



表面涂层对海工混凝土长期防护效果及 结构寿命影响分析*

刘二利¹, 杨海成^{2,3}

(1. 招商局港口集团股份有限公司, 广东 深圳 518067; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
3. 海洋基础设施长期性能交通运输行业野外观测研究基地, 广东 广州 510230)

摘要: 通过长期暴露试验和工程调查, 研究了表面涂层对海工混凝土结构长期防护效果, 并定量评估涂层对混凝土结构服役寿命的影响。研究表明: 涂层可以有效隔绝氯离子侵入, 显著提高混凝土结构服役寿命, 且采用环氧沥青+氯化橡胶面层的涂层体系具有更优的抗老化性能, 但因实际服役结构受上部作业荷载、复杂涂装施工环境等影响, 实体结构中氯离子浓度要显著大于暴露试验。实际服役环境下涂层结构随服役时间的延长, 表面氯离子浓度逐渐增大, 且表面氯离子浓度随服役时间符合线性函数模型($C_s=kt$)。考虑涂层对混凝土表面氯离子浓度时变特性的影响, 建立了采用涂层的混凝土结构耐久性寿命定量评估方法。

关键词: 表面涂层; 海工混凝土结构; 防护效果; 耐久性寿命; 定量评估

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0029-07

Influence of surface coating on long-term protective effect and structural life of marine concrete

LIU Erli¹, YANG Haicheng^{2,3}

(1. China Merchants Port Group Co., Ltd., Shenzhen, 518067, China;

2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

3. Observation and Research Base of Transport Industry of Long-term Performances of Marine Infrastructure, Guangzhou 510230, China)

Abstract: Through long-term exposure test and engineering investigation, the long-term protective effect of surface coating on marine concrete structure is studied, and the influence of coating on service life of concrete structure is quantitatively evaluated. The research shows that the coating can effectively isolate chloride ion intrusion, significantly improve the service life of concrete structures, and the coating system using epoxy asphalt and chlorinated rubber surface layer has better anti-aging performance. However, due to the influence of the actual service structure by working load and complex painting construction environment, the chloride ion concentration in the engineering structure is significantly higher than that exposure test. In the actual service environment, the surface chloride ion concentration increases gradually with the extension of service time, and the surface chloride ion concentration conforms to the linear function model with service time($C_s=kt$). Considering the effect of coating on the time-varying characteristics of chloride ion concentration on concrete surface, a quantitative evaluation method for durability life of coated concrete structures is established.

Keywords: surface coating; marine concrete structure; protective effect; durability life; quantitative evaluation

我国是沿海交通基础设施大国, 沿海基础设施所处环境恶劣, 腐蚀问题严峻^[1-2]。国内最早于

20世纪80年代通过现场暴露试验启动了混凝土涂层防护技术的研究工作, 并在海港工程中率先将

收稿日期: 2024-10-07

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2603000); 广东省重点领域研发计划项目(2019B111106002)

作者简介: 刘二利(1978—), 男, 高级工程师, 从事海港码头工程建设管理及技术研究等工作。

表面涂层作为提升结构耐久性的重要附加防腐措施^[3]。工程实践证明,表面涂层可以有效隔绝环境中的有害介质侵入,对于提高结构耐久性、延长结构的使用寿命发挥了重要作用^[4-5]。受限于复杂的材料组分、环境作用及荷载作用等因素影响,工程材料的长期劣化机制与对结构长期服役寿命的影响机理极为复杂,而当前多数研究者基于室内快速试验表征表面涂层对混凝土结构的防护效果,尚无法真实反映实际服役环境下表面涂层对混凝土结构防护效果的影响。此外,海水中氯离子在混凝土结构中的传输机制已基本清晰,并建立了基于氯离子传输的混凝土结构寿命预测模型,在我国海港码头、跨海桥梁等交通基础设施工程中得到应用。当前,表面涂层虽然保护效果有目共睹,但缺乏实际保护效果的评价研究,保护效果缺乏定量的评价标准,国内外在工程耐久性设计时,都是在混凝土结构本身满足设计使用年限的前提下,作为进一步提高耐久性的预留措施^[6]。随着混凝土结构耐久性技术水平发展,耐久性定量设计越来越受重视,需要准确

掌握表面涂层的保护效果和对结构使用寿命的影响。本文在长期暴露试验和工程调查的基础上,总结分析了表面涂层的长期保护效果,并探讨其对延长结构耐久性寿命的影响,以期将来完善标准中耐久性定量设计提供依据。

1 暴露试验与工程调查

1.1 暴露试验

在华南湛江港暴露试验站开展表面涂层材料的长期暴露试验。湛江港常年气温较高,极端最高气温达 37.7 ℃,年平均气温达 23.5 ℃,相对湿度为 85%,海水中氯离子含量约为 1.4%~1.6%,是典型的高温高湿亚热带气候。按一定的配合比进行混凝土成型 150 mm×150 mm×150 mm 混凝土试件,经标准养护 28 d 后,对混凝土试件表面进行涂层涂覆处理,开展长期暴露试验至预定的龄期取回,实验室开展相关性能测试,其中包含混凝土氯离子含量的测试;首先打磨去除涂层,然后沿不同深度取粉,并采用酸溶法测试总氯离子含量。

表 1 涂层暴露试件情况

Tab. 1 Condition of specimens with exposed coating

| 暴露样品类型 | 防腐材料的性能 | 暴露位置 | 放置年份 | 取样测试龄期/a | 备注 |
|--------|--|------|------|-----------|-------|
| 涂层暴露试件 | 涂料为 H801 环氧漆、H801 环氧漆+753 氯化橡胶面漆、199 环氧沥青漆+643 环氧沥青漆、EPA78 环氧沥青漆+EPA79 环氧沥青漆等涂层配套体系,厚度为 200~300 μm | 浪溅区 | 1987 | 6、9、19、24 | 普通混凝土 |

1.2 工程调查

选取湛江港一区北、一区南及霞海作业区 3 个实施了涂层保护的高桩码头进行调查,其中一区北、一区南是我国较早采用涂层防腐措施的海港工程,其涂层配套体系、服役时间等相关信

息见表 2。现场观察涂层外观情况及构件有无腐蚀破坏,并在构件上选取有代表性的部位钻芯,封存运回实验室后打磨去除涂层,然后沿不同深度取粉,采用酸溶法测试总氯离子含量。

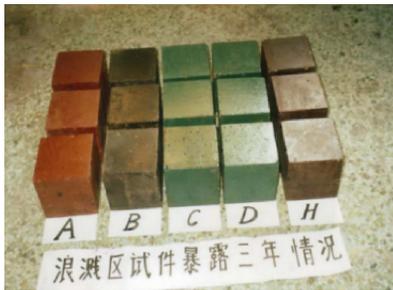
表 2 涂层工程的基本调查信息

Tab. 2 Basic information of coating engineering

| 工程名称 | 涂层配套的性能 | 涂层使用位置 | 码头建成年份 | 检测时服役年限/a |
|-------------|---|----------|--------|-----------|
| 湛江港一区北码头 | 采用 H801 环氧漆+753 氯化橡胶面漆,复合涂层干膜厚度约为 250 μm | 横梁、纵梁、面板 | 1986 | 5、19 |
| 湛江港一区南码头 | EPA78 环氧沥青底漆+EPA 环氧沥青面漆组成的涂层系统,涂层厚度为 250~300 μm | 横梁、纵梁、面板 | 1993 | 12 |
| 霞海作业区高桩梁板码头 | 采用湿固化重防腐涂料 SW-012,涂层厚度为 200~250 μm | 横梁、纵梁、面板 | 1996 | 9 |

2 暴露试验结果分析

在3、6、9、19 a 龄期时不同配套体系的涂层外观见图1, 涂层外观颜色变化较小, 涂层漆膜完好, 与混凝土黏结牢固, 无开裂、剥落等情况。特别是 H801 环氧漆+753 氯化橡胶面漆的涂层体系经过了 19 a 龄期仍无变色和粉化; H801 环氧漆则在 9 a 时有轻度失光变色, 但无粉化, 199 环氧沥青漆+643 环氧沥青漆、EPA78 环氧沥青漆+EPA79 环氧沥青漆有中度失光变色。外观检查表明, 753 氯化橡胶面漆有一定的耐候性, 环氧类涂料的耐候性相对稍差。



a) 暴露3 a龄期



b) 暴露6 a龄期



c) 暴露9 a龄期



d) 暴露19 a龄期

图1 涂层的外观质量

Fig. 1 Appearance quality of coating

暴露6、9、19、24 a 时涂层的黏结力见图2, 环氧沥青类涂层在6~9 a 暴露龄期时, 相比初始黏结力, 涂层黏结力已呈现一定程度的降低, 6 和 9 a 时涂层黏结力分别降低了约 30%、40%, 但仍然能够满足 JTS153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》^[7]中涂层黏结强度不小于 1.5 MPa 的规定。上述结果与涂层外观的变化趋势一致, 进一步说明环氧沥青类涂料耐老化性能不足。H801 环氧漆+753 氯化橡胶面漆在暴露 19 a 时涂层黏结力仍高达 2.25 MPa, 相比涂层初始黏结力无显著降低, 但随暴露时间的进一步延长, 在暴露 24 a 时黏结力快速降低到 0.8 MPa, 已不满足我国相关规范的要求。

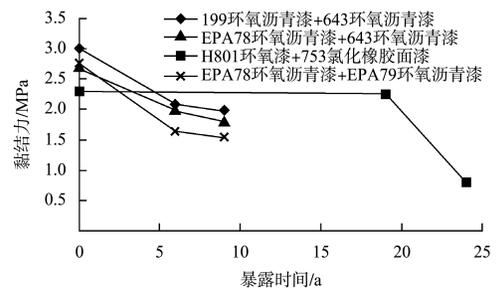


图2 涂层黏结力随时间的变化

Fig. 2 Variation of coating adhesion over time

在暴露3、6、19、24 a 时, 对 H801 环氧漆+753 氯化橡胶面漆的涂层体系抗氯离子渗透性进行了跟踪观测, 见图3。在暴露 19 a 前, 涂层体系具

有优良的抗氯离子渗透性能，表层 1~2 mm 处混凝土中氯离子浓度约 0.02%~0.03%，相比空白混凝土 6 a 时氯离子浓度已高达 0.29%，降低了 1 个量级，可见涂层在无失效的情况下，对氯离子侵入混凝土有明显的抵制作用。随着时间的延长、涂层体系的不断老化与失效，在暴露 24 a 时，氯离子浓度值快速增加，1~2 mm 处的混凝土氯离子浓度达到 0.12%，并且氯离子渗透深度已经超过 10 mm (初始氯离子浓度为 0.005%)，但对比空白混凝土，在 6 a 时空白混凝土氯离子渗透深度已超过 40 mm，进一步说明涂层对海洋环境下结构抗氯离子侵蚀性能具有良好的防护效果。

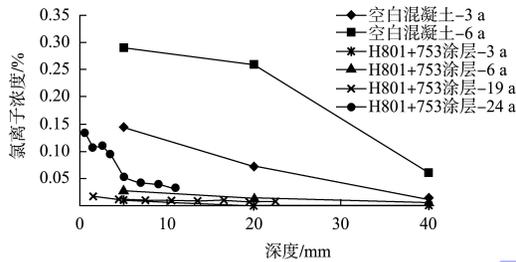


图 3 涂层混凝土抗氯离子侵蚀性能

Fig. 3 Chloride ion erosion resistance of coated concrete

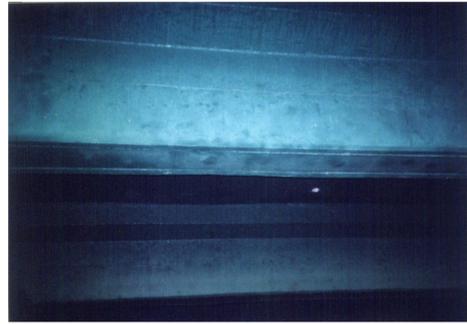
3 工程调查结果分析

3.1 码头结构外观检查

北码头涂层服役 19 a 时外观见图 4，总体来看，涂层外观颜色变化较小，大部份涂层漆膜完好，黏结牢固，涂层无粉化、开裂；码头大多数混凝土构件未发现钢筋腐蚀迹象，对照同期建成的相邻码头(没有进行涂层防腐处理)，可以观察到大部份构件有明显的钢筋腐蚀开裂、表面渗出锈水现象。



a) 没有涂层防腐的混凝土外观



b) 北码头涂层混凝土外观

图 4 北码头涂层外观

Fig. 4 Coating appearance for north wharf

南码头涂层服役 12 a 时外观见图 5a)，涂层的外观颜色略有变浅，靠近码头前沿受阳光照射部位涂层表面轻度粉化，涂层漆膜基本完好，涂层无开裂、脱落现象。相比湛江港一区北码头采用氯化橡胶面漆的涂层，采用 EPA78 环氧沥青底漆+EPA 环氧沥青面漆的涂层体系抗老化性能稍差。霞海码头涂层服役 9 a 时外观见图 5b)，涂层外观颜色略有变浅，涂层有轻度失光变色现象，涂层对混凝土结构的保护效果良好，未见钢筋出现腐蚀迹象。



a) 南码头



b) 霞海码头

图 5 码头涂层防腐外观现状

Fig. 5 Current situation of anti-corrosion coating appearance for wharf

3.2 涂层混凝土中氯离子浓度分布

考虑到湛江港一区北码头、南码头和霞海作业区码头基本在 90 年代前后建设,采用混凝土及涂层体系基本一致,为此利用 3 个码头横梁构件检测数据开展对比分析。涂层混凝土构件氯离子浓度分布见图 6,北码头服役 19 a 时混凝土内部氯离子浓度已经达到一个较高的范围,而使用 12 a 南码头和 9 a 的霞海作业区码头,涂层混凝土中氯离子浓度也达到了较高的范围,且随工程服役时间的延长,混凝土氯离子含量逐渐增大。但相比同时期、相邻结构段未涂装码头横梁构件,在 5 a 服役时间构件混凝土中氯离子浓度要显著大于同服役时间的涂层混凝土构件,且超过了服役 19 a 的涂层混凝土构件,说明涂层显著提高混凝土结构抗氯离子渗透性能。

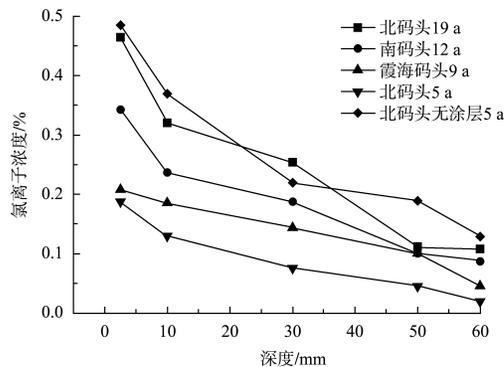


图 6 码头结构混凝土氯离子浓度分布

Fig. 6 Chloride ion concentration distribution in concrete of wharf structure

相比同时期采用相同涂层体系的暴露试验,码头实体结构中混凝土氯离子浓度要显著大于暴露试验,其主要原因:1) 根据历史资料记载,因受限于现场复杂的环境,涂层施工作业于土建完工后的半年多时间开始,此时已有部分氯离子渗透到混凝土中;2) 相比未受荷载作用的暴露试验,码头横纵梁结构受到门机作业、车辆等复杂的荷载作用,研究表明荷载对涂层劣化具有加速作用^[8];3) 相比于实验室可控的涂装环境制作暴露试件,码头结构涂装作业受混凝土表面处理工艺、作业环境、施工人员素质等多方面影响。综

合暴露试验数据表明,不同配套的涂层体系能够满足海工混凝土结构 10 a 以上的设计保护年限的要求。

4 涂层混凝土结构耐久性寿命定量评估方法

通常采用 Fick 第二定律描述混凝土中的氯离子扩散,并建立了计算氯离子扩散的基本模型,该模型中假定混凝土表面氯离子浓度是定值,主要因表面氯离子浓度早期增加较快,在工程设计与评估时,基于预测寿命的保守考虑,一般不考虑表面氯离子浓度的时变效应,因此,该模型适用于未采用表面防护措施的空白混凝土结构耐久性寿命预测^[9-10]。根据暴露试验和工程调查,涂层混凝土表面氯离子浓度随服役时间延长呈现缓慢增加,反映了涂层保护效果逐渐减弱、保护失效的过程。对涂层混凝土结构服役寿命计算时,如果不考虑服役时间对表面氯离子浓度的影响,可能产生较大的误差。

为此,本文考虑涂层对混凝土表面氯离子时变特性的影响;提出了采用表面涂层的混凝土结构耐久性寿命定量评价思路与方法:1) 以混凝土表面氯离子浓度达到最大值的时间作为涂层失效时间;2) 基于表面氯离子浓度时变特性的混凝土氯离子扩散模型,计算涂层失效时混凝土中氯离子浓度;3) 基于涂层失效时混凝土中氯离子浓度,计算相同条件下不同时间无涂层的混凝土氯离子浓度,以近似混凝土中氯离子分布或氯离子渗透通量作为等效时间,将涂层失效时间与等效时间的差值作为表面涂层对混凝土结构服役寿命延长的时间。

4.1 表面涂层失效时间的确定

根据涂层工程混凝土调查数据,发现随服役时间的延长,混凝土表面氯离子浓度值呈逐渐增大,根据表面氯离子浓度与服役时间之间的关系,见图 7,拟合得出表面氯离子浓度与服役时间的线性函数模型:

$$C_s = kt \quad (1)$$

式中： k 为环境材料综合影响系数，受涂层材料自身老化特性、服役环境、结构荷载等因素影响，对于采用环氧底漆+氯化橡胶面漆的华南地区高桩码头梁类构件， k 取 0.025 8； t 为服役时间。

根据前期研究，普通混凝土最大表面氯离子浓度值约为 0.50%~0.60%，采用涂层工程结构中混凝土表面氯离子浓度达到最大值的时间为 19.4~23.3 a(平均 21.3 a)，以该时间作为涂层失效时间，因表面氯离子浓度达到最大值后，后续从外界渗透到涂层混凝土中多余的氯离子将集聚在涂层与混凝土界面，极易造成涂层鼓胀破坏，出于保守考虑，将此时间作为涂层失效时间。

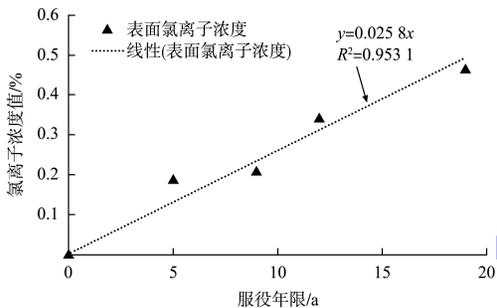


图 7 涂层混凝土表面氯离子浓度与工程服役时间的关系
Fig. 7 Relationship between surface chloride ion concentration and service time of the project

4.2 表面涂层混凝土结构氯离子扩散性能计算模型

假设初始条件 $C_0=0$ ，考虑边界条件服从时间线性函数，并利用 Laplace 变换对 Fick 第二定律推导得出基于表面线性增加的混凝土氯离子扩散模型的解析解^[11]，见式(2)。

$$C(x,t) = kt \left[\left(1 + \frac{x^2}{2D_1 t} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) - \frac{x}{\sqrt{\pi D_1 t}} e^{-\frac{x^2}{4D_1 t}} \right] \quad (2)$$

$$D_1 = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (3)$$

式中： $C(x,t)$ 为距离混凝土深度为 x 、时间为 t 时的氯离子浓度值，%； D_1 为混凝土有效氯离子扩散系数， $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ； erfc 为余误差函数； D_0 为测试时间为 t_0 时的氯离子扩散系数， $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ； m 为扩散系数龄期因子。

以华南湛江港高桩码头为例，根据 5 a 龄期相同环境及材料组分的未涂刷涂层的高桩码头混凝土氯离子扩散系数，利用式(2)和(3)，计算不同服役时间的涂层混凝土结构中氯离子浓度的分布，见图 8，随服役时间的延长，涂层混凝土中不同深度的氯离子浓度呈不断增加。

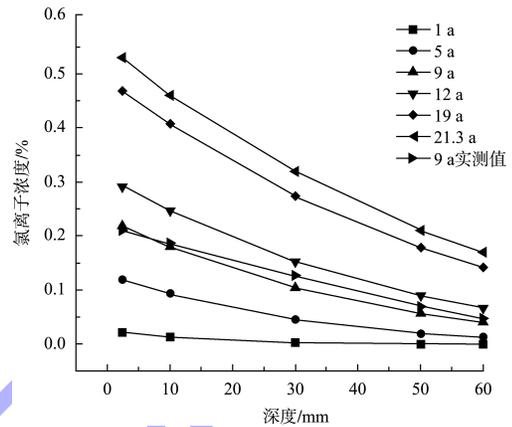


图 8 不同时间涂层混凝土中氯离子浓度预测曲线
Fig. 8 Prediction curve of chloride ion concentration in coated concrete at different time

4.3 表面涂层对混凝土结构服役寿命延长时间的定量评估方法

基于扩散方程建立了混凝土氯离子扩散基本模型如下：

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) \quad (4)$$

式中： C_0 为混凝土初始氯离子浓度，%； C_s 为表面氯离子浓度，%。

根据前述 5 a 龄期空白混凝土氯离子扩散系数，计算了空白混凝土不同服役时间的氯离子浓度分布，见图 9。随服役时间的延长，空白混凝土中不同深度的氯离子浓度呈不断增加，并且在服役 6.8 a 时空白混凝土中氯离子浓度分布曲线，与涂层失效时涂层混凝土中氯离子浓度分布曲线基本重合，即氯离子渗透通量基本相等。以近似混凝土中氯离子分布或氯离子渗透通量作为等效时间，即服役时间 21.3 a 时涂层混凝土相当于空白混凝土的等效时间为 6.8 a。将涂层失效时间 21.3 a 与等效时间 6.8 a 的差值 14.5 a 作为表面涂层对混凝土结构服役寿命延长的时间。

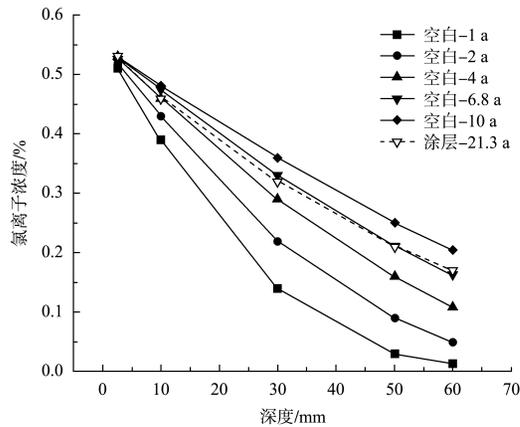


图9 不同时间空白混凝土中氯离子浓度预测曲线

Fig. 9 Prediction curve of chloride ion concentration in blank concrete at different time

5 结论

1) 表面涂层可以有效隔绝氯离子侵入, 显著提高海工混凝土结构的服役寿命, 其中采用环氧沥青+氯化橡胶面层的涂层体系具有更优的抗老化性能。因实际服役码头受作业荷载、复杂涂装施工环境等影响, 实体结构中混凝土氯离子浓度要显著大于暴露试验, 其防护效果要弱于暴露试验。

2) 实际环境下涂层混凝土结构随服役时间的延长, 表面氯离子浓度逐渐增大, 且表面氯离子浓度随服役时间符合线性函数模型($C_s = kt$)。

3) 提出以表面氯离子浓度达到最大值的时间作为涂层失效时间, 并考虑涂层对表面氯离子浓度时变特性的影响, 建立了采用表面涂层的混凝土结构耐久性寿命定量评估方法。

4) 因涂层混凝土中氯离子传输受到复杂环境、外部荷载、涂层复杂失效机制等因素影响, 且因实际服役环境下涂层混凝土结构耐久性数据样本有限, 后续仍需持续开展工程、收集工程基础数据, 以期对涂层混凝土结构定量评估方法进行完善。

参考文献:

- [1] 潘德强, 洪定海, 郑恩惠, 等. 华南沿海部分码头调查情况介绍[J]. 水运工程, 1982(2): 1-7.
PAN D Q, HONG D H, ZHENG E H, et al. Introduction to the investigation of some docks along the south china coast[J]. Port & waterway engineering, 1982(2): 1-7.
- [2] 王胜年, 黄君哲, 张举连, 等. 华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J]. 水运工程, 2000(6): 8-12.
WANG S N, HUANG J Z, ZHANG J L, et al. An investigation on concrete corrosion of seaport wharf in South China and analysis of structures' durability[J]. Port & waterway engineering, 2000(6): 8-12.
- [3] 黄君哲, 周欲晓, 王胜年, 等. 海工混凝土结构表面涂层暴露试验及应用效果[J]. 中国港湾建设, 2002, 22(6): 17-20, 51.
HUANG J Z, ZHOU Y X, WANG S N, et al. Analysis of exposure experiment and application of coatings for marine concrete structures [J]. Chinaharbour engineering, 2002, 22(6): 17-20, 51.
- [4] 海港工程混凝土结构防腐技术规范: JTJ 275—2000[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Corrosion prevention technical specifications for concrete structures of marineharbour engineering: JTJ 275-2000[S]. Beijing: China Communication Press, 2001.
- [5] 黄君哲, 范志宏, 王胜年, 等. 海洋环境中混凝土涂层防腐效果分析[J]. 水运工程, 2006(2): 16-19, 54.
HUANG J Z, FAN Z H, WANG S N, et al. Corrosion prevention effectiveness of coating system applied in marine environment [J]. Port & waterway engineering, 2006(2): 16-19, 54.
- [6] BS EN 1992-1-1, Design of concrete structures-Part 1-1[S]. Brussels: CEN, 1998.
- [7] 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Standard for durability design of port and waterway engineering structure: JTS 153-2015 [S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2015.

(下转第 42 页)