CFB + SCR 脱硫脱硝系统工艺设备运行失稳原因分析

侯建勇[1,2]，杜向前[2]，卢忠诚[2]，程晓辉[2]，严 芳[1]，李 楠[1]
（1. 新疆大学 商学院，新疆 乌鲁木齐 830008；2. 中冶华天工程技术有限公司，安徽 马鞍山 243061）

摘要： 随着钢铁工业烟气超低排放的不断推进，由循环流化床半干法（CFB）脱硫技术搭配布袋除尘器技术与选择性催化还原法（SCR）脱硝技术联合组成的一体化治理技术，在烧结和球团烟气污染物治理中已逐步得到应用。但在实际运行过程中，系统的工艺设备存在有众多不稳定因素。本文从实际生产出发，针对其工艺运行参数和设备运行状况中的不稳定因素进行相关分析，发现烟气参数和设备选型及检修力度是影响系统运行稳定的关键因素，并通过采取烟气源头控制和运行过程控制等相关措施，在提高烟气污染物脱除效率的同时，加强烟气治理系统的运行稳定性。

关键词： CFB；SCR；脱硫脱硝；工艺设备；运行失稳；原因分析
中图分类号： X701.3 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2022）03－0089－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.044

Analysis of causes of process equipment instability of CFB + SCR desulfurization and denitrification system

HOU Jianyong[1,2]，DU Xiangqian[2]，LU Zhongcheng[2]，CHENG Xiaohui[2]，YAN Fang[1]，LI Nan[1]
（1. *Business School，Xinjiang University，Urumqi* 830008，*Xinjiang，China*；2. *Zhongye Huatian Engineering Technology Co.，Ltd.，Ma'anshan* 243061，*Anhui，China*）

Abstract: With the continuous promotion of ultra-low emission of flue gas in iron and steel industry，the integrated treatment technology consisting of circulating fluidized bed semi-dry（CFB）desulfurization technology，bag-type dust remover technology and selective catalytic reduction（SCR）denitrification technology has been gradually applied in the treatment of flue gas pollutants in sintering and pelletizing. However，in the actual operation，there are numerous unstable factors in the process equipment of the system. From the actual production，the unstable factors are analyzed in its process operation parameters and equipment operation conditions，and it is found out that flue gas parameters and equipment selection and maintenance efforts are the key factors affecting the system operation stability，and it is necessary to strengthen the operation stability of flue gas treatment system while to improve the flue gas pollutant removal efficiency by taking relevant measures such as flue gas source control and operation process control.

Key words: CFB；SCR；desulfurization and denitrification；process equipment；operational instability；analysis of causes

2020 年我国废气中的 SO_2、NO_x、粉尘颗粒物排放量分别为 $3.182\ 0\times10^6$ t、$1.019\ 7\times10^7$ t、6.114×10^6 t，其中来自工业源的占比分别为 79.57%、40.94%、65.57%[1]。钢铁冶炼是大气污染物排放重点行业，含 SO_2 的烟气主要来源于钢铁生产长流程中的能源燃烧，分布在烧结（球团）、焦炉、炼铁、炼钢、轧钢等工序[2]。生态环境部于 2019 年 4 月发布的《关于

收稿日期： 2021－03－22；**修回日期：** 2021－07－05
基金项目： 安徽省重点研究与开发计划（1804a0802195）
作者简介： 侯建勇（1982—），男，硕士研究生，高级工程师，从事钢铁工业大气污染治理技术研究工作。

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

推进实施钢铁行业超低排放的意见》中要求：烧结(球团)烟气中颗粒物、SO_2、NO_x的排放限值分别为10、35、50 mg/m^3。随着钢铁工业大气污染物超低排放工作的推进，各种烟气治理技术也得以应用和推广。目前国内烧结/球团烟气超低排放治理技术主要有：以石灰石膏法、氨法、镁法为代表的湿法脱硫技术和以循环流化床(CFB)、旋转喷雾(SDA)为代表的半干法脱硫技术，搭配静电、布袋、电袋等除尘技术，与选择性催化还原(SCR)、氧化法等脱硝技术共同组成的联合脱除技术，以及活性炭(焦)脱硫脱硝搭配袋式除尘器组成的一体化脱除技术[3-4]。

由于部分地区加大了对尾气排放中的氨、二噁英、水分等指标的控制力度，由循环流化床(CFB)半干法搭配布袋除尘器与选择性催化还原(SCR)脱硝组成的一体化脱除技术在案例应用方面逐渐增多[5]。但是在该一体化脱除技术的系统实际运行中，也出现了各种工艺和设备问题，造成系统的进行失稳情况，导致系统运行费用的增加。本文结合安徽某钢铁公司炼铁厂的烧结与球团烟气治理项目，通过对项目运行失稳的影响因素进行调研，分析各因素所牵涉的制约条件，提出相关优化不利因素的相关对策，为提高系统运行状况提供思路，以便节约运行费用、达到“保达标求稳定”的运营目标。

1 烟气特征与技术简介

1.1 烧结/球团烟气特征

烧结/球团烟气中的污染物主要来源于矿石焙烧以及能源燃烧，其主要特征[6-7]：① 烟气量大且烟气波动大：烧结机一般达到6 000 m^3/h(球团生产线的单位产能烟气量需根据炉型而定)；② 含硫量随矿石的品质变化范围大：烧结烟气中的SO_2质量浓度通常为400～3 000 mg/m^3，球团烟气中的SO_2质量浓度一般会高于其在烧结烟气中的浓度，当采用高硫矿生产时会更高；③ 烟气温度变化幅度大：正常运行时烟气温度为150～160 ℃，但生产中会出现机头低温、机尾高温的状况，最低在90 ℃左右，最高可接近200 ℃；④ 烟气湿度大：一般烧结/球团烟气含水量在10%～13%之间；⑤ 烟气含氧量高：烧结烟气含氧量在16%左右，球团烟气在18%左右；⑥ 烟气中污染成分复杂：除粉尘颗粒物、SO_2、NO_x外，还有HCl、HF、二噁英等有害成分。

1.2 一体化脱除技术简介

由CFB脱硫+布袋除尘+SCR脱硝组成的超低排放一体化脱除技术，基本工艺流程：经电除尘预除尘后的烟气经文丘里加速后从底部进入吸收塔，在气流和扰动装置的作用下使吸收剂在塔内形成流化床层，塔内物料中的$Ca(OH)_2$吸收烟气中的SO_2，生成的$CaSO_3$和$CaSO_4$滞留在脱硫灰中。夹带有粉尘的烟气经塔顶流出进入布袋除尘器进行除尘，再经脱硝烟道、GGH升温后进入SCR脱硝塔内进行脱硝处理。烟气中的NO_x在脱硝塔内中温催化剂的作用下，被NH_3还原成为N_2和H_2O。脱硝后的烟气经塔底烟道、GGH降温后进入烟囱，外排烟气温度为100～120 ℃。该套烧结/球团烟气一体化脱除技术工艺流程如图1所示。

2 系统工艺运行参数分析

超低排放系统的工艺运行参数不但影响着脱除效率，而且还可能因指标超限而造成系统故障、反应失效等状况。

2.1 原烟气SO_2质量浓度

当烟气SO_2质量浓度大于3 000 mg/m^{3}时，目前仅靠CFB单塔运行难以满足出口SO_2质量浓度不大于35 mg/m^{3}的超低排放要求，需联合其他脱硫技术共同进行脱硫处理。在脱硫效率一定时，烟气出口SO_2质量浓度随入口质量浓度的增加而升高，在安徽某钢铁公司炼铁厂14 m^{2}竖炉球团烟气CFB半干法脱硫系统运行时，由于原料矿粉含硫质量分数高，通过对高硫矿的配比及碱度调整，使烟气的SO_2质量浓度不大于2 500 mg/m^{3}的脱硫设计限值，以便通过钙硫比和返料调节后使烟气出口达标排放。在系统投运期间经现场测定，当烟气入口SO_2质

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

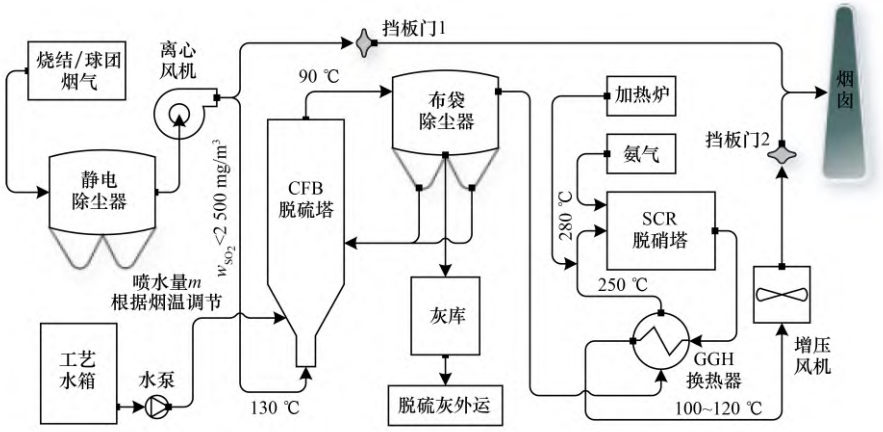
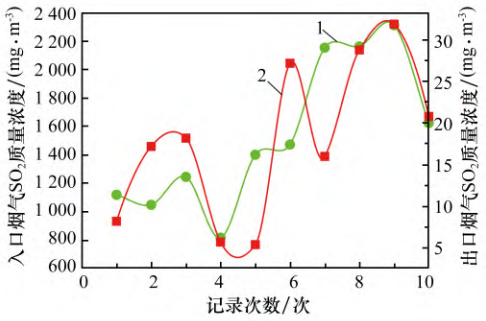


图 1　烧结/球团烟气一体化脱除技术工艺流程

Fig. 1　Process flow chart of integrated flue gas removal technology for sintering/pelletizing

量浓度达到 2 311 mg/m^3 时，出口为 31.9 mg/m^3，满足超低排放的指标要求，记录的 10 组数据如图 2 所示。



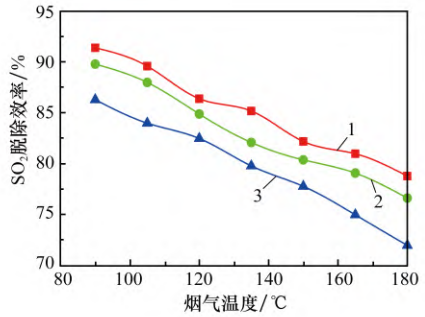
1—塔入口烟气；2—塔出口烟气。

图 2　烟气进出口 SO_2 质量浓度测定数据

Fig. 2　Measurement data of SO_2 concentration at inlet and outlet of flue gas

2.2　入塔烟气温度和喷水量

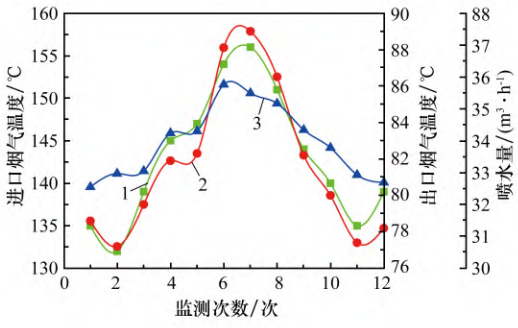
烧结/球团的原烟气温度通常为 90 ~ 200 ℃，烟气温度和喷水量严重影响脱硫效率。朱玉琴等[8]在实验中得出，在 90 ~ 180 ℃的温度范围内，脱硫效率随烟气温度的升高而下降，主要原因是由于酸碱中和反应属于放热反应，温度升高时化学平衡向反方向移动影响气液传质。另外，随烟气温度升高，SO_2 在水中的溶解度下降，影响脱硫效率(如图 3)。脱硫后的烟气出口温度一般不得低于 75 ℃，否则会因含水量升高而抑制除尘器布袋清灰，甚至发生糊袋现象。在安徽某钢铁公司球团烟气 CFB 脱硫项目中，为了控制烟气温度提高脱硫效率，将脱硫塔出口烟气温度控制在 90 ℃左右后排入布袋除尘器，塔内喷枪喷水量需根据脱硫塔烟气进口温度进行实时调节。经现场运行数据采集发现：在动态喷水量变化不大时，出口烟气温度随入口烟气温度的升高而上升，对应关系如图 4 所示。



SO_2 质量浓度/(mg·m^{-3})：1—1 457；2—1 782；3—2 419。

图 3　脱硫效率与烟气温度的关系[8]

Fig. 3　Relationship between desulfurization efficiency and flue gas temperature



1—进口烟温；2—出口烟温；3—喷水量。

图 4　喷水量对烟气温度的影响

Fig. 4　Effect of water injection rate on flue gas temperature

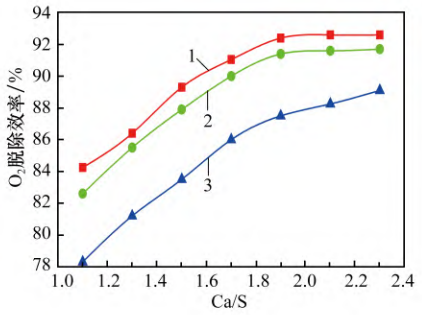
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3 塔内烟气流速

文丘里加速段的烟气流速一般为50～60 m/s，在进入塔体后流速下降，塔内烟气设计流速为4.2～6.0 m/s，烟气在塔内的反应停留时间大于6 s。塔内烟气流速的稳定，有利于维持流化床层沸腾状态，使SO_2与$Ca(OH)_2$充分反应，也可以防止因流速过低而导致塌床现象的发生。

2.4 钙硫比

较高的钙硫比(Ca/S)有利于提高脱硫塔的脱硫效率，当Ca/S小于1.9时，随着Ca/S的增加，脱硫效率增加较快；当Ca/S大于1.9时，效率也会随着Ca/S的增大有所增加，但逐渐趋于平缓，如图5所示。分析考虑到原材料的经济性，Ca/S设计值在1.5～1.9之间进行选择为宜。



SO_2质量浓度/(mg·m^{-3})：1—1 457；2—1 782；3—2 419。

图5 Ca/S对脱硫效率的影响[8]

Fig. 5 Effect of Ca/S on Desulfurization Efficiency

2.5 除尘器内烟气流速

CFB半干法脱硫配套的布袋除尘器有行喷和旋喷两种类型。旋转喷吹布袋除尘器采用旋转脉冲的方式进行清灰，清灰压力为0.085～0.15 MPa[9]，在烧结烟气半干法脱硫除尘器中应用案例已逐渐增多，清灰效果良好。CFB脱硫塔出口烟气中的颗粒物质量浓度通常范围为600～1 000 g/m^3，若要保证除尘器出口烟气颗粒物质量浓度不大于10 mg/m^3，则除尘器内烟气流速一般不超过0.65 m/min，若排放标准更加严格，则需要进一步降低烟气流速和提高滤料品质来保证出口指标。

2.6 SCR脱硝催化剂中毒

烧结烟气SCR脱硝一般采用中温钒钛系催化剂，理论反应温度为280 ℃。随着技术的进步，也逐渐出现了更低温度的催化剂，反应温度的降低有利于节省GGH换热的能源消耗，降低燃气使用量，但也会增加催化剂堵塞和中毒的风险。

烟气积灰和碱中毒是烟气SCR脱硝催化剂面临的普遍问题，烟气灰尘中含有Na、K、As等成分，形成的硫酸盐和亚硫酸盐会造成催化剂的中毒[10-11]。将SCR脱硝装置布置在脱硫和除尘工序之后，烟气中不再含有高浓度的粉尘、SO_2和SO_3，在减少硫酸氢铵(ABS)和硫酸铵(AS)生成的同时，可有效减少催化剂堵塞和中毒的风险[12-14]。为了减少催化剂堵塞的风险，可以配备耙式吹灰器，工作时所需压缩空气或蒸汽压力不小于0.6 MPa，清灰效果比声波吹灰器更好。

2.7 氨逃逸

烧结/球团烟气在SCR脱硝后，要求烟气出口氨逃逸量不大于8 mg/m^3。增加NH_3的喷入量虽有利于脱除NO_x，但会增加氨逃逸造成环境氨污染和后序设备腐蚀。为了控制氨逃逸量，需要优化气流均布与合理的喷氨点位。可通过脱硝塔内部构造及喷氨状态模拟仿真、加装高效静态混合器、合理设计塔内件尺寸及点位等方式，有效减少烟气脱硝中氨的逃逸量。刘建辉等[15]在迁钢球团烟气脱硝装置的研究中，对加装了烟道静态混合器并设置“多支管调节+多喷嘴全覆盖”式喷氨格栅进行仿真，在喷氨量与烟气进/出口NO_x质量浓度PLC联锁进行精准喷氨的状态下，得到优化后氨的质量浓度分布及气流分布有明显改善，优化后的分布仿真如图6～7所示。

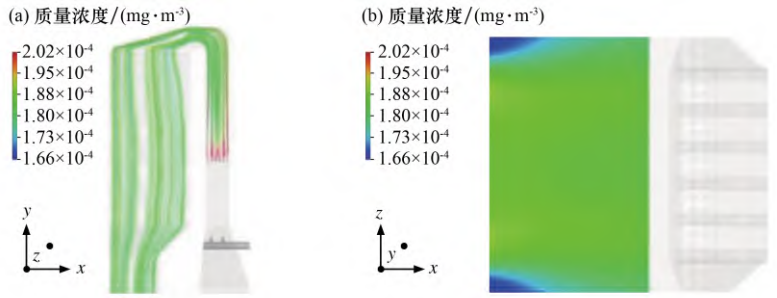
3 系统设备及管道分析

3.1 脱硫设备故障与缺陷

3.1.1 脱硫塔及塔内件

脱硫塔为钢制非标设备，进口烟道弯头处设有气流均布装置，出口扩大段设有温度、压力检测装置，以便控制脱硫塔的喷水量和物料循环量，塔底设有排灰装置，并有吹扫装置以

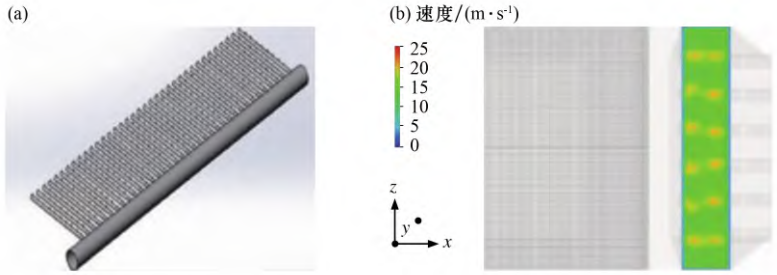
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 氨的空塔流场模拟；(b) 上层催化剂面氨平面分布模拟

图 6　塔体与顶层催化剂入口氨质量浓度分布[15]

Fig. 6　Ammonia concentration distribution at the inlet of tower and top layer catalyst



(a) 喷氨格栅模拟；(b) 喷氨格栅布置点气速分布

图 7　优化后的新型喷氨格栅气流分布[15]

Fig. 7　Optimized airflow distribution of a new type of spray ammonia grid

防止堵塞，塔内壁设有湍动环增加气流扰动。在安徽某钢铁公司 192 m^2 烧结烟气脱硫项目的 CFB 脱硫塔设计中，增设了两组塔底弯头烟气导流板和四组塔内壁烟气湍动环，优化了烟气在塔内的气流分布，改造后的新脱硫塔比原塔提高了 5% 的 SO_2 脱除效率[16]。在塔器设计时的烟气流速分布仿真模拟如图 8 所示。

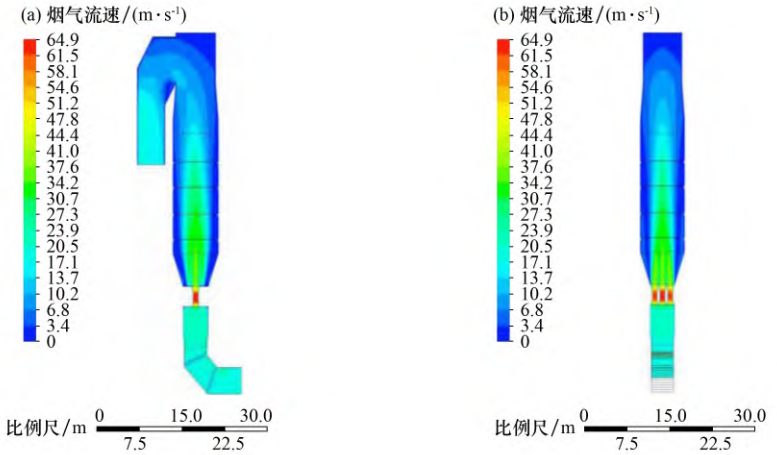


图 8　CFB 半干法脱硫塔烟气流速分布仿真模拟

Fig. 8　Simulation of CFB semi-dry flue gas velocity distribution

3. 1. 2　返料入塔位置

早期的脱硫塔进料位置在文丘里上部，此处的烟气温度为 70 ~ 80 ℃，吸收剂物料中的 $Ca(OH)_2$ 和 Cl^- 反应会生成大量的易吸潮的氯化钙($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)。氯化钙会使吸收剂吸潮后黏度增大，黏结吸收塔内壁，严重时会造成物料团聚，使塔内粉料的流动性下降，降低脱硫效率，严重时会造成系统堵塞，严重影响脱硫

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

系统的安全稳定运行。为了预防黏结堵塞，安徽某企业球团烟气超低排放项目把进料口设置在文丘里加速管下端，使反应物料率先接触高温烟气，在温度不小于120 ℃时生成不易吸潮和凝结的碱式氯化钙［$CaCl_2 \cdot Ca(OH)_2 \cdot H_2O$］。

3.1.3 工艺水喷枪

为了保证水雾粒径、延长烟气冷却时间，逐步将双流体喷枪更换成高压回流喷枪。通常高压回流喷枪的增湿水雾化粒径不小于100 μm，比表面积小、蒸发时间长，在相同的脱硫效率下，所需喷水量比双流体喷枪更少。在安徽某公司炼铁厂的球团烟气超低排放项目中，采用1根高压回流喷枪，喷枪的参数如表1所示。由于在项目改造中脱硫塔的塔径变小、高度加长、塔内烟气流速增大，回流喷枪的高压力可有效促进塔内烟气的降温和物料的紊流状态，减少塔壁黏结的现象。

表2 高压回流喷枪规格参数

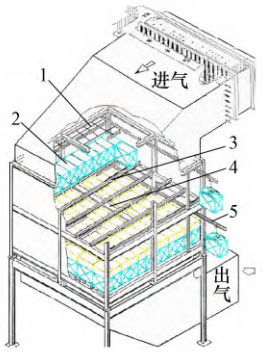
Table 2 Specifications and parameters of high pressure reflux spray gun

喷枪型号	水泵参数
流量为15 m^3/h；压力为3.0 MPa；调节比为10/1；水雾粒径为165～520 μm；平均蒸发时间为1.2 s；圆锥形喷嘴，喷角为90°，枪体为不锈钢材质，喷嘴为碳化钨或碳化硅材质	流量24 m^3/h，扬程350 m

3.2 脱硝设备故障及缺陷

3.2.1 脱硝塔及塔内件

脱硝塔内部结构包括整流格栅、催化剂支撑件、吹灰器支撑件等。烟气经除尘后仍有微量的粉尘灰滞留在催化剂表面，需用吹灰器进行清灰处理。在喷入NH_3后，在烟气中含有水蒸气时，会生成硫酸氢铵(ABS)和硫酸铵(AS)附着在催化剂表面，夹带着灰尘堵塞催化剂。况且，ABS和AS遇水后形成的酸性溶液，会造成塔内壁及塔内件等碳钢材质H^+腐蚀及氧化腐蚀[17]。脱硝塔及内部结构如图9所示。



1—整流格栅；2—催化剂模块；3—催化剂支撑；4—吹灰器支撑；5—小车轨道。

图9 SCR脱硝塔及内部结构剖视图

Fig. 9 Sectional view of SCR denitrification tower and internal structure

3.2.2 吹灰器

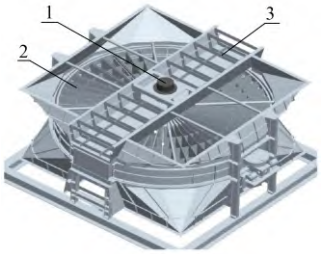
常用于SCR脱硝吹灰器的类型主要有声波式和耙式。声波吹灰器在使用中，其金属膜片磨损会日益加剧，受损后声波强度减弱，致使清灰效果下降。为了减轻声波吹灰器膜片磨损，需在压缩空气管道入口加装过滤器。耙式吹灰器采用高压蒸汽喷吹催化剂表面去除积灰，具有更好的除灰效果，所用蒸汽压力和温度分别为0.8～3.5 MPa、300～350 ℃[18]，蒸汽压力可根据项目实际情况进行调节。

3.3 GGH换热器故障

脱硫除尘后的75～90 ℃烟气进入GGH换热器，与净烟气换热升温至250 ℃后，再经热风炉加热升至280 ℃左右进入到SCR反应器中进行反应。脱硝后的烟气经过GGH换热器后降至100～120 ℃由增压风机送入烟囱排放。

回转式GGH换热器模型如图10所示。其在脱硝系统长期运行后可能发生的故障有：转子故障停运、蓄热体堵塞、密封泄露等。在运行时转轴带动蓄热体一并由驱动装置带动，为了防止转子因故障停运，驱动装置可采用主、辅两套驱动电机。当主驱动停止工作时，辅助驱动自动切换，并配置变频控制设施，实现“变频启动、工频运行”。GGH采用上热下冷的布置方式，脱硫后的低温烟气(冷侧)从下而上进入GGH换热器，可有效地减少蓄热体的积灰现象，冷侧还可配备半伸缩式吹灰器对蓄热体进行清灰。为了减少漏风率，可在冷热侧之间采用不锈钢或考登钢片进行密封，且需设置密封风机对密封件进行加压密封。

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



1—转轴；2—蓄热体；3—密封装置。

图 10　回转式 GGH 换热器结构模型

Fig. 10　Structural model diagram of rotary GGH heat exchanger

3.4　加热炉及配套设备故障

加热炉用来补充烟气从 250 ~ 280 ℃ 的温差，有内置式和外置式两种布置形式。一般采用煤气作为热源，燃烧后形成的高温烟气与脱硫除尘后的烟气进行混合，温度均匀后进入脱硝装置。加热炉区域应当预防煤气泄漏和火灾爆炸事故的发生，配置燃气泄露检测器，一旦发生燃气泄露可立即报警，开启联锁保护。加热炉燃烧室可设置紫外光式火焰检测器，实时监测燃烧器运行状况，避免发生异常燃烧，保证燃烧器的安全运行。

3.5　电仪控制系统故障

在电气楼中配有高压柜、低压柜、电线电缆、PLC 控制等设备，在现场配有各种用电设备。对于可能直接接触的带电装置，应进行隔离或加以保护。电控柜应当定期检查，防止因起潮导电发生短路，甚至发生三相短路爆炸风险。当氨气与空气的混合气体中的体积浓度达到爆炸极限范围内时，遇明火有爆炸风险，氨区的带电动力设备应采用防爆电机[19]，管线敷设及照明按防爆要求进行设计。重点生产区域需配置工业电视监控系统，在电气室、操作室等区域设置火灾报警系统。

3.6　其他辅助设施

烧结机在配备其他辅助设施生产时，需保证辅助系统的供应稳定。如配有烟气循环技术、高炉瓦斯灰代替燃料的烧结新型工艺时，应避免循环废气含水分过高导致产量下降，以及保证瓦斯灰含氮量的稳定[20-21]，从而达到减少污染物的生成与排放量的目的。

4　结　论

本文通过对造成烟气一体化脱除系统运行失稳的工艺和设备因素进行分析，得出如下结论。

(1) 在工艺运行参数中，烟气进口的污染物质量浓度、设备内烟气流速影响着排放指标；烟气温度、含水率、氨逃逸量等造成的腐蚀与中毒问题，会严重影响设备与催化剂的使用寿命。

(2) 设备与管道故障会导致检修与更换任务增加，甚至被迫停运，增加环保压力和运营维护成本。塔器在设计时应充分考虑各项应力，避免受烟温变化时出现变形和撕裂的现象。定期对动力运转设施实施养护，避免因长期运行造成的磨损与老化影响系统稳定。

(3) 当系统运行出现失稳时，可采用烧结与球团配料调整、减小烟气量、增设烧结烟气循环等源头控制措施，以及加大钙硫比、调整气速、更换催化器、加大清灰力度、加强运维管理能力等过程控制措施，也可采用矿料干燥去湿、增设其他辅助工艺等新措施进一步提高系统的运行稳定性。

参考文献：

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国生态环境统计年报[R]. 北京，2022 - 2 - 18.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2020 China eco-environmental statistical annual report[R]. Beijing，2022 - 2 - 18.

[2] 邢奕，张文伯，苏伟，等. 中国钢铁行业超低排放之路[J]. 工程科学学报，2021，43(1)：1 - 9.
XING Yi，ZHANG Wenbo，SU Wei，et al. Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China[J]. Chinese Journal of Engineering，2021，43(1)：1 - 9.

[3] 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 & Steel，2019，54(9)：1 - 11.

[4] 王新东，侯长江，田京雷. 钢铁行业烟气多污染物协同控制技术应用实践[J]. 过程工程学报，2020，20(9)：997 - 1007.
WANG Xindong，HOU Changjiang，TIAN Jinglei. Application and practice of multi-pollutant cooperative control technology

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

for flue gas in iron and steel industry [J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2020,20(9):997 – 1007.

[5] 中国金属学会. 关于钢铁企业烧结、焦化烟气超低排放情况的调研报告 [J]. 中国冶金,2019,29(7):79 – 84.
The Chinese Society for Metals. Investigation report on ultra-low emission of flue gas from sintering and coking in iron and steel enterprises [J]. China Metallurgy,2019,29(7):79 – 84.

[6] 闫伯骏,邢奕,路培,等. 钢铁行业烧结烟气多污染物协同净化技术研究进展 [J]. 工程科学学报,2018,40(7):767 – 775.
YAN Bojun,XING Yi,LU Pei,et al. A critical review on the research progress of multi-pollutant collaborative control technologies of sintering flue gas in the iron and steel industry [J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(7):767 – 775.

[7] 侯建勇,严芳,王浩,等. 基于因果 – 模糊层次分析的湿法脱硫系统运行稳定性综合评价 [J]. 化工进展,2022,41(2):569 – 583.
HOU Jianyong,YAN Fang,WANG Hao,et al. Comprehensive evaluation of operation stability of wet desulfurization system based on causal-fuzzy AHP [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2022,41(2):569 – 583.

[8] 朱玉琴,魏昕,张馨予,等. 半干法烟气循环流化床脱硫性能试验研究 [J]. 石油与天然气化工,2020,49(1):8 – 11.
ZHU Yuqin, WEI Xin, ZHANG Xinyu, et al. Experimental study on desulfurization performance of semi-dry flue gas circulating fluidized bed [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas,2020,49(1):8 – 11.

[9] 赵文波,李小龙. 旋转喷吹袋式除尘器在烧结烟气净化中的应用 [J]. 中国环保产业,2020(8):62 – 64.
ZHAO Wenbo,LI Xiaolong. Application of rotary jet bag dust collector in sintering flue gas purification [J]. China Environmental Protection Industry,2020(8):62 – 64.

[10] 刘显彬,段言康,平原,等. 烧结厂脱硝催化剂的失活原因分析 [J]. 现代化工,2020,40(S1):238 – 241.
LIU Xianbin,DUAN Yankang,PING Yuan,et al. Analysis on causation for deactivation of denitration catalyst in a sintering plant [J]. Modern Chemical Industry,2020,40(S1):238 – 241.

[11] 钱立新,杨涛,龙红明,等. 烧结烟气 V_2O_5–WO_3/TiO_2 催化剂失活及再生 [J]. 烧结球团,2020,45(4):71 – 76.
QIAN Lixin,YANG Tao,LONG Hongming,et al. Deactivation and regeneration of V_2O_5 – WO_3/TiO_2 catalysts in the sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):71 – 76.

[12] 张鹏,贾媛媛,唐中华,等. 钒钛系脱硝催化剂抗 SO_2 和 H_2O 中毒性能研究进展 [J]. 现代化工,2021,41(4):67 – 71.
ZHANG Peng,JIA Yuanyuan,TANG Zhonghua,et al. Review of research in vanadium-titanium denitration catalyst with SO_2 and H_2O poisoning resistance [J]. Modern Chemical Industry,2021,41(4):67 – 71.

[13] 唐昊,李慧,杨江毅,等. NH_3-SCR 工艺中硫酸铵盐的生成与分解机理研究进展 [J]. 化工进展,2018,37(3):822 – 831.
TANG Hao,LI Hui,YANG Jiangyi,et al. Research progress on the formation and decomposition mechanism of ammonium-sulfate salts in NH_3-SCR technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2018,37(3):822 – 831.

[14] 尹子骏,苏胜,卿梦霞,等. 一种典型钒钛系 SCR 催化剂 SO_3 生成特性研究 [J]. 化工学报,2021,72(5):2596 – 2603.
YIN Zijun,SU Sheng,QING Mengxia,et al. Study on SO_3 formation characteristics of a typical vanadium titanium SCR catalyst [J]. CIESC Journal,2021,72(5):2596 – 2603.

[15] 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.

[16] 侯建勇,严芳,姜茜,等. 烧结烟气 CFB 半干法脱硫塔技术研究 [J]. 烧结球团,2021,46(6):27 – 33.
HOU Jianyong,YAN Fang,JIANG Qian,et al. Technical research on CFB semi-dry desulfurization tower for sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):27 – 33.

[17] 马双忱,焦坤灵,张立男,等. 高温气相条件下硫酸氢铵与硫酸铵对 20# 碳钢的腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报,2017,37(6):605 – 612.
MA Shuangchen,JIAO Kunling,ZHANG Linan,et al. Corrosion characteristics of carbon steel in high temperature gas containing ammonium bisulfate and ammonium sulfate [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2017,37(6):605 – 612.

[18] 吕宏俊,刘浩波,张泽玉,等. 吹灰器在 SCR 脱硝系统中的选用 [J]. 中国环保产业,2015(4):64 – 66.
LV Hongjun,LIU Haobo,Zhang Zeyu,et al. Selective use of blowing dust utensil in SCR denitration system [J]. China Environmental Protection Industry,2015(4):64 – 66.

[19] 电力规划设计总院. DL/T 5480—2013 火力发电厂烟气脱硝设计技术规程 [S]. 北京:中国计划出版社,2013.
General Electric Power Planning and Design Institute. DL/T 5480—2013 Technical Specifications for Design of Flue Gas Denitrification in Thermal Power Plants [S]. Beijing: China Planning Press,2013.

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

[20] 裴元东，张俊杰，祁成林．适宜烧结烟气循环工艺的探讨[J]．烧结球团，2019，44(2)：74－77.
PEI Yuandong，ZHANG Junjie，QI Chenglin. Discussion on proper sintering flue gas recirculation process [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(2)：74－77.

[21] 裴元东，吴胜利，张俊杰，等．烧结配加高炉瓦斯灰替代燃料降低 NO_x 排放实践[J]．烧结球团，2020，45(1)：73－76.
PEI Yuandong，WU Shengli，ZHANG Junjie. Practice of reducing NO_x emission by sintering with blast furnace gas ash as substitute fuel [J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(1)：73－76.

(上接第 31 页)

[5] 胡鹏，曾国平，刘江涛，等．西非铁矿资源现状及潜力分析[J]．地质学报，2021，95(4)：1306－1319.
HU P，ZENG G P，LIU J T，et al. Status and potential of iron ore resources in west Africa [J]. Acta Geologica Sinica，2021，95(4)：1306－1319.

[6] 史先菊，李军，冯红云．利比里亚邦矿烧结性能试验研究[C]//2014 年度全国烧结球团技术交流年会论文集．厦门：全国烧结球团信息网，2014：51－54.
SHI X J，LI J，FENG H Y. Experimental study on sintering performance of Liberia Bang Ore [C]//Proceedings of 2014 National Sintering Pellet Technology Exchange Conference. Xiamen：National sintering and pelletizing information network，2014：51－54.

[7] 范晓慧，张一雄，季志云，等．强力混合对高比例精矿烧结的影响及机制[J]．钢铁研究学报，2021，33(1)：25－31.
FAN X H，ZHANG Y X，JI Z Y，et al. Effect and mechanism of intensive mixing on sintering with high proportion iron ore concentrate [J]. Journal of Iron and Steel Research，2021，33(1)：25－31.

[8] JIANG T，LI G H，WANG H T，et al. Composite Agglomeration Process(CAP) for preparing blast furnace burden [J]. Ironmaking & Steelmaking，2010，37(1)：1－7.

[9] 张元波，杜明辉，李光辉，等．复合造块法在难处理含铁资源中的应用新进展[J]．烧结球团，2016，41(4)：39－44.
ZHANG Y B，DU M H，LI G H，et al. New advances on application of composite agglomeration process in hard-to treat iron-nearing mineral resources [J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(4)：39－44.

[10] 陈革，王瑞军，沈茂森．包钢自熔性复合烧结矿试验研究[J]．矿冶工程，2013，33(3)：98－100；103.
CHEN G，WANG R J，SHEN M S. Experimental study on self-fluxing composite sinters of Baogang group [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2013，33(3)：98－100；103.

[11] 张贺雷．宝钢高配比镜铁矿与含铁粉尘的复合造块工艺研究[D]．长沙：中南大学，2014.
ZHANG H L. Research on composite agglomeration process with high-ratio of specularite ore and iron-bearing dust of Baosteel [D]. Changsha：Central South University，2014.

[12] 万新宇，吕庆．钒钛磁铁矿的复合造块新工艺[J]．钢铁，2014，49(6)：12－17.
WAN X Y，LYU Q. Vanadium-titanium magnetite concentrates by composite agglomeration process [J]. Iron and Steel，2014，49(6)：12－17.

[13] 胡志清，潘建，朱德庆，等．铁精矿原料特性及其对成球性能的影响[J]．烧结球团，2013，38(4)：42－45；49.
HU Z Q，PAN J，ZHU D Q，et al. Raw material characteristics of iron ore concentrate and its influence on balling performance [J]. Sintering and Pelletizing，2013，38(4)：42－45；49.

[14] 王永红，任立群，陆志宏，等．生石灰配比对烧结过程的影响[J]．烧结球团，2012，37(6)：23－26.
WANG Y H，REN L Q，LU Z H，et al. Influence of proportion of burnt lime on sintering process [J]. Sintering and Pelletizing，2012，37(6)：23－26.

[15] 张朝晖，徐凯强，邢相栋，等．烧结矿低温还原粉化影响因素研究进展[J]．钢铁研究学报，2021，33(6)：453－460.
ZHANG Z H，XU K Q，XING X D，et al. Research progress of influence factors on low-temperature reduction degradation [J]. Journal of Iron and Steel Research，2021，33(6)：453－460.

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