

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.01.001

有色冶炼高盐废水处理技术现状及展望

陈国强^{1,2}, 周连碧¹, 田森林², 陈斌¹

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650093)

摘要:有色冶炼行业产生的高盐废水存在成分复杂、难以直接回用、处理难度大等难题。首先分类阐述了处理高盐废水的热蒸发法、电化学法和膜处理法,随后对上述技术的原理、技术特点、优缺点和应用情况进行了详细分析与总结。最后,对有色冶炼行业高盐废水处理技术发展趋势进行了展望。

关键词:有色冶炼;高盐废水;电渗析;多效蒸发;资源化

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2023)01-0001-06

Present Situation and Prospect of High Salinity Wastewater Treatment Technology from Nonferrous Metallurgy

CHEN Guo-qiang^{1,2}, ZHOU Lian-bi¹, TIAN Sen-lin², CHEN Bin¹

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The high salinity wastewater produced by nonferrous metallurgy industry is complicated in composition, difficult to directly reuse and difficult to treat. Firstly, the thermal evaporation method, electrochemical method and membrane treatment method for the treatment of high salinity wastewater were described. Then, the principle, technical characteristics, advantages and disadvantages and application of the above technologies were analyzed and summarized in detail. Finally, the development trend of high salinity wastewater treatment technology in nonferrous metallurgy industry was prospected.

Key words: nonferrous metallurgy; high salinity wastewater; electrodialysis; multiple effect evaporation; resource recovery

高盐废水通常是指含有较高浓度的钠离子、氯离子、硫酸根等离子,废水中溶解性总固体大于 3.5 g/L 的废水^[1]。有色冶炼行业的高盐废水主要包括废水膜法处理浓水和部分湿法冶金废水^[2]。目前多数有色冶炼企业采用“超滤+纳滤+反渗透”膜法组合工艺处理生产废水,膜处理工艺产生的淡水回用于生产,提高了废水的循环利用率,同时也产生

了一部分膜浓水,该浓水中含有大量的氯离子、硫酸根、钠离子和钙离子,TDS 在 4~12 g/L,是典型的高盐废水,难以直接回用。另外,在湿法精炼工艺中会产生含有硫酸钠、氯化钠等无机盐,以及萃取剂、絮凝剂、表面活性剂等有机污染物的高盐废水^[3]。该废水中硫酸钠、氯化钠等浓度高达 120~239 g/L,有些工况中,硫酸钠浓度甚至可达到饱和。同时,废水

收稿日期:2022-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41831288);矿冶科技集团有限公司科研基金资助项目(02-2113)

作者简介:陈国强(1987-),男,山东青州人,博士,高级工程师

中含有大量的有机物, COD 在 1 000~5 000 mg/L, 处理难度大^[4]。随着冶炼工艺的不断发展, 有色冶炼行业高盐废水向成分越来越复杂、盐浓度越来越高的趋势发展^[5]。

近年来国家大力倡导节水减排, 有色行业对废水排放标准也日益严格, 很多地方已对工业园区污水处理站和流域排入废水的全盐量排放限值提出要求, 如何经济、高效地处理高盐废水成为有色行业的难题。目前, 高盐废水的处理技术主要分为热蒸发法、电化学法和膜处理法三类。

1 热蒸发法

热蒸发法是利用热能加热高盐废水, 产生的蒸汽冷凝得到淡水, 高盐废水浓缩结晶生成固体盐, 实现盐与水的分离^[6]。目前常用热蒸发技术主要包括机械蒸汽再压缩(MVR)技术、多效蒸发(MED)技术和多级闪蒸(MSF)技术等^[7]。

1.1 MVR 技术

MVR 技术是利用蒸发系统自身产生的二次蒸汽, 通过蒸汽压缩机进一步提高蒸汽的压力、温度和焓值, 然后全部返回到蒸发系统作为热源, 维持高盐废水始终处于高温状态, 持续蒸发浓缩, 加热蒸汽经换热后冷凝成水排出, 高盐废水逐渐浓缩成为结晶盐, 实现盐与水的分离。该技术的优点是工艺流程简单、设备占地面积小、自动化程度高、操作方便。缺点是设备投资高、动力消耗大、运行成本较高、需定期清理设备结垢^[8]。

田立辉等^[9]采用二次蒸汽再压缩处理工艺处理含有氯化钠和硫酸钠的高盐废水, 其中氯化钠含量为 8% 左右, 硫酸钠含量为 2% 左右, 结果显示, 二次蒸汽温度 90 ℃, 充分利用了蒸汽的热值, 每吨水处理成本 37 元。

1.2 MED 技术

MED 技术是通过多个蒸发器的串联运行, 使高盐废水中的水升温蒸发, 盐水浓缩结晶为固体的过程。该技术的特点是新鲜蒸汽只作为第一级蒸发器的热源, 后续每一级蒸发器的热源均利用前一级蒸发器产生的蒸汽, 使蒸汽热能得到多次利用, 从而显著降低新鲜蒸汽的消耗量, 提高热能的利用率。该技术的优点是传热效率高、能耗低、对料液要求不高、预处理简单、化学药剂消耗较少、系统操作安全可靠, 可实现全过程全自动化运行^[10]。缺点是设备体积大、一次性投入高、蒸汽温度高、管内易结垢和

腐蚀、不易清理^[11]。

丁丽^[12]采用四效顺流蒸发工艺处理氯化钠溶液, 结果显示, 进料含盐量为 21%~26%, 杂质 TOC ≤ 300 mg/L, NaClO ≤ 500 mg/L, pH = 7~9, 处理后固态产品为氯化钠, 含水量 $\leq 5\%$, TOC < 30 mg/L, 达到工业盐级标准; 二次冷凝水温度约为 60 ℃, 含盐量 $\leq 3\%$ 。

1.3 MSF 技术

MSF 技术是将加热到一定温度的高盐废水依次流经多个闪蒸室, 由于每个闪蒸室的压力逐渐降低, 高盐废水进入闪蒸室后急速地部分汽化, 逐级蒸发降温, 同时盐浓度也逐级增加, 蒸汽冷凝后得到淡水, 盐分浓缩结晶的过程^[13]。该技术的优点是设备简单、不易结垢、运行可靠。缺点是适用于大型化规模、热力学效率相对较低、能耗较高^[14]。目前该技术主要应用于海水淡化领域。

2 电化学法

电化学法是利用高盐废水具有较高的导电性这一特点, 使高盐废水中的离子在阳极和阴极之间互相迁移, 根据电解氧化还原理论, 高盐废水中的各污染物分别在阳极和阴极发生氧化、还原反应进而去除的技术。目前高盐废水处理常用的主要是电渗析技术和电催化氧化技术。

2.1 电渗析技术

电渗析技术是利用高盐废水的高导电性能, 在外加直流电场作用下, 使高盐废水中阴、阳离子发生离子迁移, 利用离子交换膜对溶液中离子的选择透过性, 实现高盐废水的浓缩和水分离的过程^[15]。该技术的优点是除盐率高、工艺简单、占地面积小、自动化程度高、处理过程不需要投加药剂、无二次污染, 缺点是对废水中不带电荷的胶体、有机物、悬浮物等无法去除, 对进水水质要求高、需预处理、容易发生浓差极化现象、离子膜需及时清洗^[16]。

颜海洋等^[17]采用电渗析工艺处理湿法冶金废水, 处理后废水 100% 回收利用, 年回收废水 50 万 t, 萃取剂 9.9 t, 钴 49.5 t、氯化铵约 1.8 万 t, 作为化肥外售, 年减少 COD 排放 100 t。

史元腾等^[18]采用“预处理+双极膜电渗析”工艺处理矿井浓盐水, 结果显示, 采用双极膜电渗析装置处理矿井浓盐水可制备酸碱, 制备一吨质量分数分别达到 4.7%、5.7% 的酸碱产品所需运行成本约

为 159.03 元,处理后的矿井浓盐水中盐离子含量降至 1 g/L 以下。

2.2 电催化氧化技术

电催化氧化技术是通过外加电极的方式,利用电极和有机物之间电子转移或电解过程产生的羟基自由基氧化降解有机物。电催化氧化技术具有氧化能力强、设备简单、无二次污染等优点^[19-20],但是存在能耗高、电极材质对处理效果的影响大等弊端,而影响了该技术的工业化应用,需要选用催化性能高、更加稳定的电极,同时可将电催化氧化法和其他的技术相组合,提高处理效果及降低能耗^[21]。

曹敏等^[22]采用不同材料的电催化阳极对湿法冶金产生的含有机物高盐废水进行处理,结果表明,Ti/Ta₂O₅-IrO₂电极效果最好,COD 去除效率 62%,显著减小了 COD 对废水硫酸钠蒸发结晶的负面影响。

张占勋^[23]采用臭氧—电催化氧化法处理高盐废水,COD 的去除率为 68.6%,吨水能耗为 7.9 kWh,每千克 COD 处理能耗为 18.5 kWh。

3 膜处理法

膜处理法是利用压力差、浓度差或电位差形成的驱动力,通过膜对高盐废水中不同成分间的选择透过性不同,来实现分离、提纯和浓缩的技术。目前膜处理技术在高盐废水处理中常用的是纳滤(NF)技术、反渗透(RO)技术和膜蒸馏技术。

3.1 纳滤(NF)技术

采用孔径在反渗透和超滤之间的纳滤膜为压力驱动膜的分离,该技术特点是膜本身带有电荷,能有效截留水中的有机污染物和二价及多价阴、阳离子,而对一价阴、阳离子具有较好的透过效果,可实现一价盐与多价盐的分离^[24]。该技术的优点是操作压力低、可实现不同价态离子的分离。缺点是分离精度一般、纳滤膜抗氧化性不强、抗污染性能一般。

李红等^[25]采用 DL 纳滤膜(混合型复合纳滤膜)处理某锌冶炼厂废水,结果表明,DL 纳滤膜对高浓度废水在最佳条件下的膜通量及金属离子截留率都很高,Zn²⁺、Cd²⁺、Ca²⁺ 的截留率分别达到 96.8%、89.7%、97.5%,说明纳滤技术可以有效分离冶炼废水中的重金属离子,可应用于冶炼废水中重金属的分离和回收。

张兆钢等^[26]研究了纳滤滤膜对不同二价盐分离的可能性,结果显示,采用截留率为 96.3%的纳

滤膜,浓水中主要为 MgSO₄ 和 MgCl₂,二者浓缩倍数接近;废水中 NaCl 的回收率为 85.74%。采用不同截留率的高压纳滤膜组合浓缩工艺,低截留率纳滤膜产浓水中 MgCl₂ 质量浓度为原水的 5.22 倍,质量为原水的 62.59%;高截留率纳滤膜产浓水中 NaCl 的质量为原水的 76.43%,MgSO₄ 质量为原水的 61.29%,浓缩倍数为 10.77 倍。不仅实现了 NaCl、MgCl₂ 及 MgSO₄ 的逐级分离,同时实现了 MgSO₄ 和 MgCl₂ 之间的分离。

3.2 反渗透(RO)技术

反渗透膜技术是以压力差为驱动力,利用反渗透膜的透过性对高盐废水中的分子进行分离,来达到高盐废水分离、提纯和浓缩的目的^[27]。反渗透膜可有效截留废水中所有的溶解性盐和相对分子量大于 100 的有机物,同时允许水分子通过。目前常用于高盐废水零排放处理的反渗透膜主要以抗氧化和抗污染膜能力强的碟管式膜(DTRO)技术和高效反渗透(HE-RO)技术^[28]。该技术具有操作简便、产水水质好、自动化程度高等优点,缺点是设备投资大、膜容易发生堵塞和腐蚀、需经常清洗和更换、运行成本高等。

郭磊^[29]采用两段式反渗透工艺处理铅锌冶炼企业废水,在最佳工况下,反渗透系统产生的浓水含盐量高达 55 g/L,高盐废水被浓缩了将近 10 倍,产水率达到了 88%。

魏明波等^[30]采用“药剂软化预处理+管式超滤+碟管式反渗透(DTRO)浓缩+蒸发结晶”组合工艺处理脱硫废水,结果表明,药剂软化预处理阶段通过投加石灰控制 pH 在 10.5~11 时,可以去除水中大部分镁离子、重金属及 F⁻。管式超滤和碟管式反渗透具有较好的抗污堵性,系统运行稳定,产水回收率为 65%~70%,实现了废水的减量化处理。膜系统产生的浓水可进入蒸发结晶系统生成结晶盐,使蒸发水量减少 50%~60%,降低了投资和运行成本。

3.3 膜蒸馏技术

膜蒸馏是以膜两侧蒸汽压力差为传质驱动力通过微孔疏水膜进行分离的一种新型膜分离技术。基于膜的疏水性,膜两侧的溶液均不能透过膜孔进入另一侧,当不同温度的溶液被疏水微孔膜分隔开时,温度高一侧溶液与膜界面的水蒸汽压比温度低一侧的高,水蒸汽就会穿过膜孔从温度高侧流入温度低侧而冷凝^[31]。该技术的优点是脱盐率高(大于

98%)、产水水质好、水回收率高、可利用工业废热、节约能源、设备简单、操作方便等。缺点是膜通量较低、单程热效率一般不到50%、运行过程中容易造成膜的污染^[32]。

张新妙等^[33]采用“调酸+膜蒸馏”工艺处理含氨氮高盐废水,结果显示,当含氨氮高盐废水进水pH调节到5左右时,膜蒸馏产水水质较好,产水中氨氮小于10 mg/L,产水TOC小于3 mg/L,脱盐率和氨氮去除率均较高。

4 结论与展望

目前有色冶炼企业处理高盐废水主要采用膜分离、膜浓缩和热蒸发结晶技术,根据现有工程运行来看,由于氯离子与硫酸根离子分离效果不理想,导致蒸发结晶产生氯化钠和硫酸钠的杂盐,利用价值低,目前杂盐的处置已逐渐成为行业新难题。近年来开始有研究采用双极膜电渗析技术将高盐废水转化为酸和碱,但是由于双极膜对进水水质要求高、有色冶炼废水水质成分复杂、预处理难度大等问题,目前该技术还处于实验室研究阶段。因此,未来需要从下述方面对有色冶炼高盐废水处理技术进行研究:

1)研发高盐废水氯化钠和硫酸钠分离技术,提高分离效果,高盐废水分离后分别蒸发结晶,产生的氯化钠和硫酸钠可以满足相应产品标准进行综合利用。

2)研发高盐废水分离、除杂技术,在氯离子跟硫酸根分离的基础上,进一步深度处理去除钙、镁、铅、锌等高价阳离子,开发“预处理除杂+双极膜电渗析”技术,将高盐废水转化为盐酸、硫酸和氢氧化钠,实现高盐废水的资源化。

参考文献

- [1] 旷玉丹,吴志宇,李杏清,等.高盐废水处理技术综述[J].广州化工,2022,50(7):36-38.
KUANG Y D, WU Z Y, LI X Q, et al. Review on high salt wastewater treatment technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(7): 36-38.
- [2] 陈宋璇,于森,黄龙,等.基于“以废热治废水”理念的高盐废水减排降碳处理技术的工业化应用[J].有色冶金节能,2022,38(4):7-11.
CHEN S X, YU M, HUANG L, et al. The industrial application of a carbon-emission-reducing technology for the high-salinity industrial effluent based on the concept of treating effluent with waste heat[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2022, 38(4): 7-11.
- [3] 曹敏,曹迪,李诺,等.电催化氧化处理高盐废水[J].中国有色冶金,2021,50(2):68-71.
CAO M, CAO D, LI N, et al. Electro catalytic oxidation treatment of high-salt wastewater[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(2): 68-71.
- [4] 巫旭,胡继刚.镍电解碳酸镍上清液絮凝研究与应用[J].世界有色金属,2017(24):294-295.
WU X, HU J G. Research and application of nickel electrolytic nickel carbonate supernatant flocculation[J]. World Nonferrous Metals, 2017(24): 294-295.
- [5] 徐焰.矿铜冶炼工厂重金属废水零排放技术路线[J].有色金属工程,2012,2(6):26-28.
XU Y. Technology route of zero discharge of heavy metal wastewater from copper smelting plant[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2012, 2(6): 26-28.
- [6] 袁惠新,金澄澄,付双成.蒸发技术在高含盐废水处理中的研究进展[J].现代化工,2017,37(5):50-54.
YUAN H X, JIN C C, FU S C. Research progress of evaporation technology in the treatment of high-salt wastewater[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(5): 50-54.
- [7] 张耀煌,邢莉玲.热浓缩在废水处理中的应用[J].安徽化工,2008,34(1):55-57.
ZHANG Y H, XING L L. Application of heat concentration in wastewater treatment[J]. Anhui Chemical Industry, 2008, 34(1): 55-57.
- [8] 刘少葵,刘勇奇,曹太鹏,等.萃取皂化废水除COD制工业盐工艺研究[J].有色金属(冶炼部分),2021(5):128-131.
LIU S K, LIU Y Q, CAO T P, et al. Study on technology of preparing industrial salt by removing COD from extraction saponification wastewater[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(5): 128-131.
- [9] 田立辉,郭杰,郭艳丽.含盐废水MVR蒸发处理工艺设计及成本分析[J].山东化工,2016,45(18):175-177.
TIAN L H, GUO J, GUO Y L. The Design and cost analysis of MVR evaporation treatment process for treating wastewater containing salt[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(18): 175-177.
- [10] 张帆,王欲晓,庄严,等.多效蒸发处理高盐有机废水进展[J].云南化工,2018,45(10):12-14.
ZHANG F, WANG Y X, ZHUANG Y, et al. Progress in the treatment of high salt organic wastewater by multi-effect evaporation[J]. Yunnan Chemical Industry,

- 2018,45(10):12-14.
- [11] 吴韩,梅小慧.多效蒸发技术在高盐度废水的应用[J].广东化工,2013,40(23):123,138.
- WU H, MEI X H. Application of multi-effect evaporation technology to high salinity wastewater[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(23): 123, 138.
- [12] 丁丽. 20 t/h 氯化钠溶液多效蒸发工艺设计及优化[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(12): 46-48.
- DING L. Design and optimization of multi-effect evaporation process for 20 t/h sodium chloride solution[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(12): 46-48.
- [13] 惠绍棠,阮国岭,于开录.海水淡化与循环经济[M].天津:天津人民出版社,2005.
- HUI S T, RUAN G L, YU K L. Desalination and recycling economy [M]. Tianjin: Tianjin People's Publishing House, 2005.
- [14] MARWANMA A. Dynamic behavior of MSF desalination plants[J]. Desalination, 1995, 101: 287-293.
- [15] 晁雷,邵雪,胡成,等.高盐废水处理工艺技术研究进展[J].安徽农业科学, 2011, 39(6): 19387-19389, 19404.
- CHAO L, SHAO X, HU C, et al. Research progress on the treatment technology of wastewater with high salinity [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(6): 19387-19389, 19404.
- [16] 王宏,郑一新,钱彪,等.电解凝絮法处理高盐度有机废水的实验研究[J].环境科学研究, 2001, 14(2): 51-53.
- WANG H, ZHENG Y X, QIAN B, et al. Electrolytic floe method and treatment of high salinity organic wastewater of experimental study [J]. Journal of Environmental Science Research, 2001, 14(2): 51-53.
- [17] 颜海洋,汪耀明,蒋晨晔,等.离子膜电渗析在高盐废水“零排放”中的应用、机遇与挑战[J].化工进展, 2019, 38(1): 672-681.
- YAN H Y, WANG Y M, JIANG C X, et al. Application, opportunity and challenge of ion membrane electro dialysis in zero discharge of high salt wastewater [J]. Chemical Industry Progress, 2019, 38(1): 672-681.
- [18] 史元腾,张丹丹,高耀寰,等.双极膜电渗析法处理矿井浓盐水的应用研究[J/OL].安全与环境学报: 1-10[2022-09-12]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.0145>.
- SHI Y T, ZHANG D D, GAO Y H, et al. Bipolar membrane electro dialysis method of dealing with the mine's strong brine application research [J/OL]. Journal of Safety and Environment: 1-10[2022-09-12]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.0145>.
- [19] MIAO Y Q, OUYANG L, ZHOU S L, et al. Electro catalysis and electro analysis of nickel, its oxides, hydroxides and oxyhydroxides toward small molecules[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2014, 53: 428-439.
- [20] NIDHEESH P V, ZHOU M H, OTURAN M A. An over view on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes [J]. Chemosphere, 2018, 197: 210-215.
- [21] JING Y, CHAPLIN B P. A mechanistic study of the validity of using hydroxyl radical probes to characterize electrochemical advanced oxidation processes [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(4): 2355-2365.
- [22] 曹敏,曹迪,李诺,等.电催化氧化处理高盐废水[J].中国有色冶金, 2021, 50(2): 68-71.
- CAO M, CAO D, LI N, et al. Electric catalytic oxidation of high salt wastewater treatment [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(2): 68-71.
- [23] 张占勋.臭氧电催化氧化工艺处理反渗透高盐浓水的研究及应用[D].北京:北京林业大学, 2019.
- ZHANG Z X. Research and application of ozonation electrocatalytic oxidation process for reverse osmosis high salt concentrated water [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [24] MOHAMMAD A W, TEOW Y H, ANG W L. Nano filtration membranes review: recent advances and future prospects[J]. Desalination, 2015, 356: 226-254.
- [25] 李红,赵东,杨晓松,等.纳滤对高浓度冶炼废水处理的可能性研究[J].现代化工, 2013, 33(3): 74-77.
- LI H, ZHAO D, YANG X S, et al. Nano filtration to study the feasibility of the high concentration refining wastewater treatment [J]. Journal of Modern Chemical Industry, 2013, 33(3): 74-77.
- [26] 张兆钢,梁松苗,田长周,等.高压纳滤膜在浓盐水资源化利用中的应用研究[J].膜科学与技术, 2021, 41(6): 146-152.
- ZHANG Z G, LIANG S M, TIAN C Z, et al. High-pressure nano filtration membrane application in the concentrated brine resource utilization research [J]. Journal of Membrane Science and Technology, 2021, 41(6): 146-152.
- [27] GREENLEE L F, LAWLER D F, FREEMAN B D. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges [J]. Water

- Research, 2009, 43(9): 2317-2348.
- [28] 宋哈楠, 李明, 张磊. 内蒙古自治区高含盐水处理技术现状及进展[J]. 北方环境, 2013, 29(1): 106-110.
- SONG H N, LI M, ZHANG L. Current status and progress of high-brine treatment technology in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Environmental Science and Management, 2013, 29(1): 106-110.
- [29] 郭磊. 某铅锌冶炼企业废水处理工艺及应用[J]. 有色金属加工, 2016, 45(3): 64-66.
- GUO L. Wastewater treatment technology and application of a lead-zinc smelting enterprise [J]. Nonferrous Metal Processing, 2016, 45(3): 64-66.
- [30] 魏明波, 胡溪, 杨万强, 等. 燃煤电厂脱硫废水处理工艺试验研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 95-99.
- WEI M B, HU X, YANG W Q, et al. Experimental study on concentration treatment process of desulfurization waste water in coal-fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 95-99.
- [31] 蔡煜格. 真空膜蒸馏处理高氨废水的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- CAI Y G. Experimental study on the treatment of high ammonia wastewater by vacuum membrane distillation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [32] 段明星, 王建兵, 王军. 真空膜蒸馏和膜吸收及其集成工艺处理高氨氮废水[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 659-664.
- DUAN M X, WANG J B, WANG J. Treatment of high ammonia-nitrogen wastewater by vacuum membrane distillation and membrane absorption [J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2): 659-664.
- [33] 张新妙, 王玉杰, 彭海珠. 膜蒸馏处理石化高盐废水技术研究[J]. 现代化工, 2015, 35(1): 153-157, 159.
- ZHANG X M, WANG Y J, PENG H Z. Membrane distillation petrochemical high salt wastewater treatment technology research [J]. Journal of Modern Chemical Industry, 2015, 35(1): 153-157, 159.