

# 湿法脱硫协同除尘机理及超低排放技术路线选择

The mechanism of co-benefit dedusting in wet desulfurization and selection on technical routes of ultra-low emission

郭俊<sup>1</sup> 杨丁<sup>2</sup> 叶凯<sup>2</sup> 何永胜<sup>3</sup>

(1. 福建龙净环保股份有限公司, 福建 龙岩 364000; 2. 国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心, 福建 龙岩 364000; 3. 上海龙净环保科技工程有限公司, 上海 200331)

**摘要:** 详细回顾了 WFGD 协同除尘的研究历史, 并通过 WFGD 喷淋层液滴捕集颗粒物的理论模型计算以及比较当今超低排放 WFGD 的协同除尘效率数据, 论证了喷淋层是 WFGD 协同除尘的主要贡献这一基本事实, 也肯定了 WFGD 协同除尘的效果。通过对机械除雾器、湿式电除尘器以及 WFGD 运行实际的分析, 理清了机械除雾器、湿式电除尘器的功能定位, 揭示了 WFGD 协同除尘的局限性, 并为燃煤电厂超低排放技术路线的选择提供了有益的意见与建议。

**关键词:** 湿法烟气脱硫; 协同除尘; 核心机理; 超低排放; 湿式电除尘器

**Abstract:** The research on co-benefit dedusting of WFGD system has been reviewed. According to the theoretical particulate trapping model calculations of droplet from WFGD spray layer and the co-benefit dedusting efficiency data comparisons on WFGD system of today's ultra-low emission, it demonstrated that the spray layer provided the major contribution in the process of co-benefit dedusting. The effect of co-benefit dedusting on WFGD confirmed has been confirmed as well. Through the practical operation analysis of mechanical demister, wet electrostatic precipitator and WFGD, the function orientation of mechanical demister and wet electrostatic precipitator have been clarified, and the limitation of WFGD co-benefit dedusting has been revealed, which provided useful advice and suggestions for the selection on technical routes of ultra-low emission for coal-fired power plants.

**Key words:** wet flue gas desulfurization; co-benefit dedusting; core mechanism; ultra-low emission; wet electrostatic precipitator

中图分类号: X701.3

文献标识码: B

文章编号: 1674-8069(2017)02-009-06

## 0 引言

随着国家三部委《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的实施, 燃煤电厂烟气治理设备超低排放改造工作突飞猛进, 成绩显著。在实施湿法脱硫(WFGD)超低排放方面, 各环保公司纷纷开发了脱硫喷淋塔技术改造提效升级的多种新工艺, 如单塔双循环技术、双托盘技术、单塔双区(三区)技术、旋汇耦合技术等, 特别在脱硫塔核心部件喷淋系统上, 采用增强型的喷淋系统设计(如增加喷淋层、提高覆盖率、提高液气比等)。脱硫效率从以前平均在 95% 左右提高到 99% 甚至更高。特别引人关注的是, 在超低排放脱硫系统脱硫效率大幅

提高的同时, 其协同除尘效果也显著提高, 一批改造后脱硫系统的协同除尘效率(净效率, 已包含脱硫系统逃逸浆液滴的含固量)达到了 70%, 甚至有更高的报道。

面对这样的事实, 与之相关的问题亟需得到解答与澄清:

(1) 超低排放湿法脱硫协同除尘的核心机理是什么?

(2) 湿法脱硫协同除尘技术是否有局限性? 应用中应注意哪些问题?

(3) 超低排放技术路线选择中如何把握好湿法脱硫协同除尘与湿式电除尘器的关系?

本文旨在追根溯源, 一方面回顾总结过去在这

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203700)

方面的研究;一方面从机理出发,研究喷淋系统(及除雾器)对颗粒物脱除的作用。并采用理论模型计算与实际工程案例比较的方法,论证湿法脱硫喷淋系统是协同除尘的主要贡献部件,同时分析湿法脱硫协同除尘的局限性及与湿式电除尘器的关系,为超低排放技术路线选择提供有益的参考意见。

### 1 湿法脱硫协同除尘的研究简要回顾

清华大学热能系对脱硫塔除尘机理的研究较多,脱硫塔内单液滴捕集飞灰颗粒物的相关研究,主要建立了综合考虑惯性、拦截、布朗扩散、热泳和扩散泳作用的单液滴捕集颗粒物模型并进行了数值模拟计算,分析了温度、液滴直径和颗粒粒径对单液滴捕集过程及效率的影响规律<sup>[1]</sup>。清华大学王晖等<sup>[2]</sup>通过测试执行GB 13223-2011标准WFGD进出口颗粒物的分级浓度的研究表明,WFGD可有效捕集大颗粒,但对PM<sub>2.5</sub>的捕集效率较低,且分级脱除效率随粒径减小而明显下降。华电电力科学研究院魏宏鸽等<sup>[3]</sup>于2011~2013年对39台锅炉(机组容量为25~1000MW)的执行GB 13223-2011标准WFGD开展了除尘效率测试试验,结果显示,不同试验机组WFGD的协同除尘效率为18%~68%,平均协同除尘效率为49%。国电环保研究院王东歌等<sup>[4]</sup>通过对我国4座电厂5台不同容量的执行GB 13223-2011标准WFGD进出口烟气总颗粒物浓度进行了测试,结果表明,WFGD对烟气中总颗粒物的去除效率介于46.00%~61.70%之间,平均达到55.50%。夏立伟等<sup>[5]</sup>对某电厂超低排放改造前的WFGD进行了协同除尘效果测试,结果显示,WFGD协同除尘效率为53%。

上述研究结果一致表明:WFGD具备协同除尘能力;执行GB 13223-2011标准WFGD平均协同除尘效率大致在50%左右;湿法脱硫协同除尘的主要机理是喷淋液滴对颗粒物的捕获机理。这种认识在WFGD实施超低排放之前是行业内比较公认的。

### 2 湿法脱硫喷淋液滴协同除尘机理

#### 2.1 湿法脱硫喷淋液滴捕集颗粒物的机理与模型

喷淋塔除尘机理与湿法除尘设备中重力喷雾洗涤器相似。一定粒径(范围)的喷淋液滴自喷嘴喷出,与自下而上的含尘烟气逆流接触,粉尘颗粒被液(雾)滴捕集,捕集机理主要有重力、惯性碰撞、截

留、布朗扩散、静电沉降、凝聚和沉降等。烟气中尘粒细微而又无外界电场的作用,可忽略重力和静电沉降,主要依靠惯性碰撞、截留和布朗扩散3种机理。前人的研究表明,Devenport提出的孤立液滴惯性碰撞效率模型<sup>[1,6]</sup>、马大广<sup>[7]</sup>的拦截效率模型、嵇敬文<sup>[8]</sup>的布朗扩散捕集效率模型与实验结果吻合较好,因此我们根据上述相关模型计算单个液滴的综合颗粒分级捕集效率,然后结合实际工程参数参考岳焕玲<sup>[9]</sup>提出的液滴群和多层喷淋层中不同粒径液滴的颗粒分级捕集效率模型进行了的计算,相关计算模型见表1所示。

表1 湿法脱硫装置喷淋液滴颗粒物捕集效率计算模型

项 目	计算模型
	①孤立液滴惯性碰撞效应颗粒分级捕集效率模型: $E_I = \left( \frac{S_I}{S_I + 0.35} \right)^2; S_I = \frac{C_c d_p^2 \rho_p u}{18 \mu_g d_l}$
	②孤立液滴拦截效应颗粒分级捕集效率模型: (1) 单个液滴对粉尘颗粒的惯性碰撞、拦截和布朗扩散效应 $E_R = (1 + K_R)^2 \frac{1}{1 + K_R} \approx 3K_R$ $K_R = \frac{d_p}{d_l}$
	③孤立液滴扩散效应颗粒分级捕集效率模型: $E_D = \frac{4}{P_e} (2 + 0.557 R_{ed}^{1/2} \times Sc^{3/8})$ $P_e = \frac{d_l u}{D} Sc = \frac{P_e}{R_{ed}} = \frac{\mu_g}{\rho_g D} R_{ed} = \frac{\rho_g d_l u}{\mu_g}$
	④单个液滴的综合颗粒分级捕集效率模型: $\eta_E = 1 - (1 - E_I)(1 - E_R)(1 - E_D)$
(2) 单层喷淋层中粒径为d <sub>l</sub> 雾滴群的颗粒分级捕集效率	$\eta_s = 1 - \frac{c_2}{c_1} = 1 - e^{-\frac{0.0015 \omega \eta_E H u_g d_l^2}{D_{3u}^2}}$
	①湿法脱硫具有多层喷淋层(n层)粒径为d <sub>l</sub> 的喷淋液滴群对颗粒的分级除尘效率模型: $\eta_{Li} = 1 - (1 - \eta_{i1})(1 - \eta_{i2})(1 - \eta_{in})$
(3) 湿法脱硫装置喷淋液滴综合除尘效率	②来自喷淋层向下运动的液滴具有一定的粒径范围(液滴粒径分为x个间隔),喷淋液滴对颗粒的分级捕集效率模型: $\eta_i = \sum_{i=1}^m \eta_{Li}$
	③湿法脱硫装置喷淋液滴的综合除尘效率: $\eta = \sum_{i=1}^m \frac{\eta_i \times VR_i}{100}$

#### 2.2 湿法脱硫喷淋层对颗粒物捕集效率影响因素

##### (1) 颗粒物粒径及分级浓度分布对喷淋层协同

粉尘脱除效率的影响

选用单向双头空心喷嘴(液滴体积平均粒径 1795  $\mu\text{m}$ ) ,液气比  $L/G = 14.283 \text{ L/m}^3$  时 ,不同粒径范围(900 ~ 5000  $\mu\text{m}$ ) 液滴群对颗粒物分级脱除效果曲线如图 1 所示。

随着颗粒物分级粒径的增大 ,脱除效率明显增加 900  $\mu\text{m}$  粒径液滴群对 1  $\mu\text{m}$  颗粒物的脱除效率不到 5% ,而对 10  $\mu\text{m}$  颗粒物的脱除效率可达 70% 以上 ,因此 ,烟尘颗粒的分级浓度特性对喷淋层的协同除尘效率影响很大 ,小颗粒( < 2.5  $\mu\text{m}$ ) 比重越大 ,脱硫塔的协同除尘效率越低。随着液滴粒径增大 ,因其数量占比大幅减小 ,发生惯性碰撞、拦截和扩散效应的概率随之降低 ,对同一粒径颗粒物分级脱除效率随之降低。

(2) 液气比对颗粒物协同脱除效率的影响

选用单向双头空心喷嘴(液滴体积平均粒径 1795  $\mu\text{m}$ ) ,液气比选为 8、12、16、20  $\text{L/m}^3$  ,不同液气比条件下不同粒径范围(900 ~ 5000  $\mu\text{m}$ ) 喷淋雾液滴群对 2.5  $\mu\text{m}$  颗粒物脱除效果曲线如图 2 所示。

上述计算结果表明 ,随着液气比的增大 ,吸收塔单位截面上喷淋浆液量越大 ,喷淋液滴数目增加 ,表面积增加 ,与颗粒物接触机会增加 ,脱除效率明显增大。对于 900  $\mu\text{m}$  左右粒径的液滴 ,液气比从 8  $\text{L/m}^3$  增加到 16  $\text{L/m}^3$  ,对 2.5  $\mu\text{m}$  颗粒分级脱除效率从 14.35% 增加到 26.64% ,脱除率增加了 84%。因此增大液气比有助于提高湿法脱硫对粉尘和细颗粒( $\text{PM}_{2.5}$ ) 的协同脱除作用。

2.3 超低排放 WFGD 与执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD 协同除尘效率的比较

为了分析问题 ,我们假定有一个脱硫工程需要做超低排放改造 ,设定进口  $\text{SO}_2$  浓度 2450  $\text{mg/m}^3$  ,进口粉尘浓度 20  $\text{mg/m}^3$  ,出口  $\text{SO}_2$  浓度在超低排放改造前后分别设定为 200  $\text{mg/m}^3$  和 35  $\text{mg/m}^3$  ,选用双头空心喷嘴(液滴体积平均粒径 1795  $\mu\text{m}$ ) ,脱硫塔进口飞灰颗粒物浓度分布参考清华大学对某个实际工程的颗粒物质量累积分布测试结果<sup>[2]</sup>。

根据上述假定 ,我们计算了超低排放 WFGD 与执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD 喷淋层的协同除尘效率、喷淋层对  $\text{PM}_{2.5}$  的脱除效率 ,同时把除雾器出口液滴中的含固量考虑在内 ,测算了超低排放 WFGD 与执行 13223 - 2011 标准 WFGD 的协同除尘效率 ,结果如表 2 所示。

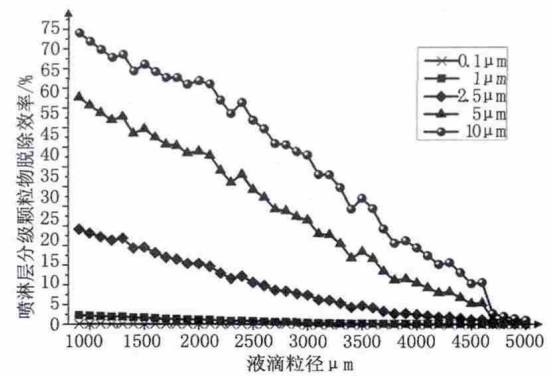


图 1 不同粒径范围液滴群对颗粒物分级脱除效率

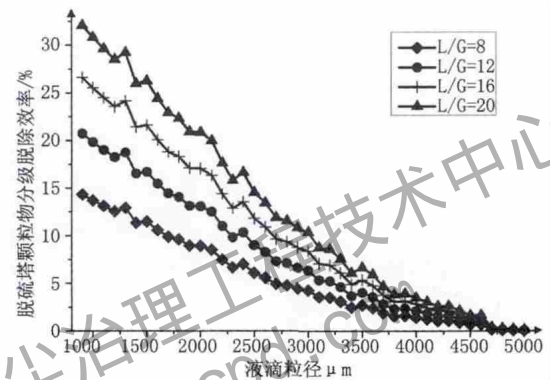


图 2 不同液气比条件下液滴群对 2.5  $\mu\text{m}$  颗粒分级脱除效率

表 2 超低排放 WFGD 与执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD 协同除尘效率计算结果

项 目	GB 13223 - 2011 标准 WFGD	超低排放 WFGD
进口 $\text{SO}_2$ 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	2450	
出口 $\text{SO}_2$ 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\leq 200$	$\leq 35$
设计脱硫效率/%	91.84	98.57
设计液气比/ $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$	10.35	17.55
喷淋层数	3	4
进口飞灰颗粒物/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	20	
喷淋层出口飞灰/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	5.01	3.34
喷淋层协同除尘效率/%	74.95	83.30
进口 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	8.75	
喷淋层出口 $\text{PM}_{2.5}$ / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	5.01	3.34
喷淋层 $\text{PM}_{2.5}$ 脱除效率/%	42.74	61.83
WFGD 出口液滴/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	50	15
浆液滴含固量/wt%	15	
WFGD 出口液滴固体/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	7.5	2.25
WFGD 出口颗粒物/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	12.51	5.59
WFGD 协同除尘效率/%	37.45	72.05

表2 计算可以给我们以下几点认识:

(1) WFGD 对飞灰颗粒物协同脱除的主要贡献是喷淋层。根据前述 WFGD 喷淋雾滴捕集颗粒物的机理分析与模型计算,喷淋层对较大粒径颗粒的脱除效率是较高的,而这一部分颗粒占重量浓度的大部分,所以计算结果显示,对执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD,喷淋层协同除尘效率 74.95%,超低排放 WFGD 喷淋层协同除尘效率 83.30%。

(2) WFGD 的整体协同除尘效率需要考虑 WFGD 逃逸液滴中的石灰石、石膏等固体颗粒物分量。在进口粉尘浓度条件不变的情况下,由于超低排放 WFGD 改造安装了高效除雾器,超低排放 WFGD 协同除尘效率可保持在 72.05%,而执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD 由于我们假设的原除雾器设计效率较低,出口液滴排放浓度较高,其协同除尘效率降到了 37.45%。为了保障 WFGD 整体的协同除尘效率和较低的颗粒物总排放浓度,需要应用高效除雾器把 WFGD 出口液滴排放浓度降到足够低。

(3) 对于我们特别关注的细颗粒物( $PM_{2.5}$ ) 执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD 喷淋层的协同脱除效率为 42.74%,超低排放 WFGD 喷淋层的协同脱除效率为 61.83%,提效 44.67%,分析超低排放 WFGD 喷淋层脱除细颗粒物效率较高的主要原因,在于大幅增加了 WFGD 的液气比,使得喷淋雾滴总的表面积增加,与细颗粒接触的概率增加,从而明显提高了颗粒物特别是  $PM_{2.5}$  的协同脱除效率。

表3 是我国部分超低排放 WFGD 工程的协同除尘效果,其中 A 为华能南通电厂 4 号机组(350 MW),B 为华能国际电力股份有限公司玉环电厂一期 1000 MW 机组,C 为首阳山公司二期 300 MW 机组。实际 WFGD 工程的协同除尘测试效率与理论计算结果存在一定的差别,但是趋势是一致的,部分案例数据还比较接近。

表3 实际超低排放 WFGD 工程协同除尘效果

项 目	A 电厂	B 电厂	C 电厂
进口粉尘浓度/ $mg \cdot m^{-3}$	12.69	15.53	23.20
出口粉尘浓度/ $mg \cdot m^{-3}$	4.10	2.86	3.90
协同除尘效率/%	67.7	81.33	83.19

超低排放 WFGD 与执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD 比较,无论是通过理论计算比较,还是通过工

程实际测试结果来比较,证明超低排放 WFGD 对执行 GB 13223 - 2011 标准 WFGD 提高协同除尘效率的大致幅度是一致的。这也间接地证明了喷淋层是 WFGD 协同除尘作用的主力军。

### 3 湿法脱硫用机械类除雾器协同除尘机理

#### 3.1 除雾器的工作机理及主要作用

除雾器是 WFGD 的重要设备,安装于脱硫塔顶部,常采用机械除雾器,用以去除烟气携带的小液滴,保护下游设备免遭腐蚀和结垢<sup>[10-12]</sup>。

除雾器对协同除尘的主要作用在于捕集逃逸液滴的同时捕集了液滴中颗粒物(石灰石、石膏及被液滴包裹的烟尘等)。SO<sub>2</sub> 与颗粒物的超低排放对 WFGD 的除雾器组件提出了更高要求,一方面,通过增加液气比与喷淋层数、提高喷淋覆盖率等措施实现高效脱硫,但在另一方面一定程度上增加了进入除雾区的液滴总量,使其负荷增加。同时为了保证 WFGD 出口烟气的颗粒物达到超低排放浓度要求,实际超低排放 WFGD 工程一般会应用多级或组合型(管式、屋脊式、水平烟道式)高效除雾器以保证 WFGD 出口液滴浓度处在较低水平,以尽量减少逃逸液滴中的颗粒物对排放的贡献。

#### 3.2 WFGD 除雾器协同除尘的贡献讨论

当今高效除雾器能将 WFGD 出口液滴排放浓度控制得比较低已得到工程实际的验证。但有人可能要问,这一类的除雾器对喷淋层出口的飞灰颗粒物是否有较高的直接脱除作用呢?我们认为,应该说会有一定作用。但是,从本文对喷淋层协同除尘效果分析可以看出,未被喷淋层捕集的飞灰颗粒物的平均粒径非常小。在现实燃煤电厂超低排放治理条件下,脱硫前的除尘器出口飞灰颗粒物浓度一般控制在 20 mg/m<sup>3</sup> 左右,平均粒径约是 3.02 μm<sup>[2]</sup>,经过脱硫塔喷淋层协同除尘作用后,喷淋层出口的飞灰颗粒物平均粒径 < 1 μm。从分析可知,机械除雾器对液滴的临界分离粒径在 20 ~ 30 μm 左右,可以推断,机械除雾器对喷淋层出口的飞灰颗粒物直接脱除(液滴包裹的除外)作用很有限,不太可能成为协同除尘的主要贡献者。

### 4 超低排放技术路线的选择

#### 4.1 WFGD 的主要功能定位与协同除尘的局限性

WFGD 的主要功能定位是脱硫,工程项目设计

时要确定设计输入与输出条件,在设计煤种上会选含硫量较高的煤种进行设计,根据要求的出口 $\text{SO}_2$ 浓度设计脱硫效率,从而设计整个脱硫系统(包括喷淋层系统和运行参数),对除尘作用基本上是协同的概念。从我们前述计算与测试数据来源,大多数是以全负荷运行状态而言。实际上,WFGD运行是与煤的含硫量、发电负荷紧密联系的。根据WFGD实际进口 $\text{SO}_2$ 浓度进行控制,调节循环泵开启的个数,控制喷淋量与浆液pH。这样可能导致协同除尘效率不是很稳定,运行中二者难以兼顾。当采用WFGD后没有配置湿式电除尘器的超低排放治理技术路线工程中,WFGD就是除尘的终端把关设备,在某种特定应用煤种情况下(如低硫煤、高灰分、高比电阻粉尘),WFGD进口比较低的 $\text{SO}_2$ 浓度与较高的飞灰颗粒物浓度同时出现,WFGD的运行将难以兼顾,不大可能为了维持较高的除尘效率将喷淋层全负荷投运,这就是WFGD协同除尘的局限性。WFGD的主要功能定位就是脱硫,除尘仅仅是协同作用,不可把除尘的终端把关全部责任交给WFGD。

#### 4.2 湿式电除尘器对超低排放与多污染物协同控制的重要作用

湿式电除尘器(WESP)安装于WFGD下游,WESP除尘原理与干式电除尘收尘原理相同,都是依靠高压电晕放电使得粉尘颗粒荷电,荷电粉尘颗粒在电场力的作用下到达收尘极。在工作的烟气环境和清灰方式上两者有较大区别,干式电除尘器主要处理含水很低的干气体,WESP主要处理含水较高乃至饱和的湿气体;干式电除尘器一般采用机械振打或声波清灰等方式清除电极上的积灰,而WESP则通过喷淋系统连续喷雾在收尘极表面形成完整的水膜将粉尘冲刷去除。由于WESP进口烟气温度低且处于饱和湿态,水雾与粉尘结合后比电阻大幅下降,使得WESP对粉尘适应能力强,同时不存在二次扬尘<sup>[15]</sup>,因此无论前部条件是否波动,WESP对细颗粒和WFGD除雾器逃逸液滴均具备较高的脱除效率,WESP还能有效捕集其它烟气治理设备捕集效率较低的污染物(如 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_3$ 、酸雾和Hg等),可作为烟气多污染物治理终端把关设备。实际工程中WESP应用较广,除尘效果显著,甚至可达到更低排放要求,例如河北国华定州发电有限责任公司1号机组(600MW)配套WESP出口粉尘排放浓度低于 $1\text{ mg/m}^3$ 。

#### 4.3 是否配置湿式电除尘器是超低排放技术路线选择中的一个重要问题

根据我们的经验可以列出以下几点作为考虑是否需要配置WESP的主要因素:

(1) 脱硫前除尘器的除尘效率是否有较大余量? 如有较大余量,就可以在不利条件下启用除尘器余量,不用过分依赖WFGD的协同除尘作用;

(2) 煤种的条件: 实际供应的煤种含硫量是否波动较小? 含硫量波动小,意味着协同除尘效率比较稳定,依靠度较高;

(3) 影响除尘器除尘效率的煤种条件和飞灰条件是否相对稳定? 如果经常可能使用影响除尘性能的困难煤种,那脱硫系统的协同除尘负担就重。

(4) 是否考虑未来对 $\text{SO}_3$ 等其他污染物的控制要求?

如果有以上(1)~(3)的不利条件,同时考虑到未来对 $\text{SO}_3$ 等可凝结颗粒物和其他污染物的控制要求,那么论证配置WESP的必要性是应该的。

目前,关于超低排放技术路线的选择有很多探讨,实际工程上的问题和条件是很复杂的,除了技术条件,还有现场场地条件、煤种来源稳定性、负荷波动状况等等其他因素需要考虑。所以我们认为超低排放技术路线选择的核心就是具体问题具体分析。

超低排放技术路线中的关键问题是多污染物协同控制,在各主要治理设备中理清主要功能和协同功能非常重要,一定要考虑当主要功能与协同功能有矛盾时如何处理,还是要保留有应对措施。比如,在煤种多变的条件下,保留一个适当规格的WESP作为终端把关,是一个较符合实际的选择。

#### 4.4 湿法脱硫协同除尘与湿式电除尘器在除尘中相互关系计算举例

为了说明WFGD与湿式电除尘器在除尘中的相互关系,我们举了个计算例子,按第3节“湿法脱硫喷淋液滴协同除尘机理”的关于超低排放脱硫系统的基本假设,取超低排放WFGD出口烟气液滴浓度为 $15\text{ mg/m}^3$ (含固量15 wt%),计算液气比分别为10、12.5、15、17.5和 $20\text{ L/m}^3$ 的WFGD进出口粉尘浓度关系曲线(注:这里是简化计算,实际应考虑塔内其他部件对烟尘的捕集作用)结果见图3所示。

WFGD的液气比越大,喷淋层协同除尘效率越高,越容易达到超低排放。对于特定液气比条件下的WFGD,WFGD进出口粉尘浓度呈线性关系,当其



进口粉尘浓度在一定范围以内(较低)时,对应的出口粉尘浓度处于图中垂直网格区域,此时由高效除雾器配合即可满足 WFGD 出口粉尘浓度达到超低排放要求;但是在斜线网格区域时就不能满足 WFGD 出口粉尘浓度 $\leq 5 \text{ mg/m}^3$ 。

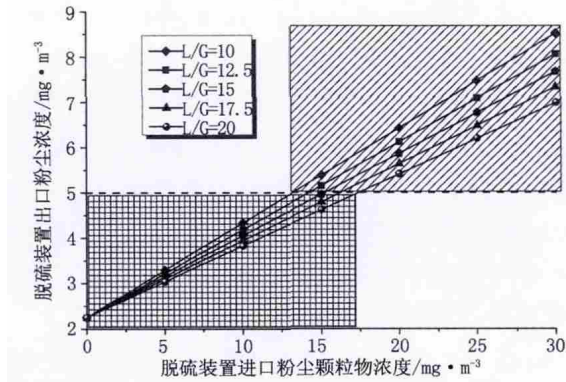


图3 不同液气比条件下 WFGD 进出口粉尘浓度关系

这个结果可供设计参考,考虑实际用煤的含硫量(特别要注意低含硫量煤种)可以估算实际应用的液气比,考虑最差煤种可以估算进口粉尘浓度最高值,这样可以判断是否需要配置 WESP 作为除尘终端把关设备。上述结果也可供实际运行控制时参考,在正常的煤种条件下,充分发挥 WFGD 的协同除尘作用,同时控制好 WESP 的运行参数;在低硫煤、飞灰条件对除尘器不利条件下,用 WESP 起到终端把关作用实现超低排放( $\leq 5 \text{ mg/m}^3$ )。

## 5 结语

(1) WFGD 协同除尘的主要贡献是喷淋层,其除尘的核心机理是雾化液滴对飞灰颗粒物的惯性碰撞、拦截和扩散效应。通过理论计算和工程案例数据比较可看出,由于超低排放 WFGD 喷淋层应用了高液气比、多层喷淋层、高覆盖率等措施以及高效除雾器的配合,协同除尘效率可达到 70% 左右。

(2) 湿法脱硫装置的主要功能定位是脱硫,除尘是协同功能。当燃用低硫煤煤种、对除尘器不利飞灰两种情况同时出现时,WFGD 的脱硫与协同除尘较难兼顾,所以在粉尘超低排放技术方案选择时,不应过度依赖 WFGD 的协同除尘作用(设计上直接应用 70% 协同除尘效率是有风险的)。

(3) 机械除雾器主要通过高效脱除来自喷淋层的雾滴抑制 WFGD 出口液滴中固体含量对排放粉尘的贡献,其液滴的临界分离粒径在 20 ~ 30  $\mu\text{m}$  左

右,对粒径更小的喷淋层出口飞灰颗粒物( $\leq 10 \mu\text{m}$ )的脱除作用很有限,起到辅助除尘作用。

(4) 湿式电除尘器对颗粒物、雾滴及其他( $\text{SO}_3$ 等)污染物具有高效捕集能力,在超低排放中作为终端把关设备可以应对煤种、工况变化的复杂情况。

(5) 超低排放技术路线选择的核心是具体问题具体分析,在各主要治理设备中理清主要功能和协同功能非常重要,在中国煤种普遍波动较大的现实条件下,更要仔细认清协同控制中协同功能的局限性,不能简单地套用一些国外经验。

## 参考文献:

- [1]王翔,宋蕾,姚强. 脱硫塔内单液滴捕集颗粒物的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2014,35(9): 1889-1893.
- [2]王琿,宋蕾,姚强,等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(5): 1-7.
- [3]魏宏鸽,叶伟平,柴磊,等. 湿法脱硫系统除尘效果分析与提效措施[J]. 中国电力,2015,48(8): 33-36.
- [4]王东歌,朱法华,易玉萍,等. 基于实测的湿法脱硫系统对颗粒物去除效果的研究[J]. 环境监测管理与技术,2015,27(5): 21-25.
- [5]夏立伟,张学锁,梁会友,等. 脱硫协同除尘技术在大型火电机组中的应用研究[J]. 中国高新技术企业,2016(12): 83-85.
- [6]Devenport. Atmospheric Environment,1978(12): 997-1008.
- [7]马大广. 除尘器性能计算[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1990.
- [8]嵇敬文. 除尘器[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1981.
- [9]岳焕玲. 火电厂脱硫工艺对除尘效率的影响研究[D]. 保定: 华北电力大学,2006.
- [10]杨宏慧,陈晨,林继香,等. 脱硫除雾器频繁堵塞原因分析及对策[J]. 华电技术,2012,34(8): 64-65.
- [11]杨治中,郭士义. 火电厂石灰石-石膏湿法脱硫除雾器的研究及应用进展[J]. 能源环境保护,2014,28(6): 11-14.
- [12]张轶,赵红,石峰,等. 脱硫除雾器对烟尘排放的影响的研究[J]. 广州化工,2014,42(17): 107-109.
- [13]马晓丽,张襄平. 无GGH湿法脱硫系统除雾器堵塞原因及防堵建议[J]. 电力科技与环保,2012,28(4): 35-36.
- [14]官大纯,红小春. 某电厂三通道除雾器堵塞过程探析与防控措施[J]. 电力科技与环保,2012,28(6): 42-44.
- [15]朱召平,郑晓盼. 湿式电除尘器在煤电超低排放中的应用[J]. 中国环保产业,2015(11): 52-56.

收稿日期:2016-12-20; 修回日期:2017-01-09

作者简介:郭俊(1955-),男,福建龙岩人,教授级高工,注册环保工程师,享受国务院特殊津贴专家,主要从事大气污染物净化技术研究及管理工作。E-mail: junguo318@139.com