

# 烧结烟气活性炭法超低排放运行实践及工艺优化

孔 镇<sup>1</sup>, 李进中<sup>2</sup>

(1. 山东钢铁集团永锋临港有限公司, 山东 临沂 276000;

2. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司, 湖南 长沙 410205)

**摘要:**为响应钢铁行业超低排放政策要求,以山西某钢铁集团烧结烟气两级活性炭法超低排放运行实践为例,介绍了两级活性炭法烟气净化原理及系统组成,分析了实际运行过程中给料输送机结露及除尘管道堵塞、给料输送机顶部冒灰、制酸系统短时间停运时影响吸附解析系统正常运行、活性炭消耗减少、吸附塔压降增大、透气性变差和吸附塔气室积料的问题,并提出了改进和优化措施。实践证明:处理后的  $\text{SO}_2$  浓度为  $0 \sim 5 \text{ mg/Nm}^3$ ,  $\text{SO}_2$  脱除率为  $99.7\% \sim 100\%$ ;处理后的  $\text{NO}_x$  浓度为  $25 \sim 32 \text{ mg/Nm}^3$ ,  $\text{NO}_x$  脱除率为  $85.4\% \sim 89.3\%$ ;处理后的粉尘浓度为  $2 \sim 10 \text{ mg/Nm}^3$ ;氨逃逸浓度为  $2 \sim 8 \text{ mg/Nm}^3$ ,各项指标均优于超低排放指标。

**关键词:**烧结烟气; 活性炭; 超低排放; 优化

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)02-0082-05

doi:10.13402/j.gcjs.2025.02.027

## Operational practice and optimization analysis of ultra-low emission technology by use of activated coke of sintering flue gas

KONG Zhen<sup>1</sup>, LI Jinzhong<sup>2</sup>

(1. Shandong Iron and Steel Group Yongfeng Lingang Co., Ltd., Linyi 276000, Shandong, China; 2. Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

**Abstract:** In response to the Ministry of Ecology and Environmental Protection's ultra-low emission for the steel industry, the operation practice of ultra-low emission of sintered flue gas two-stage activated carbon method in Shanxi is introduced. The principle and system composition of two-stage activated carbon flue gas purification are introduced. The condensation of feed conveyor, the blockage of dust removal pipeline, the leakage dust of the top of feed conveyor, the normal running of adsorption analysis system during acid system out of service for a short time, reducing consumption of activated carbon, the increased pressure drop and poor gas permeability of adsorption tower, the accumulation of activated carbon in air chamber of adsorption tower are analyzed in this paper. Improvement and optimization measures have been proposed. Practice has proven that the concentration of  $\text{SO}_2$  after treatment is  $0 \sim 5 \text{ mg/Nm}^3$ , and the  $\text{SO}_2$  removal rate is  $99.7\% \sim 100\%$ ; The treated  $\text{NO}_x$  concentration is  $25 \sim 32 \text{ mg/Nm}^3$ , and the  $\text{NO}_x$  removal rate is  $85.4\% \sim 89.3\%$ ; The concentration of processed dust is  $2 \sim 10 \text{ mg/Nm}^3$ ; The ammonia escape concentration is  $2 \sim 8 \text{ mg/Nm}^3$ , and all indicators are better than the ultra-low emission indicators.

**Key words:** sintering flue gas; activated carbon; ultra-low emission; optimization

钢铁是现代文明社会使用最主要的结构、功能材料和最重要的建筑原材料之一。钢铁工业既是资

源、能源消耗大户,同时也是污染大户,其中钢铁行业烧结工序排放的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、粉尘和二噁英占整个

收稿日期: 2024-01-19

作者简介: 孔 镇(1986—),男,工程师,从事钢铁企业环保治理方面的研究。

行业排放的绝大部分,且伴有大量重金属元素<sup>[1-2]</sup>。烧结烟气排放量大、污染物成分复杂,且由于烧结工艺自身的不稳定,所产生的烟气流量、温度、污染物浓度会有大幅度变动,这些都导致其末端治理难度较大<sup>[3]</sup>。近年来,随着国内环保问题日益突出,生态环境部陆续发布了钢铁行业超低排放要求的政策,对烟气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物等的排放指标作了严格要求,其中烧结机烟气中污染物排放浓度执行限值要求<sup>[4]</sup>:SO<sub>2</sub>排放浓度≤35 mg/Nm<sup>3</sup>;颗粒物排放浓度≤10 mg/Nm<sup>3</sup>;NO<sub>x</sub>排放浓度≤50 mg/Nm<sup>3</sup>;氟化物排放浓度≤3 mg/Nm<sup>3</sup>;二噁英类排放浓度≤0.5 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>。

活性炭联合脱硫脱硝技术是一种可资源化的干法烟气处理技术,具有排烟透明度高、无二次污染,且可同时脱硫、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。该技术脱除效率能满足环保政策要求,已得到国内钢铁行业的广泛认可,是目前国内钢铁烧结烟气治理领域大力推广的技术<sup>[5-7]</sup>。本文通过具体项目的运行实践,摸索出具体问题的解决办法,以期钢铁行业两级活性炭法运行操作提供参考。

## 1 系统组成及运行实践

### 1.1 系统组成

活性炭烟气净化工艺主要由烟气系统、吸附系统、解析系统、活性炭输送系统和活性炭卸料存储系统组成,辅助系统有制酸系统、氨站系统、除尘系统和热风炉系统等<sup>[8-9]</sup>,图1为两级活性炭脱硫脱硝工艺流程。

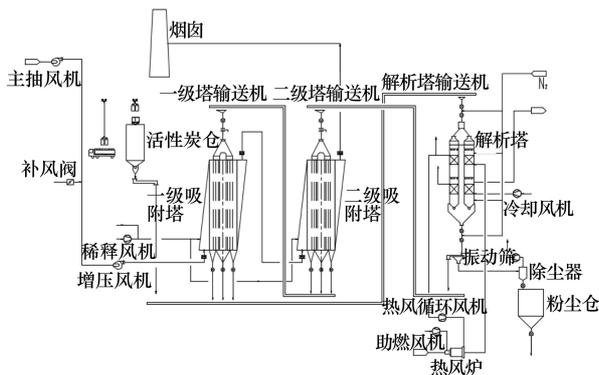


图1 两级活性炭脱硫脱硝工艺流程

(1) 烟气系统: 烧结机主抽风机出口至一级吸附塔, 一级吸附塔至二级吸附塔、二级吸附塔至钢

烟囱的全部烟道及设备。每台烧结机对应1套烟气系统。在烟气系统设置3 000 mm×4 000 mm(长×宽)的补风阀, 以确保入塔烟气温度不超过140℃。每套烟气系统设置1台4 000 kW增压风机, 增压风机采用变频运行方式, 增压风机烟气量为1.4×106 m<sup>3</sup>/h, 最大压升为8 kPa。

(2) 吸附系统: 每套吸附系统由两个吸附单元组成一级吸附塔, 3个吸附单元组成二级吸附塔。吸附单元尺寸为11 m×7 m(长×宽), 活性炭层高为29 m, 每个吸附单元左、右反应室活性炭层厚度均为2 m。每个吸附单元由前、中、后3个通道组成, 在不同部位分别设有百叶窗、不锈钢多孔板及格栅。一级吸附塔空塔流速为0.15 m/s, 二级吸附塔空塔流速为0.1 m/s。

(3) 解析系统: 每套解析系统包含两个解析塔, 其解析能力为40 t/h。解析塔上部设置1台34 t/h的进料组合真空防卡旋转阀, 下部对应设置两台17 t/h的辊式给料机和出料旋转阀。另外, 解析塔设置旁路系统, 防止意外情况排空解析塔。每套解析塔设置1台冷却风机, 冷却风量为150 000 m<sup>3</sup>/h。冷却到110℃以下的活性炭经∅268 mm×4 200 mm辊式给料机卸到振动筛。辊式给料机采用变频运行, 以调节解析塔下料量。每套解析系统设置1台振动筛, 振动筛筛孔为1.5 mm, 处理能力为35 t/h。

(4) 活性炭输送系统: 每套活性炭卸料存储系统与1套吸附解析系统对应设置1个下料斗和1个料仓, 料仓尺寸为∅4.8 m×10.5 m(筒体高度为8.2 m), 有效容积约为163 m<sup>3</sup>, 能存储7 d的活性炭用量。

每套吸附解析系统的活性炭输送工作主要由3条链斗输送机完成。一级吸附塔给料输送机将二级吸附塔下料活性炭输送至一级吸附塔塔顶。二级吸附塔给料输送机将解析塔下料活性炭输送至二级吸附塔塔顶。解析塔给料输送机将一级吸附塔下料活性炭输送至解析塔塔顶。其中一、二级吸附塔给料输送机为多点卸料输送机, 解析塔给料输送机为单点卸料输送机, 3台输送机的输送能力均为34 t/h, 两种活性炭输送机均为“Z”型输送机。

(5) 辅助系统: 制酸系统采用技术先进、经验成熟的泡沫柱洗涤装置, 稀酸冷却, 两转两吸

(3+1)工艺流程,尾气经二次吸收塔塔顶除沫器后送入烟气净化增压风机前烟道,年产98%浓硫酸3.6万吨。氨站系统包括氨水储罐、氨水输送泵和氨水蒸发器等,氨水蒸发器一用一备,单台氨水蒸发能力为2500 kg/h。除尘系统分别设置1台环境除尘袋式除尘器(面积为480 m<sup>2</sup>)、1台组合式除尘器、1台活性炭卸料袋式除尘器(面积为320 m<sup>2</sup>),分别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94000 Nm<sup>3</sup>/h,热风炉进口热风温度约为340℃,热风炉出口热风温度约为475℃,热风炉上设有火焰检测、温度检测、压力检测、高温成像仪装置。

## 1.2 运行实践

山西某钢铁集团2×220 m<sup>2</sup>烧结烟气活性炭脱硫脱硝工程,其每套烟气净化系统工况烟气量约为110万m<sup>3</sup>/h,处理前烟气设计参数如表1所示。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>系统已于2019年7月正式投运,喷氨系统和制酸系统也已投运。SO<sub>2</sub>浓度最大设计值为2000 mg/Nm<sup>3</sup>,实际运行时SO<sub>2</sub>浓度基本维持在2000 mg/Nm<sup>3</sup>以下,偶尔会出现超过2000 mg/Nm<sup>3</sup>的情况。1<sup>#</sup>系统活性炭烟气净化系统运行情况如表2所示。由表2可知:烟气净化系统出口污染物浓度均低于超低排放要求。图2为投运后的1<sup>#</sup>烧结烟气活性炭法净化系统,图3为制酸系统生产出的酸样。

表1 烟气净化设计参数

烟气量/ (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	入口温 度/℃	浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )		
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	粉尘
1.1	110~140	2000	350	50

表2 1<sup>#</sup>系统活性炭烟气净化系统运行情况

检测项目	浓度/(mg·Nm <sup>-3</sup> )		效率/%
	入口	出口	
SO <sub>2</sub>	1500~2000	0~5	99.7~100.0
NO <sub>x</sub>	220~300	25~32	85.4~89.3
出口粉尘	<10	<10	80.0
出口氨逃逸	<8×10 <sup>-6</sup>	<8×10 <sup>-6</sup>	—

## 2 工艺优化分析

工程稳定运行后,根据现场的问题反馈,对



图2 1<sup>#</sup>烧结烟气活性炭法净化系统

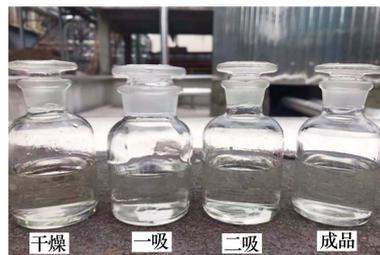


图3 制酸系统生产的酸样品

工艺和设备做进一步优化和分析,以确保后续运行的稳定性。

### 2.1 给料输送机结露及除尘管道堵塞分析

解析塔给料输送机、一级吸附塔给料输送机内潮湿,有时可见明显的冷凝水,加重了输送机的腐蚀和磨损。一级吸附塔顶部、底部的除尘管道、二级吸附塔底部的除尘管道容易堵塞,尤其是与输送机相连的除尘支管堵塞更加严重。通过现场查看分析,输送机内潮湿的主要原因为一级、二级吸附塔底部出料旋转阀处有烟气泄漏。经计算,泄漏烟气的露点温度约为58℃,除尘主管内烟气的温度大于37℃,露点温度约为30℃。通过计算发现,补少量热风可以达到大幅度降低露点温度的目的,而补冷风不仅需要风量很大且降低露点温度的效果不够明显。从目前的工程现场情况来看,塔底输送机补热风较为方便。

优化方案:在解析塔给料输送机和一级吸附塔给料输送机底部本体进行保温,并在解析塔冷却风出口热风管道(热风温度大于90℃)引入1根管道至输送机底部水平段,封堵冷风吸入口,使解析塔给料输送机和一级吸附塔给料输送机的除尘管道内不结露,管道不堵塞,尽快排走泄漏的烟气。

### 2.2 给料输送机顶部冒灰分析

解析塔除铁器口、顶部检查口冒灰严重,一级塔输送机顶部检查口冒灰严重。经现场查看及试验分析,解析塔给料输送机除铁器口、顶部检

查口冒灰主要由于一级塔底部旋转阀烟气泄漏所致,一级塔输送机顶部检查口冒灰主要由于二级塔底部旋转阀烟气泄漏所致。

优化方案:在解析塔给料输送机及一级塔输送机顶部水平段增加除尘口或加大除尘管道,增设1根管道引至活性炭仓除尘风机入口,由活性炭仓除尘风机抽风至活性炭仓布袋除尘器。

### 2.3 制酸系统停运时吸附解析系统正常运行分析

实际运行过程中,偶尔会出现制酸系统故障短时间内无法投运,而吸附塔、解析塔仍需正常运行的情况,如果此工况下富硫气体直接排放至烟囱就会引起排放指标不达标。

优化方案:在富硫气体出口增加1路DN 400的管道至增压风机入口烟道处,设置两台电动阀门。在制酸系统短时间无法投运时,关闭富硫气体至制酸系统阀门和富硫气体至烟囱的旁路阀门,开启富硫气体至增压风机入口烟道的阀门,使富硫气体进入吸附塔内,不外排到烟囱,以免环保指标超标。

### 2.4 活性炭消耗减少分析

活性炭输送机正常输送量约为22 t/h。在输送活性炭料过程中存在撒料情况,尤其当输送机输送量加大到30 t/h时情况更为严重。撒出来的活性炭经负压气力输灰管道至组合式除尘器之后排至除尘系统大灰仓,造成活性炭材料的严重浪费。

优化方案:在负压气力输灰管道上增加重力沉降器。活性炭料经过重力沉降器后,在重力的作用下将下沉到沉降器下部经管道至解析塔振动筛,活性炭灰及小颗粒物料在沉降器上部被除尘风机抽至组合式除尘器,流程如图4所示。该方法不仅明显减少活性炭的消耗(20%),还减轻了组合式除尘器的压力(减少2 t/d)。

### 2.5 吸附塔压降增大、透气性变差分析

吸附塔压降增大、透气性变差的主要原因:粉尘覆盖;铵盐结晶;活性炭平均粒度变小和设备腐蚀、堵塞。

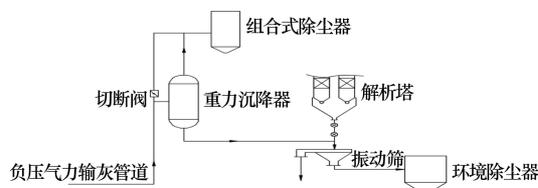


图4 增加重力沉降器工艺流程

优化方案:控制吸附塔前烟气粉尘浓度 $\leq 50 \text{ mg/Nm}^3$ ,定期检查清理进气室格栅粉尘,一旦发现塔前粉尘浓度在线检测数据异常升高或吸附塔排出的活性炭表面有明显的“白色粉尘”,应及时分析、查找原因。充分利用烧结机检修机会,组织人员检查进气室格栅“积灰”情况,发现有明显“积灰”时,应组织清扫。

当活性炭床长期不向下流动或流动速度较慢时,格栅间隙中的活性炭容易被粉尘覆盖。因此,要求活性炭床平均速度大于100 mm/h。

硫酸铵结晶不仅会堵塞活性炭微孔,还会堵塞活性炭的间隙,造成活性炭床透气性变差。吸附塔前的氨气预热温度 $\geq 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 、贫硫炭全硫 $\leq 2.0 \%$ 、脱硝前烟气二氧化硫浓度 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ ,可以有效避免硫酸铵的生成。

加强循环活性炭粒度检测,定期用2.0、5.0 mm的筛子对循环活性炭进行粒度分布检测。

在生产过程中,烟气局部温度降低会产生低温冷凝液,进而腐蚀、堵塞格栅,严重时还会使活性炭板结、增加床层阻力。在确保吸附塔活性炭床温度不超温的情况下,提高入塔烟气温度或增加兑冷空气量以降低烟气的露点温度均是防止烟气结露的重要措施。另外,应确保氨空混合气预热温度 $\geq 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 2.6 吸附塔气室积料分析

吸附塔气室内产生“积料”的根本原因是烟气的较高流速将活性炭层内的活性炭带到了气室。出解析塔的活性炭温度低、布料溜管保温不到位或者溜管长时间不下料均会导致塔内上窜的烟气在溜管内冷凝,产生的冷凝液与活性炭粉混合形成结块或“架桥”,使溜管下料不畅通,造成吸附塔顶部活性炭缺料,使烟气短路、阻力减小、流速加快。此时吸附塔进料时,悬浮在气流中的活性炭在烟气的带动下,很容易被吹到气室内。情况严重时烟道、烟囱底部会落下大量的活性炭。另外,吸附塔料位计出现误报情况也可能造成吸附塔顶部缺料。吸附塔气室底部积料越积越多,会造成活性炭层局部透气性变差,进而使活性炭吸附热不能被烟气带走、局部产生积热,严重时会引起吸附塔活性炭层局部温度高,导致超温事故;而且吸附塔气室积料还会降低吸附塔脱硫、

脱硝能力。大量的活性炭散落在气室内或烟道底部会增加烟气流动阻力,同时在烟气不断流动下产生二次扬尘,不利于烟囱出口烟尘的达标排放控制。

优化方案:定期巡检布料溜管,发现有结露或“架桥”时及时处理,防止布料管堵料;适当提高解析塔活性炭出口温度,防止活性炭“架桥”堵塞布料溜管;吸附塔料位计采用雷达料位计,防止出现误报;出气侧格栅板增设多孔板,阻拦被烟气带出的活性炭;定期检查、清理进气室侧格栅上的积灰,防止活性炭床局部烟气流速变大;定期检查、清理气室内的积料。

### 3 结 语

山西某钢铁集团在烧结烟气活性炭净化系统投运后,成功实现了烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物等多种污染物的超低排放,其浓度大幅优于《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》(环大气[2019]35号)的排放限值要求。同时,通过优化改进,该系统显著改善了现场操作环境,降低了活性炭消耗,节约了运行成本,保障了设备的长时间稳定运行。此外,两级活性炭烟气净化系统以其高稳定性和与烧结机的高同步率,成为一种适合烧结烟气超低排放治理的有效方法,不仅能

满足钢铁行业即将面临的二噁英超低排放要求,还符合未来烧结烟气净化技术的发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 左海滨,张涛,张建良,等. 活性炭脱硫技术在烧结烟气脱硫中的应用[J]. 冶金能源,2012,31(3):56-59.
- [2] 郗俊懋,张春霞,王海风,等. 烧结烟气典型污染物排放形势及减排技术分析[J]. 烧结球团,2016,41(6):59-64.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

(上接第 81 页)

填系统的运营成本,降低溢流水的含固率;通过对尾砂浓密方式、料浆搅拌方式、输送方式进行比较分析,确定采用深锥浓密机浓密方式,立式高速搅拌桶一段搅拌,自流输送方式;同时,结合现有充填系统设施,充分发挥现有充填系统立式砂仓的储砂能力,保证生产的稳定性。通过本次改造的实际效果,对于采用立式砂仓进行充填的现有矿山,建议改造成深锥浓密机,以确保底流浓度的稳定,实现稳态充填,满足充填体的强度需求。

### 参考文献:

- [1] 卢宏建,武立彬,夏传祥,等. 金属矿山充填体强度需求发展现状与展望[J]. 矿产保护与利用,2024,44(2):1-10.

- [2] 孙恒虎,刘晓明,田艳光,等. 矿山充填技术回顾与进展展望[J]. 采矿技术,2013,13(5):7-11.
- [3] 陈鑫政,郭利杰,史采星,等. 深锥浓密膏体充填工艺在国内某铜矿的应用与改进[J]. 中国矿业,2022,31(5):135-141.
- [4] 吴爱祥,王勇,王洪江. 膏体充填技术现状及趋势[J]. 金属矿山,2016(7):1-9.
- [5] 刘可任. 充填理论基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1982.
- [6] 梁峰,高谦,从革臣,等. 思山岭铁矿超细全尾砂固结粉充填胶凝材料研究[J]. 金属矿山,2019(8):198-203.
- [7] 李公成,王洪江,吴爱祥,等. 全尾砂无耙深锥稳态浓密性能分析[J]. 工程科学学报,2019,41(1):60-66.
- [8] 杨柳华,王洪江,吴爱祥,等. 全尾砂膏体搅拌技术现状及发展[J]. 金属矿山,2016(7):34-41.