研究开发

DOI：10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0186
开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

超低排放燃煤电厂中SO_3的迁移及脱除特征

冯鹏，李正鸿，刘鹤欣，谭厚章，张思聪，卢旭超，杨富鑫
（西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，陕西 西安 710049）

摘要：燃煤烟气中的SO_3会对机组运行及大气环境造成不利影响。为研究燃煤电厂SO_3排放特征，本文采取异丙醇吸收法对某300MW超低排放机组污染物控制装置进出口SO_3采样，以分析SO_3在燃煤机组中的迁移及脱除特性。结果表明：炉膛燃烧过程以及选择性催化还原装置（selective catalytic reduction，SCR）均将部分SO_2转化为SO_3，炉膛燃烧生成SO_3的质量浓度为SO_2的0.86%，SCR内SO_2/SO_3转化率为0.45%。烟气经过空气预热器，SO_3浓度降低了5.7%；静电除尘器（electrostatic precipitator，ESP）脱除SO_3效果较差，主要由于ESP内烟温在110℃以上，H_2SO_4酸雾凝结量较少；双级湿法脱硫装置（wet flue gas desulfurization，WFGD）对SO_3脱除效率达到81.3%，比国内单级脱硫装置SO_3脱除效果高30%～50%；湿式静电除尘器（wet electrostatic precipitator，WESP）脱除SO_3效率为23.0%。机组烟囱排放SO_3质量浓度为2.025mg/m^3（标准），SO_3排放因子EF为0.034kg/t。

关键词：燃煤机组；三氧化硫；超低排放；脱除特性；排放因子
中图分类号：X701 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-6613（2020）11-4660-08

Migration and removal characteristics of SO_3 in ultra-low emission coal-fired power plant

FENG Peng，*LI Zhenghong*，*LIU Hexin*，*TAN Houzhang*，*ZHANG Sicong*，*LU Xuchao*，*YANG Fuxin*
(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: SO_3 in coal-fired flue gas could cause negative effects on the operation of power plants and the atmospheric environment. To further understand the SO_3 emission from coal-fired power plants, SO_3 was sampled by isopropanol absorption method at the inlet and outlet of each air pollution control device of a 300MW ultra-low emission unit. The migration and removal characteristics of SO_3 was analyzed. The results showed that both of combustion process and selective catalytic reduction (SCR) could converted SO_2 into SO_3. The mass concentration of SO_3 generated in the combustion process accounted for 0.86% of SO_2 and the conversion rate of SO_2/SO_3 in SCR was 0.45%. The SO_3 concentration was reduced by 5.7% with an air preheater. The removal efficiency of SO_3 by electrostatic precipitator (ESP) was not satisfactory because the temperature of the flue gas in ESP was above 110℃, which resulted in a less condensation amount of H_2SO_4 acid mist. The removal efficiency of SO_3 by the two-stage desulfurization tower was 81.3%, which was 30%—50% higher than that of single stage desulfurization tower. The SO_3 removal efficiency by wet electrostatic precipitator (WESP) was 23%. The SO_3 emission mass concentration of coal-fired power plant was 2.025mg/m^3 with an emission factor EF_{coal} of 0.034kg/t.

收稿日期：2020-02-11；**修改稿日期**：2020-03-19。
基金项目：国家重点研发计划（2016YFB0600605）。
第一作者：冯鹏（1994—），男，硕士研究生，研究方向为燃煤电厂污染物排放特征。E-mail：fengpeng9858@stu.xjtu.edu.cn。
通信作者：杨富鑫，副教授，主要从事热力学、生物质能的利用、电厂节能减排等方面的研究。E-mail：fxyang@xjtu.edu.cn。
引用本文：冯鹏, 李正鸿, 刘鹤欣, 等. 超低排放燃煤电厂中SO_3的迁移及脱除特征[J]. 化工进展, 2020, 39(11): 4660-4667.
Citation: FENG Peng, LI Zhenghong, LIU Hexin, et al. Migration and removal characteristics of SO_3 in ultra-low emission coal-fired power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(11): 4660-4667.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Keywords: coal-fired power plant; sulfur trioxide; ultra-low emission; removal characteristics; emission factor

燃煤机组超低排放标准全面实施以来，烟气中可过滤颗粒物（FPM）、二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_x）等污染物的排放已经得到有效控制，而对于三氧化硫（SO_3）尚未采取针对性的控制措施。尤其随着近年来选择性催化还原技术（SCR）的广泛应用，燃煤机组的SO_3浓度明显增加，对燃煤电厂设备性能和环境的影响也愈加严重。烟气中SO_3是设备腐蚀和堵塞的主要诱因，其以H_2SO_4酸雾的形式存在更是对烟道金属部件等的防腐带来了挑战。燃煤机组排放出的亚微米H_2SO_4雾滴对于短波的散射很强，从而使得烟羽呈现蓝色。当烟气中的H_2SO_4气溶胶体积浓度在5～10mL/m^3（SO_3体积浓度1mL/m^{3}相当于质量浓度36mg/m^3）时就可能出现蓝色烟羽[1]，并导致烟羽不透明度大于50%[2]，对燃煤电厂周边生态环境产生不利影响。我国针对燃煤机组SO_3排放尚无国家标准，仅部分地区标准（如上海），提出SO_3（或H_2SO_4气溶胶）须控制在5mg/m^{3}以下[3]。

目前绝大多数燃煤机组主要依靠现有污染物控制装置对SO_3协同脱除，而国内外学者对烟气中SO_3的迁移特性以及当前污染物控制设备脱除SO_3效果均开展了研究。Ahn等[4]通过富氧燃烧中试实验结合动力学计算，指出了煤种、燃烧温度、氧量对炉膛中SO_3生成的影响规律：在800K温度条件下，炉膛中氧含量越高，则生成的SO_3浓度越高。清华大学颗粒与燃烧工程研究组[5]搭建三级测量系统，对SCR中SO_2与SO_3同时测量，发现脱硝效率与SO_2/SO_3转化率均与SCR内烟气温度成正比，综合两者效果得到SCR最佳温度区间为310～400℃。Sinanis等[6]通过实验与模拟相结合的方法对H_2SO_4酸雾的成核过程进行研究，认为H_2SO_4酸雾主要通过均相成核形成，只有SO_3浓度低于2mg/m^{3}时以异相成核为主导。Anderlohr等[7]在中试平台上对湿式静电除尘器（WESP）脱除SO_3特性进行研究发现：烟气中残留的SO_2会在湿电除尘器中生成H_2SO_4气溶胶，在没有SO_3存在的WESP中添加SO_2质量浓度达到6mg/m^{3}以上时，WESP可排放出数量浓度大于10^7个/cm^{3}的H_2SO_4气溶胶。于伟静等[8]通过建立热力学SO_3形态转化计算模型，研究得到燃煤电厂烟气中SO_3主要以SO_3气体、H_2SO_4气体和H_2SO_4酸雾气溶胶三种形式存在，而当烟气温度低于95℃时，烟气中SO_3主要以H_2SO_4酸雾气溶胶的形态存在。李高磊等[9]对3台超低排放机组进行现场实测，测得机组SO_3总脱除效率为80%～90%，SO_3排放质量浓度在5.7~11.4mg/m^3。赵毅等[10]研究发现：典型超低排放电厂污染物控制设备对SO_3总脱除效率为71.86%；张军等[11]对1000MW超低排放机组进行了现场测试，发现湿法脱硫设备与湿电除尘器对SO_3的脱除效率分别达到76.8%和73.9%。

总体而言，目前对于烟气中SO_3的研究大部分集中在生成机理、迁移特性以及单个污染物控制设备对SO_3的脱除特性。而对典型超低排放燃煤机组烟气污染物控制设备，特别是双级脱硫塔对SO_3脱除效果的研究较少。本文采用EPA Method 8推荐的异丙醇吸收法对某300MW燃煤机组烟气沿程SO_3进行采样试验、测试分析，得到SO_3在燃煤机组污染物控制装置中的迁移及脱除特性，为进一步治理燃煤机组SO_3的排放提供参考。

1　材料和方法

1.1　燃煤机组概况

试验选取的某300MW机组，采用锅炉为东方锅炉厂生产的DG1025/18.2-Ⅱ6型汽包锅炉，试验期间锅炉运行负荷为70%。测试机组SCR催化剂采用“2+1”布置方式，初装两层蜂窝式催化剂，后续在第三层加装同厂家生产的蜂窝式催化剂；ESP电源改造为高频高压电源；脱硫系统采用“预洗塔+吸收塔”双级串联脱硫塔，第二级脱硫塔加装两级屋脊式除雾器，脱硫方法为石灰石-石膏湿法脱硫（WFGD）工艺；脱硫塔后装配WESP对烟气污染物深度脱除。

根据GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》[12]，采样点如图1所示。在SCR、ESP、WFGD、WESP进出口设置采样断面，断面上采用网格布点法计算断面各点

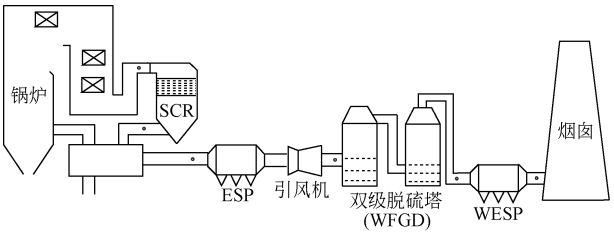

图1　SO_3采样点

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 煤的工业分析与元素分析

工业分析（质量分数）/%				元素分析（质量分数）/%					低位发热量 $Q_{net,ar}$ /MJ·kg^{-1}
M_t	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
11.816	2.569	27.325	24.991	52.53	3.22	4.54	0.87	1.07	19.811

流速并得到断面平均流速，选取流速与平均流速最为接近的采样点。

试验期间采集的入炉煤煤质工业分析与元素分析结果见表1，入炉煤中的硫含量为1.07%，按照国家标准GB /T 16658—2007属于中硫煤[13]。

参照GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》[12]，结合分布式控制系统数据并采取Gasmet烟气分析仪以及热电偶，获得各污染物控制设备进出口烟气参数，每次平行测试3次，记录测试数据，取平均值，结果见表2。

表2 污染物控制设备进出口烟气参数

位置	温度/℃	氧量/%
SCR入口	322.6	3.49
SCR出口	317.8	3.97
ESP入口	164.4	5.62
WFGD入口	164.4	6.71
WESP入口	53.2	7.22
WESP出口	52.7	7.56

1.2 采样方法

SO_3采样参照美国EPA Method 8[14]，采用异丙醇吸收法对烟气SO_3进行采样，采样系统如图2所示。根据等速采样原理，即采样嘴的吸气速度与测点处气流速度相等，从烟道中抽取一定量的烟气，采样结束后根据流量计示数、流量计前压力、流量计前温度计算出标准状况下的采样体积。采样枪中装配石英纤维滤筒去除颗粒物的干扰并全程保温加热，防止SO_3在采样枪及管壁发生冷凝；采样枪后连接着在冰浴中的一系列吸收瓶，瓶中装有体积分数为80%的异丙醇溶液，用以吸收烟气中的SO_3或H_2SO_4酸雾，而SO_2被异丙醇抑制排出，硅胶瓶用来干燥采样后的烟气。调节抽气泵的功率控制采样流量，并设定合适的采样时间，确保采样到足量的SO_3。

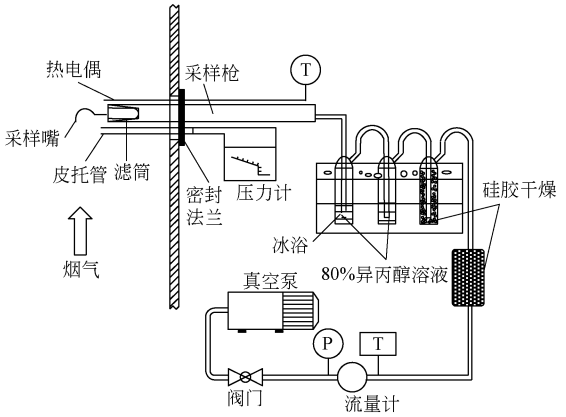

图2 SO_3气体采样系统

为了更好地掌握测试期间机组排放情况，使用Gasmet烟气分析仪在WFGD进出口对烟气进行等速取样，利用傅里叶红外分析原理直接对SO_2、HCl、HF等气态组分进行分析。

1.3 SO_3样品分析方法

采样完成后用80%异丙醇溶液淋洗吸收瓶、连接软管，将淋洗液转移到500mL容量瓶定容。随后在异丙醇溶液中加入少量钍试剂溶液（APANS）作指示剂，采用高氯酸钡溶液为标准溶液滴定。SO_4^{2-}与过量的Ba^{2+}反应生成硫酸钡沉淀，当剩余的Ba^{2+}与钍试剂结合生成紫红色钍试剂-钡络合物（$APANS_2$-Ba）时停止滴定，此过程主要反应见式(1)、式(2)。

$$Ba^{2+}(\text{过量}) + SO_4^{2-} \longrightarrow BaSO_4 + Ba^{2+}(\text{剩余}) \tag{1}$$

$$Ba^{2+}(\text{剩余}) + APANS \longrightarrow APANS_2 - Ba \tag{2}$$

基于Ba^{2+}的滴定量，间接计算出定容溶液中的SO_4^{2-}浓度，经过换算得到烟气中的SO_3气体质量浓度。根据各测点的SO_3质量浓度，可以计算得到污染物控制设备对SO_3脱除率，以式(3)计算。

$$\eta(SO_3) = \frac{c(SO_3,\text{out}) - c(SO_3,\text{in})}{c(SO_3,\text{in})} \times 100\% \tag{3}$$

式中，$c(SO_3,\text{in})$为设备入口烟气中的SO_3质量浓度（标准状况、干基、6%O_2），mg/m^3；$c(SO_3,\text{out})$为设备出口的SO_3质量浓度（标准状况、干基、6%O_2），mg/m^3。

污染物控制设备SO_2/SO_3转化率为设备出口相对进口SO_3增加的质量浓度与设备进口烟气中SO_2质量浓度的比值，以式(4)计算。

$$\eta(SO_2/SO_3) = \frac{c(SO_3,\text{out}) - c(SO_3,\text{in})}{c(SO_2,\text{in})} \times 100\% \tag{4}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

烟气其他成分如SO_2、HCl、HF的脱除效率计算方法与式(3)类似。

1.4　SO_3采样误差分析

异丙醇吸收-沉淀滴定法对SO_3采样分析过程中存在的误差主要包括如下几个方面：异丙醇溶液能够抑制SO_2在其中氧化与溶解，但少量SO_2溶解在内难以避免。因此在进行淋洗液定容之前，通入氮气对溶液进行吹扫，尽可能排除SO_2对试验准确性的干扰。采用钍试剂溶液进行滴定过程中，杂质离子如F^-、NH_4^+会产生干扰，本次试验采用氢氧化钠和盐酸溶液浸泡过的树脂去除杂质离子。样品分析过程容易出现误差之处为滴定终点的判定，故每组样品进行多次滴定，进行平行样分析，舍去偏差较大的结果。

此外，采样前连接好系统后应进行泄漏检验，确认系统无泄漏情况才开始采样；采样过程中保持锅炉运行工况、机组负荷、烟气流量、烟气流速、工业水量、石灰石浆液量稳定，燃用相同批次煤种。为保证测试值的准确可靠，各个采样点均平行采样3次，进行平行样分析。

2　结果与讨论

2.1　SO_3迁移与脱除特征

2.1.1　燃烧过程

燃煤中的大部分硫元素在炉膛中燃烧生成SO_2，其中会有0.5%～2.5%进一步氧化为SO_3[15]，主要反应见式(5)[16]。

$$SO_2 + O + M \longrightarrow SO_3 + M \tag{5}$$

式中，M为反应过程中的第三体，起到吸收反应热量的作用。

烟气飞灰以及炉膛积灰中的大量金属氧化物对SO_2向SO_3的转化具有催化作用，飞灰催化作用峰值温度为700℃[17]，炉膛积灰的催化作用易受到对流受热面温度范围的影响[18]。煤中硫含量或炉内过量空气的增加均会导致SO_2或氧浓度的增加，进而导致产生更多的SO_3[16]；同时炉膛燃烧温度越高，SO_2氧化为SO_3的反应越剧烈。

本次试验测得SCR设备入口前SO_3和SO_2浓度见表3，计算得到炉膛内SO_2/SO_3转化率为0.86%。DL/T 5240—2010《火电发电厂燃烧系统设计计算技术规程》中规定，煤粉炉燃烧中SO_2转化为SO_3的份额为0.5%～2%，本次试验机组数据处于此范围内。

表3　烟气中SO_2及SCR入口处SO_3浓度

烟气中SO_2(标准)/mg·m^{-3}	SCR入口SO_3(标准)/mg·m^{-3}
1224.3	10.581

2.1.2　SCR对SO_2的氧化作用

如表2，本次试验期间机组SCR设备进口烟气温度为322.6℃，出口烟气温度为317.8℃。SCR是目前在燃煤电厂应用最为广泛的脱硝装置，一般采用V_2O_5-WO_3/TiO_2[19-21]作为催化剂，其中V_2O_5起到主要的催化作用，在促进脱除NO_x过程中不可避免地催化SO_2氧化为SO_3。同时，NO_x使得低价钒转化为高价钒[22]，导致SO_2的氧化，SO_3显著增加。SCR设备进出口的SO_3质量浓度以及SCR进口SO_2浓度见表4，计算得到本测试机组SCR装置的SO_2/SO_3转化率为0.45%。王定帮等[23]实测得到不同负荷以及不同催化剂类型，国内典型达标排放机组SCR的SO_2/SO_3转化率在0.4%~0.8%，本文测试机组处于此范围之内。

表4　SCR进出口SO_3的质量浓度

SCR入口SO_3(标准)/mg·m^{-3}	SCR出口SO_3(标准)/mg·m^{-3}	SO_2/SO_3转化率/%
10.581	16.146	0.45

由于SCR进口处SO_2气体浓度高，经过SCR后烟气中的SO_3相对进口增加了52.6%。因此为了防止SCR过程产生过多SO_3给机组运行带来不利影响，应对SCR过程进行优化，采取相关措施找到高脱硝效率与低SO_2/SO_3转化率的平衡点十分必要。吕建燚等[24]通过改变烟气中NH_3的浓度发现，SO_2/SO_3转化率随着NH_3的升高而显著升高，因此控制SCR中NH_3浓度对降低SO_2/SO_3转化率有重要意义。同时，SCR反应只发生在催化剂壁表面约0.2mm薄层处，而SO_3生成则发生在整个催化剂上，因此推荐采用薄壁催化剂结构布置[25]。

2.1.3　ESP对SO_3的脱除作用

烟气到达空气预热器，烟气温度持续下降，当达到酸露点时部分气态H_2SO_4会凝结成H_2SO_4酸雾，被空气预热器的金属壁面拦截，造成腐蚀。同时，高湿烟气中的SO_3还会和NH_3结合生成盐分，导致烟气中的SO_3含量降低，此阶段主要反应见式(6)～式(8)。

$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 \tag{6}$$

$$2NH_3 + SO_3 + H_2O \longrightarrow (NH_4)_2SO_4 \tag{7}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$NH_3 + SO_3 + H_2O \longrightarrow NH_4HSO_4 \quad (8)$$

当烟气中SO_3浓度相对于NH_3较低时，反应主要生成粉末状$(NH_4)_2SO_4$，此时不会对空气预热器造成黏结腐蚀堵塞的影响。而当烟气中的SO_3浓度高于NH_3时，会生成高黏性的液态NH_4HSO_4，其易冷凝在空气预热器换热器表面，极大影响换热效果。空气预热器对SO_3脱除效率取决于烟气温度、空预器类型、烟气中SO_3和NH_3的浓度等因素，其出口的烟温越低，空气预热器对SO_3脱除效率越高[26]。由图3可以看出空气预热器对SO_3的脱除效率为5.7%，相较于文献值偏低[10]。

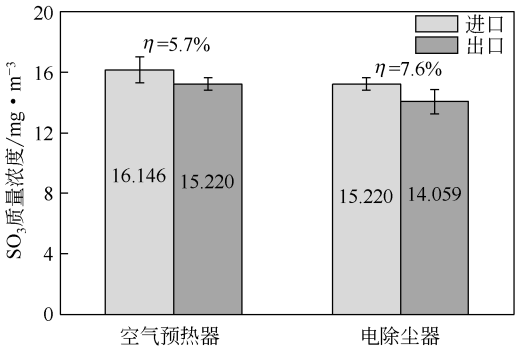

图3 ESP和空气预热器进出口SO_3浓度

烟气经空气预热器后进入ESP，ESP对于SO_3的脱除主要由两个因素影响：一是烟温降低至酸露点以下，导致气态H_2SO_4粉尘在飞灰表面冷凝吸附，与粉尘一并脱除；二是粉尘碱性物质与SO_3发生反应脱除。杨用龙等[27]对8台典型机组进行测试，除尘器SO_3脱除率为13%～76%。文献[23]测得3台达标排放机组ESP对SO_3的脱除效率为10%～15%。本文测试机组ESP脱除SO_3效率为7.63%，低于上述研究。可以看出本次测试ESP对SO_3脱除效果十分有限，主要是由于机组烟气温度保持为164.4℃（高于烟气酸露点），导致H_2SO_4酸雾生成量低，仅有少量吸附在飞灰表面跟随飞灰被脱除。因此，ESP对SO_3的脱除率较低。

2.1.4 双级脱硫塔对SO_3的脱除作用

烟气进入脱硫塔后，烟温快速降至酸露点以下，气态H_2SO_4发生均相成核[28]，形成亚微米H_2SO_4酸雾。因此脱硫塔对于SO_3的脱除主要依靠浆液液滴与H_2SO_4酸雾之间的布朗扩散、惯性拦截、热泳效应等作用并发生中和反应实现。图4为脱硫塔内脱硫浆液捕捉脱除H_2SO_4酸雾的原理，H_2SO_4酸雾的惯性大小对于能否被浆液捕捉起到至关重要的作用。当H_2SO_4雾滴与浆液滴相遇时，惯性较小的雾滴在

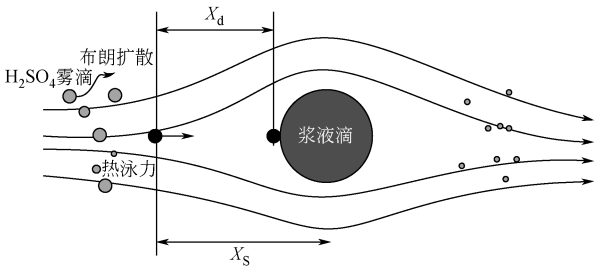

图4 浆液滴对H_2SO_4酸雾的捕集原理

液滴前X_d处会随气流绕过液滴流动，而惯性较大的雾滴会保持原来的直线运动方向脱离气流运动，液滴可以捕获到H_2SO_4气溶胶。然而亚微米H_2SO_4酸雾的Stokes数较小，属于零惯性气溶胶[29]，所以常规湿法脱硫设备对亚微米H_2SO_4酸雾的脱除效率不高。

国内湿法脱硫设备SO_3的脱除率一般为30%～50%。本次测试机组对湿法脱硫系统（WFGD）进行了增容改造。采用WFGD工艺，新建一座喷淋塔作为预洗塔，与原吸收塔串联运行，其对酸性气体的脱除效果见表5，可以看出双级湿法脱硫塔不仅对SO_2、HF、HCl的脱除效果良好，对SO_3脱除效率更是达到了81.3%，相比于单级脱硫塔对SO_3的脱除效果高出30%～50%。主要原因是烟气经过两级喷淋塔洗涤，增加了烟气在脱硫系统中的停留时间，使得浆液与H_2SO_4液滴接触概率大大增加。另外，大量H_2SO_4酸雾雾滴与烟气颗粒物结合长大，跟随颗粒物被脱硫浆液液滴捕集，因此较大提高了SO_3脱除效率。李小龙等[30]研究指出某600MW机组其双级串联双循环脱硫塔对SO_3脱除效率高达96.3%。潘丹萍等[31]实测双级脱硫塔对SO_3脱除效率为50%～65%，同时脱硫设备入口处的粉尘浓度越高，对SO_3脱除效果越好。综上所述，脱硫系统改造后，采用双级串联脱硫塔对SO_3脱除效果十分显著，对改善当前燃煤机组SO_3排放现状有着重要意义。

表5 湿法脱硫设备进出口酸性气体的质量浓度

酸性气体种类	进口质量浓度（标准）/mg·m^{-3}	出口质量浓度（标准）/mg·m^{-3}	脱除效率/%
SO_2	969.39	2.70	99.7
HF	23.99	0.92	96.2
HCl	11.76	0.46	96.1
SO_3	14.059	2.629	81.3

2.1.5 WESP对SO_3的脱除作用

机组WESP采用下进气立式布置，采用水冲洗极板除灰方式。测试期间，WESP为高电压低电流运行方式，二次直流电压为58～67kV，二次电流

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为46～81mA。机组WESP进出口SO_3质量浓度见表6，计算得到WESP脱除SO_3效率为23.0%，相较于闫君[32]、易玉萍等[33]的研究偏低。主要由于大粒径H_2SO_4雾滴大部分在WFGD过程中被脱除，WESP进口处大部分为亚微米粒径酸雾雾滴[34]，只有少部分与颗粒物结合，荷电效果不佳，影响了WESP对SO_3的脱除效果。

表6　WESP进出口SO_3的质量浓度

WESP入口SO_3（标准）/mg·m^{-3}	WESP出口SO_3（标准）/mg·m^{-3}	脱除效率/%
2.629	2.025	23.0

机组最终排放烟气中所含SO_3质量浓度为2.025mg/m^3（标准）。ESP、WFGD、WESP对SO_3的协同脱除效率为86.7%。对比双级脱硫塔的脱除效率，三者协同效果并不明显。

2.2　超低排放路线脱除SO_3不足与改进方向

烟气经过SCR、ESP、WFGD、WESP处理后，最终排放的SO_3浓度为2.025mg/m^3（标准），SO_3排放浓度处于较低水平。尽管如此，机组对SO_3的脱除仍存在不足：SO_3主要在上游设备炉膛与SCR中生成，大部分在WFGD与WESP中脱除，这样的迁移特点导致SO_3对设备及烟道管路的腐蚀难以控制。同时，因烟气温度的影响，测试机组ESP对于SO_3脱除的贡献有限。而由于WFGD对大粒径H_2SO_4雾滴脱除效果较好，对于亚微米级雾滴脱除效果一般，导致进入WESP中的SO_3大部分为亚微米级别的H_2SO_4雾滴，难以被进一步有效脱除。这一问题不仅仅存在于300MW机组，对采取相同烟气污染物控制的600MW机组[35]、1000MW机组[11]亦存在此类问题。

针对此类问题，可对燃料以及燃烧方式进行改造，如在煤中添加石灰石可以降低空预器中的SO_3浓度[36]，减少空预器及烟气上游管路的腐蚀现象，但可能会引起炉膛结渣、设备磨损等问题。对于燃烧过程的优化，可以通过控制配风和调整燃烧组织等手段来控制炉膛SO_2向SO_3的转化。低低温静电除尘器[37]是提升ESP脱除细颗粒物与SO_3的一种有效手段。在ESP前加装烟气冷却器，将ESP入口烟气温度降低至90℃左右，大部分SO_3冷凝形成硫酸雾，黏附在烟气粉尘上并被碱性物质中和，在ESP中被有效脱除。

2.3　SO_3的排放因子计算

燃煤锅炉排放SO_3对大气环境的危害性可以通过燃煤锅炉SO_3排放因子进行评估。SO_3的排放因子是指燃煤锅炉在固定负荷正常运行下，消耗单位标准煤时SO_3的排放质量。单位煤炭消耗量SO_3排放因子$EF_{煤}$计算公式为式(9)。

$$EF_{煤} = \frac{c\left(SO_3,排放\right) \times V_0}{M} \tag{9}$$

式中，M为机组单位时间煤炭消耗量，t/h；c(SO_3，排放)为排放SO_3的质量浓度，mg/m^3（标准）；V_0为机组标准状况下干烟气流量，m^3/h（标准）。计算得到该机组70%负荷下单位煤炭消耗量SO_3排放因子$EF_{煤}$为33.98mg/kg。

3　结论

（1）300MW超低排放机组在70%负荷运行工况下，排放烟气所含SO_3浓度为2.025mg/m^3（标准），单位煤炭消耗量SO_3排放因子$EF_{煤}$为33.98mg/kg，机组对SO_3的脱除基本达到国内较高水平。

（2）燃煤机组SO_3一方面来源于炉膛中SO_2转化，SO_2/SO_3转化率为0.89%；另一方面源自SCR催化剂氧化SO_2产生，SCR中SO_2/SO_3转化率为0.45%，SCR出口SO_3质量浓度较进口增加了52.6%。

（3）ESP烟温较高，气态H_2SO_4凝结产生H_2SO_4酸雾的量少，导致ESP脱除SO_3效率较低，为7.63%。双级串联脱硫塔工艺提高了脱硫浆液与烟气中H_2SO_4酸雾雾滴的接触时间，对SO_3脱除效果相比普通单级脱硫塔高30%～50%。WESP对SO_3的脱除效率为23.0%，由于主要存在形态为较难荷电亚微米级H_2SO_4雾滴，因此机组WESP对SO_3脱除效果一般。

（4）测试机组的污染物控制设备对SO_3脱除存在的主要不足是上游设备中SO_3生成难以控制、ESP脱除SO_3效率有限、WFGD与WESP协同效果不明显等。因此优化燃烧过程、采取低低温静电除尘器技术等措施可进一步增强机组对SO_3的处理水平。

参考文献

[1] 朱法华, 孙尊强, 申智勇. 超低排放燃煤电厂有色烟羽成因及治理技术的经济与环境效益研究[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 1-7, 25.
ZHU Fahua, SUN Zunqiang, SHEN Zhiyong. Cause analysis of colored smoke plume and related studies on economic and environmental benefits of its treatment technologies for ultra-low emission coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 1-7, 25.
[2] EMR. SO_3's impacts on plant O&M: Part I[J]. Power, 2006, 150(8): 40.
[3] 刘含笑, 陈招妹, 王少权, 等. 燃煤电厂SO_3排放特征及其脱除技术

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 126-136.
LIU Hanxiao, CHEN Zhaomei, WANG Shaoquan, et al. Emission characteristics and removal technology of SO_3 from coal-fired power plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(5): 126-136.

[4] AHN J, OKERLUND R, FRY A, et al. Sulfur trioxide formation during oxy-coal combustion[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 1(5): 127-135.

[5] 吴宁, 宋蔷, 李水清, 等. SCR烟气脱硝过程中SO_2和SO_3的测量[J]. 煤炭转化, 2006, 29(2): 84-87.
WU Ning, SONG Qiang, LI Shuiqing, et al. Measurement of SO_2 and SO_3 in SCR flue gas denitrification[J]. Coal Coversion, 2006, 29(2): 84-87.

[6] SINANIS S, WIX A, ANA L, et al. Characterization of sulphuric acid and ammonium sulphate aerosols in wet flue gas cleaning processes[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2008, 47(1): 22-30.

[7] ANDERLOHR C, BRACHERT L, MERTENS J, et al. Collection and generation of sulfuric acid aerosols in a wet electrostatic precipitator [J]. Aerosol Science and Technology, 2015, 49(3): 144-151.

[8] 于伟静, 马超, 谭闻澦, 等. 基于热力学平衡计算的燃煤电厂烟气中SO_3的形态研究[J]. 洁净煤技术, 2019-09-02(网络首发).
YU Weijing, MA Chao, TAN Wenbin, et al. The reseach on SO_3 morphological characteristics in flue gas of coal-fired power plants based on thermodynamic equilibrium calculation[J]. Clean Coal Technology, 2019-09-02.

[9] 李高磊, 郭沂权, 张世博, 等. 超低排放燃煤电厂SO_3生成及控制的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1079-1085.
LI Gaolei, GUO Yiquan, ZHANG Shibo, et al. Experimental research on SO_3 generation and control in ultra-low emission coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1079-1085.

[10] 赵毅, 韩立鹏. 超低排放燃煤电站三氧化硫的迁移和排放特征[J]. 环境科学学报, 2019, 39(11): 3702-3708.
ZHAO Yi, HAN Lipeng. Migration and emission of sulfur trioxide in ultra-low emission coal-fired power plant[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(11): 3702-3708.

[11] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某1000MW燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 140-144.
ZHANG Jun, ZHENG Chenghang, ZHANG Yongxin, et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1000MW coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 140-144.

[12] 国家环境保护局科技标准司. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: GB/T 16157—1996[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
Department of Science and Technology Standards, State Environmental Protection Administration. The determination of particulates and sampling methods of gaseous pollutants emitted from exhaust gas of stationary source. : GB/T 16157—1996[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.

[13] 中国煤炭工业协会. 煤炭质量分级 第2部分 硫分: GB/T 15224.2—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
China National Coal Association. Classification for quality of coal-Part 2: Sulfur content: GB/T 15224.2—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[14] United States Environmental Protection Agency. EPA method 8—Determination of sulfuric acid mist and sulfur dioxide emissions from stationary sources[S]. Washington, 1996

[15] 张悠. 烟气中SO_3测试技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHANG You. Research and application of SO_3 measurement in flue gas [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[16] SRIVASTAVA R K, MILLER C A, ERICKSON C, et al. Emissions of sulfur trioxide from coal-fired power plants[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54(6): 750-762.

[17] BELO L P, ELLIOTT L K, STANGER R J, et al. High-temperature conversion of SO_2 to SO_3: homogeneous experiments and catalytic effect of fly ash from air and oxy-fuel firing[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(11): 7243-7251.

[18] 王智, 贾莹光, 祁宁, 等. 燃煤电站锅炉及SCR脱硝中SO_3的生成及危害[J]. 东北电力技术, 2005, 26(9): 3-5.
WANG Zhi, JIA Yingguang, QI Ning, et al. The creation and harm of SO_3 for coal-fired boiler and SCR denitration[J]. Northeast Electric Power Technology, 2005, 26(9): 3-5.

[19] 姜烨. 钛基SCR催化剂及其钾、铅中毒机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
JIANG Ye. Study on titania-based SCR catalysts and their poisoning mechanism ofpotassium and lead[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[20] BUSCA G, LIETTI L, RAMIS G, et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxide catalysts: a review[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1998, 18(1/2): 1-36.

[21] 刘炜, 张俊丰, 童志权. 选择性催化还原法(SCR)脱硝研究进展[J]. 工业安全与环保, 2005, 31(1): 25-28.
LIU Wei, ZHANG Junfeng, TONG Zhiquan. Progress in study of NO_x with the selective catalytic reduction[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2005, 31(1): 25-28.

[22] XIONG Jin, LI Yuran, LIN Yuting, et al. Formation of sulfur trioxide during the SCR of NO with NH_3 over a V_2O_5/TiO_2 catalyst[J]. RSC Advances, 2019, 9(67): 38952-38961.

[23] 王定帮, 雷鸣, 余福胜, 等. 燃煤机组SO_3迁移规律及排放特性试验[J]. 热力发电, 2018, 47(11): 100-105.
WANG Dingbang, LEI Ming, YU Fusheng, et al. SO_3 migration and emission characteristics of coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11): 100-105.

[24] LÜ Jianyi, ZHOU Zhiyong, ZHANG Hanzhi, et al. Influenced factors study and evaluation for SO_2/SO_3 conversion rate in SCR process[J]. Fuel, 2019, 245: 528-533.

[25] ZHENG Chenghang, XIAO Lifeng, QU Ruiyang, et al. Numerical simulation of selective catalytic reduction of NO and SO_2 oxidation in monolith catalyst[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 361: 874-884.

[26] 舒喜, 田原润, 惠润堂, 等. SO_3在燃煤电厂各设备中形成和脱除现状研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(11): 121-126.
SHU Xi, TIAN Yuanrun, HUI Runtang, et al. Formation and removal of SO_3 in different equipment of coal-fired power plant: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(11): 121-126.

[27] 杨用龙, 苏秋凤, 张杨, 等. 燃煤电站典型超低排放工艺的SO_3脱除性能及排放特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2962-2969.
YANG Yonglong, SU Qiufeng, ZHANG Yang, et al. Removal performance and emission characteristics of SO_3 by typical ultra-low emission technologies in coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2962-2969.

[28] 李欣怡, 潘丹萍, 胡斌, 等. 燃煤烟气中SO_3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.
LI Xinyi, PAN Danping, HU Bin, et al. Research status and prospects

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of migration, transformation and control of SO_3 from coal-fired flue gas [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(12): 4887-4896.

[29] SAFFMAN P G, TURNER J S. On the collision of drops in turbulent clouds[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1956, 1(1): 16-30.

[30] 李小龙, 李军状, 段玖祥, 等. 燃煤电厂烟气中SO_3协同控制情况及排放现状[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 155-161.
LI Xiaolong, LI Junzhuang, DUAN Jiuxiang, et al. SO_3 cooperative control and emission situation in the flue gas of coal-fired power plant [J]. Electric Power, 2019, 52(10): 155-161.

[31] 潘丹萍, 吴昊, 鲍静静, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物及SO_3酸雾脱除作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4356-4362.
PAN Danping, WU Hao, BAO Jingjing, et al. Removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles and SO_3 acid mist from coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4356-4362.

[32] 闫君. 湿式静电除雾器脱除烟气中酸雾的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
YAN Jun. Experimental study on removal of acid mist from flue gas using WESP[D]. Jinan: Shandong University, 2010.

[33] 易玉萍, 周道斌, 李小龙, 等. 湿式电除尘器对低浓度污染物脱除效率的研究[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(5): 26-28.
YI Yuping, ZHOU Daobin, LI Xiaolong, et al. Research on removal efficiency of low concentration pollutants by wet electrostatic precipitator[J]. Electric Power Environmental Protection, 2017, 33(5): 26-28.

[34] 雒飞, 胡斌, 吴昊, 等. 湿式电除尘对$PM_{2.5}$/SO_3酸雾脱除特性的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 91-96.
LUO Fei, HU Bin, WU Hao, et al. Experimental study on removal properties of $PM_{2.5}$ and sulfuric acid mist by wet electrostatic precipitator[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2017, 47(1): 91-96.

[35] 吴昊, 盘思伟, 张凯. 600MW燃煤发电机组的SO_3生成与排放特性[J]. 广东电力, 2016, 29(7): 39-43.
WU Hao, PAN Siwei, ZHANG Kai. Formation and emission characteristic of SO_3 in 600MW coal-fired generating unit[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(7): 39-43.

[36] 楼清刚. 煤燃烧过程中SO_3生成的试验研究[J]. 能源工程, 2008(6): 46-49.
LOU Qinggang. Study on the formation mechanism of SO_3 during coal burning[J]. Energy Engineering, 2008(6): 46-49.

[37] 刘含笑, 郦建国, 姚宇平, 等. 低低温电除尘系统对SO_3脱除性能研究[J]. 发电技术, 2019, 40(4): 1-7.
LIU Hanxiao, LI Jianguo, YAO Yuping, et al. Study on SO_3 removal performance of low-low temperature electrostatic precipitator system [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4): 1-7

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net