

保温材料浸出液成分及腐蚀性分析

蒋林林^{1,2} 张彦军^{1,2} 张红磊^{1,2} 周冰^{1,2} 韩文礼^{1,2}

1. 中国石油集团工程技术研究有限公司, 天津 300451;
2. 中国石油天然气集团公司石油管工程重点实验室—涂层材料与保温结构研究室, 天津 300451

摘要:保温层进水,会造成层下金属的腐蚀。对玻璃棉、141 b 体系聚氨酯泡沫塑料、二氧化硅气凝胶保温毡浸出液和去离子水的 pH 值、电导率、离子浓度进行了测试,对其腐蚀性进行分析,为保温材料的选用和腐蚀控制提供参考。实验结果表明:玻璃棉浸出液呈弱碱性,电导率是三种材料中最大的,并随着浸泡时间和浸泡温度的增加有增大的趋势,浸出液中含有 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,易引起点蚀、外应力腐蚀开裂;141 b 体系聚氨酯泡沫浸出液呈弱碱性,pH 值随着浸泡时间和浸泡温度的增长有减小的趋势,电导率相对较小,80℃ 浸出液电导率大于常温浸出液,浸出液中未检出 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} ;二氧化硅气凝胶保温毡浸出液呈中性,随浸泡时间和温度的增加转变成酸性,电导率随浸泡时间和浸泡温度的变化不大,浸出液中未检出 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 。与去离子水中 Cl^- 浓度相比,141 b 体系聚氨酯泡沫塑料、二氧化硅气凝胶保温毡浸出液中 Cl^- 浓度接近 0 mg/L。

关键词:保温材料;浸出液;腐蚀性;分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.05.016

Analysis of Components and Corrosivity of Aqueous Extract from Thermal Insulation Materials

Jiang Linlin^{1,2}, Zhang Yanjun^{1,2}, Zhang Honglei^{1,2}, Zhou Bing^{1,2}, Han Wenli^{1,2}

1. CNPC Engineering Technology Research Limited Company, Tianjin, 300451, China
2. The Key Laboratory of Tubular Goods Engineering, CNPC—Research Division of Anti-Corrosion Coating and Thermal Insulation Structure, Tianjin, 300451, China

Abstract: Corrosion under insulation happened when water came into thermal insulation layer. The pH value, conductivity and ions contents of aqueous extracts of glass wool, 141 b system polyurethane foam and silica aerogel insulation blankets and deionized water were tested to estimate their corrosivity and provide references for thermal insulation materials selection and corrosion control. The results showed that the lixivium of glass wool was alkaline. Its conductivity was the largest among the three and increased with the soaking duration and temperature rising. It contained Ca^{2+} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} and Cl^- , which easily caused pitting corrosion and external stress corrosion cracking. The lixivium of 141 b system polyurethane foam was alkaline, the pH value of which decreased with the soaking duration and temperature rising. The conductivity was relatively smaller and that of 80℃ lixivium was larger than lixivium under room temperature. SO_4^{2-} and CO_3^{2-} weren't detected in the lixivium. The lixivium of silica aerogel insulation

收稿日期:2018-03-02

作者简介:蒋林林(1985-),男,山东东营人,高级工程师,硕士,主要从事管道、储罐防腐保温技术的研究及技术服务工作。

blankets was neutral and changed into acid with soaking duration and temperature increasing. The conductivity changed slightly with soaking duration and temperature variation. SO_4^{2-} and CO_3^{2-} weren't detected either. Compared with the deionized water, the concentration of Cl^- in lixivium of 141 b system polyurethane foam and silica aerogel insulation blankets was closed to 0 mg/L.

Keywords: Thermal insulation materials; Aqueous extract; Corrosivity; Analysis

0 前言

一般认为,防水是保温工程的关键,保温材料一旦进水,不但起不到保温作用,还会导致保温层下管线或容器的均匀腐蚀、局部腐蚀或外应力腐蚀开裂(ESCC),也就是常说的保温层下腐蚀。保温层下腐蚀(Corrosion Under Insulation,以下简称 CUI)是指发生在施加了保温层材料的管道或设备外表面上的一种腐蚀现象^[1-2]。大量工程案例和实验研究表明,碳钢和低合金钢在保温层下常发生均匀腐蚀和点蚀,奥氏体不锈钢则多为外应力腐蚀开裂和点蚀^[1]。水分渗入保温材料中导致基底环境变潮是 CUI 发生的开始^[3],金属表面和保温材料间形成薄层电解质溶液,为电化学腐蚀创造必要条件,最终腐蚀产物为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 Fe_3O_4 。这些腐蚀产物比较疏松,缺乏保护性,所以一旦在金属表面的某处发生,腐蚀就会持续下去。多数研究者认为,CUI 发生的原因是由于水、水中的杂质以及温度的共同作用^[4-8]。CUI 常见的腐蚀物以氯化物和硫酸盐为主,特别是奥氏体不锈钢由于保温材料中氯化物导致的外应力腐蚀开裂问题较为突出^[1,8-9]。Srinivasan S 等人^[10]对 CUI 机理进行了更详细的介绍。玻璃棉、二氧化硅气凝胶保温毡常用于地面设备,聚氨酯泡沫保温层常用于埋地管道,本文对常用保温材料浸出液的腐蚀性进行了分析,旨在为保温材料的选用和腐蚀控制提供参考。

1 试验方法

1.1 实验材料

玻璃棉、二氧化硅气凝胶保温毡、141 b 体系聚氨酯泡沫塑料、去离子水。

1.2 实验仪器

瑞士梅特勒-托利多公司 S 20 P 酸度计和 S 30 电导率仪、HACH DREL 2800 便携式分光分度计。

1.3 依据的标准

依据 GB/T 15451-2006《工业循环冷却水总碱及酚酞碱度的测定》;GB/T 15453-2008《工业循环冷却水和锅炉用水中氯离子的测定》。

1.4 实验条件

1)将 10 g 保温材料浸入 500 mL 去离子水中,分别在室温下密闭静置浸泡 1、5、7、21、35、49 d,在 80℃ 下密

闭静置浸泡 1、3 d,滤除不溶物,得到不同工况下保温材料的浸出液。

2)对浸出液中的离子成分和浓度进行测试分析。

2 实验结果及分析

2.1 浸出液 pH 测试结果及分析

三种保温材料在不同温度下浸泡不同时间所得浸出液的 pH 值见图 1。pH 值在 7~8 之间为 A 3 钢的钝化区。在酸性环境中,由于强阴极去极化剂 H^+ 的存在,腐蚀加重^[11]。

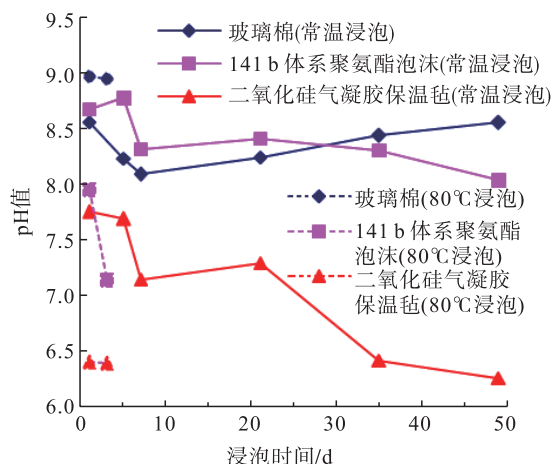


图 1 保温材料浸出液 pH 值随浸泡时间和温度变化的关系

从图 1 可以看出,玻璃棉常温浸泡和 80℃ 浸泡浸出液均呈碱性,常温浸泡 1~49 d 浸出液的 pH 值在 8.088~8.561 之间,相差不大,80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的 pH 值分别为 8.968、8.943。

141 b 体系聚氨酯泡沫常温浸泡 1~49 d 浸出液的 pH 值在 8.035~8.777 之间,80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的 pH 值分别为 7.950、7.135。常温浸泡,141 b 体系聚氨酯泡沫浸出液的 pH 值随着浸泡时间的增长,有减小的趋势,141 b 体系聚氨酯泡沫高温浸泡浸出液的 pH 值要比常温浸泡浸出液的 pH 值小。141 b 体系聚氨酯泡沫常温浸泡的浸出液呈弱碱性,可能是因为聚氨酯泡沫合成的催化剂是碱性的,使浸出液呈弱碱性。80℃ 浸泡,温度升高,促使聚氨酯泡沫水解,水解产物呈酸性,导致浸出液的 pH 值减小。

二氧化硅气凝胶保温毡常温浸泡 1~49 d 浸出液的

pH 值在 6.254~7.749 之间,随着浸泡时间的增长逐渐减小,由中性逐渐呈弱酸性。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的 pH 值分别为 6.393、6.382。常温浸泡 35 d 浸出液的 pH 值与 80℃ 浸泡 1、3 d 的 pH 值接近。浸出液呈弱酸性的原因与二氧化硅气凝胶保温毡的生产工艺有关。

2.2 浸出液电导率测试结果及分析

三种保温材料在不同温度下浸泡不同时间所得浸出液的电导率测试结果见图 2。测得去离子水的电导率为 2.46 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。电导率和浸出液的腐蚀性有一定的关系。电导率越大,金属表面产生宏观腐蚀的一般几率越大,点蚀也较容易集中于个别区域。有研究发现,腐蚀类型及严重程度可粗略地用浸出液电导值来判定。电导值为 $10^3 \mu\text{s}/\text{cm}$ 左右时,往往呈现出强点蚀的形态;电导值为 $10^2 \mu\text{s}/\text{cm}$ 时,常为小面积深坑状的腐蚀;电导值为 $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ 时,常呈现带浅坑的一般腐蚀^[12]。

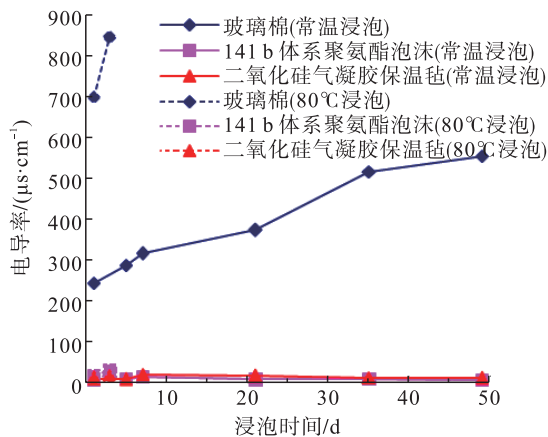


图 2 保温材料浸出液电导率随浸泡时间和温度变化的关系

从图 2 可以看出,浸泡时间和浸泡温度相同时,玻璃棉浸出液的电导率最大,远远大于 141 b 体系聚氨酯泡沫和二氧化硅气凝胶保温毡浸出液的电导率。141 b 体系聚氨酯泡沫和二氧化硅气凝胶保温毡浸出液的电导率相近。随着浸泡时间的增长,玻璃棉浸出液的电导率呈增大趋势,141 b 体系聚氨酯泡沫和二氧化硅气凝胶保温毡浸出液的电导率变化不大。

玻璃棉常温浸泡和 80℃ 浸泡浸出液的电导率均随着浸泡时间的增长而增大,常温浸泡 1~49 d 浸出液的电导率在 244.16~554.80 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间,80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的电导率分别为 699.12、844.67 $\mu\text{s}/\text{cm}$,明显大于其常温浸泡浸出液的电导率。

141 b 体系聚氨酯泡沫常温浸泡 1~49 d 浸出液的电导率在 6.65~16.21 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间,常温浸泡浸出液的电导率随浸泡时间的增长变化不大。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的电导率分别为 17.04、30.95 $\mu\text{s}/\text{cm}$,80℃ 浸泡浸出液的电导率随浸泡时间的增长有增大趋势。

二氧化硅气凝胶保温毡常温浸泡 1~49 d 浸出液的

电导率在 8.64~17.00 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的电导率分别为 15.69、18.94 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。二氧化硅气凝胶保温毡常温浸泡浸出液的电导率和 80℃ 浸泡浸出液的电导率相差很小。

从浸出液电导率分析,玻璃棉浸出液腐蚀类型表现为强点蚀状态,141 b 体系聚氨酯泡沫和二氧化硅气凝胶保温毡,表现为一般腐蚀状态。

2.3 浸出液 Mg^{2+} 浓度测试结果及分析

三种保温材料在不同温度下浸泡不同时间所得浸出液中 Mg^{2+} 浓度测试结果见表 1。 Mg^{2+} 在碱性环境中,当浓度较小时,易形成附着性很差的沉淀,加剧腐蚀;当浓度较大时,生成的沉淀膜完整性好,可抑制腐蚀。

表 1 保温材料浸出液 Mg^{2+} 浓度 单位:mg/L

工况	样品名称			
	玻璃棉	141 b 体系聚氨酯泡沫	二氧化硅气凝胶保温毡	去离子水
常温浸泡 1 d	0.602 4	0.146 4	0.163 2	0.031 2
常温浸泡 5 d	0.775 2	0.012 0	0.043 2	0.019 0
常温浸泡 7 d	0.957 6	0.172 8	0.172 8	0.062 4
常温浸泡 21 d	0.758 4	0.098 4	0.105 6	0.064 8
常温浸泡 35 d	0.676 8	0.081 6	0.112 8	0.081 6
常温浸泡 49 d	0.477 6	0.076 8	0.096 0	0.019 2
80℃ 浸泡 1 d	0.660 0	0.069 6	0.062 4	0.057 6
80℃ 浸泡 3 d	0.621 6	-	0.055 2	0.081 6

从表 1 数据可知,玻璃棉常温浸泡 1~49 d 浸出液的 Mg^{2+} 浓度在 0.477 9~0.957 6 mg/L 之间,80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的 Mg^{2+} 浓度分别为 0.660 0、0.612 6 mg/L。常温浸泡时间和浸泡温度对浸出液中 Mg^{2+} 浓度影响较小。

141 b 体系聚氨酯泡沫常温浸泡 1、7 d 浸出液的 Mg^{2+} 浓度较大,分别为 0.146 4、0.172 8 mg/L,其他工况浸出液 Mg^{2+} 浓度均小于 0.1 mg/L。80℃ 浸泡 1 d 浸出液 Mg^{2+} 浓度为 0.069 6 mg/L,80℃ 浸泡 3 d 浸出液中未检出 Mg^{2+} 。

二氧化硅气凝胶保温毡常温浸泡 1~49 d 浸出液的 Mg^{2+} 浓度在 0.043 2~0.172 8 mg/L 之间。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的 Mg^{2+} 浓度分别为 0.062 4、0.055 2 mg/L。

2.4 浸出液 Ca^{2+} 浓度测试结果及分析

三种保温材料在不同温度下浸泡不同时间所得浸出液中 Ca^{2+} 浓度测试结果见表 2。 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 对腐蚀性影响的作用原理相似。当溶液不含可使 Ca^{2+} 沉淀的阴离子时, Ca^{2+} 对碳钢的腐蚀影响不大。当在碱性环境下存在可使 Ca^{2+} 生成沉淀的阴离子时,沉积在金属表面

的 CaCO_3 微粒可能成为点蚀源而诱发点蚀和局部腐蚀^[13], 当溶液中 Ca^{2+} 的浓度较大时, 沉积的 CaCO_3 膜完整度好, 可抑制腐蚀。

表 2 保温材料浸出液 Ca^{2+} 浓度 单位: mg/L

工况	样品名称			
	玻璃棉	141 b 体系聚氨酯泡沫	二氧化硅气凝胶保温毡	去离子水
常温浸泡 1 d	0.532	0.568	0.600	0.032
常温浸泡 5 d	0.360	0.032	0.352	0.032
常温浸泡 7 d	-	0.716	1.080	0.032
常温浸泡 21 d	-	0.108	0.148	0.032
常温浸泡 35 d	-	0.388	0.552	0.032
常温浸泡 49 d	0.012	0.056	0.644	0.032
80℃ 浸泡 1 d	0.128	0.444	-	0.032
80℃ 浸泡 3 d	0.180	0.668	1.412	0.032

从表 2 数据可知, 玻璃棉常温浸泡 1 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度为 0.532 mg/L, 浸泡 5 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度为 0.360 mg/L, 浸泡 7、21、35 d 浸出液未检出 Ca^{2+} , 浸泡 49 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度为 0.012 mg/L。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度分别为 0.128、0.180 mg/L。

141 b 体系聚氨酯泡沫常温浸泡 1、5、7、21、35、49 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度分别为 0.568、0.032、0.716、0.108、0.388、0.056 mg/L。80℃ 浸泡 1 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度为 0.444 mg/L, 80℃ 浸泡 3 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度为 0.668 mg/L。

二氧化硅气凝胶保温毡常温浸泡 1~49 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度在 0.148~1.080 mg/L 之间。80℃ 浸泡 1 d 浸出液中未检出 Ca^{2+} , 80℃ 浸泡 3 d 浸出液 Ca^{2+} 浓度为 1.412 mg/L。

2.5 浸出液 SO_4^{2-} 浓度测试结果及分析

三种保温材料在不同温度下浸泡不同时间所得浸出液中 SO_4^{2-} 浓度测试结果见表 3。测得去离子水中 SO_4^{2-} 浓度为 0 mg/L。 SO_4^{2-} 对碳钢的点蚀也有一定的影响, 当其浓度较低时, 其与 Cl^- 的竞争吸附作用可能导致局部 Cl^- 浓度过高, 加速点蚀的发生; 但当 SO_4^{2-} 浓度升高到一定程度时, Cl^- 已无法再大量富集在某一局部, 这时 Cl^- 就起到了抑制点蚀的作用^[14]。

从表 3 数据可知, 玻璃棉常温浸泡 1~49 d 浸出液 SO_4^{2-} 浓度在 47~52 mg/L 之间。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液的 SO_4^{2-} 浓度分别为 51、54 mg/L。常温浸泡时间对浸出液中 SO_4^{2-} 浓度影响较小。

141 b 体系聚氨酯泡沫、二氧化硅气凝胶保温毡、去离子水中均未检出 SO_4^{2-} 。

表 3 保温材料浸出液 SO_4^{2-} 浓度 单位: mg/L

工况	样品名称			
	玻璃棉	141 b 体系聚氨酯泡沫	二氧化硅气凝胶保温毡	去离子水
常温浸泡 1 d	52	0	0	0
常温浸泡 5 d	47	0	0	0
常温浸泡 7 d	49	0	0	0
常温浸泡 21 d	46	0	0	0
常温浸泡 35 d	50	0	0	0
常温浸泡 49 d	50	0	0	0
80℃ 浸泡 1 d	51	0	0	0
80℃ 浸泡 3 d	54	0	0	0

2.6 浸出液 CO_3^{2-} 浓度测试结果及分析

三种保温材料在不同温度下浸泡不同时间所得浸出液中 CO_3^{2-} 浓度测试结果见表 4。测得去离子水中 CO_3^{2-} 浓度为 0 mg/L。 CO_3^{2-} 对腐蚀性的影响与 Ca^{2+} 对腐蚀性的影响原理相关, 两者对腐蚀的影响取决于溶液的 pH 值和两者的浓度。 CO_3^{2-} 与碳钢阳极溶解的金属离子(主要是 Fe^{2+} 、 Fe^{3+}) 形成 FeCO_3 、 $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)_3$ 沉积膜, 阻碍阳极反应的进一步进行^[14]。

表 4 保温材料浸出液 CO_3^{2-} 浓度 单位: mg/L

工况	样品名称			
	玻璃棉	141 b 体系聚氨酯泡沫	二氧化硅气凝胶保温毡	去离子水
常温浸泡 1 d	0	0	0	0
常温浸泡 5 d	0	0	0	0
常温浸泡 7 d	18.09	0	0	0
常温浸泡 21 d	36.18	0	0	0
常温浸泡 35 d	99.50	0	0	0
常温浸泡 49 d	108.54	0	0	0
80℃ 浸泡 1 d	36.18	0	0	0
80℃ 浸泡 3 d	54.27	0	0	0

从表 4 数据可知, 玻璃棉常温浸泡 1~49 d 浸出液 CO_3^{2-} 浓度随着浸泡时间的增长呈增长趋势, 在 0~108.54 mg/L 之间。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液 CO_3^{2-} 浓度分别为 36.18、54.27 mg/L。

141 b 体系聚氨酯泡沫、二氧化硅气凝胶保温毡、去离子水中均未检出 CO_3^{2-} 。

2.7 浸出液 Cl^- 浓度测试

溶液中 Cl^- 在诱发电蚀中发挥着重要的作用^[15-16], 是引起材料发生孔蚀最敏感的阴离子, 大多数环境下材料的孔蚀都与它有关^[17]。Bastos A C、Caines S、Frankel

G S, Pardo A 等人就解释含 Cl^- 溶液中诱发金属点蚀的原因进行了更多研究^[18-21]。 Cl^- 可破坏 A 3 碳钢表面腐蚀生成的钝化膜, 从而使得碳钢表面始终处于活化状态^[22-23]。此外, 碳钢活化表面还可与氯离子形成氯化物, 而氯化物属于强酸弱碱盐, 易水解生成氢离子, 从而导致腐蚀表面 pH 降低, 进一步促进了碳钢腐蚀的发生^[14]。氯化物还可能导致奥氏体不锈钢发生外应力腐蚀开裂 (ESCC), 美国材料试验学会 ASTM C 795 特别指明了接触奥氏体不锈钢材料的保温材料的使用技术规范, 规定保温材料的氯化物含量限值, 并对辅助材料如水泥、粘合剂、填缝剂、腻子及包皮材料等均作了详细规定^[24]。一般情况下要求用于不锈钢材料的保温材料中滤出氯化物含量要低于 $0.2 \times 10^{-4} \text{ mg/L}$ ^[25]。保温材料中滤出氯化物含量仅为 $0.1 \times 10^{-4} \text{ mg/L}$ 就足以使加氢裂化装置中的不锈钢管道出现外应力腐蚀开裂^[26]。

三种保温材料在不同温度下浸泡不同时间所得浸出液中 Cl^- 浓度测试结果见表 5。从表 5 数据可知, 玻璃棉常温浸泡 1~49 d 浸出液 Cl^- 浓度在 2.663~3.550 mg/L 之间。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液 Cl^- 浓度分别为 3.990、7.544 mg/L。与其他两种保温材料浸出液相比, 玻璃棉浸出液中 Cl^- 浓度是相对较大的。常温下, 浸泡时间对浸出液中 Cl^- 浓度基本没有影响。80℃ 时, 浸出液中 Cl^- 浓度随着浸泡时间的增长有增大的趋势。

表 5 保温材料浸出液 Cl^- 浓度 单位: mg/L

工况	样品名称			
	玻璃棉	141 b 体系聚 氨酯泡沫	二氧化硅气 凝胶保温毡	去离 子水
常温浸泡 1 d	2.663	1.331	0.888	<0.888
常温浸泡 5 d	2.663	1.331	0.888	<0.888
常温浸泡 7 d	2.663	1.775	1.775	<0.888
常温浸泡 21 d	3.550	2.663	1.775	<0.888
常温浸泡 35 d	2.663	<0.888	<0.888	<0.888
常温浸泡 49 d	2.663	<0.888	<0.888	<0.888
80℃ 浸泡 1 d	3.990	0.888	<0.888	<0.888
80℃ 浸泡 3 d	7.544	1.775	<0.888	<0.888

141 b 体系聚氨酯泡沫常温浸泡 1~49 d 浸出液 Cl^- 浓度在 0.888~2.663 mg/L 之间。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液 Cl^- 浓度分别为 0.888、1.755 mg/L。与去离子水中 Cl^- 浓度相比, 141 b 体系聚氨酯泡沫常温浸泡和 80℃ 浸泡析出 Cl^- 的浓度非常低, 接近 0 mg/L。

二氧化硅气凝胶保温毡常温浸泡 1~49 d 浸出液 Cl^- 浓度在 0.888~1.775 mg/L 之间。80℃ 浸泡 1、3 d 浸出液 Cl^- 浓度分别为 0.888、0.888 mg/L。与去离子水

中 Cl^- 浓度相比, 二氧化硅气凝胶保温毡常温浸泡和 80℃ 浸泡都不会析出 Cl^- 。

从浸出液 Cl^- 浓度分析, 玻璃棉浸出液易引起碳钢的点蚀、局部腐蚀、奥氏体不锈钢的外应力腐蚀开裂。

3 结论

1) 玻璃棉浸出液呈碱性, 电导率较大, 电导率随着浸泡时间和浸泡温度的增加有增大的趋势, 浸出液中含有 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- , 易引起点蚀、局部腐蚀、外应力腐蚀开裂, 危害性最大。

2) 141 b 体系聚氨酯泡沫浸出液呈弱碱性, 随着浸泡时间和温度的增加逐渐转变为中性, 常温浸泡电导率变化不大, 80℃ 浸泡浸出液电导率随浸泡时间增长有增大趋势, 浸出液中未检出 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 。产生的腐蚀类型为带浅坑的一般腐蚀。

3) 二氧化硅气凝胶保温毡浸出液, 随着浸泡时间和温度的增加由中性逐渐转变为酸性, 常温浸泡和 80℃ 浸泡电导率变化不大, 浸出液中未检出 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 。

参考文献:

- [1] 姜莹洁, 巩建鸣, 唐建群. 保温层下金属材料腐蚀的研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 381-386.
Jiang Yingjie, Gong Jianming, Tang Jianqun. Current Status of Research on Corrosion of Metallic Materials Beneath Insulation Coat [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(5): 381-386.
- [2] Aung N N, Wai W K, Tan Y J. A Novel Electrochemical Method for Monitoring Corrosion under Insulation [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2006, 53(3): 175-179.
- [3] Sousa F V V, Mota R O, Quintela J P, et al. Characterization of Corrosive Agents in Polyurethane Foams for Thermal Insulation of Pipelines [J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(27): 7780-7785.
- [4] 吕晓亮, 唐建群, 巩建鸣, 等. 保温层下腐蚀防护的研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(2): 167-172.
Lv Xiaoliang, Tang Jianqun, Gong Jianming, et al. Current Research Status on Prevention of Metal Corrosion Under Insulation [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(2): 167-172.
- [5] Vogelaere F. Corrosion Under Insulation [J]. Process Safety Progress, 2009, 28(1): 30-35.
- [6] Shekari E, Khan F, Ahmed S. Probabilistic Modeling of Pitting Corrosion in Insulated Components Operating in Offshore Facilities [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and

- Uncertainty in Engineering Systems, 2017, 3 (1): 011003 - 1 - 011003 - 11.
- [7] Geary W, Parrott R. Two Corrosion under Insulation Failure Case Studies [J]. Loss Prevention Bulletin, 2016, 250 (8): 2 - 6.
- [8] Delahunt J F. Corrosion Under Thermal Insulation and Fireproofing-An Overview [C]//Paper NACE - 03022 was Presented at the Corrosion 2003, 16 - 20 March, 2003, San Diego, California, USA. New York: NACE, 2003.
- [9] Goldie B, Kapsanis K. Corrosion Under Insulation: Basics and Resources for Understanding [J]. JPCL, 2009, 6: 34.
- [10] Srinivasan S, Ellis II P F, Chauviere M M, et al. Can we Better Address CUI and Energy Loss? [J]. Material Performance, 2013, 52 (1): 52 - 58.
- [11] 谢志海, 李莉, 降晓艳, 等. A3 碳钢在模拟油田水中的腐蚀行为研究[J]. 应用化工, 2010, 39(9): 1293 - 1299.
Xie Zhihai, Li Li, Jiang Xiaoyan, et al. Study of the Corrosion Behavior of A3 Carbon Steel in Simulated Oilfield Water [J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39 (9): 1293 - 1299.
- [12] 翁永基. 钢制管道在受潮保温材料中的腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 1989, (3): 7 - 13.
Weng Yongji. Corrosion of Steel Pipelines in Wet Thermal Insulation Materials [J]. Corrosion and Protection, 1989, (3): 7 - 13.
- [13] 许立铭, 罗逸, 董泽华, 等. 钙离子对碳钢在油田污水中腐蚀的影响[J]. 油田化学, 1996, 13(2): 161 - 164.
Xu Liming, Luo Yi, Dong Zehua, et al. The Influence of Calcium Ions on Corrosion of Mild Carbon Steel in Oilfield Produced Water [J]. Oilfield Chemistry, 1996, 13 (2): 161 - 164.
- [14] 安洋. 不锈钢及碳钢在工业循环冷却水中腐蚀性为的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
An Yang. Study on Behaviors of the Corrosion of Stainless Steel and Carbon Steel in Circulating Cooling Water [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [15] Lin Bin, Hu Ronggang, Ye Chenqing, et al. A Study on the Initiation of Pitting Corrosion in Carbon Steel in Chloride-containing Media Using Scanning Electrochemical Probes [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55 (21): 6542 - 6545.
- [16] Noveiri E, Torfi S. Nano Coating Application for Corrosion Reduction in Oil and Gas Transmission Pipe; A Case Study in South of Iran [J]. IJSEI, 2012, 1 (2): 104 - 110.
- [17] 姜涛. 碳钢在碱性溶液中孔蚀电化学研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2000.
Jiang Tao. Study on Pitting Corrosion of Carbon Steel by Electrochemical Methods in Alkaline Solutions [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2000.
- [18] Bastos A C, Simões A M, González S, et al. Imaging Concentration Profiles of Redox-active Species in Open-circuit Corrosion Processes with the Scanning Electrochemical Microscope [J]. Electrochemistry Communications, 2004, 6 (11): 1212 - 1215.
- [19] Caines S, Khan F, Shirokoff J. Analysis of Pitting Corrosion on Steel under Insulation in Marine Environments [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26 (6): 1466 - 1483.
- [20] Frankel G S, Sridhar N. Understanding Localized Corrosion [J]. Materials Today, 2008, 11 (10): 38 - 44.
- [21] Pardo A, Moreno F, Otero E, et al. Influence of pH and Chloride Concentration on the Pitting and Crevice Corrosion Behavior of High-Alloy Stainless Steels [J]. Corrosion, 2000, 56 (4): 411 - 418.
- [22] 黄锦花, 李自刚, 钱余海. 低合金耐海水腐蚀钢在模拟腐蚀环境下的耐蚀性能研究[J]. 上海金属, 2006, 28(4): 6 - 8.
Huang Jinhua, Li Zigang, Qian Yuhai. Accelerated Corrosion Behavior of Seawater Corrosion Resistant Q345 C-NHY3 Steel in Artificial Simulated Environments [J]. Shanghai Metals, 2006, 28 (4): 6 - 8.
- [23] 郑莹莹, 邹妍, 王佳. 海洋环境中锈层下碳钢腐蚀行为的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(1): 93 - 98.
Zheng Yingying, Zou Yan, Wang Jia. Research Progress on Corrosion of Carbon Steels Under Rust Layer in Marine Environment [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23 (1): 93 - 98.
- [24] Goldberg L. Take a Systems Approach to Corrosion Under Insulation [J]. Chemical Engineering Progress, 2000, 96 (3): 63 - 67.
- [25] Kumar M S, Sujata M, Venkataswamy M A, et al. Failure Analysis of a Stainless Steel Pipeline [J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15 (5): 497 - 504.
- [26] Babakr A M, Subai S A. Under Insulation Stress Corrosion Cracking of Process Piping [C]//Paper NACE - 06500 was Presented at the Corrosion 2006, 12 - 16 March, 2006, San Diego, California. New York: NACE, 2006.