不同蒸汽喷吹条件下烧结烟气的 NO_x 和 SO_2 排放规律

张奥凯[1]，罗云飞[1]，龙红明[2]
(1. 上海梅山钢铁股份有限公司，江苏 南京 210000；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032)

摘要： 为降低烟气中 NO_x 和 SO_2 的排放质量浓度，提高固体燃料的燃烧效率，本文基于某钢铁厂的烧结原料开展50 kg级烧结杯试验，研究向烧结料面喷吹蒸汽条件下喷吹总量、喷吹流量及开始喷吹时间等因素对烧结过程 NO_x 和 SO_2 排放的影响。结果表明：点火8 min后向料面连续喷吹蒸汽15 min，当喷吹流量为0.02 m^3/min时，烧结烟气中 NO_x 和 SO_2 排放质量浓度分别降低11.75%、13.25%，并且烧结矿的产、质量指标亦有优化。蒸汽的加入有利于固体燃料分子键的断裂，加速固体燃料挥发分中 HCN 和 NH_3 的析出进程，同时增强了烧结料层的局部还原性气氛，进而促进烧结过程 NO 的异相还原反应，降低了 NO_x 的排放质量浓度；向料面喷吹蒸汽会使过湿层增厚，使 SO_2 在过湿层中逐渐被吸收，当过湿层消失时，SO_2 瞬间释放不充分，从而降低其排放质量浓度，并且延迟其排放峰值。本文研究的蒸汽喷吹工艺制度有利于烧结生产提质降耗，可为钢铁企业生产提供参考。

关键词： 烧结；料面；喷吹蒸汽；污染物；NO_x；SO_2
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0009－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.017

NO_x and SO_2 emission rules of sintering gas under different steam spraying conditions

ZHANG Aokai[1], LUO Yunfei[1], LONG Hongming[2]
(1. Shanghai Meishan Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China;
2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China)

Abstract: In order to reduce the mass concentration of NO_x and SO_2 emission in the flue gas and improve the combustion efficiency of solid fuel, a 50 kg sinter pot test is carried out based on the sintering raw material of a steel plant, and the effects of total injection, injection flow and start spraying time on NO_x and SO_2 emissions during the sintering process under the condition of spraying steam to the sintering charge level are studied. The results show that, after ignition for 8 min, steam is continuously sprayed to the charge level for 15 min, and when the injection flow is 0.02 m^3/min, the mass concentrations of NO_x and SO_2 emissions in the sintering gas are reduced by 11.75% and 13.25%, respectively, and the production and quality indexes of sinter are also optimized. The addition of steam is conducive to breaking the molecular bonds of solid fuels, accelevating the precipitation process of HCN and NH_3 in the volatiles of solid fuels, enhancing the local reducing atmosphere of the sinter bed, thereby promoting the heterogeneous reduction reaction of NO in the sintering process and reducing the mass concentration of NO_x emission. Spraying steam to the charge level will thicken the super-humid layer, so that SO_2 is gradually absorbed in the super-humid layer, and when the super-humid layer disappears, SO_2 is insufficiently released instantaneously, thereby reducing its emission mass concentration and delaying its emission peak. The steam spraying process system is conducive to improving quality and reducing consumption in sintering production, and can

收稿日期： 2022－10－11；**修回日期：** 2022－11－20
基金项目： 国家自然科学基金资助面上项目(52174290)
作者简介： 张奥凯(1985—)，男，工程师，从事烧结球团、高炉炼铁工艺优化等研究工作。
通信作者： 龙红明(1979—)，男，教授，博士生导师，从事冶金烟气污染物减排、低碳炼铁等研究工作。

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

provide references for the production of iron and steel enterprises.

Key words: sintering; charge level; steam spraying; pollutant; NO_x; SO_2

在我国全面工业化进程中，钢铁产业仍是起重要支撑和推动作用的支柱产业。烧结工序作为长流程冶炼的重要环节，为高炉提供优质原料的同时具有高污染、高排放的特点。近年来，随着环保政策的日益收紧，为助力尽早实现国家“碳达峰”、“碳中和”目标，钢铁行业从业人员在源头、过程和末端减排等方面开展了一系列烧结过程污染物减排技术的研究和推广应用。由于料面喷吹蒸汽技术具有烧结生产过程提质、节能、降耗和污染物排放较低的显著优势，国内外学者开展了大量研究。日本新日铁[1-2]最早研究了向烧结料面喷吹蒸汽对烧结矿产、质量指标和污染物排放的影响，结果表明：该技术可以促进固体燃料的燃烧，优化烧结料层热量分布，从而降低固体燃料的消耗。沙钢、安钢、首钢京唐[3-6]相继开展了向料面喷吹蒸汽的工业试验，发现喷吹蒸汽后，烧结工序固体燃料消耗降低了1.64 kg/t，该方法具有抑制二噁英生成的效果。同时，中南大学、安徽工业大学等学者[7-11]通过大量研究证明了适宜的喷吹工艺可使CO体积分数降低10%以上，同时烧结矿成品率和转鼓强度分别提高0.60%和1.94%，工序固体能源消耗降低1.15 kg/t。

目前，烧结料面喷吹蒸汽对烧结矿产、质量指标和CO的排放规律已有相关研究，但该技术对烧结过程NO_x和SO_2排放的影响却鲜有报道。本文基于某钢铁厂的烧结原料结构，研究向烧结料面喷吹蒸汽条件下喷吹总量、喷吹流量及开始喷吹时间等工艺参数对烧结过程NO_x和SO_2排放的影响，明晰NO_x和SO_2的减排机理，为后续该技术的工业化应用提供理论依据和参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验原料为国内某钢铁公司烧结生产中使用的常用矿粉，包括铁矿粉、燃料、返矿、熔剂等，其主要化学成分如表1所示。A～F矿为国内磁铁精粉、澳矿、巴西矿及印度矿等。由表1可知，A、C、D和F矿的铁品位超过60%，E矿的烧损较大，为11.82%，D矿的烧损较低；试验配入部分钢渣及氧化铁皮等固废，其质量分数较低，不影响试验结果。

表1 试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and burning loss of test raw materials %

原料名称	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	烧损
A矿	64.57	2.12	1.82	0.04	0.04	0.07	0.01	2.97
B矿	56.88	5.41	1.12	3.29	1.14	0.13	0.43	6.70
C矿	61.75	3.87	2.20	0.04	0.06	0.10	0.02	8.13
D矿	62.85	7.50	1.03	0.10	0.10	0.04	0.01	0.65
E矿	57.27	4.60	1.75	0.08	0.08	0.05	0.01	11.82
F矿	62.36	4.83	2.25	0.10	0.40	0.07	0.02	3.50
石灰石	2.91	2.16	0.79	51.32	0.36	0.01	0.07	40.80
白云石	0.35	2.26	0.58	31.45	19.45	0.01	0.03	45.50
生石灰	0.51	2.31	0.63	80.21	0.41	0.01	0.03	0.61
焦粉	1.07	6.11	4.32	0.62	0.04	0.03	0.01	86.85
返矿	54.99	4.98	2.21	10.98	1.99	0.01	0.12	0.41
钢渣	1.30	8.30	1.10	30.60	3.22	1.40	0.10	0.21
铁皮	71.04	1.87	0.38	2.50	0.27	0.05	0.01	1.01

1.2 试验方法

烧结试验平台及蒸汽喷吹系统示意如图1所示。试验采用50 kg级烧结杯，杯体直径为200 mm，高度为800 mm，点火负压为7 kPa，点火温度

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

为(1 150 ± 50) ℃，点火时间为 90 s，保温时间为 30 s，烧结负压为 14 kPa。试验过程中，采用上海某公司生产的 Titan Dryfast eco 抗化学腐蚀隔膜泵从管道中抽取烧结烟气进行采样分析，采用德国 MRU 烟气分析仪对烧结烟气污染物进行检测。

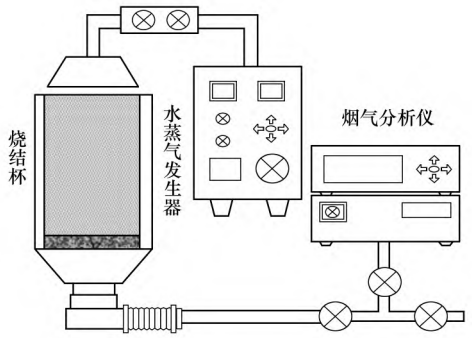


图 1　烧结试验平台及蒸汽喷吹系统

Fig. 1　Test platform of sinter pot and system of steam spraying on the sintering bed

试验采用某钢铁厂烧结现场原料，探究喷吹总量、喷吹流量、开始喷吹时间等工艺参数对烧结矿产、质量指标和烟气 NO_x、SO_2 排放质量浓度的影响。向料面喷吹蒸汽的烧结杯试验参数如表 2 所示。其中，基准试验(T_1)不喷入蒸汽；其他试验的配矿方案、布料和点火等工艺参数均与基准试验一致，具体试验配矿方案如表 3 所示。

表 2　料面喷吹蒸汽烧结杯试验参数

Table 2　Test parameters of sinter pot for steam spraying on charge lever

试验编号	开始喷吹时间/min	连续喷吹时间/min	蒸汽喷吹流量/($m^3 \cdot min^{-1}$)
T_2	8	10	0.02
T_3	8	15	0.02
T_4	8	20	0.02
T_5	8	15	0.01
T_6	8	15	0.02
T_7	8	15	0.04
T_8	4	15	0.02
T_9	6	15	0.02
T_{10}	8	15	0.02
T_{11}	10	15	0.02

注：开始喷吹时间为烧结点火至开始喷吹蒸汽的时间，min。

表 3　烧结杯试验配矿方案(质量分数)

Table 3　Raw material proportioning schemes of sinter pot test　%

A 矿	B 矿	C 矿	D 矿	E 矿	F 矿	石灰石	白云石	生石灰	焦粉	返矿	钢渣	铁皮
9.50	12.50	10.62	9.35	8.45	8.58	1.55	4.34	3.90	4.10	25.00	1.14	0.97

本文分别对烧结烟气中 NO_x 和 SO_2 测量数据进行积分处理，得到不同试验条件下烧结过程 NO_x 和 SO_2 平均排放质量浓度，再通过烧结烟气平均流量计算排放总量。计算方法如下。

$$T = Q \times t \times C \tag{1}$$

式中：T 为排放总量，g；Q 为烧结烟气平均流量，m^3/h；t 为烧结时间，min；C 为平均排放质量浓度，mg/m^3。

2　结果与讨论

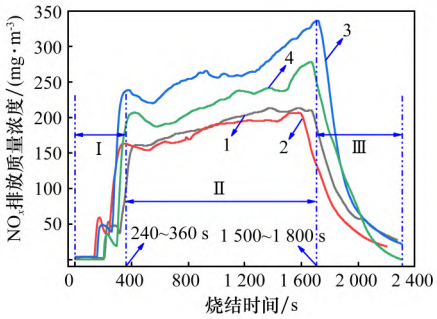
2.1　不同蒸汽喷吹条件下 NO_x 的排放规律

2.1.1　喷吹总量

试验研究不同混合料水分条件对烧结过程 NO_x 的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知：烟气中 NO_x 体积分数呈现“中间高、两端低”的现象。点火后，在较短的时间内，NO_x 的排放值迅速升高，此为第一阶段(Ⅰ区域)。这是由于在点火气体和固体燃料双重燃烧的作用下，NO_x 排放值急剧上升。NO_x 排放值达到第一个峰值之后逐渐降低，随后趋于稳定状态，随着烧结过程的继续，该值处于小幅波动且总体上升的阶段，并达到第二个峰值，此为第二阶段(Ⅱ区域)。由于前期料层表面的温度相对较低，同时在抽风的作用下固体燃料的燃烧效率和速度较低，因而 NO_x 的排放值略有降低。随着反应的继续，由于蓄热作用，料层温度迅速升高，随后反应逐渐趋于稳定，燃烧带宽度在小幅度波动中缓慢上升，NO_x 排放值趋于稳定并且有小幅增长的趋势。当烟气开始升温时，NO_x 排放值开始急剧下降，直到烧结结束，此为第三阶段(Ⅲ区域)。这是由于燃烧带宽度达到最大后迅速变窄，伴随着烧结过程的结束，NO_x 排放值达到峰值后急剧下降至零。由于该过程生成的 NO_x 基本为燃料型，大部分时间内 NO_x 的质量浓度均在 200 mg/m^3 以上。

在不同蒸汽喷吹总量条件下，试验得到 NO_x

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

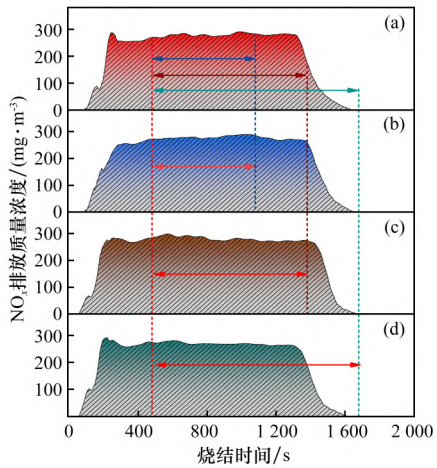


水分质量分数/%：1—6.0；2—6.5；3—7.0；4—7.5。

图 2 不同水分条件下烧结过程 NO_x 的排放规律

Fig. 2 The rule of NO_x emission in sintering process under different moisture conditions

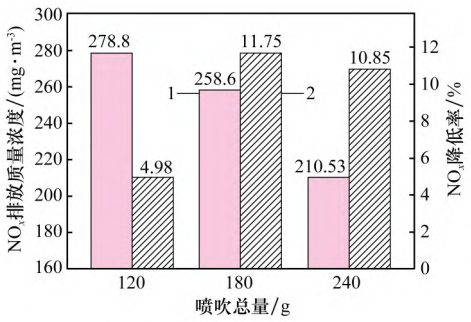
排放质量浓度曲线如图 3 所示。对图 3 进行积分，得到 NO_x 排放平均值如图 4 所示。由图 3、4 可知：相较于基准试验，在喷吹总量分别为 120、180、240 g 时，NO_x 质量浓度分别降低了 4.98%、11.75%、10.85%。喷吹蒸汽后，在烧结料中部分碱金属的催化作用下，蒸汽中部分 H_2O 解离生成·OH 自由基，加快了煤粉分子键的断裂[12]，使煤粉更快析出挥发分 HCN 和 NH_3。而挥发分析出的区域主要集中在料层内部，该区域的氧气体积分数相对较低，使得 HCN 和 NH_3 的氧化反应被抑制；与此同时，部分蒸汽进入料层后与上部热烧结矿换热后逐步升温，其进入到高温带后与燃烧中的 C 发生水煤气等反应生成了 CO、CO_2 和 H_2，使得局部还原性气氛大大增强。而焦粉表面可以



喷吹总量/g：(a) 0；(b) 120；(c) 180；(d) 240

图 3 不同喷吹总量条件对烧结过程 NO_x 排放的影响

Fig. 3 The influence of different spraying amount conditions on NO_x emission during sintering process



NO_x 指标：1—质量浓度；2—降低率。

图 4 不同喷吹总量条件下烧结过程 NO_x 平均排放质量浓度

Fig. 4 The mass concentration of average NO_x emission during sintering process under different spraying amount conditions

为还原 NO_x 提供催化反应场所并对 HCN 和 NH_3 具有明显的活化作用[13-14]，因此，NO_x 的异相还原反应显著增强，从而降低了 NO_x 的排放质量浓度。

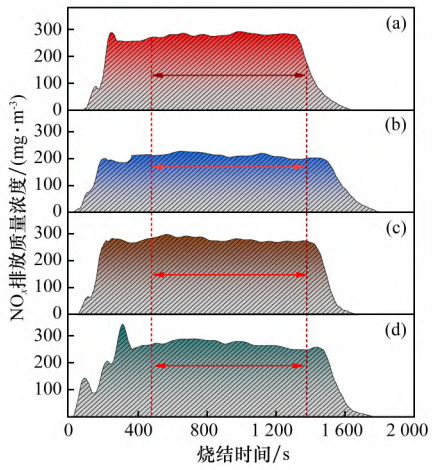
此外，有研究指出，向烧结料面喷吹蒸汽后，烧结料层内的复合铁酸钙质量分数将会大幅增加，相较于常规烧结过程，额外的铁酸钙可以通过直接催化 NO_x 还原和间接催化烧结过程中 CO 还原 NO_x 反应，有效抑制烧结过程中 NO_x 的生成。这是由于铁酸钙中存在大量晶体的棱、角和缺陷，以及价键不饱和的部位，其可作为化学吸附和催化反应的活性部位[12]，大大降低反应的活化能，有利于 NO_x 还原反应的进行。

2.1.2 喷吹流量

试验研究不同蒸汽喷吹流量条件对烧结过程 NO_x 排放的影响，结果如图 5 所示。对各 NO_x 质量浓度曲线进行积分，可得到其平均值如图 6 所示。由图 5、6 可知：在喷吹流量分别为 0.01、0.02、0.04 m^3/min 时，相较于基准试验，NO_x 质量浓度分别降低了 1.91%、11.75%、17.67%。蒸汽的加入有利于煤粉分子键的断裂，加速了煤粉中挥发分 HCN 和 NH_3 的析出进程，同时增强烧结料层的局部还原性气氛，进而促进烧结过程 NO_x 异相还原反应，减少了 NO_x 的排放量。但当喷吹流量过小时(0.01 m^3/min)，进入到烧结料层的蒸汽量较少，仅有部分蒸汽促进了局部还原性气氛，绝大部分在未到达高温带之前遇到冷烧结矿而凝结成水珠，导致降低 NO_x 排放质量浓度的效果有限；

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

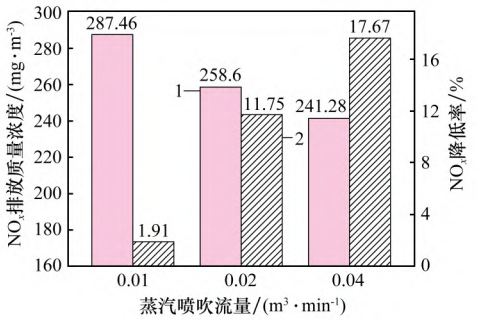
继续提高喷吹流量时，NO_x 减排效果愈加显著，但考虑到喷吹流量过大时，蒸汽喷吹对表层烧结矿有冲散和粉化等影响，不利于改善烧结指标。



喷吹流量/(m^3·min^{-1})：(a) 0；(b) 0.01；(c) 0.02；(d) 0.04

图 5　不同喷吹流量条件对烧结过程 NO_x 排放的影响

Fig. 5　The influence of different spraying flow rate conditions on NO_x emission during sintering process



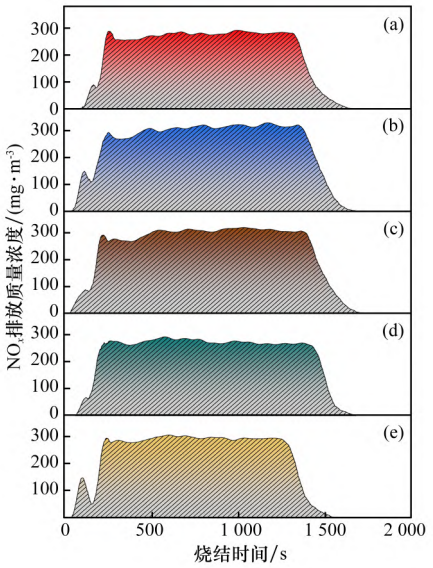
NO_x 指标：1—质量浓度；2—降低率。

图 6　不同喷吹流量条件下烧结过程 NO_x 平均排放质量浓度

Fig. 6　The mass concentration of average NO_x emission during sintering process under different spraying flow rate conditions

2.1.3　开始喷吹时间

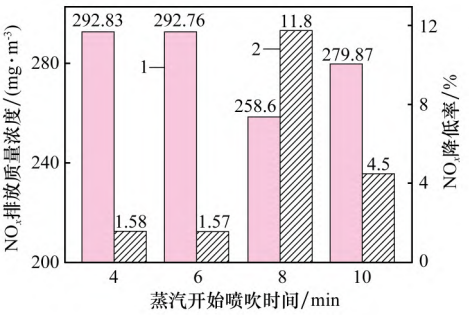
试验研究不同蒸汽开始喷吹时间对烧结过程 NO_x 排放的影响，结果如图 7 所示。对各 NO_x 质量浓度曲线进行积分，可得到其平均值如图 8 所示。由图 7、8 可知：在烧结点火后 4、6、8、10 min，并持续喷吹 15 min 条件下，相较于基准试验，NO_x 质量浓度分别降低了 1.58%、1.57%、11.75%、4.50%。随着开始喷吹时间的逐步推迟，NO_x 的降



开始喷吹时间/min：(a) 不喷吹；(b) 4；(c) 6；(d) 8；(e) 10

图 7　不同开始喷吹时间条件对烧结过程 NO_x 排放的影响

Fig. 7　The influence of different spraying time conditions on NO_x emission during sintering process



NO_x 指标：1—质量浓度；2—降低率。

图 8　不同开始喷吹时间条件下烧结过程 NO_x 平均排放质量浓度

Fig. 8　The mass concentration of average NO_x emission during sintering process under different spraying time conditions

低率呈现先升高后降低的趋势，这表明当喷吹时间过早时，烧结料层尚未传热形成足够宽度的干燥预热带，使得蒸汽与烧结混合料接触冷凝，并未发挥还原性效果，致使 NO_x 减排效果较差。同样，烧结点火后 10 min 开始喷吹时，烧结高温带稳定形成并逐步下移，部分蒸汽遇到上部冷烧结矿后冷凝，并未发挥还原性效果，其 NO_x 减排效果受限。

2.2　不同蒸汽喷吹条件下 SO_2 的排放规律

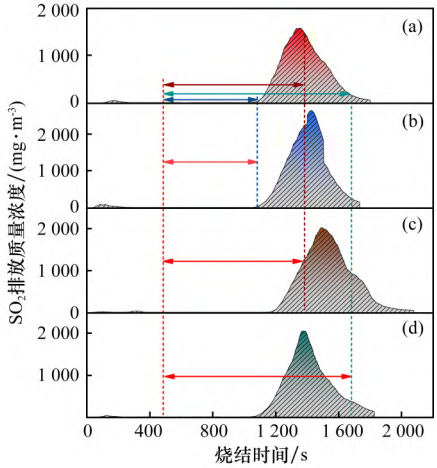
2.2.1　喷吹总量

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

试验研究不同蒸汽喷吹总量对烧结烟气中 SO_2 排放质量浓度的影响，结果如图 9 所示。由图 9 可知：在烧结后期，由于烟气温度迅速上升，SO_2 集中释放，形成 1 个波峰，烧结中段的 SO_2 排放质量浓度较稳定。这主要是因为 SO_2 在迁移过程中遇冷在过湿带聚集，并随着过湿带的迁移而逐渐下移，在烧结后期由于过湿带消失，SO_2 得到集中释放，从而出现一个较高的峰值。对图 9 中各 SO_2 排放质量浓度曲线进行积分，得到排放平均值如图 10 所示。由图 10 可知：在喷吹总量分别为 120、180、240 g 时，相较于基准试验，SO_2 排放质量浓度分别降低了 11.88%、13.25%、9.68%。对比不同喷吹总量和常规烧结条件下 SO_2 排放曲线发现，向料面喷吹蒸汽后，SO_2 排放峰值出现的时间被推迟，这是由于喷加蒸汽后，过湿层的宽度变大，导致烧结过程延后，使得 SO_2 在过湿层中被吸收，因此峰值出现时间推迟。当烧结过程升温到最高温度时，燃烧带的宽度达到最大，随后迅速变窄，当烧结过程结束时 SO_2 瞬时释放不充分导致其排放值降低。

2.2.2 喷吹流量

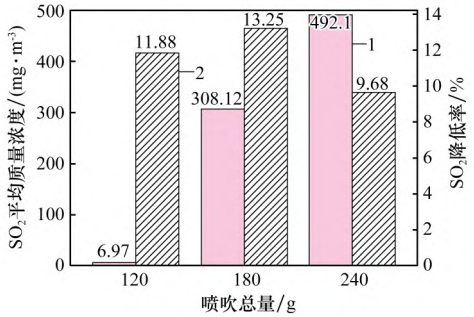
试验研究蒸汽喷吹流量对烧结过程 SO_2 排放的影响，结果如图 11 所示。对各 SO_2 排放质量浓度曲线进行积分，得到排放平均值如图 12 所示。由图11、12可知：在喷吹流量为分别为0.01、0.02、0.04 m^3/min 的条件下，SO_2 排放峰值分别为 1 772、2 014、2 232 mg/m^{-3}，相较于常规烧结过程分别提高了 203、445、663 mg/m^{-3}，并且峰值出现的时间分别延迟 200、144、205 s。分析原因认为，蒸汽喷吹后烧结过湿层宽度变大，使得前期固体燃料的燃烧速度变慢，使燃烧产生的 SO_2 在过湿层聚集，导致 SO_2 的排放峰值明显升高；但由于喷吹蒸汽后烧结时间延长，因而在不同的喷吹



喷吹总量/g：(a) 0；(b) 120；(c) 180；(d) 240

图 9 不同喷吹总量条件对烧结过程 SO_2 排放的影响

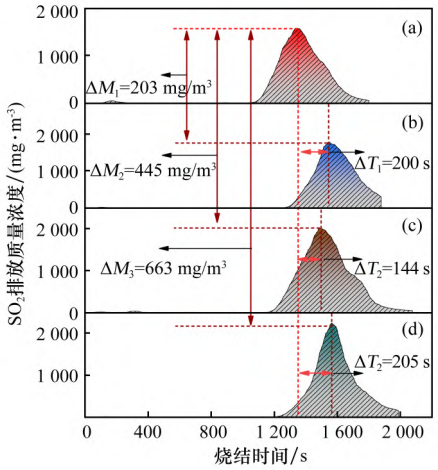
Fig. 9 The influence of different spraying amount conditions on SO_2 emission during sintering process



SO_2 指标：1—质量浓度；2—降低率。

图 10 不同喷吹总量条件下烧结过程 SO_2 平均排放质量浓度

Fig. 10 The mass concentration of average SO_2 emission during sintering process under different spraying amount conditions



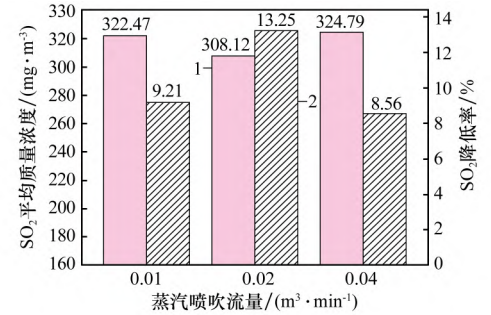
喷吹流量/(m^3·min^{-1})：(a) 0；(b) 0.01；(c) 0.02；(d) 0.04

图 11 不同喷吹流量条件对烧结过程 SO_2 排放的影响

Fig. 11 The influence of different spraying flow rate conditions on SO_2 emission during sintering process

(注：ΔT_1、ΔT_2、ΔT_3 为喷吹流量分别为 0.01、0.02、0.04 m^3/min 时的峰值延迟时间，s；ΔM_1、ΔM_2、ΔM_3 为相应峰值差，mg/m^3)

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



SO_2 指标：1—质量浓度；2—降低率。

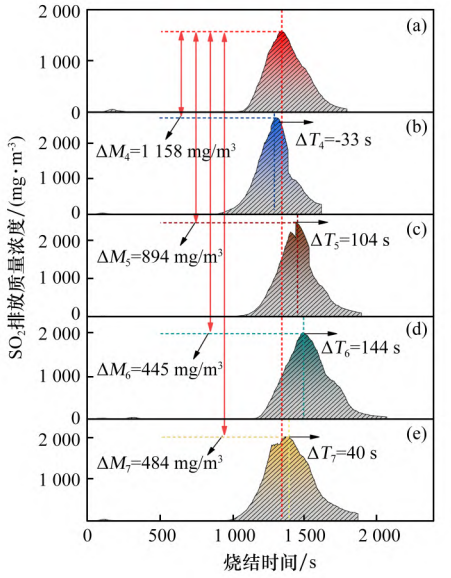
图 12　不同喷吹流量条件下烧结过程 SO_2 平均排放质量浓度

Fig. 12　The mass concentration of average SO_2 emission during sintering process under different spraying flow rate conditions

条件下，SO_2 排放平均质量浓度有不同幅度的降低，其分别降低了 9.21%、13.25%、8.56%。

2.2.3　开始喷吹时间

试验研究蒸汽开始喷吹时间对烧结过程 SO_2 排放的影响，结果如图 13 所示。对各 SO_2 质量浓度曲线进行积分，得到其平均排放值如图 14 所示。

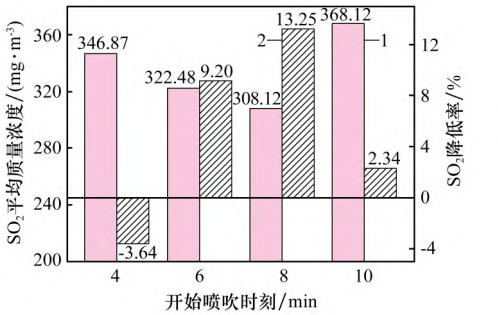


开始喷吹时间/min：(a) 不喷吹；(b) 4；(c) 6；(d) 8；(e) 10

图 13　不同开始喷吹时间条件对烧结过程 SO_2 排放的影响

Fig. 13　The influence of different spraying time conditions on SO_2 emission during sintering process

(注：ΔT_4、ΔT_5、ΔT_6、ΔT_7 为开始喷吹时间分别为 4、6、8、10 min 时的峰值延迟时间，s；ΔM_4、ΔM_5、ΔM_6、ΔM_7 分别为相应峰值差，mg/m^3)



SO_2 指标：1—质量浓度；2—降低率。

图 14　不同开始喷吹时间条件下烧结过程 SO_2 平均排放质量浓度

Fig. 14　The mass concentration of average SO_2 emission during sintering process under different spraying time conditions

由图 13、14 可知：烧结点火后 4、6、8、10 min 开始喷吹，并持续喷吹 15 min 条件下，SO_2 排放峰值出现不同变化。点火后 4 min 开始喷吹时，与 NO_x 排放趋势不同，烟气中 SO_2 排放峰值较常规烧结过程提前 33 s，同时峰值达到最高，为2 727 mg/m。这表明过早喷吹的蒸汽并未进入高温带发挥还原性效果，但由于烧结过湿层宽度变大，前期固体燃料的燃烧速度较慢，充分燃烧会产生更多的 SO_2 在过湿层聚集，导致峰值增大。同样地，由于过早喷吹的蒸汽并未进入高温带，故而其烧结速度并不明显变快，相较于基准试验，SO_2 排放质量浓度增加了 4.50%。当烧结点火后 6、8、10 min 开始喷吹时，SO_2 排放峰值到达时间分别为 2 463、2 014、2 053 s，分别延迟 104、144、40 s，同时相较于常规烧结过程，峰值到达时间分别提高 894、445、484 s；相较于基准试验，SO_2 质量浓度分别降低了 2.34%、13.25%、9.20%。

3　结　论

(1) 在烧结点火 8 min 后持续喷吹蒸汽 15 min，喷吹流量为 0.02 m^3/min，喷吹总量为 180 g 的喷吹制度条件下，NO_x 和 SO_2 排放质量浓度分别降低 11.75%、13.25%，这表明适宜的蒸汽喷吹制度有助于降低烧结过程 NO_x 和 SO_2 排放值。

(2) 蒸汽的加入有利于燃料分子键的断裂，加速了燃料中挥发分 HCN 和 NH_3 的析出进程，同时增强烧结料层局部还原性气氛，进而促进烧结过程

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

NO_x异相还原反应，减少了NO_x的排放质量浓度。

(3) 由于向烧结料面喷吹蒸汽使得过湿层的宽度变大，SO_2在过湿层中逐渐被吸收，其排放峰值延迟，当过湿层消失时，SO_2瞬间释放不充分，因而其排放值降低。

参考文献:

[1] OYAMA N, IWAMI Y, YAMAMOTO T, et al. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process [J]. ISIJ International, 2011, 51(6): 913 – 921.

[2] PRASAD A, 林立恒. 烧结机料层喷汽加湿装置应用效果 [J]. 现代冶金, 2014(1): 7 – 10.
PRASAD A, LIN Liheng. Application effect of steam injection humidifying device in sintering machine [J]. Modern Metallurgy, 2014(1): 7 – 10.

[3] 韩凤光, 许力贤, 吴贤甫, 等. 焦炉煤气强化烧结技术研究 [J]. 烧结球团, 2016, 41(2): 12 – 16; 20.
HAN Fengguang, XU Lixian, WU Xianfu, et al. Technical research on sintering intensification with coke oven gas injections [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(2): 12 – 16; 20.

[4] 李和平, 聂慧远, 韩凤光, 等. 焦炉煤气强化烧结技术在梅钢的应用 [J]. 烧结球团, 2015, 40(6): 1 – 3; 35.
LI Heping, NIE Huiyuan, HAN Fengguang, et al. Application of intensified sintering technology with COG in Meisteel [J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(6): 1 – 3; 35.

[5] 裴元东, 史凤奎, 吴胜利, 等. 烧结料面喷洒蒸汽提高燃料燃烧效率研究 [J]. 烧结球团, 2016, 41(6): 16 – 20.
PEI Yuandong, SHI Fengkui, WU Shengli, et al. Research on spraying steam on surface of sintering material bed to increase fuel combustion efficiency [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(6): 16 – 20.

[6] 裴元东, 欧书海, 马怀营, 等. 烧结料面喷吹蒸汽对烧结矿质量和CO排放影响研究 [J]. 烧结球团, 2018, 43(1): 35 – 39.
PEI Yuandong, OU Shuhai, MA Huaixuan, et al. Effect of steam spraying on sintering bed on sinter quality and CO emission [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(1): 35 – 39.

[7] 罗云飞, 杨涛, 周江虹, 等. 料面喷吹蒸汽对烧结矿产质量和CO排放的影响 [J]. 钢铁, 2021, 56(11): 47 – 54.
LUO Yunfei, YANG Tao, ZHOU Jianghong, et al. Effect of steam injection from material surface on output and quality of sinter and CO emissions [J]. Iron and Steel, 2021, 56(11): 47 – 54.

[8] 范晓慧, 甘敏, 季志云, 等. 复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用 [J]. 钢铁, 2020, 55(8): 144 – 152.
FAN Xiaohui, GAN Min, JI Zhiyun, et al. Development and application of techniques for energy conservation and emission reduction during sintering process based on multiple-component gases medium [J]. Iron and Steel, 2020, 55(8): 144 – 152.

[9] WANG Y F, YANG T, WANG H Y, et al. Application of steam injection in iron ore sintering: fuel combustion efficiency and CO emissions [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30(1): 31 – 39.

[10] 白晓军, 郭军伟, 刘月建. 烧结料面喷蒸汽实验及效果分析 [J]. 河南冶金, 2020, 28(3): 4 – 8.
BAI Xiaojun, GUO Junwei, LIU Yuejian. Test and effect analysis of steam injection on sintering surface [J]. Henan Metallurgy, 2020, 28(3): 4 – 8.

[11] 周浩宇, 范晓慧, 李谦, 等. 氢系气体喷吹对烧结污染物释放的影响规律 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 260 – 266; 299.
ZHOU Haoyu, FAN Xiaohui, LI Qian, et al. Effects of hydrogen-based gas injection on the release of typical pollutants in the sintering process [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(2): 260 – 266; 299.

[12] 易正明, 覃佳卓, 邓植丹, 等. 烧结加湿燃烧对NO_x排放影响的研究 [J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 84 – 87; 91.
YI Zhengming, QIN Jiazhuo, DENG Zhidan, et al. Influence of combustion air humidification on NO_x emissions during sintering [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4): 84 – 87; 91.

[13] OYAMA N, IWAMI Y, YAMAMOTO T, et al. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process [J]. ISIJ International, 2011, 51(6): 913 – 921.

[14] 高正阳, 杨维结, 阎维平. 煤焦催化HCN还原NO的反应机理 [J]. 燃料化学学报, 2017, 45(9): 1043 – 1048.
GAO Zhengyang, YANG Weijie, YAN Weiping, et al. Reaction mechanism of NO reduction with HCN catalyzed by char [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2017, 45(9): 1043 – 1048.

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