烧结烟气臭氧梯级氧化吸收工艺硫氮平衡研究

赵瑞壮[1]，邹 洋[2]，郜国平[1]，刘霄龙[2]，朱廷钰[2]
（1. 河北创洁环保工程有限公司，河北 石家庄 050000；2. 中国科学院过程工程研究所，北京 100190）

摘要：为明确臭氧梯级氧化吸收工艺中S、N元素的去向，提高系统脱硫脱硝效率以及副产品的再利用品质，降低烧结烟气中SO_2与NO_x的排放量，本文采用臭氧梯级氧化结合钙法密相干塔吸收工艺同时脱硫脱硝，研究臭氧梯级氧化吸收工艺在钢铁烧结烟气脱硫脱硝中的S、N平衡，通过CEMS烟气连续监测系统监测脱硫脱硝系统前后的SO_2和NO_x质量浓度，采用元素分析、离子色谱方法分别检测样品的S、N元素的质量分数，采用XRD、碘量法对样品分别进行物相分析和$CaSO_3$质量分数检测。结果表明，臭氧梯级氧化吸收工艺在钢铁烧结烟气脱硫脱硝的应用中，SO_2、NO_x的脱除效率分别为99.6%和88.9%，出口SO_2质量浓度低于10 mg/m^3，NO_x质量浓度低于30 mg/m^3，明显低于国家超低排放标准。系统净化前后的S平衡率为101.24%，N平衡率为90.25%，表明梯级氧化吸收工艺的S、N元素去向明确。此外，净化后吸收产物的分析结果表明，臭氧梯级氧化吸收工艺排出的吸收产物由$CaSO_3$、$CaSO_4$和$Ca(OH)_2$组成。其中，$CaSO_3$质量分数明显低于“SCR脱硝+半干法脱硫”工艺相应值。这表明，臭氧梯级氧化吸收工艺有利于$CaSO_3$向$CaSO_4$的转化，可提高净化系统的脱硫效率副产品的再利用品质。

关键词：梯级氧化；硫氮平衡；脱硫脱硝；烧结烟气
中图分类号：TF046.4；X701.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0089－06
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.059

Research on sulfur and nitrogen balance of ozone cascade oxidation absorption process of sintering flue gas

ZHAO Ruizhuang[1], ZOU Yang[2], GAO Guoping[1], LIU Xiaolong[2], ZHU Tingyu[2]
(1. Hebei Chuangjie Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China;
2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to clarify the destination of S and N elements in the ozone cascade oxidation absorption process, improve the desulfurization and denitrification efficiency of the system and the reuse quality of by-products, and reduce the emission of SO_2 and NO_x in the sintering flue gas, the ozone cascade oxidation is used combined with calcium-dense coherent tower absorption process to desulfurize and denitrify at the same time, research the balance of S and N in the desulfurization and denitrification of iron and steel sintering flue gas in the ozone cascade oxidation absorption process, and monitor the mass concentration of SO_2 and NO_x before and after the desulfurization and denitrification system through the CEMS flue gas continuous monitoring system, the mass fractions of S and N elements are detected by elemental analysis and ion chromatography, and the mass fractions of phase analysis and $CaSO_3$ are detected by XRD and iodometry. The results show that the removal efficiency of SO_2 and NO_x in the application of iron and steel sintering flue gas desulfurization and denitrification in the application of ozone cascade oxidation absorption process is 99.6% and 88.9%, respectively, the mass concentration of SO_2 at outlet is less than 10 mg/m^3, and the mass concentration of NO_x is less than 30 mg/m^3, which

收稿日期：2022－08－15；**修回日期**：2023－05－31
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51978644)
作者简介：赵瑞壮(1984—)，男，高级工程师，从事大气污染治理方面的研究工作。
通信作者：刘霄龙(1987—)，男，博士，副研究员，从事大气污染治理方面的研究工作。

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

is significantly lower than the national ultra-low emission standard. The S balance rate before and after system purification is 101.24%, and the N balance rate is 90.25%, indicating that the S and N element patterns of the cascade oxidation absorption process became clear. In addition, the analysis results of the absorption products after purification show that the absorption products discharged by the ozone cascade oxidative absorption process are composed of $CaSO_3$, $CaSO_4$ and $Ca(OH)_2$. Among them, the mass fraction of $CaSO_3$ is significantly lower than the corresponding value of "SCR denitrification + semi-dry desulfurization" process. This shows that the ozone cascade oxidation absorption process is beneficial to the conversion of $CaSO_3$ to $CaSO_4$, and improves the desulfurization efficiency of the purification system and the reuse quality of by-products.

Key words: cascade oxidation; sulfur and nitrogen balance; desulfurization and denitrification; sintering flue gas

在钢铁生产过程中，烧结工序是大气污染排放量最大的工序，其 SO_2、NO_x、二噁英排放量分别占整个钢铁行业排放总量的70%、48%和90%左右[1]。因此，在传统的烧结—高炉—转炉长流程钢铁生产结构中，钢铁超低排放普遍聚焦在烧结工序，从烟气污染物治理技术研发和应用上更是重点围绕脱硝来开展。随着钢铁行业超低排放限值的提出，烧结烟气已成为大气污染物治理的重要目标，研发出高效、低耗的烧结烟气硫硝治理技术已经成为当务之急，也是缓解大气污染的最有效的途径之一。

目前，烧结烟气的硫硝治理工艺主要有SCR脱硝+半干法脱硫工艺[2-5]、活性炭吸附工艺[6-8]、臭氧氧化吸收工艺[9-12]等。针对我国目前大多数烧结机已安装脱硫环保设施的现状，同时结合烧结烟气的工况特点以及综合考虑投资运行费用和场地等制约因素，臭氧氧化吸收工艺被认为是非常适用于烧结烟气的硫硝控制技术之一。十三五期间，相关科研单位在河钢唐钢240 m^2烧结机末端烟气现有"密相干法脱硫+布袋除尘"净化系统的基础上，共同研发了烧结烟气臭氧梯级氧化吸收工艺，其工程应用表明，烧结烟气经过臭氧梯级氧化吸收净化后，SO_2和NO_x排放质量浓度分别低于10 mg/m^3和30 mg/m^3，满足超低排放限制指标要求。

烧结烟气中NO组分占所有NO_x的90%以上，且由于NO物性特征难以直接与碱性吸收剂进行反应实现NO_x的脱除，因此通常将NO转化为较容易与碱性吸收剂发生反应的其它含"N"化合物，再进一步进行脱除。臭氧氧化-吸收技术工艺原理即是将NO氧化为更容易吸收的高价态NO_x(如：NO_2和N_2O_5等)，再与SO_2共同在脱硫塔中发生吸收反应进行脱除。通常认为，NO_x与吸收剂发生化学反应后生成亚硝酸盐和硝酸盐；然而，SO_2与吸收剂发生化学反应后生成的亚硫酸盐也有可能将亚硝酸根还原成N_2。

本文对该工艺技术的硫氮平衡展开深入研究，通过对净化系统入口和出口烟气量以及烟气中的SO_2、NO_x质量浓度和设备运行时间进行监测记录，计算得到净化系统中S、N输入总量，再根据系统排出吸收剂总量可计算得到理论上脱硫废灰中S、N元素的质量分数，进而得到S、N元素平衡率，分析数据可得系统输入和输出的S、N元素基本达到平衡的条件；最后根据XRD结果，进一步对吸收产物进行分析，明确该工艺技术中NO_x的主要吸收路径和原理。

1 工程应用和检测分析情况

1.1 工艺概况

本文以河钢唐钢240 m^2带式烧结机配套的净化设施作为研究对象，该系统采用的净化工艺为"臭氧梯级氧化+密相干塔吸收+布袋除尘"，其工艺流程如图1所示。由图1可知，烧结烟气经A、B烟道分别进入A、B净化系统进行处理后，汇合在一起，由烟囱排出。其中臭氧梯级氧化吸收技术的工艺原理：烧结原烟气在脱硫主塔前烟道内NO被第一、二级臭氧分布器喷入的O_3初步氧化为高价态NO_x，之后进入脱硫塔与吸收剂进行反应吸收；主塔内未进行反应吸收的NO_x被脱硫主、副塔之间设置的第三级臭氧分布器喷入的O_3进行氧化，在后端的脱硫副塔、布袋除尘器内与吸收剂进行进一步反应吸收，最后达标烟气由烟囱排放。整个系统共有5个烟气监测点，分别是A系统原始烟气监测点和脱硫脱硝后监测点、

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

B 系统原始烟气监测点和脱硫脱硝后监测点、烟囱总排口监测点。

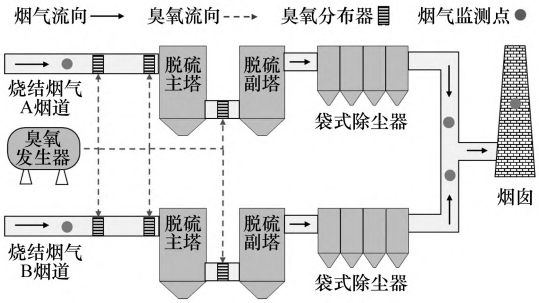


图 1　臭氧梯级氧化吸收工艺

Fig. 1　Ozone cascade oxidation absorption process

1.2　样品选取

从新鲜吸收剂中采集的样品记为样品 1(确定吸收剂本身的 S、N 元素质量分数)；A、B 净化系统运行稳定期间，第一日从 A 系统脱硫脱硝后排出的吸收剂中所采样记为样品 2；第一日从 B 系统脱硫脱硝后排出的吸收剂中所采样记为样品 3；第二日从 A 系统脱硫脱硝后排出的吸收剂中所采样记为样品 4；第二日从 B 系统脱硫脱硝后排出的吸收剂中所采样记为样品 5。从相同钢铁企业(烧结生产原料和污染物吸收剂品质基本一致)不同烧结机配套的“SCR 脱硝 + 循环流化床脱硫 + 布袋除尘”净化系统中排出的吸收剂中所采样记为样品 6(对比不同净化工艺的吸收产物)。

1.3　检测方法及仪器

净化系统入口和出口烟气中的 SO_2、NO_x 质量浓度由 CEMS 在线监测系统进行实时监测，系统排出的吸收剂总量由中控室生产人员详细记录。样品中 S、N 元素质量分数分别采用元素分析法(vario EL cube 型元素分析仪)和离子色谱法检测(DX-600 型离子色谱仪)进行分析检测。另外，通过 XRD(Rigaku SmartLab 9 kW 离子色谱仪 X 射线衍射仪)对各组样品进行物相分析，并采用碘量法对样品中 $CaSO_3$ 的质量分数进行滴定分析。

1.4　S、N 平衡率的计算

净化系统 S、N 平衡率是指系统排出吸收剂实际检测的 S、N 元素质量分数与根据系统进出口 SO_2、NO_x 质量浓度计算的吸收剂 S、N 元素应有质量分数的比值。烟气中的 S、N 元素进入净化系统中发生吸收反应后，大部分以固体的形式留在脱硫废灰中从系统排出，剩余小部分未被吸收的 S 和 N 元素随烟气从烟囱排出。根据净化系统入口和出口烟气量、污染物质量浓度和运行时间，可计算净化系统中 S、N 输入总量，再根据系统排出吸收剂总量可计算得到理论上脱硫废灰中 S、N 元素的质量分数。具体计算公式如下。

$$m_S = \frac{(C_S^1 - C_S^2) \times Q \times T}{M_S^1} \times M_S^2 \tag{1}$$

$$w_S^1 = \frac{m_S}{m_a} \times 100\% \tag{2}$$

$$\eta_S = \frac{W_S^2}{W_S^1} \times 100\% \tag{3}$$

$$m_N = \frac{(C_N^1 - C_N^2) \times Q \times T}{M_N^1} \times M_N^2 \tag{4}$$

$$w_N^1 = \frac{m_N}{m_a} \times 100\% \tag{5}$$

$$\eta_N = \frac{w_N^2}{w_N^1} \times 100\% \tag{6}$$

式中：m_S 为系统输入 S 元素总量，kg；C_S^1、C_S^2 分别为系统入、出口的 SO_2 质量浓度，kg/m^3；Q 为烟气流量(标况)，Nm^3/h；T 为系统运行时间，h；M_S^1、M_S^2 分别为 SO_2、S 的相对摩尔质量，g/mol；w_S^1 为排出吸收剂中 S 元素应有质量分数，%；m_a 为排出吸收剂总量，kg；η_S 为系统 S 元素平衡率；w_S^2 为排出吸收剂采集样品中检测的 S 元素质量分数，%；m_N 为系统输入 N 元素总量，kg；C_N^1、C_N^2 分别为系统入、出口 NO_x 质量浓度，kg/m^3；M_N^1、M_N^2 分别为 NO_2、N 相对摩尔质量，g/mol；w_N^1 为排出吸收剂中 N 元素应有质量分数，%；η_N 为系统 N 元素平衡率；w_N^2 为排出吸收剂采集样品中检测的 N 元素质量分数(烟气中 NO_x 质量浓度以 NO_2 计)，%。

2　结果与讨论

2.1　净化系统硫氮平衡分析

2.1.1　净化系统运行情况

针对臭氧梯级氧化吸收净化系统，运行参数主要包括净化系统入口和出口 SO_2 和 NO_x 质量浓度、烟气流量以及系统排出吸收剂总量，生产运行稳定期间的相应参数如表 1 所示。净化系统共

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

有5个监测点，相较于其它监测点，烟囱烟气流量最稳定、波动较小。因此，选择烟囱的流量作为烟气的流量进行计算。A、B净化系统入口和烟囱出口的SO_2、NO_x质量浓度在一定范围内波动，选取中间值作为入口和出口的质量浓度进行计算分析。

表1 系统运行参数

Table 1 System operation parameters

项目名称	波动范围	选取参数
烟囱烟气流量(标况)/(10^4 $Nm^3 \cdot h^{-1}$)	65～75	70
A、B系统入口SO_2质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	1 100～1 400	1 250
烟囱出口SO_2质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	0～10	5
A、B系统入口NO_x质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	200～250	225
烟囱出口NO_x质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	20～30	25
第一日A、B系统排出吸收剂总量/t	155	155
第二日A、B系统排出吸收剂总量/t	130	130

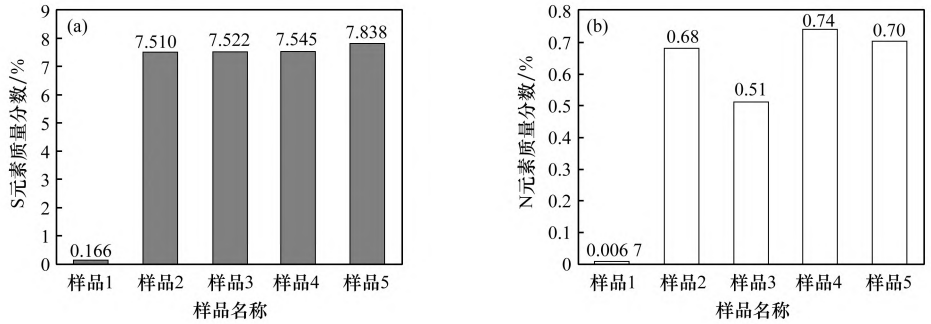
2.1.2 系统输入S/N元素总量及排出吸收剂中S/N应有质量分数

根据臭氧梯级氧化吸收净化系统运行参数：烟囱烟气流量、净化系统入口和烟囱出口的SO_2和NO_x质量浓度、运行时间，代入式(1)和(4)，计算得出系统生产运行24 h，A、B系统输入S元素总质量为10 458 kg，输入N元素总质量为1 022.61 kg。

第一日A和B系统排出吸收剂155 t，代入公式(2)和(5)，排出吸收剂中S元素应有质量分数为6.75%，N元素应有质量分数为0.66%。第二日A和B系统排出吸收剂130 t，代入公式(2)和(5)，排出吸收剂中S元素应有质量分数为8.04%，N元素应有质量分数为0.79%。生产运行两日，A、B系统输入S元素总质量为20 916 kg，输入N元素总质量为2 045.22 kg。两日系统排出吸收剂共计285 t，排出吸收剂中S元素应有质量分数为7.33%，N元素应有质量分数为0.72%。

2.1.3 系统S/N元素平衡率计算

对所选取的样品进行元素质量分数检测，检测结果如图2所示。S元素质量分数是通过元素分析仪直接检测得出，样品中的S元素经高温氧化燃烧生成SO_2，并在载气的推动下，进入分离检测单元；S元素的氧化物经吸附-脱附柱的吸附解析作用，S被分离测定。N元素质量分数是通过离子色谱测量样品中的硝酸盐和亚硝酸盐的含量确定的。从检测结果可知，样品1新鲜吸收剂中含有少量的S、N元素；样品2、3相比样品4、5中S元素和N元素质量分数均相对要少一些，这与系统运行时长有直接关系；对于在A、B不同系统同一周期采集的样品2和样品3、样品4和样品5中的S/N元素质量分数还是比较接近的。其中，样品3的N元素质量分数与其它样品相差较大，这可能是与净化系统入口NO_x的质量浓度波动或选取的样品自身未能充分参与吸收反应有关系。



(a) S；(b) N

图2 样品中S和N元素的质量分数

Fig. 2 Nass fraction of S element and N element in the sample

根据样品实际检测的元素质量分数和计算的元素应有质量分数，代入公式(3)和(6)，计算出系统S/N元素平衡率如图3所示。由图3可知，系统S/N元素平衡率大于89%，系统输入和输出

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

的 S 元素和 N 元素基本达到平衡。其中，第一日的 S 平衡率为 108.94%，输出的 S 元素大于输入，这可能是第一日系统实际入口的 SO_2 质量浓度比选定的质量浓度相对要高，导致计算的 S 元素应有质量分数偏小。对于系统 N 元素平衡率，第一、二日以及两日平均的平衡率都在 90% 左右，这说明烟气中的 NO_x 被吸收后，主要以硝酸盐和亚硝酸盐的形式保留在吸收剂中，即输入的 N 元素很少或没有以 N_2 的形式从系统中输出。N 元素未达到完全平衡主要原因分析：由于烧结生产工况波动性较大，A、B 系统入口烟气量和 NO_x 质量浓度参数变化等的不确定性，导致选定参数计算的 N 元素总量比实际输入的 N 元素总量可能偏高。

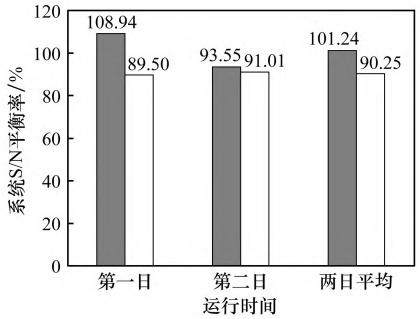


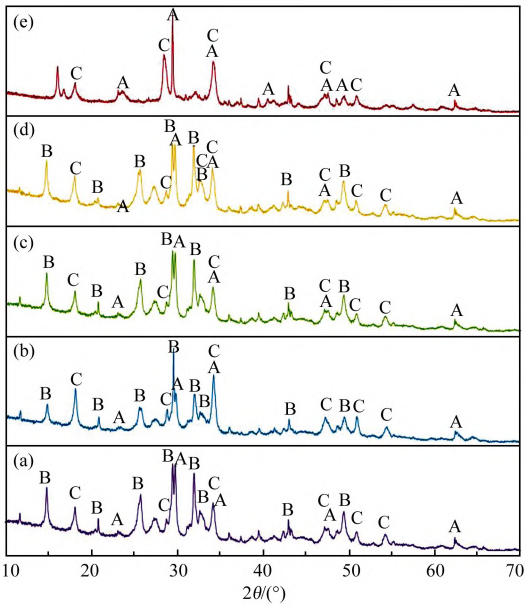
图 3　系统 S/N 元素平衡率

Fig. 3　S/N element balance rate of the system

2.2　吸收产物分析

梯级氧化吸收工艺是利用臭氧先将烟气中的 NO 氧化为 NO_2，然后在脱硫塔内进一步氧化为 N_2O_5，再通过吸收剂与 SO_2 一并吸收。相对于“SCR 脱硝 + 半干法脱硫”技术，臭氧梯级氧化吸收工艺在脱硫塔内不仅同时吸收脱除 NO_x，还同时存在氧化反应。因此，有必要对吸收后的产物进行进一步分析，并与“SCR 脱硝 + 半干法脱硫”技术排出的吸收剂进行了对比分析。

首先，对样品进行 XRD 物相分析，其检测图谱如图 4 所示。由图 4 可以看出：臭氧梯级氧化吸收工艺排出的吸收剂样品 2 到样品 5 检测出的主要组分为 $CaSO_3$、$CaSO_4$ 和 $Ca(OH)_2$，而“SCR 脱硝 + 半干法脱硫”排出吸收剂样品 6 中检测出的组分为 $CaSO_3$ 和 $Ca(OH)_2$。新鲜吸收剂的主要成分是 $Ca(OH)_2$，吸收 SO_2 后生成 $CaSO_3$，$CaSO_3$ 氧化后会进一步生成 $CaSO_4$。臭氧梯级氧化吸收工艺的脱硫塔内存在强氧化剂臭氧，能较快地将 $CaSO_3$ 氧化为 $CaSO_4$；“SCR 脱硝 + 半干法脱硫”工艺在脱硫塔内虽然存在氧气，但 $CaSO_3$ 被氧化为 $CaSO_4$ 的反应速率很慢，使得副产物脱硫灰中的 $CaSO_4$ 质量分数非常少，以至于样品 6 中没有明显检测到 $CaSO_4$ 组分。



（a）样品 2；（b）样品 3；（c）样品 4；（d）样品 5；（e）样品 6

A—$CaSO_3$；B—$CaSO_4$；C—$Ca(OH)_2$。

图 4　XRD 检测图谱

Fig. 4　XRD detection map

为进一步对比两种不同净化工艺副产物的差别，同时对样品 $CaSO_3$ 质量分数进行测量分析，结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，样品 2 到样品 5 的 $CaSO_3$ 质量分数明显要低于样品 6，结合图 4 的 XRD 图谱，这说明臭氧梯级氧化吸收工艺在吸收过程中产生的 $CaSO_3$ 大量被氧化为 $CaSO_4$，从而导致样品中的 $CaSO_3$ 质量分数减少。

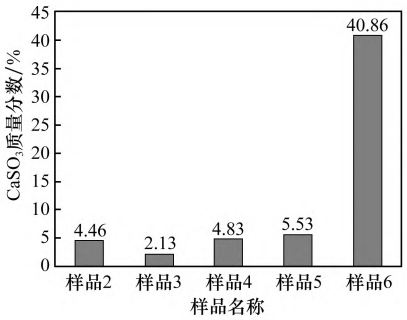


图 5　吸收剂中的 $CaSO_3$ 质量分数

Fig. 5　$CaSO_3$ mass fraction in absorbent

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

3 结 论

本文通过研究钢铁烧结烟气臭氧梯级氧化吸收工艺在工程实践应用中的硫硝平衡，明确了该工艺脱硫脱硝过程中硫元素和氮元素的去向，厘清了脱硫塔内复杂组分中 NO_x 吸收反应的主要路径或原理。得到如下结论：

（1）臭氧梯级氧化吸收净化系统排出的吸收剂样品 S 平衡率为 101.24%，N 平衡率为 90.25%，排除生产波动导致选取参数误差的计算结果影响外，可以确定臭氧梯级氧化吸收工艺的 S、N 元素输入和输出基本平衡，去向明确。

（2）臭氧梯级氧化吸收工艺排出的吸收剂中 $CaSO_3$ 质量分数要明显低于“SCR 脱硝 + 半干法脱硫”工艺，即提高了脱硫副产物中的 $CaSO_4$ 组分质量分数，从当前脱硫副产物主要应用于建材等行业角度去综合考虑，相当于臭氧梯级氧化吸收工艺有助于提高脱硫副产物的再利用品质。

参考文献：

[1] 魏进超. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[C]//第十二届中国钢铁年会. 北京：中国金属学会，2019：134.
WEI Jinchao. Steel sintering flue gas emission reduction technology[C]//The 12th China Steel Annual Conference. Beijing：China Metal Society，2019：134.

[2] 苗慧源，隋孝利，吴迪，等. 河钢承钢烧结烟气治理现状及超低排放改造[J]. 河北冶金，2019(S1)：141－145.
MIAO Huiyuan，SUI Xiaoli，WU Di，et al. The current situation and ultra low emission transformation of sintering flue gas treatment in Chenggang，Hegang[J]. Hebei Metallurgy，2019(S1)：141－145.

[3] CHEN W，HU F，QIN L，et al. Mechanism and performance of the SCR of NO with NH_3 over sulfated sintered ore catalyst[J]. Catalysts，2019，9(1)：90.

[4] 倪建东，陈活虎，薛玉业，等. 烧结烟气 SCR 脱硝系统的数值模拟及工程验证[J]. 化工环保，2018，38(5)：581－586.
NI Jiandong，CHEN Huohu，XUE Yuye，et al. Numerical simulation and engineering verification of SCR denitrification system for sintering flue gas[J]. Chemical Environmental Protection，2018，38(5)：581－586.

[5] CHEN W，LI Z，HU F，et al. In-situ DRIFTS investigation on the selective catalytic reduction of NO with NH_3 over the sintered ore catalyst[J]. Applied Surface Science，2018(439)：75－81.

[6] 杨小白，韩云龙，李迎根，等. 活性炭混合钢渣烧结烟气脱硫脱硝实验研究[J]. 过程工程学报，2019，19(2)：440－446.
YANG Xiaobai，HAN Yunlong，LI Yinggen，et al. Experimental study on desulfurization and denitrification of flue gas during sintering of activated carbon mixed steel slag[J]. Journal of Process engineering，2019，19(2)：440－446.

[7] 崔岩，朱繁，董艳苹，等. 活性炭脱硫脱硝技术在烧结烟气治理中的应用[J]. 硫酸工业，2021(6)：44－48.
CUI Yan，ZHU Fan，DONG Yanping，et al. Application of activated carbon desulfurization and denitrification technology in sintering flue gas treatment[J]. Sulfuric acid industry，2021(6)：44－48.

[8] ZHANG W J，RABIEI S，BAGREEV A，et al. Study of NO adsorption on activated carbons[J]. Applied Catalysis B：Environmental，2008，83(1－2)：63－71.

[9] 侯长江，田京雷，王倩. 臭氧氧化脱硝技术在烧结烟气中的应用[J]. 河北冶金，2019(3)：67－70.
HOU Changjiang，TIAN Jinglei，WANG Qian. Application of ozone oxidation denitrification technology in sintering flue gas[J]. Hebei Metallurgy，2019(3)：67－70.

[10] 江厚月. 工业锅炉烟气臭氧法脱硝应用技术浅析[J]. 山东化工，2016(24)：150－153.
JIANG Houyue. Analysis of the application technology of ozone method for denitrification of industrial boiler flue gas[J]. Shandong Chemical Industry，2016(24)：150－153.

[11] 张瑞，张佳，郭少鹏，等. 臭氧氧化同时脱除烟气中 NO 和 SO_2 的研究[J]. 化学世界，2015(3)：158－161.
ZHANG Rui，ZHANG Jia，GUO Shaopeng，et al. Study on simultaneous removal of NO and SO_2 from flue gas by ozone oxidation[J]. Chemical World，2015(3)：158－161.

[12] 张相. 臭氧结合钙基吸收多种污染物及副产物提纯的试验与机理研究[D]. 杭州：浙江大学，2012.
ZHANG Xiang. Experimental and mechanism study on ozone combined with calcium based absorption of various pollutants and byproduct purification[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2012.

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