

# 软化水中除氧剂与 pH 值对碳钢腐蚀率影响研究

陈莉荣, 阚伟海, 姜庆宏, 王哲

(内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** **目的** 针对供热管网软化水水质, 研究在供热软化水中除氧剂乙醛肟和异抗坏血酸钠的除氧性能, 以及添加除氧剂乙醛肟和异抗坏血酸钠、调节 pH 值对碳钢腐蚀率的影响。 **方法** 通过除氧实验、静态挂片和旋转挂片实验, 研究除氧剂乙醛肟和异抗坏血酸钠的除氧性能以及添加除氧剂对碳钢腐蚀率的影响, 用 1 mol/L 的氢氧化钠和碳酸钠溶液调节 pH 值对碳钢腐蚀率的影响, 以及添加除氧剂后在 pH=11 时对碳钢腐蚀率的影响。 **结果** 在乙醛肟和异抗坏血酸钠的质量浓度为 160 mg/L 时, 除氧率分别为 45.68% 和 71.83%, 碳钢的腐蚀率分别为 0.1948, 0.0728 mm/a; 用氢氧化钠和碳酸钠调节 pH 值为 11 时, 碳钢的腐蚀率分别为 0.0751, 0.0143 mm/a; 在乙醛肟和异抗坏血酸钠的质量浓度为 120 mg/L, pH=11 时, 碳钢的腐蚀率分别为 0.0885, 0.0365 mm/a; 在乙醛肟的质量浓度为 140 mg/L, pH=11 时, 碳钢的腐蚀率达到 0.1531 mm/a。 **结论** 异抗坏血酸钠的除氧效果优于乙醛肟的除氧效果, 碳钢的腐蚀率随着异抗坏血酸钠浓度的增加而降低, 在乙醛肟浓度大于 120 mg/L 时, 碳钢的腐蚀率随着投加量的增加出现先增大后减小的趋势; 随着 pH 值的增大, 碳钢的腐蚀率在降低。

**关键词:** 软化水; pH 值; 碳钢; 腐蚀; 异抗坏血酸钠; 乙醛肟; 除氧

**中图分类号:** TG172.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2015)07-0108-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.020

## Study on Effects of pH Value and Oxygen Scavenger on Corrosion Rate of Carbon Steel in Softened Water Solution

CHEN Li-rong, KAN Wei-hai, JIANG Qing-hong, WANG Zhe

(College of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To research the deoxidization capacity of deoxidants acetaldoxime and sodium hexametaphosphate in softened water and the effect of sodium hexametaphosphate and acetaldoxime and pH value on the corrosion inhibiting capacity of carbon steel targeting at the quality of heating softened water. **Methods** The deoxidizing test, the static coupon test and the rotary coupon test were used to investigate the effects on corrosion rate of sodium hexametaphosphate and acetaldoxime, adjusting pH value with sodium hydroxide and sodium carbonate and adjusting pH=11 after deoxidization for carbon steel. **Results** Under the condition of doses of 160 mg/L acetaldoxime and sodium hexametaphosphate, the deoxidization rate was 45.68% and 71.83%, the corrosion rate was 0.1948 mm/a and 0.0728 mm/a. The corrosion rate was 0.0751 mm/a and 0.0143 mm/a with sodium hydroxide and sodium carbonate adjusting pH to 11. And under the condition of pH=11 adjusted by doses of 120 mg/L acetaldoxime and sodium hexametaphosphate, the corrosion rate was 0.0885 mm/a and 0.0365 mm/a, while the corrosion rate was 0.1531 mm/a at a dose

收稿日期: 2015-03-10; 修订日期: 2015-04-09

Received: 2015-03-10; Revised: 2015-04-09

作者简介: 陈莉荣(1971—), 女, 内蒙古人, 教授, 主要研究方向为水处理技术。

**Biography:** CHEN Li-rong(1971—), Female, from Inner Mongolia, Professor, Research focus: water treatment technology.

of 140 mg/L acetaldoxime, pH=11. **Conclusion** The deoxygenation rate by sodium hexametaphosphate was better than by acetaldoxime, the corrosion rate of carbon steel decreased with addition of sodium hexametaphosphate, fluctuated with addition of acetaldoxime when acetaldoxime was more than 120 mg/L, and decreased with the increasing of pH value.

**KEY WORDS:** softened water; pH value; carbon steel; corrosion; sodium hexametaphosphate; acetaldoxime; deoxidization

天然水经过水质处理,将水中的悬浮物质、胶体物质、溶解的高分子物质以及溶解盐类的钙镁离子去除后得到的水称为软化水。软化水不含钙镁离子,不产生水垢,被广泛应用在许多特种工业冷却系统上,如核电站、锅炉、热电厂、空调等闭路水循环系统<sup>[1]</sup>。

软化水与一般的工业循环水相比,具有很强的腐蚀性。当用在以软化水为热媒介质的供热管网中,较高的溶解氧浓度和水温会加速供热管网的腐蚀。当供热管网腐蚀后,首先会影响供热效果,其次腐蚀反应的持续进行会降低材料设备的使用寿命,增加维修工作量和资金投入。当腐蚀到一定程度后,达到临界爆炸状况,将会直接威胁生产安全。

在供热管网腐蚀过程中,循环水溶解氧浓度、pH 值、温度、水流速度以及水中盐分浓度是热网腐蚀的主要因素。供热管网的防腐蚀措施主要有降低水中溶解氧的浓度,将热媒介质的 pH 值控制在规定的范围内,控制水的温度使之避开腐蚀的最大值区域以及通过添加缓蚀剂进行防腐蚀处理<sup>[2]</sup>。

文中针对软化水水质情况研究了添加除氧剂和调节 pH 值两种方法对供热管网软化水介质中 A3 碳钢腐蚀的影响。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验所用试剂:丙酮、无水乙醇、氢氧化钠、碳酸钠、异抗坏血酸钠、六次甲基四胺、盐酸。所用试剂均为分析纯,乙醛肟为工业纯。

试验用材料:Q235 碳钢,尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 挂片预处理

试验前用 80<sup>#</sup>, 120<sup>#</sup>, 240<sup>#</sup>, 360<sup>#</sup>, 500<sup>#</sup> 砂纸逐级打磨挂片,然后用丙酮除油,无水乙醇脱水后放入干燥器备用。

#### 1.2.2 除氧剂除氧及对碳钢腐蚀率影响试验

1) 除氧剂的除氧试验。在 250 mL 溶氧瓶中加入

软化水,用 JPB-607A 型便携式溶氧仪测定水中溶解氧浓度,记为  $a_0$ ;然后将溶氧瓶放入 HH-S8 型电热恒温水浴锅中加热,待水温升高到试验温度时,向瓶中迅速加入除氧剂,并进行水封,30 min 后取出,冷却至室温用溶氧仪测定溶解氧浓度,记为  $a_1$ ;同时做未加除氧剂的空白实验。试验后计算除氧剂的除氧率。除氧剂分别按质量浓度 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 mg/L 投加。

除氧率  $\eta$  的计算公式为:

$$\eta = \frac{a_0 - a_1}{a_0} \times 100\% \quad (1)$$

2) 添加除氧剂对碳钢腐蚀率的影响试验。静态挂片法:用量筒准确量取 1000 mL 水样倒入 1000 mL 塑料广口瓶,置于水浴锅中加热,待水温升高到试验温度后,将用尼龙绳系好的预处理挂片悬挂于瓶内(挂片不与瓶壁接触),并快速加入除氧剂,盖紧内盖,旋紧外盖后置于水浴锅中,试验时间为 72 h,试验温度为 50 ℃。

#### 1.2.3 pH 值对碳钢腐蚀率的影响试验

用 1 mol/L 的氢氧化钠和碳酸钠溶液分别将 pH 调节为 9, 10, 10.3, 10.5, 10.7, 11.0, 11.5, 12.0。当 pH>11.5 后,用 1 mol/L 的碳酸钠很难将 pH 值调至 12.0,因此只调节到 11.5。

旋转挂片法:参照《中华人民共和国国家标准水处理剂缓蚀性能的测定》(GB/T 18175—2000)<sup>[3]</sup> 在 RCC-II 型旋转挂片腐蚀试验仪上进行试验,温度为 50 ℃,转速为 75 r/min,试验时间为 72 h。

挂片后处理:试验后用自来水冲洗掉挂片表面的腐蚀产物后,然后将挂片放入酸洗溶液(取 200 mL 浓盐酸用蒸馏水稀释至 1000 mL,并加 8.0 g 六次甲基四胺,溶解混匀)中 4 min。酸洗过后用软毛刷除去表面的腐蚀产物,然后迅速用自来水冲洗,再放入 60 g/L 的氢氧化钠溶液中浸泡 30 s,取出后迅速用去离子水冲洗,滤纸擦干,再放入无水乙醇中浸泡 3 min 左右,取出再用滤纸吸干,放入干燥器内 4 h 以上,称量,精确至 0.0001 g。同时做挂片的酸洗空白试验和未添加除氧剂的空白试验。

根据挂片试验前后的质量差计算腐蚀率,腐蚀速率  $x$  按式(2)计算:

$$x = \frac{8760 \times (m - m_0) \times 10}{S \times \rho \times t} \quad (2)$$

式中:  $m$  为挂片质量损失,  $g$ ;  $m_0$  为酸洗空白试验的挂片质量损失平均值,  $g$ ;  $S$  为挂片表面积,  $cm^2$ ;  $\rho$  为挂片密度,  $7.86 g/cm^3$ ;  $t$  为试验时间,  $h$ 。

缓蚀率  $\eta$  按式(3)计算:

$$\eta = \frac{x_0 - x}{x_0} \quad (3)$$

式中:  $x_0$  为未加缓蚀剂试验中的腐蚀率,  $mm/a$ ;  $x$  为加有缓蚀剂试验中的腐蚀率,  $mm/a$ 。

在静态挂片试验及旋转挂片试验中, 对每个试验条件, 采用 3 片相同的挂片进行平行试验。试验后进行挂片后处理, 并取 3 片挂片的平行测定结果的算术平均值作为最终结果, 要求单个平行测定结果与算术平均值的相对偏差不超过  $\pm 10\%$ , 否则将舍去。

## 2 结果与讨论

### 2.1 试验水质分析

试验用水取自内蒙古科技大学供暖锅炉软化水, 水质分析见表 1。

表 1 软化水水质

Tab. 1 The quality of softened water

水质指标	水样	补水标准
pH 值	8.35	9 ~ 10
总硬度/(mmol/L)	0.21	$\leq 0.6$
$Cl^-/(mg \cdot L^{-1})$	57.13	$\leq 300$
$SO_4^{2-}/(mg \cdot L^{-1})$	87.30	$\leq 150$
总铁量/( $mg \cdot L^{-1}$ )	0.0024	$\leq 0.1$
溶解氧/( $mg \cdot L^{-1}$ )	7.0 ~ 9.0	$\leq 0.1$

在常温下测得软化水溶解氧介于  $7.0 \sim 9.0 mg/L$  之间, pH 值为 8.35。对照供热采暖系统水质标准 (DBJ 01-619—2004) 可知, 该软化水水质与包钢热电厂供热管网软化水<sup>[4]</sup>水质类似, 都存在溶解氧含量超标严重, pH 值低于补水标准的问题, 根据 Ryznar 稳定指数法分析该水质为强腐蚀型水质。

### 2.2 添加除氧剂

#### 2.2.1 除氧剂的除氧性能

试验温度为  $50^\circ C$ , pH 值为 8.35。乙醛肟、异抗坏血酸钠除氧率如表 2 所示。

表 2 乙醛肟、异抗坏血酸钠投加量与除氧率的关系

Tab. 2 The relationship between the amount of acetaldoxime, sodium hexametaphosphate and the deoxidization rate

投加量/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	乙醛肟		异抗坏血酸钠	
	除氧后氧浓度 /( $mg \cdot L^{-1}$ )	除氧率 /%	除氧后氧浓度 /( $mg \cdot L^{-1}$ )	除氧率 /%
20	5.9	27.16	5.3	25.35
40	5.6	30.86	4.4	38.03
60	5.5	32.10	3.7	47.89
80	5.3	34.57	3.0	57.75
100	5.0	38.27	3.0	57.75
120	4.8	40.74	2.7	61.97
140	4.5	44.44	2.5	64.79
160	4.4	45.68	2.0	71.83

从表 2 可以看出, 在除氧剂的质量浓度低于  $160 mg/L$  时, 异抗坏血酸钠的除氧率优于乙醛肟的除氧率。随着乙醛肟投加量的增加, 除氧率是缓慢增大, 当其投加量为  $160 mg/L$  时, 除氧率仅为  $45.68\%$ 。异抗坏血酸钠同样是随着其浓度增加, 除氧率也是增大的, 当其投加量为  $160 mg/L$  时, 除氧率为  $71.83\%$ 。添加除氧剂对碳钢腐蚀率的影响需要通过挂片试验进行探讨。

#### 2.2.2 除氧剂对碳钢腐蚀率的影响

试验采用静态挂片法, 研究了乙醛肟、异抗坏血酸钠对挂片腐蚀率的影响, pH 值为 8.35。试验结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 挂片的腐蚀率随着异抗坏血酸钠浓度的增加而降低, 随着乙醛肟浓度的增加而上下波动, 基本没有缓蚀作用。当异抗坏血酸钠的质量浓度为  $160 mg/L$  时, 挂片的腐蚀率为  $0.0728 mm/a$ , 缓蚀率为  $64.35\%$ 。

结合表 2、图 1 可以看出, 随着溶液中溶解氧浓度的减小, 挂片的腐蚀率逐渐降低, 异抗坏血酸钠表现出较好的缓蚀作用。原因是异抗坏血酸钠本身不仅有除氧的作用, 而且还是一种较强的金属钝化剂, 可在金属表面形成薄的致密保护性氧化膜层, 抑制了挂片的腐蚀<sup>[5-6]</sup>。在本试验过程中, 乙醛肟的除氧缓蚀性能没有得到较好的体现, 这可能是由于乙醛肟浓度过低, 钝化作用和除氧能力比较弱, 使得除氧缓蚀效果不佳<sup>[7]</sup>。由此可见, 添加合适的除氧剂可以控制碳钢腐蚀的。

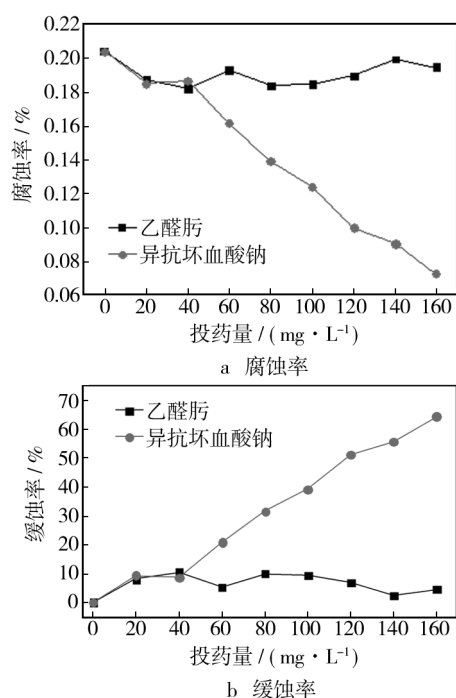


图1 除氧剂对碳钢缓蚀率、腐蚀率的影响

Fig. 1 The effect of deoxidant on inhibition rate and corrosion rate of carbon steel

### 2.3 调节pH值对碳钢腐蚀率的影响

试验采用旋转挂片法,研究了用氢氧化钠和碳酸钠调节pH对碳钢腐蚀率的影响,未调节pH值的软化水pH值为8.35。试验结果如图2所示。

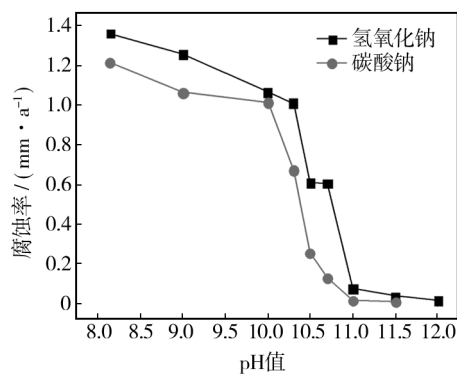


图2 pH值与碳钢腐蚀率的关系

Fig. 2 The relationship between pH value and corrosion rate for carbon steel

从图2可以看出,在原水样水质条件下,两组试验中初始的腐蚀率略有不同,分别为1.3644、1.2184 mm/a,在合理的误差范围10%内,而且用碳酸钠调节软化水的pH值比用氢氧化钠的碳钢腐蚀速率小。不管用氢氧化钠还是碳酸钠,腐蚀率均是随着pH值的增大在逐渐减小。当pH值小于10时,挂片的腐蚀率

相对变化较小,分别从1.3644 mm/a减至1.0699 mm/a和1.2184 mm/a减至1.0147 mm/a,缓蚀率分别为21.69%和16.71%;当pH值从10增大到11,腐蚀率变化很大;当pH为11时,腐蚀率分别为0.0751 mm/a和0.0143 mm/a;当pH值大于11后,两者的腐蚀率变化不明显,并随着pH值的增大趋于稳定。

从图2还可以看出,在pH值小于10时,碳钢的腐蚀率较大,溶液中发生氧的去极化和铁的氧化反应。此时挂片腐蚀为全面腐蚀,溶液中有红色沉淀物产生,同时在挂片表面生成了黑色的腐蚀产物,腐蚀产物的致密性和附着性较差,容易从挂片表面脱落,不具有保护作用,因而水中的溶解氧可以继续扩散到挂片表面,继续发生氧的去极化和铁的氧化反应,从而使得碳钢的腐蚀率较大。当pH值大于10后,挂片的腐蚀率明显降低,且当pH大于11时挂片表面呈现出金属光泽。其原因是:溶液pH升高,阴极去极化作用减弱,且阳极表面形成钝化膜,该钝化膜在碱液中的溶解度很低,附着在挂片表面阻碍腐蚀的进一步发生,起到一定的保护作用<sup>[8-11]</sup>。当pH值进一步升高,其对钝化膜稳定性的影响将减小,因而当pH值大于11后,随着pH的增大,腐蚀率相对变化不大<sup>[12]</sup>。由此可见,通过调节pH值控制金属的腐蚀是可行的。

### 2.4 添加除氧剂后调节pH值对碳钢腐蚀率的影响

由图2还可以看出,不管是用氢氧化钠还是碳酸钠,当将软化水的pH值调至11时,挂片的腐蚀率可到达一个很低的值,其腐蚀率分别为0.0751、0.0143 mm/a。试验过程中发现,乙醛肼在pH=11时的除氧率很低,因此研究了添加乙醛肼、异抗坏血酸钠除氧后在pH=11时对碳钢腐蚀率的影响。试验采用静态挂片法,除氧剂浓度按照除氧试验中除氧剂的浓度添加,pH值调节用1 mol/L的氢氧化钠溶液进行调节。试验结果如图3所示。

从图3可以看出,投加异抗坏血酸钠挂片的腐蚀率随着药剂投加量的增加呈下降的趋势,但相对变化不大。乙醛肼在投加量为0~100 mg/L时,挂片的腐蚀率比较低;当投加量为120 mg/L时,腐蚀率发生突变,达到0.0885 mm/a;投加量为140 mg/L时,腐蚀率为0.1531 mm/a,此时的腐蚀率比未投加药剂的腐蚀率还高。通过观察挂片的外观特征,在乙醛肼的质量浓度大于100 mg/L时,挂片的表面发生了点蚀,而氢氧化钠溶液又没有点蚀恢复性能的作用,从而挂片



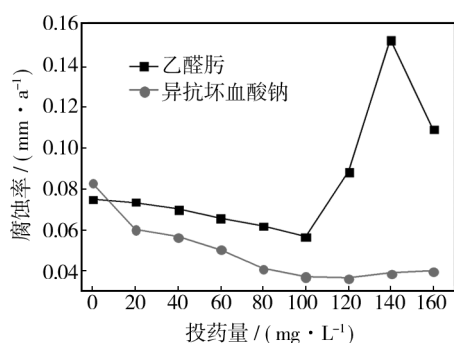


图3 除氧剂在 pH=11 时对碳钢腐蚀率的影响

Fig. 3 The effect of deoxidant on corrosion rate of carbon steel at pH=11

表 3 乙醛肟、异抗坏血酸钠在原水和 pH=11 条件下与碳钢腐蚀率的关系

Tab. 3 The relationship between acetaldoxime, sodium hexametaphosphate and corrosion rate under the condition of origin water and pH=11

除氧剂		腐蚀率 / ( mm · a <sup>-1</sup> )							
		20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L
乙醛肟	原水	0.1874	0.1824	0.1932	0.1838	0.1846	0.1898	0.1991	0.1948
	pH=11	0.0659	0.0703	0.0688	0.0621	0.0669	0.0685	0.1531	0.0979
异抗坏	原水	0.1848	0.1863	0.1615	0.1394	0.1240	0.0996	0.0903	0.0728
血酸钠	pH=11	0.0602	0.0565	0.0431	0.0413	0.0390	0.0371	0.0365	0.0298

### 3 结论

1) 在除氧剂的质量浓度小于 160 mg/L 时,异抗坏血酸钠的除氧效果优于乙醛肟的除氧效果,碳钢的腐蚀率随着异抗坏血酸钠投药量的增加呈下降趋势。碳钢的腐蚀率在乙醛肟质量浓度大于 120 mg/L 后随着其浓度的增加先增大后减低。

2) 在 pH 介于 8.35 到 12 之间时,碳钢的腐蚀率随着 pH 值的增大逐渐降低。当 pH 值大于 11 后,腐蚀率随着 pH 值的增大变化不明显。

3) 在本试验水质条件下,通过添加合适的除氧剂和调节 pH 值在一定程度上都可以控制碳钢的腐蚀,但综合考虑,调节 pH 值的效果要优于添加除氧剂的效果。

### 参考文献

- [1] 王超,秦丽娟,陶蕾,等. 无磷缓蚀剂 TS-417F 在软化水中的研究[J]. 化工科技市场,2010,33(6):22—24.  
WANG Chao, QIN Li-juan, TAO Lei, et al. Application of Non-phosphorus Corrosion Inhibitor TF-417F in Demineral-

ized Water[J]. Chemical Technology Market,2010,33(6):22—24.

的腐蚀率较大<sup>[7,13]</sup>。  
结合表 2 和表 3,分析可以看出,在相同的除氧剂浓度下,投加除氧剂后,调节 pH 值的腐蚀率比除氧未调节 pH 值的腐蚀率低,而且随着除氧剂浓度的增加,腐蚀率变化并不大。原因可能是在 pH=11 时形成的钝化膜较致密,抑制腐蚀的作用优于未调节 pH 值的钝化膜。在较高的 pH 值条件下,溶解氧浓度的大小对金属腐蚀率影响不大,这可能与碳钢在不同 pH 值形成的腐蚀产物有关。在较高的 pH 值条件下,碳钢表面生成的腐蚀产物更为致密和稳定,对碳钢的保护性更强<sup>[14—15]</sup>。

ized Water[J]. Chemical Technology Market,2010,33(6):22—24.

- [2] 曹华祥,彭涛. 浅谈供热管网的防腐问题[J]. 化工设备与防腐,1998(2):63—64.

CAO Hua-xiang, PENG Tao. On the Problem of Corrosion of Heating Pipe Network[J]. Chemical Equipment Anticorrosion,1998(2):63—64.

- [3] GB/T 18175—2000,水处理剂缓蚀性能的测定——旋转挂片法[S].

GB/T 18175—2000, Determination of Corrosion Inhibition Performance of Water Treatment Agents—rotation Specimen Method[S].

- [4] 张晶晶,陈莉荣. 异抗坏血酸钠及其复配物的除氧缓蚀性能研究[J]. 工业水处理,2013,33(12):62—65.

ZHANG Jing-jing, CHEN Li-rong. Study on the Deoxidization and Corrosion Inhibition Capacities of Sodium Erythorbate and Its Composites[J]. Industrial Water Treatment, 2013,33(12):62—65.

- [5] 丁姗姗,曹顺安,胡家元. 锅炉给水处理中的化学除氧剂[J]. 工业水处理,2010,30(4):17—21.

DING Shan-shan, CAO Shun-an, HU Jia-yuan. Chemical Oxygen Scavenger in the Treatment of Boiler Feedwater[J]. Industrial Water Treatment,2010,30(4):17—21.

- [6] 袁世平. 新型除氧剂——异抗坏血酸及钠盐[J]. 工业水

- 处理,1991,11(5):22—24.
- YUAN Shi-ping. The New Oxygen Scavenger—Sodium Erythorbate[J]. Industrial Water Treatment, 1991, 11(5): 22—24.
- [7] 许越,周德瑞,周景玲,等. 乙醛肟除氧及对 A3 钢电极电化性能的影响[J]. 精细化工,2000,17(11):643—645.
- XU Yue,ZHOU De-rui,ZHOU Jing-ling, et al. Deoxidization of Acetaldoxime and Its Electrochemical Behaviour Towards A3 Steel[J]. Fine Chemicals,2000,17(11):643—645.
- [8] 冉海涛. 循环水高 pH 值处理研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- RAN Hai-tao. The Development of High pH Water Treatment[D]. Tianjin: Tianjin University,2005.
- [9] 贾志军,杜翠薇,刘智勇,等. 3Cr 低合金钢在含饱和 CO<sub>2</sub> 的 NaCl 溶液中的腐蚀电化学行为[J]. 材料研究学报,2011,25(1):39—44.
- JIA Zhi-jun,DU Cui-wei,LIU Zhi-yong, et al. Effect of pH on the Corrosion and Electrochemical Behavior of 3Cr Steel in CO<sub>2</sub> Saturated NaCl Solution[J]. Chinese Journal of Materials Research,2011,25(1):39—44.
- [10] 吴新民,邵秀丽,薛晨,等. pH 值对碳钢在高含硫油田水中腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报,2013,33(2):159—163.
- WU Xin-min,SHAO Xiu-li,XUE Chen, et al. Effects of pH on Corrosion Behavior of Carbon Steel in Oilfield Water with High Sulphide[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2013,33(2):159—163.
- [11] 郭军科,于金山,彭翔,等. 加速腐蚀实验研究碳钢的大气腐蚀行为[J]. 表面技术,2014,43(4):68—73.
- GUO Jun-ke,YU Jin-shan,PENG Xiang, et al. Study on the Atmospheric Corrosion Behavior of Carbon Steel Using Accelerated Corrosion Test[J]. Surface Technology,2014,43(4):68—73.
- [12] 曹路. 碳钢在弱碱性环境中腐蚀行为的研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- CAO Lu. Research on Behaviors of Carbon Steel Corrosion under Alkalescent Water Conditioning[D]. Wuhan: Wuhan University,2005.
- [12] 曹国良,李国民,常万顺,等. pH 值和溶解氧对低碳钢点蚀诱发的影响[J]. 装备环境工程,2009,6(6):9—12.
- CAO Guo-liang,LI Guo-min,CHANG Wan-shun, et al. Effects of pH Value and Dissolved Oxygen on Pit Initiation Behavior of Mild Steel[J]. Equipment Environmental Engineering,2009,6(6):9—12.
- [14] 赵景茂. 碳钢在 NaHCO<sub>3</sub>-NaCl 体系中的局部腐蚀行为与机理研究[D]. 北京:北京化工大学,2001.
- ZHAO Jing-mao. Corrosion Behavior and Mechanism of Mild Steel in Sodium Bicarbonate Solutions Containing Chloride [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2001.
- [15] 谢建丽,金凯峰,蒋晓斌,等. 带锈碳钢在稀 NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 表面技术,2014,43(2):55—59.
- XIE Jian-li,JIN Kai-feng,JIANG Xiao-bin, et al. Corrosion Behavior of Rusted Carbon Steel in Diluted NaCl Solution [J]. Surface Technology,2014,43(2):55—59.
- (上接第 96 页)
- [12] TAKAHARU S, KENTARO S, SANAE T, et al. Tomoaki Hagiwara Citric Acid Pretreatment for Suppressing Adhesion of Major Egg Allergens to a Stainless Steel Surface [J]. Food Control,2013,32(2):702—706.
- [13] FRATEUR I, LARTUNDO-ROJAS L. Influence of Bovine Serum Albumin in Sulphuric Acid Aqueous Solution on the Corrosion and the Passivation of an Iron-chromium Alloy [J]. Electrochimica Acta,2006,51:1550—1557.
- [14] BUKOWSKA J. Self-assembled Monolayers of Mercaptosuccinic Acid Monolayers on Silver and Gold Surfaces Designed for Protein Binding[J]. Vibrational Spectroscopy Studies on Cytochrome,2007,38:943—949.
- [15] HAN Xue-ming. Preparation and Photolithography of Self-assembled Monolayers of 10-mercaptodecylphosphonic Acid on Glass Mediated by Zirconium for Protein Patterning [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,2013,108: 66—71.
- [16] FRATEUR I, LARTUNDO-ROJAS L. Influence of Bovine Serum Albumin in Sulphuric Acid Aqueous Solution on the Corrosion and the Passivation of an Iron-chromium Alloy [J]. Electrochimica Acta,2006,51:1550—1557.