HCl 对链算机—回转窑烟气净化系统的影响及其减排措施

王 飞，毛 瑞，姚海威，苏 航，邵久刚
（江苏省（沙钢）钢铁研究院，江苏 张家港 215625）

摘要：链算机—回转窑烟气中的气体污染物除 NO_x、SO_2 外，还含有一定比例的 HCl，其对烟气净化系统会造成显著负面影响，影响球团生产作业率。本文通过分析链算机—回转窑烟气中 HCl 的生成机理，研究 HCl 对烟气净化系统的影响，并提出相应改善措施。结果表明：95.85% 的氯元素来自各类铁精粉原料，此外，烟气中的 HCl 在喷氨区与 NH_3 反应生成大量 NH_4Cl 结晶是导致活性焦硫硝脱除系统运行不畅的主要原因。在实际生产中，可采取的 HCl 减排措施：减少高氯原料的使用实现源头减排，采用消石灰作为钙质添加剂生产碱性球团抑制 HCl 的生成，在 HCl 集中生成的链算机抽风干燥段喷洒碱液。在喷洒碱液措施下，当 $n(Na)/n(Cl)$（物质的量之比）为 2.6 时，HCl 的脱除率仅为 48.7%，其减排效率较低，不能满足生产需要。在添加钙质熔剂措施下，当消石灰配比为 1.5% 时，原料中氯元素转化为 HCl 的比例仅有 8.2%。在链算机—回转窑生产线实施 SNCR 与嵌入式 SCR 耦合前置脱硝工艺可在 HCl 生成之前将烟气中 NO_x 脱除，基本隔绝 HCl 与 NH_3 的接触。对于新建链算机—回转窑生产线，规划配置前置脱硝系统和活性焦脱硫系统的组合可以避免烟气中 HCl 的负面影响，实现球团烟气超低排放。

关键词：链算机—回转窑；HCl；活性焦；脱硫；脱硝
中图分类号：TF046.6；X701.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0163－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.103

Effect of HCl on chain grate-rotary kiln gas purification system and its emission reduction measures

WANG Fei, MAO Rui, YAO Haiwei, SU Hang, SHAO Jiugang
(Research Institute of Iron & Steel of Jiangsu Province (Sha Steel), Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China)

Abstract: In addition to NO_x and SO_2, the gaseous pollutants in the gas of the chain grate-rotary kiln also contain a certain proportion of HCl, which will have a significant negative impact on the gas purification system and affect the pellet production efficiency. The generation mechanism of HCl in the gas of the chain grate-rotary kiln is analyzed, the influence of HCl on the gas purification system is studied, and corresponding improvement measures are proposed. The results show that 95.85% of the chlorine comes from various raw material of iron ore concentrates. In addition, the main reason for the poor operation of the active coke sulfur and denitrification system is that HCl in the gas reacts with NH_3 in the ammonia injection area to generate a large amount of NH_4Cl crystals. In actual production, the following HCl emission reduction measures can be taken: reducing the use of high-chlorine raw materials to achieve source reduction, using slaked lime as a calcium additive to produce alkaline pellets to inhibit the formation of HCl, and spraying alkaline solution in the exhaust drying section of the chain grate where HCl is concentrated. Under the alkali solution spraying measure, when $n(Na)/n(Cl)$ (the ratio of the amount of substance) is 2.6, the HCl removal rate is only 48.7%, and its emission reduction efficiency is low and cannot meet the production needs. When calcium solvent is added, the proportion of slaked lime is 1.5%, and the conversion rate of chlorine in the raw material into HCl is only 8.2%. The implementation of SNCR

收稿日期：2024－08－02；**修回日期**：2024－09－04
作者简介：王 飞(1990—)，男，研究员，从事钢铁冶金环保方向的研究工作。
通信作者：毛 瑞(1988—)，男，高级工程师，从事钢铁冶金环保方向的研究和管理工作。

and embedded SCR coupled pre-denitrification process in the chain grate-rotary kiln production line can remove NO_x from the gas before HCl is generated, basically isolating the contact between HCl and NH_3. For newly built chain grate-rotary kiln production lines, planning and configuring a combination of a pre-denitrification system and an activated coke desulfurization system can avoid the negative impact of HCl in the gas and achieve ultra-low emissions of pellet gas.

Key words: chain grate-rotary kiln; HCl; activated coke; desulfurization; denitrification

球团矿具有铁品位高、生产过程碳排放低、冶金性能优良等特点，因此，在高炉炼铁中提高球团矿的入炉比例是钢铁生产实现绿色低碳的可行措施[1-2]。链算机—回转窑工艺是我国球团生产的主流工艺，其产量约占球团矿总产量的60%以上[3-4]。近年来，随着钢铁行业超低排放政策的实施，烟气净化系统的稳定运行是确保链算机—回转窑球团工艺高效生产的关键。链算机—回转窑烟气中的气体污染物除 NO_x、SO_2 外，还含有一定比例的 HCl[5]。长期以来，广泛应用的半干法、干法脱硫系统能将烟气中存在的 HCl 与 SO_2 一同吸收进入脱硫灰，减少 HCl 对烟气净化系统造成的负面影响。相关文献记载，球团脱硫灰中氯的质量分数可以达到8%左右[6]。随着脱硫灰的消纳和再利用问题的突显，近年来，活性焦烟气净化系统以其良好的净化效果和没有废物外排的特点得到快速推广与应用[7]。在生产实践中，烟气中的 HCl 会使活性焦烟气净化系统发生腐蚀，并在脱硝段与喷加的 NH_3 反应生成 NH_4Cl 结晶导致净化塔内部堵塞，使净化塔内压差升高，最终导致生产线停产清理，严重影响球团生产的作业率[8]。

本文通过调查研究某钢铁企业的链算机—回转窑球团生产线，分析烟气中 HCl 的来源及形成机理，确定 HCl 对活性焦烟气净化系统造成的影响，并提出相应改善措施，以期为活性焦烟气净化系统的稳定顺行提供参考。

1 球团系统氯的来源及转化规律

1.1 氯平衡

调查研究某钢铁企业链算机—回转窑球团生产线，取各原料、返矿、除尘灰、成品球团矿进行制样，采用离子色谱法检测其中氯含量，进行氯元素的平衡分析。计算球团生产线中氯元素的收入项和支出项，得到工艺的氯元素平衡如表1所示。由表1可见，95.85%的氯元素来自各类铁精粉，而成品球团矿中残留的氯元素占比仅为5.65%。在所有氯支出项中，烟气中的氯质量占比高达93.52%。

表1 链算机—回转窑生产线的氯平衡

Table 1 Chlorine balance of grate-kiln systems

收入项			支出项		
项目	氯带入速率/($kg \cdot h^{-1}$)	占比/%	项目	氯排出速率/($kg \cdot h^{-1}$)	占比/%
乌克兰精粉	5.48	4.55	球团矿	6.50	5.65
秘鲁精粉	106.85	88.73	返矿	0.25	0.21
智利精粉	1.81	1.50	除尘灰	0.71	0.62
澳洲精粉	1.28	1.06	烟气	107.63	93.52
膨润土	0.68	0.57	—	—	—
水	4.32	3.59	—	—	—
合计	120.42	100	合计	115.09	100

烟气中氯的含量采用《环境空气和废气 氯化氢的测定 离子色谱法》(HJ 549—2009)中的方法进行检测。检测结果表明，烟气中 HCl 的质量浓度为162 mg/m^3。因此，减少高氯原料的使用可以从源头减少氯元素的输入，从而降低 HCl 的生成量。

1.2 HCl 的生成机理

链算机—回转窑工艺如图1所示。HCl 的生成过程可概述如下[9]：氯元素以 NaCl 的形式由铁矿粉原料带入链算机；在链算机抽风干燥段，由来自预热Ⅱ段的高温烟气烘干含水料层，烟气中高浓度的 SO_2 与料层中的 NaCl 发生化学反应生成 HCl，如式(1)所示。

$$4NaCl + 2SO_2 + 2H_2O + O_2 = 2Na_2SO_4 + 4HCl \quad (1)$$

该反应也是垃圾焚烧烟气中 HCl 的主要生成反应[10-12]。该反应过程在微观上的描述：料层中矿粉颗粒被水分包裹，由原料带入的 NaCl 在水中电离，生成 Na^+ 和 Cl^-；烟气穿过料层时，SO_2 分子被湿料层吸收，溶解到水中发生反应，生成 SO_3^{2-} 和 H^+；烟气中的 O_2 将 SO_3^{2-} 进一步氧化为 SO_4^{2-}，同时，H^+ 与 Cl^- 结合成易挥发的 HCl 分子

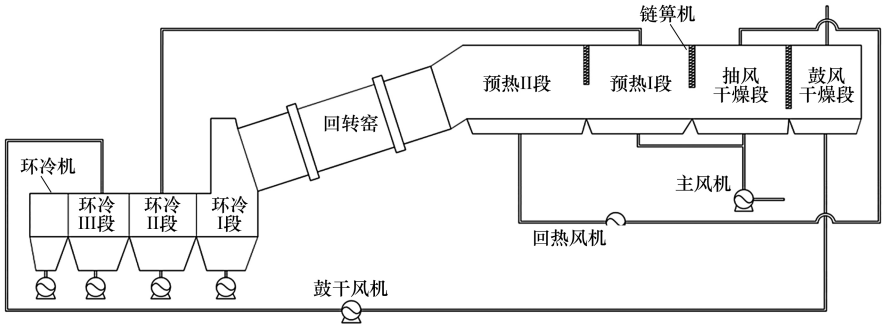


图 1　球团链算机—回转窑工艺流程示意

Fig. 1　Schematic diagram of grate-kiln process

从料层中脱除并进入烟气。链算机抽风干燥段球团料层内 HCl 生成反应的微观示意如图 2 所示。

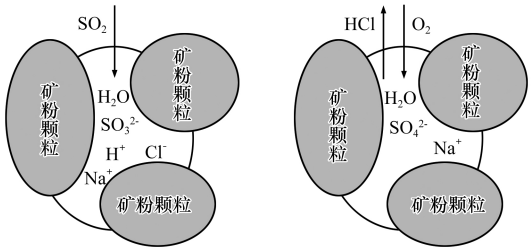


图 2　抽风干燥段球团料层内 HCl 生成反应示意

Fig. 2　Schematic diagram of the formation of HCl in the pellet layer of down draught drying segment

2　HCl 对烟气净化系统的影响

活性焦烟气净化系统的运行示意如图 3 所示。由图 3 可见：活性焦料层从上向下缓慢移动；烟气从净化塔的下部进入脱硫段，其中的 SO_2 在活性焦料层中被吸附脱除，然后在喷氨区与喷加的 NH_3 混合并进入脱硝段，最终在活性焦料层的催化作用下其中的 NO_x 转化为氮气实现脱硝。

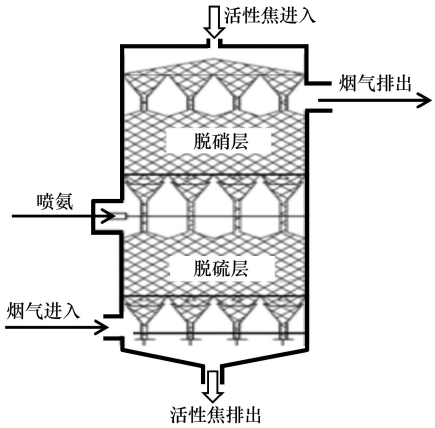
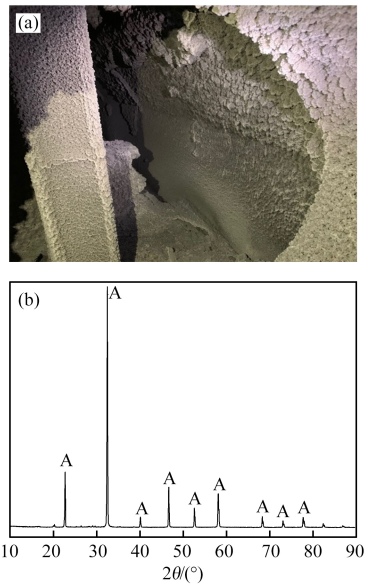


图 3　活性焦烟气净化系统运行示意

Fig. 3　Operation diagram of flue gas purification system of activated carbon

在链算机—回转窑生产线实际运行过程中，活性焦系统净化塔进出口压差从正常运行的 1.5 kPa缓慢上升至 2.5 kPa；在净化塔的喷氨区聚集了大量白色结晶物，使脱硝段进气格栅堵塞。喷氨区结晶物及其物相分析结果如图 4 所示。由图 4 可知，结晶物为纯度较高的 NH_4Cl 晶体。NH_4Cl 晶体的熔点为 340 ℃、沸点为 520 ℃，其在净化塔 120 ~ 130 ℃的温度范围内可以稳定存在。根据烟气成分的检测结果可知，烟气中存在的 HCl 在喷氨区与 NH_3 反应形成大量 NH_4Cl 晶体是导致活性焦烟气净化系统运行不畅的主要原因。净化塔内不断累积生成的结晶物，不仅堵塞烟气



（a）结晶物；（b）XRD 图谱

A—NH_4Cl。

图 4　喷氨区结晶物及其物相分析

Fig. 4　The crystal in the ammonia spray area and its XRD analysis results

通路导致净化塔进出口压差增大，使得气流分布不均，影响烟气净化效果；此外，结晶物会附着在净化塔内的钢结构表面，不断侵蚀钢结构，影响净化塔的使用寿命。因此，处置链算机—回转窑烟气中存在的 HCl 是保证活性焦烟气净化系统高效稳定运行的关键问题。

3 HCl 减排应对措施

3.1 烟道喷碱技术

在燃煤发电、化工及垃圾焚烧等领域，常采用湿法、干法、半干法技术脱除烟气中的 HCl[13-15]。其做法是向烟道或吸收塔内喷洒吸收剂(如碱液、碱性粉末等)，通过中和反应脱除 HCl。杨建国等[16]研究了不同碱性物质对燃煤烟气中氯脱除的影响，综合考虑成本和脱除效果，得出 NaOH 最具工业应用价值。本文借鉴燃煤烟气领域的研究成果[17]，在链算机—回转窑开展烟道喷碱脱除 HCl 的探索试验。由前述可知，HCl 主要产生于链算机的抽风干燥段，因此在该段风箱各支管的烟道喷洒 NaOH 溶液，可集中脱除烟气中的 HCl。主烟道的余热可使反应后的碱液在烟道内蒸发，蒸发产生的颗粒物可被主烟道的电除尘器捕集，最终达到减少或消除 HCl 进入活性焦烟气净化系统的目的。为保证碱液与烟气的充分接触，将碱液喷头安装在支管烟道与风箱的连接处，如图 5 所示。

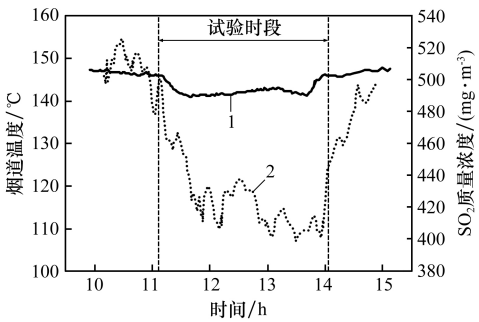
在 NaOH 溶液用量为 8 t/h、质量分数为 3.5% 以及试验时间为 3 h 的条件下，进行工业应用试验得到主烟道温度及 SO_2 浓度变化情况如图 6 所示。由图 6 可知：喷碱后，主烟道温度由约 150 ℃迅速降低至 140 ℃左右，降幅较小；SO_2 质量浓度由 500 mg/m^3 降低至 420 mg/m^3，降幅约为 16%；HCl 质量浓度由 162 mg/m^3 降低至 83 mg/m^3，降幅约为 48.7%。试验前、后电除尘灰中氯质量分数由 0.037% 升高至 0.400%，水洗滤液的 pH 值由 3.4 上升至 7.5，说明经烟道蒸发后，反应产物 NaCl 和残余碱液 NaOH 的结晶颗粒可能被电除尘器捕集。试验过程中，烟气中 HCl 和 SO_2 都会与 NaOH 发生反应，但 HCl 与 NaOH 反应的优先级大于 SO_2。资料表明，n(Na)/n(Cl)(物质的量之比)为 5 左右时，在有 SO_2 干扰的情况下，HCl 的脱除率仍可在 70% 以上。本文试验的 n(Na)/n(Cl)为 2.6，对应 HCl 的脱除率仅为 48.7%。若将n(Na)/n(Cl)提高至 5，则 NaOH 的消耗量要增加 90%，每吨球团矿需消耗工业片碱 2 kg。综合分析试验结果，在链算机烟道内喷碱脱除 HCl 的效率较低，只能延缓 HCl 对活性焦烟气净化系统的影响，且需要消耗大量工业片碱，增加运行成本的同时还可能导致烟道碱腐蚀。



(a) 碱液喷头的安装位置；(b) 现场调试

图 5 抽风干燥段支管烟道碱液喷头的安装和调试

Fig. 5 Installation and debugging of lye nozzle in branch pipe flue of down draught drying segment



1—烟道温度；2—SO_2 质量浓度。

图 6 试验期间主烟道的温度及 SO_2 质量浓度变化情况

Fig. 6 Changes of temperature and SO_2 concentration in the main flue during the test

3.2 提高原料碱度

生产碱性球团矿替代烧结矿作为高炉原料，

已成为钢铁企业应对环保要求和实施低碳生产的重要措施[18-19]。由 HCl 生成的微观示意(图 2)可知，含水料层吸收烟气中的 SO_2，使料层内电离出 H^+ 是生成 HCl 的关键。若生产碱性球团的熔剂可在含水料层中电离出 OH^-，持续中和料层内的 H^+，即可抑制 HCl 的生成，使原料中氯元素保持以氯盐的形式存在。碱性球团中常用的钙质添加剂主要有生石灰(CaO)、消石灰[$Ca(OH)_2$]、石灰石($CaCO_3$)和白云石[$CaMg(CO_3)_2$][20]。石灰石和白云石为不溶于水的碳酸盐，属于弱碱性物质。以生石灰作为钙质添加剂，其在造球过程会与水反应生成 $Ca(OH)_2$，影响生球质量。消石灰属于强碱，在工业上常用于中和酸性物质。通过比较，本文选用消石灰[$Ca(OH)_2$]作为钙质添加剂生产碱性球团，验证其抑制 HCl 生成的效果。

在链算机—回转窑生产线开展投笼试验，如图 7 所示。将配入不同比例消石灰(分析纯)的生球装入耐高温金属笼，将金属笼在链算机入口埋入生球料层，使其随链算机运转，在抽风干燥段后的预热 I 段取出。试验分别检测金属笼内球团的硫、氯变化情况，结果如图 8 所示。由图 8 可见，生球原料中氯质量分数为 0.077 6%，硫质量分数为 0.031%。当不配加消石灰时，预热 I 段取出的球团中硫质量分数上升至0.085%，氯质量分

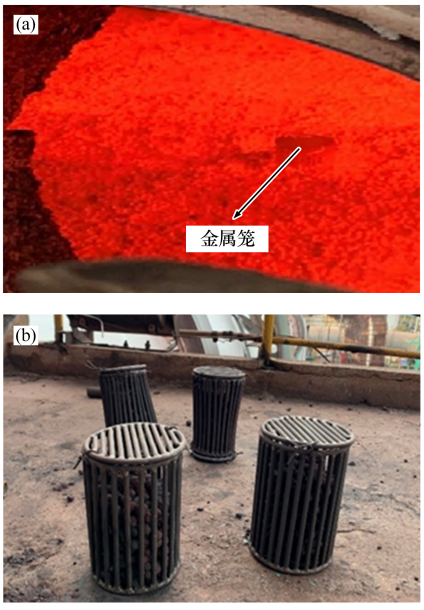
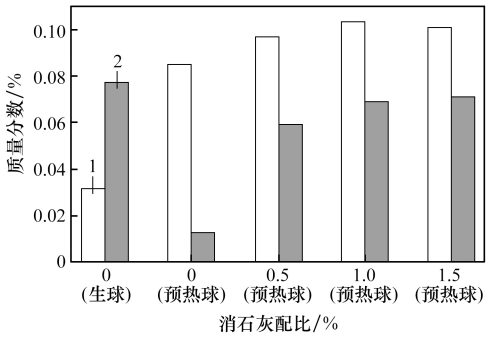


图 7　投笼试验使用的金属笼

Fig. 7　Metal cage used in cage throwing test



质量分数/%：1—硫；2—氯。

图 8　试验样品的硫、氯元素分析结果

Fig. 8　Analysis results of sulfur and chlorine

数降低至 0.012 4%，氯质量分数降幅为 84.02%，证明在抽风干燥段，球团内发生化学反应(1)使硫含量增加，氯含量降低。当配加 0.5% 消石灰时，预热 I 段取出的球团中硫质量分数升高至 0.097%，氯质量分数降低至 0.059 5%，氯质量分数降幅为 23.32%。随着消石灰的继续增加，球团中硫含量基本维持在较高水平，氯含量缓慢增加。当消石灰配比为 1.5% 时，预热 I 段取出的球团中氯质量分数仍有 0.071 2%，降幅仅为 8.25%，说明球团内氯元素转变为 HCl 的反应基本被抑制。

国内诸多钢铁企业如首钢、太钢及宝钢湛江等基于链算机—回转窑工艺已实现钙质碱性球团的工业化生产[21]。由于碱性球团的二元碱度一般要求大于 0.6，实际应用中钙质添加剂的用量要显著高于本文试验使用的配比(1.5%)[22]。通过采用消石灰生产碱性球团的技术路线，基本可以抑制链算机—回转窑烟气中 HCl 的生成，解决 HCl 影响烟气活性焦烟气净化系统顺行的问题，同时顺应钢铁企业使用碱性球团的发展趋势。

3.3　采用前置脱硝系统

SNCR(selective non-catalytic reduction，选择性非催化还原)与嵌入式 SCR(selective catalytic reduction，选择性催化还原法)耦合脱硝是典型的球团烟气前置脱硝技术[23]，该技术可在链算机预热 II 段烟罩内设置喷氨装置，利用烟罩内 850 ~ 1 100 ℃的高温条件实施 SNCR 脱硝，再利用预热 II 段风箱烟气经多管除尘器后温度为 320 ~ 400 ℃的条件实施 SCR 脱硝。工艺流程如图 9 所示。该技术方案利用预热 II 段烟气 NO_x 浓度高、温度高的特点实施脱硝，可大大节省脱硝成本。

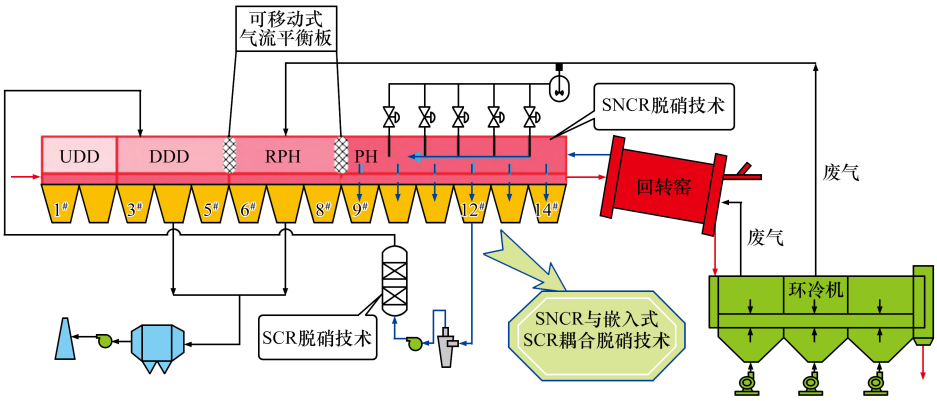


图 9 球团 SNCR 与嵌入式 SCR 耦合脱硝示意

Fig. 9 Schematic diagram of SNCR and embedded SCR coupling denitrification process

通过分析可知，建设该前置脱硝系统同样可作为已建球团活性焦烟气净化系统应对 HCl 问题的解决方案。HCl 在脱硝单元与 NH_3 反应生成大量 NH_4Cl 结晶是造成系统运行不畅的主要原因。因此，可在烟气末端将已建活性焦烟气净化系统仅用于脱硫，而在链算机建设前置脱硝系统用于脱硝。在抽风干燥段之前，喷加的 NH_3 大部分参与脱硝反应被消耗，少部分逃逸至抽风干燥段，即使生成的少量铵盐也会被电除尘器捕集。抽风干燥段产生的绝大部分 HCl 会进入活性焦烟气净化系统并被活性焦吸附，并在后续的解析制硫酸过程被洗涤，最终进入制酸废水。

根据链算机—回转窑工艺生成 HCl 的特点，对于球团生产线，规划配置前置脱硝系统和单一活性焦脱硫系统的组合可以避免烟气中 HCl 的负面影响，较好实现球团烟气超低排放。

4 结 论

（1）在链算机—回转窑工艺中，球团原料中的氯元素大部分在链算机抽风干燥段反应生成 HCl 进入烟气系统，HCl 在喷氨区与 NH_3 反应形成大量 NH_4Cl 晶体是导致活性焦烟气净化系统运行不畅的主要原因。其中，95.85% 的氯元素来自各类铁精粉原料，减少高氯原料的使用可以从源头减少氯元素的输入，从而减少 HCl 生成。

（2）在抽风干燥段风箱支管烟道喷 NaOH 碱液可脱除烟气中的 HCl，反应产物经烟道蒸发后可被电除尘器捕集，氯元素可在烟气净化系统中被分离。$n(Na)/n(Cl)$ 为 2.6 时，烟气中 HCl 的脱除率仅为 48.7%。该措施 HCl 的脱除率较低，不能满足生产需要，在增加生产成本的同时还可能导致烟道被碱腐蚀。

（3）在原料中添加消石灰可以抑制球团烟气中 HCl 的生成，使氯元素仍以氯盐的形式存在于球团中。当消石灰配比为 1.5% 时，原料中氯元素仅有 8.2% 转化为 HCl，烟气中 HCl 的生成反应被抑制。随着需求的增加，采用以消石灰作为钙质添加剂生产碱性球团的链算机—回转窑工艺，可解决烟气中 HCl 影响活性焦烟气净化系统顺行的问题。

（4）在链算机—回转窑实施 SNCR 与嵌入式 SCR 耦合前置脱硝可在 HCl 生成之前将烟气中 NO_x 脱除，基本隔绝烟气中 HCl 与脱硝反应物 NH_3 的接触，可解决已建活性焦烟气净化系统生成 NH_4Cl 晶体的问题。对于新建链算机—回转窑生产线，规划配置前置脱硝系统和活性焦脱硫系统的组合可以避免烟气中 HCl 的负面影响，实现球团烟气超低排放。

参考文献：

[1] 李绍春，程福超，王兴锋，等．Fe_2O_3 对高硅碱性球团固结性能的影响[J]．烧结球团，2024，49(1)：80－86.
LI Shaochun，CHENG Fuchao，WANG Xingfeng，et al. Influence of Fe_2O_3 on consolidation properties of high silica alkaline pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2024，49(1)：80－86.

[2] 王新东，金永龙．高炉使用高比例球团的战略思考与球团生产的试验研究[J]．钢铁，2021，56(5)：7－16.
WANG Xindong，JIN Yonglong. Strategy analysis and

testing study of high ratio of pellet utilized in blast furnace[J]. Iron & Steel,2021,56(5):7 – 16.

[3] 范晓慧,甘敏,袁礼顺,等. 氧化球团链算机—回转窑结圈机理的研究[J]. 钢铁,2008,43(3):15 – 20.
FAN Xiaohui, GAN Min, YUAN Lishun, et al. Study of mechanism on ring formation in grate-kiln of acid pellet [J]. Iron & Steel,2008,43(3):15 – 20.

[4] 胡兵,叶恒棣,王兆才,等. 链算机—回转窑球团 NO_x 排放规律及控制方法[J]. 中国冶金,2018,28(4):66 – 70.
HU Bing, YE Hengdi, WANG Zhaocai, et al. NO_x emission behavior and control methed of grate-kiln pelletizing process[J]. China Metallurgy,2018,28(4):66 – 70.

[5] 侯建勇,杜向前,卢忠诚,等. CFB + SCR 脱硫脱硝系统工艺设备运行失稳原因分析[J]. 烧结球团,2022,47(3):89 – 97.
HOU Jianyong, DU Xiangqian, LU Zhongcheng, et al. Analysis of causes of process equipment instability of CFB + SCR desulfurization and denitrification system [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):89 – 97.

[6] 张乾熙,刘高珍,贾明生,等. 球团脱硫灰中 $CaSO_3$ 的氧化试验及应用分析[J]. 烧结球团,2022,47(4):92 – 98.
ZHANG Qianxi, LIU Gaozhen, JIA Mingsheng, et al. Oxidation test and application analysis of $CaSO_3$ in pellet desulfurization ash[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(4):92 – 98.

[7] 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 dry activated coke(carbon) sintering flue gas purification technology in iron and steel industry:Process and technical and economical analysis[J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(1):65 – 69.

[8] 杨柳,王飞,毛瑞. 球团工艺活性焦脱硫脱硝系统运行问题分析[J]. 冶金动力,2020,39(8):83 – 86;89.
YANG Liu,WANG Fei,MAO Rui. Analysis on operation problems of activated coke desulfurization and denitrification system in pellet process[J]. Metallurgical Power,2020,39(8):83 – 86;89.

[9] 王飞,毛瑞,许源,等. 球团链算机回转窑工艺中氯和硫元素迁移规律[J]. 钢铁研究学报,2022,34(4):326 – 333.
WANG Fei,MAO Rui,XU Yuan,et al. Migration rule of chlorine and sulfur in grate-kiln process of pellet production[J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(4):326 – 333.

[10] 李晓东,杨忠灿,严建华,等. 垃圾焚烧炉氯源对氯化氢和二噁英排放的影响[J]. 工程热物理学报,2003,24(6):1047 – 1050.
LI Xiaodong, YANG Zhongcan, YAN Jianhua, et al. Effects of chlorine on HCl and PCDD/Fs emission in a msw incinerator[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2003,24(6):1047 – 1050.

[11] MATSUDA H,OZAWA S,NARUSE K,et al. Kinetics of HCl emission from inorganic chlorides in simulated municipal wastes incineration conditions[J]. Chemical Engineering Science,2005,60(2):545 – 552.

[12] 衣静,刘阳生. 垃圾焚烧烟气中氯化氢产生机理及其脱除技术研究进展[J]. 环境工程,2012,30(5):50 – 54;113.
YI Jing, LIU Yangsheng. Research advances in mechanisms of hydrogen chloride generation during municipal solid waste incineration and its removing technologies[J]. Environmental Engineering,2012,30(5):50 – 54,113.

[13] 高鹏,伍海霞,李凯,等. 冶炼烟气中氟化氢和氯化氢气体脱除的研究现状与展望[J]. 有色金属(冶炼部分),2023(1):18 – 24.
GAO Peng,WU Haixia,LI Kai,et al. Research status and prospects for the removal of hydrogen fluoride and hydrogen chloride gas from smelting flue gas[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2023(1):18 – 24.

[14] 熊绍武. NaOH 半干法脱酸在垃圾焚烧烟气净化中的应用[J]. 节能与环保,2020(10):106 – 107.
XIONG Shaowu. Application of NaOH semi-dry deacidification in the purification of waste incineration flue gas [J]. Energy Conservation & Environmental Protection,2020(10):106 – 107.

[15] 马如双,丁得龙,葛春亮,等. $NaHCO_3$ 干法同步脱除垃圾烟气 HCl 和 SO_2 实验研究[J]. 动力工程学报,2024,44(1):109 – 117;127.
MA Rushuang, DING Delong, GE Chunliang, et al. Experimental study on simultaneous removal of HCl and SO_2 from waste incineration flue gas by dry process with

$NaHCO_3$[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(1):109 – 117,127.

[16] 杨建国,黄洲,耿梓文,等. 不同碱基物质对燃煤烟气脱氯的影响[J]. 燃料化学学报,2018,46(8):934 – 939.
YANG Jianguo, HUANG Zhou, GENG Ziwen, et al. Effects of different alkali-based materials on coal-fired flue gas dechlorination[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2018,46(8):934 – 939.

[17] 杨建国,耿梓文,袁伟中,等. 燃煤烟气脱氯实现脱硫废水零排放技术及其影响[J]. 中国电机工程学报,2018,38(9):2657 – 2664;2834.
YANG Jianguo, GENG Ziwen, YUAN Weizhong, et al. The technology of coal-fired flue gas dechlorination for realizing zero-discharge of desulfurization wastewater and its influences on boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(9):2657 – 2664;2834.

[18] 蔡大为,范晓慧. 钢铁工业低碳炉料及绿色冶炼技术进展[J]. 烧结球团,2023,48(4):1 – 7.
CAI Dawei, FAN Xiaohui. Progress of low-carbon charge and green smelting technology in iron and steel industry [J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(4):1 – 7.

[19] 青格勒,黄文斌,安钢,等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):119 – 126.
QING Gele, HUANG Wenbin, AN Gang, et al. Research on preparation technology of low-silica alkaline pellets [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):119 – 126.

[20] 路明,陈小燕,王兴锋,等. 钙质添加剂对碱性球团性能的影响[J]. 冶金能源,2022,41(2):19 – 23.
LU Ming, CHEN Xiaoyan, WANG Xingfeng, et al. Effect of calcium additives on the performance of calcium fluxed iron ore pellets[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2022,41(2):19 – 23.

[21] 乔红梅,张建良,王耀祖,等. 国内外钙质碱性球团生产实践及发展趋势[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1031 – 1039.
QIAO Hongmei, ZHANG Jianliang, WANG Yaozu, et al. Production practice and development trend of calcareous alkaline pellets around the world[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(10):1031 – 1039.

[22] 徐子轩,姜鑫,何佳,等. 钙质熔剂对熔剂性球团矿强度的影响[J]. 中国冶金,2023,33(9):11 – 18.
XU Zixuan, JIANG Xin, HE Jia, et al. Effects of calcium flux on fluxed pellets strength [J]. China Metallurgy, 2023,33(9):11 – 18.

[23] 刘臣,胡兵,胡佩伟,等. 球团烟气 SNCR 与嵌入式 SCR 耦合脱硝新技术[J]. 钢铁,2022,57(3):133 – 141.
LIU Chen, HU Bing, HU Peiwei, et al. Innovative coupled denitrification technology of SNCR and embedded SCR for pelletizing flue gas[J]. Iron & Steel, 2022, 57(3): 133 – 141.

(上接第 162 页)

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.

[18] 朱廷钰,刘青,李玉然,等. 钢铁烧结烟气多污染物的排放特征及控制技术[J]. 科技导报,2014,32(33):51 – 56.
ZHU Tingyu, LIU Qing, LI Yuran, et al. Emission characteristics of multiple pollutants from iron-steel sintering flue gas and review of control technologies[J]. Science & Technology Review,2014,32(33):51 – 56.

[19] 邹凌云,孙普. 烧结烟气脱硫脱硝处理技术的比较分析[J]. 山西冶金,2016,39(4):57 – 59;108.
ZOU Lingyun, SUN Pu. Comparison on desulfurization and denitrification technology treatment for sintering flue gas[J]. Shanxi Metallurgy,2016,39(4):57 – 59;108.

[20] 余波,王浩,杨春根,等. 烧结烟气采用湿法脱硫烟气再热问题研究[J]. 烧结球团,2017,42(3):70 – 74.
YU Bo, WANG Hao, YANG Chungen, et al. Research on gas reheating technology of sinter flue gas processed by wet desulfurization[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(3):70 – 74.

[21] WANG P, WANG H, CHEN X, et al. Novel SCR catalyst with superior alkaline resistance performance: Enhanced self-protection originated from modifying protonated titanate nanotubes[J]. Journal of Materials Chemistry. A, Materials for Energy and Sustainability, 2015, 3(2): 680 – 690.