链算机—回转窑烟气超低排放技术研究与应用

刘 磊，李 斌，张文强，曾 琦
（唐山钢铁集团有限责任公司，河北 唐山 063000）

摘要：为实现球团烟气超低排放改造，本文通过研究链算机—回转窑生产工艺，分析烟气中颗粒物、SO_2、NO_x 排放现状，并应用相应超低排放技术措施。结果表明：链算机预热二段温度为 900～1 100 ℃，在脱硝还原剂反应温度区间，采用 SNCR 工艺改造可降低烟气中 NO_x 约 30% 左右；臭氧梯级氧化工艺改造，将强氧化剂 O_3 喷入主烟道内使 NO 氧化成 NO_2，当 $n(O_3)/n(NO)$（摩尔比）≤1.0 时，NO 的氧化产物为 NO_2，而随着 $n(O_3)/n(NO)>1.0$ 时，在脱硫塔内烟气中部分 NO_2 进一步被氧化为 NO_3，此时 NO_3 与 NO_2 迅速反应生成了 N_2O_5；根据高价态 NO_x 容易被碱性脱硫剂和水吸收的特性，可通过 SDA 旋转喷雾工艺协同吸收 NO_x 和 SO_2；采用预荷电技术对布袋进行改造后，烟气中粉尘荷电，有利于提高粉尘捕集效率，降低过滤阻力，粉尘排放浓度小于 5 mg/m³。

关键词：SNCR；SDA；臭氧梯级氧化；协同吸收；预荷电
中图分类号：TF046.6；X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)04－0106－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.061

Research and application of ultra-low emission technology of grate-kiln flue gas

LIU Lei，LI Bin，ZHANG Wenqiang，ZENG Qi
(*Tangshan Iron and Steel Group Co.，Ltd.，Tangshan* 063000，*Hebei*，*China*)

Abstract：In order to realize the ultra-low emission transformation of pelletizing flue gas，based on the research on grate-kiln manufacturing technique，the current status of particulate matter，SO_2 and NO_x emissions in flue gas is analyzed，and the technical measures of corresponding ultra-low emission are applied. The results show that the temperature at the second stage of preheating of the grate is 900～1 100 ℃. The process modification can reduce the NO_x in the flue gas by about 30% in the reaction temperature range of denitrification reducing agent; ozone cascade oxidation process transformation sprays the strong oxidant O_3 into the main flue to oxidize NO to NO_2，when $n(O_3)/n(NO)$（molar ratio）≤1.0，the oxidation product of NO is NO_2，and with $n(O_3)/n(NO)>1.0$，part of the NO_2 in the flue gas in the desulfurization tower is further oxidized to NO_3; At this time，NO_3 and NO_2 react rapidly to generate N_2O_5; According to the characteristics of high-valence NO_x that are easily absorbed by alkaline desulfurizers and water，NO_x and SO_2 can be cooperatively absorbed by the SDA rotary spray process; After the pre-charge technology is used to transform the bag，and the dust charge in the flue gas is conducive to improving the efficiency of dust capture and reducing the filtration resistance，and the dust emission concentration is less than 5 mg/m³.

Key words：SNCR；SDA；ozone cascade oxidation；synergistic absorption；pre-charge

目前国内高炉炉料结构由烧结矿、酸性球团矿和部分块矿组成，而欧美国家高炉的球团矿使用占比普遍高达 80%～90%，其中瑞士钢铁达到 97%，米塔尔 7# 和美钢联 14# 高炉达到了 80%[1]。首钢京唐公司 5 500 m³ 高炉炉料结构中，球团矿入炉比已经超过 50%[2]；唐钢不锈钢公司高炉的球团矿入炉比曾经超过 60%[3]。与烧结矿相比，球团矿具有品位高、

收稿日期：2021－06－01；**修回日期**：2022－11－02
作者简介：刘 磊(1990—)，男，工程师，从事烧结球团工艺与技术方面的研究工作。

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

成本低、工序能源消耗低、污染物排放少等优势，所以提高高炉球团矿入炉比有利于改善高炉操作和经济技术指标。

2019 年，生态环境部等五部委联合印发《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》中明确规定：带式焙烧机和链算机—回转窑生产工艺中，在基准含氧量 18% 条件下，烟气中颗粒物、SO_2、NO_x 的小时均值排放质量浓度分别不高于 10、35、50 mg/m^3。因此，球团烟气的高效治理对于球团产业的高质量发展具有重要意义。国内目前成熟的主流超低排放工艺有半干法脱硫 + SCR 脱硝技术、双级活性炭脱硫脱硝技术。其中，活性炭法需将现有脱硫设施推倒重建，投资和运行成本较大；半干法脱硫结合 SCR 脱硝技术虽能满足超低排放要求，但需设置热风炉，对烟气进行补热，一般需增温 20 ~ 60 ℃左右，运行成本较大。随着臭氧发生器制造技术的发展和成熟，氧化脱硝结合半干法协同脱硫脱硝的技术路径实现烟气超低排放成为了可能，且 NO_x 可被现有 SDA 旋转喷雾半干法脱硫装置实现协同吸收，设备的改造成本相对较低。

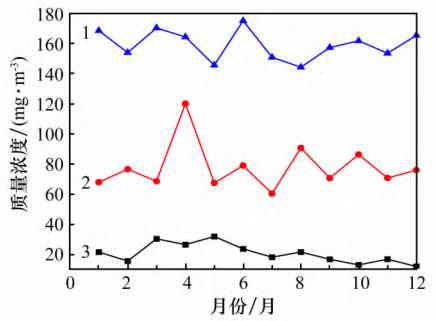
本文通过研究链算机—回转窑生产工艺，分析烟气中颗粒物、SO_2、NO_x 排放现状，探讨 SNCR 脱硝技术、臭氧氧化脱硝结合 SDA 半干法协同脱硫脱硝技术、预荷电袋式除尘技术在球团烟气超低排放改造方面的应用，以供同行参考与借鉴。

1　球团烟气排放现状与 NO_x 排放规律

1.1　球团烟气排放现状

某链算机—回转窑生产线设计年产 200 万吨球团矿，铁精粉主要以本地精粉为主，外购精粉为辅，利用喷吹煤粉提供热源，球团烟气排放量为 1.08×10^6 m^3/h。现有烟气净化设施为 SDA 旋转喷雾脱硫和布袋除尘工艺，未设置脱硝工艺设施。统计该生产线 2018 年 NO_x、颗粒物、SO_2 的排放情况，，数据按基准含氧量为 18% 进行折算，结果如图 1 所示。

由图1可知：2018年该生产线的烟气排放



1—NO_x；2—SO_2；3—颗粒物。

图 1　2018 年全年烟气排放数据

Fig. 1　Annual flue gas emission data in 2018

质量浓度已经不符合污染物超低排放标准。分析原因认为，污染物排放质量浓度高的原因主要有：① 现有布袋除尘技术效率有限，已经不符合颗粒物超低排放要求；② 现有采用 SDA 旋转喷雾法的脱硫塔脱硫效率不高，主要原因是脱硫白灰质量不理想；③ 厂区暂未设置脱硝设备，仅仅凭工艺过程控制不能满足排放要求；④ 以喷吹煤粉作为热量来源，对降低烟气中 SO_2 和 NO_x 质量浓度不利，但考虑到生产成本等原因，更改现有原燃料条件暂不能实现。因此，需要根据实际情况对球团烟气进行超低排放改造，在 2020 年底前达到超低排放水平。

1.2　球团烟气 NO_x 排放规律

选择性非催化还原(SNCR) 脱除 NO_x 技术是将含有 NH_x 的还原剂(如氨气、氨水或尿素等) 喷入温度窗口的区域，该还原剂迅速分解成 NH_3 和其它副产物，随后 NH_3 与烟气中的 NO_x 进行反应生成 N_2。采用一定质量分数的氨水作为还原剂，最佳反应温度为 900 ~ 1 100 ℃，在温度窗口内，还原 NO_x 的化学反应式主要如下。

$$4NO + 4NH_3 + O_2 = 4N_2 + 6H_2O \quad (1)$$

$$6NO + 4NH_3 = 5N_2 + 6H_2O \quad (2)$$

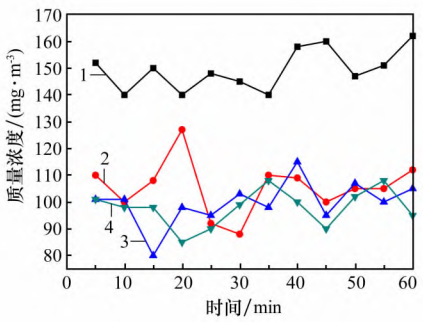
$$6NO_2 + 8NH_3 = 7N_2 + 12H_2O \quad (3)$$

$$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 = 3N_2 + 6H_2O \quad (4)$$

叶恒棣等[4] 在研究以焦炉煤气燃烧作为热源的链算机—回转窑 NO_x 排放规律时发现，NO_x 质量浓度与烟气量、煤气流量以及窑尾温度成正相关变化趋势，且预热Ⅱ段和链算机与回转窑之间的 NO_x 质量浓度较高。

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

链算机—回转窑以煤粉燃烧作为热量来源，根据烟气走向，在预热Ⅱ段会出现较高的 NO_x 质量浓度。预热Ⅱ段温度为 900 ~ 1 100 ℃，符合采用氨水作为脱硝还原剂的反应温度区间。所以，脱硝还原剂喷射最佳位置选择为链算机预热Ⅱ段区域，在此工艺段进行 SNCR 改造，不仅可以有效降低 NO_x 质量浓度，还可降低后序臭氧脱硝负荷和臭氧发生器耗电所带来的成本。另外，未参与反应的逃逸氨在烟气温度为 310 ℃以上时，不生成硫铵结晶盐及副产物，不会对设备造成损害。由 NH_3 还原 NO_x 化学反应式(1)、(4)可知，还原 1 mol NO 需要 1 mol NH_3，还原 1 mol NO_2 需要 2 mol NH_3，为确定合理的氨氮比，达到理想的脱硝效果，在设备调试过程中进行脱硝试验，检测脱硫塔前 NO_x 质量浓度随氨氮比的变化规律，结果如图 2 所示。



$n(NH_3)/n(NO_x)$：1—0；2—1.0；3—1.5；4—2.0。

图 2 不同 NH_3/NO_x 摩尔比时脱硫塔前总烟道的 NO_x 质量浓度

Fig. 2 NO_x mass concentration of main flue in front of desulfurization tower at different NH_3/NO_x molar ratio

由图 2 可知，随着氨水的喷入，烟气中 NO_x 的质量浓度下降明显，但是进一步增加氨水喷入量，NO_x 的质量浓度下降速度放缓。经计算得知，$n(NH_3)/n(NO_x)$ 从 1.0 增加到 2.0 时，脱硝效率从 29% 增加至 32%。因此，为增加氨水利用效率的同时节省成本，不建议 $n(NH_3)/n(NO_x)$ 达到 2.0 时，继续增加氨水喷入量。

为提高氨水还原 NO_x 的效率，设计 SNCR 脱硝系统如图 3 所示。其中，在氨水储存与输送系统和稀释系统(供除盐水)分别设置过滤器和背压回路阀，防止管道堵塞，保证氨水和除盐水具有稳定的流量和压力；采用计量和分配模块对氨水和除盐水进行计量并输送分配至各个雾化喷枪。在压缩空气总管上设流量压力测量仪，将压缩空气分几路通到各喷射点，同时在该模块设置空气过滤器，防止设备堵塞；经过计量分配后的雾化空气进入喷枪，在喷嘴处将氨水溶液雾化，均匀喷入链算机预热Ⅱ段区域内。通过在线监测后端烟气中 NO_x 的排放值，利用反馈信号自动调节和控制氨水的喷射量，在保证脱硝效率的前提下减少系统的运行成本。

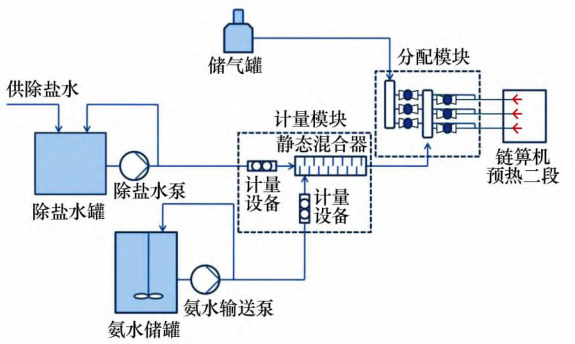


图 3 SNCR 系统工艺流程

Fig. 3 Process flow of SNCR system

2 球团烟气超低排放技术研究

2.1 臭氧梯级氧化协同 SDA 旋转喷雾法

2.1.1 脱硫脱硝机理

NO_x 被碱液吸收能力从大到小依次为 $N_2O_5 > NO_2 > NO$，因此想达到超低排放，就必须把 NO_x 中低价态 N 氧化成高价态的 N_2O_5，才能提高脱硝效率，但 N_2O_5 在球团烟气温度条件下很不稳定，容易分解。因此，第一级分布器将 O_3 喷入烟道内，对 NO_x 进行氧化主要生成 NO_2，SO_2 基本不参与反应，这是因为 O_3 与 SO_2 反应的活化能为 58.17 kJ/mol，远高于 O_3 氧化 NO 的活化能 3.176 kJ/mol，反应活化能越低，在指定温度下活化分子越多，反应越快，所以 O_3 对 NO 有较强的选择性，因此，SO_2 的存在不会对 O_3 氧化 NO 造成太大影响[5-6]。第二级分布器将 O_3 注入脱硫塔内与烟气混合，将少部分 NO 氧化为 NO_2，使烟气中部分 NO_2 被进一步氧化为 NO_3，此时 NO_3 与 NO_2 迅速反应生成了

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

N_2O_5。同时，在吸收塔内 NO_2、N_2O_5 和 SO_2 与吸收剂液膜上的 $Ca(OH)_2$ 发生强烈且迅速的传质以及传热反应，在干燥吸收塔内雾化浆滴水分的同时进行着脱硫以及脱硝反应。此时 $CaSO_3$、$CaSO_4$、$Ca(NO_2)_2$、$Ca(NO_3)_2$ 等硫硝脱除产物在 $Ca(OH)_2$ 颗粒表面生成，随着反应的持续进行以及液膜上水分的不断蒸发，最终硫硝脱除产物完全包裹在未反应完全的 $Ca(OH)_2$ 颗粒上，形成如图 4 所示的核－壳状结构。其中 NO_x 氧化反应式如下。

当 $n(O_3)/n(NO) \leqslant 1.0$ 时：

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (5)$$

当 $n(O_3)/n(NO) > 1.0$ 时：

$$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2 \quad (6)$$

$$NO_2 + NO_3 \rightarrow N_2O_5 \quad (7)$$

2.1.2　臭氧投入量对脱硫脱硝的影响

现有 SDA 旋转喷雾脱硫系统塔内雾化器的最大设计喷浆量为 22 t/h，新鲜浆液系统设计最大制浆、喷浆能力为 10 t/h。为保证脱硫效果，同时满足 $Ca(OH)_2$ 对 NO_2 和 N_2O_5 的吸收效率，考察国内先进同类型 SDA 脱硫系统，最终确定提高采购生石灰中 CaO 质量分数为 88% 以上。

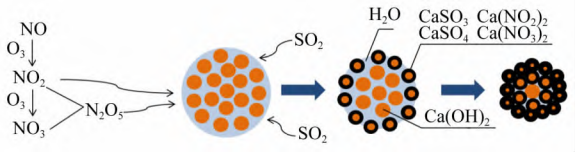
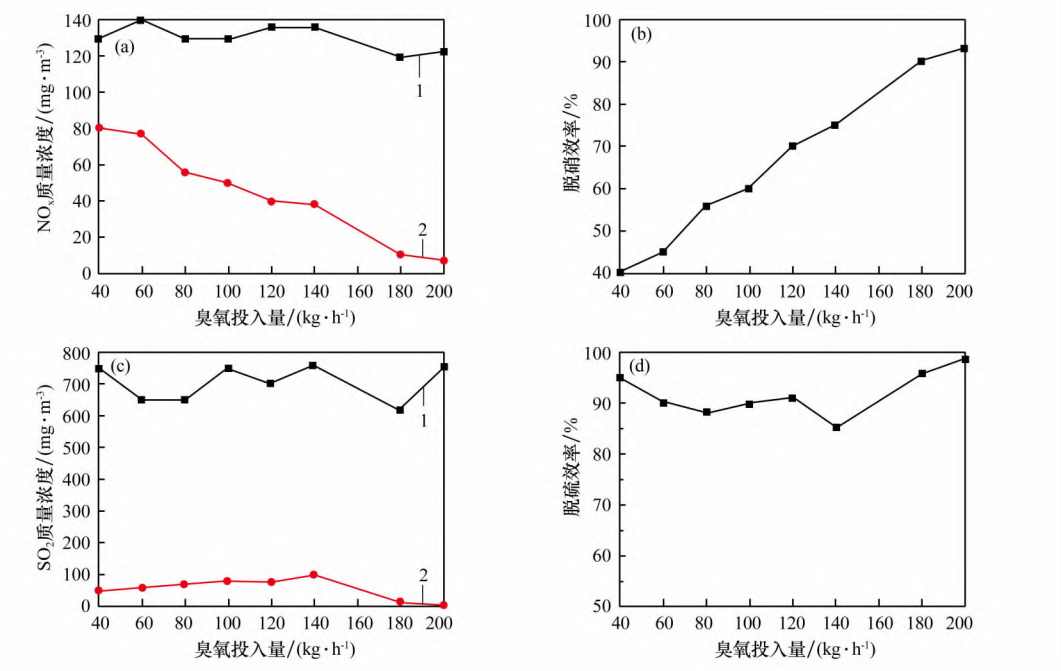


图 4　臭氧氧化结合脱硫系统同时脱除 SO_2 和 NO_x 的反应机理

Fig. 4　Reaction mechanism of simultaneous removal of SO_2 and NO_x by ozonation combined with desulfurization system

臭氧投入量是影响氧化吸收单元脱硝效果的关键因素。臭氧量对烟气中 NO 的氧化起决定性作用，随着投入的臭氧量增加，NO 先被氧化为 NO_2，然后被进一步氧化为 N_2O_5。NO、NO_2、N_2O_5 在水中的溶解度分别为 0.032、213.0 和 500.0 g/dm^3，由此可看出 NO_x 的氧化态越高就越容易被去除，因此增加臭氧的投入量可以有效地提高脱硝效率。不同臭氧投入量下脱硫塔入口和烟囱出口的 NO_x、SO_2 质量浓度和脱除效率如图 5 所示。



(a)　NO_x 质量浓度；(b)　脱硝率；(c)　SO_2 质量浓度；(d)　脱硫率

1—脱硫塔入口质量浓度；2—烟囱出口质量浓度。

图 5　不同臭氧投入量下脱硫塔入口和烟囱出口的 NO_x、SO_2 质量浓度和脱除效率

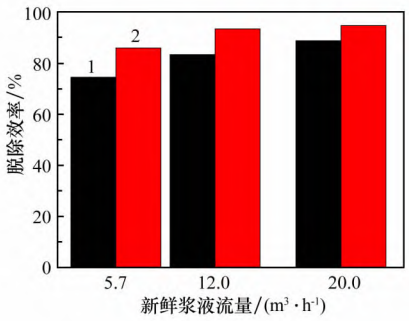
Fig. 5　Mass concentration and removal efficiency of NO_x and SO_2 at the inlet of desulfurization tower and the outlet of chimney under different ozone input

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

由图 5 可知：在新鲜浆液投入量为 5.7 m^3/h 条件下，随着臭氧投入量增加，烟囱出口 SO_2 和 NO_x 质量浓度逐渐降低，脱硫脱硝效率提高，当臭氧投入量为 200 kg/h 时脱硝效率为 93.2%，脱硫效率达到了 98.79%；脱硫塔入口的 SO_2 质量浓度随时间变化而上下波动，而烟囱出口的 SO_2 质量浓度随着臭氧投入量的增加刚开始没有明显影响，在臭氧投入量为 160 ~ 180 kg/h 及以上时，SO_2 质量浓度显著降低，脱硝效率有明显提升。分析原因认为，反应生成的 $CaSO_3$ 在脱硫塔内与残留的 O_3 反应生成 $CaSO_4$，从而促进 $Ca(OH)_2$ 与 SO_2 生成 $CaSO_3$ 的反应向右进行。

2.1.3 新鲜浆液对脱硫脱硝的影响

新鲜浆液能提供更多的 OH^- 离子促进 SO_2 和高价 NO_x 的吸收，因此新鲜浆液流量对脱硫脱硝有影响。在臭氧投入量为 160 kg/h，新鲜浆液流量分别为 5.7、12.0 和 20.0 m^3/h 时氧化吸收单元的脱硫脱硝效率如图 6 所示。由图 6 可知，随着新鲜浆液流量的增加，脱硫和脱硝效率显著的提高。当新鲜浆液流量为 5.7、12.0、20.0 m^3/h 时，脱硫效率从 85.80% 提高到 94.59%，脱硝效率从 74.35% 提高到 88.62%。虽然新鲜浆液流量为 20 m^3/h，能取得较好的脱硫脱硝效果，但新鲜浆液制浆系统能力只有 10 m^3/h，浆液罐的液位不能保持平衡，该条件下氧化吸收单元不能持续稳定的运行。

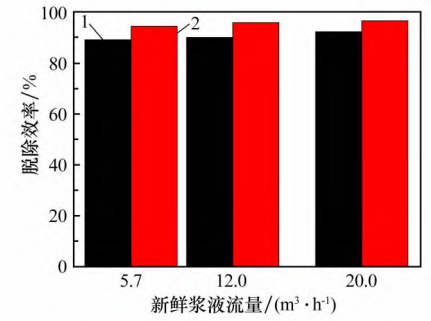


1—脱硝效率；2—脱硫效率。

图 6 臭氧投入量为 160 kg/h 时不同新鲜浆液流量下氧化吸收单元的脱硫脱硝效率

Fig. 6 Desulfurization and denitration efficiency of oxidation absorption unit under different fresh slurry flow when ozone input is 160 kg/h

为保证浆液系统稳定运行，增加臭氧投入量至 200 kg/h，新鲜浆液流量为 5.7、12、20 m^3/h 时，氧化吸收单元的脱硫脱硝效率如图 7 所示。由图 7 可知，脱硝效率从 89.1% 提高至 92.23%，脱硫效率从 94.36% 提高至 96.52%。分析原因认为，臭氧投入量增加低价态 NO_x 氧化至容易被碱液吸收的高价态 NO_x，即使在新鲜浆液流量相对较低时仍可获得较高的脱硫脱硝效率。一般情况下，为降低成本会补充一定量的循环灰，当循环灰 CaO 质量分数低于 20%，再次循环使用情况下就不能达到超低排放对 SO_2 和 NO_x 的要求，这时就需要补充新鲜浆液。



1—脱硝效率；2—脱硫效率。

图 7 臭氧投入量为 200 kg/h 时不同新鲜浆液流量下氧化吸收单元的脱硫脱硝效率

Fig. 7 Desulfurization and denitration efficiency of oxidation absorption unit under different fresh slurry flow rates when ozone input is 200 kg/h

此外，温度对臭氧分解的影响很大。根据王智化等[7]的研究结论可知：当温度为 150 ℃时，10 s 内 O_3 分解率为 28%，200 ℃时，10 s 内 O_3 分解率为 86.7%；250 ℃时，2 s 内完全分解。通过 CHEMKIN 的动力学模拟发现，150 ℃时 O_3 与 NO_x 反应时间仅需 0.01 s。为保证 O_3 氧化 NO_x 的效率，防止过高的烟气温度对 O_3 造成分解，在主抽风机后水平烟道上设置 1 套喷水降温装置，将球团烟气温度降至 150 ℃左右，该喷水降温装置要充分考虑雾化和蒸发效果，防止脱硫塔烟气进口气流分配器结垢，还要保证后续脱硫塔对烟气温度的要求。

设计臭氧梯级氧化第三级分布器，但从实际使用效果中发现，综合 SNCR 以及第一、第

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

二级分布器脱硝效率，即使第三级分布器不使用情况下仍可达到超低排放水平，具体的臭氧脱硫脱硝工艺流程如图 8 所示。

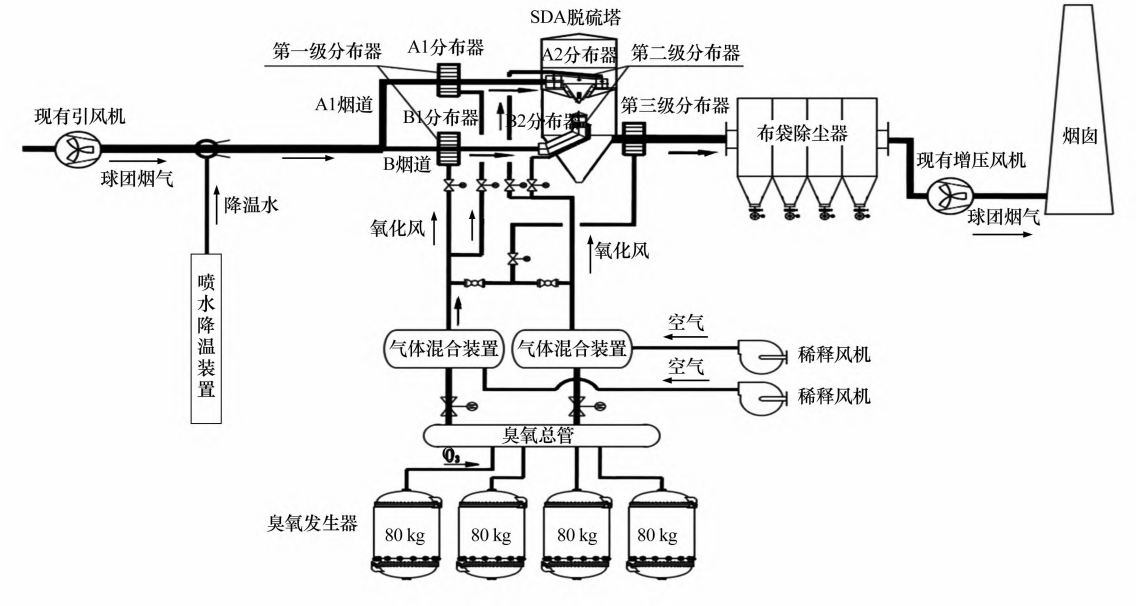


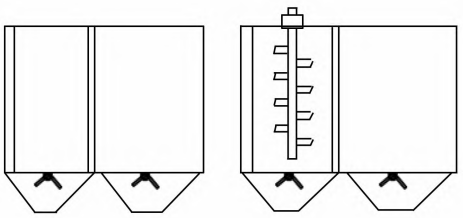
图 8　臭氧梯级氧化协同 SDA 旋转喷雾法同时脱硫脱硝工艺流程

Fig. 8　Ozone cascade oxidation combined with SDA rotary spray method for simultaneous desulfurization and denitrification process

2.2　预荷电布袋除尘改造

厂区原有布袋除尘器设计处理风量为 1.08 × 10^6 m^3/h，过滤面积为 18 000 m^2，滤料为4 800 条∅160 mm × 7 500 mm 的亚克力材质滤袋，设备阻力小于 1 500 Pa，烟气温度为70 ~ 120 ℃，出口排放质量浓度为不大于 20 mg/m^3。由此可知，原有设计烟气中颗粒物质量浓度的排放水平已经不符合超低排放要求。

预荷电直通式袋滤器技术指在袋滤器进口处前置预荷电场使烟气中的粉尘荷电，荷电后的粉尘被后续袋区滤袋捕集。由于粉尘带上同极电荷后互相排斥，可在滤袋表面形成疏松的粉饼层，从而降低设备阻力达到节能的目的。经过预荷电技术改造后，粉尘捕集效率可提高 15%~20%，过滤阻力下降 20%~30%[8]。在原有袋式除尘器的基础上，利用原袋式除尘器中间烟道的空间，沿气流方向，在第一个箱体空间内设置预荷电装置，包括预荷电顶梁、绝缘子室、阴阳极系统及其振打装置、高压电源；在前 3.5 个箱体中间烟道侧设置烟气折流板，引导气流均匀进入各个箱体；原滤袋更换为 PPS + PTFE 复合超精细梯度滤料，将明显提高粉尘捕集效率；在原上箱体上面增设净气室，收集过滤后的干净烟气；将净化后的烟气汇集后接至原出口烟道。预荷电改造前后除尘器整体示意如图 9 所示。



(a)　改造前；(b)　改造后

图 9　预荷电改造前后除尘器整体示意

Fig. 9　Overall schematic diagram of dust collector before and after pre-charging transformation

3　应用效果

采用 SNCR、臭氧梯级氧化协同 SDA 旋转喷雾法脱硫脱硝、预荷电袋式除尘超低排放技术改造的工艺路线如图 10 所示。该工艺路线涵盖了生产过程预热后段的烟气处理以及末端烟气治理，不仅利用了原有 SDA 脱硫设备，同时

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

可根据不同阶段烟气的温度变化选择与其相适应的烟气治理技术，因此工艺成本不增加，且不会对球团矿生产以及质量造成影响。此外，对于脱硫脱硝产生的固体废弃物主要进行外卖处理。

改造后，2020年的烟气排放数据如图11所示。由图 11 可知，与 2018 年烟气排放数据相比，经过超低排放技术改造后，排放烟气中的 NO_x、SO_2、颗粒物分别不超过 30、5、1 mg/m^3，污染物排放数据符合国家环保部门的超低排放的要求。

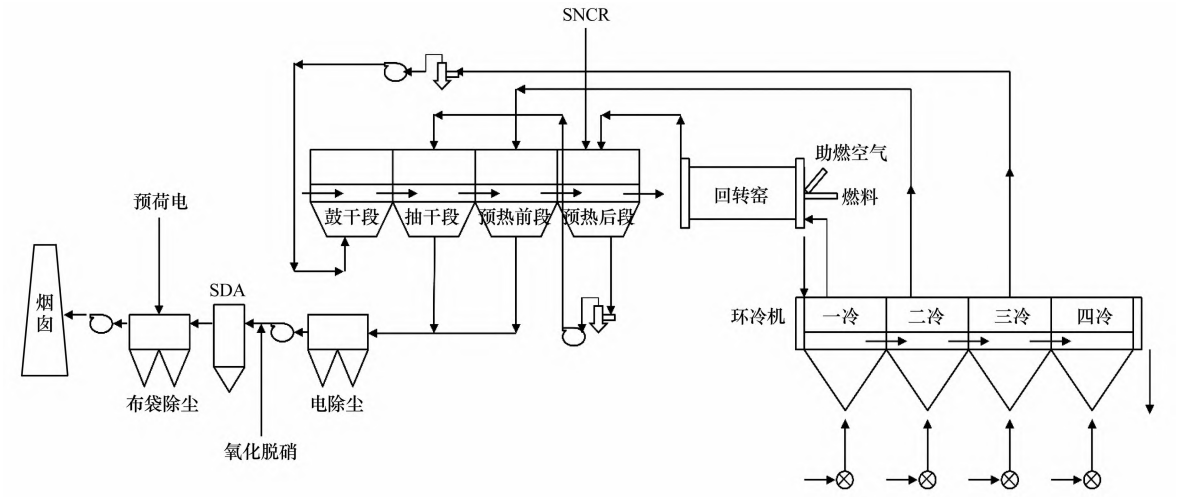
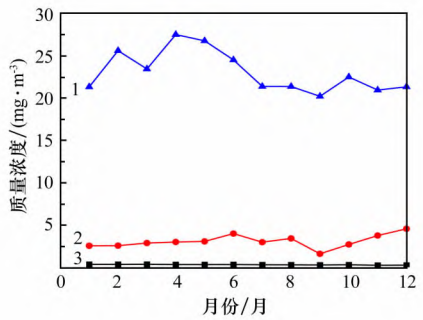


图 10 球团烟气超低排放工艺路线

Fig. 10 Ultra-low emission process route of pellet flue gas



1—NO_x；2—SO_2；3—颗粒物。

图 11 2020 年球团烟气排放数据

Fig. 11 Flue gas emission data of pellets in 2020

4 结 论

(1) 链算机预热Ⅱ段符合 SNCR 实施条件，不仅可脱除烟气中约 30% NO_x，还降低了后续臭氧脱硝负荷以及臭氧发生器耗电所带来的成本。

(2) 根据不同价态的 NO_x 被碱液吸收能力不同，需将烟气中 NO_x 氧化成高价态的 N_2O_5，但其在球团烟气温度条件下易分解，所以采用梯级氧化的方法，在球团烟道将 NO_x 氧化成 NO_2，在脱硫塔内将其氧化成高价态 N_2O_5 后，再利用 $Ca(OH)_2$ 对其进行吸收脱除。

(3) 臭氧在不同温度下分解速度不同，设计喷水降温装置，在烟气温度高于 150 ℃时，进行喷水降温操作以保证臭氧的氧化效率，降低臭氧消耗量。

(4) 采用预荷电技术对布袋除尘器进行改造，将烟气中粉尘荷电后，过滤阻力下降，同时结合 PPS + PTFE 复合超精细梯度滤料明显提高了粉尘捕集效率，降低颗粒物的排放质量浓度至 5 mg/m^3 以下。

参考文献:

[1] 季文东，贾西明，赵俊峰，等. 大型带式焙烧机高产低功耗技术的发展与应用[J]. 矿业工程，2019，17(6)：30－33.
JI Wendong，JIA Ximing，ZHAO Junfeng，et al. Development and application of high production and low consumption technology for large-scale straight-grate induration machine[J]. Mining Engineering，2019，17(6)：30－33.

[2] 张福明. 首钢绿色低碳炼铁技术的发展与展望[J]. 钢铁，2020，55(8)：11－18.
ZHANG Fuming. Development and prospect of green and low carbon ironmaking technologies in Shougang[J]. Iron & Steel，2020，55(8)：11－18.

(下转第 118 页)

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

Department of inorganic chemistry of Dalian Institute of Technology. Inorganic chemistry [M]. Beijing: People's Education Press, 1978.

[8] 卢宜源. 贵金属冶金学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 165 – 167.
LU Yiyuan. Precious metal metallurgy [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 165 – 167.

[9] 李俊杰, 魏进超, 刘昌齐. 活性炭法多污染物控制技术的工业应用[J]. 烧结球团, 2017, 42(2) 79 – 85.
LI Junjie, WEI Jinchao, LIU Changqi. Combined desulfurization, denitrification and reduction of air toxice using activated coke [J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(2): 79 – 85.

[10] 高继贤, 刘静, 曾艳, 等. 活性焦(炭)干法烧结烟气净化技术在钢铁行业的应用与分析(I): 工艺与技术经济分析[J]. 烧结球团, 2012, 37(1): 65 – 69.
GAO Jixian, LIU Jing, ZENG Yan, et al. Application and analysis of activated coke(carbon) dry sintering flue gas purification technology in iron and steel industry(I) -process and technical economic analysis [J]. Sintering and Pelletizing, 2012, 37(1): 65 – 69.

[11] 苏玉栋, 李咸伟, 范晓慧. 烧结过程中 NO_x 减排技术研究进展[J]. 烧结球团, 2013, 38(6): 41 – 54.
SU Yudong, LI Xianwei, FAN Xiaohui. Research progress of NO_x emission reduction technology in sintering process [J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(6): 41 – 54.

[12] 廖继勇, 储太山, 刘昌齐, 等. 烧结烟气脱硫脱硝技术的发展与应用前景[J]. 烧结球团, 2008, 33(4): 1 – 5.
LIAO Jiyong, CHU Taishan, LIU Changqi, et al. Development and application prospect of sintering flue gas desulfurization and denitration technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2008, 33(4): 1 – 5.

(上接第112页)

[3] 张文强, 肖洪, 高冰, 等. 唐钢1号高炉高比例球团矿冶炼工业试验[J]. 炼铁, 2019, 38(2): 13 – 16.
ZHANG Wenqiang, XIAO Hong, GAO Bing, et al. commercial test of high-rate pellet smelting in Tangshan steel's No. 1 bf [J]. Ironmaking, 2019, 38(2): 13 – 16.

[4] 叶恒棣, 胡兵, 魏进超. 链箅机—回转窑球团 NO_x 超低排放技术研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(1): 55 – 60.
YE hengdi, HU Bing, WEI Jinchao. Research on technology of ultra-low NO_x emission from grate-rotary kiln pelletizing process [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(1): 55 – 60.

[5] 牛强, 罗津晶, 郑锦森, 等. 臭氧氧化技术同时脱除烟气中NO和SO_2的试验研究. [J]. 广东化工, 2020, 12(47): 159 – 161.
NIU Qiang, LUO Jinjing, ZHENG Jinsen, et al. Experimental research for the simultaneous removal of NO and SO_2 in flue gas [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 12(47): 159 – 161.

[6] 赵南. 臭氧氧化结合湿法同时脱硫脱硝工艺及吸收添加剂研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
ZHAO Nan. Experimental study on simultaneous wet absorption of SO_2 and NO_x combined with ozone oxidation and investigation on absorption additives [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[7] 王智化, 周俊虎, 魏林生, 等. 用臭氧氧化技术同时脱除锅炉烟气中 NO_x 及 SO_2 的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(11): 1 – 5.
WANG Zhihua, ZHOU Junhu, WEI Linsheng, et al. Experimental research for the simultaneous removal of NO_x and SO_2 in flue gas by O_3 [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(11): 1 – 5.

[8] 李东明, 陈盛健, 李凯. $PM_{2.5}$ 预荷电直通式袋滤器在山钢日照炼钢除尘中的应用[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(6): 61 – 64.
LI Dongming, CHEN Shengjian, LI Kai. Application of $PM_{2.5}$ pre-charged straight-through bag filter in in Rizhao Steelmaking dust removal [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(6): 61 – 64.

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