# 烧结烟气SDA半干法脱硫工艺喷粉试验研究

陈 光[1]，侯嘉琪[1]，包向军[1]，程 灿[2]，王 浩[3]，张燕飞[1]，周 杰[1]
（1. 安徽工业大学 能源与环境学院，安徽 马鞍山 243002；2. 安徽欣创节能环保科技有限公司，安徽 马鞍山 243003；3. 中国十七冶集团有限公司，安徽 马鞍山 243000）

**摘要**：为了提高SDA半干法系统的脱硫效率，本文搭建SDA喷粉脱硫试验系统，开展喷粉对系统脱硫效率影响规律的半工业试验研究。试验结果表明：喷粉位置对脱硫效率的影响显著，随着喷粉位置的下降，脱硫效率逐渐降低，喷粉最佳位置位于塔的上部区域，脱硫效率可以达到75.90%，较未喷粉前增加19.10%；随着喷粉量的增加，脱硫效率随之增加，脱硫效率由57.90%升高至87.20%，但喷粉量过高时，脱硫灰有效利用率相较之前有所下降，脱硫效率趋于平缓；合适的增湿水量能有效提升脱硫灰的利用效率，对于不同脱硫灰的喷加量，应进行合适的增湿水配比，从而实现最佳的脱硫效率。

**关键词**：烧结烟气；SDA脱硫工艺；喷粉
**中图分类号**：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0103－07
**doi**：10.13403/j.sjqt.2023.04.061

# Research on powder spraying test of sintering flue gas SDA semi-dry desulfurization process

CHEN Guang[1], HOU Jiaqi[1], BAO Xiangjun[1], CHENG Can[2], WANG Hao[3], ZHANG Yanfei[1], ZHOU Jie[1]
(1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China; 2. Anhui Xinchuang Energy Saving And Environmental Protection Science Technology Co., Ltd., Ma'anshan 243003, Anhui, China; 3. China MCC17 Group Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China)

**Abstract**: In order to improve the desulfurization efficiency of the SDA semi-dry system, the SDA-powder spraying desulfurization test system is built, and semi-industrial experimental research on the influence of powder spraying on the desulfurization efficiency of the system is launched. The results show that the influence of powder spraying position on the desulfurization efficiency is significant, with the decrease of powder spraying position, the desulfurization efficiency gradually decreases, and the best position of powder spraying is located in the upper area of the tower, and the desulfurization efficiency can reach 75.90%, which is 19.10% higher than before powder spraying. With the increase of powder spraying, the desulfurization efficiency increases, and the desulfurization efficiency increases from 57.90% to 87.20%, but when the powder spraying amount is too high, the effective utilization rate of desulfurization ash decreases compared with before, and the desulfurization efficiency tends to be flattened. The appropriate amount of humidification water can effectively improve the utilization efficiency of desulfurization ash, and for the spraying amount of different desulfurization ash, the appropriate humidification water ratio should be carried out to achieve the best desulfurization efficiency.

**Key words**: sintering flue gas; SDA desulfurization process; dusting

**收稿日期**：2022－04－19；**修回日期**：2022－06－07
**基金项目**：安徽省重点研究和开发计划资助项目(201904a07020018)
**作者简介**：陈 光(1963—)，男，博士，教授，从事冶金过程节能环保方面的研究工作。
**通信作者**：包向军(1973—)，男，副教授，从事冶金过程节能环保方面的研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

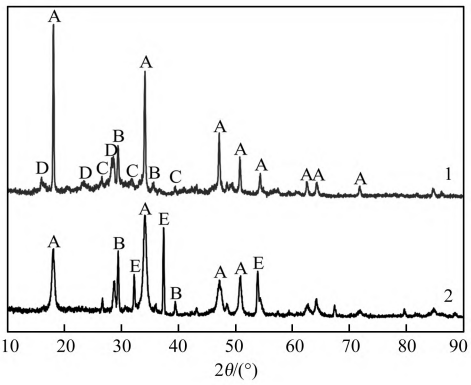
2019年以来，随着国家环保政策日趋严格，各超低排放改造的重点区域省份先后出台改造方案，钢铁行业 $SO_2$ 排放限值从原来的 100 mg/m$^3$ 降低到 35 mg/m$^3$。旋转喷雾干燥脱硫技术(SDA)是目前较为成熟的半干法烟气脱硫技术，其因投资小、运行维护成本低、设备简易等优点被广泛用于烧结烟气的脱硫。但 SDA 系统脱硫效率约为85%[1]，已经不能满足钢铁行业超低排放的标准，现有的 SDA 系统面临着淘汰更换的风险。国内外专家学者对半干法脱硫技术已进行了大量的研究，主要涉及脱硫剂、塔内 $n(Ca)/n(S)$(物质的量之比)、脱硫反应模型、脱硫塔结构模型、脱硫效率影响因素等方面，但针对 SDA 工艺的相关研究较少。在实际工程应用中，钢铁厂主要通过优化运行工况和系统管理来提高脱硫效率，但该手段提高效率有限，且优化后依旧无法满足日益严格的排放标准[2-4]。此外，国内外专家学者还研究了塔内 $n(Ca)/n(S)$、脱硫剂消化[5-7]和脱硫塔结构模拟优化[8-11]对脱硫效率的影响，这些研究结果为学术和工程应用打下了基础，但相关的试验研究较少，无法为模拟优化结果和实际工业改造提供可靠支撑。

目前，国内外对于 SDA 喷浆喷粉协同优化的试验研究尚未见报道。本文采用 SDA 喷粉脱硫新工艺搭建一套半工业试验系统，将传统的旋转喷雾与脱硫灰喷粉循环脱硫工艺相结合，向塔内合适位置喷循环脱硫灰，增加脱硫剂的循环倍率，将该部分有效成分充分利用，优化脱硫塔内颗粒质量浓度分布，增加烟气与脱硫剂的混合程度。本文研究成果可为实际工程改造提供坚强有力的支撑，具备重要的现实意义。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 材料与试剂

试验烟气为某钢铁厂现场产出的工业烧结烟气，试验脱硫剂浆液 $n(Ca)/n(S)$ 为 1.8，由工业生石灰和水按配比在浆液罐中消化制成，试验脱硫灰取自现场 SDA 工艺所产生的脱硫灰。对现场脱硫灰的成分进行了 XRD 测试分析，测试结果如图 1 所示。由图 1 可以看出：生石灰样品的物相成分主要是 CaO、$Ca(OH)_2$ 和 $CaCO_3$；脱硫灰样品相较于生石灰，几乎没有 CaO，但$Ca(OH)_2$质量分数增加，且增加了 $CaSO_4$ 与 $CaSO_3$ 成分。这说明在脱硫反应过程中，$Ca(OH)_2$并未得到完全利用，脱硫灰中仍含有大量有效脱硫成分。




1—脱硫灰；2—CaO；A—$Ca(OH)_2$；B—$CaCO_3$；C—$CaSO_4$；D—$CaSO_3$；E—CaO。

**图 1 脱硫灰样品 XRD 分析**

**Fig. 1 XRD test chart of desulfurized ash sample**

对现场脱硫灰进行化学分析，结果如表 1 所示。由表 1 可知：脱硫灰中 $Ca(OH)_2$ 质量分数约为 23%。在 SDA 脱硫反应过程中，烟气中 $SO_2$ 首先在浆液表面发生反应，生成粉状的亚硫酸钙和二水硫酸钙包裹在 $Ca(OH)_2$ 表面，从而增加了烟气从雾滴表面到中心的传质、扩散阻力，延长了反应时间，从而导致浆液中部分 $Ca(OH)_2$ 未进行反应。除此之外，脱硫塔内烟气与浆液混合不好，颗粒质量浓度分布不均匀，同样会造成脱硫剂利用不充分的问题。因此，脱硫灰的循环利用，增加了新的循环路径，强化了混合，对降低运行成本，提高脱硫效率具有重要意义。

**表 1 脱硫灰成分分析(质量分数)**

**Table 1 Desulfurization ash composition analysis %**

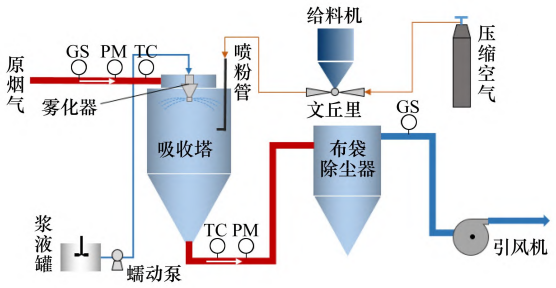
| $CaCO_3$ | $CaSO_3$ | $CaSO_4\cdot 2H_2O$ | $Ca(OH)_2$ | 其他 |
|---|---|---|---|---|
| 18.59 | 20.52 | 25.11 | 22.86 | 12.92 |

### 1.2 试验系统与分析仪器

试验系统仿照 SDA 脱硫工艺流程搭建，主要由烧结烟气系统、反应吸收塔、除尘系统、浆液供给系统、测量及控制系统、脱硫灰喷粉系统组成。试验系统工艺流图如图 2 所示。

试验烟气使用工业烧结烟气，从现场脱硫工

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net




TC—热电偶；PM—压力测量；GS—烟气测量。

**图 2　脱硫试验工艺流程**

**Fig. 2　Process flow chart of desulfurization test**

艺主要入口烟气管道引出，由试验系统末端的引风机驱动烟气流动，烟气流量通过管路设置的阀门进行调节。生石灰和水按一定配比在浆液罐中消化制浆，搅拌均匀后通过蠕动泵定量输送至旋转雾化器，雾化成 50 ~ 150 μm 的液滴。原烟气通过烟气管路从反应器顶部的环形蜗壳流道旋转进入反应器内，与脱硫剂液滴发生混合反应，烟气中 $SO_2$ 被净化吸收，含尘烟气通过布袋除尘器去除粉尘后排放。脱硫灰通过螺旋给料机定量供给，通过反应器顶部的喷粉管路喷入塔内，实现脱硫灰中有效成分的再次利用。为了防止烟温的过度散失，试验系统的烟气管路、关键设备均设有保温层。系统中，烟气测量使用 Fodisch MCA10 高温红外烟气分析仪，分析仪取样枪与检测室可自动加热恒温至 185 ℃，避免了水分对 $SO_2$ 测量的干扰，该装置可实时在线测量 NO、$NO_2$、$NO_x$、$N_2O$、CO、$CO_2$、$SO_2$、HCl、HF 和 $O_2$ 的质量浓度，并且测量数据通过电脑收集后处理。

### 1.3　试验方法

试验以脱硫塔顶部为起点分别选取了距离塔顶部 90、290、490、690、890 mm 5 个喷粉点进行探究，分别记为 *A*、*B*、*C*、*D*、*E* 点。试验研究喷粉位置、喷粉量以及增湿水对脱硫效率的影响。试验中，浆液中的 $n(Ca)/n(S)$ 为 1.8，脱硫灰 $n(Ca)/n(S)$ 为脱硫灰中 $Ca(OH)_2$ 与脱除的 $SO_2$ 之间的物质的量比，通过测量系统进口与出口的 $SO_2$ 计算得到脱硫率。喷粉位置如图 3 所示。

#### 1.3.1　喷粉位置对脱硫效率影响试验

在只喷脱硫灰脱硫和喷粉喷浆协同脱硫的两个试验条件下研究喷粉位置对脱硫效率影响。试验中，脱硫灰分别从 *A*、*B*、*C*、*D*、*E* 点 5 个喷粉点由文丘里粉泵喷入塔内，所喷加脱硫灰（即喷粉）的消耗量均为 2.71 kg/h。

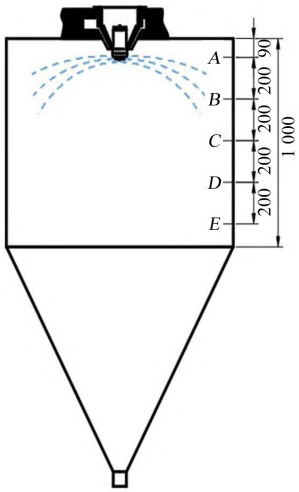



**图 3　脱硫灰喷加位置**

**Fig. 3　Desulfurization ash injection location　mm**

喷粉喷浆协同脱硫试验中，首先将消化好的脱硫剂浆液通过雾化器喷入脱硫塔内，待脱硫效率稳定后再开启喷粉系统。试验所使用的浆液 $n(Ca)/n(S)$ 为 1.8，入口烟气温度为 150 ℃，出口烟气温度控制为 80 ~ 90 ℃。

#### 1.3.2　喷粉量对脱硫效率影响试验

考虑到 *A* 点可能会造成雾化轮磨损，所以喷粉点选取为 *B* 点，即距塔顶 290 mm 位置。在只喷脱硫灰脱硫和喷粉喷浆协同脱硫的两个试验条件下研究喷粉量对脱硫效率影响。脱硫灰的喷加量通过调节螺旋给料机转速来控制，不同转速情况所对应的供粉量如表 2 所示。

**表 2　给料机供料参数**

**Table 2　Feeding parameters of the feeder**

| 调速器挡位/% | 电机转速/（$r\cdot min^{-1}$） | 供粉量/（$kg\cdot h^{-1}$） | 脱硫灰 $n(Ca)/n(S)$ |
|---|---|---|---|
| 10 | 46.7 | 1.45 | 2.1 |
| 20 | 93.4 | 2.71 | 3.9 |
| 30 | 140.1 | 4.46 | 6.5 |
| 40 | 186.8 | 5.83 | 8.5 |
| 50 | 233.5 | 8.26 | 12.1 |

#### 1.3.3　增湿水对脱硫效率影响试验

试验中，脱硫剂仅使用脱硫灰，由喷粉点 *B* 喷入脱硫塔内，喷量为 2.71 kg/h。系统总进水量为 3 L/h，采用雾化器喷加，将这一部分水称为雾

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

化水。在保证系统总进水量不变的情况下，将一部分雾化水通过喷粉管出口位置设置的雾化喷头喷加进塔内，用于对脱硫灰进行增湿活化，将该部分水称之为增湿水。试验在只喷脱硫灰、只喷加雾化水、增湿水量分别为0.8、1.6、2.4 L/h 5种试验条件下，研究增湿水对系统脱硫效率的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 喷粉位置对脱硫效率影响

在只喷脱硫灰的试验条件下，对不同喷粉位置脱硫效率进行试验测试，试验结果如图4所示。

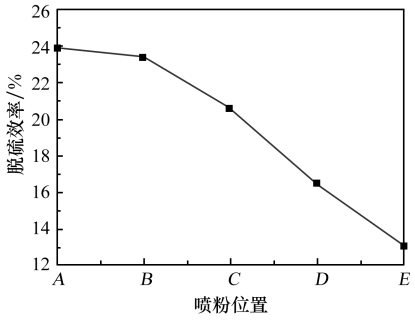


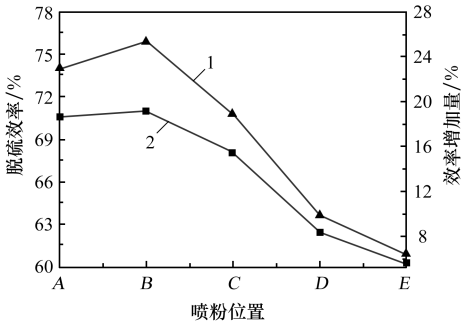

**图4 喷粉位置对脱硫效率的影响(只喷粉)**

**Fig. 4 Influence of powder spraying position on desulfurization efficiency (powder spraying only)**

在系统只喷脱硫灰的试验条件下，随着喷粉位置的逐渐降低，系统脱硫效率不断减小，由23.90%逐渐降低至13.10%。其主要原因在于，随着喷粉位置的下移，喷粉管越接近脱硫塔出口，颗粒在塔内运动路径越短，烟气与脱硫灰颗粒在塔内混合、反应的时间短，从而造成脱硫效率的降低。其中在*A*、*B*区域喷粉时(距离塔顶90、290 mm)，系统脱硫效率较大，分别可达23.9%和23.4%。主要反应式：$Ca(OH)_2 + SO_2 \rightarrow CaSO_3 \cdot 1/2H_2O + 1/2H_2O$。

在上述试验的基础上，对喷粉和雾化器喷浆同时脱硫进行测试试验。试验结果如图5所示。

在浆液$n(Ca)/n(S)$为1.8，不喷脱硫灰时，系统的脱硫效率基本稳定在54.00%~57.00%。在喷脱硫灰后，系统各喷粉位置的脱硫效率均有所提高，且在脱硫塔上部位置提升明显，当喷粉位置位于*A*、*B*点时，脱硫效率相较于没有喷加脱




1—脱硫效率；2—效率增加量。

**图5 位置对脱硫效率的影响(加浆液)**

**Fig. 5 Influence of powder spraying position on desulfurization efficiency (adding slurry)**

硫灰前，系统脱硫效率分别增加了18.60%和19.10%。由相对效率增长变化曲线可以看出，在旋转喷雾条件下，喷粉位置对脱硫效率的影响规律与单独喷粉时规律类似，脱硫塔内烟气与脱硫灰的混合、反应时间仍是影响反应效率的主要因素，其次还受到浆液中水分质量分数的影响。在旋转喷雾条件下，脱硫灰颗粒在塔内与烟气和脱硫剂浆液发生接触混合。由于浆液中水分的存在，其为脱硫灰和$SO_2$的反应提供了良好的介质条件，且脱硫灰的加入可增加塔内真实$n(Ca)/n(S)$，液膜内$Ca^{2+}$浓度也随之增大，有效地强化了$SO_2$由气相向液相的传质过程，故使得脱硫效率得以提升。在脱硫塔内，由于喷雾粒径很小，浆液与烟气进行快速的热量交换，水分蒸发速率很快，随着喷粉位置的下移，浆液能为脱硫灰所提供的水分质量分数也就越少，化学反应速率越慢，所需反应时间延长，从而进一步影响系统的脱硫效率。

综上所述，在试验系统中，脱硫效率随喷粉位置的下降而降低，当喷粉位置固定于*A*点(距塔顶90 mm)和*B*点(距塔顶290 mm)时，均可获得较高的脱硫效率。考虑到*A*点与雾化器位置高度一致，喷粉有可能对雾化轮造成磨损的问题，因此，在其下方*B*点喷粉最为合适。

### 2.2 喷粉量对脱硫效率的影响

首先，对只喷加脱硫灰的条件进行试验测试，喷粉点选取为*B*点，即距塔顶290 mm位置。试验结果如图6所示。

随着喷粉量的增加，系统的脱硫效率提升明

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

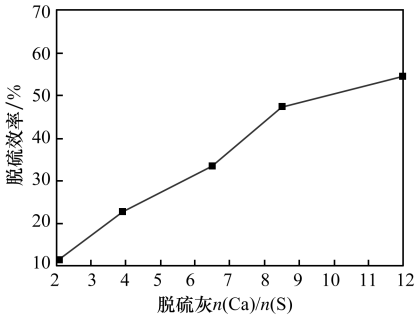



**图 6　喷粉量对脱硫效率的影响(只喷粉)**

**Fig. 6　Influence of dusting amount on desulfurization efficiency(powder spraying only)**

显，系统脱硫效率由 11.50% 逐渐增加到 54.60%。其原因在于，随着喷粉量的增加，使参与反应的有效成分增加，脱硫灰 $n(Ca)/n(S)$ 得到提高，进而提高了系统的脱硫效率。但当喷粉量增加到一定值时，系统脱硫效率有趋于平缓的趋势，脱硫灰的有效利用率开始降低。

在上述试验的基础上，本文研究旋转喷雾条件下喷粉量对脱硫效率的影响规律。其中，浆液 $n(Ca)/n(S)$ 维持在 1.8，入口烟气温度为 150 ℃，出口烟气温度控制为 80 ~ 90 ℃。试验结果如图 7 所示。

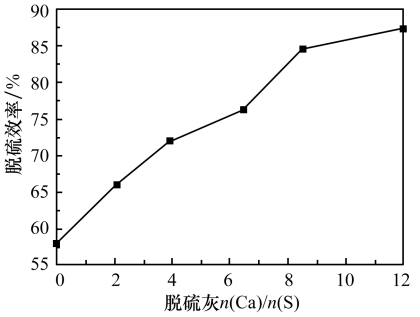



**图 7　喷粉量对脱硫效率的影响(加浆液)**

**Fig. 7　Effect of powder spraying amount on desulfurization efficiency (adding slurry)**

在只喷浆液，不喷脱硫灰时，系统的脱硫效率为 57.90% 左右，随后向脱硫塔内喷加脱硫灰，脱硫效率得到显著提升，由 57.90% 提高至 66.04%。当继续加大喷粉量时，脱硫效率随着喷粉量的增加而逐渐提升，上升至 87.20%。由脱硫效率的变化曲线可以看出，脱硫效率随喷粉量的变化并非线性关系，当脱硫灰 $n(Ca)/n(S)$ 由 8.5 增加到 12.1 时，脱硫效率的增加趋于平缓，与单喷粉时的趋势相一致。造成这一变化规律的主要原因：喷粉量的增加，提高了系统的 $n(Ca)/n(S)$，也提高了浆液中 $Ca^{2+}$ 浓度，降低了液相传质阻力，增加了化学势推动力，从而促进了脱硫反应的进行；但当脱硫灰喷加量增加到一定程度时，系统中 $Ca(OH)_2$ 的溶解速率趋于稳定，脱硫反应速率主要由气相中 $SO_2$ 气体向液面扩散、溶解与电离速率控制；雾化浆滴粒径不变，脱硫灰的增加使得塔内含固量增大，含水量减少，导致蒸发时间变短，脱硫效率下降[12-13]。所以脱硫效率会出现随脱硫灰 $n(Ca)/n(S)$ 增加而增大，但增加幅度逐渐趋于平缓，从而造成钙的有效利用率降低。因此喷粉量并非越大越好，过多增加喷粉量，也会增加后续除尘系统的负荷，从而增加系统的运行成本，影响脱硫的经济效益。

### 2.3　增湿水对脱硫效率的影响

在半干法脱硫中，水分对脱硫效率的影响很大，不仅对脱硫剂起到增湿活化作用，还使气固反应转变为气液固反应，延长了反应时间，加快了反应速率。

本文研究了 5 种试验条件下增湿水对系统脱硫效率的影响。试验结果如图 8 所示。

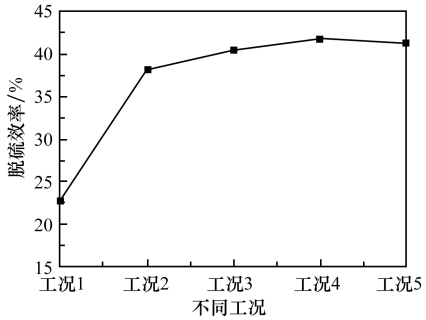



**图 8　增湿水对脱硫效率的影响**

**Fig. 8　Effect of humidifying water on desulfurization efficiency**

(注：工况 1 为只喷脱硫灰；工况 2 为使用雾化器对系统喷加雾化水；工况 3 ~ 5 的增湿水分别为 0.8、1.6、2.4 L/h)

当仅喷脱硫灰时，系统的脱硫效率仅有 22.67%，通过顶部雾化器向脱硫塔内喷雾化水后，系统的脱硫效率提升至 38.11%。其原因在于，雾化水的加入，可以在降低烟气温度的同时提高烟气的相对湿度，有利于 $SO_2$ 分子离子化并传质扩散进入颗粒物内部进一步反应，减小了反应过程中的传质阻力。当将一部分雾化水量分配到脱硫灰增湿后，3 种增湿水量下的脱硫效率均有

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

所提高，且呈先增长后下降的变化规律。产生这一变化规律的主要原因在于，反应过程中水分主要起到对烟气降温、润湿脱硫剂、提高烟气相对湿度和增加传质速率的作用。烟气进入脱硫塔内首先穿过雾化器所形成的伞状雾面，在一定程度上温度降低、相对湿度提高；水分在喷管出口与干灰便接触并附着在干灰颗粒表面，使得干灰颗粒在进入脱硫塔内后有着极大的蒸发表面积，可以进一步降低烟气温度，提高烟气的相对湿度，有利于 $SO_2$ 等酸性气体分子在脱硫灰颗粒的表面冷凝、吸附并离子化，从而进一步提高脱硫效率。当增湿水量过多时，虽然脱硫灰的增湿效果加强，但这一部分水的蒸发速率非常快，烟气中的 $SO_2$ 不易形成亚硫酸且通过雾化器喷出的水分减少，喷粉管的位置低于雾化器，烟气与增湿后的干灰接触有限，使得塔内烟气温度较之前的工况有所提高，因此造成整体脱硫效率有所下降。

综上所述，合适的增湿水量能有效提升脱硫灰的利用效率，对于不同脱硫灰的喷加量，应进行合适的增湿水配比，从而实现最佳的脱硫效率。在试验系统中，保持总用水量为 3 L/h，增湿水量为 1.6 L/h，喷粉量为 2.71 kg/h 时，脱硫灰利用最高，脱硫效率可达 42.00%。由于半工业试验中脱硫塔的雾化器转速较低，雾化喷浆的效果与工业现场实际的喷浆效果相差较远，所以试验中的脱硫效率低于实际现场的脱硫效率，但试验结果表明了与只喷浆液相比，同时喷浆液和脱硫灰能大幅提高脱硫效率。。本文通过该试验，进行塔体数值模拟优化，并提出改造方案，于 2019 年 4 月在马钢 430 $m^2$ 烧结机烟气脱硫塔实施优化喷粉改造，其脱硫效率从 85.00% 提高到 98.00%。

## 3 结 论

本文针对搭建的 SDA 喷粉脱硫试验系统，进行半工业试验，得到如下结论。

（1）喷粉位置对脱硫效率的影响显著，随着喷粉位置的降低，脱硫灰在塔内停留时间降低，脱硫效率逐渐降低。当浆液 $n(Ca)/n(S)$ 为 1.8，喷粉与喷浆联合脱硫时，随着喷粉位置的降低，相较于只喷浆液的工况，脱硫效率的增加量先增加后减小，由 18.60% 先增长到 19.10%，然后逐渐下降为 5.50%。喷粉最佳位置位于塔的上部区域，即距离塔顶 90 mm 和 290 mm 处，脱硫效率分别达到 74.00% 和 75.90%。

（2）喷粉量对脱硫效率的影响显著。单喷粉条件下，随着喷粉量的持续增加，参与反应的 $n(Ca)/n(S)$ 增加，脱硫效率随之增加，且增加明显；浆液 $n(Ca)/n(S)$ 为 1.8，喷粉与喷浆联合脱硫时，随着喷粉量的增加，脱硫效率由 57.90% 升高至 87.20%。但脱硫灰 $n(Ca)/n(S)$ 由 8.5 增加到 12.1 时，脱硫率开始趋于平缓，脱硫灰利用率较之前有所下降。

（3）合适的增湿水量能有效提升脱硫灰的利用效率，对于不同脱硫灰的喷加量，应进行合适的增湿水配比，从而实现最佳的脱硫效率。在保持总用水量为 3 L/h 不变的情况下，脱硫效率随增湿水量的上升呈先上升后下降的趋势，当增湿水量为 1.6 L/h，喷粉量为 2.71 kg/h 时，脱硫灰利用最高，脱硫效率可达 42.00%，相较于无增湿水时脱硫效率提升了 3.89%。

## 参考文献：

[1] 王成刚. 电厂烟气脱硫技术研究[J]. 江西化工，2008(4):43－45.
WANG C G. Research on flue gas desulfurization technology in power plants[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2008(4):43－45.

[2] LI C, JIA Z, YE X, et al. Simulation on deacidification performance of waste incinerator flue gas by rotating spray drying[J]. Energy, 2018, 152:652－665.

[3] 龚佑发，刘江楠，谢丹丹. 烧结烟气 SDA 脱硫工程实践及运行优化[J]. 鞍钢技术，2016(1):39－43.
GONG Y F, LIU J G, XIE D D. Sintering flue gas SDA desulfurization engineering practice and operation optimization[J]. Ansteel Technology, 2016(1):39－43.

[4] 李风民，王涛，曾才兵，等. 邯钢 2#400 $m^2$ 烧结机应用 SDA 脱硫工艺技术改进与优化的实践[J]. 烧结球团，2017，42(3):30－35.
LI F M, WANG T, ZENG C B, et al. Practice of SDA desulfurization process technology improvement and optimization in Handan iron and steel 2#400 $m^2$ sintering machine[J]. Sintering Pellet, 2017, 42(3):30－35.

[5] 杨玉环，张媛媛. 钙硫比对 CFB 锅炉炉内脱硫效率

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的影响研究[J]. 应用能源技术,2013(6):28 - 32.
YANG Y H, ZHANG Y Y. Influence of calcium-sulfur ratio on desulfurization efficiency of CFB boiler[J]. Applied Energy Technology,2013(6):28 - 32.

[6] 黄莺,余明锐,李东平. 旋转喷雾法净化烧结 $SO_2$ 烟气适用性分析[J]. 工业安全与环保,2013,39(3):38 - 40.
HUANG Y, YU M R, LI D P. Analysis on the applicability of sintering $SO_2$ flue gas purification by rotary spray method[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2013,39(3):38 - 40.

[7] 周昊,陈建中,周明熙,等. 钠法与钙法焦炉烟气旋转喷雾脱硫特性对比[J]. 动力工程学报,2017,37(10):848 - 854.
ZHOU H, CHEN J Z, ZHOU M X, et al. Comparison of rotary spray desulfurization characteristics of coke oven flue gas by sodium method and calcium method[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2017, 37(10): 848 - 854.

[8] 曾芳. 用数值模拟方法进行脱硫塔的优化设计[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2010,37(2):94 - 98.
ZENG F. Optimal design of desulfurization tower by numerical simulation method[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2010,37(2):94 - 98.

[9] 侯嘉琪,王虹,胡笳,等. 半干法 SDA 脱硫塔数值模拟与结构优化[J]. 冶金能源,2021,40(6):53 - 57.
HOU J Q, WANG H, HU J, et al. Numerical simulation and structural optimization of semi-dry SDA desulfurization tower[J]. Metallurgical Energy, 2021, 40(6): 53 - 57.

[10] 赵毅,贾里杨,刘侃. 旋转喷雾干燥法脱硫优化数值模拟[J]. 山东化工,2019,48(24):214 - 217.
ZHAO Yi, JIA L Y, LIU K. Numerical simulation of desulfurization optimization by rotary spray drying[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(24): 214 - 217.

[11] KINZEY M K. Modeling the gas and liquid-phase resistances in the dry scrubbing process for sulfur dioxide removal[D]. New Yorke: Cornell University, 1988.

[12] DANTULURI S R, DAVIS W T, COUNCE R M, et al. Mathematical model of sulfur dioxide absorption into a calcium hydroxide slurry in a spray dryer[J]. Separation Science and Technology, 1990, 25(13 - 15): 1843 - 1855.

[13] HILL F F, ZANK J. Flue gas desulphurization by spray dry absorption[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2000, 39(1): 45 - 52.

(上接第 64 页)

DING Juan, HE Huanyu, TANG Zhongyong, et al. Effects of reduction roasting behavior on the structure and strength of carbon-containing metallurgical dust pellets [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2021, 44(1): 7 - 12.

[9] 吴锽,齐渊洪,赵继伟,等. 含碳球团的还原性和还原冷却后的强度[J]. 北京科技大学学报,2000,22(2):101 - 104.
WU Keng, QI Yuanhong, ZHAO Jiwei, et al. Reduction and strength after reduction of cooled pellet contain carbon[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000, 22(2): 101 - 104.

[10] 吴斌,刘合萍. 以含锌尘泥为原料的含碳球团强度及金属化率的影响因素[J]. 云南冶金,2007,36(4):23 - 24.
WU Bin, LIU Heping. The factors influencing the strength and metallization rate of carbon-bearing pellets made of zinc-bearing dust and sludge as raw materials[J]. Yunnan Metallurgy, 2007, 36(4): 23 - 24.

[11] 张武刚. 新钢高炉锌负荷现状及控制措施探讨[J]. 江西冶金,2019,39(3):28 - 32.
ZHANG Wugang. Discussion on the current situation of blast furnace zinc load in Xin steel and its solutions[J]. Jiangxi Metallurgy, 2019, 39(3): 28 - 32.

[12] 韩晓光. 高炉煤气中 HCl 对耐火材料侵蚀过程的研究[D]. 唐山:河北联合大学,2013:2 - 16.
HAN Xiaoguang. Research of refractory materials erosion process on the HCl in blast furnace gas[D]. Tangshan: Hebei United University, 2013: 2 - 16.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net