

双爪型硅烷预处理对低表面处理环氧涂层性能影响研究

陈肖寒, 张燕, 王同良, 张勇, 白杨, 赵帅男, 姜秀杰, 崔显林, 成建强*

(海洋化工研究院有限公司, 海洋涂料国家重点试验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对低表面处理基材上环氧涂层附着力低且耐蚀性差的问题, 利用双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷配制了6种不同浓度的硅烷偶联剂溶液, 分别对St2级打磨钢板表面进行预处理并配套环氧涂料, 通过FT-IR、XPS对反应过程进行分析, 同时对涂层体系界面附着力和电化学性能进行测试。试验结果表明: 双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷水解生成的硅羟基与钢板表面活性羟基反应形成Si—O—Fe键是涂层附着力和耐蚀性提升的关键; 7.5%的硅烷浓度可实现最佳的预处理效果, 涂层附着力较未处理涂层提升1.5倍, 达到18.2 MPa; 同时海水浸泡1 000 h的涂层体系具有更正的开路电位及 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的电化学阻抗值, 表现为单一的容抗弧特征, 具备优异的腐蚀介质屏蔽效果。

关键词: 双爪型硅烷; 预处理浓度; 低表面处理; 电化学阻抗; 附着力

中图分类号: TQ637 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2024)12-0001-06

Effect of Double-claw Silane Pretreatment on Properties of Epoxy Coating with Low Surface Treatment

CHEN Xiao-han, ZHANG Yan, WANG Tong-liang, ZHANG Yong, BAI Yang, ZHAO Shuai-nan, JIANG Xiu-jie, CUI Xian-lin, CHENG Jian-qiang*

(Marine Chemical Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Marine Coatings, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: In order to solve the problem of low adhesion and poor corrosion resistance of epoxy coating on the surface of low surface treated substrate, a bis (3-(triethoxysilyl)propyl)amine coupling agent solution with 6 different concentrations was used to pretreat the surface of St2 polished steel plate and equipped with epoxy coating. The reaction process was analyzed by FT-IR and XPS, while the interfacial adhesion and electrochemical properties of the coating system were tested. The experimental results revealed that the formation of Si—O—Fe bonds, which occur through the reaction between silanol groups generated by the hydrolysis of bis-(3-triethoxysilylpropyl) silane and the active hydroxyl groups on the steel plate surface, is crucial for enhancing coating adhesion and corrosion resistance. Notably, a silane concentration of 7.5% achieved optimal pretreatment outcomes, with the coating adhesion improving 1.5 times to 18.2 MPa compared to the untreated coating. Additionally, the coating system immersed in seawater for 1 000 hours exhibited a more positive open-circuit potential and an electrochemical impedance value of $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$, demonstrating a single capacitive arc feature and superior corrosion medium barrier properties.

Key words: double-claw silane; pretreatment concentration; low surface treatment; electrochemical impedance; adhesion

收稿日期: 2024-09-11

作者简介: 陈肖寒(1998—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事防腐涂料及功能涂料的研制工作。E-mail: 2906612880@qq.com。

* 通讯作者: 成建强(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事防腐及功能涂料研制工作。E-mail: chengjianqiang@sinochem.com。

0 引言

涂料防腐性能的优劣很大程度上取决于涂层与基材间的界面结合强度, 有机涂层和钢材之间良好附着是涂层优异性能实现的前提。但作为两种极性不同的

材料,有机涂层与钢材的附着往往并不理想,尤其是对于表面处理程度较低的基材^[1-4]。在一些施工不便的狭窄场所及边角连接处,往往无法进入大型设备进行喷砂处理,只可通过砂盘等工具进行手动打磨以除去金属基材表面锈渍和氧化层等。而手动打磨得到的基材表面粗糙度较低,对涂料附着提升程度有限。为了提高低表面处理基材上涂料的附着,往往需要涂装前对钢材表面进行适当的处理和改性,包括磷化处理、钝化处理等,通过在钢板表面形成一层钝化膜来提高附着力和防腐性能。但随着近年来国家对环保的重视,磷酸和铬酸盐钝化处理逐渐被禁止使用,硅烷化处理有望成为一种替代磷酸盐和铬酸盐的新型金属表面预处理方式^[5-7],通过硅烷偶联剂预处理,在金属表面生成一层致密的硅烷膜,此种工艺施工方便,且生成的硅烷膜对涂层与基材的界面附着力和涂层防腐性能提升效果显著,其无毒、无污染、低成本及优异的粘接性等性能逐渐受到国内外学者的广泛关注^[8-10]。

硅烷偶联剂是一种含有不同化学性质官能团的物质,通过两种不同性质的官能团搭建起一座分子桥,将有机物和无机物连接在一起。其化学通式一般用 R—Si—X₃ 表示,其中 R 代表亲有机物的官能团,如氨基、乙烯基、环氧基等,可与有机高分子聚合物进行固化交联;X 代表为亲无机物的官能团,如烷氧基、芳氧基等,水解后与无机材料表面的羟基进行反应。

使用硅烷偶联剂预处理钢板时,很少直接使用纯偶联剂,往往需要将硅烷偶联剂先行水解得到硅羟基后,再在钢板表面进行预处理,以获得更好的处理效果。硅烷偶联剂浓度及种类不同,对钢板的处理效果以及后续涂层的使用性能影响亦不相同。刘佳等将 KH550 用作纳米分散剂,对其水解工艺进行探究发现,将 KH550:乙醇:水质量比调整至 1:144:16 时,水解稳定时间长,且生成的硅醇量大,水解效果最佳^[11]。赵玥等通过研究 KH560 体积分数对硅烷水解率及 PVDF 性能的影响,得出 9% 体积分数的硅烷溶液得到的 PVDF 涂层疏水性和热稳定性最好^[12]。目前国内对硅烷预处理的研究多集中在常规单爪型硅烷如 KH550、KH560 等^[13-15],对键合能力和交联密度更高的双爪型或多爪型硅烷研究较少,且对低表面处理基材上的硅烷预处理鲜有报道,因此本文基于低表面处理基材,开展了双爪型硅烷预处理浓度对环氧涂料性能影响研究。

1 试验部分

1.1 试验原材料

环氧防腐涂料 HF-06,海洋化工研究院有限公司;双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷,赢创德固赛公司;

无水乙醇(分析纯 99.7%),山东鑫赢舜新材料有限公司;去离子水,自制;Q235 钢板,山东华建钢铁有限公司。

1.2 试验方法

选取双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷作为双爪型偶联剂,按照表 1 所示配比分别配制 6 种不同浓度的硅烷偶联剂,搅拌 3 min 后静置 15 min,采用施工更为便捷的刷涂工艺,刷涂于打磨至 St2 等级的低表面处理钢板表面。硅烷溶液刷涂标准:刷涂至钢板表面浸润且无溶液堆积状态。待硅烷膜干燥 12 h 后测试膜厚并刷涂环氧防腐涂料,固化 7 d 后进行涂层膜厚及各类性能测试。试验过程均在室温下进行。

表 1 不同硅烷偶联剂浓度配比

编号	无水乙醇:硅烷:去离子水质量分数/%
1-0#	未预处理
1#	70.0:2.5:27.5
2#	67.5:5.0:27.5
3#	65.0:7.5:27.5
4#	62.5:10.0:27.5
5#	60.0:12.5:27.5

1.3 性能检测

傅里叶红外光谱(FT-IR)测试:采用赛默飞 Nicolet iS5 傅里叶变换红外光谱仪对硅烷水解前后的溶液样品进行测试,以验证硅烷偶联剂分子官能团的变化,仪器对应光谱范围为 4 000~350 cm⁻¹,分辨率优于 0.8 cm⁻¹。

X 射线光电子能谱(XPS)测试:采用 PHI 公司的 PHI5000C ESCA System X 射线光电子能谱仪进行硅烷膜的全元素扫描和单个元素的窄扫,采用 RBD147 采集卡,0~1 200 eV 全扫描谱通能为 93.9 eV,窄谱扫描通能为 23.5 eV 或 46.95 eV。

附着力测试:按照 GB/T 5210 附着力拉拔法测试标准,使用 Positest AT-M 20 mm 拉拔仪和直径 20 mm 铝质拉拔柱进行附着力测试,选用哥俩好 AB 胶(双组分丙烯酸胶)粘接,室温固化 24 h 后进行附着力测试,每个样品测试不少于 3 个点,附着力取平均值。

电化学阻抗试验:通过 CS310X 型电化学工作站(科斯特仪器),采用三电极体系对海水浸泡 1 000 h 的环氧涂层进行电化学阻抗试验,其中涂层样板作为工作电极(工作面积为 1 cm×1 cm),饱和甘汞电极作为参比电极,铂铈棒(φ3 mm×80 mm)作为辅助电极,所用电解质溶液为 3.5%NaCl 溶液,测试频率范围为

100 kHz~10 MHz, 交流电(AC)幅度为 10 mV。

2 结果与讨论

2.1 双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷水解成膜过程中官能团的变化

为了从微观层面更好地解释和验证硅烷水解前后官能团的变化, 分别对双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷水解前后的溶液进行了 FT-IR 红外测试, 红外谱图如图 1 所示。

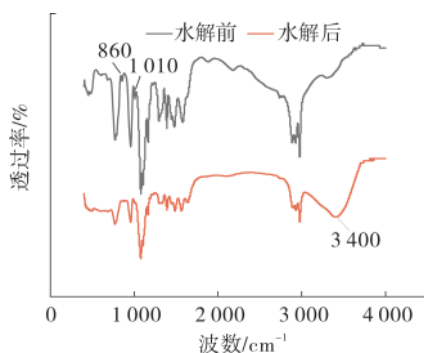


图 1 硅烷水解前后傅里叶红外图谱

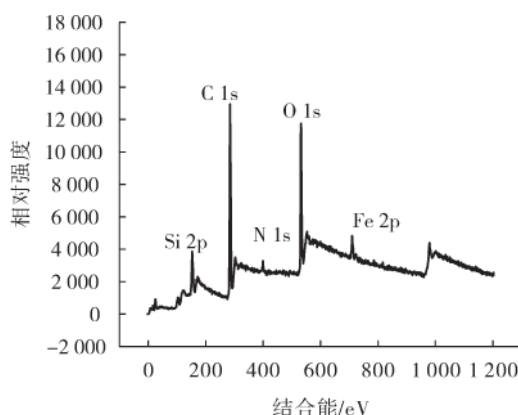
由图 1 可知, 860 cm^{-1} 和 1010 cm^{-1} 附近的特征吸收峰为 Si—O—C, 3400 cm^{-1} 处对应的是 Si—O—H 的特征吸收峰。经过 15 min 的水解, 原本处于 860 cm^{-1} 和 1010 cm^{-1} 附近 Si—O—C 的特征吸收峰消失不见, 同时 3400 cm^{-1} 处 Si—O—H 的特征吸收峰明显增强, 说明经过 15 min 的水解, 硅烷中与 Si 原子相连的乙氧基水解成了硅羟基, 而水解生成的硅羟基是实现硅烷膜与基材良好界面结合的关键。

对固化后的硅烷膜进行了 XPS 全元素扫描和窄谱扫描, 结果如图 2 所示。

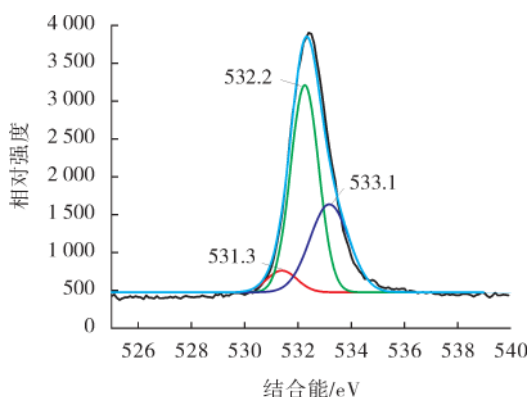
由图 2a 可知, 形成的硅烷膜中含有 Si、C、N、O 及 Fe 等元素, 其中的 Fe 元素很可能是来源于硅烷膜和钢板的化学键合^[6], 这一点可以从图 2b 中得到验证, 对 O 元素 XPS 窄谱图进行分峰拟合后得到了 531.3 eV、532.2 eV、533.1 eV 三个峰, 分别对应 Si—O—Fe、Si—O—Si 和 Si—OH, Si—O—Fe 的存在说明水解生成的 Si—OH 和钢板表面的—OH 发生了化学键合, 形成的 Si—O—Fe 键将硅烷膜和钢基材以强共价键形式结合起来^[6], 同时面积较大的 Si—O—Si 拟合峰说明硅烷膜中存在大量的 Si—O—Si 交联网络, Si—OH 的存在说明仍存在少量未缩合的 Si—OH。

硅烷 FT-IR 和 XPS 的结果表明双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷的成膜偶联过程符合 Arklest 提出的化学键合理论^[7], 主要过程如下: 1) 双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷、乙醇和去离子水配制成一定浓度的溶液后,

分子链两端硅原子相连的乙氧基遇水发生水解反应, 生成含 6 个 Si—OH 的硅醇分子链, 分子链中间的仲氨基不参与水解反应。其中, 乙醇的加入可以抑制硅醇的自缩合, 同时作为分散相促进硅烷和水的相溶性, 较大程度上提高了水解反应的效率^[1]。2) 硅醇溶液均匀涂刷于钢材表面后, 硅醇分子链上的羟基和钢材表面的活性羟基反应形成 Si—O—Fe 共价键。与此同时, 硅烷偶联剂之间的羟基还会进行缩合反应, 彼此互相交联形成硅氧烷分子网。待钢材表面硅烷溶液固化成膜后, 涂刷的环氧防腐涂料中的环氧基与硅烷分子链中保留的仲氨基发生固化交联反应, 从而实现环氧涂层与钢材间良好的界面结合。



a. 全元素 XPS 扫描图谱



b. O 元素 XPS 窄谱图

图 2 硅烷膜 XPS 扫描图谱

2.2 双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷浓度对涂层性能的影响

对完全干燥后的硅烷膜及涂层厚度进行测试, 硅烷膜厚度为 3~4 μm , 随硅烷浓度的增加略有增大; 环氧涂层厚度为 98~103 μm , 具体膜厚如表 2 所列。

对于有机涂层而言, 其耐蚀性能优劣在很大程度上取决于涂层与基体之间的界面结合强度以及涂层对腐蚀介质的屏蔽效果。涂层与基体间优异的界面结合

是整个涂层体系发挥优异性能的基础和前提,而涂层对腐蚀介质屏蔽效果则直接影响着有机涂层体系的服役寿命。因此本文对涂层体系附着力及海水浸泡 1 000 h 后的电化学性能进行了测试。

表 2 不同配比硅烷膜及环氧涂层厚度

编号	硅烷膜/ μm	环氧涂层/ μm
1-0 [#]		98
1 [#]	3.1	101
2 [#]	3.3	100
3 [#]	3.4	103
4 [#]	3.6	99
5 [#]	3.8	103

2.2.1 界面附着力

在本次研究中,采用拉拔法对 6 种经过不同浓度硅烷预处理环氧涂层体系界面附着力进行测试,并与未经预处理的涂层体系进行对比,试验结果如图 3 所示。

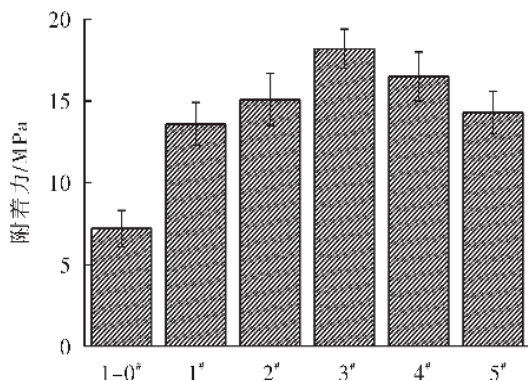


图 3 涂层附着力随硅烷预处理浓度的变化

由图 3 可知,未经过硅烷预处理的环氧涂层,其附着力数值显著偏低,在打磨钢板上的附着力仅达到 7.2 MPa。然而,经过预处理的环氧涂层附着力显著提升,数值均处于 13 MPa 以上,界面处破坏形式基本为涂层与底材的附着破坏。这一结果表明,硅烷偶联剂预处理对于提升环氧涂层与基材之间的附着力具有显著的效果,涂层附着力提升至原来的两倍左右。究其原因,主要源于偶联剂自身的特性和化学反应机制。具体而言,双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷在水解条件下生成的硅羟基(Si—OH)与钢材表面的活性羟基之间形成了稳固的 Si—O—Fe 化学键合作用。这种共价键合不仅强度高,而且耐久性强,极大地增强了涂层与基材间的结合力。与此同时,偶联剂分子中的仲氨基(NH)与

环氧树脂中的环氧基(CH(O)CH)发生了固化交联反应,进一步提升了涂层与硅烷膜之间的结合。反之,对于未经硅烷偶联剂预处理的涂层,其与基材之间的初始结合主要依赖于氢键等物理作用力,虽然这些相互作用在一定程度上有助于界面结合,但相比化学键合而言,其强度和耐久性显然逊色许多。

对比分析多种不同浓度的偶联剂配比方案后发现,随着偶联剂浓度进一步上升,涂层的附着力并非持续增强,而是达到一个峰值后开始下降,涂层附着力与偶联剂浓度之间的关系呈现出一种先增后减趋势。这主要是因为偶联剂在不同浓度下的水解能力有着显著的差异性。当偶联剂浓度过低时,其水解生成的硅羟基数量有限,无法充分与钢板表面的羟基发生有效键合,这意味着涂层体系中能够起到桥梁作用的活性分子数量不足,无法形成致密且牢固的界面层。然而,如果偶联剂浓度过高,情况也会变得不利,过量的硅烷在水中发生水解反应后,生成的大量硅羟基不仅无法进一步提高键合效率,反而可能引发自缩合现象^[8]。这种自缩合作用会导致溶液中出现明显的絮凝现象,不利于形成均匀、连续的硅烷膜结构,从而进一步导致界面处强度和耐蚀性降低。其中,当偶联剂浓度设定为 7.5% 时,涂层的附着力得到了最为显著的提升,达到 18.2 MPa,相较于未添加偶联剂的涂层,其附着力实现了 1.5 倍的提高。这意味着 7.5% 浓度下,偶联剂可以通过与钢板及涂层之间的化学反应,形成稳定且强度更高的界面层。

2.2.2 开路电位

开路电位作为衡量涂层腐蚀倾向的一个重要参数,其数值大小直接反映了涂层在特定环境条件下的腐蚀倾向性。在电化学腐蚀过程中,涂层的开路电位越负,意味着该涂层更倾向于发生电化学反应,即更容易遭受腐蚀;相反,开路电位越正,则表示涂层具有较强的环境稳定性和抵抗腐蚀的能力。因此,通过监测和分析涂层开路电位的变化,可以有效预测和评估涂层在不同时间段内可能发生的腐蚀风险。

对海水浸泡 1 000 h 后的环氧涂层体系进行了开路电位测试,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,在一定时间内,涂层的开路电位并未发生剧烈波动,而是保持在一个相对稳定的状态,这表明经过 1 000 h 海水浸泡,腐蚀介质尚未渗透到涂层到达基材表面,涂层体系未形成电化学腐蚀,仍具备良好的物理屏障作用。进一步对比不同浓度偶联剂处理涂层的开路电位,发现未经偶联剂处理的环氧涂层其开路电位大约在 -0.4 V,相较于经过偶联剂预处理的涂层表现出更负的电位值,具有较高的腐蚀倾向,这说

明偶联剂预处理能够明显提升低表面处理基材上涂层体系的整体屏蔽效果。同时,随着偶联剂浓度的增加,涂层的腐蚀电位呈现出先上升后下降的趋势,在偶联剂浓度为 7.5% 时达到最大值。此时,涂层的开路电位最正,腐蚀倾向最小,说明 7.5% 的硅烷水解浓度可形成较为均匀且紧密的 Si—O—Si 硅烷膜层,有效阻止腐蚀介质向基材的渗透,从而大大降低涂层的腐蚀倾向。

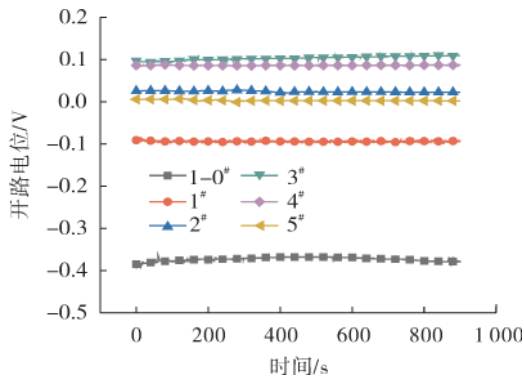


图 4 涂层开路电位随时间的变化

2.2.3 电化学阻抗

通过电化学阻抗谱(EIS)可以获得涂层在模拟腐蚀环境中的电化学行为动态信息,从而更准确地理解并优化涂层的防护机制。对海水浸泡 1 000 h 后的环氧涂层进行 EIS 测试,结果如图 5 所示。

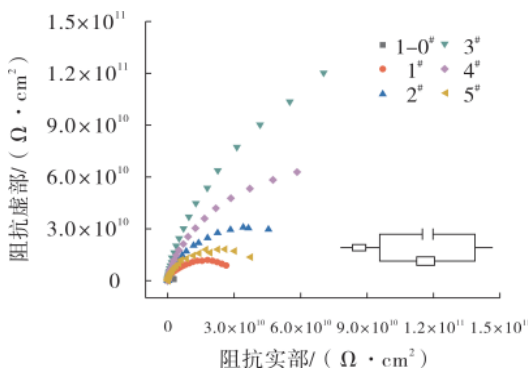


图 5 不同硅烷预处理浓度环氧涂层能奈斯特图

涂层的阻抗复平面图(奈斯特图)呈现出典型的单一容抗弧特征,这意味着所有涂层体系均表现出单一时间常数的行为。这种电路模型可用图中的等效电路图来阐释:在等效电路图中,涂层电容 QC 和涂层电阻 RC 以并联方式存在。当涂层阻抗值极高时,该涂层体系可近似为一个电阻与小电容并联的结构,其行为趋于纯电容特性。

对比分析不同偶联剂预处理浓度下的涂层阻抗模

值(图 6a),展现出一个明显的趋势:未经过偶联剂处理的涂层,其阻抗模值显著低于经过偶联剂处理的涂层;而经过适当浓度偶联剂处理的涂层,其阻抗模值提升了 1~2 个数量级。值得注意的是,随着偶联剂浓度在一定范围内的增加,涂层的阻抗值呈现先上升后下降的趋势。其中,经过 7.5% 浓度偶联剂处理的涂层表现出最高的阻抗值,达到了 10^{11} 数量级。这表明 7.5% 浓度偶联剂处理对涂层防腐性能提升效果最佳,不仅有效增强了涂层与钢板之间的结合强度,而且极大地提高了界面处的交联密度,使得涂层成为了一个更优良的腐蚀介质屏蔽层,大大降低了腐蚀介质渗透通过涂层的可能性。

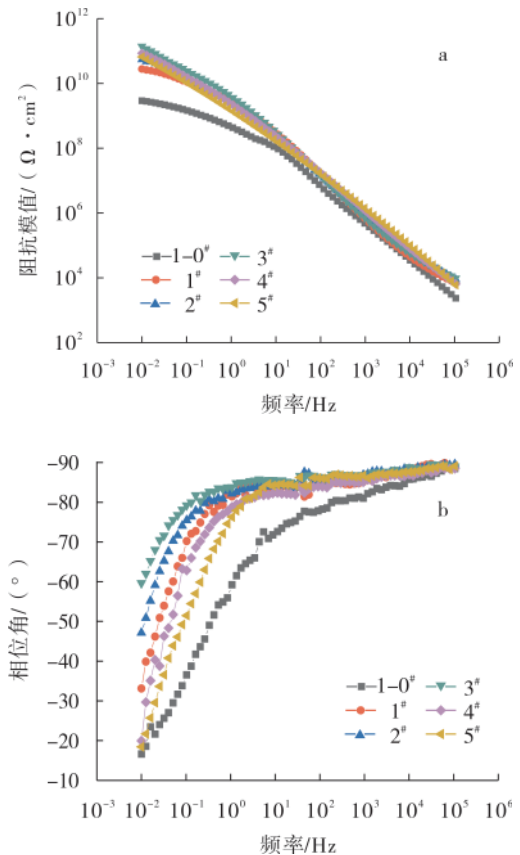


图 6 不同硅烷预处理浓度环氧涂层波特图

相位角的变化可以更好地印证偶联剂对涂层耐腐蚀性能的提升作用。从图 6b 中可以发现,经过偶联剂处理后的涂层相位角曲线表现出明显的上移现象,特别是在中高频区域,相位角趋于 -90° 的直线状态^[9],这表明此时的涂层具备大电阻和小电容的特性,电容和电阻值的大小可以反映涂层界面处的孔隙率状况,较小的电容值和较大的电阻值意味着涂层界面处空隙较小、致密程度更高。经过 1 000 h 海水浸泡,涂层仍具备优异的屏蔽性能,未出现大量腐蚀介质渗入基材而

发生腐蚀的现象。

3 结语

1) 本文利用双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷、乙醇及去离子水分别配置了6种不同浓度的硅烷偶联剂,通过FTIR和XPS对双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷水解前后及硅烷膜界面处的官能团的变化进行了分析:硅烷中与Si原子相连的乙氧基水解成Si—OH,通过化学键与钢材相连形成Si—O—Fe共价键;硅烷分子中的仲氨基与环氧涂料中的环氧基固化交联,从而实现环氧涂层-偶联剂-钢板之间的高强度界面结合。

2) 使用0~12.5%的6种不同浓度双-(3-三乙氧基硅丙基)硅烷溶液对St2低表面处理钢板进行预处理,并配套环氧涂层,通过性能对比得出,经过偶联剂预处理,环氧涂层与钢材界面附着力及耐腐蚀性能得到较大提升,随硅烷浓度的升高表现出先增大后减小的趋势,其中7.5%硅烷浓度的偶联剂溶液预处理效果最佳。

3) 相比于未预处理涂层体系,7.5%硅烷浓度的偶联剂溶液预处理涂层体系附着力提升1.5倍,达到18.2MPa;同时表现出更正的开路电位值,腐蚀倾向更小;海水浸泡1000h的环氧涂层体系仍表现为单一的容抗弧特征,具备优异的腐蚀介质屏蔽效果,其阻抗值达到 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。涂层体系界面附着力和耐蚀性提升的原因与双爪型硅烷水解生成的致密Si—O—Si网络结构及硅烷膜界面处Si—O—Fe强化学键密切相关。

参考文献:

- [1] 孙朝,裴彦军,张文学.低表面处理底漆配套富锌底漆带锈涂装综合性能研究[J].涂层与防护,2024,45(3):12-17.
- [2] 陈肖寒,白杨,王志超,等.低表面处理环氧防腐底漆的制备及其耐蚀性研究[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(5):1126-1132.
- [3] Brezoi D V. Anticorrosive polymeric coatings[J]. Sci Bull, 2022, 18(19):33-38.
- [4] 张焱琴,杨丽霞,谢鹏波.硅烷偶联剂在金属表面预处理中的应用研究进展[J].材料保护,2017,50(12):67-73.
- [5] Raghunathan V, Ayyappan V, Rangappa M S, et al. Development of fiber-reinforced polylactic acid filaments using untreated/silane-treated trichosanthes cucumerina fibers for additive manufacturing[J]. J Elastomers Plast, 2024, 56(3):277-292.
- [6] Zhang Q, Qi Z, Ma Y, et al. Evaluation of tribological properties of silane-treated rapeseed straw fiber reinforced friction polymer composites prepared by wet granulation[J]. Polym Compos, 2024, 45(4):3109-3119.
- [7] Liu W H, Hu C S, Zhang W W, et al. Improvement of UV-curable ink adhesion onto melamine faced board using dual silane treatments[J]. J Adhes, 2023, 99(7):1123-1141.
- [8] Salwa S N M, Fazly M P A, Mokhtar S M. Surface modification of bio-based composites via silane treatment: a short review[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(5):801-816.
- [9] Provost M, Raulin K, Maindron T, et al. Influence of silane coupling agent on the properties of UV curable SiO₂-PMMA hybrid nanocomposite[J]. J Sol-gel Sci Techn, 2019, 89(3):796-806.
- [10] Hung P D, Dung T N, Chinh T N, et al. Assessment of some characteristics, properties of a novel waterborne acrylic coating incorporated TiO₂ nanoparticles modified with silane coupling agent and Ag/Zn zeolite [J]. Prog Org Coat, 2022, 163:106641.
- [11] 刘佳,姚光晔.硅烷偶联剂的水解工艺研究[J].中国粉体技术,2014,20(4):60-63.
- [12] 赵玥,张瑞景,李和肖.硅烷偶联剂预处理对Q235钢表面聚偏氟乙烯涂层性能的影响[J].电镀与涂饰,2020,39(2):73-77.
- [13] Wei Y T, Gao S H, Sun W, et al. Anti-frosting and defrosting on photothermal superhydrophobic coatings based on silane hydrolysis and carbon nanotube doping [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236:121876.
- [14] Yao Q, Li Z, Qiu Z, et al. Corrosion resistance of Mg(OH)₂/MgAl-layered double hydroxide coatings on magnesium alloy AZ31: influence of hydrolysis degree of silane [J]. Rare Metals, 2019, 38(7):629-641.
- [15] 谢平波,史瑞雪.纳米TiO₂表面改性剂与分散溶剂的相容性研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(6):129-135.
- [16] 杨玉昌.金属表面硅烷膜的制备工艺优化及改性研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [17] Arkles B. Tailoring surfaces with silane[J]. Chemtech, 1997(7):766-768.
- [18] Yang L X, Liu M X, Lei X L, et al. Study on the adsorption behavior of γ -GPS on low carbon steel surfaces using RA-IR, EIS and AFM [J]. Applied Surface Science, 2011, 257:9895-9903.
- [19] 张鉴清,曹楚南.电化学阻抗谱方法研究评价有机涂层[J].腐蚀与防护,1998(3):99-104. ◆

