湿法脱硫烧结烟气的特点及其治理技术开发与应用

张 鑫，张 烁，张金成
（中冶京诚工程技术有限公司，北京 100176）

摘要：为确保烧结烟气中 SO_2、NO_x 和粉尘达到超低排放标准，需在钢铁企业原有湿法脱硫系统基础上新建或改造脱硝系统。针对烟气处理工程中出现的问题，本文以湿法脱硫烧结烟气为研究对象，针对现有技术系统能源消耗高、设备腐蚀与堵塞等问题，分析影响烟气含湿量的因素，开发余热驱动脱硫塔浆液冷却、双加热 SCR 脱硝、分列式模块化流场混合等烟气治理技术。结果表明：湿法脱硫后，烧结烟气为饱和湿烟气，含湿量为 10%～12%，露点温度为 65～80 ℃，烟气中存在较多雾滴，且溶融盐含量较高；降低烟气温度可以增加 SO_2 分压力，有利于提高脱硫效率；当温度下降区间为 7～11 ℃时，系统运行成本最低，约为 0.381 7 元/t（铁矿）；双加热 SCR 脱硝反应系统将带水湿烟气调质为微过热干烟气，使得加热过程无堵塞，并可实现在线高效清灰。混风装置的数值模拟结果表明：随着混风单元数量的增多，温度偏差逐渐变小；随着长宽比的增大，温度偏差逐渐变小，且切分数量对混合效果的影响减弱；采用 11 个混风单元的多点阵列混风装置具有十分优异的强化混合效果。本文开发的湿法脱硫烧结烟气治理成套技术，使得烟气中颗粒物、SO_2、NO_x 三项指标，由脱硫系统入口处的 250、754、219 mg/m^3 降低为烟囱排放口的 1.4、8.2、35 mg/m^3，均实现超低排放。

关键词：烧结烟气；超低排放；湿法脱硫；脱硫塔；SCR 脱硝；流场混合技术
中图分类号：TF046.4；X701.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)06－0155－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.102

Characteristics of wet desulfurization sintering gas and its development and application of treatment technology

ZHANG Xin, ZHANG Shuo, ZHANG Jincheng
(MCC Capital Engineering & Research Incorporation Limited (CERI), Beijing 100176, China)

Abstract: In order to ensure that SO_2, NO_x and dust in sintering gas meet the ultra-low emission standard, it is necessary to build or renovate the denitrification system on the basis of the original wet desulfurization system of iron and steel enterprises. In view of the problems in gas treatment engineering, wet desulfurization and sintering gas are taken as the research objects, the factors affecting the moisture content of flue gas are analyzed in view of the problems of high energy consumption, equipment corrosion and blockage of existing technical systems, and gas treatment technologies, such as slurry cooling of waste heat-driven desulfurization tower, dual-heating SCR denitrification, and differentiated modular flow field mixing, are developed. The results show that, after wet desulfurization, the sintering gas is saturated wet gas, with a moisture content of 10%～12%, a dew point temperature of 65～80 ℃, a large number of fog droplets and a high content of melt salts. Reducing the gas temperature can increase the SO_2 partial pressure, which is conducive to improving the desulfurization efficiency. When the temperature drop range is 7～11 ℃, the operating cost of the system is the lowest, which is about 0.381 7 yuan/t (iron ore); The dual-heating SCR denitrification reaction system conditions the wet gas with water into a slightly superheated dry gas, so that the heating process is clogg-free and can achieve efficient on-line ash cleaning. The numerical simulation results show that the temperature deviation gradually decreases with the increase of the

收稿日期：2024－02－28；**修回日期：**2024－04－22
基金项目：北京经济技术开发区科技创新专项资金资助项目(KC2021-A-041-204341-1)
作者简介：张 鑫(1991—)，女，高级工程师，从事钢铁自备电厂节能、烟气余热利用和超低排放方面的研究工作。

number of air mixing units. With the increase of the aspect ratio, the temperature deviation gradually decreases, and the influence of the number of slice on the mixing effect is weakened. The multi-point array mixing unit with 11 mixing units has a very good enhanced mixing effect. The complete set of wet desulfurization and sintering gas treatment technology developed in this paper reduces the three indexes of particulate matter, SO_2 and NO_x in the gas from 250, 754 and 219 mg/m^3 at the inlet of the desulfurization system to 1.4, 8.2 and 35 mg/m^3 at the chimney discharge port, all of which achieve ultra-low emissions.

Key words: sintering gas; ultra-low emission; wet desulfurization; desulfurizer; SCR denitrification; flow field mixing technology

烧结工序作为钢铁冶炼各工序中能源消耗、污染物排放大户，其能源消耗占全工序总能耗的25%，SO_2 排放占总排放量的60%以上、NO_x 排放占总排放量的48%左右。随着钢铁工业的不断发展及“双碳”战略目标的推进，国家及地方均出台了很多相关政策，钢铁行业也实施了大量超低排放改造、挥发性有机物综合治理等重大项目(已列入十四五规划102项重大工程中)，以高水平生态环境保护措施推进可持续发展、拉动经济增长。为了解决烧结烟气引发的系列环境污染问题，科研人员开展了大量的研究工作，包括活性炭吸附[1-2]、等离子束照射等[3-4]等多污染物协同治理技术。国内污染物排放治理仍然以“末端治理”为主[5]，其中，脱硫技术已经形成比较成熟的技术体系，包括湿法、干法、半干法等[6-8]。

目前，针对烧结烟气硫硝脱除方面的研究及应用技术越来越广泛。在脱硫方面，金豪等[9]研究了氨法脱硫工艺，优化后吸收塔出口烟气温度为54.8 ℃，脱硫效率约为95.0%。徐海军[10]设计了循环流化床干法脱硫工艺，在流化床塔内协同脱除 SO_2、NO_x、粉尘及二噁英和重金属等多组分污染物，实现 SO_2、粉尘排放质量浓度分别低于35、10 mg/Nm^3 的超低排放指标。孙换佶[11]研究了喷雾干燥法脱硫系统的改善措施，发现由于脱硫系统的滞后性，高含硫量烟气中 SO_2 未及时脱除，而低含硫量烟气段使用了大量脱硫剂。李海英等[12]比较了氧化镁法、石灰石-石膏法、密相干塔法等工艺对烟气中 SO_2 的控制效果，发现三者的脱硫效率分别约为93.2%、92.8%、78.3%，而石灰石-石膏脱硫技术最稳定、成熟，密相干塔法适用于 SO_2 浓度较低的烟气。在 NO_x 控制方面，LI 等[13]发现烟气循环工艺能显著降低 NO_x 的排放量，这是由于C或CO的还原反应可协同脱除 NO_x，而烧结矿中的 $CaFe_2O_4$ 起着催化剂作用。WANG 等[14]研究了烧结过程控制对 NO_x 排放的影响，当焦粉、生石灰、水和铁矿粉的质量比为2∶1∶1∶1时，平均 NO_x 排放质量浓度从220 mg/m^3 降低到166 mg/m^3，燃料氮的转化率从54.2%降低到40.9%。李永光等[15]研究了低温SCR的脱硝性能，在150 ℃的烟气温度下，催化剂平均脱硝效率达85%，但经过60 d的连续运行，催化剂表层富集的含钾盐的灰和活性炭粉导致反应器进出口压差增加，脱硝效率下降。此外，LIU 等[16]报道了一种 NO_x 循环吸收控制方法，该方法采用颗粒状 Na-ZSM-5 沸石作为低成本吸附剂，使得 NO_x 回收率大于92%(回收 NO_2 平均浓度大于2%)。

现有技术不断朝适应烧结烟气特点的方向改进，而针对烟气治理系统的节能与环保技术开发成为发展趋势。在国内绝大部分已完成烧结烟气脱硫改造的钢铁厂中，湿法脱硫技术由于反应速度快、脱硫效率高、技术成熟、适用面广，其装机容量占脱硫总装机容量的80%以上[17]。但为完成超低排放要求，需在原有湿法脱硫系统新建(改造)脱硝系统，确保 SO_2、NO_x 和粉尘排放达到超低排放标准。本文以某湿法脱硫烧结烟气治理系统为研究案例，对现有烟气治理系统进行创新，提出节能稳定的烟气治理方案，并结合工程实际开发出节能、稳定、长效运行的新工艺流程及配套产品，使烧结烟气达到超低排放的要求，以期为同行提供参考与借鉴。

1 湿法脱硫烧结烟气特点及治理现状

1.1 烟气特点

在钢铁冶炼工序中，烧结过程所排放的烟气

的体量最大、污染物种类较为集中且浓度较高。在实际运行工况中，烧结过程也相对粗犷，烟气成分复杂，其主要特点：① 烟气流量、波动性较大，1 t 烧结矿产生烟气量为 4 000 ~ 6 000 m^3；② 温度变化大，在机头电除尘器后烟气温度的波动范围可达到 80 ~ 180 ℃；③ 流量变化大，变化幅度高达 40% 以上；④ 含氧量高，一般为 15% ~ 18%；⑤ 烟气成分复杂，除含有粉尘、SO_2、NO_x 外，还含有碱金属、重金属、二噁英类等污染物；⑥ 由于配矿方案的不同，烟气中杂质成分含量的变化范围大。

经湿法脱硫后，烧结烟气为饱和湿烟气，含湿量一般为 10% ~ 12%，露点温度为 65 ~ 80 ℃，烟气中存在较多雾滴，且溶融盐含量高。其中，NO_x 主要源自烧结过程中固体燃料的燃烧，80% ~ 90% 为燃料型 NO_x。NO_x 的质量浓度一般为 200 ~ 400 mg/Nm^3，其种类和浓度与配料、温度和空气系数等燃烧环境密切相关[18]。

1.2　治理现状

（1）湿法脱硫工艺。烧结烟气湿法脱硫系统布置如图 1 所示。由图 1 可见，烟气经烧结机机头电除尘器后，先经过湿法脱硫塔脱硫，再经过湿式电除尘器除尘，直接由烟囱排放[19]。该系统只进行了湿法脱硫处理，没有设置脱硝系统。烟气脱除 SO_x 后直接排放，NO_x 基本没有被治理，因此该系统已经无法满足当前烧结烟气 NO_x 排放要求。

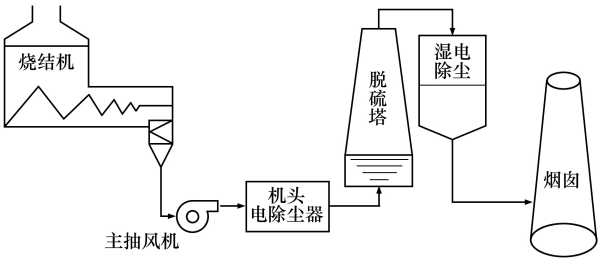


图 1　烧结烟气湿法脱硫系统布置

Fig. 1　Layout of wet desulfurization system for sintering flue gas

（2）在原有湿法脱硫系统基础上新建（改造）脱硝系统。系统布置如图 2 所示。主要工艺流程：烧结烟气经静电除尘、MGGH（media GGH，热媒循环式烟气换热器）降温、湿法脱硫、MGGH 凝结降温、MGGH 升温、GGH（gas gas heater，烟气再热器）冷却、加热炉混合热烟后，进入 SCR（selective catalytic reduction，选择性催化还原法）脱硝，再经 GGH 热端进入烟囱排入大气[20]。长期实践运行经验表明，这种工艺主要问题：催化剂脱硝效率衰减快、系统整体堵塞和腐蚀严重，进而导致脱硝系统能源消耗高、检修频繁等问题。因此，针对湿法脱硫烧结烟气的节能、稳定、长效治理技术的开发与应用尤为关键。

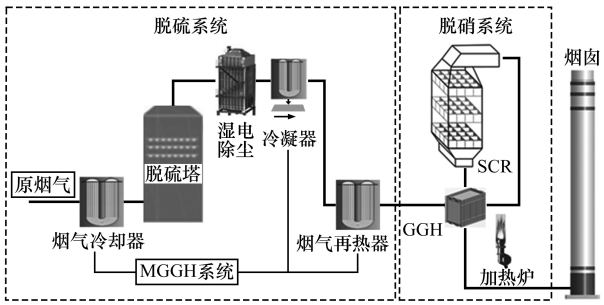


图 2　烧结烟气湿法脱硫后新建（改造）脱硝系统布置

Fig. 2　Layout of new（reconstructed）denitration system after wet desulfurization of sintering flue gas

2　湿法脱硫烧结烟气治理技术的开发与应用

2.1　余热驱动脱硫塔浆液冷却技术

目前，烧结饱和湿烟气的除湿一般有在脱硫塔入口设置换热器和出口设置冷凝器等降温处理方法。经过大量调研，结合以往工程实际经验，采用浆液换热器的降温方法更佳。此外，为解决饱和湿烟气对后部烟气处理系统腐蚀性极大的顽疾，开展烟气余热驱动脱硫塔浆液冷却技术研究。该技术通过回收烧结机尾部高温段的烟气余热产出低压饱和蒸汽，驱动冷水机组制取冷冻水，再采用浆液换热器，通过冷冻水 - 浆液换热，降低脱硫塔浆液的温度，从而降低脱硫塔的排烟温度，实现烟气含湿量的降低。其工艺流程如图 3 所示。该技术实现了能质的梯级利用，可降低 SCR 脱硝升温所需的煤气消耗。

为分析温度下降对高炉煤气消耗量、循环冷却水用量、脱硫剂浓度等因素的影响，计算得到该技术的运行成本与烟气下降幅度 ΔT 的关系如图 4 所示。由图 4 可见，降低烟气温度可以增加 SO_2 分压力，有利于提高脱硫效率；当温度下降区间为 7 ~ 11 ℃ 时，系统运行成本最低，约为 0.381 7 元/t（铁矿）。

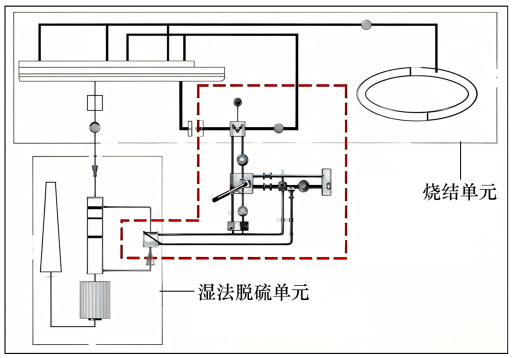


图 3 烟气余热驱动脱硫塔浆液冷却工艺流程

Fig. 3 Flow diagram of desulfurization tower slurry cooling process driven by flue gas waste heat

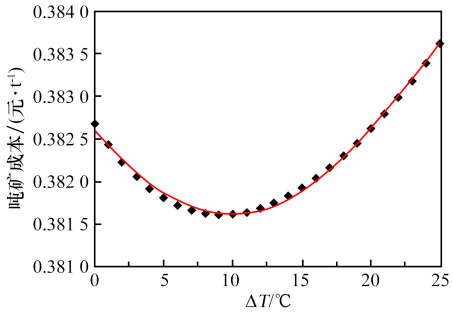


图 4 脱硫塔出口烟气温度下降幅度与能源消耗成本的关系

Fig. 4 The relationship between temperature drop range of flue gas at the exit of desulfurization tower and energy consumption

2.2 双加热 SCR 脱硝技术

2.2.1 催化剂的设计与选用

针对催化剂低温活性不足的问题，以 SCR 反应机理为理论指导，研究催化剂的理化性质，分析影响 SCR 反应活性的关键因素，选用适合烧结烟气排放特性的 SCR 催化剂。将 SCR 催化剂的理化性质进行功能化分区[21]，如图 5 所示。由图 5 可见，具有强氧化还原性能和丰富酸位点的金属氧化物催化剂具有更宽的 SCR 活性温度窗口。催化剂反应活性的评价曲线如图 6 所示。由图 6 可见，选取 SCR 催化剂的活性温度为 240 ~ 280 ℃。此时，SCR 脱硝效率均保持在 90% 以上。

2.2.2 双加热 SCR 脱硝系统

虽然湿式电除尘器滤除了大部分的可凝结颗粒物，但饱和湿烟气中仍不可避免携带部分液滴和熔融盐颗粒。通过在换热器前额外增加一级高温烟气补热装置，将带水湿烟气调质为微过热干烟气，使烟气中固体颗粒物表现为干灰的物性。采用小人法分析双加热 SCR 脱硝系统，如图 7 所示。由图 7 可见，双加热系统使得烟气粉尘的黏结、结渣特性大幅度减弱，其对 SCR 催化剂的影响大大降低。

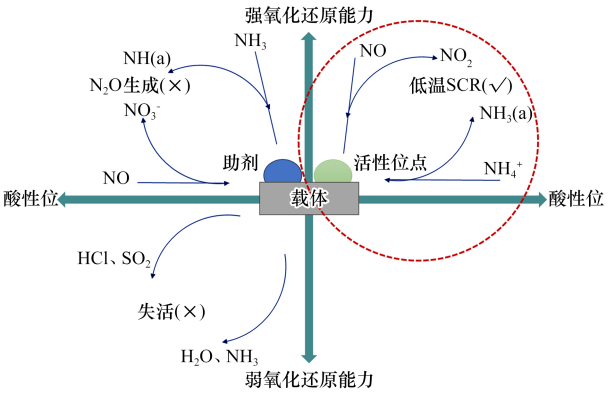
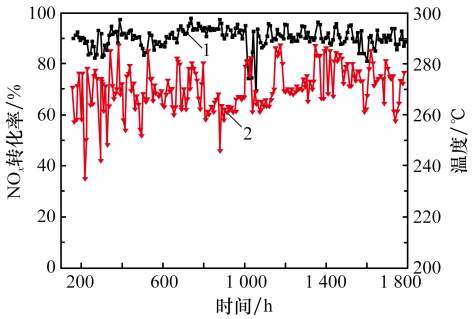


图 5 SCR 催化剂理化性质的功能化分区

Fig. 5 Functionalized partitioning of physicochemical properties of SCR catalysts



1—NO_x 转化率；2—温度。

图 6 催化剂反应活性的评价曲线

Fig. 6 Evaluation curve of catalyst activity

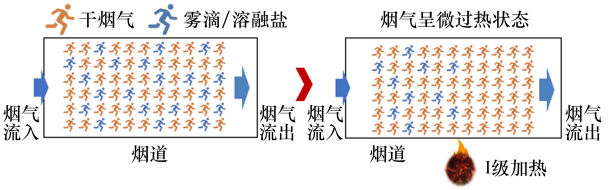


图 7 双加热系统小人法分析原理

Fig. 7 Schematic diagram of dual heating system by little man method analysis

针对 SCR 催化剂的堵塞和中毒的问题，开发带有自清洁凝渣布风技术的双加热 SCR 脱硝反应系统，通过设置混入高温烟气的一级加热系统，将带水湿烟气调质为微过热干烟气，使得加热过程无堵塞；设置凝渣布风盘，捕捉烟气中大部分干灰颗粒，并采用易于清洁的结构，实现在线高效清灰。该技术可减轻 GGH 冷侧入口所存在的挂

灰、结渣等情况，有利于烧结烟气系统可靠、稳定、长期运行。

2.3　分列式模块化流场混合技术

烧结烟气流量大，且烟气输送的截面积大。传统单点混合、多点混合及直接内置燃烧 SCR 烟气升温技术，容易形成高温通道，加剧烟气温度的偏差，导致脱硝反应效率降低、系统能源消耗升高。本文采用数值模拟方法，基于多相多场耦合理论开发分列式模块化流场混合技术，并研制高温烟气短距离高效混风装置。

2.3.1　数值仿真基本方程

SCR 烟气脱硝涉及湍流流动、传热传质、多组分输运等过程，在数值计算前采用数学方法对这些反应进行合理描述。本文采用标准压力耦合方程组的半隐式方法（semi-implicit method for pressure linked equations，SIMPLE）求解控制方程的离散方程组。控制方程如下。

连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

式中：u、v、w 分别为 x（m）、y（m）、z（m）方向流体流速，m/s。

动量守恒方程：

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial \tau}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=F_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\eta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \tag{2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial \tau}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=F_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\eta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{3}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial \tau}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=F_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\eta\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{4}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；τ 为时间，s；F_x、F_y、F_z 为 x、y、z 方向的体积力，N/m^3；p 为流体压力，N/m^2；η 为流体动力黏度，Pa·s。

能量守恒方程：

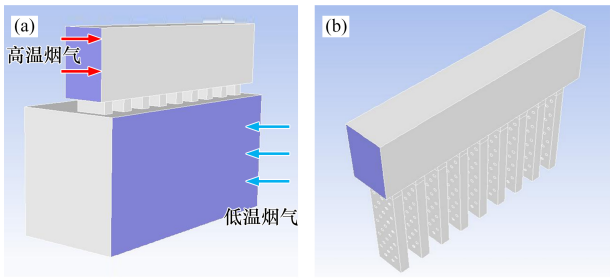
$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)-\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)=0 \tag{5}$$

式中：C_p 为流体定压比热容，J/（kg·K）；T 为流体温度，K；λ 为流体导热系数，W/（m·K）。

其中，动量及能量方程采用二阶迎风差分格式，湍流模型采用双方程模型（可实现模型）进行计算。

2.3.2　边界条件

模型输入参数：冷烟气流量为 80 万 Nm^3/h，流速为 20 m/s，温度为 215 ℃；热烟气流量为 4 × 10^4 Nm^3/h，流速为 20 m/s，温度为 1 000 ℃。边界条件：烟气入口选用“速度入口”，烟气出口选用“压力出口”。该装置内部流动介质为烟气，流动问题为三维流动换热，温度场采用三维模拟。由于装置外部含保温部件，故假定装置外表面为绝热条件。此外，假设烟气为不可压缩流体、物性参数为常数，对高温烟气混风装置及工作区域进行整体建模。内部具体模型如图 8 所示。



（a）快混装置与烟道相对位置；（b）快混装置单元结构

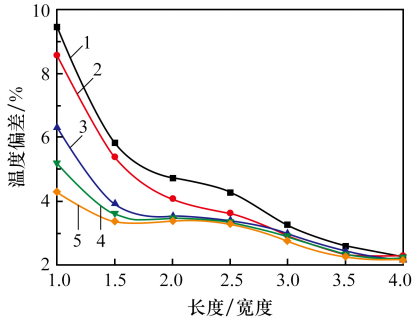
图 8　快混装置计算模型

Fig. 8　Calculation model of quick mixing device

2.3.3　模拟结果

模型初始设计为两排混风分配单元。在不改变单个分配单元设计，针对不同混风分配单元数量和间距，模拟混风后管道内的烟气温度分布，如图 9 所示。由图 9 可见：随着混风单元数量的增多，温度偏差逐渐降低；随着长宽比的增大，温度偏差逐渐降低，且切分数量对混合效果的影响减小。当长宽比为 1，混风单元数量由 7 个增加为 15 个时，温度偏差由 9.5% 下降为 4.3%，下降幅度明显；当长宽比为 2，混风单元数量为 11、13、15 个时，温度偏差稳定在 3.7% 左右。因此，优选 11 个混风分配单元，构建三维模型如图 10 所示。在混风装置出口、膨胀节入口、变径入口及 GGH 入口 4 个位置，模拟不同间距截面处的烟气温度分布如图 11 所示。由图 10、11 可见，随

着混风距离的增加，烟道截面内的温度偏差逐渐降低，在混风后1.5 m截面处即可实现烟气温度偏差≤2%。由此可见，采用 11 个混风单元的多点阵列混风装置具有十分优异的混合强化效果。



混风单元数量/个：1—7；2—9；3—11；4—13；5—15。

图 9 截面长宽比与流场温度偏差的关系

Fig. 9 The relationship between the aspect ratio of the cross-section and the temperature deviation of the flow field

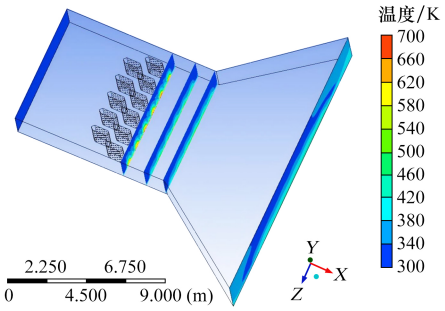


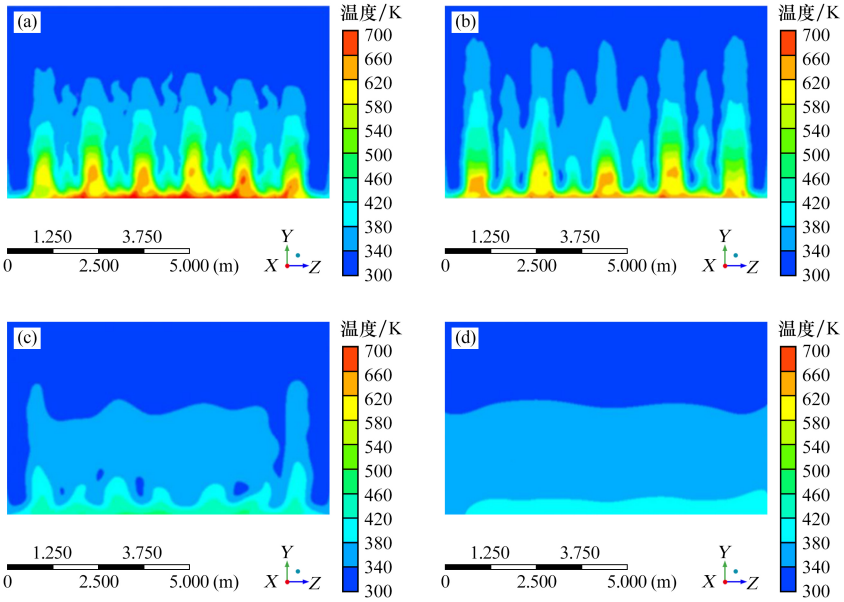
图 10 11 个混风分配单元三维模型

Fig. 10 3D model of 11 mixed air distribution units

3 应用效果

依托某烧结烟气湿法脱硫脱硝项目（设计烟气量为 190 万 Nm^3/h，脱硫塔出口排烟温度为 46.5 ℃，SCR 反应温度为 280 ℃），开发湿法脱硫烧结烟气治理成套技术。具体流程如图 12 所示。该成套技术应用后，烟气中颗粒物、SO_2、NO_x 三项指标，均由脱硫系统入口处的 250、754、219 mg/m^3 降低为烟囱排放口的 1.4、8.2、35 mg/m^3，烟气均实现超低排放。该技术的节能稳定性及主要经济指标对比如表 1 所示。相对于国内先进水平，该技术系统的总体投资减少 6.3%，占地面积减少 7%；此外，脱硫塔可节约工业用水 1 200 t/d。该技术在节能效果、大修频次、设备寿命以及保障烧结机作业率等方面，均领先于国内外主流技术。该技术系统投运至今，合计实现减排 SO_2 为 6 700 t、NO_x 为 750 t、颗粒物为 550 t，节约工业用水 20 万吨、高炉煤气 0.34 亿 Nm^3，为企业带来巨大经济效益和良好的社会效益。

投产前后换热器和催化剂防堵效果如图 13 所示。该技术系统首次应用烧结烟气余热驱动脱硫



（a）混风装置出口截面；（b）膨胀节入口截面；（c）变径入口截面；（d）GGH 入口截面

图 11 不同间距截面处烟气温度分布

Fig. 11 Temperature contour of flue gas at different spacing sections

表 1　技术节能稳定性及主要经济指标对比

Table 1　Comparison of energy saving, stability and economic indicators of the technology

项目	节约水量/（g·Nm^{-3}）	高炉煤气耗量/（Nm^3·t^{-1}）	催化剂寿命/a	大修次数/（次·a^{-1}）	设备寿命/a	保障烧结作业率/%	建设投资/%	占地面积/%	吨矿成本/%	运营成本/%	设备更换成本/%
本文技术	40.0	42.1	≥3	≤0.33	≥10	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
同类技术	7.2	46.3	1.0～1.5	2.00～4.00	3～5	90	106.3	107.0	102.2	104.4	350.0

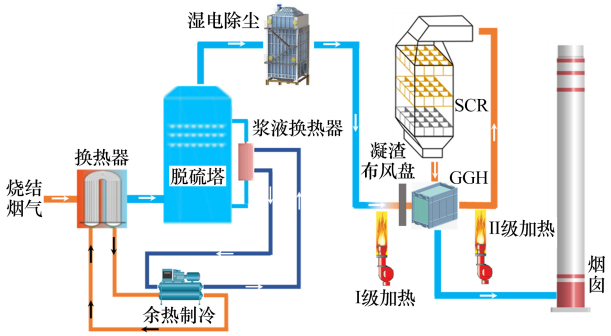
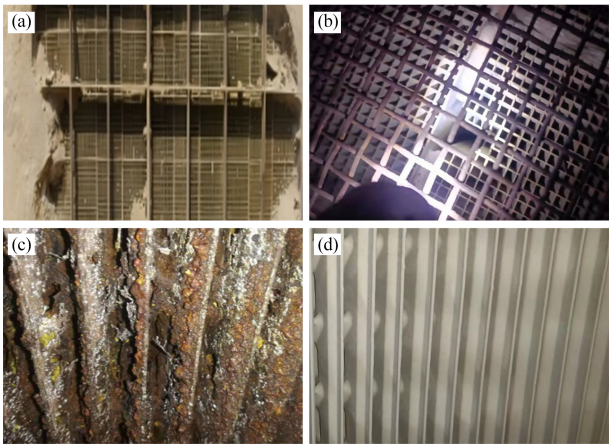


图 12　烧结湿法脱硫烟气治理技术流程

Fig. 12　Technical flow chart of sintering wet flue gas treatment and stabilization



（a）改造前催化剂；（b）改造后催化剂；
（c）改造前换热器；（b）改造后换热器

图 13　投产前后换热器和催化剂防堵效果

Fig. 13　Anti-blocking effect of heat exchanger and catalyst before and after putting into operation

塔浆液冷却技术，耦合带有自清洁凝渣布风技术的双加热 SCR 脱硝工艺及高效混风装置，解决了困扰行业多年的湿法脱硫＋SCR 脱硝系统因堵塞、腐蚀问题无法长期稳定运行的顽疾，实现了系统稳定性、主要设备寿命的大幅度提高，并同时具备降低系统能源消耗、碳排放的优点。

4　结　论

（1）湿法脱硫后，烧结烟气为饱和湿烟气，含湿量为 10%～12%，露点温度为 65～80 ℃，烟气中存在较多雾滴，且溶融盐含量较高。

（2）降低烟气温度可以增加 SO_2 分压力，有利于提高脱硫效率，当温度下降区间为 7～11 ℃时，系统运行成本最低，约为 0.381 7 元/t（铁矿）。双加热 SCR 脱硝反应系统可将带水湿烟气调质为微过热干烟气，使加热过程无堵塞，并实现在线高效清灰。催化剂使用寿命≥3 a，系统稳定性提升近 6 倍。随着混风装置截面长宽比的增大，温度偏差逐渐变小，且混风单元数量对混合效果的影响减弱。采用 11 个混风单元的多点阵列混风装置，可实现混风 1.5 m 距离内的温度偏差≤2%。

（3）湿法脱硫烧结烟气治理成套系统使得烟气中颗粒物、SO_2、NO_x 三项指标，由脱硫系统入口处的 250、754、219 mg/m^3 降低为烟囱排放口的 1.4、8.2、35 mg/m^3，均实现超低排放，且与烧结工艺作业的同步率达到 100%。

参考文献：

[1]　韩健，阎占海，邵久刚．逆流式活性炭烟气脱硫脱硝技术特点及应用[J]．烧结球团，2018，43(6)：13－18.
HAN Jian，YAN Zhanhai，SHAO Jiugang. Technical characteristics of counter flow active carbon-flue gas desulphurization and denitrification process and its application[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(6)：13－18.

[2]　向思羽，张朝晖，邢相栋，等．烧结烟气脱硫脱硝活性炭的研究进展[J]．钢铁研究学报，2023，35(3)：233－246.
XIANG Siyu，ZHANG Zhaohui，XING Xiangdong，et al. Research progress of activated carbon for desulfurization and denitrification of sintering flue gas[J]. Journal of Iron and Steel Research，2023，35(3)：233－246.

[3]　陈凯华，宋存义，张东辉，等．烧结烟气联合脱硫脱硝工艺的比较[J]．烧结球团，2008，33(5)：29－32.

CHEN Kaihua, SONG Cunyi, ZHANG Donghui, et al. A comparison of simultaneous desulfurzation and denitrition technologies of sintering waste gas[J]. Sintering and Pelletizing, 2008, 33(5): 29 – 32.

[4] 刘俊逸,张晓昀,李杰,等. 工业烟气脱硫脱硝及一体化新技术的研究进展[J]. 应用化工,2021,50(8):2297 – 2302.
LIU Junyi, ZHANG Xiaoyun, LI Jie, et al. Research progress in industrial smoke desulfurization and denitrification technologies and new integrated technology [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(8): 2297 – 2302.

[5] 黄玉鸿,蔡恒忠,柯雄,等. 烧结烟气脱硫脱硝超低排放改造工艺路线探讨[J]. 环境工程,2023,41(增刊1):380 – 382.
HUANG Yuhong, CAI Hengzhong, KE Xiong, et al. Discussion on the ultra-low emission transformation process route of sintering flue gas desulfurization and denitrification[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(Suppl 1): 380 – 382.

[6] 蒋璨. 烧结烟气石灰石 – 石膏湿法脱硫塔流场优化研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.
JIANG Can. Study on optimization of flow field of sintering flue gas limestone-gypsum wet desulfurization tower[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022.

[7] 王雅新,刘俊,易红宏,等. 钢铁行业烧结烟气脱硫脱硝技术研究进展[J]. 环境工程,2022,40(9):253 – 261.
WANG Yaxin, LIU Jun, YI Honghong, et al. Research progress of desulfurization and denitration technologies for sintering flue gas in iron and steel industry[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9): 253 – 261.

[8] 曹琬,张卫军,郭子杨. 氧化镁干法脱硫技术对烧结烟气的实践[J]. 冶金能源,2022,41(3):57 – 61.
CAO Wan, ZHANG Weijun, GUO Ziyang. Application of magnesium-based dry flue gas desulfurization in sintering flue gas[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2022, 41(3): 57 – 61.

[9] 金豪,王世杰,方红明,等. 烧结烟气氨法脱硫工艺的模拟与分析[J]. 工业安全与环保,2020,46(7):89 – 93.
JIN Hao, WANG Shijie, FANG Hongming, et al. Simulation and analysis of ammonia desulfurization process for sintering flue gas[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2020, 46(7): 89 – 93.

[10] 徐海军. 陕西龙门钢铁 450 m^2 大型烧结机超大型单 CFB 干法脱硫塔无缝集成超大型单 SCR 脱硝反应器的设计与应用[J]. 冶金管理,2020(19):63 – 64.
XU Haijun. Design and application of Shaanxi Longmen Iron and Steel 450 m^2 large sintering machine ultra-large single CFB dry desulfurization tower with seamless integration of ultra-large single SCR denitration reactor [J]. Metallurgical Management, 2020(19): 63 – 64.

[11] 孙换佶. “SDA”半干法烟气脱硫超低排实践浅析[J]. 冶金与材料,2020,40(5):45 – 46.
SUN Huanji. Analysis on ultra-low emission practice of SDA semi-dry flue gas desulfurization[J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(5): 45 – 46.

[12] 李海英,郑雅欣,王锦. 不同烧结烟气脱硫工艺应用比较与分析[J]. 环境工程,2018,36(3):102 – 107.
LI Haiying, ZHENG Yaxin, WANG Jin. Comparison and analysis of different desulfurization technologies applied in sintering flue gas[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3): 102 – 107.

[13] LI C Q, HAN Q Z, ZHU T Y, et al. Catalytic NO reduction by CO over Ca-Fe oxides in the presence of O_2 with sintering flue gas circulation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(47): 20624 – 20629.

[14] WANG Z C, ZHOU Z A, GAN M, et al. Process control technology of low NO_x sintering based on coke pretreatment[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(2): 469 – 477.

[15] 李永光,安璐,任翠涛,等. 烧结烟气低温 SCR 脱硝催化剂半工业化试验[J]. 中国冶金,2021,31(2):95 – 102.
LI Yongguang, AN Lu, REN Cuitao, et al. Semi-industrial test on low temperature SCR denitrification catalyst for sintering flue gas[J]. China Metallurgy, 2021, 31(2): 95 – 102.

[16] LIU Y S, YOU Y, LI Z Y, et al. NO_x removal with efficient recycling of NO_2 from iron-ore sintering flue gas: A novel cyclic adsorption process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 407: 124380.

[17] 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.

(下转第170页)

$NaHCO_3$[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(1):109 – 117,127.

[16] 杨建国,黄洲,耿梓文,等. 不同碱基物质对燃煤烟气脱氯的影响[J]. 燃料化学学报,2018,46(8):934 – 939.
YANG Jianguo, HUANG Zhou, GENG Ziwen, et al. Effects of different alkali-based materials on coal-fired flue gas dechlorination[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2018,46(8):934 – 939.

[17] 杨建国,耿梓文,袁伟中,等. 燃煤烟气脱氯实现脱硫废水零排放技术及其影响[J]. 中国电机工程学报,2018,38(9):2657 – 2664;2834.
YANG Jianguo, GENG Ziwen, YUAN Weizhong, et al. The technology of coal-fired flue gas dechlorination for realizing zero-discharge of desulfurization wastewater and its influences on boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(9):2657 – 2664;2834.

[18] 蔡大为,范晓慧. 钢铁工业低碳炉料及绿色冶炼技术进展[J]. 烧结球团,2023,48(4):1 – 7.
CAI Dawei, FAN Xiaohui. Progress of low-carbon charge and green smelting technology in iron and steel industry [J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(4):1 – 7.

[19] 青格勒,黄文斌,安钢,等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):119 – 126.
QING Gele, HUANG Wenbin, AN Gang, et al. Research on preparation technology of low-silica alkaline pellets [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):119 – 126.

[20] 路明,陈小燕,王兴锋,等. 钙质添加剂对碱性球团性能的影响[J]. 冶金能源,2022,41(2):19 – 23.
LU Ming, CHEN Xiaoyan, WANG Xingfeng, et al. Effect of calcium additives on the performance of calcium fluxed iron ore pellets[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2022,41(2):19 – 23.

[21] 乔红梅,张建良,王耀祖,等. 国内外钙质碱性球团生产实践及发展趋势[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1031 – 1039.
QIAO Hongmei, ZHANG Jianliang, WANG Yaozu, et al. Production practice and development trend of calcareous alkaline pellets around the world[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(10):1031 – 1039.

[22] 徐子轩,姜鑫,何佳,等. 钙质熔剂对熔剂性球团矿强度的影响[J]. 中国冶金,2023,33(9):11 – 18.
XU Zixuan, JIANG Xin, HE Jia, et al. Effects of calcium flux on fluxed pellets strength [J]. China Metallurgy, 2023,33(9):11 – 18.

[23] 刘臣,胡兵,胡佩伟,等. 球团烟气 SNCR 与嵌入式 SCR 耦合脱硝新技术[J]. 钢铁,2022,57(3):133 – 141.
LIU Chen, HU Bing, HU Peiwei, et al. Innovative coupled denitrification technology of SNCR and embedded SCR for pelletizing flue gas[J]. Iron & Steel, 2022, 57(3): 133 – 141.

(上接第 162 页)

YU Yong, ZHU Tingyu, LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China[J]. Iron & Steel,2019,54(9):1 – 11.

[18] 朱廷钰,刘青,李玉然,等. 钢铁烧结烟气多污染物的排放特征及控制技术[J]. 科技导报,2014,32(33):51 – 56.
ZHU Tingyu, LIU Qing, LI Yuran, et al. Emission characteristics of multiple pollutants from iron-steel sintering flue gas and review of control technologies[J]. Science & Technology Review,2014,32(33):51 – 56.

[19] 邹凌云,孙普. 烧结烟气脱硫脱硝处理技术的比较分析[J]. 山西冶金,2016,39(4):57 – 59;108.
ZOU Lingyun, SUN Pu. Comparison on desulfurization and denitrification technology treatment for sintering flue gas[J]. Shanxi Metallurgy,2016,39(4):57 – 59;108.

[20] 余波,王浩,杨春根,等. 烧结烟气采用湿法脱硫烟气再热问题研究[J]. 烧结球团,2017,42(3):70 – 74.
YU Bo, WANG Hao, YANG Chungen, et al. Research on gas reheating technology of sinter flue gas processed by wet desulfurization[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(3):70 – 74.

[21] WANG P, WANG H, CHEN X, et al. Novel SCR catalyst with superior alkaline resistance performance: Enhanced self-protection originated from modifying protonated titanate nanotubes[J]. Journal of Materials Chemistry. A, Materials for Energy and Sustainability, 2015, 3(2): 680 – 690.