

高含盐废水减量化及零排放方案初探

伦宇龙^{1,2*}, 周新河^{1,2}, 李 茸^{1,2}, 涂永成¹, 王 川^{1,2}, 郝楠楠^{1,2}

(1. 中国煤炭地质总局水文地质局, 河北 邯郸 056000;

2. 中煤地华盛水文地质勘察有限公司, 河北 邯郸 056000)

摘要:应某企业中水回用和污水减量化、资源化处理的需求,通过试运行来验证技术路线的合理性和稳定性。通过对零排放项目常采用的预处理技术、微滤技术、膜分离技术、电渗析技术、MVR、分盐等技术逐一分析其作用原理及实际应用,对实际应用中可能存在的问题进行讨论,并提出具体的改进方案。

关键词:高含盐;减量化;回用;分盐;零排放

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)05-0217-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.05.044

A preliminary scheme for reduction and zero-emission of high-salinity wastewater

LUN Yu-long^{1,2*}, ZHOU Xin-he^{1,2}, LI Rong^{1,2}, TU Yong-cheng¹,

WANG Chuan^{1,2}, HAO Nan-nan^{1,2}

(1. Hydro-geological Bureau of China National Administration of Coal Geology, Handan 056000, China;

2. Hua-sheng Hydro-geological Exploration Co., Ltd., China National Administration of Coal Geology, Handan 056000, China)

Abstract: According to a certain company's requirements in water reuse, sewage reduction and reutilization, the rationality and reliability of the technical system is verified through trial operation. The principle and practical application of pretreatment technology, microfiltration technology, membrane separation technology, electro dialysis technology, MVR and salt separation technology, which are often employed for zero-emission projects, are analyzed one by one. The problems that may exist in practical applications are discussed, and corresponding improvement schemes are thus proposed.

Key words: high salt concentration; sewage reduction; water reuse; salt-separation; zero-emission

由于水资源在中国地理上南北分配不均,造成我国长期面临着水资源的地理性短缺。随着我国工业化的发展,企业用水大户数量的不断增多,国家加大了对企业取水权的管理,也相应提高取水价格。与此同时,近年来水污染事件频发。2005年国家出台的《中国节水技术政策大纲》指出,节约用水的核心是提高用水利用率和效益,减少废水排放量^[1]。近年来水十条等法条也进一步提高了企业地表排污标准。中水回用从技术上已成熟,相对于高额的工业用水价格和严格的污染物排放标准,中水回用更加经济,所以污水减量化后回用已经成为工业水系统发展的大趋势。

国家大力支持并在政策上做了明确指导, HJ 274—2015《综合类生态工业园区标准》根据当地实际情况,中水回用率不低于10%~30%。但是,污水减量化的同时必然是污染物的浓度在浓水侧中急剧升高,标志性指标是污水的TDS浓度对数性升高,

高浓度的污水处理难度更大。在现有标准下,不仅对水中COD、TN、TP、TDS常规污染的指数进行控制,也对企业总污染物的排放有了限制要求。2015年国家出台《水污染防治行动计划》,指出“工业废水要实现零排放”。由此,引导了工业高盐废水回收利用,污染物减量实现近零排放,液体污染物零排放已成环保行业的大趋势^[2]。

造纸行业、煤化工行业、电力行业、石化行业、光电产业等在生产过程中会不断产生大量的含盐废水,在处理难度增大的前提下,重金属污染也相伴而来。不仅浪费大量的水资源而且对当地的生态环境造成不可逆的损伤,零排放的结果则产生大量的危险固体废物^[3],如果能通过技术手段,将零排放产生的杂盐通过分盐技术的纯化,变为高品质的工业盐产品,可实现变废为宝的绿色产业循环。低品质的工业盐也可以作为除雪剂等进行其他方面的应用。

收稿日期:2020-05-13;修回日期:2021-03-04

作者简介:伦宇龙(1988-),男,硕士,工程师,研究方向为工业污水处理、中水回用、零排放、矿山环境及土壤修复等,通讯联系人, lunyu.520@163.com。

该企业是传统石化企业,企业提出了节能减排的零排放工程。该项目也是响应目前废水处理零排放及分盐的市场驱动需求,积累该领域的研究经验便于提高行业内废水零排放领域的技术水平,同时为同类项目工程化提供数据支撑。

1 项目概况

该项目是改造项目,原处理技术为预处理单元和氨氮处理生化处理,污水预处理单元主要进行悬浮物脱除处理,包括中和、三级沉降等工序;污水氨氮处理单元主要去除氨氮,包括处理氨氮质量分数 $\geq 2000 \times 10^{-6}$ 的高氨氮污水减压汽提处理装置和处理混合后氨氮质量分数 300×10^{-6} 左右的综合污水生化处理装置。此外,因为水中有机物含量比较低,需要外加碳源(葡萄糖粉剂),水中的含盐量不做处理,送往市政污水处理厂进一步稀释和深度处理。

考虑综合因素,改造后污水深度处理规模 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。需对该项目的生产废水实行废水零排放要求,且要求最终的结晶盐做最大化的资源化处置。氯化钠纯度至少达到《工业盐》(GB/T 5462—2015)中日晒工业盐 I 级、硫酸钠纯度至少达到《工业无水硫酸钠》(GB/T 6009—2014)中 III 类一等品。一方面,本着变废为宝的绿色生产的理念;另一方面,杂盐一般定义为危险废物,现行处理约为 $3\ 500 \text{ 元}/\text{t}$ (因各地政策和市场行情有所差异),资源化后降低企业危废处理成本。

2 工艺优选

2.1 污水水质分析

(1)含盐量高、硬度高,硫酸根高,无机结垢风险大;废水中的硫酸盐含量及钙、镁离子浓度较高,经过后段工艺的浓缩,浓水中硫酸钙离子可能引起后续管路系统或设备结垢^[4-5]。

(2)硅含量大(主要为胶体氧化硅),废水中硅铝胶体为产品生产过程中的产物,污水水质波动大。硅铝胶体在较高 pH 环境中会转化成溶解硅,在低 pH 环境中又以胶体硅形式出现,极易造成后续膜系统的污堵。

(3)氯离子高,腐蚀性强;特别是氯离子含量高,极易造成设备及管路的腐蚀,因此在设计当中需选择适当的材质。

(4)氨氮高,在较高 pH 条件下会溢出污染空气。

通过对厂区的生产废水进行检测分析,该废水主要特点及注意事项如下。

(1)该生产废水主要是生产过程涉及到高岭土、氧化铝、分子筛等固体,同时也使用硫酸铵、氯化铵等溶液。因此,厂区排出的废水中除含有可溶性离子外,还含有一定量的悬浮物,主要成分是硅铝胶体、分子筛、细粉等。

(2)为满足实现厂区的废水减量及零排放需求,目前工艺比较成熟的是采用膜浓缩工艺,但必须做好膜浓缩前的预处理,否则将会对后续膜元件的正常运行及达标排放产生一定影响,同时后续蒸发结晶器的稳定运行也会受到影响。

2.2 预处理+过滤

膜分离法是采用纳滤或反渗透对高盐有机废水进行浓缩脱盐。但当给水污染物含量较高时,需要预处理,因为废水中的悬浮体及有机物等杂质易堵塞、污染膜,减少运行时间,增加清洗次数,从而降低膜使用寿命。此外,产生的浓液如需再次浓缩则问题更加严重。所以,预处理是膜浓缩的关键。

根据水质检测结果并考虑项目实际情况,改造项目占地面积有限,传统的过滤系统占地面积较大,新的微滤代替了传统除硬工艺混凝+沉淀+多介质过滤器+超滤膜的组合工艺,跟多家微滤厂家沟通后确定了 2 套处理的项目方案。

2.2.1 管式膜(某品牌)

此装置主要由预处理装置、管式膜系统组成。设备装有 8 只 1 芯装的膜组件,每只膜面积 0.14 m^2 ,合计 1.12 m^2 ,按照常规的 $500 \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 的通量核算,运行条件见表 1,预计 TMF 产能为 $560 \text{ L}/\text{h}$ 。

表 1 管式微滤运行条件

| 工艺 | 选项 1 |
|-------|-------------------------|
| 加药类型 | 液碱 & 碳酸钠 & 氯化镁 |
| 第一反应槽 | 液碱及纯碱及氯化镁, pH 10.5~11.0 |
| 第二反应槽 | 液碱, pH 11.0~11.5 |

该设备为循环过滤(见图 1、图 2),浓水会跟预处理后的水混合后反复过滤,在混合池内有浊度计,浊度计和底部的排放阀连锁,达到某一污泥浓度外排。该设备的优点:占地面积小,结构简单,气洗、水洗相结合能够维持较长时间的膜通量,过滤精度比较高,出水浊度低于 1 NTU ,水质透明,可以直接进入后段的海水反渗透。

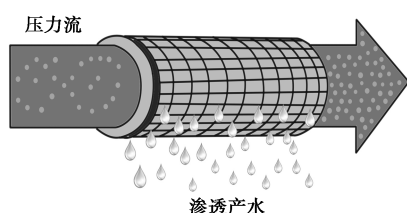


图1 管式微滤的原理图一

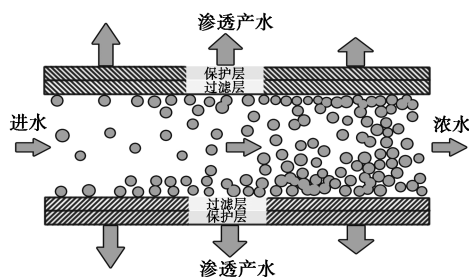


图2 管式微滤的原理图二

试运行一段时间后,发现了如下缺点:①据除硬的反应原理,在高 pH 条件下过滤效果最佳,但由于污水中的氨氮比较高,循环的错流过滤会使得设备周围的氨气浓度较高,污染空气,影响试验人员的正常操作。②管式微滤设计是大错流的死端型过滤。浓水和管式微滤进水反复混合,形成高浓度的废水,增加了过滤膜的负荷,循环过滤过程中悬浮物不易沉降,排污的污水含水率比较高,体积比较大,增加后续处理的工作量。

2.2.2 袋式微滤(某品牌)

该装置主要由预处理反应槽、袋式膜过滤系统组成。该设备是集装箱模块化设备,也称膜表面反应器(membrane surface reactor, MCR),设备装有 17 只芯膜组件,预计产能为 1 500 L/h。

袋式微滤在不加除硅药剂的情况下,在碱性环境下,污水中含有的镁离子对硅去除率 $>20\%$,袋式微滤进水 pH 保持在 11 以上时,出水硬度可控制在 100 mg/L 以下,此时碳酸钠的加药量为 $250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$,为软化除硅的最优加药组合,运行条件详见表 2。

表 2 袋式微滤运行条件

| 工艺 | 选项 1 |
|-------|---------------------------|
| 加药类型 | 液碱 & 碳酸钠 & 氯化镁 |
| 第一反应槽 | 液碱及纯碱及氯化镁, pH 10.5 ~ 11.0 |
| 第二反应槽 | 液碱, pH 11.0 ~ 11.5 |

预处理是关键,硬度应采用二级除硬,第一级采

用袋式微滤除硬(见图 3),做到产水硬度 $<150 \times 10^{-6}$,避免酸碱量的过量投加;第二级采用弱酸阳床装置除硬,减少蒸发结晶杂盐量。若采用传统的高密除硬方式,容易造成结垢,出水硬度不稳定,造成后续离子交换再生频繁,设备维修及系统不稳定性风险加大。采用镁剂除硅技术,结合袋式微滤膜反应器,可做到产水 $\text{SiO}_2 < 20 \times 10^{-6}$,避免浓缩单元和蒸发器的结垢。

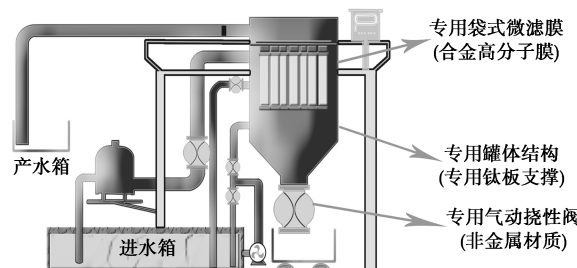


图3 袋式微滤的原理图

2.3 膜分离+膜浓缩

膜技术就是通过选择透过性膜对废水中的污染物选择性通过,而将污水中的污染物分离出来,使水质得到净化达到中水回用标准后回用,从而实现减量化,减少浓水侧的含水率,主要影响因素有温度、膜型号、污染物浓度、污染物性质、pH、压力等。根据选择能力的不同,大致可以分为反渗透和纳滤、超滤、微滤等^[6]。

2.3.1 海水反渗透

微滤产水在产水箱调节 pH 后,通过提升泵进入反渗透装置,需要考虑装置的进水压力、浓水排放量、浓水回流量等参数,控制系统回收率,验证设计膜通量、运行周期和清洗周期等方式^[7-8]。

2.3.2 纳滤

纳滤,介于反渗透和超滤之间的一种特定的膜。以压力差为推动力,截留水中粒径为纳米级颗粒物的膜分离技术。它截留有机物的分子质量为 200 ~ 400,截留溶解性盐的能力为 20% ~ 98%,对可溶性单价阴离子盐的脱除低于高价阴离子盐,如对氯化钠及氯化钙的脱除率为 20% ~ 80%,而对硫酸镁及硫酸钠的脱除率为 90% ~ 98%^[9-10]。

2.3.3 DTRO 碟管式反渗透

DTRO 膜是专门用来处理高浓度废水的反渗透膜组件,核心部件是碟管式膜片柱(见图 4)。把反渗透膜片和水力导流盘叠放在一起,用中心拉杆和端板进行固定,然后置入耐压套管中形成一个膜柱。DTRO 膜组件与传统的卷式膜构造截然不同,主要

在进水开放式流道,这样的设计有效地减缓膜堵塞和浓差极化现象,显著延长膜的使用寿命,也容易清洗膜上的积垢,保障 DTRO 膜在各种恶劣水质条件下平稳运行^[11],在 DTRO 膜处理前,通过盐酸调节废水 pH 至中性,系统回收率在 50% 以上,离子截留不低于 97%,废水平均 TDS 可浓缩至 180 000 mg/L。

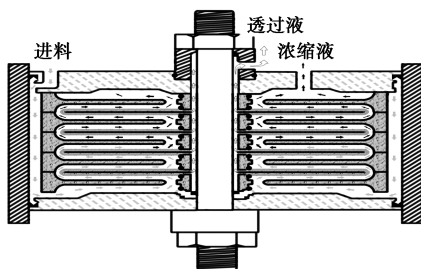


图 4 DTRO 原理结构图

2.4 电渗析

电渗析(ED)是一种使溶液中的阴、阳离子在直流电场力的作用下,通过离子交换膜的选择透过性,分离出溶液中带电离子的物理化学过程(见图 5)。电化学法适用于处理 COD 低的废水,虽然在高盐的条件下有利于降低能耗,但金属极板易损耗,更换频繁。

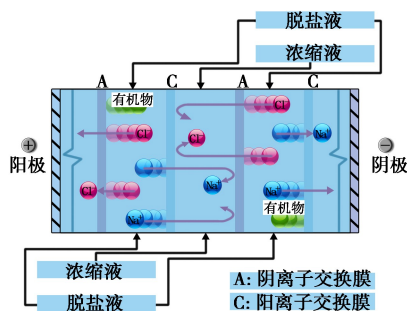


图 5 电渗析原理图

采用电渗析将纳滤淡水浓缩,可将含盐量从 30 000 mg/L 提升至 180 000 mg/L;当淡水侧含盐量降至 10 000 mg/L 以下时,浓度差变大,更换淡水;摸索电渗析实际运行中浓缩极限及浓缩时间。此时,淡水含盐量较高还需增加反渗透装置进一步净化和减量化达到中水回用标准后回用。电渗析应当注意电渗析运行过程中会产生部分氯气,腐蚀设备。应注意通风和人员防护^[12]。

2.5 蒸发结晶

MVR 是机械再压缩 (mechanical vapor recompression) 的简称。该设备仅仅在启动时短时间内需

少量蒸汽,当正常运转时,无需持续通入蒸汽,在没有外部热源的情况下,通过自身的风机压缩循环蒸汽再利用。在压缩运转的时候,电能通过风机转化为机械能,再转化为蒸汽的内能,温度在小范围内增加,并在设备内循环(见图 6)。重复利用自身产生二次蒸汽,低温蒸汽经压缩机压缩、温度升高,热焓增加,升温后成为新的热源蒸汽进入蒸发器的加热室对液体物料进行换热,维持料液沸腾,部分蒸汽凝结成水,由底部的蒸馏水收集槽配置的水泵送入尾端的板式换热器换热后降温外排。使得沸腾的物料受热气化,反复换热后重新液化成蒸馏水外排,水蒸汽潜热在内部循环,减少了热量的散失,提高了热效率^[13-15]。

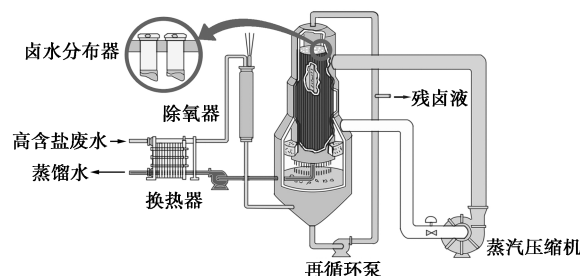


图 6 MVR 原理结构图

MVR 与传统的多效蒸发器优势:①无需外部持续通入蒸汽,主要能耗是电,蒸汽消耗量少;②蒸汽通过压缩机升温成为二次蒸汽做功,反复循环,提高热能利用效率,技术特点工艺较成熟,工程应用较多;③设备结构简单,检修方便;④占地面积较小。

2.6 分盐技术

目前蒸发分盐主要为热法分盐与冷冻分盐,为验证 2 种工艺的分盐效果,现场对于 2 种方案均进行试运行。

(1)冷冻法分盐:利用 NaCl 和 Na_2SO_4 在不同温度下溶解度的不同,采用“冷冻析十水硝-热法析纯盐-热法析杂盐”工艺,使大部分的 Na_2SO_4 先结晶析出,得到初级芒硝(十水硫酸钠),需干燥得到纯净的硫酸钠,剩余母液(少量 NaCl 和 Na_2SO_4)结晶出杂盐。相比热法分盐,结晶过程更易控制,产品纯度高且运行稳定。这种方法在制盐行业已经成熟应用。

(2)热法分盐:由于 NaCl 和 Na_2SO_4 在不同温度下溶解度的不同,采用“高温热法析纯硝-降温热法析纯盐-热法析杂盐”的工艺,通过控制温度的轻

微差异,使得 NaCl 和 Na_2SO_4 分别通过温度的差异结晶析出,余下减量化后的母液结晶出杂盐。热法分盐投资及运行成本较低,但受水质波动影响较大,对操作技术要求比较高^[16]。

实际试验中,冷冻结晶装置运行温度在 0℃,通过冷冻结晶分离出来的硫酸钠结晶盐,硫酸钠(干基)质量分数可以达到 99.1% 以上,达到了 GB/T 6009—2014 工业无水硫酸钠标准中的 I 类一等品标准要求^[17]。热法蒸发结晶装置试运行期间控制运行温度为 90℃,通过热法结晶分盐,获得的硫酸钠/氯化钠纯度如检测报告所示,由于试运行现场条件限制,无干燥设备,氯化钠及硫酸钠纯度按照干基进行折算,氯化钠纯度优于《工业盐》(GB/T 5462—

2015)中“工业干盐 I 级”标准,硫酸钠纯度优于《工业无水硫酸钠》(GB/T 6009—2014)中“III 类一等品”标准。

3 工艺流程

目前,各行各业对废水减量化零排放有不同的认识和理解,工程案例平稳运行较少且技术上并无统一认识。该项目预处理应用袋式微滤进行软化除硅;膜浓缩采用海水反渗透进行初步浓缩;浓水通过纳滤装置进行一级分盐;纳滤的浓水通过 DTRO+蒸发结晶获得硫酸钠结晶盐,纳滤产水通过电渗析+蒸发结晶获得氯化钠结晶盐(见图 7)。通过以上组合工艺实现石化行业废水的零排放分盐目的。

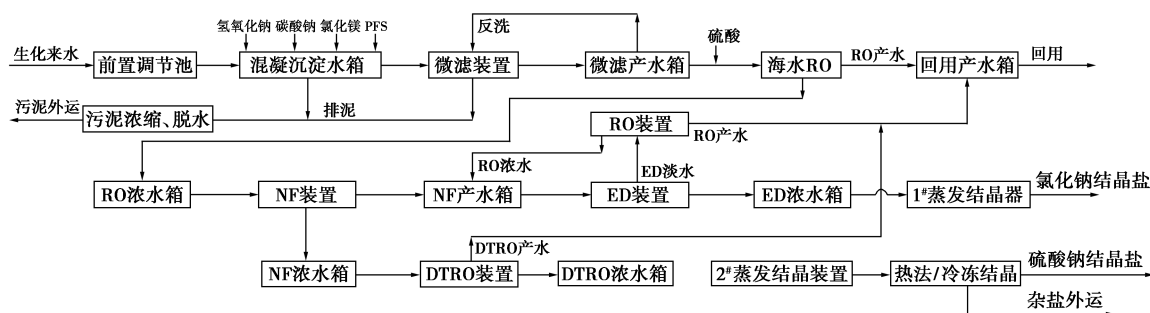


图 7 工艺流程

4 结论

该项目试运行阶段发现存在如下问题并给出解决方案。

(1) 调试期间污水水质波动,对预处理工序软化除硅的效果影响较大,对后续工段平稳运行产生影响^[18];应增大前端缓冲池的停留时间,并通过搅拌系统均质污水来水水质水量。

(2) 根据试运行数据,DTRO 进水硬度较高,有潜在结垢风险;由于前段袋式微滤工艺将硬度降到 100 mg/L 以下,但是经过后续工艺的膜浓缩,DTRO 进水硬度超过 500 mg/L,已经影响到系统的长期稳定运行,在工程设计时,可在袋式微滤装置后增加弱酸阳床,进一步去除硬后,出水硬度在 10 mg/L 以下,这样可提高后续各个膜单元的回收率,延长膜原件化学清洗周期,节省人工,降低运行费用。

(3) 试运行软化除硅工艺段加药成本高;在微滤软化除硅的过程中,通过石灰+氢氧化钠组合加药,降低氢氧化钠加药成本,而且通过小试及现有的工程案例经验得出加石灰有助于硅的去除,降低镁

剂的加药量^[17]。

(4) 试运行产品盐水分较高;增加制盐行业的常用设备干燥机,以此保证产品盐含水率达标。

(5) 在试运行现场运行过程中,现场氨氮挥发严重,污染空气,影响工作人员身体健康。应当在预处理阶段增加除臭系统,收集系统运行中产生的氨氮,采用硫酸进行吸收,产生的硫酸铵可以回用到前段生产工艺中,降低企业运营费用。

参考文献

- [1] 王丹,蒋道利.蒸发结晶技术在高含盐废水零排放领域的应用[J].中国井矿盐,2014,45(4):7-10.
- [2] 瞿瑞.高含盐废水近零排放技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [3] 封燕,谷林涛.煤化工高含盐废水处理技术存在问题及发展趋势[J].安徽化工盐,2016,42(4):27-28.
- [4] 张健,王娜,陈德珍.高含盐废水蒸发回收蒸馏水过程中的阻垢与水质问题[J].工业用水与废水,2015,46(5):6-12.
- [5] 汪岚.电厂循环冷却水系统节水及零排放技术研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [6] 杜献亮.煤化工行业高含盐废水处理及多效蒸发结晶技术的应用[J].煤炭与化工,2014,37(12):129-132.

(下转第 225 页)

大了叠合的反应速率,提高了转化率。但高温使焦炭收率增加,高碳烯烃的选择性降低。因此,为了获得良好的产物分布,应该采用适宜的反应温度^[1]。

本装置产品为叠合油,可用作高辛烷值无铅车用汽油的添加组分,叠合产品性质见表4。

表4 产品性质

| 项目 | 指标 | 备注 |
|-----------------------------|--------|---------|
| 密度/(kg·m ⁻³) | 653 | |
| 平均分子量 | 76.8 | |
| 饱和蒸汽压(40℃)/kPa | 5 | |
| 研究法辛烷值(RON) | 95.66 | 增加 1.09 |
| 硫质量含量/(mg·m ⁻³) | | 同原料 |
| 氧质量分数/% | — | |
| 苯质量分数/% | 0.26 | |
| 烯烃质量分数/% | 50.89 | |
| 馏程(ASTM D86)/℃ | 25~195 | |

从表1和表4可以看出,经叠合反应后,轻汽油的密度增加,饱和蒸汽压降低 118 kPa。轻汽油的 RON 辛烷值提高约 1.09 个单位,终馏点可控制在 195℃ 以内。

4 结论

以强酸型阳离子树脂为催化剂,进行了碳五烯烃叠合工艺的运行分析,结果如下。

(1)碳五烯烃叠合反应容易,但如何控制反应

是关键,叠合放热剧烈,易出现热点,副反应较多,选择性较难提高,要很好地把控反应温度。

(2)经叠合反应后,轻汽油的密度增加,饱和蒸汽压降低 118 kPa。轻汽油的 RON 辛烷值提高约 1.09 个单位,终馏点可控制在 195℃ 以内。

(3)碳五烯烃叠合技术的开发及成功应用,为轻汽油醚化生产装置的转产改造提供了技术支撑,并为乙醇汽油在全国推广应用后,碳五组分的资源利用提供了新的途径。

参考文献

- [1] 孟昭国. 济南炼化 S-Zorb 装置混合碳四碳五应用方向的研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- [2] 陈文艺, 王海彦, 马骏, 等. 催化裂化汽油叠合反应降烯烃研究[J]. 炼油技术与工程, 2006, 36(3): 9-12.
- [3] 陆帅君. MTBE 市场分析及工艺进展[J]. 山东化工, 2016, 45(19): 47-49.
- [4] 丹东明珠特种树脂有限公司. 强酸型阳离子树脂催化剂及其轻汽油碳五/碳六烯烃叠合应用: CN, 108283938A[P]. 2018-07-17.
- [5] 宋瑞琦, 相宏伟, 李永旺, 等. 烯烃齐聚合成液体燃料[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(12): 79-89.
- [6] 徐泽辉, 房鼎业. 异丁烯二聚反应[J]. 化学进展, 2007, 19(9): 1413-1418.
- [7] 张祥剑, 王伟, 郝兴仁, 等. 混合碳四烯烃叠合利用工艺技术研究[J]. 齐鲁石油化工, 2004, 32(4): 255-258.
- [8] 王文科, 赵丽萍, 陶志平. 不同分子筛催化剂对烯烃齐聚合成中间馏分油的影响[J]. 现代化工, 2018, 38(2): 39-42, 44. ■
- [9] 李宇庆, 马楫, 余杰, 等. 高含盐有机废水处理与回用技术应用研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(1): 80-82.
- [10] 聂莹莹. 电厂浓盐水的回用和减量化的工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [11] 田晓媛. 纳滤-反渗透膜技术处理高盐废水及高浓度重金属废水的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- [12] 王鉴, 郭天娇, 丰铭, 等. 高含盐工业废水处理技术现状及研究进展[J]. 煤化工, 2015, 43(3): 18-20.
- [13] 刘研萍, 王宝贞. DTRO 技术在我国垃圾渗滤液处理中的应用[J]. 中国城市环境卫生, 2006, (1): 24-30.
- [14] 朱帅帅. DSA 电化学法处理氯醇法环氧丙烷生产废水的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [15] 刘艳明, 高存荣, 魏江波, 等. 煤化工高含盐废水蒸发处理技术进展[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 432-436.
- [16] 王阳. 线路板蚀刻废液全回收、零排放的产业化处理工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [17] 吴正雷, 袁文兵, 杜青青. 零排放技术在高盐有机废水处理中的应用与展望[J]. 水处理技术, 2016, 42(8): 1-4.
- [18] 崔黎黎, 梁睿, 罗霖, 等. 现代煤化工含盐废水处理技术进展及对策建议[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(6): 95-100.
- [19] 徐成燕, 俞彬, 王小军, 等. 催化废水零排放及分盐中试研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(5): 38-41.
- [20] 崔凤霞, 李荣, 陈玮娜. 工业废水零排放技术进展[J]. 环境科学导报, 2016, 35(S1): 135-138. ■

(上接第 221 页)