生产实践

ASP热轧加热炉超低排放节能改造实践

魏秀东，吴优，徐小科，刘良元
（鞍钢集团朝阳钢铁有限公司，辽宁 朝阳 122000）

摘要：针对鞍钢集团朝阳钢铁有限公司热轧加热炉氮氧化物排放浓度超标、无法稳定达标的问题，结合ASP热轧加热炉的生产实际，制定并应用了低氮燃烧技术。在保持原有烧嘴加热能力不变的基础上，将炉顶平焰烧嘴和下加热可调焰烧嘴改为低氮氧化物环保型燃烧烧嘴，配套实施供热能力配置、燃烧气体流量控制、气氛控制、含氧量监测等技术。应用后，氮氧化物排放浓度由182 mg/m³降至93 mg/m³，节约燃料消耗0.01 GJ/t，不仅减少了污染物排放，还降低能源消耗，达到了节能环保与绿色降碳的目的。

关键词：加热炉；低氮燃烧技术；超低排放；环保
中图分类号：TG307 **文献标志码：**A **文章编号：**1006-4613(2026)01-0063-05
DOI：10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 01. 009

Practice on Ultra-low Emission and Energy Saving Transformation of ASP Hot Rolling Reheating Furnace

WEI Xiudong, WU You, XU Xiaoke, LIU Liangyuan
(Chaoyang Iron & Steel Co., Ltd. of Ansteel Group Cor., Ltd., Chaoyang 122000, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the problem that the nitrogen oxide emission concentration of the hot rolling reheating furnace in Chaoyang Iron & Steel Co., Ltd. of Ansteel Group Cor., Ltd. exceeded the standard and failed to meet the standard stably, the low-nitrogen combustion technology was formulated and applied combined with the actual production of the ASP hot rolling reheating furnace. On the basis of maintaining the heating capacity of the original burners unchanged, the top flat-flame burners and bottom heating adjustable-flame burners were replaced with low-nitrogen oxide environmental protection burners, and supporting technologies such as heating capacity configuration, combustion gas flow control, atmosphere control, and oxygen content monitoring were implemented. After application, the nitrogen oxide emission concentration was decreased from 182 mg/m³ to 93 mg/m³, and the fuel consumption was saved by 0.01 GJ/t. It not only reduced pollutant emissions, but also lowered energy consumption, achieving the goals of energy conservation, environmental protection and green carbon reduction.

Key words: reheating furnace; low-nitrogen combustion technology; ultra-low emission; environmental protection

当前钢铁行业正处于减量、重组与绿色发展叠加的关键阶段。由于钢铁工业流程长、产污环节多，面对日益严苛的环境约束与低碳发展挑战，钢铁企业需践行绿色发展理念以提升竞争力，不仅要加大投入推动自身从资源消耗型向资源节约

魏秀东，高级工程师，1996年毕业于鞍山钢铁学院热能工程专业。E-mail：13904916359@163. com

型、环境友好型转变，还需重视并应用完善新技术与新工艺[1]。加热炉是热轧生产线的主要耗能排污设施，也是融合经济技术与管理的关键工艺环节。在行业“节能低碳，绿色发展”主题及超低排放要求趋严的背景下，我国已进入大规模控制氮氧化物排放、减少大气污染的重要阶段[2]。鞍钢集团朝阳钢铁有限公司（以下简称“朝阳钢铁”）存在热轧加热炉氮氧化物排放浓度超标、无法稳定达标的问题。因此朝阳钢铁借鉴近年加热炉低氮燃烧技术发展成果，研究应用鞍钢薄板坯连铸连轧生产线（Angang Strip Production，ASP）热轧加热炉超低排放烧嘴改造技术，旨在降低氮氧化物排放浓度，满足环保要求。本文对此做一介绍。

1 加热炉概况和燃烧污染物排放

1.1 加热炉概况

朝阳钢铁ASP热轧加热炉为常规步进式加热炉，由预热段、加热段和均热段三部分组成[3]。加热炉燃烧系统主要由加热段和均热段的烧嘴、鼓风机、空气和煤气输送以及吹扫放散等管道组成。烧嘴由平焰烧嘴、直焰烧嘴和调焰烧嘴构成。

加热炉排烟系统有烟道及烟道闸门，炉子采用下排烟方式，炉内燃烧生成的烟气由加热炉低温尾部下降烟道流进水平烟道里，然后通过空气、煤气预热器，烟道闸板后汇入总烟道，燃烧烟气采用厂外烟囱自然排烟。

加热炉的燃料为高炉和焦炉混合煤气，混合煤气热值为2 000 kcal/Nm^3。燃烧产生的主要污染物为二氧化硫、氮氧化物和颗粒物，其中氮氧化物包含一氧化氮、二氧化氮等多种氮氧化物。加热炉燃烧配置见表1。

表1 加热炉燃烧配置

Table 1 Combustion Configuration of Reheating Furnace

分段名称	烧嘴型式	各段能力配备	
		加热能力/（Nm^3/h）	加热能力占比/%
均热段上	平焰烧嘴	4 800	16
均热段下	直焰烧嘴	6 600	21
加热段上	平焰烧嘴	9 600	31
加热段下	调焰烧嘴	10 000	32

1.2 燃烧污染物排放

外排的污染物中，颗粒物为混合煤气燃烧产生，煤气中含碳、氢等可燃成分，燃料在不完全燃烧时，这些成分无法充分转化为二氧化碳和水，会生成大量碳颗粒、未燃尽的烃类等物质，因此，混合煤气在不完全燃烧时产生的颗粒物较多。研究证明，气体燃料有三种途径生成氮氧化物[4]。燃烧过程中主要有热力型、快速型和燃料型三种氮氧化物产生[5]。热力型氮氧化物是空气中氮气在高温环境下氧化生成氮氧化物，这是加热炉生成氮氧化物的主要途径[6]；快速型氮氧化物是指燃料对空气中的氮和燃料中的碳氢离子团等反应产生的氮氧化物[7]；燃料型氮氧化物是指燃料中含氮氧化物在燃烧过程中进行热分解继而进一步氧化而成的氮氧化物[8]。统计朝阳钢铁2019—2022年氮氧化物排放浓度见图1。

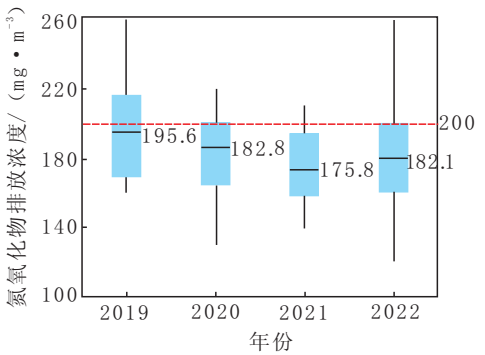


图1 朝阳钢铁2019—2022年氮氧化物排放浓度

Fig. 1 Nitrogen Oxide Emission Concentration of Chaoyang Iron & Steel Co., Ltd. from the Year of 2019 to 2022

从图1可知，氮氧化物排放浓度符合轧钢行业现行相关排放标准（≤300 mg/m^3），但是不能稳定满足超低排放标准，特别是在用纯焦炉煤气作为燃料时排放浓度波动大，控制困难。为解决这一问题，亟需探究低氮燃烧技术在现加热炉上应用的可行性，以实现加热炉的超低排放改造。

2 加热炉应用低氮燃烧技术的可行性

低氮燃烧技术的原理为低氮氧化物环保型燃烧烧嘴将燃料分两阶段供入加热炉内：第一个阶段是较少量燃料在富氧高温条件下迅速燃烧，经烧嘴口形成高速烟气流与四周吸卷的回流；而绝大部分燃料是通过第二个阶段喷入含氧量低于15%的高温烟气中，此时属于受控扩散燃烧反应。

燃烧区的主要作用就是抑制氮氧化物的生成，推迟燃烧过程，并将生成的氮氧化物分解还原，减少燃料型氮氧化物。此时，火焰温度降低，使得热力型氮氧化物生成量也减少。燃烧所需的其余空气则通过燃烧烧嘴上面的二次风喷口送入炉膛与第一阶段所产生的烟气混合，使燃料燃烧完全，成为燃尽区，从而完成整个燃烧过程。该型烧嘴能够确保混合煤气完全燃烧，减少颗粒物的产生量。通过采用两阶段燃烧技术有效规避了燃料在高温高氧环境下的集中燃烧状态，从反应源头抑制了热力型氮氧化物的大量生成[9]，最终实现氮氧化物排放浓度的显著降低。

降低加热炉氮氧化物排放的核心手段是研究采用低氮燃烧技术，即通过改变燃烧条件或燃烧方法，降低排放物中氮氧化物的浓度。该技术通过组织燃料和助燃剂在大空间燃烧，并充分利用炉内卷吸的烟气流的稀释作用，降低火焰高温区的温度，使火焰更均匀。当炉温≥900 ℃时，火焰呈透明状的无焰燃烧，大大提高燃料的加热效率，减少由于火焰局部高温对坯料造成的氧化烧损，提高坯料加热的均匀性，大幅降低氮氧化物产生量和排放量。

烧嘴是加热系统的核心设施，为保证钢坯加热质量，得到预期的加热效果，达到减排绿色环保的目的，本次改造所更换的设备中，下加热调焰烧嘴与加热段、均热段的炉顶平焰烧嘴，均选用低氮氧化物环保型燃烧烧嘴，各烧嘴的能力大小不同，功能相同。以炉顶平焰低氮氧化物环保型燃烧烧嘴为例介绍如下。

炉顶平焰低氮氧化物环保型燃烧烧嘴是一种集高效燃烧与低污染排放于一体的先进燃烧设备，其优势体现在多个技术维度，具有独特的旋流设计与火焰特性。采用空气、燃气双旋流结构设计，在烧嘴运行过程中，空气与燃气以特定角度和速度旋转喷出，两股旋流相互作用，形成强大的附壁效应，使火焰能够均匀、稳定地沿着烧嘴砖内壁向四周铺展，形成较大面积的平展火焰。优势如下：

（1）实现烧嘴砖优化与低氮燃烧机制的协同作用。为了与低氮烧嘴的性能相匹配，对烧嘴砖出口进行针对性优化设计。优化后的烧嘴砖出口结构能够引导燃烧产物形成良好的回流场。

（2）应用分级稀薄燃烧技术。将燃气和空气分成多股送入燃烧区域，避免一次性混合燃烧导致局部高温。

（3）采用分阶段燃烧形式。第一阶段以较稀薄的混合气（空气过量）燃烧，降低燃烧温度；第二阶段补充剩余燃气和空气，完成燃烧，减少氮氧化物生成。

（4）实现空间燃烧分布。利用平焰烧嘴的结构，使燃烧在炉内形成大面积、低温度的平面火焰，热量均匀分布，进一步抑制高温区氮氧化物的产生。

通过上述技术的协同作用，炉顶平焰低氮氧化物环保型燃烧烧嘴不仅实现了高效稳定的燃烧过程，还降低了氮氧化物的排放浓度，为工业炉窑等设备的绿色、高效运行提供了可靠的技术支持。

为实现精准控温与节能减排，针对均热段炉顶20个烧嘴，采用“煤气流量阈值+烧嘴分组启停+定时切换”的控制逻辑，各流量工况具体规则如下：

（1）高流量（>1 800 Nm^3/h）：控制段烧嘴煤气流量>1 800 Nm^3/h时，20个烧嘴全部开启，保障高负荷加热需求。

（2）中高流量（1 200 Nm^3/h<流量≤1 800 Nm^3/h）：采用“插花启停+定时切换”模式，进料侧2排共5个烧嘴关闭、出料侧10个烧嘴保持开启；该状态维持5 min后，执行切换操作，将原关闭的5个烧嘴全部打开，原开启的烧嘴（含出料侧10个）全部关闭，确保炉内温度均匀性。

（3）中低流量（600 Nm^3/h<流量≤1 200 Nm^3/h）：同样采用“插花启停+定时切换”模式，关闭4排共10个烧嘴（剩余10个烧嘴开启）；该状态维持5 min后，执行切换操作，将原关闭的10个烧嘴全部打开，原开启的10个烧嘴全部关闭，平衡加热效率与能耗。

（4）低流量（≤600 Nm^3/h）：进料侧2排烧嘴全部关闭，出料侧采用“插花启停+定时切换”模式，关闭出料侧2排共5个烧嘴（出料侧剩余5个烧嘴开启）；该状态维持5 min后，执行切换操作，将原关闭的烧嘴（含进料侧2排、出料侧2排）全部打开，原开启的烧嘴全部关闭，最大化降低低负荷时的能耗。

低氮燃烧技术的通用适配性已经在山东钢铁

莱芜分公司特钢事业部新中型加热炉应用中得到验证[10]，该技术成功适配特钢加热场景，不受设备规格限制。核心的完全分级燃烧方式，在预热空气480 ℃常规工况下，仍稳定实现低氮氧化物排放。炉膛温度1 300 ℃时，排放浓度低至80 mg/m³，远优于最严区域标准，且保证排放浓度≤140 mg/m³，可迁移至同类型工业加热炉应用。

3 低氮燃烧技术应用实践

低氮氧化物环保型燃烧烧嘴更换后，各烧嘴能力和安装位置不变。在下加热调焰烧嘴前的空气、煤气管道上设置脉冲和间拔两种控制，在炉顶的平焰烧嘴前的空气、煤气管道上设置间拔控制。空气、煤气管道配合阀门进行局部改造与新设备相适应。在炉内各段设置氧含量监测，精准控制炉内气氛。具体应用及效果如下。

3.1 燃烧系统

3.1.1 供热能力配置

朝阳钢铁ASP加热炉沿板坯运行方向分为三段，炉尾低温预热段、中部高温加热段及炉头的均热段。各供热段进一步分为上、下、左、右四段独立控温，全炉共设8个温度控制段。在控制方式上，上均热段和上加热段均采用间拔控制；下加热段采用间拔与脉冲控制相结合的方式；下均热段则沿用原有的双交叉限幅控制。

3.1.2 脉冲、间拔控制

改造前各段煤气和空气流量采用比例控制，加热段和均热段分别占60%和40%。在低负荷时每个烧嘴流量很低，燃烧未处于最佳状态。改造后在下加热调焰烧嘴前空、煤气管道上设置间拔和间拔脉冲两种控制，在炉顶的平焰烧嘴前空、煤气管道上设置自动阀间拔控制。炉顶采用间拔控制，使得每个烧嘴都处于最佳燃烧状态，减少氮氧化物的生成。加热炉炉顶有200个空煤气控制阀，下加热有20个空煤气间拔阀。为实现空燃比的高精度控制，有效规避燃料热值波动与压力变化对燃烧过程的干扰，系统特别保留比例燃烧控制段，通过精准调控燃料与空气的实时流量，确保燃烧效率的稳定性与一致性。在炉温调控方面，采用侧烧嘴间拔控制作为核心策略，根据炉温变化动态调整侧烧嘴的启闭与工作数量，快速响应温度需求；同时，以流量控制作为辅助手段，对燃料与空气的输入量进行精细化微调，弥补间拔控制的调节盲区，形成“以间拔控大局、以流量精校准”的协同控制模式，从而实现对炉温的高效、精准调控，满足工艺生产的严苛温度要求。脉冲和间拔控制特点如下。

脉冲调节的特点是温度控制区域精细化，加热灵活，能为每一个钢种提供一种或多种加热制度，灵活进行多种温度制度的转换、炉温平稳过渡，实现灵活的冷装、热装，钢种或规格更替管理。

间拔控制的特点是调节性能优异，可大幅提升系统调节比，加热操作灵活，能更好适配不同负荷工况。温控精准稳定，有效保证加热区域的温度均匀性，减少波动。系统可靠性高，对切断阀的性能要求降低，减少设备故障风险，提升整体运行稳定性。环保效益显著，通过优化燃烧状态，可降低氮氧化物排放量，符合环保要求。

3.1.3 气氛与氧含量精准协同控制

为实现对炉内燃烧状况的精准把控，有效减少颗粒物及氮氧化物的生成，对气氛控制与氧含量检测进行协同改造，具体内容如下。

（1）多点气氛检测布局。在加热炉各个加热段合理设置多点气氛取样检测点，通过多点采样综合分析炉内气氛状况。采用先进的气氛检测设备，实时监测炉内各类气体成分比例，为燃烧控制提供全面数据支撑。

（2）闭环控制系统构建。基于检测数据构建闭环控制系统，根据热电偶检测的温度值直接控制煤气阀门开度，精准调节煤气供给量，以满足不同阶段的加热需求。依据气氛检测数值综合控制各段空气阀门开度，使空气与煤气实现最佳配比，确保燃料充分燃烧且减少污染物生成，直接实现温度和气氛的闭环控制。该系统有效避免了传统孔板检测存在无效区的问题，相比以往控制方式，能够根据燃烧温度均匀性和燃烧生成产物快速反馈并调节阀门开度，控制更精确、反应更灵敏。

（3）氧含量实时监测。针对低负荷时空气、煤气流量小，易处于流量计非线性区导致流量检测不准确、空燃比难以精确控制，进而造成氧化烧损增加和颗粒物增多的问题，在炉内各段设置高精度氧含量检测仪。通过实时监测炉内氧含量，为气氛控制提供关键参数，确保炉内气氛始终处于理想状态，有效降低颗粒物及氮氧化物的生成。

经过上述改造，可精确控制煤气和空气供入量，从源头实现节能降耗，精准的气氛控制能够有效降低氧化烧损，减少钢材在加热过程中的损耗。同时，系统可根据煤气热值波动和压力波动，实时动态调整燃烧配比，适应煤气热值波动范围更广，保障加热炉稳定、高效且环保运行。

3.2 自动控制系统

根据低氮燃烧技术应用方案可知，自动化控制系统做适应性改变，间拔阀和脉冲控制信号、氧含量监测信号进入加热炉电力线通信（Power Line Communication，PLC）系统，增加相应模块，为检测设备运行情况，设置一套个人数字助理（Personal Digital Assistant，PDA）系统，同时对相关人机界面（Human-Machine Interface，HMI）人机交互画面及控制程序进行修改。

4 低氮燃烧技术应用效果

朝阳钢铁加热炉应用低氮燃烧技术后，燃烧污染物的排放浓度符合国家标准，对正常生产的某个时段的污染物进行统计可知，污染物能够达标排放，氮氧化物排放浓度均值由182 mg/m^{3}降至93 mg/m^3。对炉内气氛精准监测控制可以保证燃料完全燃烧，由能源统计数据可知，燃料高焦混合煤气的消耗由0.91 GJ/t降至0.90 GJ/t，节约燃料0.01 GJ/t。

5 结语

结合鞍钢集团朝阳钢铁有限公司ASP热轧加热炉的生产实际，制定并应用了低氮燃烧技术。实践表明，该技术应用后，氮氧化物排放浓度均值由182 mg/m^{3}降至93 mg/m^3。对炉内气氛精准监测控制可以保证燃料完全燃烧，节约燃料0.01 GJ/t，不仅减少了污染物排放，还降低能源消耗，达到了节能环保与绿色降碳的目的。因此，建议相关企业在具备实施条件时，积极推动低氮燃烧技术在热轧加热炉上的应用与推广。

参考文献

[1] 祁永平，孙文君，汪全儒，等.冶金工业加热炉先进自动燃烧控制系统设计与应用研究[J].工业加热，2025，54(5)：12-15.
[2] 赵国凌，畅哲峰，高德仁，等.PM2.5限排与燃煤工业锅炉发展[J].工业锅炉，2013(1)：35-41.
[3] 魏秀东，苗龙，徐小科.1700 ASP热轧加热炉双蓄热技术改造探索[J].鞍钢技术，2022(4)：37-40，50.
[4] 王艳丽.基于降低氮氧化物排放量的加热炉低氮燃烧器的改造[J].工业加热，2017，46(3)：19-21.
[5] 夏信虎.石化行业工艺加热炉烟气脱硝技术分析[J].化工管理，2019(22)：210-212.
[6] 宁中赫.超低排放燃烧技术在包钢长材厂高线加热炉中的应用[J].冶金管理，2023(4)：26-27.
[7] 宁方尧，梁勇，谢绍锐，等.蔗渣锅炉烟气双达标治理的实践[J].广西糖业，2021(4)：28-30.
[8] 林杨，李俊达.不同燃料对氮氧化物排放浓度的影响[J].天津冶金，2016(S1)：57-58，61.
[9] 范新庆.加热炉高精度燃烧控制技术的研究与应用[J].中国资源综合利用，2020(9)：178-179.
[10] 许京铭，朱继民，李新林，等.轧钢加热炉采用低氮燃烧法降低NOx排放的改造与实践[J].冶金能源，2021，46(3)：42-44.

（编辑 许营）
修回日期：2025-07-10

（上接第62页）

风并分批集中加焦，对炉缸进行热洗处理；使用红外线扫描仪进行料流轨迹测试，测量出炉料在特定料线下与炉墙碰撞的极限角度后校正等，有效活跃了炉缸，消除了炉墙黏结，保证了高炉稳定顺行，为类似条件下高炉的操作调整提供了有益经验。

参考文献

[1] 吴胜利，王筱留，张建良. 钢铁冶金学（炼铁部分）[M]. 第4版. 北京：冶金工业出版社，2019：168-172.
[2] 项钟庸，王筱留. 高炉设计-炼铁工艺设计理论与实践[M]. 第2版. 北京：冶金工业出版社，2014.
[3] 许钦伸，郭泽华. 马钢B高炉炉役后期稳定操作炉型实践[J]. 冶金动力，2022(6)：105-109.
[4] 周洋. 本钢7号高炉炉况失常原因分析及恢复实践[J]. 工程技术，2022(3)：297-301.
[5] 朱仁良. 宝钢大型高炉操作与管理[M]. 北京：冶金工业出版社，2015：213-215.
[6] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2002：109-112.
[7] 车玉满，孙鹏，李连成，等. 鞍钢铜冷却壁高炉操作炉型管理模型开发与应用[J]. 炼铁，2007，26(5)：18-21.
[8] 林国太. 三钢8号高炉炉况失常及恢复处理[J]. 福建冶金，2017，46(2)：12-14.
[9] 王志堂，刘响. 马钢4号高炉稳定渣皮的操作措施[J]. 炼铁，2020，39(2)：15-18.
[10] 谷键. 太钢5号高炉炉况波动的原因及应对措施[J]. 炼铁，2022，41(1)：39-42.

（编辑 查松妍）
修回日期：2025-09-01