高硫烧结烟气活性炭法超低排放运行实践

龙涌涛[1]，李进中[2]
（1. 新疆八一钢铁股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830022；2. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司，湖南 长沙 410205）

摘要：分层错流活性炭法将吸附塔床层分为前、中、后三层，通过控制不同床层的下料速度减少 HCl 的富集，消除高浓度 SO_2 的吸附热效益，具备较好的稳定性，且烟气适应能力强。本文针对某钢铁企业 265 m^2 烧结机活性炭烟气净化系统，介绍高含硫量、高粉尘质量浓度烧结烟气超低排放运行情况，详细分析实际运行过程中采用新型单控循环输送模式的运行优势，并提出对风筛进行优化设计以及应用重力除尘器等改进措施。结果表明：新型单控循环模式在保证硫硝脱除效率的同时，还具有粉尘排放量更低、HCl 浓度降低、脱硝副反应减少、氨水消耗量降低、活性炭总体循环量减少等优点；优化设计后的风筛，使得内部流场的均匀性、鼓风风量的利用效率均提高，可防止堵料，并大幅减少超细活性炭粉数量；增设重力除尘器后，活性炭的损耗量降低 10%～20%。系统运行后，SO_2、NO_x 质量浓度均低于超低排放限值，计算得到 SO_2、NO_x 脱除率分别达到 99.7%～100.0%、82.5%～87.3%。

关键词：高含硫量；烧结烟气；活性炭；超低排放
中图分类号：TF046.4；X701.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0177－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.105

Ultra-low emission operation practice with activated carbon method of high-sulfur sintering gas

LONG Yongtao[1], LI Jinzhong[2]
(1. Xinjiang Bayi Iron and Steel Co., Ltd., Wulumuqi 830022, Xinjiang, China; 2. Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: The activated carbon method of layered cross-flow divides the adsorption tower bed into three layers: front, middle and back, which reduces the enrichment of HCl and eliminates the adsorption heat benefit of high concentration of SO_2 by controlling the blanking speed of different beds, which has good stability and strong gas adaptability. Aiming at the activated carbon gas purification system of 265 m^2 sinterstrand in an iron and steel enterprise, the ultra-low emission operation of sintering gas with high sulfur content and high dust mass concentration is introduced, and the operation advantages of the new single-control circulating conveying mode in the actual operation process are analyzed in detail, and the air screen is optimized and the improvement measures, such as the application of gravity dust collector, are introduced. The results show that the new single-control circulating mode not only ensures the removal efficiency of sulfur nitrate, but also has the advantages of lower dust emission, lower HCl concentration, reduced denitrification side reaction, lower ammonia consumption, and reduced overall circulating volume of activated carbon. After the optimized design of the air screen, the uniformity of the internal flow field and the utilization efficiency of the air volume of the blast air are improved, this can prevent material blockage and greatly reduce the number of ultra-fine activated carbon powder. After the addition of gravity dust collector, the loss of activated carbon is reduced by 10%～20%. After the operation of the system, the mass concentrations of SO_2 and NO_x are lower than the ultra-low emission limit, and the calculated removal rate of SO_2

收稿日期：2024－10－22；**修回日期**：2024－11－09
作者简介：龙涌涛(1972—)，男，工程师，从事铁矿烧结工序除尘、脱硫脱硝以及资源循环利用等方面的工作。

and NO_x reaches 99.7%~100.0% and 82.5%~87.3%, respectively.

Key words: high sulfur content; sintering gas; activated carbon; ultra-low emission

铁矿烧结是钢铁冶炼流程的基础环节，其污染物成分复杂，包括 SO_2、NO_x、二噁英、粉尘和 HCl 等，且污染物排放量大，污染负荷约占钢铁工业总排放的45%[1]。2019 年 4 月，生态环境部等五部门联合发布了《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》(环大气[2019]35 号)，对烧结烟气中 SO_2、NO_x、颗粒物等的排放指标作了严格要求，如 SO_2、NO_x、颗粒物的排放质量浓度分别不得超过 35、50、10 mg/Nm^3。目前，钢铁行业在源头减排、过程控制和末端治理烟气多污染物方面已集成了多个高效净化技术路线，如烟气循环烧结、半干法脱硫耦合中低温 SCR 脱硝、活性炭法烟气净化、臭氧氧化硫硝协同吸收等关键技术[2]。

而活性炭烟气净化工艺已经得到国内钢铁行业的广泛认可，在烧结烟气治理领域得到大量推广与应用[3]。该工艺是一种可资源化的干法烟气处理技术，通过在吸附塔第一级吸附 SO_2，并在第二级喷入氨气实现 NO_x 脱除，具有同时脱硫、脱硝、除尘、脱重金属及有机挥发物(二噁英、呋喃)等多种污染物的功能，并能实现污染物的资源化利用[4-5]。在该工艺的研究和应用方面，李洁等[6]对某 600 m^2 烧结机活性炭烟气净化工艺和设备做了进一步优化，通过解决再生烟道的堵塞和腐蚀问题、确保吸附塔内活性炭温度、杜绝吸附塔气室漏料情况、减少卸料器管道结块、收集和处理冷凝酸等措施，使得系统运行状况明显改善；刘兰鹏等[7]分析了碳基材料的硫硝脱除机理，介绍了通过微波热处理的物理改性方法，以及酸碱改性和负载金属氧化物改性等化学改性方法来提高活性炭的硫硝脱除性能。宝钢采用活性炭二级吸附法、循环流化床(CFB)与选择性催化还原(SCR)协同净化法处置烧结烟气，两种工艺的硫硝脱除效率分别达到 95% 和 80% 以上，前者可以同时深度处理多种大气污染物，而后者脱硫灰的产生量较大、处置费用较高[8-9]。

目前，活性炭烟气净化工艺有分层错流法和逆流法两种，其中，逆流法在运行过程中会出现 HCl 在脱硝塔入口富集，其与氨气结合生成大量氯化铵堵塞活性炭通道，会对系统产生不利影响；而分层错流法将吸附塔床层分为前、中、后三层，通过控制不同床层的下料速度减少 HCl 的富集，消除高浓度 SO_2 的吸附热效益，具备较好的稳定性，且烟气适应能力强[10]。本文通过系统介绍两级活性炭烟气净化系统组成，并从降低运行成本、提高污染物净化效率方面介绍该工艺的改进措施，为实现高硫条件下烟气净化系统超低排放提供借鉴与参考。

1 活性炭烟气净化系统组成及改进措施

1.1 系统组成

(1) 主系统，由烟气系统、吸附系统、解析系统以及活性炭输送系统和卸料存贮系统组成[11]。烟气系统包括从空冷换热器至一级吸附塔、从增压风机至二级吸附塔以及从二级吸附塔至烟囱的全部烟道及设备。在烟气系统设置 3 m × 4 m 的补风阀，保证入塔烟气温度不大于 120 ℃。每套烟气系统设置 1 台 3 800 kW 增压风机，增压风机采用动叶可调轴流风机，烟气量为 1.74 × 10^6 m^3/h，最大压升(压强的增加值)为 6 kPa。吸附系统由一级吸附塔(3 个吸附单元)、二级吸附塔(4 个吸附单元)组成，吸附单元尺寸为 11 m × 7 m，其中吸附单元活性炭层高度为 29 m，每个吸附单元左、右反应室活性炭层的厚度均为 1.8 m。一级吸附塔吸附单元由前、中、后 3 个通道组成，二级吸附塔吸附单元由前、后 2 个通道组成，吸附塔不同的部位分别设有百叶窗、不锈钢多孔板及格栅。一、二级吸附塔的空塔流速分别为 0.13、0.10 m/s。解析系统包含 2 个解析塔，合计解析能力为 50 t/h。每套吸附、解析系统配套活性炭输送系统，该输送系统主要由 3 条链斗输送机组成，合计输送能力为 50 t/h。3 台输送机分别将解析塔的下料活性炭输送至一、二级吸附塔的塔顶，将一、二级吸附塔的下料活性炭输送至解析塔，将水平给料输送机的下料活性炭输送至解析塔的塔顶。

(2) 辅助系统，由制酸系统、氨站系统、除尘系统、热风炉系统和废水处理系统等组成[12]。

制酸系统主要包括泡沫柱洗涤装置，该装置使用稀酸冷却，采用两转两吸(3 + 1)工艺流程，可年产 98% 浓硫酸 3.4 万吨。氨站系统包括氨水储罐、氨水输送泵和氨水蒸发器等，其中，氨水蒸发器的蒸发能力为 1 500 kg/h。除尘系统包括 1 台袋式除尘器(750 m^2)、1 台组合式除尘器、1 台重力除尘器、1 台活性炭卸料袋式除尘器(310 m^2)，并设置收尘风机及罗茨真空泵，对输送机、振动筛、活性炭仓等各产尘点进行除尘。热风炉系统主要由热风炉本体、自动点火烧嘴、热风炉主烧嘴组成，每台热风炉设置 1 台热风循环风机，风量为 2.7×10^5 m^3/h。废水处理系统采用“初沉 + 中和 + 混凝沉淀 + 过滤 + 脱氨”工艺(与湿法脱硫系统合建)，逐一去除废水中的悬浮物、氟离子、重金属、氨氮等污染物，处理能力为 12 t/h。

1.2　改进措施

1.2.1　新型单控循环输送模式

传统活性炭输送模式的输送设备包括一、二级吸附塔输送机和解析塔输送机。该模式中，解析后的活性炭由二级吸附塔输送机送至二级吸附塔，二级吸附塔内活性炭由一级吸附塔输送机送至一级吸附塔，一级吸附塔内活性炭由解析塔输送机送至解析塔，如此进行一个物料循环。

活性炭在运行过程中经历了完整的脱硝—脱硫—再生的循环过程，其表面官能团大幅提升，且脱硝过程属于催化反应。为验证二级塔下料活性炭对脱硝的使用寿命，以传统活性炭输送模式下解析塔的下料活性炭作为研究对象，开展长时间脱硝试验[13]。试验条件：反应温度为 120 ℃、氨氮比为 1∶1、NO 质量浓度为 400 mg/Nm^3、空速为 400 h^{-1}。结果表明：在运行 800 h 后，解析塔下料活性炭的脱硝效率依旧维持在 85% 左右，说明在低硫状态下，脱硝过程能够保持长期稳定，基本不消耗官能团。

基于以上研究结果，开发新型单控循环输送模式，即在一、二级吸附塔之间不设置输送机，采用解析塔输送机将活性炭输送至解析塔，采用吸附塔输送机将解析塔内活性炭输送至一、二级吸附塔。正常运行时，活性炭在二级吸附塔的停留时间设置为前室 400 h、后室 600 h，二级吸附塔的物料循环量合计为 4 ~ 8 t/h。这种输送模式在保证硫硝脱除效率的同时，还具有以下优点：① 净烟气排放值受活性炭二次粉尘的影响减小，粉尘排放值更低；② 脱硫塔后烟气中 HCl 浓度降低、脱硝副反应减少、氨水消耗量降低；③ 开机过程中 NO_x 排放值更容易在短时间内达标；④ 活性炭损耗率降低，仅为 1.2% ~ 2.2%；⑤ 活性炭总体循环量减少，进入解析塔内活性炭的平均工作硫容升高，可达 5.0% ~ 7.0%；⑥ 吸附塔和解析塔检修或处理故障更加方便、耗时更少；⑦ 减少了 1 条活性炭输送机，维护工作量、电能消耗减小。

1.2.2　优化风筛设计

活性炭系统超细粉尘的来源如表 1 所示。由表 1 可见，烧结烟气中原始粉尘主要是以 KCl 为代表的超细粉尘；经过双级活性炭烟气净化后，出口粉尘中 60% ~ 70% 为超细活性炭粉，说明活性炭系统对原始烟尘的去除效果较好[14]。降低出口粉尘的重点在于控制活性炭系统内自身产生的超细碳粉含量。风筛装置可对进入吸附塔的活性炭进行吹扫，使吸附在活性炭表面的超细活性炭粉尘脱离，减少烟气中活性炭粉。

表 1　活性炭系统超细粉尘的来源(质量分数)

Table 1　Source of ultrafine dust in activated carbon system　　%

项目	固定碳	挥发分	灰分	活性炭粉占比	烧结灰占比
新鲜活性炭	80.00	5.00	15.00	—	—
一级塔下料活性炭	68.55	16.87	14.58	—	—
二级塔下料活性炭	74.28	14.89	10.83	—	—
一级塔出口烟尘	42.62	26.24	31.14	62.17	22.07
二级塔出口烟尘	41.19	30.69	28.12	55.45	22.11

结合实际工程情况，开发风筛除尘技术及装备，如图 1 所示。由图 1 可见，对风筛内部结构进行如下优化设计：① 重新设计风筛的进风管和出风管，改善风筛内部流场的均匀性，提高鼓风风量的利用效率；② 通过对活性炭流动状况的仿真模拟[图 2(a)]，优化设计活性炭的进料管和排料管，改善布料均匀性，防止堵料，并提高物料被吹扫的面积，减少活性炭颗粒上的细微粉尘；③ 在风筛内设计新的阻拦装置[图 2(b)]，一方

面防止活性炭被吹出，另一方面改善鼓风风量的均匀性，提高粉尘的去除效率。

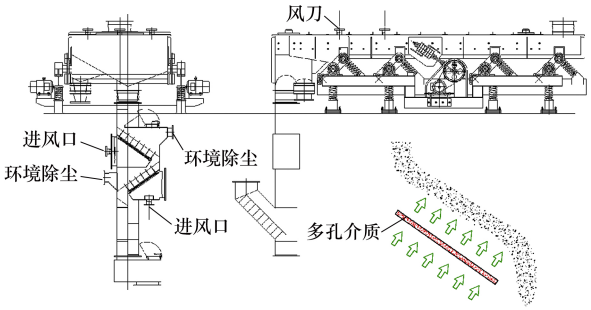
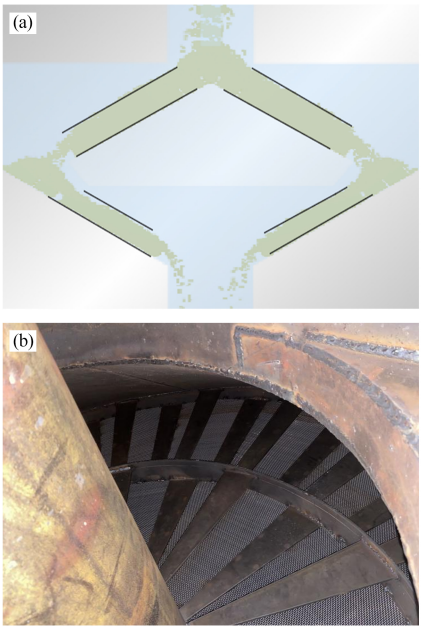


图 1 风筛除尘技术及装备

Fig. 1 Dust removal technology and equipment of the air screen



（a）活性炭流动性模拟；（b）风筛内阻拦装置

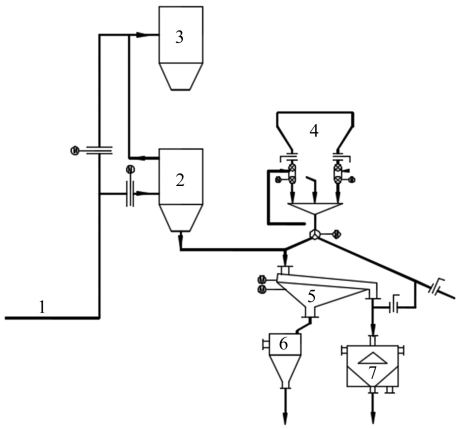
图 2 风筛内活性炭流动性仿真模拟与增设阻拦装置

Fig. 2 Fluidity simulation of activated carbon and adding a blocking device inside the air screen

1.2.3 增设重力除尘器

输送机在输送活性炭（正常输送量约为 40 t/h）过程中存在撒料情况，当输送机输送量加大到 45 t/h 时情况更严重。撒出来的活性炭由负压气力输灰管道送至组合式除尘器后，被排到除尘系统的大灰仓，这造成活性炭的严重浪费。

采取在负压气力输灰管道上增设重力除尘器来减少活性炭的浪费，流程如图 3 所示。由图 3 可见，在重力除尘器的作用下，完整的活性炭掉落到沉降器下部管道并被送至解析塔的振动筛，活性炭灰及小颗粒物料在重力除尘器上部被除尘风机抽至组合式除尘器。为了减少重力除尘器的负荷，当吸附塔或解析塔的输送机排灰口、灰仓的排灰口下料时，开启重力除尘器的入口阀，关闭组合式除尘器的入口阀；在其他情况下，关闭重力除尘器的入口阀，开启组合式除尘器的入口阀。实际运行经验表明，增设重力除尘器后，活性炭的损耗量降低 10%~20%。



1—负压气力输灰管道；2—重力除尘器；3—组合式除尘器；4—解析塔；5—振动筛；6—灰仓；7—风筛。

图 3 增加重力除尘器工艺流程

Fig. 3 Process flow diagram of adding gravity dust collector

2 活性炭烟气净化系统运行实践

2.1 系统运行情况

新疆某钢铁厂 265 m^2 烧结机的 SO_2 排放浓度较高、SO_2 资源化效益较好，于 2023 年 9 月正式投运两级活性炭法脱硫、脱硝、除尘一体化烟气净化工艺。该系统的工况烟气量约为 90 万 Nm^3/h，运行情况如表 2 所示。由表 2 可见，系统运行前，SO_2、NO_x 质量浓度基本维持在 3 000、200 mg/Nm^3 左右；系统运行后，SO_2、NO_x 质量浓度均低于超低排放限值，计算得到 SO_2、NO_x 脱除率分别达到 99.7%~100.0%、82.5%~87.3%。

活性炭在 100 ℃以上才能具备较好的 NO_x 吸附效率。而开机时活性炭的温度较低，系统需要较长的时间才能达到较高的脱硝效率。因此，在系统开机时，采取如下缩短 NO_x 达标排放时间的操作措施：① 烧结机停机后，继续缓慢解析活性炭或在解析塔采用热停机操作模式，防止未解析

表 2　活性炭烟气净化系统运行情况

Table 2　Operation condition of activated carbon flue gas purification system

项目	烟气量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	烟气温度/℃	质量浓度/($mg \cdot Nm^{-3}$)			氨逃逸量/($mg \cdot Nm^{-3}$)
			SO_2	NO_x	粉尘	
入口	900 000	120 ~ 150	2 000 ~ 3 400	150 ~ 250	50 ~ 150	—
出口	—	—	0 ~ 5	25 ~ 35	< 10	< 8

的活性炭进入二级吸附塔，降低开机脱硝副反应的能力。② 在吸附塔降温过程中继续适量喷氨，即在增压风机停机前 1 ~ 2 h 或烟囱出口氨逃逸升高时，停止喷氨。③ 重新启动增压风机并运行稳定后，当一级吸附塔后烟气温度大于 45 ℃时及时开启喷氨设备，并控制喷氨量为正常值的 0.5 ~ 1.0(预喷氨)，确保脱硝开机过程中床层内预先“储备”足够数量的氨。④ 烧结机点火开机后及时关闭补风阀，尽可能提高增压风机的出口烟气温度。当增压风机出口烟气温度大于 140 ℃或一级吸附塔床层温度大于 120 ℃时，逐步控制增压风机出口烟气温度到正常范围之内。⑤ 当烟囱净烟气 NO_x 质量浓度低于 35 mg/Nm^3、氨逃逸量达到 3.0 mg/Nm^3 或脱硝效率大于 92% 时，及时调节喷氨量直至达到正常。

2.2　运行成本对比

将采用新型单控循环输送模式、优化风筛设计、增设重力除尘器等措施的活性炭法烟气净化系统，与厂区内另外一套湿法脱硫 + SCR 脱硝烟气净化系统进行运行成本对比，如表 3 所示。由表 3 可见，由于电能、煤气消耗大幅度降低，且副产物的经济价值较高，活性炭法烟气净化系统的吨矿运行成本明显更低。

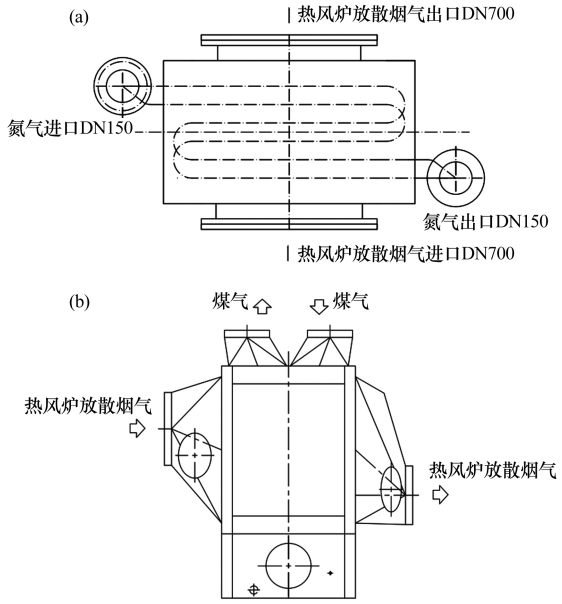
3　建　议

通过运行实践经验总结，可考虑采取以下进一步节约能源消耗、降低运行成本的措施：① 将解析塔的氮气加热器的热源改为热风炉放散烟气[图 4(a)]，在停开机期间临时采用蒸汽加热，节约蒸汽消耗。② 充分利用解析塔冷却段排出的热空气能量，将其回收至热风炉助燃风机，节约煤气消耗。③ 在煤气管道上增设烟气换热器加热煤气[图 4(b)]，采用热风放散管道作为热源，节约煤气消耗。④ 采用变频模式调节热风循环风机、冷却风机，节约电能消耗。⑤ 将富硫气体引至烟囱管道，取消烟囱端的气动阀门，在热风炉放散管道接出 1 根热风管道至富硫气体与烟囱的主管上，保护管道不被腐蚀。热风炉放散管道中的烟气温度高达 300 ℃，使处于关闭状态的富硫气体阀门的温度大于 200 ℃，起到“预热”或“加热”的作用，确保解析塔在开机过程中，富硫气体管道不会产生冷凝。⑥ 在二级吸附塔后室出料旋转阀的下料溜槽上增设热风吹扫管道，防止冬季旋转阀及其下料溜槽内活性炭粉结块，堵塞设备。由于二级吸附塔活性炭的循环量较小，为了降低生产成本，在二级吸附塔后室采用间歇下料方式。在冬季生产时，该方式存在后室旋转阀的下料溜槽因“热源”不连贯且热负荷较小，容易被泄漏的烟气冷凝、结露堵塞(活性炭粉板结)等问题，严重时会导致旋转阀负荷过大，产生故障。若处理不及时，严重影响活性炭输送的动态平衡。

表 3　两套烟气净化系统的运行成本对比

Table 3　Comparison of operating costs of two flue gas purification systems　　元/t

项目	脱硫、脱硝剂					辅助设施							职工薪酬	维修费用	总成本
	活性炭	脱硫剂	氨水	石膏	硫酸	电	生产用水	氮气	高压空气	高炉煤气	焦炉煤气	蒸汽			
活性炭法	4.39	—	0.547	—	-2.293	6.18	0.29	0.81	0.07	2.7	0.045	0.17	0.33	0.38	13.619
湿法脱硫 + SCR	—	2.99	0.430	-0.001	—	11.8	0.20	0.08	0.01	6.0	—	0.20	0.33	0.38	22.419



（a）热风炉放散烟气－氮气加热器；

（b）热风炉放散烟气－煤气加热器

图4 热风炉放散烟气能量再利用装置

Fig. 4 Energy reuse device of flue gas of hot blast stove

4 结 论

（1）采用新型单控循环模式后，活性炭的损耗率约为2.5%，损耗量降低约20%。同时，优化风筛内部设计、增设重力除尘器后，活性炭的损耗量进一步降低10%～20%。通过与湿法脱硫+SCR烟气净化工艺的运行情况对比，两级活性炭法烟气净化工艺的运行成本比前者约低40%。

（2）烧结烟气活性炭净化系统投运后，当SO_2入口质量浓度达到3 400 mg/Nm^{3}时，处理后烟气中各种污染物质量浓度均低于超低排放限值。该系统能够长期稳定运行，故障率小，与烧结机的同步率高，能够适应高含硫量的烟气处理，而且能够协同治理二噁英，符合烧结烟气净化技术的发展趋势。

参考文献：

[1] 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，2019：3－15.
YE Hengdi. Flue gas full-process emission reduction technology for sintering of iron and steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press，2019：3－15.

[2] 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.
YU Yong，ZHU Tingyu，LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China[J]. Iron and Steel，2019，54(9)：1－11.

[3] 许满兴，张天启. 烧结节能减排实用技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2018：135－142.
XU Manxing，ZHANG Tianqi. Practical technology of sintering energy saving and emission reduction[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2018：135－142.

[4] 李俊杰，魏进超，刘昌齐. 活性炭法多污染物控制技术的工业应用[J]. 烧结球团，2017，42(3)：79－85.
LI Junjie，WEI Jinchao，LIU Changqi. Combined desulfurization，denitrification and reduction of air toxice using activated coke[J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(3)：79－85.

[5] 朱廷钰，李玉然. 烧结烟气排放控制技术及工程应用[M]. 北京：冶金工业出版社，2015：232－241.
ZHU Tingyu，LI Yuran. Emission control technologies and engineering applications for sintering flue gas[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2015：232－241.

[6] 李洁，贾庆晓，董海滨. 日钢600 m^{2}烧结烟气活性炭脱硫工艺优化及运行实践[J]. 烧结球团，2019，44(1)：74－78.
LI Jie，JIA Qingxiao，DONG Haibin. Optimization of desulfurization process of Risteel 600 m^2 sintering flue gas with activated carbon method and its operation practice[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(1)：74－78.

[7] 刘兰鹏，施哲，黄帮福，等. 碳基材料用于烧结烟气协同脱硫脱硝的研究现状[J]. 环境工程，2019，37(2)：99－103；118.
LIU Lanpeng，SHI Zhe，HUANG Bangfu，et al. Research status of carbon-based materials for synergetic desulfurization and denitrification of sintering flue gas[J]. Environmental Engineering，2019，37(2)：99－103；118.

[8] 汪庆国，朱彤，李勇. 宝钢烧结烟气活性炭净化工艺和装备[J]. 钢铁，2018，53(3)：87－95.
WANG Qingguo，ZHU Tong，LI Yong. Sintering flue gas purifying process and equipment by use of activated coke in Baosteel[J]. Iron & Steel，2018，53(3)：87－95.

[9] 周茂军，张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术应用及分析[J]. 烧结球团，2019，44(3)：58－63.

ZHOU Maojun, ZHANG Daihua. Application and analysis of ultra-low emission technology of sintering flue gas in Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(3): 58 – 63.

[10] 叶恒棣,李俊杰,倪桂虎,等. 碳基多污染物净化工艺 SO_2、HCl 的迁移及转化规律[J]. 钢铁,2024,59(5): 172 – 184.
YE Hengdi, LI Junjie, NI Guihu, et al. Migration and transformation of SO_2 and HCl in activated based multi-pollutant purification process[J]. Iron & Steel, 2024, 59(5): 172 – 184.

[11] 吴青贤,魏进超. 湛江钢铁 1#烧结烟气净化装置的设计与运行[J]. 烧结球团,2017,42(6): 1 – 4.
WU Qingxian, WEI Jinchao. The design and operation of 1# sintering flue gas purification equipment for Zhanjiang steel plant[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(6): 1 – 4.

[12] 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.

[13] YUAN J, MI J X, YIN R Q, et al. Identification of intrinsic active sites for the selective catalytic reduction of nitric oxide on metal-free carbon catalysts via selective passivation[J]. ACS Catalysis, 2022, 12(2): 1024 – 1030.

[14] LI Junjie, YE Hengdi, WEI Jinchao, et al. Capture and migration of particulate matter in activated carbon sintering flue gas purification system based on ultra-low emission target[J]. Fuel, 2023, 350: 128764.

(上接第 176 页)

[8] KANG Zhizhong, YUAN Qixin, ZHAO Lizheng, et al., Study of the performance, simplification and characteristics of SNCR de-NO_x in large-scale cyclone separator[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 635 – 645.

[9] 顾卫荣,周明吉,马薇. 燃煤烟气脱硝技术的研究进展[J]. 化工进展,2012,31(9): 2084 – 2092.
GU Weirong, ZHOU Mingji, MA Wei. Research progress on denitrification technology for coal-fired flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(9): 2084 – 2092.

[10] 刘磊,李斌,张文强,等. 链箅机—回转窑烟气超低排放技术研究与应用[J]. 烧结球团,2022,47(4): 106 – 114.
LIU Lei, LI Bin, ZHANG Wenqiang, et al. Reseacrch and application of ultra-low emission technology of grate-kiln flue gas[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(4): 106 – 114.

[11] 赵欣锋,齐西伟,张遵乾,等. 烧结烟气中 NO_x 减排进展[J]. 钢铁,2022,57(11): 175 – 189.
ZHAO Xinfeng, QI Xiwei, ZHANG Zunqian, et al. Progress and exploration of NO_x emission reduction in sintering flue gas[J]. Iron and Steel, 2022, 57(11): 175 – 189.

[12] 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.
YU Yong, ZHU Tingyu, LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key process of iron and steel industry in China[J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 1 – 11.

[13] 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 and Steel, 2022, 57(3): 133 – 141.

[14] 刘建辉,范正赟,程华,等. 迁钢球团烟气超低排放关键技术集成与应用[J]. 中国冶金,2020,30(10): 98 – 102.
LIU Jianhui, FAN Zhengyun, CHENG Hua, et al. Integration and application of key technologies for ultra-low emission of flue gas in Qiangang Pelletizing Plant[J]. China Metallurgy, 2020, 30(10): 98 – 102.