

引文格式: 苏思羽, 刘燕, 刘珈维, 等. 不同生物质焦-高铁赤泥复合球团热还原对比研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(1): 155-164.

SU Siyu, LIU Yan, LIU Jiawei, et al. Comparative study on thermal reduction of different biomass coke high iron red mud composite pellets[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(1): 155-164.

不同生物质焦-高铁赤泥复合球团热还原对比研究

苏思羽¹, 刘 燕^{1,2}, 刘珈维¹, 蔡震雷², 张海明², 张延安^{1,2}

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 多金属共生矿生态化利用教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

[摘 要] 基于生物炭相较于传统煤炭能源具有含氢量多、含碳量少、含氧量多、含硫量低等特点, 本文研究了三种生物质焦-高铁赤泥复合球团的热还原机理, 对比了三种生物质焦对球团金属化率、物相结构、微观形貌以及孔径的影响, 得出以下结论。麦麸焦在复合球团金属化率、物相结构方面比其他两种生物质焦复合球团均有一定的优势, 在1100℃下热还原2 h, 金属化率达到86.5%, 比冶金焦提高5.2%, 远高于相同条件下松木焦复合球团与玉米焦复合球团; 麦麸焦-高铁赤泥复合球团主要物相组成为金属铁(44.3%)、碳(10.6%)、钙铝黄长石($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)以及霞石(NaAlSiO_4), 适用于涡流熔融还原炼铁工艺; 麦麸焦-高铁赤泥复合球团气孔结构更为均匀, 孔径约为2~4 nm, 比表面积较大, 整体结构较好, 表面金属化程度更高, 残余杂质较少。该研究结果对实现生物质资源高效利用具有重要的参考价值。

[关键词] 高铁赤泥; 麦麸焦; 玉米秸秆焦; 松木焦; 复合球团; 金属化率; 气孔分布

[中图分类号] TF821; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)01-0155-10

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.01.017

0 引言

随着现代农林业的发展, 生物质的无污染处理成为一个热点话题, 即生物质的回收再利用。然而, 由于我国可开发的生物质资源大多为农作物秸秆、林业加工废弃物等资源, 其综合利用率极低, 有效利用率仅占总体资源量的10%左右^[1]。将生物质作为原料, 置于缺氧或无氧环境中, 通过热解等一系列化学反应得到的产物, 被称为生物炭。目前,

生物炭已经在热电领域、冶金工程行业、工业废气废水净化方面有广泛的应用, 成为煤的一大重要替代品。相较于传统煤能源, 生物炭的优点十分明显, 其含氢量多, 含碳量少, 含氧量多, 含硫量低, 密度小且挥发组分析出明显^[2-4]。李兆龙等^[5]以小麦秸秆和玉米秸秆为原材料, 在温度为400℃下热解制得秸秆炭, 并探究了不同热解温度与时间对生物炭改善土壤肥力效果的影响。Priyabrata等^[6]总结了生物炭的制备与利用现状, 并通过生物炭与传统焦炭吸附性与还原性的对比, 印证了生物炭的经济可行性。Kambo等^[7]对传统热解方法进行改良, 提出了水热工艺, 开发出性能更好的水热生物炭, 并给出了两种工艺之间的差异与联系。

目前对于生物质回收再利用的研究主要有生物质直接热还原氧化铁球团以及还原赤泥方面的研究。Guo等^[8]研究了添加生物质对氧化铁颗粒还原的影响, 以及还原动力学的变化, 得出添加质量分数2%的生物质可增加氧化铁球团的孔隙率, 促

[收稿日期] 2025-06-25 [修订日期] 2025-08-09

[录用日期] 2025-08-13 [出版日期] 2026-02-01

[第一作者] 苏思羽(2000—), 女, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 主要从事固废回收再利用研究。

[通信作者] 刘燕(1970—), 女, 湖南湘乡人, 教授, 博士生导师, 主要从事反应器的物理数值模拟、冶金反应工程、化学工程与技术研究。

[基金项目] 辽宁省自然科学基金联合基金面上项目(No. 2023-MSBA-114); 第九届青托工程项目(No. 2023QNRC001); 鞍钢绿色资源科技有限责任公司技术开发项目(No. AGLYKJZLZX-2024-01)。

进CO进入球团的速率及CO₂溢出,从而加快氧化铁球团的还原速度,还原时间缩短了3%,能够有效降低能耗。然而,多数研究仅针对于生物质-氧化铁复合球团直接热还原,对于生物质热解后得到的生物质炭在氧化铁球团作为还原剂的研究较少。生物质炭直接还原可有效避免生物质热解产生的烟气对环境的影响,以及焦油附着对设备的污染损害。因此,本论文开展生物质炭还原高铁赤泥复合球团的研究,对比麦麸炭、玉米秸秆炭和松木炭在冶金领域的性能优劣,从而为工业应用生物质炭的选择提供科学参考依据。

1 试验介绍

1.1 试验原料

本文采用的试验原料为高铁赤泥(几内亚)、膨润土、铁精粉、冶金焦、玉米秸秆焦、松木焦、麦麸焦。原料在造球前需要经过预处理,压碎后置于球磨机中研磨,用筛子筛分至200目(0.074 mm)以下。不同生物炭中固定碳含量见表1。

表1 四种试验用焦中固定碳含量(质量分数)

Table 1 Fixed carbon content of four types of experimental coke (mass fraction) %

试验用焦	固定碳含量
玉米秸秆焦	42.08
松木焦	84.92
麦麸焦	48.62
冶金焦	85.51

1.2 复合球团的制备

将筛分好的原料放入温度110℃的干燥箱中干燥2 h,干燥后的原料按照表2的配比进行混料,其中铁精粉的作用为调整复合球团全铁含量至55%左右,膨润土总质量分数约为3%,作为粘结剂便于造球。将混匀的原料少量多批次地倒入圆盘造球机中进行造球,期间洒入适宜的水,得到生球。然后用6 mm和12 mm的筛子筛出生球,粒径小于6 mm的生球倒入圆盘造球机中继续长大;粒径大于12 mm的不规则生球破碎后倒入圆盘造球机中继续造球;粒径大于12 mm的规则生球筛选出,等待球团数量足够多时,清空圆盘造球机内原料,加入球团继续滚动,增加其疲劳强度。造球结束后,将合格的生球放入100℃烘箱中烘干12 h。

1.3 复合球团的还原试验

将干燥后的复合球团取出,置于管式炉中,在1 100℃下还原2 h。还原过程持续通入流速为0.2 m³/h的氩气保证试验气氛稳定^[9]。管式炉上方连接气体分析仪,当气体分析仪检测不到CO₂含量变化后,热还原结束,此时停止加热,继续通入Ar至球团随炉管冷却至室温后取出,以防止球团表面接触氧气再次氧化。管式炉试验装置见图1。

表2 制团原料质量配比

Table 2 Mass ratio of raw materials for preparing pellets

试验组	高铁赤泥/g	铁精粉/g	膨润土/g	生物质焦/g	球团配碳比
麦麸焦组	25.00	29.90	1.63	28.79	1.2
松木焦组	25.00	29.90	1.63	14.27	1.2
玉米秸秆焦组	25.00	29.90	1.63	24.92	1.2
冶金焦组	25.00	29.90	1.63	14.25	1.2



图1 管式炉试验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram of tube furnace

1.4 还原后复合球团的检测与成分计算

1.4.1 化学成分分析

采用全谱直读等离子体发射光谱仪(ICP,美国

利曼-prodigy7 plus)测定还原后球团的化学成分,具体方法如下:将反应后球团磨碎后充分溶解在稀酸中,并加入水稀释,将铁元素浓度控制在 10 mg/L 以内。取上层清液 10~15 mL,元素标样后进行测试全铁含量(M_{Fe})与金属铁含量(T_{Fe}),测试三次,取其平均值作为球团还原后的元素含量。然后采用式(1)计算球团的金属化率,记为 MD。

$$MD = \frac{M_{Fe}}{T_{Fe}} \times 100\% \quad (1)$$

1.4.2 物相结构 XRD 分析

采用 X 射线衍射仪(XRD,德国布鲁克 D8 ADVANCE)分析球团还原后的物相,具体方法如下:将球团磨碎至 200 目(0.074 mm),取粉末制成表面平整的片状物块,放置于样品台上,测试电压 40 kV,测试电流 40A,扫描角度为 10° ~ 90° ,记录球团的衍射光谱,再利用 HighScore 软件分析球团物相组成。

1.4.3 微观形貌 SEM 分析

利用扫描电镜(SEM)观察反应后球团横截面的微观形貌,采取分析设备为扫描电子显微镜(日立 SU3800)。将磨碎后球团样品固定于贴有导电胶的托盘上,对其表面进行 1.5 min 的喷金处理,增强其导电性。将处理好的样品置于扫描电子显微镜中,于真空环境中、加速电压 8kV 条件下,采用放大倍率 200×~500× 观察磨碎后球团表面微观结构,对比其气孔密度与气孔大小,从而根据孔径分析得出更适宜反应的焦种类。

1.4.4 比表面积 BET 分析

取磨碎至粒度为 200 目的球团粉末 0.5 g,利用比表面积物理吸附仪(美国麦克 ASAP2020)进行 BET 分析。在温度为 160°C 的真空条件下脱气处理 7 h,然后再以氮气作为吸附质,在温度为 77 K 的条件下进行恒温吸附测定。测定的曲线分为两个过程,样品在分压比 $P/P^0 \approx 0$ 下开始进行氮气吸附过程,至 $P/P^0=1$ 时吸附测试完毕得出恒温吸附曲线,然后进行反向脱附过程至 $P/P^0 \approx 0$ 得到恒温脱附曲线。对比标准吸脱附曲线,得出球团内部孔容孔径,及气孔种类,从而判断不同复合球团反应进行的难易程度。

2 结果与分析

2.1 不同生物炭还原后复合球团的金属化率

表 3 为不同种类生物质炭热还原后复合球团金属化率汇总表。根据表 3 对比得出,麦麸焦-高铁赤

泥复合球团金属化率最高,为 86.5%,冶金焦-高铁赤泥复合球团次之,金属化率为 81.3%,玉米秸秆焦-高铁赤泥复合球团金属化率最小,为 58.8%。

表 3 热还原后不同种类复合球团 T_{Fe} 、 M_{Fe} 、金属化率汇总表

Table 3 Summary of T_{Fe} , M_{Fe} and metallization rate of different types of composite pellets after thermal reduction

复合球团原料种类	$T_{Fe}/\%$	$M_{Fe}/\%$	金属化率/%
玉米秸秆焦	44.4	26.1	58.8
松木屑焦	49.9	33.1	66.3
麦麸焦	53.9	46.6	86.5
冶金焦	54.6	44.4	81.3

由于生物质焦来源主要为木质素,而焦油来源为半纤维素与纤维素^[10],玉米秸秆表层结构为半纤维素与木质素物质混合覆盖在纤维素上^[11,12],而半纤维素与纤维素热解产生的焦油附着于还原性焦的表面与内部,对其气孔结构产生一定堵塞影响^[13,14],比表面积较小。还原速度与还原剂的比表面积呈正比,故可认为玉米秸秆焦相同时间内还原速度较慢,相同时间内对于 Fe_2O_3 还原效果差,反应球团金属化率较低。麦麸相比玉米秸秆生物质焦的产率要高,且其半纤维素与纤维素大多存在于内部^[15],产生的焦油与还原性气体从内部逸散,故其孔隙较多,比表面积较大,还原速率快,相同时间内其还原效果较好,金属化率较高。松木屑焦相对于麦麸焦与玉米秸秆焦具有较为适中的气孔结构,故其金属化率较好。

2.2 不同生物质炭还原后复合球团 XRD 分析

图 2 为不同生物质炭还原后复合球团 XRD 图。由图 2 可知,复合球团热还原后的物相主要由 Fe_2O_3 、金属 Fe 及 SiO_2 组成,其中冶金焦复合球团与麦麸焦 Fe 衍射峰强度较好,说明其物相组成主要为金属 Fe,金属化效果较好;而松木屑复合球团与玉米秸秆复合球团的衍射峰主要由 Fe_2O_3 与 Fe 共同组成,Fe 峰衍射强度较差,说明其球团金属化效果较差。

表 4 为不同生物质炭还原后复合球团各组分 XRF 检测含量表。由表 4 及图 2 可知,还原后球团主要成分组成为 Fe、C、 Al_2O_3 、 SiO_2 组成。结合球团含量及 XRD 衍射峰分析可知,球团内主要由金

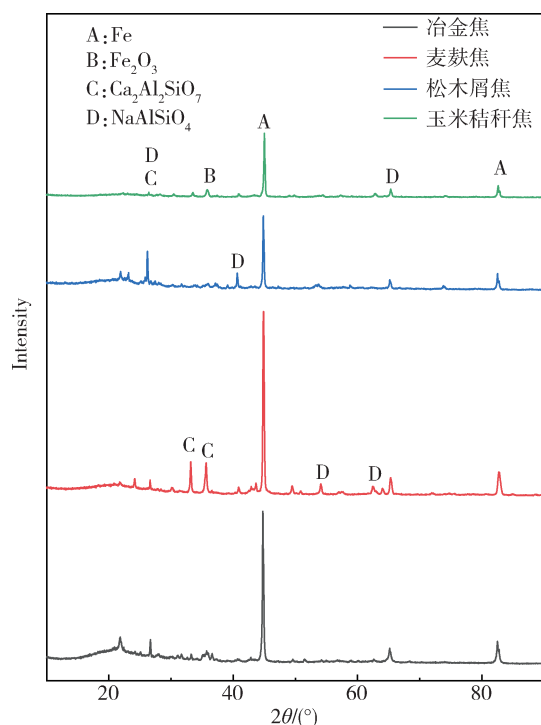


图2 还原后不同种类复合球团XRD对比图

Fig. 2 Comparison of XRD patterns of different types of composite pellets after reduction

属Fe相构成,而氧化钠与氧化铝、氧化硅高温下反应生成较稳定的钙铝黄长石($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)与霞石(NaAlSiO_4),球团熔融后由于其密度小于铁水,易于

表4 不同生物质炭还原后复合球团ICP检测结果
(质量分数)

Table 4 ICP detection results of different types of composite pellets after reduction (mass fraction) %

生物质炭类型	Na_2O	Al_2O_3	MgO	SiO_2	CaO	K_2O	Fe	C	其他
冶金焦	1.8	15.7	0.9	18.2	1.8	0.5	35.8	15.7	9.6
麦麸焦	1.4	13.1	1.2	17.7	1.4	1.0	44.3	10.6	9.3
玉米焦	1.8	11.5	1.2	23.3	2.0	0.7	40.4	6.7	12.4
松木焦	1.3	11.0	0.8	11.9	3.0	0.6	35.3	28.3	7.8

上浮形成渣与铁相分离^[16]。根据XRF检测表可知,麦麸焦中 Na_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 摩尔配比更趋近于完全生成霞石,且球团内Fe含量较多,C配比适中,适用于作为涡流熔融还原炼铁原料使用^[17]。

2.3 不同种类还原后复合球团扫描电镜分析

为了进一步表征不同生物质炭还原后复合球团物相结构,采用扫描电镜观察各还原后球团微观形貌。图3(a)—(d)分别为不同生物质炭还原后复合球团的扫描电镜图。由图3(a)—(d)可看出,麦麸焦复合球团表面结构最为平整,气孔分布与孔径较为均匀;玉米焦表面结构次之,气孔大小不匀;松木焦与冶金焦表面较为粗糙,气孔分布与气孔孔径均不匀。

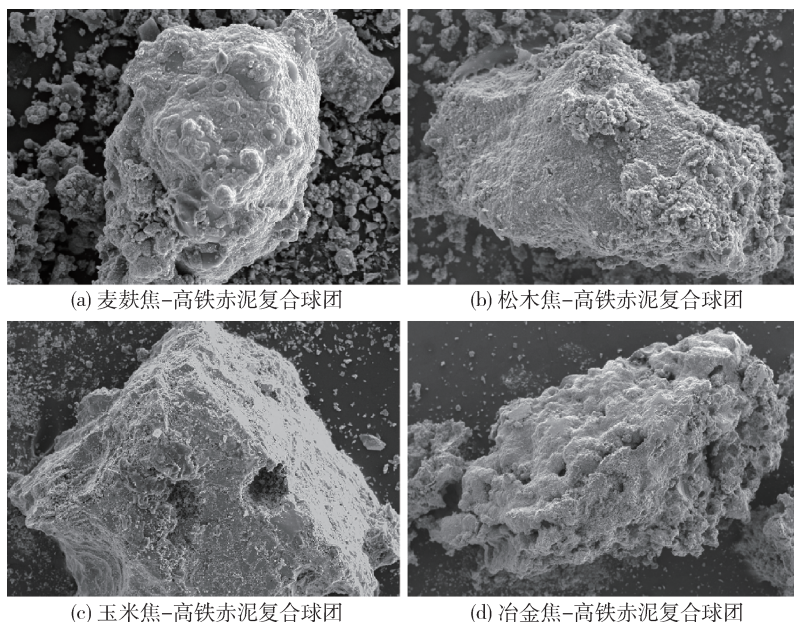


图3 四种不同生物质炭还原后复合球团扫描电镜图(放大倍率250x)

Fig. 3 Scanning electron microscopy images of four different reduced composite pellets (magnification factor 250x)

由于气-固反应较固-固反应更容易发生,故反应初期焦炭与 Fe_2O_3 产生 CO_2 短时间内再次与焦炭反应生成还原性气体 CO ,构成球团内部还原性气体氛围。 CO_2 与 CO 气体短时间大量逸出并参与反应,使得球团内部形成气体孔道,气体孔道的分布均匀度与孔径大小可印证反应进行的充分程度^[8]。孔道分布均匀证明球团内各组分充分均匀反应,而孔道集中分布说明气体集中逸散速率较快,球团内部存在部分未完全金属化组分^[18]。由图3可知,麦麸焦表面气孔分布最为均匀,且气孔孔径较为平均,其整体结构较为完整,能够观察到较明显的金属纹路。冶金焦表面气孔孔径较为平

均,但气孔分布部分不均,说明其金属化率较好。而松木焦表面存在堆砌状焦炭,玉米焦表面存在聚集气孔,说明其内部金属化不均匀,金属化效果不佳。

2.4 不同生物质炭还原后复合球团BET分析

为进一步了解使用生物质与生物质焦直接热还原高铁赤泥提炼铁过程各复合球团表面结构受到的影响程度及表现,用氮气代替孔隙结构中的气体,得到不同生物质炭还原后复合球团等温吸脱附曲线,对各个还原后复合球团的比表面积和总孔体积进行量化分析。图4(a)—(d)分别为不同生物质炭还原后复合球团的等温吸脱附曲线。

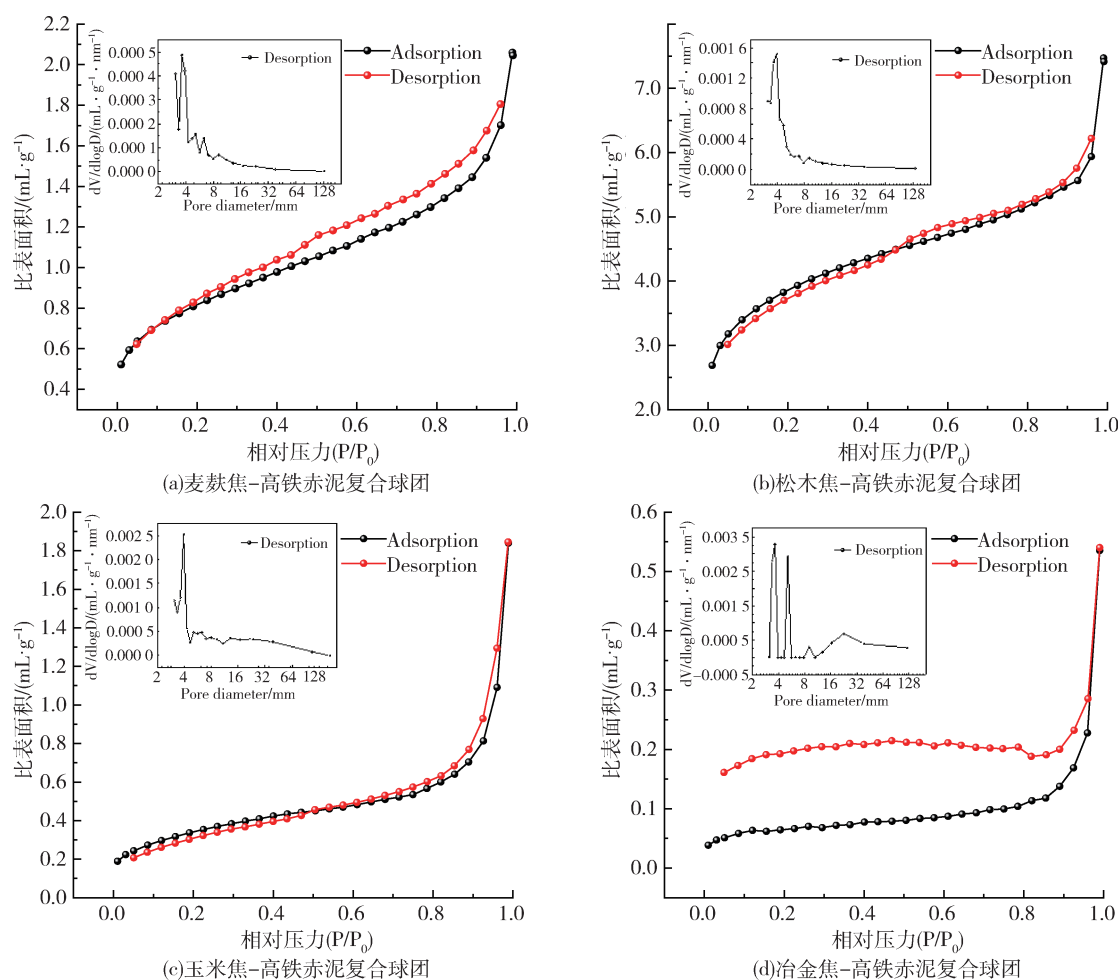


图4 四种不同生物质炭还原后复合球团BET曲线

Fig. 4 BET curves of four different reduced composite pellets

在反应过程中,还原后气体产物 CO_2 与二次反应产生的还原性气体 CO 共同构成了复合球团中的气孔孔道。图4中四种复合球团的吸脱附曲线均为

I型曲线与IV型曲线的结合,表明其结构中微孔结构与中孔结构共存^[19,20],微孔结构指孔径小于2 nm的孔隙;中孔结构(即介孔结构)指孔径介于2~

50 nm 之间的多孔体系。而球团孔径的大小在 2 ~ 4 nm 范围,说明其复合球团存在大量的介孔结构^[18]。微孔结构较小,说明产生微孔通道的气体处于产生并参与反应这一过程,即气体为 CO,故微孔结构有利于未反应核中还原性气体 CO 的内扩散^[21],而介孔结构为产物气体 CO₂短时间大量逸散的通道,故均匀的微孔结构与大量的介孔结构有助于球团完全金属化。由图 4 可知,松木焦与麦麸焦复合球团比表面积较大,分别为 0.001 4 mL/g·nm 与 0.000 5 mL/g·nm,而玉米焦与冶金焦复合球团比表面积较小,仅为 0.000 035 mL/g·nm 与 0.000 15 mL/g·nm,说明松木焦与麦麸焦单位时间内产生的还原性气体数量较多,气体集中逸散程度较快。而麦麸焦对比松木焦在 2 nm 左右具有更多的微孔,说明麦麸焦内扩散过程更好,球团内部金属铁的还原反应更充分,金属化效果更好。

3 结论

本文使用麦麸焦、松木焦、玉米焦三种生物质焦作为还原剂,对高铁赤泥复合球团还原提炼金属铁的相关性能进行研究,得到以下主要结论。

1) 在 1 100℃,热还原 2 h 的条件下,使用麦麸焦作为还原剂提炼,高铁赤泥球团金属化率最优,为 86.5%,比冶金焦提高 5.2%,远高于相同条件下松木焦复合球团与玉米焦复合球团。

2) 还原后麦麸焦-高铁赤泥复合球团主要物相组成为金属铁(44.3%)、碳(10.6%)、钙铝黄长石(Ca₂Al₂SiO₇)以及霞石(NaAlSiO₄),相比较其他两种生物质焦-高铁赤泥复合球团,麦麸焦-高铁赤泥复合球团更适用于涡流熔融还原分离铁。

3) 根据不同生物质炭还原后复合球团微观结构分析可知,麦麸焦-高铁赤泥复合球团气孔结构更为均匀,表面金属化程度更高,残余杂质较少;麦麸焦-高铁赤泥复合球团气孔结构主要为微孔与大量介孔结构,其气孔分布于 2 ~ 4 nm 范围,分布均匀;麦麸焦-高铁赤泥复合球团比表面积较大,球团内部金属化较为完全,整体结构较好。

[参考文献]

- [1] PAN S, DU M A, Huang I, et al. Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 108: 409-421.
- [2] JIANG L, YUAN X, XIAO Z, et al. A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 126: 509-515.
- [3] CHEN W, PENG J, BI X T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 847-866.
- [4] GUO M, SONG W, BUHAIN J. Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 712-725.
- [5] 李兆龙, 张婧, 冯梦丹, 等. 热解条件对秸秆生物质炭性质的影响研究[J]. 山西化工, 2021, 41(3): 6-8, 19.
LI Zhaolong, ZHANG Jing, FENG Mengdan, et al. Study on the influence of pyrolysis conditions on the properties of straw biochar [J]. Shanxi Chemical Industry, 2021, 41(3): 6-8, 19.
- [6] PRADHAN P, MAHAJANI S M, ARORA A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review [J]. Fuel processing technology, 2018, 181: 215-232.
- [7] KAMBO H S, DUTTA A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 45: 359-378.
- [8] GUO D, CUI B, CHEN Z, et al. Biomass enhances the reduction of oxidized pellets with carbon monoxide [J]. Bioresource technology, 2021, 331: 124973.
- [9] TOKIMATSU K, YASUOKA R, NISHIO M. () Global zero emissions scenarios: The role of biomass 34 energy with carbon capture and storage by forested land use [J]. Appl Energy, 2017, 185: 1899-1906.
- [10] AKHTAR J, AMIN N S. A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2012, 16: 5101-9.
- [11] ZHANG Q, ZHANG P, PEI Z, et al. Investigation on characteristics of corn stover and sorghum stalk processed by ultrasonic vibration-assisted pelleting [J]. Renewable energy, 2017, 101: 1075-1086.
- [12] CHEN W H, YE S C, SHEEN H K. Hydrolysis characteristics of sugarcane bagasse pretreated by dilute acid solution in a microwave irradiation environment [J]. Appl. Energy, 2012, 93: 237-244.
- [13] CHANG V S, HOLTZAPPLE M T. Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity [J]. Appl. Biochem. Biotechnol, 2000, 84: 5-37.
- [14] KAN T, STREZOV V, EVANS T J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 1126-1140.
- [15] WANG Y, WU L, WANG C, et al. Investigating the influence of extractives on the oil yield and alkane production obtained

- from three kinds of biomass via deoxy-liquefaction [J]. *Bioresource technology*, 2011, 102(14): 7190–7195.
- [16] 王坤. 基于钙化-碳化法的高铁赤泥涡流熔融还原提铁过程的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021: 53–54.
- WANG K. Fundamental research on the vortex smelting reduction process for iron extraction from high-iron red mud based on the calcification-carbonization method [D]. Shenyang: Northeastern University, 2021: 53–54.
- [17] 李晓飞, 张廷安, 吕国志, 等. 高铁赤泥涡流熔融还原提铁中试扩大试验[J]. *中国有色冶金*, 2024, 53(2): 42–48.
- LI X, ZHANG T, LYU G, et al. Pilot-scale test of vortex smelting reduction for iron extraction from high-iron red mud [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2024, 53(2): 42–48.
- [18] SUN H, YING Z, CHEN X, et al. Effects of pretreatment on biochar oxidation reaction and hydrogen production in lignocellulosic biochar-assisted water electrolysis [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2025, 99: 752–760.
- [19] YU W, HU J, YU Y, et al. Facile preparation of sulfonated biochar for highly efficient removal of toxic Pb(II) and Cd(II) from wastewater [J]. *Science of the total environment*, 2021, 750: 141545.
- [20] BAI X, XING L, LIU N, et al. Humulus scandens-derived biochars for the effective removal of heavy metal ions: isotherm/kinetic study, column adsorption and mechanism investigation [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(12): 3255.
- [21] JEONG M H, LEE D H, HAN G Y, et al. Reduction-oxidation kinetics of three different iron oxide phases for CO₂ activation to CO [J]. *Fuel*, 2017, 202: 547–555.

Comparative study on thermal reduction of different biomass coke high iron red mud composite pellets

SU Siyu¹, LIU Yan^{1,2}, LIU Jiawei¹, CAI Zhenlei², ZHANG Haiming², ZHANG Ting'an^{1,2}

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Key Laboratory of Ecological Metallurgy of Multi-metal Intergrown Ores of Ministry of Education, Shenyang 110819, China)

Abstract: Based on the characteristics of biochar containing more hydrogen, less carbon, more oxygen, and lower sulfur compared with traditional coal energy, this study investigates the thermal reduction mechanism of three types of biomass char-high iron red mud composite pellets, and compares the effects of three biomass chars on metallization rate, phase structure, micromorphology, and pore size. The following conclusions were drawn. Wheat bran char exhibits superior performance in enhancing the metallization rate and optimizing the phase structure of the composite pellets compared to the other two biomass chars. After thermal reduction at 1 100°C for 2 h, the metallization rate reaches 86.5%, which is 5.2% higher than that of metallurgical coke and much higher than those of pine wood char composite pellets and corn char composite pellets under the same conditions. The main phase compositions of wheat bran char-high iron red mud composite pellets are metallic iron (44.3%), carbon (10.6%), gehlenite (Ca₂Al₂SiO₇), and nepheline (NaAlSiO₄), making them suitable for the vortex melting reduction ironmaking process. The wheat bran char-high iron red mud composite pellets possess a more uniform pore structure with a pore size of approximately 2–4 nm, a larger specific surface area, a better overall structure, a higher degree of surface metallization, and fewer residual impurities. The research results provide important reference for the efficient utilization of biomass resources.

Key words: high-iron red mud; wheat bran char; corn stalk char; pine wood char; composite pellets; metallization rate; pore size distribution