

# 喷氨调平技术在燃煤锅炉 SCR 法 烟气脱硝中的应用

郭明远\*, 李磊, 金平, 陈新, 李欣

(中石化(大连)石油化工研究院有限公司, 辽宁大连 116045)

**摘要:**我国大部分火电机组使用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术对锅炉烟气进行 $\text{NO}_x$ 脱除,以满足日趋严格的环保要求。但在锅炉装置实际运行过程中,经 SCR 反应器脱硝处理后,锅炉烟气出口仍普遍出现 $\text{NO}_x$ 浓度分布不均现象,造成出口 $\text{NO}_x$ 排放超过标准要求,同时也增加了氨逃逸风险。以某公司的燃煤锅炉脱硝装置为例,分析喷氨调平改造前后烟气中氨逃逸指标和 $\text{NO}_x$ 浓度数据的差异,从而论证喷氨调平技术在控制氨逃逸及 $\text{NO}_x$ 脱除中所起到的作用。

**关键词:**喷氨调平;燃煤锅炉;SCR;烟气; $\text{NO}_x$

**中图分类号:**TK09

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2024)11-0228-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.11.040

## Application of ammonia injection adjusting technology in SCR denitration of flue gas from coal-fired boiler

GUO Ming-yuan\*, LI Lei, JIN Ping, CHEN Xin, LI Xin

(SINOPEC Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Co., Ltd., Dalian 116045, China)

**Abstract:** Most of China's thermal power units employ selective catalytic reduction (SCR) technology to remove  $\text{NO}_x$  from coal-fired boiler flue gas to meet the increasingly stringent environmental protection requirement. However, during the actual operation, after denitrification treatment by the SCR reactor, uneven distribution of  $\text{NO}_x$  concentration still commonly occurs at the flue gas outlet, resulting in  $\text{NO}_x$  emission exceeding the standard requirements and increasing the risk of ammonia escape. Taking the denitration unit of coal-fired boiler in a company as an example, the differences of ammonia escape index and  $\text{NO}_x$  concentration data in flue gas before and after ammonia injection adjusting transformation are analyzed, so as to demonstrate the role of ammonia injection adjusting technology in controlling ammonia escape and removing  $\text{NO}_x$ .

**Key words:** ammonia injection adjusting; coal-fired boilers; selective catalytic reduction; flue gas; nitrogen oxide

近年来我国环境空气质量稳中向好,但秋冬季节大气污染依然较重,区域性重污染天气也时有发生<sup>[1]</sup>。其中燃煤锅炉氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放浓度是关键因素之一<sup>[2]</sup>,对此国家连续出台相关政策以指导生产企业降低此类污染。相较于 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》中对燃煤锅炉氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放浓度限制为 $100 \text{ mg/m}^3$ ,国家相关部门新出台的《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》对燃煤机组氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放浓度给出了更为严格的要求,需要控制在 $50 \text{ mg/m}^3$ 以下<sup>[3]</sup>。因此,对于燃煤锅炉氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放浓度控制技术的研究是当前的重要课题。

国内某公司为满足当地环保要求,对所用燃煤锅炉进行了喷氨调平改造,取得了显著的成效。本文中以该公司热电部燃煤锅炉为例,分析喷氨调平改造前后烟气中氨逃逸指标和 $\text{NO}_x$ 浓度数据的差异,从而论证喷氨调平技术在控制氨逃逸及 $\text{NO}_x$ 脱除中所起到的作用,为实现低能耗、高效率的烟气脱

硝和超低排放环保治理做出贡献。

## 1 喷氨调平技术介绍

喷氨调平技术是通过在 SCR 脱硝反应器入口上游烟道内综合应用喷氨格栅、烟气导流板、烟气折流板及整流格栅等方法,使锅炉在不同的负荷与煤质工况条件下,实现脱硝反应器入口烟气流场、 $\text{NH}_3$ 与 $\text{NO}_x$ 浓度场的均匀平整分布<sup>[4]</sup>,其中喷氨格栅起到关键作用。目前,喷氨格栅按照结构特点分为线性控制喷氨格栅,分区控制喷氨格栅和静态混合喷氨格栅 3 大类<sup>[5-6]</sup>。

### 1.1 线性控制喷氨格栅

线性控制喷氨格栅的工作原理是沿着与烟道互相垂直的 2 个方向各引出许多根喷氨管,每根喷氨管上又设置多个喷氨喷嘴,每根喷氨管的流量可以进行单独调节,从而使得喷氨管喷出的氨量与烟气中氮氧化物( $\text{NO}_x$ )含量相匹配。

线性控制喷氨格栅的主要优点是在满足结构筒

收稿日期:2024-01-09;修回日期:2024-09-10

基金项目:大连市重点领域创新团队支持计划(2021RT12)

作者简介:郭明远(1990-),男,硕士,助理研究员,研究方向为环境治理及环保设备开发,通讯联系人,guomingyuan.fshy@sinopec.com。

单、系统压降小的同时,其建设维护成本低,操控使用简单。缺点是只能调节整根管的喷氨流量,同一根管上各个喷嘴的流量无法调节,因而不能适应烟气横截面  $\text{NO}_x$  分布不均匀的状况,对下游导流板、折流板和整流格栅的依赖程度高;同时,由于喷嘴数量多、喷嘴口径小,导致制造成本高,喷嘴容易堵塞,存在喷氨不均匀的状况<sup>[6-8]</sup>。

### 1.2 分区控制喷氨格栅

分区控制喷氨格栅是对线性控制喷氨格栅的改进产物,工作原理是把烟道横截面分成许多个大小相等区域,在每个区域内布置若干个喷氨喷嘴,每个区域内的喷嘴喷氨量可以单独控制,从而实现喷氨管喷出的氨量与烟气中氮氧化物( $\text{NO}_x$ )含量相匹配<sup>[6-8]</sup>。

分区控制喷氨格栅的主要优点是能适用在烟道横截面积大、烟气中  $\text{NO}_x$  浓度分布严重不均或需要高效脱硝等工况<sup>[9]</sup>。同时,由于分区控制喷氨格栅每个区域内的喷嘴喷氨量可以单独控制,从而克服了线性控制喷氨格栅调节性能差的缺点。但分区控制喷氨格栅控制相对复杂、系统整体联动性强、对操作人员操作水平要求高。

### 1.3 静态混合喷氨格栅

静态混合喷氨格栅的工作原理是在烟道截面上布置几个到几十个直径较大的喷氨喷嘴,这些喷氨喷嘴与其下游位置上的静态混合器数量一致,同时喷嘴位置与静态混合器的扰流叶片保持对应。喷氨喷嘴喷射出的  $\text{NH}_3$  与烟气中的  $\text{NO}_x$  混合后,在静态混合器扰流叶片的作用下形成稳定的涡流或旋流,从而加强了混合烟气的扰动,强化了混合烟气的湍流扩散。

静态混合喷氨格栅的主要优点是喷氨喷嘴的孔径较大,喷嘴发生堵塞的几率小;同时,静态混合喷氨格栅的喷嘴数量较少,加工成本低,具有不错的工况操作弹性,系统综合效果好。缺点是下游位置上布置的静态混合器结构相对复杂,烟气混合距离较长,压降较大<sup>[6-8]</sup>。

3 大类喷氨格栅优缺点对比见表 1。

表 1 3 大类喷氨格栅优缺点详细对比表

名称	优点	缺点
线性控制喷氨格栅	结构简单,系统压降小,建设维护成本低,操控使用简单	只能调节整根母管的喷氨流量;喷嘴数量多、喷嘴口径小,制造成本高;喷嘴容易堵塞,存在喷氨不均匀的状况

分区控制喷氨格栅	能适用在烟道横截面积大、烟气中 $\text{NO}_x$ 浓度分布严重不均或需要高效脱硝等工况;每个区域内的喷嘴喷氨量可以单独控制,调节性能强	控制复杂、系统整体联动性强、对操作人员操作水平要求高
静态混合喷氨格栅	喷嘴孔径较大,发生堵塞的几率小;喷嘴数量较少,加工成本低,系统综合效果好	静态混合器结构相对复杂,烟气混合距离较长,压降较大

## 2 喷氨调平技术应用

### 2.1 情况介绍

国内某公司热电部燃煤锅炉额定蒸发量为 490 t/h,采用 SCR 烟气脱硝工艺,按照锅炉 SCR 脱硝装置出口  $\text{NO}_x$  含量  $\leq 100 \text{ mg/m}^3$  进行设计,设置有 3 层催化剂床层,实装 2 层,备用 1 层。在燃煤锅炉执行超低排放标准后,锅炉已投用备用催化剂床层,且增大了喷氨量,但仍难以满足 SCR 脱硝装置出口  $\text{NO}_x$  浓度长期稳定  $\leq 50 \text{ mg/m}^3$  的要求,并存在喷氨系统喷嘴结垢、 $\text{NO}_x$  浓度偏差大、氨逃逸率高等问题。

针对上述负面问题,为满足最新的环保要求,该公司热电部对燃煤锅炉烟气脱硝系统进行了喷氨调平改造。

### 2.2 喷氨格栅优化改造

该公司原有脱硝单元所采用的静态混合喷氨格栅,并未对喷氨段烟道横截面做分区,喷氨管采用“大直径单根母管+双支管”的形式(如图 1 所示)。

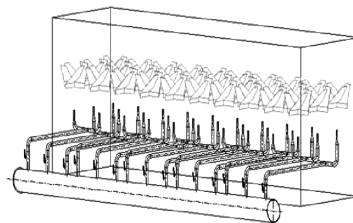


图 1 原有脱硝单元静态混合喷氨格栅

相较于该公司现有脱硝单元所采用的静态混合喷氨格栅,分区控制喷氨格栅对于烟气中  $\text{NO}_x$  浓度分布严重不均或需要高效脱硝等工况有着更好的效果。从而解决  $\text{NO}_x$  浓度偏差大、氨逃逸率高的问题。同时,分区控制喷氨格栅每个区域内的喷嘴喷氨量可以单独控制,调节性能优越。故而经过技术比选,采用分区控制喷氨格栅进行改造,设计图如

图 2 所示。

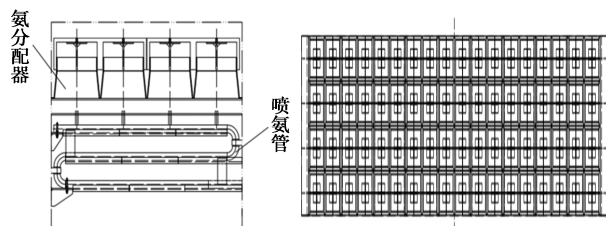


图 2 分区控制喷氨格栅设计图

针对喷氨系统喷嘴结垢的问题,将原有的“大直径单根母管”改为“小直径蛇形盘管”,从而增强氨气与烟气的换热,提升氨气进入烟道的温度。

### 3 改造效果

#### 3.1 NO<sub>x</sub> 浓度

##### 3.1.1 NO<sub>x</sub> 浓度计算方法说明

依据 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》修正到标准状态,其中燃煤锅炉的基准氧含量为 6%,在干基时,烟气中 NO<sub>x</sub> 的浓度计算公式为:

$$NO_x = 2.05 \times (NO/0.95) \times [(21 - 6)/(21 - O_2)]$$

式中,NO<sub>x</sub> 为标态、干基、基准氧含量(6%)时,烟气中氮氧化物排放浓度,mg/m<sup>3</sup>;O<sub>2</sub> 为实测干烟气中氧含量,%;NO 为实测干烟气中一氧化氮体积含量,μL/L;0.95 为按照经验数据选取的一氧化氮占氮氧化物总量的体积分数(即一氧化氮占 95%);2.05 为二氧化氮由体积含量 μL/L 转换为 mg/m<sup>3</sup> 的转换系数。

##### 3.1.2 锅炉改造前后 SCR 反应器出口 NO<sub>x</sub> 浓度对比

锅炉改造前后 SCR 反应器出口 NO<sub>x</sub> 数值测定数据比对如表 2 所示。喷氨调平改造措施实施以后,在保障氨逃逸率 ≥ 2.5 mg/m<sup>3</sup> 的前提下,锅炉 SCR 反应器出口 NO<sub>x</sub> 浓度最大偏差 < 15 mg/m<sup>3</sup>,而改造前的最大 NO<sub>x</sub> 浓度偏差为 30 mg/m<sup>3</sup> 左右。考

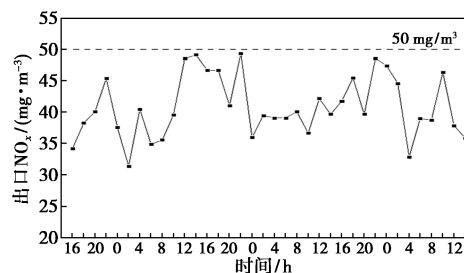
表 2 燃煤锅炉改造前后 SCR 反应器出口 NO<sub>x</sub> 浓度对比

出口 NO <sub>x</sub> 浓度	锅炉负荷/(t·h <sup>-1</sup> )	位置								最大浓度偏差/(mg·m <sup>-3</sup> )	
		1	2	3	4	5	6	7	8		
A 区	改造前	400	27	32	30	31	37	67	72	50	28.75
	改造后	400	44	42	46	50	52	50	52	54	6.75
B 区	改造前	400	32	32	24	30	23	41	64	70	30.5
	改造后	400	16	18	24	20	18	12	12	14	7.25

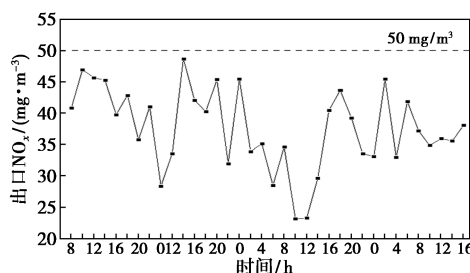
虑到催化剂活性、密封、负荷波动等原因,在催化剂按照正常规定轮动更换的前提下,SCR 反应器出口实际 NO<sub>x</sub> 值可控制在 20 mg/m<sup>3</sup> 左右。

##### 3.1.3 锅炉出口净化烟气 NO<sub>x</sub> 浓度

分别考察燃煤锅炉变工况和稳定工况下锅炉出口净化烟气 NO<sub>x</sub> 浓度情况。每隔 2 h 对燃煤锅炉 DCS 上脱硫塔出口烟气的 NO<sub>x</sub> 浓度进行记录并作图(见图 3)。



(a) 变工况



(b) 稳定工况

图 3 燃煤锅炉烟气 NO<sub>x</sub> 浓度

由图 3 可得,燃煤锅炉出口净化烟气的 NO<sub>x</sub> 浓度均小于 50 mg/m<sup>3</sup>,满足喷氨调平技术改造考核指标的要求(≤50 mg/m<sup>3</sup>)。

#### 3.2 氨逃逸

##### 3.2.1 氨逃逸率计算方法说明

氨的逃逸率是指脱硝系统运行时反应器出口处氨的浓度,氨逃逸数值由体积分数转化为质量浓度的计算公式为:

$$NH_3' = NH_3 \times (17.03/22.4)$$

式中,NH<sub>3</sub>' 为烟气中逃逸氨的质量浓度,mg/m<sup>3</sup>;NH<sub>3</sub> 为烟气中逃逸氨的体积分数,10<sup>-6</sup>。

##### 3.2.2 改造后燃煤锅炉稳定工况和变工况氨逃逸数值

分别考察燃煤锅炉变工况和稳定工况下的氨逃逸情况。每隔 2 h 对燃煤锅炉 DCS 上脱硝净化烟气的氨逃逸数值进行记录,将氨逃逸数值由体积浓度换算为质量浓度。由图 4 可得,喷氨调平后燃煤锅炉净化烟气的氨逃逸数值较为平稳,且氨逃逸数值均 ≤ 1.5 mg/m<sup>3</sup>,大部分氨逃逸数值 ≤ 1.0 mg/m<sup>3</sup>。

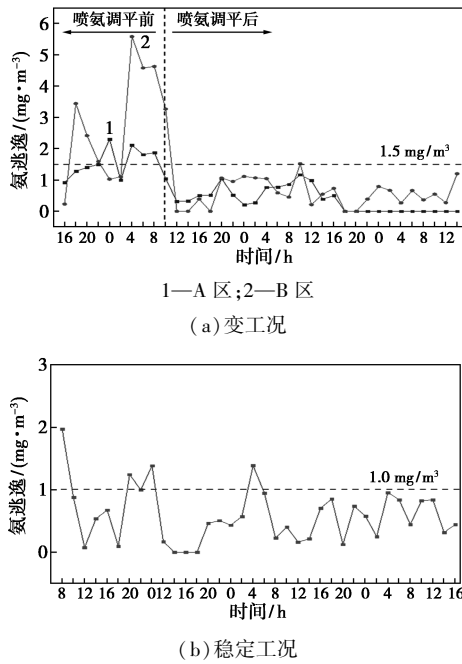
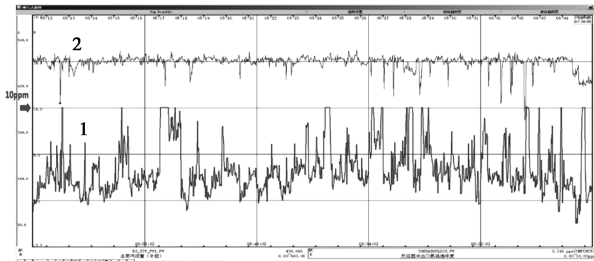


图4 燃煤锅炉烟气氨逃逸数值

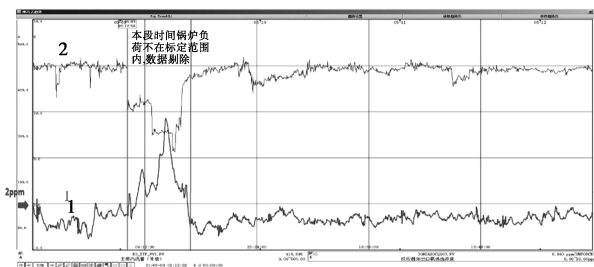
### 3.2.3 改造前后燃煤锅炉氨逃逸对比

改造前燃煤锅炉氨逃逸如图5所示,其中,曲线1为氨逃逸曲线,曲线2为锅炉负荷,从图中可以看出,氨逃逸波动范围较大,并时常达到满量程  $10 \times 10^{-6}$ ,氨逃逸平均值约为  $5.5 \times 10^{-6}$ 。进行喷氨调平技术改造后,如图6所示,氨逃逸均小于  $2 \times 10^{-6}$ ,由图5和图6对比可得,本次喷氨调平改造后,脱硝氨逃逸大幅降低。



1—氨逃逸;2—锅炉负荷

图5 燃煤锅炉烟气氨逃逸变化曲线(改造前)



1—氨逃逸;2—锅炉负荷

图6 燃煤锅炉烟气氨逃逸变化曲线(改造后)

### 3.3 烟气流速分布及偏差

分别对改造后的燃煤锅炉A区和B区脱硝反应器入口烟道内的烟气流速进行测量,A区和B区脱硝反应器入口烟道内的烟气流速及其绝对偏差,烟气流速及其最大相对偏差如表3、表4所示。

表3 燃煤锅炉A区和B区脱硝反应器烟气流速及绝对偏差

取样位置	A区		B区	
	烟气流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对偏差	烟气流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	绝对偏差
1	18.2	0.3	14.5	0.1
2	17.0	1.5	14.5	0.1
3	20.4	1.9	14.8	0.2

表4 燃煤锅炉A区和B区烟气流速及最大相对偏差

取样次数	取样点	A区		B区	
		烟气流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	最大相对偏差/%	烟气流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	最大相对偏差/%
1	a	17.8	7.05	24.5	13.79
	b	18.6		20.1	
	c	20.2		20.0	
2	a	17.2	6.67	23.0	12.36
	b	18.5		19.0	
	c	19.6		19.4	
3	a	17.6	8.02	22.5	11.39
	b	19.0		19.0	
	c	20.6		19.1	
4	a	17.8	8.58	24.2	10.35
	b	19.5		20.4	
	c	21.1		21.2	

衡量烟气均匀性标准的为烟气流速相对偏差值,行业标准控制值为  $\leq 15\%$ ,由表4可知喷氨调平改造后烟气流速最大相对偏差均在15%范围内,故改造后烟道内烟气流速较为均匀。

## 4 结语

(1)喷氨调平技术改造前,燃煤锅炉A区、B区出口烟气中氮氧化物( $NO_x$ )的最大浓度偏差分别为28.75、30.5  $mg/m^3$ ;氨逃逸波动范围较大,并时常达到满量程  $10 \times 10^{-6}$ ,净化烟气的氨逃逸平均值约为  $5.5 \times 10^{-6}$ 。喷氨调平技术改造后,燃煤锅炉A区、B区出口烟气中氮氧化物( $NO_x$ )的最大浓度偏差分别降低至6.75、7.25  $mg/m^3$ ;氨逃逸数值较为平稳,净化烟气的氨逃逸均小于  $2 \times 10^{-6}$  ( $< 1.5 mg/m^3$ )。燃煤锅炉SCR法烟气脱硝喷氨调平技术,利用原有的脱硝装置,只对脱硝反应器前的喷氨混合系统进行改造,通过采用分区喷氨、更换喷氨格栅内构件、

(下转第236页)

通过高级焓分析结果表明,大部分设备的焓损由自身不可逆性造成的,提高设备自身的工作性能,能够减少系统运行过程中的能量损失,此外对系统的焓损分类表明,可避免内源焓比例最高,证明流程中能量利用效率改进空间较大。

#### 4 结论

我国存在大量规模较小的油田伴生气,由于没有合理且经济的回收技术,这些资源大部分被浪费,本文中以某油田伴生气为研究基础,提出 GSP 与混合冷剂制冷液化联产工艺方案,通过从流程能耗、常规焓分析、高等焓分析等角度对流程进行研究和对比,主要结论如下。

(1) GSP 与混合冷剂制冷液化联产方案可有效实现油田伴生气的综合利用,可以提高整体系统的热集成度,为油气田带来良好的社会效益和经济效益。

(2) 通过常规焓分析方法对液化联产方案中设备进行有效能利用分析,发现液化联产方案中换热器、压缩机以及水冷器焓损较大。

(3) 根据高级焓进一步进行分析,进一步揭示系统改进潜力。高等焓分析发现,大多数设备总焓损中可避免内源焓损占比最高。压缩机数量多,可避免内源焓损比例高,对压缩机效率进行改进,是减小流程焓损最有效的措施。其次通过减小冷箱夹点温度,提升脱乙烷塔焓效率也可大幅降低流程总焓损。空冷器的可避免内源焓损和可避免外源焓损占

比均较高,降低空冷器焓损不仅可从自身内源焓损入手,还可改善其他设备性能降低空冷器焓损。

#### 参考文献

- [1] 许冬进. 油田伴生气高效回收和利用研究 [C]. 2015 年全国天然气学术年会, 2015: 682-687.
- [2] 邓骥, 魏芳, 申世勇, 等. 基于 RSM 的轻烃回收装置  $C_3$  收率分析及优化 [J]. 现代化工, 2016, 36(8): 178-181, 183.
- [3] 向辉, 蒲红宇, 卫浪. 基于 PSO 算法的 GSP 流程  $C_3$  轻烃回收参数优化 [J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2020, 45(3): 70-74, 127.
- [4] 陈波, 李莎, 沈丽军, 等. DHX 工艺丙烷收率理论计算公式推导及影响因素研究 [J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2021, 46(1): 61-65.
- [5] He T B, Ju Y L. A novel process for small-scale pipeline natural gas liquefaction [J]. Applied Energy, 2014, 115: 17-24.
- [6] Amidpour M. Exergetic and economic assessment of oxygen production from two columns cryogenic air separation unit [J]. Energy, 2015, 90(2): 1298-1316.
- [7] Chen J, Havtun H, Palm B. Conventional and advanced exergy analysis of an ejector refrigeration system [J]. Applied Energy, 2015, 144: 139-151.
- [8] Tao B, Yu J, Gang Y. Advanced exergy analysis on a modified auto-cascade freezer cycle with an ejector [J]. Energy, 2016, 113: 385-398.
- [9] Kelly S. Energy systems improvement based on endogenous and exogenous exergy destruction [D]. Berlin: Technische University, 2008.
- [10] Ansarinab H, Mehrpooya M, Mohammadi A. Advanced exergy and exergoeconomic analyses of a hydrogen liquefaction plant equipped with mixed refrigerant system [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144: 248-259.
- [11] Zhang S J, Jing J Q, Jiang H, et al. Advanced exergy analyses of modified ethane recovery processes with different refrigeration cycles [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119982.
- [12] Fallah M, Mahmoudi S M S, Yari M, et al. Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 108: 190-201. ■

(上接第 231 页)

优化导流板、折流板及整流格栅等,实现锅炉烟气脱硝系统的喷氨调平,降低氨逃逸。改造完成投用后,锅炉运行状况稳定,喷嘴结垢问题得到极大的改善,氨逃逸率和  $NO_x$  浓度均满足相应指标。

(2) 燃煤锅炉 SCR 法烟气脱硝喷氨调平技术目前已应用于多套装置,技术比较成熟,能够有效地控制锅炉外排烟气中的氮氧化物 ( $NO_x$ ) 浓度,同时氨逃逸控制效果十分显著。随着环保标准的日益严格以及工程设计手段的日渐丰富,喷氨调平技术会得到更广泛的应用与改进优化。在国家可持续发展战略及空气质量持续改善行动计划下,为实现低能耗、高效率的烟气脱硝和超低排放环保治理贡献力量。

#### 参考文献

- [1] 黄润秋. 国务院关于 2021 年度环境状况和环境保护目标完成情况

况的报告 [J]. 环境保护, 2022, 50(8): 8-11.

- [2] 尹海芮; 王远洋. 燃煤电厂烟气脱硝废弃 SCR 催化剂的再生和回收研究进展 [J]. 现代化工, 2019, 39(9): 16-20.
- [3] 王明星, 李欣, 李勇, 等. 分区控氨技术在烟气  $NO_x$  超低排放中的应用 [J]. 化工环保, 2021, 41(4): 524-528.
- [4] 海坤, 尹晓春, 刘隆键, 等. 烧结烟气 SCR 脱硝系统流场模拟及导流结构优化 [J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(4): 89-95.
- [5] 曹志勇, 谭城军, 李建中, 等. 燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统喷氨优化调整试验 [J]. 中国电力, 2011, 44(11): 55-58.
- [6] 韩发年, 闫志勇. SCR 烟气脱硝工艺喷氨混合装置研究进展 [J]. 化工进展, 2015, 34(12): 4151-4157.
- [7] 张云. 燃煤机组 SCR 脱硝系统 AIG 喷氨优化调整 [J]. 中国高新技术企业, 2014, (21): 49-50.
- [8] 徐波, 陈锋, 孙滴清, 等. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝喷氨静态混合技术研究 [J]. 能源与节能, 2017, (10): 86-87.
- [9] Nischt W, Bigalbal J, Wooldridge B. Recent SCR retrofit experience on coal-fired boilers [R]. New Orleans: U. S. Babcock & Wilcox, 2009. ■