



高磷铁矿含碳团块直接还原动力学

王臻¹, 春铁军^{1*}, 李东升¹, 宁超¹, 穆固天¹, 朱梦飞¹, 龙红明^{1,2}

(1. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 安徽工业大学冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 研究了基准条件(不添加 Na_2SO_4 和废塑料)、添加 4% Na_2SO_4 和添加 4% Na_2SO_4 同时废塑料替代 25% 焦粉直接还原高磷铁矿含碳团块的动力学。结果表明, 不同条件下还原高磷铁矿含碳团块的限制性环节均为气相扩散。与基准条件相比, 高磷铁矿含碳团块中加入 4% Na_2SO_4 后, 活化能由 204.92 kJ/mol 降低至 158.81 kJ/mol, 添加 4% Na_2SO_4 同时废塑料替代 25% 焦粉后, 活化能由 204.92 kJ/mol 降至 172.89 kJ/mol。

关键词: 高磷铁矿; 废塑料; 含碳团块; 直接还原; 动力学

中图分类号: TF521

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)03-0530-07

Direct Reduction Kinetics of Carbon Bearing Briquettes of High-phosphorus Iron Ore

Zhen WANG¹, Tiejun CHUN^{1*}, Dongsheng LI¹, Chao NING¹, Gutian MU¹, Mengfei ZHU¹, Hongming LONG^{1,2}

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China;

2. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling, Ministry of Education, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China)

Abstract: The reduction kinetics of carbon bearing briquettes of high-phosphorus iron ore under base condition (without adding Na_2SO_4 and waste plastics), adding 4% Na_2SO_4 and adding 4% Na_2SO_4 with waste plastics replacing 25% coke fines were carried out respectively. The results showed that the control process of carbon bearing briquettes under three conditions was gas diffusion. Compared with the base condition, the apparent activation energy of adding 4% Na_2SO_4 decreased from 204.92 kJ/mol to 158.81 kJ/mol. The addition of 4% Na_2SO_4 with waste plastics replacing 25% coke fines was also beneficial to the reduction reaction, and the activation energy reduced from 204.92 kJ/mol to 172.89 kJ/mol.

Key words: high phosphorus iron ore; waste plastics; carbon bearing briquette; direct reduction; kinetics

1 前言

随着我国钢铁行业快速发展, 铁矿进口量不断增长, 2016 年已达 10.24 亿吨, 价格居高不下, 全球铁矿资源垄断不断加剧。我国铁矿资源丰富, 但品位较低, 有害元素含量高, 生产成本较高。为保证国内铁矿石供应安全, 在进口国外富铁矿的基础上合理开采利用国内的低品位铁矿石是目前急需解决的问题^[1,2]。高磷铁矿是一种重要的潜在铁矿石资源, 我国储量巨大, 但未得到大规模经济高效的开发利用。高磷铁矿品位低并含有害元素磷, 提铁降磷是开发利用的关键^[3,4]。铁矿含碳团块直接还原-磁选工艺提铁降磷效果明显, 但还原剂用量大, 还原动力学条件尚不明确^[5-8]。魏汝飞等^[9]研究

了弱氧化性气氛下含碳团块的还原动力学, 得出在 1348~1573 K 下含碳团块由于内部碳粉与铁矿粉颗粒粒径不同, 铁氧化物与碳粉能相互嵌合且接触紧密, 反应限制性环节为界面化学反应或局部反应。储满生等^[10]研究了相同传热条件下, 热压含碳团块在 1173~1423 K 下还原的限制环节, 通过团块的热重和气体产物分析, 得出含碳团块自还原过程按还原速率可分为两个阶段, 第 1 阶段比第 2 阶段还原速率更快, 且 2 个阶段的限制性环节均为内扩散。高磷铁矿含碳团块动力学研究较少, 满毅等^[11]研究了 950~1100 °C 下 N_2 气氛中还原温度对含煤球团还原速率的影响, 结合 XRD 分析还原产物的物相转换, 基于热重实验应用不同控速模型计算直接还原过程反应动力学参数。李静华^[12]进行高磷鲕状赤

收稿日期: 2017-08-07, 修回日期: 2017-10-31

作者简介: 王臻(1993-), 男, 山东省济南市人, 硕士研究生, 主要从事铁矿资源综合利用研究, E-mail: 1014170495@qq.com; 春铁军, 通讯联系人, E-mail: springcsu@126.com。

引用格式: 王臻, 春铁军, 李东升, 等. 高磷铁矿含碳团块直接还原动力学. 过程工程学报, 2018, 18(3): 530-536.

Wang Z, Chun T J, Li D S, et al. Direct Reduction Kinetics of Carbon Bearing Briquettes of High-phosphorus Iron Ore (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 530-536, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217289.

铁矿还原磁选实验，考察了不同添加剂对高磷铁矿直接还原的影响，表明添加适量 Na_2SO_4 可促进还原过程中铁晶粒长大聚集，提高精矿铁品位，降低还原铁粉中的磷含量，但未深入研究还原过程动力学，添加 Na_2SO_4 对高磷铁矿直接还原动力学的的影响尚不明确。我国已成为世界最大的塑料生产和消费国家，大量废塑料未有效利用，废塑料污染已成为我国急需解决的问题。用废塑料碳源替代部分还原剂还原高磷铁矿中的铁氧化物，可减少矿石还原焙烧过程中还原剂用量，还可有效利用废塑料。本工作研究了基准条件(不添加 Na_2SO_4 和废塑料)、添加 Na_2SO_4 和添加 Na_2SO_4 同时用废塑料替代部分焦粉直接还原高磷铁矿含碳团块的动力学，分析了机理，确定了直接还原过程中的限制性环节和影响反应速度的因素，为高磷铁矿直接还原工艺提供理论支持。

2 实验

2.1 实验原料

还原剂为焦粉和无氯废塑料，添加剂为 Na_2SO_4 (分析纯，国药集团化学试剂有限公司)，碱度调整剂为 CaCO_3 (分析纯，国药集团化学试剂有限公司)。高磷铁矿的化学成分如表 1 所示，铁品位较低，仅为 44.35%， SiO_2 含量高达 16.19%， CaO 含量为 7.07%，磷含量为 1.08%。焦粉的工业及灰分分析结果如表 2 和 3 所示，废塑料的化学成分见表 4。废塑料中不存在有害元素 Cl，S 含量也很低，C、H 含量很高，高于焦粉中含量。

表 1 高磷铁矿主要化学成分

Table 1 Chemical composition of high phosphorus iron ore									
Component	TFe	Fe_2O_3	P	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	S
Content/wt%	44.35	63.41	1.08	16.19	7.07	7.04	2.10	0.75	0.04

表 2 焦粉工业分析

Table 2 Proximate analysis of coke fines				
Component	Moisture	Ash	Volatile	Fixed carbon
Content/wt%	1.05	12.91	3.58	82.46

表 3 焦粉灰分中主要化学成分

Table 3 Main chemical component of coke ash						
Component	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	S
Content/wt%	48.16	8.05	33.78	4.05	0.72	0.42

表 4 废塑料的化学成分

Table 4 Chemical composition of waste plastics					
Component	C	N	S	H	O
Content/wt%	91.94	0.02	0.28	7.49	0.27

2.2 实验设备

高磷铁矿成分由 EDX1800C 型 X 荧光分析仪(德国布鲁克公司)分析，废塑料成分分析采用 VarioELII 型 CHONS 元素分析仪(德国 Element 公司)。高磷铁矿团块失重实验装置 MTLQ-HYJY-1 还原炉(重庆金碧电气公司)如图 1 所示，加热装置为 SiMo 电阻炉，温度上限 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ ，电子天平精确度 0.001 g ，数据采集间隔为 1 s 。

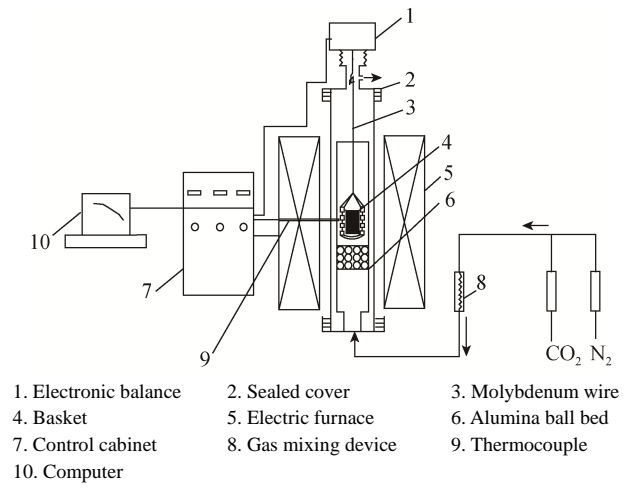


图 1 高磷铁矿团块失重实验装置
Fig.1 Experimental apparatus for weight loss of high phosphorus iron ore

2.3 实验方法

高磷铁矿磨细至粒度小于 0.074 mm 的颗粒占 90%，焦粉磨细至粒度小于 0.074 mm 的颗粒占 95%，通过内配 CaCO_3 调节碱度至 0.8，其它配料如表 5 所示。 Na_2SO_4 添加量为调节碱度后团块质量的比例，废塑料替代量为废塑料中碳含量对焦粉中固定碳含量的替代比例。

表 5 不同条件下配料参数

Table 5 Proportion parameters under different conditions					
Addition	High phosphorus iron ore/g	CaCO_3/g	Coke fines/g	$\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{g}$	Waste plastics/g
Base condition	90.45	9.55	16.00	0	0
4% Na_2SO_4	90.45	9.55	16.00	4.00	0
4% Na_2SO_4 and replacing 25% coke with waste plastics	90.45	9.55	12.41	4.00	3.59

混合料混匀后加入 2%浓度 0.02 g/mL 的淀粉溶液润湿，用压块机在 8 kN 压力下压制成直径 20 mm 、高 12 mm 的圆柱团块，放入恒温鼓风干燥箱内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥 4 h 后进行还原动力学实验。

反应器升至设定温度后，通入 N_2 和 CO_2 混合气体(流量分别为 14 和 $1\text{ L/min}^{[8]}$)，控温 30 min ，温度稳定后将吊篮放在电子天平下方挂钩上，清零，再将干燥后的团块置于吊篮中放入反应器，启动电脑自动数据采集。

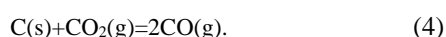
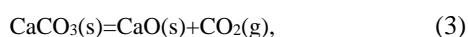
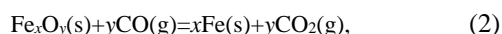
程序,当团块质量不再变化时,关闭数据采集程序,停止实验.

由不同时间高磷铁矿含碳团块失重可计算反应分数 r :

$$r=(m-m_i)/(m_0+m_C+m_{CO_2}), \quad (1)$$

其中, m 为反应前团块质量(g), m_i 为 t 时刻团块质量(g), m_0 为团块中铁氧化物中的 O 质量(g), m_C 为团块中 C 含量(g), m_{CO_2} 为团块中 $CaCO_3$ 中的 CO_2 质量(g).

弱氧化性气氛下高磷铁矿含碳团块主要反应如下:



弱氧化性气氛下,对高磷铁矿含碳团块的还原过程作以下假设:(1)忽略团块内部挥发分扩散对还原过程的影响;(2)团块内部化学物质颗粒均匀分布.

高磷铁矿含碳团块的还原过程主要为:外界气体从气固边界层扩散到颗粒表面,团块内部 $CaCO_3$ 分解产生 CO_2 气体, CO_2 气体与团块中的碳反应产生 CO 气体, CO 从多孔固体产物铁层继续扩散到达 Fe_xO_y 界面与之反应生成 CO_2 气体,继续从多孔固体产物铁层扩散至颗粒表面,再从气固边界层进入气相^[13].

高磷铁矿含碳团块的还原过程可能的限制性环节主要有碳气化、界面化学反应和团块固相颗粒间的气体扩散. 3 种限制性环节分别用不同动力学模型处理,碳气化为限制性环节时反应速度表达式^[14]为

$$\ln(1-nr)=-kt, \quad (5)$$

其中, $n=0.95$, k 为含碳团块的还原反应速率常数, t 为反应时间.

界面化学反应为限制性环节时反应速度表达式^[15]为

$$1-(1-r)^{1/3}=kt, \quad (6)$$

团块固相颗粒间的气体扩散为限制性环节且扩散符合 Tick 定律时,反应速度表达式为

$$1-2/3r-(1-r)^{2/3}=kt. \quad (7)$$

用式(5)~(7)拟合实验数据,若限制性环节为碳气化,则 $-\ln(1-nr)$ 与 t 呈直线关系,通过直线斜率可求解动力学参数.

根据各限制性环节时不同温度下的斜率 k ,用 Arrhenius 经验方程可计算活化能:

$$k=A\exp[-E/RT], \quad (8)$$

其中, E 为活化能(kJ/mol), A 为频率因子(min^{-1}), T 为温度($^{\circ}\text{C}$).

3 结果与分析

3.1 还原动力学

3.1.1 基准条件下还原

基准条件下团块在不同温度下的反应失重如图2所示.由图可知,不同温度下团块的失重规律相同,开始时快速失重,一定时间后球团质量不再变化,反应已结束.

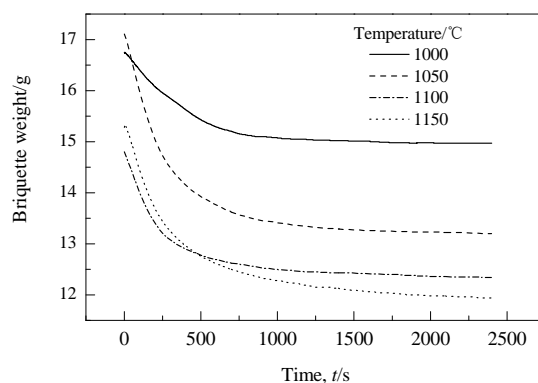


图2 基准条件下团块的失重

Fig.2 Weight loss of briquette at base condition

高磷铁矿含碳团块的反应分数与反应时间的关系如图3所示.由图可知,还原过程中反应分数随时间增加而增大,反应达到终点时,温度越高反应分数越大,1000 和 1150 $^{\circ}\text{C}$ 下反应终止时反应分数分别为 0.34 和 0.73.

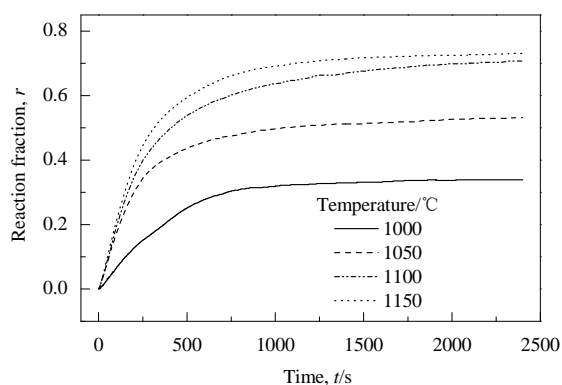


图3 不同温度下反应分数与时间的关系

Fig.3 Relationship between reaction fraction and time at different temperatures

不同限制环节的动力学拟合结果如图4所示.由图可知,式(7)拟合的线性关系良好,气相扩散为限制性环

节. 由图 4(c)直线斜率可得出各温度下的反应速率常数 k , 见表 6.

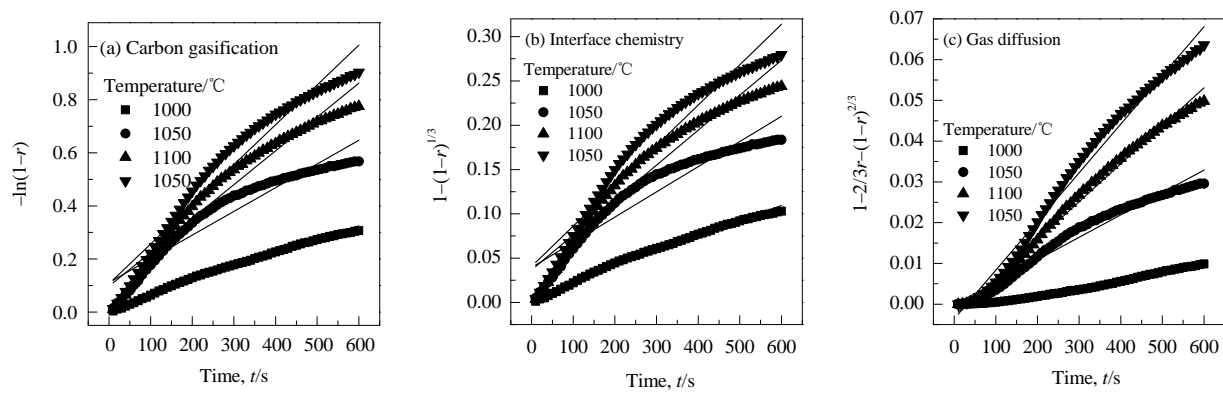


图 4 不同限制性环节的动力学拟合结果
Fig.4 Dynamic simulation results of different restricted links

表 6 基准条件下不同温度下团块的反应速率常数
Table 6 Reaction rate constants at different temperatures under base condition

Parameter	Reduction temperature/°C			
	1000	1050	1100	1150
$k/(\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s})$	0.19	0.65	1.1	1.5
$\ln k$	-10.87	-9.64	-9.11	-8.80
Correlation coefficient	0.98	0.98	0.99	0.99

3.1.2 添加 4% Na_2SO_4 还原

添加 4% Na_2SO_4 还原的高磷铁矿含碳团块在不同温度下的失重情况如图 5 所示. 由图可知, 开始时快速失重, 一定时间后球团质量不再变化.

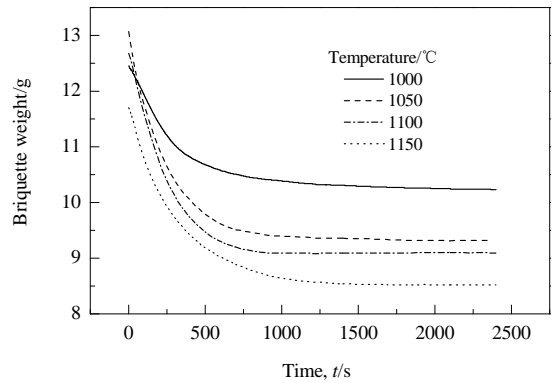


图 5 添加 4% 硫酸钠还原的团块的失重
Fig.5 Weight loss of briquettes adding 4% Na_2SO_4

添加 4% Na_2SO_4 还原的高磷铁矿含碳团块的反应分数与反应时间的关系如图 6 所示. 由图可见, 还原开始时反应分数随时间增加而增加, 一定时间后不再而增加, 反应达到终点时, 温度越高反应分数越大, 1000 和 1150 °C 时反应终止时反应分数分别为 0.57 和 0.93, 基准条件下仅为 0.73, 在相同温度和还原时间下, 添加 4% Na_2SO_4 还原的反应分数显著提高.

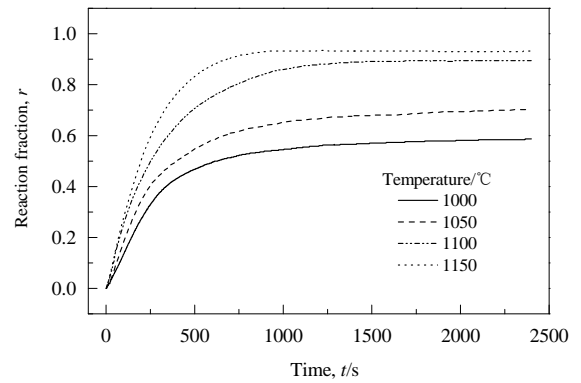


图 6 添加 4% 硫酸钠不同温度下反应分数与时间的关系
Fig. 6 Relationship between reaction fraction and time at different temperatures adding 4% Na_2SO_4

将图 6 数据用式(7)拟合, 结果如图 7 所示, 可见二者线性关系良好, 气相扩散为限制性环节. 由直线斜率可得出各温度下的反应速率常数 k , 如表 7 所示.

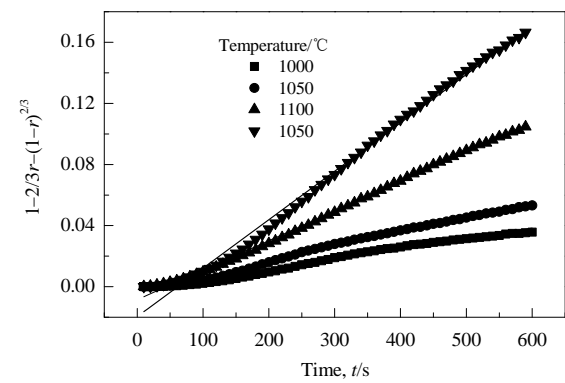


图 7 添加 4% Na_2SO_4 时 $1-2/3r-(1-r)^{2/3}$ 与 t 的拟合曲线
Fig.7 Fitted curves between $1-2/3r-(1-r)^{2/3}$ and t adding 4% sodium sulfate

表 7 不同温度下添加 4%Na₂SO₄ 还原的团块的反应速率常数
Table 7 Reaction rate constants at different temperatures for briquettes adding 4% Na₂SO₄

Parameter	Reduction temperature/℃			
	1 000	1 050	1 100	1 150
$k/(\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s})$	0.69	0.98	1.9	3.2
$\ln k$	-9.58	-9.23	-8.56	-8.04
Correlation coefficient	0.98	0.99	0.99	0.99

3.1.3 添加 4% Na₂SO₄ 同时废塑料替代 25%焦粉还原
添加 4% Na₂SO₄ 同时废塑料替代 25%焦粉还原高磷铁矿含碳团块时在不同温度下团块的失重如图 8 所示。由图可知,不同温度下团块失重规律相同,开始时快速失重,一定时间后质量不再变化。

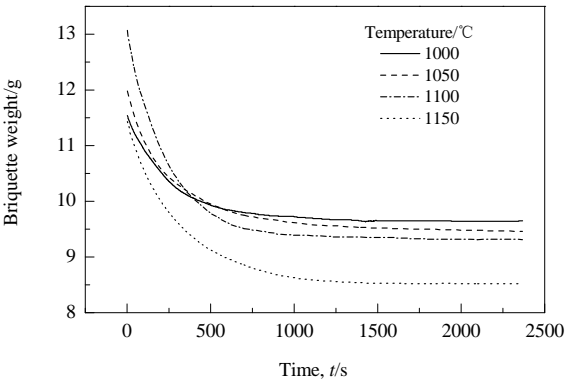


图 8 添加 4% Na₂SO₄ 同时废塑料替代 25%焦粉还原时团块的失重

Fig.8 Weight loss of briquette adding 4% Na₂SO₄ and replacing 25% coke fines with waste plastics

高磷铁矿含碳团块反应分数与反应时间的关系如图 9 所示。由图可知,还原开始反应分数随时间增加而增加,一定时间后不再随时间增加而增加,反应达到终点时,温度越高反应分数越大,1000℃下反应终止

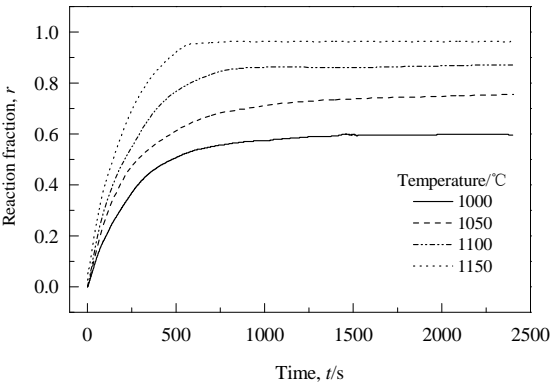


图 9 添加 4% Na₂SO₄ 同时废塑料替代 25%焦粉还原时不同温度下反应分数与时间的关系

Fig.9 Relationship between the reaction fraction and time at different temperatures with addition of 4% Na₂SO₄ and replacing 25% coke fines with waste plastics

时的反应分数为 0.59, 1150℃下反应终止时的反应分数达 0.96, 比仅添加 4%Na₂SO₄ 时(0.94)提升,表明焙烧还原过程中添加废塑料替代焦粉能小幅提高团块反应分数。

图 9 的数据用式(7)拟合,结果如图 10 所示,拟合数据线性良好,气相扩散为限制性环节。由各直线斜率可得各温度下的反应速率常数 k , 如表 8 所示。

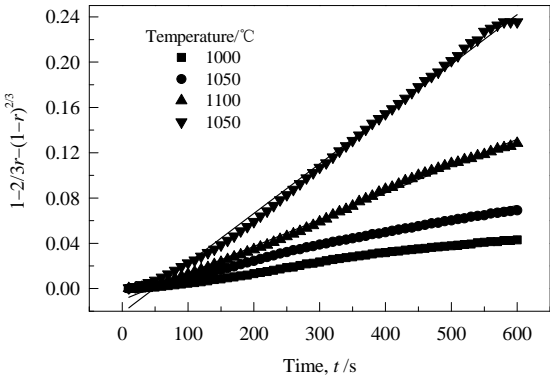


图 10 添加 4% Na₂SO₄ 同时废塑料替代 25%焦粉时 $1-2/3r-(1-r)^{2/3}$ 与 t 的拟合曲线

Fig.10 Fitted curves between $1-2/3r-(1-r)^{2/3}$ and t adding 4% Na₂SO₄ and replacing 25% coke fines with waste plastics

表 8 不同温度下添加 4% Na₂SO₄ 同时废塑料替代 25%焦粉时条件团块的反应速率常数

Parameter	Reduction temperature/℃			
	1000	1050	1100	1150
$k/(\times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s})$	0.81	1.2	2.4	4.2
$\ln k$	-9.42	-9.02	-8.33	-7.73
Correlation coefficient	0.99	0.99	0.99	0.99

3 种条件下含碳团块反应的限制性环节均为气体扩散,主要原因是调节团块碱度时 CaCO₃ 加入量在 8% 以上,分解产生 CO₂,可有效促进碳气化,加快界面反应速度。由表 7 和 8 可知,添加 4% Na₂SO₄ 同时废塑料替代 25%焦粉还原时比仅添加 4% Na₂SO₄ 还原时反应速率提高,这是因为废塑料中碳含量和挥发分含量较高,高温下废塑料受热分解,挥发分挥发后使团块空隙变大,还原气体更易在空隙表层发生还原反应。

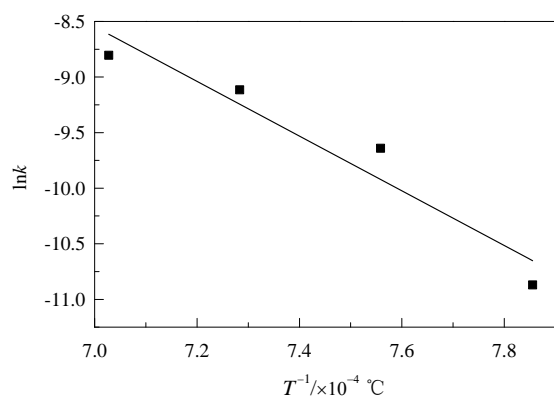
3.2 反应活化能

3.2.1 基准条件还原

由表 6 中反应速率常数得 $\ln k$ 与 T^{-1} 的拟合曲线如图 11 所示。用 Arrhenius 方程计算活化能,线性方程为 $\ln k=-24647.2/T+8.711$, 活化能为 204.92 kJ/mol。

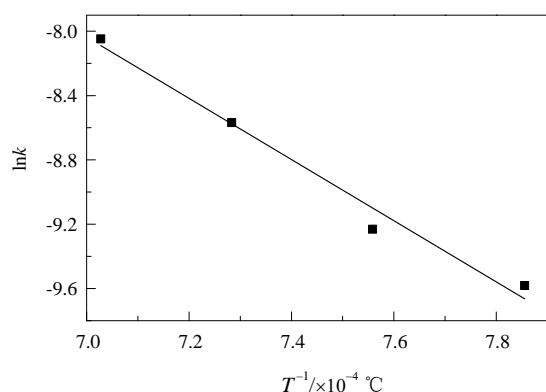
3.2.2 添加 4% Na₂SO₄ 还原

由表 7 中的反应速率常数可得 $\ln k$ 与 T^{-1} 的拟合曲

图11 基准条件下 $\ln k$ 与 T^{-1} 的关系Fig.11 $\ln k$ vs T^{-1} at base condition

线如图12所示。用 Arrhenius 方程计算活化能, 线性方程为 $\ln k = -19102.5/T + 5.343$, 活化能为 158.81 kJ/mol。

加入 Na_2SO_4 后含碳团块的活化能比基准条件下降低, 主要是因为还原过程中 Na_2SO_4 优先与高磷铁矿团块中的 SiO_2 和 Al_2O_3 反应生成铝硅酸钠, 破坏了矿石结构, 使还原气体更易扩散到反应界面, 提高了反应速率, 促进了铁原子扩散和铁晶粒长大。

图12 添加4%硫酸钠时 $\ln k$ 与 T^{-1} 的线性回归曲线Fig.12 $\ln k$ vs. T^{-1} with addition of 4% Na_2SO_4

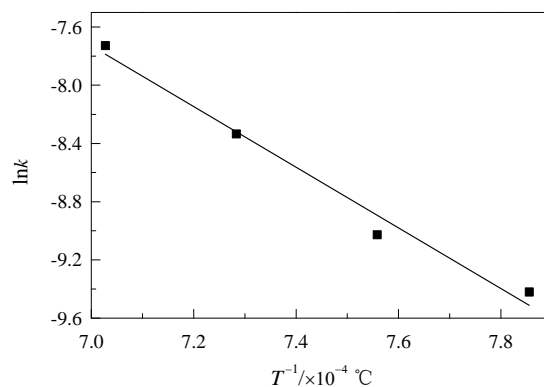
3.2.3 添加4%硫酸钠同时废塑料替代25%焦粉还原

由表8中反应速率常数可得 $\ln k$ 与 T^{-1} 的拟合曲线如图13所示, 线性方程为 $\ln k = -20796.1/T + 6.839$, 活化能为 172.89 kJ/mol。

基准条件、添加4%硫酸钠和添加4%硫酸钠同时添加废塑料替代25%焦粉条件下, 含碳团块还原反应表观活化能分别为 204.92, 158.81 和 172.89 kJ/mol, 表观活化能越低还原反应越易进行。

4 结论

在还原温度 1000~1150℃、还原时间 40 min 及 $\text{N}_2/\text{CO}_2=14/1(\text{vol})$ 的气氛下, 研究了基准条件(无添加

图13 添加4%硫酸钠和废塑料替代25%焦粉还原时 $\ln k$ 与 T^{-1} 的关系Fig.13 $\ln k$ vs. T^{-1} with addition of 4% Na_2SO_4 and replacing 25% coke fines with waste plastics

Na_2SO_4 和废塑料)、添加4%硫酸钠和添加4%硫酸钠同时废塑料替代25%焦粉还原高磷铁矿含碳团块的动力学, 得到如下结论:

(1) 3种条件下高磷铁矿含碳团块还原限制性环节均为气相扩散。相同还原温度和时间下, 添加4%硫酸钠还原的反应速率比基准条件显著提高; 添加废塑料替代25%焦粉后, 由于废塑料中碳含量和挥发分含量较高, 高温下受热分解, 还原气体更易扩散到空隙表层发生还原反应, 还原反应速率提高。

(2) 高磷铁矿含碳团块中加入4%硫酸钠后, 活化能由基准条件下的 204.92 kJ/mol 降低至 158.81 kJ/mol, 添加4%硫酸钠同时废塑料替代25%焦粉后, 活化能降低至 172.89 kJ/mol。

参考文献:

- [1] 王海军, 殷俐娟. 我国铁矿资源的全球配置 [J]. 中国矿业, 2011, 20(2): 6-9.
Wang H J, Yin L J. China's Iron Ore Resource in the Global Configuration [J]. China Mining Magazine, 2011, 20(2): 6-9.
- [2] 沈峰满, 姜鑫, 高强健, 等. 直接还原铁生产技术的现状及展望 [J]. 钢铁, 2017, 52(1): 7-9.
Sheng F M, Jiang X, Gao Q J, et al. Situation and Prospect on Production Technology of Direct Reduction Iron [J]. Iron and Steel, 2017, 52(1): 7-9.
- [3] 黄凯, 修伟帆, 郭占成, 等. 高磷铁矿脱磷技术现状及磷资源化提取新方法 [J]. 钢铁, 2016, 51(10): 1-5.
Huang K, Xiu Y F, Guo Z C, et al. Advance in Dephosphorisation of High Phosphorus Iron Ore and New Technology Recovering Phosphorus as a Resource [J]. Iron and Steel, 2016, 51(10): 1-5.
- [4] 张汉泉. 鲕状赤铁矿特征和选冶技术进展 [J]. 中国冶金, 2013, 23(11): 6-10.
Zhang H Q. Mineralogical Properties and Tendency on Utilizing Methods of Oolitic Hematite [J]. China Metallurgy, 2013, 23(11): 6-10.
- [5] 谢朝明. 高磷鲕状赤铁矿直接还原焙烧-磁选新工艺及机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 53-56.

- Xie Z M. Study on Innovative Process and Mechanisms of High-phosphorus-content Oolitic Hematite Ores Processed by Reduction Roasting-Magnetic Separation [D]. Changsha: Central South University, 2010: 53-56.
- [6] 孙永升, 李淑菲, 史广全, 等. 某鲕状赤铁矿深度还原试验研究 [J]. 金属矿山, 2009, 39(5): 80-83.
- Sun Y S, Li S F, Shi G Q, et al. Research on Deep Reduction of an Oolitic Hematite [J]. Metal Mine, 2009, 39(5): 80-83.
- [7] 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: 61-70.
- 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 Beijing, 2015: 61-70.
- [8] 程红伟, 鲁雄刚, 李谦, 等. 含碳球团还原动力学机理 [J]. 中国稀土学报, 2008, 8(26): 102-105.
- Cheng H W, Lu X G, Li Q, et al. Incident Ball Reflex Principle Kinetic Discipline [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 8(26): 102-105.
- [9] 魏汝飞, 李家新, 李杰民, 等. 弱氧化性气氛下尘泥含碳球团的还原动力学 [J]. 过程工程学报, 2011, 11(3): 429-435.
- Wei R F, Li J X, Li J M, et al. Reduction Kinetics of Dust Containing Carbon Pellets in a Weakly Oxidizing Atmosphere [J]. Chin. J. Process Eng., 2011, 11(3): 429-435.
- [10] 储满生, 王兆才, 柳政根, 等. 热压含碳团块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 M S, Wang Z C, Liu Z G, et al. Experimental Study on the Limiting Process of Self-reduction in Hot Pressed Carbon Briquette [J]. Chin. J. Process Eng., 2010, 10(1): 121-126.
- [11] 满毅, 冯俊小, 葛琦. 含煤球团直接还原热失重及动力学分析 [J]. 化工进展, 2015, 34(3): 701-704.
- Man Y, Feng J X, Ge Q. Thermogravimetric and Kinetics Analysis of Direct Reduction of Carbon-containing Pellets [J]. Chemical Industry Engineering Progress, 2015, 34(3): 701-704.
- [12] 李静华. 高磷鲕状赤铁矿还原焙烧-磁选中铁和磷的富集行为研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014: 29-36.
- Li J H. Phosphorus and Iron Enrichment Behaviors during Reduction Roasting and Magnetic Separation of High-phosphorus Oolitic Hematite [D]. Changsha: Central South University, 2014: 29-36.
- [13] 曹立军, 刘道献. 钒钛磁铁矿固态直接还原的动力学研究 [J]. 钢铁研究, 2014, 45(1): 26-28.
- Cao L J, Liu D X. Kinetics Study on Solid-state Direct Reduction of Vanadium-Titanium Magnetite [J]. Research on Iron and Steel, 2014, 45(1): 26-28.
- [14] Seaton C E, Foster J S, Velasco J. Reduction Kinetics of Hematite and Magnetite Pellets Containing Coal Char [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1983, 23(6): 490-496.
- [15] Rao Y K. The Kinetics of Reduction of Hematite by Carbon [J]. Metall. Mater. Trans. B, 1971, 2(5): 1439-1447.