



扩散渗析法纯化焦炉烟气脱硫副产稀硫酸的研究

刘 恒¹, 付本全², 王 易¹, 范国枝¹, 张 垒¹, 宋光森¹

(1. 武汉轻工大学化学与环境工程学院, 湖北武汉 430023;

2. 武钢有限技术中心, 湖北武汉 430080)

[摘要] 焦炉烟气脱硫副产稀硫酸溶液中因含有大量的铁离子等而影响其回收利用, 通常的处置方法为委托处置或加碱中和后达标排放, 不仅处置成本高, 浪费大量酸碱, 还会造成环境污染。常温下采用阴离子交换膜扩散渗析法对焦炉烟气脱硫副产稀硫酸进行回收研究, 考察了酸质量分数、酸流量、酸水流量比对酸回收率和 Fe^{2+} 截留率的影响。动态扩散渗析实验结果表明, 在酸质量分数、酸流量、酸水流量比分别为 2%、0.54 L/h、1 时, 硫酸回收率达 78%, Fe^{2+} 截留率为 92%。此外, 对扩散渗析过程中产生的残液采用 Fenton 试剂组合中和法进行处理, 最终产水水质可达到钢厂循环水补水要求。该工艺运行成本为 37.27 元/t, 实现了废酸、富铁渣和废水的零排放和再利用。

[关键词] 扩散渗析; 副产硫酸; 酸回收率; Fe^{2+} 截留率

[中图分类号] X784 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)03-0144-06

Study on purification of dilute sulfuric acid from coke oven flue gas desulfurization by diffusion dialysis

LIU Heng¹, FU Benquan², WANG Yi¹, FAN Guozhi¹, ZHANG Lei¹, SONG Guangsen¹

(1. School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. R & D Center of WISCO, Wuhan 430080, China)

Abstract: Dilute sulfuric acid solution, a by-product of coke oven flue gas desulfurization, contains a large amount of iron ions, which affects its recovery and utilization. The traditional treatment method is to entrust disposal or neutralize with alkali to reach the discharge standard, which not only has high disposal cost, wastes a lot of acid and alkali, but also causes environmental pollution. In this paper, the recovery of the by-product of coke oven flue gas desulfurization dilute sulfuric acid was studied by anion exchange membrane diffusion dialysis at room temperature. The effects of acid mass fraction, acid flow rate, acid flow and water flow ratio on the recovery rate of H_2SO_4 and Fe^{2+} rejection rate were investigated. The results of dynamic diffusion dialysis showed that when the acid mass fraction, acid flow rate, acid flow and water flow rate ratio were 2%, 0.54 L/h and 1, the recovery rate of H_2SO_4 and Fe^{2+} rejection rate were 78% and 92%, respectively. Moreover, the residual liquid produced in the process of diffusion dialysis was treated by Fenton reagent combined neutralization method, and the final produced water quality could meet the requirements of circulating water make-up in steel plant. The operation cost of the process was 37.27 yuan/t, furthermore, the zero discharge and reuse of waste acid, iron rich slag and wastewater were realized.

Key words: diffusion dialysis; by-product sulfuric acid; recovery rate of H_2SO_4 ; Fe^{2+} rejection rate

焦炉烟气活性焦脱硫脱硝一体化技术不仅可以脱除焦炉烟气中的 SO_2 、 NO_x , 还可以使烟气中的 SO_2 在催化剂催化作用下, 与氧气和水充分发生化学反应, 生成稀硫酸, 之后被送至焦化硫铵工段生产硫酸铵^[1-2]。然而, 该工艺在长时间的运行中, 因焦炉烟气冲刷炉体或脱硫系统腐蚀等原因致使生产的硫酸

中含有各种金属和重金属离子, 无法再利用。含有重金属的酸性废水具有腐蚀性和毒性双重特性, 处理不当会对环境造成不可逆的损害^[3]。废酸的处理方法有石灰中和法、电渗析法、膜蒸馏法和膜分离法等^[4-7], 目前, 较常用的方法是石灰中和法, 但是采用该方法处理废酸过程中会产生含有大量重金属离子

的污泥危废,造成二次污染,同时,副产的稀硫酸也不能被资源化利用。因此,考虑到环境和经济因素,纯化回收焦炉烟气脱硫副产稀硫酸非常必要。

扩散渗析作为一种极具吸引力的分离技术,具有低能耗、操作简单、环境友好等优点,已被广泛应用于从废酸溶液中回收酸^[8-11]。刘淑莉等^[12]采用DF120阴离子交换膜从钛白废酸中回收硫酸,在酸水流量比为0.5,酸流量为10 mL/min时,硫酸回收率超过90%,各金属离子截留率均在95%以上。陈建军等^[13]采用扩散渗析法回收硫酸稀土溶液中硫酸,硫酸回收率最高可达80%。因此,扩散渗析法被认为是一种很有潜力的从废酸溶液中回收硫酸的方法。然而,关于从焦炉烟气副产稀硫酸溶液中回收硫酸的相关研究还鲜有报道。

本研究拟采用扩散渗析法对焦炉烟气脱硫副产稀硫酸溶液进行纯化回收,对处理过程中产生的残液进行深度处理回用,并对扩散渗析过程进行成本核算,以期扩散渗析工艺的工业化应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验材料

实验所用的废酸溶液取自武汉某焦化公司,其H₂SO₄质量分数为2%~5%,主要离子含量见表1。由于Fe²⁺质量浓度远远高于其他离子质量浓度,所以本研究主要讨论Fe²⁺的截留率。

表1 废酸中主要离子含量

Table 1 Contents of the main ions in waste acid

离子种类	Fe ²⁺	Al ³⁺	Pb ²⁺	As ³⁺
质量浓度/(mg·L ⁻¹)	484~560	30~65	0.9~3.0	0.20~1.0

1.2 实验装置及方法

实验装置如图1所示,采用山东天维膜技术有限公司提供的TWDD-8-40A型扩散渗析器,其由39片DF-120阴离子扩散渗析膜组成,单片膜的有效面积为35 cm×17.8 cm。DF-120阴离子扩散渗析膜的性能见表2。

实验前,将各1.4 L的废酸溶液和去离子水分别通过2个蠕动泵从进料口和进水口注入扩散渗析器中,静置2 h,排净内部气体,使设备内部达到平衡。之后开启进口阀,调节流量,设备正常运行。运行过程中,每隔0.5 h从出口采集样品进行分析,其中H⁺浓度用已知浓度的NaOH标准溶液滴定分析,金属离子浓度通

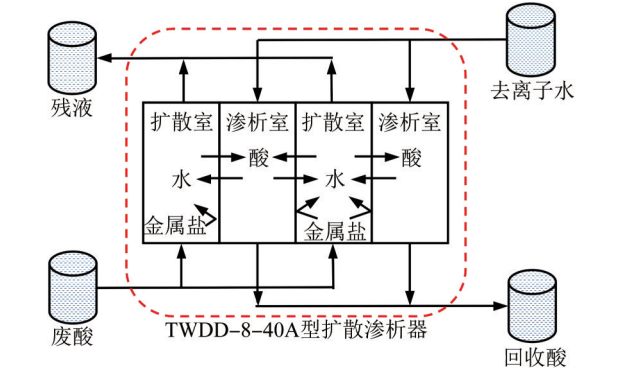


图1 扩散渗析装置图

Fig. 1 Diagram of diffusion dialysis device

表2 DF-120阴离子交换膜的性能

Table 2 Properties of DF-120 anion exchange membranes

项目	参数
含水率/%	42.34
厚度/mm	0.34
冲击强度/MPa	>0.9
稳定性(pH)	<9
离子交换容量/(mol·kg ⁻¹)	1.8
单位面积质量/(mg·cm ⁻²)	8~12

过电感耦合等离子体质谱仪(Elan 6000 ICP-MS,加拿大珀金埃尔默公司)测定,COD采用COD快速测定仪(5B-6C,连华科技有限公司)测定。膜使用前后的形貌用SEM(Quanta 400,荷兰FEI公司)表征。

1.3 数据分析及处理

扩散渗析过程中,膜的离子扩散渗析系数(U)与膜的种类和进料酸浓度有关,它代表不同离子在膜内的扩散渗析性能,其计算见式(1)。

$$U=\frac{M}{At\Delta C_m}$$

(1)

式中: U ——离子扩散系数,m/s;
 M ——离子传质的物质的量,mol;
 A ——膜有效面积,m²;
 t ——扩散渗析时间,s;
 ΔC_m ——离子在扩散液和渗析液两侧的对数平均浓度差,mol/L。

对于H⁺,其 ΔC_m 计算见式(2)。

$$\Delta C_m=\frac{C_f(H^+)-C_r(H^+)-C_d(H^+)}{\ln[(C_f(H^+)-C_r(H^+))/C_d(H^+)]}$$

(2)

式中: $C_r(H^+)$ ——回收酸中H⁺浓度,mol/L;
 $C_f(H^+)$ ——进料废酸中H⁺浓度,mol/L;
 $C_d(H^+)$ ——残液中H⁺浓度,mol/L。
扩散渗析运行效果采用酸回收率、金属离子截留

率2个指标进行评价,其计算分别见式(3)、式(4)。

$$R = \frac{C_r(H^+)Q_r}{C_f(H^+)Q_f} \quad (3)$$

$$\eta = 1 - \frac{C_r(M^+)Q_r}{C_f(M^+)Q_f} \quad (4)$$

式中: R ——酸回收率, %;

η ——金属离子截留率, %;

Q_r ——回收酸流量, L/h;

Q_f ——去离子水流量, L/h;

$C_r(M^+)$ ——回收酸中金属离子质量浓度, mg/L;

$C_f(M^+)$ ——废酸中金属离子质量浓度, mg/L。

2 结果与讨论

2.1 扩散实验中 H^+ 的扩散系数

扩散渗析过程中,根据菲克扩散定律,在给定温度和离子交换膜情况下,稳态下膜内扩散系数与进料酸浓度梯度成正比^[14]。实验条件下,对不同质量分数硫酸的 H^+ 扩散系数进行计算,结果见表3。

表3 常温条件下不同质量分数硫酸的 H^+ 扩散系数

Table 3 Diffusion coefficient of H^+ in sulfuric acid with different mass fractions at room temperature

进料酸质量分数/%	1	2	3	4	5
$U_{H^+}/(10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.73	2.39	3.01	3.79	4.25

通过对表3数据进行拟合,得出扩散渗析膜的氢离子扩散系数 $U_{H^+}(y)$ 与进料酸质量分数(x)基本呈线性关系,其拟合方程为 $y=1.10+0.644x$,相关系数 $R^2=0.994$ 。由实验数据验证了氢离子扩散系数 U_{H^+} 与进料酸质量分数成正比,即可以利用该经验关系获得不同进料条件下的氢离子扩散系数,且由数据结果可知,和同类型的膜进行比较,阴离子扩散渗析膜 DF-120 具有较强的扩散渗析性能。可以预见,该膜对实际工业废酸中的硫酸或其他无机酸具有良好的回收效果,对研究膜间离子迁移行为具有良好的指导意义。

2.2 酸流量对扩散渗析的影响

在环境温度 25 °C 的条件下,固定酸水流量比为 1,废酸溶液中硫酸质量分数为 2%,考察不同废酸溶液流量对酸回收率和金属离子截留率的影响,结果见图2。

从图2可以看出,随着酸流量由 0.3 L/h 增到 0.9 L/h,酸回收率由 82% 下降到 63%,而 Fe^{2+} 截留率由 87% 增大至 94%。这归因于水动力学条件发生的变化^[15]。酸流量增大,传质边界层变窄,传质阻力下降,有利于

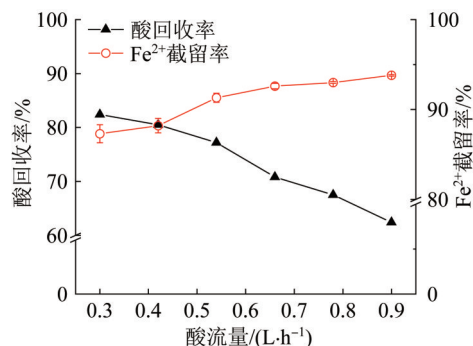


图2 酸流量对酸回收率和 Fe^{2+} 截留率的影响

Fig. 2 Effects of acid flow rate on acid recovery rate and Fe^{2+} rejection rate

SO_4^{2-} 由扩散侧向回收侧的扩散传质过程,单位时间内 SO_4^{2-} 的迁移量增加, H^+ 的迁移量随之增加,但同时随着流量的增加,废酸溶液中的 H^+ 等在渗析膜表面停留时间会缩短,导致传质交换不完全,实验中该效应大于边界层变窄所带来的效应,因而回收液中的酸浓度下降^[16-17]。此外,随着酸流量增大,回收侧的扩散层变厚,金属离子带正电荷,易被阴膜表面带的正电荷官能团所排斥,传质阻力变大, Fe^{2+} 透过膜进入扩散侧的阻力增大,致使 Fe^{2+} 截留率上升^[18]。在工业生产过程中,酸流量的减小意味着单位时间处理能力下降,处理成本也会随之增加。因此,在后续实验中选择酸流量为 0.54 L/h 来确保适当的停留时间使传质过程完全进行,并保持一定的酸回收率。

2.3 废酸溶液中硫酸质量分数对扩散渗析的影响

固定酸水流量比为 1,废酸溶液流量为 0.54 L/h,考察不同酸质量分数对酸回收率和金属离子截留率的影响,结果见图3。

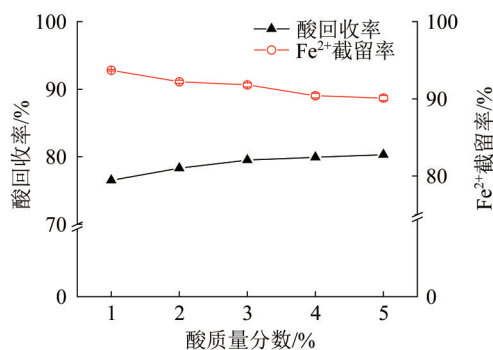


图3 酸质量分数对酸回收率和 Fe^{2+} 截留率的影响

Fig. 3 Effects of sulfuric mass fraction on acid recovery rate and Fe^{2+} rejection rate

由图3可知,在实验条件下酸回收率随酸质量分数增加而增大,但 Fe^{2+} 截留率则呈相反的变化趋

势。这是因为随着扩散侧进料酸质量分数的增加,扩散侧和渗析侧两侧浓度梯度增大,随之有更多的 SO_4^{2-} 透过阴膜,相应的扩散系数增大。为保持膜两侧的电荷平衡,有更多的 H^+ 和 Fe^{2+} 透过膜,导致相应酸回收率增大, Fe^{2+} 的截留率下降^[19-20]。废酸浓度是影响扩散渗析过程的重要因素之一,综合考虑酸回收率和 Fe^{2+} 截留率,本研究选用酸质量分数为2%的废酸溶液来进行后续实验。

2.4 酸水流量比对扩散渗析的影响

改变去离子水流量,在废酸流量和酸质量分数分别为0.54 L/h和2%条件下,考察不同酸水流量比对酸回收率和金属离子截留率的影响,结果见图4。

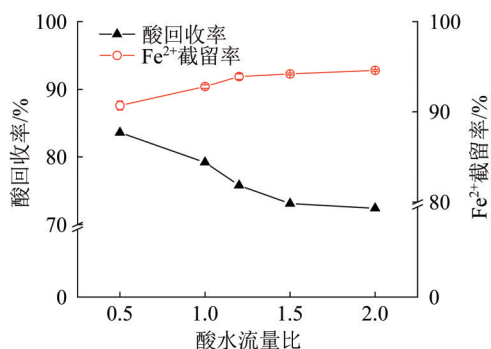


图4 酸水流量比对酸回收率和 Fe^{2+} 截留率的影响

Fig. 4 Effects of acid flow and water flow ratio on acid recovery rate and Fe^{2+} rejection rate

一般而言,在扩散渗析过程中,废酸流量不变,随着酸水流量比的增大,水流速度相对减小,膜两侧浓度差下降,进而导致传质速率下降,从而降低了酸回收率。从图4可以看出:在酸质量分数、酸流量和酸水流量比分别为2%、0.54 L/h和1时,硫酸回收率达78%, Fe^{2+} 截留率为92%;酸回收率随着酸水流量比增大呈先下降后趋于平缓趋势,而 Fe^{2+} 截留率则呈先上升而后趋缓趋势。这可能是源于随着酸水流量比增加,扩散侧水的流量减小,膜两侧的 SO_4^{2-} 浓度差减小,相应传质推动力降低,单位时间内透过膜的硫酸迁移量减小,导致硫酸的回收率下降;相应地,为保持电荷平衡,带有正电荷的 Fe^{2+} 扩散速率减慢,致使 Fe^{2+} 截留率升高^[7,12]。

2.5 膜使用寿命的研究

在工业生产中,扩散渗析膜的成本相对较高,延长膜的使用寿命有利于降低生产成本。扩散渗析膜在使用一段时间后,废酸溶液中的重金属离子和酸不溶物会堵塞膜孔隙导致酸回收率下降。本研究通

过扫描电镜观察使用前后DF-120阴离子扩散渗析膜的膜形态,结果见图5。

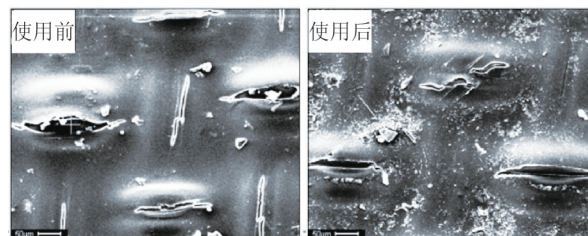


图5 使用前后扩散渗析膜表面的SEM

Fig. 5 SEM of diffusion dialysis membrane surface before and after use

由图5可知,使用前DF-120膜表面光滑均匀致密,孔径较小且分布均匀,使用后膜表面粗糙,孔径变大,表面酸不溶物增多。通过EDS能谱分析,膜表面截留物主要成分为铁、钙、镁、硅和铝等的氧化物。因此,当膜在酸回收率下降到一定程度后需要进行清洗,本实验选择在酸回收率下降到初始状态的70%时进行化学清洗。首先,用去离子水清洗膜1 min,随后用1%盐酸溶液冲洗膜15~20 min,重复3次,最后用去离子水冲洗30 s。图6为室温下该膜在酸质量分数为2%、废酸流量0.54 L/h、酸水流量比为1的条件下运行时经过不同次数的清洗后酸的回收率和 Fe^{2+} 截留率。

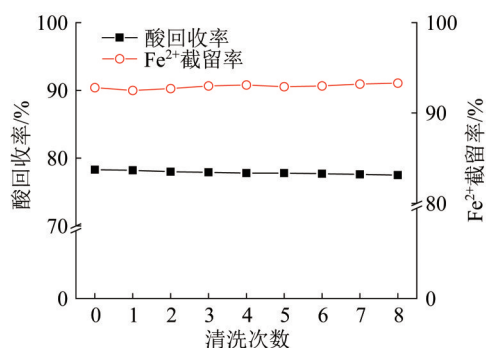


图6 清洗次数对酸回收率和 Fe^{2+} 截留率的影响

Fig. 6 Effects of cleaning times on acid recovery rate and Fe^{2+} rejection rate

由图6可知,随着膜清洗次数的增加,酸回收率总体上呈不断下降趋势,表明仍有部分重金属离子和不溶物等膜污染物质影响膜的性能。但清洗8次后,使用该膜处理废酸,酸回收率依然达到75%, Fe^{2+} 截留率在92%以上,说明清洗效果显著,且该离子交换膜性能稳定。

2.6 残液处理

焦炉烟气副产稀硫酸在经扩散渗析法处理后,会产生含有高浓度金属离子的渗析残液。表4为将现场脱硫副产稀硫酸稀释至质量分数为2%进行扩散渗析后渗析残液的水质指标。

表4 残液水质指标

Table 4 Water quality index of residual liquid

项目	硫酸质量 分数/%	Fe/ (mg·L ⁻¹)	Al/ (mg·L ⁻¹)	Pb/ (mg·L ⁻¹)	As/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)
数值	0.3~0.5	682~1 350	75~430	2.0~3.5	0.5~1.5	560~680

由表4可知,残液中含有较高浓度的COD和铁盐、铝盐,实验或生产中可以根据酸含量对渗析残液通过二次或多次扩散渗析回收有价值的废酸,但处理成本也会相应增加。本研究拟将该部分残液先收集至储存罐(储存池)中,再利用溶液自身含有的铁离子和酸性,采用Fenton试剂氧化预处理组合石灰中和工艺对其深度处理并回用。具体步骤为:取50 mL残液于250 mL烧杯中,加入一定量质量分数为27.5%的H₂O₂与残液中的Fe²⁺组成芬顿试剂去除残液中的COD,反应60 min后,再加入一定量的石灰乳调节pH至中性,溶液中金属离子Fe³⁺、Al³⁺等形成氢氧化物沉淀以污泥形态沉积,污泥经压滤固液分离后,富铁渣回烧结工序综合利用。对处理后的最终出水进行水质分析,结果见表5。

表5 最终出水水质

Table 5 Final effluent quality

项目	数值	回用水标准(GB/T 50102—2014)
pH	7.0	6~9
Fe/(mg·L ⁻¹)	0.15~0.20	≤0.5
As/(mg·L ⁻¹)	< 0.1	—
Pb/(mg·L ⁻¹)	< 0.1	—
浊度/NTU	< 3.0	≤5.0
COD/(mg·L ⁻¹)	< 60	≤60

由表5可知,渗析残液经深度处理后,最终出水水质达到了“工业循环冷却水设计规范”(GB/T 50102—2014)中再生水直接用于循环冷却水系统补充水的水质指标要求,可回用于工业循环冷却水系统补水。

2.7 运行成本分析

结合现场实际情况,以焦炉烟气副产稀硫酸(质量分数5%)处理量为10 m³/d计,对该工艺运行成本进行核算。通过物料衡算得知,主要物料消耗有纯水和药剂,主要产出有富铁渣、回收的稀硫酸和中水。

其具体运行成本主要由药剂费、水费、电费、污泥处置费和人工费组成。药剂费主要为膜清洗剂HCl、聚丙烯酰胺(PAM)、生石灰(CaO)和双氧水(H₂O₂)的费用,合计约5.84元/m³,具体见表6;单位废酸用水量为1.2 m³/m³,水费单价为4.7元/m³,成本合计5.24元/m³;单位废酸耗电3.9 kW·h,电费单价为0.6元/(kW·h),成本合计2.34元/m³;单位废酸污泥产量13.6 kg/m³,单位污泥处置费为1 500元/t,成本合计20.4元/m³;人工费为3.50元/m³。综上,本项目综合运行成本约为37.32元/m³。与现有采用石灰中和沉淀法处置相比,处置单位废酸可节约成本240元/t,每年回收废酸和节支效益超过100万元。

表6 扩散渗析过程药剂成本分析

Table 6 Reagents cost analysis of diffusion dialysis process

药剂	单价/(元·t ⁻¹)	投加量	处理成本/(元·m ⁻³)
H ₂ O ₂ (27.5%)	1 200	350 mg/L	0.426
HCl(31%)	210	12.07 g/L	2.534
生石灰	330	8.56 g/L	2.834
PAM	13 500	4.0 mg/L	0.041
合计			5.835

3 结论

采用“扩散渗析膜系统回收酸+Fenton氧化组合石灰乳中和工艺处理渗析残液”实现焦炉烟气脱硫副产稀硫酸、酸回收过程产生的富铁渣和废水的资源化利用与零排放。主要结论如下:

(1)在优化工况下,即在酸质量分数为2%,酸流量为0.54 L/h,酸水流量比为1时,扩散渗析对硫酸回收率达78%,Fe²⁺截留率达92%。

(2)在酸回收率下降到初始状态的70%时,采用1%盐酸溶液和去离子水组合化学清洗策略对扩散渗析膜进行清洗再利用,循环8次后该膜对硫酸的回收率仍达到75%以上,说明清洗效果显著,扩散渗析膜性能稳定。

(3)不考虑装置投资折旧等情况下,整个系统的运行成本约为37.32元/m³。该组合工艺不但为企业节约废酸资源,同时也解决了环境污染问题,可为焦炉烟气副产稀硫酸的实际综合利用提供技术参考。

参考文献

- [1] 王新东,侯长江,田京雷.钢铁行业烟气多污染物协同控制技术应用实践[J].过程工程学报,2020,20(9):997-1007.

- WANG Xindong, HOU Changjiang, TIAN Jinglei. Application and practice of multi-pollutant cooperative control technology for flue gas in iron and steel industry [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(9): 997-1007.
- [2] 江静. 活性焦脱硫脱硝技术在 7.63 m 焦炉上的应用[J]. 燃料与化工, 2021, 52(2): 60-62.
- JIANG Jing. Application of flue gas DeSO_x & DeNO_x by using active coke for 7.63 m battery [J]. Fuel & Chemical Processes, 2021, 52(2): 60-62.
- [3] YAN Junying, WANG Huangying, FU Rong, et al. Ion exchange membranes for acid recovery: Diffusion Dialysis (DD) or Selective Electrodialysis (SED)? [J]. Desalination, 2022, 531: 115690.
- [4] 刘红召, 井小静, 张博, 等. 提高钼冶炼废酸中钼离子交换吸附性能的研究[J]. 稀有金属, 2019, 43(3): 312-318.
- LIU Hongzhao, JING Xiaojing, ZHANG Bo, et al. Method for improving ion-exchange adsorption performance of Mo in spraying water [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(3): 312-318.
- [5] 王娟, 林哈, 汪群慧, 等. 电渗析法回收铅酸蓄电池化成工序废硫酸的研究[J]. 高校化学工程学报, 2014, 28(6): 1384-1390.
- WANG Juan, LIN Han, WANG Qunhui, et al. Sulfuric acid recovery from the waste acid generated in formation-process of a lead-acid battery plant by electrodialysis [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2014, 28(6): 1384-1390.
- [6] 魏颖颖, 蔡景成, 郭飞. 采用疏水改性纤维膜处理热镀锌废酸液实验研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(1): 37-42.
- WEI Yingying, CAI Jingcheng, GUO Fei. Experimental study on the treatment of galvanizing waste acid by the hydrophobic modified fibrous membranes [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(1): 37-42.
- [7] 秦松岩, 方玉倩, 赵立新. 无机废酸分离回收技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(1): 204-209.
- QIN Songyan, FANG Yuqian, ZHAO Lixin. Review on recovery technology of inorganic waste acid [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(1): 204-209.
- [8] 魏允, 王倩, 丛威. 扩散渗析-电渗析回收赖氨酸离子交换废液中的盐[J]. 过程工程学报, 2019, 19(5): 975-981.
- WEI Yun, WANG Qian, CONG Wei. The process of salt recovery from lysine ion-exchange waste water by diffusion dialysis-electrodialysis [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(5): 975-981.
- [9] XU Tongwen. Ion exchange membranes: State of their development and perspective [J]. Journal of Membrane Science, 2005, 263(1/2): 1-29.
- [10] 王刚, 张伟铭, 杨桢瀚, 等. 扩散渗析-电沉积联合工艺资源回收酸性含铜树脂脱附液[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(5): 103-109.
- WANG Gang, ZHANG Weiming, YANG Chenghan, et al. Resource recovery treatment of an acidic resin regenerant containing Cu^{2+} using diffusion dialysis and electrodeposition [J]. Membrane Science and Technology, 2017, 37(5): 103-109.
- [11] JEONG J, KIM M S, KIM B S, et al. Recovery of H_2SO_4 from waste acid solution by a diffusion dialysis method [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 124(1/2/3): 230-235.
- [12] 刘淑莉, 郑雅杰, 张寿春. 扩散渗析法回收钛白废酸中的硫酸[J]. 水处理技术, 2017, 43(2): 67-70.
- LIU Shuli, ZHENG Yajie, ZHANG Shouchun. Recovery of sulfuric acid from titanium white waste acid by diffusion dialysis [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(2): 67-70.
- [13] 唐建军, 陈建军, 张伟, 等. 扩散渗析法回收硫酸稀土溶液中硫酸研究[J]. 膜科学与技术, 2005, 25(2): 50-53.
- TANG Jianjun, CHEN Jianjun, ZHANG Wei, et al. Study on sulphuric acid recovery from RE sulphate solutions by diffusion dialysis [J]. Membrane Science and Technology, 2005, 25(2): 50-53.
- [14] GUECCIA R, RANDAZZO S, MARTINO D C, et al. Experimental investigation and modeling of diffusion dialysis for HCl recovery from waste pickling solution [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 235: 202-212.
- [15] LÓPEZ J, DE OLIVEIRA R R, REIG M, et al. Acid recovery from copper metallurgical process streams polluted with arsenic by diffusion dialysis [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(1): 104692.
- [16] LUO Jingyi, WU Cuiming, XU Tongwen, et al. Diffusion dialysis-concept, principle and applications [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 366(1/2): 1-16.
- [17] 孙帅, 孙宏骞, 宋静, 等. 动态扩散渗析法回收盐酸的实验与模型分析[J]. 过程工程学报, 2021, 21(1): 57-63.
- SUN Shuai, SUN Gqiansun, SONG Jing, et al. Experimental and model analysis of hydrochloric acid recovery by dynamic diffusion dialysis [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(1): 57-63.
- [18] 孙亚辉, 肖连生. 扩散渗析回收含铜退镀液中的硝酸[J]. 膜科学与技术, 2015, 35(3): 70-75.
- SUN Yahui, XIAO Liansheng. Recovery of nitric acid from copper plating solution by diffusion dialysis [J]. Membrane Science and Technology, 2015, 35(3): 70-75.
- [19] 陈明, 徐慧, 蔡忠萍, 等. 某矿山酸性废水酸洗液扩散渗析的研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(11): 26-28.
- CHEN Ming, XU Hui, CAI Zhongping, et al. Research of resin acid lotion of metal recycling process in mining acid wastewater by diffusion dialysis [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(11): 26-28.
- [20] 赵宗良, 郭红霞, 林育群, 等. 高浓度硝酸溶液的扩散渗析过程研究[J]. 膜科学与技术, 2022, 42(1): 110-114.
- ZHAO Zongliang, GUO Hongxia, LIN Yuqun, et al. Study on diffusion dialysis process of high concentration nitric acid solution [J]. Membrane Science and Technology, 2022, 42(1): 110-114.

[作者简介] 刘恒(1998—), 硕士研究生. E-mail: 2195694805@qq.com. 通讯作者: 张垒, 博士, 教授. E-mail: zhanglei@whpu.edu.cn.

[收稿日期] 2022-12-15(修改稿)