面向碳中和高炉炉料结构优化的认识与展望

张福明
(首钢集团有限公司,北京 100043)

摘要:现代高炉炼铁技术已有200余年历史,在全球“碳达峰、碳中和”的发展背景下,高炉炼铁技术由于采用焦炭作为还原剂、发热剂、渗碳剂和料柱骨架,直接消耗碳素并排放大量 CO_2,目前仍不能完全摆脱对焦炭的依赖。现代高炉采用富氧、喷煤、高风温、高顶压等强化冶炼技术,高炉生产效率显著提升,燃料消耗也大幅度降低。然而,随着世界炼铁产量的不断增长,优质铁矿石资源也逐渐匮乏;为降低生产成本,低品质铁矿石资源供给量逐年增加。为了适应国际铁矿石资源的变化,需优化高炉炉料结构,从全流程的层次研究炼铁工序的降碳技术,特别是采用低品质铁矿石实现高值利用和转化。高炉炉料结构的优化,不仅能改善炉料自身理化性能和冶金性能,更重要的是实现烧结、球团、高炉全流程的系统降碳和协同减排。为充分发挥资源最优化利用,通过工序功能的解析优化、工序之间的集成优化和流程重构优化,实现烧结、球团与高炉的合理匹配与协同运行,从流程结构优化和流程网络优化,实现炼铁系统工序集合的动态有序、协同连续和绿色低碳,这是面向碳中和高炉炼铁结构优化实现低碳减排的重要技术途径。本文研究分析了高炉炉料结构的发展演化过程,讨论了不同炉料结构对高炉生产运行的影响,分析了高炉大比例球团冶炼的技术难点和降碳效益,提出了未来高炉炉料结构优化的准则和基本思路,指出了烧结、球团和高炉未来低碳发展的目标和前景。

关键词:高炉; 炼铁; 烧结; 球团; 低碳; 炉料结构
中图分类号:F426.31;X322;TF53 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8764(2026)01-0069-11
doi:10.13403/j.sjqt.2026.01.004

Understanding and prospects of optimizing blast furnace burden structure for carbon neutrality

ZHANG Fuming
(Shougang Group Co.,Ltd.,Beijing 100043,China)

Abstract: The ironmaking technology of modern blast furnace has a history of over 200 years, under the development background of global “carbon peaking and carbon neutrality”, carbon is directly consumed and large amounts of CO_2 are emitted in ironmaking process of the blast furnace due to coke as a reducing agent, heat source, carburizing agent, and burden skeleton material in the ironmaking technology of blast furnace. Even today, the ironmaking process of blast furnace cannot completely eliminate its dependence on coke. The intensified smelting technologies such as oxygen enrichment, pulverized coal injection, high blast temperature and high top pressure are utilized in modern blast furnace, so the production efficiency of the blast furnace has been significantly improved and the fuel consumption has been substantially reduced. With the continuous growth of global iron production, high-quality iron ore resources are gradually depleting. Meanwhile, to reduce production costs, the supply of lower-grade iron ores have been increasing year by year. In order to adapt to changes in international iron ore resources and optimize the blast furnace burden structure, it is essential

收稿日期: 2025-12-07; **修回日期**: 2025-12-10
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFE0208900)
作者简介: 张福明(1967—),男,全国勘察设计大师,首钢集团一级科学家,正高级工程师,从事冶金与材料工程设计研究和冶金流程工程研究。

to study carbon reduction technologies for the ironmaking process from an entire process, particularly using low-grade iron ores to realize high-value utilization and conversion. The optimization of the blast furnace burden structure not only improves the physical, chemical, and metallurgical properties of the burdens themselves but more importantly, achieves systematic carbon reduction and coordinated emission reduction across the entire process of sintering, pelletizing, and blast furnace operations. In order to fully exploit the optimal utilization of resources, the sintering, pelletizing, and blast furnace processes shall be rationally matched through analytical optimization of procedural functions, integration optimization between procedures, and process reconfiguration optimization. Additionally, through optimization of the process structure and the process network, the process set of the ironmaking system can achieve dynamic orderly, coordinated continuous, and green, low-carbon operation. These are important technical approaches in ironmaking structure optimization of blast furnace for carbon neutrality to realize low-carbon emission reduction. In this paper the evolutionary development of blast furnace burden structures are studied and analyzed, the impact of different burden structures on blast furnace operation is discussed, the technical challenges and carbon reduction benefits of large-proportion pellet smelting in blast furnaces are analyzed, the principles and basic approaches for future burden structure optimization are proposed to indicate the goals and prospects for the future low-carbon development of sintering, pelletizing and blast furnace operations.

Key words: blast furnace; ironmaking; sintering; pelletizing; low-carbon; burden structure

近年来，全球气候变化的严峻形势促使国际社会相继提出了“碳达峰、碳中和”的发展目标。钢铁工业作为资源、能源密集型产业，CO_2排放量约为全球工业领域总排放量的7%~9%，我国钢铁工业的碳排放达15%~18%，在制造业中排放强度和排放总量位居前列[1]。我国钢铁工业中高炉—转炉长流程占据着主导地位，约有90%的钢产量来自于高炉—转炉流程。在钢铁制造全流程中，炼铁工序的碳排放约为70%~85%，因此高炉炼铁系统CO_2减排已成为钢铁工业实现碳中和目标的关键环节与技术瓶颈[2]。

第一次工业革命以后，现代高炉炼铁工艺历经了200多年的发展演化，形成了以焦炭为还原剂、发热剂、渗碳剂和料柱骨架的碳基冶金工艺体系，高炉炼铁的本质技术特征决定了生产过程必然伴随大量的碳消耗和CO_2排放。近20年来，通过富氧喷煤、高风温、高顶压、优化操作等强化冶炼技术，高炉生产效率显著提升，燃料消耗大幅度降低，但工艺技术本质上对焦炭和碳素的依赖仍未改变，高炉炼铁仍然是以碳还原为主的冶金工艺过程。

在高炉炼铁技术快速发展的形势下，全球铁矿石资源禀赋也在发生着结构性变化。随着优质铁矿资源的日益匮乏，低品位、高杂质含量的铁矿石资源使用比例正逐年上升。据统计，全球铁矿石平均品位已从2000年的48.6%下降至2022年的43.8%，其中高铝、高硅、高磷等复杂共生矿的占比增加了15.2%[3]。长期以来，我国高炉炉料结构以高碱度烧结矿为主，占比通常超过70%甚至更高，在铁矿石资源供给不足、价格波动的前提下，我国高炉炉料结构面临着优质原料供应紧张的难题。与此同时，烧结生产过程高能耗、高排放、高污染的工艺特性与超低排放及碳中和目标发生较大冲突。烧结工序能耗占整个炼铁工序的35%~40%，CO_2排放占炼铁工序的30%~35%，还产生了大量的SO_x、NO_x和粉尘等污染物[4]。由此可见，烧结工序作为高炉炼铁的上游工序，受到了资源供给不足、生态环境约束、产品质量提升等多重压力与挑战。

在此背景下，优化高炉炉料结构已从传统的炉料冶金性能改善和成本控制的维度，拓展成为全流程CO_2减排的系统工程。这需要从工序功能解析、工序间集成优化和流程重构三个层面进行系统性研究，实现烧结、球团与高炉工序的合理匹配与协同降碳。研究表明，通过提高球团矿入炉配比，可显著降低炼铁系统的CO_2排放，如果将球团矿入炉配比从20%提升至50%，理论上可使每吨铁CO_2排放降低10%~15%[5]。实施高配比球团冶炼的技术路径，面临着高性能高质量球团矿制备、炉料冶金性能综合调控、高炉操作制度改善提升、全流程协同优化等一系列工程技术难题。

本文旨在系统分析高炉炉料结构优化CO_2的

减排潜力与技术瓶颈，探讨高炉高配比球团冶炼的关键技术路径，构建炼铁工序流程协同优化的系统框架；研究分析高质量碱性球团制备和高炉高配比球团冶炼操作技术，提出面向碳中和目标的高炉炼铁技术发展思路和路径，为钢铁工业绿色低碳转型，实现高质量可持续发展提供思路和参考。

1　高炉炉料结构的演变与发展

1.1　炉料结构的演变历程

高炉炉料结构的演变是资源条件、技术进步和经济环境共同作用的结果。20 世纪 20 年代前，高炉主要使用天然块矿，受限于块矿资源供给不稳定、高品质块矿资源不足和粒度组成不合理的制约，高炉技术指标长期处于较低水平。随着钢铁产量的快速增长和铁矿石细磨精选技术的发展，粉矿比例大幅度增加，促使烧结和球团两种人工造块技术应运而生并迅速发展。

烧结技术起源于 20 世纪初，经过带式烧结机、环式烧结机等技术装备创新，以及厚料层烧结、低碳均热烧结等工艺优化，逐渐成为处理各类粉矿(特别是低品位、复杂成分铁矿粉)的主流技术[6]。烧结矿具有碱度可调(通常控制在 1.8～2.4)、机械强度高(转鼓指数为 75%～80%)、冶金性能良好(还原性指数达 75%～85%、低温还原粉化率可控制在 25%～35%)的特点，能够适应高炉大型化、高强度冶炼的要求。因此，全球主要产钢国(除北美、北欧以外)逐渐形成了以高碱度烧结矿为主(配比 50%～80%)、酸性球团矿和天然块矿为辅的典型炉料结构。

球团技术和烧结技术基本同时期问世，起步稍晚但发展迅速，特别是 20 世纪 70 年代以后，随着链箅机—回转窑和带式焙烧机技术装备的成熟，球团矿质量得到显著改善。球团矿具有含铁品位高(通常≥64%)、粒度均匀(8～16 mm)、冶金性能优良(抗压强度≥2 500 N/P、还原性指数≥70%、还原膨胀率≤20%)的特点，且生产工艺的能耗和排放强度显著低于烧结工序[7]。北美地区因优质超细铁精粉资源丰富，率先开发出以高配比球团矿(配比可达 85%～95%)为主的炉料结构，开发并形成了适应高配比球团冶炼的高炉操作技术。

中国高炉炉料结构的演化发展具有自身特色和路径。由于我国铁矿资源禀赋以及烧结为主的技术路线传承，我国长期维持高烧结矿配比(2000—2010 年平均为 72%～78%)。近年来，随着生态环保压力加大以及进口铁矿依存度不断提高，炉料结构开始沿着降低烧结矿配比、提高球团矿配比的方向进行优化调整。根据中国钢铁工业协会统计，截至 2023 年，中国重点钢铁企业的平均球团矿入炉配比已从 2015 年的 15.3% 提升至 22.8%，但与国际先进水平(欧洲平均 35%、北美平均 85%)相比仍有较大差距。表 1 为国际上不同国家/地区高炉炉料结构演变进展。针对表 1 中出现的差异主要影响因素有资源禀赋、环保政策、技术路线传承，碳排放成本、环保法规、资源全球化，优质铁精粉资源、球团技术等先进程度不同。

1.2　不同炉料结构的冶金特性与碳排放分析

高炉内炉料的冶金行为直接影响高炉透气性、还原过程和软熔带特性，进而决定燃料消耗和 CO_2 排放强度。不同炉料结构在化学成分、物理性能和高温冶金性能方面存在着显著差异，这些差异决定了它们在高炉内的行为特征和性能优劣。

烧结矿通常采用高碱度烧结生产工艺，二元碱度(CaO/SiO_2)通常控制在 1.8～2.4 之间，这使得烧结矿具有较高的熔融温度(通常≥1 450 ℃)和良好的高温性能。高碱度烧结矿的矿物组成主要以铁酸钙($CaO \cdot Fe_2O_3$)和复合铁酸钙(SFCA)为

表 1　不同国家/地区高炉炉料结构配比演变进展(质量分数)

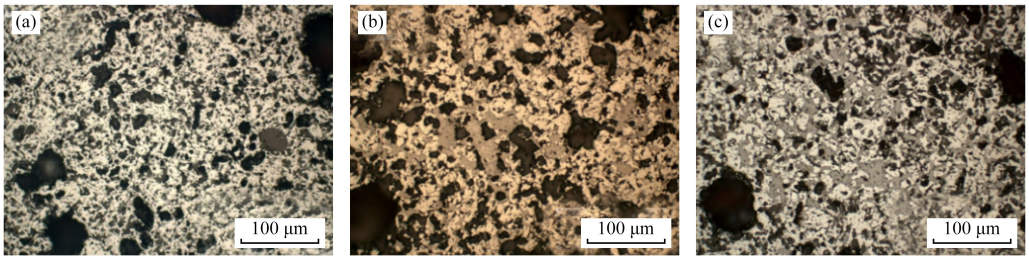
Table 1　Evolution progress of blast furnace burden structures in different countries/regions　　%

时间	中国			欧洲			北美		
	烧结矿	球团矿	块矿	烧结矿	球团矿	块矿	烧结矿	球团矿	块矿
1980—1990 年	75～80	10～15	5～10	60～65	25～30	5～15	5～15	75～85	5～10
2000—2010 年	72～78	12～18	8～12	55～60	30～35	5～10	3～10	80～90	5～10
2020—2024 年	65～70	20～25	8～12	45～55	35～45	5～15	2～8	85～95	2～7

主，这些矿相具有良好的还原性和强度。但烧结矿的气孔结构多为封闭或半封闭状，不利于还原气体的内扩散。从低碳的技术角度分析，烧结工序的能耗主要来源于固体燃料(焦粉或无烟煤)的燃烧和碳酸盐分解，每吨烧结矿的 CO_2 排放量可达 150～200 kg，明显高于球团工序(每吨球团矿 CO_2 排放约为 60～100 kg)，大约是球团工序的 2 倍。

球团矿分为酸性球团(碱度 <0.1)和碱性球团(碱度 >0.5)。传统酸性球团以赤铁矿(Fe_2O_3)为主要含铁矿相，通过焙烧过程中赤铁矿的再结晶和晶粒长大形成牢固的晶桥连接。酸性球团具有优异的常温强度(抗压强度≥2 500 N/P)和还原性能(还原性指数≥70%)，但其高温软熔性能较差，软熔区间较窄。碱性球团通过添加石灰石或消石灰等熔剂，使球团中含有一定量的铁酸钙，从而改善其高温冶金性能。球团制备过程的主要能耗为焙烧燃料消耗，生产碱性球团使用消石灰作为熔剂，由于生球中不含碳酸盐，且带式焙烧机或链算机—回转窑的热效率较高，因此球团工序的 CO_2 排放强度比烧结工序低 40%～60%[8]。不同碱度球团矿的矿相结构如图 1 所示(R 为碱度)。

天然块矿的冶金性能受其矿物组成和物理结构影响显著。优质赤铁矿块矿具有高品位(>62%)、高还原性(>65%)的特点，但脉石含量和有害元素含量直接影响高炉渣量和操作稳定性。从全生命周期角度来看，尽管块矿的 CO_2 排放最低，但综合冶金性能不如烧结矿和球团矿，资源有限且价格昂贵，通常作为炉料结构的调剂和补充，不适宜长期大量使用。表 2 为某厂不同球团矿的理化性能，表 3 为不同炉料的冶金性能和 CO_2 排放强度的对比，表 4 为国内某厂高炉炉料的高温冶金性能。



(a) 酸性球团矿；(b) R=0.9 碱性球团矿；(c) R=1.2 碱性球团矿

图 1 不同碱度球团矿的矿相结构

Fig. 1 Mineral phase structure of pellets with different basicity

表 2 不同球团矿的理化性能

Table 2 Physical and chemical properties of different pellets

项目	化学成分(质量分数)/%						抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)	碱度	还原度/%
	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO			
酸性球团矿	65.15	0.48	3.29	0.78	0.57	0.73	2 650	0.17	73.2
碱性球团矿	64.48	0.40	2.02	0.51	2.50	0.80	2 828	1.24	83.1

表 3 不同炉料冶金性能与碳排放强度对比

Table 3 Comparison of metallurgical properties and carbon emission intensity of different burdens

项目	w(TFe)/%	二元碱度(CaO/SiO_2)	烧结矿转鼓指数/%	球团抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)	还原性指数/%	低温还原粉化率(>3.15 mm)/%	熔融滴落温度/℃	熔融温度区间/℃	工序能耗/($kgce \cdot t^{-1}$)	单位产品 CO_2 排放强度/($kg \cdot t^{-1}$)
高碱度烧结矿	55～58	1.8～2.4	70～75	—	75～85	25～35	1 450～1 500	100～150	45～55	150～200
酸性球团矿	60～65	<0.6	—	≥2 500	63～72	80～90	1 350～1 400	80～120	20～30	60～80
碱性球团矿	60～65	0.6～1.2	—	≥2 300	70～80	75～85	1 400～1 450	90～140	25～35	70～100
优质块矿	62～65	<0.1	—	自然状态	65～75	10～30	1 300～1 400	100～160	—	—

表 4　国内某厂高炉炉料的高温冶金性能

Table 4　High-temperature metallurgical properties of blast furnace burdens at a domestic factory

炉料种类	软化性能				熔融滴落性能			
	T_{10}/℃	T_{50}/℃	(T_{50} ~ T_{10})/℃	T_s/℃	T_d/℃	(T_d ~ T_s)/℃	ΔP_m/Pa	S/(kPa·℃)
烧结矿	1 105	1 249	144	1 279	1 541	262	25 060	3 842
酸性球团矿	1 023	1 214	191	1 268	1 341	73	15 870	378
碱性球团矿	1 111	1 329	218	1 321	1 415	94	1 630	84
澳矿(块矿)	960	1 248	288	1 227	1 418	191	9 380	615

注：T_{10}为收缩 10% 时的温度；T_{50}为收缩 50% 时的温度；T_{50} ~ T_{10}为软化温度区间；T_s为压差徒升时的温度；T_d ~ T_s为熔融温度区间；ΔP_m为最大压差；S 为总特性值。

从高炉生产操作的视角分析，炉料结构优化的根本目的是实现高炉生产稳定顺行和高效低耗，进而言之，就是构建合理的料柱结构及软熔带形状和位置，改善高炉透气性，提高煤气利用率，降低燃料消耗。可以预见，未来高炉高效生产、强化冶炼最重要的技术关键就是高炉透气性，如果高炉料柱保持合理的透气性，下降炉料和上升煤气之间能够实现动态有序运动，在相向运动进程中顺畅地完成动量传输、热量传输、质量传输以及一系列复杂的物理化学反应，高炉利用系数和燃料比还有进一步提升优化的空间。采用高比例烧结矿结构，高炉软熔带呈倒 V 形，由于烧结矿的软化温度和熔化温度都相对较低，因此高炉中软熔带的位置相对较高，块状带的体积相对较少，煤气流分布以边缘和中心两股气流为主，高炉冶炼过程的煤气化学能未达到充分利用，煤气利用率尚未达到最优。提高球团矿入炉比例以后，由于球团矿的软化温度和熔化温度都相对较高，软熔带整体位置将向下移动，且球团矿软熔温度区间较窄，需要调整布料矩阵和送风制度以维持合理的煤气流分布。研究表明，当球团矿质量分数从 20% 提高到 50% 时，高炉间接还原度可从 45% 提高至 55%，燃料比相应降低 15 ~ 25 kg/t，每吨铁 CO_2 排放可减少 50 ~ 80 kg[9-10]。

1.3　高配比球团冶炼面临的技术挑战

理论研究和生产实践均表明，提高球团配比具有显著的降碳效应，但工业化生产应用仍面临着一系列技术挑战和难题，主要表现在以下 4 个方面。

（1）球团矿质量稳定性控制是核心技术问题。传统酸性球团矿在生产过程中易发生异常膨胀，还原膨胀率超过 20% 时会导致球团破裂和粉化，造成炉料孔隙度急剧下降，严重影响高炉透气性。碱性球团通过添加熔剂可以有效抑制还原膨胀，但熔剂种类和添加方式对球团强度、还原性和高温冶金性能的影响机制复杂，需要进行精准控制。特别是以消石灰替代传统膨润土作为黏结剂的技术，虽然可以降低 SiO_2 含量、提高球团碱度，但消石灰的吸湿性和强碱性对造球过程带来操作困难。

（2）高炉操作制度适配性是高配比球团冶炼成功的关键。球团矿堆密度较高、安息角较小，高炉布料过程中炉料“堆尖”不易控制且容易产生料面偏析，导致炉料分布不均。需要开发适用于高配比球团的炉料分布精准控制技术装备和布料模式，如并罐式无料钟炉顶设备布料装置的控制精度、料罐形状结构及中心间距、中心下料喉管结构、料流调节阀的精准控制算法等。此外，球团矿配比提高以后，由于综合入炉矿品位提高，高炉渣量显著降低，可从 350 kg/t 降至 200 kg/t 左右，炉渣的脱硫能力和排碱能力减弱，需要对炉渣成分和渣系结构进行重新设计，控制适宜炉渣中的 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 比在 0.5 ~ 0.7，调整高炉造渣制度和热制度[11]。

（3）全流程生产运行协同优化具有复杂性。提高球团矿配比不仅影响高炉操作，还涉及到炼铁工序的产能匹配和能量动态平衡。烧结机产能利用率下降可能导致工序能耗上升，球团工序产能提高需要相应的原料准备系统和焙烧系统改造，特别是原料储备、混配、造球和产品承接系统。同时，炉料结构调整还影响高炉煤气、转炉煤气及焦炉煤气等二次能源供配、转换和利用，进而

影响整个钢铁企业的能源平衡和自发电比例。

（4）技术经济性和生产运行成本是保障工艺可实施性的根本。高配比球团冶炼的工程投资较大，包括球团生产线的建设或改造、高炉配套设施的技术升级等。虽然球团生产的工序燃料成本和 CO_2 排放成本降低，但在不同碳交易价格场景下的投资回报期差异显著。需要构建全生命周期成本的预测模型，综合考虑碳交易价格、环保税、能源价格波动等因素，为企业决策提供科学依据。

2 高配比球团冶炼关键技术

2.1 碱性球团制备技术

碱性球团是实现高配比球团冶炼的重要支撑，高炉高配比球团冶炼必须攻克碱性球团的制备工艺技术难关，其关键技术主要体现在在黏结剂体系优化、焙烧制度控制和冶金性能调控等几个方面。

（1）黏结剂体系优化是碱性球团制备的核心技术突破。传统球团生产一般采用膨润土作为黏结剂，其 SiO_2 质量分数高（60%～70%）导致球团 SiO_2 质量分数增加 2.0%～3.5%，进而使高炉渣量增加 30～50 kg/t。新型黏结剂体系以部分或全部替代膨润土为目标，主要技术路线有以下 2 种。

1）采用钙基碱性黏结剂。以消石灰［$Ca(OH)_2$］或轻烧白云石（$MgO·CaO$）为主要黏结成分，辅以微量有机添加剂。消石灰在碱性球团制备中既是熔剂也是黏结剂，其细磨后（粒度 < 0.074 mm 占比 > 90%）的胶凝性和表面活性可使生球强度提高 15%～25%，且焙烧过程中形成的铁酸钙（$CaO·Fe_2O_3$）网络结构增强了球团的高温还原性和软熔性能，抑制了球团的还原膨胀，有效提高了碱性球团的综合冶金性能。首钢京唐开发的消石灰黏结剂体系，采用秘鲁高铁、低硅磁铁精矿粉生产碱性球团时，可将球团中 SiO_2 质量分数控制在 1.8%～2.2%，碱度稳定在 1.1～1.2，抗压强度达到 2 800～3 200 N/P，还原膨胀率低于 18%[12]。

2）采用有机－无机复合黏结剂。将羧甲基纤维素（CMC）、聚丙烯酰胺（PAM）等有机聚合物与少量改性膨润土（通过钠化或酸活化处理）复合使用，可将膨润土用量从传统的 15～20 kg/t 降至 3～5 kg/t，球团 SiO_2 质量分数降低至 3.0% 以下。有机聚合物的增塑作用和成膜特性，还能够改善生球的落下强度和爆裂温度[13]。

（2）焙烧制度精准控制是保证球团质量稳定的关键。针对碱性球团焙烧过程的工艺特点，需要对主要工艺参数进行协同优化。

1）预热段温度与时间控制。碱性球团需要较长的低温预热时间（250～400 ℃，8～12 min），以确保消石灰的充分分解和磁铁矿的充分氧化，避免焙烧过程中出现“黑芯”现象。

2）焙烧温度曲线优化。与传统酸性球团焙烧相比，因为铁酸钙的生成反应一般是放热过程，因此碱性球团的最佳焙烧温度要相应降低 20～30 ℃（通常为 1 220～1 250 ℃）。带式焙烧机可通过分区域调控燃烧器功率和风量，实现温度曲线的精准控制。

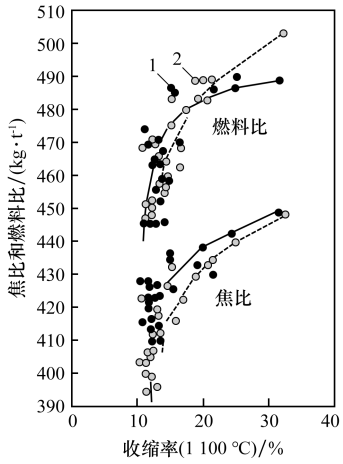
3）冷却制度精准调控。碱性球团的冷却速率需要适当降低，特别是在 600～800 ℃ 温度区间，过快的冷却会导致铁酸钙相变产生应力裂纹。采用二段式冷却（第一段风冷至 600 ℃，第二段缓慢冷却至环境温度）可将球团抗压强度提高 8%～12%。

（3）技术指标和冶金性能协同调控。通过成分设计和工艺优化，综合考量球团的抗压强度、还原性、高温软熔性和还原膨胀率等性能指标，实现协同优化。研究表明，碱性球团的冶金性能与其矿物组成密切相关，当铁酸钙质量分数控制在 8%～15% 时，球团具有最佳的还原性和高温性能。另外，赤铁矿再结晶程度影响球团强度和还原膨胀率，硅酸盐玻璃相质量分数应控制在 5% 以下，以降低低温还原粉化问题。控制球团的还原膨胀率，是碱性球团制备的关键技术难题，采取综合技术措施，将大型高炉用碱性球团的还原膨胀率降低到 18% 以下。与此同时，高炉高配比球团冶炼时，还应当关注球团矿高温软熔时的收缩率，日本神户公司通过工业试验证实当球团矿收缩率大于 10% 时，将使高炉的焦比和燃料比升高（图 2）[14－15]。

随着进口铁矿粉比例的增长，铁矿粉中 Al_2O_3 的含量在不断增加，为了改善高炉炉渣性能，需

要在炉料中添加一定量的 MgO，提高炉渣四元碱度并适当提高炉渣中的 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$[16]。烧结中不能大量加入 MgO 以防止对烧结矿性能的影响，一般将 MgO 配加在球团中，因此含镁碱性球团的制备成为球团生产的一个技术趋势。

通过技术创新与工艺优化，碱性球团的主要性能指标应当达到 $w(TFe)\geqslant 64\%$、$w(SiO_2)\leqslant 2.5\%$、碱度为 0.8～1.2、抗压强度≥2 500 N/P、还原性指数≥75%、还原膨胀率≤18%、熔融开始温度≥1 400 ℃。这些性能为高配比球团冶炼创造了坚实的技术条件。



1—1#高炉；2—2#高炉。

图 2　球团矿收缩率对高炉焦比和燃料比的影响

Fig. 2　The influence of pellet shrinkage rate on blast furnace coke rate and fuel ratio

2.2　高炉操作技术的优化

高配比球团冶炼过程中，高炉内部的气固流动、传热传质和化学反应均发生显著变化，需要有的放矢调整高炉操作制度，主要包括炉料分布控制、鼓风控制、高炉热制度及热负荷控制等方面。

炉料分布精准控制技术是解决球团布料偏析的关键。由于球团矿粒度均匀、形状相近、滚动性较强，传统的多环布料模式容易导致球团富集在炉喉中心区域，边缘矿层变薄。改进的布料技术主要包括以下几个方面。

（1）基于炉料运动轨迹进行布料矩阵优化。通过离散元法(DEM)模拟不同物料的运动轨迹，优化溜槽倾角、旋转速度和料批重量等布料操作参数，确定合理的布料档位和区间。值得关注的是，焦炭平台的合理分布是基础，既可以采用“平台＋漏斗”的布料方式，也可以采用中心加焦的布料模式。一般来说，在采用球团矿、烧结矿和块矿多种炉料结构时，在高炉料仓下各种炉料在主胶带机上的混配极其重要，为了实现多种炉料的耦合匹配，根据球团矿的入炉配比，设定合理的上料模式和炉料装料节奏。图 3 为高炉高配比球团冶炼采用中心加焦时的料层结构形状。

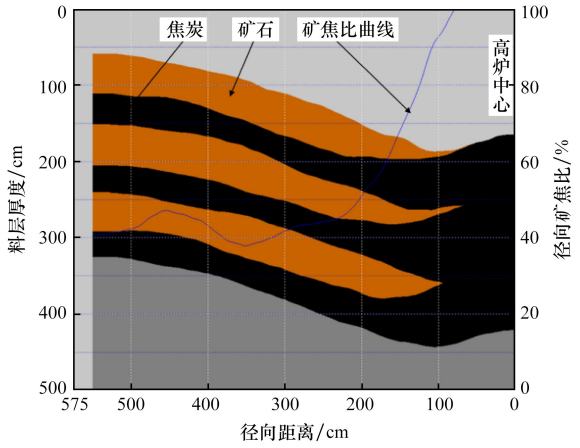


图 3　高炉高配比球团冶炼条件下的料层结构

Fig. 3　Structure of the burden layer under the high proportion pellet smelting conditions in blast furnace

（2）采用多种炉料协同布料技术。针对球团与烧结矿、焦炭的粒度差异和密度差异，开发分时段、分区域的差异化布料策略。在采用酸性球团＋碱性球团＋烧结矿＋块矿四元炉料结构时，为了实现铁素、CaO、SiO_2、Al_2O_3 等物质的均衡分布，可将球团与少量烧结矿混合后布料，以增加炉料的摩擦系数，减少滚动距离。

（3）开发应用智能化布料监控系统。集成激光料面扫描仪、雷达料面监测装置、红外热像仪、炉顶十字测温、煤气成分在线分析，实时监测料面形状和煤气分布，通过模糊控制或神经网络算法动态调整布料矩阵。实践表明，采用炉顶布料智能化监测控制技术，炉顶煤气 CO_2 可提高 1.5%～2.0%，煤气利用率相应提高，燃料比降低 3～5 kg/t。

（4）优化送风制度以适应高比例球团冶炼条件下的软熔带变化。球团矿比例提高后，软熔带位置下移、厚度变薄，需要动态调节送风参数以维持合理的煤气穿透能力。优化送风参数，适当

缩小风口直径或增加风口长度，提高鼓风动能(从 90～100 kJ/s 增至 110～130 kJ/s)，促进中心气流发展。提高鼓风富氧率，增加喷煤量。为了有效降低炉腹煤气量，减小煤气阻力损失，改善高炉透气性，提高风口前理论燃烧温度，促进煤粉燃烧，高炉富氧率可从3%～5%提高至5%～8%甚至更高，这样可以补偿球团直接还原吸热增加的影响，有助于喷煤量从 150～180 kg/t 增到 180～220 kg/t，以降低焦比和燃料比。将热风温度从常规操作的 1 200 ℃提高至 1 250～1 280 ℃，可提供更充沛的物理热，有效提高理论燃烧温度和煤粉燃烧率，补偿高配比球团冶炼所带来的炉缸热量降低。

(5) 热制度与造渣制度的协同优化是应对低渣量冶炼的技术措施。当球团矿配比超过 50% 时，渣量将降至 200 kg/t 左右，炉渣的碱度缓冲能力和排碱能力减弱，需要精准设计渣系，控制高炉造渣过程。针对低 SiO_2 球团的特点，炉渣二元碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]应适当降低至 1.15～1.25，同时提高 MgO 质量分数至 8%～10%，根据炉渣中 Al_2O_3 的含量维持适宜的 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 比，以维持炉渣的流动性和脱硫能力，使硫分配系数 Ls≥30。保持炉缸活跃和热量充沛，建立基于铁水温度和铁水硅含量[Si]的炉缸热状态预警模型。高配比球团冶炼时，铁水温度应控制在 1 480～1 520 ℃，铁水中[Si]质量分数控制在 0.3%～0.5%，略高于传统操作水平(0.2%～0.4%)，以保障炉渣充分过热具有良好的脱硫反应动力学条件。球团矿配比提高后，应有效控制有害元素入炉，碱金属(K、Na)和 Zn 等有害元素的入炉负荷可能增加，需加强炉顶煤气粉尘的脱除和回收，控制循环富集。定期进行排碱操作(如降低炉渣碱度、提高渣量)，将碱负荷($Na_2O + K_2O$)控制在 3.0 kg/t 以下，锌控制在 150 g/t 以下。

首钢京唐 5 500 m^3 高炉采用高配比球团冶炼，在球团入炉质量分数为 55% 的条件下，燃料比稳定在 480～490 kg/t，煤气利用率达到 49%～51%，渣量降低到 210～250 kg/t，实现了高炉高配比球团冶炼的长期稳定顺行[17]。表 5 是高炉高配比球团冶炼的主要技术指标对比情况，表 6 是国外部分高炉高配比球团冶炼的技术指标。

3 工序功能优化与流程重构

3.1 炼铁工序功能优化

按照冶金流程工程学理论，炉料结构优化的本质是对炼铁系统各工序功能的重新定位和流程网络的优化重组。工序功能解析优化和集成优化旨在确定烧结、球团和高炉在碳减排背景下的重新定位。

(1) 烧结工序功能转型与拓展。从生产主要原料逐步转向钢铁制造流程的消纳器和调节器。具体功能包括：消纳处理难以造球的固体废弃物(如轧钢铁鳞、除尘灰等)、调节炉料碱度平衡、生产特种烧结矿(如高铁酸钙烧结矿)以改善高炉炉渣性能。在这一新的功能定位下，烧结矿配比将降至 30%～40%，但产品质量要求更高，需要开发生产低 SiO_2、低 FeO、高还原性的烧结矿。

(2) 球团工序功能强化，未来将成为低碳原料生产的主导流程。大批量稳定生产碱性球团，$w(TFe)$≥64%，$w(SiO_2)$≤4.0%，满足高炉高配比球团冶炼需求。与此同时，球团工序应提高对

表 5 高配比球团冶炼主要技术经济指标对比

Table 5 Comparison of main technical and economic indicators for high proportion pellet smelting

项目	燃料比/(kg·t^{-1})	焦比/(kg·t^{-1})	煤比/(kg·t^{-1})	风温/℃	富氧率/%	煤气利用率/%	渣量/(kg·t^{-1})	铁水中 w(Si)/%	CO_2 排放强度/(kg·t^{-1})
传统烧结矿为主(球团配比≤20%)	500～520	340～360	150～170	1 180～1 220	3～5	45～47	280～350	0.3～0.5	1 450～1 550
高比例球团冶炼(球团配比 50%～60%)	480～500	320～340	160～180	1 200～1 250	5～7	48～50	220～260	0.4～0.6	1 350～1 450
超高比例球团冶炼(球团配比≥70%)	460～480	300～320	160～170	1 220～1 280	7～9	50～52	180～220	0.5～0.7	1 250～1 350
变化情况	↓20～40	↓20～40	↑0～10	↑20～60	↑2～4	↑3～5	↓60～100	↑0.1～0.2	↓100～200

表 6　国外部分高炉高配比球团冶炼技术指标

Table 6　Technical indicators of high proportion pellet smelting in some foreign blast furnaces

高炉	时间/（YYYY－MM）	高炉有效容积/m^3	高炉工作容积/m^3	利用系数/（$t\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$）	球团矿配比/%	烧结矿配比/%	块矿配比/%	燃料比/（$kg\cdot t^{-1}$）
日本神户 3 号	2016－04	2 112	1 863	1.92	65	0	35	513
	2016－10			1.99	80	0	20	503
加拿大阿尔戈马 2 号	2024	2 697	2 478	2.30	100	0	0	517
加拿大 Stelco－LEW	2024	2 784	2 418	2.10	94	0	0	509
美国 Lake County 1 号	2024	1 868	1 712	1.40	94	0	4	586
美国印第安纳 7 号	2024	4 709	4 037	2.30	88	0	1	473
美国盖瑞 14 号	2024	3 663	3 244	1.70	81	14	0	490
荷兰艾默伊登 7 号	1999－01	4 435	3 775	2.22	60	40	0	495
巴西图巴朗 1 号	2019	4 540	3 807	2.20	51	37	12	490

高炉	时间/（YYYY－MM）	焦比/（$kg\cdot t^{-1}$）	煤比/（$kg\cdot t^{-1}$）	天然气/（$kg\cdot t^{-1}$）	热流比	富氧率/%	CO 利用率/%	渣量/（$kg\cdot t^{-1}$）
日本神户 3 号	2016－04	315	198	0	0.81	2.8	51.5	258
	2016－10	283	220	0	0.83	4.6	52.9	257
加拿大阿尔戈马 2 号	2024	439	0	78	—	6.7	49.0	206
加拿大 Stelco-LEW	2024	408	0	101	—	6.1	50.0	205
美国 Lake County 1 号	2024	501	57	29	—	1.8	47.0	218
美国印第安纳 7 号	2024	300	108	65	—	9.9	45.0	242
美国盖瑞 14 号	2024	417	0	73	—	2.3	47.0	275
荷兰艾默伊登 7 号	1999－01	261	234	0	—	—	49.4	195
巴西图巴朗 1 号	2019	296	194	0	—	8.5	50.0	249

超细铁精粉（粒度 <0.044 mm 质量分数 >85%）的适应能力，扩大原料供应来源，可以通过铁矿粉细磨满足球团生产要求[18]；研发中高硅铁矿粉球团制备技术。

（3）高炉工序功能拓展，成为多种炉料协同优化的反应器和物质－能量的转化器。随着国际铁矿粉品质的下降和资源供给市场的不断变化，为了实现高效低碳、低成本生产，需要增强对炉料变化的适应性和炉况调控能力，通过智能化控制系统实现不同炉料结构下的稳定顺行，实现资源－能源的高效转换。

3.2　炼铁工序流程网络重构优化

流程网络重构是根据新的工序功能定位，调整物质流和能量流的衔接和匹配关系，以实现整体流程的重构优化[19]。

（1）球团主导型流程。适用于新建沿海钢铁基地或大规模改造项目，以大型带式焙烧机球团生产线为原料加工核心，配置少量烧结机处理厂内循环物料。球团矿配比可达 60%～80%，碳排放强度较传统流程降低 15%～20%。首钢京唐采用 3 台 504 m^2 带式焙烧机球团 +2 台 500 m^2 烧结机工艺配置，为 3 座 5 500 m^3 高炉提供原料，球团配比稳定在 55%～60%[20－21]。河钢唐钢新区也是采用这种以球团为主的工艺流程。

（2）球团－烧结协同型流程。这种模式适用于现有生产线的技术改造。在现有烧结产能基础上，增建或改建球团生产线，逐步提高球团配比至 40%～50%。通过物料合理分配，使烧结机专门用于处理低品质矿粉和含铁废弃物，球团生产线处理优质细铁精粉，实现资源的高质转化和高效利用。

（3）能源网络协同是流程重构的重要组成部分。高比例球团冶炼导致燃料比、鼓风量及富氧量发生了显著变化，高炉煤气发生量和热值也受

到影响，需要重新进行煤气能量流及网络的规划和优化。球团入炉配比提高后，高炉煤气热值通常增加300～500 kJ/m^3，而煤气发生量会相应减少。与此同时，烧结工序高炉煤气消耗也降低[22]，而用于带式焙烧机的高热值气体燃料消耗将增加，可将富余的高炉煤气用于球团焙烧或发电，提高自发电比例。烧结工序的余热回收和发电系统将有所缩减，需重新优化全厂蒸汽管网和发电系统集成，以实现能源梯级利用。

4 结论与展望

（1）高配比球团冶炼是当前高炉炼铁最实用、最有效的低碳技术路径。研究表明，将球团入炉配比从20%提高至50%，可降低吨铁CO_2排放10%～15%（约为150～200 kg/t），同时减少燃料消耗15～30 kg/t，适用于钢铁行业大规模推广应用。

（2）碱性球团制备技术是实现高配比球团冶炼的关键所在。基于我国铁矿粉资源条件，研究中高硅碱性球团的制备技术，更具有挑战性和实用性。通过采用新型黏结剂体系、优化焙烧制度、协同调控冶金性能等技术措施，稳定大批量生产满足高炉大型化、高强度冶炼要求的优质球团矿。

（3）优化高炉操作是高配比球团冶炼技术成功应用的重要技术保障。针对球团矿的物理特性和冶金行为，研发应用精准布料控制技术、优化送风技术、精准调控热制度与造渣制度。采用智能化控制系统实时监测高炉运行状态，动态调节操作参数，提高高炉运行稳定性和能效。

（4）炼铁系统全流程协同优化可显著提升系统降碳潜力。通过构建炼铁一体化智能配料系统、工序功能优化与拓展、流程网络重构优化，可以实现物质流和能量流的协同耦合和高效运行。

参考文献：

[1] 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.

[2] 张福明，颉建新，殷瑞钰. 钢铁制造流程炼铁区段耗散结构的解析[J]. 钢铁，2022，57(3)：1－9.
ZHANG Fuming，XIE Jianxin，YIN Ruiyu. Analysis on dissipative structure of ironmaking procedure for iron and steel manufacturing process[J]. Iron and Steel，2022，57(3)：1－9.

[3] 冯士超，秦子然. 加强国内铁矿资源保障策略探析[J]. 冶金管理，2022(18)：48－51.
FENG Shichao，QIN Ziran. Analysis of strategies to enhance domestic iron ore resource security[J]. China Steel Focus，2022(18)：48－51.

[4] 张福明. 炼铁系统低碳技术发展前景与途径[J]. 钢铁，2022，57(9)：11－25.
ZHANG Fuming. Development prospects and methods on low-carbon technology in ironmaking system[J]. Iron and Steel，2022，57(9)：11－25.

[5] 张福明，徐文轩，程相锋，等. 高炉高比例球团矿冶炼关键工艺技术分析[J]. 钢铁，2024，59(3)：32－45.
ZHANG Fuming，XU Wenxuan，CHENG Xiangfeng，et al. Analysis on key process and technology of blast furnace ironmaking on high charging proportion of pellet ore[J]. Iron and Steel，2024，59(3)：32－45.

[6] 张福明，刘清梅. 高炉—转炉钢铁制造流程低碳技术发展与认识[J]. 中国冶金，2023，33(1)：1－17.
ZHANG Fuming，LIU Qingmei. Development and understanding on low carbon technology based on BF-BOF steel manufacturing processes[J]. China Metallurgy，2023，33(1)：1－17.

[7] 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.

[8] 王新东，金永龙. 高炉使用高比例球团的战略思考与球团生产的试验研究[J]. 钢铁，2021，56(5)：7－16.
WANG Xindong，JIN Yonglong. Strategy analysis and testing study of high ratio ofpellet utilized in blast furnace[J]. Iron and Steel，2021，56(5)：7－16.

[9] 马成伟，安钢，郭宏烈，等. 京唐5 500 m^{3}高炉超高比例碱性球团矿冶炼实践[J]. 炼铁，2024，43(1)：16－20.

MA Chengwei, AN Gang, GUO Honglie, et al. Operation of jingtang 5 500 m^3 BF smelting with ultra-high percentage of basic pellet[J]. Ironmaking, 2024, 43(1): 16 – 20.

[10] 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.

[11] 滕召杰,陈建,陈川,等. 首钢京唐 5 500 m^3 高炉高比例球团矿冶炼操作制度[J]. 炼铁,2020,39(6):7 – 10.
TENG Zhaojie, CHEN Jian, CHEN Chuan, et al. Smelting operation system of Shougang jingtang 5 500 m^3 BF under high pellet rate[J]. Ironmaking, 2020, 39(6): 7 – 10.

[12] 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.

[13] 姜文政,谢路奔,项思敏,等. 复合黏结剂球团的制备与固结机制[J]. 烧结球团,2025,50(4):56 – 63.
JIANG Wenzheng, XIE Luben, XIANG Simin, et al. Preparation and consolidation mechanism of composite binder pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(4): 56 – 63.

[14] KEMPPAINEN A, OHNO K I, ILJANA M, et al. Softening behaviors of acid and olivine fluxed iron ore pellets in the cohesive zone of a blast furnace[J]. ISIJ International, 2015, 55(10): 2039 – 2046.

[15] HITOSHI Toyota, TOMONORI Maeda, NAYUTA Mitsuoka, et al. Decreasing coke rate under all pellet operation in Kobe No. 3 blast furnace[J]. Kobe Steel Engineering Reports, 2019, 69(2): 13 – 18.

[16] 沈峰满,姜鑫,高强健,等. 高炉炉渣适宜镁铝比的理论基础[J]. 炼铁,2019,38(2):17 – 21.
SHEN Fengman, JIANG Xin, GAO Qiangjian, et al. Theoretical basis of suitable MgO/Al_2O_3 ratio in BF slag [J]. Ironmaking, 2019, 38(2): 17 – 21.

[17] 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]. Iron and Steel, 2020, 55(8): 11 – 18.

[18] 智谦,张福明,韩志国,等. 配加细磨烧结粉矿对带式焙烧机球团质量的影响[J]. 中国冶金,2024,34(2):35 – 41.
ZHI Qian, ZHANG Fuming, HAN Zhiguo, et al. Effect of adding finely ground sinter powder on pellet quality of belt roaster[J]. China Metallurgy, 2024, 34(2): 35 – 41.

[19] 刘清梅,张福明. 中国钢铁制造流程发展与关键问题[J]. 钢铁,2025,60(1):15 – 28.
LIU Qingmei, ZHANG Fuming. Iron and steel manufacturing process development and critical issues in China[J]. Iron and Steel, 2025, 60(1): 15 – 28.

[20] ZAHNG Fuming, CHEN Yanbo, XU Meng, et al. Development and progress on green and low-carbon ironmaking technology at Shougang[J]. Iron & Steel Technology, 2025, 22(11): 45 – 66.

[21] 张福明,张卫华,青格勒,等. 大型带式焙烧机球团技术装备设计与应用[J]. 烧结球团,2021,46(1):66 – 75.
ZHANG Fuming, ZHANG Weihua, QING Gele, et al. Design and application on pelletizing technologies and equipments in large-scale belt type roasting machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 66 – 75.

[22] 叶恒棣,周浩宇,王兆才,等. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望[J]. 烧结球团,2020,45(5):1 – 7.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Zhaocai, et al. Research and prospect of high proportion hydrogen-rich fuel sintering technology[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 1 – 7.