

# 减缓脱硫塔除雾器堵塞的流场优化方法

刘卓, 陈冬林\*, 汪淑奇, 杨仪江, 闫优洋, 杨展

(长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南省长沙市 410114)

## Optimization Method of Flow Field for Alleviating Clogging of Mist Eliminator in Desulfurization Tower

LIU Zhuo, CHEN Donglin\*, WANG Shuqi, YANG Yijiang, YAN Youyang, YANG Zhan

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan Province, China)

**摘要:**【目的】脱硫塔除雾器因其结构简单、除雾效果好而广泛应用于燃煤火电厂。然而, 除雾器因自身气水分离原理的局限性, 容易在板面上结垢堵塞, 严重时影响机组的输出功率。因此, 需要解决湿法脱硫塔除雾器频繁结垢堵塞及由此造成的阻力损失过大问题。【方法】提出了采用导流板优化脱硫塔及其进口烟道流场的方法, 并对优化前后的Z形脱硫塔及其L形进口烟道烟气流场进行了仿真计算和工程应用验证。【结果】仿真计算结果显示, 在额定锅炉负荷工况下, 优化后L形进口烟道出口截面的速度相对标准差从27.57%降至19.99%; Z形脱硫塔内除雾器入口截面的速度相对标准差从45.66%降至40.24%。同时, 除雾器入口截面的浆液液滴质量流量从441.136 kg/s降至368.498 kg/s, 这表明优化方案有效降低了除雾器的工作负荷。实验结果表明, 改造前脱硫塔除雾器入口截面存在速度为0 m/s的区域, 改造后该区域速度提升至1~5 m/s, 与仿真计算结果趋势一致。改造后180天的运行数据显示, 除雾器前后压差不再超过200 Pa。停机检修中实测结果显示, 除雾器板面上的结垢厚度从改造前的1 cm以上减小至0.1 cm左右, 严重结垢堵塞现象已消除。【结论】所提流场优化方法显著改善了脱硫塔内烟气流场的均匀性, 降低了除雾器的工作负荷, 有效减缓了除雾器结垢堵塞问题, 具有较大的工程应用价值。

**关键词:** 燃煤机组; 脱硫塔; 锅炉; 除雾器; 堵塞; 流场均匀性; 烟气脱硫; 数值模拟

**ABSTRACT:** [Objectives] Desulfurization tower mist eliminator is widely used in coal-fired power plants due to its simple structure and good fog removal effect. However, due to the limitation of its own gas-water separation principle, it is

prone to scaling up and blocking on the plate surface, which seriously affects the output power of the unit. Therefore, it is necessary to solve the problem of frequent scaling and clogging of the wet desulfurization tower mist eliminator and the resulting excessive resistance loss. [Methods] The method of optimizing the flow field of desulfurization tower and its inlet flue using deflector plates was proposed, and the simulation calculations and engineering application verifications of the Z-shaped desulfurization tower and its L-shaped inlet flue before and after optimization were carried out. [Results] The simulation results indicate that under rated boiler load conditions, the relative standard deviation of the velocity at the outlet section of the L-shaped inlet flue decreases from 27.57% to 19.99% after optimization. The relative standard deviation of the velocity at the inlet section of the mist eliminator in the Z-shaped desulfurization tower decreases from 45.66% to 40.24%. Meanwhile, the mass flow rate of the slurry droplets at the mist eliminator inlet section drops from 441.136 kg/s to 368.498 kg/s, indicating that the optimization scheme effectively reduces the workload of the mist eliminator. Experimental results show that prior to the modification, there were regions with a velocity of 0 m/s at the mist eliminator inlet section, which are improved to a velocity of 1-5 m/s after the modification, consistent with the trends observed in the simulation. Data from 180 days of operation after the modification indicate that the pressure drop before and after the mist eliminator does not exceed 200 Pa. On-site measurement results during maintenance show that the scaling thickness on the mist eliminator plate is reduced from over 1 cm before the modification to about 0.1 cm, eliminating severe scaling and blockage phenomena. [Conclusions] The proposed flow field optimization method significantly improves the uniformity of the flue gas flow field in the desulfurization tower, reduces the workload of the mist eliminator, and effectively slows down the fouling problem of the mist eliminator, which has great engineering

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104391)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52104391).

application value.

**KEY WORDS:** coal-fired unit; desulfurization tower; boiler; mist eliminator; clogging; flow field uniformity; flue gas desulphurization; numerical simulation

## 0 引言

燃煤电厂烟气脱硫是控制  $\text{SO}_2$  排放的关键，广泛应用的湿法脱硫技术能够有效去除  $\text{SO}_2$ ，但同时也带来了新的挑战。湿法脱硫过程中烟气会夹带大量细小脱硫剂液滴，如果不进行有效处理，会严重影响后续设备的运行和效率，甚至造成环境污染。

为了满足日益严格的环保要求，并保障机组的安全稳定运行，脱硫塔后通常安装除雾器进行气水分离<sup>[1]</sup>。然而，烟气携带浆液液滴经过除雾器时，容易在其板面上结垢堵塞，导致流动阻力增加，最高可达 300~400 Pa，严重时会导致机组停机。针对此问题，很多学者提出了解决方法，如：张双平等<sup>[2]</sup>利用数值模拟的手段分析了除雾器安装高度对烟气携带浆液量的影响，研究发现，除雾器与喷淋层之间的高度以及喷淋浆液的雾化粒径对除雾器的除雾性能影响极大；禾志强等<sup>[3]</sup>研究指出，通过增加除雾器冲洗水压力，使其能更有效地冲刷掉垢体；潘超群<sup>[4]</sup>将浆液的 pH 值控制在合理范围内，成功减缓了除雾器板面上的结垢现象；马晓丽等<sup>[5]</sup>通过调整石膏浆液的 pH 值和更换新的除雾器清洗设备，解决了除雾器的堵塞问题；纪小春<sup>[6]</sup>研究指出，通过保持除雾器表面湿润，能够加强除雾器冲洗水的冲洗效果。

然而，上述研究并未考虑脱硫塔内烟气流场分布对除雾器除雾性能的影响，为此，本文基于某 670 MW 燃煤机组的脱硫塔，提出了一种新的流场优化方法，即利用导流板优化脱硫塔内的烟气速度场，消除除雾器入口截面的局部高速烟气区，以达到均匀分配除雾器工作负荷的目标，从而减缓甚至消除除雾器严重结垢堵塞的现象。

## 1 脱硫塔内流场对除雾器堵塞影响机理

### 1.1 烟气速度对喷淋浆液携带的影响

微细液滴在上升的烟气中主要受气流和重力

的作用<sup>[7]</sup>。液滴所受重力为  $\pi d^3 \rho_l g / 6$ ，烟气对液滴的作用力为  $\pi d^2 \rho_g v^2 \zeta / 8 + \pi \rho_g g d^3 / 6$ ，其中： $d$  为液滴直径， $\mu\text{m}$ ； $\rho_l$  为液滴密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $g$  为当地重力加速度， $\text{m}/\text{s}^2$ ； $\rho_g$  为饱和烟气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $v$  为气流速度， $\text{m}/\text{s}$ ； $\zeta$  为阻力系数，对于喷淋和喷雾，一般可取值 0.1。

对液滴受力应用二力平衡定理，可计算得到气流速度和液滴直径：

$$v = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_g)d}{3\rho_g\zeta}} \quad (1)$$

$$d = \frac{3\zeta\rho_g v^2}{4g(\rho_l - \rho_g)} \quad (2)$$

式(1)、(2)表明，当液滴直径  $d$  一定时，烟气速度存在临界值，若烟气速度大于该临界值，液滴会被烟气带走；反之，则液滴不会被带走。因此，烟气侧的速度直接影响除雾器的工作负荷，即液滴被烟气携带进入除雾器的数量取决于烟气速度。

### 1.2 烟气速度分布对垢体沉积的影响

目前大多数的脱硫塔均采用单侧进气，烟气进入脱硫塔后，会在塔内形成局部高速区，这部分高速烟气会携带大量液滴进入除雾器<sup>[8-11]</sup>。一方面，除雾器板面捕集的液滴会被高速烟气托住，无法及时排出，继续反应结垢<sup>[12]</sup>；另一方面，当局部烟气速度超出除雾器最大临界速度时，则会撕裂除雾器板面上形成的液膜，造成二次带水<sup>[13-14]</sup>，而烟气携带液滴穿过除雾器后，由于流通截面变大、流速变小，液滴会下坠到除雾器板片的背面形成结垢。

## 2 脱硫塔及其进口烟道的流场优化

### 2.1 脱硫塔及其进口烟道中的烟气流场分布

脱硫塔及其进口烟道的布置形式对烟气流场分布有重要的影响。该 670 MW 燃煤机组的脱硫塔从外形来看呈 Z 形，其进口烟道呈 L 形，分别如图 1、2 所示。烟气流经 L 形进口烟道时，会在其烟道中形成二次回流<sup>[15]</sup>，导致烟气在进口烟道内横向分布不均匀，因此需要在其烟道内布置导流板进行横向整流，保证进入脱硫塔之前的流场横向分布均匀。当烟气进入脱硫塔后，也会在脱

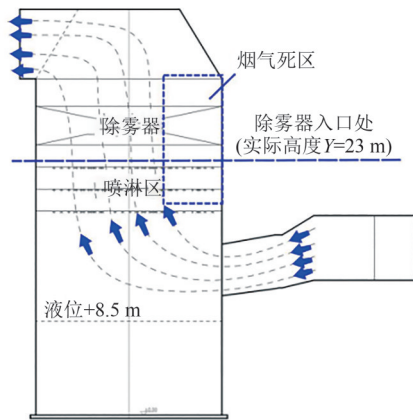


图1 Z形脱硫塔的纵断面流场分布图

Fig. 1 Profile flow field distribution of Z-shaped desulfurization tower

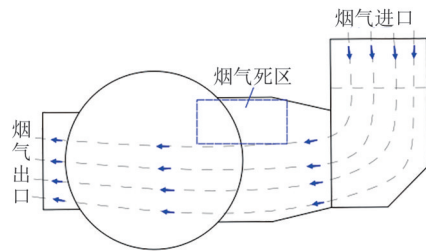


图2 L形进口烟道的横断面流场分布图

Fig. 2 Cross section flow field distribution of L-shaped inlet flue

硫塔内沿塔高方向出现局部高速区，导致在塔内纵向分布不均匀<sup>[16]</sup>，因此需要在脱硫塔内布置导流板进行纵向整流，保证除雾器入口处的流场均匀。

### 2.2 烟气流场优化方案

本文中对L形进口烟道、Z形脱硫塔设计了导流板优化方案，分别如图3、4所示，导流板定形、定位参数如表1所示。

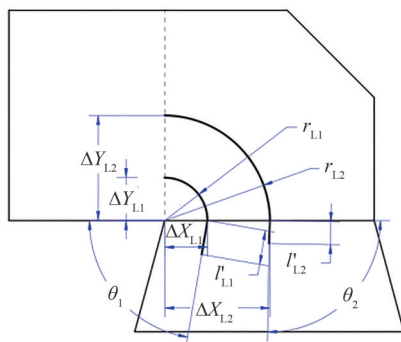


图3 L形进口烟道导流板优化方案

Fig. 3 Optimization scheme of L-shaped inlet flue guide plate

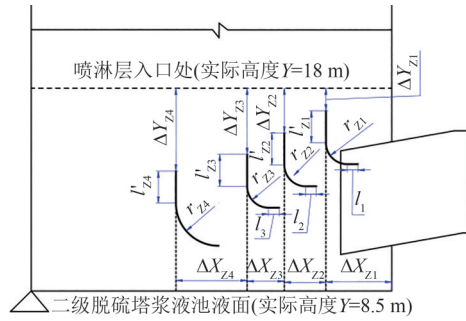


图4 Z形脱硫塔内导流板优化方案

Fig. 4 Optimization scheme of guide plate in Z-shaped desulfurization tower

表1 导流板定形、定位尺寸

Tab. 1 Shaping and positioning dimensions of guide plate

三维模型	横向定位 尺寸/m	纵向定位 尺寸/m	横向定形 尺寸/m	纵向定形 尺寸/m	半径/m	角度定位 尺寸/(°)
L形 进口烟道	$\Delta X_{L1}=1.8$ $\Delta X_{L2}=4.6$	$\Delta Y_{L1}=1.8$ $\Delta Y_{L2}=4.6$	—	$l'_{L1}=1.5$ $l'_{L2}=1.0$	$r_{L1}=1.8$ $r_{L2}=4.6$	$\theta_1=80^\circ$ $\theta_2=92^\circ$
Z形 脱硫塔	$\Delta X_{Z1}=3.0$ $\Delta X_{Z2}=1.9$ $\Delta X_{Z3}=1.7$ $\Delta X_{Z4}=3.3$	$\Delta Y_{Z1}=1.0$ $\Delta Y_{Z2}=2.0$ $\Delta Y_{Z3}=3.0$ $\Delta Y_{Z4}=3.8$	$l_1=0.5$ $l_2=0.5$ $l_3=0.5$	$l'_{Z1}=1.5$ $l'_{Z2}=1.5$ $l'_{Z3}=1.5$ $l'_{Z4}=1.5$	$r_{Z1}=1.0$ $r_{Z2}=1.0$ $r_{Z3}=1.0$ $r_{Z4}=2.0$	—

## 3 烟气流场数值模拟

### 3.1 计算模型及边界条件

#### 3.1.1 计算模型

为了保证数值模拟的准确性，按照该电厂脱硫系统的设计图纸1:1构建几何模型。采用工程上广泛使用的 Realizable  $k-\epsilon$  模型<sup>[17-19]</sup>作为湍流模型，计算烟气在脱硫塔以及进口烟道中的流动。采用离散相模型(discrete phase model, DPM)计算脱硫塔内的浆液液滴与烟气之间的相互耦合，采用适应性强的 Scalable wall functions<sup>[20-22]</sup>作为壁面函数。

#### 3.1.2 网格划分及边界条件

当脱硫塔的喷淋层不工作时，喷淋管道自身结构不会影响烟气速度场的整体分布<sup>[23-24]</sup>，因此脱硫塔模型内部仅包括导流板。网格无关性验证如图5所示，当网格数量达到百万级时，Z形脱硫塔及L形进口烟道的进出口总压差不再变化，此时能够满足网格无关性解。

模型的入口边界条件为速度入口，出口边界条件为 Outflow。具体的烟气参数如下：烟速为 15 m/s，烟气密度为 0.874 kg/m<sup>3</sup>，动力黏度为

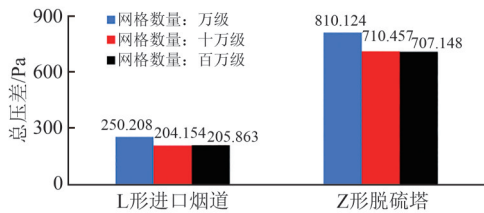


图5 进出口总压差随网格数量的变化

Fig. 5 Change of total pressure difference between inlet and outlet with the number of grids

$2.249 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 定压比热容为  $1.083 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。脱硫塔内布置有3层喷淋管道, 每层管道的喷嘴数量为84只, 每只喷嘴的流量为  $14.38 \text{ kg/s}$ , 液滴的颗粒密度为  $1140 \text{ kg/m}^3$ , 喷嘴角度为  $90^\circ$ , 液滴粒径分布采用 Rosin-Rammler 分布函数<sup>[25]</sup>。

### 3.2 模拟结果与分析

#### 3.2.1 流场分布

图6、7分别为导流板优化前后L形进口烟道  $Y=16 \text{ m}$  截面和出口截面上的速度分布云图。可以看出, 导流板优化前, L形进口烟道内侧存在明显的回流区, 并且出口附近的横向速度分布不均匀; 导流板优化后, 烟气在拐弯处的回流区明显减小, 且出口附近的横向速度分布均匀性得到显

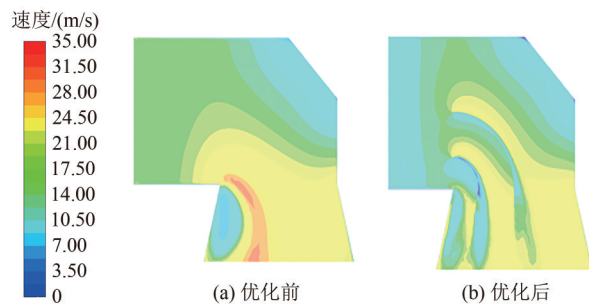
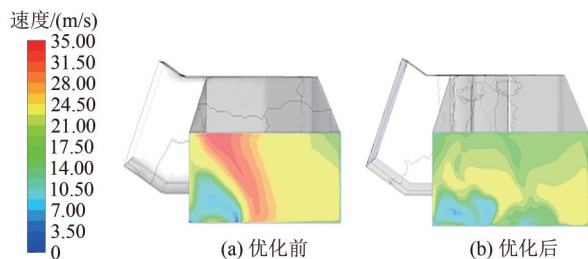
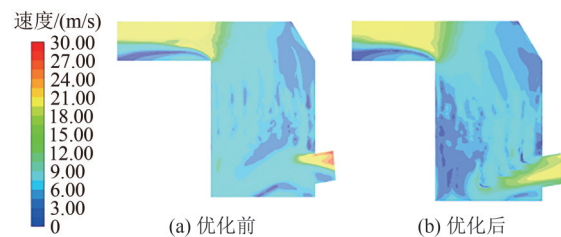
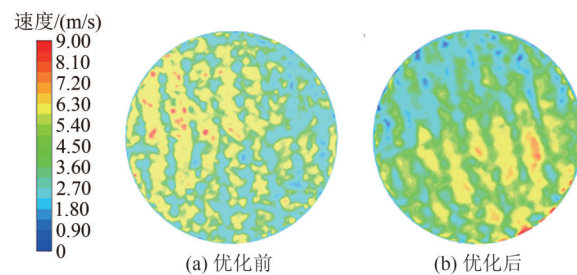
图6 L形进口烟道  $Y=16 \text{ m}$  截面上的速度云图Fig. 6 Velocity map on cross section of L-shaped inlet flue at  $Y=16 \text{ m}$ 

图7 L形进口烟道出口截面上的速度云图

Fig. 7 Velocity map on exit cross section of L-shaped inlet flue

著改善。

导流板优化前后Z形脱硫塔  $Z=0 \text{ m}$  和  $Y=23 \text{ m}$  截面上的速度分布云图分别如图8、9所示。可以看出, 导流板优化前, 脱硫塔内部的流场纵向分布不均匀, 在这样的流场分布条件下, 脱硫塔内除雾器的局部工作负荷过大, 超出了除雾器设计所能够接受的最高限定值, 导致除雾器板面上出现结垢堵塞的现象; 导流板优化后, 脱硫塔出口侧附近的局部高速区开始向塔中心移动, 这样的流场分布更有利于烟气的扩散及其与液滴之间的接触混合。

图8 Z形脱硫塔  $Z=0 \text{ m}$  截面上的速度云图Fig. 8 Velocity map on cross section of Z-shaped desulfurization tower at  $Z=0 \text{ m}$ 图9 Z形脱硫塔  $Y=23 \text{ m}$  截面上的速度云图Fig. 9 Velocity map on cross section of Z-shaped desulfurization tower at  $Y=23 \text{ m}$ 

#### 3.2.2 流场均匀性

脱硫塔内烟气侧流场的均匀性采用速度相对标准差来表征<sup>[26-27]</sup>, 其值越小, 说明速度场分布越均匀。L形进口烟道出口截面和Z形脱硫塔内除雾器入口截面的速度相对标准差如图10所示, 可以看出, 导流板整流后, L形进口烟道的出口截面和Z形脱硫塔内除雾器入口截面的流场均匀性得到了明显改善, 其中L形进口烟道出口截面的速度相对标准差从27.57%降至19.99%, Z形脱硫塔内除雾器入口截面的速度相对标准差从45.66%降至40.24%。

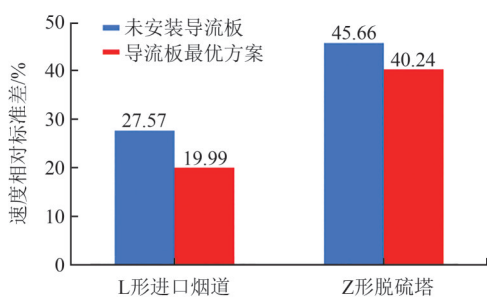


图 10 L形进口烟道出口截面和Z形脱硫塔内除雾器入口截面的速度相对标准差

Fig. 10 Relative standard deviation of velocity of exit section of L-shaped inlet flue and entrance section of mist eliminator in Z-shaped desulphurization tower

### 3.2.3 除雾器入口处的液滴质量流量

导致除雾器严重局部结垢甚至堵塞的原因主要是进入除雾器时烟气携带的浆液液滴过多。优化前后除雾器入口截面的浆液液滴质量流量如图 11 所示，可以看出，导流板优化后，除雾器入口截面的浆液液滴质量流量从原来的 441.136 kg/s 下降至 368.498 kg/s，说明导流板能够明显地减少除雾器的工作负荷，大大降低其严重结垢堵塞的可能性。

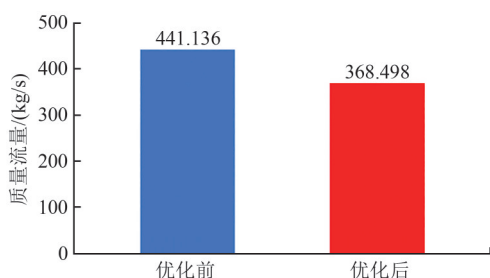


图 11 优化前后除雾器入口截面的浆液液滴质量流量

Fig. 11 Mass flow rate of slurry droplets at inlet section of mist eliminator before and after optimization

## 4 工程实施与改造效果

### 4.1 改造对象及除雾器结垢情况

以该 670 MW 燃煤电厂的 3 号脱硫塔作为改造对象，该脱硫塔采用典型的 Z 形进出口布置，其进口烟道采用 L 形布置，平板式除雾器布置在脱硫塔的上方，烟气与吸收浆液采用逆流接触方式。改造前，该脱硫塔已经在额定负荷下运行了半年时间，其主要问题是：Z 形脱硫塔内靠近出口附近的除雾器区域结垢严重，这与上述数值模拟得

出的局部高速区位置基本吻合；此外，除雾器的迎风面结垢明显少于背风面，通过超声波测厚仪测得结垢厚度达到 1 cm 以上，除雾器冲洗水无法完全冲洗干净。

### 4.2 改造前后冷态实验

为了验证基于导流板优化塔内烟气流场的效果，分别于导流板安装前后在脱硫塔内进行冷态实验。具体步骤如下：在该脱硫塔的除雾器入口截面处(Y=23 m)设立若干个测点，当机组在额定工况下运行时，维持该负荷的风量不变，采用电子微压计测量并记录各点沿脱硫塔轴向的烟气速度。改造前后 Z 形脱硫塔除雾器入口截面烟气速度分布如图 12 所示，可以看出，改造前脱硫塔除雾器入口截面有的区域速度为 0 m/s，改造后该区域速度提升至 1~5 m/s。由此可见，实验结果与数值模拟计算得出的改造前后速度分布趋势基本一致，进一步说明了数值模拟结果的正确性和导流板的优化效果。

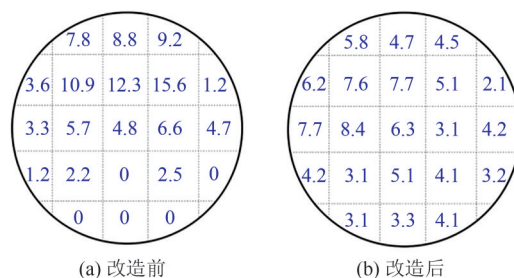


图 12 改造前后 Z 形脱硫塔除雾器入口截面烟气速度分布

Fig. 12 Flue gas velocity distribution at inlet cross section of mist eliminator of Z-shaped desulfurization tower before and after modification

### 4.3 实际工程改造效果

在进行脱硫塔改造时，对塔内除雾器板面上的垢体进行了彻底清洗。改造完成后，同样记录了在额定负荷下该脱硫塔 180 天的运行数据，结果发现，塔内除雾器前后压差不再超过 200 Pa。在改造后的某一次停机维护中，测量得到除雾器板面上的结垢厚度从改造前的 1 cm 以上减小至 0.1 cm 左右，局部严重结垢堵塞的现象已完全消除，说明将本文优化方法应用于减缓除雾器结垢堵塞的效果显著。改造前后除雾器板面上的积垢情况如图 13 所示。

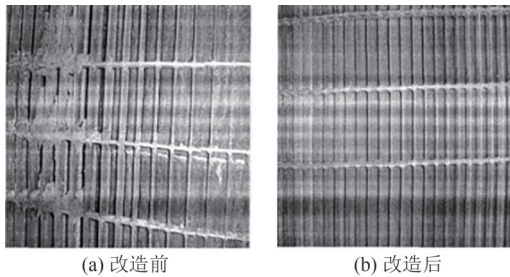


图13 改造前后除雾器板面上的积垢情况

Fig. 13 Scale accumulation on mist eliminator plate before and after modification

## 5 结论

提出了一种利用导流板减缓脱硫塔除雾器堵塞的流场优化方法,对优化前后Z形脱硫塔及其L形进口烟道烟气流场进行了数值模拟分析,并将该方法应用于实际工程改造,得到以下结论:

1) 在进口烟道和脱硫塔内合理布置导流板,可以显著消除脱硫塔内除雾器入口截面的烟气高速区。经过导流板优化后,L形进口烟道出口截面和Z形脱硫塔内除雾器入口截面的速度相对标准差均下降,除雾器入口截面的速度场明显比改造前更均匀。

2) 基于导流板的流场优化方法能够明显减少冲击除雾器板面的液滴数量,大幅降低除雾器结垢程度,从而保证脱硫塔的安全稳定运行。

## 参考文献

[1] 夏忠林, 陈文通, 许书娟, 等. 火电厂烟塔合一技术应用现状与现存问题分析[J]. 发电技术, 2024, 45(4): 590-599.  
XIA Z L, CHEN W T, XU S Q, et al. Application status and existing problem analysis of the natural draft cooling towers with flue gas injection technology in thermal power plants[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 590-599.

[2] 张双平, 陈伟雄, 贾西部, 等. 脱硫塔除雾器安装高度对烟气携液量影响的模拟研究[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 247-253.  
ZHANG S P, CHEN W X, JIA X B, et al. Simulation study on influence of installation height of mist eliminator on liquid holdup of flue gas in desulfurization tower[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 247-253.

[3] 禾志强, 祁利明, 马青树. 石灰石-石膏法脱硫系统除雾器堵塞研究[J]. 锅炉技术, 2010, 41(1): 77-80.  
HE Z Q, QI L M, MA Q S. The study of demister blocking in limestone-gypsum desulfurization technology[J]. Boiler Technology, 2010, 41(1): 77-80.

[4] 潘超群. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫除雾器堵塞分析与对策[J]. 能源环境保护, 2015, 29(4): 30-31.  
PAN C Q. Analysis and countermeasures of clogging in limestone-gypsum wet flue gas desulfurization mist eliminator[J]. Energy Environmental Protection, 2015, 29(4): 30-31.

[5] 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(2): 35-36.  
MA X L, ZHANG X P. Analysis of causes of mist eliminators blockage in wet FGD systems without GGH and its countermeasures[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2012, 28(2): 35-36.

[6] 纪小春. 折流板式除雾器的结垢与控制措施[J]. 黑龙江电力, 2012, 34(2): 131-134.  
JI X C. Scaling and its control measure of chevron mist eliminator[J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 34(2): 131-134.

[7] 郭东明. 脱硫工程技术与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 165-170.  
GUO D M. Desulfurization engineering technology and equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019: 165-170.

[8] 林瑜, 陈德珍, 尹丽洁. 喷淋层组合方式对大型脱硫塔内流动和热湿交换过程影响的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2572-2582.  
LIN Y, CHEN D Z, YIN L J. Numerical simulation of impact of spraying layers scheme on gas-liquid two phases flow, heat and mass transfer in large scale desulphurization absorption tower[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2572-2582.

[9] 王霄, 闵健, 高正明, 等. 脱硫吸收塔除雾器性能的实验研究和数值模拟[J]. 环境工程学报, 2008, 2(11): 1529-1534.  
WANG X, MIN J, GAO Z M, et al. Experimental study and numerical simulation of characteristics of demister of absorbing tower in desulfurization system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(11): 1529-1534.

[10] 尤良洲, 杜振, 江建平, 等. 管束式除尘除雾器在脱

- 硫串塔系统中的应用及性能评价[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 173-177.
- YOU L Z, DU Z, JIANG J P, et al. The application and performance evaluation of bundle precipitator in series absorpti tower of desulfurization system[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 173-177.
- [11] 邱桂芝, 张志刚, 宋寅, 等. 管束式除雾器结构优化数值模拟及高效除雾器研制[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 134-140.
- QIU G Z, ZHANG Z G, SONG Y. Numerical simulation on tube bundle demister and development of high efficiency demister[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 134-140.
- [12] 李文鼎, 高惠华, 蔡文丰. 石灰石-石膏湿法脱硫吸收塔结垢分析及预防措施[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 51-55.
- LI W D, GAO H H, CAI W F. Scaling analysis and preventive measures of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 51-55.
- [13] AZZOPARDI J B, SANAUULLAH S K. Re-entrainment in wave-plate mist eliminators[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(17): 3557-3563.
- [14] MAO F, TIAN R F, CHEN Y X, et al. Re-entrainment in and optimization of a vane mist eliminator[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 120(11): 656-665.
- [15] 张维蔚, 吕凡, 庄晓凤, 等. 弯管二次流及电厂锅炉均流技术的研究进展[J]. 热能动力工程, 2014, 29(6): 603-609.
- ZHANG W W, LV F, ZHUANG X F, et al. Research progress of secondary flow in bent pipe and flow sharing technology in power plant boiler[J]. Thermal Power Engineering, 2014, 29(6): 603-609.
- [16] 田森浩, 向勇林, 陈冬林, 等. 内置导流板的湿法脱硫塔数值模拟优化及应用[J]. 动力工程学报, 2021, 41(9): 766-772.
- TIAN S H, XIANG Y L, CHEN D L, et al. Numerical simulation optimization and application of wet desulfurization tower with inner guide plate[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(9): 766-772.
- [17] 陈慧敏, 李香龙, 刘秀兰, 等. 大功率充电连接器相变冷却换热特性研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 201-207.
- CHEN H M, LI X L, LIU X L, et al. Study of phase change cooling heat transfer characteristics of high power charging connectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 201-207.
- [18] 李子新, 王硕, 赵隆, 等. 多参数影响的导线热稳监测及动态增容研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 100-106.
- LI Z X, WANG S, ZHAO L, et al. Thermal stability monitoring of conductor and dynamic line rating considering effects of multiple parameters[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 100-106.
- [19] 张育平, 刘俊, 王洋浩, 等. 中深层U型对接井取热能力影响因素显著性分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(11): 1473-1480.
- ZHANG Y P, LIU J, WANG F H, et al. Significance analysis on the influence factors of thermal extraction capacity of medium-deep U-shaped butted well[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(11): 1473-1480.
- [20] 郭胜江, 吴广庆, 陈国邦. 适用于回流区流体力学模拟计算的三种高雷诺数湍流模型比较[J]. 制冷学报, 2005, 26(3): 26-29.
- GUO S J, WU G Q, CHEN G B. Comparison of three high-reynolds-number models in recirculation zones for simulation of computational fluid dynamics[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(3): 26-29.
- [21] 张井龙, 王尊策, 徐艳. 壁面处理对壁面旋转旋流器流动模拟的影响分析[J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(10): 142-146.
- ZHANG J L, WANG Z C, XU Y. Analysis of effect of near-wall treatments on numerical computation of rotating hydrocyclone[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2022, 52(10): 142-146.
- [22] 王新光, 毛枚良, 何琨, 等. 壁面函数在超声速湍流模拟中的应用[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 290-298.
- WANG X G, MAO M L, HE K, et al. Application of wall function to supersonic turbulence simulation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 290-298.
- [23] 张涛, 朱晓军, 彭飞, 等. 近壁面处理对湍流数值计算的影响分析[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(6): 104-108.
- ZHANG T, ZHU X J, PENG F, et al. Analysis of effect of near-wall treatments on numerical computation of turbulent flow[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 25(6): 104-108.
- [24] 杨丁. 湿法烟气脱硫吸收塔阻力特性实验研究[J]. 中

国环保产业, 2018(5): 31-36.

YANG D. Experimental study on absorber resistance characteristic of WFGD[J]. China Environmental Protection Industry, 2018(5): 31-36.

- [25] 刘文斌, 李璐璐, 李晓金, 等. 脱硫湿烟气喷淋冷凝过程中的参数优化研究[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 107-114.

LIU W B, LI L L, LI X J, et al. Study on parameter optimization of desulfurized wet flue gas in spray condensation process[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 107-114.

- [26] 蒋惠梦, 谷小兵, 余苏玲, 等. 湿法烟气脱硫喷淋塔的阻力特性研究[J]. 环境保护科学, 2017, 43(3): 85-90.

JIANG H M, GU X B, YU S L, et al. Research of resistance characteristics of wet flue gas desulfurization spraying scrubber[J]. Environmental Protection Science, 2017, 43(3): 85-90.

- [27] 冉景煜, 邓庆波, 牛俊天, 等. 湿法脱硫塔内流场均匀性影响因素及其评价方法[J]. 动力工程学报, 2020, 40(10): 825-831.

RAN J Y, DENG Q B, NIU J T, et al. Influence factors and evaluation method on the uniformity of flow field in a WFGD tower[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(10): 825-831.

收稿日期: 2024-06-20。

修回日期: 2024-09-25。

作者简介:



刘卓

刘卓(1997), 男, 硕士研究生, 主要从事高效清洁燃烧技术与污染物排放控制研究, 1173402777@qq.com;



陈冬林

陈冬林(1963), 男, 博士, 教授, 主要从事高效低污染燃烧技术与热力设备及系统性能优化研究, 本文通信作者, chendl\_01@126.com;



汪淑奇

汪淑奇(1966), 男, 博士, 副教授, 主要从事锅炉燃烧与传热、烟风道优化改造的理论与技术开发、应用研究, cswangsq@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)