非主流矿托克配加铁桥等制备氧化球团试验

易陆杰[1]，孙 超[2]，潘 建[2,3]，杨聪聪[2,3]，郭正启[2,3]，李思唯[2,3]，朱德庆[2,3]
（1. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524076；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；
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）

摘要：随着全球铁矿资源的日益紧张和多样化开发，非主流铁矿粉（如托克粉、铁桥精粉等）在球团烧结工艺中的应用逐渐成为钢铁行业关注的焦点。非主流矿通常指全铁含量（TFe）低于 62%，杂质含量较高，磷、硫、铝等有害元素较多的矿种或产量较低、市场份额小且品质波动较大的矿产资源，主要由中小型矿山生产，作为主流矿（如四大矿山产品）的补充供应来源，需通过选矿或配矿提升使用价值。本文系统研究了以非主流矿 OTF 为主，OIB 等其他非主流矿为辅在球团焙烧过程中的物理化学特性、成球性能、固结行为及其对球团质量影响的表现。试验结果表明，用 OTF 为主，配加其他非主流矿的所有配矿方案，随着水分的提高，生球的落下强度均有改善，所有配比抗压强度均大于 10 N/P。其中，OIB 使抗压强度有所上升，爆裂温度有所下降。在预热温度为 1 050 ℃、预热时间为 6 min、焙烧温度为 1 220 ℃、焙烧时间为 15 min 的条件下，可获得预热球团抗压强度为 537～693 N/P，焙烧球团抗压强度为 2 902～3 144 N/P，转鼓指数在 95% 左右，耐磨指数在 3% 左右，各项指标均满足工业生产要求。球团还原膨胀较低（<12%），低温还原粉化指数（>3.15 mm）大于 96%，但是还原性略低于 60%。

关键词：非主流铁矿；托克粉；铁桥精粉；球团；扩大试验；冶金性能
中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0074－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.049

Experiment on preparation of oxidized pellets by mixing non-mainstream ore Tok with Tieqiao

YI Lujie[1], SUN Chao[2], PAN Jian[2,3], YANG Congcong[2,3], GUO Zhengqi[2,3], LI Siwei[2,3], ZHU Deqing[2,3]
(1. Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524076, Guangdong, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Vale-Central South University Joint Laboratory on Low-Carbon and Hydrogen Metallurgy, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: With the increasing scarcity and diversification of global iron ore resources, the application of non-mainstream iron ore powders (such as Toker powder and Tieqiao concentrate powder) in pellet sintering processes has gradually become a focal point for the steel industry. Non-mainstream ores usually refer to mineral resources with total iron content (TFe) below 62%, high impurity content, and high levels of harmful elements such as phosphorus, sulfur, and aluminum, or mineral resources with low output, small market share, and significant quality fluctuations. These are mainly produced by small and medium-sized mines and serve as supplementary sources for mainstream mines (such as the four major mine products), requiring beneficiation or ore blending to enhance their value for use. This paper systematically studies the physicochemical properties, pelletizing performance, consolidation behavior, and their impact on pellet quality during pellet

收稿日期：2025－09－28；**修回日期**：2025－11－13
基金项目：岳麓山工业创新中心科研项目(2025YCII0135)
作者简介：易陆杰(1978—)，男，工程师，从事球团生产技术管理方面的工作。
通信作者：潘 建(1977—)，男，教授，从事烧结球团、低碳与氢冶金、固废资源化等基础理论与工艺研究。

roasting, mainly with OTF ore as the main focus and OIB as supplementary to other non-mainstream ores. Test results show that all ore mixing schemes using OTF as the main material and adding other non-mainstream ores improve the drop strength of the pellets as moisture increases, with compressive strength greater than 10 N/P in all ratios. Among them, OIB increases compressive strength and lowers burst temperature. Under conditions of a preheating temperature of 1 050 ℃, preheating time of 6 min, roasting temperature of 1 220 ℃, and baking time of 15 min, the compressive strength of preheated pellets can be obtained at 537 ~ 693 N/P, roasted pellets at 2 902 ~ 3 144 N/P, with a drum index of about 95% and a wear resistance index of about 3%. All indicators meet industrial production requirements. Pellet reduction expansion is relatively low (< 12%). The low-temperature reduction powdering index (> 3.15 mm) is greater than 96%, but the reducibility is slightly below 60%.

Key words: non-mainstream iron ore; Tok powder; Tieqiao concentrate powder; pelletizing; pilot test; metallurgical performance

在全球矿业寡头垄断与地缘政治博弈加剧的背景下，非主流矿已成为钢铁产业链重构、对冲主流矿高溢价及提升供应链韧性的核心突破口。2025 年全球铁矿产能显著分化，主流矿山(VALE、RIO、FMG)虽规划新增产能 7 000 万 t/a，但实际有效增量仅 800 万 t(占 11.4%)；非主流矿(如 MRL 昂斯洛 2 000 万 t、宝武-Ashburton 1 500 万 t、CSN 巴西 800 万 t)加速崛起，净增产能 2 700 万 t。2024 年发运数据印证此趋势：全球发运 14.92 亿 t，非主流矿以 7.95% 增速(> 1 904 万 t)领跑，61.3% 增量源自非洲新兴矿区[1]。技术突破大幅提升了非主流矿的利用价值，通过配矿优化及梯度脱杂[4]，其在大型高炉适配率从 55% 跃升至 82%[5]，资源综合利用率提升 15%，全生命周期成本较传统矿山下降 18% ~ 23%。战略层面，分布式开发不仅分散供应风险、增强进口高依存度国家的议价能力[6]，更深度协同低碳冶金——低品位矿耦合电炉短流程及氢基还原，吨钢碳排下降 8% ~ 10%(2030 年可达 15% ~ 18%)[8-9]，淡水河谷“新卡拉加斯计划”采用模块化开采，将建矿成本降至 $100/t(降幅 35% ~ 40%)，项目投资回报率突破 18%，重塑矿业投资逻辑。

未来，依托区块链溯源与智能定价[10]，非主流矿贸易占比预计 2030 年突破 35%。该进程需区域性混配中心、ESG(环境、社会和公司治理)多边认证及“矿山 - 港口 - 钢厂”垂直整合三大体系支撑，最终构建多极化、低碳化、数字化的全球矿产新生态。

本文聚焦非主流矿托克粉(OTF)为主、铁桥精粉(OIB)为辅的球团制备，系统揭示了 OTF-OIB 体系在链算机—回转窑工艺下的理化特性、成球性能及固结行为，明确了矿种配比对球团强度、还原性与低温还原粉化性能的耦合影响规律。通过优化配比，提出了兼顾球团质量与成本的非主流矿配矿策略，为钢铁企业多元化用矿、降本增效提供了理论支撑与实践路径。未来需进一步探索其在氢冶金、低碳烧结等新工艺中的适配性。

1　原料性能和试验方法

1.1　化学成分分析

试验原料(包括 7 种铁矿粉、2 种膨润土和 1 种石灰石熔剂)主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知：OZL、NOZL、OIB 均属于高品位磁铁精矿，其铁品位超过 66%，$w(SiO_2)$ 为 1.5% ~ 5.0%，$w(Al_2O_3)$ 较低，不到 0.7%，其他有害元素含量少；IOCJ 和 OMN 属于高品位赤铁矿，铁质量分数超过 64%，脉石成分和有害元素含量低；OTF 和 ONM 均为低品位赤铁矿，铁品位为 58% ~ 61%，$w(SiO_2)$ 为 5.0% ~ 8.4%，烧损含量高，尤其是 ONM 的烧损高达 5.66%。因此，在球团中配入 ONM 会对降低球团强度，提高焙烧能耗。

1.2　粒度组成

含铁原料及熔剂粒度组成见表 2。由表 2 可知，IOCJ、OTF、ONM 原矿粒度过粗，在造球前应对其进行磨矿预处理，使其达到适宜的粒度和比表面积。在一般的造球过程中，要求铁精矿粒度为≤0.074 mm 占 70% ~ 80% 以上，≤0.045 mm 达到 50% ~ 60%。OZL，NOZL，OIB，OMN 原矿粒度均满足上述要求，可直接用于造球。

表1 试验原料主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Chemical composition 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
OZL	68.94	29.08	2.23	0.60	0.39	0.83	0.012	0.130	0.05	0.06	-2.91
NOZL	68.46	21.89	1.46	0.32	0.57	0.68	0.045	0.005	0.01	0.04	-0.58
OIB	66.00	27.12	4.99	0.65	0.10	0.33	0.020	0.010	0.14	0.02	-1.83
IOCJ	64.62	0.80	2.88	1.04	0.09	0.05	0.070	0.020	0.02	0.01	2.88
OMN	66.80	0.23	2.89	0.62	0.10	0.02	0.040	0.010	0.03	0.03	0.86
OTF	60.78	2.05	8.35	1.24	0.36	0.14	0.050	0.040	0.01	0.02	2.35
ONM	58.71	0.63	6.50	3.08	0.08	0.14	0.060	0.020	0.01	0.11	5.66
原料种类	水分	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	K_2O	Na_2O	烧损
DB	6.52	4.87	56.82	15.39	2.01	2.38	0.09	0.01	1.41	1.79	7.80
IB	7.31	11.13	49.07	14.43	1.68	2.66	0.08	0.02	0.29	2.71	8.61
LS	2.27	0.25	2.02	0.59	51.40	2.70	0.01	0.06	0.21	0.03	42.57

注:OZL为智利精粉;NOZL为新智利精粉;OIB为铁桥精粉;IOCJ为卡粉;OMN为米纳斯精粉;OTF为托克粉;ONM为纽曼筛下粉;DB为国产膨润土;IB为进口膨润土;LS为石灰石。

表2 含铁原料及熔剂粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size distribution of iron-bearing raw materials and flux %

原料种类	≥10 mm	[8,10) mm	[5,8) mm	[3,5) mm	[1,3) mm	(0.5,1) mm	≤0.5 mm
IOCJ	—	9.49	12.63	8.22	23.72	12.34	33.60
OTF	—	1.49	3.31	5.73	12.43	8.90	68.14
ONM	7.65	73.33	10.97	4.33	0.80	0.45	2.47
原料种类	≥0.15 mm	[0.074,0.15) mm	[0.045,0.074) mm	(0.038,0.045) mm	≤0.038 mm		
OZL	0.13	1.31	5.71	14.61	79.55		
NOZL	—	14.90	30.44	54.66	—		
OIB	0.01	1.60	9.73	4.22	84.45		
OMN	0.56	10.25	25.13	7.62	56.44		
LS	81.87	3.33	14.16	0.64	—		

1.3 物理性能

铁矿原料物理性能如表3所示。由表3可知,铁矿石品位与真密度正相关。高品位主流矿真密度多≥5.0 g/cm^3;OTF、OIB等试验矿属经济型(4.5~5.0 g/cm^3)。造球适宜的堆密度为2.0~2.4 g/cm^3,OIB及OZL、IOCJ偏低,其余矿种达标。粒度方面,OIB极细(<0.038 mm占84.45%),比表面积高达2 174 cm^2/g,OTF最低(1 076 cm^2/g),NOZL与IOCJ基本满足1 500~1 900 cm^2/g的工艺要求。综上,通过合理配矿可平衡物理性能,配合高压辊磨预处理提升细度,可满足烧结球团生产需求。

表3 铁矿原料物理性能

Table 3 Physical properties of iron ore raw materials

矿粉种类	堆密度/(g·cm^{-3})	真密度/(g·cm^{-3})	孔隙率/%	比表面积/(cm^2·g^{-1})
OZL	1.78	4.88	0.64	1 378
NOZL	2.08	4.97	0.58	1 476
OIB	1.64	4.53	0.64	2 174
IOCJ	1.90	4.44	0.57	1 654
OMN	2.02	4.93	0.59	1 384
OTF	2.38	4.59	0.48	1 076
ONM	2.23	4.31	0.48	1 347

1.4 试验方法

为研究不同非主流矿不同配矿方案下的可能性,保证配矿方案的合理性,总共设计了3种配矿方案(B1、B2、B3),配矿方案如表4所示。其中,固定OMN、ONM参与每个配比且保持一致,

主要研究 OZL、NOZL、OIB、IOCJ 和 OTF 对球团性能的影响。

表 4　配矿方案(质量分数)

Table 4　Ore blending schemes　%

原料种类	B1	B2	B3
OZL	20.00	0	0
NOZL	0	20.00	0
OIB	0	0	20.00
IOCJ	0	8.00	8.00
OMN	20.00	20.00	20.00
OTF	48.20	40.20	40.20
ONM	10.00	10.00	10.00
DB	0.65	0.65	0.65
IB	0.35	0.35	0.35
LS	0.80	0.80	0.80
总计	100	100	100

小型试验配料以总重 3 kg 为基准，首先将 3 种方案混合料在 7% 相同水分下充分混匀后辊磨一次，其比表面积如表 5 所示。由表 5 可知，高压辊磨前的比表面积均低于 1 500 cm^2/g，辊磨一次后比表面积均大于 1 500 cm^2/g，满足造球要求。将辊磨后的混合矿与一定量的膨润土、石灰石混匀，然后将混合料放入圆盘造球机中进行造球试验。造球机直径为 1 m，倾角为 47°，转速为 25 r/min。人工筛分选出 12 ~16 mm 的合格生球，随机取 10 颗合格生球测定抗压强度、落下强度、爆裂温度。合格生球取样 500 g 左右烘干 6 h 测定烘干后的重量，确定水分含量。其余合格生球在(100 ± 5) ℃的恒温烘箱中干燥 6 h 后，用卧式管炉进行焙烧试验。通过管炉小型试验获得最佳造球和焙烧制度，然后在自主设计、装配的链算机—回转窑模拟装置上进行相应的扩大试验，成品球团的冷态性能和冶金性能分别根据 ISO 4700—2015、GB/T 24531—2009、GB/T 24189—2024、GB/T 13242—2017、GB/T 13240—2018 等相关标准进行测定。

表 5　不同配矿方案高压辊磨后的比表面积

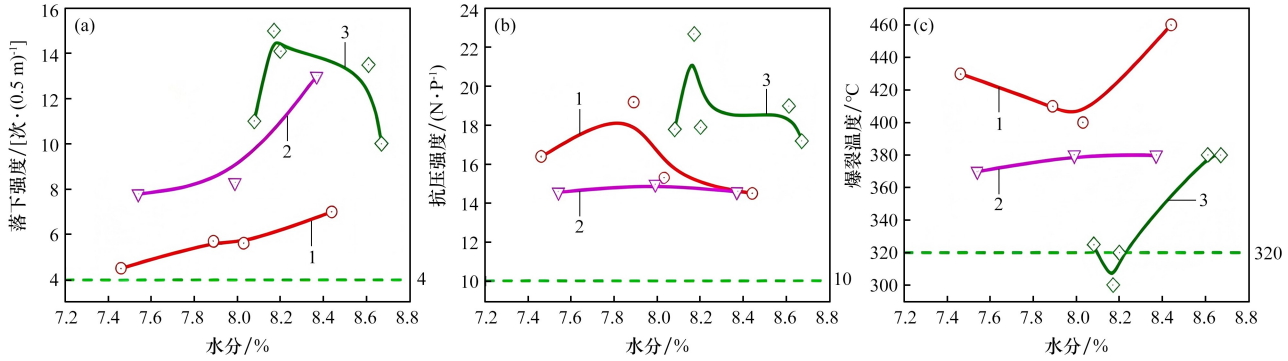
Table 5　Specific surface area after high-pressure roller grinding for different ore blending schemes　cm^2/g

配矿方案	未辊磨	辊磨 1 次
B1	1 489	1 563
B2	1 291	1 549
B3	1 303	1 592

2　结果与讨论

2.1　造球试验

固定造球时间为 12 min、膨润土用量为 1%(0.65% 进口膨润土和 0.35% 国内膨润土)，石灰石用量为 0.8%。考察了造球水分对不同配比生球性能的影响，结果如图 1 所示。由图 1 可知，对于所有的配矿方案，随着水分的提高，生球的落下强度、抗压强度和爆裂温度均可满足国家标准，其中，B2 方案中 NOZL 是 B1 中 OZL 通过浮选得到的，而 B2 中又有高品位的 IOCJ 取代了 8% 的低品位 OTF，导致 B2 的落下强度较 B1 有明显改善，抗压强度和爆裂温度随水分的变化很稳定，B3 方案中 OIB 取代了 OZL，IOCJ 取代了 8% OTF，由于



(a) 落下强度；(b) 抗压强度；(c) 爆裂温度

1—B1；2—B2；3—B3。

图 1　不同配矿方案的生球性能

Fig. 1　Green pellet properties of different ore blending schemes

OIB 原矿粒度过细，比表面积过大，生球的各项指标对水分的变化很敏感，导致 B3 在水分为 8.15% 左右落下强度达到峰值后出现回落，爆裂温度低于 320 ℃。

2.2 管炉焙烧试验

2.2.1 预热温度和预热时间对预热球团强度的影响

固定预热时间为 6 min，考察预热温度对不同配比预热球团抗压强度的影响，结果如表 6 所示。由表 6 可知，随着预热温度的提高，球团中的磁铁矿开始氧化成赤铁矿，颗粒间形成初步的固相连接，预热球团抗压强度会明显提高。此外，B1 和 B2 还没出现强度最高点。B1 对温度更敏感，这可能是因为 OZL 原矿粒度比处理后的 NOZL 细，更细的原矿具有更高的反应活性，在充分干燥后，预热阶段会氧化更充分，形成更致密的氧化层，这有助于提高球团强度。B3 跟 B2 的强度变化趋于一致，但 B3 更早的出现抗压强度最高点，这可能是因为 OIB 过高的比表面积所致。

在 1 050 ℃的预热温度下，研究了预热时间对焙烧球团抗压强度的影响，结果如表 6 所示。由表 6 可知，随着预热时间的延长，预热球团抗压强度缓慢提高。这是因为在合理的时间范围内，时间延长促进了磁铁矿(Fe_3O_4)向赤铁矿(Fe_2O_3)的氧化反应充分进行，晶粒间形成连续固相桥接结构。当预热温度维持在 1 050 ℃时，每延长 2 min，抗压强度对应增长 5%~15%。综合来看，所有配比推荐适宜的预热时间为 6 min。

表 6 预热温度和预热时间对预热球团强度的影响

Table 6 Effect of preheating temperature and preheating time on the strength of preheated pellets

预热温度/℃	B1	B2	B3	预热时间/min	B1	B2	B3
950	360	398	422	4	641	550	660
1 000	480	427	493	6	672	634	700
1 050	672	634	700	8	746	688	741
1 100	1 089	795	785	10	791	735	788

2.2.2 焙烧温度和焙烧时间对焙烧球团强度的影响

在预热温度为 1 050 ℃，预热时间为 6 min 以及固定均热制度下，焙烧时间固定为 15 min，研究了焙烧温度对焙烧球团抗压强度的影响，结果如表 7 所示。由表 7 可知，随着焙烧温度的提高，赤铁矿晶格内原子可获得足够能量，能更好的克服周围化学键力的束缚，提高其扩散能力，有利于颗粒间接触，粒子间间距缩小和长大，球团致密度提高；同时提高焙烧温度，促进了 Fe_2O_3 再结晶和晶粒的聚集长大，强化连晶，从而提高了球团矿强度。因此，随着焙烧温度的逐渐提高，焙烧球团的抗压强度显著上升。B1 和 B2 强度变化趋于一致，证明 8% 的 IOCJ 对焙烧强度的影响不大，B3 强度达到 2 500 N/P 需要更高的温度。

在预热温度为 1 050 ℃，预热时间为 6 min 以及固定均热制度下，焙烧温度固定为 1 200 ℃(B3 温度 1 215 ℃)，研究了焙烧时间对焙烧球团抗压强度的影响，结果如表 7 所示。由表 7 可知，在焙烧的初始阶段(0~9 min)，Fe_2O_3 晶粒通过表面扩散实现初步连接，形成“骨架式”结构，抗压强度会从预热强度 500~800 N/P 快速提升至 2 500 N/P。随着反应时间的继续(9~15 min)，晶粒通过体积扩散完成致密化，强度会进一步提升，同时硅酸盐液相(如 $CaO\text{-}FeO\text{-}SiO_2$ 体系)在 12~15 min 时达到最佳流动性，填充晶间孔隙并形成连续黏结网络，球团体积收缩，赤铁矿晶粒生长速率趋缓，液相分布实现动态平衡，抗压强度波动幅度变小。当反应继续，超时焙烧会引发晶粒异常粗化，晶界强度下降，同时 $FeO\text{-}SiO_2$ 相二次析出，占比回升，导致孔隙率反弹。抗压强度出现大幅度衰减。因此，在合理时间范围内，适当延长时间，焙烧球团抗压强度得以改善，但在相同焙烧时间下，B1 和 B2 和变化趋势依旧近乎一致，但 B3 强度依然最低，证明 OIB 对球团强度带来的影响几乎是负面的。即使如此，B3 方案还是满足工业标准，有进一步继续试验的必要。

表 7 焙烧温度和焙烧时间对焙烧球团强度的影响

Table 7 Effect of roasting temperature and roasting time on the strength of roasted pellets **N/P**

焙烧温度/℃	B1	B2	B3	焙烧时间/min	B1	B2	B3
1 100	721	857	919	9	2 652	2 679	2 508
1 150	1 821	1 775	1 850	12	2 979	2 916	2 847
1 200	3 019	3 138	2 640	15	3 019	3 138	2 903
1 215	3 204	3 350	2 903	18	3 028	3 335	2 934

3　成品球团扩大试验及性能分析

针对方案 B1 ~ B3，在小型试验的基础上进一步开展模拟链算机—回转窑工艺的扩大试验，试验条件及结果如表 8 所示。由表 8 可知，在预热温度为 1 050 ℃，预热时间为 6 min，焙烧温度为 1 220 ℃，焙烧时间为 15 min 的条件下，可获得预热球团抗压强度为 537 ~ 693 N/P，焙烧球团抗压强度为 2 902 ~ 3 144 N/P，预热球与成品球转鼓指数均在 95% 左右，耐磨指数在 3% 左右，各项指标均满足工业生产要求。

3 种方案成品球团矿主要化学成分如表 9 所示。由表 9 可知，球团 $w(Fe)$ 为 64%，$w(FeO)$ 低于 1%，同时 $w(SiO_2)$、$w(Al_2O_3)$ 等脉石含量分别为 6% 和 1.5% 左右，Zn、Pb、As、P、S 等有害元素及碱金属含量低。

3 种方案成品球团模拟高炉的冶金性能由表 10 所示。由表 10 可知，球团的还原膨胀较低，小于 12%。低温还原粉化指（≥3.15 mm）大于 96%，还原性较差，低于 60%。其原因可能是 OTF 含量较高导致 SiO_2 含量偏高，使液相黏度增加从而影响气体扩散；部分配比中 OIB 粒度过细，比表面积过大，导致焙烧过程中提前致密化，成品球团孔隙率偏低，不利于气体渗透与反应进行。整体来看，固定矿以 OTF 为主 OMN 和 ONM 为辅，调节 OZL、NOZL、OIB、和 IOCJ 的配矿方案在实际高炉生产中是可行的，可以通过适当提高 IOCJ 等高品位矿配比、减少 OIB 加入量或优化 $w(CaO)/w(SiO_2)$ 比值来提升还原性以满足工业标准。

4　成品球团矿相分析

各成品球团物相含量如表 11 所示。由表 11 可知，各氧化球团矿主要包括赤铁矿、磁铁矿、石英、玻璃质及其他矿物等，矿物组成比较简单，物相清晰，氧化球团由 Fe_2O_3（占 90% 左右）结晶固结为主，液相固结为辅，玻璃质、石英等仅占 5%~8%。

由链算机 – 回转窑制备出的成品球团矿矿相结构如图 2 所示。由图 2 进一步证实，球团矿中主要矿相为赤铁矿，少量的磁铁矿、石英、玻璃质等。

球团矿中的主要矿物为赤铁矿（Fe_2O_3），其呈现粒状[图 2(a)]，部分赤铁矿可发育为粒度相对较粗的片状[图 2(f)]，常紧密镶嵌构成较为致密的集合体，局部可形成交织结构[图 2(c)]。所有方案中 Fe_2O_3 结晶优良，晶粒发育较好，B2 和 B3 有些结晶颗粒尺寸超过 100 μm，多呈现自形晶、半自形晶或溶蚀状；晶形互连成整体，晶面光滑，单独粒状少，与少量粒状的钙铁橄榄石紧密胶结，显微结构力较大。

样品中磁铁矿分布不均匀，其含量较低，而且多见于球团的球核部。磁铁矿的产出形式大致分为两种：一是为形态较规则的粒状，晶体粒度通常在 0.05 mm 以下，主要为团块状集合体[图 2(e)]，

表 8　不同配矿方案球团扩大试验结果

Table 8　Pelletizing pilot-scale test results for different ore blending schemes

配矿方案	预热		焙烧		预热球团			成品球团		
	时间/min	温度/℃	时间/min	温度/℃	抗压强度/(N·P^{-1})	裂纹率/%	转鼓强度(≥3 mm)/%	抗压强度/(N·P^{-1})	转鼓指数(≥6.3 mm)/%	耐磨指数(≤0.5 mm)/%
B1	6	1 050	15	1 220	537	17.32	94.99	2 902	95.87	3.07
B2	6	1 050	15	1 220	573	19.88	95.63	3 048	95.83	2.97
B3	6	1 050	15	1 220	693	22.54	97.48	3 144	95.73	3.07

表 9　不同配矿方案球团矿主要化学成分(质量分数)

Table 9　Main chemical composition of pellets from different ore blending schemes　　%

配矿方案	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	K_2O	Na_2O
B1	64.47	0.110	5.58	1.50	0.55	0.25	0.044	0.002 6	0.036	0.046
B2	65.13	0.072	5.20	1.35	0.46	0.23	0.058	0.002 4	0.028	0.039
B3	64.61	0.073	5.80	1.37	0.50	0.15	0.049	0.002 3	0.028	0.039

表 10 不同配矿方案球团扩大试验模拟高炉冶金性能

Table 10 Simulated blast furnace metallurgical properties of pellets from pilot-scale tests for different ore blending schemes

配矿方案	还原度指数/%	还原膨胀指数/%	低温还原粉化指数/%		
			>6.30 mm	>3.15 mm	<0.50 mm
B1	55.41	11.62	96.84	1.30	1.55
B2	54.57	10.17	97.49	0	2.47
B3	57.16	11.45	93.96	2.63	2.22

表 11 各成品球团矿物组成及孔隙率

Table 11 Mineralogical composition and porosity of finished pellets

方案	矿物组成(质量分数)/%				球团孔隙率(体积分数)/%
	赤铁矿	磁铁矿	石英	玻璃相及其他	
B1	89	2	3	6	17.74
B2	89	1	2	8	15.52
B3	91	1	2	6	11.94

但沿粒间常见微细的星点状赤铁矿充填连接；二是呈细小的交代残余出现在部分赤铁矿集合体中，粒度多小于 0.02 mm[图 2(a)]。磁铁矿与赤铁矿交织也是一种良好的固相固结形式，且球团矿核心部分的赤铁矿和磁铁矿再结晶互连密实后会提高球团矿整体强度。

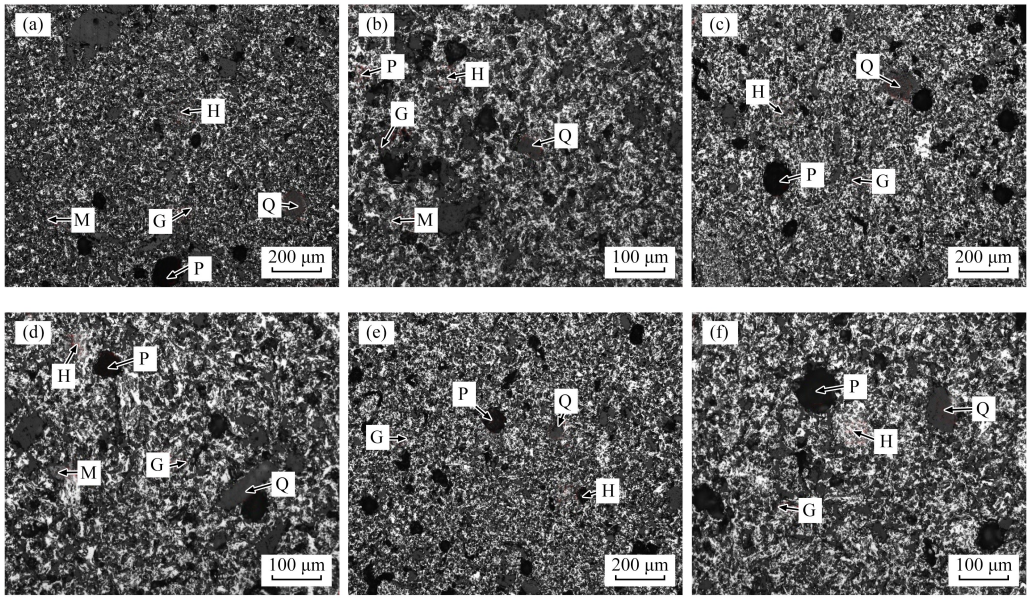
石英主要来自于配矿方案的原料和石灰石，B2 和 B3 较 B1 原料中的 SiO_2 较多，因此，B2 和 B3 形成了更大颗粒的石英相[图 2(e)、图 2(f)]，可见，SiO_2 主要还是形成了石英，由于反应不充分而形成的钙铁橄榄石在球团中的含量很少。

玻璃相是因为球团焙烧过程，冷却速度过快，来不及结晶所形成的矿物，通常呈现黑色，不规则状，该矿物会降低烧结矿强度，恶化其冶金性能。球团矿玻璃质含量较少，因此，其对球团强度影响不大。

此外，球团矿孔洞分布较为均匀，整体来看，球团孔隙率不高，常见以中孔厚壁结构为主，未见明显的大孔薄壁结构，这有利于改善球团矿强度。

5 结 论

(1) OTF 为低品位赤铁矿[w(TFe)为 60.78%]；OZL、NOZL、OIB 为高品位磁铁精矿[w(TFe)>66%为 8.35%]；IOCJ、OMN 为高品位赤铁矿[w(TFe)>64%)]。其中 IOCJ、OTF、ONM 原矿粒度过粗，在造球前应对其进行磨矿预处理，使其达到适宜的粒度，OZL，NOZL，OIB，



(a)、(b) B1；(c)、(d) B2；(e)、(f) B3

H—赤铁矿；M—磁铁矿；Q—石英；G—玻璃相；P—孔洞。

图 2 不同配矿方案成品球团矿显微结构

Fig. 2 Microstructure of finished pellets under different ore blending schemes

OMN 原矿粒度均满足造球要求。

（2）固定以铁品位为 60.78% 的 OTF 为主要原料，以铁品位分别为 66.80% 和 58.71% 的 OMN 和 ONM 为辅助原料，通过调配 OZL、NOZL、OIB 和 IOCJ 形成不同配矿方案。各方案生球的落下强度、抗压强度和爆裂温度总体满足国家标准。其中，B2 方案生球性能较稳定，落下强度优于 B1 方案；B3 方案生球性能对水分变化较敏感，其落下强度在水分约 8.15% 时达到峰值，爆裂温度低于 320 ℃。

（3）管炉焙烧及模拟链箅机—回转窑工艺的扩大试验结果表明，在预热温度为 1 000 ~ 1 050 ℃、预热时间为 6 min、焙烧温度为 1 220 ℃和焙烧时间为 15 min 的条件下，预热球团抗压强度为 537 ~ 693 N/P，焙烧球团抗压强度为 2 902 ~ 3 840 N/P，转鼓强度约为 95%，耐磨指数约为 3%，各项指标满足工业生产要求。球团还原膨胀率低于 12%，低温还原粉化指数（ > 3.15 mm）大于 96%，但还原性略低于 60%。

（4）本研究的配矿策略与工艺参数可直接应用于湛江钢铁等企业的工业化生产，为提高非主流矿利用率、降低原料成本提供了可执行的技术方案。

参考文献：

[1] 楚新莉．铁矿年报：供需失衡加剧，矿价“高处不胜寒”[N]. CFC 金属研究，2024 - 12 - 13.
CHU Xinli. Iron ore annual report: Supply-demand imbalance intensifies, ore price “feels cold at high altitude”[N]. CFC Metal Research, 2024 - 12 - 13.

[2] 李晓波，李孟土，易陆杰，等．湛江球团配矿结构分析[J]. 烧结球团，2018，43(4)：49 - 53.
LI Xiaobo, LI Mengtu, YI Lujie, et al. Analysis ofproportioning structure of Zhanjiang pelletizing plant [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 49 - 53.

[3] 许满兴．优化高炉炼铁原料采购与烧结高炉配矿一体化的思路和方法[J]. 烧结球团，2016，41(5)：1 - 7.
XU Manxing. Ideas and methods of integrated optimization of BF iron-making raw materials procurement and sintering and BF proportioning[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(5): 1 - 7.

[4] 朱苗勇．《现代冶金工艺学：钢铁冶金卷（第 3 版）》[M]. 北京：冶金工业出版社，2005.
ZHU Miaoyong. Modern metallurgical technology-steel metallurgy (3rd edition)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.

[5] 中钢国际．石碌铁矿 200 万吨/年悬浮磁化焙烧炉项目将开工[N]. 中钢国际，2022 - 12 - 09.
Sinosteel MECC. The 2 million tons/year suspension magnetization roasting project of shilu Iron mine to commence[N]. Sinosteel MECC, 2022 - 12 - 09.

[6] 温子龙．2024 年中国钢铁行业铁矿资源保障现状及未来展望[EB/OL]. 冶金工业规划研究院，(2025 - 04 - 30)[2025 - 09 - 16]. https://www.mpi1972.cn/
WEN Zilong. Current status and future outlook of iron ore resource security in China's steel industry in 2024[N]. China Metallurgical Planning & Research Institute, (2025 - 04 - 30)[2025 - 09 - 16]. https://www.mpi1972.cn/

[7] 王兰玉 李兰杰，赵素兴，等．一种中低品铁矿直接还原铁电炉熔分高效冶炼铁水的方法：CN202411226603.3[P]. 2024 - 12 - 27.
WANG Lanyu, LI Lanjie, ZHAO Suxing, et al. An efficient smelting method for producing hot metal from medium-low grade iron ore via direct reduction and electric furnace separation, CN202411226603.3[P]. 2024 - 12 - 27.

[8] 王庆 陈唐平，干明，等．一种以低品位直接还原铁为原料的低碳炼钢方法及系统：CN202311362258.1[P]. 2024 - 02 - 09.
WANG Qing, CHEN Tangping, GAN Ming, et al. A low-carbon steelmaking method and system using low-grade direct reduced iron as raw material, CN202311362258.1[P]. 2024 - 02 - 09.

[9] 李梦龙，李巍．河钢“氢基竖炉—近零碳排电弧炉”项目正式启动[N]. 中国冶金报，2024 - 04 - 09(1).
LI Menglong, LI Wei. HBIS Group “Hydrogen-based Shaft Furnace-Near-Zero Carbon Emission EAF” Project Officially Launched[N]. China Metallurgical News, 2024 - 04 - 09(1).

[10] 中国电子学会．区块链场景化应用大有可为[Z]. 2021 - 06 - 16.
China Institute of Electronics. Blockchain scenario-based applications have great potential[N]. 2021 - 06 - 16.