zhi-ming. Anti-corrosion Technology and Application Examples[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2002.
- [12] 文建国, 许求鑫. 环氧玻璃鳞片重防腐涂料[J]. 涂料工业, 1999, 29(6): 12—14.
- WEN Jian-guo, XU Qiu-xin. Epoxy Glass Flake Anticorrosive Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 1999, 29(6): 12—14.
- [13] RADHA, J C, RANGANATHAIAH, C. Effect of Hygrothermal Aging on the Diffusion of Seawater in Epoxy/Glass Composites Studied by Positron Lifetime Spectroscopy[J]. Polymer Composites, 2008, 29(2): 149—155.
- [14] 李明, 张海宽, 刘兰轩, 等. 环氧玻璃鳞片长效防腐玻璃的制备[J]. 上海涂料, 2012, 50(5): 4—6.
- LI Ming, ZHANG Hai-kuan, LIU Lan-xuan, et al. The Preparation of Epoxy Glass Flake Long-term Anti-corrosion Glass[J]. Shanghai Coatings, 2012, 50(5): 4—6.
- [15] 方健君, 沈海鹰, 王秀娟, 等. 海洋环境下耐阴极剥离重防腐涂层的研究[J]. 涂料工业, 2010, 40(10): 1—7.
- FANG Jian-jun, CHEN Hai-ying, WANG Xiu-juan, et al. Under the Ocean Environment, Heavy Anti-corrosion coating of Cathodic Disbonding of Research[J]. Paint & Coatings industry, 2010, 40(10): 1—7.

(上接第 80 页)

- [7] PETRA P, BHATTAEHARYYA A R, ANDREAS J. Morphology and Electrical Resistivity of Melt Mixed Blends of Polyethylene and Carbon Nanotube Filled Polycarbonate Polymer, 2003, 44: 8061—8069.
- [8] FLANAGAN M P, ZIKRY M, WALL J W, et al. An Experimental Investigation of High Velocity Impact and Penetration Failure Modes in Textile Composites[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(12): 1080—1103.
- [9] 阿列克谢耶夫 A T. 隐身技术的物理学基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.
- ALEKSEYEV A T. Foundations of Physics in Stealth Technology[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2002.
- [10] 周志飏. 宽频吸波涂层的探索[J]. 材料导报, 2005, 11(19): 321—323.
- ZHOU Zhi-biao. Exploration on a Broad-band Radar-wave Absorbing Coating[J]. Materials Review, 2005, 11(19): 321—323.
- [11] 张泽洋, 刘祥萱, 张海丰. $\text{NiFe}_{1.98}\text{Nd}_{0.02}\text{O}_4$ -Fe 双层吸波涂层设计及制备[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 119—123.
- ZHANG Ze-yang, LIU Xiang-xuan, ZHANG Hai-feng. Design and Preparation of Double-layer Microwave Absorbers based on Carbonyl Iron and $\text{NiFe}_{1.98}\text{Nd}_{0.02}\text{O}_4$ -Fe[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 119—123.
- [12] 刘海定, 曹旭东, 贺文海. 吸波涂层界面结合机理(I): 涂层力学性能影响因素分析[J]. 功能材料, 2007, 38(7): 1045—1048.
- LIU Hai-ding, CAO Xu-dong, HE Wen-hai. Study on the Interfacial Bonding Mechanism of Radar Absorbing coatings (I): the Factors Effect on Mechanical Properties[J]. Functional Materials, 2007, 38(7): 1045—1048.
- [13] 尹应跃, 魏晓红, 游敏. 粘涂层中的温度应力测试与分析[J]. 粘接, 2003, 24(4): 3—5.
- YIN Yin-gyue, WEI Xiao-hong, YOU Min. Measurement and Analysis of the Thermal Stress in Adhesive Coating[J]. Adhesion, 2003, 24(4): 3—5.
- [14] 杨春梅, 郑小玲, 余海洲. 环氧胶粘涂层中温度应力的有限元分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2004, 26(2): 160—162.
- YANG Chun-mei, ZHENG Xiao-ling, YU Hai-zhou. Finite Element Analysis of Inner Stress in Epoxy Adhesive Layer[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2004, 26(2): 160—162.
- [15] 张鹏, 王兆华. 丙烯酸树脂防腐涂料及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- ZHANG Peng, WANG Zhao-hua. Acrylic anti-corrosion Coatings and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [16] 彭智慧, 曹茂盛. 雷达吸波材料设计理论与方法研究[J]. 航空材料学报, 2003, 23(3): 58—63.
- PENG Zhi-hui, CAO Mao-sheng. Progress in Design theory and Methods Research on Radar Absorbing Materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(3): 58—63.