

生物质含碳球团还原过程的影响因素及其动力学行为

方书霖, 王浩, 孙武, 宋民伟, 张邹明, 王宏涛

(安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要:“双碳”背景下非高炉炼铁工艺技术开发已成为低碳冶金的重要内容。作为一种富含C、H元素的可再生能源,生物质被碳化处理后可作为转底炉含碳球团的还原介质替代原料,该项研究对进一步降低碳排放,推动含碳球团技术发展具有重要的现实意义。本文选取核桃壳、瓜子壳和花生壳三种生物质炭为还原剂制备含碳球团,研究生物质炭种类、温度和时间对含碳球团还原过程和动力学的影响,确定还原过程的动力学限制性环节。结果表明,温度对生物质含碳球团还原的影响显著,升高温度能有效促进铁氧化物还原。花生壳热解炭质地疏松、比表面积大,该结构特性展现出良好的还原性能。以花生壳生物质炭制备的球团在1100℃下还原20min后反应分数达到86.61%。扩散过程是花生壳基含碳球团还原过程的限制性环节,其表观活化能为63.886 kJ/mol。本文研究成果将为生物质含碳球团的实际应用提供理论基础和技术支撑。

关键词: 低碳炼铁; 含碳球团; 生物质; 还原反应; 动力学

中图分类号: TF046.6; X712

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)04-0064-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.04.059

Influencing factors and dynamics behavior of biomass carbon-containing pellets reduction process

FANG Shulin, WANG Hao, SUN Wu, SONG Minwei, ZHANG Zouming, WANG Hongtao

(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China)

Abstract: The development of non-blast furnace ironmaking technology under the background of carbon peaking and carbon neutrality has become an important part of low-carbon metallurgy. Biomass is a renewable energy rich in C and H elements, and it is of great practical significance to further reduce carbon emissions and promote the development of carbon-containing pellets technology after carbonization treatment as a substitute raw material for carbon-containing pellets in rotary hearth furnaces. In this paper, three kinds of biochar including walnut shell, melon seed shell and peanut shell, are selected as reducing agents to prepare carbon-containing pellets, and the effects of carbon type, temperature and time on the reduction process and dynamics of carbon-containing pellets are studied, and the dynamics constraints of the reduction process are determined. The results show that temperature has a significant impact on the reduction of carbonaceous pellets in biomass, and increasing the temperature can effectively promote iron oxide reduction. The peanut shell pyrolytic carbon has a loose texture and a large specific surface area. This structural characteristic shows good reduction performance. The pellets prepared from the biomass are reduced at 1100℃ for 20 min and the reaction fraction can reach to 86.61%. The diffusion process is the limiting link in the reduction process of carbon-containing pellets in peanut shell, and its apparent activation energy is 63.886 kJ/mol. This study will provide a theoretical basis and technical support for the practical application of biomass carbon-containing pellets.

Key words: low-carbon ironmaking; carbon-containing pellets; biomass; reduction reactions; dynamics

收稿日期: 2024-12-27; 修回日期: 2025-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074080); 安徽省大学生创新创业训练计划资助项目(S202310360169)

作者简介: 方书霖(2004—), 男, 从事绿色低碳炼铁方面的研究。

通信作者: 王宏涛(1990—), 男, 副教授, 从事低碳炼铁及冶金固废综合利用方面的研究。

据统计,2024年我国生铁和粗钢产量分别达8.52亿吨和10.05亿吨,占世界总产量的65.99%和53.39%。钢铁工业为中国式现代化建设提供了重要支撑,然而,随着优质铁矿和焦煤资源的日趋匮乏以及“碳达峰·碳中和”、“超低排放”等战略或政策影响,钢铁生产长流程冶炼面临严峻挑战。基于此,非高炉炼铁工艺技术开发成为低碳冶金的重要内容^[1]。非高炉炼铁工艺主要包括熔融还原法和直接还原法两大类^[2]。其中,直接还原法是指采用气态还原介质或固态非焦煤碳质还原剂,经固-固或气-固反应将含铁物料还原得到固态金属化产品的炼铁方法^[3-4]。含碳球团是直接还原炼铁工艺开发中形成的一种具有良好自还原性能的非高炉炼铁原料,为多元素共生矿、低品位难选矿以及含铁二次资源综合利用提供了更多的可行性技术路线^[5-9]。目前含碳球团生产过程仍大量使用煤质碳还原剂。为进一步降低碳排放,推动含碳球团技术发展,寻找绿色替代碳源具有重要的现实意义^[10]。

生物质是一种富含C、H元素的可再生含能资源^[11]。鉴于来源广、价格低和碳中性等特点,近年来,国内外学者结合钢铁流程各工序特征持续开展生物质冶金原、燃料的应用研究,在高炉喷吹、铁矿烧结以及冶金焦生产等方面取得了重要进展^[12-13],同时,针对一次、二次含铁资源还原亦进行了有益探索。赵满祥等^[14]以铁精粉和生物质热解炭为原料,采用压块成型制备尺寸为 $\varnothing 20\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的生物质含碳球团,研究了生物质含碳球团冷态和还原后强度的变化规律。结果显示:含碳球团冷态强度随成型压力和水分的增加均呈先升高后降低的趋势;还原后强度随还原温度升高呈先降低后升高的趋势,球团强度较低值出现在 $900 \sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内。HUDAKORN等^[15]以水葫芦生物质炭作为还原剂制备了生物质含碳球团,发现当含水量为10%时,生物质含碳球团的耐磨强度和粒度均能满足实际生产要求。马玉升等^[16]以生物质木炭和无烟煤为还原剂,模拟转底炉工艺研究了不同还原温度、时间及 $n(\text{C})/n(\text{O})$ (物质的量之比)条件下含碳球团的还原行为。结果表明:在相同 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 条件下,

生物质含碳球团与无烟煤基含碳球团的还原性能相当,在还原温度为 $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 为0.7、还原时间为20 min时,生物质含碳球团的金属化率超过80%。董剑豪等^[17]对比研究了无烟煤以及无烟煤掺混PE废塑料条件下含碳球团的还原过程。结果显示:在 $1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,混合还原剂含碳球团的金属化率为95.63%,与无烟煤含碳球团的金属化率相当,但向含碳球团中掺混PE废塑料会使球团产生一定程度的膨胀。相较于传统化石碳源(如煤、焦炭等),生物质炭具有化学活性高、灰分含量低以及S、P等有害元素含量少的特点,其在钢铁工业中的规模化应用是助力低碳冶金目标达成的重要途径。然而,生物质炭的机械强度、热稳定性以及制备成本等关键性能指标仍需进一步优化, these 问题是推动其规模化工业应用的技术难题。总体来看,现有研究多集中于生物质炭的制备及其对铁氧化物的还原效果,对生物质含碳球团的还原动力学研究相对较少。

为此,本文在实验室条件下先将生物质炭化获得生物质炭,然后以生物质炭为还原剂制备含碳球团,研究生物质炭种类、还原温度和时间对含碳球团还原过程的影响及其动力学行为,确定还原过程的动力学限制性环节,为生物质含碳球团的实际应用提供理论基础和技术支撑。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验原料主要包括粉状氧化铁、生物质和高纯氩气。其中粉状氧化铁为某公司生产的化学纯试剂,纯度为99.99%。生物质包括葵花子壳、花生壳和核桃壳三种,其工业分析如表1所示。由表1可以看出,三种原生生物质的挥发分质量分数均超过70%,固定碳质量分数在19%~22%范围。高纯氩气采用南京某特种气体厂生产的钢瓶气,纯度为99.95%。

1.2 试验方法

1.2.1 生物质含碳球团制备

生物质含碳球团制备过程:①将生物质干燥后破碎为 $0 \sim 1.5\text{ mm}$ 的颗粒状,然后置于电阻炉中,在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下热解炭化60 min,得到

表 1 试验用 3 种生物质的工业分析(质量分数)

Table 1 Proximate analysis of three kinds of biomass

生物质种类	used in the tests		%
	挥发分	灰分	
葵花子壳	78.38	1.82	19.80
花生壳	70.75	7.16	22.09
核桃壳	78.64	1.44	19.92

生物质炭, 通入流量为 1 L/min 的氩气直至炭化过程结束; ② 按混合料总质量 100 g、 $n(\text{C})/n(\text{O})$ 为 1.0 计算并分别称取 Fe_2O_3 粉末和生物质炭, 充分混匀后加入适量有机黏结剂(有机物质量分数为 0.05%)水溶液, 利用粉末压片机在 10 000 N 压力下将混匀料制成 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 圆柱体, 然后置于 105 °C 干燥箱中干燥 24 h, 获得生物质含碳球团样品。三种生物质炭制备的含碳球团分别被称为瓜子壳基、花生壳基和核桃壳基含碳球团。

1.2.2 生物质含碳球团还原试验

采用如图 1 所示装备进行生物质含碳球团的等温还原试验。取 4~5 块干燥生物质含碳球团样品, 称重后放入 Ni-Cr 丝网吊篮中并悬挂于管式电阻炉的入口处; 将电阻炉升温至预设温度(900~1 100 °C)后保温 30 min, 通入大流量高纯氩气排净炉内空气后将流量调整为 2 L/min; 迅速将装有样品的吊篮放至炉内恒温区进行还原试验, 同时启动计算机并设定每 10 s 自动记录数据。待天平示数不再发生明显变化后停止试验, 将试样放置于炉口处继续用氩气使其冷却至室温。

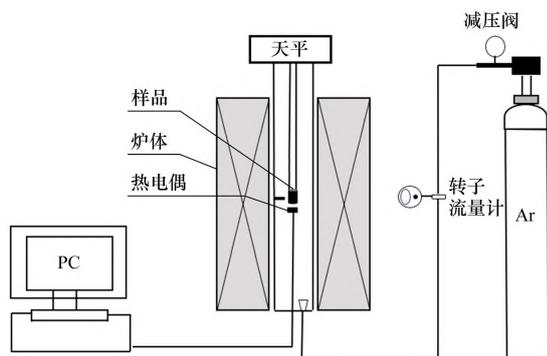


图 1 生物质含碳球团还原试验设备

Fig. 1 Experimental setup for the reduction test of biomass carbon-bearing pellets

1.2.3 还原反应动力学

生物质含碳球团等温还原过程中的失重包括

铁氧化物失氧和碳元素消耗。理论上当 $n(\text{C})/n(\text{O}) \leq 1$ 时, 碳 100% 参与反应。因此, 可用式(1)描述该还原反应进程^[8]。

$$R = \frac{M_0 - M_t}{M_0 + M_C} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为反应分数, %; M_0 为含碳球团反应前质量, g; M_t 为含碳球团反应 t 时刻质量, g; M_0 为含碳球团中与铁元素结合的总氧质量, g; M_C 为含碳球团样品中固定碳质量, g;

机理函数是确定反应动力学参数和反应过程限制环节的关键。生物质含碳球团还原反应速率方程可用式(2)表示。对式(2)分离变量同时两边积分, 将方程左侧项动力学机理函数的积分形式定义为 $g(x)$, 如式(3)所示。由该式可知, 等温还原过程中, 最概然机理函数积分值应与反应时间呈线性关系。将式(1)生物质含碳球团反应分数定义为转化率, 带入不同机理函数求解对应函数值 $g(x)$, 再将 $g(x)$ 与时间 t 进行线性回归, 得到相关系数 r^2 最大值的函数即为最概然机理函数。

$$\frac{dx}{dt} = k(T)f(x) \quad (2)$$

$$g(x) = \int_0^x \frac{dx}{f(x)} = \int_0^t k(T) dt = k(T)t \quad (3)$$

式中: x 为反应程度, %; t 为时间, min; $k(T)$ 为反应速率, min^{-1} ; $f(x)$ 为动力学机理函数的微分形式; $g(x)$ 为动力学机理函数的积分形式。

根据式(4)所示的 Arrhenius 方程可以计算还原反应的活化能。对式(4)两边取对数得到式(5), 然后将 $\ln k$ 与 $1/T$ 进行线性拟合, 由拟合直线的斜率和截距获得反应活化能与指前因子。

$$k = k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

$$\ln k = -\frac{E}{R} \times \frac{1}{T} + \ln A \quad (5)$$

式中: k 为反应速率常数, min^{-1} ; R 为气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为温度, K; A 为指前因子, min^{-1} ; E 为活化能, J/mol。

2 结果与讨论

2.1 含碳球团还原过程中质量随时间的变化

生物质含碳球团还原过程中质量随时间变化

关系如图2所示。由图2可以看出,三种生物质含碳球团等温还原过程中,球团质量在开始至5 min范围内降低较快,而后随着时间的延长,失重趋势变缓。而对于同种生物质含碳球团,相同时刻下的还原失重随温度提高明显增加。表2给出了生物质含碳球团还原20 min后的失重率,其中,花生壳基含碳球团在900、1 000 ℃和1 100 ℃还原20 min对应的失重率分别为21.72%、26.51%和29.54%。数据显示,球团还原失重率随温度增加而增大,另外两种生物质含碳球团也呈现相似的变化规律。

2.2 温度对生物质含碳球团还原反应分数的影响

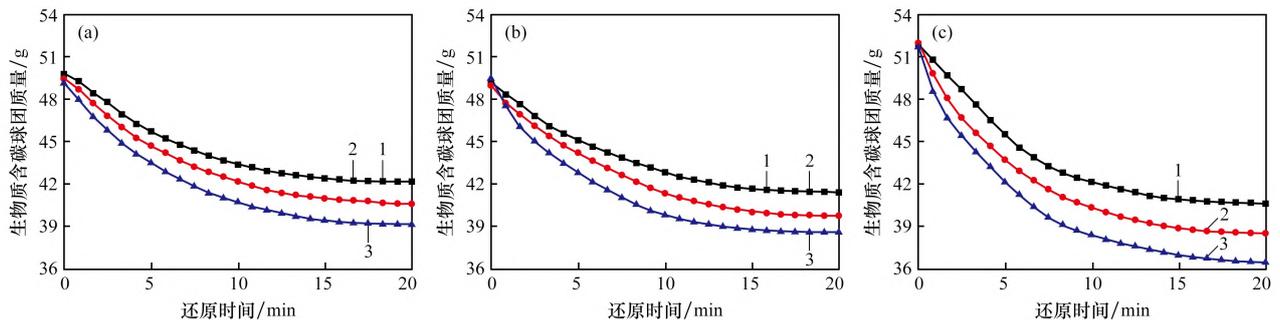
不同温度下生物质含碳球团还原过程反应分数如图3所示。由图3可以看出,等温还原过程中,三种生物质含碳球团反应分数随时间延长均呈现出由快速增加到缓慢变化的趋势。图3(c)显示,花生壳基含碳球团1 100 ℃还原过程中,反应开始至15 min,反应分数由0迅速增加至79.64%,

还原20 min时反应分数为82.28%,相比15 min时增加了2.64%,反应分数变化明显趋缓。同时发现,温度对反应分数有重要影响。以图3(a)所示的核桃壳基含碳球团为例,当还原时间为10 min

表2 生物质含碳球团还原20 min后失重率

Table 2 Weight loss ratio of carbon-containing pellets after 20 min reduction under different temperatures

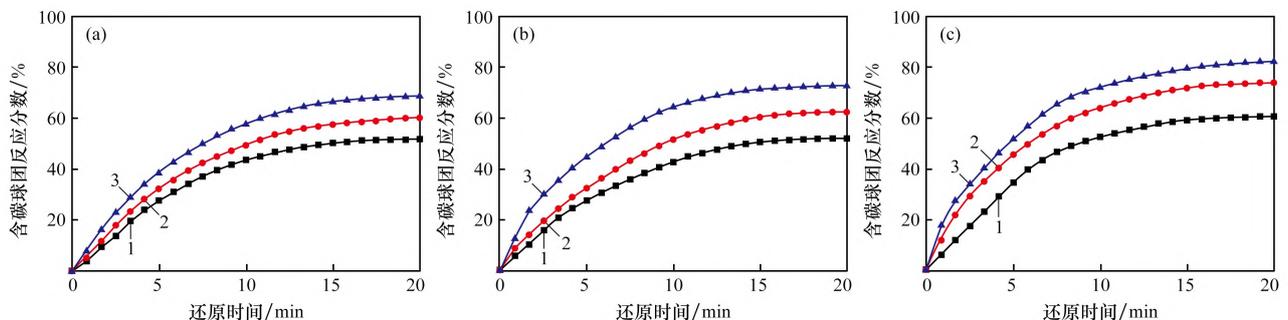
含碳球团种类	还原温度/℃	还原前质量/g	还原后质量/g	失重率/%
瓜子壳	900	49.23	41.47	15.76
	1 000	49.05	39.79	18.88
	1 100	49.52	38.62	22.01
花生壳	900	51.98	40.69	21.72
	1 000	52.11	38.56	26.51
	1 100	51.83	36.52	29.54
核桃壳	900	49.86	42.18	15.40
	1 000	49.48	40.62	17.91
	1 100	49.16	39.14	20.38



含碳球团: (a) 核桃壳基; (b) 瓜子壳基; (c) 花生壳基
温度/℃: 1—900; 2—1 000; 3—1 100。

图2 不同还原温度下生物质含碳球团质量随时间变化关系

Fig. 2 Mass variation of biomass carbon-bearing pellets with time at different reduction temperatures



含碳球团: (a) 核桃壳基; (b) 瓜子壳基; (c) 花生壳基
温度/℃: 1—900; 2—1 000; 3—1 100。

图3 不同温度下生物质含碳球团还原过程反应分数

Fig. 3 Effect of temperature on the reaction fraction of biomass carbon-bearing pellets during the reduction process

时, 900、1 000 和 1 100 °C 时对应的反应分数分别为 43.53%、49.29% 和 57.53%。与 900 °C 时的数据相比, 1 000 °C 和 1 100 °C 时的反应分数分别增加了 13.23% 和 32.16%。当还原时间为 20 min 时, 1 000 °C 和 1 100 °C 时对应的反应分数相比 900 °C 时分别增加了 16.25% 和 32.33%。

2.3 生物质炭种类对含碳球团还原反应分数的影响

生物质炭种类对含碳球团还原过程反应分数的影响如图 4 所示。对比图 4(a) 和图 4(c), 当还原温度为 900 °C 时, 核桃壳基和瓜子壳基含碳球团还原 10 min 时反应分数分别为 43.53% 和 42.58%, 而花生壳基含碳球团反应分数达到了 52.35%。当温度提高至 1 100 °C 时, 在相同还原时刻, 核桃壳基、瓜子壳基和花生壳基含碳球团反应分数分别为 57.53%、64.19% 和 72.07%。数据显示, 在反应温度和时间相同的条件下, 花生壳基含碳球团反应分数最高, 核桃壳基含碳球团反应分数较低。由此推断, 三种生物质炭还原能力由大到小的排序: 花生壳基 > 瓜子壳基 > 核桃壳基。

分析原因认为, 含碳球团还原过程涉及铁氧化物直接还原、碳气化溶损和铁氧化物间接还原。由热力学数据可知, 铁氧化物 Fe_3O_4 以及 FeO 与固体 C 直接还原反应的开始温度均高于 FeO 稳定存在的温度 (570 °C), 含碳球团中铁氧化物的直接还原实际上是借助碳的气化反应而进行的^[19]。因此, 还原介质的气化反应能力对含碳球团还原进程有重要影响。由图 5 给出的不同生物质炭的微观形貌可以看出, 核桃壳基的碳颗粒形貌与图 5(a) 所示的无烟煤颗粒较为接近, 多呈板状或条

状, 棱角分明, 结构致密。瓜子壳基的碳颗粒外形呈长条状, 部分颗粒与核桃壳基的碳板状结构类似, 另有部分颗粒表面有薄片状蜂窝。而花生壳基的碳颗粒多为不规则形态, 且大颗粒表面嵌布着若干 1~2 μm 的极细碳颗粒, 这种质地疏松和较大比表面积的结构特性为其呈现良好还原能力提供了先决条件。

综合以上, 生物质含碳球团在 900 °C 还原过程中, 宏观上质量有明显减少, 但由于反应温度较低, 生物质炭的气化反应不能充分进行, 含碳球团中铁氧化物逐级还原较慢, 使得还原反应分数处于较低水平。当温度提高至 1 100 °C 时, 碳气化和铁氧化物还原等各类反应速率加快, 含碳球团内铁氧化物颗粒与生物质炭颗粒间产生的空隙利于还原气体进入球团内部, 使还原过程进一步强化, 从而提高了反应分数。相对而言, 温度对生物质含碳球团还原过程的影响最为显著。

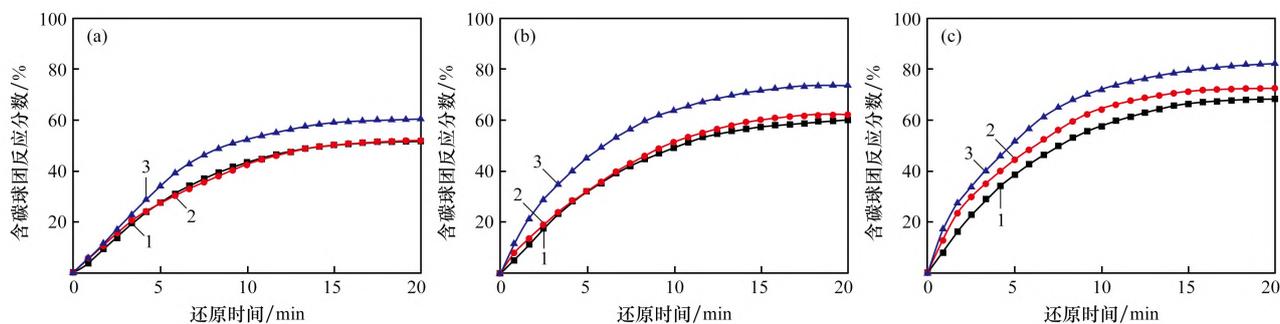
2.4 生物质含碳球团还原反应动力学

含碳球团还原涉及的物理过程和化学反应主要包括碳的气化溶损反应、铁氧化物的界面还原反应以及扩散等^[20-21]。在研究含碳球团还原过程的限制性环节时, 需进行如下假设: ① 含碳球团内碳颗粒和铁氧化物颗粒分布均匀, 即各向同性; ② 含碳球团还原过程碳气化溶损反应和铁氧化物还原反应均为一级反应。

(1) 若碳气化溶损反应为还原过程的限制性环节, 则还原反应机理函数积分形式如式(6)所示。

$$g(x) = -\ln(1-x) = kt \quad (6)$$

(2) 若界面反应为还原过程的限制性环节, 则

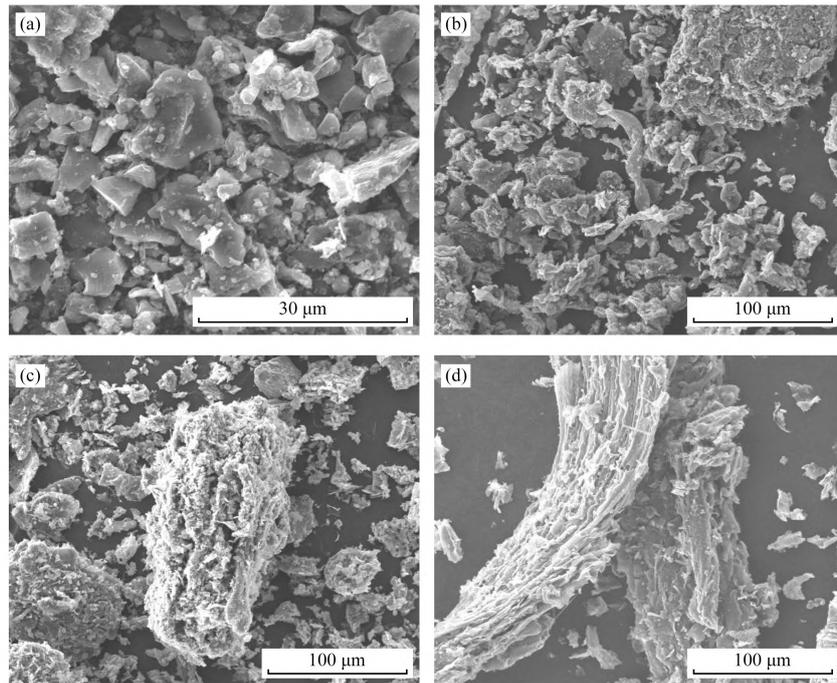


温度/°C: (a) 900; (b) 1 000; (c) 1 100

含碳球团: 1—核桃壳基; 2—瓜子壳基; 3—花生壳基。

图 4 生物质炭种类对含碳球团还原过程中反应分数的影响

Fig. 4 Effect of biochar type on the reaction fraction of carbon-bearing pellets during the reduction process



(a) 无烟煤; (b) 核桃壳基; (c) 花生壳基; (d) 瓜子壳基

图5 不同固态还原介质微观形貌

Fig. 5 SEM of different solid-state reducing agent

还原反应机理函数的积分形式如式(7)所示。

$$g(x) = 1 - (1 - x)^{1/3} = kt \quad (7)$$

(3) 若扩散环节为还原过程的限制性环节,则还原反应机理函数的积分形式如式(8)所示。

$$g(x) = [1 - (1 - x)^{1/3}]^2 = kt \quad (8)$$

式中: x 为生物质含碳球团还原过程中的反应分数; k 为反应速率常数, min^{-1} ; t 为反应时间, min 。

以还原性较优的花生壳基生物质炭制备的含碳球团为例,讨论还原过程动力学行为。将该球团不同条件下的反应分数代入以上机理函数中,

获得对应的函数值,再将函数值与反应时间进行线性拟合(图6)。根据拟合结果的线性关系和限制性环节对应的活化能,确定反应的限制性环节。

不同限制性环节下机理函数值与反应时间的线性拟合相关系数如表3所示。由表3可以发现,与碳气化溶损反应和界面反应环节相比,扩散环节线性拟合的相关系数最高,均值达到0.964 270,表明该含碳球团还原反应最有可能的机理函数为 $[1 - (1 - x)^{1/3}]^2$,且扩散最有可能为过程的限制性环节。由表3不同温度下各环节的还原速率常

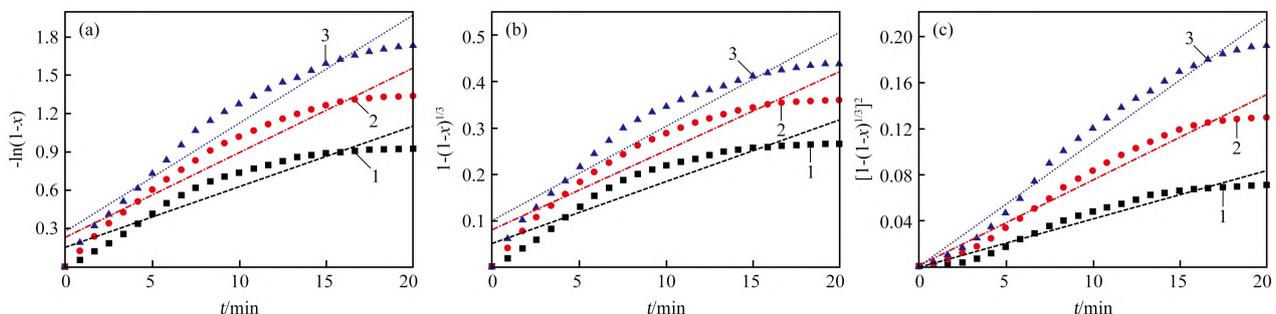
(a) 碳气化溶损反应; (b) 界面化学反应; (c) 扩散
温度/°C: 1—900; 2—1 000; 3—1 100。

图6 不同限制性环节条件下花生壳基含碳球团还原反应动力学拟合结果

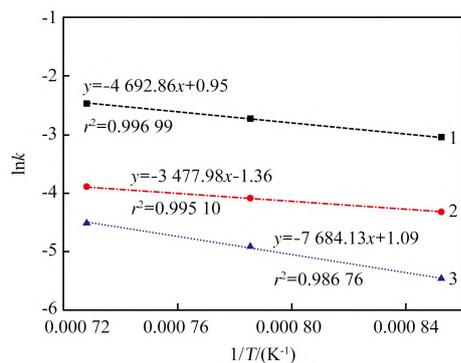
Fig. 6 Kinetic fitting results of peanut shells carbon-bearing pellets during the reduction under different restrictive links

数以及式(5),建立不同限制性环节 $\ln k$ 与 $1/T$ 的关系。拟合结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,碳气化溶损、界面反应和扩散环节的相关系数分别为 0.996 99、0.995 10 和 0.986 76,三个环节的拟合程度均较高。

表 3 不同限制性环节条件下动力学拟合相关系数

Table 3 Kinetic fitting correlation coefficient under different restrictive links

限制性环节	还原温度/ $^{\circ}\text{C}$	速率常数 (k)/ min^{-1}	相关系数 (r^2)	相关系数均值
碳气化溶损反应	900	0.047 24	0.891 45	0.917 423
	1 000	0.065 93	0.922 88	
	1 100	0.084 52	0.937 94	
界面反应	900	0.013 18	0.870 42	0.887 560
	1 000	0.016 94	0.892 30	
	1 100	0.020 28	0.899 96	
扩散	900	0.004 17	0.948 98	0.964 270
	1 000	0.007 45	0.968 56	
	1 100	0.010 79	0.975 27	



1—碳的气化; 2—界面反应; 3—扩散。

图 7 不同限制性环节条件下 $\ln k$ 与 $1/T$ 的线性拟合结果

Fig. 7 Linear fitting results between $\ln k$ and $1/T$ under different restrictive links

通过图 7 拟合直线的斜率和截距,计算得到碳气化溶损反应、界面反应和扩散为限制性环节时反应的表观活化能分别为 39.016、28.916 kJ/mol 和 63.886 kJ/mol。相关研究结果表明^[22-23],界面反应为限制性环节的反应表观活化能为 60 ~ 67 kJ/mol,碳气化溶损反应为限制性环节时的表观活化能为 230 ~ 355 kJ/mol,而扩散为限制性环节时的表观活化能应小于 150 kJ/mol。由此可见,将扩散过程作为还原过程的限制性环节,花生壳基含碳球团的反应表观活化能与相关文献一致。

另外,扩散为限制性环节时的表观活化能最大,表明该环节所需能量较多,其对还原过程影响较大。综合以上,本文确定扩散过程是花生壳基含碳球团还原过程的限制性环节。

3 结 论

本文研究了生物质炭种类、还原温度和时间对含碳球团还原过程和动力学行为的影响,确定了还原过程动力学限制性环节,得到以下结论:

(1) 生物质含碳球团还原反应分数受温度影响较大,提高温度能有效促进铁氧化物的还原。反应分数在还原初期增幅明显,但随时间延长,增加趋势变缓。

(2) 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 下还原 20 min,花生壳基、瓜子壳基和核桃壳基含碳球团的反应分数分别为 86.61%、69.07% 和 74.30%。三种生物质炭相比,花生壳基生物质炭的还原性能较好,这与其质地疏松和较大比表面积的结构特性有关。

(3) 扩散过程是花生壳基含碳球团还原过程的限制性环节,表观活化能为 63.886 kJ/mol。

参考文献:

- [1] 刘清梅,张福明. 钢铁工业减碳与 CO_2 资源化利用技术的研究进展[J]. 钢铁,2024,59(2):13-24.
LIU Qingmei, ZHANG Fuming. Research progress of carbon reduction and CO_2 resource technology utilization in iron and steel industry [J]. Iron and Steel, 2024, 59(2):13-24.
- [2] 应自伟,储满生,唐珏,等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析[J]. 河北冶金,2019(6):1-7;31.
YING Ziwei, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process [J]. Hebei Metallurgy, 2019 (6):1-7;31.
- [3] 朱德庆,薛钰霄,潘建,等. 气基直接还原工艺研究进展和发展思考[J]. 烧结球团,2022,47(1):1-9;86.
ZHU Deqing, XUE Yuxiao, PAN Jian, et al. Research progress and development thinking of the gas-based direct reduction process [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1):1-9;86.
- [4] 潘建,朱德庆,韩基祥,等. 磁铁矿氧化球团富氢气基直接还原的特性研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):

- 48-57.
- PAN Jian, ZHU Deqing, HAN Jixiang, et al. Study on hydrogen-rich gas-based direct reduction of oxide pellets made by magnetite concentrate[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(1): 48-57.
- [5] 张笑菲,王博,居天华,等. 还原剂对含碳球团预还原过程尾气成分的影响[J]. *烧结球团*, 2020, 45(6): 5-9.
- ZHANG Xiaofei, WANG Bo, JU Tianhua, et al. Influence of reducing agent to tail gas composition during the pre-reduction process of carbon-containing pellets[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2020, 45(6): 5-9.
- [6] 柴志鹏,罗德庆,韩红伟,等. 气固基作用下含碳球团还原试验研究[J]. *烧结球团*, 2023, 48(4): 65-71.
- CHAI Zhipeng, LUO Deqing, HAN Hongwei, et al. Experimental research on reduction of carbon-containing pellets under gas-solid base function[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2023, 48(4): 65-71.
- [7] HIGASHI R, OWAKI K, MARUOKA D, et al. Effect of ore type and gangue content on carburization and melting behavior of carbon-iron ore composite[J]. *ISIJ International*, 2021, 61(6): 1808-1813.
- [8] CHANG H H, CHEN I G, LU K-M, et al. Effect of heating rate on carbothermic reduction and melting behavior of iron ore-coal composite pellets[J]. *ISIJ International*, 2021, 61(11): 2715-2723.
- [9] 陈雯,王鑫,雷鹰,等. 高磷铁矿石含碳球团等温还原动力学[J]. *钢铁*, 2020, 55(9): 11-15.
- CHEN Wen, WANG Xin, LEI Ying, et al. Isothermal reduction kinetics of high-phosphorus iron ore carbon-containing pellets[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(9): 11-15.
- [10] 杨涛,雷杰,任晓健,等. 转底炉用含碳球团制备及生产工艺优化[J]. *钢铁*, 2023, 58(4): 157-166.
- YANG Tao, LEI Jie, REN Xiaojian, et al. Preparation and production process optimization of carbon-bearing pellets for rotary bottom furnace[J]. *Iron and Steel*, 2023, 58(4): 157-166.
- [11] 杨梦茹,彭琴,常玉龙,等. 生物炭替代煤粉/焦炭高炉炼铁碳减排技术研究进展[J]. *化工进展*, 2024, 43(1): 490-500.
- YANG Mengru, PENG Qin, CHANG Yulong, et al. Research progress of carbon emission reduction technology with biochar replacing pulverized coal/coke for blast furnace ironmaking[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(1): 490-500.
- [12] SRIVASTAVA U, KAWATRA S K, EISELE T C. Production of pig iron by utilizing biomass as a reducing agent[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 119: 51-57.
- [13] 张淑会,邵建男,兰臣臣,等. 生物质能在炼铁领域应用的研究现状及展望[J]. *钢铁*, 2022, 57(12): 13-22.
- ZHANG Shuhui, SHAO Jiannan, LAN Chenchen, et al. Application status and prospect of biomass energy in ironmaking process[J]. *Iron and Steel*, 2022, 57(12): 13-22.
- [14] 赵满祥,刘嘉雯,贾国利,等. 高强度生物质含碳球团制备及性能优化[J]. *中国冶金*, 2024, 34(4): 96-105.
- ZHAO Manxiang, LIU Jiawen, JIA Guoli, et al. Preparation and performance optimization for biomass carbon-bearing pellets with high strength[J]. *China Metallurgy*, 2024, 34(4): 96-105.
- [15] HUDAKORN T, SRITRAKUL N. Biogas and biomass pellet production from water hyacinth[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 532-538.
- [16] 马玉升,洪陆阔,周朝刚,等. 生物质用于直接还原工艺研究[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(4): 106-109; 115.
- MA Yusheng, HONG Lukuo, ZHOU Chaogang, et al. Application of biomass to the direct reduction process[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(4): 106-109; 115.
- [17] 董剑豪,王广,张浩,等. 塑料-无烟煤混合还原剂对含碳球团还原的影响[J]. *中国冶金*, 2021, 31(2): 90-94; 108.
- DONG Jianhao, WANG Guang, ZHANG Hao, et al. Effect of plastic-anthracite mixed reducing agent on reduction of carbon-bearing pellets[J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(2): 90-94; 108.
- [18] 刘颖. 转底炉内冶金粉尘含碳球团直接还原过程数学模型研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
- LIU Ying. Mathematical model investigation of carbon-containing made of metallurgical dust in a rotary hearth furnace[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [19] 梁连科. 冶金热力学及动力学[M]. 沈阳:东北工学院出版社, 1990.

- LIANG Lianke. Metallurgical Thermodynamics and kinetics[M]. Shenyang:Northeast Institute of Technology Press,1990.
- [20] 孟黎明,赵庆杰. 铁矿石含碳球团中碳的气化反应速度对球团熔融的影响[J]. 钢铁研究学报,2007,19(12):5-9.
- MENG Fanming, ZHAO Qingjie. Effect of carbon gasification rate on melting behavior of iron ore/carbon composite pellet[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007,19(12):5-9.
- [21] 储满生,王兆才,柳政根,等. 热压含碳球团自还原过程限制性环节的实验研究[J]. 过程工程学报,2010,10(1):121-126.
- CHU Mansheng, WANG Zhaocai, LIU Zhenggen, et al. Experimental study on controlling step of self reduction process of carbon composite iron ore hot briquette[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(1):121-126.
- [22] 潘建,段真,朱德庆,等. 不锈钢尘泥球团煤基直接还原动力学[J]. 钢铁研究学报,2022,34(10):1067-1077.
- PAN Jian, DUAN Zhen, ZHU Deqing, et al. Kinetics of coal-based direct reduction of stainless steel dust pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(10): 1067-1077.
- [23] 田彦文,翟秀静,刘奎仁. 冶金物理化学简明教程[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2011.
- TIAN Yanwen, ZHAI Xiujing, LIU Kuiren. Physical Chemistry of Metallurgy[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

(上接第 39 页)

- [29] 龚普勤,张文千,张宝珠等. 有机朗肯循环(ORC)发电在氮肥行业中的应用[J]. 中氮肥,2019(2):30-31.
- GONG Pule, ZHANG Wenqian, ZHANG Baozhu, et al. Application of organic Rankine cycle (ORC) power generation in nitrogen fertilizer industry[J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress, 2019(2):30-31.
- [30] 孙雪强. 有机朗肯循环在化工余热利用中的探讨[J]. 化工装备技术,2023,44(3):21-24.
- SUN Xueqiang. Exploration of organic Rankine cycle in the utilization of chemical waste heat[J]. Chemical Equipment Technology, 2023, 44(3): 21-24.
- [31] 池胜刚. 石化行业首套 ORC 发电机组工业运行评价[J]. 炼油技术与工程,2017,47(2):60-64.
- CHI Shenggang. Assessment of commercial operation of first ORC power generation train in petrochemical industry [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2017, 47(2):60-64.
- [32] LEE Y R, LIU L W, CHANG Y Y, et al. Development and application of a 200 kW ORC generator system for energy recovery in chemical processes[J]. Energy Procedia, 2017, 129:519-526.

(上接第 47 页)

- [21] SPREITZER D, SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen: A review [J]. Steel Research International, 2019, 90(10):1900108.
- [22] WANG Z C, LIU Z G, TANG J, et al. Analysis of gas thermodynamic utilization and reaction kinetic mechanism in shaft furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2014, 21(1):16-23.
- [23] KOVTUN O, LEVCHENKO M, ILATOVSKAIA M O, et al. Results of hydrogen reduction of iron ore pellets at different temperatures[J]. Steel Research International, 2025, 96(5):2300707.
- [24] 杨佳龙,胡正洪,李家新,等. 球团矿氨还原特性[J]. 钢铁,2025,60(1):29-39.
- YANG Jialong, HU Zhenghong, LI Jiixin, et al. Characteristics of ammonia reducing pellets[J]. Iron and Steel, 2025, 60(1):29-39.