综合论述

低碳烧结技术现状与展望

姜 涛，范晓慧，季志云，黄晓贤，徐良平
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：烧结是钢铁行业实现“双碳”目标的关键工序之一，低碳烧结对钢铁工业低碳绿色发展具有重要意义。本文针对目前低碳烧结技术的进展及工业化应用现状进行了系统梳理与总结，按照源头替碳、过程节碳和末端降碳以及基于 AI 赋能的烧结降碳技术 4 条路径进行论述，并对低碳烧结未来的发展方向进行了展望。

关键词：低碳烧结；源头替碳技术；过程节碳技术；末端降碳技术；AI 赋能降碳技术
中图分类号：TF046.4；X701 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0002－23
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.001

Current status and prospects of low-carbon sintering technology

JIANG Tao，FAN Xiaohui，JI Zhiyun，HUANG Xiaoxian，XU Liangping
(School of Minerals Processing and Bioengineering，Central South University，Changsha，Hunan 410083，China)

Abstract：Sintering is one of the key processes for achieving the “dual carbon” goals in the iron and steel industry and low-carbon sintering is of great significance for the low-carbon and green development of the iron and steel industry. In this paper，the current progress and industrial application status of low-carbon sintering technologies are systematically reviewed and summarized；the discussion is conducted along four aspects，including source carbon substitution，in-process carbon reduction，end-of-pipe carbon reduction，and AI-enabled sintering carbon reduction technologies；and future development directions for low-carbon sintering are prospected.

Key words：low-carbon sintering；source carbon substitution technology；in-process carbon reduction technology；end-of-pipe carbon reduction technology；AI-enabled carbon reduction technology

钢铁工业是我国国民经济的重要基础产业，也是制造业中碳排放量最大的部门。我国 2020～2024 年连续 5 年粗钢产量超过 10 亿 t，年排放 CO_2 超过 18 亿 t，占全国 CO_2 排放总量的 15%～17%[1]。国务院、国家发展和改革委员会、生态环境部等部门近几年发布的《2030 年前碳达峰行动方案》、《工业领域碳达峰实施方案》、《钢铁行业节能降碳专项行动计划》等文件明确指出钢铁行业是率先落实“双碳”目标的重点领域，因此，钢铁行业已进入以碳约束为核心的全新发展阶段。

在我国钢铁生产中，高炉—转炉长流程产钢占比高达 90%[2]，其中烧结作为典型的高能耗，高污染工序，消耗固体燃料超过 6 000 万 t/a，排放 CO_2 达 2 亿 t[3]，是钢铁行业碳减排的关键环节之一。近年来，国内外围绕烧结工序降碳开展了系统的科技创新，取得了卓有成效的降碳减耗效果。针对源头降碳，将清洁可再生的碳中性生物质燃料和富氢燃气用于替代煤基固体燃料，开发了基于清洁能源替代的源头减碳技术，相关技术成果应用于首钢京唐、中天钢铁、韶钢等大型钢铁企业，

收稿日期：2026－02－03；**修回日期**：2026－02－05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52274344)
作者简介：姜 涛(1963—)，男，教授，博士生导师，中国工程院院士，从事矿产资源精加工与提取冶金等方面的研究。
通信作者：范晓慧(1969—)，女，教授，博士生导师，从事铁矿绿色低碳造块与氢冶金、冶金过程数学建模与智能控制等方面的研究。

降低烧结矿固体燃耗 1.5 ~5 kg/t；针对过程减碳，通过实施超高料层烧结、燃料偏聚烧结等技术，实现了烧结过程高效降碳，以湘钢为代表的企业料层厚度提高至 1 000 mm 以上，实现烧结矿固体燃料、工序能耗均低于 40 kgce/t 的国内外领先水平；针对末端降碳，通过烧结烟气分质循环、配置大烟道余热锅炉以及环冷废气串级提质，开发了烧结烟气、废气余热高效回收技术，以唐钢为代表的企业在实现环冷废气零排放的同时将余热发电量提高至 26 kW·h 以上。除了低碳烧结工艺本身的持续升级，人工智能正凭借对烧结过程的智能感知、精准预测与闭环优化，将减耗降碳推向新高度，为钢铁工业的绿色转型注入核心动能。

本文重点梳理与总结了近十年国内外针对低碳烧结所开展的研究工作以及典型的工程案例，以期为降碳技术在行业内快速推广提供助力，为衍生出更多更好低碳烧结新技术与新工艺提供启发。

1　基于清洁能源替代的源头减碳烧结技术

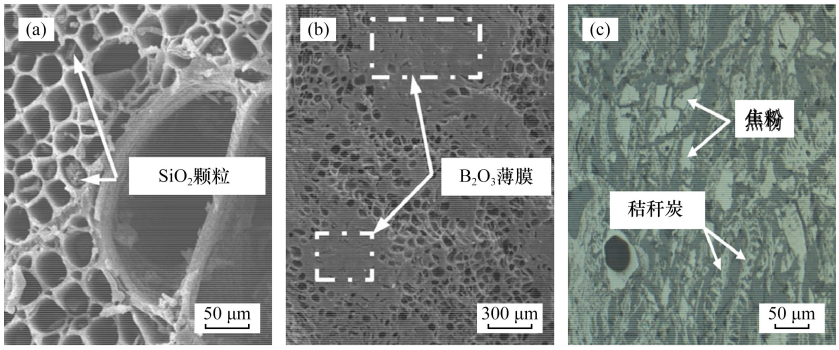
烧结工序主要依赖焦粉、无烟煤等煤基固体燃料燃烧供热，利用清洁能源替代传统烧结工艺所用的燃料具备从根本上降低烧结工序碳排放的潜力。

1.1　生物质燃料烧结技术

生物质是典型的可再生清洁能源，本世纪初已有将其应用于烧结的研究报道[4]，学者们将研究重点聚焦在生物质炭取代焦粉的比例范围[5]、影响烧结指标和烟气污染物的规律[6-8]及机理[9-10]。针对生物质炭比表面积大、单位质量热值较低导致燃烧速度过快、烧结料层最高温度偏低等问题，学者们开发了燃料粒度调控[11]、表面钝化预处理[12]、催化燃烧[13]、烧结料层分布偏析[14]等技术措施。其中，GAN 等[15-16]针对生物质燃料应用于烧结开展了系统性的研究工作，查明了生物质燃料对烧结的影响规律，并揭示了其高温反应行为及影响烧结的机理，在此基础上，开发了生物质炭表面改性技术[17]、生物质炭 - 焦炭复合型燃料制备技术[18-20]，生物质炭耦合烟气循环烧结新工艺[21-22]。预处理后的生物质炭如图 1 所示[23]，复合燃料的热重特性如图 2 所示。由图 1、2 可知，表面改性降低了生物质的孔隙率，复合燃料有效抑制了生物质炭与焦粉燃烧不同步的问题，实现生物质炭替代焦粉的配比超过 40%，烟气 CO_2 减排 20%~40%。生物质烧结技术已在实验室取得突破性的结果，但是当前的关键在于实现生物质燃料的低成本、规模化制备。

1.2　氢基气体燃料烧结技术

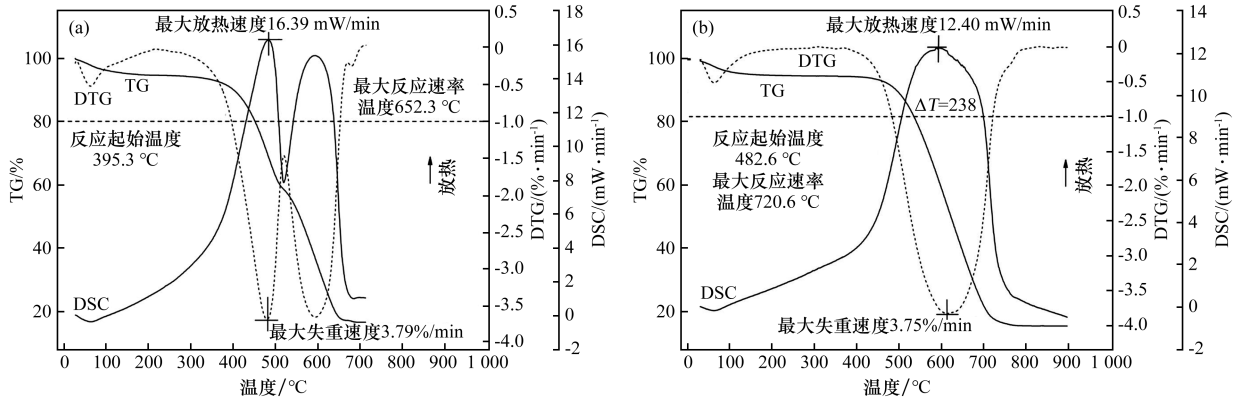
除生物质燃料外，OYAMA 等[24]率先开发了氢基气体燃料喷吹烧结技术，通过向烧结机料面喷加燃料液化天然气，在不提高料层最高温度的条件下，延长了料层中高温度的保持时间，生产出了高强度、高还原性的烧结矿，实现固体燃料从 5.0% 降至 4.7%，CO_2 减排 60 000 t/a。CHENG 等[25-26]解析了氢基燃料进入烧结料层后的燃烧行为，并揭示了多孔介质条件下氢基燃料与氧含量的相互作用机制；WU 等[27]则构建了富氧条件下氢基燃料喷吹的喷吹模式，使烧结固体燃耗降低 10.7%；JI 等[28]、HUANG 等[29]针对富氢气体燃料喷吹烧结开展系统性研究，查明了富氢气体燃



（a）2% SiO_2 改性木炭；（b）3% B_2O_3 改性木炭；（c）60% 秸秆炭 - 焦炭复合燃料

图 1　生物质燃料与复合燃料微观结构[23]

Fig. 1　Microstructure of biomass fuels and coke-biochar composite



(a) 秸秆炭与焦炭简单混合；(b) 秸秆炭 – 焦炭复合燃料

图 2 复合燃料的热重特性[20]

Fig. 2 TG characteristics of coke-biochar composite

料喷吹制度参数对烧结的影响规律、料层燃烧带的高温反应行为，揭示了富氢燃料喷吹条件下污染物减排机理；发现喷吹富氢燃料扩大了上部料层高温带宽度，优化了料层整体温度分布状态，在适宜喷吹制度下，烧结原料水分和焦粉分别可由 7.0%、5.6% 下降至 6.75%、5.3%；WU 等[30-31]开发了天然气耦合水蒸气喷吹烧结技术，研究发现在此喷吹模式下，高温带生成 OH/H 自由基，改变了 CO 的氧化和 NO 还原反应路径，在适宜制度下，固体燃料消耗降低 12.99%，喷吹段 NO_x 平均排放量减少 19.5%，CO 平均排放量减少 36.96%。

富氢燃气喷吹烧结虽面临氢基燃料的来源、成本等问题，但国内已有部分烧结设备已应用富氢燃气喷吹烧结技术，表 1 列出了有报道的工业应用效果。由表 1 可知，富氧燃料喷吹降耗效果较为明显，梅钢、中天钢铁吨矿固体能耗分别下降 4.68、2.52 kg，其他企业吨矿固体能耗下降均超过 1.50 kg。

1.3 太阳能烧结技术

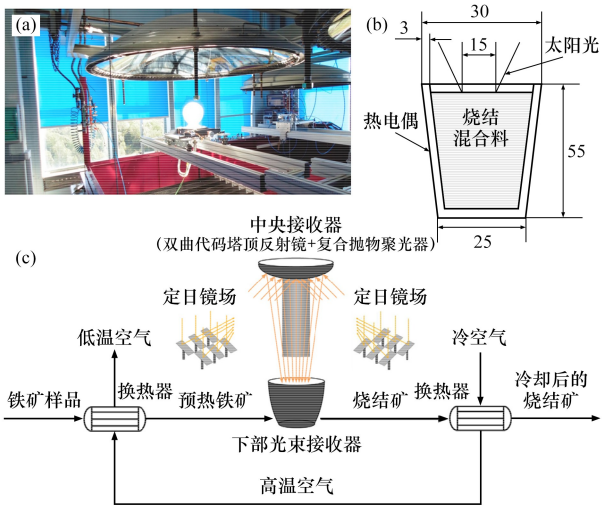
有国外学者将关注点转向太阳能等可再生能源，FERNáNDEZ-GONZáLEZ 等[38]报道了位于法国的一台 1.5 kW 立式太阳能烧结设备，其定日镜可以追踪太阳光并将其反射到最大聚光倍数15 000倍的抛物面聚光器上，如图 3(a)所示，聚焦后的太阳光束直径为 15 mm，在下方放置装有烧结物料的反应器，如图 3(b)所示。其研究发现，太阳光束虽成功点燃了烧结物料，但未采用常规抽风式烧结设备，导致气体无法穿透料层，反应深度仅为 12～15 mm，且表面温度分布不均，局部过熔，烧结矿中几乎不存在 Fe_2O_3。尽管如此，他认为太阳能烧结理论减碳潜力可达 40%～50%，未来工作应聚焦于开发适用于太阳能的连续式烧结设备。RAHBARI 等[39]据此设计了一套太阳能烧结装备系统，如图 3(c)所示，光学系统包括离轴光束下射定日镜场 + 双曲面塔顶反射镜 + 复合抛物聚光器，热力系统包括移动箅床烧结窑、空气 – 矿石直接接触式换热器，并对余热进行回收。该系统模拟了运行工况下烧结高温反应行为和料层温度状态，并进行了经济性计算，但并未进行试验验证。将太阳能等清洁可再生能源用于烧结生产虽

表 1 富氢燃气喷吹工业应用效果

Table 1 Performance of hydrogen-rich gas injection sintering technology in industrial applications

应用厂家	富氢燃气种类	喷吹量	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})(降低)	CO_2 减排	SO_2 减排	NO_x 减排
梅钢 3#烧结机[32-33]	焦炉煤气	—	4.68	2.4 万 t/a	—	—
韶钢 5#烧结机[34]	焦炉煤气	1.15 m^3/t	1.70	1.98%	5.89%	11.36%
中天钢铁(常州)550 m^{2}烧结机[35-36]	天然气	300～500 m^3/h	2.52～3.77	5.93～9.19 kg/t	—	—
江苏永钢 450 m^{2}烧结机[37]	天然气	—	2.00	—	—	—
天津某 265 m^{2}烧结机[37]	焦炉煤气	800 m^3/h	1.50	4.40 kg/t	—	—

具有较大降碳潜力，但实际应用过程一方面受限于太阳能的稳定持续性，另一方面与太阳能烧结相匹配的新型烧结设备研发尚存在较多问题亟待解决。



（a）抛物面聚光器；（b）装料坩埚[38]；（c）太阳能烧结系统[39]

图 3　太阳能烧结装置

Fig. 3　Solar thermal sintering system

2　基于能效提升的过程降碳烧结技术

2.1　超高料层烧结成矿研究新进展

烧结过程存在料层蓄热现象，且随着料层高度的提高，下层蓄热量明显提升[40]，合理利用烧结料层的自动蓄热作用可以降低原料中的配碳量，进而减少烧结工序固体燃料消耗[41]。厚料层烧结技术经半个世纪的发展，目前已在我国钢铁企业烧结机上普遍应用，且部分企业逐渐由高料层向超高料层发展，烧结固体燃料消耗显著降低[42-43]。然而，随着料层高度的提高，烧结产品质量不均的问题变得十分严重。当料高由700 mm提升至950 mm时，料层高度方向上烧结矿强度差值由6%扩大至20%，严重制约了烧结工艺能效的提升[44-45]。徐良平[46]针对超高料层烧结存在的不均匀问题，从液相形成与成矿机理入手，厘清了<3 mm细粒铁矿与熔剂在烧结过程中形成初始液相，进而溶解粗颗粒矿石最终形成终态液相的动态过程。这一发现明确了烧结液相的主要来源及其形成路径，揭示了液相成分均质化对最终烧结矿结构均匀性的决定性作用。在此基础上，提出“矿化域”这一成矿基本单元的概念，指出烧结矿是由多个“矿化域”周期性组合而成的集合体，而每个“矿化域”内部的液相成分均匀性是实现整体烧结矿均质化的关键。由此构建的“矿化域”均质成矿新模式，突破了传统烧结成矿研究中对烧结液相来源的认识不清晰，将混合料视为整体、难以关联单矿种特性与最终成矿性能的局限。其所提出的“均质烧结”技术思想，为解决高料层烧结中的质量不均问题提供了理论依据，开辟了一条通过调控原料粒度组成与矿物反应路径、实现液相成分均匀化的新工艺方向。

烧结料层内精确的热量供给是烧结液相均质化的驱动力。针对烧结过程液相生成的热量需求与供给不平衡的问题，徐良平等[47-48]基于“矿化域”成矿新模式的认识，突破传统烧结过程热量均匀分布的计算方法，直接计算各料层物料实际所需热量，以“按需供热”作为热量分布的核心原则构建了铁矿粒度与料层热量精确供给的料层结构设计模式，如图4所示。相关试验结果表明，烧结矿性能纵向均匀性显著改善：转鼓指数差异降至5.08%，还原性指数差异降至4.46%，还原粉化指数（$RDI_{<0.5\ mm}$）差异降至1.99%。在料层结构设计理论的指导下，韶钢通过调控燃料粒度

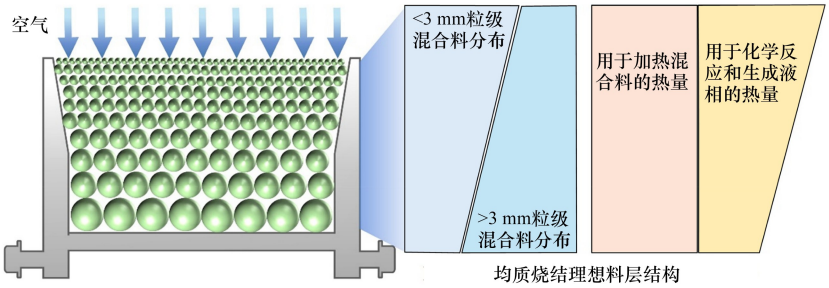


图 4　均质烧结理想料层结构示意

Fig. 4　Schematic diagram of ideal material layer structure for homogeneous sintering

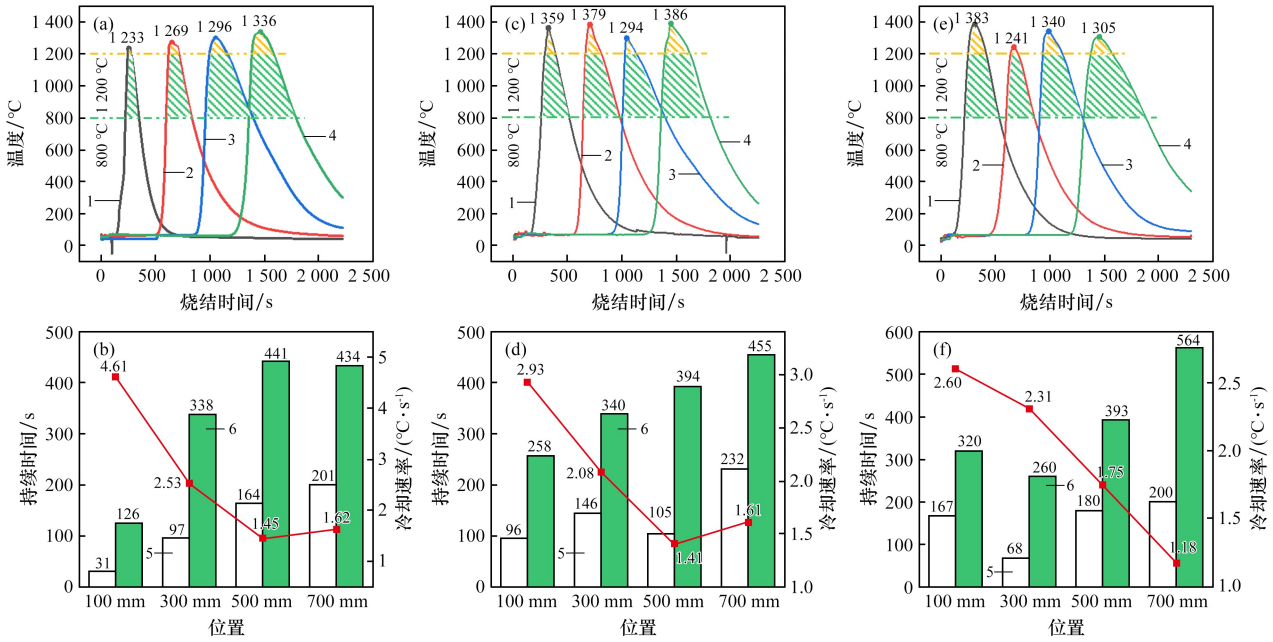
等手段优化料层燃料的分布，料层高度由 800 mm 提高至 900 mm，固体燃料消耗降低约 7 kg/t，返矿率降低约 6%。该技术是“矿化域”均质成矿的理论转化为可精准调控的工艺实践。它通过打破“热量均匀分布”的传统思维，创造性实现了热量供给与物料需求的纵向精确匹配，不仅从根本上缓解了高料层下的质量不均问题，更同步达成了降低燃料消耗与返矿率的双重效益。

2.2 基于液相成分调控的配矿烧结技术

基于上述对烧结成矿过程的新认识，作者提出了一个基于液相成分调控的铁矿配矿新方法，确定了烧结矿优质性能的适宜液相成分范围：$w(SiO_2)$ 为 4%～6%，$w(CaO)$ 为 15%～25%，$w(Al_2O_3)<2\%$，$w(MgO)<2\%$，$w(Fe_2O_3)$ 为 65%～80%[47]。基于该范围，可通过精确调控 <3 mm 粒级铁矿的化学组成及其在混合料中的占比，实现对烧结液相的“靶向”设计与精准制备，从而推动配矿模式从传统的“粗放式原料组合”向“目标产物导向”的精细调控转变。在该配矿方法的指导下，涟钢通过将高硅粗粉替代高硅精粉，降低烧结液相中的 SiO_2 含量，烧结矿的转鼓强度提高 3%～5%[46-47]。此外，该方法在复杂难处理资源中也表现出优良的适用性，YI 等[49]研究发现采用该方法调控液相的成分可有效抑制高铁赤泥对铁矿烧结产品质量的不利影响，使高铁赤泥在烧结中配加量达 6%。该技术充分发挥了烧结工艺原料适应性强的优势，实现了“好矿优用、劣质矿可用”的目标，提高了低品质含铁资源（如高铝铁矿、高硅铁矿、赤泥）的利用率，在源头上扩大原料范围，降低生产成本，提高烧结矿质量。

2.3 燃料偏聚烧结技术

为实现超厚料层烧结热量合理分布，多位研究者共同提出了固体燃料表面层偏聚的技术思路，并联合开发了基于燃料偏聚的低碳烧结关键技术与装备[50-53]。研究发现，将一定比例固体燃料偏聚至表面层后，表层高温持续时间得到延长，高温保持时间从 31 s 延长至 167 s，冷却速率从 4.61 ℃/s 降至 2.93 ℃/s，且整体料层的热量分布均匀得到改善，如图 5 所示。采用燃料偏聚技术后，实验室条件下焦粉用量可降低 7%，烧结烟气中 NO 排放减少 21.62%。目前，湘潭钢铁公司炼铁厂 4 台烧结机均应用该技术，工艺流程如图 6 所示。投入运行以来，该技术取得良好的降碳减排效果（表2），点火能耗下降约50%，固体燃料消耗下



（a）基准料层温度曲线；（b）基准料层热状态参数；（c）料面燃料分加 5% 后料层温度曲线；（d）料面燃料分加 5% 后料层热状态参数；（e）料面燃料分加 5%，降碳 7% 后料层温度曲线；（f）料面燃料分加 5%，降碳 7% 后料层热状态参数

图 5 燃料料面分加对料层热状态参数的影响[51]

Fig. 5 Effect of solid fuel surface addition on thermal parameters of the layer

降 2.71 kg/t，进口烟气 SO_2、NO_x 分别下降 12.0%、17.8%。

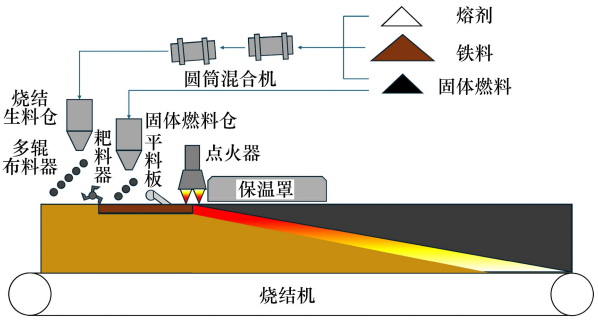


图 6　固体燃料料面分加低碳烧结工艺流程[53]

Fig. 6　Process flow of solid Fuel surface addition low-carbon sintering technology

2.4　改善高料层烧结透气性技术

随着料层高度的增加，其带来料层气体阻力增大的负面作用逐渐显现，料层由 600 mm 提升至 1 000 mm，压力降增加 160.56%[54]，严重影响料层内传质与传热[44-55]，限制了料层高度进一步提高。因此，围绕强化制粒、优化料层结构及其他工艺优化手段是改善料层透气性的研究核心方向，学者们开发了强化制粒的工艺技术[56-58]及装备[59]来改善制粒效果，并采用返矿分流[60-62]、支撑烧结[63-64]等技术手段改善烧结过程中的料层透气性。近年来，一些新的研究发现，烧结早期与末期风量过剩而中期风量不足，料层风量－热量严重失配[46]。为此，徐良平等提出料层阻力－抽风负压协同调控风量的高效烧结策略，通过降低烧结前期与后期的抽风负压，直接提高烧结过程气流的利用效率、改善烧结过程的传热[47]。同步提高空气利用效率和燃料燃烧效率[65-66]。该技术在某钢厂应用后，固体燃料消耗降低 2.5 kg/t，电耗降低约 3.1 kW·h/t。该技术突破了传统追求全程大风量的思维，直接减少了无效气流、提升了气体利用效率，体现了从被动适应向主动干预的治本思路，为解决超高料层下的透气性矛盾、进一步挖掘节能降耗潜力提供了更为精密的调控手段。

2.5　燃料改性烧结技术

燃料本身的物化特性对其在烧结料层中的燃烧行为具有较大影响，学者们发现，通过调控燃料粒级结构或对其进行改性预处理，可以促进燃料燃烧并降低污染物的排放。大量实验室研究与生产实践证明固体燃料需要有合适的粒级结构[67-68]，太粗或太细均会对烧结产生不利影响[69-70]。燃料外裹熔剂的预制粒技术可利用钙质熔剂、反应生成的铁酸钙等矿物的催化作用提升燃耗消耗和抑制污染物生产，同步实现减污降碳提质。针对该技术，学者们深入解析了预制粒燃料结构对烧结的影响[71]及污染物减排机理，并总结图 7(a)所示的燃料理想分布结构，DAI 等[72]发现，该种结构的减排机理为高温下 CO 和 NO 在铁酸钙表面的氧化还原循环，而循环中产生的 Fe-CaO中间产物具有极高催化活性，如图 7(b)所示。王一帆[73]以超厚料层烧结为背景，围绕焦粉粒度优化展开研究，查明了适宜的烧结燃料粒级结构，并联合中冶长天开发了基于燃料预处理的低 NO_x 烧结技术[74-75]。

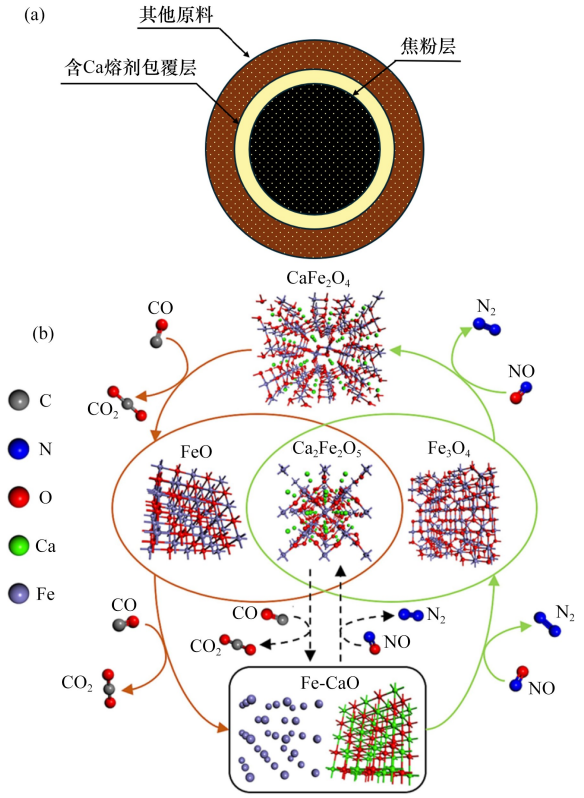
2.6　气体介质调控烧结技术

燃料颗粒周围的气体介质组成也是影响其燃料消耗和污染物转化路径的重要因素，基于此，学者们开发了富氧烧结、料面蒸汽喷吹烧结等技术。通过向料层中额外供给氧气，可以提高燃料燃烧效率，从而降低燃料消耗[76]。研究表明不同富氧会促进相应区域燃料的燃烧，具有改善料层热状态的作用[77]。因此，目前普遍推荐在料面前部区域实施富氧。韶钢[78]、梅钢[79]、酒钢[80]等报道应用富氧烧结工艺，烧结固体燃料消耗均有降低。料面蒸汽喷吹利用水煤气反应改变传统烧结固体燃料高温反应路径，从而提高燃料燃烧效率[81-82]。

表 2　燃料偏聚技术实施前后指标对比

Table 2　Comparative analysis of indicators before and after technology implementation

项目	料面分加燃料配比/%	点火温度/℃	点火能耗/(GJ·t^{-1})	烟气 NO_x 质量浓度/(mg·m^{-3})(脱硝前)	烟气 SO_2 质量浓度/(mg·m^{-3})(脱硫前)
技术实施前	0	1 156	0.054	229.07	955.56
技术实施后	6	942	0.028	188.23	854.70



（a）理想分布状态示意[74]；（b）减排机理[72]

图 7 制粒小球燃料理想分布状态与其减排机理

Fig. 7 Ideal distribution of solid fuels in granulated pellets and the associated emission reduction mechanism

WU 等[83]查明了料面蒸汽喷吹对烧结的影响规律，并开发了天然气耦合水蒸气联合喷吹的低碳烧结技术，揭示了该喷吹模式下料层高温反应行为，如图 8 所示。在适宜的参数下，焦粉用量从 5.60% 降至 5.45%，烧结矿燃料消耗减少2.13 kgce/t，烧结废气中 CO 排放降低 15.16%。首钢京唐 550 m^2烧结机在 2015 年进行了料面蒸汽喷吹的工业试验，8 根垂直于台车前进方向的蒸汽管道分布在烧结机 30 ~ 72 m 范围内，蒸汽喷吹总量为 2 t/h，温度为 130 ℃，试验结果表明，在喷吹蒸汽后，烧结返矿率降低 0.3%，固体燃料消耗降低 1.64 kg/t[84-85]。中天钢铁 550 m^2烧结机料面蒸汽喷吹工业试验结果表明[86]，在 0.7 t/h 的喷吹量下，每吨蒸汽可降低 CO 质量浓度为 500 mg/m^3。包钢三烧 265 m^2烧结机在 6#~8#风箱上方料面采用多点喷吹的方式喷吹蒸汽，烧结矿固体燃料消耗相较之前下降 0.75 kg/t[87]。

3 基于烧结余热高效回收的末端降碳技术

烧结工序余热资源占工序总能耗 70% 以上，主要包括烧结烟气余热和环冷废气余热，两类显热占烧结工序总能耗的 60%~70%（图 9）[88]，但这部分余热资源整体利用率均较低，多数钢铁企业利用率不超过 40%[89]。因此烧结余热的高效回收利用是钢铁工业节能低碳的重要途径。

3.1 环冷废气余热回收技术

环冷机目前主要回收高温段余热用于蒸汽发电，但中低温烟气多以直接放散为主。针对这部分余热的回收，宝钢采用了有机朗肯循环（ORC）发电技术回收中温段废气余热，其三烧 ORC 发电装置于 2019 年投产，发电量可达 1 191 万 kW·h/a，折合标煤为 3 811 t，但目前该技术在烧结行业的应用尚处于起步阶段[88-92]。

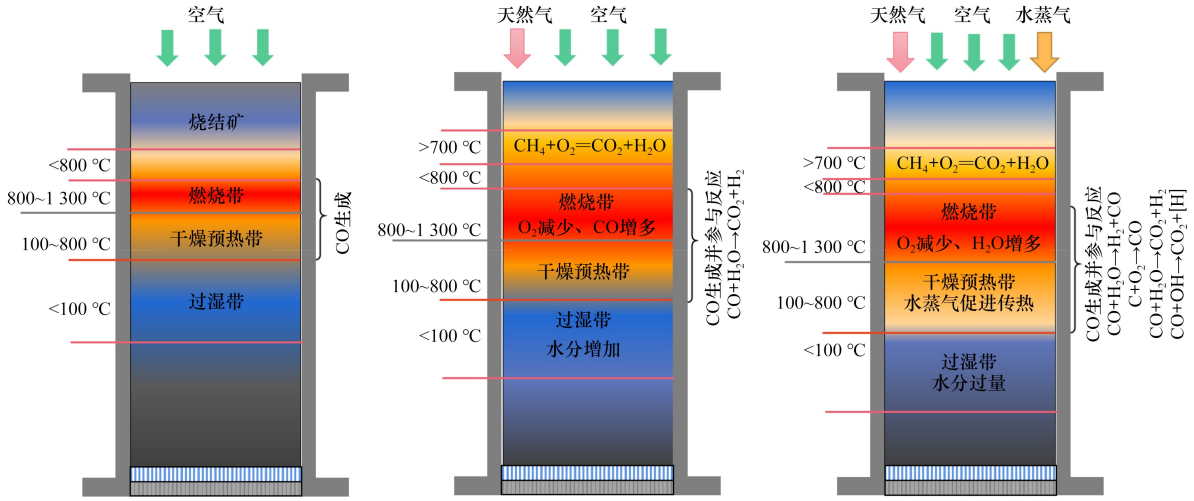


图 8 天然气耦合水蒸气料层高温反应行为[83]

Fig. 8 High-temperature reaction mechanisms of natural gas-steam coupling in the layer

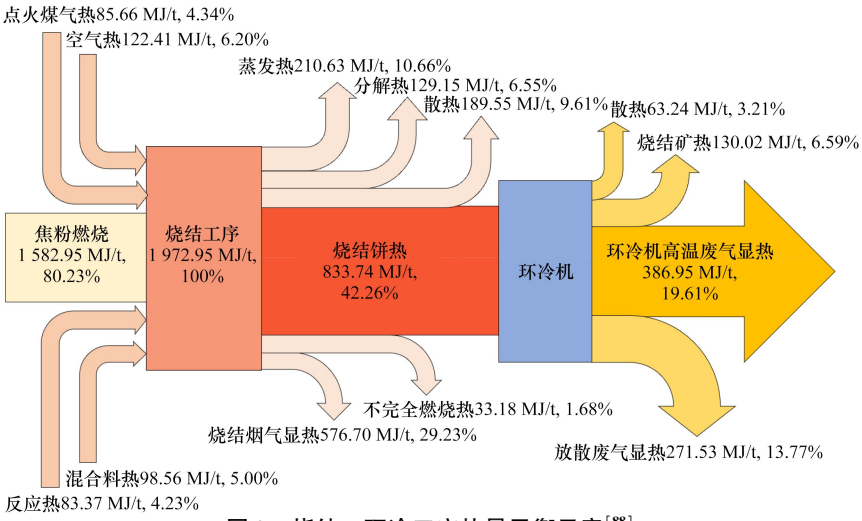


图 9　烧结 – 环冷工序热量平衡示意[88]

Fig. 9　Schematic diagram of heat balance for sintering-circular cooling process

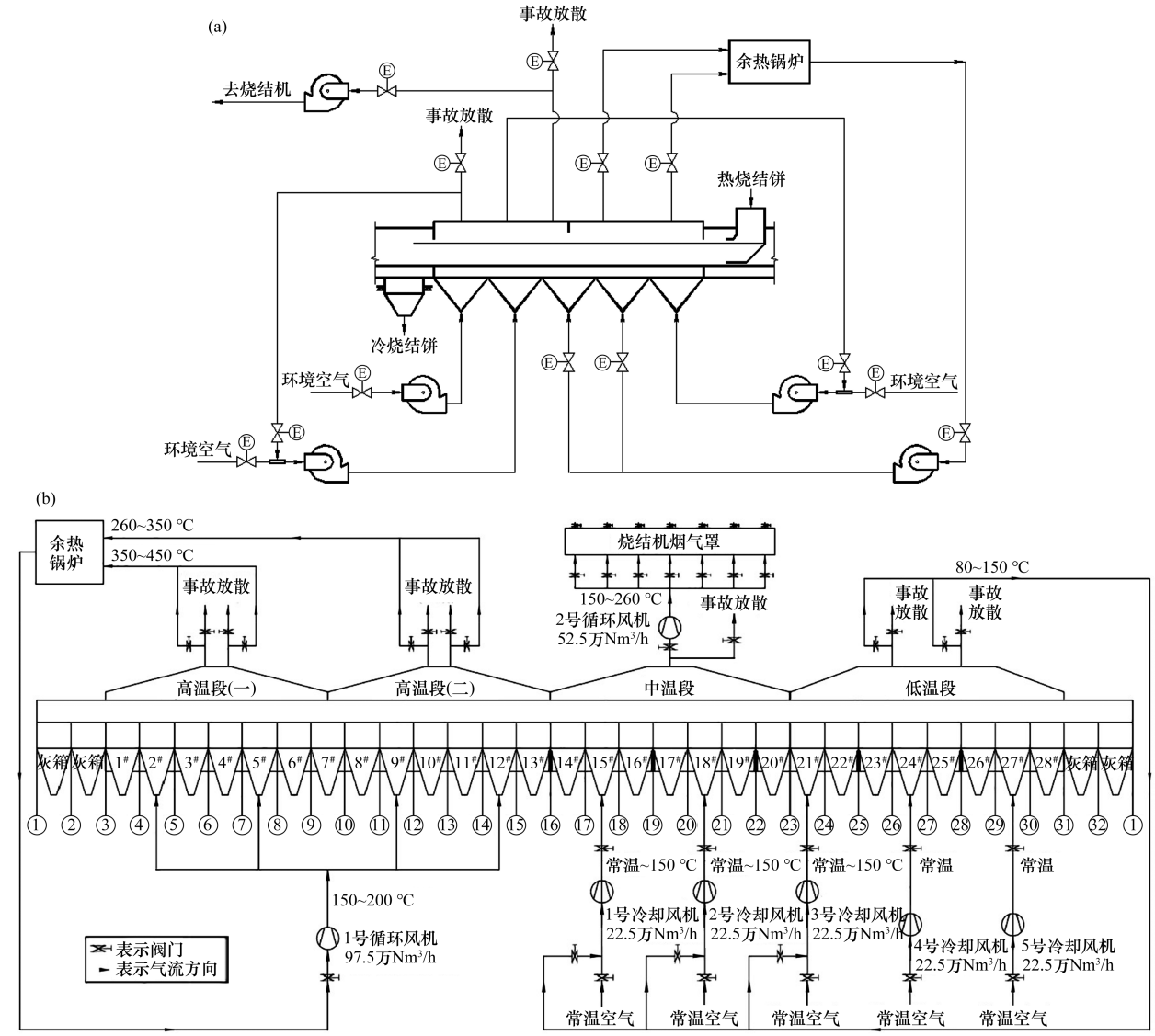
针对中低品位余热难以回收利用的问题，也有学者提出低温段废气串级循环提质的思路，将低温段废气作为入口冷却介质循环至中、高温段，进一步提升中、高温段废气余热品质，在提高余热资源回收效率的同时实现废气零排放。邹忠明[93]以某钢铁企业 550 m^2 烧结机环冷设备为对象，将低于 100 ℃的废气串级循环利用，计算得出吨烧结矿可节省标煤 0.64 kg；宝钢 600 m^2 烧结机及环冷设备在 2023 年进行包括超高料层改造、环冷机更新改造及余热系统配套改造等一系列改造措施，改造后烧结工序能耗由 52 kg/t 下降至 43 kg/t[94]。山东莱钢 480 m^2 烧结机环冷设备采用串级提质技术，将 1、2 段热风（＞380 ℃）回收进行余热发电，3 段热风（200 ℃左右）用于热风烧结与冬季热交换取暖，4 段热风（100 ~ 200 ℃）一部分循环至 1、2 段作冷却风，一部分用于热风点火和热风烧结，5 段热风（100 ℃左右）循环至 4 段作冷却风，实现余热高效回收利用[95]。中冶北方提出如图 10（a）所示的环冷机余热资源高效回收利用模式[96]，并应用于某企业 715 m^2 烧结环冷机零排放系统，如图 10（b）所示。在该系统中，将低温热废气串级至温度较高区段以提高废气温度，串级后的中温段热废气循环回烧结料面用于热风烧结，实现中低温段废气 100% 循环[97]，并结合高温段废气的自循环实现环冷机废气零排放。

环冷烟气成分单一，生产利用难度较小，以环冷烟气作循环介质的烧结研究较早。胡宾生等[98]、朱德庆等[99]在上世纪八九十年代就发现热风烧结可以降低烧结固体燃料消耗，但循环热废气时会对烧结速度产生不利影响[100]。郑浩翔[101]、GAN 等[102]通过采取富氧耦合热废气循环烧结，解决了厚料层条件下热风烧结料层氧含量降低、气体阻力增大从而影响烧结速度及燃料燃烧效率的问题，在富氧热风条件下，中上部料层的温度分布得到明显优化，烧结能耗明显降低。该技术已成功应用于太钢 450 m^2 烧结机（图 11），应用后返矿率降低 1.03%，FeO 降低 0.75%，烧结固体燃料消耗降低 1.18 kg/t，电耗降低 2.25 kW·h/t[103]。

环冷废气循环烧结在国内多个钢铁企业均有应用报道，部分企业的实际应用效果如表 3 所示[101]，循环烟气以 200 ~ 300 ℃为主，烧结固体能耗下降，烧结指标得到改善。目前主要存在的问题为环冷烟气温度波动较大，导致余热回收效果不稳定。

3.2　烧结烟气余热回收技术

针对烧结烟气余热的回收利用技术主要包括两大类：配置大烟道余热锅炉和烟气循环。依据整个烧结过程不同区域烟气温度的变化规律，部分钢铁企业在大烟道安装内置式余热锅炉对烧结后段高温烟气余热进行回收，有较为明显的节能效果，如安钢 500 m^2 烧结机大烟道余热发电折算月均节约标煤 1 200 t 左右，宣钢 360 m^2 烧结机大烟道余热发电折算月均节约标煤 600 t 左右，包钢 500 m^2 烧结机在采用大烟道余热锅炉后，工序能耗



（a）中低品位余热串级提质工艺流程；（b）715 m^2环冷机零排放系统

图 10 环冷设备余热串级提质工艺[96-97]

Fig. 10 Process flow of cascade waste heat upgrading in circular cooling equipment

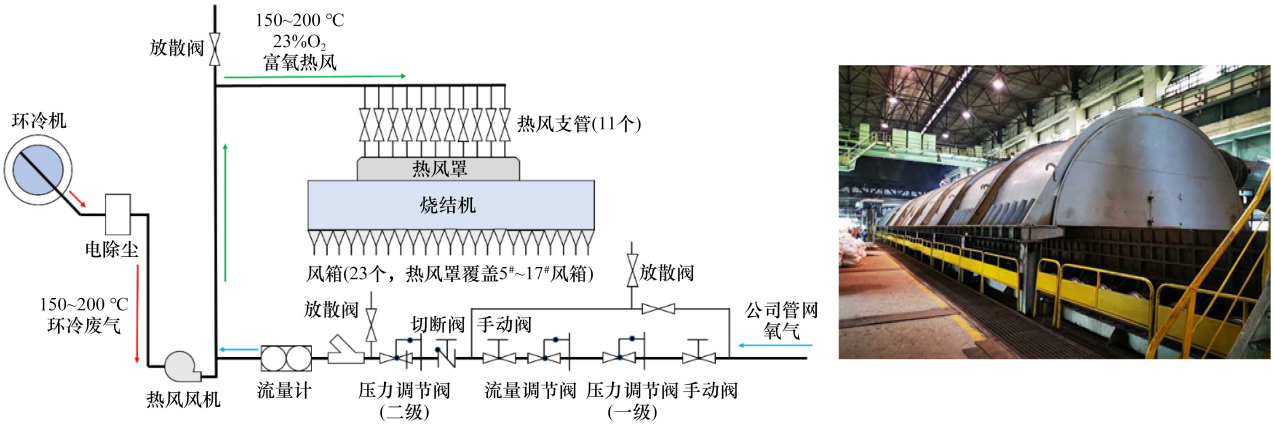


图 11 富氧热风循环烧结的工业应用

Fig. 11 Industrial application of hot air sintering coupled with oxygen rich

表 3　部分企业环冷机废气热风烧结应用情况[101]

Table 3　Application of hot air sintering in selected units

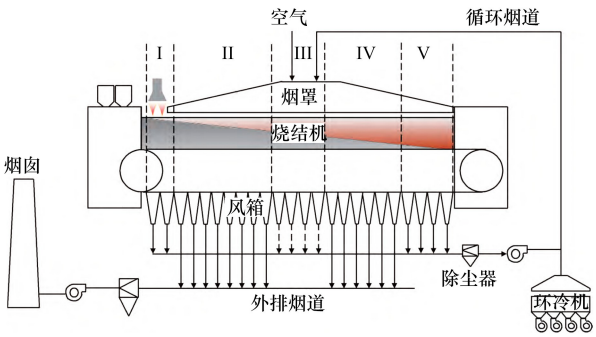
应用厂家	废气温度/℃	应用效果	备注
宝钢一烧	200 ~ 300	余热回收量约为 40 MJ/t,焦粉单耗下降 5 kg/t	设计回收温度为 350 ℃以上,实际回收温度较低,波动大
鞍钢三烧 1 号烧结机	250	焦粉配比从 6.0% 降低至 5.5%,成品率提升 9.54%,FeO 含量降低,铁酸钙含量升高	烧结矿的转鼓强度无明显变化,烟气温度波动较大
攀钢	—	提高烧结矿质量,改善温度分布,降低工序能耗 2.28 kgce/t,成品率提高 2%	回收废气温度未报道
本钢 360 m^2烧结机	200 ~ 300	转鼓强度提高 0.25%,固体燃料消耗降低 0.5 kg/t,工序能耗降低 0.73 kgce/t,FeO 降低 0.3%	设计回收温度为 300 ~ 350 ℃,实际回收温度较低
包钢 一烧	280 ~ 350	2003 年采用热风烧结,2008 年相比 1999 年烧结固体燃料消耗降低 9.28 kg/t	—
包钢 二烧	180 ~ 250		
包钢 三烧	350		
包钢 四烧	180 ~ 200		
莱钢 3 号烧结机	200 ~ 300	表层烧结矿强度提高 1.5%,转鼓强度提高 1%,固体燃料消耗降低 1.118 kg/t,成品率提高 0.6%	—
酒钢宏兴 265 m^2烧结机	—	固体燃料消耗约为 46 kg/t,工序能耗为 57.38 kgce/t,返矿率约为 13%	建成时配备热风烧结,利用环冷机后端废气
唐山国丰 230 m^2烧结机	200	利用系数提高 0.07 t/(m^2·h),转鼓强度提高 0.65%,FeO 降低 0.6%,固体燃料消耗下降 3 kg/t,环冷废气减排量达 50%	采用梯级取风,一级取 200 ~ 350 ℃,二级取 100 ~ 200 ℃
新钢 6 号、7 号烧结机	—	固体燃料消耗降低 2.33 kg/t,成品率提高 1.01%,FeO 含量降低 0.3%	热风温度未报道
太钢 450 m^2烧结机	200	固体燃料单耗降低 1.18 kg/t,产量提高 13 t/h,转鼓强度提高 0.89%,返矿率降低 1.03%	太钢热风氧含量为 23%

下降 2.25 kgce/t[104-111]，并将换热后的中低温烟气循环至烧结料面，进一步回收烟气余热。国内外针对烟气循环的研究起步较早，工程应用也发展的较为成熟。国外代表性的技术类型包括：① 日本新日铁于 1992 年开发区域选择性烟气循环技术；② 德国 Lurgi 公司于 1994 年开发的 EOS(emission optimized sintering)工艺；③ 德国 HKM 公司于 2001 年开发的 LEEP(low emission and energy optimized sintering process)工艺；④ 德国西门子奥钢联与奥地利 Voestalpine 公司于 2005 年合作开发的 EPOSINT(environment process optimized sintering)工艺。但这些工艺中，除了新日铁的区域选择性烟气循环工艺兼顾了烟气减量和余热利用外，其他工艺均主要追求烟气的大比例减量，但未充分考虑余热的回收以及烟气循环对烧结指标的影响。

国内从 2010 年开始加快推进烟气循环技术的开发工作，一些研究者系统分析了烧结烟气的排放特性，总结了烧结烟气中 O_2、CO_x、NO_x、SO_2、H_2O(g)等成分及烟气温度对烧结过程的影响规律和机理，探明了循环烟气中 NO_x、SO_2、CO 的高温反应行为，揭示了烟气循环条件下的烧结成矿机理[112-119]，针对不同原料结构确定了循环烟气品质，并提出了如图 12 所示的区域选择性烟气循环工艺[120]。在适宜的制度下，烧结烟气循环配比可达 40% 以上，烟气 CO、NO_x、SO_2减排分别可达 24.8%、28.7%、8.2%。LI 等深入研究了烟气循环的减排效果和机制，其研究发现在循环烟气条件下提高 CO 浓度[121]、降低 O_2含量均促进了 CO 对 NO_x的还原进程，且还原铁酸钙较未还原时具有更高的催化效率[122]；在对烟气循环脱除 PCDD/Fs 的研究中，他们发现烟气循环对高氯代

(六到八氯)PCDD/Fs 有较好的脱除效果，脱除效率可达 60.7%[123]；通过建立二维瞬态烧结模型，计算得出在理想的高配比(50%)循环条件下，固体燃料消耗最大可降低 16.6%[124]，其联合河钢集团开发的烧结机选择性烟气循环技术目前已应用于十余家烧结厂[125]。利用计算机模拟烟气循环对烧结过程的影响也是研究的热点，ANH 等[126]提出了一种烟气循环条件下烧结过程建模方法，用来研究烟气温度、成分和流量对烧结的影响。WANG 等[127-128]基于多相理论开发了关于烟气循环的一维数学模型，模拟固相间、固相与气相、气相间的传热过程，模拟结果表明，采用烟气循环后烧结料层内温度分布更均匀，但会影响燃烧前沿速率。ZHANG 等[129]建立了数学模型研究烟气循环与燃料分层分布耦合烧结，根据计算，发现将二者结合后烧结料层温度分布均匀性改善，与传统烧结相比，新工艺的燃料消耗量降低 2.66 t/h，与单独的燃料分层分布相比，燃料消耗量降低 0.86 t/h。

在基础理论研究不断完善的同时，国内烟气循环的工程应用也在持续推进。2011 年宝钢承担《烧结烟气余热循环利用低碳排放工艺技术创新及产业化示范工程》项目，在 132 m^2烧结机上进行类似 EPOSINT 工艺的中试，随后开发出具有自主知识产权的 BSFGR(Bao steel flue gas recirculation)内循环工艺，于 2013 年在宁钢 430 m^2烧结机上建立了示范工程，实现烟气减排量 25%、燃料消耗降低 5.2%、CO_x减排 4%，烟气中 NO_x、SO_2浓度也有不同程度降低[130]。截止目前，国内首钢、鞍钢、唐钢、沙钢等众多钢铁企业均采用了烟气循环技术[131-134]，其中首钢将 2#烧结机的 21#、22#风箱烟气循环至 4#～12#风箱对应料面，固体燃料消耗降低 3.39 kg/t，整体工序能耗下降 3.16 kgce/t；河钢集团邯钢新区 400 m^2烧结机、唐钢新区360 m^2烧结机均采用烧结烟气选择性循环技术，邯钢新区 400 m^2烧结机循环配比约为 30%，循环烟气氧含量约为 15%，生产过程中配合多种补氧措施，吨矿固体燃料消耗较技术应用前降低 10%，烧结机外排烟气量降低 20.4%；唐钢新区 360 m^2烧结机循环配比约为 20%～25%，循环烟气氧体积分数约为 19%，吨矿固体燃料消耗较技术应用前降低 5 kg。



Ⅰ区—烧结点火段；Ⅱ区—点火结束至 SO_2释放；
Ⅲ区—烟气水分含量下降至干燥预热阶段；
Ⅳ区—SO_2集中排放区；Ⅴ区—烧结末段。

图 12 区域选择性烟气循环工艺[110]

Fig. 12 Process flow of regioselective flue gas circulation sintering

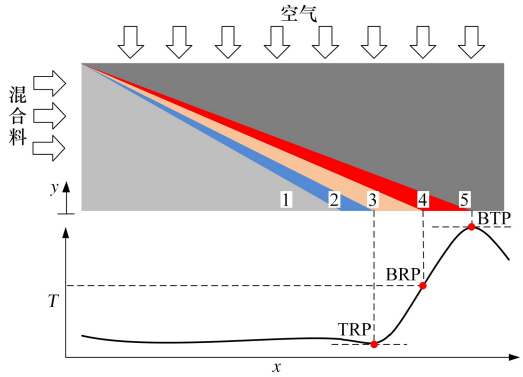
4 基于 AI 赋能的低碳烧结技术

烧结过程具有强耦合、非线性、大时滞等动态特性，基于人工经验的传统调控模式难以适应频繁波动的工况与原料条件。以机器学习为代表的新一代信息技术，为实现烧结过程的智能感知、优化决策与闭环控制提供了全新途径，是提升生产智能化水平、降低能耗的关键。

4.1 过程状态智能感知与智能控制

烧结过程状态主要指透气性状态和热状态。透气性是指固体料层允许气体通过的难易程度，而气体在烧结料层内的流动状态，关系到烧结过程的传质、传热和物理化学反应的过程。热状态又称为温度状态，FAN 等[135]提出采用废气温度上升点(temperature rising point，TRP)、废气温度拐点(burn rising position，BRP)和烧结终点(burn through point，BTP)三个特征点来共同表征(图 13)，良好的过程状态可以保证烧结矿的质量、产量和能源消耗指标。

透气性状态参数的软测量方法主要有机理模型和综合评判，机理模型存在输入参数多且无法实时检测等难题，赵小青[136]通过相关系数分析筛选出混合料 TFe 含量、点火温度、风箱负压等 18 维变量作为输入，采用 DNN 建立透气性预测模型。HUANG等[137]提出了一种烧结过程透气性综



1—原始料带；2—过湿带；3—干燥预热带；4—燃烧带；5—烧结矿带。

图 13　废气温度特征点示意

Fig. 13　Illustration of the characteristic points of exhaust gas temperature

合评价和预测方法，该方法采用模糊聚类分析法对历史数据进行透气性状态分类，并通过支持向量机构建料层厚度、风箱负压等过程检测参数与透气性状态的映射关系，实现透气性状态的提前预测。

热状态参数的软测量主要采用风箱废气温度拟合法，考虑到烧结终点 BTP 是终结状态，在线软测量也存在一定的滞后性，因此研究者采用了 BP 算法、支持向量机等机器学习方法对其进行提前预测。YAN 等[138－139]将采用三维卷积(3D-CNN)构建编码－解码器架构，挖掘过程变量在时间和空间上的演变规律，进行 BTP 的序列预测。CHI 等[140]构建了基于时空图卷积网络(ST-GCN)的 BTP 温度预测模型，对风箱间的空间依赖关系进行拓扑建模，实现了对 BTP 温度场的解析。范晓慧等[141]针对烧结终点的长、短期变化特征，采用卷积神经网络和长短期记忆网络的混合模型，实现了通过混合料布料点火阶段的特征参数来对烧结终点的长期预测。

在软测量和预测的基础上，国内外学者对烧结过程状态控制展开了一系列的研究。早期的研究主要采用理论计算、专家系统、模糊控制和预测控制等单一算法进行烧结终点的控制[142－143]。考虑到过程状态参数 TRP、BRP 和 BTP 之间的关联性，黄晓贤[144]提出了结合模糊控制和专家规则的烧结过程状态智能控制方法(图 14)，建立以 BRP 为输入的模糊控制模型，构建包含透气性指数(JPU)、TRP、BTP 等参数为前置条件的专家控制规则，通过台车速度、主抽风机频率、风箱风门开度等操作参数控制烧结过程状态。该技术已成功应用于宝钢 3 号烧结机，软件系统界面如图 15 所示。系统投入使用后的烧结终点波动范围明显小于人工控制时期，烧结矿成品率从 79.95% 提高至 82.14%，波动范围也由 0.55% 下降到了 0.45%。

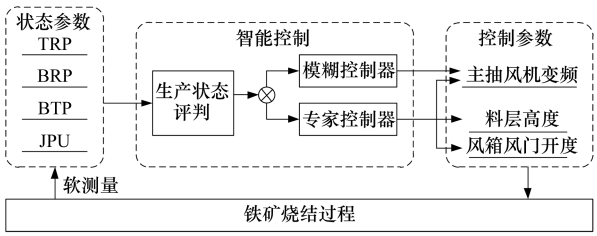


图 14　烧结过程状态控制系统结构

Fig. 14　Structure of the state control system for the sintering process

4.2　烧结固体燃料消耗优化控制

固体燃料消耗约占烧结总能耗的 80%，固体燃料燃烧也是烧结工序碳排放的最主要来源。固体燃料的优化控制是降低烧结工序乃至钢铁生产流程能源消耗和碳排放的重要举措之一。

烧结矿 FeO 含量作为烧结热量投入水平的关键指标之一，在生产现场也经常用作于燃料配比的调控依据。针对烧结矿 FeO 含量的大滞后性，可以通过生产过程的检测参数或烧结机尾断面图像对其进行预测。ZHOU 等[145]、JIANG 等[146]提出了一种基于机尾可见光图像和过程检测数据融合的烧结矿 FeO 含量软测量方法，通过深度卷积神经网络提取图像高维特征，并于过程检测参数进行融合作为模型输入，实现烧结矿 FeO 含量的软测量。YANG 等[147]提出了多源信息融合的烧结矿 FeO 含量软测量方法，基于专家知识和数据驱动的 SE-ResNet 模型提取机尾断面图像的浅层和深层特征信息，引入 Autoformer 对特征信息和过程检测数据进行序列相关性分析和融合，实现最终的烧结矿 FeO 含量软测量。ZHANG 等[148]在烧结机尾红外热成像的基础上，采用改进的卷积神经网络模型(ResNet-18)实现了烧结矿 FeO 含量的在线软测量，绝对误差 ±0.5% 的预测命中率在 91% 以上。

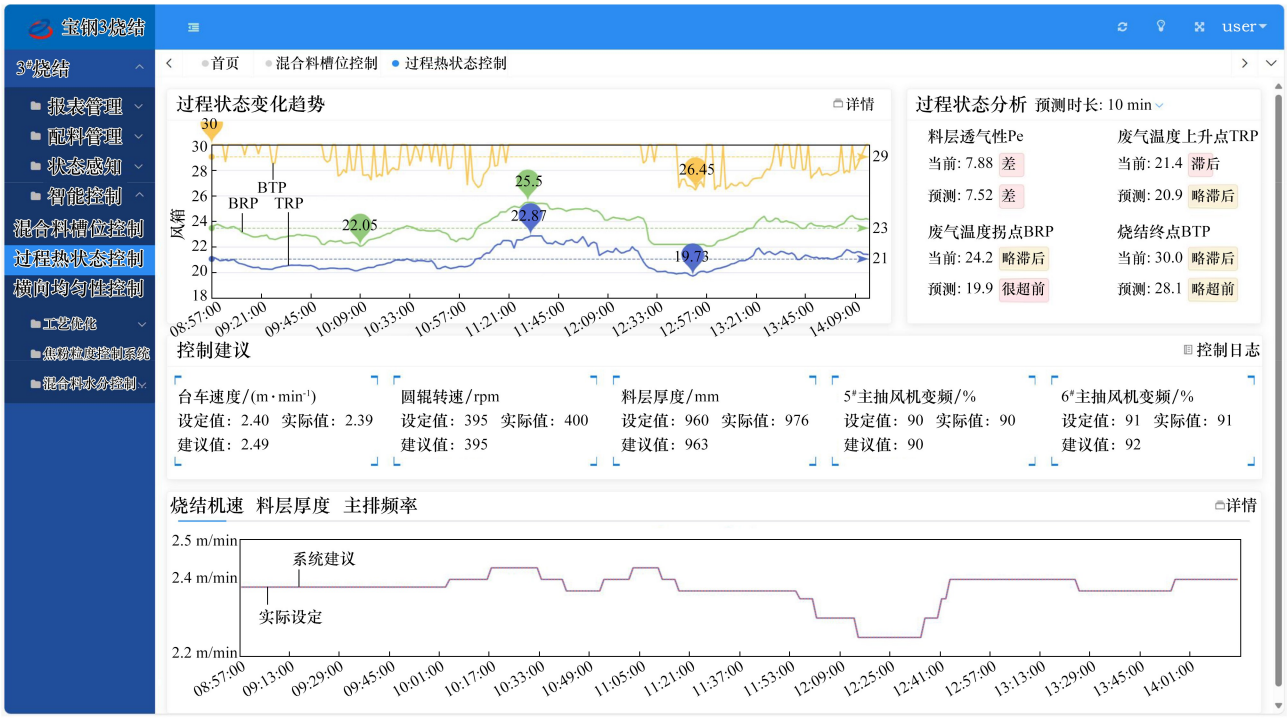


图 15 烧结过程状态控制系统界面

Fig. 15 Interface of the state control system for the sintering process

烧结混合料的固体燃料消耗与混合料 FeO 含量、烧损、水分等混合料基础性能，以及料层高度、台车速度等工艺参数紧密相关。WANG 等[149]利用决策树算法和神经网络算法对烧结能耗进行数据挖掘，利用决策树算法确定料层厚度、混合料水分等工艺参数对燃料消耗指标的影响大小；再根据影响程度大小顺序，分别利用神经网络算法确定工艺参数的最优区间。WANG 等[150]通过烧结过程物热平衡分析提取了固体燃料消耗的关键影响因素，在基于 ELM 和 AdaBoost 的固体燃料消耗和烧结矿质量参数预测的基础上，开发了基于热力学规则和数据驱动模型的烧结工艺参数优化综合集成方法。HU 等[151]、ZHOU[152]在固体燃料消耗预测的基础上提出了基于多工况的碳效建模与优化方法，采用 K 均值聚类算法划分烧结工况，预测不同工况下的固体燃料消耗，并通过粒子群算法优化生产参数。匡朝辉等[153]提出了烟气温度、机尾断面温度、环冷烟气温度等多维度耦合的热量状态表征方法，建立了基于多模态数据挖掘的烧结热量水平评价模型，并结合烧结矿 FeO 含量预测结果构建了基于知识规则自学习的燃料配比控制模型。目前，宝钢股份湛江钢铁 1 号烧结机应用了该技术(如图 16 所示)，控制模型投入使用后烧结矿 FeO 含量的稳定性得到一定的提高，标准偏差(σ)从 0.36% 降至 0.30%；烧结成品率从 79.25% 提高到 80.14%，固体燃料消耗从 47.79 kgce/t 降至 47.16 kgce/t。

4.3 质量指标预测与工艺参数优化

烧结生产过程是由多个单元组成的物理化学反应繁多的复杂系统，其信息流呈非线性、强耦合、大滞后且动态时变的特性，难以建立精确的数学模型进行描述。现场大部分采用的某一单元智能控制、基于人工经验的工艺参数协调控制和优化设定，都难以保证生产全过程的优化和稳定运行。

为了实现局部环节或全流程多个操作参数的优化设定，部分研究者提出采用遗传算法等智能优化方法进行参数寻优。SINGH 等[154]通过机器学习建立烧结矿转鼓指数和还原粉化指数预测模型，并采用 NSGA-II 算法对混合料水分、燃料配比、料层厚度等关键操作参数进行优化设定。YUAN 等[155]建立了基于质量与能量平衡的机理模型，并采用 NSGA-III 多目标优化算法，寻找最优的原料配比、层厚、水分等参数组合，以实现热利用效率、能源消耗与生产成本的帕累托最优。LI 等[156]

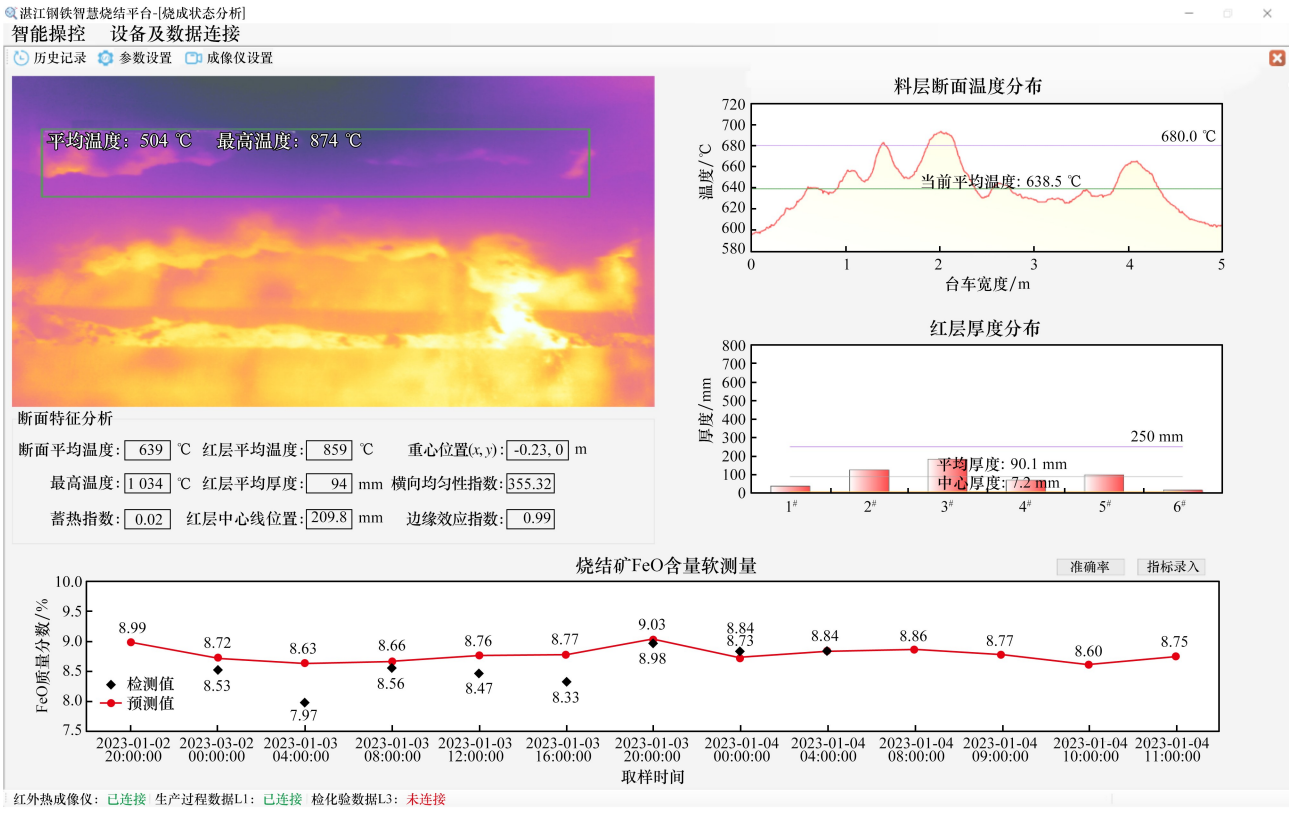


图 16　烧结矿 FeO 含量预测系统界面

Fig. 16　Interface of sinter FeO content prediction system

通过在线极限学习机预报烧结矿 FeO 含量和转鼓强度的基础上，采用 VIKOR 方法进行混合料水分、料层厚度、主抽风负压等操作参数优化设定，系统在工业化现场使用后，烧结生产综合稳定率提高，烧结矿转鼓强度提高了 0.37%，成品率提高了 0.29%，固体燃料消耗降低 0.79 kg/t。

5　结论与展望

烧结工序高效降碳对钢铁行业实现“双碳”目标具有重要推动作用。当前开发的基于生物质燃料、富氢燃气、太阳能等清洁能源替代的源头减碳技术具备从根本上解决烧结工序碳排放量大的问题。天然气、焦炉煤气等富氢燃气喷吹技术已在多家钢铁企业完成了工业化应用，但由于气体来源、成本、安全性等问题，目前的替代比例受限；基于提高料层厚度、优化料层热量分布、改善燃料燃烧效率等提升烧结过程能量利用效率的降碳技术，因其适配当前烧结生产精细化作业的发展趋势，超厚料层均质烧结、水蒸气和富氧喷吹、燃料粒度调控和燃料表面层偏聚等多项技术在钢铁企业得到广泛应用；基于烧结烟气、环冷废气余热高效回收的末端降碳技术，具有同步减少烟气排放量、回收余热资源的功能，备受钢铁企业重视，环冷低温废气串级循环提质、大烟道余热锅炉、烧结烟气与环冷热废气循环等技术已有众多工程应用案例。

经过国内外高校、科研院所与设计院、生产单位等数十年的持续科技创新，烧结能耗和碳排放指标已突破到新的历史更低水平，但与球团工序相比，烧结还有较大的降碳潜力。未来，我国铁矿烧结生产除大力推广实践证明行之有效的各类低碳烧结技术外，还应更加注重多类降碳技术的协同利用，如源头与过程耦合、过程与末端耦合、全流程耦合降碳等；要加快推进人工智能为烧结降碳赋能，研发数据与机理双驱动的烧结生产过程实时感知及优化调控技术，并依托大数据技术开展全流程碳排放监测与生产决策研究；此外，还要进一步研发各种新的绿色低碳、无碳烧结工艺技术与装备，如电气化烧结技术、太阳能烧结技术、微波烧结技术及装置等。

参考文献:

[1] 上官方钦,段志伟,崔志峰,等. 新形势下中国钢铁行业碳达峰碳中和若干问题探讨[J]. 钢铁,2024,59(9):22-31.
SHANGGUAN Fangqin, DUAN Zhiwei, CUI Zhifeng, et al. Discussion on several issues of carbon peak and carbon neutrality in China's steel industry under new situation[J]. Iron & Steel,2024,59(9):22-31.

[2] 殷瑞钰,上官方钦,崔志峰. 钢铁行业低碳发展对策研究:回顾与展望[J]. 中国冶金,2025,35(3):1-15.
YIN Ruiyu, SHANGGUAN Fangqin, CUI Zhifeng. Research on low-carbon development strategies in steel industry: Review and prospect[J]. China Metallurgy, 2025,35(3):1-15.

[3] 蔡九菊,孙文强,岳强,等. 典型钢铁流程能耗能效分析及其碳排放评价[J]. 钢铁,2025,60(7):59-70.
CAIJiuju, SUN Wenqiang, YUE Qiang, et al. Energy consumption and efficiency analysis, and CO_2 emission assessment of typical iron and steel production routes [J]. Iron and Steel,2025,60(7):59-70.

[4] LOVEL R, VINING K, DELL'AMICO M. Iron ore sintering with charcoal[J]. Mineral Processing and Extractive[Metallurgy,2007,116(2):85-92.

[5] LU L M, ADAM M, KILBURN M, et al. Substitution of charcoal for coke breeze in iron ore sintering[J]. ISIJ International,2013,53(9):1607-1616.

[6] KAWAGUCHI T, HARA M. Utilization of biomass for iron ore sintering[J]. ISIJ International,2013,53(9): 1599-1606.

[7] LIU C,KANG Y,ZHANG Y Z,et al. Effect of replacing coke with biomass fuel on sinter properties and pollutant emissions[J]. Metals,2022,12(9):1483.

[8] 周昊,邢裕健,周明熙,等. 生物质替代焦粉铁矿石烧结过程中的碱金属迁移行为[J]. 工程科学学报,2021,43(3):376-384.
ZHOU Hao,XING Yujian,ZHOU Mingxi,et al. Migration behavior of alkali metals in an iron ore sintering process with thesubstitution of biomass for coke breeze[J]. Chinese Journal of Engineering,2021,43(3):376-384.

[9] LOVEL R R, VINING K R, DELL'AMICO M. The influence of fuel reactivity on iron ore sintering[J]. ISIJ International,2009,49(2):195-202.

[10] WANG Z M,OHNO K I,NONAKA S,et al. Temperature distribution estimation in a dwight-lloyd sinter machine based on the combustion rate of charcoal quasi-particles [J]. Processes,2020,8(4):406.

[11] NIESLER M,STECKO J,STELMACH S,et al. Biochars in iron ores sintering process:Effect on sinter quality and emission[J]. Energies,2021,14(13):3749.

[12] LIU C,ZHANG Y Z,ZHAO K,et al. Modified biomass fuel instead of coke for iron ore sintering[J]. Ironmaking & Steelmaking,2020,47(2):188-194.

[13] ZHOU M X,ZHOU H,CHENG Y,et al. Investigation on the combustion behaviors of coke and biomass char in quasi-granule with CuO-CeO_2 catalysts in iron ore sintering[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(5):1934-1941.

[14] WANG J K, MENG H X, ZHOU H. Effect of biochar substitution on iron ore sintering characteristics based on optimization of fuel distribution through the bed[J]. Fuel Processing Technology,2023,247:107817.

[15] GAN M, FAN X H, CHEN X L, et al. Reduction of pollutant emission in iron ore sintering process by applying biomass fuels[J]. ISIJ International, 2012, 52(9):1574-1578.

[16] GAN M,FAN X,JI Z,et al. Application of biomass fuel in iron ore sintering:Influencing mechanism and emission reduction[J]. Ironmaking & Steelmaking,2015,42(1): 27-33.

[17] GAN M, LI Q, JI Z Y, et al. Influence of surface modification on combustion characteristics of charcoal and its performance on emissions reduction in iron ore sintering[J]. ISIJ International,2017,57(3):420-428.

[18] FAN X H, JI Z Y, GAN M, et al. Influence of preformation process on combustibility of biochar and its application in iron ore sintering[J]. ISIJ International, 2015,55(11):2342-2349.

[19] FAN X H,JI Z Y,GAN M,et al. Integrated assessment on the characteristics of straw-based fuels and their effects on iron ore sintering performance[J]. Fuel Processing Technology,2016,150:1-9.

[20] FAN X H, JI Z Y, GAN M, et al. Characteristics of prepared coke-biochar composite and its influence on reduction of NO_x emission in iron ore sintering[J]. ISIJ International,2015,55(3):521-527.

[21] GAN M,FAN X H,JIANG T,et al. Fundamental study on iron ore sintering new process of flue gas recirculation

together with using biochar as fuel[J]. Journal of Central South University,2014,21(11):4109 – 4114.

[22] GAN M,JI Z Y,FAN X H,et al. Insight into the high proportion application of biomass fuel in iron ore sintering through CO-containing flue gas recirculation[J]. Journal of Cleaner Production,2019,232:1335 – 1347.

[23] JI Z Y,YU D,FAN X H,et al. Resourceful utilization of combustible solid wastes throughout steelmaking processes:Recent progress and prospects[J]. Journal of Cleaner Production,2024,449:141696.

[24] OYAMA N, IWAMI Y, YAMAMOTO T, et al. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process[J]. ISIJ International,2011,51(6):913 – 921.

[25] CHENG Z L,WANG J Y,WEI S S,et al. Optimization of gaseous fuel injection for saving energy consumption and improving imbalance of heat distribution in iron ore sintering[J]. Applied Energy,2017,207:230 – 242.

[26] CHENG Z L,GUO Z G,FU P,et al. New insights into the effects of methane and oxygen on heat/mass transfer in reactive porous media[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2021,129:105652.

[27] WU W P, WANG R, ZENG J J, et al. Synergistic injection of hydrogen-rich gas with steam and oxygen based on thick-bed sintering[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2025,142:70 – 79.

[28] JI Z Y,ZHOU H Y,FAN X H,et al. Insight into the application of hydrogen-rich energy in iron ore sintering: Parameters optimization and function mechanism[J]. Process Safety and Environmental Protection,2020,135: 91 – 100.

[29] HUANG X X,FAN X H,JI Z Y,et al. Investigation into the characteristics of H_2-rich gas injection over iron ore sintering process:Experiment and modelling[J]. Applied Thermal Engineering,2019,157:113709.

[30] WU Y F,FAN X H,JI Z Y,et al. Influence of multiple gaseous medium injection on low-carbon iron ore sintering performance:Characteristics of natural gas and steam coupling injection[J]. Journal of Cleaner Production,2022,374:133907.

[31] WU Y F, FAN X H, JI Z Y, et al. Comprehensive evaluation of hydrogen-rich energy application in iron ore sintering process:Deep function mechanism analysis and process optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2023,420:138451.

[32] 韩凤光,许力贤,吴贤甫,等. 焦炉煤气强化烧结技术研究[J]. 烧结球团,2016,41(2):12 – 16.
HAN Fengguang,XU Lixian,WUXianfu,et al. Technical research on sintering intensification with coke oven gas injection[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(2): 12 – 16.

[33] 李和平,聂慧远,韩凤光,等. 焦炉煤气强化烧结技术在梅钢的应用[J]. 烧结球团,2015,40(6):1 – 3.
LI Heping, NIE Huiyuan, HAN Fengguang, et al. Application of intensified sintering technology with COG in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(6): 1 – 3.

[34] 周浩宇,李奎文,雷建伏,等. 烧结燃气顶吹关键装备技术的研发与应用[J]. 烧结球团,2018,43(4): 22 – 26.
ZHOU Haoyu,LI Kuiwen,LEI Jianfu,et al. Development and application of key equipment technologyfor top gas injection in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):22 – 26.

[35] 李乾坤,裴元东,周晓冬,等. 超厚料层烧结料面喷吹天然气生产实践[J]. 烧结球团,2022,47(3):32 – 37.
LI Qiankun, PEI Yuandong, ZHOU Xiaodong, et al. Production practice of natural gas injection on sinteringmaterial surface of ultra-thick layer[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):32 – 37.

[36] 胡玖林,周浩宇,刘前,等. 铁矿烧结工艺过程 CO 生成机理及减排关键技术[J]. 中国冶金,2025,35(2): 94 – 101.
HU Jiulin,ZHOU Haoyu,LIU Qian,et al. Mechanism of CO generation in iron ore sintering process and key technologies for emission reduction[J]. China Metallurgy,2025,35(2):94 – 101.

[37] 王中奇. 氢冶金烧结技术在我国的应用和发展[J]. 江西冶金,2025,45(5):425 – 432.
WANG Zhongqi. Application and development of hydrogenmetallurgy sintering technology in China[J]. Jiangxi Metallurgy,2025,45(5):425 – 432.

[38] FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ D, PRAZUCH J, RUIZ-BUSTINZA Í,et al. Iron metallurgy via concentrated solar energy[J]. Metals,2018,8(11):873.

[39] RAHBARI A, ZHENG M G, CORSI C, et al. Solar-thermal sintering of iron ore[J]. Solar Energy, 2025, 286:113123.

[40] 姜涛,李光辉,许斌,等. 烧结生产进一步提质节能的途径:均热高料层烧结[C]// 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III. 上海:中国金属学会,宝钢集团有限公司,2015:1432 - 1441.
JIANG Tao, LI Guanghui, XU Bin, et al. Approach of quality-improving and energy-saving for sintering process: Heat-homogenizing and deep-bed sintering[C]// The 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference Proceedings III. Shanghai: Chinese society for metals, Baosteel Group Ltd:2015:1432 - 1441.

[41] 张瑞年. 浅谈烧结节能降耗的技术途径和措施[J]. 烧结球团,2003,28(3):18 - 20.
ZHANG Ruinian. The ways and measurements of sintering energy saving[J]. Sintering and Pelletizing, 2003,28(3):18 - 20.

[42] 阚永海. 超厚料层烧结技术应用研究[J]. 河南冶金,2020,28(5):1 - 3.
KAN Yonghai. Research on application of sintering technology for super thick material layer[J]. Henan Metallurgy,2020,28(5):1 - 3.

[43] LIU Z J, NIU L L, ZHANG S J, et al. Comprehensive technologies for iron ore sintering with a bed height of 1000 mm to improve sinter quality, enhance productivity and reduce fuel consumption[J]. ISIJ International, 2020,60(11):2400 - 2407.

[44] XU Liangping, LIU Huibo, ZHAO Yuchao, et al. Super-high bed sintering for iron ores: problems ascertainment [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024,31(5):1063 - 1070.

[45] XU L P, LIU H B, DONG Z L, et al. Super-high bed sintering for iron ores: Behaviors, causes and solutions of horizontal segregation on strand[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2024,31(7):1590 - 1596.

[46] 徐良平. 铁矿粉超高料层均质烧结的理论基础与技术研究[D]. 长沙:中南大学,2024.
XU Liangping. Fundamental andtechnology for super-high bed homogeneous sintering of iron ores[D]. Changsha: Central south university,2024.

[47] 徐良平,阳习端,赵玉潮,等. 基于工业生产料层解析的超高料层低碳烧结技术[J]. 钢铁研究学报,2025,37(3):317 - 325.
XU Liangping, YANG Xiduan, ZHAO Yuchao, et al. Low-carbons uper-high bed sintering for iron ores based on industrial sintering bed analysis[J]. Journal of Iron and Steel Research,2025,37(3):317 - 325.

[48] XU L P, WEI D, LIU H B, et al. Super-high bed homogeneous sintering for iron ores with low carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production,2025,529: 146848.

[49] YI L Y, HAO H W, XU L P, et al. Integrated recycling of red mud for iron ore sinter manufacturing: Interfacial bonding regulation of the sintering process[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024, 12(48): 17531 - 17544.

[50] WU Y F, GAN M, JI Z Y, et al. Application of surface fuel addition coupled with pulsed-step natural gas injection in iron ore sintering: Heat distribution and process optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2025,505:145458.

[51] WU Y F, GAN M, JI Z Y, et al. New approach to improve heat energy utilization efficiency in iron ore sintering: Exploration of surface fuel addition[J]. Process Safety and Environmental Protection,2024,190:125 - 137.

[52] 赵改革,武钰丰,姜涛,等. 烧结料面燃料分加模式下点火温度对烧结过程的影响[J]. 中国冶金,2025,35(9):47 - 56.
ZHAO Gaige, WU Yufeng, JIANG Tao, et al. Effect of ignition temperature on sintering process in surface fuel addition mode[J]. China Metallurgy,2025,35(9):47 - 56.

[53] 赵改革,喻维纲,郑浩翔,等. 烧结料面燃料分加耦合低温点火碳减排新技术[J]. 中国冶金,2024,34(10):91 - 98.
ZHAO Gaige, YU Weigang, ZHENG Haoxiang, et al. A new carbon reduction technology of fuel separated addition in sintered material surface coupled with low temperature ignition[J]. China Metallurgy, 2024, 34(10):91 - 98.

[54] XU L P, XIONG L, LIU H B, et al. Super-high bed sintering for iron ores: Variation and optimization of bed resistance[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2025,32(1):40 - 51.

[55] LIU H B, XU L P, YANG X D, et al. Super-high bed sintering for iron ores: Inhomogeneous phenomena and its mechanism during mineralizing[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2024,31(8):1850 - 1860.

[56] LI S D, ZHANG J L, WANG Y Z, et al. Structural

characteristics of active quicklime flux and optimization of quasiparticle granulation performance in thick-bed sintering[J]. Steel Research International,2025,96(2):2400660.

[57] ZHOU M X,ZHOU H. Flame front propagation and sinter strength properties of permeable sintering bed prepared via enhanced granulation with hydrated lime[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering,2021,16(2):e2592.

[58] 杨永斌,唐培垚,王林,等. 预造球强化难制粒精矿烧结工艺[J]. 烧结球团,2024,49(3):25-32.
YANG Yongbin,TANG Pieyao,WANG Lin,et al. Process of pre-pelletizing strengthened sintering of refractory concentrates[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(3):25-32.

[59] YOU Y,GUO J B,ZHENG Z,et al. Comparisons of iron ore granulation and sintering performance between horizontal high-shear granulators and drum granulators [J]. Powder Technology,2022,402:117367.

[60] MATSUMURA M, YAMAGUCHI Y, HARA M, et al. Improvement of sinter productivity by adding return fine on raw materials after granulation stage[J]. ISIJ International,2013,53(1):34-40.

[61] SUN C F,MA P S,DENG J Y,et al. Intensive reduction of fuel consumption in the sintering process of double-layered fuel segregation with return fines embedding [J]. Fuel,2023,332:125955.

[62] 裴元东,张俊杰,刘桐,等. 烧结返矿分流工艺生产实践[J]. 烧结球团,2022,47(5):28-32.
PEI Yuandong, ZHANG Junjie, LIU Tong, et al. Production practice of sintering return ore diversion process[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(5):28-32.

[63] WANG Y Z,LIU Z J,ZHANG J L,et al. Study of stand-support sintering to achieve high oxygen potential in iron ore sintering to enhance productivity and reduce CO content in exhaust gas[J]. Journal of Cleaner Production,2020,252:119855.

[64] 刘杰,张辉,徐礼兵,等. 双层预烧结支撑工艺[J]. 中国冶金,2024,34(10):84-90.
LIU Jie,ZHANG Hui,XU Libing,et al. Double-layer pre-sintering process with stand-support[J]. China Metallurgy,2024,34(10):84-90.

[65] ZHENG F Q,GUO Y F,XIANG J F,et al. Improvement of iron ore sintering productivity by redistributing air volume during sintering process[J]. ISIJ International,2022,62(1):74-82.

[66] ZHANG X,BAI H,LU X,et al. Effect of cooling methods on the strength of silico-ferrite of calcium and aluminum of iron ore sinter during the cooling process[J]. Metals,2019,9(4):402.

[67] 刘燊辉,白凯凯,倪桂虎,等. 燃料粒度对铁矿烧结的影响研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):17-22.
LIU Shenhui, BAI Kaikai, NI Guihu, et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):17-22.

[68] MA H Y,PAN W,LIU L,et al. Effects of particle size of coke on iron ore sintering process[C]//10th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. Cham:Springer,2019:649-656.

[69] UMADEVI T, DEODHAR A V, KUMAR S, et al. Influence of coke breeze particle size on quality of sinter [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2008, 35(8):567-574.

[70] 蒋大军,何木光,宋剑,等. 燃料粒度对烧结性能影响的试验研究[J]. 钢铁研究,2016,44(4):1-7.
JIANG Dajun, HE Muguang, SONG Jian, et al. Experimental research on fuel particle size influence on sintering performance[J]. Research on Iron and Steel,2016,44(4):1-7.

[71] HAN T, HU C Q, SHI X F, et al. Effects of quasi-particles structure on the combustion behaviors and CO and NO emissions in the iron ore sintering[J]. ISIJ International,2025,65(1):70-79.

[72] DAI M B, GU B S, MA X X, et al. Nitrogen monoxide reduction by carbon monoxide to combustion control with calcium ferrite redox in iron ore sintering[J]. Fuel,2023,337:127172.

[73] 王一帆. 超厚料层烧结适宜燃料粒度组成的基础研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
WANG Yifan. Basic research on suitable fuel particle size composition for ultra-thick bed sintering[D]. Changsha: Central South University,2023.

[74] GAN M,FAN X H,LV W,et al. Fuel pre-granulation for reducing NO_x emissions from the iron ore sintering process[J]. Powder Technology,2016,301:478-485.

[75] WANG Z C,ZHOU Z A,GAN M,et al. Process control technology of low NO_x sintering based on coke

pretreatment[J]. Journal of Central South University, 2020,27(2):469 – 477.

[76] 张亚鹏,季斌,张晓臣,等. 富氧对烧结过程和烧结矿质量的影响[C]// 第十三届中国钢铁年会论文集. 重庆:中国金属学会,2022.
ZHANG Yapeng, JI Bin, ZHANG Xiaochen, et al. Effect of oxygen enrichment on sintering processand sinter quality[C]// The 13th China Iron and Steel Annual Conference Proceedings. Chongqing: Chinese society for metals,2022.

[77] KANG H, CHOI S, YANG W, et al. Influence of oxygen supply in an iron ore sintering process[J]. ISIJ International,2011,51(7):1065 – 1071.

[78] 张铁梁,吴敏艳,唐新明,等. 韶钢 360 m^2 烧结机富氧烧结试验[J]. 烧结球团,2007,32(4):22 – 24.
ZHANG Tieliang, WU Minyan, TANG Xinming, et al. Industrial sintering test with rich oxygen atmosphere in SHAOGANG 360 m^2 sintering plant[J]. Sintering and Pelletizing,2007,32(4):22 – 24.

[79] 沈小峰. 梅钢富氧烧结技术的研究与应用[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊),2009(10):238.
SHEN Xiaofeng. Research and application of oxygen-enriched sintering technology in Meigang[J]. Management & Technology of SME (Late Monthly Issue),2009(10):238.

[80] 王涛,鲁逢霖,胡容. 酒钢富氧烧结技术的研究与应用[C]// 2011 年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会文集. 唐山:中国金属学会,2011:226 – 228.
WANG Tao, LU Fenglin, HU Rong. Research and application of oxygen-enriched sintering technology at jiugang steel[C]// The 2011 National Symposium on Energy Conservation, Emission Reduction, and Low-Carbon Technology Development in Metallurgy Proceedings. Tangshan: Chinese society for metals,, 2011:226 – 228.

[81] SUN C F, ZHOU X G, LI G, et al. Intensive carbon combustion in sintering packed bed via steam spraying: An experimental study on carbon monoxide emission reduction[J]. Journal of Central South University,2023, 30(3):786 – 799.

[82] WANG Y F, YANG T, WANG H Y, et al. Application of steam injection in iron ore sintering: Fuel combustion efficiency and CO emissions[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2023,30(1):31 – 39.

[83] WU Y F, FAN X H, JI Z Y, et al. Investigation on the application of by-product steam in iron ore sintering: Performance and function mechanism[J]. Environmental Science and Pollution Research,2022,29(41):62698 – 62709.

[84] 裴元东,史凤奎,吴胜利,等. 烧结料面喷洒蒸汽提高燃料燃烧效率研究[J]. 烧结球团,2016,41(6):16 – 20.
PEI Yuandong, SHI Fengkui, WU Shengli, et al. Research on spraying steam on surface of sintering material bed to increase fuel combustion efficiency[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(6):16 – 20.

[85] 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]. Ironand Steel,2020,55(8):11 – 18.

[86] 李乾坤,李国良,殷国富,等. 中天钢铁 550 m^2 烧结机降低 CO 排放研究及实践[J]. 烧结球团,2019, 44(4):70 – 73.
LI Qiankun, LI Guoliang, YIN Guofu, et al. Research and practice of reducing CO emission of Zenith Steel 550 m^2 sinter machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4):70 – 73.

[87] 李树鹏,邱金厚,张永. 包钢 265 m^2 烧结机降低固体燃耗生产实践[J]. 包钢科技,2025,51(1):29 – 32.
LI Shupeng, QIU Jinhou, ZHANG Yong. Productionpractices on reducing solid fuel consumption for 265 m^2 sintering machine of Baotou steel[J]. Science & Technology of Baotou Steel,2025,51(1):29 – 32.

[88] 黄亚蕾,李慧敏,杨帆,等. 高温烧结矿冷却废气余热利用技术分析与发展[J]. 矿业工程,2022,20(6): 56 – 60.
HUANG Yalei, LI Huimin, YANG Fan, et al. Analysis and development of waste heat utilization technologyfor high temperature sintered ore cooling waste gas[J]. Mining Engineering,2022,20(6):56 – 60.

[89] 董辉,林贺勇,张浩浩,等. 烧结热工测试与分析[J]. 钢铁,2011,46(11):93 – 98.
DONG Hui, LIN Heyong, ZHANG Haohao, et al. Thermal test and analysis of sintering cooling system[J]. Ironand Steel,2011,46(11):93 – 98.

[90] 汪磐石,张永忠. 宝钢烧结余热梯级利用及展望[J]. 冶金能源,2019,38(1):46 – 51.

WANG Panshi, ZHANG Yongzhong. Cascade utilization and prospect of waste heatrecovery in sintering of Baosteel[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2019, 38(1):46 – 51.

[91] 冯军胜,裴刚,董辉,等. 烧结冷却废气余热有机朗肯循环发电系统性能分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(2):466 – 473.
FENG Junsheng, PEI Gang, DONG Hui, et al. Performance analysis of organic Rankine cyclepower generation system with sinter cooling gas waste heat[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2019,50(2):466 – 473.

[92] 洪云川,江文豪,冯军胜,等. 烧结环冷机中低温冷却废气 ORC 系统热经济性能分析[J]. 冶金能源,2025,44(4):44 – 49.
HONG Yunchuan, JIANG Wenhao, FENG Junsheng, et al. Thermal-economic performance analysis of ORC systemdriven by medium-low temperature exhaust gas in sintering annular cooler[J]. Energy for Metallurgical Industry,2025,44(4):44 – 49.

[93] 邹忠明. 烧结工程超低排放与节能措施[J]. 工程建设,2019,51(5):63 – 67.
ZOU Zhongming. Ultra-low emission and energysaving measures for sintering project[J]. Engineering Construction,2019,51(5):63 – 67.

[94] 邹振伟,廖立. 宝钢烧结余热回收利用实践[J]. 冶金动力,2024(4):107 – 110.
ZOU Zhenwei, LIAO Li. Practice of sintering waste heat recovery of baosteel[J]. Metallurgical Power, 2024(4): 107 – 110.

[95] 聂惠蒙,高鑫,樊松,等. 480 m^2 烧结余热梯级循环利用研究与应用[J]. 矿业装备,2024(S1):32 – 33.
NIE Huimeng, GAO Xin, FAN Song, et al. Research and application of cascade recycling of 480 m^2 sintering waste heat[J]. Mining Equipment, 2024(S1):32 – 33.

[96] 中冶北方(大连)工程技术有限公司. 烧结矿冷却废气余热梯级利用系统:ZL202123045084.5[P].
Northern Engineering&Technology Corporation, MCC. Cascade utilization system of waste heat from sintered ore cooling gas:ZL202123045084.5[P].

[97] 王忠英. 715 m^2 烧结环冷机零排放系统[J]. 河北冶金,2023(4):62 – 65.
WANG Zhongying. 715 m^2 sintered ring cooler zero emission system[J]. Hebei Metallurgy, 2023(4):62 – 65.

[98] 胡宾生,杜鹤桂,吕德富. 热风烧结研究[J]. 烧结球团,1989,14(6):1 – 7.
HU Binsheng, DU Hegui, LÜ Defu. Study on heat air sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 1989, 14(6): 1 – 7.

[99] 朱德庆,吴浩方. 梅山烧结矿冷却废气热风烧结工艺的研究[J]. 烧结球团,1997,22(5):13 – 17.
ZHU Deqing, WU Haofang. Study on using cooler exhaus gas to realize hot air sintering in Meishan I & S Co. [J]. Sintering and Pelletizing, 1997, 22(5):13 – 17.

[100] 张军红,徐南平,金永龙,等. 宝钢热废气烧结的实验研究[J]. 宝钢技术,1999(2):18 – 22.
ZHANG Junhong, XU Nanping, JIN Yonglong, et al. Experimental research of the hot waste gas sintering in baosteel[J]. Bao Steel Technology, 1999(2):18 – 22.

[101] 郑浩翔. 富氧耦合热风的烧结工艺及机理研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
ZHENG Haoxiang. Research on the process and mechanism of oxygen enrichment coupled hot air sintering[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[102] GAN M, ZHENG H X, FAN X H, et al. Influence of oxygen-rich hot air composite gas medium on sintering performance and function mechanism[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(5): 1071 – 1081.

[103] 王强,王玮,李强,等. 太钢低碳低排放烧结技术研究与应用[J]. 烧结球团,2022,47(1):104 – 111.
WANG Qiang, WANG Wei, LI Qiang, et al. Research and application on low carbon and low emission sintering technology of TISCO[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1):104 – 111.

[104] 徐忠. 烧结机烟气余热利用三种方式的比较[J]. 烧结球团,2015,40(5):48 – 52.
XU Zhong. Comparison of three methods for utilization of flue gas heat of sinter machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(5):48 – 52.

[105] 何赛,胡砚斌,王晋元,等. 烧结机大烟道外置式烟气热回收工程实践[J]. 烧结球团,2017,42(1):45 – 49.
HE Sai, HU Yanbin, WANG Jinyuan, et al. Practice of sintering machine's external heat recovery steam generation project[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(1):45 – 49.

[106] 邓双虎. 安钢3号烧结机烟道余热锅炉系统[J]. 河南冶金,2024,32(4):28-29.
DENG Shuanghu. Angang no. 3 sintering machine flue heat recovery boiler system[J]. Henan Metallurgy, 2024,32(4):28-29.

[107] 高万良,师伟,任春勇. 包钢500 m^2 烧结机高温烟气回收利用实践[J]. 包钢科技,2020,46(6):22-24.
GAO Wanliang, SHI Wei, REN Chunyong. Practice on recycling high temperature flue gas of 500 m^2 sintering machine of Baotou steel[J]. Science & Technology of Baotou Steel,2020,46(6):22-24.

[108] 赵玉会,管立君,韩雷雷. 烧结大烟道烟气余热回收节能效果分析[J]. 冶金能源,2019,38(3):49-51.
ZHAO Yuhui, GUAN Lijun, HAN Leilei. Analysis on energy-saving effect of waste heat recovery of flue gas in large flue gas of sintering[J]. Energy for Metallurgical Industry,2019,38(3):49-51.

[109] 张中中. 柳钢烧结机大烟道余热回收技术应用[J]. 冶金能源,2019,38(4):39-40.
ZHANG Zhongzhong. Application of large flue waste heat recoverytechnology in sintering machine of Liuzhou iron and steel company[J]. Energy for Metallurgical Industry,2019,38(4):39-40.

[110] 王学敏,梁桂梅,王洪军. 烧结大烟道余热利用节能实践[J]. 冶金动力,2017(4):14-15.
WANG Xuemin, LIANG Guimei, WANG Hongjun. Energy saving practice of utilizing waste heat from sinter flue[J]. Metallurgical Power,2017(4):14-15.

[111] 刘立新,戚义龙,王宏元. 马钢380 m^2 烧结机烟道余热利用实践[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2017,27(2):57-60.
LIU Lixin, QI Yilong, WANG Hongyuan. Application of residual heat from masteel 380 m^2 sintering machine's flue[J]. Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology,2017,27(2):57-60.

[112] FAN X H, YU Z Y, GAN M, et al. Influence of O_2 content in circulating flue gas on iron ore sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2013, 20(6):1-6.

[113] FAN X H, YU Z Y, GAN M, et al. Appropriate technology parameters of iron ore sintering process with flue gas recirculation[J]. ISIJ International, 2014, 54(11):2541-2550.

[114] FAN X H, YU Z Y, GAN M, et al. Combustion behavior and influence mechanism of CO on iron ore sintering with flue gas recirculation[J]. Journal of Central South University,2014,21(6):2391-2396.

[115] CHEN X L, HUANG Y S, GAN M, et al. Effect of H_2O (g) content in circulating flue gas on iron ore sintering with flue gas recirculation[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2015,22(12):1107-1112.

[116] FAN X H, YU Z Y, GAN M, et al. Elimination behaviors of NO_x in the sintering process with flue gas recirculation[J]. ISIJ International, 2015, 55(10): 2074-2081.

[117] YU Z Y, FAN X H, GAN M, et al. NO_x Reduction in the iron ore sintering process with flue gas recirculation [J]. JOM,2017,69(9):1570-1574.

[118] YU Z Y, FAN X H, GAN M, et al. Reaction behavior of SO_2 in the sintering process with flue gas recirculation [J]. Journal of the Air & Waste Management Association,2016,66(7):687-697.

[119] FAN X, YU Z, GAN M, et al. Mineralisation behaviour of iron ore fines in sintering bed with flue gas recirculation[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(9):712-719.

[120] 范晓慧,甘敏,季志云,等. 复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用[J]. 钢铁,2020,55(8):62-69.
FAN Xiaohui, GAN Min, JI Zhiyun, et al. Development and application of techniques for energy conservation and emission reduction during sintering process based on multiple-component gases medium[J]. Iron & Steel, 2020,55(8):62-69.

[121] LI C Q, HAN Q Z, ZHU T Y, et al. Radical-dominated reaction of CO-NO on a $CaFe_2O_4$ surface in sintering flue gas recirculation[J]. RSC Advances, 2020, 10(39):23491-23497.

[122] LI C Q, HAN Q Z, ZHU T Y, et al. Catalytic NO reduction by CO over Ca-Fe oxides in the presence of O_2 with sintering flue gas circulation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(47): 20624-20629.

[123] LI C Q, LIU G R, QIN S, et al. Emission reduction of PCDD/Fs by flue gas recirculation and activated carbon in the iron ore sintering[J]. Environmental Pollution, 2023,327:121520.

[124] ZHU T Y, WANG X, LI C Q, et al. Numerical simulation of CO emission in a sintering pot under flue gas recirculation[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,452:139069.

[125] ZHU T Y, LIU X L, WANG X D, et al. Technical development and prospect for collaborative reduction of pollution and carbon emissions from iron and steel industry in China[J]. Engineering,2023,31:37 – 49.

[126] AHN H,CHOI S,CHO B. Process simulation of iron ore sintering bed with flue gas recirculation[J]. Ironmaking & Steelmaking,2013,40(2):120 – 127.

[127] WANG G, WEN Z, LOU G F, et al. Mathematical modeling and combustion characteristic evaluation of a flue gas recirculation iron ore sintering process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2016, 97:964 – 974.

[128] WANG G, WEN Z, LOU G F, et al. Mathematical modeling of and parametric studies on flue gas recirculation iron ore sintering[J]. Applied Thermal Engineering,2016,102:648 – 660.

[129] ZHANG X H, FENG P, XU J R, et al. Numerical research on combining flue gas recirculation sintering and fuel layered distribution sintering in the iron ore sintering process[J]. Energy,2020,192:116660.

[130] 王淦. 废气循环烧结质热传输过程数值模拟及其应用[D]. 北京:北京科技大学,2017.
WANG Gan. Mathematical modeling of the heat and mass transfer in flue gas recirculation sintering and its application[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2017.

[131] 张志刚,郑绥旭,丁志伟. 烧结烟气循环技术工业化应用概述[J]. 中国冶金,2016,26(7):54 – 57.
ZHANG Zhigang, ZHENG Suixu, DING Zhiwei. Overview of industrial application of sintering flue gas recirculation technology[J]. China Metallurgy, 2016, 26(7):54 – 57.

[132] 李惠莹,王浩,金保昇. 浅谈烟气循环烧结工艺的发展现状及趋势[J]. 烧结球团,2018,43(1):61 – 65.
LI Huiying, WANG Hao, JIN Baosheng. Development status and trend of flue gas recirculation sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(1): 61 – 65.

[133] 徐慧如,高培程,朱旺,等. 首钢股份 2#烧结烟气内循环单因素试验及应用实践[J]. 矿业工程,2023, 21(2):48 – 51.
XU Huiru, GAO Peicheng, ZHU Wang, et al. Single factor test and application practice of internal circulation of 2# sintering flue gas of Beijing Shougang Co., Ltd [J]. Mining Engineering,2023,21(2):48 – 51.

[134] 王新东,王冠翔,李超群,等. 烧结烟气高比例循环技术研究进展与河钢实践[J]. 钢铁,2025,60(2): 1 – 10.
WANG Xindong,WANG Guanxiang,LI Chaoqun,et al. Research progress and practice of HBIS on high proportion circulation technology of sintering flue gas [J]. Iron & Steel,2025,60(2):1 – 10.

[135] FAN X H, HUANG X X, CHEN X L, et al. Research and development of the intelligent control of iron ore sintering process based on fan frequency conversion [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(7):488 – 493.

[136] 赵小青. 大数据技术下的烧结机烧结终点优化控制研究[D]. 唐山:华北理工大学,2021.
ZHAO Xiaoqing. Research on optimal control of sintering end point of sintering machine based on big data technology[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2021.

[137] HUANG X X, FAN X H, CHEN X L, et al. Bed permeability state prediction model of sintering process based on data mining technology[J]. ISIJ International, 2016,56(12):2113 – 2117.

[138] YAN F, YANG C J, ZHANG X M, et al. A 3-D convolution-based burn-through point multistep prediction model for sintering process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 4219 – 4229.

[139] YAN F, YANG C J, ZHANG X M, et al. BTPNet: A probabilistic spatial-temporal aware network for burn-through point multistep prediction in sintering process [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2025,36(5):9032 – 9043.

[140] CHI Z W, CHEN X X, XIA H Z, et al. An adaptive control system based on spatial-temporal graph convolutional and disentangled baseline-volatility prediction of bellows temperature for iron ore sintering process[J]. Journal of Process Control, 2024, 140: 103254.

[141] 范晓慧,庄戴鸿,周茂军,等. 基于卷积神经网络和

时间序列的烧结终点长期预测[J]. 钢铁研究学报,2025,37(11):1437 – 1445.
FAN Xiaohui,ZHUANG Daihong,ZHOU Maojun,et al. Long-term prediction of burn-through point based on convolutional neural network and time series[J]. Journal of Iron and Steel Research,2025,37(11):1437 – 1445.

[142] 赵小青,刘颂,王丰,等. 基于大数据技术的烧结终点优化控制[J]. 中国冶金,2021,31(7):77 – 82.
ZHAO Xiaoqing, LIU Song, WANG Feng, et al. Optimization control of sintering end point based on big data technology[J]. China Metallurgy,2021,31(7):77 – 82.

[143] DU S,WU M,CHEN L F,et al. A fuzzy control strategy of burn-through point based on the feature extraction of time-series trend for iron ore sintering process[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2020,16(4):2357 – 2368.

[144] 黄晓贤. 铁矿烧结过程能耗优化模型与智能控制系统的研究与开发[D]. 长沙:中南大学,2018.
HUANG X X. Research and development of energy optimization model and intelligent control system for iron ore sintering process[D]. Changsha: Central South University,2018.

[145] ZHOU P,GAO B H,ZHAO C H,et al. Heterogeneous data-driven measurement method for FeO content of sinter based on deep learning and tensor decomposition [J]. Control Engineering Practice,2023,134:105479.

[146] JIANG B Y,GAO B H,ZHOU P. Prediction of FeO content in sintering process based on knowledge distillation[C]//2023 5th International Conference on Industrial Artificial Intelligence. Piscataway: IEEE,2023:1 – 6.

[147] YANG C,YANG C J,ZHANG X M,et al. Multisource information fusion for autoformer:Soft sensor modeling of FeO content in iron ore sintering process[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2023,19(12):11584 – 11595.

[148] ZHANG N,CHEN X L,HUANG X X,et al. Online measurement method of FeO content in sinter based on infrared machine vision and convolutional neural network[J]. Measurement,2022,202:111849.

[149] WANG B,YANG B,SHENG J F,et al. An improved neural network algorithm and its application in sinter cost prediction[C]//2009 Second International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining. Piscataway:IEEE,2009:112 – 115.

[150] WANG S H,LI H F,ZHANG Y J,et al. A hybrid ensemble model based on ELM and improved AdaBoost. RT algorithm for predicting the iron ore sintering characters[J]. Computational Intelligence and Neuroscience,2019,2019:4164296.

[151] HU J,WU M,CHEN X,et al. Hybrid modeling and online optimization strategy for improving carbon efficiency in iron ore sintering process[J]. Information Sciences,2019,483:232 – 246.

[152] ZHOU K L,CHEN X,CAO W H. Optimization method for carbon efficiency in the green manufacturing of sinter ore and its application[C]//2018 37th Chinese Control Conference. Piscataway:IEEE,2018:3464 – 3468.

[153] 匡朝辉,范晓慧,赵利明,等. 烧结矿FeO含量在线智能检测系统开发与应用[J]. 烧结球团,2023,48(6):157 – 163.
KUANGZhaohui, FAN Xiaohui, ZHAO Liming, et al. Development and application of online intelligent detection system for FeO content of sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(6):157 – 163.

[154] SINGH K,VAKKANTHAM P,NISTALA S H,et al. Multi-objective optimization of integrated iron ore sintering process using machine learning and evolutionary algorithms[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2020,73(8):2033 – 2039.

[155] YUAN Y X,SUN J C,ZHANG L,et al. Intelligent optimization and impact analysis of energy efficiency and carbon reduction in the high-temperature sintered ore production process[J]. Materials,2024,17(22):5410.

[156] LI Z P,FAN X H,CHEN G,et al. Optimization of iron ore sintering process based on ELM model and multi-criteria evaluation[J]. Neural Computing and Applications,2017,28(8):2247 – 2253.