

氨法烟气脱硫气溶胶特性试验研究

潘丹萍¹, 颜金培², 鲍静静³, 郭彦鹏¹, 陈立奇², 盛溢¹, 杨林军^{1*}

(1. 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;

2. 国家海洋局 海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 福建 厦门 361000;

3. 南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

摘要:气溶胶问题已成为氨法烟气脱硫工艺推广应用的技术瓶颈,通过对氨法脱硫气溶胶化学组分及其粒径进行实时监测,考察了脱硫运行阶段、脱硫液氧化程度及pH值的影响,并试验分析了氨法脱硫过程中气溶胶的形成机理。结果表明,氨法烟气脱硫气溶胶主要为亚微米级颗粒,组分以含硫酸根、铵根为主,集中在0.1~0.4 μm之间。脱硫初始阶段,气溶胶组分中存在NH₄HSO₄和NH₄HSO₃,正常运行阶段,气溶胶组分以(NH₄)₂SO₄和(NH₄)₂SO₃为主。脱硫浆液未进行曝气氧化,气溶胶组分中SO₃²⁻为主,充分氧化后,SO₄²⁻含量明显增加;提高脱硫浆液pH值,气溶胶组分中SO₃²⁻含量增加。非均相反应形成的气溶胶组分中存在NH₄HSO₄、NH₄HSO₃;脱硫液滴的夹带和蒸发作用形成的气溶胶成分主要为(NH₄)₂SO₄和少量(NH₄)₂SO₃。非均相反应对于气溶胶的形成占主要贡献,数量浓度与质量浓度均高于单纯夹带蒸发。

关键词:氨法烟气脱硫;气溶胶;气溶胶质谱;实时探测

中图分类号:X51

文献标志码:A

Experimental Investigation on Properties of Aerosols from Ammonia Desulfurization Flue Gas

PAN Danping¹, YAN Jinpei², BAO Jingjing³, GUO Yanpeng¹, CHEN Liqi², SHENG Yi¹, YANG Linjun^{1*}

(1. Key Lab. of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast Univ., Nanjing 210096, China;

2. Key Lab. of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry (GCMAC), SOA, Xiamen 361000, China;

3. School of Energy and Mechanic Eng., Nanjing Normal Univ., Nanjing 210042, China)

Abstract: In order to solve the problem of aerosol emission, aerosol properties were investigated on-line. Experiments on the effect of different desulfurization phases, oxidation degree and pH value of desulfurization liquid and the analysis of the aerosol formation were carried out. The results showed that aerosols are mainly submicron particles ranging from 0.1 μm to 0.4 μm. NH₄HSO₄ and NH₄HSO₃ exist during the initial phase of desulfurization, while (NH₄)₂SO₄ and (NH₄)₂SO₃ are the main part when the system is in good running. Without oxidation of desulfurization liquid, the aerosol compositions are mainly SO₃²⁻ and the amount of SO₄²⁻ increases significantly after oxidation. The amount of SO₃²⁻ increases when the pH value of desulfurization liquid gets higher. NH₄HSO₄ and NH₄HSO₃ exist in the aerosols formed by the heterogeneous reaction which makes greater contribution to the aerosol formation and the compositions of aerosols formed by entrainment and evaporation of desulfurization.

Key words: ammonia flue gas desulfurization; aerosol; aerosol mass spectrometry; on-line measurement

近年来,氨法烟气脱硫工艺由于其气-液反应速度快、脱硫副产物可回收利用、脱硫效率高等优点

逐步得到推广^[1-2],但在脱硫过程中易产生大量气溶胶,单靠脱硫液的洗涤效应难以有效脱除,颗粒物

收稿日期:2015-03-17

基金项目:国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室开放基金资助项目(GCMAC1104);国家自然科学基金资助项目(51176034, 21106018, 21276049);国家重点基础研究发展规划基金资助项目(2013CB228505);国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA061604);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130906);江苏省高校自然科学基金资助项目(13KJB610011)

作者简介:潘丹萍(1989—),女,博士生.研究方向:大气污染控制. E-mail:782413560@qq.com

*通信联系人 E-mail:ylj@seu.edu.cn

随脱硫净烟气排入大气环境中,产生“硫酸雨”问题,严重影响大气环境质量^[3]。因此,脱硫过程中气溶胶的形成及其排放控制是氨法脱硫工艺亟需解决的关键问题。

目前,已有研究主要关注操作条件对脱硫效率的影响以及脱硫副产品的回收利用,对于脱硫过程中气溶胶的形成及其排放控制,国内仅见鲍静静^[4-5]、颜金培^[6-7]等开展过相关研究。已有研究中^[4-7],氨法脱硫过程中排放的气溶胶颗粒浓度和粒径分布虽可采用电称低压冲击器(ELPI)等仪器实现在线监测,但对于化学组成测试则采用离线分析方法,即先用玻璃纤维滤筒采集气溶胶样品,然后采用场发射扫描电镜-能谱分析(FSEM-EDS)、X射线衍射(XRD)等手段分析测试气溶胶颗粒的形态、元素及物相组成^[8-9]。采样过程中难免会带来滤筒基体的干扰^[10];同时,在气溶胶样品采集、贮存和运输过程中易发生诸如挥发、结晶、气-粒转化反应等,不能真实反映气溶胶颗粒最初的特性,影响氨法烟气脱硫中气溶胶形成机理的研究分析。因此,为探究氨法烟气脱硫过程中气溶胶形成机制,对所形成气溶胶进行实时监测,在线测试分析获得气溶胶的化学组成、粒径分布及浓度等物性数据尤为重要。

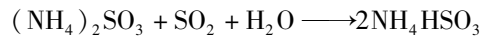
气溶胶质谱仪(AMS)是近十年来发展起来的颗粒物在线化学成分分析仪器,可以实时在线测试颗粒物大小及化学成分,特别适合于挥发性和半挥发性颗粒物的测定^[11]。针对传统采样方法无法获得真实的脱硫气溶胶产物特征,AMS具有高时间分辨的特性,通过对高温真空环境下颗粒物蒸发出的气体进行电离和质谱检测,实时获得氨法脱硫过程气溶胶组成变化,对研究氨法烟气脱硫过程中气溶胶形成机制提供了准确的数据。

作者利用自行搭建的湿法烟气脱硫试验装置,对氨法脱硫过程中形成的气溶胶化学组分及浓度等进行实时测试分析,考察了湿法烟气脱硫启动阶段及正常运行阶段、脱硫液氧化程度及其pH值的影响并试验分析了氨法烟气脱硫过程中气溶胶的形成机理。

1 试验方法

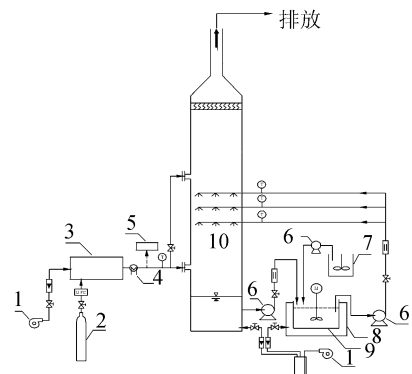
氨法烟气脱硫工艺是以液氨或氨水作为吸收剂吸收烟气中的SO₂,氨吸收液在吸收循环过程中逐渐成为(NH₄)₂SO₃-NH₄HSO₃混合溶液,因而氨法脱硫工艺实质上是用(NH₄)₂SO₃-NH₄HSO₃溶液

吸收烟气中的SO₂,在吸收塔中主要发生如下反应:



NH₄HSO₃不具有吸收SO₂的能力,经补充氨后发生如下反应,使吸收液恢复吸收能力: 2NH₄HSO₃ + NH₃ → (NH₄)₂SO₃ 根据脱硫过程和副产物的不同,湿式氨法脱硫工艺可分为氨-酸法、氨-亚硫酸铵法、氨-硫酸铵法,作者采用氨-硫酸铵法开展试验研究。

图1为氨法烟气脱硫气溶胶实时在线测试系统示意图,主要由模拟烟气配制系统、脱硫塔、脱硫浆液配制输送系统组成。采用旋涡气泵提供空气、钢瓶气提供SO₂,在静态混合器充分混合,配制成一定SO₂浓度的模拟烟气,其中SO₂添加量可通过质量流量计控制。模拟烟气经电加热器升温后进入脱硫塔进行脱硫反应,为考察气溶胶不同来源特性,塔入口处设置旁路。脱硫塔采用具有优良耐热性能的聚碳酸酯PC管制作,为喷淋塔结构,设置三级喷淋,塔出口设置除雾器。塔内烟气与脱硫浆液逆流接触反应后经除雾器排放,脱硫浆液则返回到塔外结晶槽中循环利用,槽底部设置曝气系统进行强制氧化。系统启动运行至结晶槽内浆液pH值达5.5,通过添加氨水以维持脱硫浆液pH值稳定。



1. 鼓风机; 2. SO₂; 3. 静态混合器; 4. 加热器; 5. 烟气分析仪;
6. 泵; 7. 氨水贮槽; 8. 水浴锅; 9. 结晶槽; 10. 喷淋塔。

图1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

试验采用Aerodyne公司的Q-AMS气溶胶质谱仪在线监测脱硫塔出口烟气中的气溶胶微粒组分及浓度分布,该仪器可以有效分析粒度在0.03~1.0 μm 粒径范围的气溶胶粒子,可以检测气化温度在200~900℃之间的化合物,铵盐、硫酸盐、亚硫酸盐等均在此范围内。在试验测试过程中,由于塔出口烟气浓度远高于仪器检出限,出口烟气需经稀释装置稀释后再进入该仪器进行监测,同时,由于仪器存在检测上限,在测试过程中,需要不时调节稀释比。

2 结果与讨论

2.1 氨法烟气脱硫气溶胶排放特性

为考察氨法烟气脱硫系统出口烟气中气溶胶物性,利用图1所示湿法烟气脱硫系统进行试验研究,采用20%硫酸铵溶液作为初始脱硫液,模拟烟气量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,控制 SO_2 浓度为 $2\ 857 \text{ mg}/\text{m}^3$,操作液气比(L/G)为 $16 \text{ L}/\text{m}^3$,模拟烟气加热至 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 后通入脱硫塔,利用水浴恒温加热维持脱硫浆液温度为 $45 \text{ }^\circ\text{C}$,采用烟气分析仪测试脱硫效率可达92%。ELPI可在线监测烟气中粒径为 $0.023 \sim 9.314 \text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物浓度及粒径分布,图2为ELPI在线监测结果。

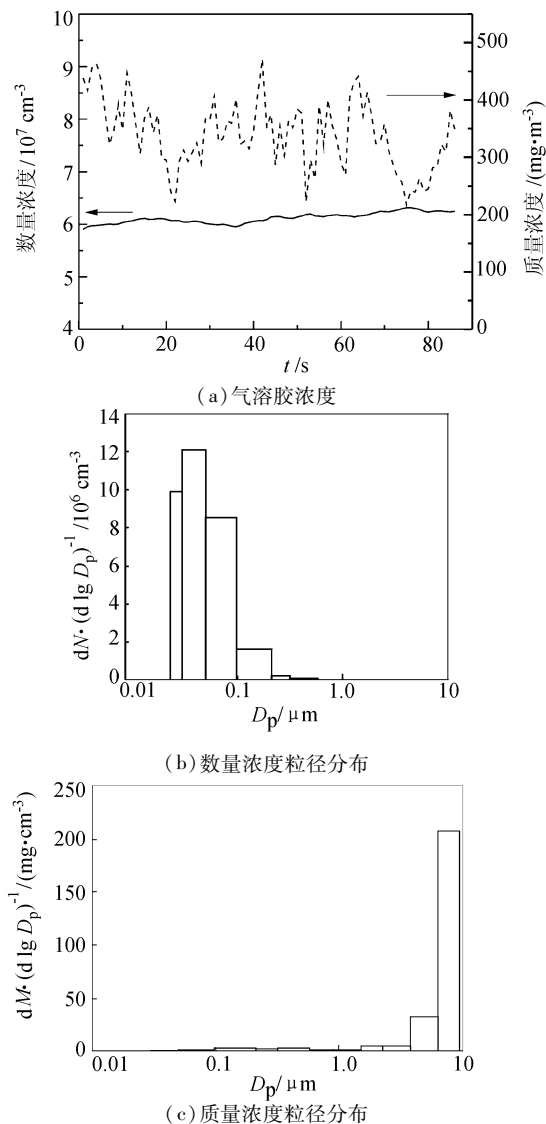
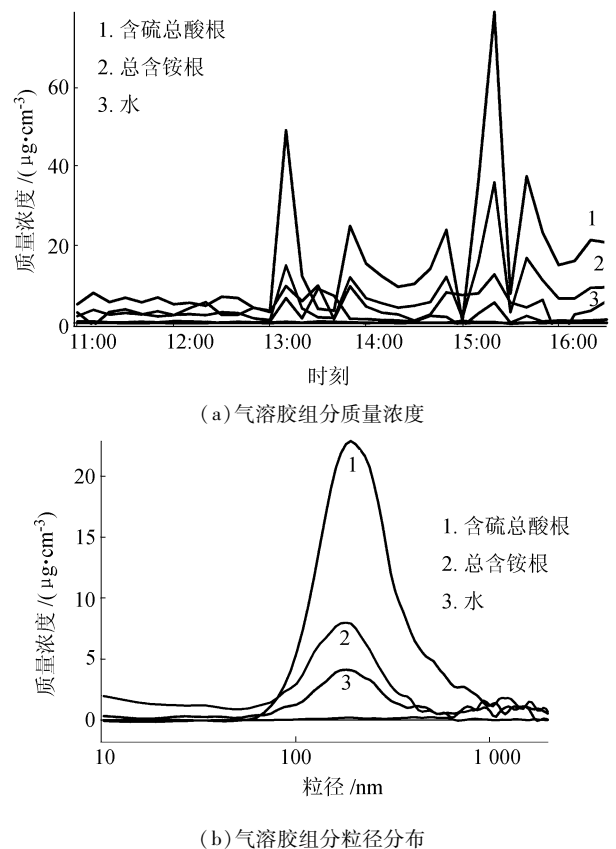


图2 ELPI监测结果

Fig. 2 Results of ELPI

试验过程中模拟烟气采用空气与 SO_2 配制,颗粒物含量极低,可忽略不计,由图2(a)可知,氨法烟气脱硫后烟气中气溶胶浓度明显增加,数量浓度约为 6×10^7 个/ m^3 ,质量浓度约为 $350 \text{ mg}/\text{m}^3$,由于质量浓度与较大粒径颗粒物相关,波动更加明显。因此,大量气溶胶颗粒在氨法烟气脱硫过程中产生并随烟气排放。图2(b)为脱硫后烟气中气溶胶数量浓度粒径分布,由图2(b)可知,气溶胶以细颗粒物为主,集中在 $0.03 \sim 0.2 \text{ }\mu\text{m}$,其中粒径分布峰值出现在 $0.04 \text{ }\mu\text{m}$ 附近;从质量浓度上看,如图2(c)所示,由于质量与粒径正相关,则以较大粒径气溶胶为主,在仪器检测范围内,主要集中在 $3 \text{ }\mu\text{m}$ 以上,亚微米级气溶胶也存在峰值,但相对平缓,主要集中在 $0.1 \sim 1 \text{ }\mu\text{m}$ 。

因此,氨法烟气脱硫后气溶胶主要为亚微米级颗粒,为有效控制脱硫烟气气溶胶排放问题,应重点关注亚微米级颗粒物特性。针对亚微米级气溶胶颗粒,采用气溶胶质谱仪在线监测氨法烟气脱硫气溶胶组分如图3所示。



(b) 气溶胶组分粒径分布

$$Q = 15 \text{ L}/\text{m}^3; c(\text{SO}_2) = 2\ 857 \text{ mg}/\text{m}^3;$$

$$L/G = 16 \text{ L}/\text{m}^3; t_{\text{inlet}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{liquid}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}.$$

图3 气溶胶质谱仪监测结果

Fig. 3 Results of aerosol mass spectrometry

由图3(a)可知,脱硫后烟气中气溶胶组分以含硫酸根、铵根为主,主要来源于脱硫过程中产生的硫酸铵、亚硫酸铵等物质,水分是由于被烟气夹带出的脱硫浆液未完全蒸发所致,由于空气中存在有机气溶胶,图中出现有机物组分。受仪器检出限要求,测试过程中,稀释比需要时常调节,所以图中出现突变峰值。图3(b)为气溶胶中各组分粒度分布,各组分粒度均呈对数正态分布,且变化趋势类似,可推测气溶胶微粒质量浓度粒径分布峰值也出现在0.2 μm 左右,主要集中在0.1~0.4 μm 。工业上硫酸铵法烟气脱硫采用氨水作为启动脱硫液,随运行时间脱硫液中硫酸铵浓度不断增加直至达到过饱和,进入正常运行阶段,本试验分别采用氨水及饱和硫酸铵溶液作为初始脱硫液,维持其他操作条件不变,稳定运行后采用气溶胶质谱仪在线监测得到氨法烟气脱硫初始阶段及正常运行阶段净烟气中气溶胶组分,如表1所示。

利用模拟烟气进行烟气脱硫试验,初始烟气中颗粒物含量极低,可忽略不计,结合其脱硫过程中涉及的反应过程,气溶胶可能含硫酸铵、亚硫酸铵、硫酸氢铵、亚硫酸氢铵等组分,但由于气溶胶质谱仪只能检测得到含硫总酸根,无法进一步鉴别其中的亚硫酸根、硫酸氢根、亚硫酸氢根等离子成分。为此,通过对比硫酸铵等物质的阴阳离子质量分率与气溶胶质谱仪测得的含硫总酸根/总含铵根质量比,来分析气溶胶成分。设 $a(\text{气溶胶}) = m(\text{含硫总酸根})/m(\text{总含铵根})$,其中含硫总酸根、总含铵根为气溶胶质谱仪所测总含量; $a(\text{硫酸铵}) = 2.67$, $a(\text{亚硫酸铵}) = 2.22$, $a(\text{硫酸氢铵}) = 4.50$, $a(\text{亚硫酸氢铵}) = 5.39$ 。

由表1可知,氨法烟气脱硫初始阶段,气溶胶组分中含硫总酸根含量为54.5%,总含铵根含量为16.6%,两者比值为3.28,这表明气溶胶中除硫酸根、亚硫酸根外,还存在硫酸氢根、亚硫酸氢根。此时,脱硫液浓度极低,减弱了脱硫浆液夹带及蒸发作用等影响,气溶胶组分中存在的硫酸氢铵、亚硫酸氢铵应为脱硫液中挥发逸出的 NH_3 、水汽与烟气中 SO_2 在高湿环境中反应生成,由于氨水浓度较低,挥发量较少, SO_2 过量, a 值偏大。在氨法烟气脱硫正常运行阶段,气溶胶组分中含硫总酸根含量为57.8%,总含铵根含量为23.8%,两者比值为2.43,介于硫酸铵和亚硫酸铵比值之间,气溶胶阴离子组分主要以硫酸根和亚硫酸根为主。脱硫浆液浓度增加,脱硫浆液夹带及蒸发作用对气溶胶形成的贡献

增强,气溶胶组分中水含量减少,含硫总酸根和总含铵根含量均有所增加,其中总含铵根含量增加更为明显, a 值减小。

表1 不同脱硫阶段气溶胶组分

Tab.1 Aerosol compositions during different desulfurization phases

	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{NH}_4)/\%$	$w(\text{SO}_4)/\%$
氨水	23.7	16.6	54.5
饱和硫酸铵	16.6	23.8	57.8

2.2 气溶胶组分特性

2.2.1 氧化程度影响

工业上湿式氨法脱硫工艺主要为氨-亚硫酸铵法与氨-硫酸铵法,而两者最大的区别在于脱硫产物氧化程度,试验中采用氨水作为初始脱硫液,其他操作条件同第2.1节。系统稳定运行后,通过是否对脱硫液进行塔外曝气氧化考察脱硫液氧化程度对于脱硫净烟气中气溶胶组分的影响,结果如表2所示。当脱硫过程中不进行塔外氧化曝气时,出口烟气中气溶胶组分含硫总酸根含量为53.7%,总含铵根含量为21.8%,两者比值为2.46,脱硫净烟气的亚硫酸铵含量较高。此时由于未进行塔外曝气,仅依靠模拟烟气中含氧量不足以充分氧化脱硫过程中生成的亚硫酸盐。当进行塔外氧化曝气,控制氧化空气量为1000 L/h时,曝气量充足,此时气溶胶组分中含硫总酸根含量为54.5%,总含铵根含量为16.6%,两者比值为3.28,相对于未塔外曝气氧化时比值增大,介于硫酸铵与硫酸氢铵之间,硫酸根含量增加明显。

表2 氧化程度对气溶胶组分影响

Tab.2 Effect of oxidation on aerosol compositions

$Q/(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{NH}_4)/\%$	$w(\text{SO}_4)/\%$
0	21.6	21.8	53.7
1000	23.7	16.6	54.5

2.2.2 脱硫液pH值影响

工业上氨法烟气脱硫pH值一般维持在5.0~6.5,为考察脱硫液pH值对脱硫净烟气中气溶胶组分影响,试验中采用饱和硫酸铵溶液作为初始脱硫液,氨法烟气脱硫处于正常运行阶段,降低模拟烟气 SO_2 浓度至1143 mg/m^3 以满足脱硫效率,其他操作条件同2.1,运行稳定后,控制脱硫液pH值分别为5.0、6.3,气溶胶组分测试结果如表3所示。当pH值为5.0时,气溶胶组分中含硫总酸根含量为59.1%,总含铵根含量为25.1%,两者比值为2.35,这表明气溶胶主要成分为硫酸铵及亚硫酸铵。增加

氨水添加量,控制脱硫浆液 pH 值为 6.3,气溶胶组分中含硫总酸根含量为 64.1%,总含铵根含量为 28.1%,两者比值为 2.28。通过添加氨水提高脱硫浆液 pH 值,脱硫浆液中氨浓度增加,脱硫反应增强,气溶胶浓度增加,同时氧化率下降,亚硫酸铵含量增加, a 值减小。

表 3 脱硫液 pH 值对气溶胶组分影响

Tab. 3 Effect of pH value of desulfurization liquid on aerosol compositions

pH	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{NH}_4)/\%$	$w(\text{SO}_4)/\%$
5.0	12.3	25.1	59.1
6.3	5.2	28.1	64.1

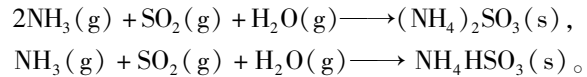
2.3 气溶胶形成机理分析

鲍静静、颜金培等^[4-7]通过测试分析氨法烟气脱硫前后细颗粒的浓度、粒径分布、形态及其组成的变化特性,得到氨法烟气脱硫过程中气溶胶形成主要通过以下 2 种途径:一是脱硫液中挥发逸出的气态 NH_3 与烟气中 SO_2 、 H_2O 间的非均相反应形成;二是来自于脱硫液滴的夹带和蒸发作用。作者结合气溶胶质谱仪在线分析结果,对这 2 种途径分别进行了试验验证。

采用饱和硫酸铵溶液作为初始脱硫液,其他操作条件同第 2.1 节,氨法烟气脱硫正常运行一段时间后,模拟烟气中停止添加 SO_2 ,在线监测脱硫净烟气中气溶胶化学组分,在该工况下,脱硫净烟气中气溶胶主要来自于脱硫液滴的夹带和蒸发作用,塔内基本不发生化学反应。喷淋层位置不变,模拟烟气通过旁路进入脱硫塔,入口设置在喷淋层上方,其他操作条件同第 2.1 节,此时,脱硫液喷淋过程中逸出的 NH_3 、 H_2O 在喷淋层上方与烟气中 SO_2 发生非均相反应形成气溶胶。

不同气溶胶形成机制下气溶胶组分如表 4 所示,当气溶胶来源于脱硫浆液的夹带和蒸发作用时,气溶胶组分中含硫总酸根含量为 51.5%,总含铵根含量为 22.6%,比值为 2.28,介于硫酸铵和亚硫酸铵比值之间。由于脱硫液中挥发逸出的 NH_3 易吸附在具有较大比表面积的气溶胶颗粒表面,导致铵盐监测结果增加,硫酸盐与铵盐的比值减小。考虑该因素的影响,表明此时形成的气溶胶成分基本与脱硫液组分相近,主要为硫酸铵和少量亚硫酸铵。当气溶胶来源于非均相反应时,其组分中含硫总酸根含量为 48.8%,总含铵根 16.2%,两者比值为 3.01,大于硫酸铵和亚硫酸铵的比值,小于硫酸氢铵和亚硫酸氢铵的比值,因此,塔内烟气中非均相反应

生成的气溶胶组分中存在亚硫酸氢根及硫酸氢根。上述试验条件下,由氧化空气带出的气态 NH_3 、水汽与烟气中 SO_2 可发生如下反应:



由于气相中含有 O_2 ,可进一步发生如下氧化反应:

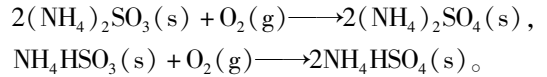
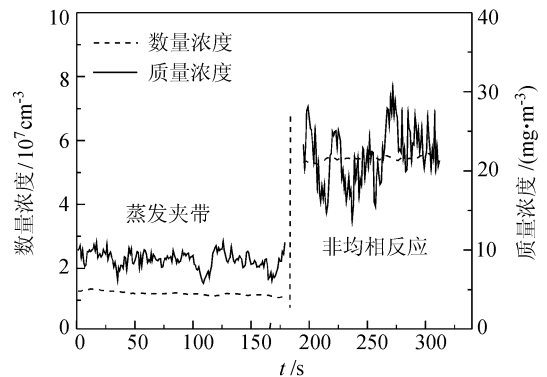


表 4 不同形成机制下气溶胶组分

Tab. 4 Aerosol compositions by different formation mechanisms

	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{NH}_4)/\%$	$w(\text{SO}_4)/\%$
蒸发夹带	23.3	22.6	51.5
非均相反应	31.8	16.2	48.8

采用 ELPI 在线测试上述 2 种形成途径下气溶胶浓度,第 1~9 级撞击器采集粒径 0.023~1.505 μm 的颗粒物,接近气溶胶质谱仪测试范围,结果如图 4 所示。由图 4 可知,2 种工况下均形成大量气溶胶,因此上述 2 种形成途径均存在,其中非均相反应对于气溶胶的形成占主要贡献,其数量浓度与质量浓度均高于单纯夹带蒸发。



$Q = 15 \text{ L/m}^3; L/G = 16 \text{ L/m}^3; t_{\text{inlet}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{liquid}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}.$

图 4 不同形成机制下气溶胶浓度

Fig. 4 Aerosol concentrations by different formation mechanisms

3 结论

利用自行搭建的氨法烟气脱硫系统,采用气溶胶质谱仪和 ELPI 对净烟气气溶胶进行在线监测分析,得到如下结论:

1) 氨法烟气脱硫气溶胶主要为亚微米级颗粒物,组分以含硫酸根、铵根为主,主要集中在 0.1~0.4 μm 。氨法烟气脱硫运行初始阶段,气溶胶组分中存在亚硫酸铵、亚硫酸氢铵,正常运行后,气溶胶

组分以硫酸铵和亚硫酸铵为主。

2) 脱硫浆液未进行曝气氧化,气溶胶组分中亚硫酸根为主,充分氧化后,硫酸根含量明显增加;提高脱硫浆液 pH 值,气溶胶组分中亚硫酸根含量增加。

3) 通过脱硫液中挥发逸出的气态 NH_3 与烟气中 SO_2 、 H_2O 间的非均相反应形成的气溶胶组分中存在亚硫酸氢根、硫酸氢根;来自于脱硫液滴的夹带和蒸发作用形成的气溶胶成分基本与脱硫液组分相近,主要为硫酸铵和少量亚硫酸铵。其中,非均相反应对于气溶胶的形成占主要贡献,数量浓度与质量浓度均高于单纯夹带蒸发。

参考文献:

- [1] Wang Lin, Liu Zhigang, Gao qiang, et al. The application of desulphurization technique in the plant of CPCCLILU branch company[J]. Energy Conservation, 2011, 30(3): 37-41. [王林, 刘志刚, 高强, 等. 玛苏莱氨法脱硫技术在齐鲁石化热电厂的应用[J]. 节能, 2011, 30(3): 37-41.]
- [2] Liu Deyou, Zhu Caiquan, Xu Changxiang, et al. Application of ammonia process of flue gas desulfurization in petrochemical thermoelectricity plant[J]. China Environmental Protection Industry, 2008(11): 28-31. [刘德友, 褚才全, 徐长香, 等. 烟气氨法脱硫技术在石化热电厂的应用[J]. 中国环保产业, 2008(11): 28-31.]
- [3] Wu Pengping, Han Zhiwei. A modeling study of indirect radiative and climatic effects of sulfate over east Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(3): 547-559. [吴蓬萍, 韩志伟. 东亚地区硫酸盐气溶胶间接辐射和气候效应的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2011, 35(3): 547-559.]
- [4] Bao Jingjing, Yin Huabin, Yang Linjun, et al. Formation characteristics of aerosols in wet ammonia-based desulphurization process[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2010, 24(2): 325-330. [鲍静静, 印华斌, 杨林军, 等. 湿式氨法烟气脱硫中气溶胶的形成特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(2): 325-330.]
- [5] Bao Jingjing, Yang Linjun, Yan Jinpei, et al. Performance of

removal of fine particles by WFGD system[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(5): 1260-1267. [鲍静静, 杨林军, 颜金培, 等. 湿法烟气脱硫系统对细颗粒脱除性能的实验研究[J]. 化工学报, 2009, 60(5): 1260-1267.]

- [6] Yan Jinpei, Yang Linjun, Bao Jingjing, et al. Impact property on fine particles from coal combustion in wet flue gas desulfurization process[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(2): 387-392. [颜金培, 杨林军, 鲍静静, 等. 湿法脱硫烟气中细颗粒物的变化特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(2): 387-392.]
- [7] Yan Jinpei, Yang Linjun, Bao Jingjing, et al. Impact property on fine particles from coal combustion in ammonia flue gas desulfurization process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 21-26. [颜金培, 杨林军, 鲍静静, 等. 氨法脱硫过程烟气中细颗粒物的变化特性[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 21-26.]
- [8] 钟秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [9] Yan J P, Bao J J, Yang L J. The formation and removal characteristics of aerosols in ammonia-based wet flue gas desulfurization[J]. Journal of Aerosol Science, 2011, 42(9): 604-614.
- [10] Huang Xiaofeng, Xue Lian, He Lingyan, et al. Online measurement of organic aerosol elemental composition based on high resolution aerosol mass spectrometry[J]. Science China Press, 2010(35): 3391-3396. [黄晓锋, 薛莲, 何凌燕, 等. 应用高分辨气溶胶质谱在线测定有机气溶胶元素组成[J]. 科学通报, 2010(35): 3391-3396.]
- [11] Canagaratna M R, Jayne J T, Jimenez J L, et al. Chemical and microphysical characterization of ambient aerosols with the aerodyne aerosol mass spectrometer[J]. Mass Spectrometry Review, 2007, 26(2): 185-222.

(编辑 黄小川)