

低温多效海水淡化铝合金换热管的化学清洗

靳亚鹏, 吴芸芳, 崔振东, 高丽丽, 尹建华, 王维珍

(自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘要: **目的** 研究低温多效海水淡化系统铝合金换热管的化学清洗技术及现场应用。**方法** 利用 X 射线荧光光谱分析现场铝合金换热管垢样成分, 采用旋转挂片腐蚀模拟试验对 5052 铝合金试样在不同清洗介质下的腐蚀速率进行测试, 并对不同浓度下的缓蚀剂性能进行评价。在现场应用中, 通过监测系统 pH 值、钙镁离子浓度、铝合金试样现场腐蚀速率以及铝合金换热管表面形貌, 对清洗过程进行控制, 评价清洗效果。**结果** 现场铝合金换热管结垢主要成分为 CaCO_3 及 CaSO_4 。所选清洗介质中, 铝合金在盐酸中的腐蚀速率最大, 在柠檬酸中的腐蚀速率最小, 结合腐蚀性及溶垢能力, 选择氨基磺酸为酸洗剂。40 °C 下, 铝合金在 4% 氨基磺酸溶液中的腐蚀速率为 1.434 mm/a, 添加质量浓度为 2 g/L 的 HSD103 酸洗缓蚀剂后, 腐蚀速率降低至 0.084 mm/a, 缓蚀效率为 94.14%, 此后继续增加缓蚀剂浓度, 并未明显提升缓蚀效率。现场应用中, 铝合金腐蚀挂片平均腐蚀速率为 0.146 mm/a, 缓蚀效率达到 90%。现场清洗约 21 h 后达到酸洗终点, pH 稳定在 2 左右, 钙镁离子浓度无明显上升, 铝合金表面垢层清除。**结论** 以氨基磺酸为清洗介质可有效清除铝合金换热管表面 CaCO_3 及 CaSO_4 垢, HSD103 酸洗缓蚀剂对铝合金有明显的保护作用, 现场应用取得了优良的清洗效果。

关键词: 低温多效海水淡化; 铝合金换热管; 结垢; 化学清洗; 氨基磺酸; 缓蚀剂

中图分类号: TG179 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)02-0200-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.029

Chemical Cleaning of Aluminium Alloy Heat Exchanger Tube in Low Temperature Multi-effect Seawater Desalination System

JIN Ya-peng, WU Yun-fang, CUI Zhen-dong, GAO Li-li, YIN Jian-hua, WANG Wei-zhen

(The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR(Tianjin), Tianjin 300192, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the chemical cleaning technology of aluminum alloy heat exchanger tube in low temperature multi-effect desalination system and put the technology into field use. The chemical composition of scale on the aluminum alloy heat exchanger tube was analyzed by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). The corrosion rate of 5052 aluminum alloy in different cleaning agents was tested and the corrosion inhibition efficiency at different concentrations of corrosion inhibitors was evaluated in rotary coupon corrosion simulation test. During the field application, pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} concentra-

收稿日期: 2018-07-17; 修订日期: 2018-11-02

Received: 2018-07-17; **Revised:** 2018-11-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2017YFC0404100); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (K-JBYWF-2017-G5, K-JBYWF-2017-T04)

Fund: Supported by the “13th five-year” National Key Research and Development Plan (2017YFC0404100) and the Fundamental Research Funds for the Central Public Welfare Research Institute (K-JBYWF-2017-G5, K-JBYWF-2017-T04)

作者简介: 靳亚鹏 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料腐蚀与防护技术。

Biography: JIN Ya-peng (1993—), Male, Master, Research focus: corrosion and protection of metal materials.

通讯作者: 王维珍 (1976—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为海水循环冷却、海水淡化水处理技术。邮箱: 13920481628@163.com

Corresponding author: WANG Wei-zhen (1976—), Male, Master, Professorate senior engineer, Research focus: sea water cycle cooling and desalination water treatment technology. E-mail: 13920481628@163.com

tion of the system and corrosion rate of aluminum alloy were monitored to control the cleaning process and evaluate the cleaning effect. Main components of heat exchange tube scale were CaCO_3 and CaSO_4 . In the selected cleaning agents, aluminum alloy corrosion rate was the highest in hydrochloric acid and the minimal in citric acid. Sulfamic acid was selected as the aluminum alloy heat exchanger tube cleaning agent because of corrosion and scale removal ability. At 40 °C, the corrosion rate of aluminum alloy in 4% sulfamic acid without and with 2 g/L HSD103 inhibitor was 1.434 mm/a and 0.084 mm/a respectively, which indicated that the corrosion inhibition efficiency was 94.14%. After that, increasing the corrosion inhibitor concentration did not obviously improve the corrosion inhibition efficiency. In the field, the average corrosion rate of aluminum alloy coupons was 0.146 mm/a and the corrosion inhibition efficiency was 90%. The acid cleaning process ended up after 21 h. After acid cleaning, the pH was stable around 2, the concentration of Ca^{2+} and Mg^{2+} did not increase significantly and the scale on aluminum alloy heat exchanger tube was cleaned out. CaCO_3 and CaSO_4 scale on the aluminum alloy heat exchanger tubes can be effectively removed by sulfamic acid as cleaning agent, and the corrosion inhibitor has obvious protective effect on aluminum alloy so that good cleaning effect is obtained by field application.

KEY WORDS: low temperature multi-effect sea water desalination; aluminum alloy heat exchanger tube; scaling; chemical cleaning; sulfamic acid; corrosion inhibitor

低温多效海水淡化技术^[1]是将一系列水平管降膜蒸发器串联并分为若干效组,通过蒸汽的多次蒸发和冷凝,得到数倍于加热蒸汽量蒸馏水的海水淡化技术,该过程中,盐水的最高蒸发温度约为 70 °C。由于海水的高含盐特性,虽然在海水淡化系统内采用添加阻垢剂等防垢技术^[2-4],但在加热浓缩过程中结垢仍不可避免^[5-6]。结垢会使效体间盐水温差明显升高,大幅降低海水淡化系统的换热效率^[7-9],增加能耗和生产运行成本,同时还可能诱发垢下腐蚀^[10-11],甚至造成换热管腐蚀穿孔发生泄漏^[12],严重影响系统的安全、稳定、经济运行。因此,针对低温多效海水淡化系统的结垢情况,定期对蒸发器换热管进行清洗,仍是目前恢复系统产水效率、保证海水淡化系统长期高效运行的必要措施^[13-14]。

传统的换热管清洗技术主要包括机械清洗法和化学清洗法。前者是采用高压水喷射或球状海绵清除,适用于换热管垢层较厚的情形,此类方法对设备几乎没有损伤,但在操作性及清洗效率上存在一定局限^[15-16]。后者则是利用化学清洗剂对垢层的溶解达到除垢目的,清洗效率相对较高,但对换热管道存在一定程度的腐蚀风险^[17-18]。近年来,一些智能化新兴技术的应用以及其他领域行之有效的清洗技术,也为换热管除垢增添了新的手段和设备^[19],如能够有效去除硬质垢的弱爆炸清灰器,能够有效去除细微污垢粒子的兆赫超声波、激光、脉冲清洗技术,以及换热管清洗机器人等^[20-21],但目前此类技术还处于实验室研究或推广阶段,未能在工程现场得到广泛应用。

对于低温多效海水淡化系统的换热管,尤其是以铝合金为材质的换热管清洗技术,现阶段研究较少,清洗过程中对铝合金换热管的腐蚀防护也缺乏相应考虑。本文针对国内某万吨级低温多效海水淡化系统的铝合金换热管结垢问题开展了化学清洗技术研究,通过现场垢样分析及不同介质对铝合金腐蚀速率的影响,筛选了合适的清洗介质及酸洗缓蚀剂,在海水

淡化工程现场应用中实时监测水质参数进行过程控制,取得了良好的效果,为今后同类装置的化学清洗提供了技术支撑和有益参考。

1 实验方法

在低温多效海水淡化系统铝合金传热管表面不同部位采集垢样,烘干后于研钵内充分研磨混合均匀,利用 Axiosm AX 单道扫描型波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)对其化学成分进行定量分析。

本论文所研究的低温多效海水淡化系统总运行时间已超过 15 000 h,蒸发器换热管材质为 5052 铝合金。腐蚀模拟试验材料选用 5052 铝合金标准腐蚀挂片,其化学成分(质量分数)为:Si 0.12%,Fe 0.15%,Cu 0.03%,Mn 0.03%,Mg 2.30%,Al 余量。试样规格为 50 mm×25 mm×2 mm。试验前,试样表面用去离子水清洗、干燥并称量,每组试验设置 3 个平行试样。

清洗介质的筛选试验条件为静态浸泡,根据 XRF 分析结果并参考《火力发电厂锅炉化学清洗导则》,研究了常见无机酸(盐酸、硫酸、磷酸、硝酸、氨基磺酸)及有机酸(柠檬酸、甲酸)对铝合金的腐蚀行为,试验温度为 40 °C,介质浓度(质量分数)为 4%,试验周期 24 h,试验结束后用 ASTM G1-03 标准方法清洗试样表面,干燥后,利用失重法计算 3 个平行试样的平均腐蚀速率。铝合金腐蚀模拟试验在 XYZK-A 型自动补液旋转挂片腐蚀试验仪中进行,装置示意图 1。试验条件模拟低温多效海水淡化系统酸洗典型工况:氨基磺酸浓度(质量分数)分别为 2%及 4%,温度分别为 20、30、40 °C。缓蚀剂性能评价试验工况:氨基磺酸浓度(质量分数)为 4%,试验温度 40 °C,缓蚀剂质量浓度分别为 0.5、1、2、3、4 g/L。旋转挂片腐蚀试验均设置转速为 80 r/min,试验周期 24 h,试样的后处理方法同静态浸泡试验。

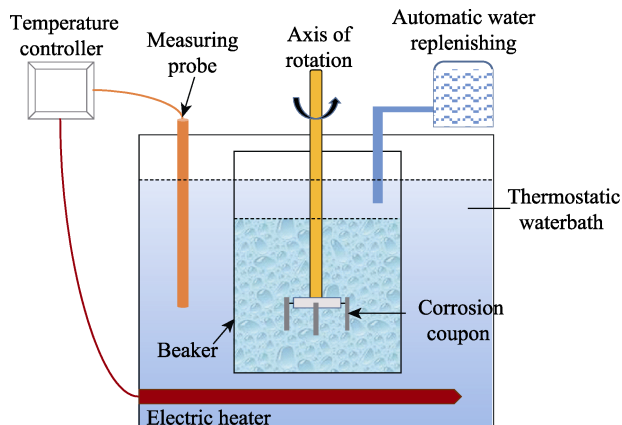


图1 旋转挂片腐蚀模拟实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the rotary coupon corrosion apparatus

2 结果及分析

2.1 垢样化学成分

系统内铝合金换热管存在不同程度的结垢现象,尤其以第1、2效最严重。第1效内铝合金换热管垢样分析结果如表1所示,垢样中的主要元素为Ca、Cl、Fe、S及Si等,Ca是形成换热管结垢的最主要元素,Fe和Cl的存在主要是由于在海水预处理阶段投加絮凝剂的结果。XRF无法检测出C元素,根据海水中 CO_3^{2-} 常规含量及分析结果中Ca、S元素质量比可以推断,垢样主要成分为 CaCO_3 及 CaSO_4 ,同时含有少量Mg、Al的化合物。针对此垢样成分,在选择清洗介质时应优先考虑酸性介质。

表1 铝合金换热管垢样成分分析
Tab.1 Chemical composition analysis of scale sample on aluminum alloy heat exchange tubes

wt%								
Ca	Cl	Fe	S	Si	Al	Mg	Na	Microelement
71.84	9.34	6.03	3.99	3.32	1.52	0.64	0.91	Bal.

2.2 不同清洗介质下铝合金的腐蚀速率

清洗介质的选择应考虑其对垢层溶解效果的同时兼顾对铝合金换热管的腐蚀行为^[22-23]。铝合金在所选清洗介质下的腐蚀速率如图2所示。试验条件下,清洗介质对铝合金的腐蚀强弱顺序为:盐酸>磷酸>硝酸>硫酸>氨基磺酸>甲酸>柠檬酸。盐酸、磷酸、硝酸和硫酸对铝合金的腐蚀性比较强,其中盐酸最显著,腐蚀速率高达40.914 mm/a。铝合金中的合金元素主要通过形成不同夹杂物和合金而对其耐蚀性产生影响^[24-28],5052铝合金中主要形成的是Al-Fe-Mn金属间化合物和 β 相(Mg-Al),这些第二相与铝合金基体构成微电偶,Mg-Al相作为阳极而优先腐蚀,Al-Fe-Mn相作为阴极则会促使周围基体发生腐蚀,

进一步诱发铝合金的点蚀^[29-32]。铝的氧化物具有n型半导体特征,而盐酸溶液中 Cl^- 等电子受体的增多使晶格缺陷增多,并促进钝化膜的破裂,点蚀加剧^[33-34]。因此若采用盐酸清洗,将面临难度较大的腐蚀控制问题,且盐酸挥发性极强,不利于现场的安全施工操作。氨基磺酸、甲酸、柠檬酸由于对钝化膜的性质改变较小,因而腐蚀性也相对较弱,但甲酸有强烈的挥发性,柠檬酸对钙、镁垢的溶解能力较低,因此优选氨基磺酸作为铝合金换热管的清洗介质。

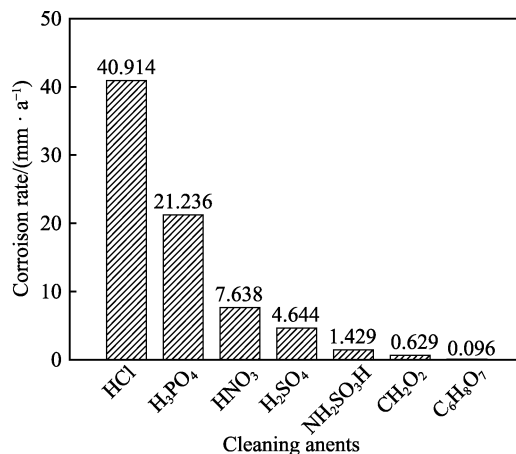


图2 铝合金在不同清洗介质中的腐蚀速率
Fig.2 Corrosion rate of aluminum alloy in different cleaning agents

温度和氨基磺酸浓度对铝合金腐蚀行为的影响如图3所示。在氨基磺酸溶液中,铝合金的腐蚀速率随着试验温度的升高而增大,同等条件下高浓度溶液中腐蚀速率更大。两种因素相比,温度对腐蚀速率的影响更明显,以4%氨基磺酸为例,试验温度从30℃升高至40℃,腐蚀速率由0.561 mm/a增加至1.434 mm/a,升高了约1.5倍,因此若系统清洗选择在夏季进行,应注意操作温度对铝合金换热管腐蚀行为的影响。对于低温多效海水淡化装置而言,由于第1、2效结垢严重,通常需要多次清洗才能清除铝合金换热管表面污垢,清洗周期较长,导致铝管腐蚀程

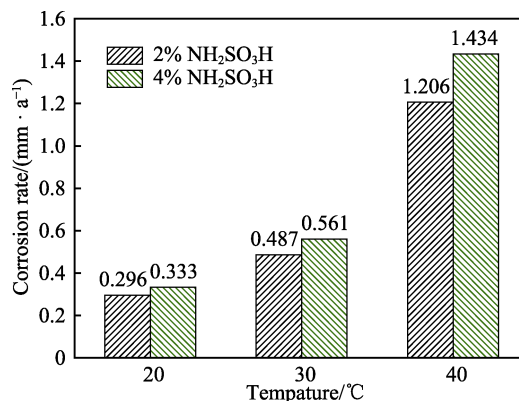


图3 不同氨基磺酸浓度下铝合金的腐蚀速率
Fig.3 Corrosion rate of aluminum alloy in $\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$ with different concentrations

度的不断积累,因此有必要加入铝合金酸洗缓蚀剂来防止换热管腐蚀^[35-36]。

2.3 酸洗缓蚀剂性能评价

氨基磺酸缓蚀剂选用自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所研制的 HSD103 酸洗缓蚀剂,在 4%氨基磺酸溶液中,其缓蚀效率随添加浓度的变化曲线如图 4 所示。可见,随着缓蚀剂浓度的增加,缓蚀效率呈现先迅速上升后缓慢上升的趋势。缓蚀剂质量浓度为 0.5 g/L,即可对铝合金起到明显的保护效果,缓蚀效率超过 65%;在质量浓度为 2 g/L 时,铝合金平均腐蚀速率降低至 0.084 mm/a,缓蚀效率达到 94.14%;此后继续增加缓蚀剂浓度,对缓蚀效率的提升效果甚微。HSD103 酸洗缓蚀剂属于混合型缓蚀剂,其分子上的基团与 Al^{3+} 反应生成沉淀膜吸附于金属表面,对腐蚀电化学反应的阳极和阴极过程均起到抑制作用^[37]。当其质量浓度小于 2 g/L 时,缓蚀剂一方面可吸附于金属表面并显著降低腐蚀速率,另一方面这种吸附是不均匀的,铝合金表面仍存在微电偶,因闭塞电池的自催化作用而发生点蚀^[38];当其质量浓度大于 2 g/L 时,缓蚀剂提供的物理屏障发挥显著作用,进而抑制铝合金表面微电偶的氧化还原过程,以及亚稳态点蚀的萌生和稳态点蚀发展^[39]。

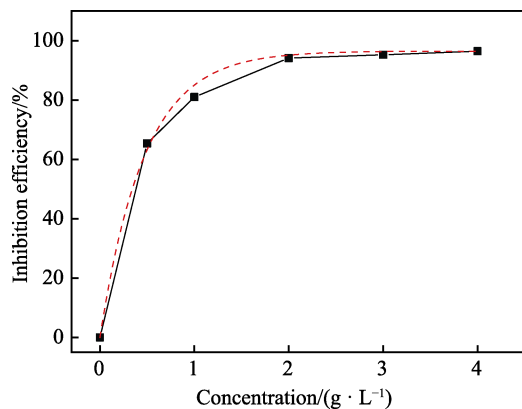


图 4 缓蚀剂添加量对缓蚀效率的影响
Fig.4 Effect of concentration of corrosion inhibitor on inhibition efficiency

综上所述,针对低温多效海水淡化系统铝合金换热管以 $CaCO_3$ 和 $CaSO_4$ 为主的结垢产物,选择氨基磺酸作为酸洗介质较为适宜,同时配合使用酸洗缓蚀剂,可显著降低铝合金的腐蚀速率,对淡化系统起到良好的保护作用。综合试验结果及药剂使用成本,选择 2 g/L 作为现场缓蚀剂投加的最优含量。

3 铝合金换热管的现场清洗

3.1 现场清洗工艺流程

低温多效海水淡化系统中第 1、2 效温度最高,

换热管结垢倾向最严重^[40-41],因此系统的清洗重点针对前两效进行。清洗前对酸洗加药罐、酸洗泵等辅助加药装置的工作状态进行检查,同时确认效体内喷淋系统畅通。现场的清洗工艺按照以下流程展开:

①系统内添加酸洗缓蚀剂。适当增加缓蚀剂浓度,减小清洗过程中缓蚀剂浓度分布不均匀对铝合金换热管的腐蚀影响。

②系统加酸。维持系统内游离酸浓度(质量分数)为 2%~4%,利用冷态循环对铝合金换热管进行喷淋和冲洗。

③淡水冲洗。清洗结束后,利用淡化水冲洗系统内残余废酸。

④酸洗废液处理。酸洗废液及系统冲洗废液排放至废液池,进行加碱中和调节至 pH 值 6~9。

3.2 清洗过程监测

清洗过程中定期检测系统 pH 值、钙离子和镁离子浓度等,并结合换热管外观形貌合理判断清洗终点,同时于系统内设置 8 组平行铝合金腐蚀挂片监测系统换热管腐蚀情况。系统内溶液 pH 值随时间的变化如图 5 所示,初始阶段,随着氨基磺酸加药量的增加, pH 值呈现快速下降的趋势,由弱碱性状态降低至 2.42;在垢层溶解反应阶段,由于氨基磺酸的消耗使 pH 值略有上升,清洗 7 h 后, pH 上升至 3.58,清洗 10 h 后,随着加药量的增加,系统最终稳定在 2 左右,保证了系统内的酸性环境。

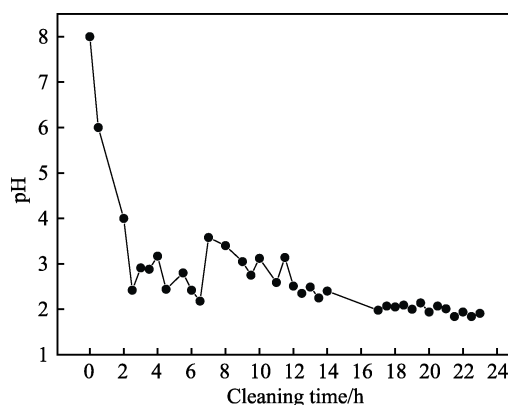


图 5 系统清洗期间 pH 值随时间的变化
Fig.5 Change of pH along with time during the cleaning by system

图 6 为系统 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在清洗期间的浓度监测结果。随着清洗进程的推进,在 7~10 h 内暂停氨基磺酸的投加,并进入系统内部检查换热管清洗效果,如图 7b 所示,换热管垢层被有效剥离、溶解。此后继续投加氨基磺酸, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度均逐渐增大, Ca^{2+} 质量浓度最高达到 6813 mg/L, Mg^{2+} 质量浓度最高达到 4254 mg/L。在系统清洗约 21 h 后,两者浓度均达到峰值且此后基本维持不变,此时换热管表面垢层溶解趋于饱和,结合图 5 可判断此时为系统清洗终点。

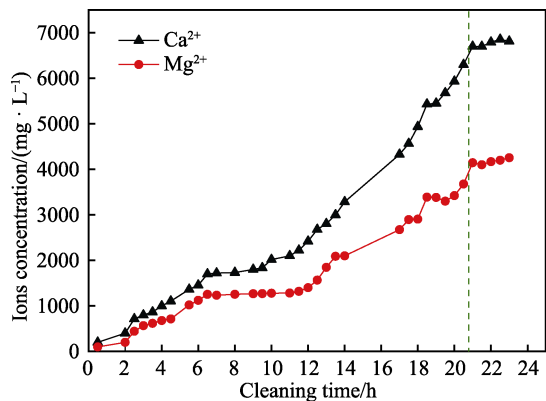


图6 系统清洗期间 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度变化
Fig.6 Change of Ca^{2+} and Mg^{2+} concentration during the cleaning by system

低温多效海水淡化系统铝合金换热管的清洗共计约 24 h, 铝合金换热管的表面形貌随着清洗进程的变化如图 7 所示, 清洗前换热管表面沉积黄褐色垢



a 清洗前



b 清洗 7 h



c 清洗 24 h

图7 清洗期间系统内铝合金换热管表面形貌
Fig.7 Surface morphology of aluminum alloy heat exchange tubes in the system during the cleaning:
(a) before cleaning, (b) after 7 h cleaning,
(c) finish cleaning (24 h)

层, 表层疏松而内层致密, 清洗期间可见换热管垢层被溶解、剥离, 清洗结束后, 换热管表面垢层基本清除且铝合金表面焕发金属光泽, 现场清洗效果明显。

铝合金腐蚀挂片的现场监测结果如图 8 所示, 8 组腐蚀监测挂片的平均腐蚀速率为 0.146 mm/a, 相比于实验室未加缓蚀剂的结果, 现场应用 HSD103 对铝合金换热管的缓蚀效率达 90%, 对系统起到了良好的保护作用。

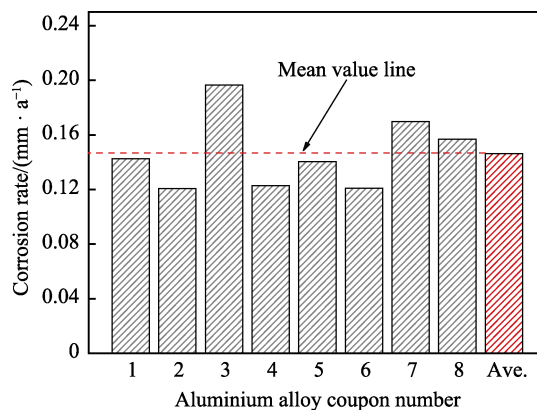


图8 效体内铝合金腐蚀挂片腐蚀速率
Fig.8 Corrosion rate of aluminum alloy corrosion coupons in the first effect

4 结论

1) 铝合金换热管表面垢样成分主要为 CaCO_3 和 CaSO_4 , 在所选 8 种清洗介质中, 氨基磺酸对铝合金腐蚀的影响相对较小, 溶垢能力及操作性较优, 因此优选氨基磺酸作为酸洗介质。温度对铝合金在氨基磺酸溶液中的腐蚀速率影响相对较大。

2) 选择 2 g/L HSD103 酸洗缓蚀剂作为最佳使用量, 在实验室条件下可将铝合金平均腐蚀速率控制在 0.084 mm/a, 缓蚀效率达 94.14%。

3) 采用氨基磺酸加酸洗缓蚀剂的清洗工艺进行了现场实际应用, 清洗时间约 21 h 后, 系统 pH 值、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度基本维持不变, 换热管表面垢层基本清除, 达到清洗终点。现场监测铝合金腐蚀挂片平均腐蚀速率为 0.146 mm/a, 现场缓蚀剂效率达到 90%。

参考文献:

- [1] 尹建华, 吕庆春, 阮国岭. 低温多效蒸馏海水淡化技术[J]. 海洋技术, 2002, 21(4): 22-26.
YIN Jian-hua, LV Qing-chun, RUAN Guo-ling. Low temperature multiple effect distillation for seawater desalination[J]. Journal of ocean technology, 2002, 21(4): 22-26.
- [2] 万高杰, 潘顺龙, 韩旭, 等. 低磷阻垢剂在低温多效海水淡化过程中的应用[J]. 精细化工, 2018, 35(3): 469-473.
WAN Gao-jie, PAN Shun-long, HAN Xu, et al. Appli-

- cation of low phosphorus scale inhibitor in low-temperature thermal seawater desalination[J]. *Fine chemicals*, 2018, 35(3): 469-473.
- [3] ALI A A, CHRISTOPHER M F. A comparative study of novel scale inhibitors with commercial scale inhibitors used in seawater desalination[J]. *Desalination*, 2015, 359(5): 22-25.
- [4] SUO G F, XIE L X, XU S C, et al. Study on inhibitors' performance under the condition of high concentration ratio in MED system[J]. *Desalination*, 2018, 437(12): 100-107.
- [5] 陈飞, 解利昕, 杨继状, 等. 高浓缩倍率低温多效蒸馏海水淡化阻垢研究[J]. *化学工程*, 2015, 43(12): 21-24.
CHEN Fei, XIE Li-xin, YANG Ji-zhuang, et al. Scale inhibition of low-temperature multi-effect distillation desalination under high concentration ratio[J]. *Chemical engineering*, 2015, 43(12): 21-24.
- [6] 张海春, 王海增, 阮国岭. 热法海水淡化阻垢及清洗技术研究现状[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(16): 12-16.
ZHANG Hai-chun, WANG Hai-zeng, RUAN Guo-ling. Research status of scale prevention and cleaning techniques in thermal seawater desalination[J]. *China water & wastewater*, 2008, 24(16): 12-16.
- [7] 张仲彬. 换热表面污垢特性的研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2009.
ZHANG Zhong-bin. Study on fouling characteristics of heat exchange surfaces[D]. Hebei: North China Electric Power University, 2009.
- [8] 乔宁. 传热金属表面腐蚀结垢行为模拟及防腐阻垢技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
QIAO Ning. Simulation of the corrosion and fouling behavior and technology of anticorrosion and antifouling on metallic heat transfer surface[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [9] QI C H, HAN X, LV H Q, et al. Experimental study of heat transfer and scale formation of spiral grooved tube in the falling film distilled desalination[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2018, 119(4): 654-664.
- [10] 马红杰, 赵敏, 黄新泉. 冷却水换热器腐蚀泄漏分析及防护[J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2016, 33(1): 26-29.
MA Hong-jie, ZHAO Min, HUANG Xin-quan. Analysis of corrosion leakage of cooling water heat exchanger and prevention[J]. *Corrosion & protection in petrochemical industry*, 2016, 33(1): 26-29.
- [11] BRENNENSTUHL A M, GENDRON T S, CLELAND R. Mechanisms of under deposit corrosion in freshwater cooled austenitic alloy heat exchangers[J]. *Corrosion science*, 1993, 35(1): 699-705.
- [12] 黄万启, 赵兴辉, 陈浩, 等. 凝汽器结垢和腐蚀原因及应对措施[J]. *腐蚀与防护*, 2018, 39(1): 55-58.
HUANG Wan-qi, ZHAO Xing-hui, CHEN Hao, et al. Reason and solution for the corrosion and scaling of condenser[J]. *Corrosion and protection*, 2018, 39(1): 55-58.
- [13] 唐智新, 吴礼云, 梁红英, 等. 低温多效蒸馏海水淡化蒸发器结垢原因分析及清洗[J]. *冶金动力*, 2015, 23(9): 61-65.
TANG Zhi-xin, WU Li-yun, LIANG Hong-ying, et al. Cause analysis and cleaning of scaling in the LT-MED seawater desalination evaporator[J]. *Metallurgical power*, 2015, 23(9): 61-65.
- [14] 张瑞祥, 刘慧娟, 滕维忠. 低温多效海水淡化设备的化学清洗[J]. *广州化工*, 2011, 39(2): 103-104.
ZHANG Rui-xiang, LIU Hui-juan, TENG Wei-zhong. Chemical cleaning for low temperature multi-effect desalination facility[J]. *Guangzhou chemical industry*, 2011, 39(2): 103-104.
- [15] 段培清. 换热器在线防、除垢技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
DUAN Pei-qing. Study on the on-line anti-scaling technology of heat exchanger[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008.
- [16] 吕昕宇. 胶球在线清洗装置对冷水机组性能影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
LYU Xin-yu. Study on the effect of rubber ball on water chiller performance[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [17] 王丽萍. 基于结垢溶垢机理的换热器在线清洗技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
WANG Li-ping. On-line cleaning technology of heat exchanger based on scale forming and dissolving mechanism[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [18] 曹杰玉, 姚建涛, 邓宇强. 电站锅炉盐酸清洗中的腐蚀控制[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2005, 17(2): 125-127.
CAO Jie-yu, YAO Jian-tao, DENG Yu-qiang. Corrosion control during acid pickling of boiler in power plant[J]. *Corrosion science and protection technology*, 2005, 17(2): 125-127.
- [19] 代峰燕, 邢爽, 高庆珊, 等. 换热器管程自动化清洗装置研究现状与发展[J]. *北京石油化工学院学报*, 2017, 25(4): 30-35.
DAI Feng-yan, XING Shuang, GAO Qing-shan, et al. Research status and development of automatic cleaning device for the tube of heat exchanger[J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology*, 2017, 25(4): 30-35.
- [20] 潘海鸿, 龚建刚, 陈琳, 等. 自适应多种群遗传算法的换热管清洗路径优化[J]. *机械设计与制造*, 2015, 53(8): 9-12.
PAN Hai-hong, GONG Jian-gang, CHEN Lin, et al. Optimization of cleaning path for heat exchange tube based on an adaptive multiple-population genetic algorithms[J]. *Machinery design & manufacture*, 2015, 53(8): 9-12.
- [21] 杨善让, 孙灵芳, 徐志明. 换热设备污垢研究的现状和展望[J]. *化工进展*, 2004, 24(10): 1091-1098.
YANG Shan-rang, SUN Ling-fang, XU Zhi-ming. Development and prospect of research on heat exchanger fouling[J]. *Chemical industry and engineering progress*,

- 2004, 24(10): 1091-1098.
- [22] 王艳芝. 盐酸介质中铝合金用复合缓蚀剂的研究[J]. 材料保护, 2002, 43(6): 18-20.
- WANG Yan-zhi. A composite inhibitor for aluminum alloy in hydrochloric acid[J]. Materials protection, 2002, 43(6): 18-20.
- [23] NOOR E A. Evaluation of inhibitive action of some quaternary N-heterocyclic compounds on the corrosion of Al-Cu alloy in hydrochloric acid[J]. Materials chemistry & physics, 2009, 114(2): 533-541.
- [24] ECKERMANN F, SUTER T, UGGOWITZER P G, et al. The influence of MgSi particle reactivity and dissolution processes on corrosion in Al-Mg-Si alloys[J]. Electrochimica acta, 2008, 54(2): 844-855.
- [25] GUILLAUMIN V, MANKOWSKI G. Localized corrosion of 6056 T6 aluminium alloy in chloride media[J]. Corrosion science, 2000, 42(1): 105-125.
- [26] MA Y, ZHOU X, LIAO Y, et al. Localised corrosion in AA 2099-T83 aluminium-lithium alloy: The role of grain orientation[J]. Corrosion science, 2016, 107(6): 41-48.
- [27] ZHANG X, ZHOU X, HASHIMOTO T, et al. The influence of grain structure on the corrosion behaviour of 2A97-T3 Al-Cu-Li alloy[J]. Corrosion science, 2017, 116(2): 14-21.
- [28] SHI Y Z, COLLINS L, BALKE N, et al. In-situ electrochemical-AFM study of localized corrosion of $Al_xCoCrFeNi$ high-entropy alloys in chloride solution[J]. Applied surface science, 2018, 439(5): 533-544.
- [29] LIAO J, HOTTA M. Corrosion products of field-exposed Mg-Al series magnesium alloys[J]. Corrosion science, 2016, 112(11): 276-288.
- [30] ANDREATTA F, APACHITEI I, KODENTSOV A A, et al. Volta potential of second phase particles in extruded AZ80 magnesium alloy[J]. Electrochimica acta, 2006, 51(17): 3551-3557.
- [31] YAO C Z, TAY S L, ZHU T P, et al. Effects of Mg content on microstructure and electrochemical properties of Zn-Al-Mg alloys[J]. Journal of alloys and compounds, 2015, 645(10): 131-136.
- [32] CASAJÚS P, WINZER N. Electrochemical noise analysis of the corrosion of high-purity Mg-Al alloys[J]. Corrosion science, 2015, 94(5): 316-326.
- [33] SHAHIDI M, GHOLAMHOSSEINZADEH M R. Electrochemical evaluation of AA6061 aluminum alloy corrosion in citric acid solution without and with chloride ions[J]. Journal of electroanalytical chemistry, 2015, 757(9): 8-17.
- [34] 陈跃良, 王安东, 张勇, 等. Cl^- 和 H^+ 对 2024-T3 铝合金初期腐蚀的协同效应[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1549-1556.
- CHEN Yue-liang, WANG An-dong, ZHANG Yong, et al. The synergistic effect of Cl^- and H^+ on initial corrosion of 2024-T3 aluminum alloy[J]. Materials review, 2018, 32(9): 1549-1556.
- [35] DEYAB M A. Corrosion inhibition of heat exchanger tubing material (titanium) in MSF desalination plants in acid cleaning solution using aromatic nitro compounds[J]. Desalination, 2018, 439(1): 73-79.
- [36] HODGKIESS T, AL-OMARI K H, BONTEM S N, et al. Acid cleaning of thermal desalination plant: do we need to use corrosion inhibitors[J]. Desalination, 2005, 183(1): 209-216.
- [37] XHANARI K, FINŠGAR M. Organic corrosion inhibitors for aluminum and its alloys in chloride and alkaline solutions: A review[J]. Arabian journal of chemistry, 2016, 26(8): 1-18.
- [38] HASSAN M, IBRAHIM S M, TAKAGI H D, et al. Kinetics of corrosion inhibition of aluminum in acidic media by water-soluble natural polymeric chondroitin-4-sulfate as anionic polyelectrolyte inhibitor[J]. Carbohydrate polymers, 2018, 192(7): 356-363.
- [39] PRAKASHAIAHB G, KUMARA D V, PANDITH A A, et al. Corrosion inhibition of 2024-T3 aluminum alloy in 3.5% NaCl by thiosemicarbazone derivatives[J]. Corrosion science, 2018, 135(5): 326-338.
- [40] 全贞花, 陈永昌, 马重芳, 等. 碳酸钙于换热表面结垢影响因素的模拟分析[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(11): 1944-1946.
- QUAN Zhen-hua, CHEN Yong-chang, MA Chong-fang, et al. Simulation and analysis of influencing parameters on fouling process of calcium carbonate on heat transfer surface[J]. Journal of engineering thermo physics, 2008, 29(11): 1944-1946.
- [41] DORIANO B, FABIO L M, NGAI Y Y. Thermo dynamic analysis and energy efficiency of thermal desalination processes[J]. Desalination, 2018, 425(2): 29-39.