嵌入式 SCR 球团烟气 NO_x 排放升高原因及解决措施

李建军[1,2]，熊 劲[3]，邵 雁[3]，汪 远[3]，潘春锋[3]，向 浩[3]，刘子豪[3]
（1. 钢铁研究总院 连铸技术国家工程研究中心，北京 100081；2. 中国冶金科工股份有限公司，北京 100028；
3. 中冶南方都市环保工程技术股份有限公司，湖北 武汉 430200）

摘要：在钢铁行业推进超低排放的背景下，嵌入式 SCR 与 SNCR 耦合脱硝技术因脱硝效率高、性价比高等优势在球团烟气治理中得到推广应用。本文针对某工程项目安装嵌入式 SCR 脱硝装置达标排放后，NO_x 质量浓度经预热段再度升高的情况，系统分析 NO_x 质量浓度升高的原因，并提出对应解决措施。结果表明：SCR 脱硝后 NO_x 质量浓度升高的原因并非由烟气侧漏或者混风所致，而是球团组分中的巴西粗粉以及掺入其中的硝酸清洗液在干燥预热过程中的热分解过程产生了 NO_x，两者的释放量占比分别为 28.7% 和 58.9%。通过物料的程序升温测试发现，在 460 ℃与 650 ℃附近存在两处属于不同 NO_x 来源的释放峰值，这与干燥Ⅱ段 370 ℃及预热Ⅰ段 650 ℃的两股烟气的温度接近，造成 NO_x 在该两处窗口温度附近快速释放。而嵌入式 SCR 脱硝技术是基于对各温度区间的余热进行充分利用而发展的高效脱硝工艺，故难以通过调整链箅机各段的温度区间来降低 NO_x 释放量。基于此，本文提出通过替换过滤机硝酸清洗液的优化措施，使得 NO_x 释放量显著降低，保障球团烟气达到超低排放标准。

关键词：球团；烟气；氮氧化物；嵌入式 SCR；脱硝
中图分类号：TF046.4；X701.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0171－06
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.104

Causes and solutions to the increase of NO_x emissions from embedded SCR pellets gas

LI Jianjun[1,2], XIONG Jin[3], SHAO Yan[3], WANG Yuan[3], PAN Chunfeng[3],
XIANG Hao[3], LIU Zihao[3]
(1. National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. Metallurgical Corporation of China Co., Ltd., Beijing 100028, China; 3. WISDRI City Environment Protection Engineering Co., Ltd., Wuhan 430200, Hubei, China)

Abstract: In the context of the promotion of ultra-low emissions in the iron and steel industry, the technology of embedded SCR and SNCR coupled denitrification has been popularized and applied in pellets gas treatment due to its high denitrification efficiency and high cost performance. The reasons for the increase of NO_x mass concentration are systematically analyzed and corresponding solutions are proposed in view of the situation that the NO_x mass concentration increases again through the preheating section after the embedded SCR denitrification device is installed in a certain engineering project. The results show that the increase of NO_x mass concentration after SCR denitrification is not caused by gas leakage or air mixing, but by the thermal decomposition process of Brazilian coarse powder in the pellets component and the nitric acid cleaning solution mixed in it during the drying and preheating process, which accounts for 28.7% and 58.9%, respectively. Through the temperature-programmed test of the material, it is found that there are two peak NO_x emission peaks belonging to different sources near 460 ℃ and 650 ℃, which are close to the temperature of the two gases

收稿日期：2024－01－22；**修回日期**：2024－03－11
作者简介：李建军(1983—)，男，博士研究生，高级工程师，从事钢铁冶金工艺及节能环保方面的研究工作。

at 370 ℃ in the drying II section and 650 ℃ in the preheating I section, resulting in the rapid release of NO_x near the temperature of the two windows. However, the embedded SCR denitrification technology is an efficient denitrification process developed based on making full use of the waste heat in each temperature range, so it is difficult to reduce the NO_x emission by adjusting the temperature range of each section of the grate. Based on this, the optimization measures of replacing the nitric acid cleaning solution of the filter are proposed, so that the NO_x emission can be significantly reduced, and the pellets gas can meet the ultra-low emission standard.

Key words: pellets; gas; nitrogen oxides; embedded SCR; denitrification

球团作为重要的造块工艺，能够为高炉提供优质的冶炼炉料。相较于烧结工艺，球团生产过程的能源消耗量较低，且球团产品的冶金性能较好，可以起到降低高炉焦比，提升冶炼经济性等作用[1-2]。在国家“双碳”战略目标背景下，球团工艺具有较好的发展前景。由于链算机—回转窑—环冷机球团生产工艺具备球团矿产量大、原料适用性强等特点，近年来我国相继投产了多条年产百万吨以上的生产线，其球团产量占我国球团总产量的60%以上[3]。该工艺烟囱出口处烟气的 NO_x 质量浓度为 100～300 mg/Nm^3，难以满足日益严格的超低排放要求[4-5]。2019 年，生态环境部、国家发展改革委、工业和信息化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》(环大气[2019]35 号)，指出到 2025 年底前，全国力争 80% 以上的钢铁产能完成改造，明确球团烟气 NO_x 小时均值排放质量浓度不高于 50 mg/m^3(基准 O_2 体积分数为 18%)。因此，链算机—回转窑—环冷机球团生产过程中面临较大的烟气超低排放压力[6]。

烟气脱硝技术主要有选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)，其反应原理均为通过氨基物质与 NO_x 反应生成 N_2 和 H_2O。对于典型的 SCR 工艺而言，在催化剂作用下，其反应窗口温度为 300～400 ℃，NO_x 的还原效率超过 90%[7]；而 SNCR 工艺无需催化剂条件，反应窗口温度为 800～1 100 ℃，因工况条件的差异，其脱硝效率为 50%～90%[8]。SNCR-SCR 耦合脱硝技术是根据烟气温度分布特点，在 SNCR 入口注入还原剂，使部分 NO_x 被还原、剩余的 NH_3 在下游 SCR 区域进一步还原 NO_x，该方法有利于实现更高的 NO_x 转化率[9]。为了实现高效低耗地脱除球团烟气中的 NO_x，研究人员基于球团烟气迁移过程中温度与 NO_x 浓度的分布规律，提出通过 SCR 与 SNCR 双重脱硝机制的有效协同，形成嵌入式 SCR 与 SNCR 耦合脱硝技术。该技术在链算机预热Ⅱ段完成低流量烟气中高浓度 NO_x 的清洁治理，使 NO_x 达到超低排放标准[10-12]。刘臣等[13]针对链算机—回转窑球团生产工艺 NO_x 排放浓度高的问题，选择 SNCR 与嵌入式 SCR 耦合脱硝工艺进行 NO_x 脱除，在烟罩内 850～1 000 ℃区间使用喷氨工艺，使 SNCR 单元脱硝率达 40%～60%，整体工艺 NO_x 的排放值满足≤50 mg/Nm^3 的超低排放标准。但在某链算机—回转窑球团生产线配套的烟气处理项目中，嵌入式 SCR 与 SNCR 耦合脱硝工艺出现 NO_x 排放超标的情况。

为此，本文通过深入研究某项目嵌入式 SCR 脱硝工艺，实测现场烟气中 NO_x 排放数据，并对球团原料进行 NO_x 释放量的定量检测，分析烟气 NO_x 排放值上升的原因，提出相应的 NO_x 减排措施，以期为同行提供借鉴与参考。

1 嵌入式 SCR 脱硝工艺流程

某项目球团烟气嵌入式 SCR 脱硝工艺流程如图 1 所示。由图 1 可见，生球沿链算机依次经过干燥Ⅰ段、干燥Ⅱ段、预热Ⅰ段和预热Ⅱ段，被逐级干燥并预热到 400～1 000 ℃，随后被送入回转窑；预热球在 1 250 ℃条件下焙烧后经一冷、二冷、三冷和四冷工序后形成成品球。

实际生产中，为有效利用球团和焙烧烟气的高温余热，需设置每股气体的流动路线：① 从一冷风机过来的空气先经过链算机的最高温段，被预热至 1 100 ℃后送入回转窑作为助燃空气，以焙烧烟气的形式出回转窑；随后，烟气进入预热Ⅱ段将球团预热到 400～1 000 ℃，温度降低至 350～400 ℃后穿过干燥Ⅱ段，再降低温度至150 ℃左

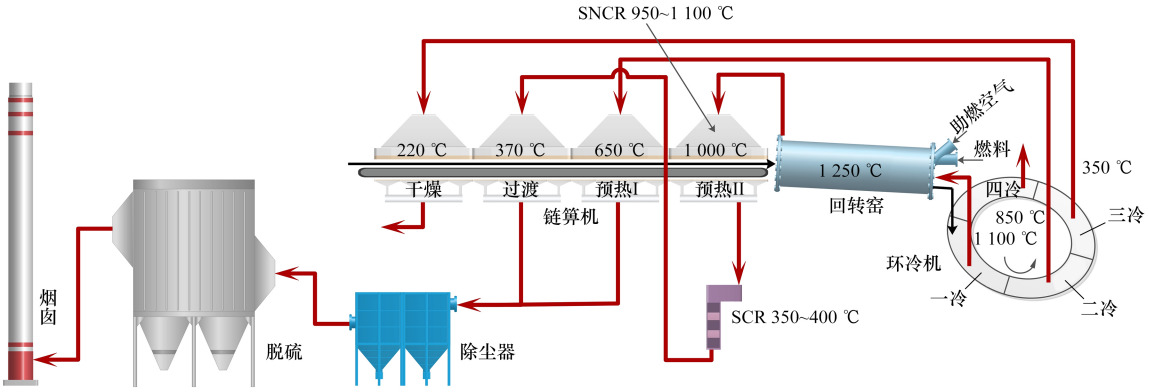


图 1　球团烟气脱硫脱硝工艺流程

Fig. 1　Process flow diagram of pellet flue gas desulfurization and denitration

右。② 从二冷风机过来的空气先经过链算机的次高温段，被预热至 850 ℃后被送至预热Ⅰ段(穿过预热Ⅰ段后温度降低至 250 ℃左右)，随后与上一股焙烧烟气混合。混合气在依次经过除尘和脱硫设备后通过烟囱进入大气。③ 从三冷风机过来的空气先经过球团的次低温段，被预热至 350 ℃后被送至干燥Ⅰ段(穿过干燥Ⅰ段后这股空气的温度降低至 100 ℃左右)，随后直接进入大气。④ 从四冷风机过来的空气在经过球团的最低温段后直接进入大气。

通常，该工艺中 NO_x 仅在回转窑内具备生成条件。NO_x 集中在焙烧烟气中，而预热Ⅱ段前后的烟气温度分别与 SNCR 和 SCR 脱硝的适宜工作温度区间相吻合[14]。在耦合工艺中，嵌入式 SCR 脱硝工艺通过先在回转窑出口管路的适宜位置喷氨(烟气温度约为 1 000 ℃)，通过 SNCR 反应预脱除部分 NO_x；在预热Ⅱ段对焙烧烟气进行降温处理，并在出口 350 ~ 400 ℃处设置 SCR 脱硝装置，利用 SNCR 反应剩余的 NH_3 对烟气进行二次脱硝。相较于在混合气管路上设置 SCR 脱硝装置，新的耦合脱硝工艺不仅处理的烟气量小，无需升温，并对 SNCR 工艺段未反应的 NH_3 进行了二次利用，降低了氨逃逸量，也极大降低了脱硝装置的建造和运营成本。然而，该耦合脱硝工艺在实际应用过程中出现了在 SCR 脱硝出口 NO_x 达标排放，而最终排放烟气中 NO_x 质量浓度又超过 50 mg/Nm^3 的情况，给现场运营带来了极大的环保压力。

2　研究方法与现场测试

2.1　研究方法

(1) 现场取样。为了明晰现场 SCR 脱硝装置后 NO_x 浓度超标的原因，使用便携式烟气分析仪(Testo 350)对链算机的干燥Ⅰ段、干燥Ⅱ段、预热Ⅰ段、预热Ⅱ段部位的 NO_x 浓度进行跟踪监测，并记录所测烟气的流量、温度及相应 NO_x 浓度的变化情况。

(2) 试验模拟。搭建如图 2 所示的试验装置对不同温度、原料来源等情况下球团预热过程中 NO_x 的释放情况进行研究。由图 2 可见，将 20 g 球团装入管式炉中，控制管式炉温度为 550、700 ℃或通过程序升温方式对球团进行热处理，控制烟气流量为 3 L/min，测试时设置回水的注射速率为 0.5 mL/min，采用烟气分析仪测定烟气中 NO_x 浓度。



图 2　试验装置示意

Fig. 2　Schematic diagram of the test device

2.2　现场测试

项目现场链算机—回转窑参数：干燥Ⅰ段长度为 7.5 m，烟罩温度为 180 ~ 200 ℃，风箱温度为 80 ~ 100 ℃，风量为 14 万 m^3/h(工况)；干燥Ⅱ段长度为 10 m，烟罩温度为 350 ~ 400 ℃，风箱

温度为100～200 ℃，风量为40万 m^3/h（工况）；预热Ⅰ段长度为10 m，烟罩温度为650～700 ℃，风箱温度为200～300 ℃，风量为11万 m^3/h（工况）；预热Ⅱ段长度17.5 m，烟罩温度为1 050～1 100 ℃，风箱温度为350～400 ℃，风量为47万 m^3/h（工况）。该生产线的球团矿产量为4 000 t/d，每吨矿配入3.0%的内部回用水。

为探明应用嵌入式SCR脱硝工艺后烟气 NO_x 超标的原因，对SCR工艺前后段的烟气流量、温度以及 NO_x 质量浓度等进行跟踪监测，其结果如图3所示。由图3可见：在预热Ⅱ段出口，SCR入口处测试数据（NO_x 质量浓度）为951～1 200 mg/m^3，SCR出口测试数据为21～31 mg/m^3；在链算机的机头往机尾方向，预热Ⅰ段的第一个风箱，测试数据为61～81 mg/m^3，预热Ⅰ段顶部烟罩内测试数据为0；干燥Ⅱ段烟罩内测试数据为42～47 mg/m^3，风箱测试数据为60～100 mg/m^3。上述数据表明，预热Ⅰ段靠近预热Ⅱ段侧的测试数据明显低于干燥段Ⅱ，因此，在预热Ⅱ段导致 NO_x 质量浓度上升的烟气侧漏或串风等因素可以排除。烟气从干燥Ⅱ段和预热Ⅰ段穿过料层后，NO_x 质量浓度增大，导致除尘器前混合气中 NO_x 测试值达到60～100 mg/m^3。综上所述，排除侧漏或串风等外部因素，则增加的 NO_x 主要来自球团及其原料组分自身受热所释放的 NO_x，故需对球团矿及其原料受热后 NO_x 的释放规律进行研究，以识别 NO_x 的增量来源。

3 球团 NO_x 释放的影响因素和机制

3.1 NO_x 释放的影响因素

3.1.1 温度条件

根据现场情况，热源烟气流向与球团行进方向呈错流方式，球团温度的分布规律：沿球团行进方向，球团温度逐渐升高；沿烟气流动方向，球团温度逐渐降低。预热Ⅰ段的热源烟气温度为650～700 ℃，则预热Ⅰ段上层球团温度近700 ℃，下层球团的最高温度为550 ℃（通过实测风箱温度获得）。

通过程序控温炉测定在700 ℃和550 ℃下球团 NO_x 的释放情况，其释放曲线如图4所示，不同时间段内 NO_x 的释放量如表1所示。由图4、表1可以看出，在5 min内，相较于700 ℃反应温度，550 ℃下 NO_x 释放更平缓且释放量偏低，但总释放量（15 min内）的差异并不十分显著，相差仅13.63%；此外，700 ℃下 NO_x 释放更快、更集中，使得10 min和5 min内 NO_x 的释放量差值提升到28.57%和48.71%。在干燥Ⅱ段和预热Ⅰ段球团的停留时间均为5 min，结合球团的温度分布，推算出在预热Ⅱ段之前球团的 NO_x 释放量为47～70 mg/kg。根据球团产量及烟气量，计算得到因球团受热释放 NO_x 导致烟气 NO_x 的提升量为33～49 mg/Nm^3。

3.1.2 原料条件

根据现场调研，球团的主要原料为巴西粗粉（占比约为50%，干基，来料粒度为0～1 mm，磨矿后 <0.075 mm 粒级占比 >85%）、智利铁精粉（占比约为30%，干基）和X铁精粉（占比约为20%，干基），三者形成混合料。在混合料中加入黏结剂，并配入3.0%的回水制备球团。其中，将巴西粗粉磨矿后进行浓密及过滤处理，将滤液返回磨矿机，使用60%硝酸周期性清洗过滤机的陶瓷滤板以恢复其过滤能力，将使用后的清洗液排入回用水池。

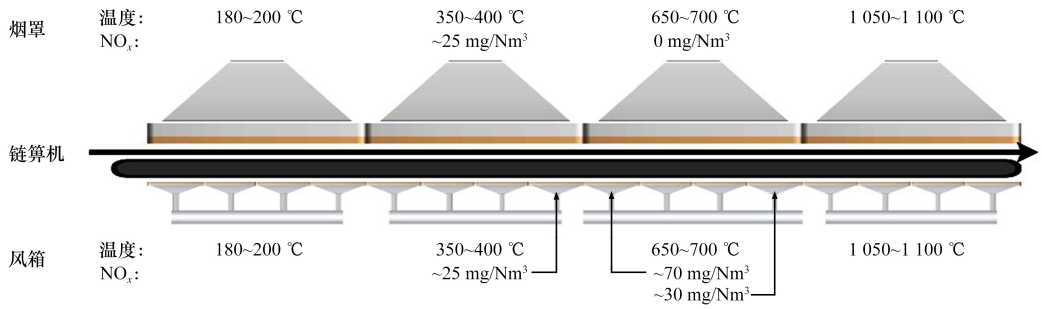
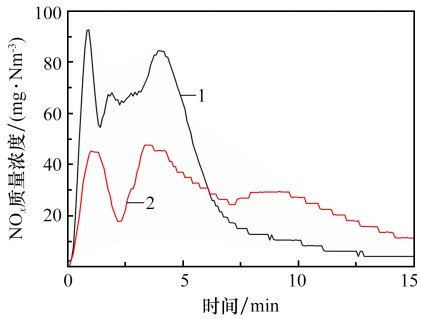


图3 链算机各段球团烟气测试结果

Fig. 3 Detection results of pellet flue gas in various stages of grate



球团温度/℃：1—700；2—500。

图 4　在不同温度下球团的 NO_x 释放曲线

Fig. 4　NO_x release curves of pellets at different temperatures

表 1　不同时间段内 NO_x 释放量

Table 1　The release of NO_x in different time periods

时间/min	700 ℃释放量/(mg·kg^{-1})	550 ℃释放量/(mg·kg^{-1})	比值(550 ℃释放量/700 ℃释放量)/%
5	49.58	25.43	51.29
10	65.81	47.01	71.43
15	70.16	60.60	86.37

试验研究 700 ℃条件下不同原料的 NO_x 释放情况，并分别采用现场回水以及蒸馏水(配比均为 3%)配入混合料制备球团，分析水分添加对球团释放 NO_x 的影响，结果如表 2 所示。由表 2 可见，巴西粗粉的 NO_x 释放量从磨前的 42.7 mg/kg 上升到磨后的 61.8 mg/kg，这是由于巴西粗粉磨矿用水中掺入了部分过滤机的硝酸清洗液；智利铁精粉 NO_x 释放量较少，约为 4 mg/kg。3 种矿粉经配料形成混合料后，NO_x 释放量为 55.9 mg/kg，这与混合料中各组分配比对 NO_x 释放量的加权值近似。此外，添加蒸馏水制备的球团与未加水混合料的 NO_x 释放量几乎无差别，而添加回水后，混合料的 NO_x 释放量最高，达到 74.1 mg/kg，相较未加水混合料增加了 18.2 mg/kg，提升幅度达到 32.56%。在混合料中配入回水后，球团的 NO_x 释放量下降至 65.0 mg/kg，可能是实心球团内部的还原环境造成了 NO_x 释放量稍有减弱。现场回水的检测结果表明，回水中 NO_3^- 质量浓度高达 1 000 mg/L(主要来自排入的稀酸洗液)，这也是采用回水配料后球团 NO_x 释放量显著增大的原因。设置智利铁精粉、X 铁精粉、巴西粗粉、硝酸清洗液以及其他因素导致的 NO_x 释放权重值分别为 1.6%、0、28.8%、57.9%、11.7%，依据各原料的配比，计算得到硝酸清洗液、巴西粗粉的 NO_x 释放占比分别达到 58.9% 和 28.7%，从而得到这两类物质是 NO_x 的主要释放源。

上述结果表明，陶瓷过滤机的硝酸清洗液会显著增加预热段 NO_x 的释放量，给嵌入式 SCR 脱硝技术 NO_x 的达标排放带来巨大隐患。

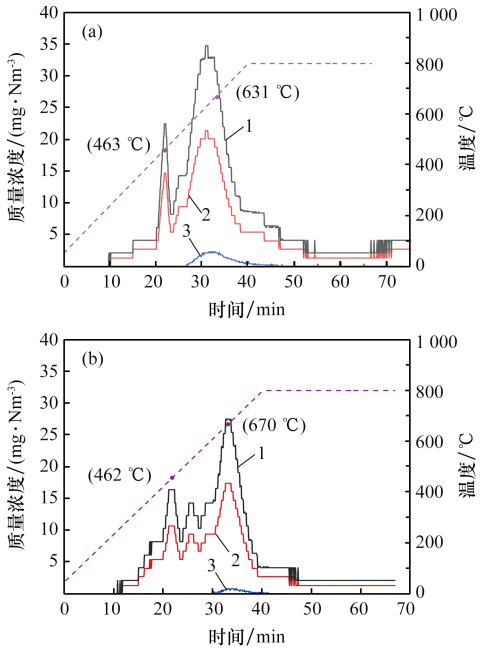
表 2　700 ℃下不同原料的 NO_x 释放量

Table 2　NO_x release of different raw materials at 700 ℃　　**mg/kg**

智利铁精粉	X 铁精粉	巴西粗粉(磨前)	巴西粗粉(磨后)	混合料(未加水)	混合料(加回水)	混合料(加蒸馏水)	球团
4.0	0	42.7	61.8	55.9	74.1	54.8	65.0

3.2　NO_x 释放机制

通过程序升温控制升温速率为 20 ℃/min 将物料温度从 50 ℃升高至 800 ℃，得到加回水制备的球团和未加水混合料的 NO_x 释放曲线如图 5 所示。由图5可以看出：NO_x 有两个很明显的释放峰，



(a) 球团；(b) 未加水混合料

1—NO；2—NO_2；3—NO_x。

图 5　球团和未加水混合料在程序升温过程中的 NO_x 释放曲线

Fig. 5　NO_x release curve of pellet and unhydrated mixture during programmed heating process

分别位于460 ℃和650 ℃左右，说明存在两个不同的NO_x来源物种，可能是两种不同物种的硝酸盐分解；从初始出峰位置判断，当温度达到200 ℃时即有NO_x释放；从峰结束的位置判断，在700 ℃时绝大部分NO_x已释放完毕。

由前述嵌入式SCR脱硝工艺可知，经过干燥Ⅱ段与预热Ⅰ段的两股烟气经除尘、脱硫后经烟囱排出，而该两段的干燥温度分别为370、650 ℃，这与球团物料中NO_x释放的两个峰值温度高度重合，表明球团中的NO_x在这两个适宜温度区间快速释放。而嵌入式SCR脱硝工艺是基于对各温度区间的余热进行充分利用而发展的高效脱硝工艺，故难以通过调整链算机各段的温度区间来降低NO_x的释放量。此外，过滤机硝酸清洗液、回水的掺入是造成球团预热烟气中NO_x释放的主要因素。因此，可通过更换过滤机清洗液、将回水更换为自来水等方式有效降低预热过程中NO_x的释放。现场实施这两项措施后，NO_x排放质量浓度低于50 mg/Nm^3，实现超低排放。

4 结 论

（1）排放烟气中NO_x质量浓度再次升高的原因并非由烟气侧漏或者混风所致，而是球团组分中巴西粗粉以及掺入其中的硝酸清洗液在干燥预热过程中热分解产生了NO_x，两者的释放量占比分别为28.7%和58.9%。

（2）通过物料的程序升温测试发现，在460 ℃与650 ℃附近存在两处属于不同NO_x来源的释放峰值，这与干燥Ⅱ段370 ℃及预热Ⅰ段650 ℃两股烟气的温度接近，造成NO_x在该两处窗口温度附近快速释放。

（3）嵌入式SCR与SNCR耦合工艺是基于对各温度区间的余热进行充分利用而发展的高效脱硝技术，故难以通过调整链算机各段的温度分布来降低NO_x释放量。本文通过全面分析各原料组分NO_x释放情况，提出替换过滤机硝酸清洗液的优化措施，使得NO_x释放量显著降低，保障球团烟气达到超低排放标准。

参考文献：

[1] 王介生,张勇,丛峰武,等. 鞍钢200万t氧化球团链算机—回转窑系统的设计[J]. 烧结球团,2005,30(4):9-13.
WANG Jiesheng, ZHANG Yong, CONG Fengwu, et al. The design of 2 Mt/a capacity grate-kiln oxidized pellet process for angang pelletizing plant[J]. Sintering and Pelletizing,2005,30(4):9-13.

[2] 韩桂洪,张元波,姜涛,等. 含锡锌铁精矿链算机—回转窑法制备炼铁用球团矿的研究[J]. 钢铁,2009,44(6):8-13.
HAN Guihong,ZHANG Yuanbo,JIANG Tao,et al. Study on preparation of pellets for iron-making from tin,zinc-bearing iron concentrates by grate-kiln process[J]. Iron & Steel,2009,44(6):8-13.

[3] 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 method of grate-kiln pelletizing process[J]. China Metallurgy,2018,28(4):66-70.

[4] 张洪亮,施琦,龙红明,等. 烧结烟气中氮氧化物脱除工艺分析[J]. 钢铁,2017,52(5):100-106.
ZHANG Hongliang, SHI Qi, LONG Hongming, et al. Analysis of NO_x removal process in sintering flue gas [J]. Iron & Steel,2017,52(5):100-106.

[5] 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.

[6] 叶恒棣,胡兵,魏进超. 链算机—回转窑球团NO_x超低排放技术研究[J]. 烧结球团,2020,45(1):55-62.
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):55-62.

[7] 李子尚,朱仁涵,杜振. SCR脱硝系统精准喷氨优化技术分析[J]. 发电技术,2021,42(5):630-636.
LI Zishang, ZHU Renhan, DU Zhen. Analysis on the optimization technology of precise ammonia injection in SCR denitration system[J]. Power Generation Technology,2021,42(5):630-636.

（下转第183页）

ZHOU Maojun, ZHANG Daihua. Application and analysis of ultra-low emission technology of sintering flue gas in Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(3): 58 – 63.

[10] 叶恒棣,李俊杰,倪桂虎,等. 碳基多污染物净化工艺 SO_2、HCl 的迁移及转化规律[J]. 钢铁,2024,59(5): 172 – 184.
YE Hengdi, LI Junjie, NI Guihu, et al. Migration and transformation of SO_2 and HCl in activated based multi-pollutant purification process[J]. Iron & Steel, 2024, 59(5): 172 – 184.

[11] 吴青贤,魏进超. 湛江钢铁 1#烧结烟气净化装置的设计与运行[J]. 烧结球团,2017,42(6): 1 – 4.
WU Qingxian, WEI Jinchao. The design and operation of 1# sintering flue gas purification equipment for Zhanjiang steel plant[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(6): 1 – 4.

[12] 赵利明. 活性炭烟气净化技术在宝钢股份宝山基地 3#烧结机的应用[J]. 烧结球团,2017,42(6): 5 – 10; 56.
ZHAO Liming. Application of activated carbon flue gas purification technology in 3# sintering machine of Baoshan base of Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(6): 5 – 10; 56.

[13] YUAN J, MI J X, YIN R Q, et al. Identification of intrinsic active sites for the selective catalytic reduction of nitric oxide on metal-free carbon catalysts via selective passivation[J]. ACS Catalysis, 2022, 12(2): 1024 – 1030.

[14] LI Junjie, YE Hengdi, WEI Jinchao, et al. Capture and migration of particulate matter in activated carbon sintering flue gas purification system based on ultra-low emission target[J]. Fuel, 2023, 350: 128764.

(上接第 176 页)

[8] KANG Zhizhong, YUAN Qixin, ZHAO Lizheng, et al., Study of the performance, simplification and characteristics of SNCR de-NO_x in large-scale cyclone separator[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 635 – 645.

[9] 顾卫荣,周明吉,马薇. 燃煤烟气脱硝技术的研究进展[J]. 化工进展,2012,31(9): 2084 – 2092.
GU Weirong, ZHOU Mingji, MA Wei. Research progress on denitrification technology for coal-fired flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(9): 2084 – 2092.

[10] 刘磊,李斌,张文强,等. 链箅机—回转窑烟气超低排放技术研究与应用[J]. 烧结球团,2022,47(4): 106 – 114.
LIU Lei, LI Bin, ZHANG Wenqiang, et al. Reseacrch and application of ultra-low emission technology of grate-kiln flue gas[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(4): 106 – 114.

[11] 赵欣锋,齐西伟,张遵乾,等. 烧结烟气中 NO_x 减排进展[J]. 钢铁,2022,57(11): 175 – 189.
ZHAO Xinfeng, QI Xiwei, ZHANG Zunqian, et al. Progress and exploration of NO_x emission reduction in sintering flue gas[J]. Iron and Steel, 2022, 57(11): 175 – 189.

[12] 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 process of iron and steel industry in China[J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 1 – 11.

[13] 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 and Steel, 2022, 57(3): 133 – 141.

[14] 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.