双 V 型均流式电除尘技术改造及流场优化

罗水源[1]，赵海宝[1,2]，袁伟锋[1]，刘含笑[1,2]，崔 盈[1]，周 统[1]
（1. 浙江菲达环保科技股份有限公司，浙江 诸暨 311800；
2. 浙江省燃煤烟气净化装备研究重点实验室，浙江 诸暨 311800）

摘要：为扎实推进钢铁行业超低排放改造，解决烧结机机头常规电除尘器无法满足出口粉尘浓度限值的问题，本文开发双 V 型均流式电除尘技术并通过 CFD 软件对电除尘器的布置进行模拟和优化，通过调整双 V 型均流式收尘板的布置型式，并在烟道处精准增设阻流板，提高气流均匀分布效果。数值模拟结果显示：采用双 V 型均流式电除尘改造方案后，电除尘器的气流分布均匀性系数（σ_r 值）小于 0.15，阻力从改造前的 235 Pa 降低到 152 Pa，进出口烟道烟气流量的偏差在 ±5% 的范围内；采用双 V 型均流式收尘板朝内收拢的布置消除了中间位置的局部高速区与两边的局部低速区。双 V 型均流式电除尘技术可为烧结机机头电除尘器提供改造方案选择。

关键词：烧结机；电除尘器；超低排放；双 V 型均流式电除尘器；数值模拟
中图分类号：TF046.4；X701.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)05－0124－06
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.084

Modification and flow field optimization of double V type current-sharing electrostatic precipitator technology

LUO Shuiyuan[1], ZHAO Haibao[1,2], YUAN Weifeng[1], LIU Hanxiao[1,2], CUI Ying[1], ZHOU Tong[1]
(1. Zhejiang Feida Environmental Science & Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Coal Fired Flue Gas Purification Equipment Research of Zhejiang Province, Zhuji 311800, Zhejiang, China)

Abstract: In order to solidly promote the ultra-low emission transformation of the iron and steel industry and solve the problem that the conventional electrostatic precipitator at the head of the sinterstrand cannot meet the limit of the outlet dust concentration, the double-V current-sharing electrostatic precipitator technology is developed, while the layout of the electrostatic precipitator is simulated and optimized through CFD software, and the effect of uniform distribution of airflow is improved by adjusting the layout type of the double V-type flow-sharing dust collection plate and accurately adding a flow baffle at the flue. The numerical simulation results show that the uniformity coefficient (σ_r value) of the airflow distribution of the electrostatic precipitator is less than 0.15, the resistance is reduced from 235 Pa to 152 Pa, and the deviation of the flue gas flow of the inlet and outlet flue is within the range of ±5%. The arrangement for the double-V-type flow-sharing dust collection plate is retracted inward, which eliminates the local high-speed area in the middle position and the local low-speed area on both sides. The double-V flow-sharing electrostatic precipitator technology can provide a modification option for the electrostatic precipitator at the head of the sinterstrand.

Key words: sinterstrand; electrostatic precipitator; ultra-low emissions; double V type current-sharing electrostatic precipitator; numerical simulation

收稿日期：2023－12－21；**修回日期：**2024－02－20
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFC3701501)
作者简介：罗水源(1965—)，男，高级工程师，从事工业烟气污染物控制方面的研究与管理。
通信作者：赵海宝(1987—)，男，高级工程师，从事电除尘及燃煤电站污染物控制方面的研究。

2019 年，生态环境部等五部委联合印发的《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》要求，烧结机机头及球团焙烧烟气中颗粒物排放质量浓度限值为 10 mg/m^3。而目前钢铁行业烧结机机头电除尘器的出口粉尘质量浓度一般为 25 ~ 50 mg/m^3，且对于粒径小于 2.5 μm 的粉尘存在逃逸现象。需要继续开发新型电除尘技术对钢铁企业原有电除尘器进行改造，将出口粉尘质量浓度降低到 15 ~ 20 mg/m^3，结合下游的脱硫装置协同除尘实现粉尘的超低排放。此外，钢铁行业电除尘器提效改造的市场规模巨大，在未来两三年内将有超 50 亿元(人民币)的需求[1-2]。我国存量烧结机约有 900 台，生产装备和技术水平已达国际一流。据中国钢铁工业协会统计，截至 2022 年 12 月，144 家钢铁企业中已有 41 家完成超低排放改造，预计到 2025 年将有 80% 以上的钢铁产能完成超低排放改造。

国内外研究人员对烧结机机头电除尘器提效技术进行了相关研究。在流场模拟方面，孙志鹏[3]通过 CFD 软件对烟道进行仿真与优化，将电除尘器入口气流分布均匀性系数(σ_r 值)降低至 0.20 以下，优化了流场分布；李凯伦等[4]和赵海晓[5]优化烟道流场后，分别将空气预热器至吸收塔的烟道阻力降低了 570 Pa 和 73.7%，减少了引风机的电能消耗；黄宇[6]通过 CFE 模拟使进口烟道的烟气流量和颗粒质量流量的偏差控制在 ±5% 以内。在粉尘特性改变方面，吕军等[7]在武钢某烧结机机头除尘中进行了化学团聚试验，将电除尘器的出口粉尘质量浓度降低了 36%；周栋梁等[8]研究了在电场和流场的耦合作用下细颗粒物的迁移、捕获机理，发现曳力对 1 μm 以下颗粒的脱除影响较大。在二次扬尘控制方面，姚群等[9]发现烧结机机头电除尘器普遍存在除尘效率不稳定，受烟气工况尤其是粉尘比电阻的波动影响较大，对极板上的粉尘进行振打易产生二次飞扬等问题；赵海宝等[10]研究了移动电极式电除尘技术，通过改变清灰方式，取消阳极的机械振打，采用清灰刷对阳极板进行清灰，解决了烧结机机头的二次扬尘。在电源控制方面，吴波[11]和赵俊霖等[12]采用在高频基波基础上叠加脉冲电源的方法，改变高压设备的供电形式，提高了粉尘的驱进速度和除尘效率。

本文开发双 V 型均流式电除尘技术，通过数值模拟对烟道和电除尘器内流场的变化进行模拟，通过分析和对比模拟结果，提出优化布置方案，改变双 V 型均流式收尘板的布置方向和型式，得到流场分布更均匀的结构形式，以期为电除尘器提效和节能改造提供借鉴与参考。

1　双 V 型均流式电除尘技术

双 V 型均流式电除尘技术是在电除尘器进口封头或出口封头内设置均流式收尘装置，利用惯性除尘、重力沉降、荷电凝聚以及微旋风、过滤等手段分别对烟气中的粉尘进行预捕集和再次捕集，同时通过形状和间距设置提高流场均匀性，降低烟气阻力，从而实现电除尘器的节能提效。

含尘烟气由进口封头进入电除尘器，被原第一层导流板初步导流，然后在水平方向被进口双 V 型均流式收尘板再次导流，5 μm 以上的颗粒在离心力、范德华力等作用下被黏附在收尘板上。由于该收尘板为多孔板，气流的阻力很小，粉尘颗粒的捕集效果极好。同时，该收尘板通过微通道改变气流流向，增加了气流中小颗粒和大颗粒的碰撞概率，从而将小颗粒黏附在大颗粒上。该收尘板增多了小颗粒的碰撞与凝并过程，使电除尘器的除尘效率大大提高。随着烟气粉尘不断黏附到收尘板上，粉层厚度达到一定数值时振打清灰装置将启动，在振打力的作用下，设定厚度的粉尘将被剥离，并成块掉落到进口封头的下封板上。由于下封板设置了足够的倾斜角度，粉尘会自动滑落到第一电场的灰斗内，并被输灰系统带走。烟气从进口双 V 型均流式收尘装置出来后，进入电场进行除尘，然后进入电除尘器出口封头的双 V 型均流式收尘装置。该装置再次捕集未脱除的粉尘以及振打二次扬尘，达到高效除尘的目的。

该技术将收尘板布置在电除尘器进口封头原第二道分布板位置，拆除或取消第二层分布板，具有场地要求低、经济性高、除尘提效显著等特点。常规电除尘器进出口封头内的导流板只有导

流作用，空间利用率低，而新技术利用电除尘器原有空间尤其是进出口封头内空间进行收尘，不仅可以解决老机组普遍存在的场地受限问题，还通过改进结构和导流方式，提高导流作用并降低阻力，从而降低风机功率，具有较大的节能潜力。

2 电除尘器气流分布数值模拟

气流分布是电除尘器性能的影响因素之一。局部流速快将导致烟气在电场内停留时间短，局部流速慢将导致混流，这均会降低电除尘效率。因此，本文采用计算流体动力学的方法，进行气流分布模拟试验，寻找对电除尘器气流影响大的位置并进行优化调整。

2.1 模拟方法

依据《电除尘器 气流分布模拟试验方法》(JB/T 7671—2017)，通过 CFD 软件进行流场数值模拟。湍流运动模型采用质量守恒方程和动量守恒方程，用 $k-\omega$ 湍流控制方程和比耗散率方程求解湍流动能 $k(\mathrm{m^2/s^2})$ 和比耗散率 $\omega(\mathrm{s^{-1}})$。主要的控制方程如下。

动量守恒方程：

$$\rho_f(u_f\cdot\nabla)u_f=\nabla\cdot[-pI+(\mu+\mu_T)(\nabla u_f+(\nabla u_f)^T)I-\frac{2}{3}\rho kI]+\rho(-\nabla\varphi) \tag{1}$$

式中：ρ_f 为气流密度，$\mathrm{kg/m^3}$；u_f 为速度场，m/s；∇为矢量微分运算符，表示向量场的梯度运算；p 为压力，Pa；I 为单位矩阵；μ 为黏度系数，Pa·s；μ_T 为湍动黏度，Pa·s；$\rho(-\nabla\varphi)$为体积力，N。

质量守恒方程：

$$\nabla(\rho u)=0 \tag{2}$$

式中：u 为速度场，m/s。

湍流动能控制方程：

$$\rho_f(u_f\cdot\nabla)k=\nabla\cdot[(\mu+\mu_T\sigma_k^*)\nabla k]+P_k-\beta_0^*\rho_f\omega k \tag{3}$$

式中：σ_k^*、β_0^* 为常数，分别取 0.5、0.09；P_k 为湍流普朗特数(Prandtl)，$P_k=\mu_T[\nabla u(\nabla u+(\nabla u)^T)]$，$\mathrm{W/m^3}$。

比耗散率方程：

$$\rho_f(u_f\cdot\nabla)\omega=\nabla\cdot[(\mu+\mu_T\sigma_\omega^*)\nabla\omega]+\alpha_{\omega/k}P_k-\rho_f\beta_0\omega^2 \tag{4}$$

式中：σ_ω^*、$\alpha_{\omega/k}$、β_0 为常数，分别取 0.5、0.5、0.072；

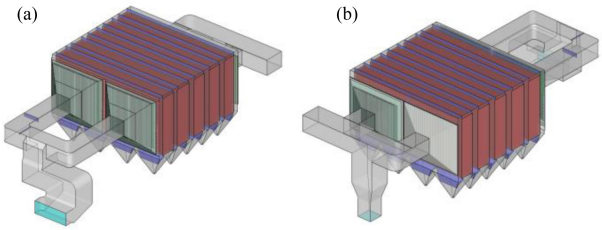
多孔介质模型：

$$S_i=\frac{\mu}{\alpha}v_i+\frac{1}{2}C_2\rho|v_i|v_i \tag{5}$$

式中：S_i 为 i 方向上动量源项，Pa·m；α 为介质渗透性；C_2 为阻力因子，1/m；v_i 为 i 方向上速度分量，m/s。

2.2 模型建立及网格化

按进、出口烟道和电除尘器设计图建立几何模型。实际 1 台烧结机沿着中心线对称布置两台电除尘器，为简化运算，试验模型仅配置 1 台电除尘器及相应烟道，整体模型如图 1 所示。按前述进行双 V 型均流式收尘板的布置建模，以 1∶1 比例进行模型仿真，准确反映双 V 型均流式收尘板的叶片方向。烟道入口尺寸为 4 m×4 m，建模范围为空气预热器出口至引风机入口的烟道和设备。

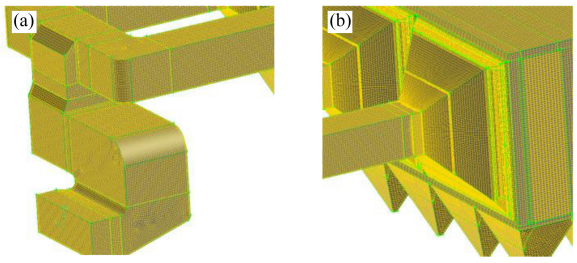


电除尘器模型：(a) A 侧；(b) B 侧

图 1 电除尘器整体模型

Fig. 1 Overall model of DV-ESP

根据电除尘器的结构特点和流动特性，采用六面体将整个计算区域划分网格。通过局部细节的网格优化和划分，可降低模拟计算的误差，并提高计算速度。网格尺寸边长为 1 mm，电除尘器网格结构如图 2 所示。



(a) 烟道；(b) 进口封头

图 2 电除尘器模型的网格划分

Fig. 2 Grid division of electrostatic precipitator model

2.3　烟气性质和边界条件

根据电除尘器运行原理，为便于模拟计算，对烟气状况和模型作如下简化：烟气为不可压缩牛顿流体，烟道远端进口处烟气速度分布均匀，模型出口采用压力出口边界条件，气流分布板采用多孔介质模型，模型中布置改变流场的导流板、阳极板、挡风板等装置，并采用固体壁面边界条件。因雷诺数 Re 大于 10^4，因此选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型。根据项目烟气量等条件，烟道入口处烟气速度为 13.76 m/s，出口边界条件设定为引风机压力，静压为 −3 kPa。气体密度为烟气密度，设为 0.87 kg/m^3。

3　模拟结果分析及方案优化

3.1　初步布置方案模拟

电场区气流分布主要依赖进口封头内布置的 3 道气流分布板，初步布置方案：按气流方向排列第一、三道为常规的圆孔分布板，开孔率分别为 41%、35%，第二道为新开发的双 V 型均流式收尘板。由于常规均流式收尘板上第一、二层布置上下均流的导流叶片，现采用双 V 型均流式收尘板取代第二层导流叶片，而双 V 型均流式收尘板上无法设置上下均流的导流叶片。根据工程实施经验，初步布置方案将原第二层的上下均流导流叶片移动到第三层气流分布板上，从而保持上下均流的效果。

在第三道分布板上布置导流叶片以调整电场区竖直方向的气流分布。在出口封头法兰处设置第一道为槽型分布板，第二道为双 V 型均流式收尘板。通过对出口封头与壳体连接尺寸的设置，保证电场上下气流速度比平均速度小，以减小气流的旁流。

另外，对电场内的阳极板、出口槽型板、灰斗挡风板均进行建模和仿真，以真实还原实际工程的气流状态。在灰斗口设置挡风板，使灰斗旁流和二次扬尘现象减弱。以上初步布置方案电除尘器纵向断面速度分布如图 3 所示。由图 3 可见：在电除尘器内，随着气流的逐步后移，电场上下边缘的气流速度逐渐减小，至第五电场出口，电场上下边缘的气流速度减小为平均速度的 65% 以下。

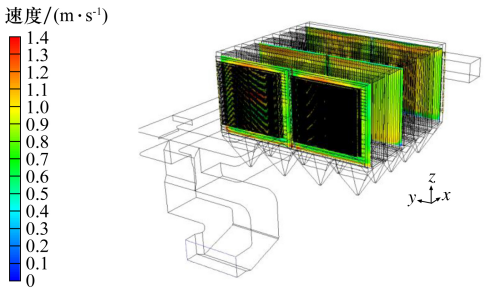


图 3　电除尘器初步布置方案纵向断面速度分布

Fig. 3　Vertical velocity profile of DV-ESP in preliminary design plan

3.2　电场流场模拟及优化

初步布置方案双 V 型均流式收尘板布置如图 4 所示。由图 4 可见：进口喇叭烟气从小口进入大口，根据直观判断，烟气可能朝着两边扩散导致中间位置气流较小。因此，初步方案设计为 V 型均流式收尘板超内收拢，左右对称，从而气流可以朝内收拢。

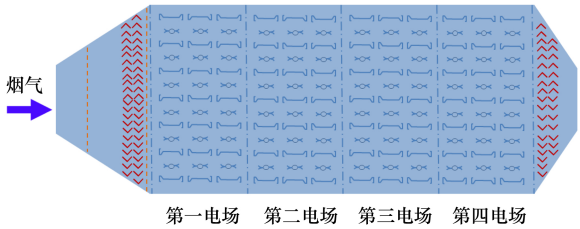


图 4　双 V 型均流式收尘板初步布置方案

Fig. 4　Layout of DV-ESP in preliminary design plan

模拟初步布置方案电场流场，得到电除尘器第一电场进口截面气流速度分布如图 5 所示。由图 5 可以看出，烟气流场在横截面上分布较差，产生了中间位置的局部高速区与两边的局部低速区，气流集中在电除尘器的中间位置，气流分布

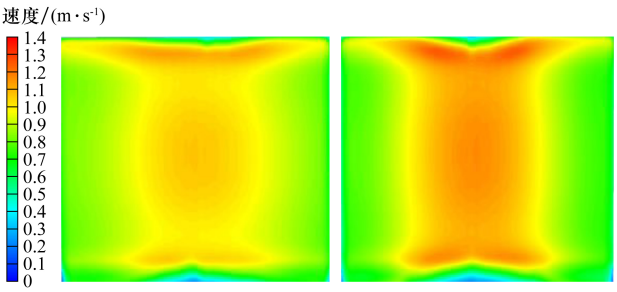


图 5　初步布置方案第一电场进口纵向断面速度分布

Fig. 5　Longitudinal velocity profile of the entrance to the first electric field of DV-ESP in preliminary design plan

均匀性系数(σ_r 值)为 0.261，烟气阻力为 235 Pa，气流分布不佳。局部高速区会导致磨损加快和烟气阻力增大，使得风机能源消耗上升。模拟结果表明，初步布置方案电场的气流可以朝内收拢，但是已超过需要的量，气流朝内收拢过多，导致气流均布不均。

为进一步提高气流分布的均匀性，根据气流朝内收拢过多的模拟结果，优化双 V 型均流式收尘板的布置型式，改变部分收尘板的布置方向，改进方案布置如图 6 所示。由图 6 可见，将原来的全部 V 型均流式收尘板从两侧朝内布置，改为两边 V 型均流式收尘板朝内布置使侧边的气流朝内收拢；中间的 V 型均流收尘板朝外布置使中间的气流向两边扩散。调整后电场区取样截面气流分布的均匀性结果如图 7 所示。由图 7 可知，优化后电场横截面上局部低速区和高速区基本消除，气流均匀性系数系数(σ_r 值)从优化前的 0.261 左右降低到了优化后的小于 0.147，阻力从改造前的 235 Pa 降低到 152 Pa，气流分布均匀性明显改善。

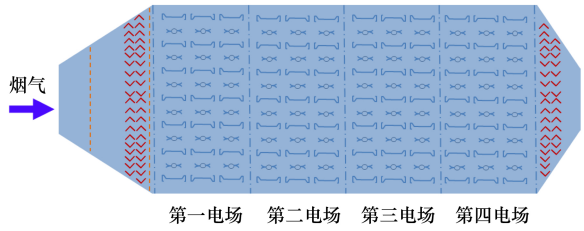


图 6 双 V 型均流式收尘板改进布置方案

Fig. 6 Layout of DV-ESP in improved plan

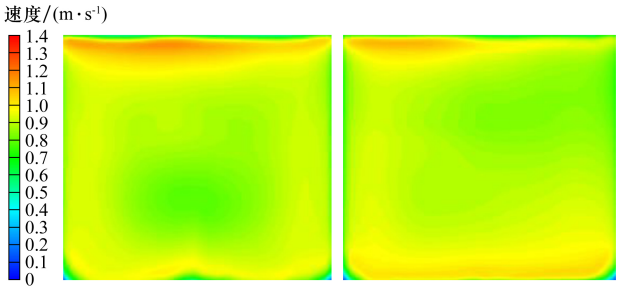
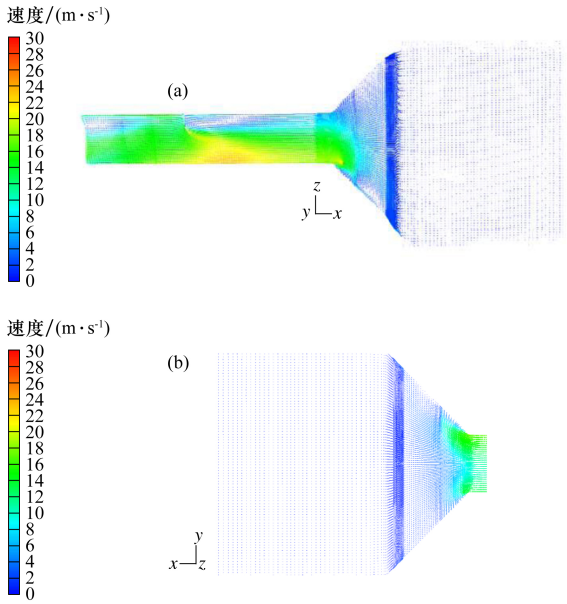


图 7 改进方案第一电场进口纵向断面速度分布

Fig. 7 Longitudinal velocity profile of the entrance to first electric field of DV-ESP in improved plan

3.3 烟道流场模拟及优化

从整体流程数值模拟结果可以看出，烟道的流场分布不均匀。由于进口烟道结构较复杂，改造项目在烟道内加装导流板比较困难，因此在原设置阻流板的基础上再增设一道阻流板。模拟得到进口烟道截面速度分布如图 8 所示。由图 8 可见：加装阻流板后，进、出口烟道烟气流量偏差在 ±5% 的范围内，进入电场的烟气气流分布均匀。从方案模拟对比得出，在边侧烟道增加 1 块阻流板后，各烟道的气流分布变得均匀，阻流板的精准设置有利于流场的分布。



（a）纵向截面；（b）横向截面

图 8 改进方案进口烟道速度分布

Fig. 8 Velocity profile of inlet flue of DV-ESP in improved plan

4 结 论

（1）开发了双 V 型均流式电除尘技术，通过数值仿真优化电除尘器布置型式。在进口烟道增设阻流板后，进、出口烟道烟气量偏差在 ±5% 的范围内，电场区取样截面气流分布均匀性系数(σ_r 值)从 0.261 降低到了小于 0.147，阻力从改造前的 235 Pa 降低到 152 Pa，进出口烟道烟气流量偏差在 ±5% 的范围内。

（2）双 V 型均流式电除尘技术可作为烧结机机头电除尘器改造方案，可有效降低电除尘器出口粉尘浓度，降低烟气阻力从而减少引风机电能消耗。

参考文献：

[1] 郭文军,李旭军. 烧结机头电除尘器运行中的常见问题与维护措施[J]. 山西冶金,2023,46(10):255 - 256;259.
GUO Wenjun, LI Xujun. Common problems and maintenance measures in the operation of sintering machine head electrostatic precipitator[J]. Shanxi Metallurgy,2023,46(10):255 - 256;259.

[2] ZHAO H B, HE Y Z, YAO Y P. Study on brush of moving electrode type electrostatic precipitator(MEEP)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2018,121:052024.

[3] 孙志鹏. 300 MW 燃煤机组电除尘器前烟道流场 CFD 仿真与优化[J]. 清净煤技术,2023,29(增刊 2):231 - 238.
SUN Zhipeng. CFD simulation and optimization of flow field in front flue of electric precipitator in a 300 MW coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology. 2023,29(Suppl 2):231 - 238.

[4] 李凯伦,孙大伟,朱红伟,等. 600 MW 火电机组烟道优化[J]. 热力发电,2017,46(4):120 - 124;136.
LI Kailun,SUN Dawei,ZHU Hongwei,et al. Optimization of flue duct for a 600 MW thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 120 - 124; 136.

[5] 赵海晓. 600 MW 超临界机组尾部烟道流场优化[J]. 浙江电力,2021,40(2):99 - 104.
ZHAO Haixiao. Optimization of flow field in tail flue of 600 MW supercritical unit[J]. Zhejiang Electric Power, 2021,40(2):99 - 104.

[6] 黄宇. 基于气固两相流的电除尘器数值模拟研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):52 - 57.
HUANG Yu. Study on numerical simulation of electrostatic precipitator based on gas-solid two-phase flow[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(3):52 - 57.

[7] 吕军,付本全,诸旭东. 化学团聚技术在烧结机头除尘中的试验研究[J]. 冶金动力,2022,41(6):119 - 121.
LÜ Jun, FU Benquan, ZHU Xudong. Experimental study of chemical agglomeration technology in sintering machine head dedusting[J]. Metallurgical Power, 2022, 41(6):119 - 121.

[8] 周栋梁,李水清,靳星,等. 电场、流场耦合作用下脱除细颗粒物的实验和数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):453 - 458.
ZHOU Dongliang, LI Shuiqing, JIN Xing, et al. Experiments and numerical simulations of the removal of fine particles in the coupling field of electrostatic precipitators[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2):453 - 458.

[9] 姚群,张思平,李浩鸣,等. 大型烧结机头烟气袋式除尘技术及工程示范[J]. 工业安全与环保,2022,48(9):78 - 82.
YAO Qun, ZHANG Siping, LI Haoming, et al. Research and engineering demonstration of the bag filter for large sintering machine head flue gas[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2022,48(9):78 - 82.

[10] 赵海宝,沈志昂,王贤明等. 移动电极式电除尘器在烧结机机头应用[J]. 烧结球团,2015,40(6):40 - 44.
ZHAO Haibao, SHEN Zhiang, WANG Xianming, et al. EEP for sintering machine dust removes[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(6),40 - 44.

[11] 吴波. 高频电源及脉冲电源在烧结机头电除尘器改造中的应用[J]. 山西冶金,2022,45(1):244 - 245;248.
WU Bo. Application of high frequency power supply and pulse power supply in the transformation of electrostatic precipitator at sintering machine head[J]. Shanxi Metallurgy,2022,45(1):244 - 245;248.

[12] 赵俊霖,万军,吕值敏. 脉冲电源提效技术在烧结烟气电除尘中的应用[J]. 烧结球团,2021,46(2):68 - 73.
ZHAO Junlin, WAN Jun, Lü Zhimin. Application of pulsed power supply extraction technology in electric dust removal of sintered flue gas[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(2):68 - 73.