钢铁冶金与材料

磁场对含 SiO_2 和 CaO 的铁氧化物还原的影响

金永丽[1,2],韩福铁[1],于　海[1],赵增武[3],张捷宇[2]

(1.内蒙古科技大学材料与冶金学院,内蒙古 包头 014010; 2.上海大学材料科学与工程学院,上海 200444; 3.内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室,省部共建国家重点实验室培养基地,内蒙古 包头 014010)

摘　要:为了考察磁场对含有 SiO_2 和 CaO 的铁氧化物还原的影响,以 93%Fe_2O_3-2.5%SiO_2-4.5%CaO 体系为对象,从化学反应效率、物相组成、显微形貌、动力学计算出发,研究了稳恒磁场的作用机制。研究表明,B=1.02 T 恒磁场促进了体系还原。与无磁条件相比,在体系气固反应过程中没有新物相生成,显微形貌呈现疏松多孔状,内扩散系数提高 1.34 倍。

关键词:铁氧化物; 还原; 磁场; SiO_2/CaO; 反应效率; 显微形貌; 扩散系数

中图分类号:TF559　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-7638(2018)06-0103-07

DOI:10.7513/j.issn.1004-7638.2018.06.017　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

听语音　聊科研　与作者互动

Effect of Magnetic Field on Reduction of Iron Oxides Containing SiO_2 and CaO

Jin Yongli[1,2], Han Futie[1], Yu Hai[1], Zhao Zengwu[3], Zhang Jieyu[2]

(1.School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. School of Materials Science and Engineer, Shanghai University, Shanghai200444, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Bayan Obo Multi-metallic Resources, Elected State Key Laboratory, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to investigate the effects of magnetic field on the reduction of iron oxides, 93% Fe_2O_3-2.5%SiO_2-4.5% CaO system had been taken to carry out a constant magnetic field (CMF) test. The reduction conversion efficiency of Fe_2O_3, the phase composition and micromorphology of the reaction product, and the reaction kinetics were analyzed. The results show the reduction of Fe_2O_3 has been greatly enhanced in a CMF equal to 1.02 T. Compared with the reaction without a magnetic field, with a CMF (B=1.02 T) there is no new phase formed in the gas-solid reaction and the reduction product exhibits a porous structure. The internal diffusion coefficient obtained in a CMF is 1.34 times higher than that without a magnetic field.

Key words: iron oxides , reduction, magnetic field, SiO_2/CaO, reaction efficiency micromorphology, diffusion coefficient

0　引言

利用磁场的影响来改良原有生产工艺,从而实现降低生产成本,改善产品质量的目的。在冶金工业生产中磁场多作用于液态金属[1],其中主要有电磁搅拌、电磁制动、电磁铸造、电磁感应加热等技术,

收稿日期:2018-06-21

基金项目:国家自然科学基金(51464039),包头市昆区科技项目,国家自然科学基金(51464040)。

作者简介:金永丽(1973—),女,内蒙古包头人,在读博士,主要从事磁场对于气固反应影响的基础研究工作。E-mail: jinyongli731112@126.com。

这些技术显著提高了钢材质量和产量，优化了冶金生产工艺[2-4]。近年来，磁场下的化学反应得到了越来越多国内外学者的关注，一些学者研究发现电磁搅拌可以有效去除钢液夹杂物，提高反应效率。一些学者的研究发现可以通过磁场引起的微观电磁流体效应及磁场对溶液内流动的影响，获得良好的镀层表面形态和较高的化学反应速率[5-8]，但是目前此类研究大多局限于磁场下溶液中的化学反应，对于高温反应特别是高温下的气固反应研究非常有限并且缺乏系统的研究理论。

当今冶金工业生产中使用的原料多为含大量脉石的铁矿，其中 SiO_2 和 CaO 是脉石的主要成分，很多国内外研究者都对此进行了大量研究工作[9-15]。基于此，笔者以同时含有 SiO_2 和 CaO 的 Fe_2O_3 为研究对象，探究磁场对其还原速度、物相变化以及显微形貌的影响，为将磁场应用于还原技术的发展提供理论依据。

1 试验方法

将分析纯 Fe_2O_3（$Fe_2O_3 \geqslant 99\%$）、SiO_2（$SiO_2 \geqslant 98\%$）和 $CaCO_3$（$CaCO_3 \geqslant 99\%$）粉末（粒度小于 0.074 mm）混合均匀，添加聚乙烯醇溶液（添加量 5%，浓度 3%），进行压块、干燥、烧结。取烧结后料柱（直径 $d = 10$ mm，高 $h = 4$ mm）称重置于石英管（内径为 12 mm，外径为 14 mm）内，之后将石英管送入磁场还原炉内，保证料柱处于炉内恒温区和恒磁区。关闭炉口通高纯氮气排净炉内空气，待炉温稳定后切换为 75% CO−25% CO_2 还原气体，气体流量为 1 L/min。在 800 ℃时进行等温失重反应，反应结束后，将还原后样品在高纯氮气下急冷至室温，然后称量并记录样品重量。

磁场还原炉如图 1 所示，主要由加热控温装置、水冷装置和磁场发生器构成。加热区采用铬镍电阻丝加热，K 型热电偶控温，恒温区的长度 60 mm，温度 800 ℃±2 ℃。磁场发生器由三层钕铁硼永磁材料组合形成一个同心圆柱体，由充磁方向不同的单片瓦型结构磁体拼合而成，恒磁区磁场强度 1.019 T ±0.014 T，长度 75 mm，方向是沿径向分布，其磁场强度分布如图 2 所示。磁体在高温处理时需要进行冷却，水冷装置由铜质水冷套、循环水箱、制冷机及水泵组成。在本试验工作中，样品中 SiO_2 含量为 4.5%，CaO 含量为 2.5%，还原时间 0~90 min。还原后样品分别进行 XRD 物相检测和 SEM 形貌观察。

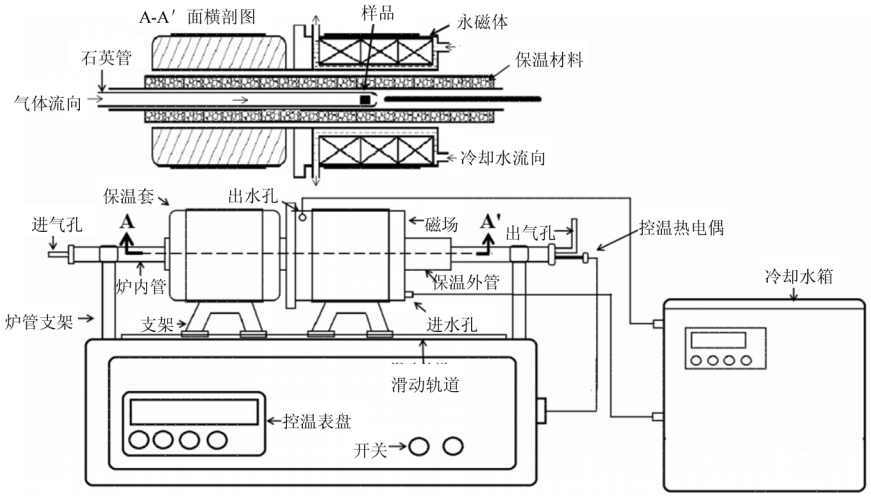


图 1 磁场还原炉示意

Fig.1 The schematic diagram of magnetic field reduction furnace

2 试验结果

2.1 磁场下 93% Fe_2O_3−4.5% SiO_2−2.5% CaO 体系还原效率及物相变化

93% Fe_2O_3−4.5% SiO_2−2.5% CaO（FSC）和 100% Fe_2O_3（F）体系的等温还原度曲线如图 3 所示。

根据图 3 可知，在磁场和常规条件下，F 和 FSC 两种体系还原度都随还原时间增加而提高，在反应末期还原度曲线趋于平缓。施加 $B = 1.02$ T 稳恒磁场后，还原度较无磁条件明显提高，尤其是在反应初期磁场起到的强化作用比较显著。添加 4.5% SiO_2 和 2.5% CaO 后，由于生成稳定的硅酸钙，无论有无

磁场均在还原初期恶化了反应条件，使得还原初期 FSC 体系还原速率低于纯氧化铁的还原，随着反应时间的增加，SiO_2 和 CaO 促进了氧化铁的还原，FSC 体系的还原速率逐渐快于 F 体系，其转折时间在 1.02 T 磁场下 10 min，而在无磁条件下约为 25 min。

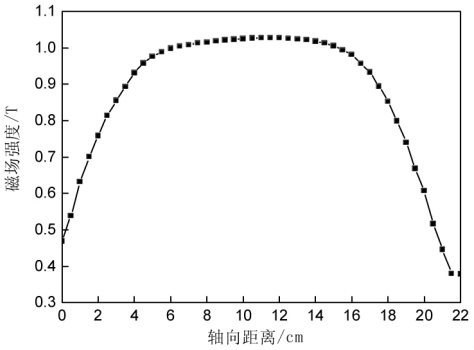


图 2　磁场强度分布

Fig.2　Magnetic field intensity distribution diagram

不同还原时间下，93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系 X 射线衍射图谱和体系内物相组成分别如图 4 和表 1 所示。

根据 XRD 物相检测结果可知，磁场和常规条件下 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系内铁氧化物的还原都是按照 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO_x \rightarrow Fe$ 的顺序，并且施加磁场后体系内并未出现特殊新物相。对比不同还原条件下体系内物相变化可知，还原 5 min 时，磁场比常规条件体系内更早出现了 FeO_x 衍射峰。还原 20 min 时，磁场比常规条件体系内更早出现了金属铁衍射峰，并且 Fe_3O_4 衍射峰更早消失。这些说明了在氧化铁逐级还原过程中，施加磁场，加快了体系的还原，促进了每一阶段新物相的产生。

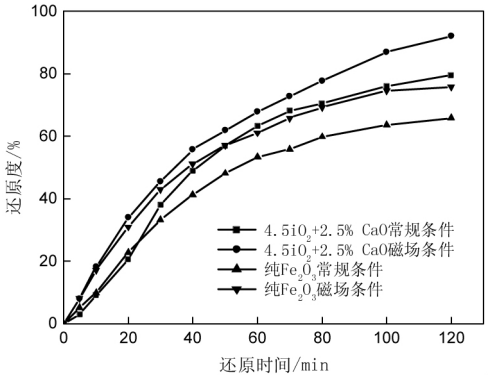


图 3　93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 和 100% Fe_2O_3 体系等温还原度曲线

Fig.3　Isothermal reduction curve of 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO and 100% Fe_2O_3 system

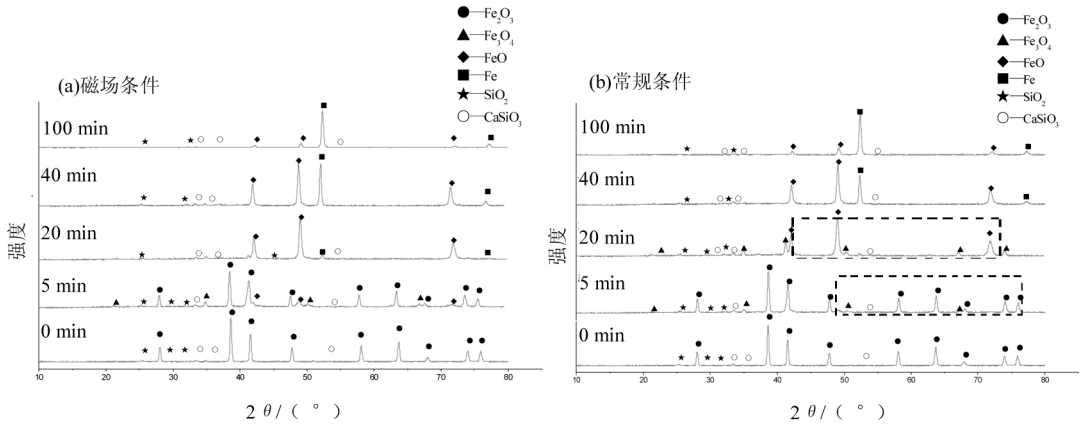


图 4　不同还原时间 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系 X 射线衍射图谱

Fig.4　X ray diffraction patterns of 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO system at different reduction time

表 1　不同还原时间 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系内物相组成

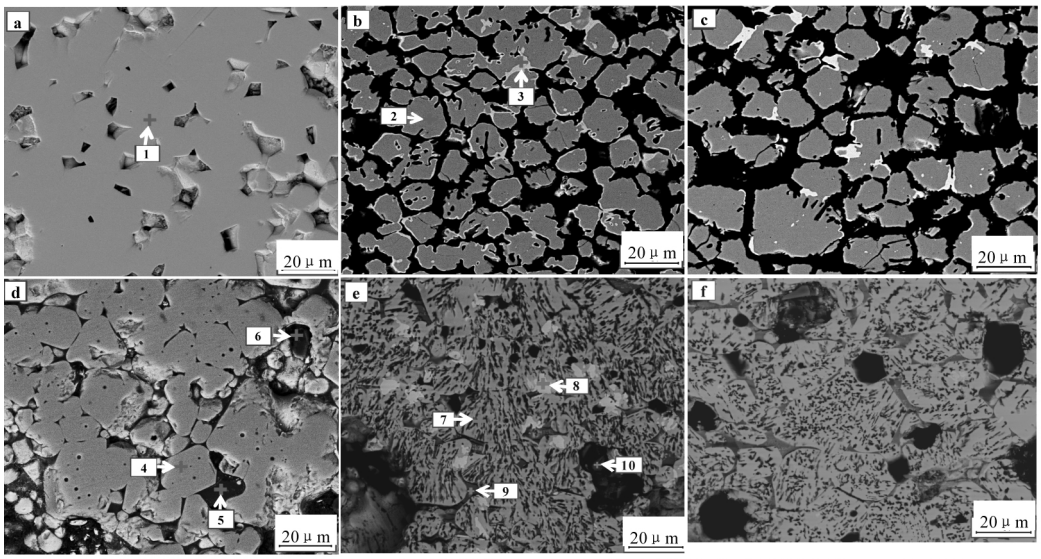
Table 1　Phase composition of 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO system at different reduction time

	物相组成				
	0 min	5 min	20 min	40 min	100 min
磁场	Fe_2O_3、$CaSiO_3$、SiO_2	Fe_2O_3、Fe_3O_4、FeO、$CaSiO_3$、SiO_2	FeO、Fe、$CaSiO_3$、SiO_2	FeO、Fe、$CaSiO_3$、SiO_2	FeO、Fe、$CaSiO_3$、SiO_2
常规	Fe_2O_3、$CaSiO_3$、SiO_2	Fe_2O_3、Fe_3O_4、$CaSiO_3$、SiO_2	Fe_3O_4、FeO、$CaSiO_3$、SiO_2	FeO、Fe、$CaSiO_3$、SiO_2	FeO、Fe、$CaSiO_3$、SiO_2

2.2 磁场下 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系还原形貌变化

不同体系还原 20 minSEM 形貌和 EDS 能谱分析分别如图 5 和表 2 所示。

如图 5 所示，根据 EDS 能谱分析结果并结合 XRD 物相检测结果判断图中各物质。图中 1、4 点处物质为 Fe_2O_3，2、7 点处浅灰色物质 FeO_x，3、8 点处白色物质为金属铁，铁氧化颗粒间深灰色楔形物(5、9 号点处)为 $CaSiO_3$，大孔隙处深灰色颗粒物(6、10 号点处)为 SiO_2。如图 5(a)、(d)所示，原料烧结后 Fe_2O_3 长大并相互连接成片。对比图 5(a)、(d)可发现，由于 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系在烧结过程中 $CaCO_3$ 会分解生成 CO_2，导致体系内含有较多大孔隙，使体系整体致密性变差。在之后的还原过程中铁氧化物晶格会发生改变，体系发生膨胀，体系内颗粒出现裂纹，甚至碎裂成小颗粒，还原生成的金属铁会优先在 FeO_x 颗粒边缘生长。对比图 5(b)、(c)可知，施加磁场体系内 FeO_x 断裂的更剧烈，形成的 FeO_x 颗粒尺寸较小，增大了还原气体与反应物的接触面积，有利于还原进行。图 5(e)所示，磁场条件下 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系中 FeO_x 颗粒内出现大量树枝状裂纹，裂纹相互连接形成微小气路。同时还发现，体系内 FeO_x 间的孔隙被 $CaSiO_3$ 所添堵，$CaSiO_3$ 化学性质非常稳定，在整个还原过程中并不参与反应，致使还原过程中体系内气体扩散主要靠 FeO_x 颗粒内的微孔进行，此时的还原效果较差。结合图 3 也可发现，磁场条件下还原初期 Fe_2O_3 体系的还原度与 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系十分接近。由图 6(f)可知，常规条件下，体系内未出现明显树枝状裂纹，显然，磁场为还原气体扩散提供了有利条件。



(a) Fe_2O_3 体系还原 0 min；(b)磁场条件 Fe_2O_3 体系还原 20 min；(c)常规条件 Fe_2O_3 体系还原 20 min；(d)93% Fe_2O_3-4.5%SiO_2-2.5%CaO 体系还原 0 min；(e)磁场条件 93% Fe_2O_3-4.5%SiO_2-2.5%CaO 体系还原 20 min；(f)常规条件 93% Fe_2O_3-4.5%SiO_2-2.5%CaO 体系还原 20 min

图 5 还原 0 min 和 20 min 不同体系 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphologies of different systems for 0 and 20 minutes reduction

不同体系还原 60 minSEM 形貌图和 EDS 能谱分析分别如图 6 和表 3 所示。根据 EDS 能谱分析结果并结合 XRD 物相检测结果判断图中各物质。

图 6 中 1、3 号点处白色物质为金属铁，2、4 号点处白色物质为 FeO_x，FeO_x 颗粒间深灰色物质(5 号点处)为 $CaSiO_3$。还原至 60 min 时金属铁沿 FeO_x 颗粒边缘生长，逐渐将 FeO_x 颗粒包裹住形成金属铁层，还原气体在体系内扩散受阻，还原速度逐渐减慢，呈现出典型的未反应核模型。对比图 6(a)、(b)可知，常规条件下纯 Fe_2O_3 还原过程中体系内颗粒间会发生黏连，减少还原气体扩散通道。而施加磁场后体系内颗粒间粘连现象明显减少，有利于还原气体的扩散。对比图 6(a)、(c)可知，随着还原时间延长，体系内金属铁的生成量增加，颗粒体积缩小，颗粒间孔隙增加，还原气体在体系内的扩散条件得到极大改善。由于还原过程中的

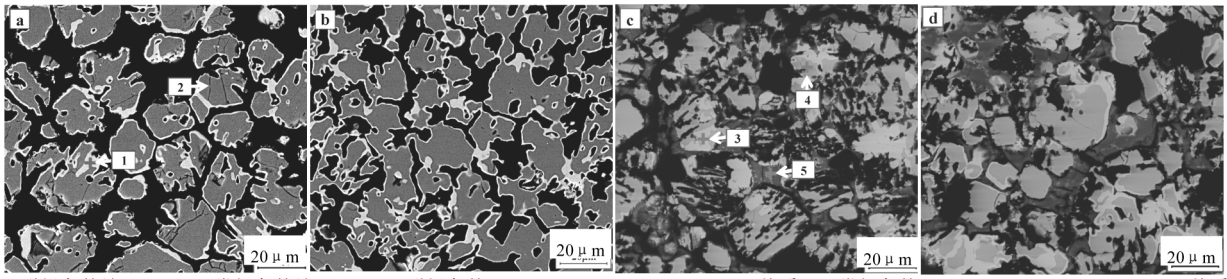
高温作用,FeO_x 颗粒中的微孔收缩减少,FeO_x 颗粒逐渐致密化。

由于 FeO_x 颗粒间 $CaSiO_3$ 的存在,阻碍了 FeO_x 颗粒的黏连,故 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系的还原要快于纯 Fe_2O_3。对比图 6(c)、(d)可知,施加磁场后 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系内部比常规条件更加疏松多孔,FeO_x 颗粒的致密性比常规条件明显降低,增大了还原气体与反应物的接触面积,可以看出磁场促进了 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系的还原。

表 2　EDS 化学元素分析

Table 2　EDS chemical element analysis table

序号	w/%			
	Fe	O	Si	Ca
1	66.53	33.47		
2	87.25	12.75		
3	100			
4	63.17	36.83		
5		3646	29.85	33.69
6		63.19	36.81	
7	81.68	18.32		
8	100			
9		31.08	37.96	30.96
10		30.13	69.87	



(a) 磁场条件纯 Fe_2O_3; (b)常规条件纯 Fe_2O_3; (c)磁场条件 93% Fe_2O_3-4.5%SiO_2-2.5%CaO 体系; (d)常规条件 93% Fe_2O_3-4.5%SiO_2-2.5%CaO 体系

图 6　还原 60 min 不同体系 SEM 形貌

Fig.6　SEM morphologies of different systems for 60 minutes reduction

表 3　EDS 化学元素分析结果

Table 3　EDS chemical element analysis table

序号	w/%			
	Fe	O	Si	Ca
1	100			
2	85.73	14.27		
3	100			
4	86.27	13.73		
5		36.37	29.00	34.63

如图 7 所示,根据 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系的面扫描结果可以看出,体系内的 SiO_2 可以与 CaO 良好的发生化学反应生成 $CaSiO_3$,并且生成的 $CaSiO_3$ 分布于 FeO_x 颗粒间,堵塞了体系内还原气体扩散通道,几乎没有游离的 Ca 元素在铁氧化物内扩散。同时 $CaSiO_3$ 化学性质非常稳定,在还原过程中不参与还原反应,致使磁场条件下还原前期 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系还原度与纯 Fe_2O_3 相近。

2.3　磁场对不同体系扩散系数的影响

试验过程中所用气体流量为 1 L/min,忽略气体外扩散的影响,故还原过程中的限速环节只考虑气体内扩散和界面化学反应两方面的影响。其对应函数如表 4 所示。

将两种体系不同还原时间的反应分数带入函数方程式并得到相应的函数曲线,使用 origin8.0 软件对函数曲线进行线性拟合,选取拟合度最高的函数作为最终限速环节。根据拟合结果发现,两种体系在磁场和常规条件下的限速环节都为气体内扩散,磁场并没有使限速环节发生改变。因此需要继续对体系在磁场和常规条件下的扩散系数进行计算,由于还原所使用样品为柱状,所以扩散系数可由式(1)[15]求得。

$$D_e^m=\frac{\rho_B F}{2bt_f M_B(c_o-C^*)}\left(\frac{V}{A}\right)^2 \tag{1}$$

其中　ρ_B—反应物 B 的密度,g/cm^3;

F—形状因子,对于片状、柱状、球形颗粒为别对应数值 1、2、3;

V—固体反应物原始体积,cm^3;

D_e—扩散系数,cm^2/s;

M_B—固体反应物 B 摩尔质量,g/mol;

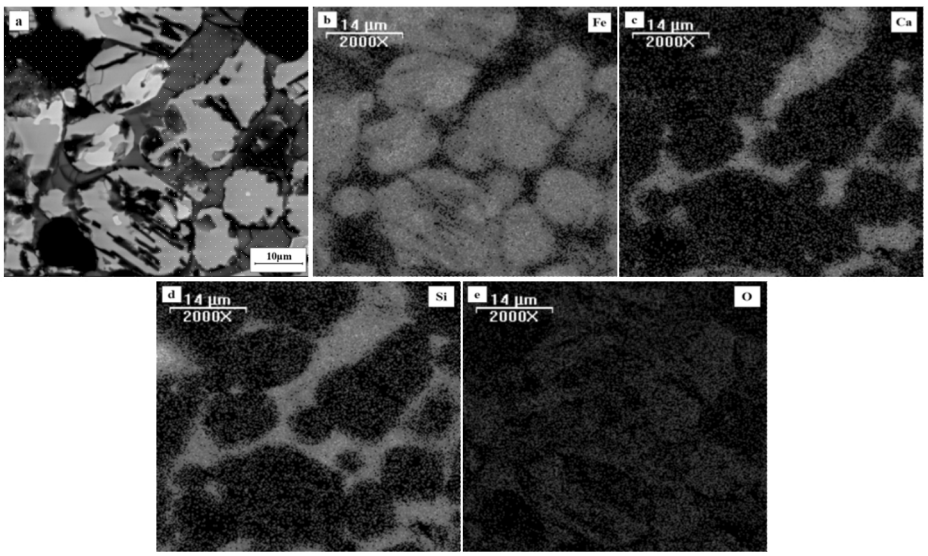
c_o—气体还原剂气相初始浓度,mol/cm^3;

c^*—气体还原物反应平衡浓度,mol/cm^3;

A—固体反应物颗粒原始表面积,cm^2;

b—反应物化学计量数。

还原试验中主要发生的反应为 Fe_2O_3 还原为 Fe 的反应,还原反应公式如式(2)所示。



(a) 扫面区域；(b)Fe 元素；(c)Ca 元素；(d)Si 元素；(e)O 元素

图 7 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO 体系不同元素面扫描

Fig.7 Different element surface scanning diagram in 93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO system

表 4 动力学机理函数

Table 4 Kinetics function

限速环节	函数关系式	限速环节编号
内扩散	$k_t = X + (1-X)\ \ln(1-X)$	Ⅰ
界面化学反应	$k_t = 1-(1-X)^{1/F}$	Ⅱ

其中 k 是常数；t 是还原时间，min；X 是反应分数；F 是粒子形状因子：1 为长条形，2 为收缩圆柱，3 为球体。由于试验选用为圆柱体烧结料块，故 F 取 2。

$$Fe_2O_3(s)+3CO=2Fe(s)+3CO_2$$

$$\Delta G^{\theta}=-30\ 720.493(J/mol) \quad (2)$$

由于施加磁场后会引入磁吉布斯自由能 ΔG^{M}，对于氧化铁的还原反应 ΔG^{M} 的具体计算方法如式(3)所示。将计算得到 ΔG^{M} 的数据代入公式来计算外加磁场条件下的扩散系数。将计算得到数据进行整理，不同还原条件下各体系扩散系数计算结果如表 5 所示。

表 5 各体系不同还原条件下扩散系数 De 值

Table 5 Diffusivity of various systems under different reduction conditions m^2/s

体系	磁场条件 D_e^m	常规条件 D_e	D_e^m/D_e
100%Fe_2O_3	$2.963\ 9\times10^{-7}$	$2.019\ 3\times10^{-7}$	1.467 7
93% Fe_2O_3-4.5% SiO_2-2.5% CaO	$4.426\ 0\times10^{-7}$	$3.308\ 9\times10^{-7}$	1.337 6

$$\Delta G^{M}=-\frac{B^2}{2\mu_0}\left[(2X_{Fe}+3X_{CO_2})-(X_{Fe_2O_3}+3X_{CO})\right] \quad (3)$$

其中 X—磁化率，800 ℃ 时，$X_{Fe}=9.91\times10^{-4}\ m^3/mol$，$X_{Fe_2O_3}=5.76\times10^{-6}\ m^3/mol$，$X_{CO}=5.6\times10^{-5}\ m^3/mol$，$X_{CO_2}=9\times10^{-6}\ m^3/mol$；

μ_0—真空磁导率，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\ H\cdot m^{-1}$；

B—外加磁场强度，$B=1.01$ T。

根据扩散系数计算结果可知，磁场条件下添加 SiO_2 和 CaO 可以提高体系的扩散系数，并且施加磁场后两种体系的扩散系数进一步提高，结合不同还原条件下体系形貌变化可知，磁场促进了还原气体内扩散。磁场促进还原气体扩散如图 8 所示。

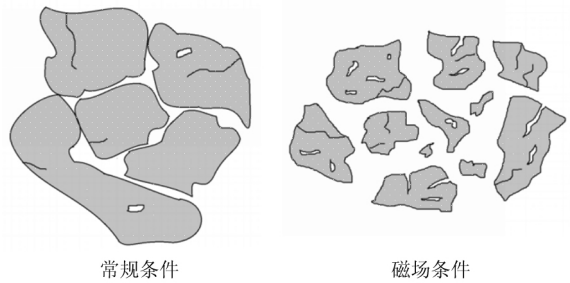


图 8 磁场促进体系气相扩散示意

Fig. 8 Schematic diagram of gas phase diffusion in magnetic field promotion system

如图 8 所示，外加磁场后体系内颗粒分布更加松散，同时铁氧化物颗粒表面裂纹和微孔更多，还原气体内扩散阻力比常规条件小，单位时间内通过铁氧化物颗粒表面的 CO 气体的量增大，还原气体与铁氧化物接触面积增大有促进了还原反应进行。

3　结论

1) 在 93% Fe_2O_3 −2.5% SiO_2 −4.5% CaO 体系气固反应过程中，B = 1.02 T 恒磁场促进了铁氧化物还原。

2) 外加磁场致使样品产生磁化，磁化力促使样品形成裂纹和微孔，降低了样品的致密性。SiO_2、CaO 的添加使样品在反应前期呈现树枝状裂纹。

3) 磁场作用下，93% Fe_2O_3 −2.5% SiO_2 −4.5% CaO 体系气固反应限速环节为气体内扩散，与无磁条件相比，其内扩散系数提高 1.34 倍。

参考文献

[1] Ma Wei, Ma Rongjun. Application and mechanism of magnetic field in metallurgy [J]. Physics, 1996, 25(7): 1-3.
(马伟，马荣骏. 磁场在冶金中的应用和机理探讨 [J]. 物理，1996，25(7)：1-3.)

[2] Kranjc M, Zupanic A, Miklavcic D, *et al*. Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(17): 3585-3591.

[3] Tanaka H, Nishihara R, Kitagawa I, *et al*. Quantitative analysis of contamination of molten steel in tundish [J]. ISIJ International, 1993, 33(12): 1238-1243.

[4] He Jicheng, Marukawa Yukiyo, Wang Qiang. A ladle with heating tapping device and its tapping method, China patent: 10045875 [P]. 2006-09.
(赫冀成，丸川熊净，王强. 一种带有加热出钢装置的钢包及其出钢方法，中国专利：10045875 [P]. 2006-09.)

[5] Cong Lin, Zhang Jiongming, Lei Shaowu. Numerical simulation of induction heating in tundish [J]. Steel Research, 2014(3): 20-25.
(丛林，张炯明，雷少武. 中间包感应加热的数值模拟 [J]. 钢铁研究，2014(3)：20-25.)

[6] Zhang Ting'an, Yang Huan. Wei Shicheng. Application of electromagnetic technology in metallurgy [J]. Material Guide, 2000, 14(10): 22-25.
(张廷安，杨欢，魏世丞，等. 电磁技术在冶金中的应用 [J]. 材料导报，2000，14(10)：22-25.)

[7] Jin Baigang, Wang Qiang. Status of electromagnetic continuous casting metallurgy technology and application [J]. Metallurgical Equipment, 2009, 6(2): 1.
(金百刚，王强. 电磁连铸冶金技术及应用现状 [J]. 冶金设备，2009，6(2)：1.)

[8] Yu Zhan, Lei Zuosheng. Measurement technology of liquid metal velocity [J]. Shanghai Metal, 2007, 29(2): 54-58.
(于湛，雷作胜. 液态金属流速的测量技术 [J]. 上海金属，2007，29(2)：54-58.)

[9] John, DH St, Nakiboglu F, Hayes P C. The effect of sulfur on the gaseous reduction of solid calciowustites [J]. Metallurgical Tran-sactions B, 1986, 17(2): 383-393.

[10] Gupta, Prithviraj, Arnab De, Chanchal Biswas. The effect of presence of SiO_2 $Al2O_3$ and P_2O_5 on the reduction behaviour of Fe_2O_3 nuggets with coke fines [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(12): 4743-4752.

[11] Bahgat M. Morphological changes accompanying gaseous reduction of SiO_2 doped wüstite compacts [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2008, 35(3): 205-212.

[12] Kim W H, Lee Y S, Suh I K. Influence of CaO and SiO_2 on the reducibility of Wüstite using H2 and CO gas [J]. ISIJ International, 2012, 52(8): 1463-1471.

[13] Inami, Takashi, Kanae Suzuki. Effects of SiO_2 and Al_2O_3 on the Lattice parameter and CO gas reduction of CaO-containing dense Wustite [J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 314-320.

[14] Geassy El. Influence of silica on the gaseous reduction of Wustite with H_2, CO and H_2-CO mixtures [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1985, 25(10): 1036-1044.

[15] Zhang Jiayun, Xing Xianran. Metallurgical physical chemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 200-203.
(张家芸，邢献然. 冶金物理化学 [M]. 北京市：冶金工业出版社，2004：200-203.)

编辑　杨冬梅