

# 碳钢的土壤腐蚀模拟加速实验

## Simulative and Accelerative Experimentation of Carbon Steel Corrosion in Soil

聂向晖<sup>1,2</sup>, 李晓刚<sup>3</sup>, 李云龙<sup>1,2</sup>, 李记科<sup>1,2</sup>, 张鸿博<sup>1,2</sup>

(1 中国石油集团 石油管工程技术研究院, 西安 710065;

2 北京隆盛泰科石油管科技有限公司, 北京 100101;

3 北京科技大学, 北京 100083)

NIE Xiang-hui<sup>1,2</sup>, LI Xiao-gang<sup>3</sup>, LI Yun-long<sup>1,2</sup>, LI Ji-ke<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-bo<sup>1,2</sup>

(1 CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710065, China;

2 Beijing Longshine Oil Tubular Technology Co., Ltd., Beijing 100101, China;

3 University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**摘要:** 利用土壤腐蚀模拟加速实验箱,进行了 Q235 碳钢在滨海盐土中的恒温恒含水量、温度交变和含水量交变三种土壤腐蚀模拟加速实验。结果表明:10%(质量分数,下同)含水时,碳钢表面由局部腐蚀逐渐发展为不均匀的全面腐蚀,其余含水条件下,其主要表现为均匀腐蚀。Q235 碳钢在 70℃ 的腐蚀速率明显高于 50℃,同一温度下,Q235 碳钢在 10% 含水土壤中的腐蚀失重最大。在恒温恒含水量加速实验中,随时间增加其腐蚀电位逐渐升高,在含水量交变和温度交变实验中,腐蚀电位和氧化-还原电位随土壤含水量减小、温度降低而逐渐升高。

**关键词:** 土壤腐蚀; 模拟加速实验; 腐蚀形貌; 腐蚀电位

**中图分类号:** TG172.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4381(2012)01-0059-07

**Abstract:** Three soil corrosion simulative and accelerative experiments such as constant temperature and water content, alternative temperatures and alternative water contents of the Q235 carbon steel were conducted in sea-shore salt soil. The results indicate that the corrosion morphology of the carbon steel in soil with 10% (mass fraction) water content shows localized corrosion at the beginning, and turns to uneven general corrosion with time. For other experimental conditions, its morphologies are mainly uniform corrosion. The corrosion rate at 70℃ is higher than that at 50℃, and reaches to maximum at the same temperature when the water content is 10%. For constant temperature and water content experiment, its corrosion potential increases with time. Its corrosion potential and redox potential increase with water content and temperature decreasing in the alternative temperatures and alternative water contents experiments.

**Key words:** soil corrosion; simulative and accelerative experiment; corrosion morphology; corrosion potential

腐蚀加速实验是一种人为控制实验条件而加速腐蚀的实验方法,通过这种方法可以在较短时间内确定金属材料发生某种腐蚀的倾向、材料的耐蚀性及介质的侵蚀性强弱。加速实验一般是在高温、侵蚀性更强的介质中进行,或是通过电化学方法强化腐蚀过程中一个或几个控制因素以促进腐蚀的发生与发展。目前,大气腐蚀加速实验开展得比较广泛,主要方法有盐雾实验,周浸实验,湿热实验等<sup>[1,2]</sup>,GB10125—97 和 ISO11310,ISO11474,ISO14993,ISO21207 等标准都给出了相应的实验方法和规范,而土壤腐蚀加速实

验的研究开展得相对较少。以往的土壤腐蚀加速实验方法主要有强化介质法、电偶加速法、电解失重法、间断极化法等<sup>[3-5]</sup>,这几种方法可以在短时间内得到较大的加速比,但除强化介质法外,其余的都是通过外加电流来加速腐蚀,腐蚀条件和形貌与实际情况差异较大,实验主要考虑了宏电池的影响,而忽略了腐蚀微电池的作用<sup>[6]</sup>。

土壤腐蚀模拟加速实验是利用实际土壤,不改变土壤腐蚀机理,控制含水量、温度变化,并适当通入空气,通过改变土壤腐蚀过程中的动力学参数来实现加

速腐蚀的目的。本工作利用北京科技大学研制的土壤腐蚀模拟加速实验箱,研究了不同实验条件下碳钢在滨海盐土中的腐蚀形貌、腐蚀失重动力学特征、腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )以及氧化-还原电位( $Eh$ )的变化情况。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验材料为 Q235 碳钢,其主要元素含量为 C 0.14%(质量分数,下同),Si 0.13%,Mn 0.44%,P 0.015%,S 0.031%,Fe 余量。试样尺寸为 40mm×30mm×4.5mm,试样经取样、磨削、除油、清洗、干燥后用精度为 0.1mg 的电子天平称重待用。

1.2 实验土壤

实验土壤取自大港材料土壤腐蚀试验站,取样深度约为 1m,原状土含水量为 19%~23%,其主要阴离子含量为  $\text{NO}_3^-$  0.01%, $\text{Cl}^-$  1.41%, $\text{SO}_4^{2-}$  0.16%, $\text{HCO}_3^-$  0.02%,pH 值 8.8。土壤经自然干燥、粉碎后过 20 目筛,然后经 105℃/6h 烘干备用。

1.3 实验方法

在土壤腐蚀模拟加速实验箱内分别进行了恒温恒含水量、含水量交变和温度交变三种土壤腐蚀模拟加速实验(表 1)。所有实验周期均为 1 个月,在实验过程中测量腐蚀电位和氧化-还原电位,测量间隔为 1h,参比电极为饱和硫酸铜电极(CSE)。分别在实验开始后的 1 天,2 天,3 天,4 天,5 天,6 天,7 天,10 天,20 天和 30 天取样,试样经清洗、除锈(除锈液为 500mL 盐酸+3.5g 六次甲基四胺,加去离子水至 1000mL)、干燥后进行失重测量和腐蚀形貌观察。

表 1 土壤腐蚀模拟加速实验条件

Table 1 Simulative and accelerative experimental conditions

Experimental method	Temperature /℃	Water content / %
Constant temperature and water content	50	10
	50	20
	50	30
	70	10
	70	20
	70	30
Alternative water content	50	10-30
	70	10-30
Alternative temperature	50-70	20

2 实验结果

2.1 腐蚀形貌

在 50℃,10%含水加速腐蚀实验的第 1 天,Q235

碳钢试样表面就出现了尺寸较小、深度较浅的腐蚀坑与腐蚀斑,随时间延长,腐蚀深度和面积逐渐增大,经过 30 天的实验,腐蚀坑、斑连成一片,发展为不均匀的全面腐蚀(图 1(a)~(c));在 50℃,恒温恒含水量条件下,Q235 碳钢的腐蚀主要以均匀腐蚀为主(图 1(d)~(f))。Q235 碳钢在 70℃,10%含水时的腐蚀也是由局部腐蚀逐渐发展为不均匀的全面腐蚀,与 50℃,10%含水时的腐蚀形貌相比,其腐蚀坑、斑的面积和深度发展更快,第 1 天试样表面就出现了尺寸较大的腐蚀坑,实验进行到第 10 天,腐蚀坑、斑即连成一片,发展为不均匀的全面腐蚀;70℃,20%含水和 70℃,10%~30%含水条件下,实验初期的试样表面表现为深度较浅的溃疡状腐蚀,随时间延长,溃疡面积逐渐增大而发展为较均匀的全面腐蚀(图 1(g)~(i));70℃,30%含水及温度交变条件下的试样均表现为均匀腐蚀。

2.2 腐蚀失重与动力学特征

Q235 碳钢在不同实验条件下 1 个月的腐蚀失重如表 2 所示,从实验结果可以看出:同一温度下,10%含水时的腐蚀失重最大,而 20%和 30%含水时的腐蚀失重较小,且数值接近;含水量交变加速实验中的腐蚀失重大于 20%和 30%含水,而远小于 10%含水时的失重;温度交变加速实验的腐蚀失重略大于 50℃,20%含水条件下的失重,而远小于 70℃时的腐蚀失重;随温度升高腐蚀失重明显增加,温度从 50℃升高到 70℃,四种含水条件下的腐蚀失重分别增加了 4.6,9.8,7.5,4.4 倍。

Q235 碳钢在不同实验条件下的腐蚀失重动力学曲线如图 2 所示。对于腐蚀失重的动力学规律一般用幂函数进行拟合,见式(1)。

$$M = Dt^n \tag{1}$$

式中: $M$ 为单位面积腐蚀失重,g/dm<sup>2</sup>; $t$ 为腐蚀时间,天; $D,n$ 为常数,其中  $D$  与材料表面性质和环境因素有关, $D$  值越大,材料的初期腐蚀速率也越大; $n$  代表腐蚀发展趋势,当  $n>1$  时,材料的腐蚀速率随时间增加而增大,当  $n<1$  时,材料的腐蚀速率随时间增加而减小。Q235 碳钢在不同实验条件下的腐蚀动力学拟合结果见表 3,其中 70℃,10%含水条件下的失重分为 1~10 天和 10~30 天两种情况分别进行拟合。

从表 3 可以看出:相同含水条件下,70℃的  $D$  值要明显高于 50℃,即温度升高促进了 Q235 初期腐蚀的发展。在 50℃实验中、10%含水时的  $n$  值大于 1,其余三种条件下的  $n$  值均小于 1,即在 10%含水时腐蚀速率随时间逐渐增加,其余含水条件下的腐蚀速率随

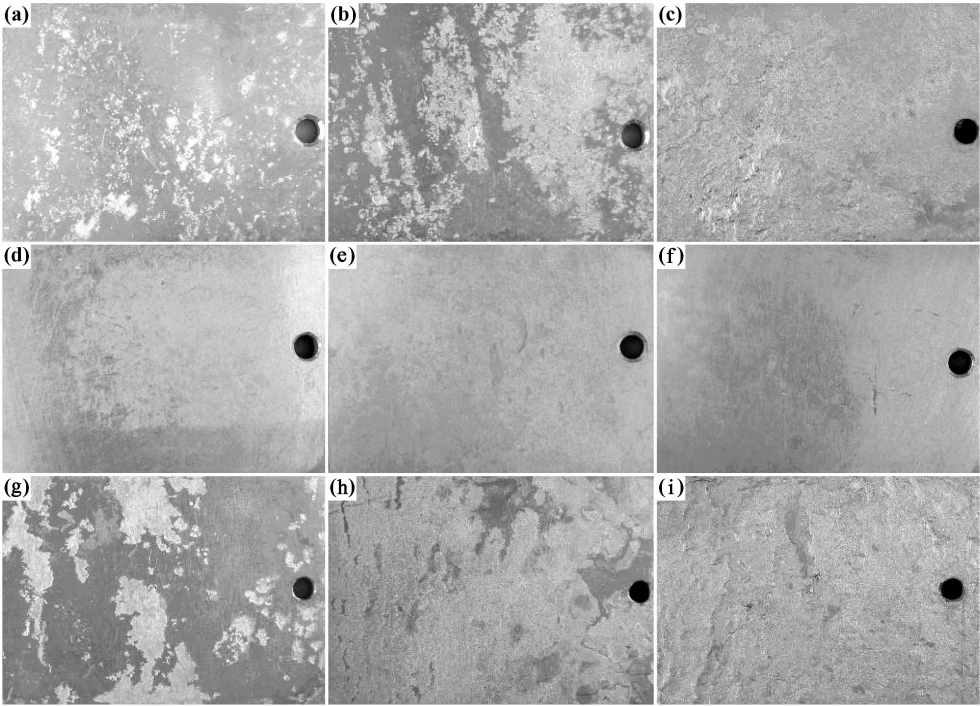


图 1 Q235 碳钢在不同加速腐蚀条件下的腐蚀形貌

(a)50℃,10%含水 1 天;(b)50℃,10%含水 10 天;(c)50℃,10%含水 30 天;  
(d)50℃,20%含水 1 天;(e)50℃,20%含水 10 天;(f)50℃,20%含水 30 天;  
(g)70℃,20%含水 1 天;(h)70℃,20%含水 10 天;(i)70℃,20%含水 30 天

Fig. 1 Corrosion morphologies of the Q235 carbon steel for different experimental conditions

(a)50℃,10% water content, 1d;(b)50℃,10% water content, 10d;(c)50℃,10% water content, 30d;  
(d)50℃,20% water content, 1d;(e)50℃,20% water content, 10d;(f)50℃,20% water content, 30d;  
(g)70℃,20% water content, 1d;(h)70℃,20% water content, 10d;(i)70℃,20% water content, 30d

表 2 Q235 碳钢在不同实验条件下 1 个月的腐蚀失重(g/dm²)

Table 2 Mass loss of the Q235 carbon steel corrosion one month(g/dm²)			
Water content/%	Temperature/℃		
	50	70	50-70
10	5.331	24.721	1.089
20	0.851	8.336	
30	1.049	7.906	
10-30	2.457	10.884	

时间而逐渐减小。与 50℃ 相比,Q235 碳钢在 70℃ 时的  $n$  值明显大于 50℃ 相同含水条件下的  $n$  值,即温度升高加快了腐蚀发展速率;在 10% 含水的前 10 天里  $n > 1$ ,腐蚀速率随时间增加而逐渐增大,而 10 天后的  $n$  值小于 1,其腐蚀速率又逐渐减小;在 70℃ 其余实验以及 50~70℃ 温度交变实验中的  $n$  值均大于 1,腐蚀速率随时间逐渐增加。

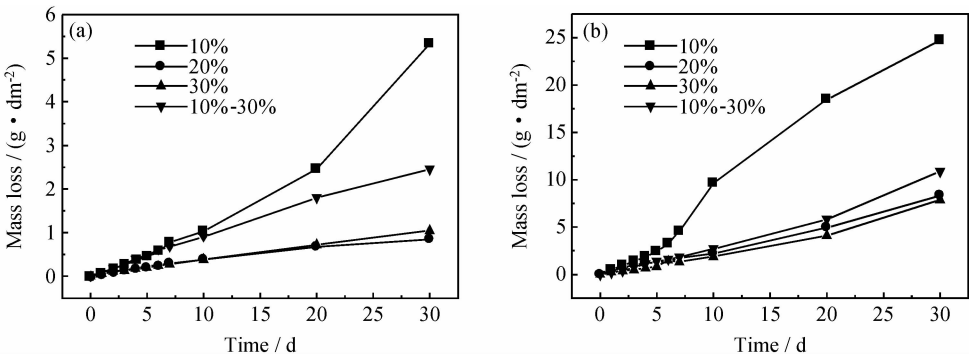


图 2 Q235 碳钢在 50℃ (a) 和 70℃ (b) 时的腐蚀失重力学曲线

Fig. 2 Dynamic curves of the Q235 carbon steel corrosion at 50℃ (a) and 70℃ (b) with different water contents

表 3 Q235 碳钢在不同实验条件下的  $D$  和  $n$  值

Table 3 Values of the  $D$  and  $n$  of the Q235 steel for different experimental conditions

Experimental condition		$D$	$n$
Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Water content/ $\%$		
50	10	0.035	1.474
50	20	0.068	0.752
50	30	0.048	0.909
50	10-30	0.114	0.909
70(1-10d)	10	0.122	1.889
70(10-30d)	10	1.486	0.830
70	20	0.218	1.064
70	30	0.118	1.227
70	10-30	0.159	1.234
50-70	20	0.024	1.114

2.3 腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )和氧化-还原电位( $E_h$ )

在 50℃ 恒温恒含水量加速实验中,  $E_{\text{corr}}$  随时间增加而逐渐增大,  $E_h$  则逐渐降低, 10% 含水条件下的  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  要明显高于 20% 和 30% 含水时的相应值, 图 3 为 50℃, 10% 和 30% 含水时  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  的变化情况。70℃ 恒温恒含水量加速实验中,  $E_h$  的变化规律不明显;  $E_{\text{corr}}$  随时间逐渐增加, 同样, 10% 含水时的  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  要明显高于 20% 和 30% 含水。

含水量交变加速实验中, 含水量变化对  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  影响较大, 每次加水时,  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  急剧下降, 而后又随含水量的逐渐减少而不断升高(图 4)。

图 5 是温度交变加速实验进行到 200~300h 间

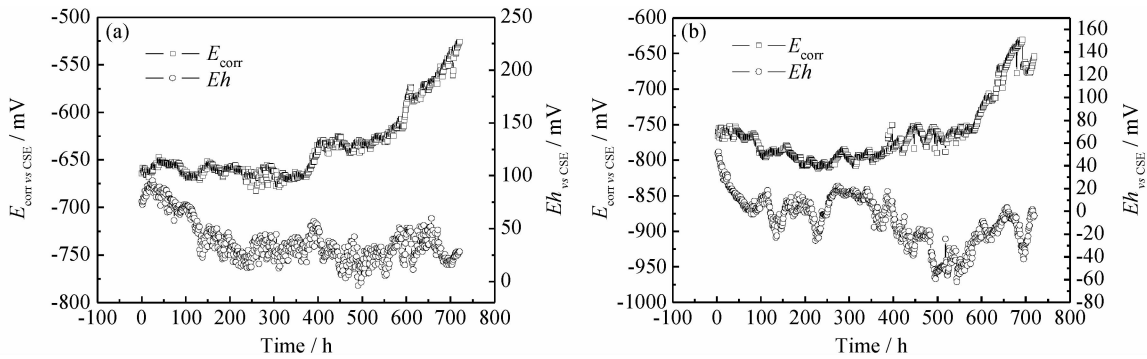


图 3 恒温恒含水量条件下的  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$   
(a) 50℃, 10% 含水; (b) 50℃, 30% 含水

Fig. 3  $E_{\text{corr}}$  and  $E_h$  of the constant temperature and water content experiments  
(a) 50℃, 10% water content; (b) 50℃, 30% water content

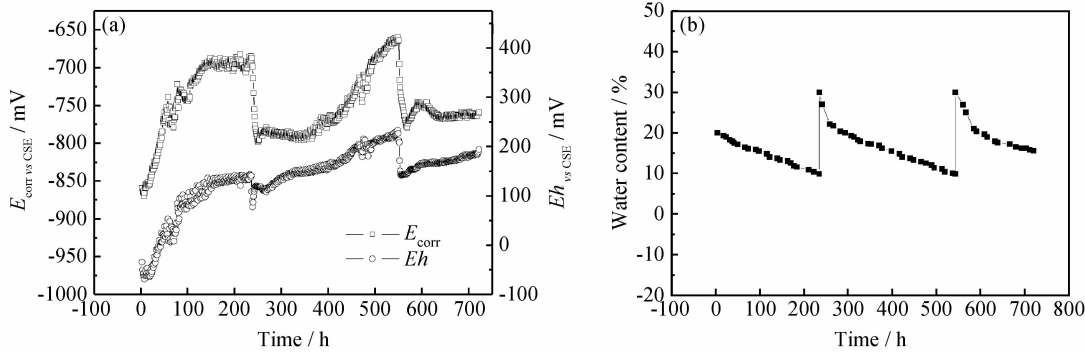


图 4 含水量交变时的  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_h$  及含水量变化  
(a) 50℃, 10%~30% 含水时的  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$ ; (b) 含水量的变化

Fig. 4  $E_{\text{corr}}$ ,  $E_h$  and water content of the alternative water content experiment  
(a)  $E_{\text{corr}}$  and  $E_h$  of 50℃, 10%-30% water content; (b) change of the water content

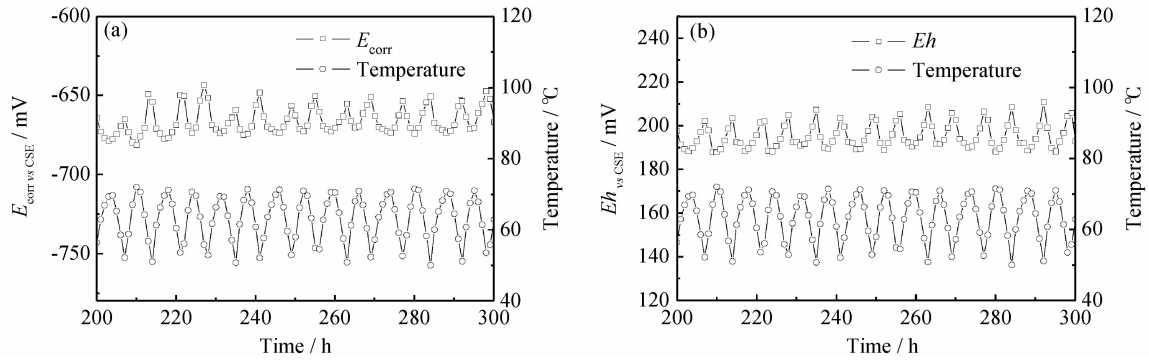
$E_{\text{corr}}$ ,  $E_h$  的变化情况, 由图 5 可看出:  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  的变化与温度变化相对应: 温度升高  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  减小, 温度降低  $E_{\text{corr}}$  和  $E_h$  增大。

3 分析与讨论

3.1 温度对腐蚀电位的影响

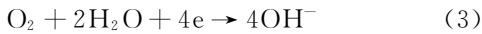
在实践中经常利用腐蚀电位来监控金属材料的土

壤腐蚀行为, 通过测量金属电极和参比电极间的电位差, 并与所设置的安全电位进行比较来确定金属构件的腐蚀状况<sup>[7]</sup>。在阴极保护中随温度变化, 保护电位也有一定的差异, Kim J G 和 Kim Y W<sup>[8]</sup> 研究了温度对埋地钢管阴极保护的影响: 当温度升高时, 保护电位负移, 较高温度下,  $-0.85\text{V}_{\text{CSE}}$  的保护电位不足以使埋地钢管得到有效保护, 此时要求有比  $-0.85\text{V}_{\text{CSE}}$  更负

图5 温度交变时  $E_{\text{corr}}$ ,  $Eh$  及温度变化(a)  $E_{\text{corr}}$  和温度的变化情况; (b)  $Eh$  和温度的变化情况Fig. 5  $E_{\text{corr}}$ ,  $Eh$  and temperature of the alternative temperature experiment(a)  $E_{\text{corr}}$  and temperature; (b)  $Eh$  and temperature

的保护电位。

对于 Fe 在滨海盐土中的腐蚀, 其阳极和阴极反应分别为:



由 Nernst 方程可得到不同温度下反应(2)和(3)的平衡电位<sup>[9]</sup>:

$$E'_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln(a_{\text{Fe}^{2+}}) \quad (4)$$

$$E'_{\text{OH}/\text{O}_2} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{\text{O}_2}}{a_{\text{OH}}^4}\right) \quad (5)$$

式中:  $E'_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}$  和  $E'_{\text{OH}/\text{O}_2}$  为阳极反应和阴极反应的平衡电位;  $E^0$  为标准电极电位;  $R$  和  $F$  分别表示气体常数和法拉第常数;  $n$  为参与电极反应的电子数;  $T$  为绝对温度。从式(4), (5)可以看出,  $E'_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}$  和  $E'_{\text{OH}/\text{O}_2}$  均随温度升高而降低, 腐蚀电位是一个混合电位, 是阳极反应和阴极反应耦合的结果。从热力学角度分析, 对于相同的阴、阳极反应 Tafel 斜率, 其腐蚀电位也随温度的升高而降低。在温度交变加速实验中, 腐蚀电位随温度的变化情况(图 5(a))也证实了这一规律。

氧化-还原电位表征了介质氧化性或还原性的相对程度, 其数值亦可用于分析是否发生硫酸盐还原菌(及硫化氢)腐蚀, 一般认为金属在  $-200\text{mV}_{\text{SHE}}$  以下的厌氧条件下易受到硫酸盐还原菌的腐蚀<sup>[10,11]</sup>。对于铁的主要腐蚀产物针铁矿( $\alpha\text{-FeOOH}$ )、磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )和菱铁矿( $\text{FeCO}_3$ )等, 其溶解性与其周围环境的组成、pH 值等有关, 同时氧化-还原电位对其溶解性的影响也很大, Neff D 等人<sup>[12]</sup>的研究表明: 在还原性条件下,  $\alpha\text{-FeOOH}$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的溶解度较大, 而在氧化性条件下, 其溶解度相对较小; 对于  $\text{FeCO}_3$ , 其溶解度在氧化性条件下较大。在土壤中普遍存在着各种氧化-还原反应, 其中包括氧体系、铁体系、锰体系等不同

的反应, 当氧化-还原反应中的氧化态和还原态反应在电极表面达到平衡, 其平衡电位称为氧化-还原电位, 其表达式为:

$$Eh = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{氧化态}}}{a_{\text{还原态}}} \quad (6)$$

即氧化-还原电位随氧化态物质浓度的升高而增加, 随还原态物质浓度升高而减小。从上述实验结果可以看出: 随含水量和温度的增加,  $\frac{a_{\text{氧化态}}}{a_{\text{还原态}}}$  的数值逐渐减小。

### 3.2 温度对腐蚀速率的影响

碳钢在滨海盐土中的腐蚀是一个电化学过程, 对于电极反应来说, 其反应速率常数与温度间的关系可以利用 Arrhenius 公式表示<sup>[13]</sup>:

$$\ln k = -\frac{E_R}{RT} + B \quad (7)$$

式中:  $k$  为反应速率常数;  $E_R$  为反应的活化能 ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。由式(7)可以看出, 温度升高, 反应速率常数增加, 反应加快。此外, 活性离子如  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  等的反应能力也随温度升高而增强, 穿越双电层的能力增大, 也促进了电极反应速率的加快<sup>[14]</sup>。

对于 Fe 在滨海盐土中的腐蚀过程, 由于氧在土壤溶液中的溶解度较小, 电极反应受浓差极化控制, 其扩散电流密度  $i_d$  与扩散系数  $D$ 、浓度  $C$  以及滞流层厚度  $\delta$  之间的关系可以表达为:

$$i_d = \frac{nFDC^b}{\delta} \quad (8)$$

式中:  $n, b$  为常数;  $F$  为法拉第常数。扩散系数受溶液温度和黏度的影响, 温度升高, 扩散系数增大, 其与温度的关系也服从 Arrhenius 公式:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_D}{RT}} \quad (9)$$

式中:  $E_D$  为扩散活化能;  $R$  为常数。扩散活化能通常比反应活化能小得多, 因此温度对扩散速率的影响远

不如化学反应那么大。

### 3.3 含水量对土壤腐蚀性的影响

含水量变化对土壤腐蚀性的影响十分复杂,不同作者的研究结论也不尽相同。Gardiner C P 等<sup>[15]</sup>研究表明:含水量决定了腐蚀过程中的电导率和氧扩散速率,低含水量时,电导率是决定腐蚀速率的主要因素,而在高含水量时,中碱性土壤中的腐蚀速率主要受氧扩散过程控制。

从上述实验结果可以看出:在相同温度下,随含水量增加,Q235 碳钢的腐蚀电位和氧化-还原电位均向负方向移动(图 4),不同含水土壤中的腐蚀控制特征可用图 6 表示,其中  $E_{\text{ceq}}$ ,  $E_{\text{aeq}}$  和  $E_{\text{corr}}$  分别为阴极反应平衡电位、阳极反应平衡电位和腐蚀电位。

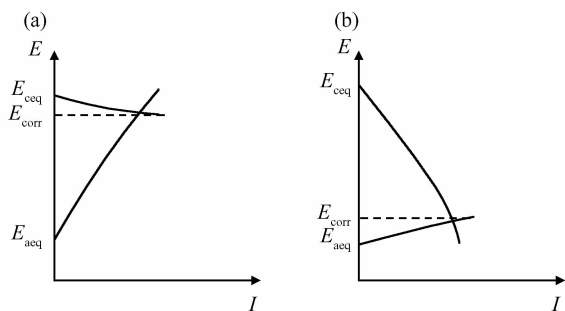


图 6 土壤腐蚀控制特征

(a)低含水量;(b)高含水量

Fig. 6 Control characteristics of the soil corrosion

(a) low water content; (b) high water content

低含水量土壤中的阳极过程接近于大气中的腐蚀行为,因钝化及离子水化困难而有很大的阻碍;但此时土壤透气性好,土壤孔隙中的游离氧部分溶解在土壤溶液中,并扩散到电极表面,从而促进了阴极过程的进行,其腐蚀过程为阳极控制,其腐蚀电位随阳极控制程度的加剧而逐渐升高。在高含水量土壤中,阳极过程与溶液中相类似<sup>[15,16]</sup>,由于土壤溶液中氧含量较低,其电极过程为阴极控制,腐蚀电位随阴极控制作用的增强而逐渐降低,当阴极控制作用达到一定程度时,腐蚀电位逐渐趋于阳极反应的平衡电位。

在不同含水条件下,Q235 碳钢的腐蚀形貌也不同。在低含水量土壤中,试样表面不能形成较厚的、连续性液膜,此时的试样表面可分为三种不同的区域:干燥区、吸附性液膜区和厚液膜区。在干燥区,腐蚀电化学过程不能进行,该区域不发生腐蚀;在吸附性液膜区,试样表面极易钝化,钝化膜的形成抑制了该区域腐蚀的进行;而在厚液膜区,腐蚀电化学过程顺利进行,在该区域形成点蚀坑,由于蚀坑内的自催化效应,蚀坑的面积和深度逐渐增加,随实验的进行,试样表面由局

部腐蚀逐渐发展为全面腐蚀,而在中高含水条件下,试样表面形成连续液膜,腐蚀主要为微电池腐蚀,在试样表面全面进行,因而表现为全面腐蚀。

从上述实验结果可以看出:相同温度下,Q235 碳钢在 10% 含水滨海盐土中的腐蚀速率最大,而在 20% 和 30% 含水滨海盐土中的腐蚀速率较小且数值接近。这主要是由于大港滨海盐土的土壤颗粒细小且含盐量较高,在相对较低(34%)的含水条件下就可以达到水饱和。在 10% 含水时,土壤孔隙中的氧含量较高,游离氧更容易到达试样表面,促进了阴极反应的进行;此外,由于土壤含盐量高,即使在 10% 含水时,它也有较高的电导率,也加快了腐蚀的发展。在实验开始阶段,试样表面由局部腐蚀发展为全面腐蚀,此时腐蚀速率主要受两方面因素的影响:(1)由于腐蚀产物离子水化困难及扩散缓慢,阻碍了腐蚀的发展;(2)试样参与腐蚀反应的面积逐渐增大,促进了腐蚀速率提高,在实验初期反应面积增大的作用较明显,因而腐蚀速率逐渐提高( $n > 1$ ),实验进行到一定程度时,试样表面基本发展为全面腐蚀,此时试样表面反应面积增大的作用逐渐减弱,由于腐蚀产物的增多、增厚,阻碍了腐蚀的进一步发展,腐蚀速率逐渐减缓(如 70℃, 10% 含水)。当含水量达到 20% 时,土壤孔隙大部分被水填充,氧的扩散控制程度加剧,抑制了腐蚀的发展,腐蚀速率降低。当含水量达到 30% 接近水饱和时,氧的扩散控制程度进一步加剧,但是由于腐蚀产物在高含水条件下扩散速率加快,促进了阳极过程的发展,其腐蚀速率与 20% 含水时基本相当。

## 4 结论

(1)在 10% 含水恒温恒含水量腐蚀模拟加速实验中,Q235 碳钢表面由局部的腐蚀坑、斑逐渐发展为不均匀的全面腐蚀,在其余实验条件下主要表现为均匀腐蚀。

(2)同一温度下,Q235 碳钢在 10% 含水滨海盐土中的腐蚀失重最大,20% 和 30% 含水时的腐蚀速率较低且数值相当。

(3)在相同含水条件下,腐蚀速率随温度升高而增大。50℃, 10% 含水时的腐蚀速率随时间增加而增大,其余含水条件下的腐蚀速率随时间增加而减小;70℃, 10% 含水前 10 天的腐蚀速率逐渐增大,10 天后,腐蚀速率逐渐减小,在 70℃ 其余含水条件下的腐蚀速率随时间增加而增大。

(4)在恒温恒含水量加速实验中,随时间增加  $E_{\text{corr}}$  逐渐升高,在含水量交变和温度交变实验中,  $E_{\text{corr}}$  和

$E_h$  随土壤含水量减小、温度降低而逐渐升高。

### 参考文献

- [1] DOBRZANSKI L A, BRYTAN Z, ACTIS G M, et al. Corrosion resistance of sintered duplex stainless steels in the salt fog spray test[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192—193(1): 443—448.
- [2] HOWARD R L, LYON S B, SCANTLEBURY J D. Accelerated tests for prediction of cut edge corrosion of coil-coated architectural cladding. Part II: cyclic immersion[J]. Progress in Organic Coatings, 1999, 37(1—2): 99—105.
- [3] 孟厦兰, 金名惠, 郭雅弧, 等. 大庆土中电偶法加速土壤腐蚀的研究[J]. 腐蚀与防护, 1995, 16(6): 262—264.
- [4] LEVIN E. Aeration cell corrosion of carbon steel in soil: in situ monitoring cell current and potential[J]. Corrosion Science, 1996, 38(12): 2083—2090.
- [5] 高立群, 李鸿锡, 孙成, 等. 土壤宏电池腐蚀的实验室研究[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(7): 279—282.
- [6] 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.
- [7] 王永红, 章钢娅, 鹿中晖, 等. 铅、铝、铜土壤腐蚀随季节变化规律[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 326—328.
- [8] KIM J G, KIM Y W. Cathodic protection criteria of thermally insulated pipeline buried in soil[J]. Corrosion Science, 2001, 44(11): 2011—2021.
- [9] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2004.

\*\*\*\*\*

(上接第 58 页)

相关系; AlN 与基体存在 AlN[100]//Al[100]的位相关系, 并且 AlN 的(0 $\bar{2}$ 0), (00 $\bar{2}$ )晶面分别与 Al 的(0 $\bar{2}$ 0), (00 $\bar{2}$ )接近平行。所有新生相与铝基体的结合界面光滑、干净没有任何反应物, 界面结合牢固。

(3)施加交流电弧超声后焊接接头抗拉强度为 92.69MPa, 达到母材强度的 62%左右, 相比未加超声的接头提高了 43%。

### 参考文献

- [1] 牛济泰, 刘黎明, 韩立红. 铝基复合材料焊接研究现状及展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(1): 130—132.
- [2] 李杏瑞, 史新伟, 汤文博, 等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料电弧焊研究进展[J]. 热加工工艺, 2008, 37(9): 95—99.
- [3] 雷玉成, 邵奇栋, 张振, 等. Ti-Al 合金对 SiC<sub>p</sub>/6061Al 复合材料等离子弧焊焊缝组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(2): 241—246.
- [4] ELLS M B D. Joining of aluminum based metal matrix composites

16—24.

- [10] 林晶, 阎永贵, 陈光章. 高锰铝青铜的微生物腐蚀行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 551—554.
- [11] 孙成, 韩恩厚, 张淑泉. 土壤中硫酸盐还原菌对 1Cr13 不锈钢腐蚀的影响[J]. 材料研究学报, 2003, 17(2): 192—197.
- [12] NEFF D, DILLMANN P, DESCOTES M, et al. Corrosion of iron archaeological artifacts in soil: estimation of the average corrosion rates involving analytical techniques and thermodynamic calculations[J]. Corrosion Science, 2006, 48(10): 2947—2970.
- [13] 梁英教. 物理化学[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 1989. 174—182.
- [14] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. 温度、Cl<sup>-</sup>浓度、Cr 元素对 N80 钢 CO<sub>2</sub> 腐蚀电极过程的影响[J]. 金属学报, 2003, 39(8): 848—854.
- [15] GARDINER C P, MELCHERS R E. Corrosion of mild steel in porous media[J]. Corrosion Science, 2002, 44(11): 2459—2478.
- [16] 伍远辉, 孙成, 张淑泉, 等. 湿度对 X70 管线钢在青海盐湖盐渍土壤中腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(2): 87—90.

收稿日期: 2010-03-12; 修订日期: 2011-07-12

作者简介: 聂向晖(1972—), 男, 博士, 从事金属材料腐蚀和无损检测等领域的研究工作, 联系地址: 陕西省西安市电子二路 32 号中国石油集团石油管工程技术研究院(710065), E-mail: niexh3597@sina.com

[J]. International Materials Reviews, 1996, 41(2): 41—45.

- [5] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 306—309.
- [6] 雷玉成, 张振, 聂加俊, 等. Ti-Al-Si 对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料等离子弧焊焊缝的组织与性能的影响[J]. 材料研究学报, 2008, 22(4): 420—424.
- [7] 李晓谦, 刘荣光, 蒋日鹏. 功率超声对铝熔体作用机理研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(3): 9—12.
- [8] 李健, 陈体军, 郝远, 等. 原位自生 Al<sub>3</sub>Ti<sub>p</sub>/Al 复合材料的制备及其拉伸性能[J]. 热加工工艺, 2008, 37(18): 7—9.
- [9] 冯若, 李化茂. 声化学及应用[M]. 合肥: 安徽科技出版社, 1990.
- [10] CAMPBELL J. Effect of vibration during solidification [J]. Int Met Rev, 1981, (2): 71—104.

基金项目: 哈尔滨工业大学现代焊接技术重点实验室资助项目(09003); 江苏省焊接技术重点实验室资助项目(JSAWT-09-03)

收稿日期: 2010-08-17; 修订日期: 2011-05-20

作者简介: 雷玉成(1962—), 男, 教授, 博导, 主要从事先进连接技术等方面的研究, 联系地址: 江苏省镇江市学府路 301 号江苏大学材料学院(212013), E-mail: yclei@ujs.edu.cn