

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.008

大压比MVR蒸发结晶装置研制与应用

邢玉雷^{1,2}, 胡斌³, 吕宏卿¹, 韩克鑫¹, 齐春华¹, 谢春刚¹

(1. 自然资源部 天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192; 2. 天津海跃水处理高科技有限公司, 天津 300192; 3. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 设计开发了面积利用系数为0.85的4/4齿对称转子型线及相应双螺杆蒸汽压缩机, 通过与强制循环蒸发工艺耦合, 研制了一台处理负荷为24 m³/d的大压比MVR蒸发结晶装置, 并开展了高盐高COD工业废水处理应用和运行分析, 顺利通过168 h性能测试。结果表明, 装置自动运行稳定, 各项技术参数均达到或优于设计值, 平均废水处理负荷1 m³/h, 进水TDS约100 000 mg/L、COD约9 200 mg/L, 出水TDS约17.4 mg/L、COD约60 mg/L, 出水指标优于排放标准, 吨水处理电耗约68 kW·h; 压缩机蒸汽压缩温升22.3 ℃, 压比为2.26, 效率为71.2%, 在母液沸点升为16 ℃工况下运行稳定。通过大压比双螺杆蒸汽压缩机的开发与应用, 研制的MVR装置提升了蒸汽压缩温升, 增强了其在高沸点升废水蒸发结晶中的实用性和可靠性。本研究对基于双螺杆蒸汽压缩机的大压比MVR蒸发结晶装置的技术集成、工艺开发和设计制造具有一定的指导意义。

关键词: 废水处理; 蒸发结晶; 机械蒸汽再压缩; 双螺杆蒸汽压缩机

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0046-07

Development and Application of Mechanical Vapor Recompression Evaporation Crystallization Device with High Pressure Ratio

XING Yu-lei^{1,2}, HU Bin³, LÜ Hong-qing¹, HAN Ke-xin¹, QI Chun-hua¹,
XIE Chun-gang¹

(1. *The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR<Tianjin>, Tianjin 300192, China*; 2. *Tianjin Haiyue Water Treatment High Tech Co. Ltd., Tianjin 300192, China*; 3. *School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: In this study, one 4-4 configuration symmetrical rotor profile with an area utilization coefficient of 0.85 and the twin-screw vapor compressor basing the profile was designed and developed. A device of mechanical vapor recompression (MVR) evaporation crystallization with a treatment load of 24 m³/d was developed with high pressure ratio by coupling of forced circulation evaporation process, and its application and operation analysis in industrial wastewater treatment with high salt and high COD were conducted, which passed through the 168-hour performance test smoothly. The results indicate that the MVR device can operate automatically and stably, with all technical indicators meeting or exceeding the design specifications. It handles a treatment load of approximately 1 m³/h, resulting in discharged water with the total dissolved solid (TDS) and chemical oxygen demand (COD) at about 17.4 mg/L and 60 mg/L

基金项目: 天津市技术创新引导专项(基金)(18YDYGHZ00100)

通信作者: 邢玉雷 E-mail: jobs2006@163.com

respectively, compared to the raw wastewater values of about 100 000 mg/L and 9 200 mg/L, respectively. These results are better than the discharge requirements. The power consumption of wastewater treatment is about $68 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$. Meanwhile, the temperature rise of compressor compressing vapor is about 22.3°C with a pressure ratio of 2.26, and average compressing efficiency of about 71.2%. These specifications qualify the compressor for operation under the condition of 16°C boiling point elevation in mother liquor. Through the innovation and application of twin-screw vapor compressor with high pressure ratio, the vapor compressing temperature rise of MVR device is improved obviously, that enhances its practicability and reliability in wastewater evaporation crystallization with high boiling point elevation. This study can serve as a guide for integrating technology, developing processes, and designing and manufacturing of MVR evaporation crystallization devices coupled with twin-screw vapor compressors.

Key words: wastewater treatment; evaporation crystallization; mechanical vapor recompression; twin-screw mechanical vapor compressor

随着节能减排及环保政策的贯彻实施,机械蒸汽再压缩蒸馏技术在工业废水浓缩减量、蒸发结晶近零排放等领域的应用越来越广泛^[1-3]。与传统多效蒸发过程相比,MVR技术无需消耗大量生蒸汽和冷却水,减少了环境热量排放,近年来发展和应用迅速^[4-7]。目前,MVR技术多采用罗茨和离心压缩机,两者单级压比均不高,在物料沸点升较高工况下无法应用罗茨压缩机,而离心压缩机则需要多级串联^[8]。螺杆压缩机属于带有内压缩的容积式压缩机,单级压比大,压缩温升可达到 60°C ,具有强制输汽的特点,容积流量几乎不受排汽压力的影响,效率较高^[9-10],因此,其应对沸点升较高的蒸发结晶工况的能力和优势比较突出,但目前基于螺杆蒸汽压缩的MVR技术研究和应用相对较少。

研制了一台双螺杆机械蒸汽压缩蒸发结晶装置,用于高盐、高COD废水的蒸发结晶处理,设计温升为 $20\sim 25^\circ\text{C}$,压比为2.1~2.5,处理负荷为 $24 \text{ m}^3/\text{d}$ 。应用测试结果表明,装置性能指标达到或优于设计值,对高盐、高COD废水的近零排放处理具有借鉴意义。

1 工艺设计

1.1 设计目标

为适应高沸点升工况下的稳定蒸发结晶,并尽可能提高物料浓缩、减少母液外排,设计研制出基于双螺杆机械蒸汽压缩的MVR蒸发结晶装置,用于高盐、高COD工业废水的处理。

技术要求:处理负荷为 $24 \text{ m}^3/\text{d}$,进水总溶解性固体(TDS) $\leq 200\,000 \text{ mg/L}$ 、COD $\leq 50\,000 \text{ mg/L}$,蒸汽

压缩温升为 $20\sim 25^\circ\text{C}$,出水水质满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)标准要求。

1.2 工艺流程

根据设计目标和应用需求,综合考虑设备投资、运行成本、稳定性及经济性,本装置采用大压比双螺杆机械蒸汽压缩和强制循环蒸发结晶集成工艺,主要由双螺杆压缩机、蒸发结晶器、加热器、预热器、稠厚器、离心机及辅助系统构成,其工艺流程设计如图1所示。

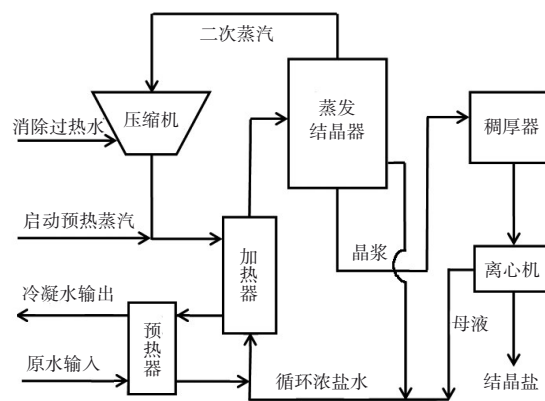


图1 MVR蒸发结晶装置物料平衡流程

Fig.1 Material balance process of MVR evaporation crystallization device

① 物料流程:原液首先进行絮凝、沉淀、过滤,然后经料液泵依次进入凝结水预热器和加热器预热,之后进入强制循环蒸发器蒸发结晶,当晶浆达到预设密度后,经出料泵输送至稠厚器养晶沉降,最后进入离心机分离得到结晶盐,离心后的母

液再返回蒸发结晶器。

② 蒸汽流程:蒸发结晶器产生的二次蒸汽经压缩机压缩后,压力和温度升高,热焓增加,再次作为加热蒸汽进入加热器与物料换热,自身被冷凝成淡水,物料受热在蒸发结晶器沸腾闪蒸产生二次蒸汽,二次蒸汽再进入压缩机内,重复上述过程。

③ 冷凝水流程:加热器壳程蒸汽放热并凝结为冷凝水,冷凝水进入冷凝水罐,然后由冷凝水泵输送至预热器,对补充料液进行预热,温度降低后输出。

④ 不凝气流程:蒸发结晶器内的不凝气随二次蒸汽一并由压缩机抽吸、压缩、输送至强制循环加热器壳程,蒸汽凝结,不凝气在压差作用下自流排空。

1.3 工艺特点

设计的MVR集成工艺具有如下特点:

① 适应性强,可应对高黏度、易起泡、易结垢、热敏性差、有结晶析出的物料处理;

② 加热与蒸发分离,高倍率浓缩,可直接浓缩结晶出盐,不易结垢和堵管,运行稳定;

③ 压比大,温升高,适于沸点升较高的料液处理,耐受15~20℃的沸点升高。

1.4 工艺参数

MVR蒸发结晶装置具体工艺参数设计如表1所示。

表1 MVR蒸发结晶装置工艺参数

Tab.1 Process parameters of MVR evaporation crystallization device

工艺参数	设计范围	正常值
废水处理负荷/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	12~26.4	24
进水含盐量/%	5~20	10
结晶出盐/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	50~220	100
蒸发压力/kPa	47.4~57.9	55.6
蒸发温度/℃	80~85	84
二次蒸汽压缩温升/℃	20~25	22
蒸发量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	500~1 000	900
加热蒸汽压力/kPa	100~143.4	125
加热蒸汽温度/℃	100~110	106

装置额定处理负荷为24 m^3/d ,蒸发负荷为900 kg/h ,调节范围为50%~110%,结晶盐负荷为100 kg/h ,压缩机额定转速为3 500 r/min ;综合考虑沸点温升积累、流阻及静压导致的温差损失和传热面积设置,双螺杆蒸汽压缩机设计温升为20~25℃。为

便于控制和保持运行稳定,同时减小压缩机尺寸,蒸发温度设计为80~85℃,压缩机排汽温度设计为100~110℃,保持压缩机出口和加热器壳程微正压,以便不凝气和凝结水可自流排出。

MVR蒸发结晶过程工艺参数计算主要根据热量平衡和质量平衡方程^[11],高盐水沸点升可采用ASPEN模拟计算或实验测试获得,COD积累导致的沸点升高需通过实验测定,压缩机选型设计可参考文献^[12-13]。

2 关键设备设计

2.1 蒸发结晶器

蒸发结晶器是MVR装置的关键设备,具有闪蒸、结晶、分离、储液的重要作用,其结构对蒸发结晶效率、产水品质、运行稳定性均有重要影响。蒸发结晶器工艺结构设计可参考闪蒸罐与汽液分离器的设计。

蒸发结晶器采用强制循环闪蒸结构,上部顶端设置丝网和折流挡板双重除雾器,以保障汽液分离效率和二次蒸汽品质;下部锥筒侧壁上对称位置分别设置物料强制循环进口和出口,进口朝上,设置扩压口减速,且位置略高于出口,以便充分闪蒸结晶;底部设置盐腿,以便结晶盐沉积和排出。蒸发结晶器过流部件采用钛材,以耐氯离子腐蚀。蒸发结晶器技术参数如表2所示。

表2 MVR蒸发结晶器技术参数

Tab.2 Technical parameters of MVR evaporation crystallizer

项目	数值
主筒体内径/mm	800
主筒体高度/mm	2 500
汽相高度/mm	1 200
液相高度/mm	1 300
盐腿直径/mm	200
盐腿高度/mm	500
二次蒸汽流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.5~2.0
料液停留时间/s	5~8

2.2 加热器

加热器是MVR蒸发结晶装置料液换热的关键设备,其结构与性能对系统热效率、运行稳定性、清洗周期具有重要影响。加热器设计的关键在于传热系数的选取、料液流速的设计、管束及折流板的结构设置、安装布置方式等。

本装置采用双加热器设计,循环泵进料管路和出料管路各设置一台加热器,以提高料液流速和降低设备高度。加热器采用管壳式结构设计,竖直安装,主要由传热管、管板、壳体、封头、导流筒、支撑板、折流板等构成。传热管采用正三角形布置,1.32 倍管间距,有效传热面积为 30 m²。加热器技术参数如表 3 所示。

表 3 MVR 加热器技术参数

Tab.3 Technical parameters of MVR heater

项目	数值
壳体内径/mm	550
加热器长度/mm	4 800
传热管长度/mm	4 000
传热管外径/mm	32
传热管数量/根	75
传热管间距/mm	42
物料流速/(m·s ⁻¹)	1.0 ~ 2.0
加热蒸汽流速/(m·s ⁻¹)	15 ~ 20

2.3 蒸汽压缩机

双螺杆蒸汽压缩机额定工况下技术参数设计如表 4 所示。

表 4 双螺杆蒸汽压缩机技术参数

Tab.4 Technical parameters of twin-screw vapor compressor

项目		数值
入口	压力/kPa	55.6
	温度/°C	84
	质量流量/(kg·h ⁻¹)	900
	容积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	2 641
	喷液量/(kg·h ⁻¹)	80
出口	压力/kPa	125
	温度/°C	106
	质量流量/(kg·h ⁻¹)	980
压缩机转速/(r·min ⁻¹)		3 000
轴功率/kW		53
电机功率/kW		75

压缩机是 MVR 蒸发结晶系统的核心设备,其性能决定了装置运行的可靠性和经济性。为提升 MVR 蒸汽压缩温升和效率,适应沸点升较高的蒸发结晶工况,本装置研发了大压比双螺杆蒸汽压缩机,其主要由阴阳转子、壳体、轴承、轴封、同步齿轮等部件构成。一对平行、互相啮合的阴、阳转子作为核心部件,其型线设计是螺杆压缩机最为关键的技术^[12],它决定了压缩机性能。转子型线即转子的

齿面与转子轴线垂直面的截交线,其设计需符合啮合原理及以下原则:减少泄漏三角形面积、减少泄漏量、提高面积利用系数、合适的转子长径比、易于加工等^[12-13]。

为提高齿间面积、减少转子直径以及降低加工成本,本压缩机采用 4/4 齿对称型线设计,型线的齿顶高与齿槽深尺寸一致,尽可能提高齿间面积。该型线设计面积利用系数达到 0.85。压缩机蒸汽压缩温升设计范围为 20~25 °C,压比为 2.1~2.5,转速调节范围为 1 500~3 500 r/min。

3 工程应用与性能分析

3.1 工程应用

大压比 MVR 蒸发结晶成套装置如图 2 所示,双螺杆蒸汽压缩机如图 3 所示。



图 2 MVR 蒸发结晶装置

Fig.2 MVR evaporation crystallization device



图 3 螺杆蒸汽压缩机

Fig.3 Screw vapor compressor

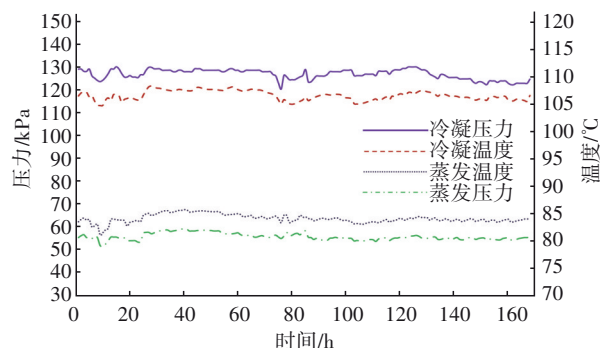
装置研制完成后,应用于高盐、高 COD 化工废水处理实际工程,进行性能测试和技术验证。

工程应用调试:首先进行设备功能检验,包括水压试验、动力设备检测、仪表检测、自控系统测试等,设备功能检验合格后,进行系统调试运行,供水、供电、加药(阻垢剂、消泡剂),启动废水循环,开

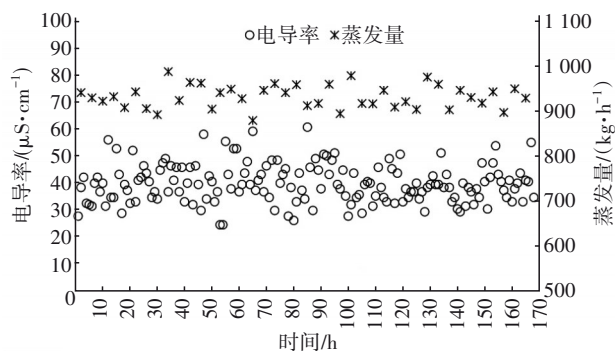
启锅炉预热,达到指定温度后变频启动蒸汽压缩机,逐步将循环、加热、蒸发、压缩、结晶、出料等全部流程投运,并调整运行数据至设计值左右,然后使MVR系统自行稳定在最佳工况并维持动态平衡;最后进行满负荷168 h自动连续运行,测试MVR装置综合性能。

3.2 性能分析

MVR装置168 h运行工况:蒸发压力和温度分别为55.6 kPa、84℃;压缩机转速为3 000 r/min,出口压力和温度分别为125 kPa、106℃;料液循环流量为350 m³/h;进水TDS约100 000 mg/L, COD约10 000 mg/L。测试结果如图4所示。



a. 蒸发和冷凝压力与温度随运行时间的变化



b. 蒸发量和电导率随运行时间的变化

图4 MVR装置168 h性能测试结果

Fig.4 Results of 168-hour performance test of MVR device

由图4可知,168 h测试中,蒸发结晶器蒸发压力均在51~58 kPa之间小范围波动,温度在82~85℃之间波动。加热器冷凝压力(即压缩机蒸汽出口压力)采用电动调节阀自动控制,波动范围为118~133 kPa,温度波动范围为104~108℃。在稳定运行工况下,废水蒸发和蒸汽压缩及加热过程维持动态平衡,废水蒸发浓缩接近3倍时结晶出盐,COD在母液中逐渐富集,当蒸发结晶器汽液相温差达到16℃时,母液自动外排。168 h测试运行工况参数总体稳

定,受凝结水排放、压缩蒸汽消除过热水喷淋以及料液预热补充蒸汽影响,加热器冷凝压力波动相对较大,但MVR装置能够适应操作条件变化,保持稳定运行。

MVR装置蒸发结晶效果见图5,进、出水水质分析见表5。



图5 MVR装置蒸发结晶盐

Fig.5 Evaporative crystallization salt of MVR plant

表5 废水原水和蒸发冷凝水水质

Tab.5 Water quality of raw wastewater and evaporative condensate

检测项目	原水	蒸发冷凝水
pH	4.52	6.53
氯化物/(g·L ⁻¹)	33.11	2.23
硫酸盐/(g·L ⁻¹)	28.85	5.18
TDS/(mg·L ⁻¹)	95 110	17.4
悬浮物/(mg·L ⁻¹)	13.8	0.12
浊度/NTU	33.5	0.54
钠/(g·L ⁻¹)	34.0	
钾/(mg·L ⁻¹)	18.5	
色度(A ₀)/度	5<A ₀ <10	<5
铁/(mg·L ⁻¹)	15.0	0.013 1
COD/(mg·L ⁻¹)	9 180.3	59.2
碳酸氢盐/(mg·L ⁻¹)	<0.7	
活性硅酸盐/(mg·L ⁻¹)	8.98	
铜/(mg·L ⁻¹)	19.7	
钡/(mg·L ⁻¹)	0.078	
总碱度/(mmol·L ⁻¹)		0.17
总硬度(以碳酸钙计)/(mg·L ⁻¹)		<1.0
SiO ₂ /(mg·L ⁻¹)		0.22
游离氯/(mg·L ⁻¹)		<0.03
锰/(μg·L ⁻¹)		5.72

双螺杆压缩机是MVR系统的核心设备,其性能决定了MVR装置废水处理负荷以及运行的可靠性

与稳定性。经168 h运行统计测算,压缩机平均过汽量约 $46.3 \text{ m}^3/\text{min}$,压比为2.26,温升为 22.3°C ,能够有效应对 16°C 沸点升高工况,保障MVR稳定运行。MVR装置废水平均处理负荷约 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,蒸发凝水量为 $860 \sim 980 \text{ kg/h}$,平均约 926.3 kg/h ,凝结水电导率维持在 $25 \sim 60 \mu\text{S}/\text{cm}$,平均约 $35 \mu\text{S}/\text{cm}$;原水呈红褐色,TDS和COD含量分别为 $95 \sim 110 \text{ mg/L}$ 和 $9 \sim 180.3 \text{ mg/L}$,蒸发冷凝水清澈透明,TDS和COD含量分别为 17.4 和 59.2 mg/L ,出水水质优于排放标准。

随着蒸发浓缩的持续进行,废水中的无机盐逐渐达到过饱和而结晶,结晶盐浆靠重力沉降于蒸发结晶器底部盐腿处,定期由出料泵抽出并输送至稠厚器进行搅拌、养晶、冷却,晶粒长大到一定程度后再排放至离心机脱水,固体盐外排,母液返回蒸发结晶器,MVR排盐量约 110 kg/h 。

3.3 经济性分析

在MVR蒸发结晶过程中,蒸汽压缩机能耗占系统能耗的比重最大,对系统经济性具有决定性影响。本装置压缩机入口设置喷液口,通过注入蒸汽凝结水来控制压缩机出口的二次蒸汽接近饱和态,降低压缩机排汽温度,以提高压缩机运行效率。喷液量可根据压缩机指示功率,结合蒸汽的进出口焓差来计算,压缩机的轴功率可根据蒸汽的绝热压缩功,并考虑一定的指示效率与机械效率来计算^[14]。根据168 h运行数据测算,本设计开发的4/4齿对称型线双螺杆压缩机平均运行效率约71.2%,电机功率为 75 kW ,运行轴功率为 53 kW ,折合蒸汽单位温升运行功率为 $2.57 \text{ kW}/(\text{t}\cdot^\circ\text{C})$ 。基于罗茨压缩机的MVR实际工程,其压缩过汽量为 1220 kg/h ,压缩温升为 18°C ,电机功率为 110 kW ,运行功率为 82 kW ,折合蒸汽单位温升运行功率为 $3.73 \text{ kW}/(\text{t}\cdot^\circ\text{C})$,与之对比,双螺杆蒸汽压缩机运行能耗降低约31.1%。本设计蒸汽压缩之外的系统能耗与常规MVR基本相同,节能优势主要体现在双螺杆蒸汽压缩机较高的运行效率上。经168 h系统总电耗统计分析,双螺杆压缩机MVR装置废水蒸发结晶处理能耗约 $68 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。

综上所述,基于双螺杆蒸汽压缩机的MVR蒸发结晶装置能够适应运行工况参数波动并保持稳定运行,技术指标均达到或优于设计值,出水水质好,节能效果明显,用于高盐、高COD废水处理优势

明显。

4 结论

针对目前工业废水处理中MVR蒸发结晶装置存在蒸汽压缩温升不高、母液排放量大的问题,研制了一种基于双螺杆蒸汽压缩的MVR蒸发结晶装置,并进行了工程应用和性能分析,得出如下结论:

① 顺利通过168 h性能测试,各项指标均达到或优于设计值,表明MVR蒸发结晶装置整体工艺系统及双螺杆压缩机等关键设备设计和制造的可靠性。

② MVR装置运行稳定,平均废水处理负荷约 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,蒸发量为 926.3 kg/h ,出水TDS为 17.4 mg/L ,COD为 59.2 mg/L ,出水水质优于设计标准,处理能耗约 $68 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。

③ 设计的双螺杆压缩机4/4齿对称型线,较好地平衡了面积利用系数和压缩效率,蒸汽压缩平均压比约2.26,温升为 22.3°C ,压缩机效率约71.2%,在沸点升较高的蒸发结晶工况中应用优势明显。

参考文献:

- [1] 许江虹,王浩雅,孙旭海,等.造纸法再造烟叶生产废水零排放关键技术应用研究[J].中国给水排水,2020,36(18):113-117.
XU Jianghong, WANG Haoya, SUN Xuhai, et al. Research on the application of key technology for zero discharge of papermaking reconstituted tobacco production wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 113-117 (in Chinese).
- [2] 韦锋涛,贾铭椿,王晓伟,等.高含盐废水浓缩处理技术研究进展[J].现代化工,2019,39(9):21-25.
WEI Fengtao, JIA Mingchun, WANG Xiaowei, et al. Research progress in concentration treatment technologies for high salinity wastewater [J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(9): 21-25 (in Chinese).
- [3] 郭海燕,徐成燕,俞彬.石化行业高含盐废水的分盐零排放中试及应用[J].中国给水排水,2018,34(7):99-102.
GUO Haiyan, XU Chengyan, YU Bin. Treatment of high salinity wastewater to achieve zero liquid discharge in petrochemical industry [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(7): 99-102 (in Chinese).
- [4] 唐刚,龙国庆.卧式MVC蒸发/结晶处理电厂高含盐

- 废水并回用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(8): 94-96.
- TANG Gang, LONG Guoqing. Treatment and reuse of high salinity wastewater from power plant by horizontal MVC evaporation/crystallization process [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(8): 94-96 (in Chinese).
- [5] 李帅旗, 王汉治, 冯自平, 等. 耦合过热蒸汽干燥的MVR蒸发结晶系统热力性能分析[J]. 化学进展, 2020, 39(2): 439-445.
- LI Shuaiqi, WANG Hanzhi, FENG Ziping, *et al.* Performance analysis of a MVR evaporative crystallization system coupled with super-heated steam drying technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(2): 439-445 (in Chinese).
- [6] CHEN Q, BURHAN M, SHAHZAD M W, *et al.* A zero liquid discharge system integrating multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment [J]. Desalination, 2021, 502: 114928.
- [7] 姜华, 张子尧, 宫武旗. MVR并联双效蒸发结晶系统设计及研究[J]. 化工进展, 2019, 38(10): 4461-4469.
- JIANG Hua, ZHANG Ziyao, GONG Wuqi. Design and research of MVR parallel double-effect evaporation crystallization system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(10): 4461-4469 (in Chinese).
- [8] 李帅旗, 何世辉, 宋文吉, 等. 基于蒸汽压缩技术的热泵蒸汽系统热力性能分析[J]. 化工进展, 2020, 39(9): 3583-3589.
- LI Shuaiqi, HE Shihui, SONG Wenji, *et al.* Performance analysis of heat pump steam system based on vapor compression technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9): 3583-3589 (in Chinese).
- [9] WU H G, LIN K L, HUANG H, *et al.* Research on effects of vapor injection on twin-screw compressor performance [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 118: 483-490.
- [10] SHEN J B, XING Z W, ZHANG K, *et al.* Development of a water-injected twin screw compressor for mechanical vapor compression desalination systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 125-135.
- [11] 李宜豪, 沈胜强, 龚路远. MVC蒸发装置自平衡运行条件下的热力参数计算模型[J]. 热科学与技术, 2020, 19(2): 110-119.
- LI Yihao, SHEN Shengqiang, GONG Luyuan. Calculation model of thermodynamic parameters of MVC evaporation system at self-balance cycle operation state [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2020, 19(2): 110-119 (in Chinese).
- [12] 蔡宏, 杨威. 螺杆压缩机接触线形状及长度的计算方法[J]. 压缩机技术, 2019(4): 28-30.
- CAI Hong, YANG Wei. Calculation method for contact line shape and length of screw compressor [J]. Compressor Technology, 2019(4): 28-30 (in Chinese).
- [13] 卢家伦, 田雅芬, 邢子文. 基于离散数据的双螺杆压缩机共轭转子型线计算[J]. 压缩机技术, 2019(3): 1-5.
- LU Jialun, TIAN Yafen, XING Ziwen. Calculation of conjugated rotor profiles generation for twin-screw compressors based on discrete data [J]. Compressor Technology, 2019(3): 1-5 (in Chinese).
- [14] YANG J L, ZHANG C, ZHANG Z T, *et al.* Study on mechanical vapor recompression system with wet compression single screw compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 205-211.
-
- 作者简介:** 邢玉雷(1982-), 男, 河南濮阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为海水淡化及废水零排放。
- E-mail:** jobs2006@163.com
- 收稿日期:** 2021-04-21
- 修回日期:** 2021-05-31

(编辑: 丁彩娟)