冶金固废协同优化提钒铁精粉球团性能研究

何晓文[1]，丁开振[1]，张广洪[2]，江雪婷[2]，夏云进[2]，邓爱军[2]
（1. 安徽马钢罗河矿业有限责任公司，安徽 合肥 231562；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032）

摘要：鉴于钢渣、高炉渣等冶金固废与膨润土在化学组成上具有相似性，本研究采用优化配矿策略，系统探究了不同冶金固废对提钒铁精粉球团性能的协同优化作用，旨在解决该球团成球性差、生球质量劣化及熟球强度不足等关键问题。结果表明：配加冶金固废后球团成球指数普遍较低，仅钢渣配比在 15%~20% 时达中等水平，由此确定最优配矿方案为 20% 钢渣或 25% 高炉渣。微观分析表明，熟球强度由铁酸钙、铁酸镁等铁氧体及硅铝酸盐的固相扩散连接桥主导，辅以低熔点化合物的液相黏结。配加固废后，生球抗压强度提升约 59%，熟球抗压强度较原矿分别提高 28.4%（钢渣）和 15.6%（高炉渣）。该类小球团可作为烧结混合料配料，有效改善料层透气性，提升烧结矿产质量。

关键词：钢渣；高炉渣；冶金固废；铁精粉；成球指数；抗压强度
中图分类号：TF046.6；X705 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0067－07
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.048

Research on performance of vanadium iron concentrate pellets for synergistic optimization from metallurgical solid waste

HE Xiaowen[1], DING Kaizhen[1], ZHANG Guanghong[2], JIANG Xueting[2], XIA Yunjin[2], DENG Aijun[2]
(1. Anhui Masteel Luohe Mining Co., Ltd., Hefei 231562, Anhui, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China)

Abstract: In view of the similarity of chemical composition between steel slag, blast furnace slag and bentonite. In this study, the synergistic optimization effect of different metallurgical solid wastes on the performance of vanadium iron concentrate pellets is systematically explored by using the optimization blending strategy, aiming to solve the key problems such as poor pelletization, deterioration of fresh pellets quality and insufficient strength of fresh pellets in vanadium tailings. The results indicate that the pelletizing index is generally low when metallurgical solid waste is added, with only a steel slag ratio of 15% to 20% achieving a moderate level. Therefore, the optimal ore blending scheme is determined to be 20% steel slag or 25% blast furnace slag. Microscopic analysis shows that the strength of fresh pellets is dominated by the solid-phase diffusion connection bridge of ferrites such as calcium ferrite and calcium ferrite and magnesium ferrite, supplemented by the liquid phase bonding of compounds with low melting point. After the combination of solid waste, the compressive strength of fresh pellets is increased by about 59%, and the compressive strength of fresh pellets is increased by 28.4% (steel slag) and 15.6% (blast furnace slag) compared with the raw ore, respectively. This type of small pellets can be used as sintered mixture ingredients, effectively improving the air permeability of the material layer and improving the quality of sintered minerals.

Key words: steel slag; blast furnace slag; metallurgical solid waste; iron concentrate powder; pelletizing index; compressive strength

收稿日期：2025－07－10；**修回日期**：2025－12－23
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52074001)
作者简介：何晓文(1968—)，男，本科，高级工程师；从事铁矿资源开采方面的研究。
通信作者：邓爱军(1982—)，男，博士，副教授；从事钢铁冶金方面的研究。

钢铁是促进国民经济建设和发展的支柱产业，其对高炉炉料的要求在钢铁行业快速发展的今天也越来越高。长期的生产实践表明，球团矿不仅要求铁品位高、有害元素少，且球团工艺与烧结工艺相比有着低污染物和低碳排放、低能耗等优点[1-3]。无论是用于生产高炉炉料还是直接还原炉料，其都能够生产出高质量、高强度和冶金性能优好的产品，因此球团矿常常被认为是一种理想的高炉精料[4]。

由于单一铁精粉直接用于球团生产常常会带来生球质量差、爆裂温度低、焙烧球团强度不达标等问题，因此实际生产中需要通过优化配矿的方法来提高球团的质量。FANG 等[9]基于铁矿自身特性的球团配矿优化原则，设计了配矿优化方案，并对方案进行了一系列试验。结果表明，通过优化配矿可使球团质量提高。SHENG 等[5]从生物质固废及优化配矿的角度对球团性能进行了研究，结果表明，随着生物质含量的增加，生物质颗粒的孔隙度也随之增大，而废木屑颗粒的最大抗压强度达到了 3 057.9 N/P，同时还原性从 75.2% 提高到 82.2%。在生物质添加量为 7% 时，颗粒的还原膨胀指数约为 10%，且废木屑颗粒的低温崩解指数表现出稳定趋势，达到了 94%，通过加入生物质的优化配矿方法，球团性能比原矿球团更佳。

随着相关研究的开展，越来越多的学者开始探索有机黏结剂对球团性能的影响，结果发现有机黏结剂主要通过 3 种机制来提高生球性能[6-7]：黏合剂扩散至矿物颗粒表面，并通过基或羧基官能团与矿物颗粒表面形成结构桥接；黏结剂本身化学键会将矿物包裹形成黏结团；黏结剂与矿物发生团聚并在内部形成稳定但强度较低的结构。通过这些研究发现添加膨润土、黏结剂、辅助矿等对铁精粉球团制备具有一定的益处[8-10]。

经过提钒后的铁精粉全铁质量分数较高（> 94%），具有极高的利用价值，因此本研究以提钒铁精粉为原料，将其制备成高质量球团，用来作为高炉冶炼原料。但由于提钒铁精粉成分中大量 Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+}，且 Al_2O_3 和 SiO_2 含量大量减少，导致其所造球团的有效黏结物质含量大幅降低，其黏结、吸附性能变弱，所制备球团质量难以满足工业生产需求[11-12]。鉴于钢渣、高炉渣等冶金固废富含 SiO_2、Al_2O_3、CaO 及 MgO 等氧化物，其化学组成与膨润土具有一定相似性。本研究立足于冶金固废的资源化利用与配矿结构优化，系统探究了添加此类固废对提钒铁精粉球团性能的影响规律。研究旨在拓宽冶金固废的综合利用途径，并为协同制备高质量提钒铁精粉球团提供新的技术支撑。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

试验以国内某矿山公司含钒铁精粉经提钒后的精粉为原料，其主要化学成分如表 1 所示。试验研究所采用的冶金固废为高炉渣和钢渣，其主要化学成分如表 2 所示。由激光粒度仪测得的高炉渣、钢渣和提钒铁精粉粒度组成如表 3 所示。此外，在试验过程中加入少量有机黏结剂（羧甲基纤维素钠）[13]，其具有大量的强吸附性基团，并且在水中有良好的分散性，同时与铁精粉之间具有较高的亲和力，焙烧时能加强球团的强度。

表 1 提钒铁精粉主要化学成分（质量分数）

Table 1 Main chemical composition of vanadium-extracted iron concentrate %

TFe	TiO_2	S	MgO	Al_2O_3
67.07	0.652	0.231	0.605	0.584
MnO	SiO_2	CaO	V_2O_5	
0.337	0.285	0.243	0.008	

表 2 高炉渣和钢渣主要化学成分（质量分数）

Table 2 Main chemical composition of blast furnace slag and steel slag %

主要成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3
高炉渣	26.98	10.05	19.64	3.55	16.17
钢渣	15.12	1.61	48.08	6.32	21.77

表 3 球团制备原料粒度分布（质量分数）

Table 3 Particle size distribution of raw materials for pelletizing %

原料	<74 μm	<48 μm	<38 μm
提钒铁精粉	91.2	25.7	16.5
钢渣	97.4	54.1	24.9
高炉渣	86.9	11.5	5.0

1.2　试验设备与方法

混合料采用人工配料，每次称取一定质量的提钒铁精粉，配加不同比例的钢渣、高炉渣和 0.5% 羧甲基纤维素钠，采用机械搅拌混匀，试验具体配加方案如表 4 所示。

表 4　试验配比方案

Table 4　Experimental ratio scheme

方案编号	试样配比
1－1	90% 提钒铁精粉 +10% 钢渣
1－2	85% 提钒铁精粉 +15% 钢渣
1－3	80% 提钒铁精粉 +20% 钢渣
1－4	75% 提钒铁精粉 +25% 钢渣
1－5	70% 提钒铁精粉 +30% 钢渣
2－1	90% 提钒铁精粉 +10% 高炉渣
2－2	85% 提钒铁精粉 +15% 高炉渣
2－3	80% 提钒铁精粉 +20% 高炉渣
2－4	75% 提钒铁精粉 +25% 高炉渣
2－5	70% 提钒铁精粉 +30% 高炉渣

试验所用设备为圆盘造球机，球团形成分三阶段：母球形成、长大及生球紧密结合[15－16]。添加矿粉至球团长大成型为直径 12～13 mm 的生球，停止添加矿粉，球团制备机工作 3～5 min 至球团表面无明显物质粉末颗粒，球团紧实。后取出球团进行落下次数、抗压强度、爆裂温度、预热、焙烧等相关性能测试。生球的预热和焙烧由∅55 mm×600 mm 的预热炉和∅55 mm×600 mm 的焙烧炉两台相同的卧式胆管炉联合组成。每次将干燥后的生球装入 60 mm×30 mm×15 mm 的瓷舟中，按设定的温度、时间条件，将瓷舟推入到各工序段。生球的预热温度为 850 ℃，预热时间为 10 min，焙烧温度为 1 200 ℃，焙烧时间为9 min，在此条件下检测预热球和成品球团矿的抗压强度。

成球性指数(K)是一个综合参数，它能够反映物料的粒度、粒度组成、比表面积以及亲水性能等多方面特性。其具体计算公式如式(1)[17－18]。

$$K = \frac{W_{分}}{W_{毛} - W_{分}} \tag{1}$$

式中：$W_{分}$ 为最大分子水，%；$W_{毛}$ 为最大毛细水，%。成球性能等级见表 5 所示。

表 5　物理成球性等级

Table 5　Balling grade table of minerals

$K<0.20$	$K=0.20\sim0.35$	$K=0.35\sim0.60$	$K=0.60\sim0.80$	$K>0.80$
无成球性	弱成球性	中等成球性	良好成球性	优等成球性

2　试验结果与讨论

2.1　成球性指数与生球性能

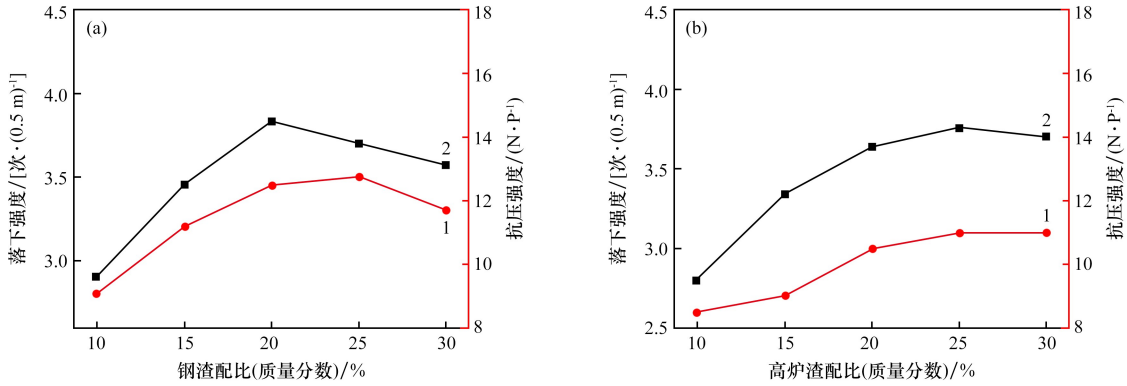
各配矿方案下生球的相关参数及性能由表 6 所示。由表 6 可知，随着钢渣配比的增加，矿粉粒度变细，比表面积增大、气孔率减小，毛细引力变大，K 也在不断提高。在钢渣配比为 20%、25% 时，K 达到 0.35，成球性能中等，但随着钢渣配比增加、矿粉粒度不断变细，孔容也不断变小，内部孔隙结构开始变得不发达，水在颗粒间的迁移速度下降，吸附能力变弱，因此当钢渣配比为 30% 时成球性能反而变弱。高炉渣粒度比钢渣和铁精粉要大且不具有适宜的粒度组成，根据表 3 计算可得 75.4% 的高炉渣粒度在 48～74 μm 之间，这将导致颗粒排列不紧密，毛细管平均直径缩小，颗粒之间的结合力增大，十分不利于大小矿物颗粒间的嵌合，所以尽管高炉渣配比从 10% 增加至 30%，但其成球性能仍然较弱。

表 6　各配矿方案下提钒铁精粉成球性指数

Table 6　Pelletizability index of vanadium-bearing iron concentrates under various ore blending schemes

方案编号	最大分子水/%	最大毛细水/%	K	成球性能
1－1	4.36	19.41	0.29	弱
1－2	4.87	19.49	0.33	弱
1－3	5.21	20.03	0.35	中等
1－4	5.33	20.65	0.36	中等
1－5	5.12	20.13	0.34	弱
2－1	4.45	18.36	0.32	弱
2－2	4.56	17.47	0.34	弱
2－3	4.31	18.22	0.31	弱
2－4	4.32	17.84	0.32	弱
2－5	4.21	17.80	0.31	弱

按照方案优化配矿后添加 0.5% 的羧甲基纤维素钠做黏结剂，并根据实际情况控制生球水分，待矿粉成球后取出进行相关性能检测，生球落下次数和抗压强度检测结果如图1所示。从图1中



（a）钢渣；（b）高炉渣

1—落下强度；2—抗压强度。

图 1 不同配矿方案下生球落下强度和抗压强度的结果

Fig. 1 Results of drop strength and compressive strength of green pellets under different binderproportioning schemes

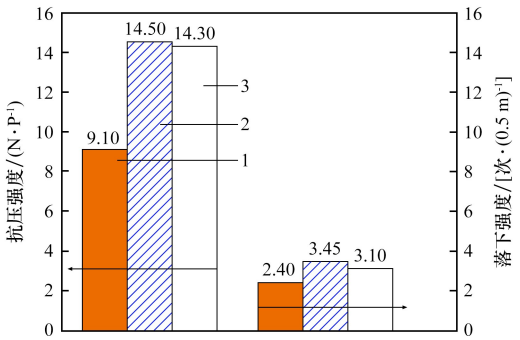
可看出，随着钢渣、高炉渣配比从 10% 增加到 30%，提钒铁精粉球团落下次数和抗压强度相较于基准(未添加钢渣和高炉渣)配比提钒铁精粉球团性能(表 7)均有一定程度上的提升。主要原因是因为无论是钢渣还是高炉渣中均含有大量的醇羟基和氧化钙(CaO)。羧甲基纤维素钠易于分散在水中形成透明的胶体溶液，其中的羧基官能团与醇羟基和氧化硅等基团产生氢键或共价键作用力，能增强矿物颗粒与集流体之间的黏结，还可以在矿物表面形成一层黏膜，对球团生球性能的提升有强化作用。在球团成形前，部分 CaO 与水反应生成 $Ca(OH)_2$，而 $Ca(OH)_2$ 的增加会提高球团内部连接桥平均黏结力，进而使生球落下强度和抗压强度有所提高。由表 2、3 可知，钢渣不仅粒径比高炉渣要小，且 CaO 含量更是达到 46.08%，因此在钢渣配比为 10%～20% 时，生球落下强度和抗压强度改善效果更佳，但随着 CaO 含量的增加，CaO 不断吸收水分并黏结矿粉形成独立小颗粒，小颗粒吸附在母球上，这将导致生球球形差且致密性下降。因此，当钢渣配比 >20% 后生球落下强度和抗压强度性能变差。

表 7 提钒铁精粉球团性能

Table 7 Properties of iron pellets after vanadium addition

成球性能	生球抗压强度/(N·P^{-1})	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	爆裂温度/℃	熟球抗压强度/(N·P^{-1})
弱	9.1	2.4	210	631

最佳配比方案下的球团性能如图 2 所示。由图 2 可以看出，当钢渣配比为 20% 时，较基准球团落下强度和生球抗压强度均有所增加，分别增加了 1.05 次/(0.5 m)、5.4 N/P；当高炉渣配比为 25% 时生球抗压强度最佳，比基准提钒铁精粉生球抗压强度增加了 5.2 N/P。



1—提钒磁铁矿生球性能(基准)；2—20% 钢渣配比球团；3—25% 高炉渣配比球团。

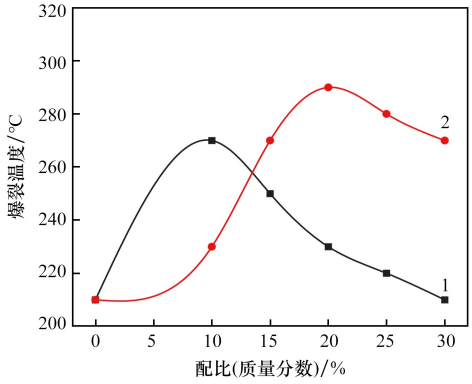
图 2 最佳配比方案下球团抗压和落下强度

Fig. 2 Comparison of compressive and drop strengths of pellets under the optimal proportioning scheme

不同配矿方案对生球爆裂温度的影响如图 3 所示。从图 3 中可以看出，添加钢渣和高炉渣均使生球爆裂温度呈先升后降趋势。机理分析显示，爆裂温度受水分蒸发、水合物分解及透气性共同控制。适量钢渣(10%)可促进 $Ca(OH)_2$ 生成，提升液相黏度(η)，导致球团内部压降(ΔP)增大，爆裂温度较基准组提高近 60 ℃。但过量钢渣会降低孔隙率，阻碍水汽排出，致使温度回落。相比之下，高炉渣粒度较大，在 10%～20% 配比范围内可增加孔隙率，且 $Ca(OH)_2$ 生成量少，故爆裂

温度随高炉渣增加而持续升高，在配比为 20% 时达峰值(290 ℃)；继续增加高炉渣，黏度增大的致密化效应超过孔隙率增加的正效应，导致温度下降。

综合分析表明，由于钢渣和高炉渣对水分的存储能力较差，在爆裂试验初期便有大量水分蒸发，此过程球团需要承受较大的内部蒸汽压，从而使球团爆裂温度始终达不到正常生产所需 400 ℃左右的指标。



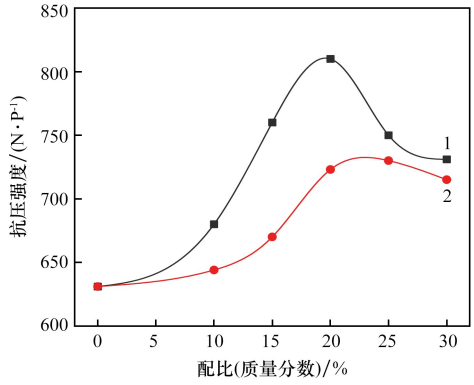
1—钢渣；2—高炉渣。

图 3　不同配矿方案下生球爆裂温度

Fig. 3　Temperature of green balls cracking under different ore blending schemes

2.2　熟球性能

预热焙烧通过固相反应、结晶及液相生成显著提高球团强度[19-20]，不同配矿方案熟球抗压强度如图 4 所示。由图 4 可知，钢渣与高炉渣配入均能有效强化提钒铁精粉熟球抗压强度。其中钢渣效果更佳：20% 钢渣配比下抗压强度达 810 N/P，较基准组(631 N/P)提升 28.4%；而高炉渣在 25% 配比下达峰值(730 N/P)，较基准组提升 15.6%。



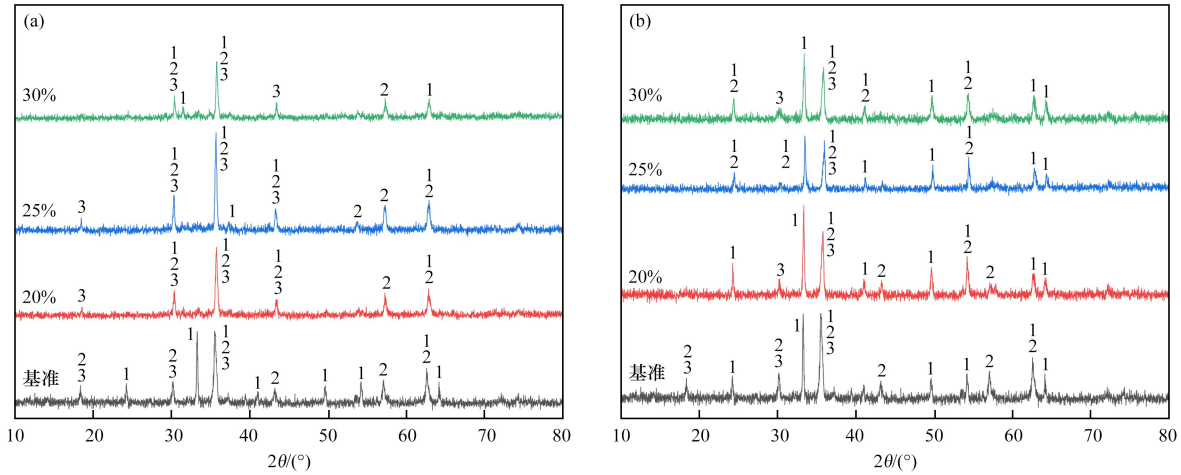
1—钢渣；2—高炉渣。

图 4　不同配矿方案熟球抗压强度

Fig. 4　Compressive strength of fired pellets under different ore blending schemes

然而，两种冶金固废球团最高强度(810 N/P)仍远低于高炉入炉标准(≥2 000 N/P)，故不宜直接用于高炉冶炼。鉴于此，该提钒超细铁精粉宜通过制备小球作为烧结原料。烧结工艺对原料初始强度无要求且需一定粒度，此类小球既能消耗难处理的超细粉，又能改善烧结料层透气性，进而提升烧结矿产、质量。

为探究高炉渣与钢渣强化焙烧球团的作用机制，对基准及 20%～30% 渣系配比球团进行了 XRD 分析，结果如图5所示。由图5可知，球团



(a) 高炉渣；(b) 钢渣

1—Fe_2O_3；2—铁氧体；3—铝硅酸盐。

图 5　不同配比焙烧球团矿 X-射线衍射图谱

Fig. 5　X-ray diffraction patterns of fired pellets with different blending ratios

焙烧后物相主要为 Fe_2O_3、铁氧体及铝硅酸盐。适量配渣可促进 Fe_2O_3 与 SiO_2、CaO 等反应生成铁酸钙及硅铝酸盐液相，填充孔隙并增强颗粒黏结，使球团致密度提升，强度增大。但过量配渣导致液相生成过多，液相迁移与体积收缩会引发内部孔洞及形变，致使强度下降。由于钢渣中 SiO_2、CaO 等助熔组分含量高于高炉渣，其强度曲线呈现更剧烈的“先升后降”趋势。

3 结 论

（1）提钒铁精粉因属高温烧结产物，二次焙烧缺乏氧化反应且有效黏结相不足，成球性能较差；仅在20%及25%钢渣配比下，成球指数(K)勉强超过0.35，达中等水平。

（2）钢渣与高炉渣最优配比分别为20%与25%。在此条件下，生球落下强度均提升约30%，抗压强度均提升约59%。受CaO含量及矿物粒径影响，生球性能均呈先升后降趋势。

（3）焙烧后球团主要物相为低熔点铁酸钙、铁酸镁等，这为液相生成提供了机械强度。最优配比条件下，钢渣与高炉渣方案熟球强度较基准球团分别提升28.4%和15.6%。但鉴于两类球团中最高强度为810 N/P，远低于高炉入炉标准(≥2 000 N/P)，因此，该类小球宜作为烧结原料，以改善料层透气性及烧结矿产、质量。

参考文献：

[1] 张国成,罗果萍,宋巍. 改善预热球团矿抗压强度的工艺优化[J]. 矿冶工程,2024,44(3):91－96.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, SONG Wei. Process optimization for improving compressive strength of preheated pellets[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(3):91－96.

[2] 梁斌,张汉泉,余洪,等. 钙基碱性球团预热焙烧特性及冶金性能研究[J]. 矿业工程,2025,23(2):62－68.
LIANG Bin,ZHANG Hanquan,YU Hong,et al. Research on preheating and roasting characteristics and metallurgical properties of calcareous alkaline pellets [J]. Mining Engineering,2025,23(2):62－68.

[3] 张帅,艾立群,洪陆阔,等. 内配生物质对钒钛磁铁矿球团性能的影响[J]. 中国冶金,2025,35(6):141－149.
ZHANG Shuai, AI Liqun, HONG Lukuo, et al. Effect of internally blended biomass on performance of vanadium-titanium magnetite pellets[J]. China Metallurgy, 2025, 35(6):141－149.

[4] 从俊强,温宝良,李家新,等. 消石灰对细粒级铁精矿球团性能的影响[J]. 钢铁,2023,58(5):20－30.
CONG Junqiang,WEN Baoliang,LI Jiaxin,et al. Effect of lime hydrate on pellet properties of fine-grained iron ore concentrates[J]. Iron and Steel,2023,58(5):20－30.

[5] LÜ X F, HAN H L, HE H S. Ore-Proportioning optimization technology in pellet process based on self-characteristics of iron ores[J]. Advanced Materials Research,2011,402:183－186.

[6] SHENG H Y, YANG Y T, ZHAN W L, et al. Exploring the effects of biomass utilization on the metallurgical performance and formation mechanisms of iron ore pellets [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2025, 186:106977.

[7] HALT J A, KAWATRA S K. Does the zeta potential of an iron ore concentrate affect the strength and dustiness of unfired and fired pellets[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2017,38(2):132－141.

[8] 任杰,罗果萍,朱建国,等. 含铁添加剂代替膨润土对球团矿性能的影响[J]. 矿冶工程,2022,42(4):106－111.
REN Jie, LUO Guoping, ZHU Jianguo, et al. Effect of iron-containing additive as substitute for bentonite on pellet properties[J]. Mining and Metallurgical Engineering,矿冶工程,2022,42(4):106－111.

[9] 许继龙,张祖刚,张鑫,等. 高塑性选铁尾泥改性制备球团黏结剂的试验[J]. 烧结球团,2025,50(3):59－69.
XU Jilong, ZHANG Zugang, ZHANG Xin, et al. Experiments on the preparation of pellet binder by modification of high-plasticity tailing mud after beneficiation[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(3):59－69.

[10] 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.

[11] 周仙霖,郑子康,万军营,等. 有机黏结剂高品位球团的固结机制研究[J]. 烧结球团,2025,50(3):70 – 77.
ZHOU Xianlin, ZHENG Zikang, WAN Junying, et al. Study on the consolidation mechanism of organic binders high-grade pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(3):70 – 77.

[12] 王宁,才志强,赵伟,等. 镁质熔剂性球团工业生产试验研究[J]. 山西冶金,2025,48(3):38 – 42.
WANG Ning, CAI Zhiqiang, ZHAO Wei, et al. Experimental study on industrial production of magnesium flux based pellets[J]. Shanxi Metallurgy, 2025,48(3):38 – 42.

[13] DE MORAES S L,DE LIMA J R B,NETO J B F. Effect of colloidal agents in iron ore pelletizing[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 39(6):414 – 419.

[14] 李彩霞,赵家林,王飞飞,等. 膨润土球团黏结剂中有机物的选择试验研究[J]. 非金属矿,2017,40(5):36 – 37.
LI Caixia, ZHAO Jialin, WANG Feifei, et al. Study on selection of organic compounds for bentonite pellet binder [J]. Non-Metallic Mines,2017,40(5):36 – 37.

[15] 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.

[16] 乔波,罗果萍,陶东平,等. 膨润土与复合黏结剂混合配加对球团性能的影响[J]. 烧结球团,2023,48(1):75 – 80.
QIAO Bo, LUO Guoping, TAO Dongping, et al. Effect of bentonite mixed with composite binder on performance of pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(1):75 – 80.

[17] 朱德庆,徐梦杰,潘建,等. 改善超细铁精矿成球性能的实验研究[J]. 钢铁研究学报,2017,29(9):704 – 710.
ZHU Deqing, XU Mengjie, PAN Jian, et al. Experimental research to improve ballability of ultrafine concentrate [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(9): 704 – 710.

[18] ABAZARPOOR A, HALALI M. Investigation on the particle size and shape of iron ore pellet feed using ball mill and HPGR grinding methods[J]. Politechnika Wrocławska,2017,53(2):908 – 919.

[19] 王永刚,杨大兵. 黏结剂对程潮铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团,2011,36(4):20 – 22.
WANG Yonggang, YANG Dabing. Influence of binder on quality of chengchao iron concentrate pellet[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(4):20 – 22.

[20]朱瑞宗,张芳,彭军,等. 巴润精矿配比对球团矿强度的影响[J]. 钢铁,2022,57(6):32 – 41.
ZHU Ruizong, ZHANG Fang, PENG Jun, et al. Effect of Barun concentrate ratio on strength of finished pellets[J]. Iron and Steel,2022,57(6):32 – 41.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国 – 知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵，不再另行支付)，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明，如有异议请来稿说明，本刊将作适当处理。