

# 水泥窑炉湿法脱硫耦合控制 SNCR 脱硝氨逃逸的研究

刘定平, 沈康\*

(华南理工大学电力学院, 广东省能源高效清洁利用重点实验室,  
广东省能源高效低污染转化工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

**摘要:**针对水泥分解炉脱硝系统氨逃逸问题,提出了利用湿法脱硫系统实现水泥工业烟气氨排放达标的方法。通过在水泥窑尾脱硫系统进行试验,研究了湿法脱硫系统对气态  $\text{NH}_3$  的脱除特性。结果表明,湿法脱硫系统浆液吸收作用能有效脱除烟气中的气态氨。液气比、脱硫浆液 pH 及浆液中氨氮浓度对尾气中氨逃逸影响较大。增大液气比有利于提高氨脱除效率,在液气比由  $4.3 \text{ L/m}^3$  提高到  $7.0 \text{ L/m}^3$  时,氨脱除效率由 86.0% 提高到 92.5%;当浆液 pH 由 5.8 升高至 6.4 时,氨脱除效率由 94% 降低至 67%;氨氮浓度由  $4.03 \times 10^3 \text{ mg/L}$  升高至  $4.06 \times 10^3 \text{ mg/L}$  时,氨脱除效率由 91.9% 降低至 86.0%。

**关键词:**逃逸氨; SNCR;  $\text{NO}_x$ ; 湿法脱硫系统; 脱除特性

**中图分类号:** X51

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2022)02-0225-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.02.045

## Coupling control of escaped ammonia from SNCR by wet desulfurization in cement kiln

LIU Ding-ping, SHEN Kang\*

(Guangdong Provincial Key Laboratory for Efficient and Clean Utilization of Energy, Guangdong Provincial Engineering Research Center for High Efficient and Low Pollution Conversion of Energy, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that ammonia escapes from the denitration system of cement decomposing furnace, a method is proposed to control the escaped ammonia by using a wet desulfurization system, making the ammonia emission in flue gas of cement industry reach China's national standard. Through performing experiments on the desulfurization system for flue gas of cement kiln, the removal characteristics of gaseous ammonia by wet desulfurization system are studied. The results show that the slurry absorption of wet desulfurization system can effectively remove gaseous ammonia from flue gas. The liquid-to-gas ratio, the pH value of the desulfurization slurry and the concentration of ammoniacal nitrogen in the slurry have a greater impact on the escape of ammonia in the flue gas. A higher liquid-to-gas ratio is beneficial to improve the removal efficiency of ammonia. The removal efficiency of ammonia increases from 86% to 92.5% when the liquid-to-gas ratio increases from  $4.3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$  to  $7.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ ; the removal efficiency drops from 94% to 67% when the pH of slurry increases from 5.8 to 6.4; it drops from 91.9% to 86% when the concentration of ammoniacal nitrogen increases from  $4.030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  to  $4.060 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**Key words:** escaped ammonia; SNCR;  $\text{NO}_x$ ; wet desulfurization system; removal characteristics

近年来,针对水泥窑炉烟气污染物排放的排放标准愈趋严格,部分地区已提出水泥工业烟气超低排放,要求将水泥窑炉生产线  $\text{NO}_x$  排放浓度限制在  $100 \text{ mg/m}^3$  及以下<sup>[1]</sup>。为达到现有的排放标准,水泥工业普遍在分解炉设置有脱硝系统,采用 SNCR 或 SCR 脱硝工艺。但由于水泥分解炉工况复杂且不稳定,  $\text{NO}_x$  初始浓度较大,导致实际喷氨量远高于理论所需氨量,逃逸氨现象严重,如何解决水泥窑炉

$\text{NO}_x$  超低排放中逃逸氨现象已成为目前水泥行业烟气治理亟待解决的问题<sup>[2]</sup>。

根据水泥工业大气污染物排放严格标准,大部分水泥生产企业在生产过程采用了 SNCR 脱硝工艺,并采用增大氨氮比的方式使  $\text{NO}_x$  排放浓度达到国家排放标准,导致水泥工业烟气氨排放量超标。由于水泥窑炉烟气成分复杂,氨气在随烟气的迁移过程中易转化为硝酸铵和硫酸铵等铵盐气溶胶,部

收稿日期:2021-03-12;修回日期:2021-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51676072)

作者简介:刘定平(1965-),男,博士,副教授,研究方向为能源清洁转化与系统优化,liudingping@123.com;沈康(1995-),男,硕士生,研究方向为能源清洁转化与系统优化,通讯联系人,931350221@qq.com。

分铵盐气溶胶最终会排入到大气环境之中,从而改变水泥厂的 PM<sub>2.5</sub> 排放特性,造成严重的大气污染<sup>[3]</sup>。

由于水泥工业大气污染物排放限值的降低,目前部分水泥厂配置了脱硫系统,其中湿法脱硫工艺由于具有脱硫效率高、对工况适应性好和技术成熟等优点成为水泥工业主流的脱硫工艺。湿法脱硫塔是窑尾烟气排入大气环境中的后端处理装置,因此研究湿法脱硫系统对于逃逸氨的脱除机制对实现水泥窑炉烟气排放达标有重要的意义。

目前已有学者通过实验对火电厂采用 SCR 脱硝工艺时湿法脱硫系统对逃逸氨的脱除特性进行了研究,实验结果表明,脱硫浆液对逃逸氨具有良好的脱除能力,逃逸氨浓度可以下降到 0.19 mg/m<sup>3</sup>,氨

脱除效率为 82.3%<sup>[3]</sup>。但是大部分水泥窑炉脱硝工艺采用的是 SNCR 工艺,氨逃逸量大,针对水泥窑炉烟气特性与处理工艺,研究湿法脱硫系统对于逃逸氨的影响因素十分必要。

本文中以某产量为 5 000 t/d 水泥生产线烟气处理系统为研究对象,开展了湿法脱硫系统对逃逸氨的脱除特性试验研究。通过试验研究了液气比、脱硫浆液 pH 及浆液中氨氮浓度对窑尾烟气中氨逃逸的影响,为水泥窑炉烟气超洁净排放中的氨逃逸治理提供了一条有效途径。

## 1 水泥窑炉氨迁移规律分析

### 1.1 水泥生产过程中氨迁移路径

典型的水泥窑炉烟气工艺流程如图 1 所示。

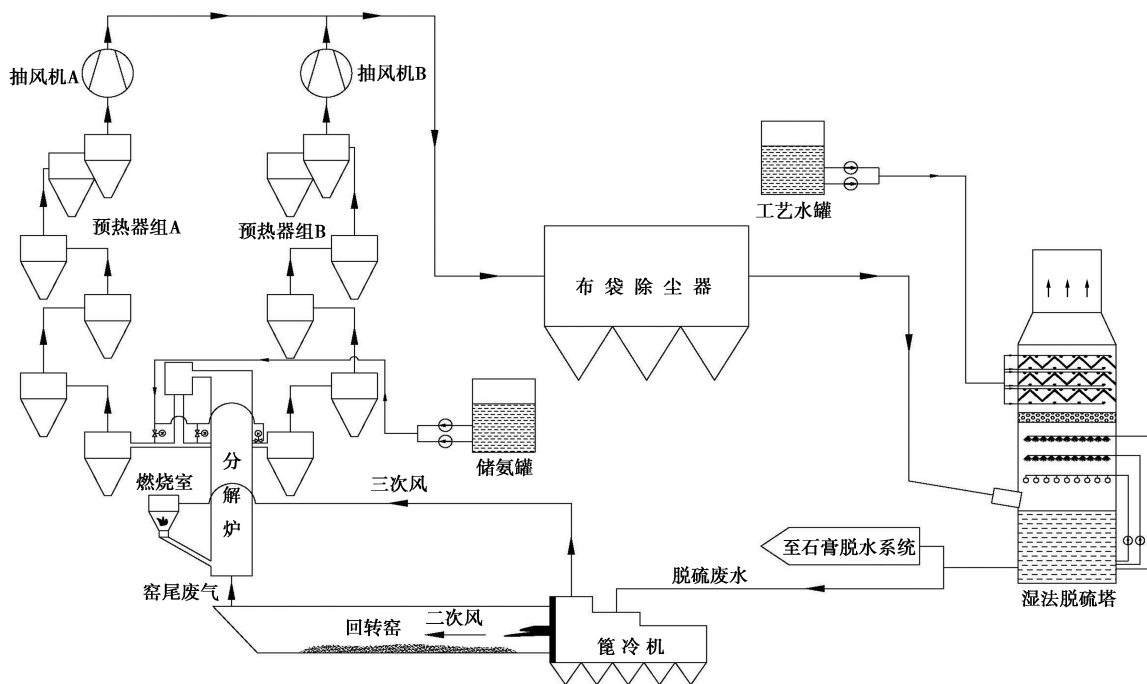


图 1 水泥窑炉烟气处理工艺流程

在上述工艺中,分解炉 SNCR 烟气脱硝系统是水泥厂保证水泥窑尾烟气 NO<sub>x</sub> 排放浓度达到国家排放标准的主要工程措施,分解炉也是水泥窑炉烟气中 NH<sub>3</sub> 的主要输入设备。由于水泥分解炉内流场复杂,氨水等还原剂在喷入后与烟气混合不均。为保证脱硝效率,实际运行过程中常喷入过量的还原剂,导致部分 NH<sub>3</sub> 随烟气逸出分解炉并进入到后续的设备中。NH<sub>3</sub> 随烟气进入五级预热器,在实际运行过程中,烟气在出预热器前温度控制在 300℃ 以上,在此温度下烟气中气态 NH<sub>3</sub> 基本不会与 SO<sub>3</sub> 反应生成硫酸氢铵<sup>[4]</sup>。同时,由于飞灰温度较高,NH<sub>3</sub> 也难以吸附于飞灰表面,因此在生料预

热器内逃逸氨主要以气相形式存在<sup>[5]</sup>。烟气出五级预热器后进入生料磨,对生料进行初步预热,在此过程中,烟气温度由 330℃ 下降至 180℃。研究表明,硫酸铵的开始生成温度为 230~270℃,部分气态氨已转化为颗粒态氨<sup>[6]</sup>。而后烟气进入布袋除尘器中,烟气温度进一步降低,由 180℃ 降低至 120℃,大部分逃逸氨转化为颗粒态氨并以飞灰的形式被除尘器捕集<sup>[7]</sup>。

除尘后烟气进入湿法脱硫系统中,由于 NH<sub>3</sub> 极易溶于水的特性,大部分气态氨在烟气与脱硫浆液逆向接触的过程中被脱除。除尘器所收集的粉尘全部返回生料使用,吸附或沉积于粉尘的氨会在高温

下挥发,重新回到烟气中。同时湿法脱硫系统对于烟气中的细颗粒物具有一定的脱除能力,部分吸附于细颗粒物表面的  $\text{NH}_3$  溶解于脱硫浆液之中,因此湿法脱硫塔是保证水泥窑尾烟气  $\text{NH}_3$  排放浓度达标的关键设备。另外,脱硫废水中的氨氮在篦冷机高温环境下重新分解为氨气进入水泥分解炉或回转窑,也是氨逃逸的来源之一。

## 1.2 水泥炉窑氨平衡分析

如图2所示,水泥炉窑烟气中  $\text{NH}_3$  主要来源于脱硝系统喷氨和市政污泥热解后释放出的  $\text{NH}_3$ ,其中50%~60%参与  $\text{NO}_x$  还原反应生成  $\text{N}_2$ ,剩余  $\text{NH}_3$  逃逸出脱硝系统<sup>[8]</sup>。70%~80%的逃逸氨沉积或吸附于飞灰中,随飞灰一同被除尘器捕集<sup>[9]</sup>。逃逸进脱硫系统的氨较少,占总逃逸氨的20%~30%。进入脱硫塔中的氨主要由烟气带入,烟气在带入气相  $\text{NH}_3$  的同时,部分吸附于飞灰表面的氨也随之进入脱硫塔内。由于脱硫塔的吸收液大部分在塔内循环,因此进入脱硫塔系统的氨在脱硫系统内形成氨平衡分布体系。浆液密度随着脱硫反应的进行而逐渐升高,当浆液密度高于  $1.1 \text{ kg/m}^3$  时,系统需将部分低浓度脱硫浆液外排出脱硫塔。外排浆液在完成石膏脱水后作为除雾器冲洗水重新回到脱硫系统中,生产的石膏晶体可作为水泥缓蚀剂。此外,部分低浓度浆液直接泵入篦冷机中,这部分浆液视为脱硫废水。在篦冷机高温环境下,脱硫废水中溶解的  $\text{NH}_3$  再次挥发出来进入烟气中,并随二次风和三次风进入分解炉中。

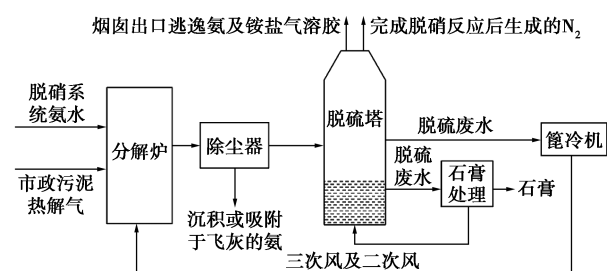


图2 水泥炉窑氨平衡

## 2 基于湿法烟气脱硫超洁净排放中氨逃逸试验

### 2.1 试验工艺介绍

目前在水泥分解炉掺烧市政污泥是降低氨逃逸的有效措施,本次试验以某掺烧市政污泥的大型水泥厂的烟气处理系统作为研究对象。吸收塔设有A、B、C 3层喷淋层,在每个喷淋层配有大量喷嘴,喷

淋保持一定比例的重叠度。采用单元制设计,每个喷淋层都配有1台与喷淋层上升管道系统相连接的循环泵,可通过启停浆液循环泵来调整脱硫塔液气比。生产过程中使用窑灰和石灰石作为吸收剂。

### 2.2 试验工况设计

试验过程中保持水泥熟料产量为  $250 \text{ t/h}$ ,掺烧城市污泥量为  $15 \text{ t/h}$ 。试验过程中,脱硫塔入口处  $\text{NH}_3$  质量浓度存在一定程度的波动,但稳定在  $22 \sim 30 \text{ mg/m}^3$ 。为了研究运行方式对氨脱除效率的影响,本次试验采用单因素分析方法,分别考察液气比、脱硫浆液 pH 和浆液氨氮浓度对湿法脱硫系统气态氨脱除效率的影响。在保证烟气  $\text{SO}_2$  排放达标的前提下选取了 AB 和 ABC 2 种喷淋层运行方式进行性能测试,运行方式 AB、ABC 对应的液气比分别为  $4.7、7.0 \text{ L/m}^3$ 。通过增加脱硫浆液的投入量来调整浆液池 pH,在前期测试的过程中发现当浆液 pH 高于 6.5 后会造成石灰石溶解困难,导致脱硫效率降低。为了尽可能贴合工程实际,本次试验设计了 5.9、6.0、6.1、6.2、6.3、6.4 6 个 pH 工况。同时通过调节浆液排出泵流量的方式调整浆液池氨氮浓度,设计 3 个工况考察浆液氨氮浓度对逃逸氨脱除效率的影响。

### 2.3 烟气成分检测方法

本次试验设置 2 个测点,分别位于布袋除尘器后和烟囱出口处。烟气中气态氨浓度测量采用氨逃逸在线分析仪,参照《燃煤电厂烟气脱硝装置性能验收规范》(DL/T 260—2012)。脱硫浆液中氨氮含量检测方法参照 HJ 535—2009,采用纳氏试剂分光光度法。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 脱硫塔液气比的影响

由于氨气易溶于水的特性,浆液的喷淋量及喷淋重叠度对氨脱除效率有很大的影响。为了研究脱硫塔液气比对脱硫塔氨脱除效率的影响,本次试验通过调整喷淋层的开启设计了  $4.7、7.0 \text{ L/m}^3$  2 个工况。图3为不同液气比下湿法脱硫塔出口烟气中  $\text{NH}_3$  浓度对比图。由表1可知,湿法脱硫塔对于烟气中的气态氨具有极强的脱除能力,在液气比为  $4.7、7.0 \text{ L/m}^3$  工况下气态氨脱除效率均稳定在 85%以上,说明湿法脱硫系统能够有效吸收脱硝系统逃逸出的  $\text{NH}_3$ 。当液气比增大时,脱硫浆液的喷淋量和喷淋重叠度也随之增大,有利于提升脱硫浆液对气态氨的捕集概率。同时,由于湿法脱硫系统

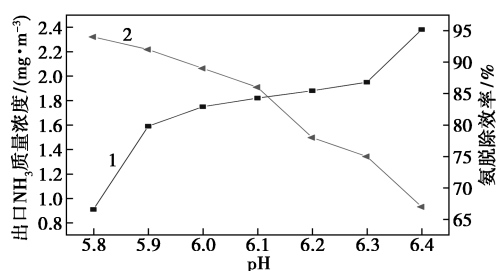
对烟气颗粒物具有一定的脱除能力,吸附于颗粒物表面的氨也随之被浆液脱除。由于湿法脱硫系统对氨具有很强的脱除能力,烟气中的气态氨以及吸附于飞灰表面的氨转移至脱硫浆液中,造成脱硫废水氨氮浓度升高。

表 1 液气比对脱硫系统出口氨质量浓度的影响

试验序号	液气比/(L·m <sup>-3</sup> )	氨脱除效率/%
1	4.7	86.0
2	7.0	92.5

### 3.2 脱硫浆液 pH 的影响

试验过程中通过增加浆液投入量来调节脱硫浆液的 pH,以研究浆液 pH 对氨脱除效率的影响。试验结果如图 3 所示,由图 3 可知当浆液 pH 由 5.8 上升至 6.4 时,脱硫系统对氨的脱除效率逐渐降低。分析原因认为,由于塔内浆液在参与脱硫反应时,逆向与烟气接触,吸收了烟气中的酸性气体 SO<sub>2</sub>、HF 和 HCl 而呈酸性。在酸性环境下,NH<sub>3</sub> 溶解于水生成的水合氨将很快发生电离反应,生成游离的铵离子。



1—出口 NH<sub>3</sub> 质量浓度;2—NH<sub>3</sub> 脱除效率

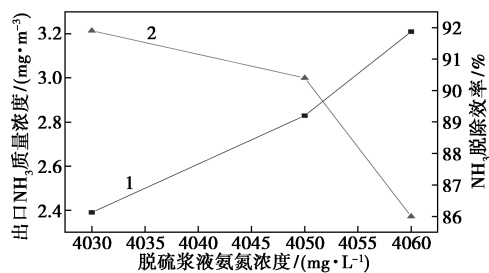
图 3 脱硫浆液 pH 对逃逸氨脱除效率的影响

当浆液 pH 升高时,化学平衡向右移动,导致脱硫浆液挥发出来的 NH<sub>3</sub> 增多,进而降低脱硫塔氨脱除效率。

### 3.3 脱硫浆液氨氮浓度的影响

由 3.1 节可知在湿法脱硫系统运行过程中,烟气中 NH<sub>3</sub> 会转移至脱硫浆液中,造成浆液氨氮浓度不断升高,进而对氨脱除效率造成影响。试验过程中通过改变脱硫废水排出泵的流量来调节浆液池氨氮质量浓度,以研究浆液氨氮浓度对氨脱除效率的影响规律,试验结果如图 4 所示。可见,当浆液池氨氮浓度上升时,逃逸氨的脱除效率有明显的下降。分析原因认为,由于 NH<sub>3</sub> 溶解于水生成的一水合氨稳定性较弱,在浆液与烟气接触时,烟气余热使脱硫浆液中的一水合氨发生分解,导致被浆液吸收的 NH<sub>3</sub> 再次挥发出来。因此浆液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 浓度越高,挥

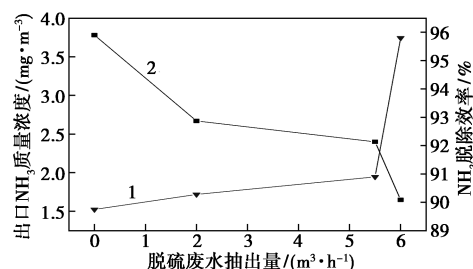
发出的 NH<sub>3</sub> 越多,氨脱除效率也随之降低。



1—出口 NH<sub>3</sub> 质量浓度;2—NH<sub>3</sub> 脱除效率

图 4 脱硫浆液氨氮浓度对逃逸氨脱除效率的影响

为了进一步研究浆液氨氮浓度对于氨脱除效率的影响,本次实验还考察了脱硫废水排出量对脱硫系统对氨脱除效率的影响,试验结果如图 5 所示。可见,氨脱除效率随脱硫废水抽出量的增加而提升。分析原因认为脱硫系统在抽出脱硫废水后,降低了浆液中氨氮浓度,从而减少了因一水合氨受热挥发而产生的 NH<sub>3</sub> 物质的量。从检测结果可知脱硫废水中含有高浓度的氨氮,后续应对脱硫废水做进一步的处理。



1—出口 NH<sub>3</sub> 质量浓度;2—NH<sub>3</sub> 脱除效率

图 5 脱硫废水流量对逃逸氨脱除效率的影响

## 4 结论

(1) 湿法脱硫系统可有效脱除烟气系统逃逸氨。通过试验证明湿法脱硫塔烟气出口 NH<sub>3</sub> 浓度可以由 30 mg/m<sup>3</sup> 降低至 5 mg/m<sup>3</sup> 以下,氨脱除效率稳定在 85% 以上。

(2) 增大湿法脱硫系统液气比有利于提高氨脱除效率。在液气比由 4.3 L/m<sup>3</sup> 提高到 7.0 L/m<sup>3</sup> 时,氨脱除效率由 86% 可提高到 92.5%。

(3) 湿法脱硫系统浆液吸收水泥窑炉烟气中逃逸 NH<sub>3</sub> 后会导致浆液中氨氮浓度升高,降低湿法脱硫系统对氨脱除效率。氨氮浓度由 4.03×10<sup>3</sup> mg/L 升高至 4.06×10<sup>3</sup> mg/L 时,氨脱除效率由 91.9% 降

(下转第 235 页)

95%, 沸程也满足国家对芳烃溶剂油的指标。最终的溶剂油产品性能参数见表 6。

表 6 最终产品性能

指标	SA-1000	SA-1500
初馏点/°C	159.5	177.2
终馏点/°C	177.2	209.9
芳烃含量/%	99.8	95.2

## 5 结论

(1) 以重汽油综合利用为背景, 提出了以重汽油为原料的溶剂油生产工艺, 即先通过萃取精馏将原料中芳烃提浓, 再通过后续溶剂油精制单元生产满足牌号的溶剂油产品。

(2) 对萃取精馏单元的溶剂进行了筛选与设计, 首先确定使用环丁砜为基础溶剂, 并通过筛选进一步确定苯为复配组分。

(3) 针对该工艺优化操作参数, 根据现有原料, 优化得出混合溶剂复配比为环丁砜: 苯 = 7:1, 溶剂比为 3, 萃取精馏塔原料进料位置为第 26 块板, 萃取剂进料位置为第 4 块板, 理论塔板数 33, 回流比 0.3, 溶剂回收塔理论板数为 32, 进料位置为第 18 块板, 回流比为 1, 为后续重汽油制芳烃溶剂油工业生产提供指导。

## 参考文献

- [1] 陈晓响. 利用炼厂轻烃拓展化工产业链方案[J]. 现代化工, 2019, 39(7): 1-5.
- [2] 门秀杰, 孙海萍, 雷强. 我国芳烃行业前景展望及发展建议[J]. 现代化工, 2019, 39(3): 1-4, 6.
- [3] 宋昌才, 邓中活, 牛传峰. 重油生产低碳烯烃等化工品技术研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(S1): 86-94.
- [4] 叶芳芳, 张帅, 李长刚, 等. 生产清洁汽油技术的研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(7): 71-74, 76.

(上接第 228 页)

低至 86.0%。在运行过程中及时排放脱硫废水可有效降低脱硫塔出口氨逃逸量。

(4) 降低湿法脱硫系统浆液 pH 有利于提高氨脱除效率。当浆液 pH 由 5.8 升高至 6.4 时, 氨脱除效率由 94% 降低至 67%。

## 参考文献

- [1] 河北水泥工业大气污染物排放标准(征求意见稿)[EB/OL]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20191010/1011776.shtml>.
- [2] 周荣, 吴建, 朱俊. 水泥厂超低排放标准及技术研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(6): 788-794.

- [5] 刘毓敏, 牟永波, 乔海燕, 等. 乙炔焦油综合利用研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(6): 42-46.
- [6] 方向晨, 郭蓉, 仝玉军, 等. 典型炼化一体化企业生产低硫船用燃料油的重油加工方案比较[J]. 化工进展, 2021, 40(7): 3703-3710. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1616.
- [7] 臧甲忠, 郭春垒, 范景新, 等. C<sub>9</sub>+重芳烃增产 BTX 技术进展[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1278-1287.
- [8] 唐卫东. 连续重整重芳烃综合利用工艺的探讨[J]. 石油炼制与化工, 2006, (11): 35-39.
- [9] 任慧勇, 杨卫兰, 张蓓. 中国重整 C<sub>9</sub>+重芳烃分离和利用机会分析[J]. 现代化工, 2020, 40(8): 11-14, 20.
- [10] 杨明磊, 徐志海, 李智. 芳烃生产工艺改进与经济性分析[J]. 现代化工, 2020, 40(10): 207-211.
- [11] 王祥祥, 韩东敏, 张倩, 等. 低共熔溶剂萃取精馏分离乙醇-水共沸物的研究[J]. 现代化工, 2019, 39(3): 223-226.
- [12] 翟建, 刘育良, 李鲁闽, 等. 萃取精馏分离苯/环己烷共沸体系模拟与优化[J]. 化工学报, 2015, 66(9): 3570-3579.
- [13] 袁倩, 陈冰, 公茂柱, 等. 重石脑油萃取脱芳烃技术基础研究[J]. 应用化工, 2015, (S1): 69-72.
- [14] Qin Wang, Jing Y Chen, Ming Pan, et al. A new sulfolane aromatic extractive distillation process and optimization for better energy utilization[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018, 128: 80-95.
- [15] Renon H, Prausnitz J M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures[J]. AIChE Journal, 1968, 14(1): 135-144.
- [16] Yu Y X, He M Y, Gao G H, et al. Boiling points for five binary systems of sulfolane with aromatic hydrocarbons at 101.33 kPa[J]. Fluid Phase Equilibria, 2001, 190(1/2): 61-71.
- [17] Wang Z, Huang L, Xia S, et al. Isobaric (vapour+liquid) equilibria for sulfolane with toluene, ethylbenzene, and isopropylbenzene at 101.33 kPa[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2011, 43(12): 1865-1869.
- [18] 黄垒. 以环丁砜为溶剂的芳烃抽提体系相平衡研究及流程模拟[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [19] 李鹏, 李晗. 重整抽提装置环丁砜在线再生技术应用[J]. 现代化工, 2014, 34(10): 135-138.
- [20] Habaki H, Yoshimura Y, Egashira R. Separation of aromatic components from light cycle oil by solvent extraction[J]. Separation Science and Technology, 2019, 54(7): 1159-1166. ■
- [3] 程滕, 杨林军, 孙稚权. 湿法脱硫系统对脱硝产生逃逸氨的脱除特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2020, 50(3): 530-536.
- [4] 马双忱, 邓悦, 吴文龙, 等. SCR 脱硝过程中硫酸氢铵形成特性实验研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(2): 143-150.
- [5] 李小龙, 朱法华, 段玖祥, 等. 600MW 燃煤机组逃逸氨迁移规律与排放特性[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 1-9.
- [6] 杨建国, 杨伟樱, 郑方栋, 等. NH<sub>3</sub> 和 SO<sub>3</sub> 对硫酸氢铵和硫酸铵生成的影响[J]. 燃料化学学报, 2018, 46(1): 92-98.
- [7] Cheng T, Zheng C, Yang L J, et al. Effect of selective catalytic reduction denitrification on fine particulate matter emission characteristics[J]. Fuel, 2019, 238: 18-25.
- [8] 余其俊, 陈容, 张同生, 等. 水泥工业烟气脱硫脱硝技术研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7): 2015-2032.
- [9] Brendel G F, Bonetti J E, Rarhbone R F, et al. Investigation of NH<sub>3</sub> adsorption on fly ash due to installation of selective catalytic reduction systems[R]. US Department of Energy, 2000. ■