

焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制工业化试验研究

王 斌¹, 李玉然¹, 刘连继², 陈 鹏², 郭俊祥¹, 林玉婷¹, 朱廷钰¹

(1. 中国科学院 过程工程研究所 湿法冶金清洁生产国家工程实验室 过程污染控制工程研究中心, 北京 100190;

2. 唐山钢铁集团有限公司, 河北 唐山 063016)

摘 要:目前我国大气污染形势依然严峻, 活性炭法烟气多污染物协同控制技术可同时脱除 SO₂、NO_x、H₂S 等多种污染物, 不消耗水, 无二次污染, 在国内已应用于钢铁烧结烟气、焦化焦炉烟气等, 但其效率有待提高。焦化行业焦炉烟气低硫高氮、多污染物共存的排放特征, 对活性炭法的脱硝效率及多污染物脱除效果提出了更高要求。为了探究提高焦炉烟气净化效率的因素, 建设了焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制工业化试验平台, 处理烟气流速 33 000 Nm³/h。通过调控活性炭移动速率和喷氨量, 优化了焦炉烟气净化效率, 分析了移动过程对活性炭物理性能的影响、再生后活性炭性质的变化和活性炭的碳消耗。结果表明, 活性炭法多污染物协同控制技术的脱硫效率超过 99%, 脱硝效率达到 80%, 各排放指标满足特别排放限值 (NO_x 浓度 ≤ 150 mg/Nm³、SO₂ 浓度 ≤ 30 mg/Nm³、颗粒物浓度 ≤ 15 mg/Nm³) 要求。移动过程使活性炭的耐压强度下降 33%~55%, 尤其是直径较小的活性炭, 耐磨强度有所下降, 但降幅较小, 这两项参数的下降会导致活性炭损耗量增加。再生后元素 S 的回收率达 90%, 吸附后 (再生前) 活性炭的比表面积相比新鲜活性炭下降了约 20%。活性炭物理碳磨损取主要决于活性炭的移动速率, 化学碳消耗来自官能团的分解, 活性炭的年损耗量约为初装量的 10.7%。

关键词: 活性炭; 脱硫脱硝; 焦炉烟气; 多污染物协同控制

中图分类号: X51; TQ536

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)06-0182-07

Industrial experimental study on the multi-pollutant collaborative control with activated carbon for coke oven flue gas

WANG Bin¹, LI Yuran¹, LIU Lianji², CHEN Peng², GUO Junxiang¹, LIN Yuting¹, ZHU Tingyu¹

(1. Beijing Engineering Research Center of Process Pollution Control, National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Tangshan Iron & Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063016, China)

Abstract: Now the situation of air pollution in China is still serious. The multi-pollutant collaborative control with activated carbons can simultaneously remove multi-pollutant, such as SO₂, NO_x and H₂S without water consumption and secondary pollution. It has been used in the flue gas purification of iron-steel sintering and coke oven et al, but the purification efficiency needs to be improved. In the coking industry, the activated carbon technology demands a higher denitrification efficiency and effectively capturing multiple pollutants for the coke oven flue gas with the emission characteristics of low sulfur, high nitrogen and multi-pollutant coexisting. In order to explore the factors to improve the efficiency of coke oven flue gas purification, the industrial test platform was built for multi-pollutant collaborative control with activated carbon for coke oven flue gas purification. The flue gas flow rate was 33 000 Nm³/h. The moving speed of activated carbon and ammonia injection quantity were adjusted to investigate and optimize the flue gas purification efficiency. The effect of moving process on physical properties of activated carbon, properties of activated carbon after regeneration and carbon consumption were analyzed. The results

收稿日期: 2019-12-03; 责任编辑: 白妮娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19120301

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC0210600); 河钢集团唐钢公司产学研项目

作者简介: 王 斌 (1987—), 男, 河北定州人, 工程师, 主要从事活性炭法烟气污染排放控制研发。E-mail: wangbin19@ipe.ac.cn。通讯作者: 李玉然, 副研究员, 主要从事工业烟气多污染物协同控制研究。E-mail: yrli@ipe.ac.cn; 朱廷钰, 研究员, 主要从事大气污染排放控制研究。E-mail: tyzhu@ipe.ac.cn

引用格式: 王斌, 李玉然, 刘连继, 等. 焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制工业化试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 182-188.

WANG Bin, LI Yuran, LIU Lianji, et al. Industrial experimental study on the multi-pollutant collaborative control with activated carbon for coke oven flue gas [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 182-188.



移动阅读

indicate that the desulfurization efficiency and denitrification efficiency of the multi-pollutant collaborative control technology with activated carbon are more than 99% and 80%, respectively. The emission indexes meets the special emission standards ($\text{NO}_x \leq 150 \text{ mg/Nm}^3$, $\text{SO}_2 \leq 30 \text{ mg/Nm}^3$, $\text{PM} \leq 15 \text{ mg/Nm}^3$). The compressive strength of activated carbon obviously decreases by 33%–55% during the moving process, especially for the smaller diameter activated carbon, while the abrasion resistance decreases slightly, but the decrease range is small. The decrease of these two parameters will increase the consumption of activated carbon. The recovery rate of elemental sulfur in the regeneration process is up to 90%, and the specific surface area of activated carbon after adsorption (before regeneration) is approximately 20 percent lower than fresh activated carbon. The physical carbon abrasion of activated carbon mainly depends on the moving speed, and the chemical carbon consumption depends on decomposition of the functional groups. The total carbon consumption of activated carbon is approximately 10.7 percent per year of the first loading capacity.

Key words: activated carbon; desulfurization and denitrification; coke oven flue gas; multi-pollutant collaborative control

0 引 言

焦化行业是我国重点监控的污染行业之一,其排放的烟气中 NO_x 约占全国工业 NO_x 排放量的 8%^[1]。焦炉烟气成分复杂,总体排放特征为低硫高氮、多污染物共存^[2-4]。我国从 2012 年开始执行 GB 16171—2012《炼焦化学工业污染物排放标准》,规定一般地区 NO_x 、 SO_2 及颗粒物排放浓度限值分别为 500、50 和 30 mg/Nm^3 ,特别排放限值地区分别为 150、30 和 15 mg/Nm^3 。2018 年 9 月河北省发布 DB 132863—2018《炼焦化学工业大气污染物超低排放标准》,规定 NO_x 、 SO_2 及颗粒物排放浓度限值分别为 130、30 和 10 mg/Nm^3 ,这对焦化行业烟气净化技术提出了更高要求。

焦炉烟气净化技术主要采用 2 种工艺路线:旋转喷雾干燥吸收(SDA)半干法脱硫+选择性催化还原(SCR)脱硝工艺、活性炭法一体化净化工艺^[5-8]。宝钢湛江 7 m 焦炉于 2015 年 11 月初投产烟气净化装置,采用了 SDA 半干法脱硫+低温 SCR 脱硝除尘热解析一体化技术与工艺^[9],先烟气脱硫,然后布袋除尘,最后低温 SCR 脱硝,烟气出口污染物满足国家特别排放限值。SDA 半干法脱硫+SCR 脱硝工艺净化效率高,但系统流程较长。安阳钢铁焦化分公司 6 m 焦炉于 2017 年 8 月底和 9 月中旬分别投产 2 套活性炭法一体化烟气净化装置^[10],该工艺充分利用了焦化系统的各项资源,无新污染物产生,系统占地面积小,脱硫效率达到 95%,脱硝效率达到 30%~50%,出口颗粒物浓度小于 10 mg/m^3 。新疆八一钢铁 6.5 m 焦炉采用活性炭法烟气脱硫脱硝工艺^[11],2018 年 9 月投入运行,运行实践表明,脱硫效率达到 99%,脱硝效率达到 35%~50%。活性炭法净化工艺脱硫效率较高,但脱硝效率有待提高。

中国科学院过程工程研究所研发了活性炭法(IPE-AC)烟气净化技术,于 2018 年 9 月底在唐钢

美锦(唐山)煤化工有限公司建成了焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制工业化试验装置,设计脱硫效率 95%以上,脱硝效率达到 80%,出口颗粒物浓度小于 10 mg/Nm^3 ,并开展了系列试验研究。

1 试 验

1.1 系统组成与工艺流程

焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制工业化装置的处理烟气流 33 000 Nm^3/h ,如图 1 所示。该装置包含烟气系统、吸附系统、解析系统和活性炭输送系统,其辅助设施包括活性炭卸料存贮系统、热风炉系统、供氨系统、硫铵制备系统等。



图 1 焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制工业化试验装置

Fig 1 Industrial device for multi-pollutant collaborative control with activated carbon for coke oven flue gas

工艺流程如图 2 所示,包括烟气流程和活性炭流程。烟气经换热器降温至 135 $^{\circ}\text{C}$ 左右,由增压风机输送至吸附塔底部脱硫段,经活性炭脱硫后进入塔内过渡段与氨气混合,混合气经吸附塔上部脱硝段 SCR 法脱硝,净烟气由烟囱排入大气。活性炭由吸附塔顶部进入塔内,自上而下移动,吸附饱和的活性炭由塔底排出,经提升机输送至解析塔,加热再生后经振动筛筛分,筛上颗粒由提升机再次输送至吸附塔循环使用,筛下的活性炭粉由新鲜的活性炭予以补充。

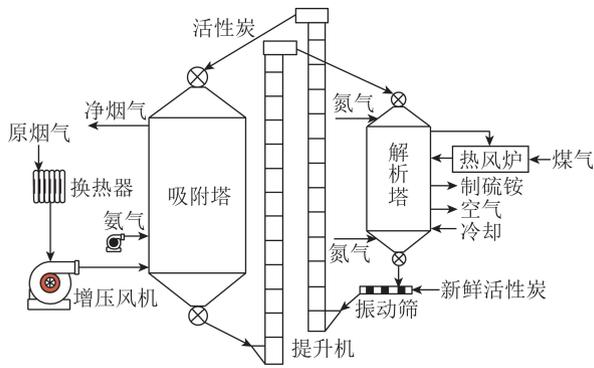


图2 工艺流程

Fig 2 Technological process

1.2 主要工艺设备

1) 吸附塔

吸附塔由2个吸附单元组成,每个吸附单元由2层活性炭组成,每层活性炭可单独调节移动速率。每个吸附单元从下而上分为2段,按烟气进入顺序分别为底部的脱硫段和上部的脱硝段。当焦炉烟气通过脱硫段时,主要进行脱硫、除尘、除多污染物等,通过脱硝段时以脱硝为主。

2) 解析塔

解析塔主要包括上部的加热段和下部的冷却段,两者都由多管换热器组成。活性炭在氮气中被间接加热到400℃以上,释放或分解吸附的污染物,恢复活性。再生后的活性炭,在冷却段中冷却到120℃以下,输送至振动筛。

3) 活性炭输送机

系统需2台链斗式提升机,为吸附塔和解析塔输送活性炭。吸附塔活性炭提升机为多点接料提升机,将吸附塔下料活性炭输送至解析塔塔顶。解析塔活性炭提升机为单点接料提升机,将振动筛筛分后的活性炭输送至吸附塔塔顶。

1.3 主要工艺参数

主要工艺参数见表1。

表1 主要工艺参数

Table 1 Main processing parameters

项目	给定值	设计值
烟气量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	—	33 000
烟气温度/℃	180~220	120~150
烟气水分/%	15~20	15~20
进出口SO ₂ 浓度/(mg·Nm ⁻³)	90~150	≤10
进出口NO _x 浓度/(mg·Nm ⁻³)	290~350	≤65
进出口颗粒物浓度/(mg·Nm ⁻³)	15~25	≤10

1.4 活性炭参数

采用9 mm柱状活性炭,具体指标见表2。

表2 活性炭技术参数

Table 2 Technical parameters of activated carbon

项目	指标	测试标准
形状	圆柱状颗粒	GB/T 7702.1—1997
粒径分布/%	≥11.2 mm	≤5
	11.2~5.6 mm	≥90
	5.6~1.4 mm	≤4.7
	≤1.4 mm	≤0.3
耐磨强度/%	≥97	GB/T 30202.3—2013
耐压强度/daN	≥400	GB/T 30202.3—2013
堆密度/(g·L ⁻¹)	600±50	GB/T 30202.1—2013
含水率/%	≤3	GB/T 7702.1—1997
燃点/℃	≥420	GB/T 7702.9—2008
脱硫值/(mg·g ⁻¹)	≥30	GB/T 30202.4—2013
脱硝效率/%	≥50	GB/T 30202.5—2013
灰分/%	≤20	GB/T 7702.15—2008
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	180~200	GB/T 7702.20—2008
pH	9.5~11.5	GB/T 7702.16—2008
挥发分/%	≤3	GB/T 212—2008

1.5 分析方法

烟气进出口的NO_x、SO₂、颗粒物和O₂浓度通过聚光科技的CEMS-2000烟气在线监测系统及MRU烟气分析仪测定;活性炭耐磨强度采用MHXT-2D型耐磨强度测定仪测定,耐压强度采用MHXT-3D型耐压强度测定仪测定;元素含量分析在Vario EL cube分析仪上采用动态燃烧法原理完成;X射线光电子能谱采用Thermo公司的ESCALAB 250;孔结构分析采用Quanta Chrome公司的Autosorb-iQ物理吸附仪测定;脱除效率基于进出口的浓度差值计算。

2 结果与讨论

2.1 运行参数调控

活性炭脱硫脱硝工艺中,活性炭的移动速率是影响污染物脱除效果的重要参数之一。活性炭移动速率可通过吸附塔和解析塔底部的卸料阀及连接2个塔的活性炭提升机共同控制。调节移动速率的依据是使吸附塔出口烟气污染物浓度达标,同时解析塔内活性炭充分再生。

若移动速率过快,解析塔内活性炭停留时间过短,含硫沉积物无法充分解析^[12],进而影响再生后的脱硫脱硝活性;同时,过快移动会加剧活性炭之间及其与反应器壁间的摩擦,增加活性炭的物理碳磨损。若移动速率过慢,吸附饱和的活性炭不能及时

输送到解析塔,使吸附塔内活性炭脱硫脱硝效率下降,同时脱硝段混入 SO_2 也会使活性炭结块进而影响塔内气相流场。

活性炭移动速率对 NO_x 浓度及再生后脱硫值的影响见表3。可知移动速率为 0.017 m/h 时,再生后的活性炭硫容已经恢复,但由于活性炭移动速率过慢,恢复硫容的活性炭不能及时进入吸附塔中,造成吸附塔内的吸附能力降低,出口 NO_x 浓度提高,脱硝效率难以满足要求。经多次调试,活性炭移动速率提高至 0.024 m/h 后,出口 NO_x 浓度可以满足排放要求,但从长期来看,活性炭再生并不充分,其硫容不断下降。获得的合适移动速率为 0.020 m/h ,可同时满足解析塔的再生需求及吸附塔的脱除效率需求。

表3 活性炭移动速率对 NO_x 浓度及再生后脱硫值的影响
Table 3 Effect of moving speed of activated carbon on NO_x concentration and desulfurization value after regeneration

移动速率/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	出口 NO_x 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)	再生后活性炭脱硫值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
0.017	77	33
0.020	60	33
0.024	63	27

喷氨量对 NO_x 浓度及氨逃逸的影响见表4。可知喷氨量直接影响活性炭的脱硝效率,氨氮比为 0.85 时,脱硝效率低,出口 NO_x 超标;氨氮比达到 1.20 时,吸附塔氨逃逸达到了 19×10^{-6} ,远超标准。通过多次调试,将喷氨量控制在约 $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$,此时氨氮比为 1 ,氨逃逸为 2.7×10^{-6} ,低于要求值 3×10^{-6} 。

表4 喷氨量对 NO_x 浓度及氨逃逸的影响
Table 4 Effect of ammonia injection quantity on NO_x concentration and ammonia escape

氨氮比	喷氨量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	出口 NO_x 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)	氨逃逸/ 10^{-6}
0.85	3.0	85	2.5
1.00	3.5	60	2.7
1.20	4.2	59	19.0

上述参数确定后,考察了系统长时间运行的脱硫脱硝除尘效率。系统稳定连续运行 $2\,000 \text{ h}$ 的进出口污染物浓度变化如图3所示,其中焦炉烟气入口 NO_x 浓度约为 $315 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,出口浓度约为 $58 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,脱硝效率达到 80% ;入口 SO_2 浓度约为 $120 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,出口 SO_2 浓度为 0 ,脱硫效率约为 100% ;颗粒物入口浓度为 $20 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,出口浓度为 $7 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,排放指标低于特别排放限值。

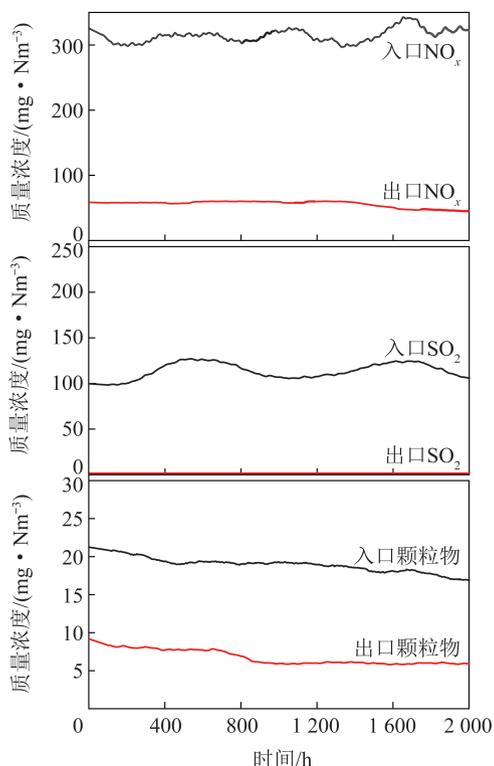


图3 污染物浓度随时间变化

Fig 3 Change curves of pollutant concentration with time

2.2 移动过程对活性炭物理性能的影响

活性炭物理性能包括耐压强度和耐磨强度,新鲜和筛分后的活性炭样品的物理强度对比见表5,其中D1为粒径 $8 \sim 9 \text{ mm}$ 新鲜活性炭,D2和D3分别为粒径 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 解析筛分后的活性炭。由表5可知,活性炭在移动再生过程中耐压强度下降明显,降幅 $33\% \sim 55\%$,尤其是直径较小的活性炭。其耐磨强度也有所下降,但降幅较小。这两项参数的下降会导致活性炭损耗量的增加。为了确保系统的正常运行,运行过程中应及时筛分出破碎的活性炭。

表5 不同活性炭样品的耐压耐磨强度

Table 5 Compressive strength and abrasion resistance of various activated carbon

活性炭样品	耐压强度/ daN	耐磨强度/ $\%$
D1	900	98
D2	600	97
D3	400	95

2.3 再生后活性炭性质变化

为了验证活性炭对烟气中多污染物的吸附及再生性能,对新鲜、再生前后的活性炭进行元素分析,结果见表6。

由表6可知,由于烟气中含有 NO_x ,且活性炭对硫化物具有较强的吸附能力,再生前(吸附产物)的

表6 活性炭样品元素分析

Table 6 Ultimate analysis of activated carbon

活性炭 样品	元素分析/%				
	C _{daf}	N _{daf}	H _{daf}	S _{daf}	O _{daf}
新鲜	78.53	0.97	0.22	4.49	15.79
再生前	70.22	1.15	0.13	9.34	19.16
再生后	75.44	2.14	0.13	4.95	17.34

N、S元素含量明显高于新鲜活性炭。活性炭热再生后,S元素显著降低,经过计算可知解析出的硫占吸附过程吸附硫总量的90%左右。活性炭中仍残留一部分硫尚未解析,分析原因可能是吸附过程中生成了相对稳定的含硫物种,在解析温度为420℃左右时不能分解释放。因此再生后O元素含量减少,主要是因为羧基等官能团可在420℃以下分解,产生CO和CO₂。

再生前后的活性炭XPS光谱见图4和表7。可知O 1s光谱包括:峰1,C=O(531.0~531.9 eV);峰2,—OH(532.3~532.8 eV);峰3,C—O—C(533.1~533.8 eV);峰4,COOH(534.3~535.4 eV);峰5,吸附水/氧(536.0~536.5 eV)。再生后含氧官能团总量有所减少,目前研究的共识是活性炭表面的酚羟基和羧基是NH₃的吸附位点,其官能团含量直接影响脱硝效率。由图4可知,再生后酚羟基和羧基都明显减少,造成活性炭脱硝效率下降。

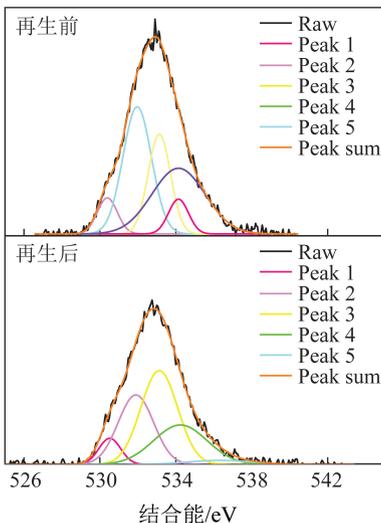


图4 活性炭再生前后O 1s XPS谱图

Fig 4 XPS spectra of O 1s before and after regeneration of activated carbon

为了研究活性炭表面孔隙结构的变化情况,对新鲜、吸附-再生后的活性炭孔隙结构进行分析,结果如图5所示。与新鲜活性炭相比,吸附后(再生前)活性炭的比表面积下降约20%,这是因为烟气中的含硫物质与NH₃反应沉积于活性炭表面及孔隙

表7 活性炭再生前后C 1s峰分峰情况

Table 7 C 1s spectra of activated carbon

活性炭	before and after regeneration					%
	C=O	OH	C—O—C	COOH	H ₂ O	
再生前	17.6	35.6	23.7	17.7	5.4	
再生后	15.9	30.4	35.1	15.6	3.0	

结构中。再生后由于硫酸盐分解,活性炭的微孔增加,由于再生过程伴有活性炭表面含氧官能团的分解,因此其再生后的微孔容积比新鲜样品更大。

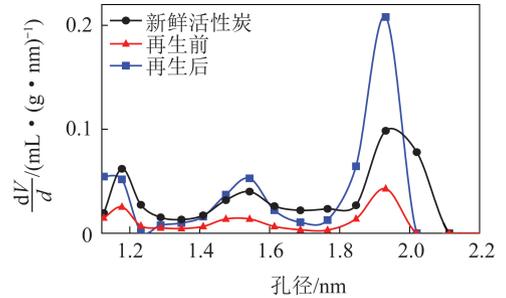


图5 不同活性炭样品的孔径分布

Fig 5 Pore size distribution of various activated carbons

活性炭的微孔主要集中在1.2、1.5和1.9 nm。与新鲜活性炭相比,活性炭表面含硫物质的沉积使吸附后的活性炭孔径明显减小。加热再生后,由于活性炭表面官能团的分解,其孔径显著增大,甚至超过新鲜的活性炭。

2.4 活性炭碳消耗

活性炭碳消耗是活性炭烟气净化技术运行成本的重要因素,通过研究碳消耗,可以优化工艺条件,减少CO和CO₂排放^[13]。活性炭碳消耗主要分为物理碳磨损和化学碳消耗两部分^[14]。物理碳磨损取决于活性炭的移动速率和循环次数,而化学碳消耗来自官能团的分解^[15]。

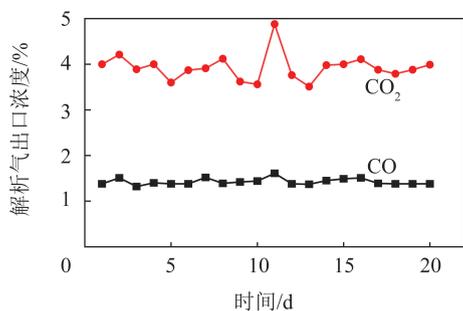
物理碳磨损发生在活性炭移动过程中,以活性炭粉末的形式被振动筛筛分出。根据活性炭初装量折算的物理碳磨损计算方法为

$$\alpha = m_1 T / m, \quad (1)$$

其中, α 为物理碳磨损,%/a(以初装量计,下同); m_1 为平均筛下活性炭粉末质量,t/h; T 为年运行时间,h; m 为活性炭初次装填量,t。测得物理碳磨损为8%/a。

活性炭的化学碳消耗主要发生在热再生过程中,为了探究化学碳消耗量以及碳消耗的来源,利用MRU烟气分析仪测试反应器出口处CO₂和CO的浓度,测试结果如图6所示。

CO₂主要来自活性炭中羧酸及酸酐的分解,CO主要来自活性炭中的苯酚及酸酐的分解。再生过程

图6 CO和CO₂浓度随解析时间变化Fig 6 Change of CO and CO₂ concentrations with desorption time

中CO出口浓度约为1.5%,CO₂约为4%,二者比例约为1:3。根据活性炭初装量折算的化学碳消耗计算方法为

$$\beta = \varphi v M_1 T / M_2 \quad (2)$$

其中, β 为化学碳消耗,%/a(以初装量计,下同); φ 为CO₂体积分数,%; v 为解析气体积,m³/h; M_1 为CO/CO₂的摩尔质量,g/mol; M_2 为解析气的摩尔质量,g/mol。折算出化学碳消耗约为2.7%/a。

3 结 论

1)焦炉烟气活性炭法多污染物协同控制工业化试验装置活性炭移动速率为0.020 m/h,氨氮比为1时,系统烟气出口NO_x约为58 mg/Nm³,脱硝效率达到80%;出口SO₂为0,脱硫效率约为100%;颗粒物出口浓度为7 mg/Nm³,排放指标低于特别排放限值,且氨逃逸为2.7×10⁻⁶,低于要求值3×10⁻⁶。

2)活性炭在移动再生过程中耐压强度下降明显,降幅33%~55%,尤其是直径较小的活性炭,其耐磨强度也有所下降,但降幅较小。这2项参数下降会导致活性炭损耗量增加。为了确保系统的正常运行,运行过程中应及时筛分出破碎的活性炭。

3)活性炭热再生后,S元素显著降低,解析出的硫占吸附过程吸附硫总量的90%左右;吸附后(再生前)活性炭的比表面积相比新鲜活性炭下降约20%,活性炭的微孔主要集中在1.2、1.5和1.9 nm,活性炭表面含硫物质的沉积使吸附后的活性炭孔径明显减小。加热再生后,由于活性炭表面官能团的分解,其孔径显著增大,甚至超过新鲜的活性炭。

4)活性炭物理碳磨损发生在活性炭移动过程中,为8%/a;活性炭的化学碳消耗主要发生在热再生过程中,为2.7%/a,活性炭年损耗仅为初装量的10.7%。

参考文献(References):

[1] 王升龙,王乃超.焦炉烟道气脱硝技术研究进展[J].广东化工,

2019,46(11):146.

WANG Shenglong,WANG Naichao.Research progress on denitrification technology of coke oven flue gas[J].Guangdong Chemical Industry,2019,46(11):146.

[2] 王岩,张飏,郭珊珊,等.焦炉烟气脱硫脱硝技术进展与建议[J].洁净煤技术,2017,23(6):1-6.

WANG Yan,ZHANG Yang, GUO Shanshan, et al. Progress and suggestion on desulfurization and denitrification technology for coke oven flue gas[J].Clean Coal Technology,2017,23(6):1-6.

[3] 李立业,田京雷,黄世平.焦炉烟气SO₂和NO_x排放控制[J].燃料与化工,2017(2):4-6,11.

LI Liye,TIAN Jinglei,HUANG Shiping.Emission control of SO₂ and NO_x in coke oven flue gas[J].Fuel & Chemical Processes,2017(2):4-6,11.

[4] 杨锋,蒋廉颖,冯志军.焦炉烟气脱硫脱硝技术研究进展[J].山西化工,2019(1):53-54.

YANG Feng,JIANG Lianying,FENG Zhijun.Research progress of coke oven flue gas desulfurization and denitrification technology[J].Shanxi Chemical Industry,2019(1):53-54.

[5] 尹华,吕文彬,孙刚森,等.焦炉烟道气净化技术与工艺探讨[J].燃料与化工,2015,46(2):1-4.

YIN Hua,LYU Wenbin,SUN Gangsen,et al.Technology of coke oven flue gas purification and discussion on its process[J].Fuel & Chemical Processes,2015,46(2):1-4.

[6] 许红英,陈鹏,颜芳.焦炉烟气脱硫脱硝一体化技术的研究进展[J].燃料与化工,2019,50(4):1-3.

XU Hongying,CHEN Peng,YAN Fang.Progress of research in an integrated DeSO_x and DeNO_x from coke oven waste gas[J].Fuel & Chemical Processes,2019,50(4):1-3

[7] 孙刚森,尹华,吕文彬,等.焦炉烟气脱硫除尘脱硝及其热解析一体化工艺[J].燃料与化工,2015,46(6):40-41,46.

SUN Gangsen,YIN Hua,LYU Wenbin,et al.Integrated process for desulfurization,deducting,denitration and thermal decomposition of coke oven flue gas[J].Fuel & Chemical Processes,2015,46(6):40-41,46.

[8] 张庆文,常治,铁刘莉,等.SDS干法脱硫及SCR中低温脱硝技术在焦炉烟气处理中的应用[J].化工装备技术,2019,40(4):14-18.

ZHANG Qingwen,CHANG Zhi,TIE Liuli,et al.Application of SDS dry desulfurization and SCR medium and low temperature denitration technology in coke oven flue gas treatment[J].Chemical Equipment Technology,2019,40(4):14-18.

[9] 孙刚森,高飞.基于宝钢湛江焦炉烟道废气净化工程之实施论焦炉烟气污染物净化治理方案[C]//2015年(第九届)焦炉节能环保及干熄焦技术研讨会论文集.安阳:中国金属学会炼焦化学分会,2015:153-156.

SUN Gangsen,GAO Fei.Based on the implementation of the flue gas purification project of Zhanjiang coke oven in Baosteel[C]//2015(9th)Symposium on Coking Energy Conservation,Environmental Protection and CDQ Technology. Anyang: Coking Chemistry Branch of the Chinese Society for Metals,2015:153-156.

[10] 张化强,高庆华,李学志,等.宝钢6m焦炉活性炭烟气脱硫脱

- 硝一体化技术实践[J].河南冶金,2018,26(5):32-33.
- ZHANG Huaqiang, GAO Qinghua, LI Xuezhi, et al. The application of removing the SO_2 and NO_x in exhaust gas with the activated carbon at 6 m coke oven in Angang[J].Henan Metallurgy, 2018, 26(5):32-33.
- [11] 王宁.活性焦联合脱硫脱硝技术在焦炉烟气治理中的应用[J].新疆钢铁,2019(1):9-11.
- WANG Ni. Application of activated coke combined desulfurization and denitrification technology in coke oven flue gas treatment[J]. Xinjiang Iron and Steel, 2019(1):9-11.
- [12] 李东亮,李震.河钢邯钢 $2 \times 360 \text{ m}^2$ 烧结机解析塔工艺优化[J].河北冶金,2019(S1):125-127.
- LI Dongliang, LI Zhen. Process optimization of analytic tower of $2 \times 360 \text{ m}^2$ sintering machine in HBIS Hansteel [J]. Hebei Metallurgy, 2019(S1):125-127.
- [13] LI Y, LIN Y, WANG B, et al. Carbon consumption of activated coke in the thermal regeneration process for flue gas desulfurization and denitrification [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 1391-1400.
- [14] BOYANO A, GÁLVEZ ME, MOLINER R, et al. Carbon-based catalytic briquettes for the reduction of NO; Effect of H_2SO_4 , and HNO_3 , carbon support treatment [J]. Fuel, 2008, 87(10/11): 2058-2068.
- [15] LIN Y, LI Y, XU Z, et al. Transformation of functional groups in the reduction of NO with NH_3 , over nitrogen-enriched activated carbons [J]. Fuel, 2018, 223: 312-323.