

Research on the Effect of the pH Value and the Content of Dissolved Oxygen on the Corrosion of Carbon Steel in the Deionized Water at 100°C

Yanfei Xu, Songwei Wang, Yu Zhang, Yuqing Li

Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: 1558987115@qq.com

Received: Oct. 7th, 2015; accepted: Oct. 27th, 2015; published: Oct. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The effect of the pH value and the content of dissolved oxygen on the corrosion of 20# carbon steel in the deionized water at 100°C are studied by the weight-loss method. According to the test results, when the oxygen content is very high in the deionized water without deoxidization at 100°C, the increase of the pH value is helpful to reduce the corrosion of 20# carbon steel. In the deionized water slightly deoxidized or thoroughly deoxidized at 100°C, if the pH value is not high enough (e.g. 8.0 - 8.5), the corrosion of 20# carbon steel will be more serious, and only when the pH value is high enough (e.g. 9.0 - 9.5) can the corrosion of 20# carbon steel be reduced. Besides, within the oxygen content and the pH value range tested, the decrease of the oxygen content is helpful to reduce the corrosion of 20# carbon steel under the same pH value.

Keywords

Carbon Steel, The Deionized Water, Corrosion and Protection, 100°C, pH Value, Dissolved Oxygen

100°C 除盐水中pH值和溶解氧含量对碳钢的腐蚀影响研究

徐艳飞, 王松伟, 张 瑜, 李雨晴

武汉大学, 湖北 武汉
Email: 1558987115@qq.com

收稿日期: 2015年10月7日; 录用日期: 2015年10月27日; 发布日期: 2015年10月29日

摘要

采用失重法研究了100℃除盐水中pH值和溶解氧含量对20号碳钢的腐蚀影响。研究表明, 在试验的氧含量和pH值范围内, 在不除氧的100℃除盐水中提高pH值有利于减轻20号碳钢的腐蚀; 在部分除氧或几乎彻底除氧的100℃除盐水中pH值调得不够高(如8.0~8.5)时腐蚀反而加重, pH值必须调得足够高(如9.0~9.5)腐蚀才会减轻; 在各pH值除盐水中减少氧含量都有利于减轻20号碳钢的腐蚀。

关键词

碳钢, 除盐水, 腐蚀与防护, 100℃, pH值, 溶解氧

1. 引言

金属腐蚀是指金属在其周围环境中发生化学或电化学反应而产生的变质或破坏现象。发电机组凝结水系统的设备与管道材料多为20号碳钢、介质多为除盐水、温度从几十摄氏度到一百多摄氏度。如果不控制水中氧含量和调节水的pH值合适, 凝结水系统的设备与管道会发生氧腐蚀[1]-[7]。曾有人研究过碳钢水热管在无氧高温高纯水中的腐蚀与成膜规律, 研究温度为100℃~200℃, 没有具体水质变化对腐蚀与成膜影响的研究[8]。本文通过不锈钢高压釜单因素变化挂片试验, 研究100℃除盐水中的溶解氧含量、pH值对碳钢的腐蚀影响, 并在此基础上提出相应的防腐蚀措施。

2. 试验方法

2.1. 不锈钢高压釜挂片法

2.1.1. 试片材质和试验仪器

试验所用试片材质为20号碳钢, 其化学成分(质量分数)为: C 0.202%, Mn 0.452%, Si 0.293%, Ni 0.031%, Cr 0.056%, V 0.0002%, Cu 0.074%, Fe 余量[9] [10]。

试验所用主要试验仪器为:FYX-1 高压釜、BSA124S 赛多利斯天平、721-100 可见分光光度计、PHSJ-3F 实验室 pH 计、DDS-307 电导率仪等。

2.1.2. 试验步骤

- 1) 将试片用砂布和0号、2号、4号砂纸依次打磨后测量尺寸, 然后用无水乙醇擦洗2遍、放入干燥器中干燥至恒重备用;
- 2) 将已调好pH值的除盐水倒入高压釜、恒重并称重的20号碳钢试片挂入高压釜的液侧;
- 3) 以80L/h的流量通入高纯氮气一定时间, 然后迅速升温至预设温度并恒温8h;
- 4) 取出碳钢试片, 用除盐水清洗、擦去表面的腐蚀产物, 再用无水乙醇擦洗干净、放入干燥器中干燥至恒重后称重;
- 5) 根据试验前后试片质量的变化计算碳钢的失重腐蚀速度, 公式为:

$$V_{\text{失重}} = \frac{W_0 - W_1}{St}$$

式中 $V_{\text{失重}}$ 为失重腐蚀速度, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; W_1 为试验后试片的质量, g ; W_0 为试验前试片的质量, g ; S 为试片的表面积, m^2 ; t 为在高压釜中挂片试验的时间, h [11]。

2.2. 铁含量测定法

通过测定高压釜挂片后釜液中的铁含量辅助分析碳钢的腐蚀情况[12]。

采用国家标准“锅炉用水和冷却水分析方法”中的“铁的测定”方法即“1.10-菲罗啉分光光度法”测釜液中的铁含量。

根据釜液中铁含量计算碳钢的测铁腐蚀速度, 公式为:

$$V_{\text{测铁}} = \frac{C \times 10^{-6} \times V}{St}$$

式中 $V_{\text{测铁}}$ 为测铁腐蚀速度, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; C 为釜液中铁含量, $\mu\text{g}/\text{L}$; V 为釜液的体积, L ; S 为试片的表面积, m^2 ; t 为在高压釜中挂片试验的时间, h 。

3. 结果与讨论

3.1. 在相同溶解氧含量下碳钢在除盐水中的腐蚀与 pH 值的关系

1) 表 1 为通过高压釜挂片试验得到的对除盐水不除氧时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系。

由表 1 可知, 20 号碳钢在不除氧(氧含量在 $6895 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右)的 100°C 除盐水中, 在试验的 pH 值范围内, 测铁腐蚀速度远小于失重腐蚀速度, 随 pH 值升高失重腐蚀速度明显减小。说明在 100°C 不除氧的除盐水中, 提高 pH 值有利于减轻 20 号碳钢的腐蚀。

2) 表 2 为通过高压釜挂片试验得到的对除盐水除氧 4 min、氧含量为 $1250 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系。

由表 2 可知, 20 号碳钢在部分除氧(氧含量在 $1250 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右)的 100°C 除盐水中, 在试验的 pH 值范围内, 测铁腐蚀速度远小于失重腐蚀速度, 随 pH 值升高失重腐蚀速度和测铁腐蚀速度都是先稍微增大后明显减小。说明 20 号碳钢在 100°C 部分除氧的除盐水中, pH 值调得不够高时腐蚀反而加重, pH 值必须调得足够高腐蚀才会减轻。

3) 表 3 为通过高压釜挂片试验得到的对除盐水除氧 14 min、氧含量为 $75.9 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系。

由表 3 可知, 20 号碳钢在大部分除氧(氧含量在 $75.9 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右)的 100°C 除盐水中, 在试验的 pH 值范围内, 测铁腐蚀速度远小于失重腐蚀速度, 随 pH 值升高失重腐蚀速度先稍微增大后减小, 测铁腐蚀速度是先明显增大后明显减小。说明 20 号碳钢在 100°C 大部分除氧的除盐水中, pH 值调得不够高时腐蚀反而加重, pH 值必须调得足够高腐蚀才会减轻。

4) 表 4 为通过高压釜挂片试验得到的对除盐水除氧 30 min、氧含量为 $6.8 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系。

由表 4 可知, 20 号碳钢在几乎彻底除氧(氧含量在 $6.8 \mu\text{g}/\text{L}$ 左右)的 100°C 除盐水中, 在试验的 pH 值范围内, 测铁腐蚀速度远小于失重腐蚀速度, 随 pH 值升高失重腐蚀速度和测铁腐蚀速度都是先稍微增大后明显减小。说明 20 号碳钢在 100°C 几乎彻底除氧的除盐水中, pH 值调得不够高时腐蚀反而加重, pH 值必须调得足够高腐蚀才会减轻。

Table 1. The effect of pH value on the corrosion of carbon steel in the deionized water (oxygen content $\approx 6895 \mu\text{g/L}$)
表 1. 不除氧、氧含量为 $6895 \mu\text{g/L}$ 左右时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系

| 氧含量/ ($\mu\text{g/L}$) | pH | DD/ ($\mu\text{S/cm}$) | 表面积/(mm^2) | 失重/(mg) | 失重腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量/($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|-----------------------------|------|-----------------------------|-----------------------|---------|---|-------------------------|---|
| 6895 | 5.98 | 1.190 | 1293.7 | 9.0 | 0.8696 | 1441.87 | 0.0836 |
| | 7.15 | 2.75 | 1124.1 | 6.9 | 0.7673 | 1658.07 | 0.0922 |
| | 8.10 | 2.33 | 1261.3 | 6.9 | 0.6838 | 1508.67 | 0.0822 |
| | 9.40 | 10.62 | 1163.5 | 4.5 | 0.4835 | 1198.27 | 0.0708 |

Table 2. The effect of pH value on the corrosion of carbon steel in the deionized water with oxygen content $\approx 1250 \mu\text{g/L}$
表 2. 除氧 4 min、氧含量为 $1250 \mu\text{g/L}$ 左右时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系

| 氧含量/($\mu\text{g/L}$) | pH | DD/ ($\mu\text{S/cm}$) | 表面积/(mm^2) | 失重/(mg) | 失重腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量/($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|-------------------------|------|-----------------------------|-----------------------|---------|---|-------------------------|---|
| 1250 | 5.98 | 1.235 | 1141.3 | 1.5 | 0.1643 | 267.07 | 0.0176 |
| | 7.33 | 2.84 | 1147.4 | 1.7 | 0.1852 | 537.47 | 0.0351 |
| | 8.54 | 2.17 | 1276.0 | 1.8 | 0.1763 | 880.93 | 0.0431 |
| | 9.39 | 10.60 | 1151.1 | 1.0 | 0.1086 | 366.13 | 0.0199 |

Table 3. The effect of pH value on the corrosion of carbon steel in the deionized water with oxygen content $\approx 75.9 \mu\text{g/L}$
表 3. 除氧 14 min、氧含量为 $75.9 \mu\text{g/L}$ 左右时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系

| 氧含量/($\mu\text{g/L}$) | pH | DD/($\mu\text{S/cm}$) | 表面积/(mm^2) | 失重/(mg) | 失重腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量/($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|-------------------------|------|-------------------------|-----------------------|---------|---|-------------------------|---|
| 75.9 | 6.02 | 1.327 | 1060.5 | 1.0 | 0.1179 | 164.20 | 0.0097 |
| | 7.20 | 2.71 | 1108.5 | 1.1 | 0.1240 | 1073.40 | 0.0605 |
| | 8.17 | 2.88 | 1294.4 | 1.2 | 0.1159 | 540.07 | 0.0287 |
| | 9.32 | 10.50 | 1050.5 | 0.9 | 0.1071 | 466.97 | 0.0278 |

Table 4. The effect of pH value on the corrosion of carbon steel in the deionized water with oxygen content $\approx 6.8 \mu\text{g/L}$
表 4. 除氧 30 min、氧含量为 $6.8 \mu\text{g/L}$ 左右时碳钢的腐蚀与 pH 值的关系

| 氧含量/($\mu\text{g/L}$) | pH | DD/($\mu\text{S/cm}$) | 表面积/(mm^2) | 失重/(mg) | 失重腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量/($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度/($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|-------------------------|------|-------------------------|-----------------------|---------|---|-------------------------|---|
| 6.8 | 6.02 | 1.23 | 1183.4 | 0.9 | 0.0951 | 501.37 | 0.0265 |
| | 6.93 | 2.60 | 1204.8 | 1.0 | 0.1038 | 583.27 | 0.0303 |
| | 8.09 | 5.53 | 1273.0 | 1.3 | 0.1135 | 911.20 | 0.0447 |
| | 9.20 | 11.78 | 1102.3 | 0.7 | 0.0794 | 380.87 | 0.0216 |

3.2. 在相同 pH 值除盐水中碳钢的腐蚀与溶解氧含量的关系

1) 表 5 为通过高压釜挂片试验得到的 pH 值为 6.0 左右的除盐水中碳钢的腐蚀与氧含量的关系。

由表 5 可知, 20 号碳钢在 100°C 不调 pH 值(6.0 左右)的除盐水中, 在试验的氧含量范围内, 随氧含量减少腐蚀速度变小。说明在 100°C 不调 pH 值的除盐水中, 减少氧含量有利于减轻 20 号碳钢的腐蚀。

2) 表 6 为通过高压釜挂片试验得到的 pH 值为 7.0 左右的除盐水中碳钢的腐蚀与氧含量的关系。

由表 6 可知, 20 号碳钢在 100°C 调 pH 值为 7.0 左右的除盐水中, 在试验的氧含量范围内, 测铁腐蚀速度远小于失重腐蚀速度, 随氧含量减少失重腐蚀速度变小。说明在 100°C 调 pH 值为 7.0 左右的除盐水中, 减少氧含量有利于减轻 20 号碳钢的腐蚀。

3) 表 7 为通过高压釜挂片试验得到的 pH 值为 8.0~8.5 的除盐水中碳钢的腐蚀与氧含量的关系。

由表 7 可知, 20 号碳钢在 100℃调 pH 值为 8.0~8.5 的除盐水中, 在试验的氧含量范围内, 测铁腐蚀速度远小于失重腐蚀速度, 随氧含量减少腐蚀速度先减小后变化不大。说明在 100℃调 pH 值为 8.0~8.5 的除盐水中, 减少氧含量有利于减轻 20 号碳钢的腐蚀。

4) 表 8 为通过高压釜挂片试验得到的 pH 值为 9.0~9.5 的除盐水中碳钢的腐蚀与氧含量的关系。

由表 8 可知, 20 号碳钢在 100℃调 pH 值为 9.0~9.5 的除盐水中, 在试验的氧含量范围内, 测铁腐蚀速度远小于失重腐蚀速度, 随氧含量减少腐蚀速度变小。说明在 100℃调 pH 值为 9.0~9.5 的除盐水中, 减少氧含量有利于减轻 20 号碳钢的腐蚀。

Table 5. The effect of oxygen content on the corrosion of carbon steel in the deionized water with pH 6.0

表 5. pH 值为 6.0 左右时碳钢的腐蚀与氧含量的关系

| pH | 氧含量 /($\mu\text{g/L}$) | DD/ ($\mu\text{S/cm}$) | 表面积 /(mm^2) | 失重 /(mg) | 失重腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量 /($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|---|-----------------------------|---|
| 6.0 | 6895 | 1.190 | 1293.7 | 9.0 | 0.8696 | 1441.87 | 0.0836 |
| | 1250 | 1.235 | 1141.3 | 1.5 | 0.1643 | 267.07 | 0.0176 |
| | 75.9 | 1.327 | 1060.5 | 1.0 | 0.1179 | 164.20 | 0.0097 |
| | 6.8 | 1.23 | 1183.4 | 0.9 | 0.0951 | 501.37 | 0.0265 |

Table 6. The effect of oxygen content on the corrosion of carbon steel in the deionized water with pH 7.0

表 6. pH 值为 7.0 左右时碳钢的腐蚀与氧含量的关系

| pH | 氧含量 /($\mu\text{g/L}$) | DD/ ($\mu\text{S/cm}$) | 表面积 /(mm^2) | 失重 /(mg) | 失重腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量 /($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|---|-----------------------------|---|
| 7.0 | 6895 | 2.75 | 1124.1 | 6.9 | 0.7673 | 1658.07 | 0.0922 |
| | 1250 | 2.84 | 1147.4 | 1.7 | 0.1852 | 537.47 | 0.0351 |
| | 75.9 | 2.71 | 1108.5 | 1.1 | 0.1240 | 1073.40 | 0.0605 |
| | 6.8 | 2.60 | 1204.8 | 1.0 | 0.1038 | 583.27 | 0.0303 |

Table 7. The effect of oxygen content on the corrosion of carbon steel in the deionized water with pH 8.0~8.5

表 7. pH 值为 8.0~8.5 时碳钢的腐蚀与氧含量的关系

| pH | 氧含量 /($\mu\text{g/L}$) | DD/ ($\mu\text{S/cm}$) | 表面积 /(mm^2) | 失重 /(mg) | 失重腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量 /($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|---|-----------------------------|---|
| 8.0~8.5 | 6895 | 2.33 | 1261.3 | 6.9 | 0.6838 | 1508.67 | 0.0822 |
| | 1250 | 2.17 | 1276.0 | 1.8 | 0.1763 | 880.93 | 0.0431 |
| | 75.9 | 2.88 | 1294.4 | 1.2 | 0.1159 | 540.07 | 0.0287 |
| | 6.8 | 5.53 | 1273.0 | 1.3 | 0.1135 | 911.20 | 0.0447 |

Table 8. The effect of oxygen content on the corrosion of carbon steel in the deionized water with pH 9.0~9.5

表 8. pH 值为 9.0~9.5 时碳钢的腐蚀与氧含量的关系

| pH | 氧含量 /($\mu\text{g/L}$) | DD/ ($\mu\text{S/cm}$) | 表面积 /(mm^2) | 失重 /(mg) | 失重腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) | 铁含量 /($\mu\text{g/L}$) | 测铁腐蚀速度 /($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|---|-----------------------------|---|
| 9.0~9.5 | 6895 | 10.62 | 1163.5 | 4.5 | 0.4835 | 1198.27 | 0.0708 |
| | 1250 | 10.60 | 1151.1 | 1.0 | 0.1086 | 366.13 | 0.0199 |
| | 75.9 | 10.50 | 1050.5 | 0.9 | 0.1071 | 466.97 | 0.0278 |
| | 6.8 | 11.78 | 1102.3 | 0.7 | 0.0794 | 380.87 | 0.0216 |

4. 结论

1) 100℃除盐水中 pH 值和氧含量对碳钢腐蚀影响的规律为:

a) 在试验的氧含量和 pH 值范围内, 在 100℃不除氧的除盐水中, 提高 pH 值有利于减轻 20 号碳钢的腐蚀; 在 100℃部分除氧或几乎彻底除氧的除盐水中, pH 值调得不够高(如 8.0~8.5)时腐蚀反而加重, pH 值必须调得足够高(如 9.0~9.5)腐蚀才会减轻。

b) 在试验的氧含量和 pH 值范围内, 在 100℃各 pH 值除盐水中, 减少氧含量均有利于减轻 20 号碳钢的腐蚀。

2) 建议的 100℃除盐水中碳钢的防腐蚀措施为:

a) 在 100℃不除氧即氧含量很高(6895 μg/L 左右)的除盐水中, 为减轻或防止 20 号碳钢的腐蚀, 应调节除盐水的 pH 值为碱性, 建议将 pH 值调至 9.0~9.5 及以上。

b) 在 100℃部分除氧或几乎彻底除氧即氧含量不是很高(6.8 μg/L~1250 μg/L)的除盐水中, 为减轻或防止 20 号碳钢的腐蚀, 应不调节除盐水的 pH 值或将 pH 值调得足够高(如 9.0~9.5), 建议将 pH 值调至 9.0~9.5。

致 谢

感谢国家大学生创新实验项目“一种咪唑啉对除盐水中碳钢的缓蚀作用研究(201510486055)”的资助, 感谢武汉大学动力与机械学院谢学军教授的悉心指导。

参考文献 (References)

- [1] 谢学军, 龚洵洁, 许崇武, 彭珂如 (2011) 热力设备的腐蚀与防护. 中国电力出版社, 北京, 4-9.
- [2] 杨卫国, 徐君铭 (2005) (溶)氧腐蚀——一种容易被忽视的腐蚀形式. *广州化工*, **3**, 74-75.
- [3] 包月霞 (2010) 金属腐蚀的分类和防护方法. *广东化工*, **7**, 199.
- [4] 曹路 (2005) 碳钢在弱碱性环境中腐蚀行为的研究. 硕士论文, 武汉大学, 武汉.
- [5] 陈莉荣, 阚伟海, 姜庆宏, 王哲 (2015) 软化水中除氧剂与 pH 值对碳钢腐蚀率影响研究. *表面技术*, **7**, 108-113.
- [6] 曹国良, 李国民, 常万顺, 陈珊, 陈学群 (2009) pH 值和溶解氧对低碳钢点蚀诱发的影响. *装备环境工程*, **6**, 9-12.
- [7] 吴新民, 邵秀丽, 薛晨, 张彩霞, 方芳 (2013) pH 值对碳钢在高含硫油田水中腐蚀行为的影响. *中国腐蚀与防护学报*, **2**, 159-163.
- [8] 魏宝明, 章忠星, 朱一帆, 何平 (1988) 碳钢在高温高纯水中腐蚀与成膜规律研究. *南京化工学院学报*, **2**, 1-8.
- [9] 刘延湘, 刘军, 楼台芳 (2006) 锅炉水 pH 值影响 20A 碳钢的腐蚀研究. *中国腐蚀与防护学会耐蚀金属材料第十届学术年会*.
- [10] 刘延湘, 楼台芳 (2003) 低磷酸盐-低 NaOH 模拟炉水中 20A 碳钢的腐蚀. *腐蚀科学与防护技术*, **1**, 9-11.
- [11] 肖调兵 (2012) 高纯水中碳钢腐蚀的影响因素研究. 硕士论文, 武汉大学, 武汉.
- [12] 霍金仙 (2003) 高压釜腐蚀试验应注意的问题. *山西电力*, **1**, 5-7.