

褐—赤复合型高磷铁矿直接还原—磁选实验

祝民进, 王广, 易青山, 王静松, 薛庆国

(北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了实现某褐—赤复合型低品位复杂高磷铁矿的高效利用, 进行了基于直接还原—磁选工艺制备铁精矿的实验研究, 考查了还原温度、添加剂、还原剂种类等因素对高磷铁矿还原的影响。结果表明: 随着温度从 1 000 ℃ 升高到 1 150 ℃, 还原球团金属化率从 28.65% 增加到 73.11%; 碱度从 0 增加到 1.2, 还原球团金属化率先增加后降低, 金属化率较高为 76.52%; 球团 Na_2CO_3 用量从 2% 增加到 8%, 还原球团金属化率先增加后降低, 金属化率较高为 74.36%; 使用城市固废替代部分还原剂, 随着置换比从 0 增加到 60%, 还原球团的金属化率增加后降低, 较高金属化率为 83.64%。在碱度为 0.6、 Na_2CO_3 用量为 4%、城市固废置换比为 20%、还原温度为 1 100 ℃ 和还原时间为 30 min, 还原后球团金属化率为 83.64%。将上述还原球团进行磨矿磁选, 在磨矿粒度小于 0.03 mm, 磁场强度为 100 kA/m 时, 磁选后精矿产率、铁回收率、金属化率分别为 50.81%、78.36% 和 48.81%。由于金属铁颗粒的尺寸较小, 导致精矿产率和铁回收率整体偏低, 继续研究如何实现金属铁颗粒的长大非常关键。

关键词: 高磷铁矿; 矿相结构; 直接还原; 磁选

doi:10.12476/kczhly.202311280622

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0129-07

引用格式: 祝民进, 王广, 易青山, 等. 褐—赤复合型高磷铁矿直接还原—磁选实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 129-135.

ZHU Minjin, WANG Guang, YI Qingshan, et al. Limonite-hematite composite high-phosphorus iron ores by direct reduction and magnetic separation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 129-135.

2022 年我国铁矿石对外依存度超过了 80%, 铁矿石长期依赖于进口, 导致铁矿石价格受制于人, 国内钢铁企业盈利困难, 不利于国内钢铁行业发展^[1-2]。在这种情况下, 利用好国内的现有资源, 可以有效的抑制铁矿石价格的上涨, 使国民经济健康协调的发展。我国 97% 的铁矿资源属于品位为 30% 以下的低品位铁矿石, 其中复杂难选的褐铁矿、赤铁矿以及多金属共生矿等占比较大^[3-4]。在众多铁矿资源中, 高磷铁矿是一种储量巨大的复杂难选铁矿石资源, 世界高磷铁矿石储量达几百亿 t, 储量非常丰富。我国高磷铁矿储量也非常丰富, 储量达 74.5 亿吨, 约占全国铁矿石资源总量的 14.86%^[5]。高磷铁矿中的磷含量较高, 且嵌

布粒度极细, 经常与菱铁矿、鲕绿泥石或含磷矿物共生或者相互包裹, 使得磷分离困难, 通过常规的选矿方法难以去除^[6-8]。国内外对高磷铁矿选矿开展了大量的研究, 目前利用方法有重选法、磁选法、浸出法、磁化焙烧—磁选等^[9-12]。但是大量研究表明传统选矿法难以分离铁磷, 存在铁低磷高的特点; 浸出工艺成本较高, 对设备腐蚀较大的特点; 磁化焙烧工艺可以提高精矿铁品位和回—磁选工艺中铁损大, 尾矿中铁品位较高。直接还原—磁选是一种较为成熟的铁矿处理方法, 同时也被认为是最有效的提铁降磷工艺^[13-14]。近年来, 减污降碳协同增效逐渐受到国家的关注, 如果将城市生活垃圾作为冶金的还原剂, 不仅能够

收稿日期: 2023-11-28

作者简介: 祝民进 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事复杂难选铁矿研究。

通信作者: 王广 (1985-), 男, 副教授, 主要从事低碳炼铁研究。

让其“变废为宝”，实现减污降碳，还能够解决高磷铁矿直接还原过程中还原剂消耗量过大的问题。宁超等^[15]在高磷铁矿石还原过程中用废塑料替代焦粉，采用直接还原—磁选工艺。结果表明，采用 25% 的废塑料替代焦粉后金属铁晶粒迁移聚集效果明显，有良好的提铁降磷效果。

本文以某褐—赤复合型低品位高磷铁矿为研究对象，该高磷铁矿矿相结构复杂，铁-磷分离难度高。以该高磷铁矿为原料，采用直接还原—磁选技术，研究温度、碱度、添加剂和还原剂等因素对高磷铁矿含碳球团中铁、磷矿物还原行为的影响，

探究还原球团磁选提质效果，为该高磷铁矿开发利用过程较佳还原工艺参数的获得提供参考。

1 实验

1.1 实验原料

实验所采用的褐—赤复合型高磷铁矿的化学分析结果见表 1。从表 1 可见，矿石为贫铁矿，矿石 Fe 品位很低，主要的脉石成分 SiO₂ 高达 18.99%，其次是 Al₂O₃、CaO 和 MgO，且矿石中有害元素 S、P 含量较高，难以直接用于炼铁。

表 1 原矿样品化学分析
Table 1 Chemical analysis of ore samples

TFe	FeO	S	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	TiO ₂	LOI
32.41	0.60	0.63	0.30	18.99	8.85	2.80	0.90	1.03	0.36	16.0

原矿 XRD 分析结果见图 1，原矿中主要的含铁矿物为赤铁矿和针铁矿，脉石矿物主要有石英和钙镁铁铝硅酸盐。原矿的 EPMA 见图 2，原矿呈同心环带的鲕状结构，鲕状结构较为复杂，有多种，如多脉石层结构、褐铁矿无核结构、以赤铁矿为核心的褐铁矿结构。褐铁矿主要存在于鲕粒结构中，赤铁矿存在于鲕状结构的核心和散布在脉石基体中。鲕粒核心的赤铁矿含铁量较高，脉石中 SiO₂ 含量较高，且赤铁矿中含有少量的 P₂O₅。从 EPMA 面分析结果来看，脉石相中存在 Ca、P 共存相，即磷灰石相；还有一部分 Ca、P 类似于弥散分布，Si 主要分布在脉石矿物中。

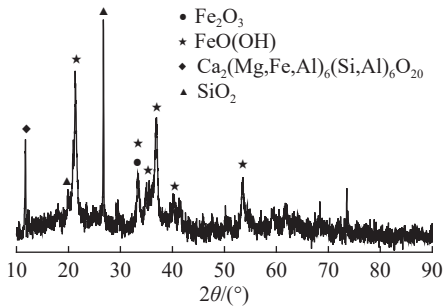


图 1 原矿的 XRD
Fig.1 XRD pattern of the ore

实验所用的还原剂为无烟煤和城市碳氢固废，粒度均小于 0.18 mm，其工业分析见表 2。实验过程添加的 CaCO₃ 和 Na₂CO₃ 均为分析纯试剂。城市碳氢固废以北京城区的生活垃圾为主，具体采用的是城市生活垃圾中的可回收垃圾、其

他垃圾和厨余垃圾，可回收垃圾主要是废塑料和废纸，其他垃圾包括木竹类 and 无机物类，城市碳氢固废具体组成见表 3。

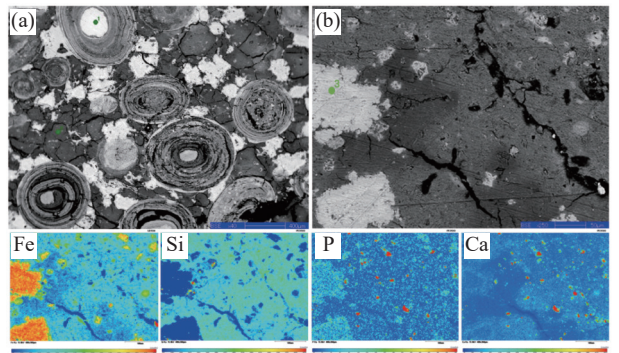


图 2 原矿的 EPMA
Fig.2 EPMA of the ore

表 2 无烟煤和城市碳氢固废工业分析 单位：%
Table 2 Analysis of anthracite and urban hydrocarbon waste industries

种类	固定碳	挥发分	灰分
无烟煤	72.43	5.69	20.11
城市碳氢固废	19.02	61.56	19.42

表 3 城市碳氢固废原料组成 单位：%
Table 3 Composition of urban hydrogen waste raw materials

原料	可回收垃圾		其他垃圾		厨余垃圾
	废塑料	废纸	木竹类	无机物	
配比	45	40	5	5	5

1.2 实验方法

原矿、无烟煤和城市固废烘干后破碎筛分至

-1.0 mm, 按照不同的比例称取一定量的原矿、添加剂、无烟煤和城市碳氢固废充分混匀, 取固定量的混合料在 20 MPa 下压制成直径为 20 mm、高度约为 10 mm 的圆柱体球团。球团在 120 °C 下干燥 12 h, 以除去球团中的水分。实验所用的设备为高温井式电炉, 通入氩气 (3 L/min) 作为保护气体。电炉从室温开始升温, 控制升温速率为 5~7 °C/min, 到达预定温度并保温 30 min 后将装有球团的坩埚恒温焙烧, 还原结束后在惰性气氛中自然冷却。用扫描电子显微镜-能谱仪 (SEM-EDS) 对球团进行微观结构和微区成分分析, 最后分析还原球团的 TFe、MFe 等化学成分。

将较优条件焙烧后的球团细磨至-0.015 mm, 施加 100 kA/m 的磁场强度, 对样品进行磁选提质。磁选设备为 CXG-99 磁选管, 磁选时间为 30 min, 最后对磁选样品进行表征, 分析其产率、铁回收率、金属化率, 并分析磁选样品的微观结构和微区成分。

2 实验结果与讨论

2.1 温度对高磷铁矿还原的影响

还原焙烧温度会显著影响铁氧化物的还原速率, 因此, 在无添加剂条件下, 探究了还原温度对还原过程的影响。在 C/O 为 1.0、焙烧时间为 30 min、使用无烟煤作为还原剂的条件下, 研究了焙烧温度对球团还原行为的影响。图 3 是球团金属化率随温度变化曲线, 随着还原温度的升高, 还原球团金属化率逐渐升高, 在 1 000 °C 时金属化率只有 28.65%, 在 1 150 °C 时金属化率为 73.11%, 金属化率仍较低。根据氧化铁还原机理可知, 氧化铁还原为强吸热反应, 所以温度越

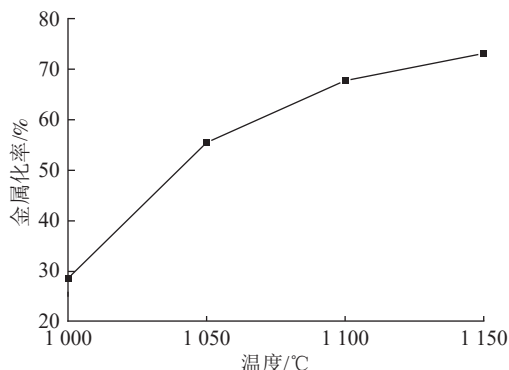


图 3 不同温度下还原球团金属化率
Fig.3 Metallization ratio of reduction pellets at different temperatures

高, 越利于直接还原反应的加快; 同时温度越高, 无烟煤的反应活性也越高, 也越利于还原。但是过高的温度会使得还原生成的 FeO 与 SiO₂ 和 Al₂O₃ 发生反应, 生成低熔点和难还原的铁橄榄石和铁尖晶石, 阻碍还原反应的进程, 影响工艺的正常生产。综合考虑, 本研究选取较为适宜的还原温度为 1 100 °C。

2.2 添加剂对高磷铁矿还原的影响

CaCO₃ 和 Na₂CO₃ 对铁氧化物还原中铁与渣的分离有促进作用, 因此添加 CaCO₃ 和 Na₂CO₃, 考查添加剂用量对球团还原行为的影响, 确定较佳添加剂用量条件。在 C/O 为 1.0、还原温度为 1 100 °C、还原时间为 30 min 条件下, 添加 CaCO₃ 调节球团碱度, 考查不同碱度用量对高磷铁矿还原的影响, 实验结果见图 4。添加碱度对金属化率提升效果明显, 从未添加 CaCO₃ 的 68.79% 提升到 76.52%(碱度为 0.6), 但碱度继续增加金属化率反而下降。这是由于 CaCO₃ 在高温会分解成 CaO, CaO 可以抑制铁尖晶石和铁橄榄石的生成, 生成更多的金属铁, 所以一开始金属化率增加; 但同时低熔点化合物的减少, 会阻碍金属铁的扩散和继续长大, 使得后续碱度增加金属化率下降。所以适当增加碱度有利于金属铁生成, 本研究选取较适宜的碱度为 0.6。

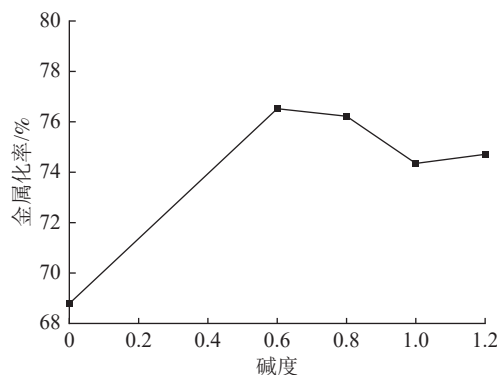


图 4 不同碱度下还原球团金属化率
Fig.4 Metallization ratio of reduction pellets at different alkalinity

在 C/O 为 1.0、还原温度为 1 100 °C、还原时间为 30 min 条件下, 考查不同 Na₂CO₃ 用量对高磷铁矿还原的影响, 实验结果见图 5。添加 Na₂CO₃ 后球团金属化率先增加后降低, 总体变化不明显, 在添加 4% 的 Na₂CO₃ 用量时金属化率较高为 74.36%, 随后继续增加 Na₂CO₃ 的用量则会导致金属化率下降。Na₂CO₃ 会促进无烟煤中碳的

气化反应,使还原分压提高,导致金属化率增加。与此同时 Na_2CO_3 会分解生成 CO_2 和低熔点的 Na_2O , CO_2 的生成降低了 CO 的分压, Na_2O 的生成会堵塞气体扩散的孔隙,隔离了还原气体和铁颗粒,所以过多 Na_2CO_3 的加入会使金属化率降低。本研究选取较适宜的 Na_2CO_3 用量为 4%。

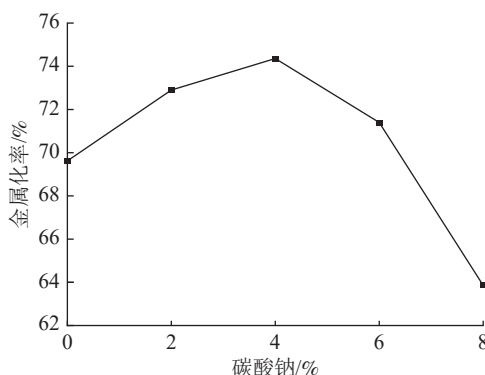


图5 不同碳酸钠含量下还原球团金属化率

Fig.5 Metallization ratio of reduction pellets at different Na_2CO_3 contents

2.3 还原剂种类对高磷铁矿还原的影响

还原剂是影响直接还原提铁降磷的重要影响因素之一,实验考查不同还原剂种类和用量对球团还原行为的影响。在 C/O 为 1.0、碱度 0.6、碳酸钠为 4%、还原温度为 1100°C 及还原时间为 30 min 条件下,以城市碳氢固废替代部分无烟煤,考查不同城市碳氢固废用量对高磷铁矿还原的影响,结果见图 6。随着城市碳氢固废的用量不断增加,还原球团金属化率先增加后降低,在置换比为 20% 时,金属化率较高为 83.64%,对比未添加城市碳氢固废的情况,金属化率上升了 17.57%。因为在还原焙烧过程中城市碳氢固废在高温下热解,会产生气体烃和少量的高反应性残炭,该气体烃会继续受热分解成 CO 和 H_2 ,加快还原反应速率。随着置换比的增加,产生的高反应性残炭也增加,与气氛中的 CO_2 气体直接反应生成 CO ,也会促进还原反应的进行。但继续增加城市碳氢固废用量,还原球团的金属化率逐渐降低,这是由于城市碳氢固废中含有大量的挥发分,在还原过程中大量挥发分逸出导致球团内部产生大量孔隙,导致部分原料颗粒处于隔离状态,降低了直接还原反应速率,导致还原球团的金属化率下降^[16]。同时置换比越大,还原后球团的强度越低,变得越脆,不利于后续工艺正常生产,因此本研究选取较适宜的城市碳氢固废置换比为 20%。

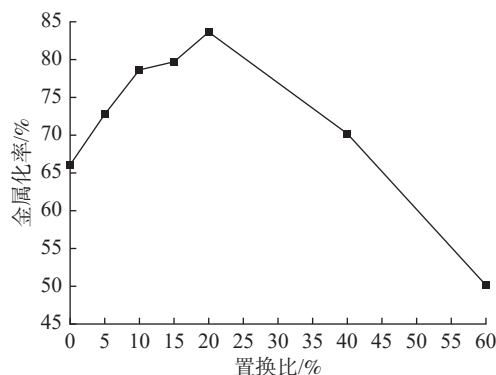


图6 不同置换比下还原球团金属化率

Fig.6 Metallization ratio of reduction pellets at different substitution ratios

2.4 还原球团的微观结构分析

在 C/O 为 1.0、碱度 0.6、碳酸钠为 4%、城市碳氢固废置换比为 20% 及还原时间为 30 min 条件下,分别在 1000°C 、 1050°C 、 1100°C 、 1150°C 、 1200°C 对球团进行焙烧。焙烧后还原球团的 XRD 见图 7。在 1000°C 时,球团中有少量金属铁峰,主要以 Fe_2O_3 峰为主;在 1050°C 时,金属铁峰有所增加, Fe_2O_3 峰依旧存在;在 1100°C 时, Fe_2O_3 峰值急剧下降,金属铁峰明显增多;当温度在 1150°C 时,还原球团基本没有 Fe_2O_3 峰,只剩下金属铁;在 1200°C 时,主要是金属铁峰和钙镁铝等硅酸盐峰为主。

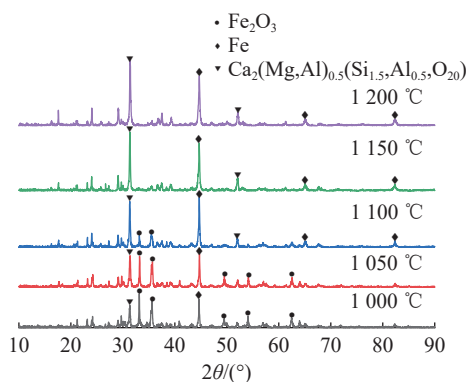


图7 较优条件下不同温度焙烧样品 XRD

Fig.7 XRD pattern of samples roasted at different temperatures at optimal conditions

还原后球团的微观结构见图 8。从还原后球团的 SEM 可知,在 1000°C 时,还原球团中的金属铁颗粒很少,大部分呈粒状且分布散乱,此时金属铁颗粒尺寸在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 左右。在 1050°C 时,还原球团中的金属铁颗粒明显增大,尺寸增加到 $5\sim 10\mu\text{m}$ 左右。在 1100°C 时,金属铁颗粒尺寸进一步增加,较大的铁颗粒尺寸可达 $20\mu\text{m}$ 。在

1 150 ℃ 时，还原球团增大且逐渐聚集。温度达到 1 200 ℃ 时，还原球团的金属铁颗粒已经高度

聚集，此时大多数的金属铁颗粒都连接在一起呈现出块状，且边缘清晰。

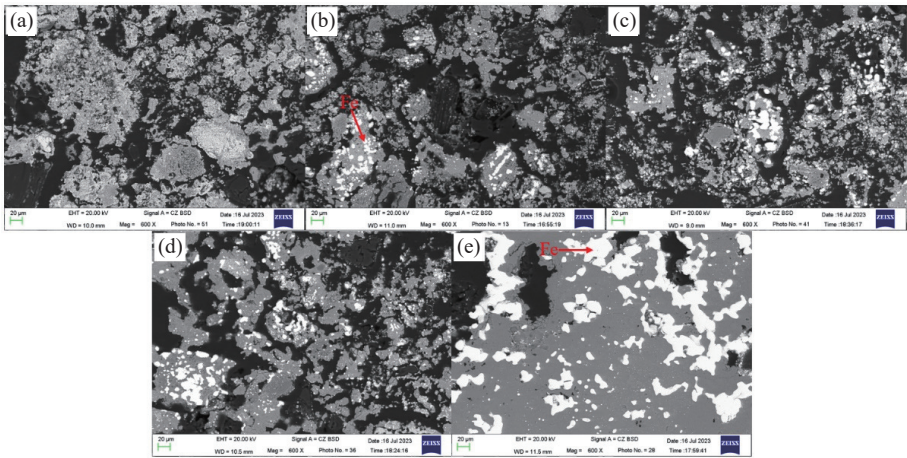


图 8 较优条件下还原球团的微观结构: (a)1 000 ℃, (b)1 050 ℃, (c)1 100 ℃, (d)1 150 ℃, (e)1 200 ℃
Fig.8 Microstructure of reduction pellets under optimal conditions: (a)1 000 ℃, (b)1 050 ℃, (c)1 100 ℃, (d)1 150 ℃, (e)1 200 ℃

还原球团中金属铁颗粒的磷含量见图 9，随着温度的增加，金属铁颗粒中的 P 含量也不断地增加。大多数高磷铁矿中的磷主要是以氟磷灰石形式存在。但本文实验所用到的褐-赤复合型低品位高磷铁矿中的磷还会以 P_2O_5 的形式存在，本文主要考虑 $Ca_3(PO_4)_2$ 和单一 P_2O_5 的还原。 $Ca_3(PO_4)_2$ 被碳还原的开始温度为 1 418.5 ℃，在 1 400 ℃ 以下磷灰石很难和碳发生还原反应^[17]。但 SiO_2 的存在，会使得碳热还原开始温度下降，促进反应的进行。 SiO_2 存在时， $Ca_3(PO_4)_2$ 被碳还原开始温度为 1 160.9 ℃，反应开始温度下降明显。本文所用的高磷铁矿还含有 P_2O_5 ，在高温下被碳还原生成 P_2 ，反应开始温度为 930 ℃^[18]。根据上述分析可

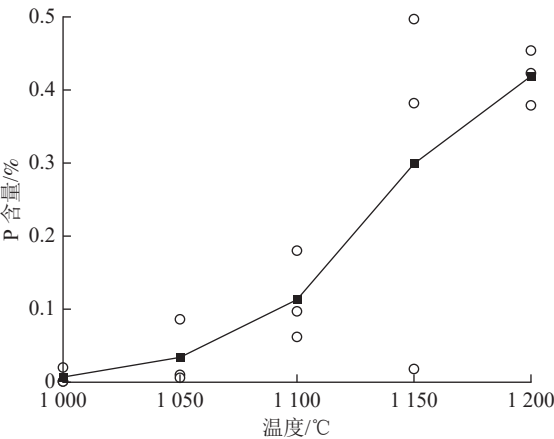


图 9 较优条件下还原球团金属铁中 P 含量
Fig.9 Phosphorus content in metallic iron of reduction pellets at optimal conditions

知，在 1 000 ℃ 到 1 100 ℃ 主要涉及 P_2O_5 的还原，在 1 000 ℃ 左右 P_2O_5 开始还原，此时金属铁中磷含量较少，从 1 000 ℃ 到 1 100 ℃ P_2O_5 还原反应继续进行，速率逐渐加快；1 100 ℃ 到 1 200 ℃ 主要涉及 $Ca_3(PO_4)_2$ 的还原，这时 P_2O_5 和磷酸钙的还原叠加进行，导致金属铁颗粒中磷含量进一步明显升高。

2.5 还原球团细碎磁选提质探究

在 C/O 为 1.0、碱度 0.6、碳酸钠为 4%、城市固废置换比为 20%、还原温度为 1 100 ℃ 和还原时间为 30 min 条件下进行还原焙烧，还原后样品破碎至 -0.03 mm 进行磁选，磁场强度 100 kA/m，对磁选样品进行化学成分和 SEM-EDS 能谱分析。

磁选样品化学成分分析见表 4，磁选后精矿产率、铁回收率和金属化率整体偏低。从图 10 可知，磁选样品中金属铁颗粒未完全扩散长大成大颗粒的铁，说明并没有完全还原，金属铁颗粒还包裹着一些未还原的铁氧化物，这也使得金属化率和铁品位难以提升。金属铁颗粒大小仅有 1~2 μm ，粒度极细，这些金属铁颗粒极易随着脉石部分在磁选过程中被水流冲走而损失掉，导致铁的回收率和铁精矿的品质较低。

表 4 磁选精矿指标分析				
Table 4 Analysis of magnetic separation concentrate indices				
TFe	MFe	铁产率	铁回收率	金属化率
49.99	24.40	50.81	78.36	48.81

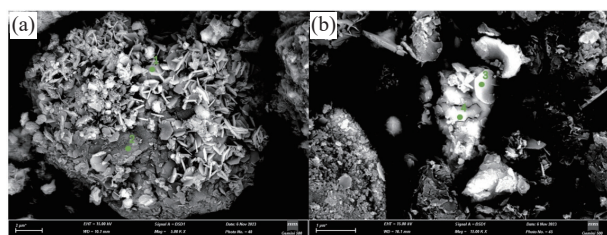


图 10 磁选样品的 SEM: (a)5 000 倍, (b)15 000 倍

Fig.10 SEM of magnetic separation samples:

(a)5 000x, (b)15 000x

3 结 论

(1) 高磷铁矿还原为强吸热反应, 随着温度从 1 000 °C 升高到 1 150 °C, 还原球团金属化率逐渐升高, 在 1 150 °C 时较高金属化率为 73.11%, 但过高的温度会使得球团熔化, 影响工艺的正常生产。

(2) 添加 CaCO_3 调节碱度, 球团金属化率先增加后降低, 在碱度为 0.6 时金属化率最高为 76.52%, 由于过高的 CaCO_3 会导致球团中低熔点化合物的减少, 阻碍金属铁的扩散和继续长大, 使后续金属化率下降。添加 Na_2CO_3 也会使球团金属化率先增加后降低, Na_2CO_3 用量为 4% 时金属化率最高为 74.36%, 由于 Na_2CO_3 会分解生成 CO_2 和低熔点的 Na_2O , CO_2 的生成降低了 CO 的分压, Na_2O 的生成会堵塞气体扩散的孔隙, 导致后续金属化率下降。

(3) 城市碳氢固废代替部分无烟煤还原有很好的效果, 在 C/O 为 1.0、温度 1 100 °C、碱度 0.6、 Na_2CO_3 添加量为 4% 以及置换比为 20% 的情况下, 还原 30 min 后的球团金属化率能达到 83.64%, 同时铁颗粒中磷含量低于 0.1%。

(4) 在磨矿粒度为小于 0.03 mm, 磁场强度为 100 kA/m 的条件下, 磁选后精矿产率、铁回收率、金属化率分别为 50.81%、78.36% 和 48.81%, 整体偏低。这是由于金属铁颗粒没有完全还原, 金属铁颗粒还包裹着一些未还原的铁氧化物, 使金属化率和铁品位难以提升; 同时磁选粒度极细, 这些金属铁颗粒极易随着脉石部分在磁选过程被水流冲走而损失掉, 导致铁的回收率和铁精矿的品质较低。

参考文献:

[1] 张翔. 浅谈我国铁矿资源安全的现状和对策[J]. 福建冶金, 2021(3):56-58.

ZHANG X. The present situation and countermeasures of iron ore resource safety in China[J]. Fujian Metallurgy, 2021(3):56-58.

[2] 韩跃新, 张小龙, 高鹏, 等. 中国铁矿石选矿技术发展与展望[J]. 金属矿山, 2023(12):1-24.

HAN Y X, ZHANG X L, GAO P, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2023(12):1-24.

[3] 柳林, 王威, 刘红召, 等. 磁化焙烧-磁选回收某褐铁矿中铁的实验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):33-37.

LIU L, WANG W, LIU H Z, et al. Research on recovery of iron from limonite by magnetization roasting and magnetic separation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):33-37.

[4] 马长喜, 夏飞龙, 张姗姗, 等. 低品位高硅铝土矿静态焙烧溶出[J]. 矿产综合利用, 2023(2):7-12.

MA C X, XIA F L, ZHANG S S, et al. Study on digestion of low grade high silica bauxite by static roasting[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(2):7-12.

[5] ZHANG H, ZHANG Z, LUO L, et al. Behavior of Fe and P during reduction magnetic roasting-separation of phosphorus-rich oolitic hematite[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2018(41):47-64.

[6] 丁湛, 文书明, 李春龙, 等. 铁矿石脱磷工艺现状及同步脱除新方法[J]. 矿产综合利用, 2020(3):56-62.

DING Z, WEN S M, LI C L, et al. Current status of phosphorus and sulfur removal technology of iron ore and new method of synchronous removal[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):56-62.

[7] 吴世超, 孙体昌, 寇珏, 等. 组合脱磷剂对高磷铁矿还原焙烧-磁选的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3):423-430.

WU S C, SUN T C, KOU Y, et al. Effects of combined dephosphorization agents on reduction roasting-magnetic separation of high phosphorus iron ore[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(3):423-430.

[8] 周文涛, 韩跃新, 孙永升, 等. 高磷鲕状赤铁矿提铁降磷研究综述[J]. 金属矿山, 2019(2):10-14.

ZHOU W T, HAN Y X, SUN Y S, et al. Research prospect of enriched iron and dephosphorization of high phosphorus oolitic hematite[J]. Metal Mine, 2019(2):10-14.

[9] Ionkov K, Stoyan G, Armando C, et al. Amenability for processing of oolitic iron ore concentrate for phosphorus removal[J]. Minerals Engineering, 2013(46):119-127.

[10] ZHANG L, Machiela R, Das P, et al. Dephosphorization of unroasted oolitic ores through alkaline leaching at low temperature[J]. Hydrometallurgy, 2019(184):95-102

- [11] Xia W, Ren Z, Gao Y. Removal of phosphorus from high phosphorus iron ores by selective HCl leaching method[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011(18):1-4.
- [12] 余洪, 谢蕾, 殷佳琪, 等. 鄂西高磷鲕状赤铁矿磁化还原矿物组成及分布规律[J]. 矿物岩石, 2019, 39(3):1-8.
- YU H, XIE L, YIN J Q, et al. Composition and distribution of magnetized reduction minerals in high phosphorus oolitic hematite in western Hubei Province[J]. J Mineral Petrol, 2019, 39(3):1-8.
- [13] 余文. 高磷鲕状赤铁矿含碳球团制备及直接还原-磁选研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- YU W. Study on the preparation of high-phosphorus oolitic hematite-coal composite briquette and its direct reduction-magnetic separation[D]. Beijing: University of Science and Technology Bei-jing, 2015.
- [14] 吴世超, 孙体昌, 李正要, 等. 高磷铁矿石直接还原-磁选研究进展[J]. 金属矿山, 2021(2):58-64.
- WU S C, SUN T C, LI Z Y, et al. Research progress of direct reduction-magnetic separation of high phosphorus iron ore[J]. Metal Mine, 2021(2):58-64.
- [15] 宁超. 内配废塑料高磷铁矿含碳团块直接还原-磁选研

究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.

- NING C. Study of adding waste plastics in carbon bearing briquettes of high phosphorus iron ore by direct reduction and magnetic separation[D]. Maanshan: Anhui University Of Technology, 2018.
- [16] Donskoi E, McElwain D L. Mathematical modelling of non-isothermal reduction in highly swelling iron ore-coal char composite pellet[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2001(28):384-389.
- [17] 成成, 薛庆国, 王静松, 等. 高磷铁矿含磷矿物与脉石相碳热还原机理[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(4):8-15.
- CHENG C, XUE Q G, WANG J S, et al. Carbothermal reduction mechanism of fluorapatite and gangue in high phosphorus iron ore[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(4):8-15.
- [18] 赵立文, 纪文涛, 黄海艺, 等. 黄磷电尘灰真空碳热还原法提镓[J]. 有色金属工程, 2021, 11(8):51-60.
- ZHAO L W, JI W T, HUANG H Y, et al. Extraction of gallium from yellow phosphorus flue dust by vacuum carbothermal reduction[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(8):51-60.

Limonite-hematite Composite High-phosphorus Iron Ores by Direct Reduction and Magnetic Separation

ZHU Minjin, WANG Guang, YI Qingshan, WANG Jingsong, XUE Qingguo

(State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to achieve the efficient utilization of a certain limonite-hematite composite high-phosphorus iron ore, experimental research was conducted on the preparation of iron concentrate based on a direct reduction-magnetic separation process. The results indicate that with an increase in temperature from 1 000 °C to 1 150 °C, the metallization ratio of the reduction pellets increased from 28.65% to 73.11%. With an increase in alkalinity from 0 to 1.2, the metallization ratio of the reduction pellets initially increased and then decreased, reaching a maximum of 76.52%. As the dosage of Na_2CO_3 in the pellets increased from 2% to 8%, the metallization ratio initially increased and then decreased, reaching a maximum of 74.36%. When a portion of the reducing agent was substituted with municipal solid waste, as the substitution ratio increased from 0 to 60%, the metallization ratio of the reduction pellets initially increased and then decreased, reaching a maximum metallization ratio of 83.64%. With an alkalinity of 0.6, Na_2CO_3 dosage of 4%, municipal solid waste substitution ratio of 20%, reduction temperature of 1 100 °C, and reduction time of 30 min, the metallization ratio of the pellets after reduction reached 83.64%. The previously reduced pellets were subjected to grinding and magnetic separation. With a grinding particle size of less than 0.03 mm and a magnetic field intensity of 100 kA/m, the concentrate yield, iron recovery rate, and metallization ratio after magnetic separation were 50.81%, 78.36%, and 48.81%, respectively. Due to the relatively small size of metallic iron particles, there is an overall lower concentrate yield and recovery rate. Further research on achieving the growth of metallic iron particles is crucial to address this issue.

Keywords: high-phosphorus iron ore; mineral phase structure; direct reduction; magnetic separation