

三种黑色金属的土壤腐蚀行为与土壤性质的关系

姜军¹, 王辉², 张春晓², 赵震杰², 章钢娅¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008;
2. 河南科技大学 环境工程系, 河南 洛阳 471023)

摘要: 目的 揭示黑色金属腐蚀速度与土壤环境因子之间的关系。方法 分析Q235B碳素结构钢、X70和X80管线钢的腐蚀质量损失率和点蚀深度等数据,与土壤的矿物组成和理化性质进行比较。结果 三种钢在江西鹰潭土壤中的腐蚀最为严重,Q235B钢在其他七种土壤中腐蚀状况没有显著性差异,X70管线钢在黑龙江大庆和辽宁沈阳的腐蚀质量损失率较其他非酸性土壤高,而X80管线钢腐蚀状况在各土壤中遵循江西鹰潭>黑龙江大庆>辽宁沈阳=山东大港≥四川成都=西藏拉萨≥新疆库尔勒≥青海格尔木的规律。结论 江西鹰潭红壤中三种钢腐蚀速率高的原因可能在于不均匀的土壤质地,粘粒含量较高使得土壤适宜腐蚀的水分含量保持时间较长和土壤酸度较高。

关键词: 黑色金属; 土壤腐蚀; 腐蚀速率; 点蚀深度

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.008

中图分类号: TJ04; TG172.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0038-06

Relationship of Corrosion of Three Ferrous Metals in Soils and Soil Properties

JIANG Jun¹, WANG Hui², ZHANG Chun-xiao², ZHAO Zhen-jie², ZHANG Gang-ya¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Department of Environment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: **Objective** To elucidate the relationship between the corrosion rate of three ferrous metals and the associated soil properties. **Methods** The weight loss due to corrosion and the pitting depth of Q235B steel, X70 and X80 pipeline steels were analyzed and compared with the composition and the physicochemical properties of soil minerals. **Results** The worst corrosion of three studied ferrous metals was observed in the red soil in Yingtan, Jiangxi Province. The differences of corrosion rate in the other seven soils were not significant for Q235B steel. The significant

收稿日期: 2015-04-27; 修订日期: 2015-06-18

Received: 2015-04-27; Revised: 2015-06-18

基金项目: 国家材料环境腐蚀野外科学观测研究平台项目(2005DKA10400)

Fund: Supported by National Science and Technology Infrastructure Platforms Construction Projects of China(2005DKA10400)

作者简介: 姜军(1978—),男,江苏常州人,副研究员,主要研究方向为土壤表面电化学。

Biography: JIANG Jun(1978—), Male, from Changzhou, Jiangsu, Associate professor, Research focus: soil surface electro-chemistry.

通讯作者: 章钢娅(1955—),女,江苏南京人,研究员,主要研究方向为土壤化学。

Corresponding author: ZHANG Gang-ya(1955—), Female, from Nanjing, Jiangsu, Professor, Research focus: soil chemistry.

larger weight losses of X70 pipeline steel in the non-acidic soils were found in the soils in Daqing and Liaoning, located in Heilongjiang and Liaoning Provinces, respectively. The corrosion rate of X80 pipeline steel in the studied soils followed the order: Yingtan, Jiangxi>Daqing, Heilongjiang>Shenyang, Liaoning=Dagang, Shandong $\geq$ Chengdu, Sichuan=Lhasa, Tibet $\geq$ Korla, Xinjiang $\geq$ Golmud, Qinghai. **Conclusion** The highest corrosion rate of three ferrous metals in the red soil was most likely resulted from the heterogeneous texture as the high content of clays caused long maintenance of moisture and high soil acidity.

KEY WORDS: ferrous metals; soil corrosion; corrosion rate; pitting depth

材料腐蚀是一个世界性的问题,全球每年材料腐蚀损失超过1.8万亿美元^[1],我国每年的材料腐蚀损失占GDP的3%~4%^[2-3]。随着我国经济结构的调整,特别是能源结构的调整,天然气和石油管线的铺设,输电、输水线路的架设都需要大量的钢桩、套管、储罐和电缆等地下设施。

金属的土壤腐蚀分为两类,分别是自然腐蚀和电腐蚀。自然腐蚀又包含了微电池腐蚀、宏电池腐蚀和生物腐蚀;电腐蚀包括了直流杂散电流腐蚀和交流杂散电流腐蚀^[4]。在这些腐蚀类型中,最常见的是微电池和宏电池腐蚀,其中微电池腐蚀源于金属表面物理状态的不均匀性,构成的微观电池各部分应力分布不均匀或变形不均匀;宏电池腐蚀源于土壤性质的不均匀性(氧浓差、盐浓差、温差等)和不同材料连接处性质的差异性。由于我国地域辽阔,拥有砖红壤、红壤、黄壤、暗棕壤、草甸土、潮土和黑土等各类土壤,这些土壤物理、化学和生物学性质迥异^[5],并且不同地区土壤环境差异也很大,因此造成对材料的腐蚀速率和腐蚀类型各异^[6]。

由此,进行材料的土壤腐蚀实验(包括室外现场埋设和室内模拟实验),积累大量的土壤腐蚀数据,对收集到的腐蚀数据进行提炼、分析、归纳,总结腐蚀速度与土壤环境因子之间的关系,有助于更好地理解引起材料腐蚀的土壤环境因素,从而对地下管线等金属和合金材料采取更加有效的保护。

1 试验

1.1 供试金属材料

20世纪50年代末在国家科委组织下建立起来的“国家材料土壤环境腐蚀试验站网”^[7],已经积累了100余万条材料土壤腐蚀数据^[8]。通过调取腐蚀试验站网平台数据,选择Q235B碳素结构钢、X70和X80管线钢等3种黑色金属作为供试金属材料。腐蚀参数包括腐蚀质量损失率、腐蚀失厚率、平均点蚀深度和最大点

蚀深度。每个试件埋藏试验深度为1 m,埋藏时间为1年,实验重复2次。

1.2 供试土壤

分别选择西藏拉萨、青海格尔木、新疆库尔勒、黑龙江大庆、辽宁沈阳、山东大港、四川成都和江西鹰潭等地的土壤为研究对象,调取黑色金属在这些土壤中的腐蚀速度,研究三种黑色金属腐蚀速度与土壤理化性质之间的关系。拉萨、格尔木和库尔勒的主要粘土矿物是水化云母,伴随蒙脱石、高岭石和蛭石;大庆的主要粘土矿物为蒙脱石和水化云母,伴随蛭石和高岭石;沈阳和大港的主要粘土矿物为水化云母和蛭石,伴随蒙脱石和高岭石;成都的主要粘土矿物为蛭石和高岭石,伴随水化云母、蒙脱石、三水铝石和针铁矿;鹰潭的主要粘土矿物为高岭石,伴随有蛭石、水化云母、三水铝石和赤铁矿^[5]。

1.3 统计分析

利用SPSS 13.0软件的Duncan's multiple range test方差分析进行多组样本间差异显著性分析,统计同一金属的腐蚀质量损失率、腐蚀失厚率、平均点蚀深度和最大点蚀深度在不同土壤中是否存在显著差异。Pearson相关分析研究腐蚀质量损失率与平均点蚀深度,腐蚀质量损失率与最大点蚀深度之间的相关性。Origin 8.0线性拟合全盐与浸出液电导率,浸出液电导率与泥糊电导率之间的相关性。

2 结果与讨论

2.1 三种钢在8种土壤中的腐蚀速度

在“国家材料土壤环境腐蚀试验站网”平台的资助下,2006—2007年各土壤腐蚀站点进行了为期1年的黑色和有色金属野外埋藏实验,埋藏深度为1 m。选择Q235B碳素结构钢、X70和X80管线钢的腐蚀数据,与土壤理化性质数据进行分析,以期初步获得这

三种钢的土壤腐蚀参数与土壤性质之间的关系。Q235B 碳素结构钢的腐蚀质量损失率、腐蚀失厚率、平均和最大点蚀深度见表 1。

表 1 Q235B 碳素结构钢在 8 个地区埋藏 1 年的腐蚀指标
Table 1 Corrosion indicators for Q235B basic steel buried one year in-situ in eight districts

地区	腐蚀质量损失 率/(g·cm ⁻² ·a ⁻¹)	腐蚀失厚率/ (mm·a ⁻¹)	平均点蚀 深度/mm	最大点蚀 深度/mm
西藏拉萨	0.023b	0.029b	0.137b	0.190b
青海格尔木	0.022b	0.028b	0.123b	0.175b
新疆库尔勒	0.022b	0.028b	0.108b	0.175b
黑龙江大庆	0.026b	0.033b	0.126b	0.165b
辽宁沈阳	0.028b	0.036b	0.161b	0.205b
山东大港	0.028b	0.035b	0.079b	0.115b
四川成都	0.025b	0.032b	0.103b	0.155b
江西鹰潭	0.070a	0.090a	0.516a	0.685a

注:采用 Duncan' s multiple range test 方差分析,同一列不同字母表示显著性差异($P<0.05$)

结果表明,Q235B 钢在江西鹰潭红壤中四项指标均最高,与其他土壤达到显著差异($P<0.05$)。腐蚀质量损失率、失厚率、平均点蚀深度和最大点蚀深度分别比其他 7 种土壤高 1.50 ~ 2.18, 1.50 ~ 2.21, 2.77 ~ 5.53 和 2.34 ~ 4.96 倍。Duncan' s multiple range test 方差分析结果表明,另外 7 种土壤,Q235B 的四项腐蚀参数不存在显著差异($P>0.05$)。

X70 管线钢的腐蚀质量损失率、腐蚀失厚率、平均和最大点蚀深度见表 2。

表 2 X70 管线钢在 8 个地区埋藏 1 年的腐蚀指标
Table 2 Corrosion indicators for X70 pipeline steel buried one year in-situ in eight districts

地区	腐蚀质量损失 率/(g·cm ⁻² ·a ⁻¹)	腐蚀失厚率/ (mm·a ⁻¹)	平均点蚀 深度/mm	最大点蚀 深度/mm
西藏拉萨	0.023c	0.029c	0.220b	0.360b
青海格尔木	0.018c	0.023c	0.157b	0.210b
新疆库尔勒	0.021c	0.027c	0.127b	0.175b
黑龙江大庆	0.031b	0.040b	0.190b	0.265b
辽宁沈阳	0.028b	0.036b	0.214b	0.315b
山东大港	0.023c	0.030c	0.121b	0.170b
四川成都	0.023c	0.030c	0.118b	0.190b
江西鹰潭	0.067a	0.085a	1.107a	1.660a

表 2 结果表明,X70 管线钢在江西鹰潭红壤埋

藏 1 年后,腐蚀质量损失率和失厚率分别达到 0.067 g/(cm²·a)和 0.085 mm/a,显著高于埋藏于黑龙江大庆和辽宁沈阳土壤中的 X70 管线钢($P<0.05$),而后两种土壤又显著高于西藏拉萨、青海格尔木、新疆库尔勒、山东大港和四川成都土壤中 X70 管线钢的腐蚀质量损失率和失厚率($P<0.05$)。X70 管线钢在江西鹰潭的平均点蚀深度和最大点蚀深度也最高,分别达到 1.107 和 1.660 mm,比其他土壤高 4.03 ~ 8.38 倍和 2.07 ~ 5.32 倍。因此,X70 管线钢在江西鹰潭红壤中腐蚀最为严重,与其他土壤存在显著差异,次之为黑龙江大庆和辽宁沈阳土壤,而西藏拉萨、青海格尔木、新疆库尔勒、山东大港和四川成都埋藏点的 X70 管线钢腐蚀最弱。

X80 管线钢的腐蚀质量损失率、腐蚀失厚率、平均和最大点蚀深度见表 3。

表 3 X80 管线钢在 8 个地区埋藏 1 年的腐蚀指标
Table 3 Corrosion indicators for X80 pipeline steel buried one year in-situ in eight districts

地区	腐蚀质量损失 率/(g·cm ⁻² ·a ⁻¹)	腐蚀失厚率/ (mm·a ⁻¹)	平均点蚀 深度/mm	最大点蚀 深度/mm
西藏拉萨	0.024cd	0.031cd	0.215b	0.345b
青海格尔木	0.017e	0.021e	0.129b	0.170cd
新疆库尔勒	0.020de	0.026de	0.091b	0.120d
黑龙江大庆	0.036b	0.046b	0.157b	0.205cd
辽宁沈阳	0.029c	0.037c	0.234b	0.275bc
山东大港	0.028c	0.036c	0.173b	0.230bcd
四川成都	0.025cd	0.032cd	0.084b	0.135d
江西鹰潭	0.077a	0.099a	0.843a	1.105a

与 Q235B 碳素结构钢和 X70 管线钢腐蚀参数相似,江西鹰潭红壤中埋藏的 X80 管线钢腐蚀最为严重,腐蚀质量损失率、失厚率、平均点蚀深度和最大点蚀深度均显著高于其他 7 种土壤($P<0.05$)。对腐蚀质量损失率和失厚率而言,X80 管线钢腐蚀状况在各土壤中遵循以下规律:江西鹰潭>黑龙江大庆>辽宁沈阳=山东大港≥四川成都=西藏拉萨≥新疆库尔勒≥青海格尔木。X80 管线钢平均点蚀深度在江西鹰潭为 0.843 mm,为其他土壤的 3.60 ~ 10.03 倍。方差分析结果表明,平均点蚀深度在其他 7 种土壤上没有显著差异($P>0.05$)。最大点蚀深度表现为:江西鹰潭>西藏拉萨≥辽宁沈阳≥山东大港≥青海格尔木=黑龙江大庆≥四川成都=新疆库尔勒。

表 1—3 结果表明,三种黑色金属在土壤中的腐蚀行为都表现为江西鹰潭最为严重。对江西鹰潭红壤中

埋藏的Q235B, X70和X80钢材的腐蚀参数进行比较,发现三种金属的腐蚀质量损失率和失厚率不存在显著差异($P>0.05$),平均点蚀深度为 $X70(a) \geq X80(ab) \geq Q235B(b)$,而最大点蚀深度 $X70(a) > X80(b) > Q235B(c)$ 。因此, X70管线钢在江西鹰潭红壤中的腐蚀最为严重,其次为X80管线钢和Q235B碳素结构钢。

2.2 不同腐蚀因子间的相关性分析

将得到的三种金属材料在8种土壤上的腐蚀因子进行相关性分析,研究腐蚀质量损失率与平均点蚀深度,腐蚀质量损失率与最大点蚀深度之间的关系。结果发现,腐蚀质量损失率与平均点蚀深度(如图1a所示),腐蚀质量损失率与最大点蚀深度(如图1b所示)之间存在极显著正相关关系, Pearson 相关系数 r 分别达到0.88和0.85($P=0.00$)。这说明在自然腐蚀条件下,对于腐蚀状况差异较大的土壤而言,腐蚀质量损失率与点蚀深度之间有很好的相关性。

在分析腐蚀情况最为严重的江西鹰潭红壤中腐蚀质量损失率与点蚀深度之间的关系时发现,腐蚀质量损失率与平均点蚀深度、最大点蚀深度之间不存在显著相关。相关系数 r 分别为-0.86和-0.30,概率 P 值分别为0.87和0.56,均远大于所设定的0.05显著性水平(如图1所示)。因此,对于腐蚀质量损失率相似的

金属材料而言,其平均腐蚀深度、最大腐蚀深度很可能不一致。

野外埋藏实验一般采用腐蚀质量损失率作为腐蚀指标,然而埋藏实验中的点蚀深度,尤其是最大点蚀深度,对采用何种阴极保护措施具有重要意义。当进行阴极保护设计时,必须综合考虑各种腐蚀因子,选取腐蚀参数最大值,据此才能设计出最合适的阴极保护措施。

2.3 土壤理化性质对黑色金属腐蚀速度的影响

一般而言,随着土壤水分的增加,金属的腐蚀电流密度会先增加,后降低^[9-10]。有机质含量越丰富,微生物可以利用的营养物质也越多,当pH值接近中性且有一定量硫酸盐的强还原性土壤,造成的生物腐蚀也越严重^[11-12]。pH值越低, H^+ 去极化腐蚀作用越强^[13], Cl^- 能破坏钢铁表面钝化膜而催化钢材料的腐蚀^[14]。全盐和电导率越高的土壤,电阻率越低,腐蚀电路中电流较大,腐蚀较严重^[15]。

通常金属在非酸性土壤中发生吸氧腐蚀,遵循反应方程式:



所选的8种供试土壤基本性质列于表4,土壤水分含量变化较大,在3.23%~35.47%之间。 Cl^- 含量、全盐量和电导率最高的是青海格尔木和山东大港土壤, X70, X80和Q235B钢的腐蚀情况并不严重,原因可能在于这两种土壤水分含量很低(10.50%)或很高(34.60%),而在非酸性土壤中金属的腐蚀需要 O_2 和 H_2O 同时存在,才有利于吸氧腐蚀的进行。辽宁沈阳土壤有机质含量最高,为2.37%,但仍属于较低水平,另外沈阳土壤中 SO_4^{2-} 含量非常低(0.81 mmol/kg),所以硫酸盐还原菌(SRB)的丰度也不高,造成沈阳土壤中三种钢材的腐蚀并不严重。

江西鹰潭红壤中三种钢材发生严重腐蚀的原因可能主要在于:

1) 土壤质地不均匀。章钢娅等发现, A3钢在鹰潭质地不均匀的砾石土上经过0.27 a的埋藏实验,腐蚀速率高达 $0.17 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$,而均匀红粘土中A3钢的腐蚀速率仅为 $0.05 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ^[13]。埋藏点土壤质地不均一,极易发生氧浓差导致的宏电池腐蚀。

2) 水分含量适宜。江西鹰潭土壤含水量在22.96%,较适合金属腐蚀的发生。由于江西红壤的粘粒含量较高,一般在40%左右^[16],保持适宜于腐蚀的水分含量时间较长。

3) pH值较低。氧电极电位与pH值的关系式为:

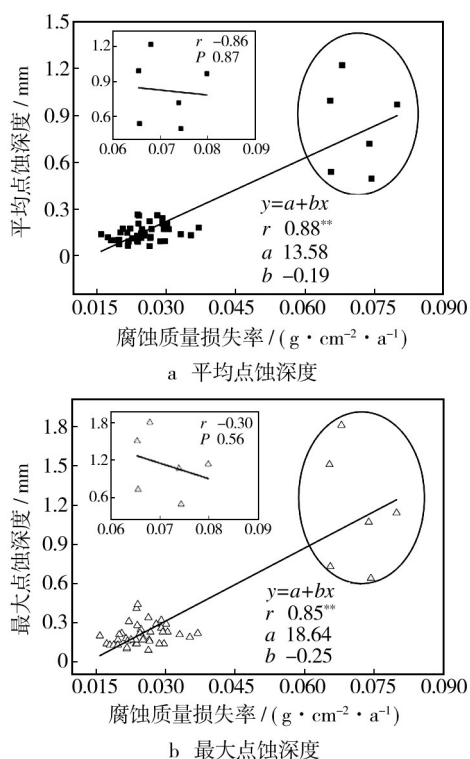


图1 腐蚀质量损失率与平均点蚀深度、最大点蚀深度之间的关系
Fig.1 Relationship of weight loss with average pitting depth and the maximum pitting depth

表4 供试土壤的基本性质
Table 4 Basic properties of the studied soils

	水分/ %	有机质/ %	pH	$n(\text{SO}_4^{2-})/$ (mmol·kg ⁻¹)	$n(\text{Cl}^-)/$ (mmol·kg ⁻¹)	全盐/ (g·kg ⁻¹)	浸出液电导率(1:5)/ (mS·cm ⁻¹)	泥糊电导率(1:0.5)/ (mS·cm ⁻¹)
西藏拉萨	8.85	0.62	8.58	9.78	3.44	1.30	0.37	1.06
青海格尔木	10.50	0.36	8.06	161.60	5912.50	355.26	55.20	62.10
新疆库尔勒	3.23	0.07	8.86	83.83	18.28	7.34	1.60	2.65
黑龙江大庆	31.90	0.23	9.08	2.42	2.80	0.59	0.17	0.66
辽宁沈阳	22.21	2.37	8.00	0.81	0.86	0.39	0.06	0.13
山东大港	34.60	0.41	8.65	37.10	532.13	33.56	8.10	25.60
四川成都	35.47	0.26	8.39	2.93	0.54	0.43	0.08	0.52
江西鹰潭	22.96	0.44	4.93	0.20	0.22	0.04	0.00	0.01

$E_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}} = 1.229 - 0.059 \text{ pH}$,显然,pH值越低,氧的平衡电位越正,金属发生吸氧腐蚀的可能性也越大。当土壤pH小于5.0,阴极发生析氢反应的可能性也显著增加^[17]。

同时,通过对土壤全盐与浸出液电导率、浸出液电导率和泥糊电导率进行Origin 8.0线性拟合发现(如图2所示),相关系数 R^2 分别达到1.00和0.92 ($P=0.00, 0.00$),均达到极显著正相关关系,证明土壤全盐量与电导率之间存在很好的相关性。因此,盐分含量高的土壤,导电离子浓度也高,电导率越强。

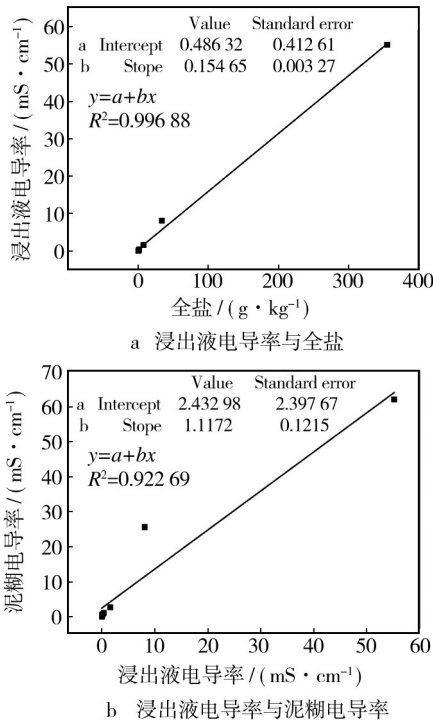


图2 浸出液电导率与全盐、泥糊电导率之间的关系
Fig.2 Relationship of the electrical conductivity of the soil extracts with the salt content and the saturated paste

3 结论

通过比较Q235B,X70和X80三种钢材在8种土壤中的腐蚀参数,可以得出以下结论。

1) 自然腐蚀条件下,对于腐蚀状况差异较大的土壤来说,腐蚀质量损失率与点蚀深度之间有很好的相关性。对腐蚀质量损失率相似的金属材料而言,其平均腐蚀深度、最大腐蚀深度很可能不一致。

2) 中性和碱性土壤中Q235B,X70和X80钢的腐蚀率明显小于弱酸性的江西鹰潭红壤。原因在于江西鹰潭红壤质地不均匀,粘粒含量较高,水分含量适宜且pH值较低。

参考文献:

[1] SCHMITT G ü nter. Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control[M]. New York: World Corrosion Organization, 2009.

[2] ZHAO L, TENG H, YANG Y, et al. Corrosion Inhibition Approach of Oil Production Systems in Offshore Oilfields[J]. Materials and Corrosion, 2004, 55(9): 684—688.

[3] 李臣生,赵斌,褚跃民,等. 硫化氢对气田钢材的腐蚀影响及防治[J]. 断块油气田, 2008, 15(4): 126—128.

LI Chen-sheng, ZHAO Bin, CHU Yue-min, et al. Impact of Hydrogen Sulfide Corrosion to Steels in Gas Field and the Preventive Measures[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(4): 126—128.

[4] 张道明,刘继旺. 谈谈土壤腐蚀[J]. 油田地面工程, 1990(9): 41—43.

ZHANG Dao-ming, LIU Ji-wang. Discussion on the Soil Corrosion[J]. Oil Surface Engineering, 1990(9): 41—43.

[5] 熊毅,李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

- 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(20): 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.