

# 烟气冷凝喷淋协同脱除多种污染物的试验研究

惠保安<sup>1</sup>, 柴冬青<sup>1</sup>, 徐学智<sup>1</sup>, 王连喜<sup>1</sup>, 王宜民<sup>1</sup>, 李 乾<sup>1</sup>, 殷晓杰<sup>1</sup>, 黄 宇<sup>1</sup>, 刘雪霞<sup>2</sup>, 包雯菲<sup>2</sup>, 张洞宇<sup>3</sup>, 李玉忠<sup>2</sup>

(1. 山东兖矿济三电力有限公司, 山东济宁 272069; 2. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东济南 250061;

3. 山东七星智能装备科技有限公司, 山东济南 250105)

**摘要:**虽然常规燃煤污染物已实现超低排放,但SO<sub>3</sub>、可凝结颗粒物等新兴污染物的控制问题还未得到解决。为实现常规和新兴污染物的协同控制,本文研究了燃煤烟气在冷凝喷淋过程中多种污染物的协同脱除技术。试验在一台440 t/h的循环流化床燃煤锅炉尾部烟道,对烟气先后进行增湿喷淋和冷凝喷淋处理,在多工况下进行冷凝喷淋协同脱除多种污染物的研究,并确定最佳的运行参数。结果表明:在烟气冷凝喷淋过程中,在液气比4.4~5.4 L/m<sup>3</sup>、喷淋温度18.8~28.1℃的工况范围,可过滤颗粒物的脱除效率为81.9%~100%,SO<sub>3</sub>的脱除效率为85.5%~93.5%,SO<sub>2</sub>的脱除效率为84.8%~99.9%,可凝结颗粒物的脱除效率为14.8%~55.4%。证明冷凝喷淋技术能够有效协同脱除多种污染物,对进一步提高燃煤污染治理水平具有重要意义。

**关键词:**燃煤污染物治理;细颗粒物;三氧化硫;可凝结颗粒物;烟气脱硫;烟气冷凝;协同脱除

**中图分类号:**X773 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2025)03-0166-08

## Experimental study on synergistic removal of multiple pollutants by flue gas condensation scrubbing

HUI Bao'an<sup>1</sup>, CHAI Dongqing<sup>1</sup>, XU Xuezhi<sup>1</sup>, WANG Lianxi<sup>1</sup>, WANG Yimin<sup>1</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, YIN Xiaojie<sup>1</sup>, HUANG Yu<sup>1</sup>, LIU Xuexia<sup>2</sup>, BAO Wenfei<sup>2</sup>, ZHANG Dongyu<sup>3</sup>, LI Yuzhong<sup>2</sup>

(1. Shandong Yankuang Jisan Electric Power Co., Ltd., Jining 272069, China; 2. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, 250061, China; 3. Shandong Qixing Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Jinan, 250105, China)

**Abstract:** Although conventional coal-fired pollutants have achieved ultra-low emissions, the control issues of emerging pollutants such as SO<sub>3</sub> and condensable particulate matter have not yet been resolved. To achieve the collaborative control of them, this paper studies the collaborative removal technology of various pollutants in coal-fired flue gas during the condensation scrubbing process. In the experiments, a flow of real flue gas emitted from a 440 t/h coal-fired circulating fluidized bed boiler was treated with humidification scrubbing and condensation scrubbing successively. The synergistic removal of various pollutants by the condensation scrubbing under multiple operating conditions were investigated, and the optimal operating parameters were determined. The results showed that during the flue gas condensation scrubbing process under the liquid-to-gas ratio of 4.4~5.4 L/m<sup>3</sup> and the scrubbing temperature of 18.8~28.1℃, the removal efficiencies for filterable particulate matter, SO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, and condensable particulate matter were 81.9%~100%, 85.5%~93.5%, 84.8%~99.9%, and 14.8%~55.4% respectively, suggesting that the condensation scrubbing technology can effectively synergistically remove various pollutants, which is of great significance for further improving the level of coal-fired pollutant control.

**Key words:** coal-fired pollutant control; fine particulate matter; sulfur trioxide; condensable particulate matter; flue gas desulfurization; flue gas condensation; synergistic removal

收稿日期:2024-11-28;策划编辑:白娅娜;责任编辑:黄小雨 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.24112803

基金项目:山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2023ME015);济南市科研带头人工作室项目(20233064);济南市科技计划项目(202323005)

作者简介:惠保安(1983—),男,山东安丘人,学士。E-mail: huibaoan@163.com

通讯作者:李玉忠(1976—),男,山东莱西人,博士。E-mail: lyz@sdu.edu.cn

引用格式:惠保安,柴冬青,徐学智,等.烟气冷凝喷淋协同脱除多种污染物的试验研究[J].洁净煤技术,2025,31(3):166-173.

HUI Bao'an, CHAI Dongqing, XU Xuezhi, et al. Experimental study on synergistic removal of multiple pollutants by flue gas condensation scrubbing[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 166-173.



## 0 引言

燃煤污染物治理一直是大气污染防治的重大挑战。近年来,我国在燃煤污染物治理技术取得了显著的进步,主要污染物如烟尘即可过滤颗粒物(Filterable Particulate Matter, FPM)、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )和氮氧化物( $\text{NO}_x$ )已实现超低排放<sup>[1]</sup>。虽然一些地方的大气污染已经得到控制,但是部分地区在某些时段仍然存在雾霾污染,三氧化硫( $\text{SO}_3$ )和可凝结颗粒物(Condensable Particulate Matter, CPM)<sup>[2]</sup>等新兴污染物的环境影响引起了人们的广泛关注。其中, $\text{SO}_3$ 在低温烟气中以硫酸雾气溶胶颗粒形态存在,排放形成蓝色烟羽,污染环境,是目前治理的难点<sup>[3-4]</sup>。CPM的成分复杂,其无机成分包含盐类和重金属等痕量元素;有机成分包含烷烃、脂类、醇类和多环芳烃等。成分的多样性使得CPM的特性和影响更加复杂<sup>[5]</sup>。为了应对这些种类繁多、成分复杂的新兴污染物,如果能够通过协同脱除工艺进行治理,将极大简化污染治理系统,降低治理成本。

以往研究发现烟气深度冷却工艺具备协同脱除多种污染物的潜力。GROHN等<sup>[6]</sup>观察到烟气冷却换热器能够去除26%~40%的颗粒物,而SIPPULA等<sup>[7]</sup>研究发现冷凝式烟气洗涤器对颗粒物的脱除效率达到了84%,FENG等<sup>[8]</sup>测试得到冷凝洗涤对湿饱和烟气中细颗粒的脱除效率最高接近100%;也有研究发现在湿法脱硫后进行以余热回收为目的的烟气喷淋降温过程可协同脱除 $\text{SO}_2$ <sup>[9]</sup>,脱除效率可达56%~65%<sup>[10]</sup>;湿法脱硫后对烟气进行低温洗涤,对 $\text{SO}_3$ 的协同脱除效率为55%~90%<sup>[11]</sup>;CHEN等<sup>[12]</sup>研究发现CPM在增湿喷淋和冷凝喷淋过程中可以转化为FPM,并通过前提物溶解等机制得到部

分脱除。

以往烟气深度冷却协同脱除污染物的研究大多针对单一污染物,多种污染物协同脱除的研究较少;而且大部分是实验室规模的研究,该方法在工业现场的实际效果有待验证。为此,本文在工业现场以一台燃煤锅炉烟气作为研究对象,建立先增湿和后冷凝的两级烟气喷淋系统,在多工况冷凝喷淋过程中测试多种污染物(FPM、 $\text{SO}_3$ 、CPM、 $\text{SO}_2$ )的变化,研究烟气在经历冷凝喷淋过程中多种污染物的协同脱除效果,分析确定最佳的运行参数。

## 1 试验方法

### 1.1 试验系统

如图1所示,本研究在一台440 t/h的循环流化床燃煤锅炉现场进行试验,锅炉采用煤与煤泥混合燃烧的方式,其中煤的质量分数为20%,煤泥的质量分数为80%,具体的燃料分析数据见表1。锅炉环保设施包括选择性非催化还原脱硝系统、一级布袋除尘器、脱硫脱硝一体化装置和二级布袋除尘器。在现场的脱硫脱硝一体化装置前引出一路烟气旁路,烟气量为1000  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,在旁路上安装两级喷淋塔:第一级为增湿喷淋塔,喷淋液为碱性溶液,模拟湿法脱硫过程,基本维持稳定运行,为试验提供相对稳定的湿烟气,该塔出口烟温大约46~48  $^{\circ}\text{C}$ ,由于碱性溶液周期性添加,使得该塔出口 $\text{SO}_2$ 质量浓度在32~90  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ 小范围波动;第二级为冷凝喷淋塔,采用温度低于烟气露点的冷水喷淋,使得烟气中的部分水蒸气发生冷凝,该塔工况参数为:液气比为4.4、5.0和5.4  $\text{L}/\text{m}^3$ ;喷淋温度为18.8、23.3和28.1  $^{\circ}\text{C}$ ,出口烟温为17~26  $^{\circ}\text{C}$ 。烟气污染物采样点分别是冷凝喷淋塔前、后两个位置(对应图1中A、B点),以评估冷凝喷淋对多种污染物的协同脱除效果。

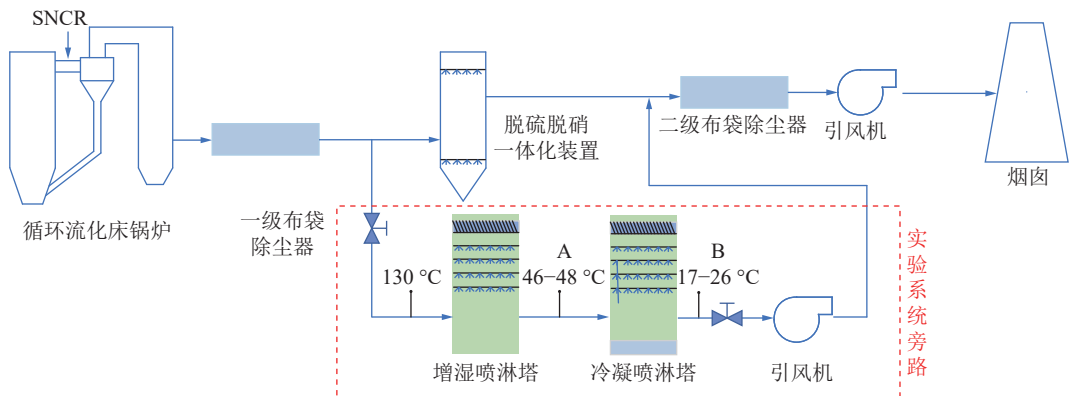


图1 试验系统图

Fig. 1 Diagram of experimental system

表1 燃料分析  
Table 1 Fuel analysis

参数	基准	煤	煤泥
水分/%	空气干燥基	1.50	1.80
灰分/%	收到基	35.40	53.30
挥发分/%	干燥无灰基	25.10	20.90
硫分/%	空气干燥基	0.57	0.71
低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	收到基	18.52	8.92

## 1.2 检测方法

如图2所示,对于颗粒物的测量,本研究基于美国EPA Method 202以及中国国家标准《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)》,构建了一套固定源颗粒物采样系统,该系统具备同时采集FPM和CPM样品的功能。在采样过程中,采样枪全程加热至120℃,以防止水汽在采样过程中凝结。采样枪的后端安装有玻璃纤维滤筒,用于收集FPM样品。随后,通过全程加热的聚四氟乙烯管,将采样气体引导至CPM采样装置中,依次经过冷凝管、冲击瓶和滤膜,以进一步收集气体中的CPM成分。将采集到的CPM样品进行萃取分离、干燥、称重等程序,获得CPM的有机成分和无机成分数据。对于SO<sub>2</sub>和SO<sub>3</sub>,分别依据对应标准《固定污染源废气二氧化硫的测定 定电位电解法(HJ 57—2017)》和《固定污染源废气硫酸雾的测定 离子色谱法(HJ 544—2016)》进行采样测量。

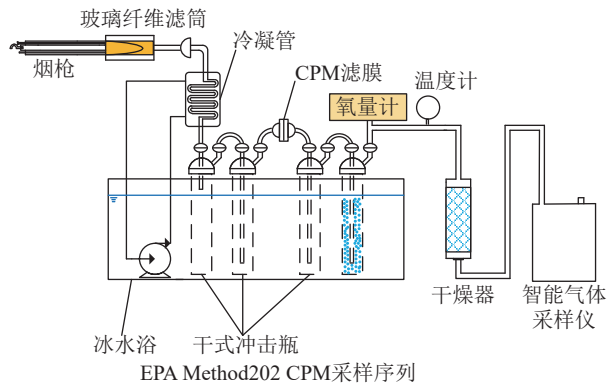


图2 颗粒物采样设备示意

Fig. 2 Schematic diagram of particulate matter sampling equipment

为保证数据的可靠性,所有工况均进行3次重复试验,结果取平均值。所有浓度数据转换为标准状况(273 K, 101.325 kPa)和6%氧含量条件下的数据。

## 2 结果与讨论

在试验中的每一工况下,对冷凝喷淋塔进出口的FPM、SO<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>和CPM质量浓度分别进行测试,下面依次呈现各污染物的测试结果,并进行相关讨论。

### 2.1 冷凝喷淋过程中FPM的协同脱除

本节讨论经增湿喷淋达到饱和状态的烟气,在经历冷凝喷淋过程中FPM的协同脱除效果。试验在系统相对稳定运行的条件下进行,变换冷凝喷淋塔的液气比和喷淋温度,得到不同工况下FPM的进出口质量浓度数据,并计算得到脱除效率数据,见表2。利用MATLAB插值法绘制了FPM脱除效率的曲面图和等值线图,如图3所示。

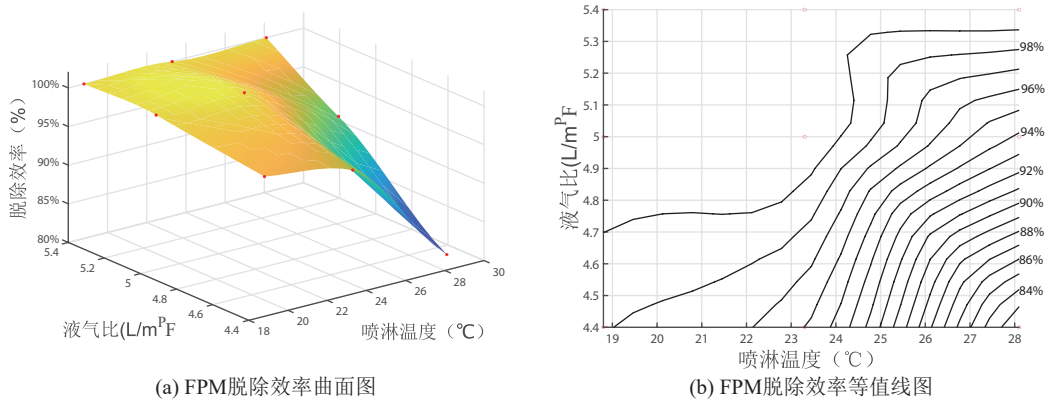
表2 不同工况下冷凝喷淋对FPM的脱除效果

Table 2 Removal of FPM by condensation scrubbing under different operating conditions

工况编号	液气比/(L·m <sup>-3</sup> )	喷淋温度/℃	入口质量浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	出口质量浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )	脱除效率/%
1	4.4	28.1	10.5	1.9	81.9
2	4.4	23.3	9.8	0.4	95.9
3	4.4	18.8	9.4	0.2	97.9
4	5.0	28.1	11.2	0.7	93.8
5	5.0	23.3	9.0	-1.4	100
6	5.0	18.8	12.3	-3.3	100
7	5.4	28.1	11.5	-0.2	100
8	5.4	23.3	10.1	-0.5	100
9	5.4	18.8	8.9	-0.2	100

结果显示:冷凝喷淋塔入口FPM质量浓度为10 mg/Nm<sup>3</sup>左右时,出口质量浓度均远低于颗粒物的超低排放标准(5 mg/Nm<sup>3</sup>),且大部分数据低于测量方法的检出限(1 mg/Nm<sup>3</sup>)。表中所列为负数的数据是因为质量浓度低于测量设备的检出限所呈现的测量误差,在效率计算中取为零。可见FPM的脱除效率处在82%~100%,表明冷凝喷淋可以实现对细颗粒物的高效脱除。以往的研究可以对该高效脱除机理进行解释:在冷凝喷淋塔内,烟气中的水蒸气在喷淋液滴的表面上发生凝结,水蒸气定向迁移至液滴表面所引发的扩散泳力,作用于液滴附近的超细颗粒物,使其向液滴靠拢并凝并于液滴表面,实现了细颗粒物的高效脱除<sup>[8]</sup>。

另外,数据显示:FPM的脱除效率随着喷淋温度的降低和液气比的提高而提高。其原因在于:液



(a) FPM脱除效率曲面图

(b) FPM脱除效率等值线图

图3 运行参数对冷凝喷淋脱除FPM的影响

Fig. 3 Influence of operating parameters on the removal of FPM by condensation scrubbing

滴温度的降低导致其表面水蒸气过饱和度增加,强化了水蒸气凝结,增大了扩散泳力作用,从而提高了对细颗粒物的捕获能力;液气比的提高扩大了烟气与液滴的接触面积,为喷淋液滴捕获细颗粒物提供了更为有利的传质条件。

图3a效率曲面图显示:随着喷淋温度的降低和液气比的提高,FPM的脱除效率呈现先快速增加,后增速放缓的特征。说明在试验工况范围内,这两个参数对于该脱除效率的贡献度存在边际效益递减的范围。同时,图3b显示:高于95%的脱除效率等值线相比低于95%的等值线分布较为稀疏;高于95%的等值线对应的参数范围为:液气比高于 $5.1 \text{ L/m}^3$ ,喷淋温度低于 $24.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这说明在该参数范围,两参数对脱除效率贡献度的边际效益递减,从经济性角度看不适合在此参数范围运行。建议在液气比不高于 $5.1 \text{ L/m}^3$ 、喷淋温度不低于 $24.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的参数边界,兼顾脱除效率和经济性考虑,选择适当的运行参数。

## 2.2 冷凝喷淋过程中 $\text{SO}_3$ 的协同脱除

本节讨论经增湿喷淋达到饱和状态的烟气,在经历冷凝喷淋过程中 $\text{SO}_3$ 的协同脱除效果。试验在系统相对稳定运行的条件下进行,变换冷凝喷淋塔的液气比和喷淋温度,得到不同工况下 $\text{SO}_3$ 的进出口质量浓度数据,并计算得到脱除效率数据,如表3所示。利用MATLAB插值法绘制了 $\text{SO}_3$ 脱除效率的曲面图和等值线图,如图4所示。

结果显示:冷凝喷淋塔入口 $\text{SO}_3$ 质量浓度为 $17 \text{ mg/Nm}^3$ 左右时,各个工况下出口质量浓度均低于 $5 \text{ mg/Nm}^3$ ,达到了部分地区的排放标准,说明冷凝喷淋可实现对 $\text{SO}_3$ 的有效控制。可见 $\text{SO}_3$ 的脱除效率处在 $86\% \sim 93\%$ ,表明冷凝喷淋可以实现对 $\text{SO}_3$ 的高效脱除。以往的研究可以对该高效脱除机理进行解释:烟气中的 $\text{SO}_3$ 在试验工况下以 $\text{H}_2\text{SO}_4$

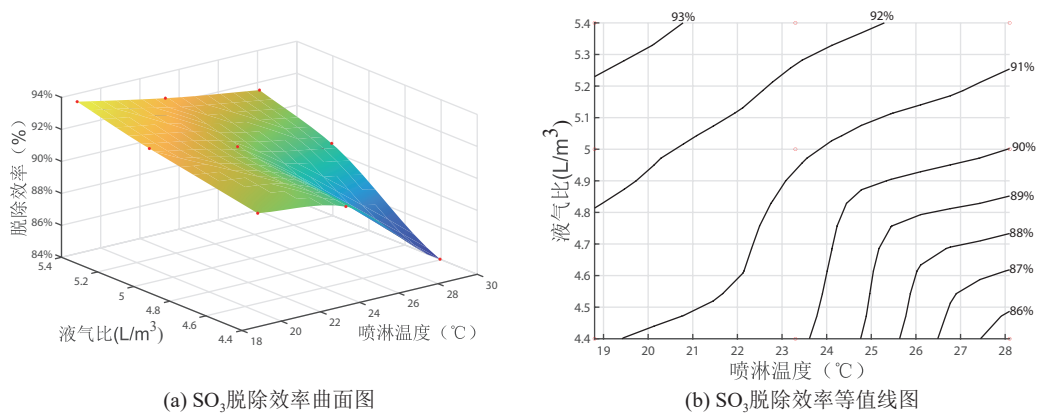
表3 不同工况下冷凝喷淋对 $\text{SO}_3$ 的脱除效果Table 3 Removal of  $\text{SO}_3$  by condensation scrubbing under different operating conditions

工况编号	液气比 ( $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ )	喷淋温度 ( $^\circ\text{C}$ )	入口质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	出口质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	脱除效率 (%)
1	4.4	28.1	18.1	2.62	85.5
2	4.4	23.3	17.5	1.72	90.2
3	4.4	18.8	17.9	1.59	91.1
4	5.0	28.1	16.8	1.68	90.0
5	5.0	23.3	17.2	1.51	91.2
6	5.0	18.8	18.5	1.41	92.4
7	5.4	28.1	16.5	1.41	91.5
8	5.4	23.3	17.6	1.33	92.4
9	5.4	18.8	18.7	1.22	93.5

形式存在<sup>[13-14]</sup>,且为可凝性污染物。当经历冷凝喷淋的过程中,烟气中的 $\text{SO}_3$ 会发生冷凝,一部分冷凝于喷淋液滴表面而被捕集;一部分冷凝成气溶胶颗粒,继而在扩散泳作用下被喷淋液滴捕获;还有一小部分直接以气态形式溶解于喷淋液滴而被捕获。

另外,数据显示: $\text{SO}_3$ 的脱除效率随着喷淋温度的降低和液气比的提高而提高。其原因在于:喷淋温度的降低强化了烟气中 $\text{SO}_3$ 的冷凝,有利于 $\text{SO}_3$ 直接冷凝于喷淋液滴表面而被捕获;同时喷淋温度的降低强化了水蒸气凝结引发的扩散泳力作用,有利于喷淋液滴对 $\text{SO}_3$ 气溶胶的捕获;液气比的提高扩大了烟气与液滴的接触面积,为喷淋液滴捕获 $\text{SO}_3$ 提供了更为有利的传质条件。

图4a效率曲面图显示:随着喷淋温度的降低和液气比的提高, $\text{SO}_3$ 的脱除效率也呈现先快速增加,后增速放缓的特征,这说明在试验工况范围

图4 运行参数对冷凝喷淋脱除SO<sub>3</sub>的影响Fig. 4 Influence of operating parameters on the removal of SO<sub>3</sub> by condensation scrubbing

内，这两个参数对于该脱除效率的贡献度存在边际效益递减的范围。同时，图4b显示：高于90%的脱除效率等值线相比低于90%的等值线分布较为稀疏；高于90%的等值线对应的参数范围为：液气比高于5.0 L/m<sup>3</sup>，喷淋温度低于23.6 °C。这说明在该参数范围，两参数对脱除效率贡献度的边际效益递减，从经济性角度看不适合在此参数范围运行。建议在液气比不高于5.0 L/m<sup>3</sup>、喷淋温度不低于23.6 °C的参数边界，兼顾脱除效率和经济性考虑，选择适当的运行参数。

### 2.3 冷凝喷淋过程中SO<sub>2</sub>的协同脱除

本节讨论经增湿喷淋达到饱和状态的烟气，在经历冷凝喷淋过程中对SO<sub>2</sub>的协同脱除效果。试验在系统相对稳定运行的条件下进行，变换冷凝喷淋塔的液气比和喷淋温度，得到不同工况下SO<sub>2</sub>的进出口质量浓度数据，并计算得到脱除效率数据，如表4所示。利用MATLAB插值法绘制了SO<sub>2</sub>脱除效率的曲面图和等值线图，如图5所示。

结果显示：冷凝喷淋塔入口SO<sub>2</sub>质量浓度为32~90 mg/Nm<sup>3</sup>范围时，各个工况下出口质量浓度均低于SO<sub>2</sub>的超低排放标准（35 mg/Nm<sup>3</sup>），说明冷凝喷淋可实现对SO<sub>2</sub>的有效控制。可见SO<sub>2</sub>的脱除效率处在84.8%~99.9%之间，表明冷凝喷淋可以实现对经历湿法脱硫后较低浓度SO<sub>2</sub>的高效脱除。这是由于SO<sub>2</sub>溶于水，冷凝喷淋塔的低温条件有利于SO<sub>2</sub>在喷淋液滴中的溶解；并且在经历前序湿法脱硫工艺后，SO<sub>2</sub>浓度相对较低，在冷凝喷淋水中不足以达到饱和，从而可实现该条件下对SO<sub>2</sub>的高效协同脱除<sup>[15]</sup>。另外，数据显示：SO<sub>2</sub>的脱除效率随着喷淋温度的降低和液气比的提高而提高，这是由于SO<sub>2</sub>在水中的溶解度随着温度的降低而提高；而液气比的提高增加了烟气与液滴的接触面积，为喷淋液滴捕获SO<sub>2</sub>提供了更为有利的传质

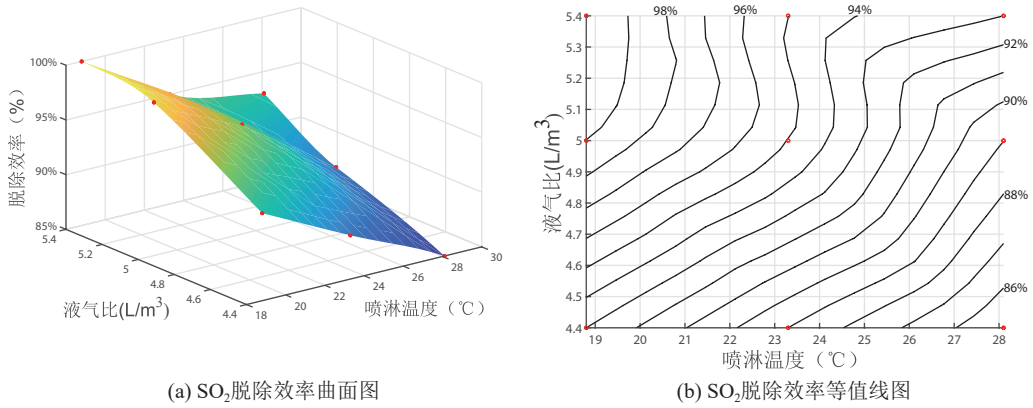
表4 不同工况下冷凝喷淋对SO<sub>2</sub>的脱除效果Table 4 Removal of SO<sub>2</sub> by condensation scrubbing under different operating conditions

工况编号	液气比 / L · m <sup>-3</sup>	喷淋温度 / °C	入口质量浓度 (mg · m <sup>-3</sup> )	出口质量浓度 (mg · m <sup>-3</sup> )	脱除效率 / %
1	4.4	28.1	90.0	11.0	84.8
2	4.4	23.3	75.0	8.0	88.7
3	4.4	18.8	54.9	4.0	92.7
4	5.0	28.1	32.0	3.5	89.1
5	5.0	23.3	59.9	3.3	94.7
6	5.0	18.8	29.8	0.3	99.0
7	5.4	28.1	80.0	5.6	93.1
8	5.4	23.3	38.3	1.9	95.0
9	5.4	18.8	80.3	0.1	99.9

条件。

图5a效率曲面图显示，随着喷淋温度的降低和液气比的提高，SO<sub>2</sub>的脱除效率增速较为均匀；图5b所示的脱除效率等值线分布也较为均匀。说明在试验工况范围内，这两个参数对于脱除效率的贡献度未出现边际效益明显递减的范围，结合对应的SO<sub>2</sub>脱除效率处于84.8%~99.9%这一较高的范围，因此试验工况范围内的参数都在工程应用的可选范围。考虑到与FPM、SO<sub>3</sub>协同脱除的需要，可以综合选取最佳参数边界，即液气比不高于5.0 L/m<sup>3</sup>、喷淋温度不低于24 °C，以获得较好的协同脱除效果。

另外，在湿法脱硫塔后增设冷凝喷淋，可以极大地缓解传统脱硫系统为实现超低排放所面临的各方面压力。在传统模式下，为了达到超低排放标准，脱硫塔往往需要在各项投入边际效益递减的区间运行，成本较高；并且现场需要严苛的操作，以避免短时超标的风险。如在脱硫塔后增加冷凝喷

图5 运行参数对冷凝喷淋脱除SO<sub>2</sub>的影响Fig. 5 Influence of operating parameters on the removal of SO<sub>2</sub> by condensation scrubbing

淋, 前序脱硫系统可以适当提高排放浓度、降低脱除效率, 以避免过高的投入, 后续的冷凝喷淋可以确保达标排放。冷凝喷淋可以协同脱除 FPM、SO<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub> 等多种污染物, 还可以回收烟气余热和水分, 具有较好的综合效益, 具有很好的应用价值。

#### 2.4 冷凝喷淋过程中 CPM 的协同脱除

本节讨论经增湿喷淋达到饱和状态的烟气, 在

经历冷凝喷淋过程中对 CPM 的协同脱除效果。试验在系统相对稳定运行的条件下进行, 变换冷凝喷淋塔的液气比和喷淋温度, 得到不同工况下的 CPM 及其有机成分 (CPM<sub>Y</sub>) 和无机成分 (CPM<sub>W</sub>) 的进出口质量浓度数据, 并计算得到 CPM 脱除效率数据, 见表 5。利用 MATLAB 插值法绘制了 CPM 脱除效率的曲面图和等值线图, 如图 5 所示。

表5 不同工况下冷凝喷淋对 CPM 的脱除效果

Table 5 Removal of CPM by condensation scrubbing under different operating conditions

工况编号	液气比 (L · m <sup>-3</sup> )	喷淋温度/°C	入口质量浓度/(mg · Nm <sup>-3</sup> )			出口质量浓度/(mg · Nm <sup>-3</sup> )			脱除效率、%
			CPM	CPM <sub>Y</sub>	CPM <sub>W</sub>	CPM	CPM <sub>Y</sub>	CPM <sub>W</sub>	
1	4.4	28.1	28.3	12.5	15.8	24.1	10.9	13.2	14.8
2	4.4	23.3	29.6	11.7	17.9	22.9	9.7	13.2	22.6
3	4.4	18.8	31.2	11.4	19.8	21.1	9.1	12.0	32.4
4	5.0	28.1	28.6	12.0	16.6	21.3	9.8	11.5	25.5
5	5.0	23.3	30.5	11.8	18.7	19.8	9.1	10.7	35.1
6	5.0	18.8	29.9	11.2	18.7	16.6	8.9	7.7	44.5
7	5.4	28.1	29.3	12.1	17.2	18.5	9.2	9.3	36.9
8	5.4	23.3	32.0	12.3	19.7	16.9	8.8	8.1	47.2
9	5.4	18.8	31.6	12.2	19.4	14.1	8.7	5.4	55.4

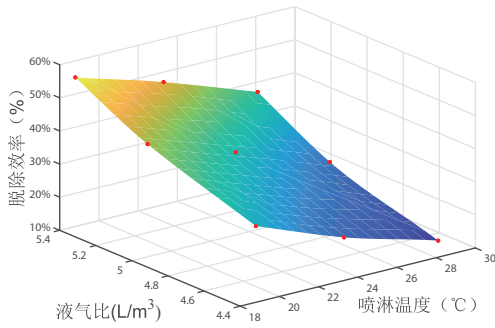
测量结果显示, 冷凝喷淋塔入口 CPM 质量浓度为 28 ~ 32 mg/Nm<sup>3</sup> 左右时, 各个工况下出口质量浓度均有不同程度下降, 但都未达到颗粒物的超低排放标准 (5 mg/Nm<sup>3</sup>), 这说明冷凝喷淋可以降低 CPM 的排放, 但是本试验工况条件未能实现 CPM 的超低排放。根据试验数据, 计算得到不同工况下 CPM 的脱除效率, 可见烟气中的 CPM 在经历冷凝喷淋塔过程中, CPM 的脱除效率为 18.6% ~ 52.6%; CPM 无机组分的脱除效为 26.8% ~ 70.6%; 有机组分的脱除效率为 5.7% ~ 24.4%。以往的研究

可以解释 CPM 在冷凝喷淋过程中的脱除机理: 主要包括 CPM 冷凝转化为 FPM, 以及 CPM 的气态前体物被喷淋液滴溶解脱除。有机成分和无机成分的脱除效率存在差异的主要原因可能在于: CPM 的气态前体如 HCl、SO<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub> 等无机组分易溶于水, 冷凝喷淋能显著降低 CPM 中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 等无机成分的含量<sup>[15]</sup>; 然而, CPM 中的有机组分较为复杂, 部分有机成分的溶解度较低, 导致脱除效率不高。

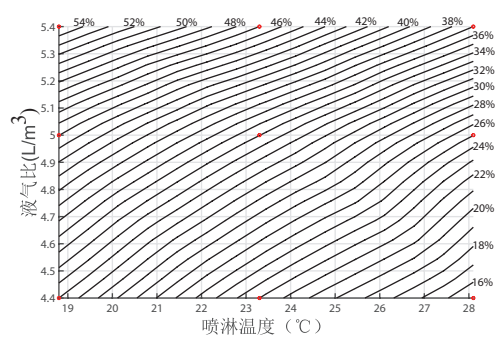
另外, CPM 的脱除效率随着喷淋温度的降低和

液气比的提高而提高。其原因在于喷淋温度降低使得烟气温度降低,强化了CPM的冷凝,使得脱除效率提高;随着液气比的增大,使得烟气与喷淋液滴的接触面积增大,强化了CPM前体物被液滴溶解的因素,从而提高了CPM的脱除效率。

图6a效率曲面图显示:随着喷淋温度的降低和液气比的提高,CPM脱除效率增加的速率比较一致,未出现明显增速放缓的情况;脱除效率等值线的分布也相对比较均匀;说明在试验工况范围内,



(a) CPM的脱除效率曲面图



(b) CPM脱除效率等值线图

图6 运行参数对冷凝喷淋脱除CPM的影响

Fig. 6 Influence of operating parameters on the removal of CPM by condensation scrubbing

### 3 结 论

通过现场试验研究得到,在烟气湿法脱硫的增湿喷淋后利用低温水对烟气进行冷凝喷淋,在液气比 $4.4 \sim 5.4 \text{ L/m}^3$ 、喷淋温度 $18.8 \sim 28.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的工况范围,可过滤颗粒物的脱除效率为 $81.9\% \sim 100\%$ , $\text{SO}_3$ 的脱除效率为 $85.5\% \sim 93.5\%$ , $\text{SO}_2$ 的脱除效率为 $84.8\% \sim 99.9\%$ ,可凝结颗粒物的脱除效率为 $14.8\% \sim 55.4\%$ 。脱除效率随着喷淋温度的降低和液气比的提高而提高。说明冷凝喷淋技术可实现可过滤颗粒物、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 和可凝结颗粒物的协同脱除;并且该技术对于前三者的脱除效率较高,排放浓度满足相应排放标准要求。兼顾经济性考虑,建议通过冷凝喷淋协同脱除可过滤颗粒物、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 的最佳参数边界为液气比不高于 $5.0 \text{ L/m}^3$ 、喷淋温度不低于 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在试验工况下,冷凝喷淋对于可凝结颗粒物仅获得最高约 $55\%$ 的脱除效率,排放浓度也未达到超低排放的水平;未来在技术经济可承受的前提下,可通过进一步提高液气比或降低喷淋温度的手段获得更高的可凝结颗粒物脱除效率。

### 参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)[R]. 2014.  
National Energy Administration of the People's Republic of China.

未达到液气比和喷淋温度两个参数对CPM脱除效率贡献度边际效益递减的情况。加之所获得的CPM脱除效率较低,说明试验工况范围未达到脱除CPM的最佳参数范围,其最佳参数范围与前述协同脱除FPM、 $\text{SO}_3$ 和 $\text{SO}_2$ 的最佳参数范围不重合。为获得更高的CPM脱除效率,可在技术经济可承受的前提下进一步提高液气比或降低喷淋温度。但因条件限制,本文未能进行相关的探索,可列入未来的研究计划。

Action Plan for Energy Conservation and Emission Reduction Upgrade and Transformation of Coal and Electricity (2014-2020) [R]. 2014.

- [2] FENG Y P, LI Y Z, CUI L. Critical review of condensable particulate matter[J]. *Fuel*, 2018, 224: 801-813.
- [3] ZHANG Y, ZHENG C H, HU F S, et al. Field test of  $\text{SO}_3$  removal in ultra-low emission coal-fired power plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(5): 4746-4755.
- [4] ZUO W J, ZHANG X Y, LI Y Z, et al. Evaluation of the controlled condensation method for flue gas  $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  measurement[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 206: 106461.
- [5] ZHANG Z P, LI Y Z, ZHANG X Y, et al. Review of hazardous materials in condensable particulate matter[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 220: 106892.
- [6] GRÖHN A, SUONMAA V, AUVINEN A, et al. Reduction of fine particle emissions from wood combustion with optimized condensing heat exchangers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(16): 6269-6274.
- [7] SIPPULA O, HOKKINEN J, PUUSTINEN H, et al. Particle emissions from small wood-fired district heating units[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(6): 2974-2982.
- [8] FENG Y P, LI Y Z, CUI L, et al. Cold condensing scrubbing method for fine particle reduction from saturated flue gas[J]. *Energy*, 2019, 171: 1193-1205.
- [9] ZHOU X, LIU H, FU L, et al. Experimental study of natural gas combustion flue gas waste heat recovery system based on direct contact heat transfer and absorption heat pump[C]//ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability Collocated

- with the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, 2013.
- [10] 魏茂林, 付林, 赵玺灵, 等. 燃煤烟气余热回收与减排一体化系统应用研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(6): 1157-1165.  
WEI Maolin, FU Lin, ZHAO Xiling, et al. Coal-fired boiler flue gas heat recovery system and its performance study[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(6): 1157-1165.
- [11] 左左俊. 冷核诱导  $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  气溶胶颗粒物凝并净化机理研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.  
ZUO Wujun. Study on condensation and purification mechanism of  $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  aerosol particles induced by cold nucleus[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [12] CHEN T L, DENG L J, LI Y Z, et al. Improvement of the reduction of condensable particulate matter in flue gas scrubbing process[J]. Environmental Research, 2023, 237: 116945.
- [13] LI Y Z, ZHU Q W, YI Q J, et al. Experimental method for observing the fate of  $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  in a temperature-decreasing flue gas flow: Creation of state diagram[J]. Fuel, 2019, 249: 449-456.
- [14] ZHENG C H, WANG Y F, LIU Y, et al. Formation, transformation, measurement, and control of  $\text{SO}_3$  in coal-fired power plants[J]. Fuel, 2019, 241: 327-346.
- [15] ZHANG Z P, WANG L, LI Y Z, et al. Mechanism of Condensable Particulate Matter transformation and reduction in flue gas scrubbing process[J]. Fuel, 2024, 366: 131255.