

# 火电厂回转式空预器的堵塞调研及 解决方案研究

陈海玲<sup>1\*</sup>, 姬鄂豫<sup>1</sup>, 姚杰新<sup>2</sup>, 朱元良<sup>1</sup>

(1. 南阳理工学院生物与化学工程学院, 河南 南阳 473004;  
2. 郑州赛为机电设备有限公司, 河南 郑州 450001)

**摘要:**详细调研了火电厂空预器发生堵塞的各种原因, 认定空预器内生成硫酸氢铵是重要原因。进一步讨论了导致空预器入口  $\text{SO}_3$  浓度高的因素, 发现硫酸氢铵的生成速率与  $\text{SO}_3$  浓度呈正比; 提出了解决空预器堵塞最好的办法是降低空预器入口  $\text{SO}_3$  浓度, 即在空预器入口或 SCR 出口等处喷射碳酸钠或注入其他碱性吸附剂来降低空预器入口  $\text{SO}_3$  浓度, 指出此方法中核心技术是喷射系统。对于已经堵塞的空预器, 提出采用化学清洗方法来提高清洗效果。

**关键词:** 回转式空预器; 堵塞; 硫酸氢铵; 化学清堵

中图分类号: X773

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)10-0195-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.10.043

## Investigation and solution for blocking problem in rotary air preheater of thermal power plant

CHEN Hai-ling<sup>1\*</sup>, JI E-yu<sup>1</sup>, YAO Jie-xin<sup>2</sup>, ZHU Yuan-liang<sup>1</sup>

(1. School of Biological and Chemical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;  
2. Zhengzhou Saiwei Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The causes of clogging happened in air preheater of thermal power plant are investigated in detail. It is confirmed that the formation of ammonium bisulfate in air preheater is an important cause for clogging. The factors causing high concentrations of  $\text{SO}_3$  in air preheater inlet are discussed further. It is found that the formation rate of ammonium hydrogen sulfate is proportional to the concentration of  $\text{SO}_3$ . Thus, the best way to solve the air preheater clogging is to reduce  $\text{SO}_3$  concentration in air preheater inlet, i. e., sodium carbonate or other alkaline adsorbent is injected at the places such as the entrance of air preheater or the exit of SCR. The injection system is the core technology of this method. In addition, chemical cleaning method is proposed for the clogged air preheater.

**Key words:** rotary air preheater; clogging; ammonium bisulfate; chemistry-way to clear blocking

空气预热器在热力系统中的定位是回收主省煤器后烟气热量来加热锅炉燃烧用热风, 进一步降低排烟温度, 一般工作在  $110 \sim 400^\circ\text{C}$ 。对机组经济性的影响主要来自阻力、漏风率、排烟温度 3 个运行参数<sup>[1-2]</sup>。①空预器阻力的上升直接增加了引风机和送风机电流, 若只考虑引风机电流, 阻力每升高  $1\ 000\ \text{Pa}$ , 以  $300\ \text{MW}$  机组为例简单折算, 引风机功率增加  $700\ \text{kW}$ , 电费增加约  $200\ \text{万元/a}$ 。②空预器漏风率的上升直接影响机组煤耗, 以  $300\ \text{MW}$  机组为例, 空气预热器漏风率每上升  $1\%$ , 机组发电煤耗增加  $0.15\ \text{g}$ 。③空预器出口烟温的上升直接影响锅炉效率, 通常空气预热器排烟温度每上升  $15^\circ\text{C}$ , 锅炉效率下降  $1\%$ <sup>[3]</sup>。

由于近年来环保排放要求提高, 大批燃煤机组 SCR 脱硝装置投运, 氨逃逸率高所造成的硫酸氢铵

黏灰堵塞空预器已经成为影响很多电厂安全经济运行的病症, 致使引风机出力不足, 机组出力受限。其次, 硫酸氢铵造成的堵塞清除比较困难, 严重时需停炉进行离线清洗。最后, 面对电网峰谷差的逐年增大, 电网调度对  $300\ \text{MW}$  火电机组深度调峰能力的需求日益凸显。深度调峰低负荷区间致使 SCR 脱硝反应器入口烟温逼近催化剂最低使用温度, 更有利于硫酸氢铵的生成<sup>[4-5]</sup>。

空预器堵灰历来都是大问题: ①阻力增加, 风机功耗增加, 甚至引起喘振; ②受热面积减少, 排烟温度上升, 锅炉效率降低; ③漏风增加, 降低冷端局部温度, 增加空预器低温腐蚀的机率; ④堵灰吸附  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 加重低温腐蚀, 更容易产生积灰, 产生恶性循环。SCR 普及后更加普遍, 到了无法忍受的地步, 必须全方位治理<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-08-01

基金项目: 河南省科技攻关项目 (182102310058)

作者简介: 陈海玲 (1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为油田化学剂、金属腐蚀与防护, 通讯联系人, j0104072@163.com。

## 1 空预器堵灰原因分析

### 1.1 空预器工作原理

空预器在电厂工艺流程中的应用如图 1 所示, 工作原理如图 2 所示。

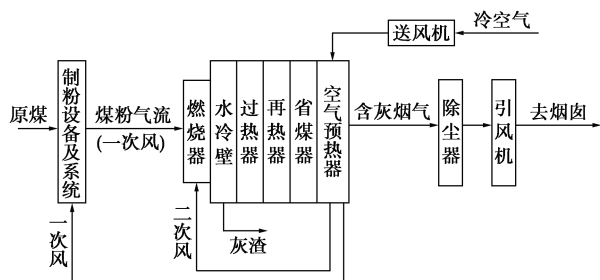


图 1 空气预热器在电站锅炉中的应用



图 2 换热原理

### 1.2 空预器堵灰原因

空预器堵灰动态过程想象: 少量灰沉积在干净的传热板上—某种黏性的东西把它粘在传热板上 (如水, 酸性物质, ABS、CaO 等碱性物的水合物)—传热板变得不光滑—烟气通流面积减少, 流速增加、灰吹走—吹灰带走, 如果灰带不走, 长大搭桥, 成为堵灰。

所以空预器堵灰原因是: ①排烟温度过低 (锅炉设计原因、锅炉低负荷), 空预器冷段温度低, 低于酸露点以下时结露黏灰 (腐蚀和积灰同时恶化)。②吹灰蒸汽疏水不充分, 汽温过热度太小, 传热板潮湿黏灰。③氨逃逸硫酸氢铵生成, 导致硫酸氢铵堵塞。④回转式空预器内部开始积灰至一定程度时, 蒸汽吹灰器难以深度清灰, 当通道完全堵灰时, 在线处理难度大。也即大量灰、狭窄的流道 (空预器是咽喉要道) 和适当的黏结剂, 只要有黏结剂存在, 无论任何煤种, 都有可能严重堵灰, 是空预器堵灰的关键原因<sup>[7-8]</sup>。安装 SCR 前黏结剂主要是水、酸, SCR 改造后更加厉害的是硫酸氢铵。

空预器带水和酸的原因: ①煤种含水量过大, 水露点升高 (见表 1); ②煤种含硫量升高, 导致酸露点

降低; ③空预器清洗后没有清理干净, 且没有充分干燥; ④空预器消防系统、暖风器泄露; ⑤运行过程中环境温度太低, 造成结露; ⑥吹灰温度不够, 造成带水。

表 1 主要煤种特点

煤种名称	挥发分体积分数/%	灰分(A)/%	水分(M)/%	主要特点
无烟煤	<10	6~25	1~5	着火困难, 不易燃烬, 灰水含量低, 发热量较高
贫煤	10~20			介于无烟煤和烟煤之间
烟煤	20~40	7~30	3~18	挥发分含量较高, 各成分适中, 着火稳定性好
褐煤	40~50	40~50	40~60	灰水含量高, 发热量较低, 易自燃

空预器带水防范措施: ①根据环境温度及时投入暖风器或再循环风机; ②充分疏水保证温度; ③保证暖风器、空预器消防系统的严密性; ④燃料含硫量不能有太多超标; ⑤检修清灰一定要彻底, 保证光滑; ⑥清灰后保证干燥充分再投入使用; ⑦前后烟道拒绝涡流“死”烟气。

### 1.3 空气预热器内硫酸氢铵的产生

(1) 炉内燃烧产生的  $SO_3$

炉内燃烧  $SO_2$  转化为  $SO_3$  主要发生在辐射受热段和对流段, 转化率大约在 1%。对于一个典型的炉膛, 如果烟气中  $SO_2$  的浓度为  $2\ 000\ mg/m^3$ , 在省煤器出口处的烟气中  $SO_3$  的浓度大约为  $2\ 072\ mg/m^3$ <sup>[9]</sup>。

(2) 脱硝使用催化剂后产生的  $SO_3$

SCR 后硫酸氢铵 (ammonium bisulfate) 是个大事。SCR 的催化剂会将部分  $SO_2$  氧化为  $SO_3$ , 增加了烟气中的  $SO_3$  浓度; 美国电厂在安装 SCR 后, 很多电厂出现了蓝烟问题; 据美国 EPA 估计, 约 75% 的安装了 SCR 烟气脱硝装置+湿法烟气脱硫装置的电厂受到蓝烟问题的困扰; PM<sub>2.5</sub> 与蓝烟之间的关系受到公众的关注<sup>[10]</sup>。

由于在锅炉出口高灰烟气条件下安装 SCR 脱硝系统, 也导致烟气中  $SO_3$  增加。SCR 催化剂成分主要有  $TiO_2$ 、 $V_2O_5$  和  $WO_3$  或  $MoO_3$ 。在烟气经过催化剂层时, 钒又有助于  $NO_x$  的脱除, 钒也是  $SO_2$  转化为  $SO_3$  的活性催化剂, 该转化率取决于催化剂中钒的浓度、种类和烟气的温度, 温度越高, 产生的  $SO_3$  就越多。因而, 为了减少  $SO_2$  转化率必须采用

含钒较低的催化剂,但用量要增加。一般情况下转换率为0.5%~1.5%,对于SO<sub>2</sub>含量为2 000 mg/m<sup>3</sup>的烟气,会在SCR的出口增加20 mg/m<sup>3</sup>的SO<sub>3</sub><sup>[11]</sup>。

由催化剂引起的转化率也取决于烟气的温度和锅炉负荷,烟气温度高转化率亦高。烟气温度偏高往往是由于锅炉对流受热面灰污垢使得传热降低。在低负荷时烟气流速低,由于在催化剂停留的时间长也会使转化率增加,虽然此时烟气温度偏低使转化率减少会有些抵消。典型的SO<sub>2</sub>转化率在喷氨情况下的多层催化剂反应器中是0.5%~2.0%。SCR的作用见图3。

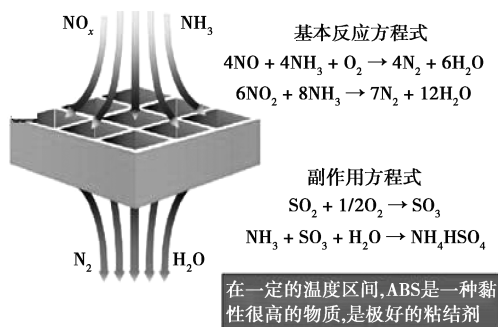


图3 SCR的作用

SO<sub>3</sub>对电厂运行的设备也有很大影响,包括酸露点温度提高限制了空预器的热回收并使之引起腐蚀。SO<sub>3</sub>和SCR/SNCR逃逸的氨反应使得空预器和催化剂结污垢。SO<sub>3</sub>也影响飞灰或活性炭吸附汞的效果,因为SO<sub>3</sub>会和汞竞争活性炭。因而对电厂来说,脱SO<sub>3</sub>不光是排放污染的控制,对锅炉系统也有许多好处。

空气预热器是SO<sub>3</sub>的汇,即会减少SO<sub>3</sub>;SO<sub>3</sub>的减少量取决于烟气的温度和空预器的类型;烟气的冷却速度越快,空预器出口的烟温越低,SO<sub>3</sub>的减少量越大;通常空预器对SO<sub>3</sub>的脱除率为10%~15%;但是在烟温降低的同时,生成H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>风险就会增大。烟气温度低于260℃时,SO<sub>3</sub>与烟气中的水分结合形成气相硫酸。由于硫酸比烟气中的水分具有更高的露点温度,因此当烟气冷却时硫酸凝结并导致后端管道和其他设备(ESP及引风机等)腐蚀。随着烟气中硫酸浓度的上升(例如安装SCR设备或燃烧高硫煤),硫酸露点温度也会升高。这时必须相应提高空气预热器出口温度来防止腐蚀产生,这必将对机组效率产生负面影响。空气预热器酸性凝结液腐蚀是其中一个重要问题,灰和硫酸液在一定条件下形成黏性沉积物。即使提高空预器出口温度以

防止酸露点达未安装SCR烟气脱硝装置的程度,部分电厂还是出现空气预热器污垢黏性系数增加的情况。

在一定的条件和温度下SO<sub>3</sub>和NH<sub>3</sub>反应形成氨盐沉积。如果SO<sub>3</sub>的摩尔浓度比NH<sub>3</sub>摩尔浓度大,当空气预热器中烟气冷却时,氨(NH<sub>3</sub>)与SO<sub>3</sub>反应生成ABS。硫酸氢铵的物理特性是180~220℃为黏稠的鼻涕状物质,高过220℃继续升温转为气态,低于180℃继续降温转为固态(化肥)。黏稠状态的ABS可导致空气预热器通道结垢。这种黏性物质会在空气预热器结垢使得空气预热器压差急剧增加,时间长了不得不停机清除。空气预热器换热元件通道的选型、换热单元深度和清洗方式都必须考虑到如何使ABS的影响最小。

通过分析大量的实验和实装数据,发现空预器入口SO<sub>3</sub>的浓度与结垢的关系如图4,所以,当空预器入口SO<sub>3</sub>的浓度小于5 mg/m<sup>3</sup>时空预器将运行良好。

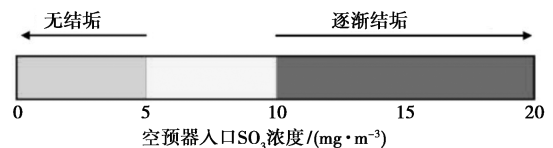


图4 空预器入口SO<sub>3</sub>浓度与硫酸氢铵结垢的关系

当NH<sub>3</sub>从SCR中逃逸时,会出现在下游的烟气中。SO<sub>3</sub>若没有在空气预热器之前被脱除,中、高硫煤SO<sub>3</sub>浓度在108~216 mg/m<sup>3</sup>,即便是少量的NH<sub>3</sub>也极易产生ABS。图5分别展示了燃煤和燃油、燃气机组生成硫酸氢铵的温度区域。而空预器的运行不可能避开此温度区域<sup>[12-13]</sup>。

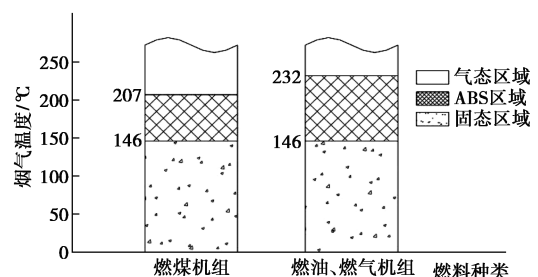


图5 生成硫酸氢铵的温度区域

当含硫量低于0.6%时,空预器烟气侧压差增速小于0.10 kPa/月,硫酸氢铵在空预器内沉积速率:

$$R = [\text{NH}_3] \times [\text{SO}_3] \times [T_{\text{IT}} - T_{\text{rep}}]$$

式中,  $[\text{NH}_3]$  和  $[\text{SO}_3]$  单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $T_{\text{IT}}$  为硫酸氢铵生成温度;  $T_{\text{rep}}$  为空预器出口特征温度;  $R$  正比于  $[\text{SO}_3]$ 。

空预器堵塞的案例:2016 年 12 月,3<sup>#</sup>炉完成锅炉烟气超低排放改造,锅炉出口烟气  $\text{NO}_x$  排放浓度控制  $50 \text{ mg}/\text{m}^3$  以下,运行 5 个月以后,空预器的差压从正常值 600 Pa 逐渐上升至 2 000 Pa 以上,吹灰处理无效。停炉后淋水冲洗 3 d 恢复正常。抽样检查化验确定为硫酸氢铵堵塞。

此外,硫酸氢铵不仅会黏附在空预器上,而且还会黏附在极线、极板或布袋上。如果采取的措施不当,不能彻底解决前端烟气中硫酸氢铵问题,会导致下游设备黏附更多的硫酸氢铵。电除尘器阴极线肥大、电除尘器运行电压高、电流低、硫酸氢铵糊袋导致压差上升至 4 000 Pa 以上。

## 2 空预器堵灰的解决方案

空预器清堵,国内科研技术工作人员进行了积极的探索,如华润电力(唐山曹妃甸)有限公司、大唐三门峡发电有限责任公司、山西兴能发电有限责任公司采用排烟升温法,天津国电津能热电有限公司采用单侧排烟升温法,北京华能达公司、南京科远股份公司、杭州新际能源公司和哈尔滨锅炉有限责任公司分别使用了不同方式的热风再循环清堵方案,山西兴能发电有限责任公司 4 台机组全部安装了高可调频高声强声波吹灰器,煤中硫在 1.6% 时效果不错,60 万机组空预差压在 0.8 kPa,30 万机组空预差压在 1.8 kPa。2017 年煤中硫分升至 2.2% 时,出现大面积堵塞,供热季至后期无法维持运行。以上方案取得了一定的成效,但未能从根本上解决问题。下面主要介绍有望根本解决空预器的几种化学清堵方案。

### 2.1 SBS 喷射工艺

如果在空气预热器换热之前,烟气中  $\text{SO}_3$  被有效脱除,ABS 在空气预热器结垢的可能性将大幅降低。这可显著减少或省去机组停机的需要,同时也降低高压水冲洗空气预热器 ABS 沉积物的成本。换热元件更换费用也将减少,因为缩短元件寿命的诸多因素(如 ABS 和硫酸腐蚀、吹灰的频率和压力、水洗频率)得到了明显抑制。

SBS 喷射工艺在空气预热器入口喷射  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  工艺与回转式空气预热器相结合来提高热回收效率,碳酸钠以溶液形式喷入,干燥后在烟气中与  $\text{SO}_3$

反应生成硫酸钠,能有效控制  $\text{SO}_3$  浓度,清除酸性物质则可以提高燃煤电厂的热效率。这是目前美国燃煤火电机空气预热器前脱除  $\text{SO}_3$  的主要方法。SBS 脱  $\text{SO}_3$  工艺主要化学反应:

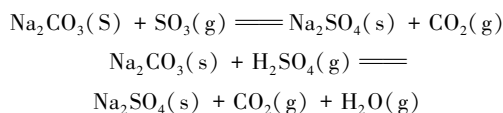


图 6 为 SBS 喷射工艺流程。碳酸钠溶液通过双流体雾化喷嘴喷入烟气,并且水分在离喷射点距离很短的下游被完全蒸发。一些重要的反应在极短时间内以液相形式发生,但大部分的  $\text{SO}_3$  脱除通过与干燥颗粒的固相反应形式进行。干燥后的颗粒细小却有非常大的表面积,增加了反应活性。干燥的反应产物随飞灰颗粒被静电或袋式除尘器捕捉。

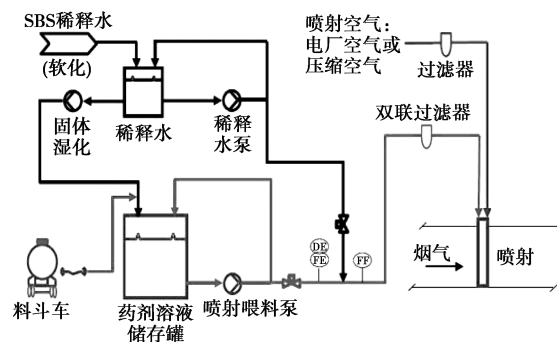


图 6 SBS 喷射工艺流程

SBS 喷射技术的核心是喷射系统。药剂溶液通过多管喷枪注入烟气,每根喷枪上有多个双流体雾化喷嘴。对每个特定项目,设计通常包括运用计算机流体动力模型(CFD)模拟特定烟道中的烟气分布,确定喷枪和喷嘴的数量和位置,保证药剂雾化干燥,并跟烟气充分混合。喷嘴利用压缩空气来达到合适的雾化。喷枪通过自身内部空气流动得到冷却<sup>[14]</sup>。

碳酸钠溶液可在尾部烟道中不同位置喷射,包括 SCR 入口、空预器入口或出口,甚至 FGD 入口。优选的喷射位置是紧接在省煤器下端或 SCR 出口端,因为这些位置较高的气体温度可减少干燥时间并加快反应速度。

### 2.2 碱性吸附剂注射技术(DSI)

碱性吸附剂注射技术是一种脱除烟气中酸性气体重要技术,原理是向炉内或烟道上合适位置注射碱性吸附剂,吸附剂与烟气中酸性气体  $\text{SO}_3$ 、 $\text{HCl}$  反应,生成固体盐类颗粒物,从而完成酸性气体脱除,同时可协同脱除烟气中 Hg、As 等重金属。注射

吸附剂范围涵盖 Ca 系、Mg 系、Na 系等 10 余种<sup>[15]</sup>。大唐火电院完成了 600 MW 燃煤机组碱性干粉 SO<sub>3</sub> 脱除工艺的设计、集成和工程示范项目建设,属国内首次,据中国电机工程学会鉴定达到国际先进水平。

托克托电厂 1# 机组项目:600 MW 四角切圆亚临界机组、SCR+ESP+WFGD,1% 的 S 含量,空预器入口注射,注射吸附剂为 Ca(OH)<sub>2</sub>,SO<sub>3</sub> 脱除目标 <5 mg/m<sup>3</sup>。托克托电厂 1# 机组 SO<sub>3</sub> 脱除实际效果见表 2。

表 2 1# 机组空预器 SO<sub>3</sub> 浓度在 DSI 投运前后变化

机组负荷/MW	550	500	450
DSI 投运前 SO <sub>3</sub> 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	8.4	8.5	6.5
DSI 投运后 SO <sub>3</sub> 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	4.6	4.5	3.1

### 2.3 高压水清堵方案

几种高压水清堵方案的优缺点见表 3。

表 3 几种高压水清堵方案的优缺点

冲洗方式	在线高压水清洗	半侧隔离清洗	离线高压水清洗
优点	不需要停机及系统隔离,操作简单,容易实现,不影响机组带负荷,清洗终点容易判断	对空预器元件损坏可能性小	安全性高
缺点	造成排烟温度降低,控制不好会造成低温酸腐蚀可能性;传热元件温差变化可能会造成空预器变形	需要冷却、清洗、隔离 3 个过程,清洗终点不好判断,影响机组运行负荷,单侧风机运行时间长,风险大;一般电厂空预器出口无烟气挡板,系统无法隔离,工艺实施困难	时间长,机组必须停运才能够实施

### 3 建议的空预器清堵方案

根据以上调研,建议在正常运行时,采用碱性吸附剂注射技术,可选碱类包括天然碱、纯碱、小苏打、氢氧化镁、氢氧化钙、亚硫酸钠、氧化镁和白云石等,

可减少空预器入口 SO<sub>3</sub> 浓度,从根本上消除硫酸氢铵的生成,但要注意喷射工艺技术这一核心问题。

在空预器已经堵塞时,则建议采用在线或离线化学清洗方案。硫酸氢铵水溶性很好,但腐蚀形态为黏稠坚硬的附着物,为延长化学清洗剂作用时间,提高清洗效果,拟通过文献调研,研究滞留型清洗剂,开发高效的化学清洗剂。

### 参考文献

- [1] 王乐乐,孔凡海,何金亮,等.超低排放形势下 SCR 脱硝系统运行存在问题与对策[J].热力发电,2016,45(12):19-24.
- [2] 张建华,沈家铨,周江,等.波纹板式 SCR 催化剂脱硝后空预器堵塞及成因探究[J].电力科技与环保,2016,32(4):5-8.
- [3] 陈镇超.SNCR/SCR 联合脱硝的应用及对锅炉运行的影响[J].能源工程,2016,(2):48-55,68.
- [4] 齐晓辉,牛如清,王德鑫,等.探析 SCR 脱硝后空预器低温端腐蚀原因与对策[J].全面腐蚀控制,2015,(12):20-22.
- [5] 王海刚.SCR 脱硝机组空气预热器堵塞原因分析和建议[J].电站系统工程,2015,(4):19-22.
- [6] 刁润丽,赵世伟,刘嘉.烟气脱硝产生的硫酸氢铵对空预器的影响及对策[J].应用能源技术,2015,(4):20-24.
- [7] 惠润堂,韦飞,王宝德,等.SCR 法烟气脱硝后空气预热器堵塞及应对措施[J].中国电力,2014,47(10):110-112.
- [8] 马双忱,邓悦,吴文龙,等.SCR 脱硝副产物硫酸氢铵与空预器中飞灰反应特性[J].环境工程学报,2016,10(11):6563-6570.
- [9] 郭东立,王洁,张国鑫,等.660 MW SCR 脱硝机组空预器堵塞原因分析及对策[J].浙江电力,2014,(3):46-50.
- [10] 惠润堂,庄柯,韦飞,等.加装 SCR 脱硝装置对燃煤锅炉系统的影响及对策[J].环境工程,2013,31(6):82-85.
- [11] 于洪海,陈利,曲立涛.SCR 催化剂活性降低对空预器腐蚀的影响分析[J].环境科学导刊,2016,35(5):6-8.
- [12] 马双忱,金鑫,孙云雪,等.SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制[J].热力发电,2010,39(8):12-17.
- [13] 方立军,杨雪,刘玉东,等.SCR 烟气脱硝空气预热器堵灰 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> 含量实验研究[J].电力科学与工程,2017,33(1):37-42.
- [14] 李欣怡,潘丹萍,胡斌,等.燃煤烟气中 SO<sub>3</sub> 迁移转化特性及其控制的研究现状及展望[J].化工进展,2018,37(12):4887-4896.
- [15] 刘勇.碱基吸收剂喷射脱除燃煤烟气中 SO<sub>3</sub> 的实验研究[D].杭州:浙江大学,2018.■