球团

鞍钢带式焙烧机高品质碱性球团工业化生产及高炉应用实践

周明顺[1,2]，田 勇[3]，侯恩俭[4]，韩基祥[5]，邓 睿[6]，朱德俊[4]，宋清诗[7]，张中中[6]

（1. 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室，辽宁 鞍山 114009；2. 鞍钢集团钢铁研究院，辽宁 鞍山 114009；
3. 鞍钢股份有限公司，辽宁 鞍山 114021；4. 鞍钢集团矿业有限公司 东鞍山烧结厂，辽宁 鞍山 114021；
5. 中宏联（鞍山）科技有限公司，辽宁 鞍山 114021；6. 中钢设备有限公司，北京 100080；
7. 淡水河谷金属（上海）有限公司，上海 200070）

摘要：本文系统阐述了鞍钢成功开发并实现工业化应用的基于带式焙烧机的高品质碱性球团生产技术。该技术确立了以鞍钢自产铁精矿为大宗铁料配加复合熔剂的优化方案，实现了年产 400 万 t 碱性球团的稳定生产。所产碱性球团碱度稳定在 1.0，全铁（TFe）品位约 64.0%，抗压强度≥2 865 N/P，还原性指标达 78.5%，低温还原膨胀率为 11.19%，综合性能达到国际领先水平。高炉工业应用表明，配加该球团后，入炉球团配比可由约为 25%（传统酸性球团）提升至最高 36.5%，入炉品位提高 0.97 个百分点以上，燃料比降低 1.5 kg/t，并实现吨铁二氧化碳减排 24.46 kg。该技术在国内首次实现了高炉从酸性球团向碱性球团的平稳直接转换，为国内同类铁矿资源生产高品质碱性球团提供了完整的技术示范。展望未来，本技术路线在原料拓展、产品系列化开发及高炉高球团配比冶炼技术等方面具备广阔的深化创新空间。

关键词：带式焙烧机；碱性球团；工业化生产；高炉应用；炉料结构优化；低碳转型

中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0136－10

doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.011

Industrial production of high-quality fluxed pellets using straight grate and application practice in blast furnace in Ansteel

ZHOU Mingshun[1,2], TIAN Yong[3], HOU Enjian[4], HAN Jixiang[5], DENG Rui[6], ZHU Dejun[4], SONG Qingshi[7], ZHANG Zhongzhong[6]

(1. State Key Laboratory of Metallic Material for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Iron and Steel Research Institute of Angang Group, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Angang Steel Company Limited, Anshan114021, Liaoning, China; 4. East Anshan Sintering Plant, Mining Co., Ltd. of Ansteel, Anshan 114021, Liaoning, China; 5. Zhonghonglian (Anshan) Technology Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114021, China; 6. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 100080, China; 7. Vale Metals (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: This paper systematically describes the successful development and industrial application of a technology that produces high-quality fluxed pellets using a straight grate at Ansteel. This technology establishes the optimized scheme that the iron concentrate produced by Ansteel is used as the primary iron-bearing material to mix with composite fluxes, to achieve stable production of fluxed pellet of 4 million tonnes per year. The fluxed pellets produced exhibit stable basicity of 1.0, total iron (TFe) grade of approximately 64.0%, compressive strength ≥2 865 N/P, reducibility index of 78.5%, and

收稿日期：2025－10－16；**修回日期**：2025－12－12

作者简介：周明顺（1964—），男，正高级工程师，鞍钢集团首席专家，从事烧结球团与高炉炉料结构研发工作。

low-temperature reduction-disintegration index of 11.19% . Their overall performance reaches internationally leading standards. Industrial application in blast furnace shows that after such pellets are added, the proportion of pellet in the blast furnace burden increases from about 25% (with traditional acid pellets) to a maximum of 36.5% . This resulted in an increase in the burden iron grade by over 0.97 percentage points, a reduction in the fuel rate by 1.5 kg/t hot metal, and a decrease in CO_2 emissions by 24.46 kg per tonne of hot metal. This technology realizes the successful smooth and direct transition from acid pellets to fluxed pellets in blast furnace operation for the first time in China, and provides a complete technical demonstration for producing high-quality fluxed pellets from similar domestic iron ore resources. Looking forward to the future, this technical route holds broad potential for further innovation in areas such as raw material diversification, product serialization development, and smelting technology with high proportion of pellet in blast furnace.

Key words: straight grate; fluxed pellets; industrial production; blast furnace application; blast charge structure optimization; low-carbon transition

在中国钢铁工业以“高炉—转炉”长流程为主导的现行生产模式下，优化高炉炉料结构是实现产业绿色转型、助力达成“双碳”目标的核心路径之一[1-3]。在全球钢铁行业低碳转型实践中，提高球团矿入炉配比已展现出显著的节能降碳效益。例如，瑞典 SSAB 采用 100% 球团矿冶炼，燃料比可低至 450 kg/t[4]；德国蒂森克虏伯将球团配比提升至 70% 后，吨钢碳排放降低约 18%[5]；国内首钢、河钢等企业通过提高球团配比，也实现了吨铁 CO_2 排放降低 10% 以上、燃料消耗降低 3% 等成效。然而，我国高炉炉料中球团矿平均配比仍不足 30%，远低于欧美国家普遍超过 80% 的先进水平[6]。国家发展改革委在《产业结构调整指导目录》中已明确鼓励发展高配比球团冶炼技术。因此，系统性地研发与推广高配比球团冶炼技术，已成为国内钢铁企业的必然选择。

碱性球团矿因其优良的机械强度与冶金性能，被视为替代烧结矿、提高球团配比的理想炉料之一。国内外学者围绕碱性球团制备已开展了大量基础与应用研究。例如，中南大学朱德庆团队研究表明，提高碱度可有效强化赤铁矿及难焙烧铁矿球团的焙烧性能，适宜的液相生成能促进固态扩散，改善球团的低温还原粉化性能[7-8]。球团抗压强度受碱度与 MgO 含量的协同影响，适度提高碱度可缓解因 MgO 增加导致的强度下降[9-12]。青格勒等[13]指出，使用消石灰作为黏结剂有助于降低膨润土配加量。ZHU 等[14]通过光学显微镜与热力学分析发现，消石灰在焙烧过程中能促进形成复合铁酸钙(SFCA)等有益矿相，从而提升球团强度与还原性。田筠清等[15]在低硅碱性球团试验中发现，当碱度提升至 1.0 以上时，球团自由膨胀指数可降至 20% 以下。在工业应用方面，首钢、唐钢等高炉的试验均证实，采用高配比碱性球团并配套优化装料制度与强化冶炼措施，可有效降低燃料比并提高产量[16-18]。相比之下，鞍钢高炉传统的炉料结构长期维持在“75% 高碱度烧结矿 + 25% 酸性球团矿”，在碱性球团领域的技术储备与实践经验相对薄弱[19]。其自产铁精矿粒度微细(<20 μm 占比高达 65%)，导致烧结过程透气性差[20]。此外，精矿中 SiO_2 含量对生产品质稳定的碱性球团而言仍显偏高，远不如首钢京唐(55%)[21-23]、河钢唐钢(45%)[24-25]等企业碱性球团原料条件。因此，鞍钢在推进高配比球团冶炼过程中，面临原料适应性、工艺参数精准调控、球团冶金性能稳定提升等一系列亟待解决的工艺难题，仍存在技术挑战。

鞍钢作为国内重要的钢铁原料生产基地，自身拥有丰富的铁矿资源。为推动资源高效、高值化利用，并响应绿色低碳发展战略，以自身铁精矿资源为基础，基于带式焙烧机工艺，系统性开展了高品质碱性球团工业化生产与高炉应用技术攻关。

本文详细阐述了从原料特性研究、优化配料与球团冶金性能、生产过程操作与控制指标，到建成 400 万 t 级工业化生产线并实现稳定生产，最终完成高炉大规模工业应用验证的全链条创新实践。研究成果不仅成功突破了鞍钢铁精矿制备高品质碱性球团的技术瓶颈，更通过实际生产数据与高炉应用效果，验证了该技术路线在提升高炉经济技术指标、降低碳排放方面的显著效益，为

同类铁矿资源的利用和我国钢铁工业的炉料结构优化与低碳转型，提供了可复制、可推广的系统性解决方案与坚实的技术支撑。

1 东鞍山烧结厂碱性球团生产实践

1.1 碱性球团生产线简介

鞍钢集团矿业有限公司东鞍山烧结厂400万t带式焙烧机碱性球团生产线(以下简称东鞍山碱性球团)是鞍钢矿业在推进绿色转型与产业升级进程中的一项关键成果。该项目于2024年1月17日开工建设，2024年9月12日开始主体设备冷态试机，2024年10月15日点火，2024年11月10日开始热态试机，2024年11月27日投产，于2025年1月1日达产达效。

在原料配矿方面，生产线以鞍钢自产铁精矿为核心原料，基于对各矿种天然特性的充分掌握，优化配矿方案并实现了工业化成功应用。为制备碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]稳定在1.0的碱性球团，确立了以自产消石灰与外购优质石灰石粉作为复合熔剂的配料方案。该方案充分发挥了在铁料中高硅导致的熔剂大配比条件下，消石灰与石灰石的互补协同作用，有利于改善混合料成球性能及生球焙烧性能，在相对较低的焙烧温度下形成适宜液相，促进赤铁矿再结晶及铁酸钙黏结相的生成，从而保障球团强度与冶金性能的均衡优化。

在工艺技术与装备方面，生产线核心采用最新带式焙烧机球团技术体系。该体系集成了高效混匀与造球、球团干燥—预热制度精准调控、焙烧气氛与温度场均匀化控制、风流系统优化、多级冷却余热回收及全流程智能化控制等关键技术。依托该体系，鞍钢矿业东鞍山烧结厂建成年产400万t带式焙烧机生产线，实现了从原料处理、造球、干燥、预热、焙烧到冷却全流程的高效稳定运行与精准控制。其中，对焙烧过程的智能化精确控制，有效保障了碱性球团所需矿相结构的充分发育与其冶金性能的稳定与均一。

1.2 原料化学成分

生产所用含铁原料包括DF精矿、AQ精矿、DC精矿和DJ精矿4种铁精矿。其中，DF、AQ、DC 3种为鞍钢自产，DJ精矿为外购。熔剂采用消石灰与外购石灰石粉两种。黏结剂为复合膨润土。原料主要化学成分及烧损见表1。由表1可知：DF精矿$w(FeO)$较低(18.03%)，为赤铁矿型精矿，$w(FeO)/w(TFe)$比值约为0.26，显著低于磁铁矿理论值，表明其铁元素主要以赤铁矿(Fe_2O_3)形式存在，$w(SiO_2)$极低(2.20%)，为生产低硅、高品位球团的理想原料；DC精矿$w(FeO)$高(>28%)，$w(SiO_2)$最高(6.80%)，为高硅磁铁矿精矿，$w(FeO)/w(TFe)$比值均大于0.42，接近磁铁矿(Fe_3O_4)的理论特征，表明铁元素主要以磁铁矿形式存在，高硅特性是其作为原料的主要限制因素，烧损(-2.58%)较高，预示氧化焙烧时会有一定增量，并可释放大量氧化热，有利于节能；AQ精矿的$w(FeO)$也较高(28.80%)，$w(SiO_2)$居中(4.00%)，为中硅磁铁矿精矿，在焙烧时同样可释放大量氧化热，有利于节能；DJ精矿具有最高的$w(FeO)$(29.27%)和最高的烧损(-2.74%)，最低的$w(SiO_2)$(2.26%)，禀赋优越，为低硅高烧损磁铁矿精矿，可释放大量氧化热，有利于节能。

总之，从原料属性看，DF精矿为赤铁矿型原料，核心优势是提铁降硅；AQ精矿、DC精矿、

表1 原料主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and losses on ignition of raw materials %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S	P_2O_5	K_2O	Na_2O	水份	烧损
DF精矿	68.80	18.03	2.20	0.43	0.21	0.33	0.039	0.031	0.027	0.031	9.10	-1.25
AQ精矿	68.30	28.80	4.00	0.35	0.30	0.18	0.060	0.018	0.022	0.027	8.70	-1.36
DC精矿	66.59	28.67	6.80	0.19	0.60	0.47	0.025	0.014	0.016	0.013	10.10	-2.58
DJ精矿	69.67	29.27	2.26	0.33	0.30	0.18	0.100	0.008	0.023	0.014	7.80	-2.74
膨润土	3.65	—	54.48	13.30	3.28	2.21	0.180	0.160	1.940	4.980	12.42	14.13
石灰石	0.17	—	1.76	0.50	52.29	1.88	0.040	0.005	0.230	0.018	3.00	42.89
消石灰	0.22	—	2.84	0.68	66.84	2.16	0.052	0.007	0.230	0.027	3.00	26.78

DJ 精矿均为磁铁矿型原料，共同特点是 w(FeO)高、有焙烧节能特质。

1.3　铁精矿配矿方案

针对鞍钢矿业东鞍山烧结厂带式焙烧机碱性球团(以下简称东鞍山碱性球团)生产所用的 4 种铁精矿(DF 精矿、AQ 精矿、DC 精矿、DJ 精矿)，在其化学成分及特定配比约束下，以满足成品球团碱度 1.0、铁品位≥64.0%、二氧化硅 <4.0% 为核心目标，并通过定量模型计算，生产中主要采用 DF 精矿(配比为 55%) + DC 精矿(配比为 25%) + DJ 精矿(配比为 20%)的配矿方案。考虑到 DJ 精矿为外购铁精矿，若 DJ 精矿供应受限，则考虑采用 DF 精矿(配比为 52.5%) + DC 精矿(配比为 17.5%) + AQ 精矿(配比为 30%)的备用方案。

1.4　配矿方案应用

为了满足东鞍山碱性球团对 $w(SiO_2)$ <4.0% 的要求，对 DF 精矿与 AQ 精矿进行深度细磨深选，导致铁精矿比表面积由适宜造球的 1 600 ~ 1 800 cm^2/g，提高到了 2 300 ~ 2 500 cm^2/g；<0.024 mm超细粒级由 40%~50% 提高到了 70%，造球缺失粗粒成核粒级，造球适宜水分大幅上升，导致 DF 及 AQ 精矿相比前期基础研究所用 DF 与 AQ 铁精矿的造球属性有较大差异，深选后的铁精矿成球性能下降。两种超细铁精矿(DF 铁精与 AQ 铁精)粒度组成、比表面积及成球性能指标见表 2。

针对以上问题，配加 DJ 精矿调剂，将配矿结构由 DF 精矿(50%~55%) + AQ 精矿(35%~40%) + DC 精矿(10%~15%)，调整为 DF(50%~55%) + DC(15%~25%) + DJ 精矿(10%~20%)，以便控制球团矿 w(FeO)为 64%~64.3%、$w(SiO_2)$ 为 3.6%~4.0%、碱度为 1.0。

鞍钢东鞍山烧结厂新建了自己的消石灰生产线，对熔剂进行了优化选择。实际生产采用生、熟熔剂搭配使用的方案(即：石灰石 + 消石灰)，因石灰石硬度高，细磨后颗粒不规则，有很好的摩擦作用，在铁料中高硅导致大比例配加熔剂的条件下，适当配加，可以明显改善成球性能，配加后可以降低生球适宜水分，改善生球爆裂温度，焙烧后还可以提高球团矿的孔隙率，改善还原性指数。

2　东鞍山碱性球团生产指标

2.1　生产过程操作与控制指标

东鞍山碱性球团生产过程指标如表 3 所示。由表 3 可知，生球质量稳定，落下强度维持在 4 ~ 6 次/(0.5 m)的合格区间，湿返球率控制在23%~25%。热工制度方面，最高干燥温度设定为 380 ~ 400 ℃，可在有效脱除生球水分的同时避免爆裂；最高焙烧温度精准控制在 1 260 ~ 1 270 ℃的适宜固相结晶区间，为获得高强度球团奠定了基础。目前排矿温度约为 150 ℃，表明冷却系统效率或余热回收尚有进一步优化的空间。

2.2　成品球团冷强度与热态冶金性能

工业化生产的东鞍山碱性球团与国外碱性球团的主要化学成分与碱度和冶金性能指标对比分别如表 4、5 所示。由表 4、5 可知，东鞍山碱性球团在抗压强度上具有显著优势，抗压强度达

表 2　两种超细铁精矿粒度组成、比表面积及成球性能

Table 2　Particle size distribution, specific surface area and pelletization performance of two types of ultra-fine iron concentrates

原料	粒度组成(质量分数)/%				比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	成球性指数
	[0.074,0.045] mm	(0.045,0.038] mm	<0.038 mm	<0.024 mm		
DF 精矿	0.25	7.65	92.10	72.12	2 330	0.19
AQ 精矿	0.37	5.58	94.05	69.92	2 568	0.17

表 3　碱性球团生产过程指标

Table 3　Production process indicators of fluxed pellets

生球落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	湿返球率/%	最高干燥温度/℃	最高焙烧温度/℃	最高排矿温度/℃
4 ~ 6	23 ~ 25	380 ~ 400	1 260 ~ 1 270	150

表4 东鞍山碱性球团与国外碱性球团主要化学成分和碱度对比

Table 4 Comparison of main chemical compositions and basicity between Dong'anshan fluxed pellets and foreign fluxed pellets

碱性球团来源	主要化学成分(质量分数)/%						碱度
	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	S	P	
巴西(某厂I)	66.53	1.94	1.92	0.51	0.040	0.050	0.99
巴西(某厂II)	65.50	2.13	2.22	1.00	0.030	0.040	1.04
东鞍山	64.02	3.80	3.80	0.46	0.036	0.023	1.00

表5 东鞍山碱性球团与国外碱性球团冶金性能指标对比

Table 5 Comparison of metallurgical performance indicators between Dong'anshan fluxed pellets and foreign fluxed pellets

转鼓指数(>6.3 mm)/%	耐磨指数(<0.5 mm)/%	冷压强度/(daN·P^{-1})	还原膨胀指数(>900 ℃)/%	还原性指数/%	低温还原粉化指数(500~600 ℃)(>3.15 mm)/%
94.70	4.4	2 500	20.00	—	—
93.50	5.5	1 700	14.00	75.0	—
92.80	5.4	2 865	11.19	78.5	89.6

2 865 N/P，远超工业标准(>2 500 N/P)，转鼓强度为92.80%。这是保障其在高炉内料柱中保持完整性的关键。虽然在转鼓和耐磨指数上略逊于巴西某厂I，但整体机械强度完全满足高炉冶炼要求。

此外，低温还原粉化率(>3.15 mm)达89.6%，表明其具有良好的机械强度与低温还原条件下的结构稳定性。同时，成品球团的还原度指数为78.5%，膨胀率为11.19%，显示出良好的高温还原动力学性能与体积稳定性，这些指标完全满足大型高炉对优质炉料的要求。

可见，东鞍山碱性球团在抗压强度、还原膨胀率和还原度三项核心指标上均表现出色，甚至超越了部分国际同类产品，这主要得益于其优化的配矿方案及焙烧工艺。尽管受限于自产矿源，其在铁品位和部分冷强度指标(如转鼓指数)上与国外顶尖产品存在一定差距，但其综合冶金性能优异，完全满足大型高炉对高强度、高还原性、高体积稳定性炉料的要求，是一款具有国际竞争力的碱性球团产品。

为了更好地了解东鞍山碱性成品球团相关性能，对其不同直径成品球团进行了相关分析，结果见图1。由图1可知，球团直径对其关键冶金性能指标呈现规律性影响，这主要源于球团反应表面积、传质效率与结构应力的变化：① 还原性方面。随着球团直径由8~12 mm增大至16~17 mm，其还原度指标呈现下降趋势，由78.3%下降至76.7%。这主要是因为直径增大导致比表面积减小，同时气体反应剂扩散至球团核心的路径增长，阻力增大，从而减缓了整体还原动力学过程，而还原膨胀率指标随着直径增大，变化不大。② 冷强度方面。随着球团直径由8~12 mm增大至16~17 mm，常温抗压强度呈现增加趋势，由2 640 N/P提高至3 616 N/P。这表明球团直径存在一个最佳尺寸范围，以实现焙烧结构的合理致密与均匀。综合来看，较小的球团直径，如：10~12 mm有利于获得更优的还原性与反应效率，但对冷强度存在潜在挑战。在实际生产中，需通过优化原料配比、造球盘参数及焙烧制度，在适宜的直径范围内寻求还原性与强度的最佳平衡，以达到高炉冶炼的要求。

碱性球团优异的还原性能(较传统酸性球团的62%~65%提升至78%~82%)归因于其特有的矿物组成[26]。在焙烧过程中，CaO与Fe_2O_3反应生成铁酸钙(如$CaO·Fe_2O_3$)等矿物相，其发达的微孔结构为还原气体(CO、H_2)向内扩散提供了更优通道，从而显著加快了还原速度[27]。

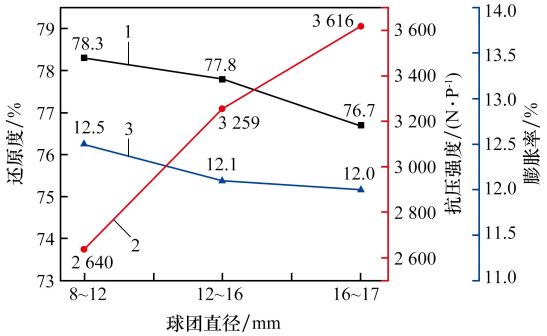
2.3 碱性球团化学成分

工业化生产的东鞍山碱性球团主要典型化学成分如表6所示。由表6可知，成品球团全铁品位为64.02%，FeO质量分数低至0.30%，SiO_2与

表 6　东鞍山碱性球团成品球主要化学成分及碱度

Table 6　Main chemical composition and basicity of Dongshao fluxed pellets

质量分数/%										碱度
TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	K_2O	Na_2O	
64. 02	0. 30	3. 80	0. 46	3. 80	0. 35	0. 023	0. 036	0. 020	0. 150	1. 00



1—还原度；2—抗压强度；3—膨胀率。

图 1　不同直径东鞍山碱性成品球团性能指标

Fig. 1　Comparison of performance indicators of Dongshao fluxed pellets with different diameters

CaO 质量分数均为 3. 80%，二元碱度为 1. 00。该产品为典型的高品位碱性球团。其高品位、低 FeO 的特性有利于提高高炉入炉品位和还原效率。核心优势在于通过优化配矿、精细化、智能化实现了精准的碱度控制(R = 1. 0)，这为在焙烧过程中形成以铁酸钙为主的高强度、高还原性黏结相提供了理想的化学基础，从本质上保障了其优良的冶金性能。

3　高炉工业应用效果

鞍钢股份有限公司炼铁总厂在多座高炉中成功进行了配加该碱性球团的工业试验与长期应用。通过逐步提高碱性球团配比，替代部分酸性球团与烧结矿，实现了高炉从传统以酸性球团为主的炉料结构，向高配比碱性球团新结构的平稳、直接转换。操作上重点优化了上下部调剂制度，以适应球团配比提高后炉内煤气分布与软熔带特性的变化。高炉应用实践取得了显著的效果。

3. 1　高炉炉料结构调整与效果

鞍钢股份有限公司炼铁总厂在 2#、3#、10#、11# 4 座高炉中进行了碱性球团的工业化应用，其应用前后的炉料结构对比如表 7 所示。由表 7 可知，4 座高炉的球团总入炉配比由碱性球团使用前的 24. 3%~25. 4% 提升至使用后的 28. 9%~36. 5%。其中，东鞍山碱性球团成功替代了部分烧结矿与酸性球团，其配比达到 16. 4%~21. 8%，减少了为调节炉渣碱度所需的高碱度烧结矿添加量。此外，经比较现场实际生产数据发现，全厂高炉平均入炉品位由 2024 年 11 月的 57. 45% 提升至 2025 年 6 月的 58. 42%，提高了 0. 97 个百分点，为降低燃料比奠定了基础。

表 7　各高炉碱性球团使用前后炉料结构对比

Table 7　Comparison of burden structure before and after using fluxed pellets in each blast furnace

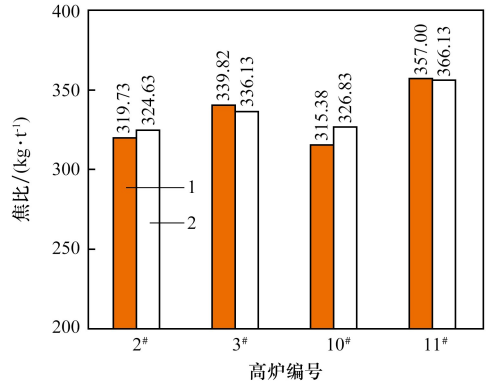
高炉编号		配比(质量分数)/%			
		烧结矿	酸性球团	东鞍山碱性球团	球团合计配比
2#	使用前	75. 70	24. 30	0	24. 3
	使用后	66. 70	14. 20	19. 10	33. 3
3#	使用前	75. 00	25. 00	0	25. 0
	使用后	64. 10	14. 60	21. 30	35. 9
10#	使用前	74. 60	25. 40	0	25. 4
	使用后	63. 50	14. 70	21. 80	36. 5
11#	使用前	74. 90	25. 10	0	25. 1
	使用后	71. 10	12. 50	16. 40	28. 9

注：使用前为 2024 年平均数据，使用后为 2025 年 1 月至 7 月平均数据。

3. 2　碱性球团应用对高炉操作指标的影响

为定量评估东鞍山碱性球团的工业应用效果，选取 2024 年 1 月至 11 月(应用前)与 2024 年 12 月至 2025 年 7 月(应用后)的生产数据进行比较。碱性球团使用前后高炉焦比、煤比以及利用系数变化分别如图 2~4 所示。

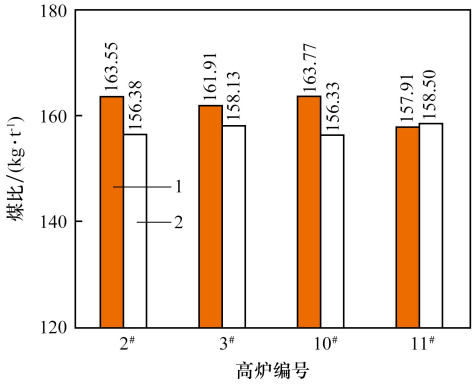
由图 2、3 可知，碱性球团使用前后各高炉燃料结构调整呈现差异化但总体优化的趋势。3#与 11#高炉焦比分别下降 3. 7 kg/t 和 0. 9 kg/t；2#与 10#高炉焦比虽略有上升，但其煤比显著下降(分别下降 7. 2 kg/t 和 7. 4 kg/t)。综合来看，4 座高炉的燃料比(焦比 + 煤比)整体呈现下降趋势，体现了燃料利用效率的提升。这主要是因为东鞍山



1—用前；2—用后。

图 2 2#、3#、10#、11#高炉使用碱性球团前后焦比变化

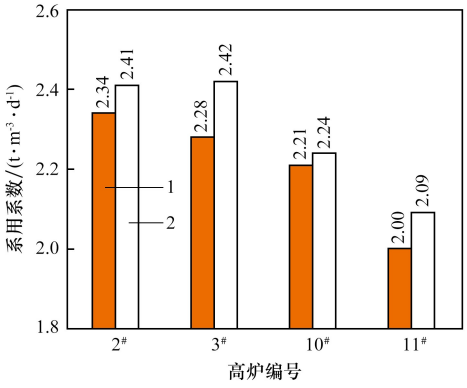
Fig. 2 Change in coke rate before and after the use of basic pellets in blast furnaces No. 2, 3, 10, and 11



1—用前；2—用后。

图 3 2#、3#、10#、11#高炉使用碱性球团前后煤比变化

Fig. 3 Change in coal rate before and after the use of basic pellets in blast furnaces No. 2, 3, 10, and 11



1—用前；2—用后。

图 4 2#、3#、10#、11#高炉使用碱性球团前后利用系数变化

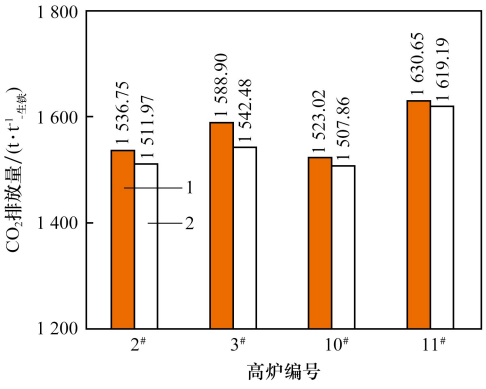
Fig. 4 Change in productivity before and after the use of basic pellets in blast furnaces No. 2, 3, 10, and 11

碱性球团优异的还原性能(还原度 78% 以上)促进了高炉内间接还原发展，降低了直接还原度，从而减少了作为还原剂和发热剂的炭质燃料消耗。

由图 4 可知，4 座高炉的利用系数在应用碱性球团后均有所提升。其中，3#高炉的利用系数从 2.28 t/(m³·d)提升至 2.42 t/(m³·d)，增幅尤为显著。可见，东鞍山碱性球团作为“自带熔剂”的高品位炉料，其入炉配比的提高减少了高碱度烧结矿的配比，同时因其酸性脉石含量低，显著降低了吨铁渣量。渣比的降低不仅减少了造渣热耗，还有利于提高铁水收得率、减轻炉衬侵蚀，带来综合节能效益。

3.3 碱性球团应用对高炉碳减排效果评估

高炉冶炼的碳排放强度主要受燃料比、球团配比及渣比等因素影响。为评估东鞍山碱性球团应用对高炉工序的碳减排效果，本研究选取鞍钢 2#、3#、10#、11# 4 座高炉为对象，对比分析了 2024 年(应用前)与 2025 年(应用后)的生产数据(图 5)。核算过程遵循《温室气体 第 1 部分：组织层面温室气体排放与清除的量化和报告规范及指南》(ISO 14064—1:2018)及《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 高炉大比例球团冶炼》(YB/T 6117—2023)等相关标准。



1—用前；2—用后。

图 5 2#、3#、10#、11#高炉使用碱性球团前后碳排放量比较

Fig. 5 Comparison of carbon emissions from blast furnaces No. 2, 3, 10, and 11 before and after using basic pellets

由图 5 可知，应用东鞍山碱性球团后，4 座高炉的吨铁 CO_2 排放量均有所下降。平均生铁排放强度由应用前的 1 569.83 kg/t 降低至应用后的

1 545.38 kg/t，实现生铁平均减排 24.46 kg/t，平均减排率为 1.6%。其中，3#高炉生铁减排效果最为显著，减排量达 46.42 kg/t。

为了更好地理解减排的来源，对使用碱性球团前后，4 座高炉 CO_2 减排驱动进行分解，结果见表 8。由表 8 可知，球团配比提升是碳减排最主要的驱动因素，而燃料比与渣比变化的影响则因炉而异。由于球团工序的碳排放强度远低于烧结工序，四座高炉因球团配比的提高实现生铁平均减排 24.82 kg/t。燃料比的影响在高炉间差异较大，仅 3#高炉因燃料比显著降低 7.5 kg/t，带来了明确的减排效益，生铁减排 17.85 kg/t，而其他高炉因燃料结构调整（如 10#高炉焦比上升、煤比下降）未产生减排贡献，甚至略有增加，可见稳定与优化燃料比是进一步挖掘减排潜力的关键。

4　结论与展望

鞍钢成功开发并工业化应用了基于带式焙烧机的高品质碱性球团生产技术，确立了以自产铁精矿配加复合熔剂的优化方案，实现了年产 400 万 t 碱性球团的稳定生产。所产碱性球团碱度稳定在 1.0、w(TFe) 约为 64.0%、抗压强度≥2 865 N/P、还原性为 78.5% 和低温还原膨胀为 11.19% 等综合性能，达到国际领先水平。高炉配加该碱性球团可实现球团配比由 25% 提升至最高 36.5%，入炉品位提高 0.97 个百分点以上，燃料比降低 1.5 kg/t，并实现吨铁碳减排 CO_2 24.46 kg。该技术在国内首次实现了高炉从酸性球团向碱性球团的平稳直接转换，并为国内同类磁铁矿、赤铁矿资源生产高品质碱性球团提供了完整的技术示范。

展望未来，本技术路线具备广阔的深化拓展空间与持续创新潜力。首先，在工艺与资源利用方面，可进一步开展基于多种铁矿资源（特别是低品位及复杂难处理矿种）的适配性配矿研究，建立智能化动态模型，拓宽原料来源并降低生产成本。同时，探索将碱度范围从当前的 1.0 适度拓宽，开发适应不同高炉操作需求的系列化碱性球团产品，增强炉料调控的灵活性。其次，在高炉应用层面，需系统研究碱性球团更高配比（如 40% 以上）甚至全球团冶炼条件下的高炉操作制度与冶炼规律，优化上下部协调，确保炉况长期稳定顺行，进一步挖掘节焦降碳潜力。推动该技术在不同炉容、不同工艺配置的高炉上推广应用，形成可复制、可推广的技术。

参考文献：

[1] 周文涛，胡俊鸽，郭艳玲. 国外烧结球团突破性技术研究进展[J]. 烧结球团，2015，40(2)：1－6.
ZHOU Wentao，HU Junge，GUO Yanling. Research progress about foreign breakthrough sintering & pelletizing technologies[J]. Sintering and Pelletizing，2015，40(2)：1－6.

[2] 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.

表 8　2#、3#、10#、11#高炉使用碱性球团前后减排驱动分解

Table 8　Decomposition of emission reduction drivers before and after the use of basic pellets in blast furnaces No. 2，3，10，and 11

项目	高炉燃料比变化引起的 CO_2 减排量		球团配比变化引起的 CO_2 减排量		渣比变化引起的 CO_2 减排量		总 CO_2 减排量/(kg·t^{-1})
	高炉燃料比变化/(kg·t^{-1})	减排量/(kg·t^{-1})	碱球配比(质量分数)/%	减排量/(kg·t^{-1})	渣比变化/(kg·t^{-1})	减排量/(kg·t^{-1})	
2#	－2.3	＋0.22	19.10	－25.82	－0.3	＋0.83	－24.77
3#	－7.5	－17.85	21.30	－29.37	＋1.0	＋0.80	－46.42
10#	＋4.0	＋18.46	21.80	－32.64	－17.2	－0.98	－15.16
11#	－0.3	－1.37	16.40	－11.46	＋10.4	＋1.36	－11.46
均值	－1.5	－0.13	19.65	－24.82	－1.5	＋0.50	－24.46

注：表中“－”表示排放减少，“＋”表示排放增加。

[3] 王新东,金永龙."双碳"背景下高炉使用高比例球团的展望[J]. 过程工程学报,2022,22(10):1379 - 1389.
WANG Xindong, JIN Yonglong. Prospect on high ratio pellet utilized in blast furnace under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(10): 1379 - 1389.

[4] 张福明. 世界高炉炼铁技术的发展现状与趋势[J]. 炼铁,2023,42(5):1 - 9.
ZHANG Fuming. Development status and trend of BF ironmaking technology worldwide[J]. Ironmaking, 2023, 42(5): 1 - 9.

[5] BAI K K, LIU L C, PAN Y Z, et al. A review: Research progress of flux pellets and their application in China [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2021, 48(9): 1048 - 1063.

[6] 毕传光. 镁质铁矿球团在梅钢4 070 m^3高炉应用实践[J]. 烧结球团,2018,43(3):58 - 62.
BI Chuanguang. Application practice of magnesia iron ore pellets in Meisteel 4 070 m^3 blast furnace[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(3): 58 - 62.

[7] 朱德庆,沈文俊,潘建,等. 碱度和内配燃料对赤铁矿球团强度的影响[J]. 金属矿山,2011(6):104 - 108.
ZHU Deqing, SHEN Wenjun, PAN Jian, et al. Research on influence of the alkalinity and the fuel flux to the intensity of hematite pellets[J]. Metal Mine, 2011(6): 104 - 108.

[8] 杨聪聪,夏光辉,朱德庆,等. 铁矿氧化球团低温还原粉化性能的影响因素评述[J]. 工程科学学报,2024,46(11):1978 - 1988.
YANG Congcong, XIA Guanghui, ZHU Deqing, et al. Review of influencing factors on the reduction disintegration performance of iron ore oxidized pellets [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(11): 1978 - 1988.

[9] 朱德庆,高子富,潘建,等. 碱度及MgO质量分数对球团焙烧及冶金性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(10):3963 - 3970.
ZHU Deqing, GAO Zifu, PAN Jian, et al. Influence of pellet basicity and MgO content on roasting and metallurgical properties of pellets[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(10): 3963 - 3970.

[10] 曲旭东,李坚毅,折媛. 碱度对熔剂性球团抗压强度及冶金性能的影响[J]. 冶金能源,2022,41(1):15 - 20.
QU Xudong, LI Jianyi, ZHE Yuan. Effect of basicity on the compressive strength and metallurgical properties of fluxed pellets[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2022, 41(1): 15 - 20.

[11] 李建鹏,卢建光,刘小杰,等. 球团矿中MgO含量对炉料熔滴性能的影响[J]. 中国冶金,2022,32(4):21 - 26.
LI Jianpeng, LU Jianguang, LIU Xiaojie, et al. Effect of MgO content in pellets on softening-dripping properties of burden in BF[J]. China Metallurgy, 2022, 32(4): 21 - 26.

[12] WANG R R, ZHANG J L, LIU Z J, et al. Effect of lime addition on the mineral structure and compressive strength of magnesium containing pellets[J]. Powder Technology, 2020, 376: 222 - 228.

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

[14] ZHU D Q, WANG D Z, PAN J, et al. Utilization of hydrated lime as binder and fluxing agent for the production of high basicity magnesium fluxed pellets[J]. ISIJ International, 2022, 62(4): 632 - 641.

[15] 田筠清,青格勒,刘长江,等. 使用石灰石生产低硅碱性球团矿试验[J]. 中国冶金,2018,28(4):13 - 16.
TIAN Yunqing, QING Gele, LIU Changjiang, et al. Production experiment of low silica alkaline pellet by limestone[J]. China Metallurgy, 2018, 28(4): 13 - 16.

[16] 余晓波,李志海,韩红伟,等. 首钢股份1号高炉高碱度球团矿冶炼工业试验[J]. 炼铁,2020,39(1):12 - 16.
YU Xiaobo, LI Zhihai, HAN Hongwei, et al. Commercial test of Shougang No. 1 BF smleting with high alkali pellet [J]. Ironmaking, 2020, 39(1): 12 - 16.

[17] 韩红伟,余晓波,李志海,等. 首钢股份3号高炉高比例球团矿冶炼工业试验[J]. 炼铁,2023,42(6):55 - 59.
HAN Hongwei, YU Xiaobo, LI Zhihai, et al. Commercial test in Shougang No. 3 BF operating with higher percentage of pellets [J]. Ironmaking, 2023, 42(6):

55 – 59.

[18] 王新东,刘存强,刘磊,等. 碱性球团生产技术研究及高炉高比例应用实践[J]. 河北冶金,2025(2):1 – 11.
WANG Xindong, LIU Cunqiang, LIU Lei, et al. Research on production technology of alkaline pelletizing and application of high proportion in blast furnace[J]. Hebei Metallurgy,2025(2):1 – 11.

[19] 于丽娟,宋宪平,王义达,等. 鞍钢合理炉料结构的形成[J]. 钢铁,2003,38(11):1 – 4.
YU Lijuan, SONG Xianping, WANG Yida, et al. Rationalization of burden composition at Anshan steel [J]. Iron & Steel,2003,38(11):1 – 4.

[20] 邓睿,苏鸿,韩基祥,等. 高球比炉料结构下镁质球团的冶金性能研究[J]. 烧结球团,2020,45(2):31 – 35.
DENG Rui, SU Hong, HAN Jixiang, et al. Study on metallurgical properties of magnesium pellet under the burden structure of high pellet ratio[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):31 – 35.

[21] 司金凤,贾彦忠,李凤臣. 配加高镁球团矿高炉炉料结构的研究[J]. 钢铁研究,2016,44(3):1 – 5.
SI Jinfeng, JIA Yanzhong, LI Fengchen. Study on burden structure of blast furnace with adding high magnesium pellets[J]. Research on Iron and Steel, 2016, 44(3): 1 – 5.

[22] 滕召杰,王凯,陈建,等. 首钢京唐 3 号高炉高比例球团矿冶炼实践[J]. 炼铁,2021,40(4):29 – 32.
TENG Zhaojie, WANG Kai, CHEN Jian, et al. Smelting practice of Shougang jingtang No. 3 BF under high rate of pellets[J]. Ironmaking,2021,40(4):29 – 32.

[23] 毛庆武,章启夫,李欣,等. 特大型高炉使用高比例球团矿技术研究及应用[J]. 炼铁,2020,39(6):1 – 6.
MAO Qingwu, ZHANG Qifu, LI Xin, et al. Study and application of high pellet rate technology in super-large sized BF[J]. Ironmaking,2020,39(6):1 – 6.

[24] 张旭升,何友国,曹树志. 唐钢新区 2 922 m^3 高炉高球比生产的操作制度[J]. 炼铁,2024,43(2):20 – 24.
ZHANG Xusheng, HE Youguo, CAO Shuzhi. Operating system of 2 922 m^3 BF under high rate of pellets in Tangshan steel new district[J]. Ironmaking, 2024, 43(2):20 – 24.

[25] 李朝旺,庞真丽,董国强,等. 唐钢熔剂性球团矿的开发研究及高炉高球比冶炼[J]. 炼铁,2023,42(6):60 – 64.
LI Chaowang, PANG Zhenli, DONG Guoqiang, et al. Technology development of Tangshan steel in fluxed pellets and smelting with high pellet rate in BF[J]. Ironmaking,2023,42(6):60 – 64.

[26] 张建良,刘征建,李克江,等. CaO 对球团矿还原行为及结构的影响[J]. 北京科技大学学报,2015,37(10):1261 – 1268.
ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, LI Kejiang, et al. Effect of CaO on reduction behavior and structure of iron ore pellets[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2015,37(10):1261 – 1268.

[27] 朱德庆,郭正启,李建,等. 高碱度烧结矿与酸性球团矿综合炉料的还原性能[J]. 钢铁研究学报,2010,22(5):1 – 5.
ZHU Deqing, GUO Zhengqi, LI Jian, et al. Reduction properties of complex burden composed of high basicity sinter and acid pellet[J]. Journal of Iron and Steel Research,2010,22(5):1 – 5.

(上接第 127 页)

XIE Yunqiang, ZHANG Zhongzhong, WANG Zihong, et al. Sintering basic characteristics of iron ores used in an iron and steel plant and optimum proportioning ores [J]. China Metallurgy,2018,28(3):9 – 15.

[20] 马辉,秦华伟. 铁矿石同化性能试验研究与配矿优化[J]. 烧结球团,2022,47(5):13 – 19.
MA Hui, QIN Huawei. Experimental research on assimilation performance of iron ore and ore matching optimization[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5): 13 – 19.