无预处理铁矿球团生产中膨润土提质降耗技术

唐银华[1,2]，李浩鸣[2,3]，聂绍昌[2]，詹卫华[2]，龙红明[1]

(1. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032；2. 新余钢铁股份有限公司，江西 新余 338001；
3. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083)

摘要： 膨润土作为球团生产的主要黏结剂，虽能提升成球性与强度，但其所含脉石成分会导致球团品位下降，增加高炉冶炼的碳耗、炉渣及碳排放。为降低膨润土用量、提升球团质量并推动低碳生产，本文针对某钢铁企业原料无预处理工艺条件，提出以配矿优化与有机复合黏结剂替代为核心的提质降耗技术。通过分析 6 种铁精矿的理化特性，设计 4 种配矿方案，系统研究混合工艺、膨润土用量及有机黏结剂种类对生球强度、预热焙烧行为与球团微观结构的影响。结果表明：在无预处理条件下，混合矿的成球性较差，膨润土配比需≥3.5%；采用优化配矿方案(A 矿 11.5%、F 矿 20%)，将膨润土用量从 3.5% 降至 2.5% 并添加 0.02% BASF 有机黏结剂，所得生球落下强度仍满足生产要求。球团抗压强度维持在 2 600 N/P 以上，铁品位提升至 62.12%，SiO_2 质量分数降至 7.55%。微观结构分析表明，膨润土减量会提高球团孔隙率(11.65%→15.62%)，而 BASF 的添加可使其回落至 14.43%，有利于强度改善。该技术在不增加黏结剂成本的前提下，实现膨润土用量降低 1.0%，可为球团生产提质降耗提供实用技术路径。

关键词： 铁精矿；球团矿；复合黏结剂；膨润土；落下强度

中图分类号： TF046.6 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764(2025)06－0056－11

doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.096

Bentonite quality improvement and consumption reduction technology in production of untreated iron ore pellets

TANG Yinhua[1,2], LI Haoming[2,3], NIE Shaochang[2], ZHAN Weihua[2], LONG Hongming[1]

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China; 2. Xinyu Iron & Steel Co., Ltd., Xinyu 338001, Jiangxi, China; 3. School of Minerals Processing and Bio-engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Although bentonite, as the main binder in pellet production, can improve the pelletizing performance and strength of the pellets, the gangue components it contains can lead to a decrease in pellet quality, as well as increase carbon consumption, slag formation, and carbon emissions during the blast furnace smelting. In order to reduce the amount of bentonite, improve the quality of pellets and promote the low-carbon production, in view of the lack of pretreatment process conditions for raw materials in a steel enterprise, a technology on quality improvement and consumption reduction with ore blending optimization and organic composite binder replacement as the core is proposed. By analyzing the physical and chemical properties of six iron concentrates, four ore blending schemes are designed, and the effects of mixing process, bentonite dosage and organic binder type on the strength of the fresh pellets, preheating and roasting behavior and microstructure of pellets are systematically studied. The results show that the pelletizing performance of the mixed ore is

收稿日期： 2025－02－24；**修回日期：** 2025－06－12

基金项目： 安徽省自然科学基金青年项目(2508085JX007)

作者简介： 唐银华(1978—)，女，博士研究生，高级工程师，从事烧结球团工艺技术方面的研究工作。

通信作者： 龙红明(1979—)，男，教授，从事冶金工程、资源综合利用方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

poor under the condition without pretreatment, and the bentonite ratio needs to be ≥3.5%. The optimized ore blending scheme (11.5% in mine A and 20% in mine F) is used to reduce the amount of bentonite from 3.5% to 2.5% and 0.02% BASF organic binder is added, and the falling strength of the fresh pellets still meets the production requirements. The compressive strength of the pellets is maintained above 2 600 N/P, the iron grade is increased to 62.12%, and the mass fraction of SiO_2 is decreased to 7.55%. Microstructural analysis shows that the reduction of bentonite can increase the porosity of the pellets (11.65%→15.62%), while the addition of BASF could reduce it to 14.43%, which is conducive to the improvement of strength. This technology can reduce the amount of bentonite by 1.0% without increasing the cost of binder, which can provide a practical technical path for pellets production quality and consumption reduction.

Key words: iron ore concentrate; pellets; composite binder; bentonite; drop strength

国家“碳达峰·碳中和”战略目标和钢铁工业超低排放等相关政策的出台，对钢铁企业绿色生产提出了严格要求。据统计，我国钢铁工业碳排放量约占碳排放总量的 15%～18%，是制造业中碳排放量最高的行业[1-3]。在未来相当长的一段时间内，高炉—转炉流程是钢铁生产制造的主要流程[4]。炼铁工序是钢铁工业中碳排放的主要源头，其碳排放量占钢铁工业总排放量的 82.79%。因此，钢铁工业碳减排的关键在炼铁工序。在炼铁工序中，进一步加强精料技术是低碳高炉冶炼技术发展的重要方向[5]。球团矿作为优质的高炉炉料，其工序能耗以及 NO_x、SO_2、二噁英排放量都远低于烧结矿，同时具有粒度均匀、冷态强度高、铁品位高、冶金性能好等优点。生产实践表明，与烧结工序相比，球团生产工序可降低 CO_2 排放约 110 kg/t[6]。加大球团矿在高炉炉料结构中的占比能减少烧结矿的使用，降低高炉生产工序中的碳消耗。据测算，球团矿入炉比每提高 1.0%，吨钢 CO_2 排放量可降低 0.27%～0.3%。膨润土作为最主要的黏结剂，在球团生产中发挥着重要作用。膨润土的加入能大幅改善原料的成球性，提高球团质量。但膨润土中 SiO_2、Al_2O_3 等脉石成分会降低球团矿品位，增加高炉冶炼碳消耗以及炉渣和碳排放[7]。目前，我国膨润土用量大多在 15 kg/t 以上，而国外膨润土消耗量为 5～10 kg/t。据统计，每减少 1.0% 的膨润土用量，球团品位将提高 0.6%，燃料比将降低 1.2%[8]。因此，降低膨润土用量是提高球团矿铁品位、降低碳消耗、减少碳排放的有效途径之一。

目前，以有机黏结剂替代部分膨润土是降低膨润土用量的有效方法之一[9-10]。球团用黏结剂主要分为无机黏结剂和有机黏结剂两种。一般要求黏结剂具有良好的亲水性、黏结性、遇水分散性以及较大的比表面积和良好的热稳定性，同时对后续生产流程的影响较小[11-12]。与膨润土相比，有机黏结剂在高温下往往会分解挥发，因此基本不会影响球团矿的最终品位[13]。但是，有机黏结剂在高温下的分解析出会造成球团孔隙度提高，进而降低球团强度。另外，膨润土内铝硅酸盐能在高温下与铁氧化物同化形成黏结相而强化球团强度，而有机黏结剂在高温下不会形成黏结相，其焙烧后生产球团的强度往往大幅低于膨润土球团强度，无法满足高炉冶炼要求[14]。因此，实际生产中一般不单独使用有机黏结剂，而是将有机黏结剂替代部分膨润土，以复合黏结剂的形式进行应用。

为此，本文在国内某钢铁企业现有工艺流程和原料结构的基础上，考虑该球团生产线未设置预处理工艺，通过优化配矿、复合黏结剂开发与使用等手段在保证生球质量的前提下降低膨润土用量，提高球团品位、降低 SiO_2 含量，为球团生产提供改进建议和技术参考。

1　原料性能和研究方法

1.1　原料性能

球团生产采用 6 种铁精矿搭配使用，包括自产精矿 4 种(A、C、D 和 E 矿)、省外精矿 1 种(B 矿)以及进口精矿 1 种(F 矿)。6 种铁精矿的化学成分、粒度组成、比表面积和静态成球性等物理化学性质如表 1～3 所示。从检测结果可以看出，6 种精矿都属于磁铁精矿，其化学成分相差较大。F 精矿的铁品位最高，达到69.01%；A 精矿次

中国知网　https://www.cnki.net

表 1 原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

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

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S	P	烧损
A 精矿	65.40	31.12	5.80	0.646	0.363	0.251	0.934	0.029	-2.12
B 精矿	63.45	24.95	10.12	0.943	0.198	0.372	0.062	0.046	-1.80
C 精矿	62.35	21.02	6.83	1.110	2.190	0.714	0.431	0.017	-1.60
D 精矿	63.08	20.46	6.96	1.510	0.752	0.714	0.471	0.024	-0.97
E 精矿	64.01	22.25	7.81	0.900	0.576	0.546	0.254	0.030	-1.47
F 精矿	69.01	28.64	1.71	0.406	0.577	0.847	0.012	0.018	-2.53
膨润土	5.27	—	54.01	14.960	5.220	3.180	0.092	0.260	10.59

之，铁品位为 65.4%，其他精矿的铁品位较低，为 62%~64%。对于 SiO_2 质量分数，F 精矿值非常低，仅为 1.71%，其他 5 种精矿的含量均较高。对于粒度组成，F 精矿粒度最小，其次为 B、D 和 E 精矿，A 和 C 精矿粒度偏大。

表 2 铁精矿的粒度组成与比表面积

Table 2 Particle size composition and specific surface area of iron concentrate

原料名称	粒度组成(质量分数)/%				比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
	>74 μm	≤74 μm	(45,74] μm	≤45 μm	
A 精矿	19.25	80.75	26.46	54.29	1 116.06
B 精矿	10.91	89.09	25.93	63.16	956.80
C 精矿	18.45	81.55	21.77	59.78	806.70
D 精矿	13.86	86.14	19.69	66.45	771.74
E 精矿	14.96	85.04	24.74	60.30	856.44
F 精矿	3.77	96.23	18.30	77.93	1 049.07

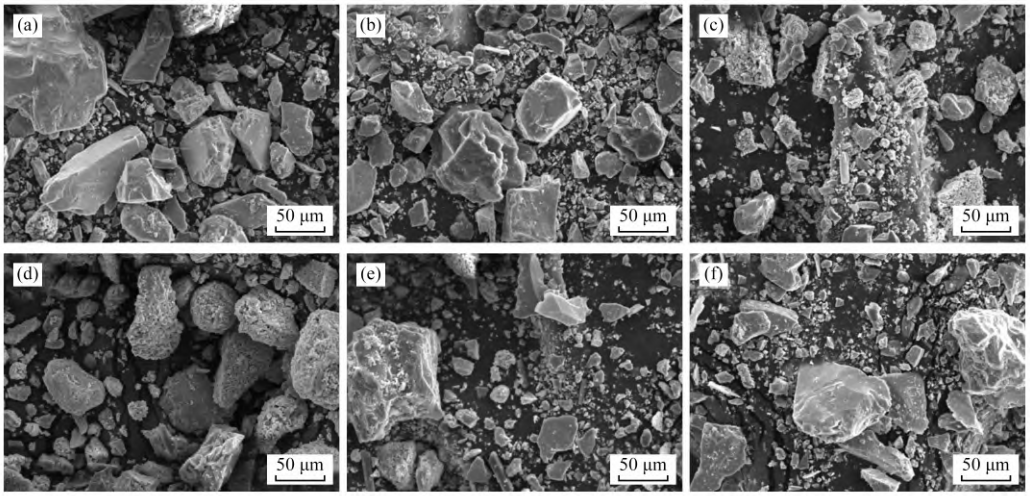
静态成球性指数是一个综合评价铁精矿成球性能的参数，它可以反映物料的粒度组成、比表面积以及亲水性等性质。由表 3 可知，C 精矿具有优等成球性，B、D、E 和 F 精矿具有良好成球性，而 A 精矿仅具有中等成球性。

表 3 铁精矿的静态成球性能

Table 3 Static balling performance of iron concentrate

原料名称	最大毛细水/%	最大分子水/%	静态成球性指数	成球性评价
A 精矿	22.10	6.64	0.43	中等
B 精矿	18.03	7.47	0.71	良好
C 精矿	22.10	9.87	0.81	优等
D 精矿	25.92	10.86	0.72	良好
E 精矿	22.66	8.68	0.62	良好
F 精矿	15.30	6.60	0.76	良好

6 种铁精矿的微观颗粒形貌如图 1 所示。由图 1 可知：A、B、E 和 F 精矿颗粒表面较为光滑，



(a) ~ (f) A ~ F 精矿

图 1 铁精矿颗粒的微观形貌

Fig. 1 The microstructure of iron concentrate particles

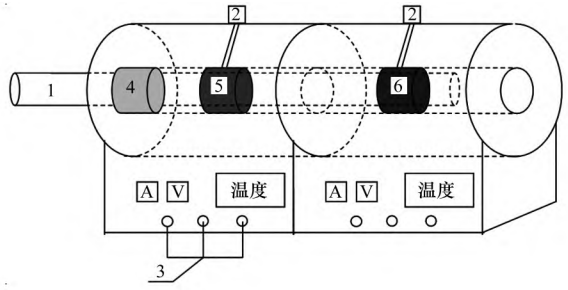
中国知网 https://www.cnki.net

呈颗粒状、板状或片状，在成球过程中不利于颗粒间的啮合；C 和 D 精矿颗粒表面呈冠状或凹凸不平，有利于成球。

1.2　研究方法

将 6 种铁精矿和膨润土按照设定比例经电子皮带秤称重，烘干后制备水分适宜的混合料。采用强力混合机将混合料混匀后，在实验室小型圆盘造球机制备生球。采用实验室小型混合机模拟原料强力混合过程，通过改变混合时间而调整混合强度。圆盘造球机直径为 1 000 mm，转速为 23 r/min，倾角为 47°。造球过程分为母球形成、母球长大、生球紧密三个阶段，整个造球时间为(15 ±0.5) min。试验模拟实际生产情况，首先用小铲将混合好的物料加入转动的造球机内，并加水造母球，然后连续加水加料，使母球在规定的时间内长大成球。经过 3 min 滚动紧密后，用小铲将生球铲出，将 12.5 ~ 15 mm 的生球作为成品生球。造球完成后，立即称取 500 g 生球置于电热干燥箱在(105 ±5) ℃下干燥，测量生球水分、强度及爆裂温度。

预热焙烧试验在卧式管炉中进行，它由两个管炉对接而成，采用镍铬丝电阻炉作预热用、硅碳管电阻炉作焙烧用。试验装置如图 2 所示。试验时将充分干燥后的生球装在刚玉方舟中进行预热和焙烧试验。预热试验方法：将电阻炉炉口到炉中央的距离平均分为五段，预热时将充分干燥的球团分 5 次慢慢推到炉体中央，每次停留 1 min，最后在预热区停留相应的预热时间，再依次退出，退出过程中每次停留时间也为 1 min。焙烧试验方法：采用预热试验步骤对球团进行预热，预热结束后将球团直接推入焙烧区，停留相应的焙烧时间，焙烧结束后将球团推回预热区保温 5 min，再依次按预热试验步骤将球团取出。



1—炉管；2—热电偶；3—开关及控制按钮；4—干燥段；5—预热段；6—焙烧段。

图 2　管式焙烧炉装置示意

Fig. 2　Device diagram of tube baking furnace

采用实验室自动抗压强度检测仪检测球团的抗压强度。对球团矿某层(内、中间、外)断面进行电子显微镜(SEM)成像，然后使用图像处理软件(ImageJ)分析孔隙面积占比，推算孔隙率。重复检测 10 次，去除最大值和最小值后计算平均值作为该球团的某层孔隙率。

2　结果与讨论

2.1　铁矿原料的成球行为

2.1.1　优化配矿

实际生产中造球精矿配比和资源量如表 4 所示。结合各铁精矿的物理化学性质、价格及实际配矿要求，设计膨润土配比为 2.5%。由 6 种铁精矿的化学成分(表 1)分析可以得出，自产的 4 种铁精矿(A、C、D 和 E 矿)的含硫量较高，尤其是 A 矿的含硫量在 1% 左右。从环保角度考虑，不应额外增加 A 矿用量，而以当前用量为基准，即设置 A 矿配比为 11.5%。根据 6 种铁精矿的单价，进口的 F 精矿的价格远高于其他 5 种精矿。从成本控制角度考虑，F 矿用量只减不增。

表 4　实际生产中造球精矿配比和资源量

Table 4　Ratios and resources of iron concentrate for pelletizingin actual production

原料名称	实际配比/%	计划用量/万吨	最大用量/万吨	最大配比/%
A 精矿	11.50	1.03	1.66	19.28
B 精矿	65.50	5.80	1.61	18.70
C 精矿			4.73	54.93
D 精矿				
E 精矿				
F 精矿	20.0	1.78	1.96	22.76

根据以上分析及配矿原则，制定 4 种配矿方案，如表 5 所示。其中，方案 1 为限定 A 矿用量为11.5%、F 矿用量为 20%，是基于实际原料成分计算得出的成本最优方案；方案 2 为限定 A 矿用量为 11.5%、F 矿用量为 20%，是基于机构检测的原料成分计算得出的成本最优方案；方案 3 为限定A矿用量为11.5%、其他5种精矿按照成

中国知网　https://www.cnki.net

表5 配矿方案、价格及混合料性能

Table 5 Ore blending scheme, prices and mixture properties

方案编号	混合料配比(质量分数)/%						价格/(元·t^{-1})	<74 μm粒级占比/%	成品球团矿理论化学成分(质量分数)/%	
	A	B	C	D	E	F			TFe	SiO_2
1	11.5	14.0	14.0	22.0	18.5	20.0	1 644.70	77.88	62.25	7.49
2	11.5	18.7	21.8	14.0	14.0	20.0	1 641.58	77.90	62.13	7.64
3	11.5	18.5	25.5	14.0	15.5	15.0	1 621.88	77.22	61.85	7.90
4	11.5	18.5	22.5	14.0	15.5	18.0	1 633.83	77.64	62.03	7.73

本最优原则得到的方案；方案4为限定A矿用量为11.5%，在方案3的基础上，增加3%的F矿用量，减少配比最高的C矿，以避免某种精矿用量过多。由表5可见：4种方案中，方案1的成本最高，但是成品球的SiO_2质量分数最低，仅为7.49%，对应的全铁品位也最高，达到62.25%；方案3的成本最低，但是成品球的SiO_2质量分数也最高，接近8.0%；4种方案混合矿原料的<74 μm粒级占比相差不大。

2.1.2 原料混合的时间及水分对生球强度的影响

以配矿方案1为基准，在混合料水分为6%~7%、膨润土配比为3.5%的条件下，研究不同混合时间和混合料水分对生球质量的影响。试验结果如表6所示。由表6可以得出，延长混合时间可有效提高生球落下强度，但也会导致爆裂温度下降。当混合时间为5 min时，生球落下强度为6次/(0.5 m)，满足生产要求；混合时间与爆裂温度呈负相关，随着混合时间的增加，爆裂温度逐渐降低，但是整体而言，爆裂温度最低值为495 ℃，基本均满足生产要求。混合时间对生球和干球抗压强度的影响没有表现出单一的规律性。整体来看，混合时间的增加会降低生球抗压强度、提高干球抗压强度。混合料水分对于生球质量的影响整体不大，对生球落下强度基本没有影响，对生球和干球抗压强度没有明显的规律性，爆裂温度随着水分的增加而小幅降低，就绝对值而言对生产的影响并不大。

表6 混合时间和混合料水分对生球质量的影响

Table 6 Effect of mixing time and moisture content on the quality of green pellets

混合料水分/%	混合时间/min	落下强度/次·(0.5 m)$^{-1}$]	生球抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃	干球抗压强度/(N·P^{-1})
6	5	6.0	16.9	535	104.8
6	10	6.6	15.7	530	140.0
6	20	7.2	16.9	510	162.3
6	30	8.2	11.9	505	136.4
6	60	10.1	14.0	495	143.9
5	5	6.3	14.8	540	140.7
7	5	6.2	15.3	523	132.3

2.1.3 膨润土用量对生球强度的影响

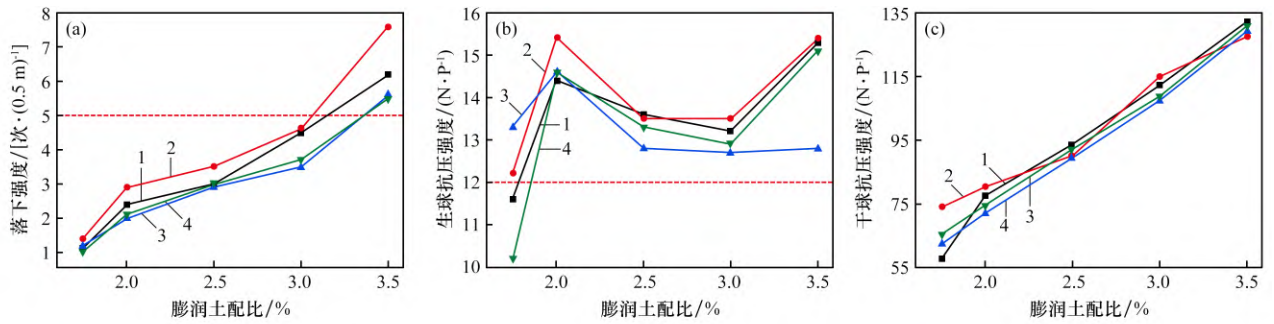
依据以上研究结果，固定铁精矿混合时间为5 min、混合料水分为7%，研究膨润土用量对生球质量的影响。试验结果如图3所示。由图3可以得出，降低膨润土的用量会导致生球落下强度降低，当膨润土配比低于3.5%时，生球的落下强度均低于5次/(0.5 m)，4种配矿方案生球的落下强度由大到小依次为方案2>方案1>方案3>方案4。当膨润土配比高于1.75%时，生球抗压强度都在12 N/P以上，膨润土的配比与生球抗压强度没有明显的关联性，但4种配矿方案的抗压强度变化趋势比较接近，生球抗压强度由大到小依次为方案2>方案1>方案4>方案3。另外，随着膨润土用量的降低，干球抗压强度逐渐降低，膨润土用量与干球抗压强度表现出良好的线性规律。

综上所述，膨润土配比需不低于3.5%，4种配矿方案的生球质量由好到差依次为方案2>方案1>方案4>方案3。

2.2 膨润土减量下有机黏结剂对生球强度的影响

以上研究结果可以得出，6种铁精矿混合矿的成球性能较差，制备落下强度合格的生球需要膨润土用量不低于3.5%，过高的膨润土用量会降低球团矿铁品位。因此，为了进一步提高球团矿质量，本文使用4种有机黏结剂代替部分膨润土进行造球试验，以降低膨润土的使用量。目前，市

中国知网 https://www.cnki.net



(a) 落下强度；(b) 生球抗压强度；(c) 干球抗压强度

1～4—方案 1～4。

图 3　膨润土用量对 4 种配矿方案生球质量的影响

Fig. 3　Effect of bentonite dosage on the quality of green pellets in four kinds of ore blending schemes

场上主流的有机黏结剂包括 BASF、PAM、ZM 和 CMC，其单价分别为 30 000、7 500、4 000、12 000元/t，而膨润土的单价为 600 元/t。不同黏结剂配比条件下生产每吨球团矿的黏结剂成本如表 7 所示。由表 7 可以看出，当膨润土配比为 3.5% 时，1 t 铁矿需要消耗 35 kg 膨润土，生产 1 t 氧化球团的黏结剂成本为 21 元/t；将膨润土的消耗量由 3.5% 降低至 2.5%，添加 4 种有机黏结剂以替代膨润土。按照 4 种有机黏结剂的成本计算，生产每吨球团矿所需的复合黏结剂成本与使用纯膨润土生产的成本相当。

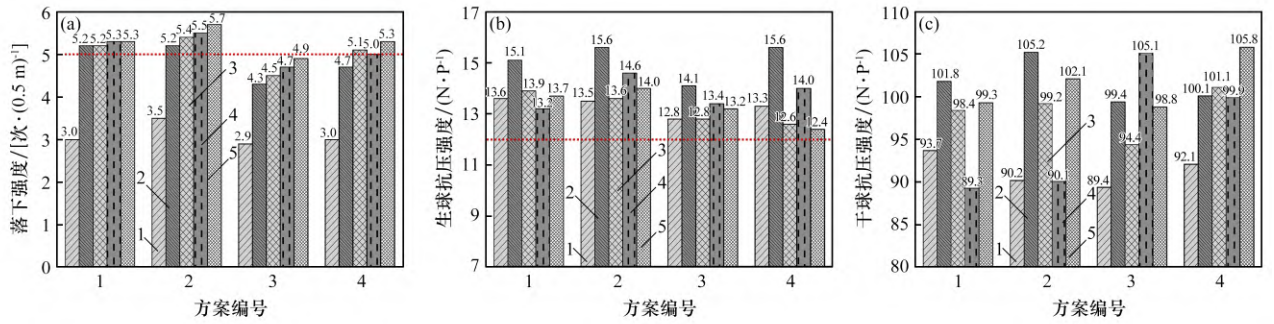
以配矿方案 1 为基准，使用以上 4 种黏结剂添加方案制备的生球质量如图 4 所示。由图 4 可以得出，当膨润土用量降低到 2.5% 时，添加 4 种有机黏结剂均可大幅提高生球的落下强度，且新方案的落下强度值相差不大，从大到小依次为 CMC > PAM ≈ ZM > BASF。此外，在各黏结剂方案下采用配矿方案3制备的生球落下强度均小于 5 次/(0.5 m)，故该方案不进行后续的试验研究。对于生球的抗压强度，4 种复合黏结剂方案的生球强度由大到小依次为 BASF > PAM > CMC ≈ ZM，其中 BASF 优势较大，其余 3 种黏结剂的效果相当。

表 7　球团黏结剂添加方案及成本

Table 7　Scheme and cost of adding binder for pelletizing

添加方案	配比(质量分数)/%					成本/(元·t⁻¹)
	膨润土	BASF	PAM	ZM	CMC	
膨润土	3.5	—	—	—	—	21.0
膨润土 + BASF	2.5	0.02	—	—	—	21.0
膨润土 + PAM	2.5	—	0.10	—	—	21.0
膨润土 + ZM	2.5	—	—	0.15	—	22.5
膨润土 + CMC	2.5	—	—	—	0.05	21.0

综上所述，使用复合黏结剂造球应优选配矿方案 1、2 和 4；此外，在膨润土用量降低 1%(从 3.5% 降低到 2.5%) 时，4 种有机黏结剂添加方案制备的生球质量基本均能满足生产要求。



(a) 落下强度；(b) 生球抗压强度；(c) 干球抗压强度

1—2.5% 膨润土；2—0.02% BASF；3—0.15% ZM；4—0.1% PAM；5—0.05% CMC。

图 4　复合黏结剂对 4 种配矿方案生球质量的影响

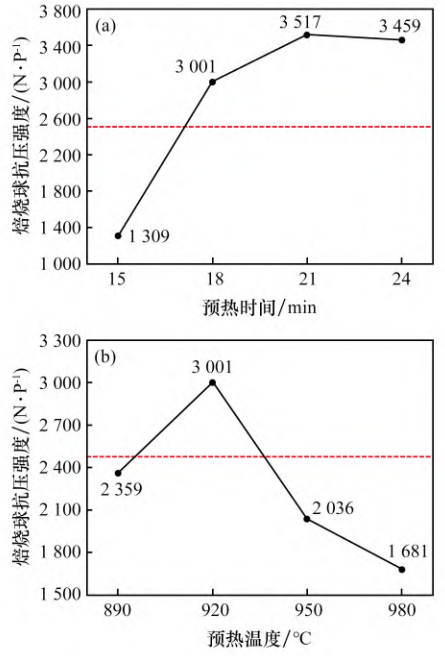
Fig. 4　Effect of composite binder type on the quality of green pellets in four kinds of ore blending schemes

中国知网　https://www.cnki.net

2.3 球团预热焙烧行为

2.3.1 预热制度对焙烧球强度的影响

以配矿方案 1 为研究对象，在膨润土配比为 3.5%、焙烧时间为 20 min、焙烧温度为 1 250 ℃条件下，研究预热时间(固定预热温度为 920 ℃)和温度(固定预热时间为 18 min)对焙烧球强度的影响(预热球强度基本满足现场生产要求)。试验结果如图 5 所示。由图 5(a)可以得出，适当延长预热时间可以有效提高焙烧球强度。当预热时间由 15 min 延长到 18 min 时，焙烧球强度由 1 309 N/P提高到 3 001 N/P。显然，在预热时间为 15 min 的条件下，球团氧化不彻底，导致球团强度较低。因此，适当地延长预热时间可提高球团强度。而预热时间为 18 min 制备的球团强度已满足生产要求，没有必要继续延长预热时间。



(a) 预热时间; (b) 预热温度

图 5 预热制度对焙烧球抗压强度的影响

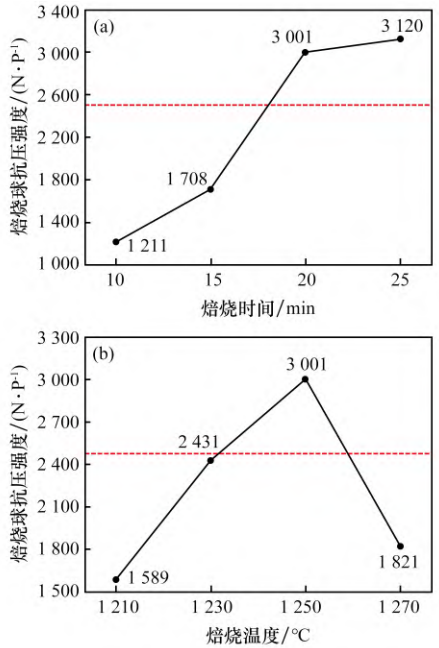
Fig. 5 Effect of preheating system on compressive strength of roasted pellets

由图 5(b)可以得出，适当提高预热温度可有效提高焙烧球强度，但过高的预热温度又会降低焙烧球强度。当预热温度由 890 ℃提高到 920 ℃时，焙烧球强度由 2 359 N/P 提高到 3 001 N/P，继续提高预热温度，焙烧球强度大幅降低。这是因为适当提高预热温度可有助于球团的氧化固结，但过高的预热温度会使球团表层迅速氧化并开始再结晶，在球团表层形成一层致密的氧化层，不利于球团的进一步氧化而导致球团强度下降[15]。同时，较高的 SiO_2 含量也可能在较高的预热温度下在表层形成少量液相，阻碍 O_2 向球团矿内部扩散而导致其强度下降[16]。

综上，本文制备氧化球团最适宜的预热时间和温度分别为 18 min 和 920 ℃。

2.3.2 焙烧制度对焙烧球强度的影响

以配矿方案 1 为研究对象，在膨润土配比为 3.5%、预热温度为 920 ℃、预热时间为 18 min 条件下(预热球强度满足现场生产要求)，研究焙烧时间(固定焙烧温度为 1 250 ℃)和温度(固定焙烧时间为 20 min)对焙烧球强度的影响，试验结果如图 6 所示。由图 6(a)可以得出，延长焙烧时间可有效提高焙烧球强度。当焙烧时间由 10 min 延长到 20 min 时，焙烧球强度由 1 211 N/P 提高到 3 001 N/P，继续延长焙烧时间，焙烧球强度继续提高，但焙烧时间为 20 min 制备的球团强度已满足生产要求。



(a) 焙烧时间; (b) 焙烧温度

图 6 焙烧制度对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of roasting system on compressive strength of roasted pellets

由图 6(b)可以得出，适当提高焙烧温度可有效提高焙烧球强度，但过高的焙烧温度又会降低焙烧球强度。当焙烧温度由 1 210 ℃提高到 1 250 ℃

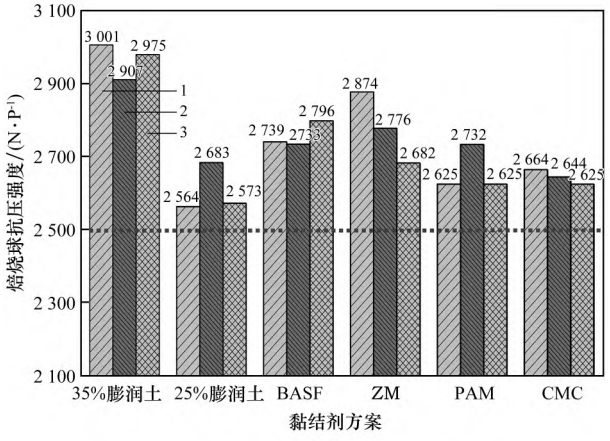
中国知网 https://www.cnki.net

时，焙烧球强度由 1 589 N/P 提高到 3 001 N/P，继续提高焙烧温度，焙烧球强度大幅降低。这是因为配矿方案 1 中 SiO_2 质量分数较高，达到 7.5% 左右，较高的 SiO_2 含量会在球团内形成较多的液相，适宜的液相可以在球团中起到黏结作用，有利于球团强度的提高，但过多的液相在冷却时因收缩导致球团内孔隙度增大，进而降低球团矿的强度[17]。

综上，本文制备氧化球团最适宜的焙烧时间和温度分别为 20 min 和 1 250 ℃。

2.3.3　配矿方案及复合黏结剂对球团强度的影响

上述研究确定了球团生产适宜的预热和焙烧制度，即预热时间为 18 min、预热温度为 920 ℃、焙烧时间为 20 min、焙烧温度为 1 250 ℃。在此基础上，本文进行配矿方案和复合黏结剂种类对球团强度的影响研究。试验结果如图 7 所示。由图 7 可以得出，当膨润土配比 3.5% 时，三种配矿方案球团的抗压强度都在 2 900 ~ 3 000 N/P，相差不大；当膨润土由 3.5% 下降至 2.5% 时，球团的抗压强度下降 8% ~ 14%，尽管各方案制备的球团强度仍高于 2 500 N/P，但膨润土配比为 2.5% 制备的生球落下强度不能满足生产要求(如图 5 所示)，因此需要添加适量的有机黏结剂提高生球落下强度。



配矿方案：1—1；2—2；3—3。

图 7　复合黏结剂种类对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 7　Effect of composite binder type on compressive strength of roasted pellets

配矿方案 2 制备球团的基准强度(膨润土配比为 2.5%)较高，4 种有机黏结剂对配矿方案 2 球团抗压强度的提升幅度最小，对配矿方案 1 球团抗压强度的提升幅度最大。4 种黏结剂中，BASF 和 ZM 黏结剂对球团抗压强度的提升幅度要大于 PAM 和 CMC 黏结剂。就绝对值而言，4 种黏结剂球团的抗压强度都在 2 500 N/P 以上，主要分布在 2 600 ~ 2 800 N/P，与添加 3.5% 膨润土球团的抗压强度相比，复合黏结剂球团的抗压强度降低了约 127 ~ 376 N/P，下降幅度为 4.23% ~ 11.76%。

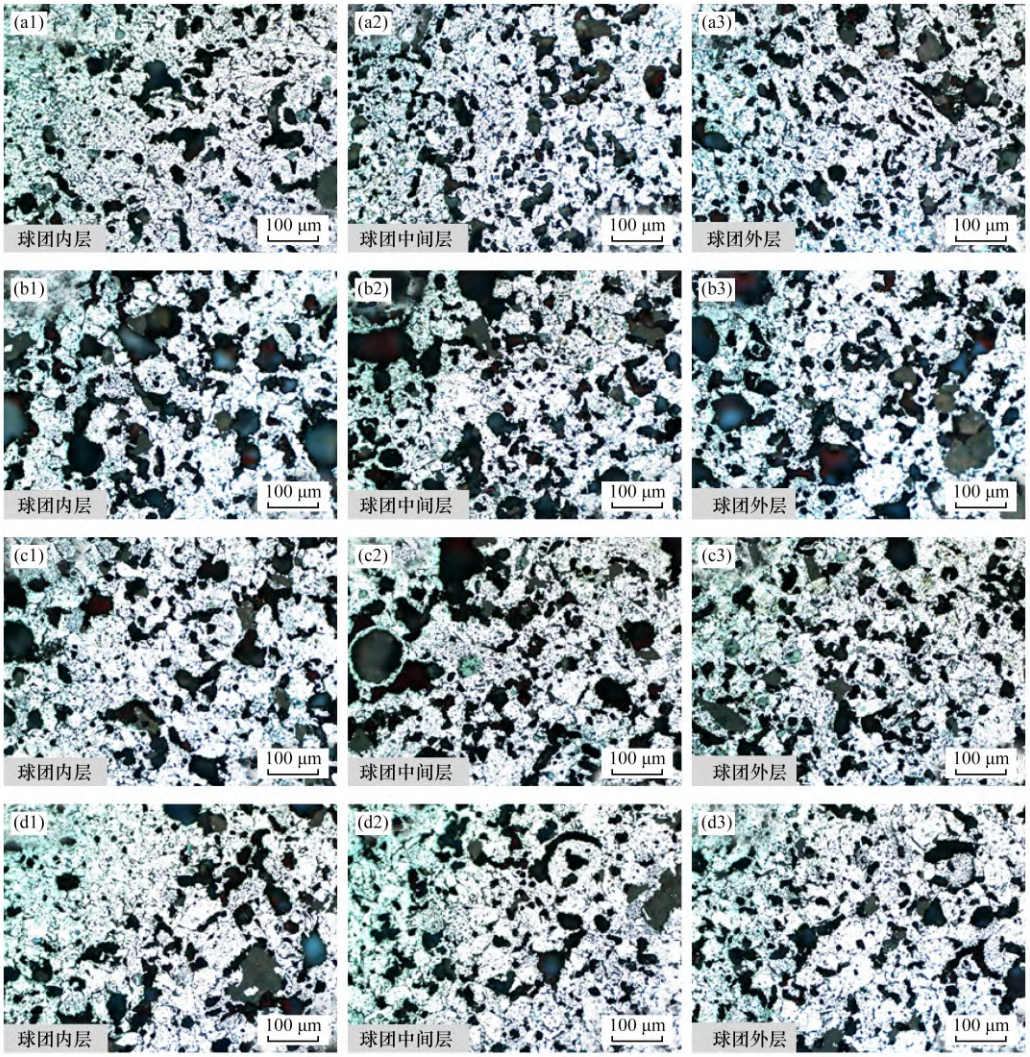
3　球团矿微观结构及化学成分

上述研究发现焙烧制度、黏结剂用量及种类会影响球团强度，因此，本文利用蔡司显微镜对球团矿的主要物相和微观结构进行观察和分析，结果如图 8 所示。由图 8 可以得出，球团矿的物相以赤铁矿(亮白色)连晶为主，少量未氧化的磁铁矿(棕色)分散于赤铁矿中，其余物相主要是灰色的渣相和橄榄石相[18]。根据显微结构图可以计算各球团内部的平均孔隙率，结果如表 8 所示。

由表 8 可以得出，焙烧温度过高(超过 1 250 ℃)会提高球团内部孔隙率，这是因为球团矿表层的 Fe_2O_3 氧化完全并发生高温再结晶，形成一层致密的连晶层，因此球团外层孔隙率较低，而这不利于球团矿内层的进一步氧化[19-20]；同时，由于球团 SiO_2 含量较高，球团矿内层未氧化完全的 FeO 与 SiO_2 等生成大量液相，液相在降温过程中收缩，进而在球团内层形成大量的孔洞，导致球团矿强度的降低。降低膨润土的用量也会提高球团内部孔隙率，当膨润土配比由 3.5% 降低到 2.5% 时，球团孔隙率从 11.65% 提高到 15.62%，而在此基础上添加适量的有机黏结剂会降低球团内部孔隙率，当添加 0.02% BASF 时，球团内部孔隙率小幅降低到 14.43%，这与前述各制备条件下球团强度的变化趋势相吻合。

在添加 2.5% 膨润土 + 0.02% BASF 的条件下，3 种配矿方案(方案 1、2 和 4)制备的球团矿的化学成分如表 9 所示。由表 9 可以得出，3 种配矿方案下球团矿的品位都在 62% 以上，其中方案 2 球团的铁品位略高；方案 1 球团 SiO_2 质量分数最低，方案 4 球团 SiO_2 质量分数超过了 8%。结合各方案球团矿化学成分及成本，配矿方案 1、2 较为适宜。

中国知网　https://www.cnki.net



(a1)～(a3) 3.5%膨润土、1 250 ℃焙烧温度;(b1)～(b3) 3.5%膨润土、1 270 ℃焙烧温度;(c1)～(c3) 2.5%膨润土、1 250 ℃焙烧温度;(d1)～(d3) 2.5%膨润土+0.02% BASF、1 250 ℃焙烧温度

图 8 不同条件下制备的球团矿相结构

Fig. 8 Mineral phase structure diagrams of pellets prepared at different conditions

(注: 预热温度为 920℃,预热时间为 18 min,焙烧时间为 20 min)

表 8 不同条件下制备的球团孔隙率

Table 8 Pellet porosity prepared at different conditions

黏结剂组合	焙烧温度/℃	不同球团位置孔隙率/%			平均孔隙率/%
		内层	中间层	外层	
3.5%膨润土	1 250	11.24	11.97	11.74	11.65
3.5%膨润土	1 270	18.10	17.58	16.17	18.61
2.5%膨润土	1 250	15.24	16.36	15.27	15.62
2.5%膨润土+0.02% BASF	1 250	15.82	13.43	14.04	14.43

表 9 球团矿的主要化学成分(质量分数)

Table 9 Main chemical composition of pellets %

方案编号	TFe	FeO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O
1	62.12	1.24	7.55	0.854	1.48	0.689	0.186	0.123
2	62.36	1.19	7.83	0.882	1.38	0.683	0.197	0.112
4	62.25	1.01	8.01	0.785	1.56	0.722	0.170	0.135

4 结 论

(1) 现场无原料预处理工艺下,混合矿的成球性较差,膨润土配比需不低于 3.5%。过高的膨

中国知网 https://www.cnki.net

润土用量会降低球团矿的铁品位。使用有机黏结剂替代部分膨润土可在保证生球落下强度的同时，提高球团矿的铁品位。当膨润土用量从 3.5% 降低到 2.5% 时，4 种有机黏结剂添加方案制备的生球质量均能基本满足生产要求。

(2) 以配矿方案 1 为基准，在膨润土配比为 3.5%，预热时间和温度分别为 18 min 和 920 ℃，焙烧时间和温度分别为 20 min 和 1 250 ℃的条件下，球团矿抗压强度达 3 001 N/P。在黏结剂成本基本保持不变的情况下，添加有机黏结剂替代 1% 膨润土(配比从 3.5% 降低到 2.5%) 制备的球团矿强度依然满足生产要求。

(3) 降低膨润土的用量会提高球团内部孔隙率，当膨润土配比由 3.5% 降低到 2.5% 时，球团孔隙率从 11.65% 提高到 15.62%，而在此基础上添加适量的有机黏结剂会降低球团内部孔隙率。添加 0.02% BASF 时，球团内部孔隙率小幅降低到 14.43%，球团强度得到改善。

参考文献:

[1] 王新东，上官方钦，邢奕，等. “双碳”目标下钢铁企业低碳发展的技术路径 [J]. 工程科学学报，2023，45(5)：853－862.
WANG Xindong，SHANGGUAN Fangqin，XING Yi，et al. Research on the low-carbon development technology route of iron and steel enterprises under the “double carbon” target [J]. Chinese Journal of Engineering，2023，45(5)：853－862.

[2] WANG L，YANG Y B，OU Y，et al. Synergistic conversion of iron ore sintering dust and waste biochar to produce direct reduction iron and syngas: Gasification，reduction behavior and thermodynamic analysis [J]. Journal of Cleaner Production，2024，434: 139996.

[3] WANG L，YANG Y B，OU Y，et al. In-depth study on the synergistic conversion mechanism of iron ore with waste biochar for co-producing directly reduced iron (DRI) and syngas [J]. Energy，2024，290: 130250.

[4] QIANG L，WANG J S，SHE X F，et al. Principles and support technologies of low-carbon ironmaking for blast furnace [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2025，211: 115363.

[5] 叶匡吾. 高炉炉料结构与精料 [J]. 烧结球团，2001，26(3)：6－7.
YE Kuangwu. BF burden composition and burden materials preparation [J]. Sintering and Pelletizing，2001，26(3)：6－7.

[6] 李磊，豆远波，王宇，等. 大比例球团矿在包钢 2 200 m^3 高炉的生产实践 [J]. 包钢科技，2022，48(4)：13－17.
LI Lei，DOU Yuanbo，WANG Yu，et al. Production practices on large proportion of pellet in 2 200 m^3 blast furnace of Baotou steel [J]. Science & Technology of Baotou Steel，2022，48(4)：13－17.

[7] 韩凤光，杨涛，赵贺喜，等. 复合黏结剂对球团高温固结的影响及机理 [J]. 工程科学学报，2023，45(9)：1450－1458.
HAN Fengguang，YANG Tao，ZHAO Hexi，et al. Effects and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets [J]. Chinese Journal of Engineering，2023，45(9)：1450－1458.

[8] 李骞，马永和，唐银华，等. 铁矿球团用有机黏结剂研究进展 [J]. 钢铁，2022，57(11)：11－21.
LI Qian，MA Yonghe，TANG Yinhua，et al. Research progress of organic binder for iron ore pellets [J]. Iron and Steel，2022，57(11)：11－21.

[9] 杨永斌，段倩倩，李骞，等. 铁矿球团膨润土黏结剂提质改性研究进展 [J]. 钢铁研究学报，2022，34(2)：101－110.
YANG Yongbin，DUAN Qianqian，LI Qian，et al. Research progress on upgrading modification of iron ore pellet bentonite binder [J]. Journal of Iron and Steel Research，2022，34(2)：101－110.

[10] MA Y H，LI Q，CHEN X L，et al. Reducing bentonite usage in iron ore pelletization through a novel polymer-type binder: Impact on pellet induration and metallurgical properties [J]. Journal of Materials Research and Technology，2024，30: 8019－8029.

[11] MA Y H，LI Q，ZHANG Y，et al. A novel polymer-type binder to decrease bentonite dosage during iron ore pelletizing: Performance and mechanisms [J]. Journal of Materials Research and Technology，2023，27: 6900－6911.

[12] QIU G Z，JIANG T，LI H X，et al. Functions and molecular structure of organic binders for iron ore pelletization [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects，2003，224(1/2/3)：11－22.

中国知网　https://www.cnki.net

[13] 范晓慧,王祎,甘敏,等. 提高有机黏结剂氧化球团矿强度的措施[J]. 钢铁研究学报,2008,20(5):5-8;19.
FAN Xiaohui, WANG Yi, GAN Min, et al. Strength enhancement of oxide pellet with organic binder[J]. Journal of Iron and Steel Research,2008,20(5):5-8;19.

[14] 杨永斌,黄桂香,姜涛,等. 有机黏结剂替代膨润土制备氧化球团[J]. 中南大学学报(自然科学版),2007,38(5):850-856.
YANG Yongbin, HUANG Guixiang, JIANG Tao, et al. Preparation of oxidized pellets with organic binder instead of bentonite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2007,38(5):850-856.

[15] CHEN W B, DONG Z Q, JIAO Y, et al. Preparation, sintering behavior and consolidation mechanism of vanadium-titanium magnetite pellets[J]. Crystals,2021,11(2):188.

[16] 路明,于洪军,王兴锋,等. SiO_2含量对铁矿球团性能影响的研究进展[J]. 鞍钢技术,2022(4):7-12.
LU Ming, YU Hongjun, WANG Xingfeng, et al. Research progress on effect of content of SiO_2 on properties of iron ore pellets[J]. Angang Technology,2022(4):7-12.

[17] 邱勇虎,罗果萍,任杰,等. 含铁黏结剂对磁铁矿球团氧化动力学的影响[J]. 中国冶金,2024,34(4):39-48.
QIU Yonghu, LUO Guoping, REN Jie, et al. Effect of iron-containing binder on oxidation kinetics of magnetite pellets[J]. China Metallurgy,2024,34(4):39-48.

[18] 王兴锋,路明,于洪军,等. 大孤山磁铁精粉微观结构与氧化焙烧性能[J]. 烧结球团,2021,46(6):75-81;88.
WANG Xingfeng, LU Ming, YU Hongjun, et al. Microstructure and oxidation roasting properties of Dagushan magnetite flavor powder[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):75-81;88.

[19] LÜ H, GAN M, WEN X P, et al. Promoting low-temperature consolidation of vanadium titano-magnetite pellets by high-pressure grinding roll: Mechanism of mechanical activation[J]. Journal of Materials Research and Technology,2024,30:2435-2445.

[20] TIAN H Y, CHU M S, PAN J, et al. Effect of manganese ore and basicity on the consolidation characteristic of nickel-chromium iron ore pellets[J]. Powder Technology,2024,435:119362.

(上接第15页)

[17] 刘文超,蔡九菊,董辉,等. 烧结过程余热资源高效回收与利用的热力学分析[J]. 中国冶金,2013,23(2):15-20.
LIU Wenchao, CAI Jiuju, DONG Hui, et al. Thermodynamic analysis on the effective recovery and utilization of sinter waste heat[J]. China Metallurgy,2013,23(2):15-20.

[18] 陈富松,袁亚强,康宏毅,等. 当前形势下烟气循环烧结工艺发展现状及展望[J]. 中国冶金,2024,34(2):21-34.
CHEN Fusong, YUAN Yaqiang, KANG Hongyi, et al. Development status and prospect of flue gas recirculation sintering process under current situation[J]. China Metallurgy,2024,34(2):21-34.

[19] CAPUTO A C, PELAGAGGE P M. Heat recovery from moving cooling beds: Transient modeling by dynamic simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 1999, 19(1):21-35.

[20] ZHANG X H, CHEN Z, ZHANG J Y, et al. Simulation and optimization of waste heat recovery in sinter cooling process[J]. Applied Thermal Engineering,2013,54(1):7-15.

[21] 贺道山,朱旺,安乃鲜,等. 环冷机高效密封和冷却技术[J]. 河北冶金,2024(4):40-44.
HE Daoshan, ZHU Wang, AN Naixian, et al. Efficient sealing and cooling technology for annular cooler[J]. Hebei Metallurgy,2024(4):40-44.

[22] 耿新健. 新型高效烧结环冷机密封创新技术[J]. 冶金与材料,2025,17(3):91-93.
GENG Xinjian. Innovative sealing technology of new high-efficiency sintering ring cooler[J]. Metallurgical and Materials,2025,17(3):91-93.

中国知网 https://www.cnki.net