烧结烟气循环工艺含氧量控制及烟气成分变化研究

王延江[1]，钟庭梁[2]，王建芳[3]，佘雪峰[2]，薛庆国[2]

（1. 德龙钢铁有限公司，河北 邢台 054009；2. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室，北京 100083；
3. 河北热轧板带钢技术创新中心，河北 邢台 054009）

摘要： 本文基于德龙钢铁公司 230 m^2 烧结机配备的烟气循环系统，分析了烟气循环技术应用前后各风箱支管烟气中 O_2 体积分数以及 CO、SO_2 与 NO_x 质量浓度的差异，并对这 4 种烟气成分质量浓度变化的原因及可能对烧结矿产、质量产生的影响进行了分析。结果表明：烟气循环后，风箱支管烟气中 O_2 平均体积分数较常规烧结下降了 13.26%，CO 平均质量浓度较常规烧结上升了 34.98%，烟气循环对 SO_2 和 NO_x 的减排效果明显，分别达到了 33.5% 和 20.7%；在实际应用过程中，通过对循环烟气组分、温度等参数的协同控制，并利用混风装置，将取自不同风箱的循环烟气和环冷热烟气有效混匀，确保烧结机上部循环烟罩内含氧量稳定在 18% 以上，温度达到（235 ± 25）℃范围。

关键词： 烧结；烟气；内循环；废气减排；烟气组分

中图分类号： X701 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000 - 8764（2022）05 - 0069 - 06

doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.073

Oxygen control of sintering flue gas circulation process and research on flue gas composition change

WANG Yanjiang[1], ZHONG Tingliang[2], WANG Jianfang[1], SHE Xuefeng[2], XUE Qingguo[2]

(1. *Delong Steel Co., Ltd., Xingtai* 054009, *Hebei, China*; 2. *State Key Laboratory of New Technology of Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*; 3. *Hebei Hot Rolled Strip Technology Innovation Center, Xingtai* 054009, *Hebei, China*)

Abstract: Based on the flue gas circulation system equipped with the 230 m^2 sintering machine of Delong Steel Co., Ltd., the differences in the volume fractions of O_2 and the mass concentrations of CO, SO_2 and NO_x in the flue gas of each bellow branch pipe before and after the application of flue gas circulation technology are analyzed, and the reasons for the change in the mass concentration of these 4 flue gas components and the possible impact on the output and quality of sinter are analyzed. The results show that after the flue gas cycle, the average volume fractions of O_2 in the flue gas of the bellow branch pipe decreases by 13.26% compared with conventional sintering, the average mass concentration of CO increases by 34.98% compared with conventional sintering, and the emission reduction effect of flue gas circulation on SO_2 and NO_x is obvious, reaching 33.5% and 20.7%, respectively. In the actual application process, through the coordinated control of the circulating flue gas components, temperature and other parameters, and the use of the mixed air device, the circulating flue gas, hot flue gas through circulating cooling taken from different bellows are effectively mixed to ensure that the oxygen content in the upper circulating hood of the sintering machine is stable at more than 18%, and the temperature reaches the (235 ± 25) ℃ range.

Key words: sintering; flue gas; inner loop; exhaust gas emission reduction; flue gas component

收稿日期： 2021 - 10 - 13；**修回日期：** 2021 - 12 - 13

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（U1960205）

作者简介： 王延江（1979—），男，工程师，从事烧结生产技术研究与管理工作。

通信作者： 佘雪峰（1978—），男，教授，从事能源高效转化与链接方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现代烧结生产在抽风过程中进行，其排放的烟气量较大，大约占到了钢铁生产烟气排放总量的40%，且含有多种环境污染物，如粉尘、SO_2、NO_x、二噁英、重金属等[1]。烧结烟气循环技术是一种主动将烧结过程中产生的部分载热烟气返回到烧结点火器后的台车上部烟气密封罩内，并使其重新参与烧结过程的一种烧结方法。通过该技术可以实现对热烟气的循环使用，将烟气中部分SO_2和NO_x等污染物有效消纳在烧结生产过程中，并回收利用烟气余热[2]。根据烟气循环方式的不同可将烟气循环工艺分为外循环和内循环两类。前者是被动接受主烟道的烟气进行循环，烟气循环量大，但是工艺简单粗放，对烧结过程产生的影响较大，在炉料结构以球团矿为主的欧洲应用比较广泛。相比之下，内循环工艺调控则更加灵活，通过有计划的主动选取进行循环的烟气以满足减排、节能、增产等多种需求，更加符合我国发展清洁绿色烧结技术的方向。研究发现，通过烧结烟气循环技术可实现25%～40%的烟气量减排，同时还能有效利用循环烟气的显热及其可燃成分，显著提高废气中粉尘和SO_x的脱除率，降低NO_x和二噁英类的生成量[3-5]。但同时由于烧结循环烟气具有高硫、低氧、高水分的特点，会对正常烧结过程带来一定影响，如可能会使烧结过程中氧化氛围淡化，进而阻碍针状铁酸钙的生成，或者使过湿带加厚，造成料层透气性恶化等负面影响[6-7]。

因此，本文以德龙钢铁公司230 m^2烧结机在常规烧结和烟气循环烧结两种情况下的烟气数据为分析对象，考察常规烧结与烟气循环烧结的烟气成分(O_2、CO、SO_2及NO_x)的差异及原因，并针对保证循环烟气含氧量及温度提出了相应的系统优化措施，以期为合理应用烟气循环技术提供参考与借鉴。

1 实际运行数据采集

德龙钢铁有限公司烧结厂230 m^2烧结机共有18个风箱，采用烧结烟气内循环工艺。其主要工艺流程为将烧结机机头、机尾部分风箱含氧量相对较高的热烟气循环至烧结机头部上方的循环烟罩中，使这部分烟气重新参与烧结过程，如图1所示。生产中，实际选取4#、5#、6#、16#、17#、18#风箱烟气，烧结烟气取风管道设有风量调节阀门，烟气循环比例可调节，也可灵活切换到原系统。

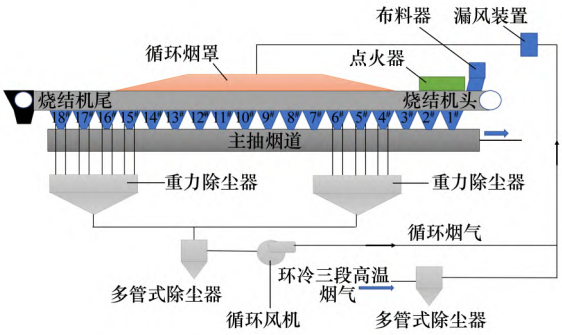


图1 德龙230 m^2烧结机烟气循环工艺示意

Fig. 1 Delong's 230 m^2 sintering machine flue gas circulation process flow chart

该烧结机在7～11月生产过程中的原、燃料条件如表1～3所示。由表1～3可知：烧结原、燃料的成分及性能基本稳定，因此对烧结

表1 7～11月烧结原、燃料配比(质量分数)

Table 1 Ratio of raw materials and fuel for sintering from July to November %

返矿	混合粉	氧化铁皮	生镁粉	钢渣粉	白灰	焦粉	洗精末
18.0	65.3	1.5	4.4	0.4	6.0	1.0	3.4

注：洗精末是一种燃料，来源于无烟煤的精洗过程。

表2 烧结铁粉粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size composition of iron ore powder %

+10 mm	8～10 mm	5～8 mm	3～5 mm	1～3 mm
1.5	3.0	20.7	23.1	51.7

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　焦粉的粒度组成(质量分数)

Table 3　Particle size composition of coke powder　　%

+10 mm	8 ~ 10 mm	5 ~ 8 mm	3 ~ 5 mm	1 ~ 3 mm	−1 mm
10.9	9.0	12.1	15.1	30.3	22.6

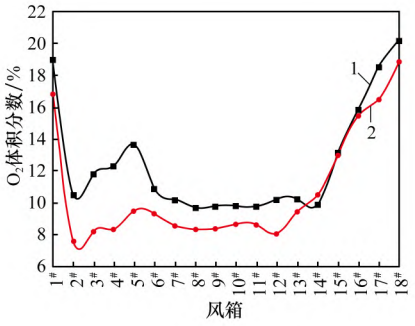
过程影响较小。本文将烧结机在常规烧结和烟气循环烧结两种情况下风箱支管烟气中 O_2、CO、SO_2 和 NO_x 的成分进行记录整理，分别在两种不同情况下采集 15 组烟气数据，通过对比分析得出烟气循环前后上述 4 种成分的变化情况，并对分析结果进行讨论。

2　结果与讨论

文中各烟气成分讨论，数据均来源于现场监测，每个风箱各取 10 组数据，取平均值作图。

2.1　O_2 体积分数变化

图 2 是烧结烟气循环前后各风箱支管烟气中 O_2 体积分数变化情况。由图 2 可以看出：两种情况下 O_2 体积分数变化的趋势相同，反应初期在 1#、2# 风箱快速下降；在烧结反应中期，燃烧反应最为剧烈，燃烧带厚度大，料层耗氧量大，因此 2# ~ 14# 风箱的含氧量较低；最后随着烧结反应进行到后期，烟气含氧量随之上升。



1—常规烧结；2—烟气循环烧结。

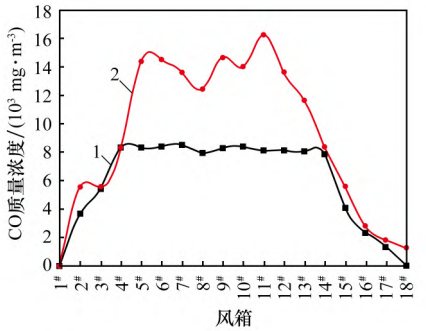
图 2　烟气循环烧结前后风箱支管烟气 O_2 体积分数变化

Fig. 2　Changes in the volume fraction of O_2 of flue gas in the wind box branch before and after the sintering of the flue gas cycle

此外，由数据分析结果可知，烟气循环烧结情况下风箱支管烟气中 O_2 平均体积分数较常规烧结下降了 13.26%，尤其是在烟气循环情况下的 2# ~ 4# 和 7# ~ 12# 风箱中，烟气含氧量只有 6% ~ 12%。一般认为含氧量低于 18% 时，各项烧结指标恶化，O_2 在整体为氧化过程的烧结过程中除了要提供燃料燃烧之外，还会影响铁酸钙的生成，因为氧气、氧化物及熔体的反应是铁酸钙生成的主要途径，含氧量的升高有利于熔体的氧位及熔体中 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比例的增大，进而促进冷却过程中铁酸钙从熔体中析出[8]；而含氧量降低会使垂直烧结速度减慢，燃烧带温度降低，淡化烧结过程中的氧化氛围，进而阻碍针状铁酸钙生成和烧结矿成矿，对烧结过程造成较大影响[9]。

2.2　CO 质量浓度变化

图 3 是烧结烟气循环前后各风箱支管烟气中 CO 质量浓度变化情况。由图 3 可以看出：两种情况下 CO 质量浓度变化的趋势相同，随着燃烧带和预热干燥带料层的增厚，碳和氧的反应越来越剧烈，产生的 CO 量越来越多，未完全燃烧的 CO 量也随之增多，因此在 2# ~ 4# 风箱位置 CO 质量分数迅速上升，5# ~ 14# 风箱位置处于平稳状态，随后逐渐降低。



1—常规烧结；2—烟气循环烧结。

图 3　烟气循环烧结前后风箱支管烟气 CO 质量浓度变化

Fig. 3　Changes in the mass concentration of CO of flue gas in the wind box branch before and after the sintering of the flue gas cycle

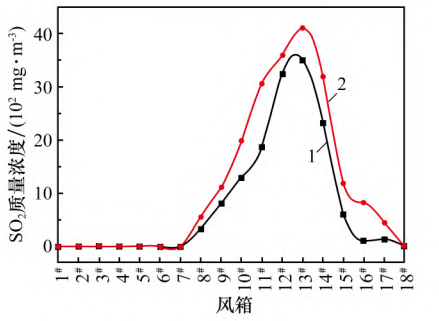
此外，由数据分析结果可知，烟气循环后，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

风箱支管烟气中 CO 平均质量浓度较常规烧结上升了 24.98%。主要是因为烧结燃料在烧结过程中燃烧产生的 CO 随着循环烟气重新参与了烧结过程，CO 作为可燃气体，在循环过程中再次通过烧结料层，部分 CO 燃烧放热，为烧结料层提供更多的热量，使得 CO 的潜热可得到了充分利用，降低了烧结工序 CO 的排放量，对铁前低碳排放有积极意义，有利于促进铁前系统朝绿色低碳方向发展，同时也为降低烧结系统能耗提供了可能性[10]，此外 CO 可抑制焦炭中含氮化合物向 NO 的进一步转化，进而降低烟气中 NO 的质量浓度。

2.3 SO_2 质量浓度变化

常规烧结与烟气循环烧结条件下风箱支管烟气 SO_2 质量浓度如图 4 所示。



1—烟气循环烧结；2—常规烧结。

图 4 烟气循环烧结前后风箱支管烟气 SO_2 质量浓度变化

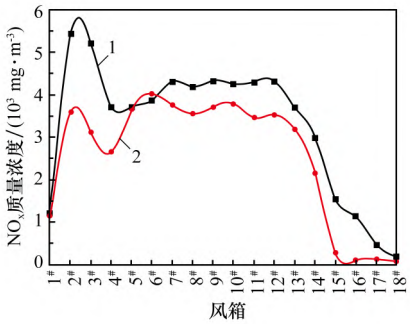
Fig. 3 Changes in the mass concentration of SO_2 of flue gas in the wind box branch before and after the sintering of the flue gas cycle

由图 4 可以看出：两种情况下 SO_2 质量浓度变化的趋势相同。烧结初期，润湿带中的熔剂对 SO_2 的吸收能力逐渐增强，因此在烧结前段 SO_2 的排放质量浓度较低；进入烧结中后期，润湿带逐渐消失，烧结混合料对 SO_2 的吸收能力也随之降低，其中蕴含的硫得以重新释放而回到烟气中，在高温带，焦粉燃烧与不稳定的亚硫酸盐分解产生大量新生 SO_2，SO_2 质量浓度达到最大值；烧结末期，随着燃料的耗尽，SO_2 质量浓度随之降低[11]。

此外，相较于常规烧结烟气，循环烧结烟气中的 SO_2 质量浓度降幅达到了 33.5%。循环烟气中的 SO_2 及新生 SO_2 主要被含水烧结料吸收，以亚硫酸、$CaSO_4$、$CaSO_3$ 的形式固定下来，使最终排放烟气中 SO_2 质量浓度降低，烧结过湿带中生石灰和水的质量分数是影响料层固硫能力的主要因素，混合料中 CaO 质量分数和水分增加，会增强其对 SO_2 的吸收能力。因此，当烧结混合料碱度升高时，意味着烧结矿中游离的 CaO 增多，对烟气中 SO_2 的吸收量增多，使烧结矿残余硫质量分数增加。刘臣[12]研究发现：当循环烟气中 SO_2 质量浓度高于 5 714.3 mg/m³ 时，烧结矿残余 S 质量分数高于常规烧结矿，此外循环烟气中 SO_2 质量浓度过高还可能产生 H_2SO_4 对管道和风机造成腐蚀；于恒[13]认为：因为烧结熔剂对 SO_2 存在吸收作用，影响了熔剂与铁矿粉的固相反应，使烧结液相生成量减少，以致于随 SO_2 质量浓度升高，烧结矿成品率和平均粒径逐渐降低。因此在选择循环风箱时应考虑 SO_2 质量浓度的影响，选择 SO_2 质量浓度适中的风箱，既能保证对 SO_2 的富集效率，又不会对烧结过程造成负面影响。

2.4 NO_x 质量浓度变化

常规烧结与烟气循环烧结条件下风箱支管烟气 NO_x 质量浓度如图 5 所示。由于烧结过程产生的 NO_x 主要为燃料型 NO_x，且 90% 以上是 NO，因此可将 NO 质量浓度视为 NO_x 质量浓



1—常规烧结；2—烟气循环烧结。

图 5 烟气循环烧结前后风箱支管烟气 NO_x 质量浓度变化

Fig. 5 Changes in the mass concentration of NO_x of flue gas in the wind box branch before and after the sintering of the flue gas cycle

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度。由图 5 可见，烟气循环技术应用前后 NO_x 质量浓度变化趋势基本相同，即在沿烧结机运行方向上，两者均呈两边低中间高的趋势。造成这种现象的原因是在烧结点火开始时，由于温度较低，烧结混合料中的大部分燃料还没开始燃烧，仅有少量的挥发分从燃料中挥发出来被氧化为 NO_x；随着烧结的进行，由于燃料中氮的燃烧温度高于其热解温度，因此大量燃料中的氮热解，与氧发生反应导致 NO_x 生成量增加；随着烧结过程结束，NO_x 质量浓度随之降低。

此外，常规烧结烟气条件下风箱烟气中 NO_x 质量浓度平均值为 324.81 mg/m^3，循环烧结条件下则为 257.59 mg/m^3，降幅达到了 20.7%。其主要是由于铁酸钙对 CO 还原 NO_x 的催化作用。徐春保等[14]研究表明，在无催化作用的条件下，CO 直接还原 NO_x 的能力非常小，最大的 NO_x 还原率仅有 3.0%；于恒等[13]通过研究发现，在有铁酸钙催化的条件下，NO_x 还原度达到 96.3%，且在烧结烟气中产生的 NO_x 质量浓度范围内，NO_x 基本不与烧结料层反应，对烧结矿显微结构及矿相组织没有影响。

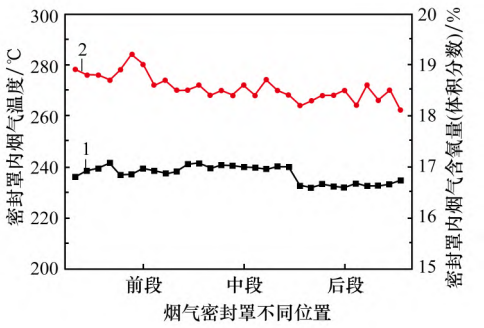
3　优化措施及效果

由于烧结烟气的温度和成分波动较大，使得循环烟气的含氧量及温度不稳定，而这两者对于烧结过程的影响很大，其中含氧量不仅影响烧结矿产、质量，还会影响烟气其他组分的质量浓度，此外 O_2 体积分数的改变会影响 CO、SO_2 和 NO_x 的质量浓度，而 CO 质量浓度的改变，也会对 NO_x 排放质量浓度产生影响。因此在对烟气循环技术进行优化时应注意考虑循环烟气中的含氧量。对此在原有烟气内循环工艺(图 1)的基础上，进行风箱灵活调控优化及含氧量差额补偿混风技术改进，并取得了良好的应用效果。

(1) 在原有将 4#、5#、6#、16#、17#、18# 风箱烟气进行循环的基础上增加一个 15# 风箱作为调风手段，每个风箱上面安装两个截风阀，可将风箱通往大烟道的通道截住，保证每一个风箱都可按照工艺要求和实际运行状况进行随意切换，当循环烟气含氧量较低时可用 15# 风箱烟气代替 6# 风箱烟气参与循环过程。

(2) 通过各风箱与主管道间调节阀的协同调配，采用混风装置对取自不同风箱的循环烟气和环冷热烟气有效混匀，实现对循环烟气含氧量、温度等参数的差额补偿，确保烧结机上部循环烟罩内各段含氧量稳定在 18% 以上，温度达到(235 ± 25) ℃范围。

系统优化后，在实际运行过程中对不同烟气密封罩位置(前段、中段和后段位置分别代表 4# ~ 7#，8# ~ 12#，13# ~ 15# 风箱)的循环烟气含氧量和温度进行监测，结果如图 6 所示。由图 6 可见，密封罩内循环烟气的温度的最大波动值为 4.05%；含氧量稳定在 18% 以上，有利于实现匀质、高强度烧结。



1—常规烧结；2—烟气循环烧结。

图 6　系统优化后烟气密封罩不同位置含氧量及烟气温度

Fig. 6　The oxygen content and flue gas temperature at fume seal are different positions of flue gas seal cover after the system optimization

4　结　论

(1) 不同风箱烟气参数变化与风箱所对应的料层状态密切相关，且烟气循环前后各风箱烟气成分的变化趋势保持一致，说明烟气循环技术的应用并未破坏正常烧结过程的规律。

(2) CO 和 NO_x 的质量浓度变化趋势一致，O_2 体积分数与 CO、NO_x 质量浓度变化趋势呈现负相关趋势。CO 与 NO_x 质量浓度的快速上升

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

段对应 O_2 体积分数的快速下降段，CO 与 NO_x 高质量浓度段对应 O_2 体积分数的低段，CO 与 NO_x 质量浓度的快速下降段对应 O_2 体积分数的快速上升段。

(3) 通过烧结烟气循环系统优化，密封罩内循环烟气温度的最大波动值为 4.05%；含氧量稳定在 18% 以上；烟气循环对 SO_2 和 NO_x 的减排效果明显，分别降低了 33.5% 和 20.7%，在保证烧结过程所需的氧体积分数情况下，有效地消纳了烧结过程中的烟气污染物。

(4) 烟气循环采用烟气混风装置，对取自不同风箱的循环烟气和环冷热烟气有效混匀，不仅可以提高循环烟气的氧体积分数，同时可利用环冷机废气提高循环风温，降低因烧结烟气温度波动对烟气循环过程造成的不良影响。

参考文献:

[1] 唐先觉. 我国烧结能耗现状及节能途径[J]. 烧结球团，1998,23(2):1-6.
TANG X J. China´s sintering energy consumption status quo and energy-saving ways [J]. Sintering and Pelletizing,1998,23(2):1-6.

[2] 李惠莹,王浩,金保昇. 浅谈烟气循环烧结工艺的发展现状及趋势[J]. 烧结球团,2018,43(1):61-65.
LI H Y,WANG H,JIN B S. Talk about the development status and trend of flue gas cycle sintering process [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(1):61-65.

[3] LONG H M,WU X J,CHUN T J,et al. Apilot-scale study of selective desulfurization via urea addition in iron ore sintering [J]. International Journal of Minerals,Metallurgy,and Materials,2016,23(11):1239-1243.

[4] LONG H M,LI J X. Influence of dioxin reduction on chemical composition of sintering exhaust gas with adding urea [J]. Journal of Central South University,2012,19(5),1359-1363.

[5] ZHANG Y,LIU B,SU Z,et al. Effect of CO and CO_2 content-insuction gas on sintering process for iron or [J]. ISIJ International,2014,54(8):1991-1993.

[6] 甘勤,何群. 影响钒钛烧结矿铁酸钙生成因素的研究[J]. 烧结球团,2008,33(2):9-14.
GAN Q,HE Q. The factors affecting the production of calcium ferrite,a sintered ore of niobium titanium,were studied [J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(2):9-14.

[7] 范振宇. 烟气循环烧结的基础研究[D]. 长沙:中南大学，2011:26-38.
FAN Z Y. Basic research on the sintering of the flue gas cycle [D]. Changsha:Central South University,2011. 26-38.

[8] 郑绥旭,张志刚,谢朝明. 烧结烟气循环工艺的应用前景[J]. 中国高新技术企业,2013(9):62-64.
ZHENG S X,ZANG Z G,XIE C M. The application prospect of sintered flue gas circulation process [J]. China High Technology Enterprises,2013(9):62-64.

[9] 潘建. 铁矿烧结烟气减量排放基础理论与工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2007:15-38.
PAN J. Basic theory and process research on emission reduction of sintered flue gas in iron ore [D]. Changsha:Central South University,2007:15-38.

[10] 杨红博,李咸伟,俞勇梅,等. 烧结烟气二噁英减排控制技术研究进展[J]. 世界钢铁,2011,11(1):10-15.
YANG H B,LI X W,YU Y M,et al. Progress was made in the research on the control technology of sintering flue gas dioxin emission reduction [J]. World Iron&Steel,2011,11(1):10-15.

[11] 龙红明,张向阳,李家新,等. 铁矿烧结过程 SO_2 的排放特性及过程脱硫的可行性研究[J]. 过程工程学报,2015,15(2):230-235.
LONG H M,ZHANG X Y,LI J X,et al. A feasibility study on the emission characteristics of SO_2 in the iron ore sintering process and the desulfurization of the process [J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2015,15(2):230-235.

[12] 刘臣. $SO_2/NO_x/CO_x$ 在铁矿石烟气循环烧结过程中的行为研究[D]. 长沙:中南大学,2013:45-56.
LIU C. Study on the behavior of $SO_2/NO_x/CO_x$ in the process of iron ore flue gas circulation sintering [D]. Changsha:Central South University,2013:45-56.

[13] 于恒. 铁矿烧结烟气循环中 SO_2 和 NO_x 过程控制与节能减排的协同优化[D]. 沈阳:东北大学,2016:45-56.
YU H. Co-optimization of SO_2 and NO_x process control and energy saving and emission reduction in iron ore sintering flue gas cycle [D]. Shenyang:Northeastern University,2016:45-56.

[14] 徐春保,吴胜利,苍大强,等. 金属氧化物对 CO 还原 NO 反应的催化作用[J]. 环境科学,1999(1):31-33.
XU C B,WU S L,CANG D Q,et al. Catalytic effect of metal oxides on the reduction of NO by CO [J]. Environmental Science,1999(1):31-33.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net