

超细磁铁矿/赤铁矿混合铁精矿碱性球团制备技术及工业应用

周明顺^{1,2}, 田勇³, 侯恩俭⁴, 蒋益³, 赵正洪^{1,2}, 朱德俊⁴, 杨光⁴, 姜喆^{1,2}

- (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)

摘要:为实现铁前系统绿色低碳转型, 针对鞍钢自产超细磁铁矿/赤铁矿混合精矿粒度极细、成球性差、氧化放热强、焙烧窗口窄、易过热开裂等特殊热行为问题, 系统开展原料物化特性表征、造球工艺参数与配矿结构优化、带式焙烧热工制度设计及冶金性能评价研究, 形成碱性球团制备成套关键技术。在此基础上, 鞍钢集团矿业有限公司东鞍山烧结厂400万t/a带式焙烧机碱性球团生产线实现稳定运行。碱性球团TFe含量约为64.0%、SiO₂含量约为3.80%, 碱度稳定在1.0; 抗压强度≥2 800 N/P、转鼓强度>92%、还原度>78%、还原膨胀率<12%、低温还原粉化率($RDI_{+3.15\text{ mm}}$)>90%。按《钢铁行业碳排放核算方法与报告指南(试行)》核算, 球团工艺替代原360 m²烧结机后, 产品碳排放强度由199.02 kgCO₂/t烧结矿降至40.64 kgCO₂/t球团矿, 实现了79.58%的减排效果。该研究为超细混合铁精矿资源制备碱性球团及其低碳应用提供了工程范例。

关键词: 超细混合精矿; 磁铁矿/赤铁矿; 碱性球团; 带式焙烧机; 冶金性能; 低碳炼铁; 碳减排

中图分类号: TF046 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)02-0013-11

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 02. 002

Preparation Technology and Industrial Application of Fluxed Pellets from Ultra-fine Magnetite-hematite Mixed Iron Concentrate

ZHOU Mingshun^{1,2}, TIAN Yong³, HOU Enjian⁴, JIANG Yi³, ZHAO Zhenghong^{1,2},

ZHU Dejun⁴, YANG Guang⁴, JIANG Zhe^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China; 4. Donganshan Sintering Plant of Ansteel Group Mining Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: To achieve the green and low-carbon transformation of the ironmaking system, in response to the special thermal behavior issues of Ansteel's self-produced ultra-fine magnetite-hematite mixed concentrate, such as extremely fine particle size, poor pelletizing property, strong oxidation heat release, narrow roasting window, and easy overheating and cracking, a systematic study was carried out on the characterization of raw material physical and chemical properties, optimization of pelletizing parameters and ore blending structure, design of the straight-grate system, and evaluation of metallurgical properties, and a complete set of key technologies for the preparation of fluxed pellets was formed. On this basis, the 4 million t/a fluxed pellet production line with the

straight-grate system in Donganshan Sintering Plant of Ansteel Group Mining Co., Ltd. achieved stable operation. The TFe of the fluxed pellets was approximately 64.0%, the SiO₂ was about 3.8%, and the basicity was stable at 1.0. Compressive strength was $\geq 2\ 800$ N per piece, drum strength was $>92\%$, reduction degree was $>78\%$, reduction expansion rate was $<12\%$, low-temperature reduction pulverization rate ($RDI_{+3.15\text{ mm}}$) was $>90\%$. According to the “Guidelines for Accounting and Reporting of Carbon Emissions in the Iron and Steel Industry (for Trial Implementation)”, after the pelletizing process replaced the original 360 m² sintering machine, the carbon emission intensity of the product decreased from 199.02 kgCO₂/t sintered ore to 40.64 kgCO₂/t pelletized ore, representing a 79.58% emission reduction. This study provides an engineering example for the preparation of fluxed pellets from ultra-fine mixed iron concentrate resources and their low-carbon application.

Key words: ultra-fine mixed concentrate; magnetite-hematite; fluxed pellets; straight-grate system; metallurgical performance; low-carbon ironmaking; carbon emission reduction

我国铁前系统以烧结矿+球团矿—高炉—转炉长流程为主导,能耗与碳排放占比最高,烧结工序又是SO₂、NO_x、颗粒物等大气污染物的重要来源之一^[1-3]。工艺对比表明,球团工序能耗仅为烧结的45%左右,污染物排放约为烧结的24%。相关企业测算数据显示,球团工艺在烟气流、CO₂、粉尘、SO₂、NO_x排放上均显著优于烧结工艺。因此,发展碱性球团技术、提高球团矿入炉比例,是鞍钢突破环保与能效瓶颈、实现绿色低碳转型的关键举措。

受资源禀赋、球团品质与成本等因素影响,我国高炉球团平均配比仍偏低,与欧美高比例球团炉料体系存在差距^[4-6]。立足我国铁精矿资源条件,开发高品位、低脉石、性能稳定的碱性球团矿并形成规模化技术路线,是推进长流程低碳转型的现实选择。碱性球团是在铁精矿造球过程中配加钙质熔剂,经过焙烧形成的高碱度炉料,行业通常以二元碱度CaO/SiO₂ ≥ 0.6 为判定标准,工业碱度多控制在0.8~1.3。该类球团可部分替代烧结矿入炉,减少石灰石分解吸热与CO₂排放,降低渣量并稳定炉渣体系;同时粒度均匀、强度高,有利于改善料柱透气性,为高比例球团冶炼提供支撑。研究表明,碱度、MgO、熔剂特性及加入方式,能够通过调控焙烧液相量、黏结相组成与矿相结构,显著影响球团冷强度、低温还原粉化、还原膨胀及软熔滴落性能^[7-15,26-27]。适度液相与有益矿相可提升球团的综合性能,但碱度过高或热工制度不当易导致液相过量、裂纹增多及性能劣化,需在质量、成本与冶炼适应性间优化匹配。

鞍钢集团钢铁研究院周明顺团队历经多年研究,打破了高硅铁精矿无法生产碱性球团的技术禁区,研发出基于低碱高硅球团的低碳高炉炉料解决方案,并获2022年世界钢铁协会低碳生产卓越成就奖,这一技术对解决我国普遍存在的铁精矿含硅高、生产碱性或熔剂性球团难的问题具有重要参考借鉴意义。首钢、河钢等高炉实践表明,碱性球团配比提升至50%~55%时,综合燃料比降低4.5~5.4 kg/t,利用系数提升7.5%~10.2%,生铁日产量增幅7.6%~10.2%,吨铁CO₂排放下降约60 kg^[16-18]。碱性球团凭借综合优势,已成为铁前系统降碳与超低排放协同发展的优选炉料。

鞍钢矿业铁精矿经细磨深选后,-400~-500目超细粒级占比超80%,存在成球需水量大、生球强度低、干燥易爆裂、焙烧控制难等问题。该超细磁铁矿/赤铁矿混合精矿比表面积大、表面活性强、造球参数敏感, SiO₂含量偏高不利于低燃料比冶炼,且不同铁矿物氧化再结晶差异大,对焙烧温度与氧气控制要求严苛。前期带式焙烧机试产时,曾出现生球落下强度偏低、干燥粉化率高、焙烧过熔黏结、成品球强度波动大等问题,膨润土消耗高、合格球产出率低,难以稳定支撑高炉高比例球团冶炼。本研究以鞍钢该混合精矿为原料,沿“原料表征—造球与配矿优化—焙烧试验—性能评价—工业验证—碳减排核算”路线开展研究,制备适配高炉的碱性球团。针对超细精矿成球难、焙烧控制严苛等问题,形成成套生产技术并应用于鞍钢集团矿业有限公司东鞍山烧结厂400万t/a带式焙烧机产线,实现产品性能达标与规模化稳定生

产。通过球团工艺替代烧结工艺的减排核算,建立球团替代烧结低碳路径,形成可推广工程示范,为鞍钢铁前低碳高效生产提供技术支持。

1 原料与方法

以鞍钢碱性球团生产所用铁精矿为研究对象,系统检测其化学成分、微观形貌、比表面积、成球性能及热行为等关键指标。通过原料性能表征,揭示其在造球、焙烧过程中的作用机制,为高品质碱性球团的制备提供理论依据与原料支撑。

1.1 原料化学成分与物化性能

1.1.1 铁精矿化学成分

碱性球团生产所用三种大宗铁精矿的主要化学成分(质量分数)与烧损见表1。由表1可知,

AQC精矿各化学成分含量适中,满足球团生产要求;DFC精矿TFe最高、SiO₂最低,品位优、熔剂消耗少;DCC精矿FeO最高,氧化放热强、利于焙烧,但SiO₂偏高,需要增加熔剂配比。三种精矿有害杂质极少、原料纯净,烧损为负,焙烧时氧化增重有利于球团致密化。

1.1.2 膨润土物化性能与熔剂化学成分

试验用膨润土吸水率391.5%、膨胀容49 mL,属优质膨润土。消石灰CaO含量高、活性好,为主要熔剂,石灰石作为辅助熔剂。采用石灰石20%+消石灰80%的熔剂组合方案,可以提高生球爆裂温度、优化球团孔隙与还原性。膨润土与熔剂主要化学成分(质量分数)及烧损见表2,由表2可知,所用原料均符合要求,适配碱性球团生产。

表1 三种铁精矿主要化学成分(质量分数)与烧损

Table 1 Main Chemical Composition (Mass Fraction) and Burning Loss of Three Iron Concentrate

矿名	化学成分(质量分数)/%										烧损
	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	P	
AQC精矿	67.66	25.40	5.20	0.30	0.18	0.35	0.020	0.020	0.060	0.01	-1.36
DFC精矿	68.70	19.21	2.42	0.21	0.33	0.43	0.068	0.036	0.039	0.02	-0.80
DCC精矿	67.01	28.58	5.96	0.22	0.25	0.14	0.013	0.011	0.020	0.01	-2.53

表2 膨润土与熔剂主要化学成分(质量分数)及烧损

Table 2 Main Chemical Composition (Mass Fraction) and Burning Loss of Bentonite and Fluxes

熔剂种类	化学成分(质量分数)/%									烧损
	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	
膨润土	3.98	53.28	13.17	3.36	2.30	0.100	0.16	1.87	4.960	14.36
消石灰	0.17	1.90	0.47	65.58	2.87	0.036	<0.01	0.19	0.016	28.72
石灰石	0.17	1.84	0.43	52.57	1.78	0.077	<0.01	0.24	0.018	42.75

1.1.3 铁精矿物化性能

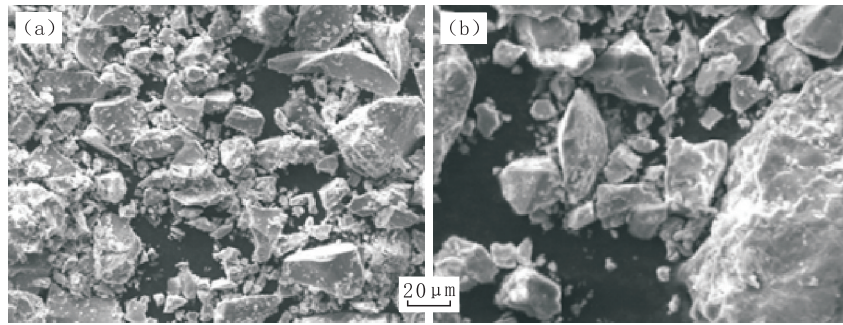
(1) 微观颗粒形貌分析

采用SEM对AQC、DFC铁精矿进行微观形貌表征,为成球机理与工艺优化提供依据,铁精矿微观颗粒形貌见图1。由图1可知,两种精矿颗粒均以超细粒级为主,多数粒径尺寸<20 μm,呈不规则粒状与片状,表面致密光滑,部分附着微细颗粒。不规则粒状与片状颗粒导致铁精矿比表面积大、造球需水量高,生球强度与稳定性差;表面光滑使颗粒间机械咬合弱,生球抗冲击性差,易造成造球与焙烧过程波动,对球团质量控制不利;颗粒

堆积紧密、孔隙率低,干燥预热容易开裂。

(2) 物相组成分析

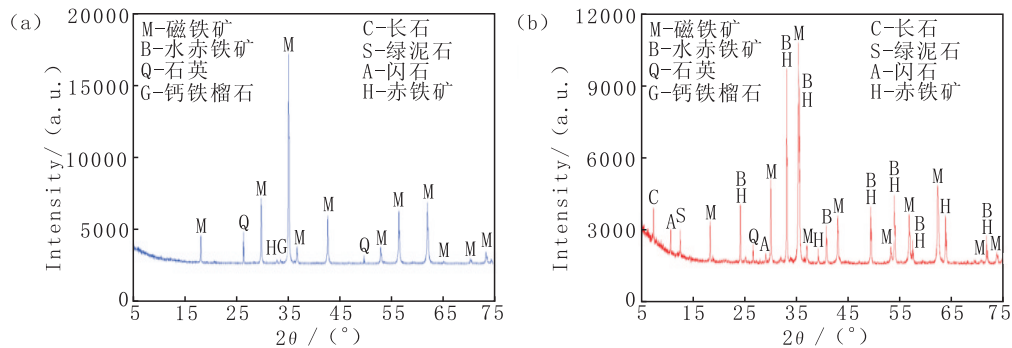
采用X射线衍射(XRD)对AQC、DFC铁精矿进行物相表征,明确含铁矿物与脉石组成,为配矿方案与焙烧制度优化提供依据。铁精矿X射线衍射分析如图2所示。由图2可知,AQC精矿主相为磁铁矿,伴生赤铁矿,脉石以石英为主,总脉石约7%,磁铁矿氧化放热充足,利于焙烧固结,但石英含量较高,且含结晶水矿物,需要严格控制干燥与焙烧制度;DFC精矿主相为赤铁矿,磁铁矿含量较低,伴生水赤铁矿,脉石以石英、长石、绿泥石为



(a) AQC精矿; (b) DFC精矿

图1 铁精矿微观颗粒形貌

Fig. 1 Microstructure Morphology of Iron Concentrate Particles



(a) AQC精矿; (b) DFC精矿

图2 铁精矿X射线衍射分析

Fig. 2 X-ray Diffraction Analysis of Iron Concentrate

主,总脉石约9%,品位高、杂质少,但氧化放热不足,单独焙烧难度大。

两种精矿物相、粒度与成球特性差异显著,单独使用均存在明显短板。通过AQC、DFC混合配矿可以实现优势互补,改善成球性与焙烧适应性,为制备高性能碱性球团提供可靠原料保障。

1.2 铁精矿静态成球性能

静态成球性能是表征铁精矿亲水能力及成球难易程度的关键指标,为造球工艺参数优化提供基础依据。本试验对三种铁精矿的比表面积与静态成球性能进行了系统检测,三种铁精矿的比表面积与静态成球性指数见表3。

1.2.1 静态成球性指数分析

由表3可知,三种铁精矿在静态条件下的成球性能存在显著差异。以静态成球性指数(K)为核心评价依据,三种铁精矿的成球能力由强至弱依次为DFC精矿、AQC精矿、DCC精矿。其中DFC精矿展现出最优的静态成球潜力,而DCC精矿静态成球性相对偏弱。

表3 三种铁精矿的比表面积与静态成球性指数

Table 3 Specific Surface Area and Static Ballability Index of Three Iron Concentrate

原料	真密度/ (g/cm^3)	比表面积/ (m^2/kg)	最大分子 水含量 (质量分数)/%	最大毛细 水含量 (质量分数)/%	静态 成球性 指数 K
AQC精矿	4.99	216.0	4.78	16.00	0.43
DFC精矿	4.84	203.7	5.07	15.18	0.50
DCC精矿	4.88	140.8	4.00	15.61	0.35

1.2.2 生产实际适应性与机理分析

静态成球性指数仅代表理想静态环境下的颗粒成球倾向,与工业造球动态过程存在一定差异。结合实际生产工况与微观机理分析,三种铁精矿在实际生产中成球能力由强至弱依次为DCC精矿、AQC精矿、DFC精矿。

DCC精矿成球性能最强,尽管DCC精矿静态成球性数标最低,但其比表面积最小($140.8 \text{ m}^2/\text{kg}$),颗粒表面吸附水膜的饱和度要求较低。在动态造球过程中,DCC精矿颗粒更易在滚动挤压下形成致

密堆积,生球内部孔隙结构相对合理,且在干燥预热阶段不易发生爆裂。因此,在实际生球筛分与抗压强度测试中,DCC精矿展现出最佳的成型稳定性与机械强度,是高质量生球的优质原料。

AQC精矿成球性能次之,是由于其比表面积最大($216.0 \text{ m}^2/\text{kg}$),表面活性位点多,持水能力强。该矿种在动态成球初期易形成均匀的水膜,成球速度快。但由于比表面积过大,若水分控制不当,易导致生球过湿或在高温干燥阶段收缩剧烈,影响最终强度的稳定性。

DFC精矿成球性能最差,DFC精矿虽然静态成球性指数最高,但其成球性受水分影响极为敏感。在实际生产的动态滚动状态下,其颗粒间的接触点黏结力较弱,生球结构相对松散。一旦水分略高,极易出现“过湿层”现象,导致生球强度下降、落下强度不合格,成为制约生球质量的关键瓶颈。

1.2.3 综合配料策略

综上所述,静态成球性指数反映了矿粉的基础成球属性,而实际生产性能则受比表面积、持水特性及微观结构的综合制约。鉴于三种铁精矿在物理属性与成球特性上差异显著,实际生产中建议采用多品种精矿合理搭配的配料方案。通过优化DCC精矿的引入比例,可以有效对冲DFC精矿成球稳定性的风险,同时利用AQC精矿的成球速度优势,为制备高质量、高稳定性的生球团提供可靠的原料保障。

1.3 铁精矿热行为

1.3.1 研究方法

采用同步热分析仪(TG-DSC)对AQC、DFC、DCC三种铁精矿进行热行为分析。试验条件如下:试样质量(10 ± 1) mg,升温速率 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,测试温度范围为室温~ $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,分别通入空气、氮气两种气氛,气体流量 $50 \text{ mL}/\text{min}$ 。通过TG曲线记录试样质量变化,DSC曲线分析热效应特征,明确不同铁精矿在升温过程中的脱水、氧化及相变规律,为球团焙烧制度制定与配矿方案设计提供理论依据。

1.3.2 铁精矿热行为特征分析

(1) 不同气氛下的氧化与热效应特征

AQC精矿、DFC精矿及DCC精矿在空气、氮气气氛下的TG-DSC分析曲线见图3~图5。由图3~图5可知,在氮气气氛下,三种铁精矿无明显氧化增重与放热峰,仅存在微量脱水失重,表明铁矿物未发生氧化反应;在空气气氛下,三种铁精矿在中

温区间出现显著氧化增重与放热峰,热行为差异显著。在空气气氛下,AQC精矿氧化增重 2.0% ,氧化程度约 58% ;DFC精矿氧化增重 1.8% ,氧化程度约 52% ;DCC精矿在 $300\sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 氧化最为剧烈,最大氧化增重约 2.5% ,对应DSC曲线放热峰强且尖锐。AQC精矿、DFC精矿氧化起始温度均在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,AQC精矿高温氧化阶段持续时间更长,DFC精矿在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 后质量与热效应基本趋于稳定。

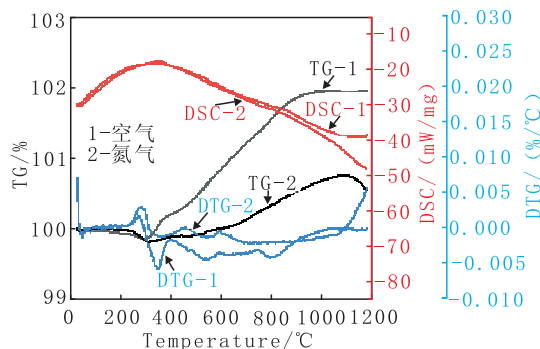


图3 AQC精矿在空气、氮气气氛下的TG-DSC分析曲线
Fig. 3 TG-DSC Analysis Curve of AQC Concentrate in Air and Nitrogen Atmospheres

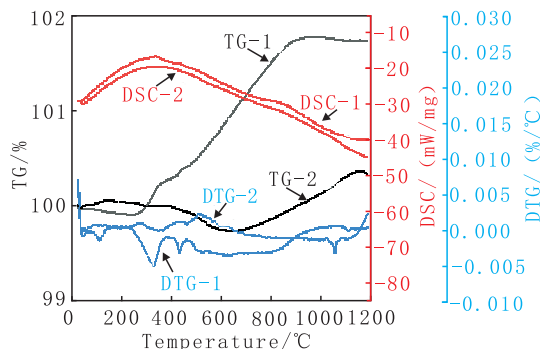


图4 DFC精矿在空气、氮气气氛下的TG-DSC分析曲线
Fig. 4 TG-DSC Analysis Curve of DFC Concentrate in Air and Nitrogen Atmospheres

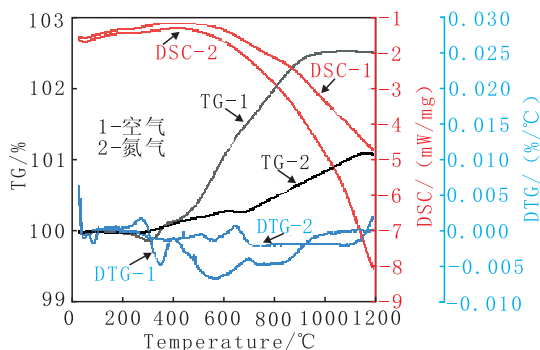


图5 DCC精矿在空气、氮气气氛下的TG-DSC分析曲线
Fig. 5 TG-DSC Analysis Curve of DCC Concentrate in Air and Nitrogen Atmospheres

(2) 热行为差异成因分析

三种铁精矿的热行为差异主要由FeO含量决定,DCC精矿FeO含量高,低温氧化速率快,再结晶固结能力强,但易出现过熔黏结;DFC精矿FeO含量低,氧化过程温和稳定,但单独使用时氧化放热不足,固结驱动力偏弱;AQC精矿氧化过程平稳,热行为介于两者之间,可在配矿体系中起到缓冲热波动的作用。同时,气氛氧浓度与升温速率对氧化进程影响显著,缺氧气氛或升温速率过快均会抑制铁矿物氧化,其中DCC精矿对温度更为敏感,需严格控制焙烧温度与升温制度。

(3) 配矿热行为协同效应

三种铁精矿热行为具有良好互补性,AQC精矿用于平衡体系热波动、避免局部过热,DFC精矿保障成品球团品位与焙烧稳定性,DCC铁精矿可为体系提供充足氧化放热与固结强度。通过三者合理配比,可实现氧化速率与放热强度的均衡匹配,保证球团在焙烧过程中受热均匀、固结充分,为制备高性能碱性球团提供支撑。

2 试验研究与结果分析

2.1 造球工艺优化

生球水分直接影响成球效果与成品性能。水分不足则成球差、强度低;水分过高易黏结、爆裂

温度下降,需针对原料特性精准调控。因此对造球过程进行优化试验,试验在圆盘造球机中进行,造球过程分为母球形成、球核长大、生球密实三个阶段。造球机参数为直径1 000 mm,转速23 r/min,倾角47°。固定二元碱度1.00,选用配矿方案为DFC铁精矿50%+AQC精矿35%+DCC精矿15%,外配0.7%膨润土及适量熔剂,碱性球团配矿方案见表4,生球水分对生球性能的影响见表5。依据生球落下强度指标依据,行业及带式焙烧机生产通用标准为生球落下强度 ≥ 4.0 次/(0.5 m)即可满足转运、干燥及焙烧工序的生产要求。由表5可知,随着生球水分的提高,落下强度先升后降,抗压强度整体稳定,爆裂温度随水分过高明显降低。综合考虑生球落下强度、抗压强度及爆裂温度等关键性能,确定最佳生球水分为9.88%,此时落下强度达到8.0次/(0.5 m),抗压强度13.37 N/P,爆裂温度532℃,各项指标均满足并优于碱性球团生产要求。在实际生产中,混合料水分按8.5%左右控制,生球水分按10%左右控制。

2.2 焙烧扩大试验与焙烧制度优化

焙烧是决定碱性球团强度、冶金性能及生产能耗的关键工序。以碱度为1.0的优化配矿方案为基础,开展焙烧扩大试验,确定适宜热工制度,制备满足高炉冶炼要求的优质碱性球团。

表4 碱性球团配矿方案

Table 4 Ore Blending Scheme for Fluxed Pellets

DFC精矿/%	AQC精矿/%	DCC精矿/%	熔剂/%	外配膨润土/%	球团TFe/%	球团SiO ₂ /%	碱度
50~55	35~40	10~15	4.6~4.8	0.70~0.75	64.0~64.5	3.6~4.0	1.0

表5 生球水分对生球性能的影响

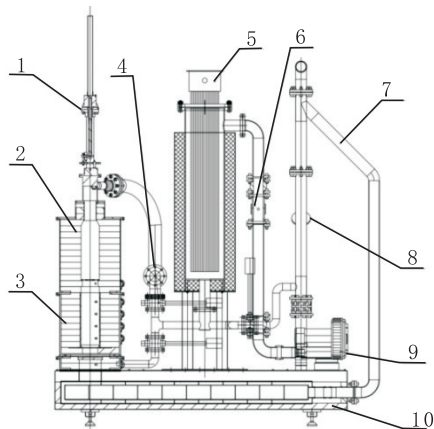
Table 5 Effect of Pelletizing Moisture on Green Pellet Properties

方案 序号	生球水分/ %	造球时间/ min	落下强度/ [次·(0.5 m) ⁻¹]	抗压强度/ (N·P ⁻¹)	爆裂温度/ ℃
1	7.05	12	5.4	12.35	>550
2	8.54	12	5.8	11.32	>550
3	9.13	12	6.0	13.14	>550
4	9.32	12	6.7	13.24	>550
5	9.88	12	8.0	13.37	532
6	10.78	12	6.1	11.51	496
7	11.62	12	5.1	12.78	478

采用模拟带式焙烧机工艺扩大装置(见图6),完整模拟了干燥、预热、焙烧、均热、冷却全流程,对最优配矿方案进行扩大验证,为工业化生产提供可靠工艺参数。经多组平行试验优化,成品球团的抗压强度、冶金性能等关键指标显著提升,满足生产要求,验证了管炉试验结果可靠,可直接作为年产400万t工业生产线的的设计依据。结合试验结果,确定工业化适宜焙烧制度,带式机碱性球团矿焙烧制度见表6。

由表6可知,预热段550~1 120℃,保障球团充分氧化与结构稳定,温度偏低则氧化不足、强度偏低,温度偏高易造成表层过熔,阻碍内部氧

化。焙烧段1 220~1 270 °C需精准控温,温度不足导致固结不充分、强度差,温度过高则液相过量,导致球团变形、黏连。均热段1 150 °C可促进晶粒长大与物相均匀化,是提升球团强度与冶金性能的重要环节。



1-丝杠升降机; 2-球团燃烧室; 3-球团焙烧室; 4-空气通断阀;
5-反吹加热炉; 6-涡街流量计; 7-管路; 8-尾气分析仪;
9-涡旋鼓风机; 10-空气换热室。

图6 模拟带式焙烧机工艺扩大装置

Fig. 6 Pilot-scale Simulated Straight-grate System Process System

表6 带式机碱性球团矿焙烧制度

Table 6 Roasting Regime of Fluxed Pellets on Straight-grate System

球团焙烧全过程	温度/°C	时间/min
鼓风干燥	60~80	2.80~3.30
抽风干燥	130~200	2.80~3.30
预热段	550~1 120	4.00~4.32
焙烧段	1 220~1 270	9.00~9.32
均热段	1 150	2.30~2.70
一冷段	1 100~900	5.63~6.03
二冷段	750~600	3.13~3.53
三冷段	420~270	3.13~3.53

2.3 成品球团矿化学成分与冶金性能

以50% DFC精矿+35% AQC精矿+15% DCC精矿为配比,在优化焙烧制度下制备碱性球团(FP),与现场酸性球团(AP)对比检测,评价其高炉适用性。

2.3.1 化学成分

FP与AP的化学成分及碱度对比见表7。由表7可知,两组球团TFe含量均>64.0%,为高品位炉料;FeO含量均<0.3%,氧化充分。FP二元碱度为1.00,是典型碱性球团,其SiO₂含量为3.80%,显著低于AP中SiO₂含量6.32%。在有害元素控制方面,两组球团P含量与S含量均极低;FP碱金属总量仅为0.084%,远低于AP碱金属总量的0.235%,可以有效减轻高炉碱金属循环富集,改善炉况顺行。

综上所述,实验室制备的FP,其铁品位高、碱度适宜、SiO₂与有害元素控制优异,化学成分整体优于现场AP,为优良冶金性能奠定了基础。

2.3.2 冶金性能

根据相关国家标准,测定FP与AP的还原度指数(RI)、低温还原粉化指数(RDI)、自由膨胀指数(RSI)及冷态强度。FP与AP的冷强度和热态冶金性能指标的比较见表8。由表8可知,FP还原度指数RI为78.72%,远高于AP的65.00%,还原动力学更好。CaO能够促进易还原矿相生成,有效抑制还原停滞。高温体积稳定性上,FP自由膨胀指数为11.23%,低于AP的14.56%,球团在高炉内体积更稳定,有利于维持料柱透气性。强度与低温粉化性能相近,两者转鼓强度均大于92%,冷态强度优良;RDI_{-0.5mm}均低于3%,粉化控制良好。

总体而言,AP仅在冷强度与低温粉化指标略占优,核心高温冶金性能明显偏弱。FP借助钙质熔剂优化了物相及结构,还原性能与高温稳定性大幅提升,可以改善高比例球团入炉后的透气性与软熔带特性,为高炉提高球团配比、高效稳定冶

表7 FP与AP的化学成分(质量分数)及碱度对比

Table 7 Comparison of Chemical Composition (Mass Fraction) and Basicity of FP and AP

试样	化学成分(质量分数)/%										碱度
	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	K ₂ O	Na ₂ O	
FP	64.01	0.30	3.80	0.58	3.79	0.41	0.002	0.010	0.034	0.050	1.00
AP	64.65	0.28	6.32	0.71	0.35	0.46	0.003	0.010	0.045	0.190	0.06

表8 FP与AP的冷强度和热态冶金性能指标的比较

Table 8 Comparison of Cold Strength and Hot Metallurgical Properties between FP and AP

试样	还原度指数/%	自由膨胀指数/%	转鼓强度/%	低温还原粉化指数/%		
				$RDI_{+6.3\text{ mm}}$	$RDI_{+3.15\text{ mm}}$	$RDI_{-0.5\text{ mm}}$
FP	78.72	11.23	92.45	97.41	97.68	2.21
AP	65.00	14.56	93.50	97.80	98.02	1.91

炼提供有力支撑。

2.4 碱度对球团矿还原膨胀率的影响

碱度是调控球团高温冶金性能的关键参数,通过改变焙烧过程中矿物组成、液相量与显微结构,直接影响还原膨胀行为。还原膨胀过大会引发粉化、料柱透气性恶化、炉压升高,威胁高炉顺行。因此,明确碱度与还原膨胀的对应规律,对抑制异常膨胀、提升体积稳定性具有重要理论与工程价值。

本研究固定 SiO_2 含量为4.05%,以CaO调节二元碱度,设置0.05、0.35、0.50、0.68、0.98五组水平,按GB/T 13240—2018测定还原膨胀率。碱度对球团矿还原膨胀率的影响如图7所示,由图7可知,还原膨胀率随碱度呈典型单峰曲线变化,碱度由0.05升至0.50时,膨胀率从11.2%升至峰值22.0%;继续提高至0.98,膨胀率逐步降至12.0%。

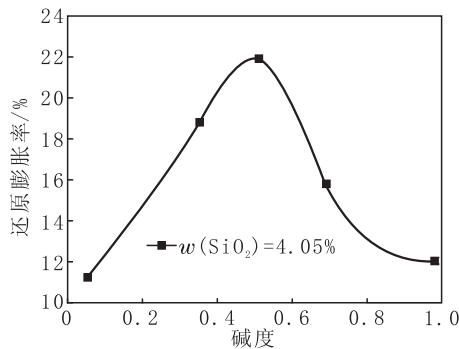


图7 碱度对球团矿还原膨胀率的影响

Fig. 7 Effect of Basicity on Reduction Swelling Rate of Pellets

机理分析表明,低碱度(<0.4)时,少量 Ca^{2+} 固溶弱化赤铁矿晶界结合,还原相变易产生晶间裂纹,膨胀上升;中碱度($0.4\sim 0.6$)时,易生成低熔点钙硅酸盐液相,结构疏松多孔,应力集中释放,膨胀达到峰值;高碱度(≥ 0.8)下,过量CaO促进高熔点黏结相形成,结构致密、强度提高,可有效抑制裂纹与膨胀,显著提升高温体积稳定性。

2.5 软熔滴落性能研究

软熔滴落性能是评价高炉炉料高温冶金性能的关键指标,优良特性可以改善料柱透气性、降低高炉燃料比。为揭示碱性球团的改善作用,设置两组炉料结构对比:以1号为基准(71%高碱度烧结矿+29%AP),2号为试验方案(55%高碱度烧结矿+22%AP+23%FP),开展软熔滴落试验,综合炉料软熔滴落性能见表9。

由表9可知,配加FP后综合炉料软熔滴落性能明显优化,试验方案软化起始温度 T_{10} 略降,熔化温度 T_s 基本持平,滴落温度 T_d 由1424℃降至1420℃,熔滴区间由148℃收窄至137℃,软熔区间基本稳定。最显著的是熔滴特性值 S 从976.7 kPa·min大幅降至637.4 kPa·min,软熔带透气性阻力显著降低,同时渣铁高温流动性提升、滴落更顺畅。

综合表明,在传统炉料结构中配加适量FP,可以有效优化软熔滴落特性,降低高温透气性阻力,对高炉高效、稳定、顺行具有明显的积极作用。

表9 综合炉料软熔滴落性能

Table 9 Softening and Melting-dripping Properties of Comprehensive Burden

炉料	$T_{10}/^{\circ}\text{C}$	$T_{40}/^{\circ}\text{C}$	$T_s/^{\circ}\text{C}$	$T_d/^{\circ}\text{C}$	软化区间	熔滴区间	软融区间	熔滴特性值 $S/$	滴落5 min	滴落10 min
					$(T_{40}\sim T_{10})/^{\circ}\text{C}$	$(T_d\sim T_s)^{\circ}\text{C}$	$(T_d\sim T_{10})/^{\circ}\text{C}$	(kPa·min)	质量/g	质量/g
1号	1186	1264	1276	1424	78	148	238	976.7	120.6	229.0
2号	1181	1270	1283	1420	89	137	239	637.4	167.0	224.7

3 东鞍山烧结厂碱性球团工业化生产应用

3.1 东烧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(以下简称“东烧”)年产400万t带式焙烧机碱性球团生产线,是鞍钢矿业推动绿色低碳转型与产业升级的重点工程。项目于2024年1月17日开工建设,2024年9月12日完成主体设备冷态调试,10月15日点火投产,11月10日进入热负荷试车,11月27日正式投产运行,并于2025年1月1日实现达产达效。

3.2 东烧碱性球团生产指标

3.2.1 生产过程操作与控制指标

东烧碱性球团生产线过程关键指标如表10所示。实际生产表明,生球落下强度保持在(3~6)次/(0.5 m),湿返球率控制在23%~25%,生球质量受控,造球工序稳定可靠,生产线运行稳定;热工制度控制合理,最高干燥温度为380~400℃,可以高效脱水并防止生球爆裂;最高焙烧温度精准控制在1 260~1 270℃,处于适宜的固相

结晶与固结温度区间,为制备高强度成品球团提供了保障。当前成品排矿温度约150℃,冷却效果与余热回收能力仍具备进一步优化潜力。

表10 东烧碱性球团生产过程关键指标

Table 10 Production Process Key Indicators of Dongshao FP

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/℃
3~6	23~25	380~400	1 260~1 270	150

3.2.2 成品球团物理及冶金性能

由于量化粒度差异对球团成型质量及冶金行为的敏感度,不同粒级球团的抗压强度存在明显梯度规律。因此,为全面评估东烧碱性球团的工业化适用性及质量均匀性,开展成品球团物理及冶金性能系统测试。东烧碱性球团与国外碱性球团化学成分、碱度、冷强度及冶金性能指标比较见表11,进一步通过不同粒级(直径)分级测试,深入探究颗粒尺寸对球团强度及还原性能的影响规律,不同直径东烧碱性成品球团性能指标比较见图8。

表11 东烧碱性球团与国外碱性球团化学成分、碱度、冷强度及冶金性能指标比较

Table 11 Comparison of Chemical Composition, Basicity, Cold Strength and Metallurgical Properties between Dongshao Basic Pellets and Foreign Basic Pellets

品名	化学成分(质量分数)/%						碱度	冷强度		冶金性能			
	TFe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	S	P		CCS/ (N/P)	TI _{+6.3mm} / %	AI _{-0.5mm} / %	RSI/ %	RI/ %	RDI _{+3.15mm} / %
某国外碱性球团1	66.53	1.94	1.92	0.51	0.04	0.050	0.99	2 500	94.70	4.4	20.00		
某国外碱性球团2	65.50	2.13	2.22	1.00	0.03	0.040	1.04	1 700	93.50	5.5	14.00	75.0	
东烧碱性球团	63.98	3.71	3.69	0.46	0.01	0.002	0.99	2 865	92.80	5.4	11.19	78.5	92.1

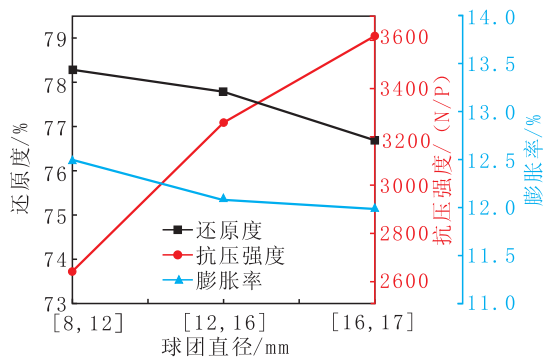


图8 不同直径东烧碱性成品球团性能指标比较

Fig. 8 Comparison of Performance Indicators of Dongshao Fluxed Finished Pellets with Different Diameters

由表11可知,东烧碱性球团平均抗压强度达2 865 N/P,明显优于两款国外对比产品,转鼓强度为92.80%,虽然与国外顶尖产品存在小幅差距,但足以满足高炉料柱骨架的支撑要求;东烧球团RDI_{+3.15mm}为92.1%,高温还原结构稳定性优异,还原度(RI)达到78.5%,还原软化开始温度低,显著优于传统酸性球团。东烧碱性球团还原度由传统酸性球团的62%~65%大幅提升至78%~82%,核心归因于CaO与Fe₂O₃在高温下形成了易还原的铁酸钙物相,同时合理的碱度促进了球团内部微孔结构的发育,利于还原剂气体扩散。

由图8可知,RI与RDI在不同粒级间表现稳定。这表明东烧球团的微孔结构与铁酸钙黏结相形成均匀,受颗粒自身直径影响极小。这种粒度不敏感性是大型高炉均匀冶炼的关键前提,确保无论布料过程中如何分布,球团都能提供稳定的透气性和反应效率。

综合来看,东烧成品球团TFe含量约为64.0%、SiO₂含量约为3.80%,碱度稳定在1.0;抗压强度≥2 800 N/P、转鼓强度>92%、还原度>78%、还原膨胀率<12%、低温还原粉化率(RDI_{+3.15mm})>90%。尽管其TFe品位和转鼓指数与国外顶级产品略有差距,但在还原性能、强度稳定性及生产成本控制方面

具备显著优势,完全满足大型高炉高效、低耗、稳定的冶炼要求,具备较强的国际市场竞争能力。

3.2.3 化学成分

东烧碱性球团成品球化学成分(质量分数)和碱度见表12,由表12可知,工业化生产的东烧碱性球团主要化学成分TFe含量为64.02%,FeO含量为0.30%,SiO₂与CaO均为3.80%,二元碱度为1.00,化学成分稳定,为典型优质碱性球团成分体系。高Fe、低FeO有利于提高高炉入炉品位与间接还原效率;碱度精准控制为焙烧形成铁酸钙高强度、高还原性黏结相奠定基础,从成分上保证了优良冶金性能。

表12 东烧碱性球团成品球化学成分(质量分数)和碱度

Table 12 Chemical Composition(Mass Fraction) and Basicity of Dongshao Fluxed Finished Pellets

化学成分(质量分数)/%										碱度
TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	K ₂ O	Na ₂ O	
64.02	0.30	3.80	0.46	3.80	0.35	0.023	0.036	0.020	0.150	1.00

3.3 生产运行经济指标

东烧碱性球团经济指标见表13,由表13可知,东烧碱性球团生产线利用系数为0.92 t/(m²·h),单位产能利用率高;综合合格率为94.93%,工艺控制稳定精准;日历作业率为92.83%、扣外作业率为93.14%,设备与生产组织高效。该生产线经济指标表明碱性球团规模化、低成本、稳定化生产是可以实现的。

表13 东烧碱性球团经济指标

Table 13 Economic Indicators of Dongshao Fluxed Pellets

利用系数/ (t/(m ² ·h))	综合合格率 /%	日历作业率 /%	扣外作业率 /%
0.92	94.93	92.83	93.14

4 带式焙烧机工艺替代的碳减排效果

4.1 核算依据与工艺制度

4.1.1 核算依据

以《钢铁行业碳排放核算方法与报告指南(试行)》为核算依据,燃料燃烧排放按燃料消费量与对应CO₂排放因子乘积计算;工业过程排放按熔剂(石灰石、白云石)分解量核算;外购电力排放按电网平均排放因子计算;运输排放按运输距离、载

货量与公路运输排放因子核算。参数依据:燃料低位发热量、CO₂排放因子、电网排放因子、运输排放因子均采用指南推荐缺省值;能源消耗、熔剂用量、电耗、运输数据均来自现场实测与扩大试验标定值。

4.1.2 工艺制度

(1) 对照工艺:东烧360 m²烧结机现行生产制度,燃料以无烟煤/焦粉为主,常规布料与抽风烧结,碱度为1.8~2.0。

(2) 替代工艺:400万t/a带式焙烧机优化热工制度,燃料以天然气为主,成品球团碱度为1.0。

4.2 碳减排核算结果

对原360 m²烧结工序与新建带式焙烧机工序开展全口径碳排放对比核算,带式焙烧机生产CO₂减排效果见表14。

由表14可知,采用带式焙烧机碱性球团替代烧结矿后,产品碳排放强度由199.02 kg CO₂/t降至40.64 kg CO₂/t,综合减排率达79.58%。其中,范围一(燃料燃烧排放)减排96.9%,降幅最显著。主要因燃料由固体煤粉切换为清洁天然气,燃烧碳排放大幅下降;同时球团工艺熔剂配比烧结显著降低,碳酸盐分解带来的工业过程排放明显减少。范围二(外购电力热力)减排33.9%,带式

表14 带式焙烧机生产CO₂减排效果

Table 14 Carbon Emission Reduction Effect of

Straight-grate System Production kg/t

项目	范围一		范围二	范围三	合计
	燃料燃烧 排放	工业过程 排放	外购电力 热力排放	铁精矿 运输排放	
烧结工序	123.25	27.55	41.14	7.08	199.02
球团工序	3.86	8.99	27.19	0.60	40.64
减排量	-119.39	-18.56	-13.95	-6.48	-158.38
减排百分比	-96.9%	-67.4%	-33.9%	-91.50%	-79.58%

焙烧机热工制度优化、余热梯级利用与高效风机运行,使工序电耗显著降低,间接排放同步下降。范围三(铁精矿运输排放)减排91.5%,球团生产全部使用鞍钢内部就近铁精矿,取消外购矿粉长距离运输,运输环节碳排放近乎消除。

5 结论与展望

5.1 结论

针对鞍钢自产超细磁铁矿/赤铁矿混合精矿粒度细、对球团工艺造成显著不利影响等特点,为满足高比例球团冶炼与铁前低碳转型需求,开展了原料特性、配矿方案、造球焙烧制度及冶金性能的系统研究,形成了碱性球团成套制备技术,并在东烧400万t/a带式焙烧机生产线实现工业化稳定应用,主要结论如下:

(1) 突破了超细混合精矿制备碱性球团的关键技术,建立了适配鞍钢原料特点的配料与工艺体系。采用石灰石与消石灰复合配矿,确定配矿优化方案,结合带式焙烧机球团体系,完成了从实验室研究到碱性球团工业生产的全流程验证,生产线运行稳定、产品质量可控。

(2) 碱性球团工业产品综合性能优异。成品球团TFe含量约为64.0%、SiO₂含量约为3.80%,碱度稳定在1.0;抗压强度≥2 800 N/P、转鼓强度>92%、还原度>78%、还原膨胀率<12%、低温还原粉化率($RDI_{+3.15\text{ mm}}$)>90%,具备较强的国际市场竞争力,可满足大型高炉优质炉料要求。

(3) 实现了铁前系统协同碳减排。采用球团工艺替代原烧结工艺,碳排放强度由

199.02 kgCO₂/t 烧结矿降至40.64 kgCO₂/t 球团矿,降幅79.58%。

综上,本研究解决了超细铁精矿制备高品质碱性球团的技术难题,形成了完整的技术方案与应用示范,对同类资源高效利用、高比例球团推广及行业绿色发展具有重要意义。

5.2 展望

本研究验证了鞍钢超细混合精矿制备碱性球团并规模化应用的可行性,形成了从原料到工艺应用的完整技术范例,可为同类企业提供技术参考。未来应进一步深化两方面工作:一是加强碱性球团成球机理与焙烧相变规律和镁质碱性球团的研究,提升产品稳定性和软熔性能;二是持续挖掘全流程减碳潜力,完善碳足迹管控体系,为钢铁工业深度低碳转型提供更强技术支撑。

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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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4070m³高炉应用实践[J]. 烧结球团, 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.
- [8] 杨聪聪,夏光辉,朱德庆,等. 铁氧化物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.
- [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.
- [10] 曲旭东,李坚毅,折媛. 碱度对碱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.
- [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.
- [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.

(下转第49页)

- 2024, 53(5):6-14.
- [58] 镜泊观澜. 国内氢气输送管网项目梳理[EB/OL]. (2023-07-25). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1772383407061509584&wfr=spider&for=pc>.
- [59] 仲冰, 张学秀, 张博, 等. 我国天然气掺氢产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 100-107.
- [60] 工信部、国家发改委等. 印发《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》[J]. 中国设备工程, 2025(3): 1.
- [61] 林水静, 张胜杰. 清洁低碳氢将成为工业深度脱碳利剑[N/OL]. 中国能源报, 2025-01-06(007). <http://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/attachment/202501/06/b4d8b1f9-4fe4-403e-964f-ac55e2aff8ce.pdf>.
- [62] 2024-2030年氢能源产业规划专项研究报告[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2024/0525/8100100135006072.shtm>.
- [63] 王雅熙, 陈宇, 李天雷, 等. 高压储氢容器及输送管道选材与设计标准综述[J]. 油气储运与处理, 2023, 41(4): 1-8.
- [64] 章小峰, 万亚雄, 武学俊, 等. Fe-Mn-(Al)-C高强韧性钢氢脆微观机制的研究进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(8): 949-962.
- [65] 李鑫, 韦博鑫, 鲁仰辉, 等. 临氢环境下管线钢氢损伤机理研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(5): 1125-1133.
- [66] 王贞. 高强DP钢中氢扩散行为及其对氢脆敏感性的影响[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2025.
- [67] GB/T 29729—2022 氢系统安全的基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [68] Hua Z L, Gao R Z, Xing B H, et al. State-of-the-art and knowledge gaps in gaseous hydrogen pipelines: from the perspective of materials, design, and integrity management[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2025, 26(2): 87-109.
- [69] 石荣建. 纳米析出相对马氏体钢氢脆性能影响机制的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [70] 蒙波. 含氢天然气高压输送管道材料性能劣化及失效后果研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [71] Huang L C, Chen D K, Xie D G, et al. Quantitative tests revealing hydrogen-enhanced dislocation motion in α -iron[J]. Nature Materials, 2023, 22: 710-716.
- [72] 林晓磊, 郭玉华. 超高强度钢的应用与分析[J]. 中国锰业, 2004, 22(2): 41-44.
- [73] 曲炎森. X80管线钢焊接热影响区氢致裂纹行为研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- [74] Nardo R M, Cerniglia D, Lombardo P, et al. Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing[J]. Procedia Structural Integrity, 2016(2): 581-588.
- [75] 巩建鸣, 蒋文春, 唐建群, 等. 湿 H_2S 环境下低合金钢焊接接头氢扩散数值模拟[J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 5-8.
- [76] 巩建鸣, 蒋文春, 唐建群, 等. 16MnR钢焊接接头氢扩散三维有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 113-118.
- [77] 钟振前, 田志凌, 唐树平. 0Cr16Ni5Mo钢中条状夹杂物对氢扩散过程的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(2): 84-89.

(编辑 许营)

修回日期: 2025-08-26

(上接第23页)

- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [23] 毛庆武, 章启夫, 李欣, 等. 特大型高炉使用高比例球团矿冶炼技术及应用[J]. 炼铁, 2020, 39(6): 1-6.
- [24] 张旭升, 何友国, 曹树志. 唐钢新区2922m³高炉高球比生产的操作制度[J]. 炼铁, 2024, 43(2): 20-24.
- [25] 李朝旺, 庞真丽, 董国强, 等. 唐钢碱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.
- [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.
- [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.

(编辑 白璐)

修回日期: 2026-03-18