活性炭法烟气脱硝率的影响因素与测试方法优化

蔡 嘉[1a]，康建刚[1b]，梁明华[1a]，赵利明[2]，葛彦凯[1b]，魏进超[1b]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司 a. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司；b. 工程技术研究中心，湖南 长沙 410205；2. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524072）

摘要： 随着钢铁工业污染问题的日益凸显与环保排放标准的大幅趋严，烧结烟气脱硝已成为钢铁污染治理的重点和难点。活性炭法脱硝具有安全稳定、抗硫抗水和对烟气温度要求低等优势，是一种极具应用前景的低温脱硝技术。本文针对烧结烟气波动大、工艺控制难的问题，研究 O_2 体积分数、湿度、入口 NO 体积分数、空速及氨氮摩尔比对活性炭脱硝的影响规律，并对 GB/T 30202—2013 和 GB/T 35254—2017 中脱硝率的测试参数进行比较分析。结果表明：活性炭脱硝以 NH_3-SCR 为主，物理吸附脱硝的贡献比为 29.1%；烟气条件变化显著影响活性炭脱硝率，O_2 体积分数、NO 体积分数、氨氮摩尔比与脱硝率呈正相关关系，湿度、空速与脱硝率呈负相关关系；此外，建议取反应末期 5 h 的脱硝率平均值作为 GB/T 35254—2017 的测试值。

关键词： 烧结；烟气；活性炭；脱硝；测试方法；优化
中图分类号： TF046.4；X701.7 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0095－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.028

Influencing factors and optimization on test method of flue gas denitration rate by activated carbon method

CAI Jia[1a], KANG Jiangang[1b], LIANG Minghua[1a], ZHAO Liming[2], GE Yankai[1b], WEI Jinchao[1b]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd. a. Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd.; b. Engineering Technology Research Center, Changsha 410205, Hunan, China; 2. Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524072, Guangdong, China)

Abstract: With the increasing prominence of pollution problems in iron and steel industry and the sharp tightening of environmental protection emission standards, the denitration of sintering flue gas has become the focus and difficulty of pollution control in iron and steel iudustry. Activated carbon denitration has the advantage of safety, stability, sulfur resistance, water resistance, and low requirements for flue gas temperature, and it is a low-temperature denitration technology with great application prospects. Aiming at the problem of large fluctuation of sintering flue gas and difficult process control, the effects of O_2 volume fraction, humidity, inlet NO volume fraction, airspeed and ammonia/nitrogen molar ratio on activated carbon denitration are studied, and the test parameters of denitration rate in GB/T 30202—2013 and GB/T 35254—2017 are compared and analyzed. The results show that NH_3-SCR is the main source of activated carbon denitration, and the contribution ratio of physical adsorption denitration is 29.1%. The denitration rate of activated carbon is affected by the change of flue gas conditions significantly, and the volume fraction of O_2, the volume fraction of NO, and the molar ratio of ammonia/nitrogen are positively correlated with the denitration rate, while humidity and airspeed are negatively correlated with denitration rate. In addition, it is recommended to take the average denitration rate of 5 h at the

收稿日期： 2022－03－17；**修回日期：** 2022－06－21
基金项目： 国家重点研发计划重点专项资助项目(2021YFB3500600)；湖南省创新平台与人才计划资助项目(2020RC4027)
作者简介： 蔡 嘉(1982—)，男，工程师，从事环保工程运行维护、项目管理等工作。
通信作者： 康建刚(1990—)，男，工程师，从事环保新材料制备及新工艺开发、副产物资源化利用等方面的研究工作。

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

end of the reaction as the test value of GB/T 35254—2017.

Key words: sintering; flue gas; activated carbon; denitration; test method; optimization

钢铁工业是国民经济的重要基础产业，是国家经济水平和综合国力的重要标志[1]。2022年我国粗钢产量为10.13亿吨，位列全球第一，占全球粗钢总产量的56.7%。然而，钢铁生产过程具有流程长、能耗高、污染排放物种类多和总量大等特点，已成为污染物排放第一大户，其颗粒物、二氧化硫、NO_x排放量分别占全国排放总量的30.1%、13.7%、15.7%[2-3]。活性炭烟气多污染物协同高效净化技术(简称“活性炭法烟气净化技术”)具有多污染物协同处置、副产物资源化利用、高度节水和不产生二次污染等优势[4]，被列入国家鼓励发展的重大环保技术装备目录。活性炭因具有发达的孔隙结构、较大的比表面积、丰富的含氧官能团及较好的抗水抗硫稳定性，可在原烟气超低温工况下直接应用，避免了烟气升温能耗高及碳排放的问题，是一种优异的低温脱硝材料[5-6]。目前该技术已在宝钢股份、太钢、邯钢等国内外大型钢铁企业得到应用，在(超)低温脱硝领域取得了良好的示范效应[7-9]。然而，该技术应用的同时暴露出工艺控制难度大、烟气工况波动导致脱硝效率不稳定、脱硝率测试方法待优化等问题。

脱硝率在实际工程应用中意义重大，是活性炭法烟气净化技术工程设计的重要指标。由于烟气的条件参数显著影响脱硝过程，本文重点研究O_2体积分数、湿度、NO体积分数、空速及氨氮摩尔比等因素对活性炭法脱硝的影响，并进一步优化活性炭法烟气脱硝率测试计算方法，为工况波动下脱硝率的变化规律提供指导。

1 脱硝率的测试方法及装备

活性炭法烟气脱硝分为物理吸附、催化氧化、催化还原和非催化还原4个阶段。物理吸附阶段：活性炭表面微孔直接决定了NO_x的物理吸附量，为NO_x转化提供微反应器；催化氧化阶段：活性炭表面的极性/碱性官能团能促进O_2和NO吸附，有利于NO氧化为NO_2；催化还原阶段：活性炭表面酸性官能团与NH_3提供的孤对电子结合，吸附的NH_3在活性吸附氧作用下失去H形成中间体$-NH_2$，吸附态NO或NO_2与吸附态NH_3或中间体$-NH_2$在氧化作用下发生歧化反应生成N_2和H_2O；非催化还原阶段：活性炭表面的氨与烟气中的SO_2发生反应生成氧化硫氨或硫氨，活性炭再生时该物质作为$-NH_n$基化合物残留于活性炭微孔中，脱硝时$-NH_n$与烟气中的NO直接反应还原为N_2[10]。

脱硝率测试参考的标准主要有《脱硫脱硝用煤质颗粒活性炭试验方法》(GB/T 30202—2013)和《烟气集成净化专用碳基产品》(GB/T 35254—2017)，二者测试基本参数如表1所示。其中，采用GB/T 30202—2013进行测试时，每120 min测量一次尾气的NO体积分数，当连续4次测量的差值不大于0.000 5%时，停止试验；采用GB/T 35254—2017进行测试时，每1 h测量一次尾气NO体积分数，连续测量20 h。

表1 GB/T 30202—2013和GB/T 35254—2017中脱硝率的测试参数

Table 1 Test parameters of denitration rate in GB/T 30202—2013 and GB/T 35254—2017

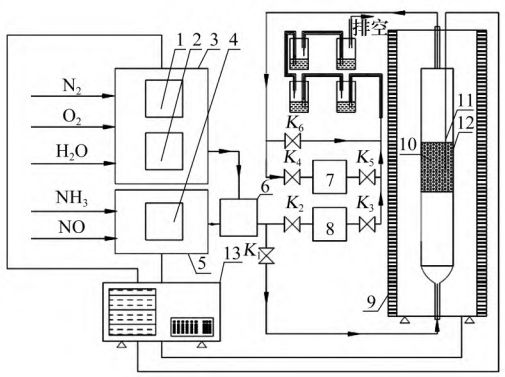
项目	反应器内径/mm	烟气流向	样品数量/L	模拟烟气体积/(L·min^{-1})	体积分数(干基)/%			湿度/%	反应温度/℃
					NO	NH_3	O_2		
GB/T 30202—2013	108	上进下出	7.8	52.00	0.02	0.020	6.4	8	120±5
GB/T 35254—2017	50	下进上出	~1(500 mm料层)	4.42	0.04	0.032	17.0	10±1	120±2

此外，由表1可见：二者的测试条件有明显区别，尤其是GB/T 30202—2013规定O_2体积分数为6.4%、湿度为8.0%，这与铁矿烧结的烟气条件存在较大差异；且空速为400 h^{-1}(由模拟烟气量和样品量计算得到)较工程应用条件偏高，其测试结果对工程指导意义不强。因此，目前钢铁行业主要采用GB/T 35254—2017进行脱硝率测试。

采用GB/T 35254—2017进行脱硝率测试的系统示意如图1所示。混合模拟烟气由NO、O_2、NH_3、水蒸气及平衡气氮气组成，气体混匀后通入

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

反应器活性炭固定床层，烟气中的 NO 得以脱除，尾气经净化装置处理后排出。



1—配气模块 1；2—加湿模块；3、5—计算机自动配气系统 1、2；4—配气模块 2；6—混气罐；7、8—烟气分析仪 1、2；9—计算机自动控温反应炉；10—活性炭吸附产品层；11—热电偶；12—固定床反应器；13—计算机自动控制显示系统；K_1 ~ K_6—阀门。

图 1　脱硝率测试系统示意

Fig. 1　Schematic diagram of denitration rate test system

2　脱硝率的影响因素分析

在固定床反应装置上开展 GB/T 35254—2017 脱硝率的测试试验，采用控制单一变量法研究工艺参数对脱硝效果的影响规律。试验基础反应条件：反应温度为 120 ℃、湿度为 10%、O_2 体积分数为 16%、NO 体积分数为 0.04%、NH_3 体积分数为 0.032%，采用 N_2 作为平衡气。

2.1　O_2 体积分数

为消除活性炭表面吸附氧的影响，模拟烟气通入前使用高纯氮气在 120 ℃下吹扫 30 min，再进行测试试验，结果如图 2 所示。由图 2 可知：烟气中不含氧时，活性炭的脱硝能力极其有限，仅为 15.3% 左右，这是由于传统的 SCR 反应过程需要氧的参与，而无氧时 NO_x 在活性炭发达的微孔结构中发生了物理吸附。随着模拟烟气系统中 O_2 体积分数的增加，活性炭的脱硝率持续提高，但当 O_2 体积分数超过 10% 后，脱硝率的增加趋势逐渐平缓。在 O_2 体积分数为 16% 时脱硝率为 52.6%，较无氧条件时提高了 37.3%，这说明模拟烟气条件下活性炭的脱硝以 NH_3-SCR 反应过程为主，表面微孔结构物理吸附脱硝为辅，物理吸附脱硝占整体脱硝的 29.1%。已有研究表明，O_2 的存在能促进吸附到 L 酸位上的 NH_3 发生脱氢反应生成 NH_2，并能够大大促进 NO 在催化剂表面吸附生成硝酸盐和吸附态的 NO_2，从而促进低温下的 SCR 反应[11]。而烧结烟气中 O_2 体积分数通常为 13% ~ 18%，这可以满足活性炭 SCR 反应过程对氧的需求。

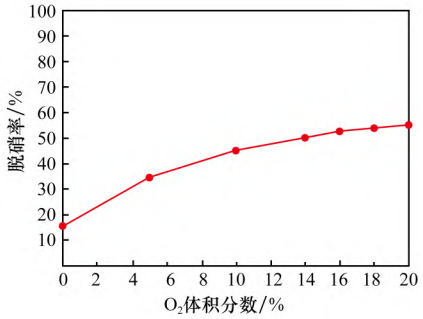


图 2　O_2 体积分数对活性炭脱硝效率的影响

Fig. 2　Effect of oxygen content on denitration efficiency of activated carbon

2.2　湿度

实际烧结烟气中含有 5% ~ 20% 的水蒸气，同时脱硝反应过程也有 H_2O 产生，因此研究 H_2O 对活性炭脱硝性能的影响十分必要。对湿度为 0% ~ 20% 时活性炭的脱硝性能进行试验，结果如图 3 所示。由图 3 可以看出，当模拟烟气中通入 H_2O 后，活性炭的脱硝率明显下降。这是由于 H_2O 与反应气体和反应产物（NH_3 和 NO）在活性炭表面的活性位点上发生了竞争吸附，这种现象在低温脱硝过程中尤其明显[12]；而且，H_2O 作为脱硝反应的产物，不利于反应的正向进行[5]。

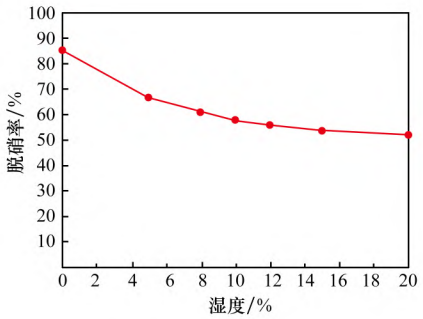


图 3　湿度对活性炭脱硝效率的影响

Fig. 3　Effect of humidity on denitration efficiency of activated carbon

2.3　NO 体积分数

为研究活性炭对烟气中 NO 体积分数的适应

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

性，对不同 NO 体积分数下活性炭的脱硝性能进行试验，结果如图 4 所示。由图 4 可知：随着 NO 体积分数的提高，活性炭的脱硝率显著提升，这与常规 V-W-Ti 体系催化剂随 NO 体积分数升高脱硝率降低的变化规律[13]截然相反。分析原因认为：活性炭作为一种以纳米孔为主、BET 比表面积高达 200 m^2/g 的多孔吸附材料，低温条件下对 NH_3 具有较大的物理吸附容量[14]，NO 体积分数提高的同时喷入 NH_3 的体积分数也相应提高，导致 NH_3 吸附量提高，为 NH_3-SCR 过程提供了更加充足的 NH_3 源，表现为脱硝率提高；另一方面，活性炭的 NH_3 吸附量随着 NH_3 不断喷入及 NH_3-SCR 过程消耗的动态变化，脱硝率提高导致 NH_3 消耗增加，NH_3 源过剩量减小，表现为随着 NO 体积分数的提高活性炭脱硝率增幅趋缓。以上结果表明，在低温 SCR 脱硝领域，得益于较大的 NH_3 物理吸附容量，活性炭较常规 V-W-Ti 催化剂具有更加优异的 NO 体积分数适应窗口，尤其在高 NO 体积分数烟气条件下，活性炭具有无可比拟的低温脱硝优势。

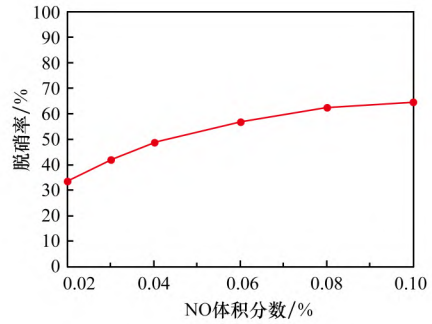


图 4 NO 体积分数对活性炭脱硝率的影响

Fig. 4 Effect of NO volume fraction on denitration efficiency of activated carbon

2.4 空速

在总烟气量不变的情况下，合理设定活性炭体积，寻求最佳系统空速是设计、建造脱硝系统首先需要考虑的问题。为此，进行空速对活性炭脱硝效率的影响试验，结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，在空速增大即反应时间减小的情况下，活性炭的脱硝率显著降低。分析原因认为：在低空速下，烟气与活性炭表面有更充分的接触时间，外扩散作用效果增强，有助于提高活性炭的脱硝率；在高空速下，烟气与活性炭表面的接触时间明显缩短，内扩散过程难以充分进行，并且随着空速的不断增大，外扩散过程也进行不充分，导致脱硝效率下降[12]。

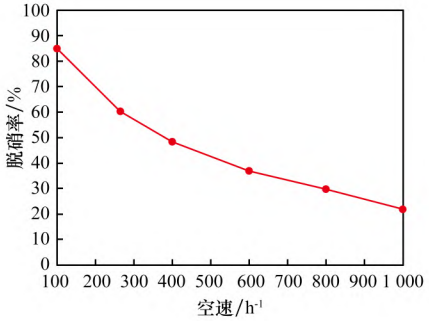


图 5 空速对活性炭脱硝率的影响

Fig. 5 Effect of space velocity on denitration rate of activated carbon

2.5 氨氮摩尔比

在化学反应中，增大反应物的浓度可以促进反应向正反应方向进行。进行氨氮摩尔比对脱硝性能的影响规律试验，结果如图 6 所示。由图 6 可知，随着 NH_3 投入量的增加，活性炭的脱硝率先显著升高后趋于稳定。NH_3 进入活性炭所在的反应器之后主要吸附在活性炭表面，形成过渡态化合物来起到催化还原作用。当氨氮摩尔比小于 1 时，少量的 NH_3 不足以满足 NO 还原需要，NH_3 量显著影响活性炭的脱硝效率；当氨氮摩尔比大于 1 时，活性炭表面 NH_3 的吸附量升高，NO 转化率有了一定程度的提高。但活性炭表面吸附 NH_3 是有限的，其反应位点饱和后，通入过量 NH_3 对提高活性炭脱硝率无益，而过量的 NH_3 还会与烟气的中的硫化物发生反应，形成硫酸盐附着在活性炭表面，从而堵塞活性孔道，并会腐蚀气体管道及脱硝装置[15]。

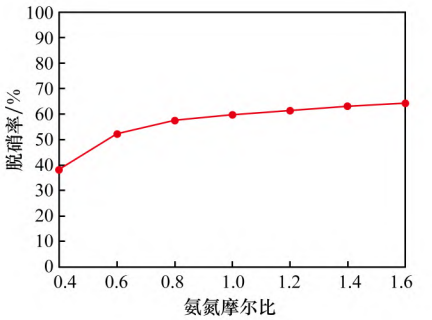


图 6 氨氮摩尔比对活性炭脱硝效率的影响

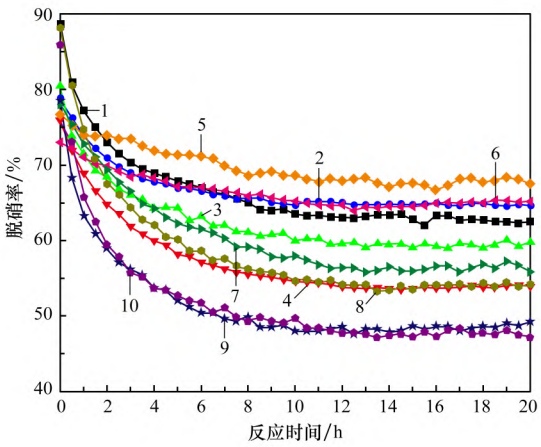
Fig. 6 Effect of molar ratio of ammonia to nitrogen on denitration efficiency of activated carbon

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

3　脱硝率测试方法的优化

3.1　随机测试结果

随机抽取国内不同地区和厂家生产的活性炭，分别编号为试样 1 ~ 10，参照 GB/T 35254—2017 进行脱硝率测试试验，结果如图 7 所示。由图 7 可以看出：在初始阶段，活性炭的脱硝率普遍偏高，推测此时同时发生了物理吸附脱硝和 SCR 脱硝；约 10 h 后，物理吸附趋于饱和，脱硝进入稳定阶段，且初始值与稳定值并不一致，可见初始脱硝率并不具有代表性。此外，GB/T 35254—2017 中关于脱硝率的测算方法笼统地表述为“当 SCR 反应达到平衡时，脱除的 NO_x 与通入的模拟烟气中的 NO_x 的比值即为碳基产品的脱硝率”，这种说法对如何取值并无明确限定。对试验原始数据进行分析可知，从 4 h 起，出口烟气中 NO 小时均值的变化绝对值均小于 0.005%，满足 SCR 反应平衡的条件，但试验仍未达到稳定脱硝过程。

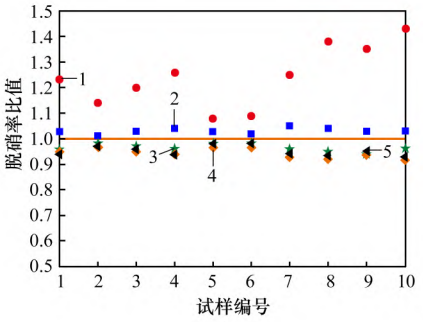


1 ~ 10—试样 1 ~ 10。

图 7　随机测试试样的脱硝率随时间的变化情况

Fig. 7　Changing situation of denitration rate of random test sample

为量化测试过程的稳定脱硝阶段，以 20 h 全程测试过程的脱硝率平均值为基准，分别计算 1、5、10、15、20 h 时试样 1 ~ 10 的脱硝率平均值，并计算以上各阶段脱硝率平均值与 20 h 脱硝率平均值的比值，结果如图 8 所示。由图 8 可见，1 h 脱硝率平均值远偏离于 20 h 平均基准值，5 h 脱硝率平均值偏离趋势次之，而 10、15、20 h 脱硝率平均值相互几乎重合，这说明从 10 h 开始，活性炭进入稳定脱硝阶段。



时间段/h：1—1；2—5；3—10；4—15；5—20。

图 8　某一阶段脱硝过程中活性炭脱硝率的变化情况

Fig. 8　The change of denitration rate of activated carbon in denitration process at a certain stage

（注：脱硝率比值为某时间段脱硝率平均值与 20 h 平均脱硝率的比值）

3.2　计算方法优化

为增强 GB/T 35254—2017 对活性炭生产及应用过程的指导意义，进一步优化脱硝率测试计算方法，得到不同测试时间段内试样 1 ~ 10 的脱硝率平均值，结果如表 2 所示。由表 2 可知：20 h 脱硝率平均值较其余时间段计算值偏高，这是由脱硝初始阶段脱硝率高导致的，不具有代表性。随着测试的进行，脱硝达到稳态，符合 SCR 的特征，这也是活性炭在工程应用中最主要的脱硝方式。为排除无关因素以及个体活性炭性能差异的干扰，同时综合考虑代表性，推荐采用 20 h 测试过程中 16 ~ 20 h 的测试平均值（即脱硝反应末期 5 h）作为活性炭脱硝率测试值。

表 2　不同时间段测试过程中脱硝率平均值

Table 2　Average denitration rate in different test periods

试样编号	20 h	6 ~ 20 h	11 ~ 20 h	13 ~ 20 h	16 ~ 20 h	18 ~ 20 h
1	66.25	63.11	63.02	62.93	62.82	62.62
2	66.65	64.79	64.76	64.73	64.74	64.72
3	62.21	59.60	59.50	59.39	59.39	59.44
4	57.08	53.99	53.90	53.79	53.84	53.88
5	69.69	67.85	67.78	67.66	67.67	67.96
6	66.39	64.89	64.84	64.83	65.01	65.11
7	60.25	56.58	56.45	56.31	56.46	56.56
8	58.39	54.26	54.15	54.05	54.14	54.18
9	51.37	48.39	48.39	48.39	48.55	48.64
10	51.63	47.93	47.79	47.66	47.78	47.87

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

4 结 论

(1) 无氧烟气条件下，活性炭发生物理吸附脱硝，脱硝率为15.3%；模拟烧结烟气条件下约5 h达到稳定状态，脱硝率为52.6%，物理吸附脱硝占整体脱硝的29.1%，活性炭发挥脱硝作用以NH_3-SCR为主。

(2) 活性炭脱硝受烟气条件变化影响较大，O_2体积分数、初始NO体积防溺水、氨氮摩尔比与脱硝率呈正相关变化；湿度、空速与脱硝率呈负相关变化。

(3) 对GB/T 35254—2017脱硝率计算方法进行了优化，综合考虑计算结果代表性、活性炭个体差异及测试条件的波动等异常情况，建议取脱硝反应末期5 h脱硝率平均值作为测试值。

参考文献:

[1] 徐匡迪. 中国国民经济的发展与钢铁工业[J]. 中国冶金,2003(12):3-9.
XU Kuangdi. Development of chinese national economy and iron & steel industry [J]. China Metallurgy,2003(12):3-9.

[2] 张建良,尉继勇,刘征建,等. 中国钢铁工业空气污染物排放现状及趋势[J]. 钢铁,2021,56(12):1-9.
ZHANG Jianliang, YU Jiyong, LIU Zhengjian, et al. Current situation and trend of air pollutant emission in China's steel industry [J]. Iron and Steel,2021,56(12):1-9.

[3] 刘飞,薛志钢,续鹏,等. 钢铁行业典型烧结机污染物排放特征对比研究[J]. 环境科学研究,2020,33(4):849-858.
LIU Fei, XUE Zhigang, XU Peng, et al. Comparative study on pollutant emission characteristics of typical sintering machines in iron and steel industry [J]. Research of Environmental Sciences,2020,33(4):849-858.

[4] 魏进超,李俊杰,康建刚. 基于生命周期评价的烧结烟气净化技术比较[J]. 环境工程技术学报,2017,7(4):424-432.
WEI Jinchao,LI Junjie,KANG Jiangang. Comparison on different sintering flue gas purification technologies based on the life cycle assessment [J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2017,7(4):424-432.

[5] 胡中杰,张威力,王跃飞,等. 影响活性炭烟气净化系统脱硝效率的因素分析[J]. 烧结球团,2020,45(2):73-78.
HU Zhongjie, ZHANG Weili, WANG Yuefei, et al. Analysis on factors affecting denitration efficiency of flue gas purification system using activated carbon [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):73-78.

[6] 解炜,李小亮,陆晓东,等. 烟气净化用活性炭脱硫脱硝机理研究与发展趋势[J]. 洁净煤技术,2021,27(6):1-10.
XIE Wei,LI Xiaoliang,LU Xiaodong,et al. Mechanism and development trend of desulfurization & denitrification of activated carbon used in flue gas purification [J]. Clean Coal Technology,2021,27(6):1-10.

[7] 赵利明. 活性炭烟气净化技术在宝钢股份宝山基地3#烧结机的应用[J]. 烧结球团,2017,42(6):5-10;56.
ZHAO Liming. Application of activated carbon flue gas purification technology in 3# sintering machine of Baoshan base of Baosteel [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(6):5-10;56.

[8] 樊猛辉,冀岗,李强,等. 烧结机提质增产与减排技术的改造与应用[J]. 烧结球团,2020,45(5):34-38.
FAN Menghui,JI Gang,LI Qiang,et al. Renovation and application on technology of quality and productivity improvement and flue gas emission reduction of sinterer [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):34-38.

[9] 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, SHAN 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.

[10] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019:227-229.
YE Hengdi. Flue gas full-process emission reduction technology for sintering of lron and steel [M]. Beijing: Metallurgical Ind ustry Press,2019:227-229.

[11] 朱德力. 活性炭纤维协同脱硫脱硝的试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
ZHU Deli. Experimental study on simultaneous desulfurization and denitrification over activated carbon fibers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2015.

(下转第107页)

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

[J]. 当代化工研究,2022(1):7-9.
WANG Hangheng. Discussion on the future development direction of coal mining technology [J]. Modern Chemical Research,2022(1):7-9.

[7] ZHUKOVSKIY Y L,BATUEVA D E,BULDYSKO A D,et al. Fossil energy in the framework of sustainable development: Analysis of prospects and development of forecast scenarios [J]. Energies,2021,14(17):5268.

[8] ZHANG R,XING Y W,XIA Y C,et al. Synergistic adsorption mechanism of anionic and cationic surfactant mixtures on low-rank coal flotation [J]. ACS Omega,2020,5(32):20630-20637.

[9] FAN Y J,CHAI Y F,WU J Y,et al. Behavior of coke in the blast furnace for smelting Bayan Obo Mine [J]. Fuel,2022,309:122147.

[10] 曾宇,姜喆,张建良,等. 大喷煤条件下鞍钢高炉喷吹煤粉的炉内利用率 [J]. 中国冶金,2022,32(3):61-67.
ZENG Yu,JIANG Zhe,ZHANG Jianliang,et al. Utilization rate of coal injection for blast furnace in Anstellunder the large injection condition [J]. China Metallurgy,2022,32(3):61-67.

[11] 王小艾,姜鑫,田晓文,等. 提高高炉喷煤比的关键技术研究与应用 [J]. 河北冶金,2021(5):49-54;69.
WANG Xiaoai,JIANG Xin,TIAN Xiaowen,et al. Research and application of key technology to improve the coal injection ratio of blast furnace [J]. Hebei Metallurgy,2021(5):49-54;69.

[12] WU K,PAN W,XU W R,et al. Research on utilization factor of injected pulverized coal into BF at large PCI rate [J]. Steel Research International,2008,79(12):904-907.

[13] 孔凡朔,张建良,李丙来,等. 高炉喷煤精确控制技术开发应用 [J]. 钢铁,2006,41(6):9-12.
KONG Fanshou,ZHANG Jianliang,LI Binglai,et al. Development and application of accurate PCI control technology [J]. Iron & Steel,2006,41(6):9-12.

[14] 曾宇,姜喆,张建良,等. 鞍钢高炉喷吹燃料的综合特性分析 [J]. 中国冶金,2022,32(5):1-8.
ZENG Yu,JIANG Zhe,ZHANG Jianliang,et al. Comprehensive analysis on characteristics of injection fuel in Ansteel blast furnace [J]. China Metallurgy,2022,32(5):1-8.

[15] LI Y J,ZHANG J L,WANG G W,et al. Effect of coal blending on ash fusion behavior for blast furnace injection of high calcium bituminous coal [J]. Energy Science & Engineering,2019,7(6):3332-3343.

(上接第 100 页)

[12] 梁辉,查贤斌,归柯庭. γFe_2O_3 的选择性催化还原脱硝性能及其对 NH_3 和 NO 的表面吸附行为研究 [J]. 中国电机工程学报,2014(32):5734-5740.
LIANG Hui,ZHA Xianbin,GUI Keting,et al. A study of selective catalysis reduction denitration performance and adsorption of NH_3 and NO over γFe_2O_3 catalyst [J]. Proceedings of the CSEE,2014(32):5734-5740.

[13] 高岩. 选择性催化还原脱硝催化剂的实验与机理研究 [D]. 济南:山东大学,2013.
GAO Yan. Experimental and mechanism analysis on selective catalytic reduction de NO_x catalyst [D]. Jinan: Shandong University,2013.

[14] 马建蓉,刘振宇,黄张根,等. NH_3 在 V_2O_5/AC 催化剂表面的吸附与氧化 [J]. 催化学报,2006,27(1):91-96.
MA Jianrong,LIU Zhenyu,HUANG Zhanggen,et al. Adsorption and oxidation of NH_3 over V_2O_5/AC catalyst [J]. Chinese Journal of Catalysis,2006,27(1):91-96.

[15] 李晓晓. 球状活性炭担载锡基铈基金属氧化物用于 NO 低温催化还原研究 [D]. 上海:华东理工大学,2015.
LI Xiaoxiao. SnO_2-CeO_2/spherial activated carbon based catalysts for low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3 [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2015.

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