

近海大气环境下钢框架自振频率评估研究^①

郑山锁, 石磊, 郑捷, 周炎, 张秋石, 朱揽奇

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 由于沿海地区的钢结构建筑常暴露在露天, 不可避免地受到大气环境的腐蚀。本文在材料力学和结构分析的基础上, 研究沿海地区钢框架结构自振频率的变化, 进而对结构在近海大气环境下存在的潜在损伤进行评估。基于工字形与箱形截面, 提出结构自振频率与结构构件厚度变化的关系式, 并分别考虑构件内外表面腐蚀的影响。以一榀钢框架结构为例, 分析其在腐蚀5、10、20年后结构前10阶自振频率的变化。分析结果表明, 随着腐蚀程度的增加, 结构自振频率降低的越大。研究成果可为锈蚀钢框架损伤评估提供一定的参考依据。

关键词: 近海大气环境; 钢框架; 损伤评估; 自振频率

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)05-0673-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0673

Assessment of Natural Frequency of Steel Frames in Offshore Atmospheric Environment

ZHENG Shan-suo, SHI Lei, ZHENG Jie, ZHOU Yan, ZHANG Qiu-shi, ZHU Lan-qi

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: Steel space structures in coastal areas are often exposed to the open air so are inevitably subjected to atmospheric corrosion. In this paper, we draw from the fields of material science and structural analysis to present a framework for evaluating potential damage from atmospheric corrosion to steel space structures in coastal areas. We derive equations that relate structural natural frequency sensitivity to structural member thickness and consider both the inner and outer surface corrosion of the structural member. Using an actual large steel space structure as an example, we examine the feasibility of our proposed approach and assess the potential structural damage caused by atmospheric corrosion. The results demonstrate that atmospheric corrosion does not obviously affect the natural frequencies of the structure but does redistribute the stress and some of the structural members may undergo large stress changes.

Key words: coastal atmosphere; steel frame; damage assessment; natural frequency

0 引言

目前, 钢结构工程在全世界建筑中得到了广泛应用, 如桥梁、体育场馆、会展中心等大型公共建筑。然而由于长期暴露, 其不可避免地会受到大气腐蚀, 而锈蚀会改变钢材的化学和物理性能, 削弱钢结构

构件的强度。大气腐蚀引起的钢材力学性能的退化可能导致结构的损伤积累, 如果累积损伤不能被及时发现, 结构的安全将受到威胁, 造成的损害可能最终导致结构局部破坏或整体倒塌。

^① 收稿日期: 2016-06-24

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAJ08B03); 国家自然科学基金(51678475); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20136120110003)

作者简介: 郑山锁, 男, 博士生导师, 教授, 主要从事工程结构抗震研究。E-mail: zhengshansuo@263.net。

通信作者: 郑捷, 女, 讲师, 主要从事建筑与结构设计研究。E-mail: julie1314f@126.com。

目前的研究主要集中于大气腐蚀材料力学性能的退化规律方面^[1-2],而对结构整体抗震性能研究较少。结构抗震分析可按弹性体系进行,其中结构自振频率直接影响结构地震反应的大小,它的大小直接影响了弹性分析中地震作用的大小^[3]。因此,准确地计算出结构的自振频率对于确定结构的地震反应至关重要。

本文拟评估大气腐蚀对沿海地区钢结构安全性的影响;提出结构的自振频率与结构构件厚度变化的关系式;最后以一榀五层两跨钢框架构为案例,验证所提出的方法的可行性,并评估大气腐蚀对结构的潜在损害。

1 钢材的起锈时间与锈蚀速率

1.1 钢材起锈时间

钢结构建筑在建造初期会做防腐处理,防腐涂层保护时间的长短与外部环境类型、防腐涂层的类型与厚度有关。根据《工业建筑防腐蚀设计规范》^[4]的规定,钢结构表面防护的规定应符合表 1。

表 1 钢结构的表面防护

Table 1 Surface protection of steel structures			
防腐蚀涂层最小厚度/mm			防护层使用年限/a
强腐蚀	中腐蚀	弱腐蚀	
0.28	0.24	0.2	10~15
0.24	0.2	0.16	5~10
0.2	0.16	0.12	2~5

钢结构环境分类根据《GB/T15957-1995 大气环境腐蚀性分类》^[5]确定。近海大气环境一般为强腐蚀类型,虽然有防腐涂层的保护,但随着服役时间的增加,防腐涂料会在外部环境的侵蚀下失去保护

功能。防腐涂层失效之时便是钢结构腐蚀发生之日,因此钢结构防腐涂层失效起始时间的确定是钢结构腐蚀行为研究的一项关键内容。

1.2 钢材平均锈蚀速率

根据《金属腐蚀电化学热力学》^[6]可以得到碳钢在各类大气中的腐蚀速率(表 2)。

表 2 碳钢在各类大气中的腐蚀速率

Table 2 Corrosion rate of carbon steel in all kinds of atmosphere environment			
大气类型	平均腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	大气类型	平均腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)
农村	0.004~0.065	工业	0.026~0.175
城市	0.023~0.071	海洋	0.026~0.104

根据《钢结构防腐蚀和防火涂装》^[7]以及《近海大气中耐候钢和碳钢抗腐蚀性能的研究》^[8]可以得到 Q235 钢和 Q345 钢在大气中暴露 5 年锈蚀速率(表 3)。

表 3 两种钢在大气中暴露 5 年腐蚀速率

Table 3 Corrosion rate of two kinds of steels exposed in the atmosphere for five years								
类型	各地腐蚀速率 K/(μm·a ⁻¹)							
	成都	广州	武汉	北京	包头	鞍山	南京	上海
Q235①	27.5	27.3	14.2	11.7	6.7	19.5	4.0	17.8
Q345②	25.8	25.0	14.1	10.0	6.7	17.0	-	-
②/①	0.94	0.92	0.99	0.85	1.00	0.87	-	-

1998 年国际标准化组织(ISO)推出了 ISO 12944 (Paints and varnishes——Corrosion protection of steel structures by protective paint systems),将腐蚀环境进行划分,见表 4。

表 4 国际标准化组织 ISO 12944-2 腐蚀环境

Table 4 Corrosion environment divided by International Standardization Organization ISO 12944-2

腐蚀类别	低碳钢单位面积上的损失(第一年暴露后)		湿性气候下的典型环境	
	$K_w/(g/mm^2/a)$	$K/(\mu m/a)$	室外	室内
C1 很低	≤10	≤1.3		加热的建筑内部,空气洁净,如办公室、住宅、商店、学校等
C2 低	10~200	1.3~25	大气污染较低,大部分是乡村地区	未加热的建筑内部,可能发生冷凝,如仓库、体育场
C3 中	200~400	25~50	城市和工业大气,中等的二氧化硫污染,低盐度沿海区域	高湿度和有一定空气污染的生产场所,如食品加工厂、洗衣厂、酒厂、牛奶场等
C4 高	400~650	50~80	高盐度的工业区和沿海地区	化工厂、游泳池、船厂等
C5-1 很高(工业)	650~1 500	80~200	高盐度和恶劣大气的工业区	总是有冷凝和高湿度的建筑物内部
C5-M 很高(海洋)	650~1 500	80~200	高盐度和沿海的近岸地带	总是处在高湿度和污染的建筑物内部

注:K_w和K分别为用腐蚀质量和腐蚀深度表示的腐蚀速率

2 大气腐蚀对结构自振频率的影响

结构的自振频率是结构弹性分析的重要参数,

与结构内部阻尼和外力无关。钢结构不可避免地受到大气腐蚀的影响,可能导致其构件截面面积的损

失。由于钢结构构件大部分采用工字形、圆形或矩形空心截面,在构件外表面涂抹防腐涂料可以提高其耐腐蚀性,但这一措施很难用于构件内表面的处理。本文假定锈蚀对钢结构影响主要体现在对截面厚度的削弱,最终影响结构的整体性和安全性,因此有必要提出一些方法来研究固有频率与构件厚度减少之间的关系,以评估锈蚀钢结构的损伤。在对钢框架结构进行分析时,结构的矩阵特征方程可以写成:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\varphi} = 0 \quad (1)$$

式中: ω 为圆频率; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\boldsymbol{\varphi}$ 为结构模态向量。质量矩阵、刚度矩阵和模态向量是关于构件几何性质的函数,如结构构件厚度 t ,将式(1)对构件厚度 t 求导得:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial t} - \frac{\partial \omega_r^2}{\partial t} \mathbf{M} - \omega_r^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \boldsymbol{\varphi}_r + (\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_r}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

由于质量矩阵与刚度矩阵均为对称矩阵,有

$$\boldsymbol{\varphi}_r^T (\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) = [(\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\varphi}_r]^T = 0 \quad (3)$$

$$\text{可得 } \frac{\partial \omega_r^2}{\partial t} = \frac{\boldsymbol{\varphi}_r^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial t} - \omega_r^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \boldsymbol{\varphi}_r}{\boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_r} \quad (4)$$

又有 $\omega_r = 2\pi f_r$, 可得

$$\frac{\partial f_r}{\partial t} = \frac{1}{8\pi^2 f_r} \cdot \frac{\boldsymbol{\varphi}_r^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial t} - 4\pi^2 f_r^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \boldsymbol{\varphi}_r}{\boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_r} \quad (5)$$

式(5)可用于结构自振频率随结构构件厚度变化的计算。当构件厚度变化引起自振频率变化较小时,自振频率的变化可以表示为:

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t \quad (6)$$

由式(5)可知,自振频率的变化主要取决于 $\partial \mathbf{K} / \partial t$ 和 $\partial \mathbf{M} / \partial t$ 。这取决于构件横截面类型,对桁架单元,单元刚度矩阵和质量矩阵与横截面面积直接相关,单元刚度矩阵和质量矩阵与厚度的关系可表示为:

$$\frac{\partial \mathbf{K}^e}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{K}^e}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{M}^e}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{M}^e}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \quad (8)$$

对梁单元,单元刚度矩阵和质量矩阵与厚度的关系可以表示为

$$\frac{\partial \mathbf{K}^e}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{K}^e}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{K}^e}{\partial I_x} \cdot \frac{\partial I_x}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{K}^e}{\partial I_y} \cdot \frac{\partial I_y}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{K}^e}{\partial I_z} \cdot \frac{\partial I_z}{\partial t} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{M}^e}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{M}^e}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{M}^e}{\partial I_x} \cdot \frac{\partial I_x}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{M}^e}{\partial I_y} \cdot \frac{\partial I_y}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{M}^e}{\partial I_z} \cdot \frac{\partial I_z}{\partial t} \quad (10)$$

式中: I_x 、 I_y 、 I_z 分别为局部坐标系下构件截面对三个方向的惯性矩。工字形与矩形截面如图1所示。

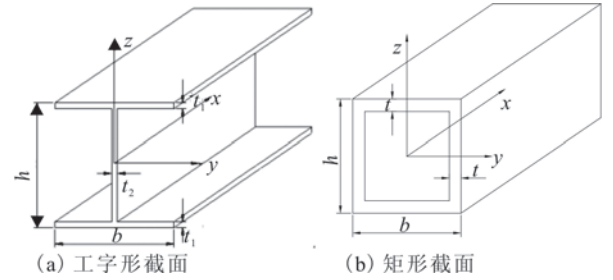


图1 截面类型

Fig.1 Section type

对工字形截面有:

$$\frac{\partial I_y}{\partial t} = bt_1^2 + (h - t_1)^2(t + b) + \frac{t_1^3}{3} + \frac{(h - 2t_1)^2(h - 2t_1 + 3t_2)}{2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial I_z}{\partial t} = \frac{2b^3 - t_2^3 + 6t_1b^2 + 3t_2^2(h - 2t_1)}{6} \quad (12)$$

$$\frac{\partial I_x}{\partial t} = \frac{\partial I_z}{\partial t} + \frac{\partial I_y}{\partial t} \quad (13)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = 2(h - t_2 + 2b) \quad (14)$$

对矩形截面,分别考虑内外表面腐蚀,当内表面锈蚀深度为 t 时:

$$\frac{\partial I_y}{\partial t_n} = (h - 2t)^2 \cdot \frac{(3b + h - 8t)}{6} \quad (15)$$

$$\frac{\partial I_z}{\partial t_n} = (b - 2t)^2 \cdot \frac{(3h + b - 8t)}{6} \quad (16)$$

$$\frac{\partial I_x}{\partial t_n} = \frac{1}{6} (b + h - 4t)^3 \quad (17)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t_n} = 2(b + h - 4t) \quad (18)$$

当外表面锈蚀深度为 t 时:

$$\frac{\partial I_y}{\partial t_w} = \frac{h^2}{6} (h + 3b) \quad (19)$$

$$\frac{\partial I_z}{\partial t_w} = \frac{b^2}{6} (b + 3h) \quad (20)$$

$$\frac{\partial I_x}{\partial t_w} = \frac{1}{6} (b + h)^3 \quad (21)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t_w} = 2(b + h) \quad (22)$$

若能得到所有单元刚度矩阵与质量矩阵随厚度

变化的关系,按传统有限元方法将其组合即可求得 $\partial \mathbf{K} / \partial t$ 和 $\partial \mathbf{M} / \partial t$,这样由结构锈蚀引起构件厚度变化,最终导致自振频率的变化 Δf 就可通过式(6)求得。

3 案例分析

3.1 钢框架模型简介

设计计算一五层两跨钢框架结构,其立面布置如图 2 所示。框架梁、柱采用工字形截面,材质均为 Q235 钢;风荷载及雪荷载标准值分别为 0.35 kN/m²及 0.4 kN/m²,各层楼盖上恒荷载标准值均为 5.0 kN/m²,活载 0.5 kN/m²;屋面恒荷载标准值为 7.0 kN/m²,活载 0.5 kN/m²。抗震设防烈度为Ⅷ度,并按Ⅱ类场地土及近震条件考虑。框架梁、柱截面尺寸如表 5 所列;材料的弹性模量 $E=2 \times 10^8$ kN/m²,泊松比 $\nu=0.3$ 。

3.2 未锈蚀结构动力分析

在建立有限元模型的基础上,对钢结构的动力

特性进行分析。结构的前 10 阶振型如图 3 所示。

表 5 梁柱截面尺寸表

Table 5 Section size of beams and column			
结构构件	截面尺寸/mm	截面面积/cm ²	截面惯性矩/cm ⁴
梁	500×300×8×16	133	63 080
边柱	600×300×10×16	153	97 150
中柱	700×300×10×20	186	162 700

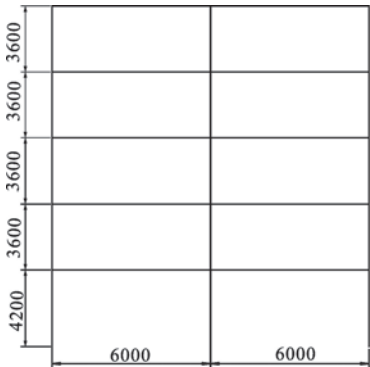


图 2 结构立面布置图
Fig.2 Structure layout

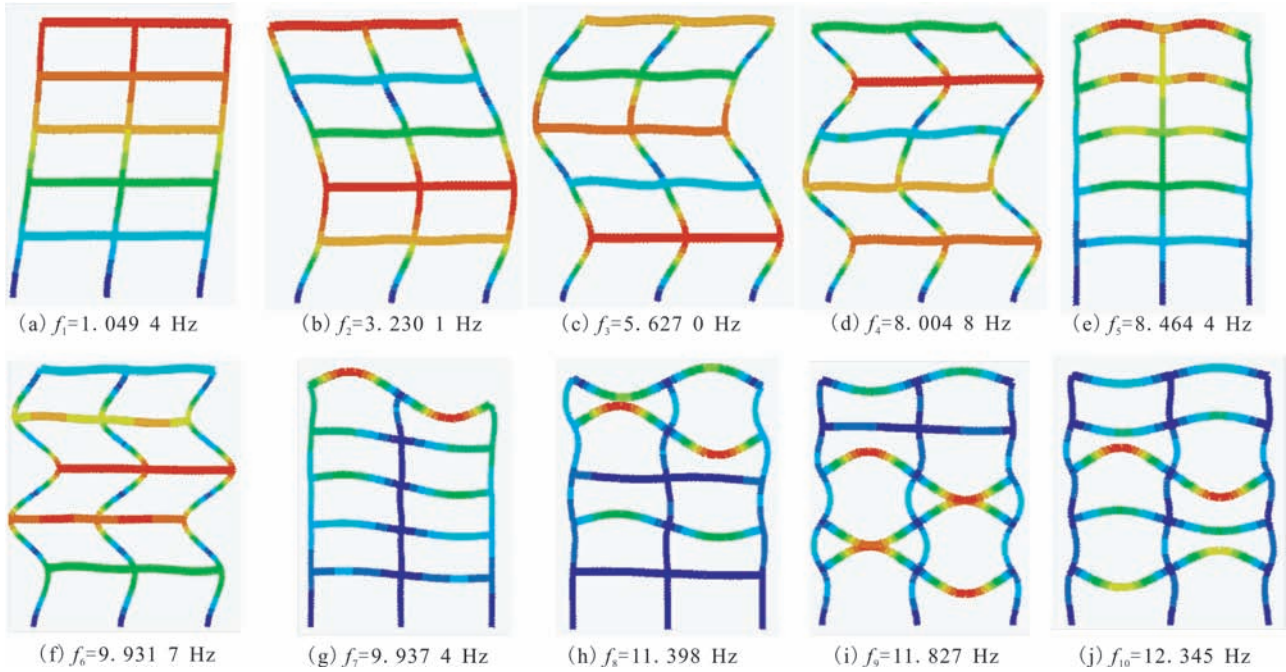


图 3 结构各阶振型图
Fig.3 Vibration mode shapes of the structure

3.3 钢材的大气腐蚀

由表 1 可以看出,导致钢结构防腐涂层失效的主要原因有:环境因素、涂层厚度、结构形式以及金属表面除锈质量等级等。虽然影响防腐涂层失效的原因很明确,但其失效机理却非常复杂,以致很难准确预测涂层的失效起始时间。本文为分析方便,对

上述资料里的腐蚀速率进行总结分析,将 Q235 碳素结构钢在近海大气环境中的平均腐蚀速率取为 0.06 mm/a,起锈时间取为 20 a。

3.4 大气腐蚀对自振频率的影响

一般钢结构构件的外表面通常会涂有防腐涂料,但其内表面由于操作不便可能不会涂抹,同时存

在一些特殊结构由于所处环境的原因后期很难维护,因此有必要考虑结构构件内外表面的大气腐蚀。在任一情况下,第 r 阶自振频率随构件厚度变化可由式(5)得出,由第 i 个构件厚度变化引起的第 r 阶频率变化 Δf_r 可由式(6)计算,最后由所有结构构件厚度减少导致第 r 阶固有频率的变化组合可得出结构第 r 阶自然频率变化,即可对大气腐蚀对第 r 阶固有频率的影响进行评估。

由内、外表面腐蚀引起的结构前10阶自振频率的变化如图4所示,锈蚀时间分为5、10和20 a。由图4可知,前10阶自振频率是减小的,随着腐蚀时间的增加,自振频率减小更快,但同时也存在有些高阶自振频率是增加的。这是由于腐蚀导致构件厚度的降低,进而造成刚度降低,同时也引起结构质量减小。自振频率的变化取决于构件刚度降低和质量减少的相对程度。

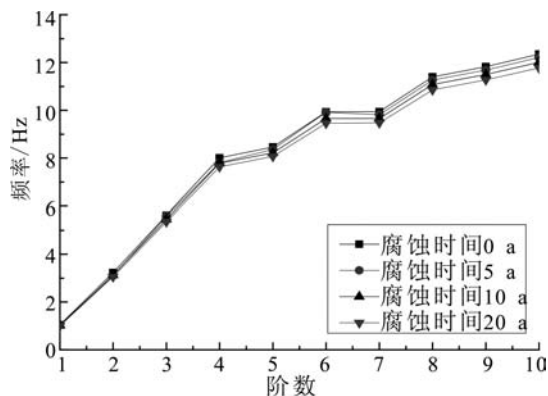


图4 结构自振频率大小

Fig.4 Natural frequency of the structure

可以看出,结构的第二阶自振频率由于结构构件腐蚀引起的变化最大。在20 a内,由于构件表面腐蚀,第二阶固有频率的最大变化为5.6%。因此从本案例可以看出,该钢框架结构的自振频率受大气腐蚀的影响较小。但这一结论可能不适用于其他钢结构。

4 结论

本文对近海环境下结构自振频率随构件厚度变化的研究结果表明:

- (1) 近海大气环境下锈蚀结构自振频率会减小,其变化程度随大气腐蚀年限的增加而增加。
- (2) 该方法可同时考虑内、外表面腐蚀引起的结构自振频率的变化,且可分别考虑局部腐蚀及均匀腐蚀的影响。

(3) 锈蚀对结构影响是多方面的,本文仅考虑锈蚀对截面削弱的影响,其他因素对结构自振频率的影响还需进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 郑山锁,孙龙飞,杨威,等.锈蚀RC框架结构抗地震倒塌能力研究[J].建筑结构,2014(16):59-63.
ZHENG Shan-suo, SUN Long-fei, YANG Wei, et al. Study on Seismic Collapse Resistance Ability of the Corroded RC Frame Structures [J]. Building Structure, 2014 (16): 59-63. (in Chinese)
- [2] 吴庆,袁迎曙.锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J].土木工程学报,2008,41(12):42-47.
WU Qing, YUAN Ying-shu. Experimental Study on the Deterioration of Mechanical Properties of Corroded Steel Bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (12): 42-47. (in Chinese)
- [3] 周芬.地基-箱形基础-框架结构动力相互作用试验与理论分析[D].长沙:湖南大学,2005.
ZHOU Fen. Dynamic Experimentation and Theoretic Analysis of Soil-box Foundation-frame Structure Interaction System [D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)
- [4] GB50046-2008,工业建筑防腐设计规范[S].北京:中国计划出版社,2008.
GB50046-2008, Code for Anticorrosion Design of Industrial Constructions [S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)
- [5] GB/T15957-1995,大气环境腐蚀性分类[S].北京:中国标准出版社,1996.
GB/T15957-1995, Corrosivity Classification of Atmospheric Environment [S]. Beijing: Standards Press of China, 1996. (in Chinese)
- [6] 杨熙珍.金属腐蚀电化学热力学[M].北京:化学工业出版社,1991.
YANG Xi-zhen. Metal Corrosion Electrochemical Thermodynamics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [7] 刘新,时虎.钢结构防腐和防火涂装[M].北京:化学工业出版社,2005.
LIU Xin, SHI Hu. Anticorrosion and Fireproof Coatings for Steel Structures [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 张全成,吴建生.近海大气中耐候钢和碳钢抗腐蚀性性能的研究[J].材料科学与工程,2001,19(2):12-15,25.
ZHANG Quan-cheng, WU Jian-sheng. The Study on the Corrosion Resistance of Rust Layer on the Surface of Weathering Steel in Marine Atmosphere [J]. Materials Science and Engineering, 2001, 19 (2): 12-15, 25. (in Chinese)