

高铁氧化锰矿还原过程中铁锰氧化物同步还原动力学研究^①

张汉泉, 杨帆, 许鑫, 路漫漫
(武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北武汉 430205)

摘要: 分别采用气基(CO)和煤粉为还原剂,在管炉中进行了高铁氧化锰矿还原焙烧试验,探究了焙烧温度和焙烧时间对高铁氧化锰矿中锰和铁氧化物同步还原的影响。结果表明,气基还原焙烧条件下, Mn_2O_3 还原过程受化学反应控制,还原反应表观活化能为42.64 kJ/mol; Fe_2O_3 还原过程受内扩散控制,还原反应表观活化能为21.30 kJ/mol。与煤基焙烧相比,气基还原焙烧过程中 Mn_2O_3 和 Fe_2O_3 还原反应更容易进行,且锰氧化物由 Mn_2O_3 直接还原为MnO,不需要先还原为 Mn_3O_4 中间产物。

关键词: 氧化锰矿; 动力学; 限制环节; 还原焙烧; 活化能; 气基还原; 煤基还原

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.019

文章编号: 0253-6099(2023)01-0084-05

Kinetics of Simultaneous Reduction of Iron and Manganese Oxides During Reduction of High-Iron Manganese Oxide Ore

ZHANG Hanquan, YANG Fan, XU Xin, LU Manman

(School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: Experiments were performed in a tube furnace for reduction roasting of high-iron manganese oxide ore, respectively with gas-based (CO) and pulverized coal as reducing agents. The effects of roasting temperature and roasting time on the simultaneous reduction of manganese and iron oxides therein were investigated. The results show that during the gas-based reduction roasting, the reduction process of Mn_2O_3 is controlled by chemical reaction, with apparent activation energy of 42.64 kJ/mol. However, the magnetization process of Fe_2O_3 is controlled by internal diffusion, with apparent activation energy of 21.30 kJ/mol. Compared to coal-based roasting process, Mn_2O_3 and Fe_2O_3 are easier to be reduced during the process of gas-based reduction roasting, and the manganese oxides can be directly reduced from Mn_2O_3 to MnO without the step of being reduced to intermediate product Mn_3O_4 .

Key words: manganese oxide ore; kinetics; limit link; reduction roasting; activation energy; gas-based reduction; coal-based reduction

锰的用途非常广泛,约90%用于钢铁工业,10%用于有色冶金、化工、电子、电池、农业等领域^[1-5]。我国是锰资源消耗大国,每年锰矿的需求在3000万吨以上,其中一半依赖进口,严重制约着我国钢铁和化工产业的发展^[6-8]。高铁锰矿作为我国进口锰矿的主要来源,其特征是锰矿物与铁矿物共生,铁含量较高^[9-11]。高铁锰矿的还原过程与普通锰矿、铁矿有所差异,受到化学反应控制、内扩散控制、混合控制等环限制^[12-15]。有学者利用气基和煤基还原剂对铁锰矿进行了还原动力学研究,建立了还原动力学模型^[16-17]。

但前人研究大多集中于锰物相的还原研究,对铁锰同步还原动力学研究较少。本文对高铁氧化锰矿磁化焙烧过程进行了研究,在回收优质锰精矿的同时,同步回收高铁尾矿,提高锰铁比,可为充分利用锰矿资源提供技术支撑。

1 试验原料及研究方法

1.1 试验原料

试验所用原矿取自南非某地高铁氧化锰矿,矿物元素组成见表1。

① 收稿日期: 2022-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(51974204,52204276);广西建筑新能源与节能重点实验室开放基金(22-J-22-2)

作者简介: 张汉泉(1971—),男,湖北浠水人,博士,教授,主要从事铁矿造块、复杂铁矿综合利用研究。

通信作者: 路漫漫(1989—),男,安徽铜陵人,博士,讲师,主要从事复杂矿物及固废综合利用、废水处理等研究。

表 1 高铁锰矿元素组成(质量分数) %

TMn	TFe	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	烧失
40.90	16.36	0.3	4.58	7.21	0.76	6.52

由表 1 可知,高铁锰矿中锰和铁元素含量分别为 40.90% 和 16.36%, 锰铁比为 2.5, 为优质的富锰矿石。但该矿样中脉石矿物相对含量较高, 其中 CaO 含量为 7.21%, SiO₂ 含量为 4.58%, MgO 含量为 0.76%, Al₂O₃ 含量为 0.3%, 说明该矿样需要经过分选处理以去除脉石矿物。原矿 XRD 分析结果见图 1。

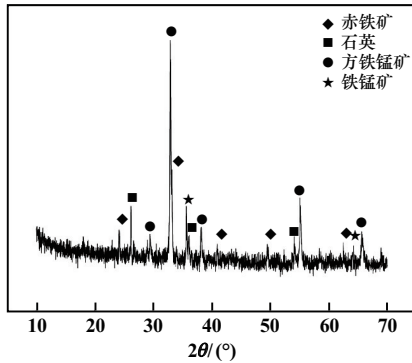


图 1 原矿 XRD 图谱

由图 1 可知,原矿中主要含锰矿物为方铁锰矿,铁矿物赋存形式为赤铁矿,脉石矿物主要为石英。

1.2 试验方法

矿样经颚式破碎机破碎至 -2 mm, 装袋备用。气基还原焙烧每次取矿样 50 g, 均匀装入刚玉瓷舟中, 置于管式炉(科晶 GSL-1400X)中, 升温速率 10 °C/min, 升温过程中通入 N₂, 待升温至指定温度后通入 N₂ 和 CO 的混合气体焙烧一定时间, 焙烧结束后通入 N₂ 至矿样冷却至室温, 总气体流量 500 mL/min, CO 体积分数为 30%。煤基还原焙烧每次取 50 g 矿样与一定量煤粉混合均匀, 放置于不锈钢罐中, 马弗炉(SX2-5-12)升温速率 10 °C/min, 升至指定温度后将不锈钢罐放入马弗炉中焙烧一定时间, 焙烧后矿样放入堆煤中冷却。

通过研究高铁氧化锰矿还原焙烧动力学, 确定了气基和煤基不同还原焙烧条件下 Mn₂O₃ 和 Fe₂O₃ 同步还原为 MnO 和 Fe₃O₄ 的还原率, 明确 Mn₂O₃ 和 Fe₂O₃ 实现同步还原的限制环节以及表观活化能, 揭示高铁氧化锰矿中锰氧化物和铁氧化物实现同步还原的机理。

1.3 产品表征

通过还原焙烧将 Fe₂O₃ 还原为 Fe₃O₄、将 Mn₂O₃ 还原为 MnO, 因此以 Mn²⁺ 与全锰质量分数表征锰的还原率, 以氧化亚铁含量除以全铁质量分数与赤铁矿全部磁化的比值(Fe₂O₃ 全部转化为 Fe₃O₄ 时铁的还原

度 FeO/TFe 比为 42.86%) 来表征铁的磁化率。计算方法如下:

$$R_{\text{Mn}} = \frac{w(\text{Mn}^{2+})}{w(\text{TMn})} \times 100\% \quad (1)$$

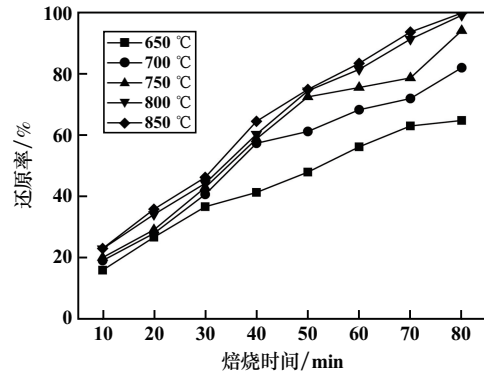
$$R_{\text{Fe}} = \frac{w(\text{FeO})}{w(\text{TFe}) \times 42.86\%} \times 100\% \quad (2)$$

式中 R_{Mn} 为锰还原度, %; $w(\text{Mn}^{2+})$ 为二价锰含量, %; $w(\text{TMn})$ 为全锰含量, %; R_{Fe} 为铁还原度, %; $w(\text{FeO})$ 为亚铁含量, %; $w(\text{TFe})$ 为全铁含量, %。

2 试验结果及讨论

2.1 焙烧温度与时间对 Mn₂O₃ 还原率的影响

以 CO 和 N₂ 的混合气体为还原剂, 气基还原焙烧条件下焙烧温度与时间对 Mn₂O₃ 还原率的影响如图 2 所示。

图 2 焙烧温度与时间对 Mn₂O₃ 还原率的影响

由图 2 可知, 随着焙烧温度升高和焙烧时间延长, Mn₂O₃ 还原率不断提高。焙烧温度升至 800 °C 后, 继续提高温度对 Mn₂O₃ 还原速率影响不大, 因此选择还原温度为 800 °C。800 °C 下焙烧 80 min, Mn₂O₃ 还原率达到 98.94%。

2.2 焙烧温度与时间对 Fe₂O₃ 磁化率的影响

以 CO 和 N₂ 的混合气体为还原剂, 气基还原焙烧条件下焙烧温度与时间对 Fe₂O₃ 磁化率的影响如图 3 所示。

由图 3 可知, 焙烧温度较低时, 焙烧 80 min 才可以取得较好的还原效果; 随着焙烧温度升高, 还原速率逐渐加大; 焙烧温度达到 800 °C 时, 仅需 60 min, Fe₂O₃ 就完全还原为 Fe₃O₄; 继续升高焙烧温度和延长焙烧时间反而会导致过还原生成富氏体。

2.3 还原剂种类对锰和铁氧化物还原率的影响

分别选取 CO 和还原煤为还原剂, 对矿样进行还原焙烧试验, 固定焙烧温度 800 °C, 不同焙烧时间下的还原结果如表 2 所示。

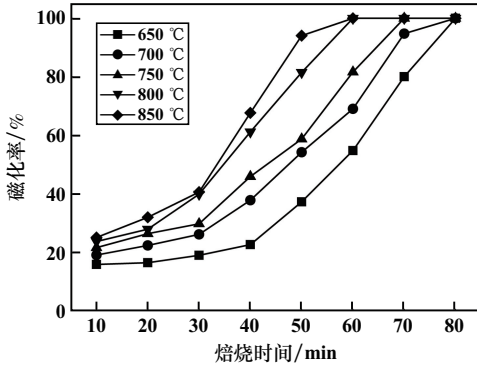


图3 焙烧温度与时间对 Fe₂O₃ 磁化率的影响

表2 还原剂种类还原焙烧对比试验结果

还原剂种类	焙烧时间/min	Fe ₂ O ₃ 磁化率/%	Mn ₂ O ₃ 还原率/%
煤粉	50	36.64	24.70
	60	46.32	26.75
	80	55.32	28.70
CO	50	58.80	72.46
	60	81.66	75.51
	80	100.00	93.93

由表2可知,焙烧时间60 min时,以CO为还原剂,样品中Fe₂O₃磁化率和Mn₂O₃还原率可分别达到81.66%和75.51%;以煤粉为还原剂,样品中铁、锰物相磁化率和还原率较低,仅分别为46.32%和26.75%。焙烧时间延长到80 min,以CO为还原剂时,Fe₂O₃磁化率和Mn₂O₃还原率分别达到100%和93.93%;此时以煤粉为还原剂时,Fe₂O₃磁化率和Mn₂O₃还原率仍然较低。CO还原高铁氧化锰矿的效率远优于煤粉。

3 还原焙烧机理研究

为了探究气基条件和煤基条件下焙烧温度对产品物相的影响规律,对不同温度下的气基和煤基焙烧产品进行了XRD分析,结果分别见图4和图5。

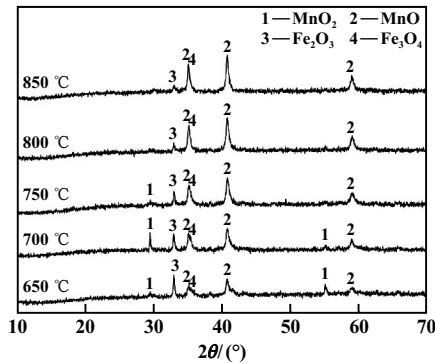


图4 气基条件下不同温度焙烧矿 XRD 图谱

由图4可知,随着焙烧温度升高,MnO₂和Fe₂O₃

逐渐被还原,MnO₂和Fe₂O₃峰强度和面积逐渐减弱,MnO和Fe₃O₄峰强度逐渐增强,表明MnO和Fe₃O₄的晶型逐渐完善,说明提高温度有利于Mn₂O₃和Fe₂O₃的还原。由图4还可以看出,从650 °C开始磁铁矿逐渐生成,750 °C时磁铁矿相对含量最高,超过750 °C后磁铁矿的相对含量降低,可能由于温度过高生成了富氏体或锰铁氧化物。

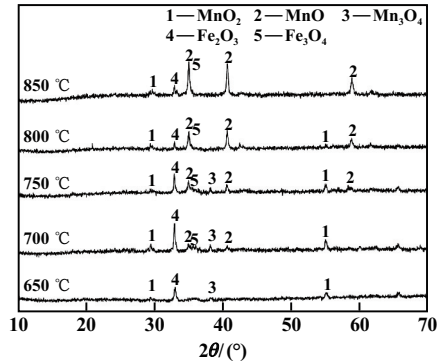


图5 煤基条件下不同温度焙烧矿 XRD 图谱

由图5可知,使用煤粉为还原剂时,650 °C和700 °C逐渐生成Mn₃O₄和Fe₃O₄,温度高于700 °C后,Mn₃O₄被还原成MnO;800 °C时,Mn₂O₃和Fe₂O₃峰强度都减弱,这也是煤基磁化焙烧分选的最佳温度。

综上所述,以CO作为还原剂时,Mn₂O₃可直接还原为MnO,无中间价态产生,可以有效降低锰和铁氧化物的还原反应难度,获得较好的分选效果。

4 还原焙烧过程动力学分析

4.1 Mn₂O₃ 还原过程动力学研究

为了探究在气基条件下焙烧时氧化锰矿中Mn₂O₃还原的限制环节,将还原率R_{Mn}代入化学反应控制和内扩散控制方程对t进行拟合,结果见图6~7。通过相关系数R²反映不同控制模型的匹配度情况,结果见表3。

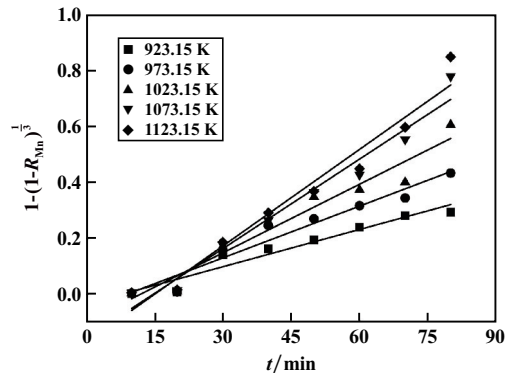


图6 1/(1-R_{Mn})^{1/3}对焙烧时间t的拟合曲线

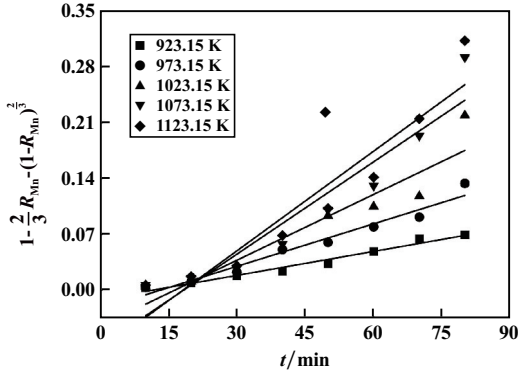


图 7 $1 - \frac{2}{3}R_{Mn} - (1 - R_{Mn})^{\frac{2}{3}}$ 对焙烧时间 t 的拟合曲线

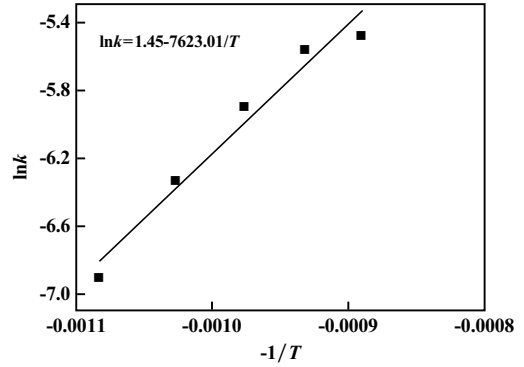


图 9 内扩散控制模型 Mn_2O_3 还原 Arrhenius 图

表 3 Mn_2O_3 还原过程控制方程拟合相关系数 R^2

热力学温度 T/K	化学反应控制模型 $R_{化Mn}^2$	内扩散控制模型 $R_{内Mn}^2$
923.15	0.969 8	0.987 6
973.15	0.973 8	0.980 9
1 023.15	0.975 4	0.994 5
1 073.15	0.983 2	0.949 4
1 123.15	0.979 8	0.951 6

表 4 Mn_2O_3 还原 Arrhenius 模型参数拟合结果

模型	斜率 k'_{Mn}	相关系数 R_{Mn}^2	$E_{aMn}/(kJ \cdot mol^{-1})$
化学反应控制	5 128.82	0.990 4	42.64
内扩散控制	7 623.01	0.984 4	63.38

在上述基础上,为最终确认高铁氧化锰矿焙烧过程中的控制模型,利用 Arrhenius 定理计算浸出反应表观活化能,可得 Arrhenius 速率公式的积分方程式为:

$$\ln k = -\frac{E_{aMn}}{R_{常}T} + \ln A \quad (3)$$

式中 k 为反应速率常数; E_{aMn} 为活化能, kJ/mol ; T 为热力学温度, K ; $R_{常}$ 为理想气体常数,取 $8.314 J/(mol \cdot K)$; A 为频率因子。

以 2 个控制模型不同热力学温度的 $\ln k$ 对 $1/T$ 作图,得到对应拟合曲线见图 8~9,根据拟合曲线方程参数得到浸出反应表观活化能见表 4。

由图 8~9 及表 4 可知,气基还原高铁氧化锰矿中还原体系中反应速率与温度拟合方程的相关系数为 0.990 4,根据阿伦尼乌斯方程计算出表观活化能

$E_{aMn} = 42.64 kJ/mol$,由此判断出 Mn_2O_3 还原的控制步骤为化学反应控制,其界面化学的动力学方程为:

$$1 - (1 - R_{Mn})^{\frac{1}{3}} = e^{0.1737 - 5128.82/T} t \quad (4)$$

4.2 Fe_2O_3 磁化还原过程动力学研究

为了探究在气基焙烧温度条件下氧化锰矿中 Fe_2O_3 磁化的限制环节,将还原率 R_{Fe} 代入化学反应控制和内扩散控制方程对 t 进行拟合,结果见图 10~11。通过相关系数 R^2 反映不同控制模型的匹配度情况,结果见表 5。

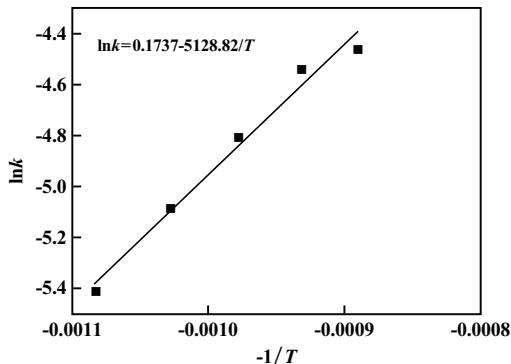


图 8 化学反应控制模型 Mn_2O_3 还原 Arrhenius 图

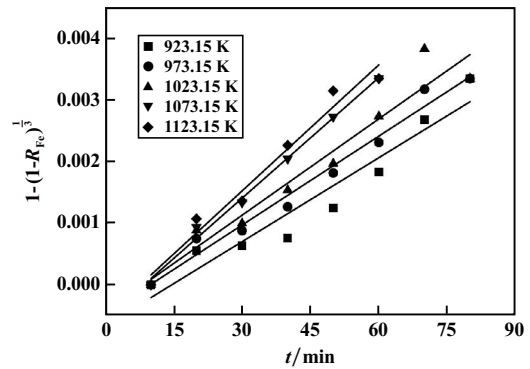


图 10 $1 - (1 - R_{Fe})^{\frac{1}{3}}$ 对焙烧时间 t 的拟合曲线

在上述基础上,为最终确认高铁氧化锰矿焙烧过程中的控制模型,利用 Arrhenius 定理计算浸出反应表观活化能,可得 Arrhenius 速率公式的积分方程式:

$$\ln k = -\frac{E_{aFe}}{RT} + \ln A \quad (5)$$

式中 k 为反应速率常数; E_{aFe} 为活化能, kJ/mol ; T 为热力学温度, K ; R 为理想气体常数,取 $8.314 J/(mol \cdot K)$; A 为频率因子。

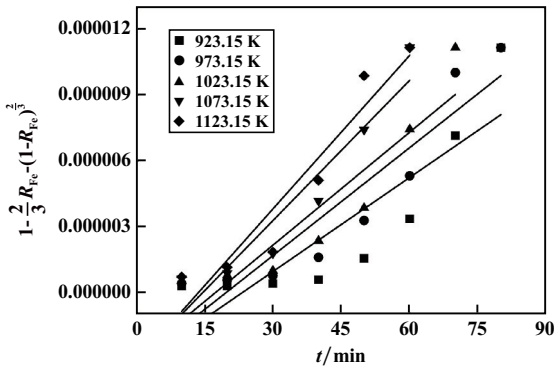


图 11 $1 - \frac{2}{3}R_{Fe} - (1 - R_{Fe})^{\frac{2}{3}}$ 对焙烧时间 t 的拟合曲线

表 5 Fe_2O_3 还原过程控制方程拟合相关系数 R^2

热力学温度 T/K	化学反应控制模型 $R^2_{化Fe}$	内扩散控制模型 $R^2_{内Fe}$
923.15	0.964 5	0.911 3
973.15	0.978 4	0.931 1
1 023.15	0.943 2	0.921 7
1 073.15	0.983 6	0.949 6
1 123.15	0.972 8	0.953 3

同样以 2 个控制模型不同热力学温度的 $\ln k$ 对 $1/T$ 作图,得到对应拟合曲线见图 12~13,根据拟合曲线方程参数得到浸出反应表观活化能见表 6。

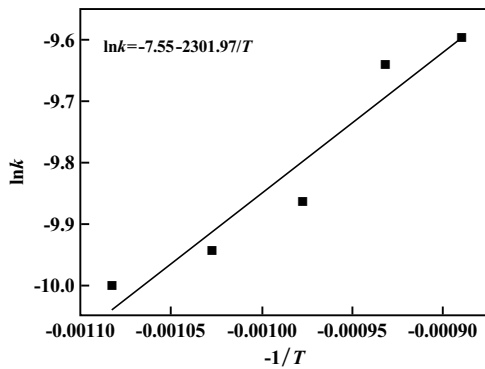


图 12 化学反应控制模型 Fe_2O_3 还原 Arrhenius 图

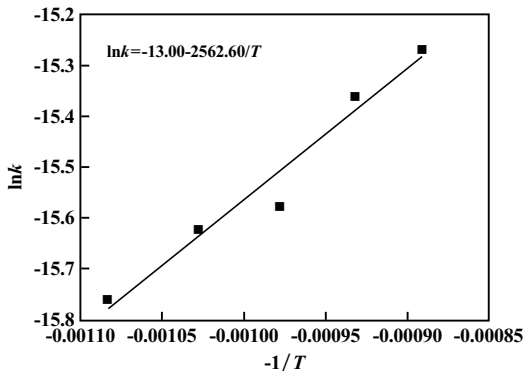


图 13 内扩散控制模型 Fe_2O_3 还原 Arrhenius 图

表 6 Fe_2O_3 还原 Arrhenius 模型参数拟合结果

模型	斜率 k'_{Fe}	相关系数 R^2_{Fe}	$E_{aFe}/(kJ \cdot mol^{-1})$
化学反应控制	2 301.97	0.980 6	19.14
内扩散控制	2 562.60	0.976 6	21.30

由图 12~13 及表 6 可知,气基还原高铁氧化锰矿中还原体系中反应速率与温度方程的相关系数为 0.976 6,根据阿伦尼乌斯方程计算出表观活化能为 $E_{aFe} = 21.30 kJ/mol$,接近混合控制,但在反应区间内混合控制的相关性较差,由此判断出 Fe_2O_3 还原的控制步骤为内扩散控制,其内扩散的动力学方程为:

$$1 - \frac{2}{3}R_{Fe} - (1 - R_{Fe})^{\frac{2}{3}} = e^{-13.00 - 2562.60/T} t \quad (6)$$

5 结 论

- 1) 气基焙烧条件下,焙烧温度 800 °C、焙烧时间 60 min 时, Mn_2O_3 还原率和 Fe_2O_3 磁化率均接近 100%。
- 2) 随着温度升高,高铁氧化锰矿中 Mn_2O_3 和 Fe_2O_3 逐渐还原为 MnO 和 Fe_3O_4 。以 CO 为还原剂,750 °C 基本上能实现锰和铁氧化物的同步还原,温度超过 800 °C 会出现过还原反应。煤基还原时,在 750 °C 以下 Mn_2O_3 会先转变成 Mn_3O_4 ,再还原为 MnO ;而气基条件下 Mn_2O_3 直接还原生成 MnO 。
- 3) 气基还原过程中 Mn_2O_3 还原反应的表观活化能为 42.64 kJ/mol,还原过程的主要控制步骤为化学反应控制; Fe_2O_3 还原反应的表观活化能为 21.30 kJ/mol,还原过程主要控制步骤为内扩散控制。

参考文献:

- [1] 焦 芬,史 柯,覃文庆,等. 废旧镍钴锰电池回收工艺及污染控制概述[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):153-158.
- [2] 孙宏伟,王 杰,任军平,等. 全球锰资源现状及对我国可持续发展建议[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(6):169-174.
- [3] 邢万里,王安建,王曼丽. 全球锰资源供需形势简析[J]. 矿床地质, 2014,33(S1):873-874.
- [4] 温晓霞. 低品位复杂氧化锰矿还原新技术研究[D]. 武汉:中国地质大学材料科学与化学工程学院, 2010.
- [5] 王 钊. 煤基还原焙烧法处理高品位氧化锰矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):80-83.
- [6] 邹廷信,聂 程,毛拥军. 某进口软锰矿还原焙烧、浸出实验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):115-117.
- [7] 林 平,陈方正. 我国锰矿资源的需求态势和利用策略[J]. 中国市场, 2007(40):20-22.
- [8] 邹 鑫,钟 宏,曹占芳,等. 以硫化钙为还原剂焙烧还原提取锰除尘灰中的锰[J]. 矿冶工程, 2017,37(1):100-102.
- [9] 洪世琨. 我国锰矿资源开采现状与可持续发展的研究[J]. 中国锰业, 2011,29(3):13-16.

- carbothermal reduction of antimony oxide concentrate[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022,18:882-895.
- [8] 王苗,杨双平,庞锦琨,等.微波活化预焙烧对辉钼矿焙砂脱硫影响研究[J].矿冶工程,2018,38(5):115-118.
- [9] 陈雯,雷鹰,何文浩,等.鲕状赤铁矿微波加热还原提铁脱磷机制[J].钢铁研究学报,2020,32(1):9-19.
- [10] YANG S P, LIU H J, SUN H X, et al. Study on Influencing Factors of High-Temperature Basic Characteristics of Iron Ore Powder and Optimization of Ore Blending[J]. Materials, 2022,15(9):3329.
- [11] LI K Q, CHEN J, PENG J H, et al. Efficient improvement for dissociation behavior and thermal decomposition of manganese ore by microwave calcination[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,260:121074.
- [12] Amankwah R K, Pickles C A. Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrate[J]. Minerals Engineering, 2009,22(13):1095-1101.
- [13] 王强,董蒙,孙金妹,等.强磁场下合金凝固过程控制及功能材料制备[J].金属学报,2018,54(5):742-756.
- [14] 金永丽,韩福铁,于海,等.磁场对含SiO₂和CaO的铁氧化物还原的影响[J].钢铁钒钛,2018,39(6):103-109.
- [15] 金永丽,于海,张捷宇,等.磁场对含CaO铁氧化物还原的影响[J].金属学报,2019,55(3):410-416.
- [16] 张旭东,金永丽.白云鄂博矿磁场强化还原的矿相演变规律[J].钢铁钒钛,2021,42(2):139-145.
- [17] 杨英,孙树臣,涂赣峰,等.我国氟碳铈矿焙烧分解过程与机理研究进展[J].稀土,2014,35(4):98-102.
- [18] 朱文振.碳化硅粉体低温合成工艺以及二氧化硅为主的烧结相晶型转变的研究[D].合肥:合肥工业大学材料科学与工程学院,2012.
- [19] 张芳.白云鄂博铁精矿焙烧过程氟化物逸出机理研究[D].北京:北京科技大学冶金与生态学院,2015.
- [20] ZHENG Qiang, WU Wen-yuan, BIAN Xue. Investigations on mineralogical characteristics of rare earth minerals in Bayan Obo tailings during the roasting process[J]. Journal of Rare Earths, 2017,35(3):300-308.
- [21] 孙树臣,吴志颖,边雪,等.NaCl-CaCl₂对氧化钙分解独居石的影响[J].稀土,2007(5):6-9.
- 引用本文:蒋锦韬,金永丽.稳恒磁场下白云鄂博矿形貌变化及热分解分析[J].矿冶工程,2023,43(1):89-94.

(上接第88页)

- [10] 何辉.锰矿资源现状与锰矿勘察研究[J].中国锰业,2017,35(1):23-24.
- [11] 邓文兵,张彦文,孔令湖,等.中国锰矿资源现状与国家级锰矿床实物地质资料筛选[J].中国矿业,2019,28(9):175-182.
- [12] Amiri A, Ingram G D, Maynard N E, et al. An Unreacted Shrinking Core Model for Calcination and Similar Solid-to-Gas Reactions[J]. Chemical Engineering Communications, 2015,202(9):1161-1175.
- [13] Homma S, Ogata S, Koga J, et al. Gas-solid reaction model for a shrinking spherical particle with unreacted shrinking core[J]. Chemical Engineering Science, 2005,60(18):4971-4980.
- [14] 赵强.菱铁矿流态化磁化焙烧强化过程基础研究[D].北京:北京科技大学冶金与生态工程学院,2019.
- [15] 潘峰.山西广灵难选赤铁矿制易选磁铁矿的氢还原行为及动力学[D].太原:太原理工大学化学化工学院,2013.
- [16] FENG Y, CAI Z, LI H, et al. Fluidized roasting reduction kinetics of low-grade pyrolusite coupling with pretreatment of stone coal[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2013,20(3):221-227.
- [17] Muriana R A, Muzenda E, Abubakre O K. Carbothermic Reduction Kinetics of Ka'oje (Nigeria) Manganese Ore[J]. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2014,2(5):392-403.
- 引用本文:张汉泉,杨帆,许鑫,等.高铁氧化锰矿还原过程中铁锰氧化物同步还原动力学研究[J].矿冶工程,2023,43(1):84-88.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2023年2月