

# 燃煤电厂脱硝氨逃逸率测量计算技术研究及应用

俞立 钱新风 彭涛

(大唐华东电力试验研究院, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** SCR 脱硝工艺在我国燃煤电厂广泛应用, 脱硝氨逃逸率的精准测量存在一定困难, 电厂无法准确掌握脱硝系统的喷氨量, 易造成硫酸氢铵的大量生成及空预器的堵塞。对脱硝氨逃逸率测量方法进行研究, 通过对中间参数的准确测量和计算, 经过集成计算得出相对准确的脱硝氨逃逸率, 并在电厂空预器堵塞问题诊断中成功应用, 最后提出该测量计算技术的应用注意点。

**关键词:** 脱硝系统 氨逃逸率 测量 空预器 堵塞

## RESEARCH AND APPLICATION OF MEASUREMENT AND CALCULATION TECHNOLOGY OF DENITRATION AMMONIA ESCAPE RATE IN COAL-FIRED POWER PLANT

YU Li, QIAN Xin-feng, PENG Tao

(Datang East China Electric Power Test & Research Institute, Hefei 230000, China)

**Abstract:** SCR denitration process is widely used in China's coal-fired power plants. It is difficult to accurately measure the escape rate of denitration ammonia. The power plant can not accurately grasp the ammonia injection amount of denitration system, which is easy to cause a large number of ammonium bisulfate generation and air preheater blockage. This paper studies the measurement method of denitration ammonia escape rate. Through accurate measurement and calculation of intermediate parameters, the relatively accurate denitration ammonia escape rate is obtained through integrated calculation. It is successfully applied in the diagnosis of air preheater blockage in power plant, and the application points of this measurement technology are put forward.

**Key word:** SCR; ammonia escape rate; measure; air preheater; blocking

## 0 引言

选择性催化还原脱硝工艺 (SCR) 在我国燃煤电厂广泛应用, 为我国燃煤机组氮氧化物的减排做出了巨大的贡献。在烟气脱硝过程中, 烟气中部分二氧化硫经催化剂作用, 生成了三氧化硫, 逃逸的氨气会与三氧化硫 (锅炉燃烧生成的和脱硝催化生成的三氧化硫) 反应生成酸性物质硫酸铵与硫酸氢铵, 硫酸氢铵的熔点为  $146.9^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。硫酸氢铵具有吸湿性, 强黏结性及腐蚀性, 易粘附在空预器蓄热元件及空隙间, 堵塞空预器, 同时吸附烟气中的烟尘, 导致混合堵塞物难以被去除, 造成空预器阻力上升, 增加发电能耗, 严重时造成引风机失速、机组停机<sup>[2,3]</sup>。控制硫酸氢氨生成可以通过减少氨逃逸率及二氧化硫的浓度来实现。目前降低燃煤硫份直接影响到燃煤采购及发电经济性, 而控制氨逃逸率是较为有效的方法, 同时也节能降耗。控制氨逃逸率首先需要将氨逃逸率测量准确, 目前燃煤机组氨逃逸率测量仪测量数据准确的较少, 大部分仅能体现趋势, 甚至仅显示为一定值, 无法体现喷氨是否过量, 不能为电厂脱硝精细喷氨提供指导, 该问题一直困扰着电厂。

收稿日期:

第一作者: 俞立 (1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电厂大气污染物控制技术、污染物排放监测技术研究及环保监督相关工作, yongyuankl@126.com。

## 1 脱硝氨逃逸率测量技术

### 1.1 氨逃逸率测量技术概述

目前脱硝出口烟气中氨逃逸率的检测方法主要有两种应用较为广泛。一种是方法是化学分析法，另一种是光谱方法。化学分析法为人工采样化验，仅用于性能测试，无法实现在线实时监测。光谱方法可实现在线实时监测，目前绝大部分脱硝系统均安装了光谱方法的氨逃逸率测试仪。光谱方法包括：差分吸收光谱法、傅里叶变换红外光谱法、激光诱导荧光法、光声光谱法及 TDLAS 光谱法。<sup>[4]</sup>目前国内燃煤电厂采用光谱方法测量氨逃逸率时大多应用激光光谱测量或化学发光测量技术。<sup>[5]</sup>

### 1.2 激光光谱测量技术

激光光谱测量技术采用可调谐半导体激光吸收光谱（TDLAS 光谱法）<sup>[6-8]</sup>进行测量。当激光二极管的光通过被测量气体时，其波长可调谐成被测气体的吸收波长，此光被调谐波长扫描，并由光二极管吧透过的光信号记录下来，有计算单元计算吸收光的信号大小，进而得到气体的浓度。<sup>[9,10]</sup>

### 1.3 化学发光测量技术

使用化学发光法测量的分析仪是通过多通道采样，并将 NO、NO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 在对应的通道内转化为 NO，在反应室中和臭氧发生化学反应产生收到激励的 NO<sub>2</sub> 和光 hv，光 hv 的强度与 NO 的含量呈线性关系：当收到激励的 NO<sub>2</sub> 分子衰减至较低的能量状态时便会发光，通过分析该光性质，得到 NO 含量读数，最终对多个通道读数的对比得到 NH<sub>3</sub> 的含量。<sup>[5]</sup>

### 1.4 传统氨逃逸率测量技术存在不足

以上两种氨逃逸率测量方法在理论上均能准确测量烟气中的氨逃逸率，但实际效果却不尽如人意。主要原因由以下几点：

（1）由于烟气在脱硝出口处未进行除尘，烟气中烟尘含量较高，在线分析仪光程会随着烟尘浓度的增加而缩短，影响分析精度，而抽取法也易被烟尘堵塞管理，故障率较高；

（2）由于脱硝出口截面积较大，激光分析仪一般无法水平或垂直对穿烟道直接安装，而是安装在烟道的一个角倾斜安装，在锅炉启停及负荷变化过程中烟道会发生膨胀变形，导致分析仪两侧探头无法严格对中，从而无法测量精确，甚至无法正常工作。

（3）脱硝出口烟气温度一般为 300~420℃，分析仪需要采用冷却风机向探头鼓入冷空气进行冷却，冷却风机的压头高于炉膛烟气压力，会影响分析仪的分析精度。

（4）由于脱硝出口烟道截面积较大，脱硝系统截面喷氨量、各处催化剂催化反应性能、气流分布、NO<sub>x</sub> 分布均存在一定的差别，导致脱硝出口测点截面处的 NO<sub>x</sub> 浓度及氨逃逸率往往存在较大偏差。激光分析仪往往只能安装在烟道的一角，直接抽取法也仅抽取一处烟气，它们固有的测量属性均决定了测量的氨逃逸数值无法代表整个脱硝出口截面的平均氨逃逸率。

基于以上分析，目前燃煤发电机组空预器频繁堵塞的一个重要原因为无法准确监测脱硝出口烟道断面的氨逃逸率。当整个截面的平均氨逃逸率直接测量无法实现时，可以集成多个可精确测量的值，通过相应理论计算，得出整个截面的平均氨逃逸率，能得到相对准确的氨逃逸率，用以指导电厂脱硝喷氨，或用来对过量喷氨造成的问题进行诊断。

## 2 脱硝氨逃逸率测量及集成计算技术设计

根据多台机组脱硝喷氨控制原理可知，机组实际喷氨量是通过脱硝进、出口 NO<sub>x</sub> 浓度与烟气量等参数计算得来。其中的难点之一在烟气量的测量。由于脱硝系统入口烟道出流场均匀性不高，部分区域存在涡流、导流板设置不合理等问题，一般流量计无法对整个断面的实际烟气量测量准确，有的甚至偏差较大。

脱硝氨逃逸率测量及集成计算技术需要采用相对准确的烟气量，因此若采用原有烟气量测量数据无法满足准确度的要求。通过利用脱硝工程设计烟气量、锅炉设计蒸发量、锅炉实际蒸发量（该值可准确测量），通过理论计算，得到相对准确的实时烟气量参数。

$$Q_{\text{计算}} = Q_{\text{设计}} \times q_{\text{实际}}/q_{\text{设计}} \quad (1)$$

式中： $Q_{\text{设计}}$  为脱硝设计烟气量，单位为  $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$q_{\text{设计}}$  为锅炉设计蒸发量，单位为  $\text{t/h}$ ；

$q_{\text{实际}}$  为锅炉实时蒸发量， $q_{\text{实际}}$  即锅炉主蒸汽流量数据，单位为  $\text{t/h}$ ；

$Q_{\text{计算}}$  为脱硝理论计算实时烟气量，单位为  $\text{m}^3/\text{h}$ ；

考虑到脱硝工程在设计时烟气量放了一定的裕量，因此需要通过多个工况的实际测量值（采用网格法测量整个断面）与  $Q_{\text{计算}}$  进行统计对比，得出  $Q_{\text{计算}}$  的修正系数  $k$ 。

$$Q_{\text{实际}} = Q_{\text{计算}} \times k \quad (2)$$

式中： $Q_{\text{实际}}$  为脱硝实时烟气量（标态、干基、6%氧），单位为  $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$k$  为烟气量修正系数，无单位；

基于脱硝实时烟气量，利用公式（3）得到单台脱硝反应器烟气量。

$$V_q = Q_{\text{实际}}/2 \quad (3)$$

式中： $V_q$  为单台脱硝反应器烟气量（标态、干基、6%氧），单位为  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

式（3）仅针对脱硝系统 A、B 侧烟气流量一样的脱硝系统，但部分脱硝系统 A、B 侧烟气流量会出现偏差，此时  $V_q$  的确定需要通过实际测量值对烟气量的分配比例进行确认，最终确定每台脱硝反应器的烟气量。

对脱硝入口  $\text{NO}_x$  进行数据处理：

$$C'_{\text{NO}} = 0.62 \times C_{\text{NO}_x\lambda} \quad (4)$$

$$C'_{\text{NO}_2} = 0.05 \times C_{\text{NO}_x\lambda} \quad (5)$$

式中： $C_{\text{NO}_x\lambda}$  为脱硝烟气分析仪测量的入口烟气中  $\text{NO}_x$  浓度值，单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ；

$C'_{\text{NO}}$  为脱硝入口  $\text{NO}_x$  中  $\text{NO}$  的浓度值，单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ；

$C'_{\text{NO}_2}$  为脱硝入口  $\text{NO}_x$  中  $\text{NO}_2$  的浓度值，单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ；

获取  $\eta_{\text{NO}_x}$ ，公式如下：

$$\eta_{\text{NO}_x} = (C_{\text{NO}_x\lambda} - C_{\text{NO}_x\text{出}})/C_{\text{NO}_x\lambda} \quad (6)$$

式中： $\eta_{\text{NO}_x}$  为脱硝效率，单位为 %；

$C_{\text{NO}_x\text{出}}$  为脱硝烟气分析仪测量的出口烟气中  $\text{NO}_x$  浓度值，单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ；

$$m = \eta_{\text{NO}_x} + (r_a/17) / (C'_{\text{NO}}/30 + C'_{\text{NO}_2}/23) \quad (7)$$

式中： $m$  为氨与 SCR 进口  $\text{NO}_x$  的摩尔比，无单位；

$C'_{\text{NO}}$  为入口烟气中  $\text{NO}$  浓度，单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ；

$C'_{\text{NO}_2}$  为入口烟气中  $\text{NO}_2$  浓度，单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ；

$r_a$  为规范规定氨逃逸率，为固定值  $2.27 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

对单台脱硝反应器液氨消耗量  $W_a$ ，公式如下

$$W_a = ( (V_q \times C'_{\text{NO}} \times 17) / (30 \times 10^6) + (V_q \times C'_{\text{NO}_2} \times 34) / (46 \times 10^6) ) \times m \quad (8)$$

式中： $W_a$  为单台脱硝反应器液氨消耗量，单位为 kg/h；  
 $V_q$  为单台脱硝反应器烟气量，单位为  $m^3/h$ ；  
 $C'_{NO}$  为入口烟气中 NO 浓度，单位为  $mg/m^3$ ；  
 $C'_{NO_2}$  为入口烟气中  $NO_2$  浓度，单位为  $mg/m^3$ ，  
 $m$  为氨与 SCR 进口  $NO_x$  的摩尔比，无单位；

$$W_{a\text{过}} = W_{a\text{实际}} - W_a \quad (9)$$

式中： $W_{a\text{过}}$  为过量喷氨量，单位为 kg/h；  
 $W_{a\text{实际}}$  为脱硝氨耗量测量仪测量值，单位为 kg/h。  
 对实际氨逃逸进行计算，公式如下：

$$r_{a\text{实际}} = W_{a\text{过}}/V_q + r_a \quad (10)$$

式中： $r_{a\text{实际}}$  为实际氨逃逸率，单位为  $mg/m^3$ ；  
 通过以上介绍可知，脱硝氨逃逸测量及集成计算技术采用准确的烟气量、进出口  $NO_x$  浓度等数据计算理论的氨耗量，通过与实际喷氨量进行比较，得到实际喷氨量超过的部分即为整个截面的整体氨逃逸总量，最终通过与烟气量的比值，得出整个截面的平均氨逃逸量。

### 3 脱硝氨逃逸率测量及集成计算技术应用

安徽某电厂 2 号机组 2018 年 11 月 18 日机组检修完成后启动，运行一个月左右，空预器阻力出现异常。A 侧空预器发生压差快速上升的情况，11 月 21 日，660MW 负荷时，A 侧空预器压差约为 1300Pa，12 月 12 日，660MW 负荷时，A 侧空预器压差约为 2000Pa，即 2 号机组运行 20 天左右，A 侧空预器压差上升了 700Pa。根据理论分析，A 侧空预器堵塞原因为 A 侧脱硝反应器存在严重的氨逃逸率超标情况，并与烟气中的  $SO_3$  生成硫酸氢铵，粘附在空预器上，最终形成快速堵塞。

对 2 号机组脱硝 A、B 侧反应器出口  $NO_x$  浓度及氨逃逸率进行测试，测试结果详见图 1、图 2。

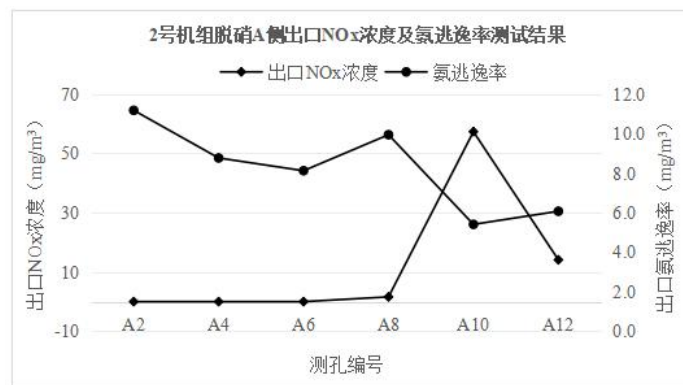


图 1 2 号机组脱硝 A 侧反应器出口  $NO_x$  浓度及氨逃逸率测试结果

Fig.1 Test results of  $NO_x$  concentration and ammonia escape rate at the outlet of A reactor at denitration side a of unit 2

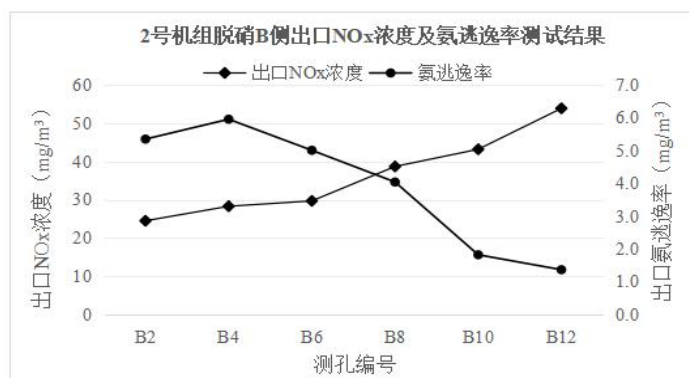


图2 2号机组脱硝B侧反应器出口NO<sub>x</sub>浓度及氨逃逸率测试结果

Fig.2 Test results of NO<sub>x</sub> concentration and ammonia escape rate at the outlet of B reactor at denitration side a of unit 2

根据图1可知, 2号机组脱硝A侧出口氨逃逸率最高达到11.2mg/m<sup>3</sup>, 平均氨逃逸率为8.2mg/m<sup>3</sup>, 远超过规范要求的2.27mg/m<sup>3</sup>, 部分测孔采样测试得出烟气中NO<sub>x</sub>浓度为0mg/m<sup>3</sup>, 说明A侧存在明显的过量喷氨现象。B侧出口氨逃逸率最高为6.0mg/m<sup>3</sup>, 平均氨逃逸率为3.9mg/m<sup>3</sup>, 略超过规范要求, 因此B侧过量喷氨现象不严重。

虽然由以上分析可以明显看出, A侧存在过量喷氨现象。但根据大量的脱硝系统运行经验可知, A侧脱硝反应器平均氨逃逸率即使达到8.2mg/m<sup>3</sup>, 并不会使得A侧空预器发生如此快速地堵塞。对2号机组启机后脱硝运行部分参数进行调阅, 发现新的现象, 部分时段A侧脱硝喷氨量出现了较大幅度的上升, 且并不随负荷的回落而下降, 因此出现了更加严重的过量喷氨, 且持续时间较长。对严重过量喷氨的时间段数据进行处理分析, 并通过脱硝氨逃逸测量及集成计算技术计算得出2号机组脱硝A、B侧再严重过量喷氨过程中的实际氨逃逸率, 详情见表1、表2。

表1 脱硝A侧反应器过量喷氨时段氨逃逸率计算结果

Table 1 Calculation results of ammonia escape rate during excessive ammonia injection period of denitration side A reactor

时间段编号	持续时间 (h)	机组负荷 (MW)	A侧入口浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	A侧出口浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	A侧实际喷氨量 (kg/h)	A侧理论喷氨量 (kg/h)	A测氨逃逸率 (mg/m <sup>3</sup> )
1	5	418	314.7	17.7	97.0	68	49.2
2	8	300	382.3	16.1	94.0	61	75.8
3	7	280	553.0	19.3	144.4	84	148.4
4	4	400	296.6	19.0	101.4	61	70.7
5	1	623	629.8	20.2	312.0	214	108.8
6	7	352	335.3	19.0	94.9	61	67.5
7	7	347	305.4	14.8	80.0	55	51.1
8	5	398	311.3	12.7	94.9	64	54.8
9	3	401	294.9	11.5	91.0	61	52.9

表2 脱硝A侧反应器过量喷氨时段氨逃逸率计算结果

Table 1 Calculation results of ammonia escape rate during excessive ammonia injection period of denitration side B reactor

时间段编号	持续时间 (h)	机组负荷 (MW)	B侧入口浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	B侧出口浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	B侧实际喷氨量 (kg/h)	B侧理论喷氨量 (kg/h)	B测氨逃逸率 (mg/m <sup>3</sup> )
1	5	418	321.0	49.4	67.0	68	0.6

2	8	300	388.7	74.6	68.0	62	15.6
3	7	280	572.1	89.3	90.2	87	10.0
4	4	400	290.0	59.2	49.1	59	-14.5
5	1	623	688.7	65.8	221.8	235	-12.1
6	7	352	310.5	73.9	58.9	57	5.9
7	7	347	292.6	47.5	57.1	52	12.2
8	5	398	310.6	77.7	58.5	64	-7.1
9	3	401	274.1	76.0	50.7	56	-6.7

根据表 1 可知, A 侧脱硝在运行过程中多次出现严重过量喷氨现象, 采用脱硝氨逃逸率测量及集成计算技术得出: A 侧脱硝出口截面平均氨逃逸率最高达到 108.8mg/m<sup>3</sup>(143.4ppm), 最低达到 49.2mg/m<sup>3</sup>(64.9ppm); B 侧脱硝出口截面平均氨逃逸率最高达到 15.6mg/m<sup>3</sup>(20.6ppm), 最低氨逃逸率 < 0ppm, 整体远低于 A 侧氨逃逸率。

RadianCorp 于 1982 年运用热力学和动力学模型来估算硫酸氢铵的形成<sup>[11]</sup>:

$$\text{Radian 数} = [\text{SO}_3] \times [\text{NH}_3] \times [\text{T}_{\text{IFT}}] \times [\text{T}_{\text{rep}}] \quad (11)$$

式中: [T<sub>IFT</sub>]是硫酸氢铵形成的初始温度;

[T<sub>rep</sub>]为综合了排烟烟气温度和空预器冷段金属壁表面温度的数值;

[SO<sub>3</sub>]、[NH<sub>3</sub>]分别为烟气中 SO<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub> 的浓度。

Radian 数值越大表示硫酸氢铵形成的可能性越高。对于一台空预器, 短期内 [T<sub>IFT</sub>]、[T<sub>rep</sub>] 基本为一固定值, 因此对 [SO<sub>3</sub>]、[NH<sub>3</sub>] 的浓度乘积进行计算<sup>[12]</sup>, 并在相应曲线图中进行查阅, 即可得出硫酸氢氨的生产倾向。

2 号机组 A 侧 SCR 氨逃逸率最高达到 143.36ppm, 持续 5h, 2 号锅炉出口 SO<sub>2</sub> 浓度约为 4000mg/m<sup>3</sup>, 根据 2 号机组脱硝装置性能考核试验报告可知 2 号锅炉及脱硝系统 SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 总转换率为 2.3%, 所以 2 号机组脱硝出口 SO<sub>3</sub> 浓度为 93mg/m<sup>3</sup>, 即 26ppm, A 侧脱硝氨逃逸率与 SO<sub>3</sub> 总乘积为 3727ppm<sup>2</sup>, 同时 2 号机组空预器出口温度为 120-140°C, 根据图 5<sup>[2]</sup>可知, 大量硫酸氢铵生成, 黏附在空预器内, 并最终成为固态残留在空预器中, 造成 A 侧空预器快速堵塞。

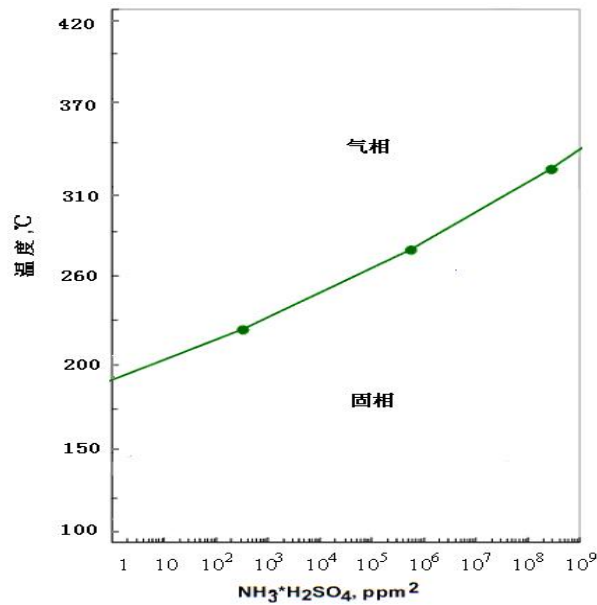


图 3 NH<sub>3</sub> 和 SO<sub>3</sub> 浓度乘积对硫酸氢铵形成的影响

Fig.2 Effect of concentration product of NH<sub>3</sub> and SO<sub>3</sub> on the formation of ammonium bisulfate

根据脱硝氨逃逸率测量及集成计算技术计算分析可知, A 侧脱硝系统阶段性严重过量喷

氨，导致氨逃逸率严重超标，并与烟气中的  $\text{SO}_3$  形成大量硫酸氢氨，最终在 A 侧空预器内黏附固化，最终快速堵塞空预器。

## 4 结论及建议

### 4.1 结论

目前由于测量环境及测量方法的限制，脱硝氨逃逸测试仪器数据与实际值存在偏差，造成电厂难以对脱硝系统氨逃逸率进行准确监控，不可避免的会存在过量喷氨的情况出现，最终生成硫酸氢铵粘附在空预器、除尘器等后续设备上。若采用脱硝氨逃逸率测量及集成计算技术进行检测，即集成多个可精确测量的参数，最终通过理论计算，可得出相对精准的氨逃逸率，为脱硝运行提供数据支撑，同时也在一定程度上预防空预器的堵塞。

### 4.2 建议

运用脱硝氨逃逸率测量及集成计算技术需要注意以下几点：

(1) 烟气量修正系数  $k$  值的确定需要通过网格化精准测量多个负荷段的烟气量，并与相应理论计算值进行综合归纳得出；

(2) 部分电厂 A、B 侧脱硝入口烟气量偏差较大，每侧的烟气量需根据试验数据进行归纳分配；

(3) 脱硝系统喷氨量的实时计量需要精确。

## 参 考 文 献

- [1] 范芸珠, 曹发海. 硫酸铵热分解反应动力学研究[J]. 高校化学工程学报, 2011, 25(2): 341-346.
- [2] 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. 热力发电, 2010; 39(8):12—17.
- [3] 马双忱, 郭蒙, 宋卉卉, 等. 选择性催化还原工艺中硫酸氢铵形成机理及影响因素. 热力发电, 2014; 43(2): 75—78.
- [4] 吴晔. 燃煤电厂氨逃逸在线监测技术现状及设备选型建议[J]. 科技资讯, 2019, 17(32):55-56.
- [5] 密大奎, 张传良. 脱硝系统氨逃逸分析仪测量技术存在的问题及优化方案[J]. 华电技术, 2019, 41(08):57-60.
- [6] 程立平. 激光原位测量式氨逃逸仪表在托电公司的应用[J]. 中文信息, 2014(3): 303, 352.
- [7] 吴晔, 张东平, 王大钊, 王伟. 基于 TDLAS 多点氨逃逸测试系统的运行优化[J]. 化学工程与装备, 2019(04):286-288.
- [8] 孟林辉, 范廷举, 骆德全, 韩敏艳. 多点抽取式氨逃逸在线分析系统[J]. 神华科技, 2019, 17(03):55-59.
- [9] 张进伟, 陈生龙, 程银平. 可调谐半导体激光吸收光谱技术在脱硝微量氨检测系统中的应用[J]. 中国仪器仪表, 2011(3): 26-29.
- [10] 宁睿. 氨逃逸监测设备的应用及维护[J]. 电工技术, 2015(8): 57.
- [11] J M Bruke, KL Johnson, Ammonium sulfate and bisulfate formation in air preheaters[R]. US EPA 600/7-82-025a, 1982.
- [12] Fossil Energy Research Corporation. In Situ Device for Real-Time Catalyst Deactivation Measurements[R], Final Technical Report: DOE Project 422FC2G05NT4229898, Laguna Hills, California, May 2007.

第一作者：俞立（1987—），男，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为火力发电厂大气污染物控制技术研究、污染物排放监测技术研究及环保监督相关工作，yongyuankl@126.com。

通信作者：俞立（1987—），男，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为火力发电厂大气污染物控制技术研究、污染物排放监测技术研究及环保监督相关工作，yongyuankl@126.com。