两级活性炭吸附法烧结烟气净化系统工艺和装备

汪庆国[1]，黎前程[2]，李 勇[3]

（1. 宝山钢铁股份有限公司，上海 201900；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410007；
3. 湖南中冶长天节能环保技术有限责任公司，湖南 长沙 410007）

摘 要： 介绍了国内首套两级活性炭吸附法烧结烟气净化系统各种污染物脱除机理、工艺流程和系统装备，主要包括烟道系统、吸附系统、解析系统、活性炭储运系统等。对各主要系统内部结构、工作原理、相关设计和运行工艺参数进行了详细的说明，并对该系统的技术特点和投运后实际烟气净化效果进行了详细介绍。该系统具有污染物脱除率高，运行稳定可靠的优点。处理前烟气中 SO_2 平均浓度为 430.5 mg/Nm^3，处理后 SO_2 浓度在 0.224～4.203 mg/Nm^3 之间，SO_2 脱除率在 99.02%～99.95% 之间；处理前 NO_X 平均浓度为 277.5 mg/Nm^3，处理后 NO_X 含量在 20.9～41.5 mg/Nm^3 之间，NO_X 脱除率在 85.05%～92.47% 之间；处理后二噁英的平均毒性当量浓度为 0.0484 ngTEQ/Nm^3；净化后粉尘含量在 14.0～14.7 mg/Nm^3 之间。与一级吸附法净化系统相比，两级吸附净化系统可以深度脱除烟气中 SO_2 并大幅提高 NO_X 的脱除率。结合生产运行情况对该烧结烟气活性炭净化系统做出了适当评价并对其推广应用前景进行了展望。

关键词： 烧结烟气；活性炭；两级吸附；工艺流程；主要装备；净化效果

中图分类号： X701 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2018)01－0066－07

doi: 10.13403/j.sjqt.2018.01.014

The art of activated coke in sintering flue gas two-stage purifying process and equipment

Wang Qingguo[1], Li Qiancheng[2], Li Yong[3]

(1. *Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai* 201900; 2. *ZhongyeChangtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410007, *Hunan*; 3. *ZhongyeChangtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha* 410007, *Hunan*)

Abstract The removal mechanisms for main pollutants in sintering flue gas, process flow for flue gas purification and systematical equipment of the sintering flue gas purifying systems by activated coke were introduced in detail, which is the first two－stage purifying system of its kind in China. The major facilities including flue system, adsorption system, desorption system, activated coke storage and transportation system were systematically and completely illustrated. The inner structure, working principle, and relevant designing and operating parameters of some major equipment were concisely presented. The technological characteristics of this purifying system were summarized, and the actual treatment effect was presented. The results showed that, this system has the advantages of high reduction rate of pollutants and steady and reliable operating performance. The average SO_2 content in sintering flue gas is 430.5 mg/Nm^3 before being purified, while its content is decreased between 0.224 and 4.203 mg/Nm^3 after treatment, with a high removal rate from 99.02% to 99.95%; the average NO_X content is 277.5 mg/Nm^3 before being purified, while its content is decreased between 20.9 and 41.5 mg/Nm^3 after treatment, with a removal rate from 85.05% to 92.47%; the average toxic equivalent quantity of dioxin is decreased to 0.0484 ngTEQ/Nm^3 after treatment; the dust content after treatment is decreased between 14.0 and 14.7 mg/Nm^3. Compared with one－stage adsorption

收稿日期： 2017－09－06

作者简介： 汪庆国(1985－)，男，硕士，设计管理管理师、工程师，主要从事冶金工艺和环保方面的研究。

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

purifying system, two – stage purifying system can deeply reduce SO_2 and significantly improve the removal rate of NO_X. An evaluating conclusion on this two – stage purifying system was drawn based on the actual treatment effect and practical run performance. Meanwhile, the application prospect of this new purifying system was predicted.

Key words sintering flue gas; activated coke; two – stage adsorption; process flow; major equipment; purification effect

1 前　言

为适应未来更加严格的大气污染物排放标准，宝山钢铁股份有限公司（以下简称“宝钢股份”）根据宝钢湛江钢铁有限公司（以下简称“湛江钢铁”）2 台 550 m^2 烧结机的 2 套一级活性炭吸附法烧结烟气净化系统的运行情况和净化效果，通过技术改造为宝钢股份三烧结 600 m^2 的烧结机新建了一套具备两级活性炭吸附系统的烟气净化系统。通过两级活性炭吸附系统的串联使用和在其中使用不同新鲜程度的活性炭，以期达到既深度脱除烧结烟气中的污染物，尤其是提高难处理的 NO_X 的脱除率，又可以最大限度地降低生产运行成本的目的。该系统是目前国内首套两级活性炭吸附法烧结烟气净化系统，其主要建设目标为：①烟气中 SO_2 排放浓度≤50 mg/Nm^3；②烟气中 NO_X 排放浓度≤110 mg/Nm^3；③粉尘排放浓度≤20 mg/Nm^3；④二噁英当量排放浓度≤0.5 ngTEQ/m^3；⑤氟化物排放浓度≤4.0 mg/Nm^3；⑥氨逃逸≤10 mg/Nm^3；⑦与烧结机同步率≥95%。

2 烧结烟气活性炭净化原理

2.1 脱硫原理

烧结烟气净化使用的吸附剂为圆柱状活性炭[1,2]，大小为∅9 mm × 10 mm。利用活性炭（AC）物理吸附性能，能同时吸附脱除多种有害物质，具体过程如下：

物理吸附：$SO_2 \rightarrow SO_2^*$（* 表示吸附状态）（1）

化学吸附：$SO_2^* + O^* + nH_2O^* \rightarrow H_2SO_4^* + (n-1)H_2O^*$（2）

向硫酸盐转化：$H_2SO_4^* + 2NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_4^*$（3）

2.2 脱硝原理

活性炭脱硝过程包括了选择性催化还原（SCR）反应和非选择性催化还原（non – SCR）反应。SCR 利用活性炭自身催化性能或在其中添加催化剂，能使部分有害物质反应生成无害物质。反应的过程如下：

SCR 反应：$NO + NH_3 + 1/2O^* \rightarrow N_2 + 3/2H_2O$（4）

non – SCR 反应：$NO + —C\cdot\cdot Red \rightarrow 1/2\ N_2 + -C\cdot\cdot O$（5）

2.3 解析再生原理

活性炭解析再生过程如下：

硫酸分解：$H_2SO_4 \cdot H_2O + 1/2C \rightarrow SO_2 + 1/2\ CO_2 + 2H_2O$（6）

硫酸氢氨分解：$NH_4HSO_4 \rightarrow SO_3 + NH_3 + H_2O$；$SO_3 + 2/3NH_3 \rightarrow SO_2 + H_2O + 1/3N_2$（7）

还原性物质的生成：$-C\cdot\cdot O + 2/3NH_3 \rightarrow -C\cdot\cdot red + H_2O + 1/3N_2$（8）

2.4 二噁英脱除原理

二噁英是一类具有强毒性和强致癌性的有机污染物[3,4]。钢铁企业烧结过程是环境中二噁英的主要来源之一[5,6]。二噁英包括多氯二苯并对二噁英（PCDDs）和多氯二苯并呋喃（PCDFs）2 种[7]。烟气中固态二噁英在吸附塔内被活性炭移动层过滤捕集，气态二噁英则被活性炭吸附。被活性炭捕集和吸附的二噁英在解析塔内被加热到 400 ℃以上并持续超过 3 h，在催化作用下苯环间的氧基被破坏，最终被裂解为无害物质。

物理吸附：$PCDD/Fs \rightarrow PCDD/Fs^*$（9）

高温裂解：$PCDD/Fs^* + O^* \rightarrow CO_2 + H_2O + HCl$（10）

2.5 除尘和脱重金属原理

活性炭吸附层相当于高效的颗粒层过滤器，烟气中直径 1 μm 以上的粉尘通过与活性炭层发生碰撞而被捕集，1 μm 以下的颗粒物通过扩散

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

作用被捕集。活性炭捕集的粉尘在装卸、倒运和筛分过程中，部分脱附外逸的灰尘通过小型布袋除尘器除去。烟气中的汞、砷等重金属大多以粉尘为载体，主要通过活性炭层的过滤作用和吸附作用[8,9]从烟气中脱除。

3 系统组成与工艺流程

该净化系统主要由烟道系统、两级吸附系统、解吸系统、活性炭储运系统组成，辅助系统包括制酸系统和废水处理系统，氨气由其他单元供给并通过管道输送至交接点。其工艺流程见图1。

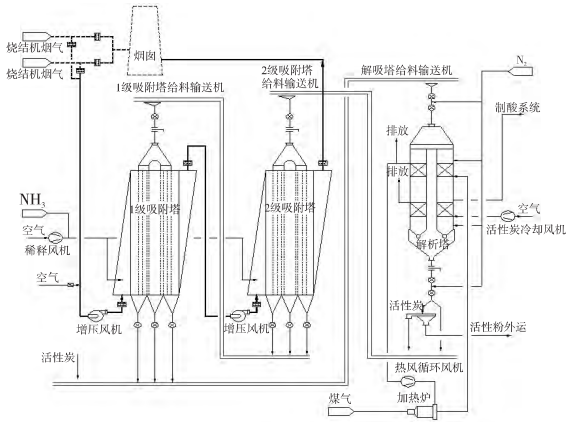


图1 两级活性炭吸附法烧结烟气净化工艺流程

该净化系统的烟气处理量为 197.624×10^4 Nm^3/h。在主抽风机至主烟囱的烟道上设置旁路烟气挡板并使用两台增压风机将烟气依次送入一级和二级吸附塔。氨气在“氨气/空气混合器”与稀释风机鼓入的空气混合，使 NH_3 浓度低于爆炸下限。稀释后的氨气由格栅均匀喷入各吸附单元入口烟道。烟气中的污染物被吸附塔内活性炭层吸附和通过催化反应生成无害物质，净化后的烟气进入主烟囱排放。吸收了 SO_2、NO_X、二噁英等污染物的活性炭经输送装置送往解析塔。

在解析塔内 SO_2 被高温解析释放出来，NO_X 在解析塔内继续进行 SCR 和 non－SCR 反应生成无害的 N_2 与 H_2O，二噁英在催化作用下受热分解为无害物质。富含 SO_2 的解析气体被送往制酸系统制取硫酸。解析后的活性炭经塔底部的振动筛筛分，筛上吸附能力强的大颗粒活性炭落入二级吸附塔给料输送机输送至吸附塔循环利用，筛下小于 1.2 mm 的小颗粒活性炭粉进入炭粉仓，用罐车运输至其他单元作为燃料使用。

该烟气净化系统由2套吸附解析系统组成，每套吸附解析系统主要包括2台增压风机、1座吸附塔(两级，每级包含4个吸附单元)、1座解析塔(2个塔)、1台热风炉、1套活性炭储运装置、1套小型布袋除尘器和1套烟气挡板门等设备。图2所示是投运后的烧结烟气活性炭净化系统。



图2 投运后的烧结烟气活性炭净化系统

4 主要装备

4.1 烟道系统

烟道系统是从主抽风机至烟囱的全部烟道及其上安装的设备。该净化系统设置2套烟道系统，分别对应2台主抽风机。每套烟道系统设置3.4 kW的一级增压风机和二级增压风机，净化系统的风压损失由增压风机补偿。在烟道系统设置了雾化喷水降温装置和电动冷风阀，可保证入塔烟气温度不大于135 ℃。烟道系统设置了原烟气、净烟气、系统旁路挡板和二级吸附塔旁路挡板，每座吸附塔的各个吸附单元也都设置有进出口烟气挡板。

4.2 吸附系统

吸附系统从上至下包括活性炭给料阀、布料仓、吸附模块，圆辊卸料机，下料仓，卸料阀等设备。该净化系统设置2套吸附系统，每套吸附系统与1套烟道系统对应。每套吸附系统由串联的两级吸附塔组成，每级吸附塔都由4个吸附单

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

元组成，两级吸附塔的外形尺寸都为 9.9 m × 28.0 m × 47.0 m，其中吸附单元总高为 24.0 m。吸附塔是整个烟气净化系统的核心设备之一，采用分层移动床型结构，每个吸附单元由左右对称共六个反应室组成，分别为前室、中室和后室，在不同的部位设有入口格栅、中间多孔板及出口微格栅。吸附塔空塔流速为 0.15 ~ 0.20 m/s。图 3 所示是建设中的吸附塔系统，从图中可以看到吸附塔的内部结构。



图 3　吸附塔内部结构

图 3 中两块相邻壳体之间的部分为一个吸附单元。SO_2、NO_X、二噁英、粉尘等污染物的吸附在吸附塔内完成。烟气从吸附单元左右两个模块中间垂直于活性炭运动的方向进入吸附模块，首先通过前室和中室，主要进行脱硫、除尘、除重金属和脱二噁英，最后进入后室，主要以脱硝为主[1,10]。经过两级吸附，有害物质被脱除，烟气经吸附塔出口进入总烟道，经净烟气挡板后由主烟囱排放。每个反应室中活性炭的移动速度由∅265 mm × L9 280 mm 圆辊卸料机控制，前、中、后室的圆辊卸料机的卸料速度分别约为 0.6 t/h，1.2 t/h 和 0.6 t/h。

该净化系统设置两级吸附塔，根据一、二级吸附塔入口烟气中污染物浓度的不同，两级吸附塔使用不同新鲜度的活性炭。在第二级吸附塔中，因为污染物浓度较低，烟气侧吸附推动力较低，吸附塔中采用从解析塔中解析出来的新鲜活性炭；在第一级吸附塔中，污染物浓度高，烟气侧吸附推动力高，吸附塔中采用在二级吸附塔吸附了少量污染物的活性炭。与两级吸附塔都使用新鲜活性炭相比，这种方法显著降低了活性炭的循环量，减轻了解析塔的解析负荷。

4.3　解析系统

解析系统从上至下包括活性炭给料阀、进料仓、解析塔本体、圆辊卸料机、卸料阀、下料仓、振动筛、炭粉仓等设备。该净化系统设置 2 套解析系统，每套解析系统与两级吸附塔对应。每套解析系统包含 1 组共 2 个解析塔，2 个解析塔并排布置，2 个解析塔的解析能力为 24 t/h。解析塔也是烟气净化系统的核心设备之一，主要包含进料段、加热段（解析段）、过渡段、冷却段和下料仓，解析段与冷却段均为列管换热器。图 4 为解析塔内外结构和加热段热风、冷却段冷风送风流程。

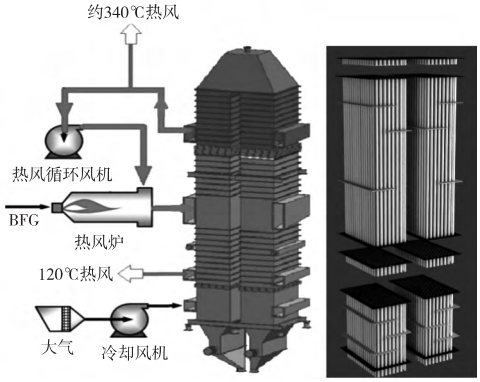


图 4　解析塔冷热风送风流程和内外部结构

由图 4 可见，高炉煤气在热风炉内燃烧后，热烟气送入解析塔加热段的壳体内。加热段的热风通道由壳体和内部水平设置的隔离钢板组成。在加热段，吸附了污染物的活性炭被热风从 100 ℃左右加热到 400 ℃以上，并保持 3 h 以上，活性炭吸附的 SO_2 被释放出来，生成富含 SO_2 的气体（SRG），SRG 在下部过渡段被输送至制酸单元制取 H_2SO_4。被活性炭吸附的部分 NO_X 继续发生 SCR 或者 non - SCR 反应，生成 N_2 与 H_2O。被活性炭吸附的二噁英在催化作用下受热分解为无害物质。

解析后的活性炭进入解析塔下部的冷却段。在冷却段，冷却风机鼓入空气通过间接冷却将活性炭的大部分物理热带走。每组解析塔对应设置一台冷却风机，冷却风量为 56 000 m^3/h。活性炭冷却到 120 ℃以下经∅265 mm × L4 200 mm

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

圆辊卸料机定量卸到下料仓，再通过下部卸料阀送入活性炭振动筛。解析塔圆辊卸料机的卸料速度约为9.6 t/h。每组解析塔对应设置1个共用的活性炭振动筛。

解析过程中需要用氮气进行保护，氮气同时作为载气将解析出来的SO_2等有害气体带出。氮气从进料段通入，富含SO_2的解析气从过渡段流出，一组解析塔氮气进口流量为460 Nm^3/h，进口温度约为100 ℃。

4.4 活性炭储运系统

活性炭储运系统包括卸料存储系统和输送机系统。每套卸料存贮系统与1套吸附解析系统对应设置一个储料仓，储料仓尺寸为∅4.0 m×11.0 m(筒体高9 m)，有效容积约为90 m^3，能存储14 d的活性炭用量。当系统需要添加活性炭时，通过仓底卸料装置和解析塔给料输送机向解析塔加料。每套吸附解析系统设置3条“Z”型链斗运输机，分别是二级吸附塔、一级吸附塔和解析塔给料输送机，其运输能力均为24 t/h。

4.5 系统的技术特点

该净化系统最突出的特点是根据一、二级吸附塔入口烟气中污染物浓度高低的不同，两级吸附塔使用了不同新鲜度的活性炭。这种方法不但提高了烟气净化的效果，而且还显著降低了活性炭的循环量，降低了生产运行的成本。该系统还具有如下技术特点：①吸附塔入口多点喷氨；②解析塔余热循环利用；③增压风机入口烟气温度自动调节；④吸附塔分区控制；⑤多种活性炭防摔设计；⑥制酸尾气循环处理等。

5 烟气净化实际效果

该净化系统自投运以来，各种污染物排放浓度都优于建设目标。图5所示是在2017年3月16日至3月22日系统功能考核期间，每日经该系统净化后主烟囱排放的烟气中SO_2的小时浓度变化。在此期间，该系统的2套吸附解析系统入口原烟气中SO_2浓度平均值分别为391 mg/Nm^3和470 mg/Nm^3，该系统原烟气中SO_2浓度的综合平均值为430.5 mg/Nm^3。

2017年3月16～22日主烟囱排放的烟气中SO_2的小时平均浓度变化，如图5所示。

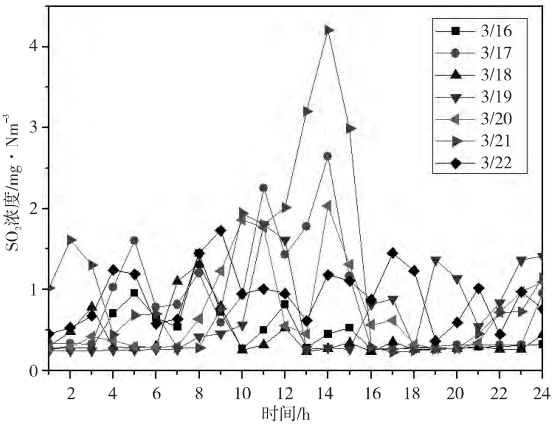


图5 2017年3月16～22日主烟囱排放的烟气中SO_2的小时平均浓度变化

由图5可知，处理后SO_2浓度在0.224～4.203 mg/Nm^3之间，大幅优于大气污染物特别排放限值中180 mg/m^3的排放要求。SO_2脱除率在99.02%～99.95%之间，说明两级活性炭烟气净化系统对SO_2具有超高的脱除率。

图6所示是在2017年3月16～22日系统功能考核期间，每日经该系统净化后主烟囱排放的烟气中NO_X的小时浓度变化。

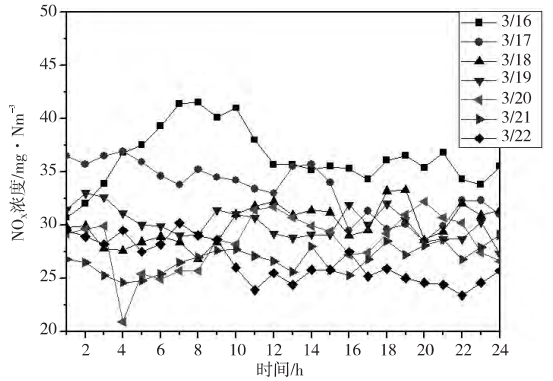


图6 2017年3月16～22日主烟囱排放的烟气中NO_X的小时平均浓度变化

在此期间，该系统的2套吸附解析系统入口原烟气中NO_X浓度平均值分别为290 mg/Nm^3和265 mg/Nm^3，该系统原烟气中NO_X浓度的综合平均值为277.5 mg/Nm^3。处理后NO_X浓度在20.9～41.5 mg/Nm^3之间，大幅优于大气污染物

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

特别排放限值中 300 mg/m^3 的排放要求。NO_X 脱除率在 85.05% ~92.47% 之间，与其他脱硝工艺设施相比，两级活性炭吸附法烟气净化系统的脱硝率有较大幅度的提高。

图 7 所示是在 2017 年 3 月 16 ~22 日系统功能考核期间，每日经该系统净化后主烟囱排放的烟气中粉尘的小时浓度变化。经过净化后粉尘含量在 14.0 ~14.7 mg/Nm^3 之间，明显优于大气污染物特别排放限值中 40 mg/m^3 的排放要求，表明该系统具有良好的除尘效果。

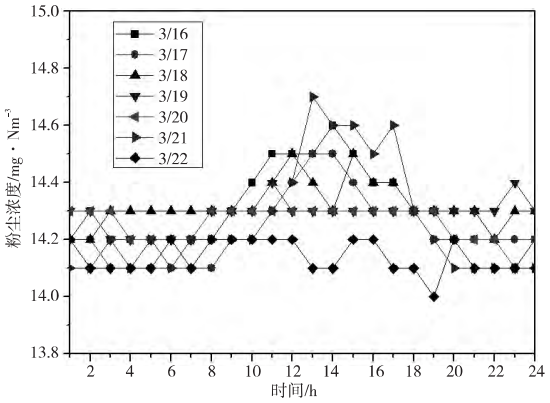


图 7　2017 年 3 月 16 ~22 日主烟囱排放的烟气中粉尘的小时平均浓度变化

通过在主烟囱取样孔抽样分析，净化后烟气中二噁英的平均毒性当量浓度为 0.048 4 ngTEQ/Nm^3，大幅优于大气污染物特别排放限值中 0.5 ngTEQ/m^3 的排放要求；氟化物平均浓度为 <0.06 mg/Nm^3，大幅优于大气污染物特别排放限值中 4 mg/m^3 的排放要求；氨的平均浓度为 1.74 mg/Nm^3，大幅小于 10 mg/Nm^3 的氨逃逸控制目标值。

6　与一级活性炭吸附法烧结烟气净化系统的比较

与湛江钢铁 2 套一级活性炭吸附法烧结烟气净化系统相比，宝钢股份两级活性炭吸附法烟气净化系统因增加 2 个二级吸附塔而增加的投资约 1.3 亿元，其年活性炭消耗比湛江钢铁一级吸附净化系统增加约 1 500 t，每 t 烧结矿烟气净化的综合成本(含折旧)比湛江钢铁一级吸附净化系统增加约 1.20 元。在烧结烟气量大体相当，入口污染物浓度范围大体一致的情况下，两级吸附烟气净化系统和一级吸附净化系统的净化效果对比见表 1。

表 1　两级活性炭吸附法和一级吸附法烧结烟气净化效果对比

项目	湛江钢铁	宝钢股份
净化系统方案	一级吸附塔	两级吸附塔
烟气量/ $\times 10^4$ Nm^3 · h^{-1}	180.031	197.624
净化前 SO_2 浓度平均值/mg · Nm^{-3}	497.34	430.50
净化后 SO_2 浓度平均值/mg · Nm^{-3}	3.53	0.75
SO_2 平均脱除率/%	99.31	99.83
净化前 NO_X 浓度平均值/mg · Nm^{-3}	315.06	277.50
净化后 NO_X 浓度平均值/mg · Nm^{-3}	117.24	30.25
NO_X 平均脱除率/%	62.64	89.10
净化后粉尘浓度平均值/mg · Nm^{-3}	9.46	14.26
净化后二噁英毒性当量浓度平均值/ngTEQ · Nm^{-3}	0.0058	0.0484

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

由表1可见，经过两级活性炭吸附净化系统和一级活性炭吸附净化系统处理后的烧结烟气中各种污染物的平均浓度都大幅优于大气污染物特别排放限值中规定的数值。与一级活性炭吸附净化系统相比，两级吸附净化系统在深度脱硫方面表现更佳，而且对于难脱除的 NO_X，其脱除率得到大幅提高。

7 结 语

(1) 该两级活性炭吸附法烧结烟气净化系统投运后，处理后的烟气中各种污染物含量都大幅优于《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》(GB28662－2012) 和大气污染物特别排放限值，成功实现了烟气中多种污染物的末端协同治理。处理后 SO_2 排放浓度小于 4.203 mg/Nm^3，脱除率大于 99.02%；NO_X 排放浓度小于 41.5 mg/Nm^3，脱除率大于 85.05%；粉尘排放浓度小于 14.7 mg/Nm^3；二噁英排放平均毒性当量浓度为 0.048 4 $ngTEQ/Nm^3$。该系统可以高效地脱除烧结烟气中的各种污染物，副产物 SO_2 用于制取98%的浓硫酸，可产生一定的经济效益，且整个系统不产生二次污染，是一种先进实用的烧结烟气末端协同深度治理的工艺和装备。

(2) 与湛江钢铁的一级活性炭吸附法净化系统相比，两级吸附净化系统对 SO_2 和 NO_X 的脱除率更高，尤其是对于较难脱除的 NO_X，其脱除率有大幅提高。从实际生产情况看，这3套系统都能够长期稳定地运行，系统的故障率小，实现了与烧结机同步率≥95%的目标，该系统是一种稳定可靠的烧结烟气污染物末端治理装备。

(3) 为加强大气污染防治、促进钢铁行业化解过剩产能，在重点控制区的钢铁企业从2013年开始逐步执行大气污染物特别排放限值。在此背景下，钢铁企业建设可以同时深度处理多种大气污染物的环保设施成为企业发展的当务之急。目前这种烧结烟气活性炭净化工艺和装备已经成为国内多家钢铁企业的拟选方案，具有巨大的应用价值和推广前景。

参考文献

[1] 王林狮，黄济民. 脱硫脱硝活性焦在尾气处理中的应用[J]. 煤化工，2016，44(4)：22－25.

[2] 翟尚鹏，刘静，杨三可，等. 活性焦烟气净化技术及其在我国的应用前景[J]. 化工环保，2006，26(3)：204－208.

[3] 林海鹏，于云江，李琴，等. 二噁英的毒性及其对人体健康影响的研究进展[J]. 环境科学与技术，2009，32(9)：93－97.

[4] 姚玉红，刘格林. 二噁英的健康危害研究进展[J]. 环境与健康杂志，2007，24(7)：560－562.

[5] 苍大强，魏汝飞，张玲玲，等. 钢铁工业烧结过程二噁英的产生机理与减排研究进展[J]. 钢铁，2014，49(8)：1－8.

[6] 闻胜，惠阳，张晓玲，等. 烧结厂烟尘和静电除尘器灰尘中二噁英的分布特征[J]. 环境化学，2007，26(6)：823－827.

[7] 罗阿群，刘少光，林文松，等. 二噁英生成机理及减排方法研究进展[J]. 化工进展，2016，35(3)：910－916.

[8] 范明霞，童仕唐. 活性炭上吸附态重金属稳定性[J]. 环境工程学报，2017，11(1)：312－316.

[9] 孟梅，华玉妹，朱端卫，等. 生物炭对重金属污染沉淀物的修复效果[J]. 环境化学，2016，35(12)：2543－2552.

[10] 高继贤，王铁峰，王金福. SO_2 体积分数对ZL50活性炭吸附脱硫行为的影响和动力学分析[J]. 环境科学，2010，31(5)：1152－1159.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版文章。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述声明。

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