

# Cu-P-RE 耐候钢的耐蚀性能

岳丽杰<sup>1)</sup> 陈为公<sup>2)</sup> 王龙妹<sup>3)</sup>

1) 山东科技大学材料科学与工程学院, 青岛 266510 2) 青岛理工大学管理学院, 青岛 266520

3) 钢铁研究总院冶金工艺研究所, 北京 100081

**摘要** 通过干湿周浸加速腐蚀实验研究了不同稀土含量的耐候钢和对比普碳钢的腐蚀行为及其耐蚀性能. 采用失重法测得了各试样的腐蚀率; 结果发现, 稀土耐候钢的腐蚀率远低于普碳钢的, 不同稀土含量的耐候钢的耐蚀性不尽相同. 采用电化学交流阻抗技术对带锈钢样的表面锈层结构及电化学反应过程进行了研究, 提出在本实验条件下钢电化学腐蚀的等效电路模型, 计算出锈层电阻、极化阻抗等表征锈层性能的电化学元件参数值. 稀土耐候钢锈层中存在半无限扩散和有限厚度扩散两种过程, 有限厚度扩散极化阻抗反映了耐候钢内锈层的保护性能.

**关键词** 稀土; 耐候钢; 交流阻抗; 锈层; 耐蚀性

**分类号** TG 142.4

## Corrosion resistance of Cu-P-RE weathering steel

YUE Li-jie<sup>1)</sup>, CHEN Wei-gong<sup>2)</sup>, WANG Long-mei<sup>3)</sup>

1) School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

2) Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China

3) Institute of Metallurgy Technics, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China

**ABSTRACT** The corrosion behavior and corrosion resistance of Cu-P-RE weathering steel and plain carbon steel were studied by dry-wet cycle immersion test. A weight-loss method was used to measure the corrosion rates of all steel samples. The results show the corrosion rate of Cu-P-RE weathering steel is much lower than that of Q235 steel. The corrosion resistances of the weathering steels with different rare earth contents are distinguishing. The structure of rust layer on the rusty steel samples and its electrochemical reaction process were investigated by electrochemical impedance spectra techniques. An equivalent circuit was set up to represent the steel/solution interface reaction. Some electrochemical parameters such as rust layer resistance and polarization impedance were deduced from electrochemical impedance spectra of the steels. The parameters can estimate the protective properties of rust layer. There are two different diffusion processes, which are semi-infinite diffusion and finite thickness diffusion, in rust layer on the RE weathering steel. The protective properties of inner rust layer on the weathering steel can be estimated by the polarization impedance of finite thickness diffusion.

**KEY WORDS** rare earth; weathering steel; electrochemical impedance spectroscopy; rust layer; corrosion resistance

耐候钢是在国民经济建设中占有重要地位的钢种, 10PCuRE 耐候钢是利用我国丰富的稀土资源优势发展的耐候钢, 大气腐蚀是其常见的腐蚀形式. 由于影响大气腐蚀的因素较多且难以控制, 因此人们进行了大量的实验<sup>[1-4]</sup>来研究耐候钢的大气腐蚀规律及其耐蚀机理, 利用 X 射线衍射、扫描电镜和

电子探针等现代物理测试手段<sup>[5-8]</sup>对其锈层的物相组成、形貌和结构等进行了研究, 从物理角度对钢的耐蚀能力进行了定性分析.

耐候钢在大气中的腐蚀属于薄液膜下的电化学反应, 具有一般电化学反应的特征, 因此利用电化学方法来研究钢与介质的电化学反应过程, 则更能反

收稿日期: 2008-06-10

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目 (No. 2002BA315A05)

作者简介: 岳丽杰 (1979-), 女, 副教授, 博士, E-mail: yuelijie26@126.com

映出耐候钢发生腐蚀反应的本质以及钢与介质间的界面反应信息,从而可以对耐候钢的大气腐蚀规律和耐蚀机理进行更为详尽的研究. 本文利用交流阻抗电化学方法对干湿周浸实验室加速腐蚀实验条件下获得的 10PCuRE 耐候钢和碳钢带锈层试样进行了研究,得到了评价钢耐蚀能力的定量电化学指标,从电化学角度评价了锈层的保护性能.

表 1 实验钢化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of steels

编号	C	Mn	Si	S	O	P	Cu	RE
Q235	0.150	0.41	0.17	0.0120	0.0100	—	—	—
1 <sup>#</sup>	0.095	0.44	0.21	0.0045	0.0024	0.102	0.31	0.0120
2 <sup>#</sup>	0.090	0.43	0.20	0.0040	0.0027	0.104	0.31	0.0160
3 <sup>#</sup>	0.090	0.45	0.18	0.0040	0.0034	0.100	0.31	0.0089

## 1.2 实验方法

利用北京科技大学腐蚀中心周浸实验箱进行周期性浸润腐蚀实验,实验溶液为  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NaHSO}_3$ ,实验温度控制在  $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $70\% \pm 5\%$ ,每个循环周期 60 min,其中浸润时间 15 min,烘烤后试样表面最高温度  $70 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . 试样加速腐蚀的时间分别为:72, 168, 240 h. 经过浸渍后的试样一部分用于计算腐蚀率,一部分用于测量交流阻抗谱图. 浸渍干湿循环试样尺寸为  $35 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,测定腐蚀失重之前采用无水乙醇脱水,丙酮除油,然后将试样置于干燥塔内干燥 24 h 后称重. 腐蚀后采用 500 mL 盐酸+500 mL 去离子水+10 g 六次甲基四胺清除腐蚀产物<sup>[9-10]</sup>,同时用未腐蚀试样来校正除锈液对基体的腐蚀量,以保证实验数据的准确性及重现性. 每组选取三个试样,取其平均值作为最终结果. 采用 SALTRON 1255B 频率响应分析仪和 1480 恒电位仪进行交流阻抗测试. 采用三电极体系,试样工作面积为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  左右,保持工作面锈层完整无脱落,背面焊导线,除工作面以外其余部位密封. 实验溶液为  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NaCl}$  和  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$  混合溶液. 扫描频率范围  $1 \times 10^6 \sim 0.01 \text{ Hz}$ ,每个数量级取八个数据点. 正弦交流电压作为激励信号,幅值 10 mV. 选用 Zview 软件分析数据.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 周浸腐蚀实验结果

采用失重法对周浸不同时间的实验耐候钢样及对比普碳钢的腐蚀率进行计算,结果见表 2. 由结果可以看出,所有试样的腐蚀率都是在初期迅速达到

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验稀土耐候钢采用实验室真空感应炉冶炼,化学成份见表 1,加入的稀土为含铈 48.93%(质量分数)的混合稀土. 采用 Q235 钢作为对比样.

极大值,然后下降. Q235 钢在各个阶段的腐蚀率都远大于其他试样,在后期其腐蚀率下降的趋势渐缓,仍然以较大的腐蚀速度继续腐蚀. 说明 Q235 钢无论在裸露状态还是有锈层的情况下其耐蚀性都不如耐候钢,其锈层对基体的保护作用非常弱. 比较其他三种耐候钢试样,腐蚀率下降的速度各不相同,表明不同稀土含量的耐候钢其耐蚀锈层生成的速度和耐蚀性能也是不同的. 稀土质量分数为 0.0089% 的 3<sup>#</sup> 在各个腐蚀阶段的腐蚀率均较低;稀土质量分数为 0.012% 的 1<sup>#</sup> 试样的腐蚀率下降速度最快,说明其稳定耐蚀锈层生成的速度较快,耐蚀能力最好. 分析发现,随着稀土含量的增加,稀土耐候钢的耐蚀性并非越来越好,稀土质量分数为 0.016% 的 2<sup>#</sup> 试样在腐蚀过程中腐蚀率下降较缓慢,腐蚀 240 h 后其腐蚀率为最大,耐蚀性最差. 以上说明稀土可以提高耐候钢的耐蚀能力,但必须保证在一定的含量范围内.

表 2 试样各周期腐蚀速率

Table 2 Corrosion rates of steels in different cycles

试样号	腐蚀率(72h)/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	腐蚀率(168h)/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	腐蚀率(240h)/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )
1 <sup>#</sup>	4.491	2.451	1.824
2 <sup>#</sup>	3.793	2.408	1.844
3 <sup>#</sup>	3.739	2.560	1.792
Q235	6.444	3.134	2.816

### 2.2 交流阻抗实验

#### 2.2.1 交流阻抗谱图及等效电路

交流阻抗方法是用小幅度正弦交流信号扰动电解池,通过观察体系在稳态时扰动的跟随情况来

研究电极反应过程,同时测量电极的阻抗以判定材料耐蚀性能的一种腐蚀电化学研究方法. 本实验采用幅值为 10 mV 的正弦电压信号作为激励信号,在  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  和  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SO}_4$  混合溶液

中对 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 Q235(周浸 240 h 的带锈样)进行了测试,得出的各个试样在测试溶液中浸泡不同时间的交流阻抗谱图见图 1 和图 2 所示.

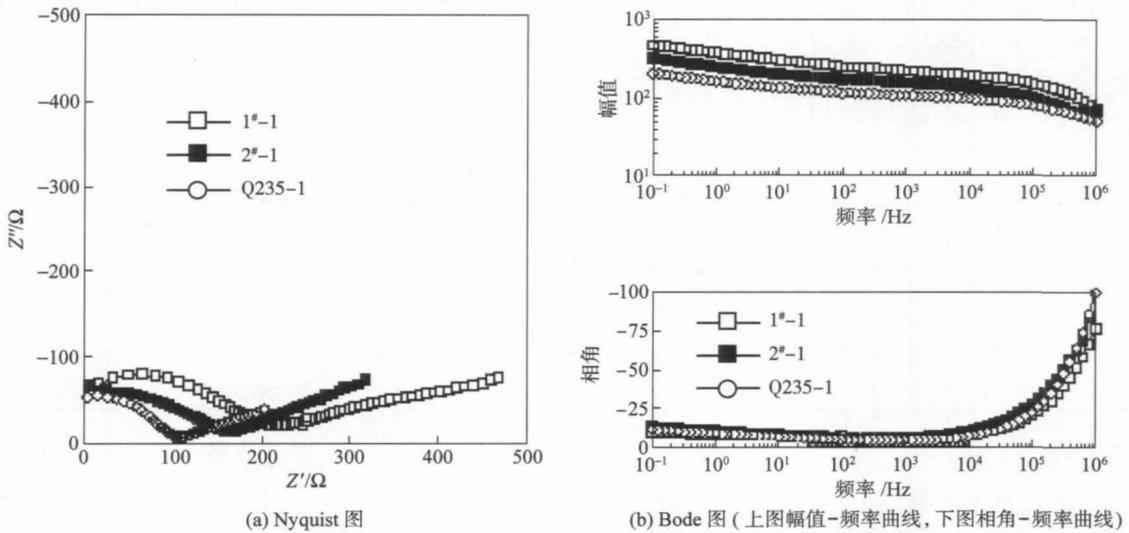


图 1 带锈样在溶液中浸泡 40 min 后的 EIS 谱

Fig.1 EIS spectra of rusty steel samples immersed in the solution for 40 min

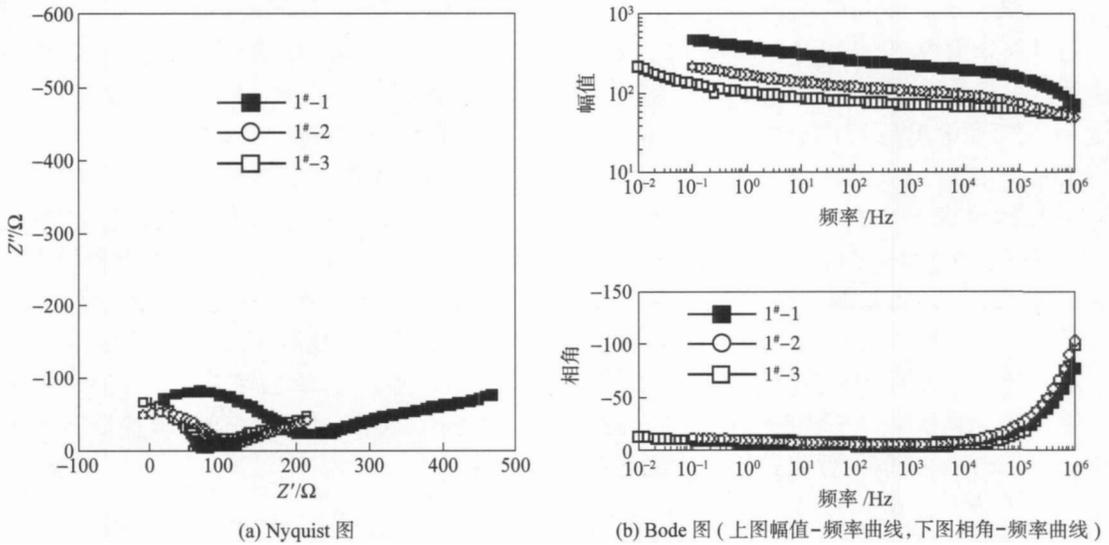


图 2 1<sup>#</sup>试样在溶液中浸泡 40, 80, 120 min 后的 EIS 谱

Fig.2 EIS spectra of Sample 1<sup>#</sup> immersed in solution for 40, 80, 120 min

图 1 为各试样在测试溶液中浸泡 40 min 后测得的交流阻抗谱图,图 2 是同一试样 1<sup>#</sup>在溶液中分别浸泡 40, 80, 120 min 后测的阻抗谱图,分别采用编号“试样号-1、试样号-2 和试样号-3”来表示. 根据试样的交流阻抗图以及带锈钢样在溶液中的腐蚀电化学体系的特征,可以推测出相应的等效电路. 所有试样的阻抗谱图均包括两个容抗弧以及一条扩散线. 阻抗谱高频段的容抗弧说明锈层本身有一定

的充电放电能力,可以等效成一个电容,加上锈层本身具有一定电阻,电容充电过程结束后,电流将通过锈层,因此锈层在整个电化学电路中可以等效为一个电阻( $R_R$ )与一个跨接电容( $C_R$ )并联. 中频段的容抗弧反映了电极/电解质溶液两相界面的双电层的充放电行为和电荷传输过程,分析发现容抗弧产生了较大的压缩变形,这是由于电极表面粗糙造成电极/溶液界面中电场分布不均匀等引起的弥散效

应,与双电层的性质有关.采用常相角元件 CPE 代替电容  $C_d$  来模拟双电层将更接近于实际测量数据.由于中频区的电荷传输反应引起的阻抗与低频区的扩散过程引起的阻抗相重叠,故此区域的阻抗谱产生了更大的变形.图谱中低频区的直线,反映了浓差和扩散对电极反应的影响.分析本实验的阻抗谱结果,得到浓差极化阻抗是由两种扩散过程引起的.一种是半无限扩散过程引起的,用  $n=0.5$  的常相角元件来表示;另一种为有限厚度扩散过程引起的,用双曲线正切阻抗( $W_s$ )来表示.可以得出带锈钢样在电解液中的电化学腐蚀体系同时存在着电化学极化和浓差极化两种过程,电极总的阻抗是由这两种过程引起的阻抗串联组成,即电荷传输电阻  $R_C$  加上浓差极化阻抗  $Z_w$ .根据上面的分析建立了对应于实际腐蚀体系的阻抗谱的等效电路见图 3 所示.

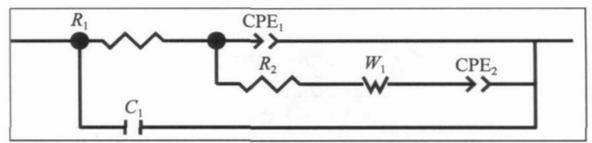


图 3 试样交流阻抗谱的对应等效电路  
Fig.3 Equivalent circuit for fitting EIS data

图 3 的等效电路用电路表示码(CDC)表示为  $(C(R(CPE(RW_sCPE))))$ ,采用 Zview 电化学软件运用该电路对各个试样的阻抗谱进行了拟合,结果发现在  $5 \times 10^5 \sim 0.01$  Hz 的频率范围内实测数据与拟合数据符合得非常好,拟合方差小于 0.1%,结果见图 4.说明  $(C(R(CPE(RW_sCPE))))$  电路可以描述带锈钢样的腐蚀电化学和传质过程,进而可以很好地表征钢样表面锈层的结构和性能特征.

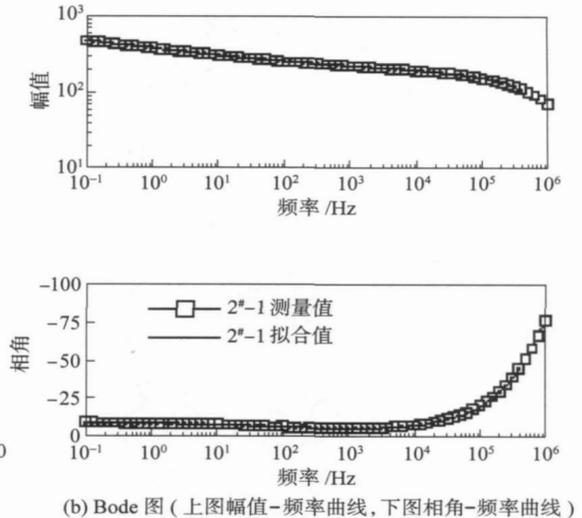
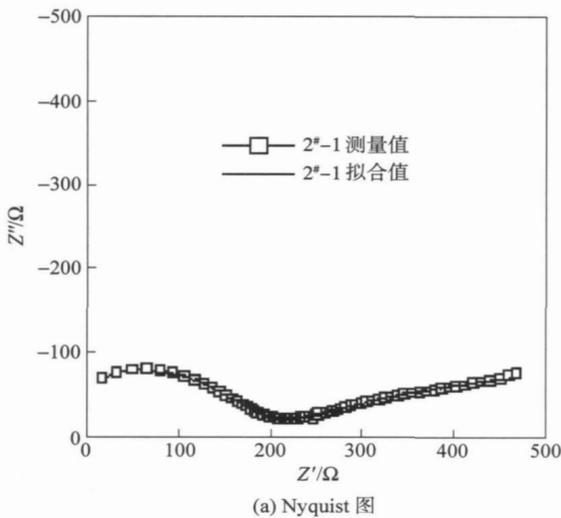


图 4 2<sup>#</sup>-1 试样的交流阻抗谱拟合结果  
Fig.4 Fitting results of EIS spectra of Sample 2<sup>#</sup>-1

图 3 中  $C_1$ 、 $R_1$  是描述钢样锈层特征的等效电阻和电容.  $R_1$  反映的是电场作用下膜中离子迁移时所受阻力或是电极反应所受阻力,与溶解速度成反比.  $C_1$  与膜表面粗糙度成正比,与膜厚成反比. CPE 为常相角元件,其阻抗值为:

$$Z = 1/[T(j\omega)^p] \quad (1)$$

当  $0 < p < 1$  时用来模拟存在弥散效应的双电层电容,即图中的  $CPE_1$ ;当  $p = 0.5$  时用来表示半无限扩散过程引起的浓差极化阻抗,即图中的  $CPE_2$ .  $R_2$  为电荷传输电阻,主要是反映电荷在传输过程中受到的界面双电层静电场的作用.  $W_1$  为双曲线正切阻抗,其阻抗值为:

$$Z = R \tanh((jT\omega)^p)(jT\omega)^{-p} \quad (2)$$

式中  $W_1-R$  为 Warburg 电阻,  $W_1-p$  锁定为 0.5,  $W_1-T = L^2/D$ ,为有效扩散厚度的平方与粒子有效扩散系数的比值.通过拟合获得了上述各电化学元件的参数,结果见表 3.在这里选取了能有效表征材料耐蚀性能的  $R_1$ 、 $C_1$  和  $W_1$  的三个数据进行讨论.由于电荷传输电阻  $R_2$  与钢所处的电化学体系有关以及中频段的曲线变形严重难以确定其值,故不予讨论.

### 2.2.2 等效电路中电化学元件参数

从表 3 的结果看出,浸泡不同时间的各试样电容值  $C_1$  均是以 Q235、2<sup>#</sup> 和 1<sup>#</sup> 顺序减少的;说明试

表 3 等效电路中各电化学元件的参数值

Table 3 Parameters of electrochemical elements in the equivalent circuit

试样号	$R_1/\Omega$	$W_1-R/\Omega$	$W_1-T/s$	$C_1/F$	总阻抗, $R/\Omega$
1 <sup>#</sup> -1	145.50	215.40	$7.11 \times 10^{-5}$	$2.53 \times 10^{-9}$	360.90
1 <sup>#</sup> -2	114.70	180.50	$5.09 \times 10^{-5}$	$3.18 \times 10^{-9}$	295.20
1 <sup>#</sup> -3	106.40	164.30	$4.71 \times 10^{-5}$	$4.60 \times 10^{-9}$	270.70
2 <sup>#</sup> -1	110.50	181.45	$4.09 \times 10^{-5}$	$5.08 \times 10^{-9}$	291.95
2 <sup>#</sup> -2	84.11	135.44	$2.96 \times 10^{-5}$	$6.67 \times 10^{-9}$	219.55
2 <sup>#</sup> -3	65.64	89.10	$1.58 \times 10^{-5}$	$7.50 \times 10^{-9}$	154.74
Q235 <sup>#</sup> -1	82.56	77.46	$2.46 \times 10^{-5}$	$6.77 \times 10^{-9}$	220.02
Q235 <sup>#</sup> -2	45.66	50.23	$1.60 \times 10^{-5}$	$7.10 \times 10^{-9}$	95.89
Q235 <sup>#</sup> -3	29.52	31.56	$9.10 \times 10^{-6}$	$8.01 \times 10^{-9}$	61.08

样表面锈层 Q235 钢最粗糙, 1<sup>#</sup> 生成的锈层最均匀致密. 这一点从锈层的外观形貌上会得到证实. 可见 1<sup>#</sup> 试样的具有保护性的内锈层最厚. 结合图 3 的等效电路分析, 可以认为耐候钢的表面由两层性质有所差异的部分构成, 表层有一层能够与测试溶液发生电化学反应的物质; 这一层向内存在一层较为致密的物质, 该层的存在阻碍了反应向内部的进行. 外锈层结构疏松多孔, 并且由于生长速度过快, 存在许多裂纹, 物质在其中的传输速度远大于在内锈层的传输速度. 所以物质在内锈层的传输就成为反应的控速步骤. 有限厚度扩散即反映了这一传质过程, 其中极化阻抗参数  $W_1-T = L^2/D$  中的  $L$  就表示了内锈层的相对厚度. 如果假定物质在内锈层中的扩散系数是相同的, 即假定所有试样内锈层的组成和密度是一样的, 则可以通过比较  $W_1-T$  值的大小来比较各个试样的  $L$  值(即内锈层的厚度). 从表 3 看出,  $W_1-T$  是按着 Q235、2<sup>#</sup> 和 1<sup>#</sup> 的顺序增大的; 说明 1<sup>#</sup> 稀土耐候钢的内锈层厚度最大, 在腐蚀过程中疏松多孔的外层逐渐转变为致密稳定的内锈层, 锈层的保护能力增强, 钢的耐蚀能力提高.

随着试样在溶液中浸泡时间的延长, 总阻抗值逐渐降低, Q235 钢阻抗下降的趋势最大, 如图 5 所示. 稀土耐候钢的总阻抗远远大于普碳钢的. 总阻抗是锈层电阻  $R_1$  与扩散引起的 Warburg 电阻  $W_1-R$  的和, 阻抗值大, 阻碍粒子传输的阻力大, 因而使得反应难以进行, 降低钢的腐蚀速度. 此结果与前面的失重腐蚀率结果相一致. 上述结果充分反映了同样的实验条件下, 稀土耐候钢具有保护性更强更稳定的锈层. 同时可以看到, 不同稀土含量的耐候钢锈层的保护能力是不同的. 在实验条件和其他化学成分一致、只改变稀土含量的情况下, 得到了稀土耐候钢耐蚀能力的差异, 说明稀土对于耐候钢耐蚀

性的影响作用. 本实验从电化学的角度得出稀土提高 Cu-P 耐候钢耐蚀性的定量结果, 稀土通过使锈层致密稳定保护性强而提高了钢的耐蚀性, 但这要在一定的稀土含量范围内.

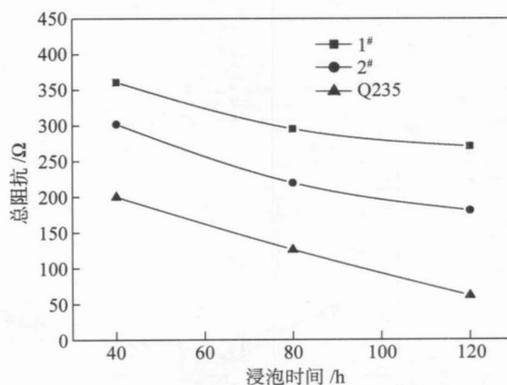


图 5 带锈样的总阻抗随浸泡时间的变化关系

Fig. 5 Curve of the resistance of rusty samples to immersion time

### 3 结论

(1) 在本实验干湿周浸加速腐蚀实验条件下, 测得的 Cu-P-RE 耐候钢失重腐蚀率和交流阻抗结果表明, 不同稀土含量的耐候钢的耐蚀能力不同. 稀土通过使锈层致密稳定保护性强而提高了钢的耐蚀性, 但要在一定的稀土含量范围内.

(2) 利用电化学等效电路模型 (C (R (CPE (RW<sub>s</sub>CPE)))) 可以表征干湿周浸加速腐蚀实验条件下稀土耐候钢锈层的结构和传质过程, 锈层中存在半无限扩散和有限厚度扩散两种过程, 有限厚度扩散极化阻抗反映了耐候钢内锈层的保护性能.

(3) 应用交流阻抗实验方法, 可以获得锈层电阻、扩散极化阻抗等表征锈层结构和性能的电化学参数, 从电化学角度得出稀土耐候钢锈层保护能力的定量结果.

(下转第 601 页)

- [3] Kaga T, Kometani K, Lizuka K. The reaction of ferro-silicon nitride in carbon refractory. *Taikabutsu*, 2002, 54(11): 574
- [4] Lopes A B. Influence of ferro silicon nitride on the performance of the modern taphole mud for blast furnace. *Refract Appl News*, 2002, 7(5): 26
- [5] Kometani K, Lizuka K, Kaga T. Behaviour of ferro-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in blast furnace taphole mud. *Taikabutsu Overseas*, 1999, 19(1): 11
- [6] Chen J H. *Composition, Structure and High Temperature Properties of Fe-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Used in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C Materials* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006 (陈俊红. Fe-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 组成、结构及其对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C 体系材料高温性能的影响[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2006)
- [7] Gachik M I, Lakisheif N P, Yemilin B I. *The Theoretics and Technics of Ferroalloy*. Zhang F, Yu Z, Translated. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 89 (加西克 M И, 拉基舍夫 H П, 叶姆林 B И. 铁合金生产的理论和工艺. 张峰, 于忠, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 89)
- [8] Ziegler G, Heinrich J, Wotting G. Review relationships between processing, microstructure and properties of dense and reaction-bonded silicon nitride. *J Mater Sci*, 1987, 22(9): 3068
- [9] Zhang J. *Thermodynamic Calculations of Melts*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 12 (张鉴. 熔体热力学计算. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 12)

(上接第 572 页)

## 参 考 文 献

- [1] Lin Q, Li J, Zhang L M. Mechanism of atmospheric corrosion resistance of RE in high tension weathering steel. *Chin Rare Earths*, 2008, 29(1): 63 (林勤, 李军, 张路明. 高强度耐大气腐蚀钢中稀土提高耐蚀机理研究. 稀土, 2008, 29(1): 63)
- [2] Zhang Q C, Wu J S, Yang X F, et al. Investigation of accelerated laboratory tests for weathering steel. *Mater Prot*, 2002, 35(3): 21 (张全成, 吴建生, 杨晓芳, 等. 耐大气腐蚀用钢实验室加速腐蚀的研究. 材料保护, 2002, 35(3): 21)
- [3] Liu C J, Liu H L. Effects of RE on atmospheric corrosion resistance of B450NbRE steel. *Chin Rare Earths*, 2008, 29(1): 81 (刘承军, 刘宏亮. 稀土对 B450NbRE 钢耐大气腐蚀性能的影响. 稀土, 2008, 29(1): 81)
- [4] Zhang Q C, Wu J S. The electrochemical characteristics of rust layer formed on the weathering steel in cyclic dry/wet laboratory test. *Mater Mech Eng*, 2002, 26(8): 22 (张全成, 吴建生. 周浸加速循环腐蚀实验中耐候钢锈层的电化学特征. 机械工程材料, 2002, 26(8): 22)
- [5] Ishikawa T, Kumagai M, Yasukawa A. Fluences of metal ions on the formation of  $\gamma$ -FeOOH and magnetite rusts. *Corros Sci*, 2002, 44: 1073
- [6] Asami K, Kikuchi M. In-depth distribution of rusts on a plain carbon steel and weathering steels exposed to coastal-industrial atmosphere for 17 years. *Corros Sci*, 2003, 45(11): 2671
- [7] Wang J J, Guo X D. Analysis of the corrosion rust on weathering steel and carbon steel exposed in marine atmosphere for three years. *Corros Prot*, 2002, 23(7): 288 (王建军, 郭小丹. 海洋大气暴露 3 年的碳钢与耐候钢表面锈层分析. 腐蚀与防护, 2002, 23(7): 288)
- [8] Chen Y Y, Teng H J, Wei L I, et al. Mechanical properties and corrosion resistance of low-alloy steels in atmospheric conditions containing chloride. *Mater Sci Eng*, 2005, 398: 47
- [9] Mizoguchi T, Ishiia Y, Okada T, et al. Magnetic property based characterization of rust on weathering steels. *Corros Sci*, 2005, 47: 2477
- [10] Yue L J, Wang L M, Piao X Y, et al. Weather resistance and its mechanism for 10PCuRE steel. *J Iron Steel Res*, 2006, 18(1): 34 (岳丽杰, 王龙妹, 朴秀玉, 等. 10PCuRE 钢的耐大气腐蚀性及其耐蚀机理. 钢铁研究学报, 2006, 18(1): 34)