

模拟酸雨大气环境中Cl⁻浓度对镀锌钢腐蚀行为的影响

刘雨薇¹, 王振尧¹, 吕旺燕², 苏伟²

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2. 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 目的 研究模拟酸雨环境中Cl⁻浓度对镀锌钢腐蚀行为的影响与作用机理。方法 以pH为3.05的模拟酸雨溶液作为空白溶液,在每升空白溶液中分别加入0.01,0.1和0.5 mol的NaCl,浸泡3天和7天后取出试样,进行形貌、成分分析以及电化学分析。结果 浸泡后镀锌钢表面形成的腐蚀产物主要为NaZn₄SO₄Cl(OH)₆·6H₂O。随着溶液中Cl⁻浓度的增加,镀锌钢的腐蚀电位逐渐减小,腐蚀电流密度逐渐增大,阻抗值逐渐减小。结论 通过不同时间的浸泡,随着溶液中Cl⁻浓度的增加,镀锌钢表面腐蚀产物对基体都有一定的保护作用,但保护作用逐渐减小,尤其在浸泡3天时的变化最明显。

关键词: 镀锌钢; 模拟酸雨; 电化学技术; 大气腐蚀

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.005

中图分类号: TJ04; TG172.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0022-05

Effects of Cl⁻ Concentration on Corrosion Behavior of Hot-dip Galvanized Steel in Simulated Acid Rain Atmospheric Environment

LIU Yu-wei¹, WANG Zhen-yao¹, LYU Wang-yan², SU Wei²

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of Cl⁻ Concentration on Corrosion Behavior of Hot-dip Galvanized Steel in simulated acid rain atmospheric environment. **Methods** The simulated acid rain solution (pH=3.05) was used as basic solution, then 0.01, 0.1, and 0.5 mol/L NaCl was respectively added. Samples were immersed in these solution and taken out respectively after 3 days and 7 days. Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and electrochemical techniques were used to analyze the corroded samples. **Results** After immersion, the corrosion product

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-06-08

Received: 2015-05-06; Revised: 2015-06-08

基金项目: 南网科技项目(K-GD2014-0532)

Fund: Supported by the Technology projects from China Southern Power Grid(K-GD2014-0532)

作者简介: 刘雨薇(1990—),女,辽宁人,硕士研究生,主要研究方向为大气腐蚀。

Biography: LIU Yu-wei(1990—), Female, from Liaoning, Master graduate student, Research focus: atmospheric corrosion.

通讯作者: 王振尧(1962—),男,辽宁人,博导,研究员,主要研究方向为自然环境腐蚀。

Corresponding author: WANG Zhen-yao(1962—), Male, from Liaoning, Doctoral tutor, Researcher, Research focus: atmospheric corrosion.

component that formed on the surface of hot-dip galvanized steel is $\text{NaZn}_4\text{SO}_4\text{Cl}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Along with the increase of the Cl^- concentration, the corrosion potential of the galvanized steel was gradually decreased, the corrosion current was gradually increased and the impedance value was decreased. **Conclusion** With the increase of Cl^- concentration, the protective effects of corrosion product formed on the surface of hot-dip galvanized steel was gradually reduced, especially after 3 days' immersion.

KEY WORDS: hot-dip galvanized steel; simulated acid rain; electrochemical technique; atmospheric corrosion

近年来,酸雨已成为一个全球性的环境问题,早在1999年,全世界因酸雨腐蚀造成的经济损失达200亿美元,我国因酸雨对材料腐蚀所造成的损失也高达30亿元^[1-3]。热镀锌作为一种阳极防腐中最经济有效的方法^[4]被广泛应用于建筑材料、航空配件、交通运输、电力通讯和家电家具等行业。随着我国经济建设的高速发展,电力负荷大幅度增加,输电线路的寿命问题日益突出。作为电力工业的重要基础设施,输电线路的安全可靠性直接关系到电网的安全运行。我国的输电线路中输电杆塔^[5]和高压输电线路中架线设施^[3]大多使用镀锌钢材料,因此,镀锌钢的大气腐蚀研究和防护技术的开发日益受到电力部门和环保部门的高度重视。

目前,很多学者针对锌及锌涂层在污染环境中的初期腐蚀行为开展了大量研究^[6-10]。杨小奎^[11]等利用电化学阻抗的方法研究了环氧富锌涂层对AZ91D镁合金的腐蚀防护能力;安百刚等^[12-13]研究了锌在模拟酸雨溶液中的腐蚀行为;原徐杰等^[4]采用动电位极化测试技术研究了沉积不同浓度NaCl和NaHSO₃的镀锌钢在干湿交替作用下的腐蚀行为;Shuan Liu等^[14]研究了Cl⁻浓度对镀锌钢在模拟锈层溶液中腐蚀行为的影响。目前,关于模拟酸雨大气环境中Cl⁻浓度对镀锌钢腐蚀行为的影响研究甚少。由此,笔者通过采用动电位极化测试技术和电化学阻抗测试技术来获得锈层的电化学性能,并结合成分与形貌分析,研究锈层对镀锌钢腐蚀行为的影响,分析不同实验结果之间的相关性,揭示模拟酸雨溶液中Cl⁻浓度对镀锌钢腐蚀行为的影响。

1 实验

1.1 材料

实验材料为某厂提供的镀锌钢,基体材料为Q345钢,其化学成分(以质量分数计)为:C 0.18%, Si 0.45%, Mn 1.35%, P 0.036%, S 0.032%, V 0.075%, Nb 0.045%, Ti 0.09%, Fe余量。表面为热浸镀锌。表面形貌及成分分析的试样尺寸为15 mm × 15 mm,电化学试样表面尺寸为10 mm × 10 mm。所有试样都需先

经过丙酮除油,酒精冲洗后,吹干置于干燥器中备用。用于电化学分析的试样,除工作界面外的其他面用环氧树脂密封后,清洗、吹干备用。

1.2 腐蚀浸泡试验

浸泡溶液为模拟酸雨溶液,其基本成分为^[15-17]: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NaF, KNO_3 , MgSO_4 , CaCl_2 ;其质量浓度分别为:2.039, 0.0172, 1.178, 0.33, 3.633 g/L(为实际雨水浓度的200倍)。将此模拟酸雨溶液pH值调至3.05,并将此溶液作为空白溶液,在每升空白溶液中分别加入0.01, 0.1, 0.5 mol的NaCl。分别浸泡3天和7天后,每次取出3个电化学样、2个形貌分析试样和1个成分分析试样,取出的试样先用蒸馏水进行清洗,经风筒吹干,然后再放入干燥器中保存备用。

1.3 形貌及腐蚀产物分析

利用XL30FEG型扫描电子显微镜(SEM)对腐蚀试样的表面微观形貌进行观察和分析。X射线衍射(X-ray Diffraction)分析使用Rigaku-D/max-2500PC型衍射仪,采用CuK α 靶,在50 kV-250 mA条件下以2(°)/min的扫描速度对腐蚀产物进行测量,并用PCPDF和Jade软件进行X射线衍射结果的标定。

1.4 电化学测量

电化学测量采用PARSTAT2273设备和三电极体系来完成,饱和KCl甘汞电极(SCE)为参比电极,Pt电极为对电极,工作电极为未腐蚀的镀锌钢或浸泡不同时间后的带锈试样。电解质为模拟酸雨溶液,在室温(20 °C)下进行测量。阻抗测量扰动电位为10 mV,测试频率为10⁻²~10⁵ Hz。极化曲线测量的扫描速率为0.3333 mV/s,扫描区间为-0.4~+0.6V(相对于开路电位)。电化学阻抗数据用ZSipWinV3.0软件进行拟合。

2 实验结果与讨论

2.1 锈层成分分析

图1为镀锌钢在不同Cl⁻浓度的模拟酸雨溶液中

浸泡3天和7天后的XRD结果。可以看出,浸泡后,镀锌钢表面的腐蚀产物主要为 $\text{NaZn}_4\text{SO}_4\text{Cl}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。浸泡3天时,随着溶液中 Cl^- 浓度的增加,Zn的峰强度逐渐减弱。 Cl^- 的物质的量浓度从0.01 mol/L增加到0.1 mol/L时, $\text{NaZn}_4\text{SO}_4\text{Cl}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 峰的数量和强度均有所增加;增加到0.5 mol/L时, $\text{NaZn}_4\text{SO}_4\text{Cl}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 峰的强度和数量变化不大。浸泡7天时,产物的组成与浸泡3天后的产物组成相同,而在加入0.1 mol/L NaCl的溶液中,腐蚀产物 $\text{NaZn}_4\text{SO}_4\text{Cl}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的数量最多,峰的强度最高。

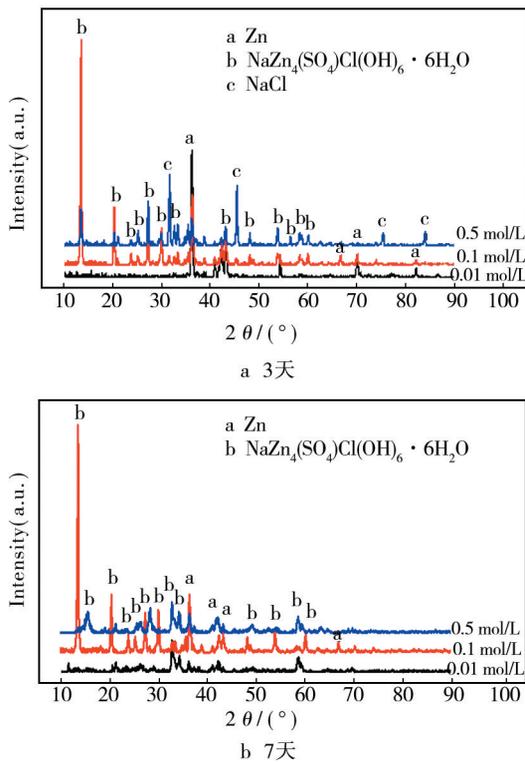


图1 镀锌钢在不同 Cl^- 浓度的模拟酸雨溶液中浸泡3天和7天后的XRD谱图

Fig.1 XRD results of galvanized steel in simulated acid rain solutions with different Cl^- concentration after 3 days' and 7 days' immersion

2.2 锈层形貌分析

图2为镀锌钢在 Cl^- 浓度分别为0.01, 0.1, 0.5 mol/L的模拟酸雨溶液中浸泡3天和7天后的表面形貌。可以看出,浸泡3天后,镀锌钢在 Cl^- 浓度为0.01 mol/L的溶液中,试样表面生成比较平整致密的产物;在0.1 mol/L的溶液中,试样表面出现局部突起的团絮状产物;在0.5 mol/L的溶液中,试样表面生成均匀的细针状产物。浸泡7天后,在 Cl^- 浓度为0.01 mol/L的溶液中,试样表面生成相互交叉的针状产物,且各产物之

间有一定的间隙;在0.1 mol/L的溶液中,试样表面为较大的片状产物;在0.5 mol/L的溶液中,试样表面生成外形轮廓不清晰的球状产物。这说明镀锌钢表面生成产物的形貌不仅随着时间变化,当 Cl^- 浓度变化时,产物的形貌也有较大的差异。 Cl^- 浓度较低时,产物形貌随着浸泡时间的增加由小球状转变成针状;当浓度较高时,产物形貌随着浸泡时间的增加由细小的针状转变成小球状。

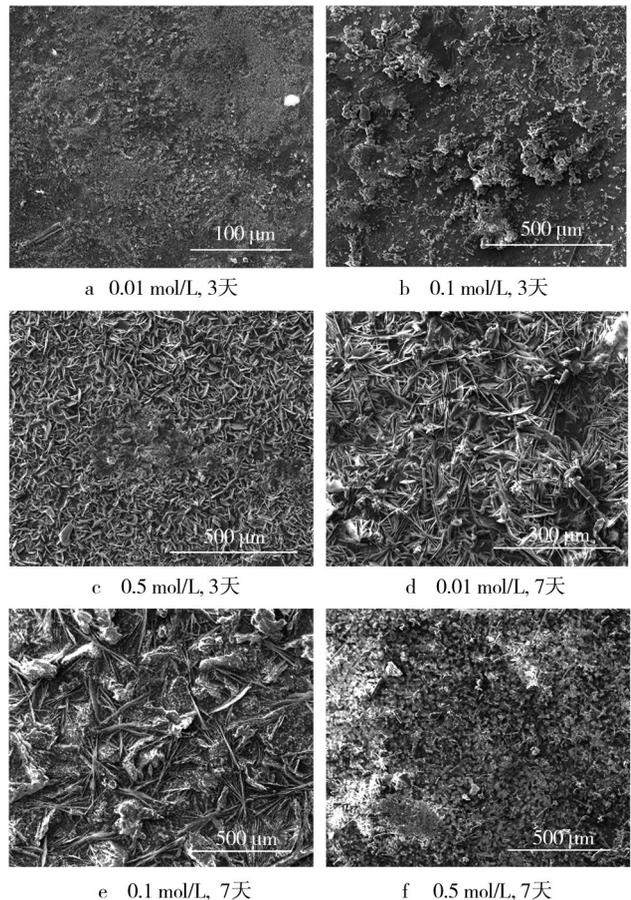


图2 镀锌钢在不同 Cl^- 浓度的模拟酸雨溶液中浸泡不同时间后的表面形貌

Fig.2 The surface morphology of galvanized steel in simulated acid rain solutions with different Cl^- concentration after 3 days' and 7 days' immersion

2.3 电化学分析

图3为镀锌钢试样浸泡前、浸泡3天后和浸泡7天后在 Cl^- 浓度分别为0.01, 0.1, 0.5 mol/L的模拟酸雨溶液中的极化曲线。从图3中可以看出,浸泡前,随着溶液 Cl^- 浓度的增加,镀锌钢的腐蚀电位负移,极化曲线的阳极分支向右移,阳极电流密度增大。说明 Cl^- 浓度的升高使得其对金属的破坏增强,腐蚀速度增大。浸泡3天后,随着溶液 Cl^- 浓度从0.01 mol/L增加到0.1

mol/L时,腐蚀电位急剧减小,阳极分支和阴极分支均向右移,右移的程度反映阳极过程和阴极过程受到腐蚀促进的程度。溶液中Cl⁻浓度从0.1 mol/L增加到

0.5 mol/L时,极化曲线变化不大。浸泡7天后,随着溶液中Cl⁻浓度的增加,腐蚀电位变化不大,阳极电流密度逐渐增大。

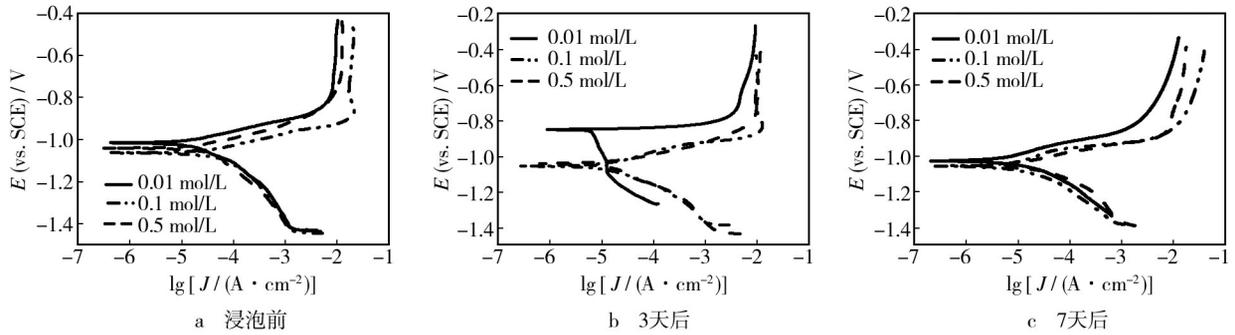


图3 镀锌钢在不同浓度Cl⁻模拟酸雨溶液中浸泡前后的极化曲线

Fig.3 Polarization curves of galvanized steel in simulated acid rain with different Cl⁻ concentration before and after immersion

经过PowerSuite软件计算得到的电化学数据见表1,比较浸泡前后各试样的腐蚀电流密度可知,各试样的腐蚀电流密度随浸泡时间的增加,逐渐减小。说明浸泡后,腐蚀速率逐渐减小,镀锌钢表面形成的产物对基体的保护作用逐渐增强。整个浸泡过程镀锌钢表面锈层产生后,即使Cl⁻浓度继续增大,它对基体的侵蚀也能受到锈层较好的阻碍。

随着Cl⁻浓度的增加,容抗弧半径变化不大,阻抗值保持在几百欧姆左右。浸泡3天后,溶液中Cl⁻浓度从0.01 mol/L增加到0.1 mol/L时,容抗弧半径急剧减小,当再增加到0.5 mol/L时,容抗弧半径继续减小。浸泡7天后,随着Cl⁻浓度从0.01 mol/L增加到0.1 mol/L,容抗弧半径减小,当再增加到0.5 mol/L时,变化较小。说明镀锌钢在此模拟酸雨溶液中,随着Cl⁻浓度数量级从10⁻²增加到10⁻¹,耐蚀性迅速减小,数量级同为10⁻¹时,耐蚀性变化不大。

图4为镀锌钢在不同Cl⁻浓度的模拟酸雨溶液中浸泡前、浸泡3天和浸泡7天后的Nyquist图。浸泡前,

表1 镀锌钢在含不同浓度Cl⁻的模拟酸雨溶液中的腐蚀参数

Table 1 Corrosion parameters of galvanized steel in simulated acid rain with different Cl⁻ concentration

c(Cl ⁻)/ (mol·L ⁻¹)	0天		3天		7天	
	E _{corr} /mV	J _{corr} /(A·cm ⁻²)	E _{corr} /mV	J _{corr} /(A·cm ⁻²)	E _{corr} /mV	J _{corr} /(A·cm ⁻²)
0.01	-1014.6	27.85	-833.1	9.73	-1022.1	9.25
0.1	-1039.4	42.00	-1037.8	22.71	-1051.7	19.34
0.5	-1061.5	63.45	-1050.7	20.84	-1052.6	16.78

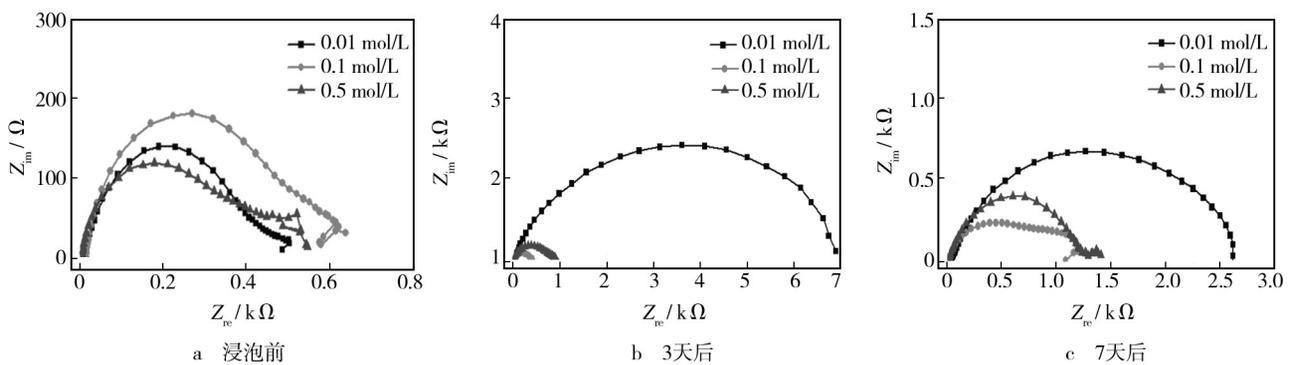


图4 镀锌钢在不同Cl⁻浓度的模拟酸雨溶液中的阻抗谱

Fig.4 Nyquist and Bode plots of galvanized steel in simulated acid rain solutions with different Cl⁻ concentration

对比浸泡前后 Nyquist 图,可以看出浸泡后 Cl^- 浓度为 0.01 mol/L 的溶液中容抗弧半径显著增大,说明在 Cl^- 的量浓度较低时,锈层对基体的保护作用较强。 Cl^- 浓度为 0.1, 0.5 mol/L 的溶液中,随浸泡时间的增加,容抗弧半径变化不大。这是由于 Cl^- 半径较小,它可以很容易地破坏锈层结构,穿过锈层,进而破坏基体。当锈层被破坏后,新的基体表面露出,作为腐蚀电化学反应的阳极,其他部分作为阴极。根据“大阴极,小阳极”理论, Cl^- 浓度的增加,加速了镀锌钢的腐蚀。

3 结论

1) 模拟酸雨溶液中, Cl^- 浓度的增加会使镀锌钢的腐蚀电位下降,腐蚀电流密度增加,阻抗值减小,镀锌钢的耐蚀性逐渐减弱。

2) 浸泡不同时间后,镀锌钢表面形成的腐蚀产物的成分不随浓度发生变化,主要为 $\text{NaZn}_4\text{SO}_4\text{Cl}(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。

3) 在模拟酸雨溶液中,虽然在镀锌钢表面形成的锈层对基体的继续腐蚀有一定的阻碍作用,但是当溶液中 Cl^- 较高时,锈层的保护作用逐渐减弱。浸泡 3 天时,变化最为明显。

参考文献:

- [1] BHATTI N, STREETS D G, FOELL W K. Acid Rain in Asia [J]. *J Environ Manage*, 1992, 16(4): 541—562.
- [2] COLE I S, GANTHER W D, FURMAN S A, et al. Pitting of Zinc: Observations on Atmospheric Corrosion in Tropical Countries[J]. *Corros Sci*, 2010, 52(3): 848—858
- [3] 宋卓, 郭军科, 郭锦龙. 环境对电网材料的腐蚀影响分析及评价[J]. *山西电力*, 2008, 149(5): 7—9.
SONG Zhuo, GUO Jun-ke, GUO Jin-long. Analysis and Evaluation of Environment Influence on Network Material Corrosion[J]. *Shanxi Electric Power*, 2008, 149(5): 7—9.
- [4] 刘雨薇, 王振尧, 王军, 等. 输电塔杆用热浸镀锌钢在模拟酸雨大气环境中的腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2014, 34(5): 426—432.
LIU Yu-wei, WANG Zhen-yao, WANG Jun, et al. Corrosion Behavior of Hot-dip Galvanized Steel for Power Transmission Tower in Simulated Acid Rain Atmospheric Environment[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2014, 34(5): 426—432.
- [5] 原徐杰, 张俊喜, 张世明, 等. 镀锌层破损输电杆塔用镀锌钢在干湿交替作用下的腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2013, 33(5): 395—399.
YUAN Xu-jie, ZHANG Jun-xi, ZHANG Shi-ming, et al. Corrosion Behavior of Galvanized Steel for Power Transmission Tower with Breakage of Zinc Coating in Polluted Environment [J]. *J Chin Soc Corros Prot*, 2013, 33(5): 395—399.
- [6] ODNEVALL I. Atmospheric Corrosion of Field Exposed Zinc—A Multianalytical Characterization of Corrosion Products from Initial Films to Fully Developed Layers[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 1994.
- [7] ALMEIDA E. Atmospheric Corrosion of Zinc Part I: Rural and Urban Atmospheres[J]. *Br Corros J*, 2000, 35(4): 284—288.
- [8] ALMEIDA E. Atmospheric Corrosion of Zinc Part II: Marine Atmospheres[J]. *Br Corros J*, 2000, 35(4): 289—296.
- [9] ODNEVALL I, LEYGRAF C. Formation of $\text{Zn}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ in a Rural Atmosphere[J]. *Corros Sci*, 1994, 36(6): 1077—1091.
- [10] ODNEVALL I, LEYGRAF C. Formation of $\text{NaZn}_2\text{Cl}(\text{OH})_6\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ in a Marine Atmosphere[J]. *Corros Sci*, 1993, 34(7): 1213—1229.
- [11] 杨小奎, 张涛, 张世艳, 等. 环氧富锌涂层对 AZ91D 镁合金的腐蚀防护能力研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(1): 18—23.
YANG Xiao-kui, ZHANG Tao, ZHANG Shi-yan, et al. Research on the Corrosion Protection Properties of Zn-rich Epoxy Coating Provided for AZ91D Magnesium Alloy[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(1): 18—23.
- [12] 安百刚, 张学元, 韩恩厚, 等. Zn 在模拟酸雨溶液中及其液膜下的腐蚀[J]. *金属学报*, 2004, 40(2): 202—206
AN Bai-gang, ZHANG Xue-yuan, HAN En-hou, et al. Corrosion of Zinc in Simulated Acid Rain Solution and under Thin Electrolyte Layer Formation by Simulated Acid Rain Solution [J]. *Acta Metal Sin*, 2004, 40(2): 202—206.
- [13] 刘雨薇, 王振尧, 曹公望, 等. Zn 在模拟酸雨大气环境中的腐蚀行为研究[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 375—383.
LIU Yu-wei, WANG Zhen-yao, CAO Gong-wang, et al. Corrosion Behavior of Zn in Simulated Acid Rain Atmospheric Environment[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 375—383.
- [14] LIU Shuan, SUN Hu-yuan, SUN Li-juan, et al. Effects of pH and Cl^- Concentration on Corrosion Behavior of the Galvanized Steel in Simulated Rust Layer Solution[J]. *Corrosion Science*, 2012, 65: 520—527.
- [15] MAGAINO S, SOGA M, SOBUE K, et al. Zinc Corrosion in Simulated Acid Rain[J]. *Electrochimical Acta*, 1999, 44(24): 4307—4312.
- [16] ZIN I M, HOWARD R L, BADGER S J, et al. The Mode of

- XIONG Yi, LI Qing-kui. Soils in China[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [6] COLE I S, MARNEY D. The Science of Pipe Corrosion: A Review of the Literature on the Corrosion of Ferrous Metals in Soils[J]. Corrosion Science, 2012, 56: 5—16.
- [7] 董超芳, 李晓刚, 武俊伟, 等. 土壤腐蚀的实验研究与数据处理[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(3): 154—160.
DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, WU Jun-wei, et al. Review in Experimentation and Data Processing of Soil Corrosion[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2003, 15(3): 154—160.
- [8] 何树全, 武丽. 材料土壤腐蚀数据库的功能特点与应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2014, 31(4): 57—60.
HE Shu-quan, WU Li. Functions and Applications of Database for Material Soil Corrosion[J]. Corrosion and Protection in Petrochemical Industry, 2014, 31(4): 57—60.
- [9] 陈旭, 杜翠薇, 李晓刚, 等. 含水量对 X70 钢在大港滨海盐渍土壤中腐蚀行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(7): 730—734.
CHEN Xu, DU Cui-wei, LI Xiao-gang, et al. Influences of Water Content on the Corrosion Behavior of X70 Steel in Da-gang Saline-alkaline Soil[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(7): 730—734.
- [10] 章钢娅, 林云青, 卢再亮. Q235 钢在不同湿度红壤中的腐蚀形貌研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(10): 393—396.
ZHANG Gang-ya, LIN Yun-qing, LU Zai-liang. Q235 Steel's Corrosion Morphology in Red Soil under Different Moisture Conditions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(10): 393—396.
- [11] 孙慧珍, 胡士信, 廖宇平. 地下设施的腐蚀与防护[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- SUN Hui-zhen, HU Shi-xin, LIAO Yu-ping. Corrosion and Anticorrosion of the Underground Facilities[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [12] ENNING Dennis, GARRELFs Julia. Corrosion of Iron by Sulfate-reducing Bacteria: New Views of an Old Problem[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(4): 1226—1236.
- [13] 章钢娅, 许敏, 林云青, 等. 常用碳钢在酸性土壤中腐蚀行为的初步研究[J]. 土壤, 2009, 41(3): 500—503.
ZHANG Gang-ya, XU Min, LIN Yun-qing, et al. A Preliminary Study of Common Carbon Steel Corrosion Behavior in Acidic Soil [J]. Soils, 2009, 41(3): 500—503.
- [14] 杜荣归, 刘玉, 林昌健. 氯离子对钢筋腐蚀机理的影响及其研究进展[J]. 材料保护, 2006, 39(6): 45—50.
DU Rong-gui, LIU Yu, LIN Chang-jian. Effect of Chlorine Ions on the Corrosion Behavior of Reinforcing Steel in Concrete[J]. Materials Protection, 2006, 39(6): 45—50.
- [15] 席艳君, 孙成, 李洪锡, 等. 酸性土壤腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(4): 247—248.
XI Yan-jun, SUN Cheng, LI Hong-xi, et al. Acidic Soil Corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(4): 247—248.
- [16] JIANG Jun, XU Ren-kou, ZHAO An-zhen. Comparison of the Surface Chemical Properties of Four Soils Derived from Quaternary Red Earth as Related to Soil Evolution[J]. Catena, 2010, 80(3): 154—161.
- [17] LIU Zhi-yong, DU Cui-wei, ZHANG Xin, et al. Effect of pH Value on Stress Corrosion Cracking of X70 Pipeline Steel in Acidic Soil Environment[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26(4): 489—496.

(上接第 26 页)

- Action of Chromate Inhibitor in Epoxy Primer on Galvanized Steel[J]. Progress in Organic Coatings, 1998, 33(3/4): 203—210.
- [17] 黎学明, 刘强, 孔令峰, 等. 模拟酸雨溶液中应力对镀锌钢绞线腐蚀行为影响[J]. 腐蚀科学与防护, 2008, 20(1): 44—46.
- LI Xue-ming, LIU Qiang, KONG Ling-feng, et al. Corrosion Behavior of Galvanized Steel under Stress in Simulated Acid Rain Solution[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(1): 44—46.