

氧化铁碳热还原过程间接还原规律研究

郭培民 赵 沛 孔令兵 王 磊

(钢铁研究总院 北京 100081)

摘 要: 为了研究碳热还原过程的间接还原规律,在 20 kg/h 推舟炉加热装备上开展试验,借助在线气体分析仪和金属铁产品的化学成分检测,探讨了煤种、煤粉粒度以及铁精矿粉制备方式等因素对间接还原反应的影响,最后从理论上解析了该反应过程的间接还原来源和定量关系。研究表明:间接还原主要来源于碳热直接还原过程产生的 CO 与氧化铁间发生的化学反应;步进还原过程中,煤中部分挥发分参与间接反应,使得稳定期煤气中的 $\text{CO}_2/(\text{CO} + \text{CO}_2)$ 比例超过 20%;铁精矿粉粒度越小,还原效果越好,间接还原比例越高。

关键词: 钛精矿;碳热还原;间接还原;氧化铁

中图分类号: TF55 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2019)05-0104-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.05.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on Indirect Reduction Law in Carbothermal Reduction Process for Iron Oxide

Guo Peimin, Zhao Pei, Kong Lingbing, Wang Lei

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the law of indirect reduction in the process of carbothermal reduction, experiments were carried out on a 20 kg/h pushing boat heating furnace. The changes of gas composition in the process were recorded by on-line gas analyzer, and composition of reduced samples was measured. The influence of coal type, particle size of pulverized coal and preparation method of iron concentrate on indirect reduction reaction was discussed. Finally, the source and quantitative relationship of indirect reduction process were analyzed theoretically. The results show that indirect reduction mainly comes from the chemical reaction between iron oxide and CO produced by direct carbothermal reduction process. During the step reduction process, some volatiles of coal are involved in the reaction, leading to the proportion of $\text{CO}_2/(\text{CO} + \text{CO}_2)$ in the stable gas more than 20%. In a certain range, the smaller size of iron ore concentrate powder achieve better the reduction effect.

Key words: iron concentrate, carbothermic reduction, indirect reduction, iron oxide

0 引言

碳热还原过程是煤基直接还原工艺的重要反应过程,如回转窑、含碳球团还原等^[1-4]。一般按照碳氧比来配煤,即按照氧化铁中的氧含量和煤中固定碳的

摩尔比确定一个比值,然后根据反应条件,适当地增加一定的煤量,即过量系数。一般通过试验去摸索此参数,对于转底炉此过量系数可在 1.2~1.6。然而实际状态的反应过程是比较复杂的,除了 C 和氧化铁反应外,还存在反应产生的 CO 与氧化铁发生的间接还

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金委员会——中国宝武钢铁集团有限公司钢铁联合重点研究基金资助(U1560201)。

作者简介: 郭培民(1975—),男,正高级工程师,博士生导师,主要从事钢铁冶金工艺及理论研究,Email: guopm@pku.org.cn。

原 反应耦合在一起。研究者利用热重—红外或热重质谱仪等测试手段研究了碳热还原条件的间接还原规律,发现碳还原氧化铁过程存在一定比例的间接还原^[5-11],但试验规模偏小,另外缺少定量化的解析。

笔者所在的研究团队已进行了不少气基间接还原及氧化铁煤基还原的研究^[12-16],在已有的研究经验基础上并在国家重点自然科学基金资助下,将碳热还原的规模放大到 20 kg/h,并实现准连续化试验。借助金属铁产品成分分析以及还原过程在线气体成分,研究碳热还原过程中的金属铁间接还原比例以及各种相关影响因素,并试图进行定量化解析。

1 试验装备及步骤

1.1 试验原料

试验中采取的纯铁精矿粉全铁含量达到71.34%,通过搅拌磨磨细成粒度通过 400 目(<0.037 mm),另外一部分铁精矿粉通过普通锤破碎,粒度分布见表 1。

煤粉采用兰炭和气煤,成分见表 2。粒度磨细到~100 目(0.150 mm) 水平。由于兰炭反应性较差,因此在使用兰炭作还原剂时,配加了兰炭质量 4% 的碳酸钠(分析纯),以提高兰炭的反应性。

1.2 试验装备

推舟加热炉(见图 1) 的加热段 2 m,加热段长度方向可连续放入 8 个钢舟物料,加热段后接冷却段 2 m,炉内产生的煤气从推舟炉前段出气口流出,接着通过水洗排空。加热时炉内通氮气保护。钢舟尺寸 250 mm(长) ×200 mm(宽) ×60 mm(高),钢舟材质为 310S 耐热不锈钢。

做完试验后,还原后的样品做化学成分分析。

表 1 锤破后铁矿粉的粒度分布
Table 1 Size distribution of Iron ore concentrate powder after hammer breaking

粒度/目(mm)	比例/ %
>20(>0.84)	6.7
20~40(0.84~0.42)	24.5
40~80(0.42~0.178)	55.0
<80(<0.178)	13.8

表 2 煤的成分
Table 2 The composition of coal

煤的种类	固定碳含量	挥发份	灰分	水分
气煤	52.00	29.45	5.50	13.10
兰炭	83.50	3.25	4.25	9.00

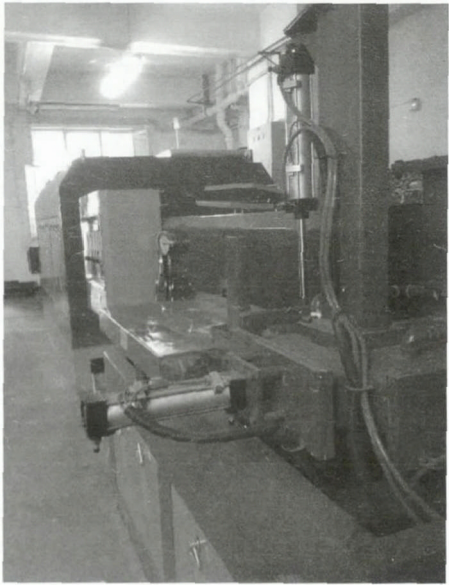


图 1 连续推舟加热炉
Fig.1 Continuous pushing boat heating furnace

在连续性的推舟试验中,在线测定出口煤气成分中的 H₂、CO、CO₂ 体积含量。

1.3 试验步骤

1.3.1 同时间还原试验

按照碳氧比 0.9 : 1 配料,将物料放入 4 个钢舟,料厚 50 mm,每个舟物料质量约 5 kg。首先将加热炉炉膛加热到 1 050 ℃,然后将这 4 个钢舟放到炉内加热段中心区,保持时间 2 h。随后将钢舟推入冷却区冷却至常温。氮气流量 0.5 m³/h。间隙试验煤粉采用兰炭,氧化铁采用普通锤破的纯铁精矿粉。

1.3.2 步进还原试验

在步进还原试验中,用气煤作为还原剂,两种铁精矿粉粒度都使用,按照碳氧比 0.9 : 1 配料。每 15 min 向加热炉内送一个钢舟,钢舟在加热段停留时间大约 2 h,加热段设定温度为 1 050 ℃。步进试验合计向炉内送入 20 个盛有物料的钢舟。具体配料见表 3。在钢舟进入炉内同时,启动在线气体分析仪。

2 试验结果

2.1 同时间还原

还原铁中残炭大于 2%,同时金属化率达到 98%,表明碳过剩了。由于兰炭中挥发份较低,可忽略它对间接还原的影响。间接还原和直接还原的计算可根据文献^[17]计算。每个钢舟中铁的间接还原等参数见表 4。根据产品成分可以计算出还原炉内间接还原度大约为 17%。

表3 步进试验条件及还原结果
Table 3 Step test conditions and reduction results

序号	矿粉破碎方式	舟的数量	$w_C / \%$	$w_{MFe} / \%$	$w_{TFe} / \%$	金属化率 / %	还原率 / %	直接还原度 / %	间接还原度 / %
1	锤破	4	4.13	85.16	91.11	93.47	95.11	78.37	21.63
2	搅拌磨	2	7.08	87.40	89.41	97.75	98.31	63.76	36.24
3	锤破	2	4.52	80.85	89.45	90.39	92.79	78.37	21.63
4	搅拌磨	2	8.32	85.36	89.75	95.10	96.33	62.89	37.11
5	锤破	10	3.52	84.58	92.47	91.46	93.60	82.35	17.65

表4 还原后海绵铁粉化学成分
Table 4 Chemical compositions of reduced DRI

钢舟编号	$w / \%$			直接还原度 / %	间接还原度 / %	金属化率 / %	还原率 / %
	[C]	[MFe]	[TFe]				
1	2.75	93.08	94.59	81.20	18.80	98.40	98.80
2	2.46	93.68	95.16	82.31	17.69	98.44	98.83
3	2.42	92.90	94.81	82.72	17.28	97.99	98.49
4	2.47	93.31	95.36	82.67	17.33	97.85	98.39

2.2 步进还原

2.2.1 气体成分变化

步进还原过程气体成分变化规律见图2。从图2可见,煤气成分呈现规律性波动,这主要与间隔推舟有关。当炉门打开进新舟后,新舟中的煤粉受热挥发,表现出煤气中的氢含量急剧升高, CO 、 CO_2 则相应下降。试验前期,氢含量高,平均超过了30%,而 CO 平均只有35%,这主要是前期,进去的舟少,没有充满整个高温段。因此,煤粉挥发份占的比例高。随着反应的进行,进入反应中期, CO 平均含量处于55%~65%,而 H_2 则下降到20%左右, CO_2 则处于15%左右;反应后期,没有新舟进入炉内,则氢含量逐渐下降到不足10%,而 CO 接近80%, CO_2 则只有10%。当舟全部推出高温区后,这几种气体浓度归于0。

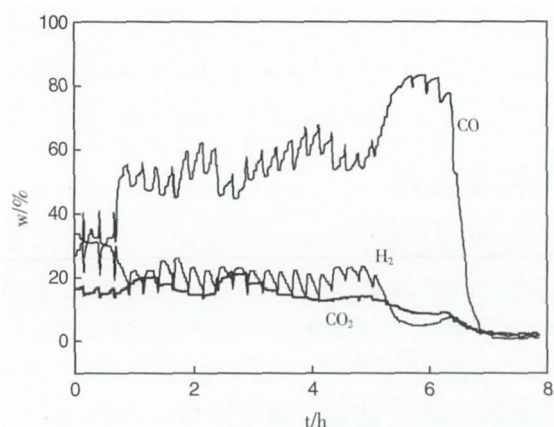


图2 煤气成分变化

Fig.2 Variation of gas composition

2.2.2 还原情况

从表3可见,铁粉采用搅拌磨,还原效果最好,金属化率超过了95%。这是因为搅拌磨磨的铁粉很细,全部小于400目(0.037 mm),平均粒度在0.015 mm。因此,反应比表面积大,且扩散层厚度薄,搅拌磨样品的间接还原率高(超过了36%)。根据动力学基本规律,碳的直接还原由碳的气化反应和 FeO 的间接还原组成,其中碳的气化反应是限制性环节。样品中的残炭很高,这也表明间接还原很充分,甚至超过了1050℃的平衡值($CO_2 / (CO + CO_2) = 29.5\%$)。产生这个偏差的原因,与本计算中假定所有的铁还原均来自碳有关。实际上本试验还原剂采用了挥发性较高的气煤,挥发份中的氢气参与了 Fe_3O_4 的间接反应。

3 间接还原来源及量化分析

Fe_3O_4 还原到金属铁,经历了两个阶段,第一阶段,从 Fe_3O_4 到 FeO ;第二阶段,从 FeO 到金属铁。在第一阶段,主要反应为 $C + CO_2 = 2CO$ 与 $Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2$;在第二阶段,主要反应为 $C + CO_2 = 2CO$ 与 $FeO + CO = Fe + CO_2$ 。先分阶段讨论:

3.1 预热段内生CO的间接还原

在预热区,当温度超过700℃以上会发生直接还原反应 $C + Fe_3O_4 = 3FeO + CO$,产生的 CO 会进一步与 Fe_3O_4 反应生成 FeO 或金属铁。

从图3可见,图中0点气体成分,此时煤气成分介于 $Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2$ 的煤气平衡点b点与 $C +$

$\text{CO}_2=2\text{CO}$ 平衡点 a 点之间。此时该成分点煤气,既能发生 $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}=3\text{FeO}+\text{CO}_2$ 推动 0 点向 b 点移动;又能发生 $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ 促使 0 点向 a 点移动。这两种反应 0 点移动方向是相反的,如果 $\text{C}+\text{CO}_2$ 气化还原快于间接还原,则 0 点向 a 点移动,反之则向 b 点移动。因此最终平衡点是两个反应的反应速度相当。

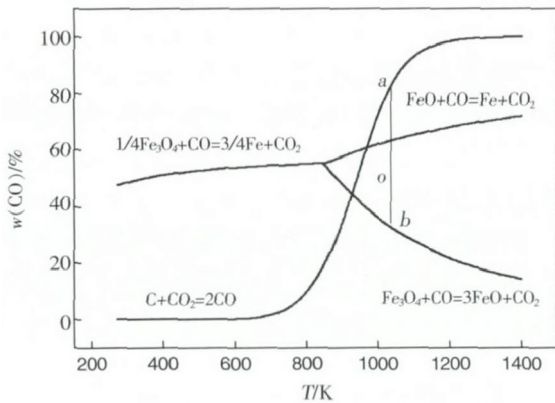


图3 煤气成分介于 $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ 与 $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{C}=3\text{FeO}+\text{CO}$ 曲线的位置关系

Fig.3 Position of gas composition between curve $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ and curve $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{C}=3\text{FeO}+\text{CO}$

$\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}=3\text{FeO}+\text{CO}_2$ 及 $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ 的反应速率分别见式(1)和式(2)^[13,15]:

$$\frac{df_1}{d\tau} = \frac{3}{r_1 \rho_1} k_1 \left(1 + \frac{1}{K_1} \right) (c_{\text{CO}}^i - c_{1\text{平}}) (1-f_1)^{2/3} \quad (1)$$

$$\frac{df_2}{d\tau} = \frac{3}{r_2 \rho_2} k_2 \left(c_{2\text{平}} - c_{\text{CO}} + \frac{c_{2\text{平}}^2 - c_{\text{CO}}^2}{K_2} \right) (1-f_2)^{2/3} \quad (2)$$

当反应处于动态平衡时,二者反应速率相同,则:

$$\frac{3}{r_1 \rho_1} k_1 \left(1 + \frac{1}{K_1} \right) (c_{\text{CO}}^i - c_{1\text{平}}) (1-f_1)^{2/3} = \frac{3}{r_2 \rho_2} k_2 \left(c_{2\text{平}} - c_{\text{CO}} + \frac{c_{2\text{平}}^2 - c_{\text{CO}}^2}{K_2} \right) (1-f_2)^{2/3} \quad (3)$$

式中 f_1, f_2 分别为 $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}$ 反应、碳气化反应的反应分数; k_1, k_2 分别为 $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}$ 反应、碳气化反应的综合动力学参数 (m/s); K_1, K_2 分别为 $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}$ 反应、碳气化反应的平衡常数; $c_{1\text{平}}, c_{2\text{平}}$ 分别为 $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}$ 反应、碳气化反应平衡时的还原气体浓度 (mol/m³); ρ_1, ρ_2 分别为 $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}$ 反应、碳气化反应的反应前氧化铁球团的氧摩尔数及碳摩尔数 (mol/m³); r_1, r_2 分别为氧化铁粉颗粒及煤粉颗粒的半径 m。

取 $r_1=r_2, \rho_2=0.9\rho_1, T=1123\text{ K}, K_1=1.65, K_2=16.62, k_1=0.0175\text{ m/s}, k_2=0.0012\text{ m/s}$ 。

计算得到平衡点 $\text{CO}=42.5\%, \text{CO}_2=57.5\%$ 。

预热段内生 CO 煤气来自 C 与 Fe_3O_4 的直接还原或来自部分煤中的挥发份。煤的挥发份暂且不考虑。

假定从 Fe_3O_4 到 FeO 反应是由直接还原和 CO 间接还原叠加而成的,且此部分产生的 CO 不参与 FeO 到金属铁的反应。直接还原比例设为 x , 且

$$x+x(1-\% \text{CO})=1$$

则 $x=0.635$, 即直接还原比例为 63.5%, 间接还原比例 36.5%。

考虑到此阶段还原量占整个还原的 0.25, f 为整体还原分数 f 取 0.9, 本阶段间接还原占总体煤气间接还原的贡献为 10.1%。

3.2 高温段内生 CO 的间接还原

在高温区, 温度超过 $1000 \sim 1050^\circ\text{C}$, 将前段还原到 FeO 的物料进一步还原到还原分数为 f 的海绵铁。

图4中 0 点气体成分, 此时煤气成分点介于 $\text{FeO}+\text{CO}=\text{Fe}+\text{CO}_2$ 的煤气平衡点 b 点与 $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ 平衡点 a 点之间, 此时该成分点煤气, 既能发生 $\text{FeO}+\text{CO}=\text{Fe}+\text{CO}_2$, 推动 0 点向 b 点移动; 又能发生 $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$, 促使 0 点向 a 点移动。这两种反应 0 点移动方向是相反的, 如果 $\text{C}+\text{CO}_2$ 气化还原快于间接还原, 则 0 点向 a 点移动, 反之则向 b 点移动。因此最终平衡点是两个反应的反应速度相当。

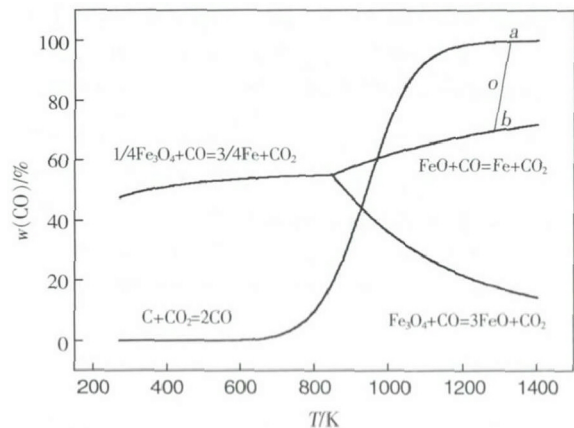


图4 煤气成分介于 $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ 与 $\text{FeO}+\text{C}=\text{Fe}+\text{CO}$ 曲线的位置关系

Fig.4 Position of gas composition between curve $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$ and curve $\text{FeO}+\text{C}=\text{Fe}+\text{CO}$

$\text{FeO}+\text{CO}=\text{Fe}+\text{CO}_2$ 的反应速率分别见式(4)^[13,15]:

$$\frac{df_3}{d\tau} = \frac{3}{r_3 \rho_3} k_3 \left(1 + \frac{1}{K_3} \right) (c_{\text{CO}}^i - c_{3\text{平}}) (1-f_3)^{2/3} \quad (4)$$

当反应处于动态平衡时, 式(4)和式(2)二者反

应速率相同 则:

$$\frac{3}{r_3 \rho_3} k_3 \left(1 + \frac{1}{K_3}\right) (c_{\text{CO}}^i - c_{3\text{平}}) (1 - f_3)^{2/3} = \frac{3}{r_2 \rho_2} k_2 \left(c_{2\text{平}} - c_{\text{CO}} + \frac{c_{2\text{平}}^2 - c_{\text{CO}}^2}{K_2}\right) (1 - f_2)^{2/3} \quad (5)$$

式中 f_3 为 $\text{FeO} + \text{CO}$ 反应的反应分数; k_3 为 $\text{FeO} + \text{CO}$ 反应的综合动力学参数 (m/s); K_3 为 $\text{FeO} + \text{CO}$ 反应的平衡常数; $c_{3\text{平}}$ 为 $\text{FeO} + \text{CO}$ 反应的平衡时还原气体浓度 (mol/m^3); ρ_3 为 $\text{FeO} + \text{CO}$ 反应的反应前氧化铁球团的氧摩尔数 (mol/m^3); r_3 为 FeO 颗粒的半径 μm 。

取 $r_3 = r_2$ $\rho_2 = 0.9\rho_3$ $T = 1323\text{ K}$ $K_3 = 0.38$ $K_2 = 440.8$ $k_3 = 0.035\text{ m/s}$ $k_2 = 0.178\text{ m/s}$ 。

计算得到平衡点 $\text{CO} = 89.5\%$ $\text{CO}_2 = 10.5\%$ 。

可以得到间接还原比例为 9.5%。

考虑到此阶段还原量占整个还原的 $0.75/f$ f 为整体还原分数 f 取 0.9, 本阶段间接还原占总体煤气间接还原的贡献为 7.9%。

这样在不考虑煤的挥发份影响条件下, 整体还原过程中间接还原贡献率在 18% 左右。这与前面的兰炭还原结果是一致的。

3.3 连续进料稳定期、末期的间接还原

推舟稳定后 (见图 5 中 3~5 h 区间曲线), 煤气中 CO 体积分数在 60% 左右 $\text{CO}_2/(\text{CO} + \text{CO}_2) = 20\% \sim 24\%$ 要比计算值 18% 高一些, 这也是与煤中的挥发份参与间接还原有关。当不再推入带有物料的钢舟 (见图 5 中 5~6 h 区间曲线), 而仅仅推入空舟后, $\text{CO}_2/(\text{CO} + \text{CO}_2)$ 不断下降, 最终低于 10%, 与计算值 8% 相近。这是因为最后在高温区的钢舟煤粉挥发物已基本挥发完全, 且 $\text{C} + \text{Fe}_3\text{O}_4 = 3\text{FeO} + \text{CO}$ 比例也在下降, 最后只剩下 $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ 反应。

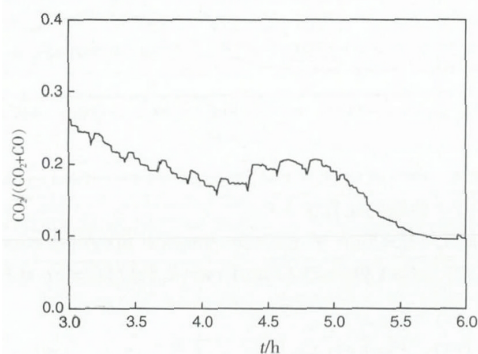


图 5 推舟稳定期及末期气体氧化度变化
Fig.5 Change of oxidation degree of gas at steady stage and last stage

3.4 粒度对间接还原的影响

从图 6 可见, 煤粉/铁矿粉粒度比值对 $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 间接还原比例影响显著, 比值越大, 间接还原比例越大。这是因为当煤粉粒度比铁精矿大时, 碳的气化反应量变少, CO 间接还原量变高, ρ 点向下移动, 间接还原比例提高。当经过搅拌磨磨细后的铁精矿粉还原时, 铁精矿粉平均粒度 0.015 mm, 煤粉平均粒度为 0.265 mm 时, $\text{CO} = 0.741$ $x + x(1 - 0.741) = 1$ $x = 0.794$, 即此阶段间接还原为 20.6%, 占总体还原的 $20.6\% \times 0.75/f = 17.2\%$ 。而第一阶段还原间接还原占总体还原程度为 10.4%, 因此超细粉总体间接还原为 27.6%。

实际反应过程中, 超细铁精粉的间接还原率超过了 36%, 大于 27.6%, 这是因为还有一部分间接还原来自煤中的挥发份。

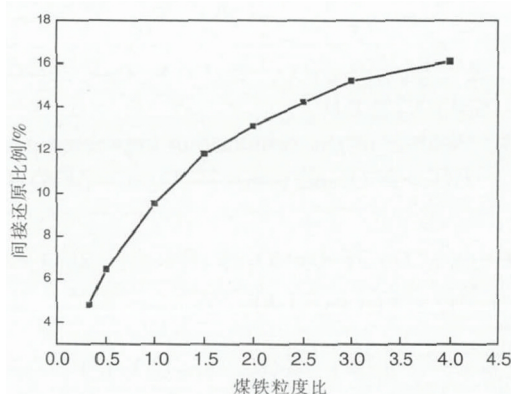


图 6 煤粉/铁矿粉粒度比对 $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 间接还原比例影响
Fig.6 The effect of particle size ratio of coal powder/iron ore powder on the proportion of $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ indirect reduction

4 结论

对碳热还原反应进行了 20 kg/h 准连续试验研究, 借助在线气体成分分析和产品的成分检测, 对间接还原的来源进行了分析, 并进行了量化计算。主要结果如下:

1) 对于挥发性低的兰炭, 通过添加剂的加入, 在 1050 °C 还原 2 h, 金属化率达到了 98%, 间接还原率约为 17%。

2) 在步进还原试验中, 由于采用高挥发性的煤作为还原剂, 部分挥发份参与反应, 使稳定期煤气中 $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{CO})$ 超过 20%。步进试验末期, 由于没有新物料进入炉内, 煤气中 $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{CO})$ 下降到

10%以下。

3) 超细铁矿粉的间接还原比例要明显高于普通粒度铁矿粉的间接还原比例。

4) 氧化铁碳热还原中的间接还原主要来自内生CO的间接反应,包括金属铁还原阶段的间接还原和FeO还原阶段的间接还原,并分别给出了这两

个阶段间接还原产生量的估算方法,估算结果与试验现象和数据基本一致。

5) 除了内生CO的间接还原,煤粉中的挥发分也参与了部分间接反应,提高了整个碳热还原的间接还原比例。

参考文献

- [1] Tiwari P, Bandyopadhyay D, Ghosh A. Kinetics of gasification of carbon and carbothermic reduction of iron oxide [J]. *Ironmaking and Steelmaking* (UK), 1992, 19(6): 464–468.
- [2] Zhu D, Mendes V, Chun T *et al.* Direct reduction behaviors of composite binder magnetite pellets in coal-based grate-rotary kiln process [J]. *ISIJ International*, 2011, 51(2): 214–219.
- [3] Donskoi E, Olivares R I, McElwain D L S *et al.* Experimental study of coal based direct reduction in iron ore/coal composite pellets in a one layer bed under nonisothermal, asymmetric heating [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2006, 33(1): 24–28.
- [4] Yao Meiqin, Yu Jian, Guo Feng *et al.* Non-isotherm kinetic of iron oxide reduction by graphite [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(6): 2072–2079.
(姚梅琴, 余剑, 郭凤 等. 氧化铁石墨固相还原非等温反应动力学 [J]. *化工学报*, 2013, 64(6): 2072–2079.)
- [5] Guo Dabin, Zhu Liandong, Guo Sheng *et al.* Direct reduction of oxidized iron ore pellets using biomass syngas as the reducer [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 148: 276–281.
- [6] Wei Rufe, Cang Daqiang, Zhang Lingling *et al.* Staged reaction kinetics and characteristics of iron oxide direct reduction by carbon [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2015, 22(10): 1025–1032.
- [7] Ding Yingui, Wang Jingsong, She Xuefeng *et al.* Reduction characteristics and kinetics of Bayanobo complex iron ore carbon bearing pellets [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2013, 20(5): 28–33.
- [8] Chanchal Biswas, Prithviraj Gupta, Arnab DeMahua *et al.* Kinetic studies on the reduction of iron ore nuggets by devolatilization of lean-grade coal [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2016, 23(12): 1360–1368.
- [9] Huang B H, Lu W K. Kinetics and mechanisms of reactions in iron ore/coal composites [J]. *ISIJ International*, 1993, 33(10): 1055–1062.
- [10] Bulin Chaoke, Guo Ting. Control of thermodynamics of carbothermic reduction of iron oxides by using factors impacting thermodynamics of carbon gasification [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014, 34(1): 77–81, 86.
(布林朝克, 郭婷. 利用碳气化反应热力学的影响因素调控铁氧化物的碳热还原热力学 [J]. *矿冶工程*, 2014, 34(1): 77–81, 86.)
- [11] Man Yi, Feng Junxiao, Ge Qi *et al.* Thermogravimetric and kinetics analysis of direct reduction of carbon-containing pellets [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(3): 701–704.
(满毅, 冯俊小, 葛琦 等. 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.)
- [12] Guo Peimin, Zhao Pei, Wang Lei *et al.* Oxidizing kinetics of reducing gas during iron oxide reduction process [J]. *Iron and Steel*, 2017, 52(9): 22–26.
(郭培民, 赵沛, 王磊 等. 氧化铁气基还原过程的气体氧化动力学 [J]. *钢铁*, 2017, 52(9): 22–26.)
- [13] Guo Peimin, Zhao Pei, Kong Lingbing *et al.* New calculation method for intrinsic rate constant of boudouard reaction [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2018, 30(8): 606–609.
(郭培民, 赵沛, 孔令兵 等. CO₂ 气化反应本征反应速率常数测定计算新方法 [J]. *钢铁研究学报*, 2018, 30(8): 606–609.)
- [14] Guo Peimin, Zhao Pei, Wang Lei *et al.* Analysis of reduction of iron ore and oxidation of reducing gas in moving bed [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2018, 30(5): 348–353.
(郭培民, 赵沛, 王磊 等. 移动床内氧化铁还原及还原气体氧化行为分析 [J]. *钢铁研究学报*, 2018, 30(5): 348–353.)
- [15] Guo Peimin, Zhao Pei, Wang Lei *et al.* Influence of technical parameters on reducing efficiency of iron ore fine in continuous fluidized bed [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(10): 1231–1236.
(郭培民, 赵沛, 王磊 等. 工艺参数对连续流化床内铁矿粉还原效果的影响 [J]. *工程科学学报*, 2018, 40(10): 1231–1236.)
- [16] Guo Peimin, Zhang Dianwei, Zhao Pei. Study on catalytic mechanism of reducing hematite by carbon at low temperature [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2006, 27(4): 1–5.
(郭培民, 张殿伟, 赵沛. 低温下碳还原氧化铁的催化机理研究 [J]. *钢铁钒钛*, 2006, 27(4): 1–5.)
- [17] Zhou Chuandian. Technical handbook for BF ironmaking [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
(周传典. 高炉炼铁生产技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.)

编辑 杨冬梅