

狮子洋通道锚固系统复合防护体系研究

张颖雯¹, 王博^{2*}, 韩永胜², 李小松², 罗政军²

(1.广东湾区交通建设投资有限公司, 广州 510000; 2.中铁山桥集团有限公司, 河北 秦皇岛 066200)

摘要: 锚固系统作为悬索桥的主要受力部件, 其主缆等关键部件极易受周围恶劣环境的影响而发生腐蚀, 因而锚固系统复合防护体系具有极高的研究价值。本文通过专题试验研究模拟锚固系统在咸淡水交替作用海洋环境中的腐蚀机理, 系统研究了复合防护体系的黏结性、拉伸性、阻燃性及老化机理等, 验证了狮子洋通道锚固系统重防腐涂层+硫化型密封胶复合防护体系材料的科学性, 方案的合理性, 为狮子洋通道项目锚固系统耐久性设计提供了可靠的理论依据。

关键词: 悬索桥; 锚固系统; 腐蚀; 复合防护体系

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)08-0017-05

Research on the Composite Protection System of the Anchoring System of the Shiziyang Channel

ZHANG Ying-wen¹, WANG Bo^{2*}, HAN Yong-sheng², LI Xiao-song², LUO Zheng-jun²

(1. Guangdong Bay Area Transportation Construction Investment Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. China Railway Shanhaiguan Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066200, Hebei, China)

Abstract: As the main stressed component of the suspension bridge, the anchoring system and other key components such as the main cable are very susceptible to corrosion due to the influence of the surrounding harsh environment, so the composite protection system of the anchoring system has high research value. In this paper, the corrosion mechanism of the simulated anchoring system in the marine environment of alternating brackish and fresh water is studied through special experiments, and the adhesion, tensility, flame retardancy and aging mechanism of the composite protection system are systematically studied, and the scientificity and rationality of the scheme of the composite protection system of heavy anti-corrosion coating + vulcanized sealant of the Shiziyang channel anchoring system are verified, which provides a reliable theoretical basis for the durability design of the anchoring system of the Shiziyang channel project.

Key words: suspension bridges; anchoring systems; corrosion; composite protection systems

0 引言

悬索桥主缆拉力通过其锚固系统传递到锚体上, 锚固系统承受索股的拉力, 将其合理地分散到锚体上,

收稿日期: 2024-09-09

作者简介: 张颖雯(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事大跨径悬索桥施工关键技术、高性能钢结构制造技术、高强度、耐腐蚀、耐疲劳等新型钢材的研发及其在悬索桥关键构件中的应用工作。E-mail: evazhangabc@sina.com。

*通信作者: 王博(1993—), 男, 本科, 工程师, 主要从事钢结构涂装管理及研究工作。E-mail: 1257968562@qq.com。

保证不对锚体造成破坏^[1]。锚固系统主要结构为后锚梁和锚杆, 通过锚杆将主缆与锚体连接起来。锚杆是悬索桥锚固系统关键受力构件之一, 桥梁服役期间不可检查和更换, 其耐久性是桥梁设计寿命的重要支撑^[2-3]。锚杆的隔离防护方案是保证其不受腐蚀的关键, 狮子洋通道锚固系统钢材表面采用重防腐油漆涂装、锚杆预埋部分采用 4 mm 硫化型防腐密封胶包裹, 考虑一定的钢板腐蚀裕量作为储备措施, 提高锚固系统的耐久性。

1 狮子洋通道项目锚固系统隔离防护方案

1.1 常见的复合隔离防护技术

常见的油漆防腐、电弧喷涂+油漆复合涂层等都

因存在孔隙及使用寿命有限等具有一定的局限性^[4],PEF 发泡材料由于水汽透过率较大,起到的也只是简单的隔离作用。上述材料随着时间推移会逐渐老化、开裂,无法长期有效隔绝外界腐蚀介质。

现阶段,悬索桥主缆锚固材料大多采用型钢锚杆,而钢材本身具有良好的导热性能,因此对温度极为敏感,尤其当外界环境温度达到 300 ℃时,钢材的弹性模量等力学指标将大幅度削弱,严重威胁结构的安全。所以锚杆的隔离防护措施需要同时满足隔离防护和阻燃性能。大体积混凝土产生孔隙、微小裂纹等是不可避免的,水汽等外界的腐蚀介质会通过此通道腐蚀到基材。同时,随着桥梁架设主缆的拉力会逐步提升,导致锚体混凝土受拉开裂。因此,需要选择的隔离防护材料还需要满足无黏结(有足够的伸长率)要求。从油毛毡^[9]到 PEF 发泡材料,再到最近使用硫化型密封胶耐久性得到不断改善。现阶段国内锚杆隔离防护方案主要有油毛毡或 PEF 发泡棉、橡胶条+钢板、硫化型橡胶密封+PEF 材料、4 mm 硫化型橡胶密封胶包裹等 4 种方案。

1.2 狮子洋通道锚固系统复核隔离防护体系

狮子洋通道属于滨海或者近海环境,桥梁面临咸淡水交替作用,尤其是地下水丰富而且水中腐蚀介质复杂,服役环境恶劣,加之长期大荷载作用,锚固系统极易发生腐蚀,导致受力发生变化,进而威胁到整个桥梁的安全运行,同时前后锚杆采用铆接方式连接,施工过程中存在局部火灾燃烧风险。针对上述存在的问题,须对狮子洋的锚杆隔离防护方案—重防腐涂层+硫化型密封胶复合防护体系的配套性以及锚杆隔离防护材料选择的合理性进行专题研究,为锚杆防腐隔离工艺及材料性能指标的最终确定提供技术支撑。

2 复合防护体系之间的配套性研究

2.1 涂料涂层与硫化型密封胶的黏结性研究

2.1.1 试验目的

揭示硫化型密封胶与防腐涂层的黏结性能老化机理;验证硫化型密封胶在海水、海水位变动区的防腐效果。

2.1.2 试验设计

试验设置空白对照组,在轴心受力(偏心受力)、试验环境为浸泡(干湿交替)的情况下分别持续 20 h、40 h、60 h(400、800、1 200 次)进行老化试验。

2.1.3 试验流程

1)涂装完油漆的钢板表面涂 4 mm 厚硫化型密封胶,采用设计好的聚四氟乙烯模具,制作的硫化型密封胶试件表面要求光滑平整。

2)使用反力架施加荷载,通过千斤顶加载,加载值由压力传感器监控。

3)完成反力架加载后,对反力架上重点位置的螺栓、螺栓孔、螺杆等关键连接处进行保护,防止腐蚀过程中因连接处损坏导致试验失败。将反力架放入循环箱时,用吊带吊起,减轻对箱底的压力。

2.1.4 试验结果

1)所有试件的破坏模式均为密封胶内聚破坏,表明密封胶与防腐涂层之间的黏结力大于密封胶自身内聚力,密封胶自身内聚力决定了试件的剥离强度。

2)所有密封胶与钢板表面油漆的剥离强度均大于 3.0 kN/m。

3)老化初期,腐蚀介质未侵蚀密封胶与油漆界面,不影响黏结强度^[9]。浸泡 480 h 和干湿循环 400 次,剥离荷载不变。老化后期浸泡 1 440 h 和干湿循环 1 200 次,密封胶剥离强度下降约 10.9%。

2.2 混凝土-硫化型密封胶-锚杆组合体系老化试验

2.2.1 试验目的

揭示混凝土-硫化型密封胶-锚杆组合体系在海水、海水位变动区的协同作用机理,验证包裹硫化型密封胶的锚杆表面与混凝土之间的隔离保护效果。

2.2.2 试验设计

试验设置空白对照组,对应力钢板(偏心应力钢板)在浸泡(干湿交替)条件下分别进行 20 h、40 h、60 h(400、800、1 200 次)的老化试验。

2.2.3 试验流程

1)涂装重防腐油漆涂层的钢板表面涂 4 mm 厚硫化型密封胶。

2)切割模具,固定试件与混凝土之间的相对位置,便于后续混凝土浇筑、养护、拆模等过程。

3)浇筑混凝土,养护,脱模。

4)完成反力架加载后,对反力架上重点螺栓、螺栓孔、螺杆等关键连接处保护,防止腐蚀过程中因连接处损坏导致试验失败。将反力架放入循环箱时,用吊带吊起,减轻对箱底的压力。

5)在循环箱完成循环后,采用 MTS 拉伸试验机对试件进行拉拔试验。

2.2.4 试验结果分析

1)试件分为弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段、滑移阶段 4 个破坏阶段。

2)偏心受力更加不利,黏结强度至少增加 18.5%。

3)拉拔试验后混凝土内表面及密封胶表面较光滑,均无明显破坏。偏心受力方式试件破坏较为严重,部分受力混凝土边缘被破坏。

4)密封胶与混凝土界面黏结荷载均小于 1.0 kN,黏结强度均小于 35 kN/m²,密封胶与混凝土之间的无黏结效果好。

3 硫化型密封胶拉伸性能老化试验

3.1 试验目的

揭示硫化型密封胶在海水、海水位变动区的拉伸强度和伸长率的演化规律；理清硫化型密封胶的老化产物及其对锚杆腐蚀环境的影响程度。

3.2 试验设计

长期浸泡试验和干湿循环试验均在 5%NaCl 溶液中进行,溶液温度为 60 ℃^[7],选用哑铃状试件,设置空白对照试件,平行试件数量为每组 3 块,共 7 组,对试件在浸泡(干湿交替)环境下腐蚀 480 h、960 h、1 440 h(400、800、1 200 次)。

3.3 试验结果

进行了硫化型密封胶的老化试验(干湿交替和长期浸泡)以及拉伸性能试验,研究了密封胶的拉伸强度和伸长率演化规律。

3.3.1 扫描电镜研究

以对照组和最大腐蚀龄期的密封胶为例,利用扫描电镜得到密封胶的断口扫描结果,如图 1 所示。

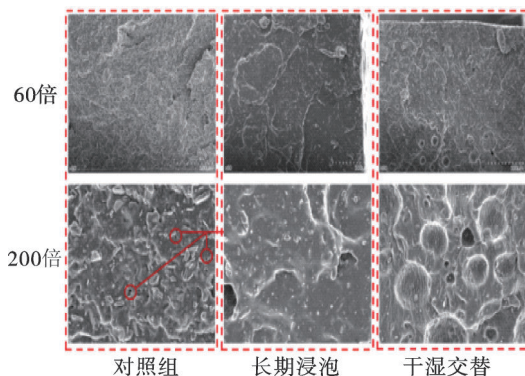


图 1 断面电镜扫描结果

通过图 1 可以看出,未老化试件断面有少量孔洞,可能是由于固化时放出的低分子醇类物质挥发或是水分蒸发造成。1 440 h 浸泡试件的断面孔洞数量无显著增加,孔洞直径变大。可能是在水分和温度的双重作用下,易于对固化时形成的孔洞造成腐蚀,导致孔洞直径增大。1 200 次干湿循环试件断面孔洞数量及直径均变大。干湿循环老化条件对密封胶的内部微观组织影响最大,势必影响其力学性能,浸泡条件影响次之。

3.3.2 拉伸强度和伸长率演化规律

通过试验结果可以得出:

- 1)随着老化龄期增加,密封胶的拉伸强度下降显著。例如浸泡 1 440 h,拉伸强度最大下降了 28.3%。
- 2)随着老化龄期增加,密封胶伸长率逐渐下降,例如干湿循环 1 200 次,伸长率为 569.67%,下降了 13.0%,低于要求的 600%。

4 重防腐油漆涂装钢板耐老化试验

4.1 试验目的

揭示涂装重防腐油漆的钢板腐蚀机理及腐蚀行为;验证重防腐油漆涂装在海水、海水位变动区的防腐效果^[8]。

4.2 试验设计

重防腐油漆涂装钢板耐老化试验设置空白对照组,每组平行试件数量 2 块,共 7 组,在浸泡(干湿交替)环境下老化 480 h、960 h、1 440 h(400、800、1 200 次)。

4.3 试验结果

在试验过程中,我们测定了重防腐油漆涂装钢板在浸泡(干湿交替)环境下老化 480 h、960 h、1 440 h(400、800、1 200 次)的开路电位并进行了极化曲线和交流阻抗谱分析,得出以下试验结果:

- 1)试件的开路电位均为正值,主要由于金属试件表面的防腐油漆较厚,防护性能好。
- 2)腐蚀龄期增加,极化曲线出现向右上角移动的趋势,说明腐蚀电位逐步下降,电流(自腐蚀)密度逐步增大,油漆涂层开始发生腐蚀。
- 3)开路电位和塔菲尔极化曲线表明防腐涂层仍具有完全的保护作用。自腐蚀电流密度最大为 0.38 nA/cm²,远远小于裸钢自腐蚀电流密度(0.01~1 mA/cm²)。
- 4)通过涂层的交流阻抗谱分析得出涂层电阻最小为 5.97×10⁹ Ω·cm²,远大于裸钢电阻 10⁷ Ω·cm²,表明涂层有防护能力,满足构件对于腐蚀防护的需要。

5 硫化型密封胶火灾风险分析

5.1 密封胶燃烧值测定试验

准确称量阻燃和非阻燃密封胶样品,确保两者均由组分 A 和 B 按照 13:1 的比例混合,分别涂抹两种密封胶在橡胶板材上,控制涂层厚度约为 0.2 mm。固化完成后将其从橡胶板材上取下,并将样品粉碎成细小颗粒状,将其打包送检测定燃烧值。阻燃密封胶的热值为 14 802.08 J/g,非阻燃密封胶的热值为 15 009.46 J/g,同时查得燃点、燃烧速率、比热容、导热系数,见表 1 所列。

表 1 密封胶热值、燃点、燃烧速率、比热容、导热系数

材料	热值/(J·g ⁻¹)	热释放速率/kW	燃点/℃	质量燃烧速率/(g·s ⁻¹)	比热容/(J·(g·K) ⁻¹)	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)
非阻燃密封胶	14 802.08	897	200	0.664	1.0	0.1
阻燃密封胶	15 009.46	688	300	0.664	1.5	0.3

5.2 密封胶燃烧参数-敏感度分析

模型网格尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm，在参数分析的模拟中，只分析燃烧的前半段时间，该时间段火焰主要在火源这一侧的腹板，锚杆的另一侧基本不受影响，因此只用了半边锚杆截面的模型。燃点参数分析如图 2 所示。

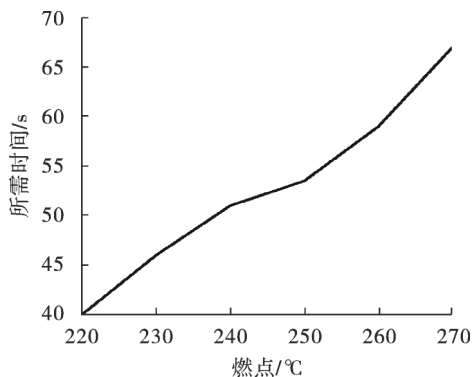


图 2 火焰蔓延至顶板所需时间

5.3 导热系数分析

导热系数分析模型如图 3 所示，模型均在第 25 s 前熄灭，火焰未扩散至顶板。

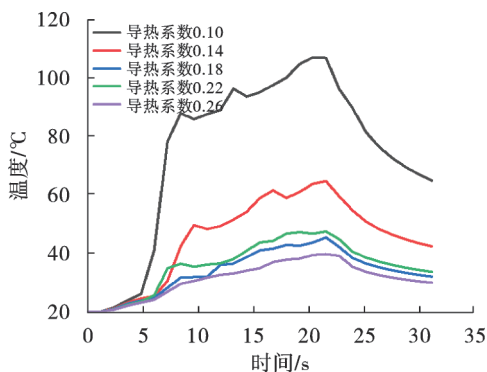


图 3 不同导热系数密封胶表面温度曲线

5.4 比热容分析

比热容分析模型如图 4 所示。

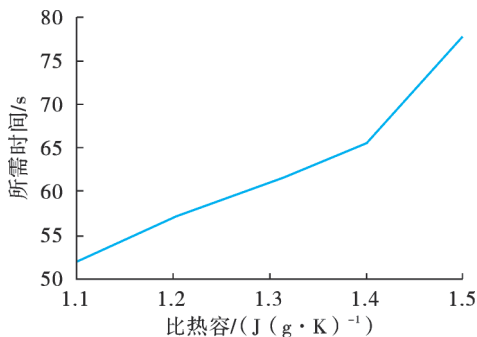


图 4 火焰蔓延至顶板所需时间

分析上述参数得出：

1) 腹板最高温度随着密封胶导热系数增大而减小，但到达温度峰值的时间点基本不变。

2) 随着密封胶燃点和比热容提高，腹板温度达到最大的时间点也相应延后，而且火焰的扩散速度也显著减慢。

3) 当燃点大于 280 °C、导热系数大于 0.26 W/(m·K)、比热容大于 1.0 J/(g·K)，火焰能够自然熄灭。

因此为了达到更好的阻燃效果，建议用于使用的阻燃密封胶燃点大于 280 °C、导热系数大于 0.26 W/(m·K)、比热容大于 1.0 J/(g·K)。

5.5 密封胶可燃性分析

5.5.1 非阻燃密封胶模型 1

锚杆截面尺寸为单束锚杆，长度为 1 m，网格尺寸 5 mm×5 mm×4 mm，非阻燃密封胶 4 mm，非阻燃密封胶热学参数参考表 1，密封胶热边界为辐射和热对流导热，周围自然通风，风速为 0，各测点温度如图 5 所示。

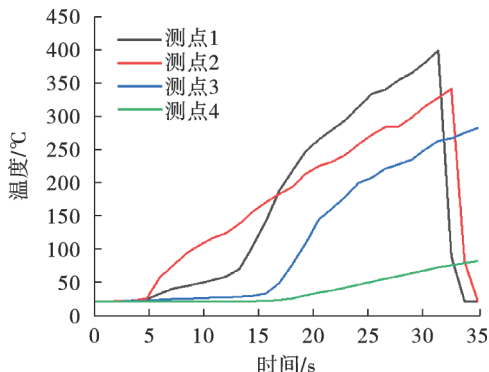


图 5 各测点温度

5.5.2 阻燃密封胶模型 2

锚杆截面尺寸为单束锚杆，长度为 1 m，网格尺寸 5 mm×5 mm×4 mm，阻燃密封胶 4 mm，阻燃密封胶热学参数参考表 1，密封胶热边界为辐射和热对流导热，周围自然通风，风速为 0，各测点温度如图 6 所示。

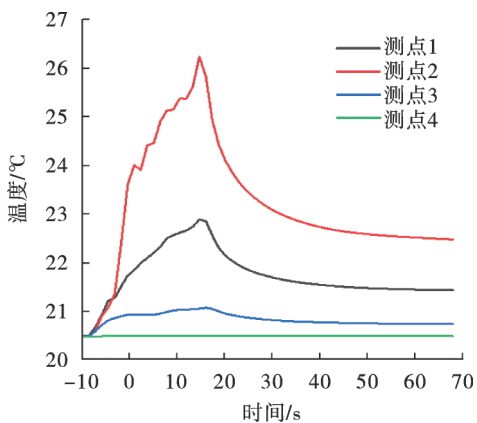


图 6 各测点温度

5.5.3 可燃性分析结果

非阻燃和阻燃密封胶仿真分析可得:使用非阻燃密封胶时,点燃后火焰迅速扩散,不可控制,直到所有密封胶被燃尽才能熄灭,锚杆表面温度可达 900 ℃,钢材力学性能严重下降;使用阻燃密封胶时,点燃后火焰扩散范围小,只有周围的一小部分密封胶被燃尽,22 s 后自然熄灭,空气和锚杆温度都不超过 40 ℃,不会引起大范围火灾和锚杆受力性能劣化。

5.6 锚杆间火焰扩散分析

5.6.1 非阻燃密封胶模型 3

上下两根锚杆均为单束锚杆,长度为 1 m,锚杆间的最小间距为 270 mm,表面为 4 mm 的非阻燃密封胶,网格尺寸为 5 mm×5 mm×4 mm。计算区域只有上方开口,风速为 0,密封胶表面热边界为辐射和热对流导热,测点温度曲线如图 7 所示。

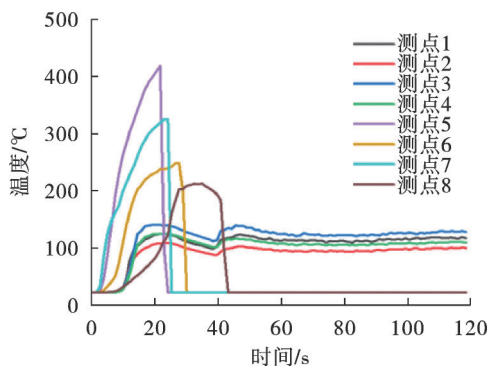


图 7 非阻燃密封胶模型测点温度曲线

5.6.2 阻燃密封胶模型 4

上下两根锚杆均为单束锚杆,长度为 1 m,锚杆间的最小间距为 270 mm,表面为 4 mm 的阻燃密封胶,网格尺寸为 5 mm×5 mm×4 mm。计算区域只有上方开口,风速为 0,密封胶表面热边界为辐射和热对流导热,测点温度曲线如图 8 所示。

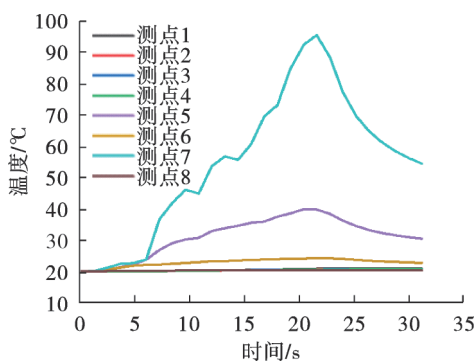


图 8 阻燃密封胶模型测点温度曲线

5.6.3 火焰扩散分析结果

由非阻燃和阻燃密封胶的双锚杆仿真分析可得:

使用非阻燃密封胶时,点燃后火焰迅速扩散,不可控制,第 20 s 时,上方锚杆被下方锚杆点燃,直到所有密封胶被燃尽才能熄灭,锚杆表面温度可达 700 ℃,钢材力学性能严重下降。使用阻燃密封胶时,点燃后火焰扩散范围小,只有周围的少部分密封胶被燃尽,25 s 后自然熄灭,空气和锚杆温度都不超过 120 ℃,不会引起大范围火灾和锚杆受力性能的劣化。

5.7 锚杆重防腐涂层热影响区分析

对锚杆接头位置进行模拟燃烧,分析可知当涂层距离锚杆端点大于 1.35 m 时,受到的最高温度不超过 80 ℃。复合涂层中的环氧富锌能耐温度 240 ℃,涂料加热烘烤温度为 80 ℃,保守考虑锚杆温度不超过 80 ℃时,对涂层性能没有影响^[9],因此可得出以下结论:

1)密封胶的选取:建议采用阻燃密封胶,阻燃密封胶可以减小密封胶被点燃的风险,限制火焰扩散速度,控制火灾规模,有效延缓锚杆的升温速度和减小温度峰值。

2)阻燃密封胶的覆盖范围:建议在锚杆全部表面覆盖密封胶。使用阻燃密封胶可以有效延缓锚杆升温速度和减小温度峰值,也可以让火焰扩散更慢,且自然熄灭。可以有效防止施工期间由于交叉施工等原因导致密封胶被点燃,并且控制密封胶被点燃后的火灾规模。

3)锚杆涂层出厂前涂抹范围:建议出厂前锚杆的涂层覆盖范围保留 1.35 m 以上的空白区域,防止铆钉的高温影响涂层性能。

6 结语

1)密封胶与钢板黏结性能老化:密封胶与防腐涂层之间的黏结力大于密封胶自身内聚力。密封胶与钢板表面油漆的剥离强度均大于 3.0 kN/m,浸泡 1 440 h 和干湿循环 1 200 次,密封胶的剥离强度下降约 10.9%。

2)密封胶隔离防护性能:拉拔试验后混凝土内表面及密封胶表面较光滑,均无明显破坏。偏心受力方式影响试件破坏形态,比如受压侧混凝土边缘部分被压碎。密封胶与混凝土界面黏结荷载均小于 1.0 kN,黏结强度均小于 35 kN/m²,密封胶与混凝土之间的无黏结效果好。

3)密封胶老化性能:随着老化龄期增加,密封胶伸长率和拉伸强度逐渐下降。干湿循环 1 200 次后密封胶伸长率和拉伸强度为 569.67%和 0.786 MPa,分别下降 13.0%和 21.24%,略低于要求的 600%。

4)涂层耐老化性能:防腐蚀涂层具有保护作用,其中自腐蚀电流密度最大为 0.38 nA/cm²,远小于裸钢的自腐蚀电流密度(0.01~1 mA/cm²)。涂层电阻最小为 5.97×10⁹ Ω·cm²,远大于裸钢电阻 10⁷ Ω·cm²。

5)密封胶选取:建议采用阻燃密封(下转第 45 页)