球团绿色化智能化新技术与新工艺研究进展

范晓慧，甘 敏，陈许玲，冯振湘，孙增青
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：球团法作为炼铁炉料加工的主要工艺，兼具能耗低和产品性能好等优势，是未来炼铁炉料发展的重要方向。本文综述了球团生产过程中的绿色化与智能化技术进展。首先，分析球团焙烧工艺的发展趋势，总结复杂原料条件下的预处理技术和优化配矿技术，以及酸性球团、碱性球团、护炉球团等多品种球团制备技术的研究现状；其次，讨论低碳焙烧技术的最新进展，特别介绍了清洁能源替代、低 NO_x 燃烧和嵌入式节能环保方面的技术突破；最后，探讨基于数字孪生和大数据驱动的智能化赋能技术，包括全流程的智能感知、精准预测与闭环优化控制。本文通过梳理和评估三大技术领域，旨在为球团生产的绿色转型与智能升级提供技术路径，并展望未来方向，从而为推动行业的高端化、绿色化、智能化发展提供实践指导。

关键词：氧化球团；低温焙烧；低氮燃烧；嵌入式脱硝；热工模拟；智能控制
中图分类号：TF046.6；X701 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0025－24
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.002

Research progress on new technologies and processes for green and intelligent pelletizing

FAN Xiaohui, GAN Min, CHEN Xuling, FENG Zhenxiang, SUN Zengqing
(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: As a main technology of processing ironmaking furnace burden, pelletizing has advantages such as low energy consumption and high product quality, and is an important direction for development of ironmaking furnace burden in future. This paper reviews the technical progress in greening and intellectualizing the pellet production process. Firstly, it analyzes the development trends of pellet roasting processes, summarizing pretreatment technologies and optimized ore blending techniques under conditions of complex raw materials, as well as the research status of preparation technologies for various pellet types, including acid pellets, basic pellets, and hearth-protecting pellets. Secondly, it discusses the latest developments in low-carbon roasting technologies, with a special introduction to technological breakthroughs in clean energy substitution, low-NO_x combustion, and embedded energy-saving and environmental protection measures. Finally, it discusses intelligent empowering technologies based on digital twins and drive by big data, including intelligent sensing across the entire process, precise prediction, and closed-loop optimization control. By reviewing and evaluating these three major technological areas, this paper aims to provide technological pathways for the green transformation and intelligent upgrade of pellet production, and to look forward to future directions, thereby providing practical guidance for promoting the high-end oriented, greening, and intelligentizing development of the industry.

Key words: oxidized pellets; low-temperature roasting; low-nitrogen combustion; embedded denitrification; thermal simulation; intelligent control

收稿日期：2026－02－07；**修回日期**：2026－02－12
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2023YFC3707002)
作者简介：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。

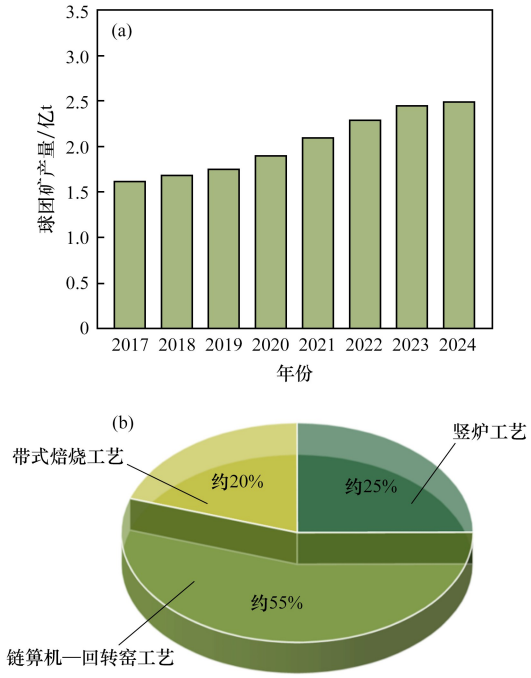
球团法作为钢铁炉料加工的主要工艺，具有加工能耗低、产品含铁品位高、强度好、冶金性能优良等显著优势。球团矿既是长流程炼铁的重要原料，也是短流程炼铁的主要原料，具有广阔的发展前景。球团相比烧结工艺，在环境方面具有明显优势，其工序能耗约为烧结工序的 50%，污染物的排放比烧结工序低 45% 以上，CO_2 排放比烧结工序低 65%。因此，在国家超低排放和“双碳”背景下，大力发展球团产业，对高炉高配比球团冶炼和以球团为主要原料的氢冶金短流程冶炼具有重要支撑作用，对降低钢铁冶炼的碳排放意义重大。

随着钢铁工业“双碳”战略的深入实施，球团绿色化与智能化发展已成为提高能效、降低排放、提升产品质量的核心技术路径。新时期球团生产过程面临原料质量波动、复杂的热工条件以及排放控制等多重挑战。为了应对这些挑战，行业正在推动基于工艺革新、能源替代、数字化转型等多维度的技术升级。基于此，本文系统综述球团绿色化、智能化领域的新技术与新工艺进展：首先梳理主流焙烧工艺流程及复杂原料条件下的预处理技术和优化配矿技术；其次总结低碳焙烧与 NO_x 全过程控制的关键技术路线及其研究和应用进展；最后讨论数值模拟、质量预测与智能控制在球团热工过程中的应用现状与挑战，并展望球团智能化发展的方向，为球团工艺的绿色转型与智能化升级提供理论支持与实践指导。

1 铁矿球团发展概述

1.1 球团工艺与装备发展趋势

近年来我国球团矿产量变化趋势及主要生产工艺产能占比如图 1 所示。由图 1 可知，随着钢铁行业低碳转型持续深化，作为炼铁优质炉料的球团矿产量逐年增加，年产量已达 2.3 亿 t 以上[1]。目前球团生产工艺主要竖炉工艺、链算机—回转窑工艺与带式焙烧机工艺；竖炉工艺因单机生产能力受限，难以满足当前我国大型高炉对原料的要求，占比已降至约 25%；链算机—回转窑工艺的原料适应性较好，球团焙烧均匀，是当前我国球团生产的主导工艺，产能占比约为 55%。从球团工艺结构整体看，链算机—回转窑工艺仍将在一段时期内担当产能主体。带式焙烧机工艺具有原料适用范围广、单机产能大与自动化水平高等优势，且不存在结圈问题[2]。虽然目前带式焙烧机仅占球团产能的 20% 左右，但发展迅速，占比在不断的提升。



（a）球团矿产量；（b）生产工艺占比

图 1 近年我国球团矿产量及主要球团生产工艺产能占比

Fig. 1 Recent output of pellets in China and proportion of capacity for main pellet process

在近年新建的球团生产线中，有越来越多企业选择带式焙烧机工艺，如表 1 所示。由表 1 可知，自 2020 年以来，80% 以上的新增产能为带式焙烧机工艺。带式焙烧机凭借其可生产多元化球团的技术与产能优势，是未来球团产能扩容与升级的主导方向。

在技术发展方向上，链算机—回转窑工艺和带式焙烧机工艺仍需进一步推进燃料结构优化、超低排放改造与智能化升级[3]。此外，对于链算机—回转窑工艺，如何降低回转窑结圈风险，保证不同原料结构下的稳定运行，也是需要解决的问题。而带式焙烧机工艺在实现设备大型化与成套装备国产化后，如何进一步提升热效率、改善球团质量的均匀性等是未来研究的重要方向。

表 1　近年我国部分新增球团生产线情况

Table 1　The situation of some new pellet production lines in China in recent years

投产年份	企业(年产能)	工艺类型
2020	河钢乐亭[(2×480)万 t/a]、柳钢防城港(400 万 t/a)	带式焙烧机
2021	敬业集团(200 万 t/a)	链箅机—回转窑
2021	宝钢马钢股份(400 万 t/a)	带式焙烧机
2022	昆钢(260 万 t/a)、南钢(400 万 t/a)、中天钢铁(300 万 t/a)、广西盛隆冶金(300 万 t/a)、攀钢西昌钢钒(300 万 t/a)	带式焙烧机
2023	阳春新钢铁(120 万 t/a)	链箅机—回转窑
2023	青岛邦拓(400 万 t/a)、玉溪玉昆钢铁(360 万 t/a)、首钢迁钢(400 万 t/a)、建龙西钢(400 万 t/a)	带式焙烧机
2024	鞍钢矿业(400 万 t/a)、承德兆丰钢铁[(2×260+480)万 t/a]	带式焙烧机
2025	方大达钢(200 万 t/a)	带式焙烧机
2025	河钢邯钢(200 万 t/a)	链箅机—回转窑
建设中	唐山瑞丰钢铁(170 万 t/a)、攀枝花晟友钒钛(400 万 t/a)、武安冀南钢铁(270 万 t/a)	带式焙烧机
建设中	武安冀南钢铁(150 万 t/a)	链箅机—回转窑

除上述 3 种工艺外，环形焙烧机工艺与钢带焙烧机工艺具有设备布置紧凑、占地面积小、原料适应性强的优点，可满足竖炉工艺淘汰后中小型规模球团生产的需求。其中，环形焙烧机工艺适用于 30～120 万 t/a 的球团生产。印度 Pro 矿物公司建设了世界上第一台环形球团设备，设计产能为 120 万 t/a，采用赤铁矿精粉生产球团，占地仅为传统球团设备的 50%。钢带焙烧机工艺投资与运行成本低、热效率高，在 200 万 t/a 以下的铁矿球团生产中展现出良好的应用潜力[4]。然而，其规模化应用仍需在钢带耐高温腐蚀性能、设备密封与风流系统稳定性等方面开展进一步研究。

1.2　球团含铁原料预处理与配矿技术研究进展

随着球团矿产量的提高，中高品位磁铁精矿与赤铁精矿等优质铁矿资源日益匮乏，球团用含铁原料呈现多元化趋势。在此条件下，高硅铁精矿、钒钛磁铁矿、海砂矿、镜铁矿、褐铁矿以及其他烧结用粗粒铁矿粉等复杂铁矿资源的配比逐渐增加[5-8]。然而，采用几种乃至十余种矿的多元含铁原料生产球团时，由于不同铁矿资源在粒度组成、颗粒形貌、比表面积与成球性能等物理性质方面的差异显著，以及 SiO_2、Al_2O_3、TiO_2及碱金属等脉石与杂质组分的波动更大，使得球团成球与热处理过程更难控制，影响工序稳定运行与产品质量。因此，实现多元化原料条件下的球团稳定生产，需要进一步发展适用于不同矿种特征的预处理技术与配矿方法，改善其成球与焙烧性能，形成适用于多元含铁原料体系的球团制备关键技术。

1.2.1　含铁原料预处理技术

由于海砂矿、镜铁矿与褐铁矿等复杂铁矿资源粒度粗，比表面积小，直接将其用于球团生产会对工艺过程与产品质量造成不利影响。预处理可有效改善含铁原料物理性质，提高其成球与焙烧性能，主要包括球磨、润磨、高压辊磨(HPGR)以及这些方法的联合工艺。其中，球磨预处理适用于需大幅提高细粒级含量的含铁原料，但存在处理时间长和能耗高的问题。润磨主要用于改善磁铁精矿与赤铁精矿的成球性与焙烧性能，但处理能力受限，且不适用于镜铁矿等坚硬矿石的预处理。高压辊磨单机处理能力大、能量利用率高、原料适应性强且具有选择性破碎的特点，得到的颗粒往往沿不同矿物的晶界断裂。同时，颗粒形状更加不规则，粒径分布更宽，有利于形成更紧密的球团结构[9]。相较于其他两种预处理工艺，高压辊磨技术是当前球团原料预处理技术发展的重要方向。

目前，钒钛磁铁矿在球团制备过程中主要采用高压辊磨进行预处理，可显著提高球团质量，降低焙烧温度。这主要是由于高压辊磨能够改善钒钛磁铁矿颗粒表面性质、增加微细粒含量与比表面积、促进晶体活化与提高机械储能，如图 2 所示[10-11]。采用高压辊磨对海砂矿和镜铁矿进行

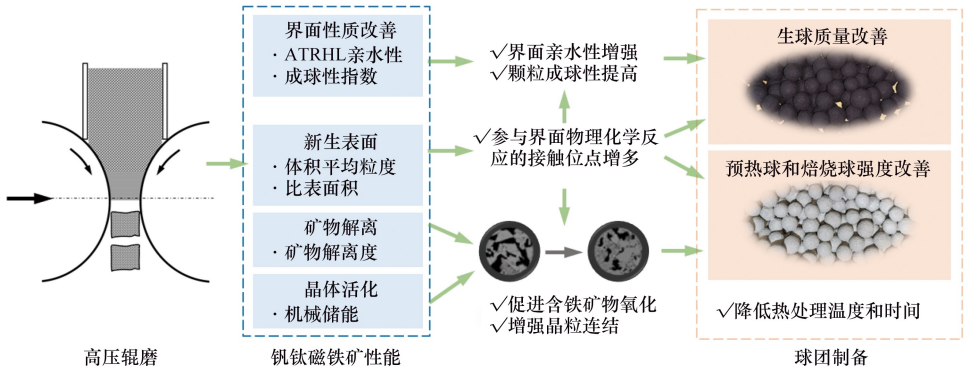


图 2 HPGR 预处理强化钒钛磁铁矿球团制备的机理[10]

Fig. 2 Mechanism of VTM pellets strengthened by HPGR pretreatment

预处理时，也能取得良好的效果，可显著提高球团质量，降低焙烧温度[12-13]。此外，选取适宜的辊磨参数是实现高效活化的关键。辊磨压力过低会导致机械活化效果变差，而辊磨压力过高时能量利用率降低，并且大幅缩短辊面寿命。适宜的给料水分能够增强颗粒间的毛细力，提高料层在层压粉碎过程的抵抗应力，有利于辊面压力的作用与转递，改善机械活化效果。但过高的水分会导致高压辊磨处理能力降低以及机械活化效率下降等问题[14-15]。

将烧结用粗粒铁矿粉用于球团生产是近年来的研究热点，由于其粒度较粗，目前多采用球磨或球磨 + 高压辊磨的联合预处理工艺，取得了良好的应用效果。目前的研究主要是将巴西卡粉、巴西混合粉、托克粉、麦克粉等粗粒矿粉细磨至 0.074 mm 以下占比约 80% 后，用于球团生产，在细磨矿粉配比不超过 40% 左右时球团指标可满足要求[16]。其中，李兴旺等[17]以 25% 湿磨褐铁矿搭配 75% 磁铁精矿实现了零膨润土成球，焙烧球强度可达 2 445 N/P。针对湿式球磨后矿粉难沉降、过滤阻力大与滤饼水分高的问题，可通过优化富矿粉种类与配比改善细磨后矿粉的沉降与过滤性能[18]，同时采用干法球磨替代湿磨也取得了较好的效果[19]。南钢通过动态干燥 - 立式辊磨一体化的立式干磨预处理技术，使粗铁矿粉在热介质与机械力作用下实现表面活性和表面能的显著提高，工艺流程如图 3 所示。经立式干磨预处理得到的矿粉可同样替代膨润土，实现无黏结剂球团生产[20]。此外，考虑到采用细磨工序处理粗粒矿粉能耗较大且效率低，有研究提出可采用两段高压辊磨对粗粒铁矿粉进行处理，然后筛分出 1 mm 以下粒级用于球团制备，当矿粉配比为 30% 时球团强度仍可满足生产要求[21]。

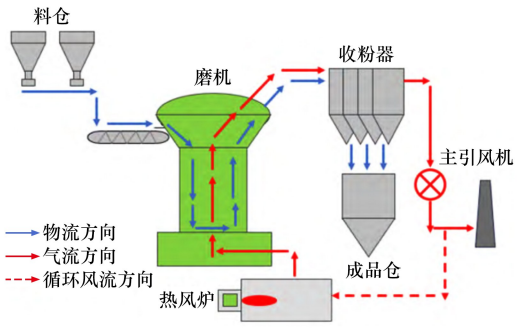


图 3 立式干法磨矿工艺流程示意[20]

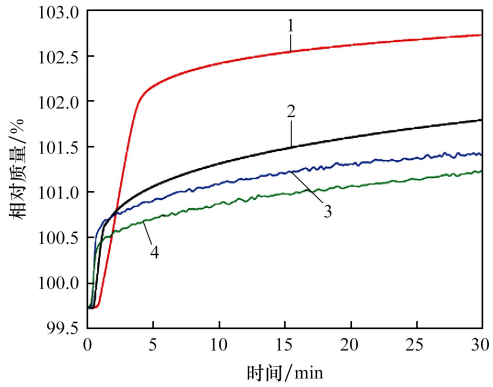
Fig. 3 Schematic diagram of dry grinding process

目前预处理工艺与参数的选取仍依赖于对特定矿种的经验性总结与实验规律，缺乏系统性的理论基础与普适性的指导。未来有必要深入开展“原料特性—预处理工艺参数—机械活化效果”之间内在关联机制的研究，为实现多元含铁原料低成本高效制备球团提供理论依据与技术支撑。

1.2.2 优化配矿技术

面对球团生产日趋复杂的原料体系，优化配矿不仅能节省用料成本，还能改善难处理铁矿资源的成球性和焙烧性能。刘吉涛等[22]通过优化巴润矿、大堆料和巴润精矿三种铁精矿的配比，有效提高了预热球和焙烧球强度，可减少回转窑内粉末，降低结圈风险。何晓义等[23]通过配加高硅赤铁矿、高镁磁铁矿并优化其配比，改善了白云鄂博铁精矿球团强度，并且降低了球团还原膨胀率。然而，上述研究主要是针对特定原料开展的配矿优化。在此基础上，有必要进一步探索具有

普适性的配矿原则或方法。研究表明，将不同粒度铁精矿按配比混合，可在不改变工艺流程的前提下使铁精矿粉的粒度组成更加合理，改善生球性能[24]。另一些研究指出适量的中粗粒级颗粒在造球过程中具有“球核”与“骨架”作用，有助于保障球团内孔隙合理性。而小于44 μm 的细粒氧化速率更快且氧化更为充分，有利于 Fe_2O_3 再结晶与强度形成，如图 4 所示。增加细粒级配比通常有利于提高成品球团强度，但细粒级过量会阻碍氧化进程并导致球团质量降低。将粒度小于44 μm的颗粒质量分数控制在 60%～70%，有利于促进球团均匀氧化、提高固结强度，球团综合质量最优[25-26]。



1—[0,0.044）mm；2—[0.044,0.054）mm；
3—[0.054,0.064）mm；4—[0.064,0.074] mm。

图 4　950 ℃下不同粒级磁铁矿氧化的热重曲线[26]

Fig. 4　Thermogravimetric curves of magnetite powders of different grain sizes at 950 ℃

在优化配矿系统方面，陈金鸿等基于遗传算法建立了球团矿配料寻优模型，将抗压强度、黏结率的实测值与预测值之差作为寻优目标，查明了原料中 Ca 含量、二元碱度、三元碱度与球团矿抗压强度、黏结率之间的相关性，并以此实现配料优化[27]。而东北大学储满生团队开发的多重机器学习智能配矿系统基于原料的化学成分、粒度组成、比表面积、静态成球性等关键参数，通过智能关联性分析算法，探究了操作和原料因素对球团质量的影响，揭示了球团质量与原料性能的线性、非线性、分段特征及高维度模糊关联[28]。研究结果表明，基于算法构建的配矿优化模型，可获得满足性能指标并具备成本效益的最佳配矿方案，实现资源高效利用与成本降低。

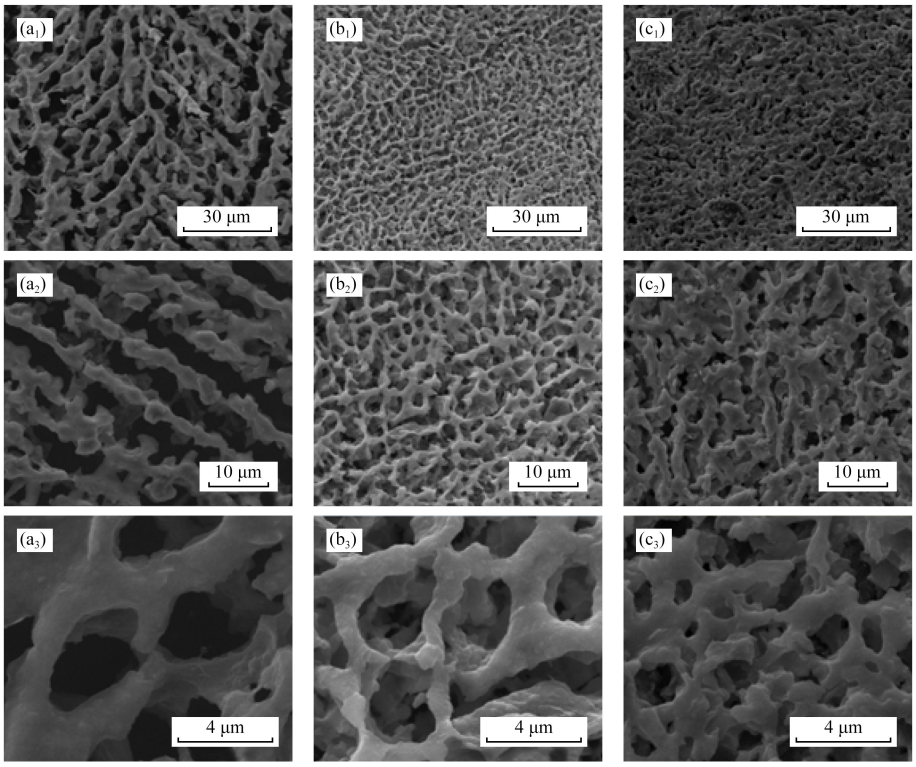
综上所述，现有的配矿技术主要是基于原料物理性质与化学成分，根据优劣互补原则来进行的，取得了一定的效果。但不同含铁原料的氧化固结特性，如氧化速率与颗粒间固结连晶强度等因素尚未纳入考虑。此外，进一步开发数据与机理深度融合的智能配矿系统，并且开展“原料—球团—炼铁”一体化配矿，将是未来球团配矿的重要发展方向。

1.3　多品种球团矿制备技术研究进展

1.3.1　酸性球团

高 TFe、低 SiO_2 酸性球团的强度好，还原性能和软熔性能优，是目前酸性球团的主要发展方向。除了使用优质含铁原料外，减少或替代膨润土的使用也是提高球团 TFe 品位的有效途径。通过对膨润土进行钠化改性、有机复配或有机改性，可将膨润土用量降低至 1% 左右[29]。相较于膨润土，有机黏结剂可以在用量更低的条件下制备出生球指标满足要求的球团，主要包括 CMC 类、淀粉类、聚丙烯酰胺类以及腐殖酸类。有机黏结剂基本不含硅，在球团干燥预热过程烧损达 90% 左右，对球团铁品位影响很小，但同时也导致预热球强度较低。并且，大多有机黏结剂使用成本较高。因此，在我国以链箅—回转窑为主的球团工艺结构下，一直未得到广泛应用。

近年来，随着带式焙烧机的快速发展，有机黏结剂在球团生产中的应用也得到越来越多关注。鞍钢集团的生产实践表明，采用 0.6%～0.8% 的复合黏结剂替代配比为 1.5% 的膨润土在带式焙烧机中生产球团矿，可在保证成品球强度和生产稳定的前提下，将铁品位提高 0.58%[30]。中南大学姜涛院士团队开发的煤基胶体型复合黏结剂具有易分散、用量低的优点，可用于高品位铁矿球团以及钒钛磁铁矿球团制备，其微观形貌如图 5 所示[图中 η_a 代表物质的表观黏度，mPa·s;1 s^{-1} 代表剪切速率为 1 每秒(1/s)；$\eta_a^{1\,s^{-1}}$ 代表在剪切速率为1 s^{-1} 条件下，该物质的黏度，mPa·s]。目前，已在攀枝花钢城集团有限公司建立全球首条 20 万 t/a 胶体型复合黏结剂示范生产线，能够满足西南地区 2 000 万 t/a 球团产能对黏结剂的需求[31]。开发低成本、低配加量、原料适用性强的新型有机黏结剂是目前酸性球团技术的重要发展方向。



$(a_1)\sim(a_3)\eta_a^{1\,s^{-1}}=2\,400$ mPa·s；$(b_1)\sim(b_3)\eta_a^{1\,s^{-1}}=9\,600$ mPa·s；$(c_1)\sim(c_3)\eta_a^{1\,s^{-1}}=80\,000$ mPa·s

图5 煤基胶体型复合黏结剂冷冻电镜[31]

Fig. 5 Cryo-SEM images of coal-based colloidal composite binder

1.3.2 镁质球团

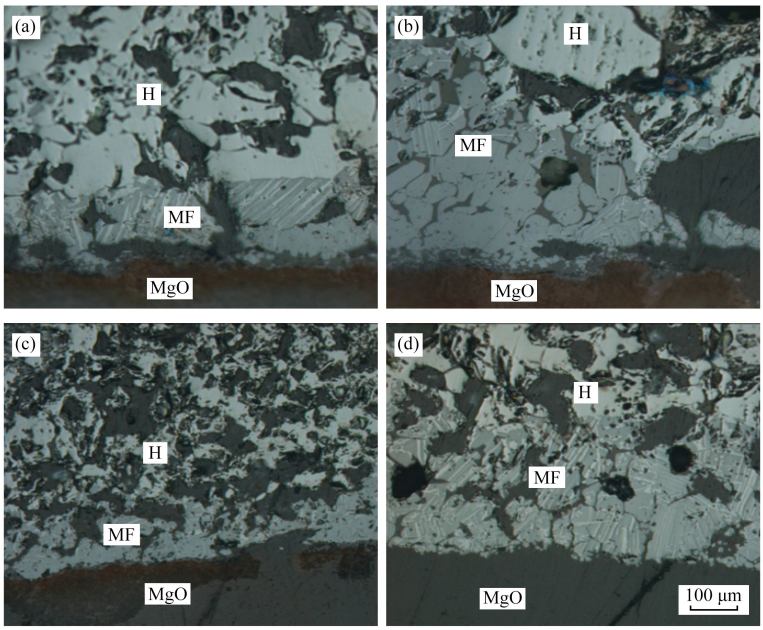
高炉冶炼需要将炉渣中 MgO 质量分数控制在10%~12%，以达到较优的冶炼效果。随着球团矿入炉配比的增加，提高球团中 MgO 含量是未来球团生产的必然趋势。基于此，针对 MgO 粉、菱镁石、蛇纹石、高镁磁铁矿、镁橄榄石、白云石以及镁质复合黏结剂等不同含镁添加剂制备镁质球团已开展了大量研究。结果表明，无论使用何种添加剂，提高球团中 MgO 配比均会降低预热球和焙烧球抗压强度。并且，随着 MgO 含量升高，球团适宜焙烧温度和适宜焙烧时间区间均变窄，生产操作难度加大。但镁质复合黏结剂对生球强度的不利影响最小，高镁磁铁矿对预热球强度的不利影响最小，白云石对焙烧球强度的不利影响最小，并且配加高镁磁铁矿制备的球团的还原膨胀性和低温还原粉化性更优[32]。

研究和实践表明，添加含钙熔剂制备低碱度镁质球团，或添加含硼物质是强化镁质球团固结的有效措施[33-34]。这是由于含钙和含硼物质形成的低熔点液相可以显著提高 Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 的迁移能力，促进熔剂矿化和赤铁矿晶粒连接，从而提高球团强度，如图6所示。首钢京唐通过配加2%硼铁矿或1%硼泥，在降低镁质球团焙烧温度的同时提高球团强度。当焙烧温度为1 250 ℃时，采用橄榄石和镁粉制备的镁质球团矿抗压强度仍可达2 700 N/P 以上，显著降低了工序能耗。武钢通过配加10%硼镁铁精矿生产 MgO 质量分数为1.26%的镁质球团。工业试验结果表明，配加硼镁铁矿生产的镁质球团强度好，可满足高炉生产要求。

1.3.3 熔剂性球团

熔剂性球团是指在混合料中添加含 CaO 熔剂生产的球团。添加既含钙又含镁熔剂制备的球团矿称为镁质熔剂性球团。发展熔剂性球团技术是实现高炉大球比冶炼的基础，近年来炼铁工作者在熔剂性球团固结机理、添加剂种类以及生产工艺方面开展了大量工作[35]。

研究表明，添加钙质熔剂制备的球团在焙烧时会生成液相，随着钙质熔剂用量的增加，含钙物相由含钙硅酸盐向铁酸钙转变，球团强度逐渐升高[36]。但球团中过量的液相也会破坏球团结



（a）磁铁精矿与 MgO 试剂扩散耦；（b）磁铁精矿添加石灰石 $R=0.3$ 与 MgO 试剂扩散耦；
（c）赤铁精矿与 MgO 试剂扩散耦；（d）赤铁精矿添加石灰石 $R=0.3$ 与 MgO 试剂扩散耦
H—赤铁矿；MF—铁酸镁。

图 6　碱度对镁离子扩散的影响[34]

Fig. 6　Influence of basicity on magnesium ionic diffusion

构[37]，使得球团强度下降，因此钙质熔剂用量不宜过高。钙质熔剂种类也是影响焙烧球强度的重要因素。常用的钙质熔剂有生石灰、石灰石和白云石。与石灰石和白云石相比，以生石灰为熔剂的球团中次生赤铁矿晶粒较大、连接更紧密，因而具备更高的抗压强度。首钢在生产实践中采用氢氧化钙代替碳酸钙制备熔剂性球团，由于氢氧化钙在较低的温度区间快速分解脱除，为高温区间磁铁矿氧化创造了良好的动力学条件，采用氢氧化钙制备的预热球和焙烧球强度更高。结合低水造球、干燥制度优化等措施，可在焙烧温度降低 30 ℃的条件下使球团强度仍保持在 3 200 N/P 以上。此外，针对中高硅熔剂性球团，需进一步评估不同碱度与 MgO 含量下球团的液相生成特性。

采用链算机—回转窑工艺生产熔剂性球团时面临回转窑易结圈的问题。范晓慧等[38]的研究表明，入窑粉末量以及粉末中低熔点物质与碱金属含量是影响回转窑结圈的关键。潘建等[39]通过优化链算机干燥预热制度提高预热球强度，改善燃料质量，优化燃料粒度、喷吹位置与喷吹量等措施抑制结圈形成，并结合窑头窑尾红外测温与窑壳红外三维测温模型，实现结圈早期识别与及时处置，延长结圈周期、提升作业率。相较于链算机—回转窑球团工艺，带式焙烧机更适用于生产熔剂性球团。例如，河钢唐钢新区开展的中高硅熔剂性球团生产取得了良好的应用效果，具有很好的发展前景和应用价值。

1.3.4　护炉球团

采用含钛球团护炉是当前高炉最简便有效的护炉方法。目前生产护炉球团所用钛矿主要是钒钛磁铁矿、钛精矿与海砂矿等。例如，鞍钢采用 8% 的海砂矿生产 TiO_2 质量分数为 0.91% 的低钛球团进行护炉冶炼，重钢采用钒钛磁铁矿与钛精矿制备 TiO_2 质量分数为 18% 的高钛型护炉球团矿[40]。从护炉角度看，高钛型护炉球团矿产品附加值更高，应用范围广，除预防性护炉外，还可用于炉缸侵蚀严重时的强效护炉。生产高钛型护炉球团矿需要大幅提高球团中钛矿配比。然而，钒钛磁铁矿、钛精矿与海砂矿等钛矿成球性能差、难氧化，在球团中配比越高，制备的护炉球团固结强度越低，难以满足高炉要求。通过预处理改

善钛矿成球与焙烧性能是较为有效的途径，王新安等[41]将TiO_2质量分数约为7.5%的新西兰高钛粗矿粉细磨至小于74 μm粒级占比为70%后用于高钛护炉球团生产，取得了一定效果。向绍红等[42]通过润磨预处理改善钛精矿的成球性能，并将其用于制备TiO_2质量分数为21%的高钛型护炉球团。研究发现，降低预热温度、延长预热时间是改善高钛球团强度的关键，TiO_2含量越高适宜预热时间越长。

除氧化球团工艺外，采用冷固结钛精矿制备护炉球团不仅具有能耗低、原料适用性强的优点，还可生产TiO_2质量分数为30%以上的高钛型护炉球团[43]，具有很强的发展前景。此外，利用废钛基催化剂等二次资源作为钛源生产护炉球团也是一条潜在的路径。

2 球团绿色低碳制备新技术

球团生产作为钢铁工业的关键环节，其生产过程严重依赖于传统的煤、天然气等化石燃料，CO_2和NO_x等污染物的减排压力大。因此，开发和应用新的减排技术和工艺，不仅是响应国家环保政策、实现超低排放的必然要求，也是推动钢铁工业绿色转型、提升行业竞争力的重要途径。

2.1 低碳焙烧新技术

2.1.1 氢基燃料焙烧

近年来，氢能替代传统化石燃料用于冶金领域备受瞩目。氢气作为高热值、零碳排放的清洁能源，其燃烧产物仅为水蒸气，使得氢基燃料(如天然气、焦炉煤气及氢气混合气)成为球团生产的理想低碳替代方案。

氢基燃料掺烧到煤粉中可改善煤粉的燃烧率，并显著降低CO_2和污染物排放。LIN等[44]对煤粉和氢气在旋流燃烧器中的混合燃烧进行了研究，发现掺氢配比为5%时，煤粉的燃烬率提高5.08%，CO_2排放较未掺氢降低1.49%，JOHANSSON等[45]进行了氢和煤粉用于回转窑混合喷吹的研究，结果表明与纯煤燃烧相比，协同燃烧形成的火焰更强、更紧凑，着火更早且波动更小，使窑前段的过程温度与传热水平得到提升，NO_x排放降低32%。于洪军等[46]针对煤粉球团窑的碳排放及污染问题开展了“煤改气”工程化设计，结果表明：天然气在环保减排及球团产、质量提升方面均显著优于煤粉。

氢能应用于球团焙烧供热仍面临一些挑战。首先，氢气燃烧速度较快且火焰温度较高，这可能导致回转窑或带式焙烧机内热工制度的剧烈波动，并生成大量热力型NO_x。其次，氢气燃烧产生的高湿烟气可能影响球团的干燥和预热过程，从而影响球团的质量和稳定性。对于回转窑工艺，球团主要通过吸收火焰的辐射热获得焙烧所需的热量，但氢基燃料燃烧烟气中缺乏辐射热量的固体微粒，这会造成球团接收到的辐射热较少，从而影响球团焙烧[45,47]。此外，虽然氢气的质量热值较高，但其体积热值约为天然气的1/3[48]。在等热量喷吹的条件下，氢基燃料的富氢程度越高，所需喷吹的燃气体积流量也越大，这可能产生与球团热工制度不匹配的火焰尺寸和温度场。为了克服这些难题，深入研究球团回转窑或带式机燃料优配、气固混燃、合理配风以及燃烧器结构优化至关重要[44]。

2.1.2 生物质燃料焙烧

生物质被誉为是继煤、石油、天然气后的第四大能源物质[49]。采用生物质燃料部分替代煤粉等化石燃料用于球团生产，不仅为球团工序提供了可工程化的源头减碳路径，也有望协同降低硫氧化物等污染物排放[50]。

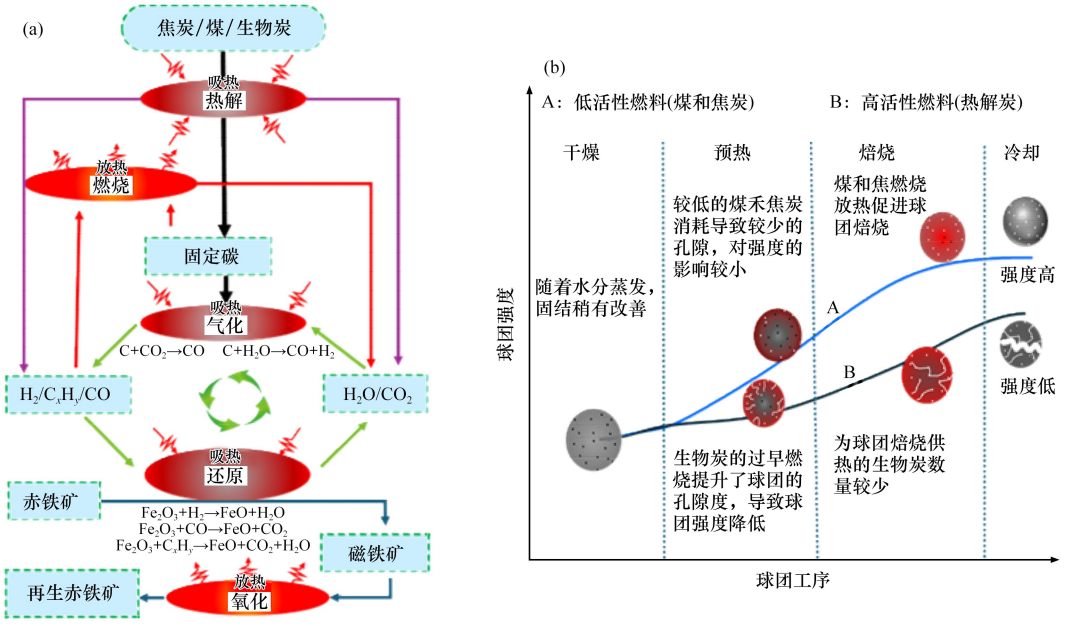
鉴于生物质燃料的零碳和低污染物排放特性，将包括原始生物质、生物质炭、生物质气和生物质油在内的不同形态的生物质燃料用于球团回转窑供热可显著降低其对煤粉、天然气等化石燃料的依赖。燃烧性能好的生物质气和生物质油还有望作为球团带式焙烧机的燃料[51]。KOVERIA等[52]将葵花壳粉作为固体燃料用于球团回转窑喷吹，研究表明，葵花壳可替代40.4%至60.7%的天然气，平均1.3 kg葵花壳替代1 m^3天然气，且所得球团的铁含量与抗压强度等关键指标与全天然气生产相当。CARVALHO等[53]研究了以生物质气化的合成气来替代带式焙烧机常用的天然气，证实了生物质气作为带式机燃料的可行性，然而经济制备生物质气是限制因素。

球团内配炭可显著降低生产能耗，有学者研究发现，对赤铁球团内配碳源，可以降低总固体燃料消耗 20%~30% [54]，采用生物质炭取代焦粉作为球团内配碳源是进一步降低球团污染物排放的举措，然而类高阶煤特性的生物质炭的制备是关键。LI 等[55]开发的生物质热解 - 水淬技术制备出了与无烟煤燃烧特性十分相似的水淬生物质炭，十分适用于球团内配，其作为内配碳源对球团固结过程的强化机理及对球团质量的影响见图 7。内配碳源通过在高温下将赤铁矿还原为磁铁矿，随后氧化放热生成再结晶性能更好的次生赤铁矿，从而获得了抗压强度更好的球团矿。

2.1.3　微波焙烧

微波焙烧具有无碳、体积快速加热的显著优势，可用于球团干燥、氧化与焙烧过程，受到诸多学者的关注。目前的研究表明，大部分铁矿石均具有良好的吸波性能[56-58]。并且，微波在干燥效率、晶相转变动力学与局部温度场调控方面对比传统热处理具有明显促进作用[59]。TIAN 等[60]的研究表明，微波预热后的球团比常规预热的球团具有更高的氧化度与抗压强度，且球团孔隙率更低。这与微波预热的球团中 FeO 氧化更充分，使得颗粒连接更加紧密有关，这表明微波预热比常规预热更有利于球团的氧化。YI 等[61]、FU 等[62]、ATHAYDE 等[63]发现，采用微波加热时生球干燥时间比常规干燥更短，干燥后球团平均抗压强度更高。同时，微波焙烧球团的抗压强度是传统加热的两倍，这是由于微波加热可以改善球团焙烧过程中磁铁矿的氧化和新生赤铁矿颗粒的结晶，如图 8 所示。微波功率、频率、处理时间与反应器几何形状共同决定加热均匀性与穿透深度，其中，在球团矿微波焙烧过程中微波功率的提高比延长焙烧时间影响更大[64-65]。半工业试验表明多模腔或组合频率设备有利于改善大批量球团样品的温度均匀性与产能扩大。

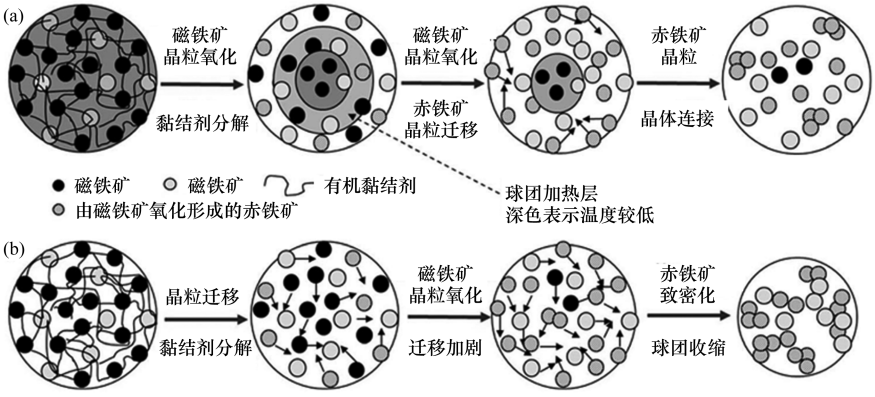
尽管微波焙烧氧化球团在实验室规模取得积极成果，但要实现工业化应用仍面临若干关键挑战。一方面是装备大型化背景下微波加热均匀性与穿透深度限制，易造成料层上部与中下部温差，影响球团质量的均匀性[66]。另一方面是高温透波耐火材料的开发，以及含尘烟气对微波腔体的腐蚀。此外，微波焙烧与常规热源的耦合策略研究需要进一步开展。总体而言，微波焙烧技术在氧化球团制备具有较好应用潜力，但其产业化需要系统的工程化验证。



（a）强化机型；（b）球团质量

图 7　内配生物质炭对球团固结过程的强化机理及对球团质量的影响[55]

Fig. 7　Strengthening consolidation mechanism of internal fuel in pellets and its effect on pellet strength



(a) 常规加热；(b) 微波加热

图8 微波强化球团矿氧化固结机制[61]

Fig. 8 Mechanism of pellet oxidation and consolidation strengthened by microwave

2.1.4 太阳能焙烧

近年来，聚光太阳能（CST）加热技术因其能够产生超过1 000 ℃的高温而有望成为未来冶金应用的理想选择，特别是在球团制备领域[67-68]。理论上，太阳能－燃料转化效率是卡诺效率和反应器吸收效率的函数，最佳工作温度范围为827～1 527 ℃。集中太阳能技术主要通过4种配置实现高温应用：抛物线槽式、塔式、线性菲涅尔式和抛物面碟式。其中塔式系统的聚光比最高，最适合高温冶金应用。PUROHIT等[69-71]研究表明添加石灰的磁铁矿球团（LMP）在太阳能加热过程中显示出良好的应用潜力。石灰与磁铁矿在低于1 100 ℃的温度下进行焙烧，制备的团块具有与烧结矿相当的强度和还原性，可作为高炉工序的潜在原料。物相组成与微观结构分析显示，太阳能与电加热团块的反应机理无明显差异，主要物相为板条状 $CaFe_3O_5$ 和少量球形 $Ca_2Fe_2O_5$。其中，太阳能加热样品中磁铁矿的矿化率更高，$CaFe_3O_5$ 质量分数可达90%，如图9所示。通过质量和能量平衡分析表明，太阳能焙烧LMP工艺在不同太阳能替代占比下均具有显著的减排潜力。当反应器热效率为80%时，使用天然气为能源的焙烧工艺，球团矿 CO_2 排放为150 kg/t，而随着太阳能替代占比增加至80%，CO_2 排放量显著降低至80 kg/t。

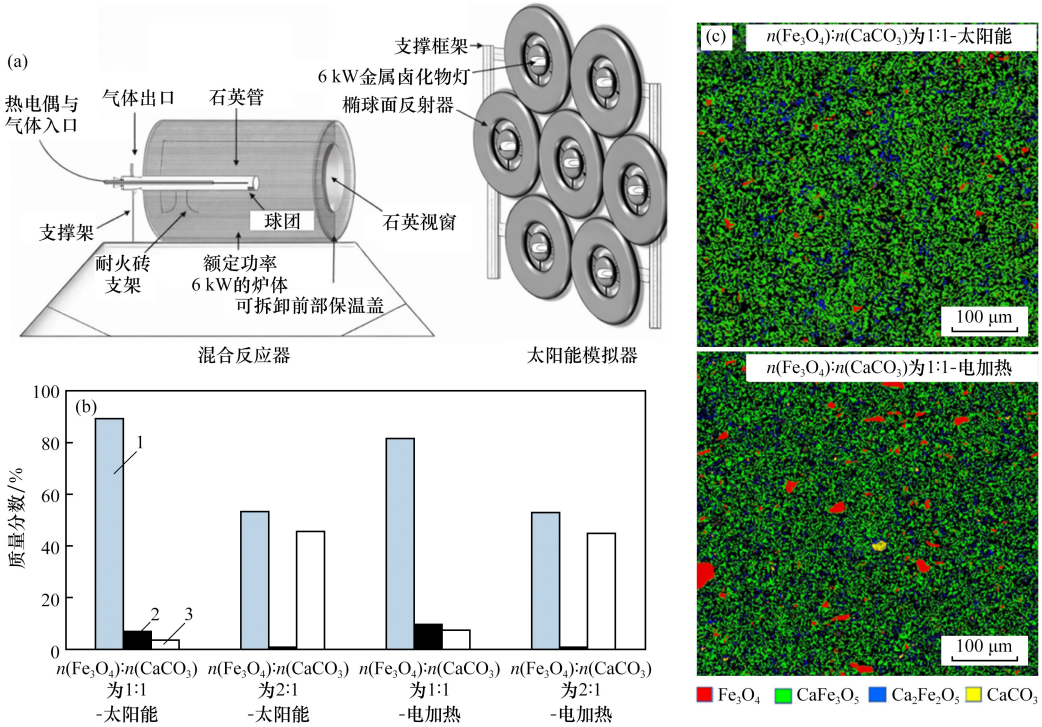
当前，实验规模的研究证实了太阳能加热在铁矿石造块中的技术可行性。虽然存在反应器热效率不高、气体颗粒和灰尘对透明反应器有不利影响等问题，以及经济性方面仍面临挑战，但随着反应器设计的改进、反应器保护机制的开发、设备成本的降低以及热存储性能的提高，基于太阳能的铁矿石造块和冶炼工艺具有一定的商业化潜力。该技术的成功开发不仅将减少钢铁行业的碳足迹，还将为可再生能源在高温工业过程中的应用开辟新的途径。

2.2 球团减排新技术与新工艺

2.2.1 低氮燃烧技术

焙烧环节是球团烟气 NO_x 生产的源头，采用低氮燃烧技术实现超低排放并降低后端治理压力具有重要意义[72]。鉴于球团烟气中的 NO_x 以燃料型和热力型为主，可通过降低燃料氮输入以控制燃料型 NO_x 的生成，并通过抑制火焰峰值温度、缩短高温停留时间来降低热力型 NO_x 的生成强度，这是实现源头减排的关键[73-74]。在球团工况下，上述两方面需协同实施，方能在保证焙烧制度与产品质量的前提下实现源头减排[75]。

燃料型 NO_x 主要来源于燃料中的有机氮组分的氧化，其生成量受单位供热量的燃料氮输入所约束，在维持球团焙烧制度稳定的前提下，低氮供热的首要路径是通过燃料结构优化以降低进入高温区的燃料氮总量[76-77]，例如选用氮含量低的气体或固体燃料，开展燃料掺混以降低综合含氮水平，并通过燃料制备与粒度级配优化改善着火与燃尽位置，从而避免含氮组分在强氧化、高温核心燃烧区集中释放。EDLAND等[78]用生物质替代氮含量相对较高的煤粉用于回转窑喷吹，实现



（a）太阳能模拟器实验装置；（b）球团矿物相组成；（c）球团矿电子探针显微分析相图

1—$CaFe_3O_5$；2—$Ca_2Fe_2O_5$；3—Fe_3O_4。

图 9　混合太阳能模拟实验装置与焙烧球性质[71]

Fig. 9　Hybrid solar simulator experimental setup and the properties of roasted pellets

NO_x 减排 90%；RIKARD 等[75]的研究表明球团回转窑煤掺烧生物质喷吹可有效减少 NO_x 排放量；JOHANSSON 等[45]在回转窑中进行了氢气和煤粉的混烧，发现与纯煤燃烧相比，混烧（70% 煤 30% 氢气）与纯煤燃烧和纯氢气燃烧相比，混烧火焰的 NO_x 排放量分别减少了 32% 和 78%。综上所述，通过引入低氮或无氮燃料并实施合理的燃料结构优化，是降低球团回转窑燃料型 NO_x 排放的有效技术路径。

热力型 NO_x 的生成数量与燃烧温度密切相关，火焰温度峰值越高、处于高温区的停留时间越长，NO_x 产生量就越大[79]。因此，在确保球团产线稳定运行的前提下，火焰峰值温度应尽可能控制在较低水平[80-81]。燃烧器的结构是影响火焰峰值温度的重要因素，通过优化旋流强度、多通道配风与喷口结构，使燃料与助燃空气实现“足够混合但不过快混合”，避免局部富氧与局部过热[74]。工程上通过分级燃烧/分级配风以降低火焰峰值温度，即在主燃区控制局部氧浓度与反应强度，避免近化学当量的高温燃烧核心形成，并在下游补风完成燃尽，以此降低高温停留时间并抑制 NO_x 生成[75,82]；同时可引入烟气以降低火焰峰值温度、改善温度场均匀性；乔俊等[83]通过设计低氮燃烧器，在燃烧器内部与出口射流中实现空气分级，有效控制了燃料与助燃空气的混合过程和速度，延缓燃烧时间，延长火焰行程，拉长烧成带范围，降低了火焰峰值温度。实践表明，采用该低氮燃烧器后，焙烧烟气中的 NO_x 质量浓度降低约 45.56%，外排烟气中的 NO_x 质量浓度降低约 71.05%；彭俊豪等[84]改变了燃料与空气的混合位置，实现 NO_x 排放质量浓度降低 10%～20%。上述措施旨在降低峰值温度、削弱高温区体积分数，并通过重构当量比与氧质量浓度分布，间接降低燃料氮向 NO_x 的转化倾向，从而对燃料型 NO_x 与热力型 NO_x 形成协同抑制。

2.2.2　嵌入式脱硝新工艺

在球团行业绿色转型的背景下，嵌入式脱硝工艺作为一种突破传统末端治理局限的新型技术路线，近年来受到行业的广泛关注。针对传统球团烟气脱硝工艺中存在的烟气温度低、再热能耗

高及系统压降大等共性难题，嵌入式 SCR 和 SNCR 脱硝工艺(图 10)利用球团焙烧生产线自身的结构特性，将 SCR 反应器和 SNCR 脱硝工序嵌入链箅机的特定热力区间内，直接利用工艺过程中的烟气余热，使脱硝反应在无需额外热源的情况下，直接在链箅机预热带(PH 段)喷氨，实现 SNCR 脱硝。并在 PH 段回热管道嵌入 SCR 装置，PH 段废气的温度与催化剂的最佳活性温度窗口(约为 280 ~ 400 ℃)相匹配，从而在不需加热的条件下高效脱硝，打破了先生产后治理的传统思维，不仅显著降低了烟气再热所带来的化石能源消耗和碳排放，还通过缩短烟气流程有效减小了系统阻力，实现了污染物减排与能效提升的有机统一[72]。嵌入式脱硝技术优异的脱硝效果已经得到证实。邯钢某年产 200 万 t 的链箅机—回转窑球团生产线于 2019 年 7 月配套建成投运一套 SCR 脱硝系统，据运行数据显示，球团烟气 NO_x 质量浓度从入口的 400 ~ 700 mg/m^3 成功脱除至出口的不大于 30 mg/m^3，脱除效率稳定在 90% 以上，实现了球团烟气 NO_x 的稳定超低排放[85]。2020 年 5 月，中国科学院过程工程研究所联合河钢集团在唐钢青龙炉料 200 万 t/a 的球团线上建成并投产世界首台“嵌入式 SNCR + 梯级氧化脱硝”示范工程项目，应用后每吨球团矿脱硝运行费用约 4 元/t，约为现行中温 SCR 运行费用的 1/3 ~ 1/2[86]。

嵌入式脱硝仍面临着温区稳定性、过程可控性和长期可靠性 3 方面的挑战。首先，球团产线启停、负荷波动以及燃料和配风调整，会导致预热段与烟道温度场波动，使有效反应温区和停留时间发生变化，易引发喷射覆盖不足和反应不完全，进而增加氨逃逸和排放波动，削弱稳定达标能力并提高运行成本[85-87]。其次，反应与混合条件受限。嵌入式脱硝依赖局部高温区的瞬时反应，而 NO_x 浓度、氧量和湍流强度分布不均，若还原剂雾化和扩散不足，易出现局部过量与欠量并存，导致效率波动、氨逃逸增加及副反应风险上升。此外，在高粉尘与腐蚀环境下，沉积、磨损和喷枪结垢会削弱喷射与混合效果，并通过压损和流场扰动影响主流程稳定，且维护条件较为受限[88]。针对上述问题，优化路径应围绕材料性能提升、运行控制强化与过程结构优化协同展开。通过开发耐高温、耐腐蚀且具备抗积灰失活能力的功能材料，可从源头增强装置的长期稳定性[89]；同时结合在线监测与数据融合技术，将温度、NO_x 浓度及氧含量等关键参数纳入闭环调节，实现还原剂的自适应投加，在保障脱硝效率的同时有效压缩氨逃逸空间[90]。在此基础上，通过流场与反应耦合优化喷射结构和混合条件，并兼顾抗结垢与可维护性设计，可进一步降低运行风险[91]。在材料、控制与结构优化的共同作用下，嵌入式脱硝有望在复杂工况中实现更稳定的排放，表现与更具经济性的全寿命运行。

3 球团热工过程模拟与智能控制

球团生产过程具有多变量强耦合、高度非线性和大时滞等特点，同时伴随复杂的物理化学反应。在高温、高粉尘且封闭的球团生产工况下，关键工艺参数难以在线、直接测量，导致过程状态难以感知，只能依赖少量间接信号与人工经验进行调控。当工况与原料条件频繁波动时，经验

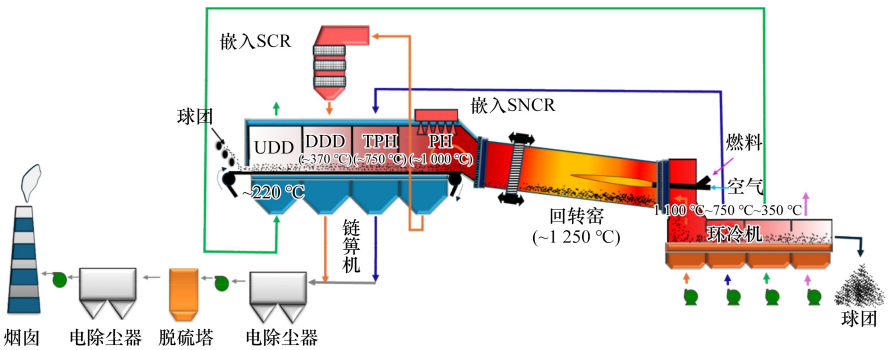


图 10 球团回转窑工艺嵌入式脱硝工艺流程

Fig. 10 Embedded denitrification process of pellet rotary kiln

主导的调控方式难以及时、精准地匹配最优热工制度与能耗边界，难以满足稳定、高效和低碳的生产需求。近年来，以人工智能为基础的新一代信息技术逐步应用于球团生产领域，基于生产数据与过程机理，开展了热工状态智能感知、智能控制以及优化决策等相关研究，取得了良好效果。

3.1　球团热工状态智能感知

3.1.1　热工过程数值模拟

球团热工过程在封闭的设备内完成，料层的温度、水分、成分等状态难以通过常规检测手段直接获取，数值模拟技术成为了实现过程透明化、可视化的有效方法。针对当前主流的链算机—回转窑和带式焙烧机两种工艺，其数值模拟研究侧重点有所不同。

链算机—回转窑—环冷机工艺的特点是设备分段独立且相互耦合，物料依次经过链算机、回转窑和环冷机。研究者通常针对不同设备的特性建立相应的数学模型，并逐步实现全流程耦合。VOSKAMP 等[92]、FAN 等[93]基于传热传质与宏观能量守恒假设构建了一维模拟模型，揭示了链算机和回转窑沿料层高度或运动方向的温度梯度变化。但由于一维模型对空间及复杂化学反应描述有限，其适用性主要局限于趋势分析。

为克服一维模型在空间表征上的局限，研究者引入二维截面维度以揭示热工过程中流场分布与温度分层现象。FENG 等[94]建立了链算机二维干燥预热模型，量化了球团料层的温度分层现象。针对回转窑，为考虑窑体旋转等动力学行为，袁芷晨[95]构建了包含“塞流层 – 活跃层”的动力学模型，实现了颗粒径向运动与气固反应的耦合模拟。为进一步探究球团料层中的反应过程，PU 等[96]利用二维轴对称模型精细刻画了单颗粒内部的氧气浓度梯度及氧化放热引致的内部温升，弥补了宏观模型对微观反应细节描述的不足。WANG 等[97]、范晓慧等[98]建立了较为全面的链算机内球团焙烧过程的数学模型，揭示了球团料层温度、水分及氧化度的分布规律，并进一步将回转窑截面的二维模型与轴向的一维模型结合，建立了能直观表现窑内状态的准三维模型。

近年来，计算流体力学（computational fluid dynamics，CFD）成为球团热工过程三维模拟的核心手段。为了揭示气流分布规律与气固换热机制，王文煜等[99]基于 CFD 技术构建了链算机三维数值模型，精细解析了复杂风箱结构内的气流运动规律与气固换热特征。张舵咏[100]则进一步引入离散单元法，关注气相燃烧并捕捉了颗粒在回转窑内的碰撞等行为。尽管针对链算机—回转窑—环冷机工艺的数值模拟研究已取得大量成果，但上述模型多聚焦于单一设备，难以反映设备间热量与物料状态的连续传递特性。为实现对链算机—回转窑—环冷机工艺全流程的整体感知，杨桂明[101]构建了链算机—回转窑—环冷机系统耦合的全流程数值模型，在统一框架下描述温度场、气流场及反应程度在设备间的传递过程，实现了从单一流场向气固耦合多物理场的跨越

针对带式焙烧机工艺流程集中、料层厚且气流循环系统复杂的特点，数值模拟目前主要侧重于从局部到全流程跨尺度研究。LALAM 等[102]通过多线性回归量化漏风及算板换热影响，修正了边界条件，将预测误差从 20% 降至 8.17%。LOBOV 等[103]构建了考虑燃烧效率的三维模型，重点解析了烧嘴流量对料层横向热均匀性的调控机制。ENGLUND 等[104]构建了包含风箱、管道及燃烧室的全尺寸三维 CFD 模型，成功捕捉了冷却段余热回用至预热段的协同作用。CAO 等[105-106]基于传热传质、多孔介质与流体力学等理论，构建料层温度、水分与磁铁矿氧化分布耦合模型，并纳入镁对氧化及碳酸镁分解影响，经实验数据验证后精度超过 90%。

为兼顾物理一致性与计算效率，王耀祖等[107]和 WANG 等[108]分别提出了基于数字孪生体的降阶模型与基于 CFD 数据的机器学习代理模型，将回转窑温度场的计算周期从小时级缩短至秒级，实现了复杂热工过程的实时精准重构。LI 等[109]针对回转窑燃烧状态，利用卷积循环神经网络对火焰图像序列进行分析，实现了燃烧状态的智能识别与异常预警。总体而言，机理与数据融合建模正成为球团过程透明化的重要技术路径。

综上所述，球团热工过程数值模拟研究从早期的简化一维模型到如今集成了 CFD-DEM 的三维

耦合模型，研究重心从单纯的宏观趋势分析深入至微观反应动力学与多物理场协同机制的解析，提升了球团热工过程的透明化程度。尽管球团过程机理模型不断完善，但高精度数值模拟计算时间长，难以满足工业现场对实时监测与在线优化的需求。因此，通过机理降价与数据协同的方式构建轻量化代理模型，能够在保证精度的同时提升计算效率，从而为球团工业数字孪生与热工过程闭环优化提供可实施的技术支撑。

3.1.2 球团指标预测

受限于离线化验周期长、检测频次有限等因素，球团抗压强度等关键质量指标具有显著滞后性，难以对过程运行提供实时反馈，研究人员重点围绕过程数据与质量指标的映射关系开展预测建模。针对原料属性与过程参数的高维特性，GAO 等[110]采用主成分分析降维结合遗传算法优化 BP 神经网络，定量刻画了原料成分、碱度和粒度等因素对球团抗压强度的综合影响；李泽政[111]为探究球团生产过程热状态对质量的影响，针对工业现场化验数据少、标签稀缺的问题，引入数据增强与生成式模型扩充小样本数据，有效提升了球团抗压强度预测精度。此外，YANG 等[112]通过视觉技术提取球团内部的赤铁矿、磁铁矿等矿相结构特征，建立了微观组织与抗压强度的关联，在强度预测的基础上，从矿相结晶角度理解质量波动的根源。FAN 等[113]基于链算机—回转窑的质量与热量平衡原理获取“时间－温度”曲线，结合积分形式的动力学公式构建了球团抗压强度机理模型，准确识别由热量波动引起的球团抗压强度的变化。CAO 等[114]针对带式焙烧机工艺，进一步提出了 GBDT-TCN 模型，捕捉热状态参数间的长时序依赖，成品球抗压强度预测命中率超过90%。陈许玲等[115]利用贝叶斯优化 GBDT 集成学习方法，结合特征选择策略，有效解决了多变量强耦合难题，将预测命中率提升至95%以上。

总体而言，球团指标预测研究正沿着“数据驱动—机理约束—多源融合”逐步发展：早期方法多依赖统计学习与特征工程，通过降维与集成建模在有限样本下获得可用精度；而近期的进展则更加注重工业数据的时序特性挖掘，引入时序模型与集成学习提升了模型对热工过程的动态捕捉能力，但模型性能仍高度依赖在线数据质量。因此，在时序建模框架中融入物理一致性约束，并通过多源数据(过程参数、视觉特征等) 协同，提升跨工况迁移能力与过程可解释性。

3.2 球团热工过程智能控制

球团热工过程的运行稳定性是保障产品质量与能效指标落地的最终环节。然而，受限于各工艺段之间的流场耦合特性，单回路反馈或人工经验的离散调控模式难以兼顾全局动态平衡。因此，构建集解耦控制、抗扰动自适应与多目标协同于一体的智能控制体系，是实现球团生产闭环调控的关键技术路径。针对球团过程的大滞后与强耦合特性，现有研究主要聚焦于关键工艺环节的精准调控与抗扰动控制。

对于带式焙烧机工艺，研究重点在于应对一体化反应器内复杂多物理场的耦合，以实现关键温度的精准控制。为解决因单燃烧室独立调节导致的燃气流量不均问题，设计了基于燃气流量平衡的温度梯度控制系统[116]。朱丛笑[117]采用串级 PID 控制方法，解决了带式焙烧过程大惯性、大时滞和多扰动下温度难以稳定控制的问题。MYTROFANOV[118]针对变机速条件下关键温度控制难的问题，利用模糊逻辑控制策略，克服了台车变速的控制难点，有效优化了气流分布以维持热工制度稳定。

链算机、回转窑和环冷机紧密耦合，热工制度复杂，其控制策略呈现出层级化的特征。在基础控制与解耦层面，主要解决多变量耦合及抗扰动难题，李树涛等[119]、林秀强[120]分别利用视觉反馈与前馈 PID 技术增强了燃烧闭环控制的抗干扰能力。徐少川等[121]为解决多变量间的热工耦合，设计模糊解耦控制器实现了各工艺段温度的独立调节；李福堃[122]和修晓波[123]则引入模糊神经网络，显著提升了变参数条件下温度场的跟踪精度。为进一步提升系统级决策水平，将现场长期积累的操作经验融入智能控制体系，是应对复杂工况波动的重要保障。常亮等[124]、WANG 等[125]构建的专家系统将操作经验转化为推理规则，有效规范了操作流程并提升了透气性、稳定性与产

品合格率；然而，上述方法多侧重于维持既定工况的稳定性，在多重约束下难以实现最佳控制策略。因此，近年来的研究趋势已从单一的回路控制发展为全局优化控制，如闫素杰等[126]利用数据分析改进模糊 PID 策略，实现了环冷机各段温度与负压的自适应调节。YANG 等[127]通过将控制任务解构为热量供应控制与热量分配控制两个核心模块，并辅以专家协调机制，实现了对全流程热工参数的精准锁定与动态平衡，为球团生产的节能减排提供了具体的技术路径。此外，HUANG 等[128]通过将多目标遗传算法与过程机理模型集成，在满足质量约束的前提下实现了干燥预热过程的全局优化控制，有效降低了煤气消耗。

综上所述，球团热工过程智能控制技术针对不同层级的控制需求，现有研究从底层局部回路解耦控制向上层专家决策及全流程智能协同控制发展。然而，面对能效约束，依赖稳态控制已难以应对复杂工况下质量波动与能源消耗间的矛盾。因此，在保证工况稳定的基础上实施多目标协同的智能控制策略，将是实现球团过程由被动调整向主动提质降耗转型的核心方向。

3.3　球团热工操作决策优化

球团生产过程涉及多工艺段多设备耦合，变量多且响应滞后。受限于复杂的物理约束，生产调控需要在质量、能耗与产量之间寻求最佳平衡。相比于传统单一单元的参数调节，构建融合机理模型、数据挖掘与人工智能的多目标优化框架，是实现球团全局最优生产的关键技术路径。

获取最优热工制度，进而获得良好成品球冶金性能，是保障高炉顺行并降低炼铁工序能耗的关键基础。杨爱民等[129]以提高成品球的抗压强度为目标，实现链算机—回转窑—环冷机温度和混合料成分的优化。然而，在“双碳”约束趋严与降本增效压力持续加大的背景下，单目标优化模式已难以满足生产实际需求，亟需向兼顾质量、能耗、排放和成本的多目标协同转变。在此背景下，MIRIYALA 等[130]针对焙烧过程中质量与能耗平衡问题，采用进化算法获得了不同工况下的帕累托最优解集，为生产决策提供了可量化的参考区间。

从单点调控向多目标协同优化的转变，显著增加了优化决策问题的维度与复杂度，这对生产过程的精准描述与高效求解能力提出了更高要求。因此，现有的热工操作优化方法正由机理或单一数据驱动逐步发展为“机理 – 数据”的深度融合。张晨[131]通过流场仿真对焙烧炉内热风流动状态进行分析，进一步优化热风分配系统。李鸿儒等[132]结合案例推理技术，通过历史相似案例的检索、调整和自学习实现智能决策，有效降低燃煤消耗、提高球团质量和降低球团制造成本。该类方法适用于在线快速决策，但其结果在模型可解释性和新工况适应性方面仍存在不足。为兼顾机理一致性与工程可用性，近年来“机理 + 数据”的混合建模优化方法成为新趋势。如任秀东[133]将火焰图像特征与过程数据融合，识别与判断燃烧状态，并建立优化的操作模式库。

针对不同的原料特性，曹风等[134]通过对带式机模拟仿真，对预热、焙烧及冷却段各条件进行正交模拟探究，优化得到镁质球团的适宜温度制度和高温保持时间。并基于构建的干燥过程模拟模型，在保证产量的前提下，将每吨生球累计能耗降低 1.50%[101]。YANG 等[135]通过聚类算法识别出最优稳态工况，并利用关联规则归纳专家操作经验，实现对冷却工艺优化。在此基础上，蒋文浩[136]将机器学习模型的预测结果作为混合整数线性规划问题的约束条件，在较短计算时间内获得满足质量要求且运行成本较低的操作参数组合。这种“预测后优化”框架为复杂工况下的球团热工操作优化决策提供了可实施的技术手段。

综上所述，球团生产优化研究逐步转向兼顾质量、能耗与排放的多目标全局协同。融合机理模型与数据驱动优势的混合建模已成为技术发展的重要路径，其旨在保证物理一致性的同时提升计算时效性，进而通过构建高适应性的实时多目标优化决策系统，最终实现复杂动态工况下球团生产的动态优化与绿色低碳运行。

4　结　论

目前，我国球团工业正处于向“大型化、绿色化、智能化”深度转型的关键时期。面对日益严峻的资源与环境双重约束，球团生产技术的创新已

不再是单一维度的突破，而是涉及工艺、装备、能源结构和智能决策的协同发展。

在工艺与原料适应性方面，随着含铁原料质量的变化，传统的经验主导生产模式面临着挑战。未来，球团生产装备将趋向大产能和强原料适应性的带式焙烧机，并辅以环形与钢带焙烧机等中小型设备。为了应对不同原料特性，需要构建以“原料特性、预处理、成球机制”为核心的理论体系，并研发适用于不同球团品种的智能配矿系统和新型黏结剂，以确保生产稳定性和产品质量。在绿色低碳转型方面，能源替代和污染物治理将是两大关键方向。氢基燃料和生物质能为减少碳排放提供了新的解决路径，但燃烧器结构优化、热工制度匹配及装备的热效率提升仍需解决。低氮燃烧与脱硝技术的结合，正在推动从末端治理到源头与过程协同控制的转变，实现超低排放和能效提升。在智能化方面，数字化技术已成为突破球团热工过程“黑箱”操作的关键。未来，将重点发展基于“机理降阶 + 数据协同”的混合建模策略，构建实时响应的数字孪生系统，实现对关键质量指标的精准预测，并通过智能控制体系向多目标优化决策转变。

总体而言，通过先进工艺装备的迭代、清洁能源技术的突破以及数智化闭环决策体系的构建，球团工业将逐步实现生产过程的透明化和主动优化，为钢铁行业的绿色低碳转型提供有力支撑。

参考文献：

[1] 邓勇,张玉泽,刘然,等. 高炉高比例球团冶炼研究现状及展望[J]. 钢铁研究学报,2026,38(1):1 – 12.
DENG Yong, ZHANG Yuze, LIU Ran, et al. Research status and prospects of high proportion pellet smelting in blast furnaces[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2026,38(1):1 – 12.

[2] 余海钊,廖继勇,范晓慧. 带式焙烧机球团技术的应用及研究进展[J]. 烧结球团,2020,45(4):47 – 54.
YU Haizhao,LIAO Jiyong,FAN Xiaohui. Application and research progress of pelletizing technology of belt roaster [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):47 – 54.

[3] 王新东,张文强,高冰,等. 大型带式球团焙烧机的开发与应用[J]. 钢铁,2025,60(3):26 – 35.
WANG Xindong, ZHANG Wenqiang, GAO Bing, et al. Development and application of large-scale belt pellet roasting machine[J]. Iron and Steel,2025,60(3):26 – 35.

[4] JING T,LÜ H,GAN M,et al. A new insight into iron ore oxidized pellets prepared by steel belt roasting process [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024,31(12):2903 – 2914.

[5] 路明,陈小艳,王兴锋,等. 高硅磁精粉球团矿预热焙烧工艺制度优化研究[J]. 烧结球团,2022,47(3):59 – 65.
LU Ming, CHEN Xiaoyan, WANG Xingfeng, et al. Research on optimization of preheating roasting process system for high silicon magnetic powder pellet[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):59 – 65.

[6] 胡长松,田兰忱,张道远,等. 钒钛磁铁矿带式焙烧机工艺研究及工程设计[J]. 中国冶金,2023,33(11):88 – 97.
HU Changsong,TIAN Lanxian,ZHANG Daoyuan,et al. Process research and engineering design of straight-grate for V-Ti magnetite ore [J]. China Metallurgy, 2023, 33(11):88 – 97.

[7] 刘桐,张俊杰,贾来辉,等. 高配比褐铁矿在线球磨矿在球团生产中的应用[J]. 烧结球团,2023,48(4):52 – 58.
LIU Tong,ZHANG Junjie,JIA Laihui,et al. Application of online ball grinding of high proportion limonite in pellet production [J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(4):52 – 58.

[8] 毛瑞,王飞,金海,等. 烧结富矿粉细磨用于制备球团矿的试验研究[J]. 烧结球团,2022,47(2):24 – 29.
MAO Rui, WANG Fei, JIN Hai, et al. Experimental research on grinding rich ore powder originally used for sintering to prepare pellet[J]. Sintering and Pelletizing, 2022,47(2):24 – 29.

[9] CHEN F, GUO Y F, JIANG T, et al. Effects of high pressure roller grinding on size distribution of vanadium-titanium magnetite concentrate particles and improvement of green pellet strength[J]. Journal of Iron and Steel Research,International,2017,24(3):266 – 272.

[10] LÜ H, GAN M, WEN X P, et al. Promoting low-temperature consolidation of vanadium titano-magnetite pellets by high-pressure grinding roll: Mechanism of mechanical activation[J]. Journal of Materials Research

and Technology,2024,30:2435 – 2445.

[11] GUO Y F,LIU K,CHEN F,et al. Effect of high-pressure grinding rolls pretreatment on the preparation of vanadium-titanium magnetite pellets[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 2479 – 2490.

[12] LÜ H,GAN M,FAN X H,et al. Impact of high-pressure grinding roll on ironsand pellets preparation: Mechanical activation mechanism and energy efficiency assessment [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2025,32(10):3220 – 3234.

[13] 朱德庆,唐艳云,Vinicius Mendes,等. 高压辊磨预处理强化巴西镜铁矿球团[J]. 北京科技大学学报,2009(1):30 – 35.
ZHU Deqing, TANG Yanyun, MENDES Vinicius, et al. Improvement in pelletization of Brazilian specularite by high-pressure roller grinding[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2009(1):30 – 35.

[14] SARAMAK D,LEŚNIAK K. Impact of HPGR operational pressing force and material moisture on energy consumption and crushing product fineness in high-pressure grinding processes[J]. Energy, 2024, 302: 131908.

[15] 范晓慧,李诗娴,甘敏,等. 钒钛铁精矿润湿程度对高压辊磨机械活化的影响[J]. 钢铁研究学报,2024,36(9):1142 – 1151.
FAN Xiaohui, LI Shixian, GAN Min, et al. Effect of wetting degree of vanadium-titanium-iron concentrate on mechanical activation in high pressure roller grinding [J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(9): 1142 – 1151.

[16] 马丽,青格勒,田筠清,等. 球团配加细磨麦克粉的试验研究[J]. 烧结球团,2019,44(2):39 – 41.
MA Li, QING Gele, TIAN Yunqing, et al. Experimental study on pelletizing proportioned with grinded MAC fines [J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(2):39 – 41.

[17] 李兴旺,刘桐,张俊杰,等. 预处理褐铁矿零膨润土成球机理[J]. 中国冶金,2024,34(1):10 – 17.
LI Xingwang,LIU Tong,ZHANG Junjie,et al. Pelletizing mechanism of pretreated limonite without bentonite[J]. China Metallurgy,2024,34(1):10 – 17.

[18] 彭道胜,潘建,李军,等. 细磨卡粉制备熔剂性球团的试验研究[J]. 烧结球团,2021,46(4):50 – 57.
PENG Daosheng, PAN Jian, LI Jun, et al. Experimental research on preparation of fluxed pellets from fine grinding Carajas powder[J]. Sintering and Pelletizing, 2021,46(4):50 – 57.

[19] ZHU D Q, GUO Z Q, PAN J, et al. Insights on pretreatment of Indian hematite fines in grate-kiln pelletizing process: The choice of grinding processes[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(5):506 – 514.

[20] 胡守景,秦立浩,姚永宽,等. 无黏结剂球团矿低成本生产关键技术应用[J]. 烧结球团,2025,50(1):61 – 68.
HU Shoujing, QIN Lihao, YAO Yongkuan, et al. Key technology and application for low-cost production of binder-free pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(1):61 – 68.

[21] 吕浩,甘敏,文小平,等. 高压辊磨强化粗粒铁矿粉制备高品质球团的规律[J]. 中国冶金,2024,34(5): 89 – 97.
LÜ Hao,GAN Min,WEN Xiaoping,et al. Regularities of high-pressure roll grinding strengthening for high-quality pellets preparation from coarse iron ore powder[J]. China Metallurgy,2024,34(5):89 – 97.

[22] 刘吉涛,张国成,罗果萍,等. 包钢球团合理配矿及链箅机工艺制度的优化研究[J]. 烧结球团,2014,39(4):31 – 34.
LIU Jitao,ZHANG Guocheng,LUO Guoping,et al. Study on reasonable proportioning and process system optimization of travelling grate in Baotou Iron and Steel (Group) Co[J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(4): 31 – 34.

[23] 何晓义,郑占斌,付国伟,等. 基于白云鄂博铁精矿制备球团矿的优化配矿研究[J]. 包钢科技,2025,51(5):18 – 23.
HE Xiaoyi,ZHENG Zhanbin,FU Guowei,et al. Research on optimizing ore proportioning for preparing pellet based on iron ore concentrate of Bayan Obo[J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation,2025, 51(5):18 – 23.

[24] 朱德庆,虎训,潘建,等. 优化配矿强化西澳超细粒磁铁精矿球团焙烧研究[J]. 工程科学学报,2017,39(5):683 – 692.
ZHU Deqing, HU Xun, PAN Jian, et al. Optimization of feed blends to enhance the roasting performance of pellets made from Western Australian ultrafine magnetite

concentrate[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(5):683 – 692.

[25] 韩秀丽,刘剑炜,段博文,等. 不同粒级铁精粉配比对碱性球团矿质量的影响[J]. 钢铁,2026,61(1):14 – 24.
HAN Xiuli, LIU Jianwei, DUAN Bowen, et al. Effect of different particle size ratios of iron concentrate on quality of basicity pellets[J]. Iron and Steel,2026,61(1):14 – 24.

[26] 甘敏,刘卓奇,季志云,等. 基于粒度组成调控的高品质球团制备技术[J]. 钢铁研究学报,2024,36(8):1001 – 1010.
GAN Min, LIU Zhuoqi, JI Zhiyun, et al. High quality pellet preparation technology based on particle size distribution regulation[J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(8):1001 – 1010.

[27] 陈金鸿,张柳叶,贾学勇,等. 基于遗传算法建立球团矿配料寻优模型的研究[J]. 烧结球团,2019,44(5):43 – 49.
CHEN Jinhong, ZHANG Liuye, JIA Xueyong, et al. Research on establishing pellet proportioning optimization model based on genetic algorithm[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(5):43 – 49.

[28] 韩英泽,田宏宇,王茗玉,等. 基于相关性分析与CatBoost算法的球团性能预测与反馈[J]. 中国冶金,2025,35(7):180 – 188.
HAN Yingze, TIAN Hongyu, WANG Mingyu, et al. Prediction and feedback of pellet performance based on correlation analysis and CatBoost algorithm[J]. China Metallurgy,2025,35(7):180 – 188.

[29] 杨永斌,段倩倩,李骞,等. 铁矿球团膨润土黏结剂提质改性研究进展[J]. 钢铁研究学报,2022,34(2):101 – 110.
YANG Yongbin, DUAN Qianqian, LI Qian, et al. Research progress on upgrading modification of iron ore pellet bentonite binder[J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(2):101 – 110.

[30] 张辉,夏铁玉,宫作岩,等. 带式焙烧机球团生产提质降耗措施[J]. 烧结球团,2021,46(3):59 – 64.
ZHANG Hui, XIA Tieyu, GONG Zuoyan, et al. The measures of improving quality and reducing consumption in pellets production of belt type roasting machine[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(3):59 – 64.

[31] ZHANG J, ZHANG Y K, ZHANG X, et al. Rheological properties of coal-based colloidal composite binder for iron ore pelletization[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2025,32(10):3164 – 3175.

[32] 朱德庆,刘震,杨聪聪,等. MgO含量和来源对球团焙烧特性及冶金性能的影响[J]. 工程科学学报,2021,43(8):1116 – 1124.
ZHU Deqing, LIU Zhen, YANG Congcong, et al. Effect of magnesium oxide and its occurrence on the roasting and metallurgical performance of magnetite pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(8): 1116 – 1124.

[33] 范晓慧,甘敏,陈许玲,等. 低碱度镁质氧化球团的试验研究[J]. 钢铁,2009,44(3):6 – 10.
FAN Xiaohui, GAN Min, CHEN Xuling, et al. Experiments of low-basicity magnesian oxidized pellets[J]. Iron and Steel,2009,44(3):6 – 10.

[34] 范晓慧,谢路奔,甘敏,等. 高镁球团焙烧特性及其固结强化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(2):449 – 455.
FAN Xiaohui, XIE Luben, GAN Min, et al. Roasting characteristics of magnesium pellets and mechanism of strengthening concretion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 449 – 455.

[35] 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.

[36] LIU K, CHEN F, GUO Y F, et al. Influence of basicity and calcium-containing substances on the consolidation mechanism of fluxed iron ore pellets[J]. Metals,2022,12(6):1057.

[37] FAN X H, GAN M, JIANG T, et al. Influence of flux additives on iron ore oxidized pellets[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(4): 732 – 737.

[38] 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 and Steel,2008,43(3):15 – 20.

[39] 潘建,田宏宇,朱德庆,等. 回转窑结圈形成机理及应对措施的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(7):13－22.
PAN Jian, TIAN Hongyu, ZHU Deqing, et al. Research progress of ringing formation mechanisms in rotary-kiln and its response measures[J]. Iron and Steel, 2020, 55(7):13－22.

[40] 李从德,陈有垒. 高钛型护炉球团矿焙烧工艺研究[J]. 烧结球团,2010,35(6):12－16.
LI Congde,CHEN Youlei. Study on high titania type blast furnace lining protection pellet induration process[J]. Sintering and Pelletizing,2010,35(6):12－16.

[41] 王新安,方贻留,王洪玉. 高炉护炉用钒钛球团矿的开发[J]. 山东冶金,2007,29(2):28－29.
WANG Xin'an, FANG Yiliu, WANG Hongyu. Development of vanadium-titanium pellet for protecting blast furnace hearth lining[J]. Shandong Metallurgy, 2007,29(2):28－29.

[42] 向绍红. 高钛护炉球团制备工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2021.
XIANG Shaohong. Research on preparation technology of high-titanium BF-protecting pellet[D]. Changsha: Central South University,2021.

[43] 代梦博,孙彩虹,孟庆民,等. 冷固结钛精矿高炉护炉球团制备研究[J]. 烧结球团,2020,45(4):41－46.
DAI Mengbo,SUN Caihong,MENG Qingmin,et al. Study on preparation of the pellets for blast furnace lining protection made from cold-bonded titanium concentrate [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):41－46.

[44] LIN X, LEI X, WANG C, et al. Numerical simulation study of hydrogen blending combustion in swirl pulverized coal burner[J]. Energies,2024,17(1):248.

[45] JOHANSSON A, FERNBERG J, SEPMAN A, et al. Cofiring of hydrogen and pulverized coal in rotary kilns using one integrated burner[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2024,90:342－352.

[46] 于洪军,路明,王佳师,等. 球团矿回转窑"煤改气"方案设计[J]. 冶金能源,2023(4):60－64.
YU Hongjun,LU Ming,WANG Jiashi,et al. Design of the replacement of coal with liquefied natural gas in a pellet rotary kiln[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2023(4):60－64.

[47] WIINIKKA H,SEPMAN A,ÖGREN Y,et al. Combustion evaluation of renewable fuels for iron-ore pellet induration [J]. Energy & Fuels,2019,33(8):7819－7829.

[48] TAKENO K, KIDO H, TAKEDA H, et al. Flame stabilisation mechanism for under-expanded hydrogen jets [J]. Fire,2024,7(2):48.

[49] 卢晓哲,王治喃. 我国生物质能高值化技术发展趋势与未来展望[J]. 科技中国,2025(10):68－74.
LU Xiaozhe, WANG Zhinan. Development trend and future prospect of biomass energy high-value technology in China[J]. China Scitechnology Think Tank, 2025 (10):68－74.

[50] 刘剑军,施建军,余莹,等. 生物质在铁矿加工领域的应用研究进展[J]. 金属矿山,2023(12):99－110.
LIU Jianjun, SHI Jianjun, YU Ying, et al. Research progress on the application of biomass in iron ore processing[J]. Metal Mine,2023(12):99－110.

[51] 甘敏,李进华,范晓慧,等. 一种高活性低灰分生物质炭及其制备方法和在带式焙烧机中的应用:CN120966498A[P]. 2025－11－18.
GAN Min,LI Jinhua,FAN Xiaohui,et al. A highly active and low-ash biomass charcoal, its preparation method, and application in a belt sintering machine: CN120966498A[P]. 2025－11－18.

[52] KOVERIA A,KIEUSH L,BOYKO M,et al. Production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks[J]. Acta Metallurgica Slovaca,2021,27(4):167－171.

[53] CARVALHO M M O,CARDOSO M,VAKKILAINEN E K. Biomass gasification for natural gas substitution in iron ore pelletizing plants[J]. Renewable Energy,2015,81: 566－577.

[54] AYYANDURAI A, PAL J. Kinetics of carbon oxidation during induration of hematite ore pellet[J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2022,39(6):2551－2560.

[55] LI J H, GAN M, JI Z Y, et al. A novel method for preparing high-quality biochar from straw via coupled water quenching and pyrolysis for steel metallurgy[J]. Energy,2025,325:136090.

[56] AMINI A,OHNO K,MAEDA T,et al. Effect of particle size and apparent density on the initial stages of temperature increase during the microwave heating of Fe_3O_4[J]. Powder Technology,2018,338:101－109.

[57] LIN G, ZHANG L B, PENG J H, et al. Microwave roasting of siderite and the catalytic combustion effects on anthracite[J]. Applied Thermal Engineering,2017,117: 668－674.

[58] ZHU X R, CHEN Y G, LIU X, et al. Microwave

fluidization magnetization roasting of limonite ores: Phase transformation, microstructure and kinetics[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2025, 32(7): 1519 – 1528.

[59] CHEN J, LI X P, GAO L, et al. Microwave treatment of minerals and ores: Heating behaviors, applications, and future directions[J]. Minerals, 2024, 14(3): 219.

[60] TIAN R, PENG Z W, FAN W L, et al. Preheating characteristics of magnetite pellets under microwave irradiation[J]. JOM, 2025, 77(1): 133 – 143.

[61] YI L Y, HAO H W, SHEN X S, et al. Drying and roasting characteristics of iron ore pellets with microwave heating [J]. JOM, 2023, 75(9): 3709 – 3717.

[62] FU B A, CHEN M Q. Linear non-equilibrium thermal and deformation transport model for hematite pellet in dielectric and magnetic heating[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 173: 115197.

[63] ATHAYDE M, COTA FONSECA M, COVCEVICH M. Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 39(4): 266 – 275.

[64] TIAN R, PENG Z W, FAN W L, et al. Exploring microwave roasting characteristics of magnetite pellets: A focus on hematite formation and elemental migration [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2025, 11(1): 340 – 352.

[65] LUO G W, PENG Z W, FAN W L, et al. Microwave drying characteristics and kinetics of hematite pellets[J]. Powder Technology, 2025, 449: 120340.

[66] ASLAM A, AHMADIHOSSEINI A, RAFEZI H, et al. Energy efficiency in microwave – assisted drying for iron ore pellets: A comparative study of microwave and convective systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128489.

[67] SANGLARD B, HUNEAU B, CARREY J, et al. Towards solar iron metallurgy: Complete hydrogen reduction of iron ore pellets under a concentrated light flux[J]. Solar Energy, 2024, 284: 113072.

[68] LUU M, SANGLARD B, LACHAIZE S, et al. Towards solar metallurgy: Iron ore reduction by ammonia under concentrated light flux[J]. Solar Energy, 2025, 287: 113250.

[69] PUROHIT S, BROOKS G, RHAMDHANI M A, et al. Analyses of CWF ($CaFe_3O_5$) phase formation in lime-magnetite pellets[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(8): 852 – 864.

[70] PUROHIT S, EKMAN B, MEJIAS R, et al. Solar processing of composite iron ore pellets: Preliminary assessments[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 1017 – 1028.

[71] PUROHIT S, BROOKS G, RHAMDHANI M A, et al. Evaluation of concentrated solar thermal energy for iron ore agglomeration[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 317: 128313.

[72] GAN M, SHU W, JI Z Y, et al. Control of nitrogen oxides emission by selective non-catalytic reduction in preheating section during iron ore pellets production [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(2): 215 – 222.

[73] 练以诚, 康泽双, 王建立, 等. 高温氧化铝回转窑低氮燃烧技术探讨[J]. 轻金属, 2021(11): 57 – 62.
LIAN Yicheng, KANG Zeshuang, WANG Jianli, et al. Discussion on low-nitrogen combustion technology in high-temperature alumina rotary kiln[J]. Light Metals, 2021(11): 57 – 62.

[74] 王利民. 低氮燃烧技术在回转窑生产中的实际应用[J]. 铁合金, 2025, 56(3): 58 – 60.
WANG Limin. The practical application of low nitrogen combustion technology in rotary kiln production[J]. Ferro-Alloys, 2025, 56(3): 58 – 60.

[75] EDLAND R, NORMANN F, FREDRIKSSON C, et al. Implications of fuel choice and burner settings for combustion efficiency and NO_x formation in PF-fired iron ore rotary kilns[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(3): 3253 – 3261.

[76] KONTTINEN J, KALLIO S, HUPA M, et al. NO formation tendency characterization for solid fuels in fluidized beds [J]. Fuel, 2013, 108: 238 – 246.

[77] TIAN J, WANG L, XIONG Y, et al. Enhancing combustion efficiency and reducing nitrogen oxide emissions from ammonia combustion: A comprehensive review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 183: 514 – 543.

[78] EDLAND R, SMITH N, ALLGURÉN T, et al. Evaluation of NO_x-reduction measures for iron-ore rotary kilns[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(4): 4934 – 4948.

[79] 姚永江, 蔡长明, 刘勇. 高效低氮燃烧器在球团回转窑的应用[J]. 矿业工程, 2021, 19(2): 49 – 52.

YAO Yongjiang, CAI Changming, LIU Yong. Application of high-efficiency low-nitrogen burner in pelletized rotary kiln[J]. Mining Engineering, 2021, 19(2): 49 – 52.

[80] BLASIAK W, YANG W H, NARAYANAN K, et al. Flameless oxyfuel combustion for fuel consumption and nitrogen oxides emissions reductions and productivity increase[J]. Journal of the Energy Institute, 2007, 80(1): 3 – 11.

[81] 马晓勇，孟祥龙，吴敬，等. 低氮煤气燃烧器在球团回转窑低氮达标排放技改中的应用[J]. 矿业工程，2021(4): 54 – 58.
MA Xiaoyong, MENG Xianglong, WU Jing, et al. Application of low nitrogen gas burner in technical transformation of pellet rotary kiln achieving low nitrogen discharge standard[J]. Mining Engineering, 2021(4): 54 – 58.

[82] NORMANN F, ANDERSSON K, LECKNER B, et al. Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(5): 385 – 397.

[83] 乔俊，沈国良，刘金英，等. 低氮燃烧技术在首钢球团的应用实践[J]. 矿业工程，2021, 19(6): 42 – 45.
QIAO Jun, SHEN Guoliang, LIU Jinying, et al. Application practice of low nitrogen combustion technology in pelletizing projects of Beijing Shougang co. ltd[J]. Mining Engineering, 2021, 19(6): 42 – 45.

[84] 彭俊豪，卓建坤，关靖宇，等. 烟气内循环和燃料分级对天然气低氮燃烧特性的影响[J]. 热力发电，2025, 54(2): 57 – 67.
PENG Junhao, ZHUO Jiankun, GUAN Jingyu, et al. Effects of flue gas internal recirculation and fuel staging on low-nitrogen combustion characteristics of natural gas[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(2): 57 – 67.

[85] TANG H, LIU X L, LI Y R, et al. Investigation on low energy-consumed embedded selective catalytic reduction technology for pelletizing flue gas and the CO_2 emission reduction assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(18): 53492-53504.

[86] 世界首台(套)氧化工艺球团烟气超低排放示范工程在河钢投用[EB/OL]. 中国钢铁新闻网.(2020 – 08 – 11)[2026 – 01 – 15]. http://www.csteelnews.com/qypd/ywjx/202008/t20200811_36989.html.
The world's first set of demonstration project for ultra-low emission of flue gas from oxidation-process pelletizing has been put into operation at HBIS Group. [EB/OL]. China Iron and Steel News Network. (2020 – 08 – 11)[2026 – 01 – 15]. http://www.csteelnews.com/qypd/ywjx/202008/t20200811_36989.html.

[87] 金森旺，吴芳，孙献斌，等. 床温及 SNCR 脱硝对 CFB 锅炉 NO_x 和 N_2O 排放影响的试验研究[J]. 热力发电，2020, 49(5): 104 – 110.
JIN Senwang, WU Fang, SUN Xianbin, et al. Experimental study on influence of bed temperature and SNCR denitrification on NO_x and N_2O emissions from CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 104 – 110.

[88] 刘丽梅，韩斌桥，韩正华. 燃煤锅炉 SNCR 脱硝系统常见问题及对策[J]. 热力发电，2010, 39(6): 65 – 67.
LIU Limei, HAN Binqiao, HAN Zhenghua, et al. Common problems appeared in sncr denitrification system of coal-fired boilers and countermeasures thereof[J]. Thermal Power Generation. 2010, 39(6): 65 – 67.

[89] 郁苏俊. 低温脱硝 SCR 催化剂改性研究及工业应用进展[J]. 化工管理，2025(5): 62 – 65.
YU Sujun. Research on low-temperature SCR catalysts and industrial development[J]. Chemical Enterprise Management, 2025(5): 62 – 65.

[90] 章新宇，任文锦，余正伟，等. 工业烟气 SCR 脱硝过程智能控制模型的研究进展[J]. 烧结球团，2024, 49(6): 53 – 67.
ZHANG Xinyu, REN Wenjin, YU Zhengwei, et al. Research progress on intelligent control model of industrial gas SCR denitrification process[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(6): 53 – 67.

[91] 潘作为，史晓莉. 燃煤电厂烟气脱硝 SCR 喷氨协调优化控制仿真[J]. 计算机仿真，2025, 42(12): 170 – 174.
PAN Zuowei, SHI Xiaoli. Simulation of coordinated optimization control of SCR ammonia injection for flue gas denitrification in coal-fired power plants[J]. Computer Simulation, 2025, 42(12): 170 – 174.

[92] VOSKAMP J H, BRASZ J. Digital simulation of the steady state behaviour of moving bed processes[J]. Measurement and Control, 1975, 8(1): 23 – 32.

[93] FAN X H, WANG Y, CHEN X L. Mathematical models and expert system for grate-kiln process of iron ore oxide pellet production. Part II: Rotary kiln process control

[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(6): 1724 – 1727.

[94] FENG J X, LIANG K L, ZHANG C, et al. Development and application of thermal mathematical model of iron ore pellet bed in grate[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, 16(3): 312 – 315.

[95] 袁芷晨. 氧化球团回转窑温度场数学建模与数值模拟系统[D]. 长沙:中南大学, 2022.
YUAN Zhichen. Temperature field mathematical modeling and numerical simulation system for rotary kiln of oxidized pellet[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[96] PU Z, ZHOU F, SUN Y, et al. Modelling and numerical simulation of isothermal oxidation of an individual magnetite pellet based on computational fluid dynamics [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(7): 799 – 808.

[97] WANG Y, FAN X H, CHEN X L. Mathematical models and expert system for grate-kiln process of iron ore oxide pellet production (Part I): Mathematical models of grate process[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(4): 1092 – 1097.

[98] 范晓慧, 李俊, 陈许玲, 等. 铁矿氧化球团回转窑三维温度场仿真模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012(8): 2896 – 2899.
FAN Xiaohui, LI Jun, CHEN Xuling, et al. Three-dimensional temperature field simulation model of rotary kiln for iron ore oxidized pellet[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012(8): 2896 – 2899.

[99] 王文煜, 刘星安, 赵魏, 等. 球团矿在链箅机中预热过程的数值模拟[J]. 现代制造技术与装备, 2016, 52(7): 91 – 92.
WANG Wenyu, LIU Xingan, ZHAO Wei, et al. Numerical simulation of preheating process in the grate pellet at the beginning[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016, 52(7): 91 – 92.

[100] 张舵咏. 基于CFD-DEM耦合的球团回转窑气固相传输过程研究[D]. 长沙:中南大学, 2022.
ZHANG Duoyong. Numerical investigation of gas-solid two-phase transfer process in rotary kiln based on CFD-DEM coupled method[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[101] 杨桂明. 链箅机—回转窑球团工艺热工过程智能控制与优化模型的研究[D]. 中南大学, 2016.
YANG Guiming. Research on the intelligent control and process optimization model of iron ore pellet induration in traveling grate-rotary kiln process[D]. Central South University, 2016.

[102] LALAM S, JANA A K, DWARAPUDI S. Formulating iron ore pellet induration process in an industrial straight grate system: Real-time experimentation and validation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 55: 102928.

[103] LOBOV V I, KOTLIAR M O. Temperature distribution model of the iron ore pellets layer inside the combustion chamber of the belt kiln burning zone[J]. Scientific Bulletin of National Mining University, 2015(2): 109 – 117.

[104] ENGLUND D J, DAVIS R A. CFD model of a straight-grate furnace for iron oxide pellet induration[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2014, 31(4): 200 – 208.

[105] CAO F, GAN M, FAN X H, et al. Energy consumption optimization model and system for the pellet drying process of straight grate[J]. Drying Technology, 2024, 42(8): 1357 – 1369.

[106] 曹风. 带式机镁质球团热工过程数值模拟的研究[D]. 中南大学, 2020.
CAO Feng. Numerical simulation research on the thermal process of magnesia-containing pellets in straight grate[D]. Central South University, 2020.

[107] 王耀祖, 刘征建, 张建良, 等. 数据与机理融合的回转窑数字孪生体[J]. 钢铁, 2025, 60(11): 61 – 71.
WANG Yaozu, LIU Zhengjian, ZHANG Jianliang, et al. Data and mechanism integrated digital twin of rotary kiln[J]. Iron & Steel, 2025, 60(11): 61 – 71.

[108] WANG Y Z, XU Y, SONG X R, et al. Novel method for temperature prediction in rotary kiln process through machine learning and CFD[J]. Powder Technology, 2024, 439: 119649.

[109] LI T, ZHANG Z T, CHEN H. Predicting the combustion state of rotary kilns using a Convolutional Recurrent Neural Network[J]. Journal of Process Control, 2019, 84: 207 – 214.

[110] GAO Q J, ZHANG Y Y, JIANG X, et al. Prediction model of iron ore pellet ambient strength and sensitivity analysis on the influence factors[J]. Metals, 2018,

8(8):593.

[111] 李泽政. 钙质熔剂对球团性能影响机理研究及质量预测[D]. 唐山:华北理工大学,2024.
LI Zezheng. Study on the effect of calcium flux on pellet performance and prediction optimization[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2024.

[112] YANG A M, ZHUANSUN Y X. Prediction of compressive strength based on visualization of pellet microstructure data[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2021,28(6):651 - 660.

[113] FAN X H, YANG G M, CHEN X L, et al. Predictive models and operation guidance system for iron ore pellet induration in traveling grate-rotary kiln process[J]. Computers & Chemical Engineering,2015,79:80 - 90.

[114] CAO F,GAN M,FAN X H,et al. Time series prediction model for compressive strength of ore pellets produced by straight grate[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2025,32(8):2320 - 2333.

[115] 陈许玲,蒋文浩,黄晓贤,等. 基于特征选择与梯度提升决策树的球团矿抗压强度预测[J]. 钢铁研究学报,2024,36(3):319 - 327.
CHEN Xuling, JIANG Wenhao, HUANG Xiaoxian, et al. Prediction of compressive strength of pellet based on feature selection and gradient boosting decision tree [J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(3): 319 - 327.

[116] 周检平. 带式焙烧机球团烧嘴智能控制系统[J]. 冶金设备,2024(1):48 - 52.
ZHOU Jianping. Belt roaster pellet burner intelligent control system[J]. Metallurgical Equipment,2024(1): 48 - 52.

[117] 朱丛笑. 球团焙烧机温度控制的设计与实现[D]. 沈阳:东北大学,2014.
ZHU Congxiao. The design and implementation of temperature control of pellet roasting machine[D]. Shenyang:Northeastern University,2014.

[118] MYTROFANOV O. Improvement of the control process of the heat treatment of iron ore pellets in the preheating area of the conveyor-type roasting machine[J]. Technology Audit and Production Reserves, 2020, 6(56):34 - 39.

[119] 李树涛,王耀南,张昌凡. 基于燃烧火焰图象特征的回转窑神经网络控制系统[J]. 自动化学报,2002, 28(4):591 - 595.
LI Shutao, WANG Yaonan, ZHANG Changfan. Neural network control system for rotary kiln based on features of combustion flame[J]. Acta Automatica Sinica,2002, 28(4):591 - 595.

[120] 林秀强. 莱钢型钢链算机—回转窑智能控制系统及其应用[J]. 烧结球团,2012,37(3):40 - 42.
LIN Xiuqiang. Intelligent control system of grate-kiln in laisteel section steel and its application[J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(3):40 - 42.

[121] 徐少川,王斌,井元伟. 链算机—回转窑温度场模糊解耦控制设计[J]. 烧结球团,2010,35(4):25 - 30.
XU Shaochuan, WANG Bin, JING Yuanwei. Design of fuzzy decoupling control of temperature field in grate-rotary kiln[J]. Sintering and Pelletizing,2010,35(4): 25 - 30.

[122] 李福堃. 基于模糊 CMAC 算法的链算机球团温度系统的应用[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2016.
LI Fukun. Application of fuzzy CMAC algorithm in chain grate machine pelletizing temperature system[D]. Anshan:University of Science and Technology Liaoning, 2016.

[123] 修晓波. 基于模糊自适应神经网络的链算机鼓风干燥段温度场控制研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
XIU Xiaobo. Study on fuzzy adaptive neural network in updraft drying section of the pellets grate temperature field control[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2020.

[124] 常亮,王介生. 以透气性为中心的链算机过程智能优化控制[J]. 鞍山科技大学学报,2006,29(6): 599 - 602.
CHANG Liang,WANG Jiesheng. Intelligent optimization control of grate process centring on permeability[J]. Journal of Anshan University of Science and Technology,2006,29(6):599 - 602.

[125] WANG Y, FAN X H, CHEN X L. Expert system for control guidance of grate-kiln pellet production[J]. ISIJ International,2013,53(3):399 - 402.

[126] 闫素杰,杜平,张涛涛,等. 基于数据分析模糊 PID 球团矿冷却智能控制方法[J]. 烧结球团,2023, 48(1):81 - 85.
YAN Sujie,DU Ping,ZHANG Taotao,et al. Intelligent control method of fuzzy PID pellet cooling based on data analysis[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(1): 81 - 85.

[127] YANG G M, FAN X H, CHEN X L, et al. Intelligent control of grate-kiln-cooler process of iron ore pellets using a combination of expert system approach and Takagi-Sugeno fuzzy model[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(5): 434 – 441.

[128] HUANG X X, FAN X H, LI Z P, et al. An integrated optimal control model for the drying and preheating process in iron ore pellet manufacturing[J]. Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications, 2024, 51(1): 72 – 79.

[129] 杨爱民,李山山,任翠环. 基于粒子群算法的球团生产工艺参数优化研究[C]// 2018 钢铁流程绿色制造与创新技术交流会论文集. 甘肃:钢铁研究总院钢铁研究学报编辑部,2018:55 – 63.
YANG Aimin, LI Shanshan, REN Cuihuan. Optimization of process parameters for pellet production based on particle swarm optimization (PSO)[C]// Proceedings of the 2018 Symposium on Green Manufacturing and Innovative Technologies in the Iron and Steel Process. Gansu: Editorial Department of the Iron and Steel Research Journal, Iron and Steel Research Institute, 2018: 55 – 63.

[130] MIRIYALA S S, MITRA K. Multi-objective optimization of iron ore induration process using optimal neural networks[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35(5): 537 – 544.

[131] 张晨. 炉内热风流动状态对焙烧机性能的影响[J]. 工业加热,2024,53(11):13 – 17.
ZHANG Chen. The influence of hot air flow state in furnace on performance of the induration machine[J]. Industrial Heating, 2024, 53(11): 13 – 17.

[132] 李鸿儒,胡锦兴,陈光皓. 基于案例推理的球团焙烧过程智能优化控制[C]//第 28 届中国过程控制会议(CPCC 2017)暨纪念中国过程控制会议 30 周年摘要集. 甘肃:中国自动化学会过程控制专业委员会,2017:328.
LI Hongru, HU Jinxing, CHEN Guanghao. Case-based reasoning intelligent optimaization control of pellets roasting process[C]//Abstracts of the 28th China Process Control Conference (CPCC 2017) & the 30th Anniversary of the China Process Control Conference. Gansu: Process Control Professional Committee of Chinese Association of Automation, 2017: 328.

[133] 任秀东. 基于多源异构信息融合的回转窑球团焙烧过程操作模式优化[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2014.
REN Xiudong. Operation mode optimization of rotary kiln pellet sintering process based on multi-source heterogeneous information fusion[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2014.

[134] 曹风,甘敏,范晓慧,等. 带式机镁质球团热工制度仿真及优化[J]. 钢铁研究学报,2021,33(4):284 – 292.
CAO Feng, GAN Min, FAN Xiaohui, et al. Simulation and optimization of thermal engineering system for magnesium pellets of straight grate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(4): 284 – 292.

[135] YANG G M, FAN X H, CHEN X L, et al. Optimization of cooling process of iron ore pellets based on mathematical model and data mining[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22(11): 1002 – 1008.

[136] 蒋文浩. 基于数据挖掘的氧化球团矿抗压强度预测与优化[D]. 长沙:中南大学,2023.
JIANG Wenhao. Prediction and optimization of compressive strength of oxidized pellets based on data mining[D]. Changsha: Central South University, 2023.