

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.24.020

以 MVR 为核心的含盐废水处理工艺设计

张 军^{1,2}, 宋萌萌², 高 兴², 张茂刚², 华 佳²

(1. 无锡环境科学与工程研究中心, 江苏 无锡 214153; 2. 无锡城市职业技术学院 建筑与环境工程学院, 江苏 无锡 214153)

摘 要: 无锡某化工厂含盐废水设计废水量约 $17 \text{ m}^3/\text{d}$, 废水中主要含有钙、镁、铜、硝酸铵等污染物。根据原水水质特点并结合企业需求, 进行了软化工艺与浓缩工艺的详细比选, 确立了以石灰+碳酸钠为前端软化工艺, 蒸汽机械再压缩技术(MVR)为核心浓缩工艺, 并辅以RO末端处理的整体处理工艺。设计中, 根据硝酸铵浓水回收的浓度需求结合废水易结晶特性, 选定MVR压缩机为罗茨式压缩机并对级间管路进行了详细的保温与降阻设计。经过半年运行监测, 系统运行稳定, 操作管理方便, 硝酸铵回收率达到92.6%, 总体脱盐率在99%以上。通过硝酸铵废液浓缩回收与冷凝水脱盐回用, 降低了一半以上废水处理成本。

关键词: 含盐废水; 软化; 蒸汽机械再压缩

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)24-0109-06

Design of Saline Wastewater Treatment Process with MVR as Core Treatment Unit

ZHANG Jun^{1,2}, SONG Meng-meng², GAO Xing², ZHANG Mao-gang², HUA Jia²

(1. Wuxi Research Center for Environmental Science and Engineering, Wuxi 214153, China;

2. College of Architectural and Environmental Engineering, Wuxi City College of Vocational Technology, Wuxi 214153, China)

Abstract: The wastewater treatment capacity of a chemical plant in Wuxi is about $17 \text{ m}^3/\text{d}$, which mainly contains calcium, magnesium, copper, ammonium nitrate and other pollutants. According to the characteristics of raw water quality and the needs of enterprises, the detailed comparison of softening and concentration process was carried out, and the whole treatment process with lime + sodium carbonate as the front softening stage, MVR as the core concentration unit and RO as the end treatment stage was established. In the designing process, according to the requirement of ammonium nitrate concentration for recovery of concentrated water and the easy crystallization characteristic of wastewater, MVR compressor was chosen as Roots compressor, and the detailed heat preservation and resistance reduction design of interstage pipeline were carried out. After operation monitoring for half a year, the system operation was stable, management was convenient, the recovery rate of ammonium nitrate was 92.6%, and the total

基金项目: 江苏省大学生创新项目(201813748010Y); 无锡城市职业技术学院院级重点课题(WXCY-2017-KZ-04); 无锡城市职业技术学院科研创新团队项目(KYCXTD201801, KYCXTD201901); 无锡市科学技术协会软科学重点课题(KX-19-C49); 无锡城市职业技术学院“青蓝工程”资助项目; 江苏高校“青蓝工程”资助项目

通信作者: 张军 E-mail: 89422193@qq.com

desalination rate was over 99%. More than half of the cost of wastewater treatment was reduced by concentrated recovery of ammonium nitrate wastewater and desalination of condensate water.

Key words: saline wastewater; softening; mechanical vapor recompression

化工生产废水中通常含有大量可溶性无机盐,如 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,当废水中 TDS 质量分数达 1% 时常称为含盐废水,部分含盐废水中还含有 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{2+} ,增加了处理难度^[1-3]。上述生产废水量大、处理难度高,寻找处理效果好、成本低的处理工艺,实现生产废水近零排放不仅是构建生态命运共同体的外在需求,也是当前我国企业生产发展的强烈内需。含盐废水处理常用的技术为膜法与热法两类,膜法对预处理要求较高,需要定期清洗;常规热法需要消费大量蒸汽,运行成本高,应用受到了一定限制。蒸汽机械再压缩技术(MVR)利用压缩机对低温位的蒸汽压缩,提升热焓为高温位蒸汽,该技术节能、环保、运行成本低,有较好的应用前景^[4]。

无锡某化工企业含盐废水以 MVR 为核心技术进行处理,取得了较好的效果。

1 项目背景

该工程处理对象为无锡园区化工企业生产废

水,设计废水量约 $17 \text{ m}^3/\text{d}$,该废水中含有硝酸铵,还含有部分钙、镁与铜离子。

企业生产总体目标:实现近零排放,尽量使生产废水经处理后实现回用,并通过将硝酸铵废水回收处理后作氮肥原料,帮助企业降低生产成本,提高经济效益。

2 处理工艺设计

2.1 预处理工艺

原水中含有钙、镁离子与铜离子,钙镁离子经历起始、运输、附着、剥蚀和老化后可引起设备的结垢、腐蚀,同时极大地降低传热效率、增加能耗与刷罐频率^[5],《铜、钴、镍工业污染物排放标准》(GB 25467—2010)中也对 Cu^{2+} 有明确限定。为提高设备运行周期,降低能耗,避免回收的硝酸铵中含重金属污染物,浓缩结晶前需预先去除钙、镁离子与铜离子。

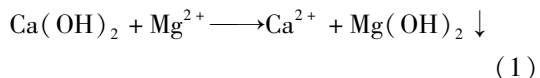
首先需确定上述离子的去除工艺,常规软化处理工艺对比如表 1 所示。

表 1 不同软化工艺对比

Tab. 1 Comparison of different softening technologies

软化工艺	原 理	特 点	操作与管理	成本
离子交换	原水经离子交换树脂去除水中硬度	无二次泥渣产生,离子交换反应受电荷正负电性限制,适用硬度较小水质,置换反应后原水盐度可能增加,交换树脂饱和后需药剂再生	占地小,定员少,可实现自动化操作	高
石灰-碳酸钠	石灰、碳酸钠与原水中离子反应后去除水中硬度	水中的悬浮物、微生物黏泥等可一并沉淀去除,泥渣易脱水	操作要求低,可用于中小系统	一般
石灰	与碳酸盐反应,生成碳酸钙、氢氧化镁、氯化钙	能去除水中的碳酸盐硬度,无法去除水中的非碳酸盐硬度和负硬度	占地大,人员多,操作简单、强度高	较低
石灰-烟气	烟气中二氧化碳代替碳酸钠生成沉淀	可以利用生产烟气进行软化处理,可去除碳酸盐与非碳酸盐硬度	需要烟气处理装置,操作管理要求高	较低
造粒法	通过诱导晶种进行吸附造粒,逐渐增大,沉淀到底部	沉淀分离性较好,对钙的去除效果较好,镁的诱导结晶较复杂,不适用于高镁低钙水质	定员少,但对工艺操作有一定要求	中
氢氧化钠-碳酸钠	氢氧化钠、碳酸钠与钙、镁反应生成沉淀物去除	能去除碳酸盐与非碳酸盐硬度,对镁的去除效果较好,二次沉渣量少,然而氢氧化钠价格通常是石灰的数倍	定员少,可实现自动化	较高

通过上述对比,结合处理效果与成本,若采用烟气成本较低,但需另设烟气洗涤装置,故决定采用石灰+碳酸钠对镁、钙离子先后进行软化处理,反应如下:



氢氧化钙对铜离子有共沉作用,但仍需部分药剂辅助,通过加入 Na_2S 与 PAM,彻底生成 CuS 沉淀,沉淀颗粒可经 PAM 的聚合架桥聚集变大,再经压滤机除去。预处理工艺一方面可降低原水硬度,防止后续处理设备结垢的发生,同时可解决后续重

金属污染问题。

2.2 核心处理工艺

废水处理过程中需回收 NH_4NO_3 , 对常规回收工艺进行方案比选^[2,6-7] (如表 2 所示)。

电渗析装置对预处理要求较高,且浓缩度相对

较低^[8],不能满足甲方回收要求,而多效蒸发能耗较高,也不宜采用。由于该厂放置处理设备的场地有限,为尽可能实现节能减排并降低运行成本,因此含盐废水浓缩工艺选定为目前技术日趋成熟的 MVR 工艺。

表 2 不同浓缩工艺对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of different concentration technologies

浓缩工艺	基本原理	优点	缺点	占地面积	造价	成本
电渗析	利用场外电场作用及离子交换膜的选择透过性实现盐水分离	可用于含盐量在 500 ~ 4 000 mg/L 的高盐水,耗药量少,操作简单,易实现自动化,分离效果较好	对预处理有较高要求,电极容易产生腐蚀与结垢	小	中	高
晶种法技术	以 CaSO_4 等为“晶种”,离子附着在这些种子上,并保持悬浮在水中,最终沉淀	适应不同盐度的含盐水,在晶种作用下,沉淀分离效果较好	易受盐类影响,需及时添加晶种,工艺控制要求高	小	中	中
膜蒸馏	在一定温度下利用蒸汽压力差与膜的选择性透过性实现盐水分离	设备构造相对简单、操作方便、操作条件温和,由于膜表面疏水性,分离得到的水纯度高,浓缩倍数高	膜成本高、蒸馏通量小、稳定性相对差,热利用率低,易受极化影响	中	中	高
多效蒸发系统(MED)	加热蒸汽由第一效开始与含盐废水换热,产生的二次蒸汽逐次与含盐废水换热直至废水浓缩	技术成熟,效率高,浓缩倍数高,无需药剂,适用于不同类型的高盐水	需要蒸汽量大,冷却水消耗量也较大	大	低	高
MVR 技术	流程短、设备少,通过压缩机对低温位的蒸汽进行压缩,增加其热焓对高盐水进行蒸发浓缩	除了装置启动外,不再需要新鲜蒸汽,不易结垢,可在温度较低及负压力的状态下运行,避免物料高温变性、结焦	效率易受工艺操作影响,对保温有较高要求	小	高	低

2.3 全工艺流程

该项目生产废水处理工艺采用三联合工艺(如图 1 所示),全工艺流程包含三部分:前端处理单元、中部 MVR 处理单元与终端反渗透处理单元。废水在前端预处理部分通过加药软化与除铜,产生的泥渣经压滤后委托有资质的单位进行处理,预处理大大降低了 MVR 在 NH_4NO_3 浓缩过程中发生结垢的概率,同时提高了换热器等传热装置的传热效率。前端处理后,由中部 MVR 核心处理单元负责硝酸铵水浓缩。废水与闪蒸罐出流液预热,然后进入换热器换热。经换热器后,一部分进闪蒸汽罐蒸发,蒸发中产生的二次蒸汽进入压缩机压缩后再进入换热器与料液换热,蒸发中产生的不凝气体经汽水分离收集后排放,蒸发后达到设计浓度的浓缩水滤后回收,未达到设计浓度的水进入预热器;另一部分生成冷凝水,这部分冷凝水仍携带着一定盐量,如果直接排放会产生一定的盐害^[4],若将其回用生产,按企业以往生产经验仍需进一步降低含盐量。因此,冷凝水再泵入终端反渗透单元进行深度脱盐后回用,并将反渗透浓水进行二次处理。整个过程中,废水历经软化、除铜预处理后,提高了 NH_4NO_3

浓液回收品位,预处理与 MVR 核心处理同时大大降低了反渗透系统的工作负荷,延长了反渗透系统的工作周期与使用寿命。选择上述三联合处理工艺流程,既保障了设备的正常工作,同时也实现了硝酸铵废水的近零排放。

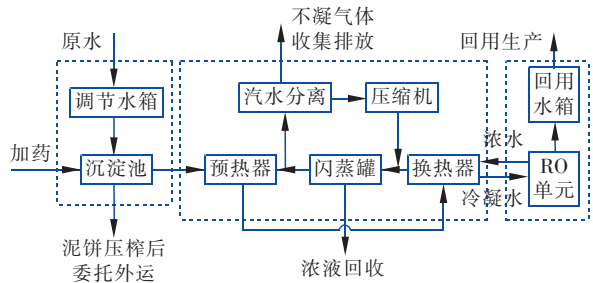


图 1 生产废水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

3 MVR 处理系统工艺设计

装置设计进料量为 $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$, 进料温度为 20°C , 进料盐浓度为 $30\,000 \text{ mg/L}$, 浓缩倍数取 8, 闪蒸罐压力为 0.05 MPa 。

3.1 沸点升温

溶液的沸点与溶液的浓度相关,沸点会随着浓

度的提高而升高,沸点温升是蒸发设计的重要参数,设计前需进行简单试验,测定常压下不同饱和溶液的沸点温升,生产废水起始浓度为 3%,加热蒸发浓缩 8 倍后浓缩到 24%,溶液的沸点由 101.5℃增至 111.2℃,沸点温升为 9.7℃。

3.2 压缩机选择

MVR 中比较常用的蒸汽压缩机主要是离心式和罗茨式。两种类型压缩机的工作原理与特性如表 3 所示。

表 3 两种压缩机对比分析

Tab.3 Comparative analysis of two compressors

项目	离心式	罗茨式
特性	蒸汽量随管道变化,压力基本不变(恒压)	蒸汽量随管道基本不变,压力随管道变化(恒量)
材质	双相钢、钛合金等	镀铬、镀镍防腐碳钢
运行噪声	较低	稍高
优点	结构简单、动平衡性能好、振动小、运转周期长,适用于流量大、温升小场合	无需润滑、效率高、单级压比高、对蒸汽中粉尘不敏感,不喘振,适用于流量小、温升高场合
缺点	对雾颗粒敏感、应用领域小、易喘振和腐蚀,单级压比低,若密封性不好易产生油气污染	结构相对复杂、排量小、振动大、维护成本高
成本	高	低

离心式压缩机温升比罗茨式低,对沸点温升在 5℃以上的溶液通常应选用罗茨式压缩机。此次废水溶液的沸点升为 9.7℃,流量相对较小,且考虑到硝酸铵回收过程中不宜携带油污等杂质,故此次设计选用罗茨式蒸汽压缩机。考虑到罗茨压缩机运行噪声较大,设计采用三叶式转子,并将压缩机与电机利用隔声降噪材料包覆处理,尽可能降低噪声对工作环境的影响。

3.3 级间管路系统

① 系统运行过程中,废水与浓缩液、冷凝水的热交换由 MVR 循环蒸汽供给,启动后系统再无外界热源补给,所以 MVR 工艺本身对系统保温性要求较高。加之废水中硝酸铵热敏性较强,温度降低容易在管道中结晶,可通过强化管道保温提高伴热而避免结晶。设计中选用复合硅酸盐管壳型保温材料,保温层厚度应满足要求且缝隙严密,并按要求配置管道柔性补偿装置。开车前应确保系统保温测试合格。为保证合理的操作弹性,在闪蒸罐出口与冷

凝器处预留 2 处活接,闪蒸罐出口活接处预留管路结晶吹扫,在冷凝器活接处留排污兼事故排出口。

② 考虑到压缩机压缩比直接关联 MVR 系统能耗,且压缩比有一定限度,若各处理单元级间管路压降大,系统能耗就比较高。管路系统应考虑光滑过度,避免死角。设计要求管道弯头、三通与焊缝处均做内抛光处理,管路阀门采用结构简单、阻力较小的球阀,设置在靠近设备处,便于硝酸铵结晶堵塞时拆卸。

3.4 主要工艺参数

进水泵将通过预处理的废水送至预热器,预热器通过将出料液产生的热量传给进料液预热,预热后料液混匀后被导入冷凝器,料液在冷凝器中与压缩机加热蒸汽换热至目标温度后送入闪蒸罐,产生的冷凝水泵至 RO 处理。闪蒸罐内转化为过热盐水并产生蒸汽,蒸汽被蒸发室上方的捕沫网分离气体和液体,然后被吸入压缩机中重新加热。闪蒸室出料液经循环泵回至换热器,少部分浓缩液回收后釜残外运,母液强制循环再蒸发直至达到设计浓度。MVR 系统闪蒸罐、冷凝器与压缩机的主要工艺参数见表 4。

表 4 MVR 系统主要设计参数

Tab.4 Main design parameters for MVR system

参 数	数值
料液蒸发温度/℃	91.3
闪蒸罐蒸发量/(L·h ⁻¹)	612.4
预热器换热面积/m ²	5.8
冷凝器换热面积/m ²	45.4
闪蒸罐进料量/(L·h ⁻¹)	134 165
浓缩出料量/(L·h ⁻¹)	87.4
闪蒸压力(设定值)/MPa	0.05
压缩机进出口压力/MPa	0.10~0.18
闪蒸罐进料温度/℃	95.3
冷凝器进料温度/℃	90.5
压缩机进口温度/℃	81.6
压缩机出口温度/℃	96.2

4 主要构筑物及设备参数

① 预处理设施:沉淀池 1 座,PP 材质,1 500 mm×2 000 mm×1 000 mm, $Q=0.7\text{ m}^3/\text{h}$,停留时间为 4 h。设软化除铜加药泵 4 台(3 用 1 备);PAM 加药泵 1 台,电机 1 kW,转速为 1 390 r/min,配套减速机 1 台;压滤机 1 台,过滤压力为 9.5 MPa,过滤面积为 10 m²,滤室总容积为 150 L,配套隔膜泵 1 台,

流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程为 500 kPa 。

② MVR 系统:闪蒸罐有效容积为 0.12 m^3 ,分离室高度为 4.5 m ,直径为 1.2 m ,进料管 DN200,捕沫网直径为 0.5 m ,材质 304 不锈钢。进料泵 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 120 kPa ,出料泵 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 500 kPa ,循环泵 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 125 kPa ,冷凝水泵 $3.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 250 kPa ,真空泵最大抽速为 $0.45 \text{ m}^3/\text{min}$,转速为 2880 r/min ,蒸汽加热器额定功率为 73 kW ,额定蒸汽压力为 0.7 MPa ,额定蒸汽温度为 170°C 。

③ 反渗透与储水设施:反渗透产水量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,操作压力为 $1.2 \sim 1.8 \text{ MPa}$,脱盐率为 95% ,尺寸为 $3100 \text{ mm} \times 900 \text{ mm} \times 1400 \text{ mm}$ 。所有储水设施采用碳钢防腐材质,储存调节废水的集水箱 1 套,尺寸为 $5400 \text{ mm} \times 2300 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$;中间水箱 1 套,尺寸为 $2300 \text{ mm} \times 2300 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$;冷凝水箱 1 套,尺寸为 $5400 \text{ mm} \times 2300 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$;反渗透出水回用水箱 1 套,尺寸同冷凝水箱;MVR 浓缩出水水箱 1 套,尺寸为 $9000 \text{ mm} \times 2300 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ 。

5 系统运行情况

系统调试前期进料量少,闪蒸温差较大,随着系统开始正常运行,进料量逐渐达到设计值,同时随着进料量的增加与稳定,闪蒸罐带来的热量增加使蒸发量变大而趋于稳定,最终闪蒸温差逐渐稳定在设计值。

系统于 2018 年 6 月投入运行,在为期 6 个月的连续监测中系统出水 pH 值均值为 7.73 ,满足回用要求。各处理单元的盐度如表 5 所示。预处理单元主要去除 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} ,由于碳酸钠、硫化钠等药剂的加入,废水中总盐度有所提升。MVR 单元在前期调试过程中,随着浓缩倍数的逐渐上升,出料液不断浓缩并达到设计值,如表 5 所示,MVR 稳定运行后的平均脱盐率达到了 98.24% 。RO 单元的出水盐度比较稳定,脱盐率整体也稳定在 85% 以上。生产废水进水平均盐度为 29158 mg/L ,经过三个处理单元后,出水的平均盐度为 68 mg/L ,整个工艺的脱盐率达到了 99.77% 。运行前期,硝酸铵的回收量不稳定。经分析认为,应该是硝酸铵发生水解,部分分解产物随不凝气体排出造成的。在后期操作中,通过严格控制闪蒸罐内运行过程中料液的 pH 值,并适当提高罐内的真空度,使硝酸铵回收率达到 92.6% 。

表 5 各处理单元脱盐效果

Tab.5 Desalination effect of each treatment unit

项 目		预处理单元	MVR 单元	RO 单元
进水盐度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	范围	28 106 ~ 30 210	29 252 ~ 30 336	316 ~ 732
	均值	29 158	29 794	524
出水盐度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	范围	29 252 ~ 30 336	316 ~ 732	59 ~ 76
	均值	29 794	524	68
各单元盐度的平均去除率/%		-2.18	98.24	87.02

6 综合效益分析

预处理单元的进水泵、搅拌机、加药泵、压滤机等能耗合计约 $8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;MVR 处理单元的蒸汽加热器、压缩机、进出料泵、蒸汽泵、冷凝水泵等能耗合计约 $50 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;RO 处理单元能耗为 $2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。则总电耗约 $60 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

废水药剂成本:碳酸钠、硫化钠、PAM 等药剂合计约 $1.50 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

回收效益:MVR 工艺将硝酸铵废水回收处理后作氮肥肥料,冷凝水用作生产回用水。若生产用水按 $3 \text{ 元}/\text{m}^3$,硝酸铵售出费按 $320 \text{ 元}/\text{t}$,每吨废水回用水按 0.8 t 、硝酸铵 0.1 t 计,则可回收成本近 $35 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。回收后,实际折合废水处理成本约 $15 \text{ 元}/\text{m}^3$,降低了一半以上的废水处理成本。

节能效益:根据参考文献^[9],类似条件下 MVR 处理单元若采用三效蒸发工艺,MVR 工艺每年比三效蒸发工艺节约成本 16.8 万元 。

环境效益:本项目通过三段式联合处理,实现了废水近零排放,尤其避免了含氮废水的排放。

由于原水水质、水量的特殊性,单位水处理成本并不低,但同目前同类废水采用的电渗析与膜工艺相比^[8,10],在经济、环境效益上仍占据一定优势。

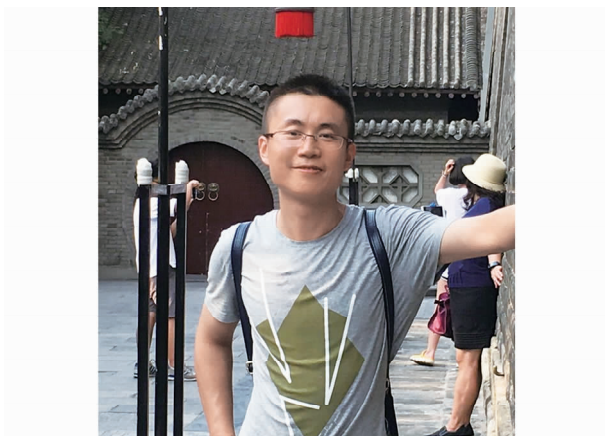
7 结语

本项目通过方案比选确定了石灰+碳酸钠预处理与 MVR 核心处理工艺,从而降低了末端 RO 处理的工作负荷与生产成本,整个废水从进水到出水脱盐率达到了 99.77% ,脱盐效果较好且系统运行稳定。然而,为尽可能提升硝酸铵的回收量,在运行过程中应注意控制闪蒸罐内 pH 值,适当提高罐内真空度以减少物料随不凝气的流失。该项目通过回收硝酸铵与回用冷凝水,整个系统实际废水处理成本降低一半以上,不仅实现了含盐废水近零排放,同时

提升了企业的经济效益,可为类似项目设计提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 杨德明,叶梦飞,谭建凯,等. 机械蒸汽再压缩(MVR)热泵技术的应用进展[J]. 常州大学学报:自然科学版,2015,27(1):76-80.
Yang Deming, Ye Mengfei, Tan Jiankai, *et al.* Application progress for mechanical vapor recompression heat pump technology [J]. Journal of Changzhou University: Natural Science Edition, 2015, 27(1): 76-80 (in Chinese).
- [2] 彭赛军. NaCl-Na₂SO₄-H₂O 体系(MVR)与(ME)盐硝联产工艺生产分析[J]. 中国井矿盐, 2012, 43(2):1-4.
Peng Saijun. Analysis on the co-production of salt and sodium sulfate with NaCl-Na₂SO₄-H₂O system brine by means of MVR and ME processes [J]. China Well and Rock Salt, 2012, 43(2): 1-4 (in Chinese).
- [3] Oren Y, Korngold E, Daltrophe N, *et al.* Pilot studies on high recovery BWRO-EDR for near zero liquid discharge approach [J]. Desalination, 2010, 261: 321-330.
- [4] Víctor-Ortega M D, Ochando-Pulido J M, Hodaifa G, *et al.* Ion exchange as an efficient pretreatment system for reduction of membrane fouling in the purification of model OMW [J]. Desalination, 2014, 343: 198-207.
- [5] 徐文江,张志辉,李安峰,等. 机械式蒸汽再压缩技术处理高盐废水的工程实例[J]. 环境工程, 2018, 36(增刊):68-69,76.
Xu Wenjiang, Zhang Zhihui, Li Anfeng, *et al.* Engineering example of treatment of high salinity wastewater by MVR technology [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(S): 68-69, 76 (in Chinese).
- [6] Han D, He W, Yue C, *et al.* Analysis of energy saving for ammonium sulfate solution processing with self-heat recuperation principle [J]. Appl Therm Eng, 2014, 73(1): 641-649.
- [7] 王爱军,周京都,贾彬彬,等. MVR 技术处理循环流化床锅炉排浓盐水[J]. 中国给水排水, 2015, 31(20):85-87.
Wang Aijun, Zhou Jingdu, Jia Binbin, *et al.* Industrial test of MVR technology for treating concentrated salt water from circulating fluidized bed boiler [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(20): 85-87 (in Chinese).
- [8] 王方,王明亚,王明太. 改良电渗析法和集成膜法在硝酸铵废水回收中的应用[J]. 化肥工业, 2016, 43(3):44-46.
Wang Fang, Wang Mingya, Wang Mingtai. Use of improved electrodialysis process and integrated membrane process in ammonium nitrate wastewater recovery [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2016, 43(3): 44-46 (in Chinese).
- [9] 晋银佳,孙海峰,王丰吉,等. 燃煤电厂高盐废水“零排放”处理工艺及技术经济分析[J]. 华电技术, 2017, 39(12):46-49.
Jin Yinjia, Sun Haifeng, Wang Fengji, *et al.* Technical and economic analysis of “zero emission” treatment of high salinity wastewater from coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2017, 39(12): 46-49 (in Chinese).
- [10] 郭艳丽,田立辉. 硝酸铵冷凝液回收的工艺设计与效益分析[J]. 氮肥技术, 2016, 37(2):43-45.
Guo Yanli, Tian Lihui. Process design and benefit analysis of ammonium nitrate condensate recovery [J]. Nitrogenous Fertilizer Technology, 2016, 37(2): 43-45 (in Chinese).



作者简介:张军(1982-),男,江苏无锡人,硕士,副教授,研究方向为水处理技术与应用。

E-mail:89422193@qq.com

收稿日期:2019-09-03