烧结烟气 CFB 半干法脱硫塔技术研究

侯建勇[1,2]，严 芳[1]，姜 茜[1]，程晓辉[2]，杜向前[2]
(1. 新疆大学 商学院，新疆 乌鲁木齐 830008；2. 中冶华天工程技术有限公司，安徽 马鞍山 243061)

摘要： 循环流化床(CFB)半干法脱硫技术是基于塔内粉态吸收剂在沸腾床状态下，与喷入的高压水共同完成对烟气中 SO_2 的吸收。为了优化吸收塔内部结构和烟气流动的均匀性，提高工艺水喷枪效果和系统内物料的流动性，本文结合某钢铁企业烧结烟气 CFB 半干法脱硫项目，采用三维模拟技术对脱硫塔进行建模，分析吸收塔结构、喷枪类型、吸收剂入料和返料位置；采用计算流体动力学(CFD)仿真技术对塔体烟气的流速均布情况进行系统仿真，从而验证增设导流板和湍动环的气流分布效果。结果表明：在优化后的模型仿真中，烟气偏流现象有明显改善，通过文丘里中心截面的烟气平均流速相对标准偏差从 8.2% 下降到 1.8%；高压回流喷枪可获得较大的水雾粒径，更有利于降低烟气温度和延长反应时间；吸收剂入料和返料进塔位置设置在文丘里进口下侧可减少氯化钙的生成，避免物料结块、粘接塔壁和物料流动性的下降；脱硫效率从超低排放改造前的 93.3% 提高到改造后的 98.3%，烟气出口 SO_2 质量浓度保持在 25 mg/m^3 以下。

关键词： 烧结；CFB 半干法；脱硫塔；三维建模；CFD 仿真
中图分类号： TF046.4；X701.3　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2021)06－0027－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.081

Technical research on CFB semi-dry desulfurization tower for sintering flue gas

HOU Jianyong[1,2], YAN Fang[1], JIANG Qian[1], CHENG Xiaohui[2], DU Xiangqian[2]
(1. *School of Business, Xinjiang University, Urumqi* 830008, *Xinjiang, China*; 2. *Zhongye Huatian Engineering Technology Co., Ltd., Ma'anshan* 243061, *Anhui, China*)

Abstract: The semi-dry desulfurization technique of circulating fluidized bed (CFB) is the absorption of SO_2 in flue gas conducted by the injected high-pressure water and the powder absorber based on the powder absorber in the tower under the boiling bed state. In order to optimize the internal structure of the absorption tower and the uniformity of flue gas flow, improve the effect of the process water lance and the fluidity of the material in the system, combined with a sintering gas CFB semi-dry desulfurization project of an iron and steel enterprise, using 3D simulation technology to model the desulfurization tower, analyze the structure of the absorption tower, the type of lance, the absorber inlet and return position. The computational fluid dynamics (CFD) simulation technology is used to systematically simulate the flow rate uniformity of the tower body flue gas, thus, the air flow distribution effect of the additional deflector plate and turbulent ring is verified. The results show that: 1) in the optimized model simulation, the flue gas bias flow phenomenon has been significantly improved, and the relative standard deviation of the average flue gas flow rate through the venturi center section has decreased from 8.2% to 1.8%; 2) the high pressure reflux lance can obtain a larger water mist particle size, which is more conducive to cooling flue gas and prolonging the reaction time; 3) the absorber inlet and return material into the tower position set at the lower side of the venturi inlet can reduce the generation of calcium chloride and avoid material agglomeration, adhesion to the tower wall and the decrease of material fluidity; 4) the desulfurization efficiency is increased from 93.3% before the ultra-low emission retrofit to 98.3% after the retrofit, and the flue gas outlet SO_2 mass concentration is kept below 25 mg/m^3.

Key words: sintering; CFB semi-dry; desulfurization tower; 3D modeling; CFD simulation

收稿日期： 2021－05－11；**修回日期：** 2021－07－05
基金项目： 安徽省重点研究与开发计划(1804a0802195)
作者简介： 侯建勇(1982—)，男，硕士研究生，高级工程师，从事钢铁工业大气污染治理技术研究工作。

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

2020 年我国粗钢产量为 10.647 亿吨[1]，位居世界首位。据国家统计局数据显示，我国 2019 年 SO_2 排放总量为 457.3 万吨，其中 86.46% 来自工业源[2]。钢铁冶炼是大气污染物排放的重点行业，含 SO_2 的烟气主要来源于烧结(球团)、焦炉、炼铁、炼钢、轧钢等工序的生产中[3]。生态环境部于 2019 年 4 月发布的《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》中要求：烧结烟气 SO_2 排放限值为 35 mg/m^3。烧结烟气脱硫中半干法技术主要有循环流化床法(CFB)、旋转喷雾法(SDA)和密相塔法(DAF)等。CFB 半干法是其中脱硫效率相对较高的钙基吸收技术[4-6]，该方法引进于德国 Lurgi 公司，主要应用在燃煤锅炉烟气脱硫项目中[7]，但在早期应用过程中曾出现过塌床、返料不畅、塔壁结垢等问题[8-9]，致使实际应用依然以湿法脱硫技术为主[10]。随着部分地区对烟囱“脱白”的要求以及对 HF、HCl、二噁英、重金属等非常规污染物的控制，CFB 半干法因具备多污染物脱除和出口烟气温度较高等特点，近期在烧结烟气超低排放中的应用案例逐步增多。

在早期的技术研究中，杨家军[11]在对燃煤锅炉烟气 CFB 半干法脱硫改造中发现：增设弯头导流板和文丘里整流段后将系统脱硫效率从 90% 提高到 96.5%。王晓芳等[12]在燃煤锅炉烟气半干法脱硫试验中得出：塔体采用塔顶帽腔式结构以及在出口下沿处设置三角挡板，可促进塔内烟气循环和颗粒物凝缩。宋健斐等[13]提出一种旋流式半干法脱硫塔设想，并采用雷诺应力模型和颗粒随机轨道模型模拟了塔内气固两相流场的特征，得出强旋流造成的湍动流场有利于提高脱除效率。于斌等[14]采用(Computational Fluid Dynamics，CFD)技术对燃煤发电机组烟气半干法脱硫烟道进行流场模拟后发现：在塔底设置导流板叶片可改善烟道内烟气的不均衡现象。

上述研究推动了 CFB 半干法脱硫技术的不断进步，但在塔体内部气流均布情况和返料适宜位置等方面缺乏研究。为了使烧结烟气 CFB 半干法脱硫塔取得较好的预期效果，本文对脱硫塔及附属设施进行三维建模，采用 CFD 软件对文丘里及塔内的气流分布进行仿真，确定出合适的加料和返料位置，以及选择更适合 CFB 半干法脱硫塔的工艺水喷枪，为脱硫塔及塔内件的设计提供数据支撑。

1 脱硫塔及塔内烟气流动仿真

1.1 脱硫塔建模与仿真

本文以安徽某钢铁厂 2#192 m^2 烧结烟气脱硫工程为例进行超低排放改造设计。该工程于 2012 年投产，原设计采用 CFB 半干法脱硫 + 布袋除尘器，入口烟气流量为 1.06×10^6 m^3/h、温度≤150 ℃、SO_2 质量浓度≤1 500 mg/m^3，出口 SO_2 质量浓度≤200 mg/m^3。改造后的烟气出口 SO_2 质量浓度≤25 mg/m^3，低于超低排放所要求的 35 mg/m^3。鉴于超低排放的高要求，项目采用新型的 CFB 半干法脱硫塔更换原有旧塔，提高整体脱硫效率。

脱硫塔为钢制非标设备，包括进口段、排灰段、高温混合段、文丘里加速段、流化床反应段、出口段、塔顶循环装置等。CFD 仿真采用纯气相，脱硫塔模型边界条件如表 1 所示，其仿真模型如图 1 所示。

表 1 脱硫塔仿真边界条件

Table 1 Simulation boundary condition of desulfurization tower

进口气相流速/(m·s^{-1})	进口温度	进口物料	出口压力/Pa	塔壁传热	出口物料
18.4	不设定	空气	0	绝热	空气

1.2 脱硫塔烟气流动仿真

原脱硫塔及文丘里烟气分布的 CFD 仿真分别如图 2、3 所示。

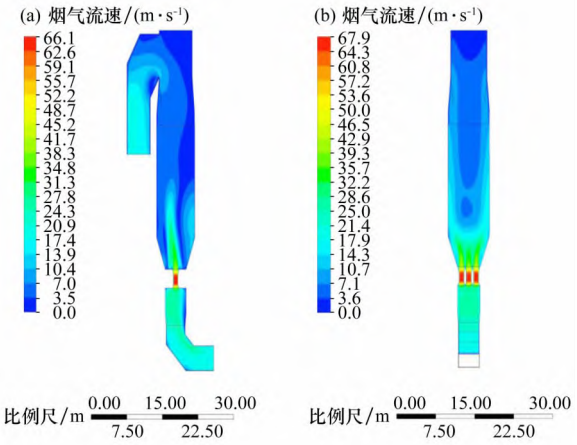
由图 2 可见，塔体侧面的气流分布沿中心轴线的对称性较好，但在塔体正面的气速分布较差，烟气经过文丘里后有明显偏流。分析原因认为：烟气流动产生的惯性会导致其在变向或受阻后产生偏流，偏流现象会造成烟气在弯

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



图 1　优化前的脱硫塔模型

Fig. 1　Model of desulfurization tower before optimization



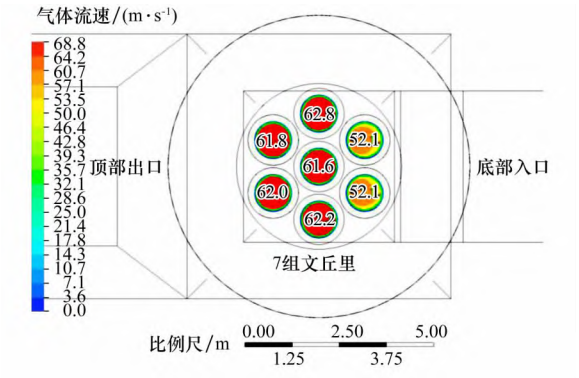
(a) 塔体正面；(b) 塔体侧面

图 2　脱硫塔烟气流速分布仿真

Fig. 2　Simulation of flue gas velocity distribution in desulfurization tower

头、塔腰、塔顶等多处形成漩涡或死角，在通过塔底弯头和吸收塔时形成不同流速的带状区，包括高速带、中速带和低速带等，甚至可能有停滞带的存在。高速带烟气快速穿过循环流化床层，致使吸收剂在有限的反应时间内，无法充分吸收 SO_2，降低整体脱硫系统的脱除效率。

由图 3 可见，7 组文丘里喉管中心截面上的烟气平均流速有明显差别，靠近入口侧的文丘里烟气流速明显偏小。烟气在通过文丘里时流速会迅速升高，携带系统循环物料形成流化床层。烟气通过各组文丘里中心时的流速越均匀，越有利于床层的稳定。气速偏差越大，越容易造成塔内烟气和床层的絮乱。穿过文丘里后的高速带烟气会向低速带偏流，增加塔内形成漩涡的可能性，降低 SO_2 的脱除效率。



(a) 塔体正面；(b) 塔体侧面

图 3　文丘里烟气平均流速分布仿真

Fig. 3　Simulation of mean velocity distribution of flue gas in venturi

2　脱硫塔及附属设施改造优化

2.1　脱硫塔改造

2.1.1　增设导流板

为使气流均布，在塔底弯头处设计烟气导流板。由于塔底弯头为二次折角式，在折角的对角线处设置 1 组导流板。导流板的叶片角度下段为 45°、上段为 90°；中间间距为 800 mm × 350 mm；两边间距为 800 mm × 250 mm；叶片尺寸为 770 mm × 500 mm × 5 mm；两个角钢支撑尺寸分别为 100 mm × 80 mm × 10 mm、80 mm × 50 mm × 6 mm。塔底弯头折流板模型如图 4 所示。

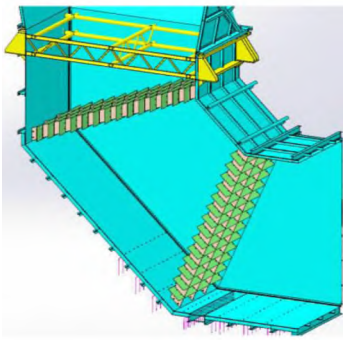


图 4　塔底弯头折流板模型

Fig. 4　Model of bend baffle at tower bottom

2.1.2　设置塔内壁湍动环

单个文丘里喉管直径为 0.99 m，脱硫塔直径为 8.0 m。烟气经过文丘里进入脱硫塔后流速大幅下降，同时沿塔内壁区的烟气压阻也相对较低。为了防止烟气沿塔壁向上逃逸，在塔内壁设计 4 组湍动环，强制烟气向塔轴心位置

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

湍动；同时，文丘里喉管正上方的吸收剂量比塔内壁圆周区域更多，该装置可促进 SO_2 与吸收剂发生反应。湍动环采用 6 mm 厚 Q235B 钢板焊制(整体折边制成效果更佳)，其设计参数：下角为 30°，上角为 60°；高度为 150 mm，环上底宽度为 100 mm。塔内壁湍动环模型如图 5 所示。

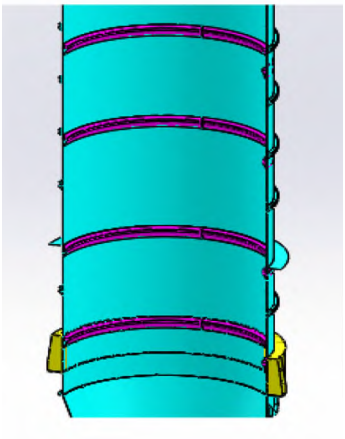


图 5 塔内壁湍动环模型

Fig. 5 Turbulent ring model of inner wall of tower

2.2 脱硫附属设施更新及优化

2.2.1 工艺水喷枪的产品更新

为了延长塔内吸收反应时间和良好的烟气冷却效果，取得较高的脱硫效率。项目改造中增大吸收塔高度，设计工况塔内流速为 5.9 m/s，将用于烟气降温的工艺水双流体喷枪更换为高压回流喷枪。高压回流喷枪的工艺水雾化粒径不小于 100 μm，双流体喷枪为 60 μm 左右[15]。在同等水量时，较大的水雾粒径比表面积小、蒸发时间长；在相同的脱硫效率下，高压回流喷枪所需的喷水量比双流体喷枪更少。单台脱硫塔喷枪数量一般为 1～4 根，喷枪数量越多，水雾粒径越小[16]。为了减小塔壁物料相互粘连的影响，应避免使用喷枪直接喷射塔壁，使水雾沿烟气气流方向喷射，喷射角度为 90°。该项目设计使用 2 根高压回流喷枪，喷枪枪体使用不锈钢材质，喷嘴为碳化钨或碳化硅材质，采用“1 用 1 备”形式，设计参数如表 2 所示。喷枪安装定位在文丘里出口上侧，布置在气流均布较好的 40～50 m/s 的气速区，安装高度在文丘里出口上端 1.5 m 处，并设置检修平台，以便人员进行检修与维护。

表 2 烟气脱硫喷枪设计参数

Table 2 Design parameters of FGD spray gun

喷枪流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	喷枪压力/MPa	喷枪调节比	喷枪水雾粒径/μm	平均蒸发时间/s	喷角/(°)	水泵流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	水泵扬程/m	水泵功率/kW
35	3.5	10/1	167～527	1.2	90	56	400	160

2.2.2 加料、返料入塔定位的优化

原有旧脱硫塔返料入塔口在文丘里上部，与工艺水喷枪安装在同一高度。遇水后烟气温度快速下降至 80 ℃左右，在此温度下注入物料时，吸收剂 $Ca(OH)_2$ 与水中的 Cl^- 反应生成易吸潮的氯化钙($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)，副产物吸潮后会结块粘接在塔内壁及塔内件上，引起设备腐蚀。结块严重时会造成物料流动性下降，内循环受阻，影响系统的稳定运行。将物料进料口设置在文丘里下端，既可以提高气固两相接触反应时间，又能使反应物料率先接触高温烟气，使 $Ca(OH)_2$ 和 Cl^- 在温度不小于 120 ℃时生成不易吸潮的碱式氯化钙[$CaCl_2 \cdot Ca(OH)_2 \cdot H_2O$][17]，可有效避免氯化钙吸潮结块的影响。

3 优化后的脱硫塔模型与脱除效果

3.1 优化后脱硫塔模型及气流分布

设置塔底弯头导流板和塔内壁湍动环后，得到优化后的脱硫塔模型如图6所示，塔内、文

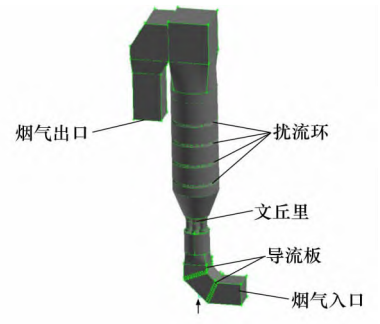


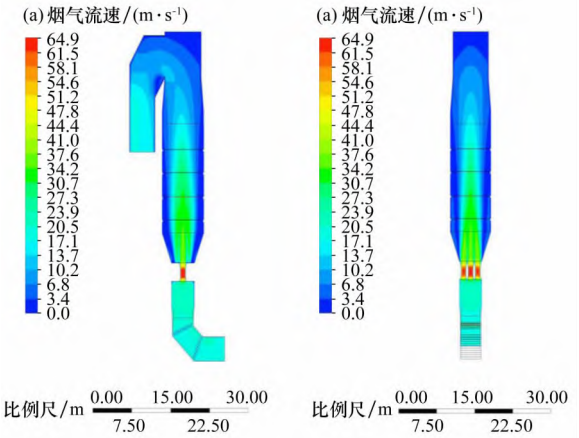
图 6 优化后的 CFB 脱硫塔模型

Fig. 6 Optimized CFB desulfurization tower model

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

丘里的烟气流速分布情况如图 7、8 所示。由图 7、8 可知，烟气速度分布沿中心轴线正面和侧面的对称性相比优化前有明显改善，烟气在塔底弯头段经过折流板均布转向后进入 7 组文丘里，使气体在经过文丘里加速段时形成直流，减小紊流与偏流。

根据相对标准偏差测算(式 1)，计算文丘里气体平均流速相对偏差对比，结果如表3所



(a) 塔体正面；(b) 塔体侧面

图 7　优化后的脱硫塔烟气流速分布仿真

Fig. 7　Simulation of optimized flue gas velocity distribution in desulfurization tower

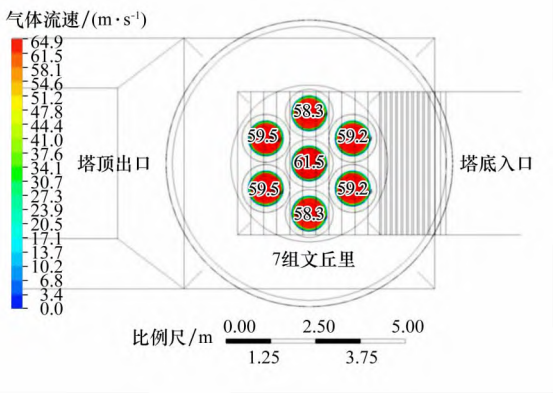


图 8　优化后的文丘里烟气平均流速分布仿真

Fig. 8　Simulation of optimized average velocity distribution of flue gas in venturi

示。由表 3 可知：脱硫塔模型内 7 组文丘里中心截面的平均流速相对标准偏差，由优化前的 8.4% 下降为 1.81%。

$$RSD = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中：RSD 为相对标准偏差，%；σ 为测量值的标准偏差；n 表示测量样本的数量；$\bar{x}$ 表示测量样本的平均值，m/s；x_i 为各测量样本的值，m/s。

表 3　文丘里气体平均流速相对偏差对比

Table 3　Comparison of relative deviation of mean velocity of gas in venturi

项目	文丘里截面气体流速(v)/(m·s⁻¹)							平均值($\bar{x}$)/(m·s⁻¹)	标准偏差(S)	相对标准偏差(RSD)/%
	1	2	3	4	5	6	7			
改造前	52.1	52.1	61.6	61.8	62.0	62.2	62.8	59.371	4.985	8.40%
改造后	58.3	58.3	59.2	59.2	59.5	59.5	61.5	59.357	1.073	1.81%

注：表中 1～7 为文丘里气体流速测量点。

3.2　SO_2 脱除效果

项目按照烟气进口 SO_2 质量浓度不大于 1 500 mg/m³ 设计，但炼铁厂在改造后使用的烧结料为高配比低硫精矿，实际入口 SO_2 质量浓度不超过 1 000 mg/m³。通过对脱硫塔及附属设施的设计优化，项目于 2020 年底投入运行。改造前、后的 SO_2 脱除效果对比如表 4 所示。由表4可知：烟囱出口的 SO_2 质量浓度可保持

表 4　改造前、后 SO_2 脱除效果对比

Table 4　Comparison of SO_2 removal effect before and after revamping

项目	脱硫塔参数				设计值/(mg·m⁻³)	排放标准/(mg·m⁻³)	设计效率/%	入口测量值/(mg·m⁻³)	出口测量值/(mg·m⁻³)	运行效率/%
	直径/m	高度/m	烟气流速/(m·s⁻¹)	其他						
改造前	8.5	32.83	5.2	内置 7 组文丘里	≤100	≤200	93.3	986	83	91.6
改造后	8.0	47.10	5.9	内置 7 组分体文丘里	≤25	≤35	98.3	441	12	97.2

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

在20 mg/m³以下，相比改造前脱硫塔的脱硫效率有大幅度提高。

4 结 论

本文采用CFD软件对CFB半干法脱硫塔及附属设施进行建模仿真与分析，并对优化前、后的效果进行对比，结合实际工程应用案例得出以下结论:

(1) 在脱硫塔底部弯头增设导流板，可有效缓解烟气偏流现象。增加导流板和塔内壁湍动环后，烟气通过文丘里中心截面的烟气平均流速相对标准偏差从8.2%下降到1.8%。

(2) 高压回流喷枪较大的水雾粒径更有利于烟气的降温，相同脱硫效率时更能节省水量。将加料、返料位置更换至文丘里入口下侧，在烟气温度≥120 ℃时生成的副产物不易发生粘壁、结块、堵塞等现象，更有利于系统内粉态物料的输送。

(3) 优化改造后的脱硫塔及附属设施在案例项目的应用中，脱硫效率提高了5%，SO_2排放量可稳定保持在设计目标值25 mg/m³以下，满足超低排放要求。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局,2021.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of the people's Republic of China in 2020 [R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2021.

[2] 生态环境部. 2016—2019年全国生态环境统计公报[R]. 北京: 生态环境部,2020.
Ministry of Ecology and Environment. National bulletin of ecological statistics for 2016—2019 [R]. Beijing: PRC, 2020 - 12 - 14.

[3] 邢奕,张文伯,苏伟,等. 中国钢铁行业超低排放之路[J]. 工程科学学报,2021,43(1):1 - 9.
XING Yi, ZHANG Wenbo, SU Wei, et al. Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(1): 1 - 9.

[4] 中国金属学会. 关于钢铁企业烧结、焦化烟气超低排放情况的调研报告[J]. 中国冶金,2019,29(7):79 - 84.
The Chinese Society for Metals. Investigation report on ultra-low emission of flue gas from sintering and coking in iron and steel enterprises [J]. China Metallurgy, 2019, 29(7): 79 - 84.

[5] 王新东,侯长江,田京雷. 钢铁行业烟气多污染物协同控制技术应用实践[J]. 过程工程学报,2020,20(9):997 - 1007.
WANG Xindong, HOU Changjiang, TIAN Jinglei. Application and practice of multi-pollutant cooperative control technology for flue gas in iron and steel industry [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(9): 997 - 1007.

[6] 于勇,朱廷钰,刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J]. 钢铁,2019,54(9):1 - 11.
YU Yong, ZHU Tingyu, LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China [J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 1 - 11.

[7] 安忠义,詹茂华. CFB技术用于烧结烟气脱硫脱硝的可行性探讨[J]. 烧结球团,2015,40(6):53 - 58.
AN Zhongyi, ZHAN Maohua. Discussion on feasibility study of CFB technology for desulfurization and denitrification [J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(6): 53 - 58.

[8] 金婷,朱廷钰,叶猛,等. 循环流化床烧结烟气脱硫灰理化性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2010,37(6):35 - 40.
JIN Ting, ZHU Tingyu, YE Men, et al. Physical and chemical properties of circulating fluidized bed sintering flue gas desulfurization ash [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition), 2010, 37(6): 35 - 40.

[9] 黄培杨,张晨,肖雄,等. 干法脱硫吸收塔塌床原因分析及预防措施[J]. 华电技术,2015,37(9):61 - 62;80.
HUANG Peiyang, ZHANG Chen, XIAO Xiong, et al. Cause analysis and preventive measures for the collapsed bed of the dry desulfurization absorption tower [J]. Huadian Technology, 2015, 37(9): 61 - 62; 80.

[10] 李凤臣,王挽平,钟闯,等. 烧结机半干法烟气脱硫塔结垢的原因分析及改进[J]. 烧结球团,2016,41(6):65 - 68.
LI Fengchen, WANG Wanping, ZHONG Chuang, et al. Analysis of semi-dry method flue gas desulfurization tower fouling cause of sinter machine and improvement [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(6): 65 - 68.

[11] 杨家军. 超净排放中循环流化床半干法脱硫工艺的优化升级[J]. 环境工程技术学报,2016,6(4):371 - 376.
YANG Jiajun. Optimization and upgrading of semi-dry desulfurization process of circulating fluidized bed for ultra clean emission [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(4): 371 - 376.

[12] 王晓芳,佟会玲,李定凯,等. 循环流化床常温半干法烟气脱硫技术的工程示范研究[J]. 动力工程,2004(3):421 -

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

425.
WANG Xiaofang, TONG Huiling, LI Dingkai, et al. Experimental research on the CFB-FGD of semi-dry process in ambient temperature in a demo plant [J]. Power Engineering, 2004(3): 421 – 425.

[13] 宋健斐，王迪，张慧敏，等. 新型半干式旋流脱硫塔内气固两相流的数值模拟研究 [J]. 现代化工，2017，37(2)：184 – 187.
SONG Jianfei, WANG Di, ZHANG Huimin, et al. Simulation of gas-solid two-phase flow in a new-type semi-dry swirling flow desulfurization tower [J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(2): 184 – 187.

[14] 于斌，王爱，孙洪斌，等. 循环流化床半干法脱硫装置烟道流场模拟优化 [J]. 洁净煤技术，2020，26(3)：75 – 81.
YU Bin, WANG Ai, SUN Hongbin, et al. Flue flow field simulation and optimization in CFB semi-dry desulfurization plant [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 75 – 81.

[15] 沈伦，吴国勋，张忠梅，等. 单级多喷嘴 CFB-FGD 技术研究及应用 [J]. 环境工程，2014，32(12)：73 – 75.
SHEN Lun, WU Guoxun, ZHANG Zhongmei, et al. The study and application of single layer and multi-nozzle CFB-FGD technology [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(12): 73 – 75.

[16] 李鹏飞，李睿，王广春，等. 烟气脱硫脱硝流化床反应器中喷枪设计的模拟与优化 [J]. 环境工程，2020，38(10)：151 – 155.
LI Pengfei, LI Rui, WANG Guangchun, et al. Simulation and optimization of spray gun design in flue gas desulfurization and denitrification fluidized bed reactor [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(10): 151 – 155.

[17] 侯建勇，严厚华. 含高浓度污染物的球团烟气净化技术进展与选择 [J]. 河南冶金，2021，29(1)：6 – 10；48.
HOU Jianyong, YAN Houhua. Progress and selection of pellet flue gas purification technology with high concentration pollutants [J]. Henan Metallurgy, 2021, 29(1): 6 – 10; 48.

(上接第 14 页)

[20] ZANG S M, ZHANG G Z, Qiu W G, et al. Resistance to SO_2 poisoning of V_2O_5/TiO_2-PILC catalyst for the selective catalytic reduction of NO by NH_3 [J]. Chinese Journal of catalysis, 2016, 37(6): 888 – 897.

[21] 曲瑞陽，叶栋，胡达清，等. 负载型铈钛 SCR 催化剂反应机理探究 [J]. 应用化工，2017，46(2)：203 – 207.
QU Ruiyang, YE Dong, HU Daqing, et al. Study on reaction mechanism of supported Cerium-Ti SCR catalyst [J]. Journal of Applied Chemistry, 2017, 46(2): 203 – 207.

[22] LI Y X, MA G F, PENG S Q, et al. Boron and nitrogen co-doped titania with enhanced visible-light photocatalytic activity for hydrogen evolution [J]. Applied Surface Science, 2008, 254(21): 6831 – 6836.

[23] LIANG Quanming, LI Jian, HE Hong, et al. Effects of SO_2 on the low temperature selective catalytic reduction of NO by NH_3 over CeO_2–V_2O_5–WO_3/TiO_2 catalysts [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2017, 11(4): 153 – 159.

[24] 冯云桑，刘少光，陈成武，等. Co-Ce 氧化物对 MnO_x/TiO_2 低温 SCR 脱硝催化剂的影响 [J]. 材料热处理学，2014，35(6)：26 – 33.
FENG Yunsang, LIU Shaoguang, CHEN Chengwu, et al. Effect of Co-Ce Oxide on Low Temperature SCR Catalyst of MnO_x/TiO_2 [J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(6): 26 – 33.

[25] 张萼松. SCR 催化剂表面硫酸氢铵分解机制及催化剂改性研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2019.
ZHANG Yusong. Study on decomposition mechanism of ammonium bisulfate on SCR catalyst and modification of catalyst [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

本刊调价声明

由于纸张及印刷费上涨，《烧结球团》从 2020 年起每本定价调为 25 元，仍为双月刊，全年六期，共 150 元。本刊邮发代号为 42 – 23，请读者到当地邮局订阅。

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