

# SO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub>/NO 对 SCR 脱硝中 PM<sub>2.5</sub> 排放特性的影响

史雅娟, 张玉华, 束航, 范红梅, 张亚平, 杨林军\*

(东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要:**为探究 SO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub>/NO 体积比对 SCR 脱硝中 PM<sub>2.5</sub> 排放特性的影响, 通过模拟 SCR 脱硝试验装置, 针对商业 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂, 利用电称低压冲击器(ELPI)等仪器对 SCR 脱硝装置出口 PM<sub>2.5</sub> 物性进行了测试分析。结果发现, SCR 脱硝装置出口细颗粒物数浓度达到 1.0 × 10<sup>6</sup> 个/cm<sup>3</sup> 左右, 其主要成分为 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> 及少量 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 且细颗粒物多为亚微米级。同时研究了 SO<sub>2</sub> 催化氧化对 PM<sub>2.5</sub> 形成的影响, 并采用傅里叶原位红外光谱 (FTIR) 研究了氨氮体积比对 PM<sub>2.5</sub> 生成的影响机理。结果表明, SO<sub>2</sub> 的影响与 SO<sub>2</sub> 氧化生成的 SO<sub>3</sub> 浓度与颗粒物数浓度显著相关, 氨氮体积比的浓度对形成的颗粒物数浓度有直接影响, 而且对 SO<sub>2</sub> 氧化率也有一定影响。

**关键词:**选择性催化氧化; PM<sub>2.5</sub>; 排放特性; SO<sub>2</sub>; NH<sub>3</sub>

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)02-0090-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.02.023

## Effect of SO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> on emission characteristics of PM<sub>2.5</sub> in SCR

SHI Ya-juan, ZHANG Yu-hua, SHU Hang, FAN Hong-mei, ZHANG Ya-ping, YANG Lin-jun\*

(Key Laboratory for Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, College of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> catalyst, physical properties of PM<sub>2.5</sub> in outlet flue gas of SCR are tested and analyzed by Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) through SCR DeNO<sub>x</sub> simulation test device. The result indicates that the number concentration of fine particles which are mostly submicron reaches about 1.0 × 10<sup>6</sup>/cm<sup>3</sup>. These fine particles mainly consists of NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> and some (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Moreover, the effect of SO<sub>2</sub> oxidation on PM<sub>2.5</sub> formation is also studied. Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) is applied to study the influence of NH<sub>3</sub>/NO. The results point out that there is a significant correlation between SO<sub>3</sub> concentration generated by SO<sub>2</sub> oxidation and number concentration of particle. In addition, volumetric ratio of NH<sub>3</sub>/NO not only directly relates to the number concentration of particles, but also affects SO<sub>2</sub> oxidation.

**Key words:** selective catalytic reduction; fine particles; emission characteristics; SO<sub>2</sub>; NH<sub>3</sub>

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)是当今主要大气环境污染物之一,其排放对环境 and 人类健康有很大危害。目前我国氮氧化物的主要排放源是燃煤电厂<sup>[1]</sup>,燃煤电厂大部分都采用了高效的 SCR 脱硝技术。SCR 脱硝装置虽然脱除了 NO<sub>x</sub>,减少了其转化为二次污染物的可能,但是 SCR 过程本身会改变细颗粒物的物化特性,增加一次 PM<sub>2.5</sub> 的排放<sup>[2]</sup>。作为 SCR 核心的催化剂,商业中广泛采用的是 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂<sup>[3]</sup>,他不仅催化脱硝反应,还会将一部分烟气中的 SO<sub>2</sub> 催化氧化成 SO<sub>3</sub>,SO<sub>3</sub> 可与 NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O 反应生成 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 等硫酸铵盐,硫酸铵盐经核化凝结作用形成亚微米级细颗粒,部分在催化剂上积聚,造成催化剂活性点减少,通道堵塞,使 SCR

脱硝效率降低,压降增大。由于 SCR 下游设备空预器及管道温度较低,少部分硫酸铵盐会沉积在空预器及管道内部,引起设备及管道腐蚀,大部分以气溶胶形式随烟气进入后续除尘及湿法烟气脱硫系统,但由于细颗粒物粒径小,很难被后续系统除去,因此最终会排入大气环境<sup>[4]</sup>。

Amanatidis<sup>[5]</sup>、Thiruvengadam<sup>[6]</sup>、Lee 等<sup>[7]</sup> 均发现经过氨(尿素)法 SCR 脱硝后,机动车尾气颗粒物数浓度显著增加,并指出这与硫酸铵盐形成有关。国内马双忱等<sup>[8]</sup>总结了 SCR 脱硝过程中硫酸氢铵的生成量与 SO<sub>2</sub> 氧化率及氨逃逸量有关,但对于其中的影响机理未有深入研究。笔者通过模拟 SCR 脱硝装置,针对 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 商业催化剂,对 SCR

收稿日期:2015-07-29

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973计划,2013CB228505)

作者简介:史雅娟(1991-),女,硕士生,研究方向为大气污染控制,shiyajuan1209@163.com;杨林军(1967-),男,博士,教授,研究方向为大气污染控制,通讯联系人,ylj@seu.edu.cn。

脱硝装置出口PM<sub>2.5</sub>物性进行了测试分析,并研究了SO<sub>2</sub>催化氧化及氨氮体积比对PM<sub>2.5</sub>形成的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 催化剂样品

试验用催化剂是由成型的工业催化剂V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>碾成粉末状,并筛选出均匀颗粒状催化剂样品,主要成分为V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.899%)、TiO<sub>2</sub>(86.81%)、WO<sub>3</sub>(4.61%)。

### 1.2 分析系统

氨法SCR脱硝模拟试验装置整体流程如图1所示。该装置主要由模拟烟气配制系统、催化反应系统、分析测试系统组成。模拟烟气和反应气体由NO、NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>钢瓶气配制;SO<sub>3</sub>是由SO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>在置于恒温水浴锅中的混合器内反应生成,温度控制在60℃。

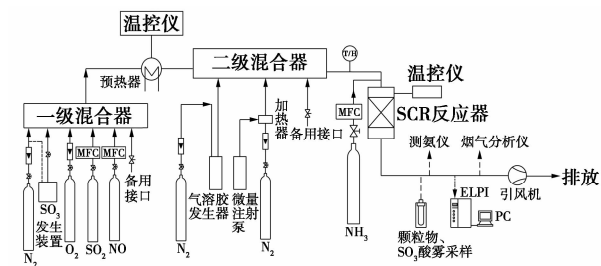


图1 模拟SCR脱硝系统示意图

### 1.3 实验方法

利用场发射扫描电镜-能谱(FSEM-EDX)对

(上接第89页)

(2)第2步固定床加氢还原反应时,采取逆流反应的方式,催化剂为DCF-1Raney-Ni,反应温度为70℃,反应压力为6.0 MPa,总空速为0.3 h<sup>-1</sup>,助催化剂为2.0% NaOH的甲醇溶液,质量分数为0.46%,二甲氨基丙腈的转化率与N,N-二甲基-1,3-丙二胺的选择性均达99.5%以上。

## 参考文献

- [1] Taminco[DB/OL]. www.Taminco.com,2011-12-18.
- [2] Hantsman, Technical Bulletin [DB/OL]. www.hantsman.com, 2013-10-03.
- [3] 索罗蒂亚公司. 3-二甲氨基丙胺的低压制备方法: 中国, 1747925A[P]. 2003-12-12.
- [4] 巴斯夫欧洲公司. 合成N,N-二甲基-1,3-二氨基丙烷(DMA-PA)的方法: 中国, 101321722A[P]. 2006-10-23.
- [5] 巴斯夫欧洲公司. 生产N,N-取代的1,3-丙二胺的方法: 中国, 102026956A[P]. 2009-05-11.

SCR出口颗粒物的形貌进行分析;利用X射线衍射仪测定颗粒物相组成;利用ELPT实时在线测量细颗粒物浓度及粒径分布。实验时,烟气进入旋风分离器,并被脱除大于10 μm的颗粒后,由高温洁净气体稀释后进入ELPI测试系统。实验条件:温度为350℃,氨氮体积比为1.0,NO体积分数为0.08%,SO<sub>2</sub>体积分数为0.08%,水汽体积分数为8%,O<sub>2</sub>体积分数为5%,细颗粒物用PM<sub>2.5</sub>采样器进行采样;利用德国RBR公司生产的ECOM J2KN型烟气分析仪测量烟气中组分浓度。

采用原位红外实验探究氨氮体积比对SO<sub>2</sub>催化氧化的影响。先将待测催化剂样品在400℃的高纯N<sub>2</sub>(20 mL/min)中预处理1 h,在降至350℃过程中,记录下背景值,在采取样品谱图时减除相应的背景值即为样品的原位红外谱图。实验用气体总流量控制为40 mL/min,通入的气体(使用时)体积分数条件如下:φ(NH<sub>3</sub>) = φ(NO) = φ(SO<sub>2</sub>) = 0.2%, φ(O<sub>2</sub>) = 5%,平衡气体为高纯N<sub>2</sub>,并记录吹扫稳定后相应的样品谱图;当样品经SO<sub>2</sub>预吸附处理后,需用N<sub>2</sub>吹扫40 min至稳定状态后,再在N<sub>2</sub>气氛下获取相应样品谱图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SCR出口PM<sub>2.5</sub>物性分析

ELPI在线测试SCR脱硝进出口细颗粒物数浓度的实验结果如图2所示。

- [6] 苏玉光. 二甲基-1,3-丙二胺[J]. 浙江化工,1991,22(1):61-62.
- [7] Meng Q W, Deng C F, Li Y N, et al. Research about the method of synthesizing N,N-dimethyl-1,3-propanediamine continuously[J]. Chemical Engineering, 2013, 35: 1087-1092.
- [8] Fruth A, Strauss J, Stuhler H. Process for the preparation of saturated primary fatty amines by hydrogenation of unsaturated fatty acid nitriles; US, 5175370[P]. 1992-12-29.
- [9] Chen Hui, Xue Mingwei, Hu Shenghua, et al. The effect of surface acidic and basic properties on the hydrogenation of lauronitrile over the supported nickel catalysts[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 181/182: 677-684.
- [10] Barrault Y, Pouilloux. Synthesis of fatty amines. Selectivity control in presence of multifunctional catalysts[J]. Catalysis Today, 1997, 37: 137-153.
- [11] Verhaak M, Van Dillen A J, Geus J W. The selective hydrogenation of acetonitrile on supported nickel catalysts[J]. Catalysis Letters, 1994, 26(1/2): 37-53.
- [12] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬, 等. 物理化学: 下册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 195. ■

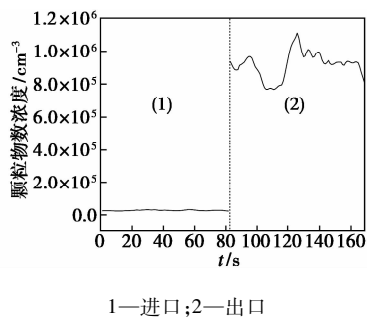


图 2 SCR 进出口细颗粒物数浓度

因为入口烟气由钢瓶气配制,因此,细颗粒物含量接近 0,而经过 SCR 脱硝反应之后,烟气中检测到细颗粒物数浓度达到  $1.0 \times 10^6$  个/cm<sup>3</sup> 左右。表明 SCR 脱硝会促进细颗粒物数浓度的增加。

SCR 脱硝装置出口细颗粒物数浓度分布测试结果如图 3 所示。由图 3 可见,颗粒数粒径多分布在 0.026 ~ 0.08 μm 内,亚微米级颗粒占大多数。通常,颗粒物呈三模态分布,即爱根核模态(粒径 < 0.08 μm)、积聚模态(粒径在 0.08 ~ 2 μm 之间)和粗粒子模态粒径 > 2 μm)<sup>[9]</sup>。由于 SCR 脱硝出口细颗粒物多是 < 0.08 μm 的颗粒,那么其主要是爱根核模态颗粒物。而该颗粒物主要由污染气体经过复杂的化学反应转化而成<sup>[10]</sup>,因此 SCR 出口排放的细颗粒物是在 SCR 脱硝过程中通过化学反应转化得到。

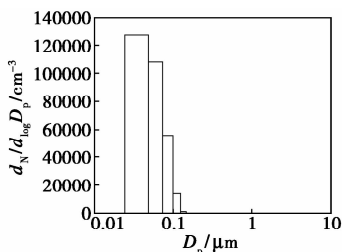
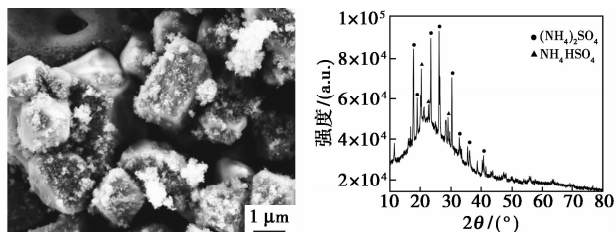


图 3 SCR 出口细颗粒物粒径分布图

SCR 脱硝出口细颗粒物的 SEM 和 XRD 分析如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,这些细颗粒多呈立方体、长方体晶型,大小较为均匀,粒径集中在 1 μm 及 1 μm 以下,这与 ELPI 测试的粒径分布结果相一



(a) SEM 图

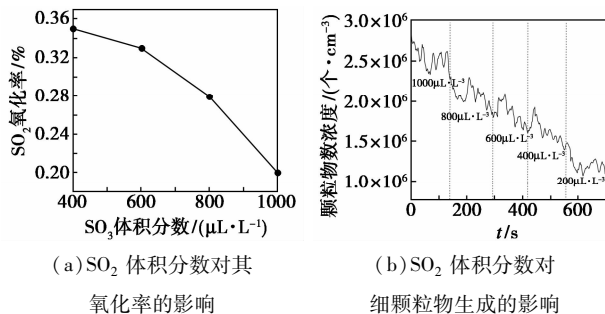
(b) XRD 图

图 4 SCR 出口细颗粒物 SEM 和 XRD 图

致。图 4(b)中可以看出,烟气中的细颗粒物主要为 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> 及少量(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。

## 2.2 SO<sub>2</sub> 催化氧化对 PM<sub>2.5</sub>形成的影响

SO<sub>2</sub> 浓度对其氧化率及细颗粒物生成的影响如图 5 所示。



(a) SO<sub>2</sub> 体积分数对其氧化率的影响

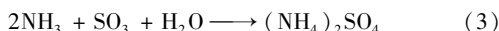
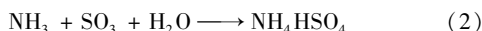
(b) SO<sub>2</sub> 体积分数对细颗粒物生成的影响

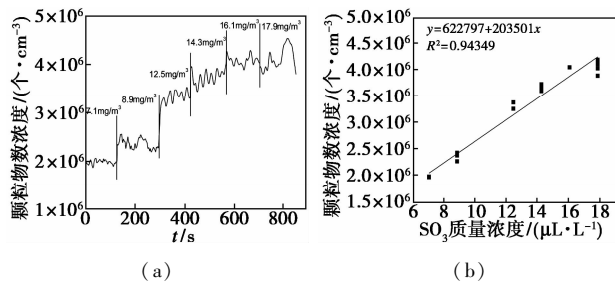
图 5 SO<sub>2</sub> 体积分数对其氧化率及细颗粒物生成的影响

由图 5(a)可知,随着 SO<sub>2</sub> 体积分数的增大,SO<sub>2</sub> 氧化率逐渐降低。Svachula<sup>[11]</sup>指出,在低体积分数范围内(约 350 μL/L),SO<sub>2</sub> 体积分数提高促进了其转化,但受到催化剂上活性位数量限制,当 SO<sub>2</sub> 体积分数很高时,大多数活性位被占据,且由于 SO<sub>2</sub> 的反应速率远小于扩散速率,导致部分 SO<sub>2</sub> 未能反应,降低了 SO<sub>2</sub> 氧化率,所以随着 SO<sub>2</sub> 体积分数的增加,SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 转化率降低,但 SO<sub>3</sub> 生成量总体呈增加趋势。

由图 5(b)可以看出,SO<sub>2</sub> 体积分数的增加会导致出口烟气中细颗粒物数浓度明显增加,这是因为 SO<sub>2</sub> 体积分数提高使得 SO<sub>3</sub> 生成量增多,从而使得在一定氨浓度下,氨与 SO<sub>3</sub> 反应生成的细颗粒物增多。

为验证此猜想,研究了 SO<sub>3</sub> 浓度与 PM<sub>2.5</sub>形成的关系,结果如图 6 所示。实验反应条件为:ρ(NO) = 800 mg/m<sup>3</sup>,φ(O<sub>2</sub>) = 5%,φ(H<sub>2</sub>O) = 8%,[NH<sub>3</sub>]/[NO] = 1.0,N<sub>2</sub> 作为平衡气。结果表明,SCR 脱硝出口细颗粒物浓度随 SO<sub>3</sub> 浓度的增加而增加,SO<sub>3</sub> 浓度与颗粒物数浓度之间的相关性研究得到相关系数 r = 0.971 37,经 F 检验,在 0.01 置信水平上,SO<sub>3</sub> 质量浓度与单位体积颗粒物数目之间呈显著相关关系。结果表明,SO<sub>3</sub> 质量浓度与细颗粒物的生成量有重要关系,说明 SO<sub>2</sub> 的氧化是 SCR 脱硝出口细颗粒物形成的重要因素之一,可推测其具体反应式<sup>[12]</sup>:

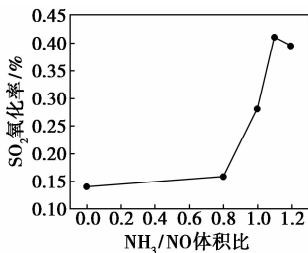


图6 SO<sub>3</sub>浓度对细颗粒数浓度的影响及相关性

### 2.3 NH<sub>3</sub>/NO体积比对PM<sub>2.5</sub>形成的影响

NH<sub>3</sub>/NO体积比是SCR脱硝工艺中一项重要的参数,在脱硝反应中,若氨氮体积比过低,反应所需NH<sub>3</sub>会明显不足,限制催化剂脱硝效率;若氨氮体积比过高,虽然SCR反应会较充分,脱硝效率较高,但氨的逃逸现象显著,不仅会造成NH<sub>3</sub>的浪费和运行成本的增加,还易造成SCR中细颗粒物生成量的增加<sup>[2]</sup>。

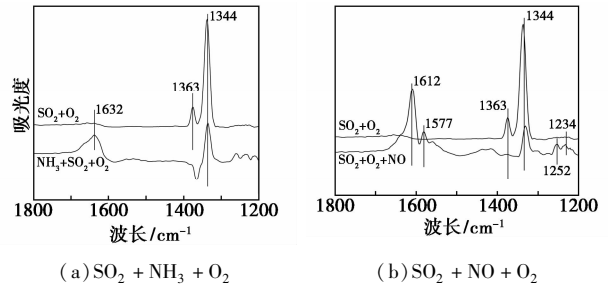
考察了氨氮体积比对SO<sub>2</sub>氧化的影响,结果如图7所示。从图7可以看出,当氨氮体积比 $\alpha < 0.8$ 时,SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化率较低;当 $0.8 \leq \alpha \leq 1.1$ 时,随着NH<sub>3</sub>添加量的增加,SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化率大幅度增加;当氨氮体积比 $\alpha > 1.1$ 时,SO<sub>2</sub>向SO<sub>3</sub>的转化受到了抑制作用。

图7 NH<sub>3</sub>/NO体积比对SO<sub>2</sub>氧化的影响

为进一步研究上述现象的机理,通过傅里叶红外光谱仪分别探究了NH<sub>3</sub>与NO对SO<sub>2</sub>吸附过程的影响,结果如图8所示。

图8(a)为SO<sub>2</sub>与NH<sub>3</sub>在5%O<sub>2</sub>存在条件下的共吸附与单独吸附20min的对比红外谱图,其中1632 cm<sup>-1</sup>处的峰归属于Lewis酸中心吸附的NH<sub>3</sub>中N—H键的简并伸缩振动<sup>[13-14]</sup>,1344 cm<sup>-1</sup>处为归属于吸附态SO<sub>2</sub>(吸附态SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的形式)的特征吸附峰<sup>[15-16]</sup>,在只有SO<sub>2</sub>与O<sub>2</sub>存在的条件下,SO<sub>2</sub>的特征吸附峰强度明显强于与NH<sub>3</sub>共吸附条件下SO<sub>2</sub>特征吸附峰的强度,表明NH<sub>3</sub>与SO<sub>2</sub>之间存在竞争吸附现象,并且NH<sub>3</sub>竞争吸附减弱了SO<sub>2</sub>在催化剂表面的吸附能力,NH<sub>3</sub>与催化剂表面活性点位,特

别是V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>组分的预先吸附,降低了SO<sub>2</sub>与V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>吸附并发生反应的机率,从而阻碍了SO<sub>2</sub>的吸附及氧化现象。图8(b)表明,在NO的共吸附条件下产生的SO<sub>2</sub>特征峰的强度明显弱于SO<sub>2</sub>在O<sub>2</sub>环境下的特征吸附峰强度,表明NO与SO<sub>2</sub>之间存在竞争吸附现象,且NO的竞争吸附减弱了SO<sub>2</sub>在催化剂表面的吸附能力。

图8 SO<sub>2</sub>分别与NH<sub>3</sub>、NO在5%O<sub>2</sub>存在条件下的共吸附与单独吸附20min的对比红外谱图

综上所述,烟气中的NH<sub>3</sub>、NO与SO<sub>2</sub>存在竞争吸附现象,NH<sub>3</sub>、NO与催化剂表面的V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>活性组分的吸附有效降低了SO<sub>2</sub>与V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>点位的吸附,从而减弱了SO<sub>2</sub>在催化剂表面的吸附能力,阻碍了SO<sub>2</sub>有效催化氧化行为的发生,而O<sub>2</sub>的存在却能促进SO<sub>2</sub>在催化剂表面的吸附能力,从而提升其催化氧化能力。

因此,氨氮体积比对SO<sub>2</sub>氧化的影响机理可推测为:氨氮体积比 $\alpha < 0.8$ 时,SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化率较低,这是因为此时NO相对较多,由于NO与SO<sub>2</sub>之间存在竞争吸附现象,且NO的竞争吸附减弱了SO<sub>2</sub>在催化剂表面的吸附能力;当氨氮体积比 $\alpha > 1.1$ 时,NH<sub>3</sub>大量吸附于催化剂上,在V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的活性位上NH<sub>3</sub>和SO<sub>2</sub>出现明显的竞争吸附,吸附的NH<sub>3</sub>阻止SO<sub>2</sub>向催化剂壁面扩散,从而对SO<sub>2</sub>向SO<sub>3</sub>的转化产生了一定的抑制作用,使SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化率减小;当氨氮体积比在0.8~1.1时,NH<sub>3</sub>与NO几乎完全反应,逃逸量很少,不抑制SO<sub>2</sub>氧化,使得SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化率大幅度增加。

为探究NH<sub>3</sub>对细颗粒物形成的影响,考察了不同氨氮体积比时细颗粒物数浓度变化情况,如图9所示。由图9可以看出,氨氮体积比从0.8增至1.2,细颗粒物数浓度也相应增加,但氨氮体积比为0.8与1时,细颗粒物数浓度增长幅度不大;从1增至1.2时,细颗粒物数浓度明显增加。结合氨氮体积比对SO<sub>2</sub>氧化的影响,可分析得到氨氮体积比对PM<sub>2.5</sub>形成的影响如下:氨氮体积比小时,由于氨浓

度本身小,且  $\text{SO}_2$  氧化率很低( $\text{NH}_3/\text{NO}$  体积比为 0.8 时约为 0.15%),使得生成的硫酸铵盐等细颗粒物很少;当氨氮体积比增至 1 时,细颗粒物的生成量有略微增加,这是氨浓度及  $\text{SO}_2$  氧化率增加的结果,但也受到  $\text{SO}_2$  氧化率增幅限制(当  $\text{NH}_3/\text{NO}$  体积比从 0.8 增至 1 时,其从 0.15% 小幅增至 0.28%);当氨氮体积比大于 1 时,氨浓度显著增加,尽管  $\text{SO}_2$  的氧化稍微受到抑制(从 0.41% 降至 0.38%),细颗粒物生成量仍明显增多。因此,氨氮体积比是细颗粒物形成的 1 个关键因素,喷氨过量会使得脱硝出口硫酸盐以及硫酸氢盐细颗粒物的浓度增加。

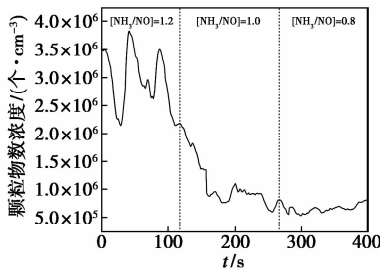


图 9  $\text{NH}_3/\text{NO}$  体积比对  $\text{PM}_{2.5}$  数浓度的影响

### 3 结论

(1) 当  $\text{SO}_2$  与  $\text{NH}_3$  共存时,模拟氨法 SCR 脱硝过程产生大量细颗粒物,其颗粒数浓度达到  $1.0 \times 10^6$  个/ $\text{cm}^3$  左右。细颗粒物主要为  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  及少量  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 。

(2) 氨法 SCR 脱硝中细颗粒物的形成是通过  $\text{SO}_2$  在催化剂表面  $\text{V}_2\text{O}_5$  作用下氧化成  $\text{SO}_3$ ,与烟气中的  $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  反应生成的。随着  $\text{SO}_2$  体积分数的增加,其氧化率减少,但  $\text{SO}_3$  生成量增加,且  $\text{SO}_3$  体积分数与颗粒物数浓度之间有显著相关关系。

(3)  $\text{NH}_3$  对细颗粒物形成的影响机制有 2 个方面:一方面由于  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}$  与  $\text{SO}_2$  存在竞争吸附, $\text{SO}_2$  氧化率受到氨氮体积比影响;另一方面出口的颗粒物浓度随  $\text{NH}_3$  浓度增加而增加,且后者对细颗粒物形成的影响更为显著。因此,SCR 运行时需严格控制  $\text{SO}_2$  氧化率及氨氮体积比,在保证脱硝效率的同时,减少细颗粒物的生成,避免对环境造成二次污染。

### 参考文献

[1] 稂小洛,曹国良,黄学敏. 中国区域氮氧化物排放清单[J]. 环境与可持续发展,2008,(6):19-22.  
[2] 张玉华,束航,范红梅,等. 商业  $\text{V}_2\text{O}_5$ - $\text{WO}_3/\text{TiO}_2$  催化剂 SCR

脱硝过程中  $\text{PM}_{2.5}$  的排放特性及影响因素研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(2):383-389.

- [3] 高岩,栾涛,程凯,等. 选择性催化还原蜂窝状催化剂工业试验研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(35):21-28.  
[4] Matsuda S, Kamo T, Kato A, et al. Deposition of ammonium bisulfate in the selective catalytic reduction of nitrogen oxides with ammonia[J]. Ind Eng Chem Prod Res Dev,1982,21:48-52.  
[5] Amanatidis S, Ntziachristos L, Giechaskiel B, et al. Impact of selective catalytic reduction on exhaust particle formation over excess ammonia events [J]. Environ Sci Technol, 2014, 48: 11527 - 11534.  
[6] Thiruvengadam A, Besch M C, Carder D K, et al. Influence of real-world engine load conditions on nanoparticle emissions from a DPF and SCR equipped heavy-duty diesel engine[J]. Environ Sci Technol,2011,46(3):1907-1913.  
[7] Lee S, Cho Y, Song M, et al. Experimental study on the characteristics of nano-particle emissions from a heavy-duty diesel engine using a urea-SCR system [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(3):355-363.  
[8] 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.  
[9] Wolf M F, Hidy G M. Aerosols and climate: anthropogenic emissions and trends for 50 year[J]. Journal of Geophysical Research,1997, 102(D10):11113-11121.  
[10] 于敦喜. 燃煤细颗粒物的模式识别及其形成机理[D]. 武汉:华中科技大学,2007:11-13.  
[11] Svachula J, Alemany L J, Ferlazzo N, et al. Oxidation of  $\text{SO}_2$  to  $\text{SO}_3$  over honeycomb DeNOxing catalysts[J]. Ind Eng Chem Res,1993, 32:826-834.  
[12] Baek B H, Aneja V P. Measurement and analysis of the relationship between ammonia, acid gases, and fine particles in eastern north carolina[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004,54:623-633.  
[13] Sun D K, Liu Q Y, Liu Z Y, et al. Adsorption and oxidation of  $\text{NH}_3$  over  $\text{V}_2\text{O}_5/\text{AC}$  surface [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009,92(3/4):462-467.  
[14] Ramis G, Li Y, Busca G. Ammonia activation over catalysts for the selective catalytic reduction of  $\text{NO}_x$  and the selective catalytic oxidation of  $\text{NH}_3$ . An FT-IR study[J]. Catalysis Today,1996,28(4):373-380.  
[15] Kantcheva M, Cayirtepe I, Naydenov A, et al. FT-IR spectroscopic investigation of the effect of  $\text{SO}_2$  on the SCR of  $\text{NO}_x$  with propene over  $\text{ZrO}_2$ - $\text{Nb}_2\text{O}_5$  catalyst [J]. Catalysis Today, 2011, 176: 437 - 430.  
[16] Long R Q, Yang R T. FTIR and kinetic studies of the mechanism of  $\text{Fe}^{3+}$ -exchanged  $\text{TiO}_2$ -pillared clay catalyst for selective catalytic reduction of NO with ammonia[J]. Journal of Catalysis,2000,190(1):22-31(10). ■