高配比赤－褐铁矿氢基竖炉球团制备特性及其冶金性能

易陆杰[1]，黄文航[2]，潘 建[2,3]，杨聪聪[2,3]，赵利明[1]，李孟土[1]，伍 英[4]，谢思珺[2]
（1. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524000；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410086；
3. 淡水河谷－中南大学低碳与氢冶金联合实验室，湖南 长沙 410083；
4. 宝山钢铁股份有限公司，上海 宝山 200941）

摘要：高品位球团精粉资源供应不足、球团生产成本高是制约氢基竖炉直接还原工艺发展的重要因素之一，开展高比例赤－褐铁矿制备氢基竖炉用氧化球团矿研究对扩大球团原料来源、降低球团和直接还原铁（DRI）生产成本具有重要现实意义。本文以某典型赤－褐铁矿粉（G 矿粉）为对象，研究其在不同配比条件下（0～50%）链算机—回转窑工艺球团制备特性及在模拟 HYL 法条件下的球团冶金性能，探索高配比赤－褐铁矿用于制备氢基竖炉氧化球团的可行性。结果表明：G 矿粉因存在较高比例疏松多孔的针铁矿，具有良好可磨性，细磨产品比表面积大，有利于成球，在0～50%配比范围内均可制备出合格生球，但随着 G 矿配比由 0 增加到 50%，生球热稳定性呈下降趋势；同时，因结晶水高温脱除导致球团孔隙增多，需适当提高焙烧温度才能维持球团强度；与基准相比，配加 30%～50% G 矿粉时，球团还原性和黏结性能良好，但低温还原粉化性能随 G 矿粉配比增加而变差，还原膨胀率呈上升趋势。优化配矿是实现高配比赤－褐铁矿制备氢基竖炉用优质氧化球团的有效措施之一。

关键词：赤－褐铁矿；氢基竖炉；氧化球团；焙烧性能；冶金性能
中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764（2026）01－0176－12
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.015

Preparation characteristics and metallurgical properties of pellets in hydrogen-based shaft furnace with high-proportion hematite-limonite

YI Lujie[1], HUANG Wenhang[2], PAN Jian[2,3], YANG Congcong[2,3], ZHAO Liming[1],
LI Mengtu[1], WU Ying[4], XIE Sijun[2]
(1. Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524000, Guangdong, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410086, Hunan, China; 3. Vale-Central South University Low Carbon and Hydrometallurgy Joint Laboratory, Changsha 410083, Hunan, China); 4. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Baoshan District, Shanghai 200941, China)

Abstract: The insufficient supply of high-grade pellet concentrate powder resources and the high production cost of pellet are among the important factors restricting the development of the direct reduction process of hydrogen-based shaft furnace. Study on preparing oxidized pellets in hydrogen-based shaft furnace with high-proportion hematite-limonite is of great practical significance for expanding pellet raw material sources and reducing production cost of pellet and direct reduced iron (DRI). Taking a typical hematite-limonite powder (powder G) as the subject, this paper studies the pellet preparation characteristics with it in the grate-rotary kiln process under different proportions (0～50%) and the pellet metallurgical properties under simulated HYL process conditions, exploring the feasibility of using a high-proportion

收稿日期：2025－09－27；**修回日期**：2025－11－03
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金资助项目（BWLCF202216）
作者简介：易陆杰（1978—），男，工程师，从事球团生产技术管理工作。
通信作者：杨聪聪（1989—），男，副教授，从事铁矿造块、低碳与氢冶金理论和新技术、低品位矿及大宗固废综合利用等方面的研究。

hematite-limonite for preparing oxidized pellet in hydrogen-based shaft furnace. The results show that due to the presence of high-proportion loose and porous goethite, powder G has good grindability, and the finely ground product has a large specific surface area, which is beneficial for pelletizing. Qualified green pellets can be prepared within the proportion range of 0 ~ 50%. However, as the proportion of Powder G increases from 0 to 50%, the thermal stability of the green pellets shows a downward trend; meanwhile, due to the increased porosity caused by the removal of crystalline water at high temperatures, it is necessary to appropriately increase the roasting temperature to maintain pellet strength. Compared with the base case, when 30% ~ 50% of powder G is blended, the reducibility and binding property of the pellets are good, but the low-temperature reduction disintegration performance worsens with the increase in the proportion of powder G, and the reduction swelling rate shows an upward trend. Optimized ore blending is one of the effective measures to produce high-quality oxidized pellet in hydrogen-based shaft furnace with high-proportion hematite-limonite.

Key words: hematite-limonite; hydrogen-based shaft furnace; oxidized pellet; roasting performance; metallurgical properties

在“双碳”战略实施背景下，球团矿正成为钢铁行业低碳绿色转型升级的重要战略选择。作为优质炉料，凭借其品位高、有害元素含量低以及优异的冶金性能，是高炉炼铁和气基竖炉直接还原工艺的关键原料，且其制备过程相较于铁矿烧结工艺本身更具有节能绿色低碳潜能。因此，球团矿在高炉冶炼中的应用既能大幅降低炼铁能耗，又能有效减少冶炼焦比和二氧化碳排放，为实现绿色低碳发展提供切实可行的解决方案[1]。

然而由于我国高品位球团精粉资源供应严重不足，制约了球团工艺和氢基竖炉直接还原工艺的发展[2-3]。近年来铁精粉进口需求持续攀升，2013 年至 2024 年间，铁精矿进口量从 6 957 万 t 大幅增长至 1.43 亿 t。同时由于磁铁精粉资源存在区域分布不均衡且市场价格较高，在球团生产中使用相对低价的赤铁矿和褐铁矿粉将成为提升企业经济效益的有效途径之一，这也代表了未来球团工艺发展的主流趋势[4-5]。由于褐铁矿本身的结晶水过高，导致球团焙烧性能较磁铁矿差，能源消耗更高，过程控制难度更大，且成品球团机械强度和冶金性能也较差，难以作为单独的球团原料进行利用，所以需要严格控制其配比。因此，从兼顾球团成本和性能的角度出发，如何实现赤－褐铁矿粉在球团生产过程中的高配比稳定应用并确保成品球团质量是一项重要的技术攻关课题。在前人研究中，通常采取优化配矿、赤－褐铁矿粉预脱结晶水、优化球团焙烧热工制度等措施，显著降低褐铁矿在预热阶段的脱水负荷、减少因水分急剧蒸发导致的球团爆裂问题，从而提高生球热稳定性和成品球团机械强度；同时，通过增加磁铁精矿占比和微调球团碱度等措施促进赤铁矿再结晶，改善球团冶金性能[6-7]。

目前，赤－褐铁矿用于带式焙烧机和链箅机—回转窑工艺球团工业生产均已证明其可行性。如南京钢铁、中天钢铁和宝钢湛江钢铁等钢铁厂带式焙烧机工艺生产中赤－褐铁矿配比可达30%~40%，甚至更高，链箅机—回转窑工艺则通常低于20%，其生产的成品球团主要用于高炉炼铁[7-8]。为了更好地将此矿应用于球团矿生产，本文以某低价赤－褐铁矿粉(G 矿粉)为对象，研究其配比和配矿方案对生球性能、球团焙烧特性和成品球团在 HYL 法氢基竖炉条件下冶金性能的影响规律，以期为钢铁工业原料多元化开发、生产工艺优化及成本控制提供理论基础和技术指导。

1　原料性能与研究方法

1.1　原料性能

1.1.1　化学成分

试验用原料包括 7 种铁矿粉、1 种除尘灰、1 种膨润土和 1 种熔剂(石灰石)，主要化学成分与烧损如表 1 所示。由表 1 可知，在 8 种铁矿粉之中，A 矿粉的铁品位最高达到了 70.41%，FeO 的质量分数为 30.06%，根据换算可得出其磁铁矿质量分数为 96.9%，为一种优质的磁铁矿。B 矿粉和 C 矿粉的 FeO 质量分数分别为 27.12% 和 16.07%，是典型的磁铁矿和磁－赤铁矿。同时，A、D、E 矿粉的 SiO_2、Al_2O_3、P 和 S 的含量都较低，是优质球团原料；C矿粉的SiO_2质量分数最

表1 原料主要化学成分与烧损(质量分数)

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

原料种类		TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	K_2O	Na_2O	烧损
铁矿粉	A	70.41	30.06	1.03	0.53	0.20	0.37	0.027	0.008	0.025	0.062	-2.98
	B	66.00	27.12	4.99	0.65	0.10	0.33	0.020	0.010	0.140	0.020	-1.83
	C	63.27	16.70	8.62	1.55	0.24	0.38	0.050	0.010	0.028	0.046	-1.23
	D	66.61	5.59	4.21	0.24	0.34	0.37	0.017	0.017	0.009	0.043	0.22
	E	66.80	0.23	2.89	0.62	0.10	0.02	0.040	0.003	0.030	0.030	0.86
	F	64.62	0.80	2.88	1.04	0.09	0.05	0.074	0.019	0.019	0.009	2.88
	G	62.01	0.17	3.49	2.10	0.07	0.09	0.120	0.017	0.010	0.018	5.70
除尘灰		55.12	4.90	6.74	1.68	5.94	1.54	0.047	0.061	0.061	0.091	4.15
膨润土		7.21	—	54.11	15.05	1.89	2.48	0.860	0.015	1.018	2.112	8.08
细磨石灰石		0.25	—	2.02	0.59	51.40	2.70	0.013	0.058	0.210	0.026	42.57

高，达到了8.62%。相比之下，G矿粉铁品位最低，仅为62.01%左右，FeO质量分数为0.17%，烧损达到了5.70%，为铁矿中最高，但扣除烧损后铁品位可达65.70%；同时，G矿粉中Al_2O_3、P的质量分数分别为2.10%、0.12%，是一种中等铁品位、高铝、高磷的赤-褐铁矿。若在球团原料中使用G矿粉，则可能导致铁矿粉湿磨-沉降-过滤工序效率降低、球团焙烧性能变差，Al_2O_3和P含量增加，对球团质量产生不利影响，因而需控制其配比[9-11]。

1.1.2 粒度组成和比表面积

含铁原料的粒度组成和比表面积如表2所示。由表2可知，C、G、F、A几种铁矿粉的原始粒度太粗而无法直接造球，试验前对其进行磨矿预处理，控制<0.074 mm质量分数为80%~85%，而E、D、B等本身粒度较细，<0.074 mm大于80%，且比表面积均达到了1 500 cm/g以上，可直接作为球团原料[7-8]。为改善球团混合料成球性和焙烧性能，研究将这些铁精矿与上述细磨后铁矿粉混匀并进一步进行高压辊磨预处理，最终混合精矿的比表面积达到了1 500~1 900 cm^2/g。另外，试验用膨润土和细磨石灰石分别作为造球用黏结剂和调节球团碱度的熔剂，其<0.074 mm质量分数均大于90%，可满足造球要求。

表2 含铁原料物理性能

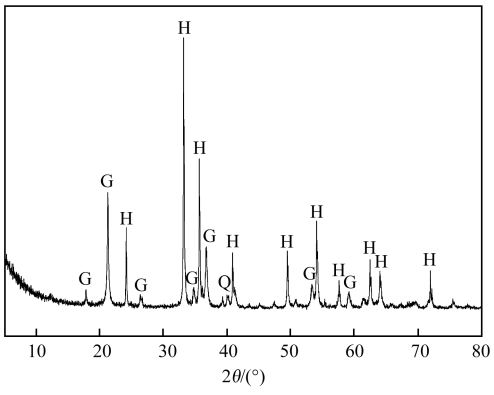
Table 2 Physical properties of iron-bearing raw materials

含铁原料	<0.074 mm粒级质量分数/%	比表面积/($cm\cdot g^{-1}$)
A*	80.00	1 784
E	89.19	1 384
C*	80.00	1 471
D*	80.00	1 242
B	98.40	2 175
F*	80.00	1 654
G*	80.00	1 902
除尘灰	60.31	1 200

注：*表示矿粉球磨至<0.074 mm质量分数为80%左右后测定比表面积。

1.1.3 赤-褐铁矿粉(G矿粉)物相特征

G矿粉主要物相分析如图1所示，光学矿相照片如图2所示，同时基于扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)了铁、硅、铝元素分布特征，如图3所示。由图1~3可知，G矿粉主要由赤铁矿、针铁矿、磁铁矿、高岭石、石英等物相组成，质量



H—赤铁矿；G—褐铁矿；Q—石英。

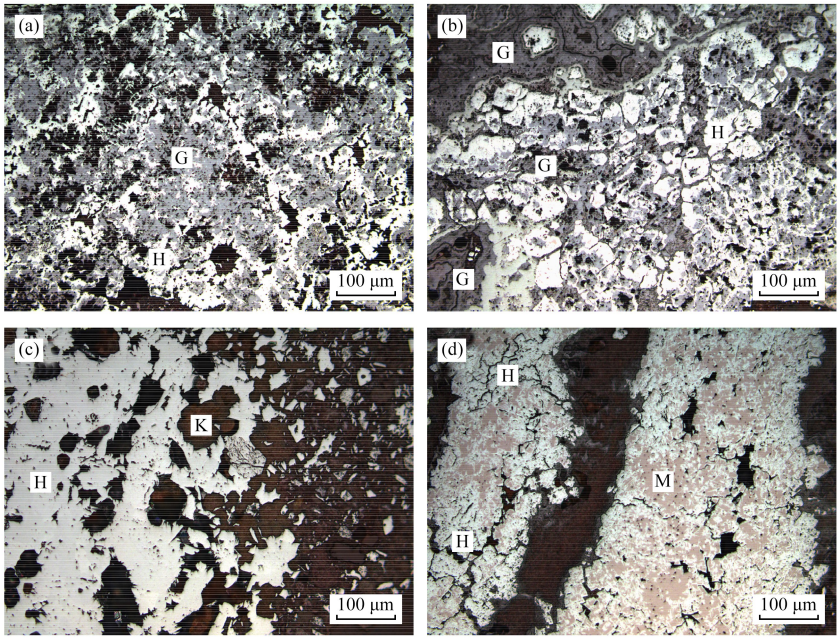
图1 G矿粉XRD主要物相分析

Fig. 1 Phase analysis of G mine powder by XRD

分数分别约为 46%、46%、1%、3%、3%。由图 2、3 可知，G 矿粉所含的 Si 元素主要以石英和高岭石等形式存在，其中石英含量较少，分布较为松散；而 Al 主要以铝针铁矿为主，少量以铝硅酸盐形式存在，分布较广，与铁元素分布特性接近。

1.2　研究方法

为了阐明配加赤－褐铁矿配比对生球性能、球团焙烧特性及成品球团冶金性能的影响规律，基于现场原料条件，设计了 7 组配矿方案，如表 3、4 所示。其中方案 1 为基准，G 矿粉质量分数为 0；方案 2 和方案 3 中，G 矿粉质量分数均为 30%，



（a）、（b）赤铁矿与针铁矿紧密共生；（c）高岭石存在于铁矿物孔隙中；（d）铁矿与磁铁矿共存区

H—赤铁矿；G—针铁矿；M—磁铁矿；K—高岭石。

图 2　G 矿粉中主要矿物物相光学显微结构照片

Fig. 2　Optical microscopic photographs of main mineral phases of G mine powder

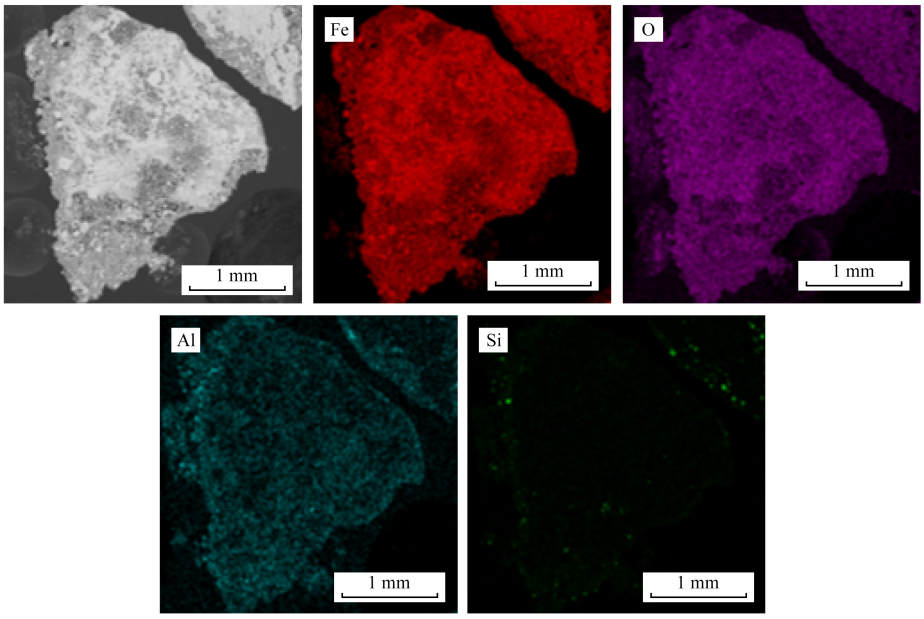


图 3　G 矿粉中 Fe、Si 和 Al 的元素分布特征

Fig. 3　Elemental distribution characteristics of Fe, Si, and Al of G mine powder

表3 试验配矿方案设计及理论成分(质量分数)

Table 3 Experimental ore blend design and theoretical chemical composition %

配矿方案	G	A	B	C	D	E	F	膨润土	石灰石	除尘灰	合计
B1(基准)	0	21.2	0	0	35	0	39.05	1	1.25	2.5	100
B2	30	0	30	0	0	35.45	0	1	1.05	2.5	100
B3	30	25.0	0	40.15	0	0	0	1	1.35	2.5	100
B4	35	25.0	0	35.20	0	0	0	1	1.30	2.5	100
B5	40	30.0	0	25.00	0	0	0	1	1.50	2.5	100
B6	45	30.0	0	19.25	0	0	0	1	2.25	2.5	100
B7	50	35.0	0	8.30	0	0	0	1	3.20	2.5	100

表4 试验配矿方案球团的理论成分

Table 4 Test pelletizing ore plan theoretical composition

配矿方案	化学成分(质量分数)/%			二元碱度
	Fe	SiO_2	Al_2O_3	
B1(基准)	65.70	3.55	0.85	0.25
B2	64.77	4.73	1.22	0.15
B3	63.32	6.18	1.24	0.15
B4	63.48	5.89	1.32	0.15
B5	63.87	5.11	1.39	0.20
B6	63.76	4.76	1.47	0.30
B7	63.88	3.93	1.54	0.50

方案4~7的G矿粉质量分数分别为35%、40%、45%、50%。本试验主要模拟湛江钢铁现场造球条件，故对膨润土用量进行了固定，在此基础上也便于比较相同造球条件下不同配矿方案的造球性能。

首先，将粗铁矿粉分别细磨至<0.074 mm质量分数为80%左右，然后按表3、4进行配矿得到混合精矿，经过高压辊磨1次使比表面积达到1 500~1 900 cm^2/g。造球试验中，将辊磨后混合精矿，添加1%膨润土和一定比例的细磨石灰石，先人工充分混匀3次，然后在直径为1 000 mm、边高为3 00 mm的圆盘造球机中进行生球的制备。每次造球试样的总干重为4 kg，圆盘造球机的工艺条件参照前期研究确定[5]，转速恒定为28 r/min，倾角为47°。每组造球试验完毕后，均匀取样测试生球水分，取直径为10~16 mm的合格生球测定生球的抗压强度、爆裂温度及落下强度。生球质量指标按抗压强度大于10 N/P，落下强度大于4次/(0.5 m)，爆裂温度大于300 ℃进行控制，以满足工业生产基本要求。通过优化造球水分和造球时间，确定不同配矿方案适宜的造球工艺，在此基础上明确G矿粉配比对生球性能的影响规律。

不同方案相应最佳指标的生球，经105 ℃烘箱干燥4 h以上后用于模拟链箅机—回转窑球团工艺的管炉焙烧试验，考察了预热和焙烧参数对于预热和焙烧球团抗压强度的影响，确定了不同方案的最佳热工制度。基于小试，进一步开展了模拟链箅机—回转窑工艺条件的扩大试验。扩大试验中，生球料层高度恒定为220 mm，每组试验生球装入量约为20~23 kg，然后用不同温度、风速和方向的热风分别对生球进行鼓风干燥、抽风干燥、抽风预热，预热完毕后将焙烧杯上、中、下层的预热球团分别取样用于抗压强度和AC转鼓强度的测定，预热球团需满足平均抗压强度不低于500 N/P、AC转鼓强度不低于95%(>3 mm)的工业生产要求；将预热球团热装进入直径为350 mm、长为1 200 mm的回转窑进行高温氧化焙烧，通过控制天然气和助燃风流量控制焙烧温度及气氛，完成焙烧后从窑头、窑尾取样，然后随窑冷却至500 ℃后卸出，继续在空气中自然冷却至室温。

对不同方案成品球团的冶金性能进行分析，包括球团的化学成分，以及模拟HYL法标准条件下的还原性、还原膨胀性能(RSI)、低温还原粉化性能(LTD)、黏结指数(CI)，揭示G矿粉配比对成品球团在HYL法富氢直接还原条件下冶金性能的影响。

2 结果与分析

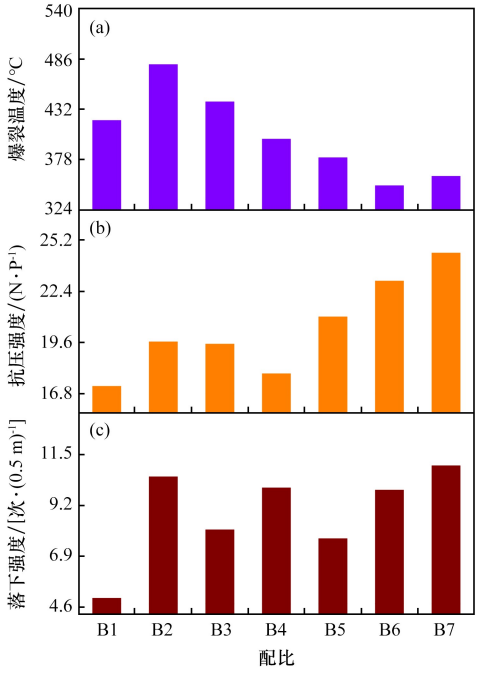
2.1 G矿粉配比对生球性能的影响

不同配矿方案在各自最佳造球工艺条件下的

生球性能对比如图 4 所示。由图 4 可知，在实验室条件下，方案 B1 ~ B7 适宜的造球水分为 7.6% ~ 8.1%，造球时间为 10 min。在上述条件下，生球落下强度均可达到 5 次/(0.5 m)以上，抗压强度达到15 N/P以上，B1 ~ B7的生球爆裂温度可达 350 ℃以上。

另外，通过对比可知，随着 G 矿粉配比的增加，生球落下强度和抗压强度较基准均明显增大。一方面，是因为 G 矿粉作为典型的软质铁矿，其含有较高比例的针铁矿，增加了铁矿颗粒的亲水性和持水能力，因而 G 矿粉配比越高，适宜的生球水分趋于升高。造球过程中，水分作为黏结介质，填充矿粒之间的孔隙，并在矿粒表面形成薄膜水和毛细水。随着造球水分的添加，原料颗粒之间的孔隙逐渐被填充，球团内部毛细水引力作用占据主导地位[12]。当矿粒间毛细管水趋于饱和，毛细压力会增强，这能使更多矿粉向水滴中心聚拢，改善球团内核聚结效果，提高生球强度[13-14]。

同时也可看到，G 矿粉配比越高，尤其超过 30% 后，由于生球受到热冲击时水分来不及向外迁移，饱和蒸气压显著上升，内应力明显增加，从而使其热稳定性变差，爆裂温度降低至 350 ~ 360 ℃，但仍可满足生产要求。



(a) 爆裂温度；(b) 抗压强度；(c) 落下强度

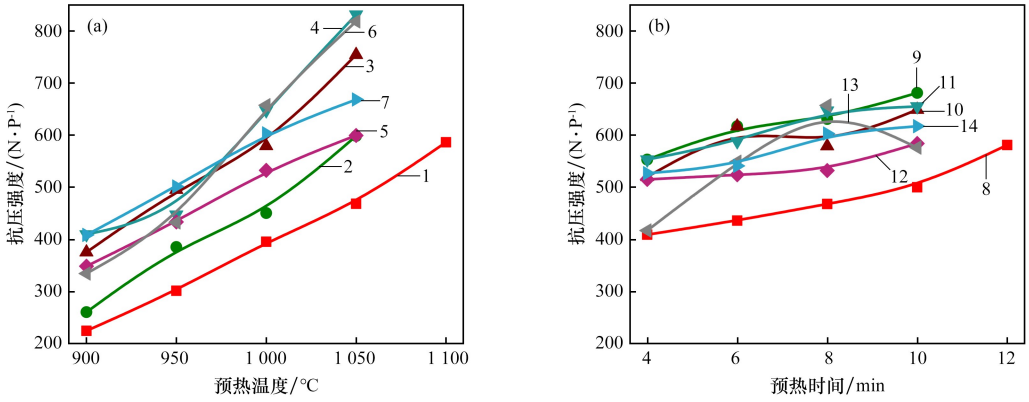
图 4　最佳造球条件下各配比方案生球性能对比

Fig. 4　Comparison of green pellets performance of different blends under corresponding proper balling conditions

2.2　G 矿粉配比对球团预热焙烧性能的影响

2.2.1　预热温度和时间的影响

预热温度与预热时间对不同配矿方案预热球团抗压强度的影响结果如图 5 所示。由图 5 可知，预热球团抗压强度随着预热温度提高或预热时间延长而逐渐升高，这是因为磁铁矿氧化生成的新生 Fe_2O_3 或原生 Fe_2O_3 颗粒间形成微晶键连接，从



(a) 预热温度(固定预热时间 8 min)；(b) 预热时间(固定预热时间 8 min)

1—B1(基准)；2—B2；3—B3；4—B4；5—B5；6—B6；7—B7；8—B1(基准)(1 050 ℃)；9—B2(1 050 ℃)；10—B3(1 000 ℃)；11—B4(1 000 ℃)；12—B5(1 000 ℃)；13—B6(1 000 ℃)；14—B7(1 000 ℃)。

图 5　预热温度与预热时间对不同配矿方案预热球团抗压强度的影响

Fig. 5　Effects of preheating temperature and duration on the compressive strength of preheated pellets under various ore blending formulations

而使球团固结强度增加[15-16]。为了满足预热球团抗压强度达到500 N/P以上，方案B1和B2适宜的预热温度为1 050 ℃，预热时间分别为10～12 min和6～8 min；方案B3～B7适宜的预热温度为1 000 ℃，预热时间为6～8 min。在相同预热温度下，G矿粉配比增加会使预热球团抗压强度呈先升高后下降的趋势，在G矿粉配比为35%～45%时预热球团抗压强度达到最高值，这也从侧面说明，优化配矿可减少G矿粉高烧损带来的不利影响。

2.2.2 焙烧温度和焙烧时间的影响

在上述适宜预热制度和焙烧时间为15 min的条件下，考察了焙烧温度对不同方案焙烧球团抗压强度的影响，结果如图6(a)所示。由图6(a)可知，焙烧温度越高，焙烧球团抗压强度越高。球团矿的焙烧固结属于固相固结，主要通过质点扩散在晶粒接触处形成连接桥使颗粒互相黏结而固结。随着焙烧温度升高，加快了球团矿内部的各种物理化学反应和质点扩散，同时赤铁矿再结晶和聚晶长大使球团矿中孔隙率减少[13,15]。综合分析，方案B1、B2适宜的焙烧温度为1 250～1 280 ℃，而方案B3～B7适宜的焙烧温度仅需1 190～1 220 ℃，焙烧球团抗压强度便可达到2 500 N/P以上。由此可见，在高G矿粉配比情况下，通过适当增加磁铁精矿、提高球团碱度等措施，可获得良好的球团焙烧性能，使工序能耗维持不变或甚至有所降低。

在方案B1焙烧温度为1 265℃、方案B2为1 250 ℃、方案B3～B4为1 190 ℃、方案B5～B7为1 220 ℃的条件下，研究焙烧时间对不同配矿方案球团焙烧性能的影响，结果如图6(b)所示。由图6(b)可知，由于方案B1的焙烧温度较高，在焙烧时间为9 min时球团抗压强度达到3 000 N/P以上；而方案B2～B7则需要15 min的焙烧时间才能使焙烧球团抗压强度达到3 000 N/P左右。同时可注意到，除B1和B5外，其余方案的焙烧时间不宜过高，否则球团强度反而下降，可能原因是高温条件下Fe_2O_3会发生部分分解，进而削弱球团中赤铁矿晶粒间的键合作用[11,17-18]。

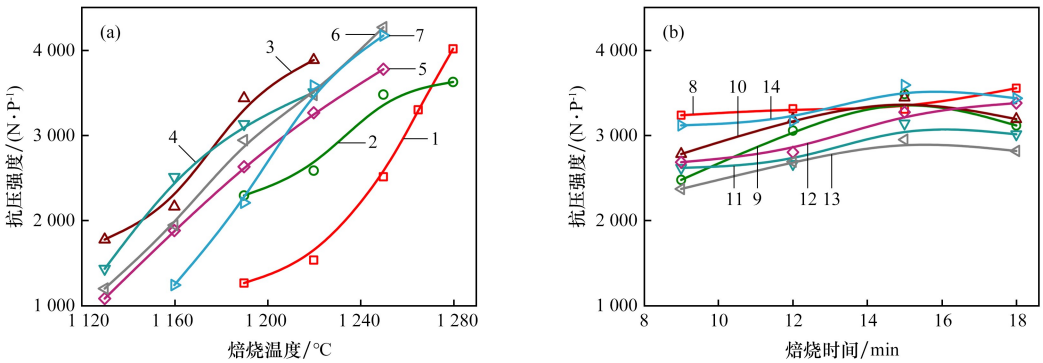
2.3 模拟链算机—回转窑工艺球团焙烧扩大试验

在小试基础上，针对方案B1～B3、B5和B7进行了模拟链算机—回转窑工艺球团焙烧扩大试验，最佳工艺条件和试验结果如表5所示。由表5可知，各方案在预热温度为1 020～1 050℃、预热时间为6～9 min、焙烧温度为1 250～1 265 ℃、焙烧时间为15 min的适宜热工制度下，均可制备出抗压强度大于2 500 N/P、转鼓强度大于95%、耐磨指数低于3%的合格成品球团，进一步验证了小试结果。且随着G矿粉配比增加到30%～50%，焙烧球团抗压强度始终维持在2 700～3 000 N/P，未出现恶化趋势。

2.4 成品球团在HYL法直接还原条件下的冶金性能分析

2.4.1 成品球团化学成分

上述5种方案(B1、B2、B3、B5、B7)在最佳



(a) 焙烧温度；(b) 焙烧时间

1—B1(基准)；2—B2；3—B3；4—B4；5—B5；6—B6；7—B7；8—B1(基准)(1 265 ℃)；9—B2(1 250 ℃)；10—B3(1 190 ℃)；11—B4(1 190 ℃)；12—B5(1 220 ℃)；13—B6(1 220 ℃)；14—B7(1 220 ℃)。

图6 焙烧温度和焙烧时间对焙烧球团抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of roasting temperature and time on the compressive strength of roasted pellets

表 5　不同配矿方案球团焙烧扩大试验最佳工艺条件及结果

Table 5　Optimal conditions and results of the pilot-scale tests for different blends

各方案球团	预热段(PH)		焙烧段		预热球团强度		焙烧球团强度		
	时间/min	温度/℃	时间/min	温度/℃	抗压强度/($N\cdot P^{-1}$)	转鼓指数(>3 mm)/%	抗压强度/($N\cdot P^{-1}$)	转鼓指数(>6.3 mm)/%	耐磨指数(<0.5 mm)/%
B1	9	1 050	15	1 265	829	96.84	3 645	97.72	1.74
B2	6	1 050	15	1 250	453	97.00	2 737	96.39	2.67
B3	8	1 020	15	1 250	817	97.04	2 963	95.31	2.69
B5	6	1 050	15	1 250	752	96.92	2 951	95.45	2.94
B7	6	1 050	15	1 250	875	97.79	2 872	95.59	2.41

注：鼓风和抽风干燥温度分别为 250 ℃和 300 ℃，鼓风和抽风干燥时间分别为 3 min 和 4 min，干燥风速为 1.2 m/s；过渡预热段(TPH)温度为 650 ℃，时间为 3 min，风速为 2.4 m/s；预热段(PH)风速也为 2.4 m/s。

条件下制备的成品球团的主要化学成分如表 6 所示。由表 6 可知，5 种方案成品球团的全铁为 64%~66%，FeO 质量分数为 0.1%~0.6%，说明成品球团的氧化程度较高。这些 FeO 可能赋存在于未被完全氧化的磁铁矿中，也可能存在于渣相中。理想氧化球团的 FeO 质量分数应尽可能低(通常要求≤1%)，以确保较高程度的 Fe_2O_3 再结晶，且有利于改善球团还原性。另外，从脉石含量来看，配加了 30%~50% G 矿粉的 4 个配矿方案中，SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数较基准均有所增加，分别达到了 3.7%~5.5% 和 1.2%~1.6%；同时 G 矿粉配比增加后，球团 P 含量也随之增加。

2.4.2　模拟 HYL 法条件下的球团冶金性能

(1) 还原性指数。不同方案成品球团分别在 HYL 法 800 ℃和 950 ℃条件下的还原性如图 7 所示。由图 7 可知，所有方案在 800 ℃下的还原性指数处于 2 ~ 3.5 范围之间，当还原温度达到 950 ℃时，还原性指数可达到 4 以上，满足 HYL 法氢基直接还原生产要求。

与基准相比，配加 G 矿粉后，球团还原性整体得到改善。可能原因：G 矿粉中针铁矿含量高，在氧化焙烧阶段，球团容易形成更多孔隙，促进还原；但对于方案 B7，由于球团碱度相较于其他方案高，球团焙烧时更易形成液相，阻塞孔隙，抑制还原气体在球团内扩散，削弱了配加 G 矿粉增加球团孔隙带来的有利作用[6,19-20]。

(2) 还原膨胀性能。不同方案成品球团在 800 ℃富氢直接还原条件下的还原膨胀性能如图 8 所示。根据图 8 可知，随着 G 矿粉配比增加，球团还原膨胀率总体呈增加趋势；除方案 B7 以外，其余方案的成品球团还原膨胀率均低于 15%，能满足氢基竖炉生产要求。

氧化球团还原膨胀产生的原因主要是由赤铁矿(Fe_2O_3)在还原过程中的晶型转变($\alpha-Fe_2O_3\rightarrow Fe_3O_4$)引起，其理论体积膨胀率高达 30%[21]。结合不同方案的原料特性和配矿结构，方案 B1 球团还原膨胀率较低，主要得益于其采用了“赤铁矿＋镜铁矿＋磁铁矿”组合，其中赤铁矿 F 的铁品位高、杂质较低，镜铁矿 D 的铁品位高、颗粒致密光滑，磁铁矿 A 有助于氧化生成更高活性的赤铁矿，使颗粒间连晶作用更强、赤铁矿再结晶程度增加，从而形成了稳定的复合结构，增强了抵制赤铁矿还原时因晶型转变内应力的能力，使体积变化更温和[21]。

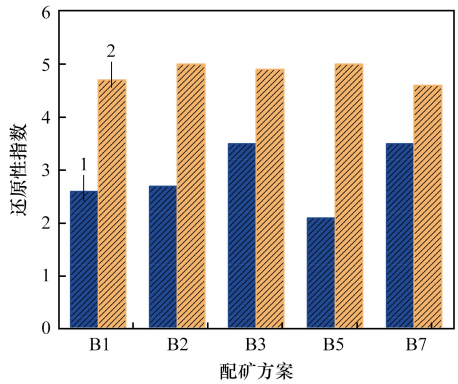
相比之下，配加了 G 矿粉的 4 组成品球团具有更高的体积膨胀倾向，主要因为其还原性更好，还原速率更高，从而产生更大的内应力导致。当 B7 中 G 矿粉配比达 50%，虽然磁铁精矿配比和球团碱度适当上调，氧化球团机械强度高，但这是球团致密化带来的结果，其削弱了抵抗赤铁矿还原晶型转变应力的能力，同时液相和孔隙的不均匀分布特性进一步加剧体积膨胀的各向异性[22]。

(3) 动态低温还原粉化性能。不同方案成品球团的低温还原粉化性能对比如表 7 所示。由表 7 可知，基准方案 B1 的低温还原粉化性能最好，低温还原粉化性能(>6.3 mm)可达 90% 以上，低温还原粉化性能(<0.5 mm)低于 5%，整球率基本达到了60%；但配加了30%~50% G矿粉后，球

表 6 不同方案扩大试验成品球团主要化学成分(质量分数)

Table 6 Main chemical composition of finished pellets from different schemes in scale-up testing %

各方案球团	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	K_2O	Na_2O	R_2
B1	65.92	0.55	3.56	1.02	0.83	0.35	0.048	0.002 8	0.030	0.057	0.23
B2	65.17	0.18	4.43	1.22	0.71	0.20	0.052	0.004 3	0.055	0.049	0.16
B3	64.17	0.48	5.42	1.35	0.91	0.32	0.055	0.005 7	0.039	0.060	0.17
B5	64.72	0.24	4.62	1.41	1.00	0.31	0.065	0.003 0	0.038	0.059	0.22
B7	64.44	0.28	3.72	1.58	1.76	0.33	0.072	0.002 8	0.035	0.061	0.47



1—800 ℃; 2—900 ℃。

图 7 不同方案成品球团分别在 800 ℃和 950 ℃条件下的还原性对比

Fig. 7 Comparison of the reducibility of the fired pellets for different schemes at 800 ℃ and 950 ℃

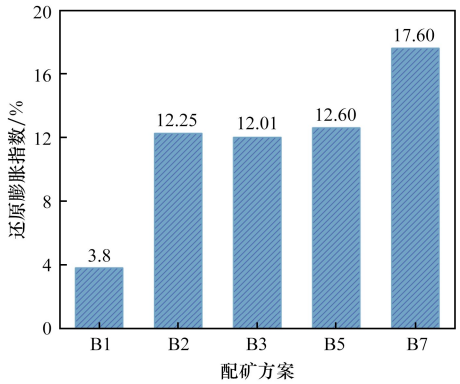


图 8 不同方案成品球团在 800 ℃条件下的还原膨胀性能对比

Fig. 8 Comparison of reduction swelling performance of fired pellets for different schemes at 800 ℃

团的低温还原粉化性能变差，其中方案 B7 的冶金性能稍好，低温还原粉化性能(>6.3 mm)可达 80%以上，低温还原粉化性能(<0.5 mm)为 12%左右，而整球率为 67%左右；其次是方案 B2、B3，低温还原粉化性能(>6.3 mm)为 77%左右，但，低温还原粉化性能(<0.5 mm)较高，达到了 16%~18%，但两组球团的整球率差异较大，分别为 55%和 68%。相比之下，方案 B5 配比的低温还原粉化性能最差。

方案B1球团LTD性能最好，如前所述，得益于其原料特性和配矿结构，球团具有良好的抵抗赤铁矿还原晶型转变应力的能力，因而减少了粉化倾向。同理，G 矿粉配比增加，使球团孔隙率增加，却削弱了球团抵抗赤铁矿还原晶型转变应力的能力，引起不均匀膨胀，使低温还原粉化性能变差。此外，譬如方案 B7，虽然其体积膨胀倾向最高，但因为碱度较高，生成的低熔点液相抑制了球团还原过程碎片化、粉化现象的发生[23]。

(4) 黏结指数。不同方案成品球团的黏结指数如图9所示。由图9可知，所有方案球团的黏

表 7 不同方案成品球团的低温还原粉化性能对比

Table 7 Comparison of LTD degradation performance of fired pellets for different schemes

各方案球团	还原前质量/g	还原后质量/g	低温还原粉化性能指标/%			整球率/%
			>6.3 mm	0.5~6.3 mm	<0.5 mm	
B1	1 000.56	967.17	93.76	3.92	2.32	59.76
B2	1 000.10	953.27	77.63	5.72	16.65	54.55
B3	1 001.12	963.15	77.40	4.63	17.97	68.84
B5	1 000.91	953.12	60.81	2.60	36.59	53.52
B7	1 000.51	964.39	85.55	2.69	11.76	67.39

结性能均低于 15%，满足氢基竖炉生产要求；但相比于基准，随着 G 矿粉配比增加，成品球团黏结性能随之改善。这主要是因为 G 矿粉的加入降低了球团整体铁品位，促进了液相生成和渣键连接，抑制了铁晶须大量析出和球团黏结[21]。

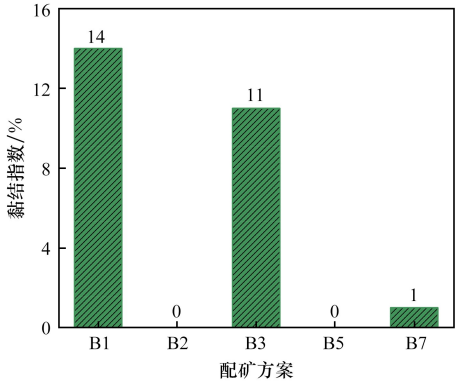


图 9　不同方案成品球团的黏结性能对比

Fig. 9　Comparison of the clustering performance of fired pellets for different schemes

2.4.3　成品球团矿相分析

不同配矿方案成品球团的微观结构如图 10 所示。由图 10 可知，随着 G 矿粉配比的增加，球团孔隙率及孔洞大小呈较明显的增加趋势，这可能对改善球团还原性有促进作用，但对球团抵抗还原膨胀和粉化内应力起到了削弱作用。其主要原因是，G 矿粉的针铁矿比例高，富含结晶水，高温焙烧过程中水分蒸发会留下更多孔隙，导致球团结构疏松。方案B1使用赤铁矿、镜铁矿和磁铁矿等原料，烧损较低，球团结构明显更致密；方案 B5 球团中因为 G 矿粉配比较高，产生了微裂纹，导致低温还原粉化性能恶化。对于方案 B7，由于碱度更高，促进了液相生成，进而改善了球团固结。

3　结　论

（1）G 矿粉是一种典型的赤－褐铁矿混合矿，烧损高，脱除结晶水后铁品位可达 65% 以上，具有易磨、难沉降、难过滤脱水的特性，会对湿式磨矿和球团制备产生一定不利影响。

（2）G 矿粉配比在 30%～50% 范围内，均可制备出合格生球，且生球强度随着 G 矿粉配比增加而改善，但爆裂温度呈降低趋势。高配比 G 矿粉球团焙烧性能可通过优化配矿、适当提高磁铁矿配比和球团碱度等措施加以改善。基于链算机—回转窑工艺，在预热温度为 1 020～1 050 ℃、预热时间为 6～9 min，焙烧温度为 1 250～1 265 ℃、焙烧时间为 15 min 的适宜热工制度下，成功制备出抗压强度大于 2 500 N/P、转鼓强度大于 95%、耐磨指数低于 3% 的成品球团。随着 G 配比增加，成品球团在 HYL 法富氢还原条件下的还原性和黏结性能改善，但还原膨胀性能和低温还原粉化性能变差。

（3）对于链算机—回转窑工艺而言，G 矿粉配比不宜过高，建议工业生产中G矿粉配比不超

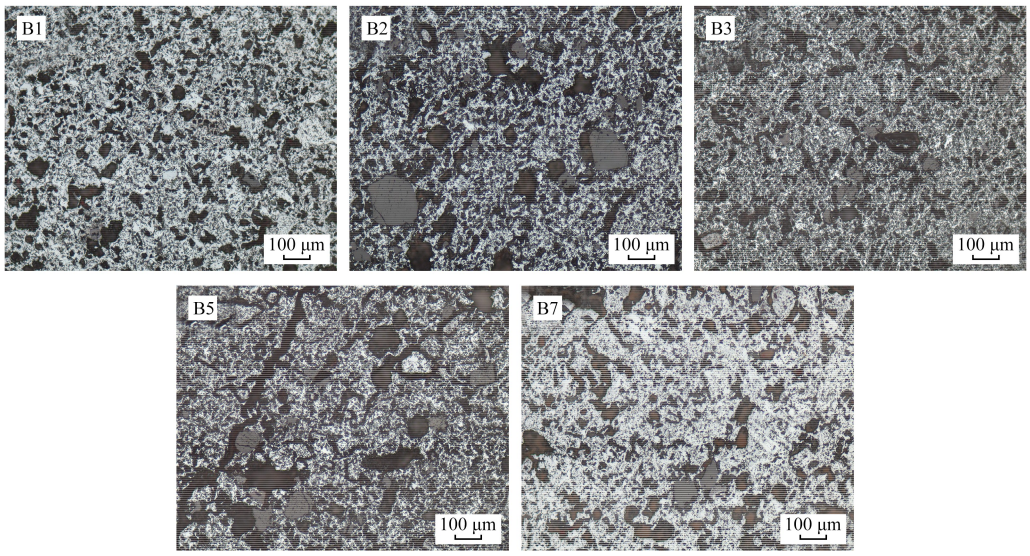


图 10　各方案焙烧球团微观显微结构

Fig. 10　Microstructure of the fired pellets for different schemes

过30%，同时通过优化配矿、加强原料准备和适当增加球团碱度，减少高结晶水物料对球团焙烧和产品质量带来的不利影响。如何改善高配比赤－褐铁矿球团在HYL法富氢还原条件下的冶金性能，尤其是低温还原粉化性能，是一个重要研究课题。

参考文献：

[1] 蔡大为,范晓慧. 钢铁工业低碳炉料及绿色冶炼技术进展[J]. 烧结球团,2023,48(4):1－7.
CAI Dawei,FAN Xiaohui. Progress of low-carbon charge and green smelting technology in iron and steel industry [J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(4):1－7.

[2] 朱德庆,李晓波,潘建,等. 世界铁矿主要矿业公司碳减排路径及进展评述[J]. 钢铁,2024,59(4):1－8.
ZHU Deqing, LI Xiaobo, PAN Jian, et al. Review of decarbonization pathways and progress for main iron ore mining companies[J]. Iron & Steel,2024,59(4):1－8.

[3] 刘航涛,吕振福. 国内外铁矿资源利用状况及发展趋势研究[J]. 中国矿业,2025,34(7):315－323.
LIU Hangtao, LYU Zhenfu. Utilization status and development trend of iron ore resources at domestic and abroad[J]. China Mining Magazine,2025,34(7):315－323.

[4] 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.

[5] 易陆杰,蒋林海,李建,等. 优质球团矿产品多元化低成本清洁生产技术开发与应用[J]. 烧结球团,2022,47(1):95－103.
YI Lujie, JIANG Linhai, LI Jian, et al. Technology development and application of diversified low cost clean production of high quality pellet products[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):95－103.

[6] 杨聪聪,曲士娟,梁海源,等. 某进口赤－褐铁矿磨矿特性及其氧化球团制备行为[J]. 钢铁研究学报,2024,36(9):1152－1162.
YANG Congcong, QU Shijuan, LIANG Haiyuan, et al. Grinding characteristics of an imported hematite-limonite and its oxidized pellet preparation behavior[J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(9):1152－1162.

[7] 刘胜歌,张俊杰,张巧玉,等. 高比例赤褐铁矿在球团带式焙烧机的相关应用与研究[J]. 冶金信息导刊,2023,60(4):32－35.
LIU Shengge, ZHANG Junjie, ZHANG Qiaoyu, et al. Related applications and research about high red limonite in pellets belt type roasting machine[J]. Metallurgical Information Review,2023,60(4):32－35.

[8] 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.

[9] 杨聪聪,侯德楠,潘建,等. 不同类型铁矿粉湿式磨矿—沉降—过滤行为及其影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(10):3627－3640.
YANG Congcong,HOU Denan,PAN Jian,et al. Analysis of wet grinding-sedimentation-filtration behaviors of different types of iron ore fines and influencing factors [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2024,55(10):3627－3640.

[10] 杨聪聪,侯德楠,朱德庆,等. 铁矿粉基本特性对其湿式磨矿—沉降—过滤性能的影响机制[J]. 中南大学学报(自然科学版),2025,56(5):1711－1720.
YANG Congcong, HOU Denan, ZHU Deqing, et al. Influence mechanism of basic characteristics of iron ore fines on its wet grinding-sedimentation-filtration performance[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2025,56(5):1711－1720.

[11] 潘建,马雯卓,朱德庆,等. Al_2O_3 对铁矿烧结球团及高炉冶炼的影响[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1095－1108.
PAN Jian, MA Wenzhuo, ZHU Deqing, et al. Effect of Al_2O_3 on sintering, pelletizing and blast furnace smelting [J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(10):1095－1108.

[12] 朱德庆,杨钰萍,宋清诗,等. 不同球团工艺条件下PFC1精矿球团制备特性[J]. 中国冶金,2024,34(6):44－54.
ZHU Deqing, YANG Yuping, SONG Qingshi, et al. Pelletizing characteristics of PFC1 concentrate in different pelletizing processes[J]. China Metallurgy,2024,34(6):44－54.

[13] 姜涛．铁矿造块学[M]．长沙：中南大学出版社，2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.

[14] LI G H, LI X Q, ZHANG Y B, et al. Induration mechanisms of oxidised pellets prepared from mixed magnetite-haematite concentrates[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2009, 36(5): 393－396.

[15] 乔波，罗果萍，柴轶凡，等．不同精矿制备球团矿预热焙烧性能对比分析[J]．烧结球团，2021，46(2)：50－56.
QIAO Bo, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Comparison and analysis on preheating roasting performance of pellets prepared from different concentrates[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 50－56.

[16] 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.

[17] 冉微，潘建，杨聪聪，等．配加赤－褐铁矿对熔剂性磁铁矿球团氧化动力学和焙烧性能的影响[J]．过程工程学报，2025，25(5)：510－521.
RAN Wei, PAN Jian, YANG Congcong, et al. Effect of addition of hematite and limonite on oxidation kinetics and roasting performance of fluxed magnetite pellets[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2025, 25(5): 510－521.

[18] FORSMO S P E, FORSMO S E, SAMSKOG P O, et al. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets[J]. Powder Technology, 2008, 183(2): 247－259.

[19] 高国锋，周晓雷，施哲，等．纯褐铁矿球团焙烧工艺及其影响因素研究[J]．硅酸盐通报，2020，39(2)：485－492.
GAO Guofeng, ZHOU Xiaolei, SHI Zhe, et al. Study on roasting process of pure limonite pellet and its influencing factors[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 485－492.

[20] 李骞，杨永斌，姜涛．菱铁矿和褐铁矿球团制备技术研究[J]．矿冶工程，2009，29(2)：59－62.
LI Qian, YANG Yongbin, JIANG Tao. Study on siderite and limonite pellets preparation technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(2): 59－62.

[21] 钟昇平，郭磊，丁智勇，等．铁矿粉气基直接还原过程中铁晶须生长观察[J]．有色金属科学与工程，2018，9(1)：15－21.
ZHONG Shengping, GUO Lei, DING Zhiyong, et al. Observation on the growth of iron whisker in gas-based direct reduction process of iron ore fines[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(1): 15－21.

[22] 李卓，宗燕兵，张建良，等．高硅镁质熔剂性球团还原历程及冶金性能分析[J]．钢铁，2023，58(3)：34－42.
LI Zhuo, ZONG Yanbing, ZHANG Jianliang, et al. Reduction process and metallurgical properties analysis of high silicon magnesia flux pellets[J]. Iron & Steel, 2023, 58(3): 34－42.

[23] YANG C C, WEI L, ZHU D Q, et al. Hydrogen-based direct reduction behavior of iron ore pellets with iron grades ranging from 59% to 68%[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 138: 787－801.