

氢气直接还原超细铁精矿干燥球制备超细还原铁粉研究

董申奥¹, 温宝良², 杨佳龙^{1*}

¹安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山

²马鞍山钢铁有限公司技术中心, 安徽 马鞍山

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年6月1日

摘要

研究提出了一种氢气直接还原超细铁精矿干燥球后再磁选制备超细还原铁粉技术, 系统开展了超细铁精矿干燥球氢还原特性分析及超细还原铁粉的制备与表征。结果表明: 超细铁精矿干燥球的还原性显著优于成品球, 基于ROM2模型计算得出干燥球氢还原反应活化能为27.78 kJ/mol, 约为成品球的1/2; 超细铁精矿干燥球在850℃下氢还原150 min时, 还原度达到99.92%, 经磁选后制得的超细还原铁粉纯度为98.06%, 粒径分布D50为18.48 μm, 磁选可有效去除还原产物中的二氧化硅杂质。研究表明, 氢气直接还原超细铁精矿干燥球后再磁选制备超细还原铁粉技术, 具有降低超细还原铁粉生产成本的潜力, 可为超细铁精矿的资源化利用提供新的技术路径。

关键词

超细铁精矿, 干燥球, 氢气还原, 超细还原铁粉, 磁选

Research on the Preparation of Ultrafine Reduced Iron Powder by Direct Hydrogen Reduction of Ultrafine Iron Ore Concentrate Dried Pellets

Shen'ao Dong¹, Baoliang Wen², Jialong Yang^{1*}

¹School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan Anhui

²Technology Center, Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan Anhu

Received: March 26, 2026; accepted: May 22, 2026; published: June 1, 2026

*通讯作者。

文章引用: 董申奥, 温宝良, 杨佳龙. 氢气直接还原超细铁精矿干燥球制备超细还原铁粉研究[J]. 冶金工程, 2026, 13(2): 53-62. DOI: 10.12677/meng.2026.132007

Abstract

This study proposes a technology for producing ultrafine reduced iron powder by hydrogen direct reduction of dried ultrafine iron ore concentrate pellets followed by magnetic separation. A systematic analysis was conducted on the hydrogen reduction characteristics of the dried ultrafine iron ore concentrate pellets, as well as the preparation and characterization of the resulting ultrafine reduced iron powder. The results show that the reducibility of the dried ultrafine iron ore concentrate pellets is significantly better than that of indurated pellets. Based on the ROM2 model, the activation energy for the hydrogen reduction of the dried pellets is calculated to be 27.78 kJ/mol, which is only half that of indurated pellets. After hydrogen reduction at 850°C for 150 min, the reduction degree of the dried ultrafine iron ore concentrate pellets reaches 99.92%. The ultrafine reduced iron powder obtained after magnetic separation has a purity of 98.06% and a median particle size (D50) of 18.48 μm. Magnetic separation effectively removes silica impurities from the reduced product. The study demonstrates that the technology of producing ultrafine reduced iron powder by hydrogen direct reduction of dried ultrafine iron ore concentrate pellets followed by magnetic separation has the potential to reduce the production cost of ultrafine reduced iron powder and provides a new technological route for the resource utilization of ultrafine iron ore concentrate.

Keywords

Ultrafine Iron Ore Concentrate, Dried Pellets, Hydrogen Reduction, Ultrafine Reduced Iron Powder, Magnetic Separation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铁粉是粉末冶金行业的基础原料，其用量约占粉末冶金原料总量的 70%~80%，此外还有 14%~20% 用于高效焊条制造[1]。目前，铁粉的主要生产方法包括电解法、雾化法和还原法，其中电解铁粉生产成本高昂，限制了其大规模应用；雾化铁粉虽体积密度高、适用于高性能粉末冶金产品制造，但对生产设备要求严苛。尽管近年来雾化铁粉产量持续增长，但还原铁粉仍占据我国粉末冶金市场主导地位，其产量占总铁粉产量的 52.6%。

还原铁粉呈银灰色或黑色粉末，又称“双吸剂”，除粉末冶金领域外，还凭借其特殊的电、磁、光学特性，广泛应用于暖宝宝、食品保鲜、气割材料、土壤有机物除害等多个领域。还原铁粉粒度范围覆盖粗粉至超细粉，其中超细还原铁粉通常指平均粒径小于 20 μm 的产品[2]，可满足高端应用场景的技术需求。

目前，碳热一次还原与氢气二次还原是还原铁粉制备的主流工艺[3]，瑞典 Höganäs、日本 JFE 及我国马钢、武钢、莱钢等企业均采用该工艺[4]。该工艺通常以轧钢铁鳞或高纯磁铁精粉为原料，经隧道窑煤粉一次还原、钢带式还原炉分解氨二次还原[5]，再通过粉碎、磁选、筛分等工序得到成品。我国多以轧钢铁鳞为原料，但由于轧钢过程中钢种变化、铁鳞混杂堆积及外界污染等因素，导致还原铁粉杂质含量高、性能稳定性差[6]。

相比之下，瑞典、美国、日本等国家 70% 的还原铁粉以高纯磁铁精粉为原料，因其可有效降低还原

过程中 Fe_2SiO_4 的生成,提升产品质量稳定性,且制备的还原铁粉海绵铁组织更发达、松装密度可控、成型性优异,可用于含油轴承、高温高强度结构件、穿甲弹芯等高端产品。但传统碳热一次还原采用圆形坩埚环状装料法,存在还原周期长、能耗高、产品难以研磨等弊端,限制了生产效率的提升。

为解决上述问题,研究提出了氢气直接还原超细铁精矿干燥球后直接磁选的制备技术。氢气还原具有清洁高效的优势,且可在较低温度下减少 Fe_2SiO_4 生成、避免干燥球烧结;选用超细铁精矿干燥球无需焙烧,可降低生产成本,同时其高孔隙率可提升可还原性,克服超细铁精矿直接还原易粘连、对煤粉要求高的难题。通过系统研究原料性能、氢还原特性及产品表征,为该技术的工业化应用提供理论依据和技术支撑。

2. 原料性能与研究方法

2.1. 原料性能

本实验采用的超细铁精矿,其化学成分如表 1 所示,由表 1 可知,该铁精矿全铁(Fe_{tot})含量为 66.58%, FeO 含量为 28.88%,杂质成分中 SiO_2 含量为 6.75%, CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 P 、 S 等杂质含量均较低,符合还原铁粉制备的原料要求。

Table 1. Chemical composition (in wt.%) of iron ore concentrate

表 1. 铁精矿化学成分(质量分数)

原料	Fe_{tot}	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	P	S
超细铁精矿	66.58	28.88	0.12	6.75	0.38	0.06	0.01	0.01

超细铁精矿的粒度组成如表 2 所示,由表 2 可知,该铁精矿 -0.028 mm 细颗粒占比高达 84.56%,表明该铁精矿具有典型的超细粒度特征。

Table 2. Grain size composition (in wt.%) of iron ore concentrate

表 2. 铁精矿粒度组成(质量分数)

原料	+0.075 mm	0.048~0.075 mm	0.038~0.048 mm	0.028~0.048 mm	-0.028 mm
超细铁精矿	0	1.46	3.65	10.33	84.56

通过造球工艺制备的超细铁精生球,其水分为 9.4%~9.6%,10~12 mm 生球的落下强度为 13.5 ± 2.6 次/(0.5 m),抗压强度为 16.8 ± 1.9 N/个。

经干燥处理后,干燥球(Dried pellets, DP)的抗压强度提升至 45.6 ± 3.4 N/个,可满足后续还原实验的操作要求。

作为对比,超细铁精矿成品球(Indurated pellets, IP)的抗压强度为 4518.3 ± 864.7 N/个,孔隙率为 $18.4 \pm 3.5\%$ 。

2.2. 研究方法

2.2.1. 制备技术路线

超细铁精矿制备超细还原铁粉的技术路线如图 1 所示,首先将超细铁精矿生球送入带式还原炉进行干燥处理,随后对干燥球进行氢气还原反应,还原过程中产生的氢气和水蒸气通过回收设备循环利用,还原温度控制在 700°C ~ 850°C 。由于生球未经过焙烧,还原后的干燥球仅由松散的超细还原铁粉和二氧化硅组成,经破碎、轻度细磨(-0.028 mm > 80%)及磁选(Magnetic separation, MS, 磁场强度 100 mT)去除二氧化硅后,即可获得超细还原铁粉。

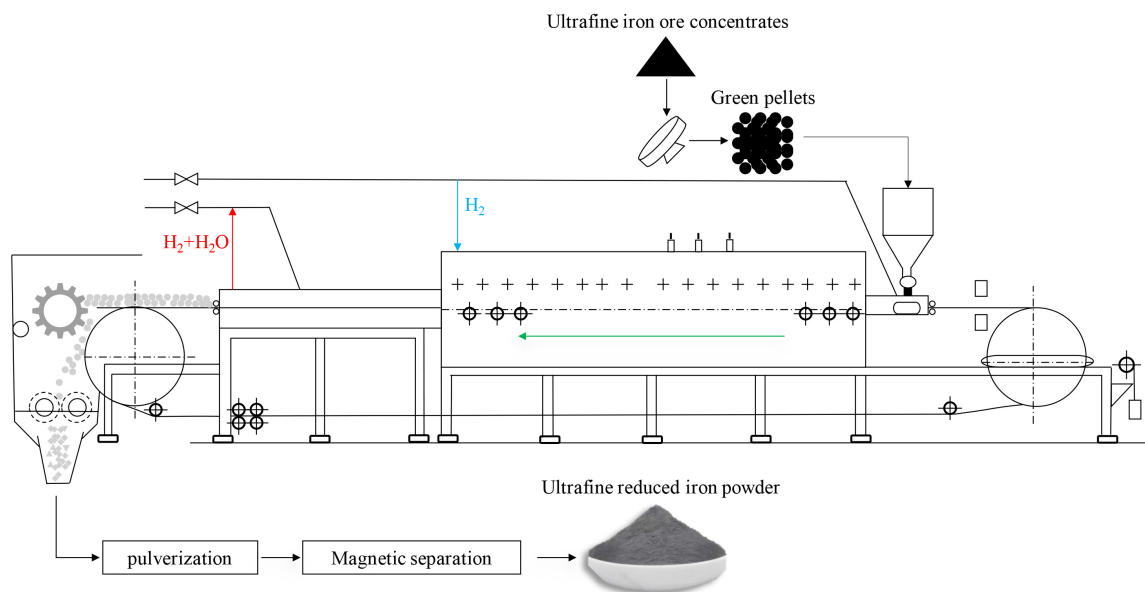


Figure 1. Technical route for the preparation of ultrafine reduced iron powder

图 1. 制备超细还原铁粉的技术路线

2.2.2. 氢还原动力学实验

超细铁精矿球成品球与干燥球的氢还原动力学实验在 101.3 kPa 下进行, 实验装置由气体流量控制器、管状反应床和称重设备组成。具体操作如下: 将 50 ± 1 g 的球团装入直径为 60 mm 的吊篮中, 吊篮悬挂于精度为 0.001 g 的天平底部, 置于直径为 86 mm 的反应管内; 反应开始前, 通入流量为 7 ± 0.2 L/min 的氮气作为保护气; 反应管以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速率升至指定温度(700°C 、 750°C 、 800°C 、 850°C)并保温; 随后将氮气替换为纯氢气(流量 7 ± 0.2 L/min)通入反应床, 记录球团失重数据; 还原反应完成后, 停止通入氢气, 继续通入氮气直至反应管温度降至 50°C 以下, 取出球团进行后续检测。

球团还原度随时间变化曲线通过实验过程中的球团质量变化绘制, 绘制过程中忽略其他组分的影响, 将全部失重视为铁氧化物还原, 依据 GB/T 24189-2024 规定的方法计算还原度, 以质量分数(%)表示。

2.2.3. 检测与表征

采用德国布鲁克公司生产的 D8 ADVANCE 型 XRD 仪进行相结构组成分析, 测试角度范围为 $5^\circ\sim 85^\circ$; 通过 Sigma 500 场发射扫描电子显微镜观察样品微观形貌; 使用 Bettersize2600 激光粒度分布仪采用湿法检测还原铁粉的粒度组成; 依据 GB/T 223.7-2002 测定还原铁粉的纯度(金属 Fe 的质量分数)。

3. 实验结果与讨论

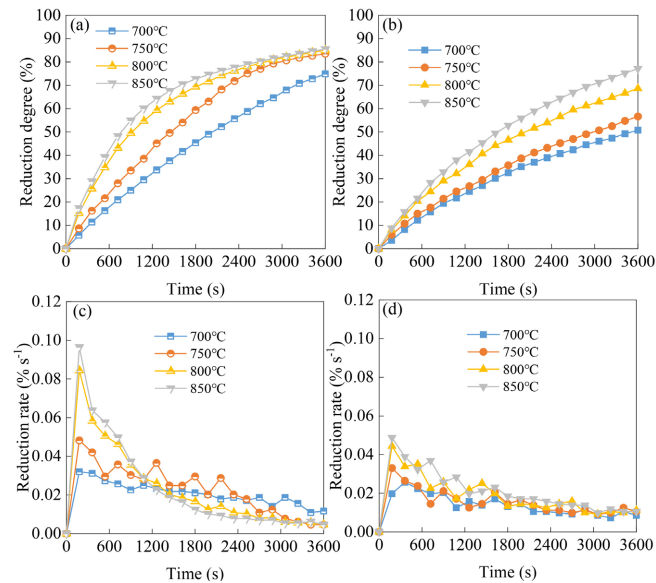
3.1. 超细铁精矿干燥球氢还原特性

3.1.1. 还原特性曲线

不同温度下超细铁精矿干燥球与成品球氢还原度及还原速率随时间变化曲线如图 2 所示, 由图 2 可知, 随着还原温度的升高, 超细铁精矿干燥球达到反应完全所需的时间显著缩短。在 750°C 和 850°C 条件下, 还原 60 min 时干燥球的氢还原度相近, 均约为 84%; 而成品球在相同温度下的还原度分别为 56.6% 和 77.1%, 存在明显差异。这表明, 在相同还原时间内, 超细铁精矿干燥球的氢还原度和还原速率显著高于成品球。

当还原温度高于 750°C 后, 干燥球与成品球的还原度差异进一步扩大, 其原因在于两者的还原相结构不同: 未经过焙烧的干燥球主要由松散的磁铁矿构成, 而成品球则由赤铁矿连晶构成, 松散的磁铁矿颗

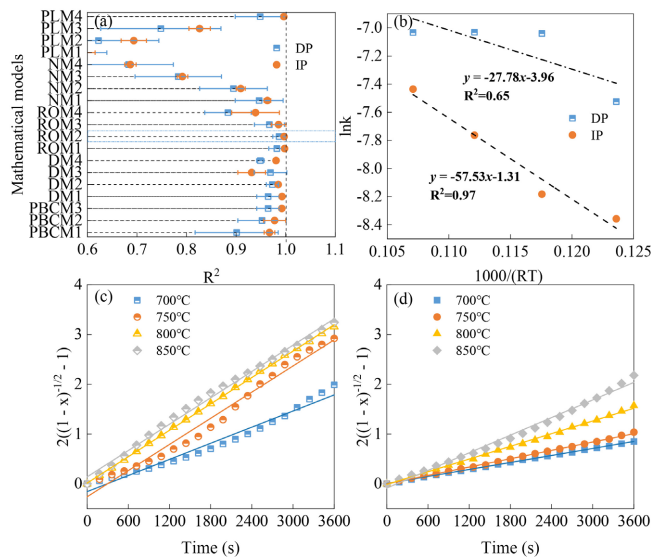
粒结构可增大与还原气体的接触面积,从而显著提升还原速率。此外,浮氏体的还原属于成核控制过程,其还原难度较大且氧损失最高,这导致干燥球氢还原后期的还原速率显著降低。



(a) 不同温度下超细铁精矿干燥球氢还原度随时间变化曲线; (b) 不同温度下超细铁精矿成品球氢还原度随时间变化曲线; (c) 不同温度下超细铁精矿干燥球氢还原速率随时间变化曲线; (d) 不同温度下超细铁精矿成品球氢还原速率随时间变化曲线。

Figure 2. Time varying curves of hydrogen reduction degree and reduction rate of dried pellets and indurated pellets made from ultrafine iron ore concentrate under different temperatures
图 2. 不同温度下超细铁精矿干燥球与成品球氢还原度与氢还原速率随时间变化曲线

3.1.2. 还原活化能



(a) 最概然机理函数的 R^2 值; (b) 拟合活化能; (c) 超细铁精矿干燥球 ROM2 模型机理函数与时间拟合图形; (d) 超细铁精矿球团 ROM2 模型机理函数与时间拟合图形。

Figure 3. Selection of the reduction model and the reduction of the activation energy
图 3. 还原模型的选择与还原活化能

通过不同气氛和反应模型下的温度线性拟合,选取 R^2 平均值最优的最概然机理函数,结果如图 3 所示,由图 3 可知,ROM2 模型拟合超细铁精矿干燥球的 R^2 平均值最接近 1,是其氢还原反应的最适宜机理函数。基于 ROM2 模型计算得出,超细铁精矿成品球氢还原反应活化能 E_a 为 57.53 kJ/mol,而干燥球的活化能 E_a 仅为 27.78 kJ/mol,约为成品球的 1/2,进一步证明超细铁精矿干燥球的还原反应更易进行。干燥球还原活化能线性拟合 R^2 值较低,主要与 700℃ 时干燥球的还原特性相关,该温度下反应速率常数的 k 值过低,导致拟合效果欠佳。

3.1.3. 还原相组成结构

超细铁精矿干燥球在 700℃ 下氢还原不同时间后的 XRD 相结构组成如图 4 所示,由图 4 可知,随着还原时间的延长,磁铁矿相峰和浮氏体相峰的峰值强度显著降低,铁相峰的峰值强度显著增加,还原 60 min 时铁相峰强度达到最高,剩余磁铁矿和浮氏体相峰强度较低,表明还原反应持续进行,铁氧化物不断转化为金属铁。

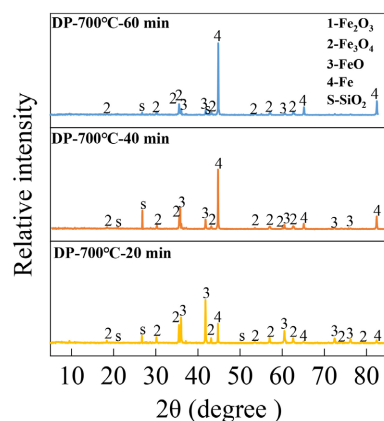


Figure 4. XRD phase structure composition and structure of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate after hydrogen reduction at 700℃ for different durations

图 4. 超细铁精矿干燥球 700℃ 氢还原不同时间后的 XRD 相结构组成

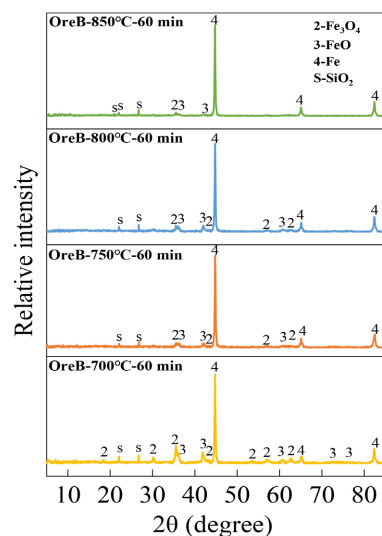


Figure 5. XRD phase structure composition and structure of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate after 60 min hydrogen reduction at different temperatures

图 5. 超细铁精矿干燥球不同温度下氢还原 60 min 后的 XRD 相结构组成

不同温度下干燥球氢还原 60 min 后的 XRD 相结构组成如图 5 所示, 由图 5 可知, 可知无论还原温度高低, 干燥球还原后均残留少量磁铁矿相和浮氏体相, 这与还原度未达到 100% 密切相关。不同温度下干燥球还原 60 min 经磁选后的 XRD 相结构组成如图 6 所示, 由图 6 可知, 磁选后二氧化硅相峰的峰值强度显著降低, 但仍存在微量低强度的磁铁矿相和浮氏体相。

超细铁精矿干燥球不同温度下氢还原 60 min 后的光学矿相如图 7 所示, 由图 7 可知, 干燥球还原后形成的铁粉结构松散, 基本不形成连晶; 随着还原温度升高, 内部多边形磁铁矿相和浮氏体相结构明显减少, 二氧化硅相呈片状嵌布在还原铁粉晶粒间; 高温下, 铁氧化物因氧脱除发生晶粒崩解, 使还原铁粉呈现更微细的点状结构。此外, 微细铁相包裹浮氏体相的结构, 导致浮氏体难以与氢气充分接触完成脱氧, 这也印证了前文 XRD 分析中还原后期还原速率降低、还原度未达 100% 的结论。

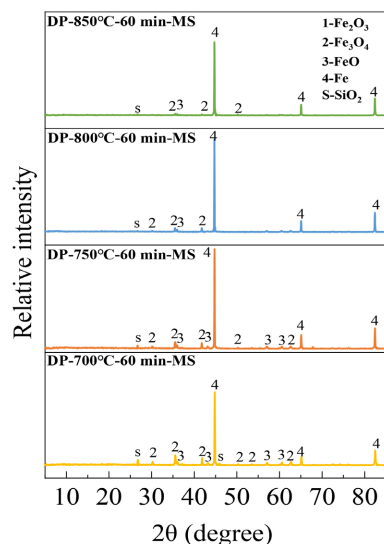


Figure 6. XRD phase composition and structure of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate after 60 min hydrogen reduction and magnetic separation at different temperatures
图 6. 不同温度下超细铁精矿干燥球氢还原 60 min 磁选后的 XRD 相结构组成

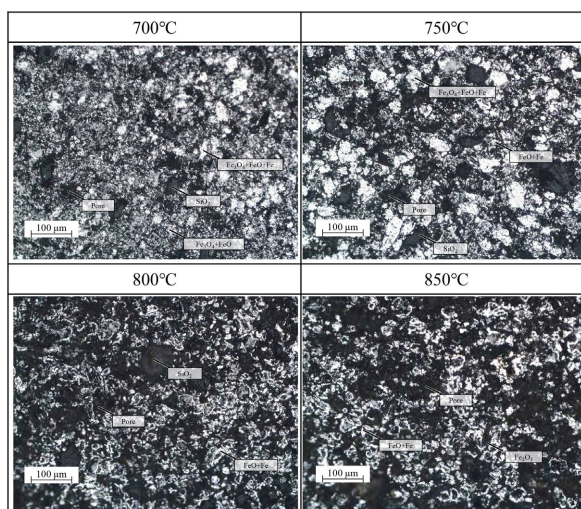


Figure 7. Optical mineral phases of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate after 60 min hydrogen reduction at different temperatures
图 7. 超细铁精矿干燥球不同温度下氢还原 60 min 后的光学矿相

3.2. 超细还原铁粉的制备与表征

超细铁精矿干燥球在 850℃ 下氢还原 150 min 的还原度与还原速率曲线如图 8 所示, 由图 8 可知, 该温度下干燥球的还原度易从 0% 提升至 80%, 但进一步提升至 95% 以上难度较大; 还原 150 min 时, 干燥球的还原度达到 99.92%, 接近完全还原。

干燥球在 850℃ 下还原 150 min 后, 未磁选与磁选所得还原铁粉的 XRD 相结构组成如图 9 所示, 由图 9 可知, 磁选可有效降低还原铁粉中二氧化硅相峰的峰值强度, 显著提升产品纯度。

磁选后所得还原铁粉的化学成分如表 3 所示, 其 Fe 含量为 98.06%, 纯度较高, 主要杂质为 SiO₂ (0.82%), Ca、Mg、Al、P、S 等杂质含量均较低, 符合还原铁粉的质量要求。

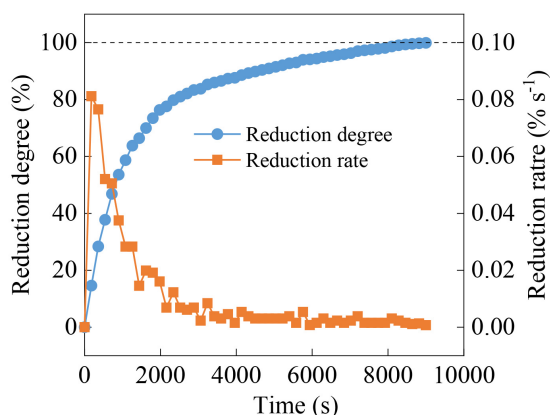


Figure 8. Reduction degree and reduction rate of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate after hydrogen reduction at 850℃ for 150 min

图 8. 超细铁精矿干燥球 850℃ 下氢还原 150 min 还原度与还原速率曲线

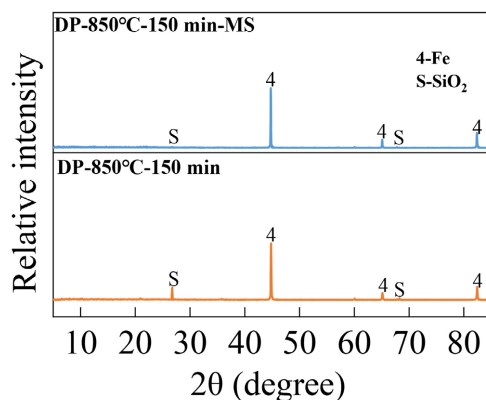


Figure 9. XRD phase structure composition of reduced iron powder obtained after hydrogen reduction of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate at 850℃ for 150 min before and after magnetic separation

图 9. 超细铁精矿干燥球在 850℃ 下氢还原 150 min 后所制得还原铁粉未磁选和磁选后的 XRD 相结构组成

Table 3. Chemical composition (in wt.%) of reduced iron powder obtained after 150 min hydrogen reduction and magnetic separation at 850℃ of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate

表 3. 超细铁精矿干燥球在 850℃ 下氢还原 150 min 后磁选所制得还原铁粉的化学成分(质量分数)

Fe	SiO ₂	Ca	Mg	Al	P	S
98.06	0.82	0.09	0.22	0.02	0.01	<0.01

还原铁粉的粒度分布如图 10 所示, 其中 $D_{50} = 18.48 \mu\text{m}$, $D_{90} = 36.74 \mu\text{m}$, 表明所制备的还原铁粉具有典型的超细粒度特征, 可满足超细还原铁粉的应用要求。

超细铁精矿干燥球氢还原前磁铁精粉与还原后磁选所得铁粉的形貌如图 11 所示。由图 11 可知, 还原前磁铁精粉表面光滑, O 元素强度较高; 还原所得铁粉表面形成“绒毛”状结构, O 元素强度显著降低, 表明铁氧化物已被有效还原。“绒毛”状结构的形成, 推测与铁粉在 850°C 下还原铁粉发生轻微烧结相关[7]。

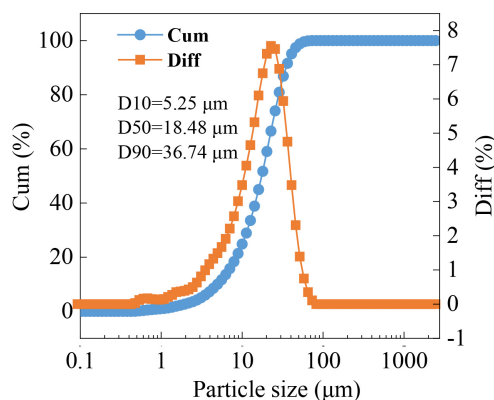


Figure 10. Particle size distribution of reduced iron powder obtained after 150 min hydrogen reduction and magnetic separation at 850°C of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate
图 10. 超细铁精矿干燥球在 850°C 下氢还原 150 min 后磁选所制得还原铁粉的粒度分布

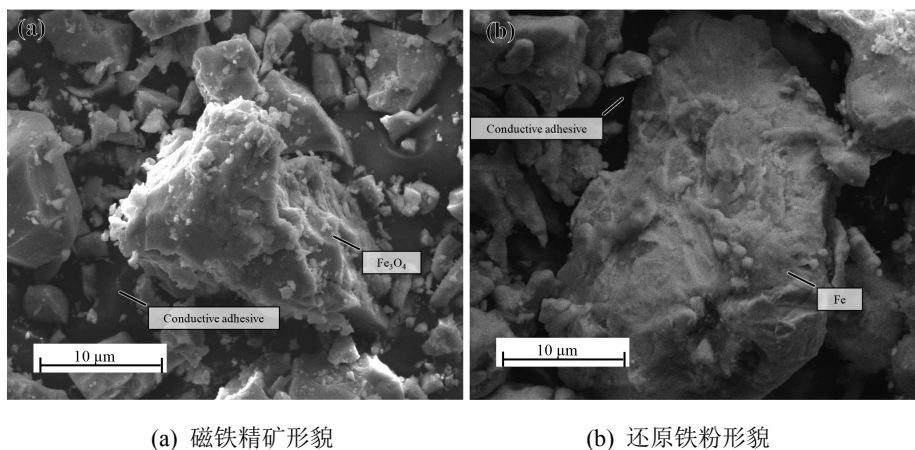


Figure 11. Morphology of magnetite concentrate before hydrogen reduction and reduced iron powder obtained after 150 min hydrogen reduction and magnetic separation at 850°C of dried pellets made from ultrafine iron ore concentrate

图 11. 超细铁精矿干燥球氢还原前磁铁精矿与 850°C 下氢还原 150 min 后磁选所制得还原铁粉形貌

4. 结论

1) 超细铁精矿干燥球的还原性显著优于成品球, 其氢还原反应活化能(27.78 kJ/mol)约为成品球(57.53 kJ/mol)的 $1/2$, 还原反应更易进行, 相同还原条件下干燥球的还原度和还原速率更高。

2) 超细铁精矿干燥球氢还原过程中, 浮氏体的还原为成核控制过程, 难度较大, 导致还原后期还原速率显著降低; 还原后的铁粉结构松散, 二氧化硅呈片状散布在铁粉晶粒间, 磁选可有效去除二氧化硅杂质, 但无法完全消除未还原的微量磁铁矿和浮氏体。

3) 超细铁精矿干燥球在 850℃下氢还原 150 min 时, 还原度达到 99.92%, 经磁选后制得的超细还原铁粉纯度为 98.06%, 粒径 D50 = 18.48 μm, 符合超细还原铁粉的质量标准。

4) 氢气直接还原超细铁精矿干燥球后再磁选制备超细还原铁粉技术, 具有降低超细还原铁粉生产成本的潜力, 可为超细铁精矿的资源化利用提供新的技术路径。

基金项目

安徽省重大产业创新计划资助项目(AHZDCYCX-LSDT2023-01)。

参考文献

- [1] Wu, J., Xu, B., Zhou, Y., Dong, Z., Zhong, S. and Jiang, T. (2023) A Novel Process of Reverse Flotation-Hydrogen Reduction for Preparation of High-Purity Iron Powder with Superior Magnetite Concentrate. *Separation and Purification Technology*, **307**, Article ID: 122784. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122784>
- [2] Gan, M., Guo, E., Li, H., Cao, Y., Fan, X., Ji, Z., *et al.* (2024) Production of Ultrafine Iron Powder by Low-Temperature Hydrogen Reduction: Properties Change with Temperature. *Journal of Iron and Steel Research International*, **31**, 2645-2654. <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01228-z>
- [3] Yao, G., Li, Y., Guo, Q., Qi, T. and Guo, Z. (2021) Preparation of Reduced Iron Powder for Powder Metallurgy from Magnetite Concentrate by Direct Reduction and Wet Magnetic Separation. *Powder Technology*, **392**, 344-355. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.023>
- [4] Wu, J.T., Xu, B., Dong, Z.L., Zhou, Y.J., Xu, L.P., Li, G.H., *et al.* (2023) Preparation of High-Purity Reduced Iron Powder by Höganas Process from Ultra-Pure Magnetite Concentrate. *Journal of Central South University*, **30**, 3006-3020. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5427-0>
- [5] Wang, C.L., Yang, H.F., Jiang, B.P., Zhang, J.L., Lu, L.F. and Tang, Q.Y. (2014) Recovery of Iron from Lead Slag with Coal-Based Direct Reduction Followed by Magnetic Separation. *Advanced Materials Research*, **878**, 254-263. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.878.254>
- [6] Jikar, P.C. and Dhokey, N.B. (2021) Overview on Production of Reduced Iron Powder from Mill Scale Waste. *Materials Today: Proceedings*, **44**, 4324-4329. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.552>
- [7] Sista, K.S., Dwarapudi, S. and Nerune, V.P. (2019) Direct Reduction Recycling of Mill Scale through Iron Powder Synthesis. *ISIJ International*, **59**, 787-794. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2018-628>