

烧结烟气脱硝工艺及选择性催化还原法 (SCR) 在脱硫前后布置的对比分析

彭如

(湖南省冶金规划设计院有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: NO_x 是一种危害性极大的物质, 大量的 NO_x 可引发酸雨、化学烟雾等, 不仅破坏环境, 还会威胁人类的健康。钢铁工业是我国工业领域 NO_x 排污大户之一, 钢铁生产废气中, 氮氧化物的排放量占全国排放总量的 10%, 其中烧结工序是钢铁产生中 NO_x 的主要来源之一, 占有工序排放 NO_x 总量的 50% 左右。目前国内烧结脱硝处理工艺主要为活性焦脱硫脱硝工艺、臭氧脱硝工艺、原有脱硫 + 中高温升温 SCR 脱硝工艺, 其中中高温升温 SCR 脱硝工艺具有一定的优势, 慢慢成为首选。原有脱硫 + 中高温升温 SCR 脱硝工艺又存在两种布置方式, 即 SCR 布置在脱硫前与布置在脱硫后, 两种布置方式各有优缺点。本文综合分析 SCR 布置在湿法脱硫前/后 + 中高温升温 SCR 脱硝工艺的技术区别及利弊, 以及在投资及运行成本上的差异, 并进行简要的技术、经济对比分析, 以确定最合适的烧结脱硝处理工艺。

关键词: 烧结烟气; NO_x; 烟气脱硝; SCR

中图分类号: X757

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2023.03.022

2018 年开始, 河北等省相继印发《钢铁工业大气污染物超低排放标准》, 提出烧结机头 (球团焙烧) 烟气在 16% 基准含氧量条件下, NO_x、SO₂、颗粒物排放限值分别为 50mg/Nm³、35mg/Nm³、10mg/Nm³[1]。

1 烧结过程 NO_x 的生成机理

钢铁厂排放的 NO_x 主要来源于烧结生产过程中燃料燃烧的产物。一般情况下燃烧过程中产生的 NO_x 主要是 NO 和 NO₂, 二者统称为氮氧化物 (NO_x)。燃烧过程中 NO_x 的生成途径主要有热力型 NO_x、快速型 NO_x、燃料型 NO_x。根据韩国钢铁厂的研究显示, 钢铁厂烧结过程中几乎没有热力型 NO_x 和快速型 NO_x, 但有燃料型 NO_x, 生成的 NO_x 主要为 NO, 只有少量的 NO₂。烧结后烟气中的 NO_x, 主要是由烧结固体煤炭燃料及含铁原料中的氮和空气中的氧气在高温烧结时产生, 烧结过程中 NO_x 来源主要有两个部分, 一是烧结的点火阶段, 二是固体煤炭燃料燃烧和高温反应过程。燃料型 NO_x 的生成受燃料氮含量及氮的存在形态、燃料粒度、空气中氧含量、烧结混合料中的物质成分等影响 [2]。

2 烧结脱硝的主要处理工艺

2.1 活性焦干法联合脱硫脱硝技术

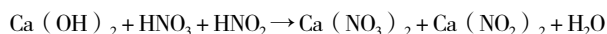
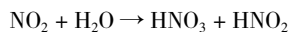
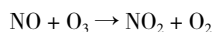
活性焦脱硝有两种机理: 一是物理吸附; 二是化学催化还原。

活性焦吸附污染物时有两种作用机理, 一是物理吸附, 二是化学吸附。物理吸附作用依赖于活性焦多孔比表面积大的特

性, 将烟气中的污染物截留在活性焦内。化学吸附依靠的是活性焦表面的晶格有缺陷的 C 原子、含氧官能团和极性表面氧化物, 利用它们的化学特征, 有针对性地固定污染物在活性焦内表面上, 以达到脱硫脱硝的目的。

2.2 臭氧氧化吸收脱硝法

将臭氧注入混合反应装置内, 使臭氧与烟气充分混合, 将烟气中不溶于水的 NO 氧化成易溶于水的高价态氮氧化物, 包括 NO₂、N₂O₃、N₂O₅, 在极短时间内完成反应。然后进入湿法脱硫吸收塔, 喷淋溶液将烟气中被氧化的氮氧化物吸收, 确保 NO_x 排放浓度在环保要求的浓度以下。主要反应方程式如下:



臭氧法的主要装置是臭氧发生器。

2.3 脱硫前/后 + 中高温升温 SCR 脱硝技术

因目前烧结烟气基本已配套脱硫系统, 只需加装升温 SCR 脱硝组成脱硫脱硝系统, 故此工艺分为前置为脱硫前 + 中高温升温 SCR 脱硝装置和后置为脱硫后 + 中高温升温 SCR 脱硝装置。

烧结机烟气从主抽风机出来后的烟气温度约为 150℃, 故需对烧结机烟气进行升温, 烟气升温的热源可采用煤气燃烧产生的热量。煤气燃烧后的烟气与烧结机烟气混合, 将烧结机烟气 (含煤气燃烧尾气) 加热到 320℃ 以上, 以利于 SCR 脱硝反应。后续的 SCR 脱硝反应基本与电厂成熟的 SCR 脱硝反应一样, 如图 1 所示。

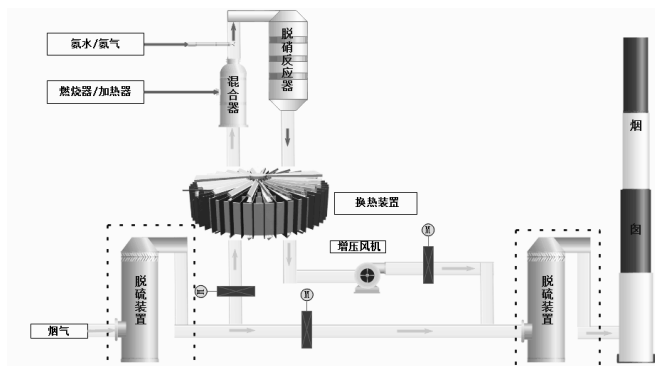


图1 脱硫前/后+中高温升温SCR脱硝技术工艺流程简图

目前烧结机主要脱硝工艺优缺点对比如表1所示。

表1 不同烧结脱硝工艺对比

序号	工艺技术	技术优点	技术缺点	投资成本	运行成本
1	活性焦干法联合脱硫脱硝技术	成熟技术，可协同脱硫、脱硝、除尘	占地面积大、系统相对复杂	投资成本极高	运行成本高（电耗及活性焦）
2	臭氧脱硝技术	系统简单，操作简单，占地面积小，需与湿法脱硫配合使用	业绩相对较少，运行效率的稳定性有待检验，存在政策风险	投资成本适中	运行成本偏高（电耗）
3	脱硫前/后+中高温升温SCR脱硝技术	中/高温催化剂运行业绩多，运行稳定，成熟技术，可满足超低排放	需要升温	投资成本适中	运行成本适中

综上所述对比，因活性焦干法联合脱硫脱硝工艺整体投资价格太高，以及臭氧使用可能的逃逸对环境的破坏，故此两种工艺使用较少，脱硫前/后+中高温升温SCR脱硝技术工艺慢慢成为首选。湿法脱硫在现有配套烧结脱硫中的占比约为87%，本文后续主要讨论中高温升温SCR脱硝布置在湿法脱硫前后的技术区别及利弊，以及在投资及运行成本上的差异，进行简要的技术、经济对比分析。

3 前置的优点及缺点

3.1 前置工艺布置说明

因脱硝系统在脱硫前，故进入脱硝的 SO_2 和粉尘浓度较高，考虑到脱硝催化剂对 SO_2 的氧化特性，脱硫前的脱硝反应温度在 320°C 以上为宜，且高温催化剂在电力行业中应用较多，技术成熟可靠。

因烧结烟气经过机头电除尘和主抽风机后（脱硫前）的温度约为 150°C ，远低于常规脱硝温度（ $280\sim 380^\circ\text{C}$ ），故需对烧结机烟气进行升温，烟气升温的热源采用高炉或焦炉煤气燃烧的热量，将烧结机烟气加热到 320°C 以上，以利于中高温升温

SCR脱硝反应。

为充分利用SCR系统余热热量，节省煤气消耗，对机头主抽风机后的烧结机烟气（ 150°C 左右）升温和降温过程采用回转式预热器（GGH）进行换热。回转式预热器以再生方式传递热量，脱硝后热烟气与脱硝前冷烟气交替流过GGH内部受热面。当烟气流过时，脱硝后热烟气热量传给受热面，受热面温度升高，并积蓄热量，当脱硝前冷烟气再流过时，受热面将积蓄的热量释放给脱硝前冷烟气。

加入回转式预热器后，整个升温SCR脱硝的烟气流程为：从SCR反应器出来的净烟气（ 320°C 左右）经过与原烟气（ 150°C ）进行热交换后，降温至 180°C 左右排出，再进入脱硫系统，原烟气升高至 290°C 左右，经过高炉或焦炉煤气加热器进行加热，加热后的烟气（ $\geq 320^\circ\text{C}$ ）进入SCR反应器。通过采用回转式预热器（GGH），烟气加热温度只需 30°C 左右，大大节省了煤气的消耗。前置脱硝烟气流程如图2所示。

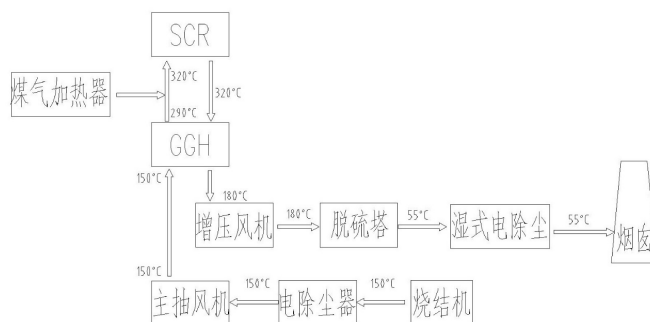


图2 前置式脱硝烟气工艺流程图

3.2 前置的优点

整个系统的运行温度均在 150°C 以上，远高于烟气的露点，无腐蚀风险，故所有烟道及设备内部均无需耐酸防腐，GGH换热器冷端材质采用普通考登钢即可。原烟气进GGH温度为 150°C ，出GGH温度为 290°C ，GGH单侧升温梯度为 140°C ，相比脱硫后GGH换热面积可大大减少，相应减轻了GGH重量，降低了GGH制造成本。烧结机头已基本配套脱硫系统和烟囱，可利用旧有烟囱，且脱硝系统常规为立式布置，底进底出，与前后端连接的主抽风机和增压风机均接近地面，故前置烟气流向更顺畅，烟道短，整体项目投资成本相对低一些。

3.3 前置的缺点

因烧结的粉尘特性，烧结机头电除尘效率一直较差，排放浓度在 $80\sim 150\text{mg}/\text{Nm}^3$ 之间，故前置脱硝系统处于高粉尘的工况，且粉尘中含有大量的铁粉和碱性金属，在烧结升温至 320°C 以上时，烟气中的粉尘将二次烧结，形成熔融状的粗粉尘块，粘结在脱硝催化剂表面，此粉尘在耙式吹灰器吹灰冲击下也较难吹离催化剂表面，使脱硝系统运行较短时间后，催化

剂表面堵塞,脱硝系统阻力急剧增加,无法长期稳定运行。

进入SCR系统的烟气SO₂未经处理,浓度高,以脱硝催化剂SO₂/SO₃转化率1%考虑,将生成一定量的NH₄HSO₄,且在146~207℃区间内可能会凝结成液态,这个温度区间正好在GGH换热元件运行的温度区间范围内,故需要经常对换热元件进行有效吹灰。

脱硝系统经过升温后,进入脱硫后的温度将达到180℃,此温度超过了湿法脱硫入口的安全运行温度,脱硫入口需要安装降温装置,保证进入脱硫的温度小于160℃。烟气经过后端湿法脱硫后,排放约55℃的饱和湿烟气,因此烟囱出口将出现长长的白色烟羽。

4 后置的优点及缺点

4.1 后置工艺布置说明

因烧结烟气经过脱硫后的温度约为55℃,故需对烧结机烟气进行升温,烟气升温的热源采用高炉或焦炉煤气燃烧的热量。将烧结机烟气加热到320℃以上,以利于中高温升温SCR脱硝反应。

为充分利用SCR系统余热热量,脱硫系统的烧结机烟气(55℃左右)升温 and 降温过程同样采用回转式预热器进行换热。加入回转式预热器后整个升温SCR脱硝的烟气流程为:从SCR反应器出来的净烟气(320℃左右)经过与原烟气(55℃)进行热交换后,降温至85℃左右排出,原烟气升高至290℃左右,再经过高炉或焦炉煤气加热器进行加热,加热后的烟气(≥320℃)进入SCR反应器。后置脱硝流程如图3所示。

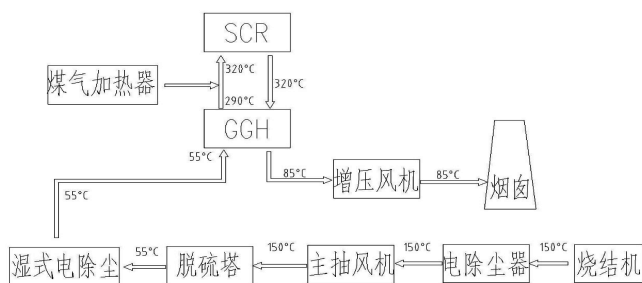


图3 后置式脱硝烟气工艺流程图

4.2 后置的优点

烧结烟气经过湿法脱硫及湿式电除尘器除尘后,粉尘含量可控制在10mg/Nm³以下,在脱硝配备常规吹灰系统的情况下,基本无堵塞风险,系统可长期稳定运行。后置脱硝的排烟为约85℃的非饱和烟气,在干燥的夏季时节,烟囱出口的烟羽将得到一定的改善。

4.3 后置的缺点

脱硝系统布置在湿法脱硫后,故低温烟气所处的GGH入

口烟道、GGH冷端、烟囱等均需要玻璃鳞片防腐,增加了施工风险及投资费用。此工艺一般需要新建烟囱,烟气需从脱硫塔顶引下进入底进底出的脱硝系统,烟道较长,烟气弯头较多。脱硝系统在湿法脱硫后,均为饱和湿烟气,烟气整体比热比脱硫前非饱和烟气比热大,升高相同温度的烧结烟气,脱硫后脱硝的煤气将比脱硫前煤气耗量大。

5 综合对比分析

对两种工艺进行综合对比分析,如表2所示。

表2 综合对比分析

序号	项目名称	SCR放置在脱硫前	SCR放置在脱硫后	备注
1	脱硝效率	高	高	
2	催化剂成本	适中	适中	
3	加热能耗	稍高	高	
4	GGH腐蚀风险	很低	高	
5	入口烟道是否防腐	不需要	需要	
6	脱硝堵塞风险	很高	低	
7	NH ₄ HSO ₄ 生成量	高	低	
8	消白效果	无	有	
9	脱硫入口是否需降温	需要	不需要	
10	项目总投资	适中	高	

6 结语

前置的稳定运行对烧结机头电除尘的除尘效率要求非常高,烧结原料中的碱性金属含量要非常低,对烧结配料需要调整配料。相对前置,后置脱硫后的粉尘含量已处理至10mg/Nm³以下,在脱硝配备常规吹灰系统的情况下,基本无堵塞风险,为脱硝系统长期稳定运行提供了保障。在现今严峻的环保形势下,保障烧结生产和环保设施长期稳定运行将是重中之重,故建议采用后置的SCR脱硝布置方式。

参考文献:

- [1] 河北省生态环境厅.DB13/2169-2018 钢铁工业大气污染物超低排放标准[S].石家庄:河北省生态环境厅,2018.
- [2] 龙红明,肖俊军,李家新,等.烧结过程氮氧化物的生成机理与减排方法[C]//中国金属学会.第九届中国钢铁年会论文集,2013:280-286.

作者简介:彭如(1990-),男,湖南长沙人,大学本科,工程师,主要从事大气污染防治与治理研究。