

MgO 在含铬型钒钛烧结矿制备中的迁移及作用

周 密, 杨松陶, 姜 涛, 薛向欣

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110819)

摘 要: 研究在含铬型钒钛矿烧结过程中 MgO 对烧结矿转鼓强度(TI)及低温还原粉化指数(RDI)的影响, 采用熔点熔速仪和 SEM-EDS 研究 MgO 对含铬型钒钛矿熔化特性的影响, 并探讨 MgO 在烧结过程的迁移行为。结果表明: 当 MgO 含量为 1.95%~2.63%(质量分数)时, MgO 含量的提高对含铬型钒钛矿熔化特性未产生不利影响; 当 MgO 含量由 1.95%增加到 2.63%时, 烧结矿转鼓强度由 50.33%提高到 53.40%, RDI_{+3.15} 由 80.57%上升到 82.71%; MgO 的迁移主要以 Mg²⁺的形式通过类质同象形式取代 Fe²⁺而形成含镁磁铁矿(Fe, Mg)O·Fe₂O₃, Mg²⁺的含量随着 MgO 含量的提高而增多, 其迁移历程为: FeO·Fe₂O₃→(Fe, Mg)O·Fe₂O₃→(Mg, Fe)O·Fe₂O₃→MgO·Fe₂O₃。

关键词: 含铬型钒钛磁铁矿; MgO; 熔化特性; 迁移; 烧结

中图分类号: TF521

文献标志码: A

Transference and influences of MgO in sintering of Cr-bearing vanadium and titanium magnetite

ZHOU Mi, YANG Song-tao, JIANG Tao, XUE Xiang-xin

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The influences of MgO on the tumbler index (TI), reduction degradation index (RDI) and melting characteristics of V-Ti-Cr magnetite sinter were studied. The transference and interaction mechanism of MgO in sintering of V-Ti-Cr magnetite were investigated by melting point-rate measuring and SEM-EDS. The results show that, when MgO content (mass fraction) increases from 1.95% to 2.63%, the melting characteristic of V-Ti-Cr magnetite does not become worse. Furthermore, TI increases from 50.33% to 53.40% and RDI_{+3.15} increases from 80.57% to 82.71% with increasing MgO content from 1.95% to 2.63%. The transference of MgO is mainly in the form of Mg²⁺, which diffuses into crystal lattice of magnetite and forms (Fe, Mg)O·Fe₂O₃, and the content of Mg²⁺ in magnetite increases with increasing MgO content. The course of transference of MgO is FeO·Fe₂O₃→(Fe, Mg)O·Fe₂O₃→(Mg, Fe)O·Fe₂O₃→MgO·Fe₂O₃.

Key words: Cr-bearing V-Ti magnetite; MgO; melting characteristics; transference; sintering

近年来, 随着国内外铁矿选矿技术的发展, 矿物组成复杂的含铬型钒钛磁铁矿得到开发利用, 在一定程度上缓解了我国“缺铬”的局面, 同时提供了重要的钒资源^[1-2]。MgO 对高炉炼铁有着重要的影响, 适宜的 MgO 含量对改善炉渣的流动性、稳定性、冶金

性能及提高炉渣的脱硫能力有重要作用^[3-5]。由于矿石中有的 MgO 含量往往不能满足高炉冶炼的需求, 所以常常在成本低廉的烧结造块过程中加入含镁熔剂^[5], 这对烧结矿的质量将产生重要影响。有关研究表明, 适当提高烧结矿 MgO 含量, 有利于提高烧结

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA062302, 2012AA062304); 国家自然科学基金重大项目(51090384); 国家自然科学基金资助项目(51174051); 科技部重大国际合作项目(2012DFR60210)

收稿日期: 2014-04-01; **修订日期:** 2014-06-15

通信作者: 薛向欣, 教授, 博士; 电话: 024-83681711; E-mail: xuexx@mail.neu.edu.cn

矿强度,改善烧结矿的冶金性能^[5]。但 MgO 在烧结过程中的行为受到矿石种类和原料成分等诸多因素的影响。不同的烧结混合料成分, MgO 对烧结矿产量和质量的影响趋势及其适宜值也不相同。目前,关于 MgO 对烧结矿质量的影响及作用机理并不明确且有争论^[5-7],尤其是缺乏矿物组成复杂的含铬型钒钛矿相关数据。为此,本文作者针对含铬型钒钛磁铁矿烧结条件下不同 MgO 含量的含铬型钒钛烧结矿的转鼓强度及还原粉化指数进行研究,并通过熔点熔速仪和 JEOL S-3400N 型扫描电镜分析 MgO 对含铬型钒钛矿熔化特性的影响及 MgO 在烧结过程中的迁移变化,探明 MgO 在含铬型钒钛矿烧结过程中的作用机理。

1 实验

1.1 实验原料

所用含铬型钒钛磁铁矿来源于俄罗斯 ARICOM 公司,其余原燃料由黑龙江建龙钢铁公司提供。实验原燃料的化学成分列于表 1 和 2。

从表 1 可以看出,含铬型钒钛磁铁矿与攀枝花钒钛磁铁精矿($w(\text{Fe}_t) \approx 51.16\%$, $w(\text{V}_2\text{O}_5) \approx 0.55\%$, $w(\text{TiO}_2) \approx 13.29\%$, $w(\text{Cr}_2\text{O}_3) < 0.08\%$)相比^[8],铬含量高($w(\text{Cr}_2\text{O}_3)=0.47\%$),钒含量高($w(\text{V}_2\text{O}_5)=1.01\%$),钛含量低($w(\text{TiO}_2)=5.12\%$)。根据岩相鉴定及 XRD 分析^[9-10],铁在原矿中以磁铁矿、钛铁晶石($2\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$)和钛铁矿

($\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$) 3 种形态存在。钛主要存在于钛磁铁矿和钛铁矿中,钒主要存在于磁铁矿中,以 V_2O_3 形态存在,因它置换了磁铁矿中的 Fe_2O_3 ,所以常以 $\text{FeO}\cdot\text{V}_2\text{O}_3$ 表示。铬主要以类质同象的形式存在于磁铁矿中形成铬钛磁铁矿。

1.2 实验方法

1.2.1 熔化特性实验

如表 3 所列,将不同烧结配料中的铁矿粉、返矿和除尘灰、生石灰细磨至粒径小于 0.074 mm,用 MgO 分析纯代替菱镁石调节混合料中 MgO 含量,将混合料混匀后制成 $d\ 3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}$ 的圆柱体。利用熔点熔速仪对 MgO 含量在 1.95%~2.63%的含铬型钒钛烧结混合料进行熔化特性测定,根据试样的形态,采集不同温度下的照片,考察其熔化特性,进而分析 MgO 对含铬型钒钛烧结矿液相生成的影响。

1.2.2 烧结杯实验

烧结实验的总体方案如表 3 所列,碱度 $R(m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2))=2.25$ 在各组实验中保持不变,烧结混合料水分在 8.5%~9.1%之间,通过改变菱镁石粉的添加量,调节 MgO 在烧结矿中的含量。配料后,将混合料充分混匀并在圆筒混合机中制粒 12 min,然后布料、点火、烧结。烧结实验在直径 $\times$ 高为 150 mm $\times$ 500 mm 的烧结杯中进行,在温度 1000 $^{\circ}\text{C}$ 、负压为 5 kPa 的条件下点火 2 min,在烧结过程中负压为 10 kPa,当烧结废气温度达到最高时即为烧结终点。

表 1 烧结原料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of sintering raw materials

Raw material	Mass fraction/%									
	Fe _t	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	H ₂ O
V-Ti-Cr magnetite	61.42	28.63	0.32	2.54	1.20	2.95	5.12	1.01	0.47	1.02
Magnetite A	62.99	26.56	0.49	5.30	1.01	3.36				0.26
Magnetite B	63.85	27.86	0.05	5.48	0.17	3.66				0
Magnetite C	61.81	22.21	1.39	3.66	3.54	2.44				0
Shaft furnace dust	62.56		0.31	8.16	0.58	0.92				0
Magnesite	0		1.20	3.50	42.00	0				2.00
Quicklime	0		80.0	5.00	1.10	0				0

表 2 焦炭的化学成分

Table 2 Chemical compositions of coke breeze (mass fraction, %)

Fixed carbon	Volatile	Organic compound	Ash(14.00)					
			FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Others
84.00	0.50	1.50	0.14	0.48	7.50	0.15	2.72	2.89

表 3 不同 MgO 含量的烧结原料配料方案

Table 3 Schemes of raw material in sintering experiments with different MgO contents (mass fraction, %)

MgO	V-Ti-Cr magnetite	Magnetite A	Magnetite B	Magnetite C	Return	Shaft furnace dust	Magnesite	Quicklime	Carbon
1.95	13.44	15.53	12.41	20.67	14.00	4.50	2.00	12.45	5.00
2.10	13.37	15.45	12.35	20.55	14.00	4.50	2.33	12.45	5.00
2.25	13.30	15.35	12.28	20.44	14.00	4.50	3.02	12.40	5.00
2.40	13.23	15.28	12.22	20.35	14.00	4.50	3.02	12.40	5.00
2.63	13.11	15.12	12.12	20.18	14.00	4.50	3.57	12.40	5.00

将烧结矿冷却后，进行落下、筛分和转鼓强度测试，低温还原粉化性能在东北大学开发的 RSZ-03 型矿石冶金性能综合测定仪上测试。

1.2.3 SEM-EDS 分析

在每组烧结矿中随机取 3 块试样，将试样切割成长 3 cm、宽为 2 cm、厚为 1 cm 的薄片，用树脂进行封样。将封装后的试样分别在 100~1000 号金刚砂磨盘中进行粗磨，再在毛玻璃板上进行进一步细磨，最后在抛光机上进行抛光、清洗，烘干后进行喷金处理，在 JEOL S-3400N 型扫描电镜上进行 SEM-EDS 分析。

2 结果与讨论

2.1 MgO 含量对含铬型钒钛磁铁矿熔化特性的影响

烧结混合料是由不同矿物组成的渣相，没有固定的熔点，根据国家标准 GB/T 219—1996，定义混合料的特征熔化温度如下：收缩 30%时的温度为有效液相的开始形成温度(θ_s)，反映烧结过程中混合料开始生成有效液相的温度。收缩 60%时的温度为有效液相形成终止的温度(θ_F)，反映烧结过程中混合料有效液相生成的难易程度。定义温度区间 $\theta=\theta_F-\theta_s$ ，反映烧结过程中有效液相量的生成范围，也可以间接对烧结过程中燃料配比提供参考依据。

本实验采用统一的升温速度，室温~1000℃，10℃/min；1000~1200℃，8℃/min；1200~1400℃，5℃/min。定义熔化时间(t_M)为混合料在上述升温制度下，从收缩 30%到 60%所经历的时间。烧结过程中，混合料具有较低的特征熔化温度(θ_s ， θ_F)和较宽的熔化区间(θ)有助于液相的稳定形成，适当的熔化时间(t_M)将有助于液相的持续稳定流动。液相的生成难易及有效粘结对烧结矿的质量将产生重要影响。

从表 4 可见，随着 MgO 质量分数的增大，含铬

型钒钛烧结物料开始形成液相的温度相对变化不大， θ_s 只是略有提高，为 1315~1325℃；液相的有效终止温度 θ_F 稍有提高，为 1336~1358℃，且随着 MgO 含量的提高，熔化区间 θ 变宽，熔化时间 t_M 变大，液相稳定生成区间及连续稳定流动时间增加，从而可以形成有效的粘结。所以在含铬型钒钛烧结物料中，MgO 含量的提高对含铬型钒钛烧结矿熔化特性影响不大，从而可以说明 MgO 的增加对烧结混合料的液相生成未产生明显的不利影响。而相关研究认为^[7, 11]：在普通铁矿粉烧结物料中，随着氧化镁含量的提高，液相开始温度 θ_s 与液相终止生成温度 θ_F 提高，液相流动性降低，有效液相量下降，即 MgO 含量的提高对液相生成不利。由于含铬型钒钛矿自身矿物学性质，由前期研究可知^[9]，其铁矿粉自身同化温度高，达到 1335℃，且其在烧结过程中易产生高熔点物质，故在 MgO 含量为 1.95%~2.63%范围内，随着 MgO 含量的提高，含铬型钒钛烧结矿液相开始生成温度 θ_s 及有效液相终止温度 θ_F 升高不明显。相关生产研究也表明^[12]：在一定范围内提高钒钛烧结矿中 MgO 含量有利于烧结矿冶金性能。

表 4 MgO 含量对含铬型钒钛烧结物料熔化特性的影响

Table 4 Influence of MgO content on melting characteristics of V-Ti-Cr magnetite sinters

w(MgO)/%	$\theta_s/^\circ\text{C}$	$\theta_F/^\circ\text{C}$	$\theta/^\circ\text{C}$	t_M/min
1.95	1315	1336	21	4.2
2.10	1315	1340	25	5.0
2.25	1320	1346	26	5.2
2.40	1320	1350	30	6.0
2.63	1325	1358	33	6.6

2.2 MgO 对含铬型钒钛烧结矿冶金性能影响

MgO 对含铬型钒钛磁铁矿烧结矿强度及低温还

原粉化性能的影响见图 1。从图 1 中可以看出, 在含铬型钒钛烧结矿中, 随着 MgO 含量的提高, 烧结矿的转鼓强度有所提高。当 MgO 从 1.95% 上升到 2.63% 时, 转鼓强度从 50.33% 增加到 53.40%。烧结矿转鼓强度的提高是由于 MgO 含量增加时, 烧结速度明显变慢, 烧结过程中高温段保持时间长, 有利于液相的发展; 同时, 随着含铬型钒钛烧结矿中 MgO 含量的提高, 在局部 MgO 含量高的区域, 玻璃相中镁质硅酸盐矿物会从中析出, 从而降低了玻璃相的含量, 有利于提高烧结矿强度。在烧结冷却过程中, Mg^{2+} 能部分固溶于 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的晶格中, 抑制了 $\beta\text{-C}_2\text{S} \rightarrow \gamma\text{-C}_2\text{S}$ 相变的发生, $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 的量减少, 从而使烧结矿的强度提高^[13], 此外, 烧结矿的裂纹普遍发生在骸晶状的再生赤铁矿晶体集中处, 由于大量 Mg^{2+} 进入磁铁矿中形成大量稳定的含镁磁铁矿, 减少了次生赤铁矿的生成, 也就减少了裂纹的产生^[4], 这也有利于含铬型钒钛磁铁矿强度的提高。

从图 1 也可以看出, 随着 MgO 含量由 1.95% 提高到 2.63%, 含铬型钒钛烧结矿的低温还原粉化指数由 80.57% 上升到 82.71%。这表明提高 MgO 含量有利于改善含铬型钒钛烧结矿的低温还原粉化性能。烧结矿发生低温还原粉化的最根本原因是烧结矿中的再生 Fe_2O_3 在 450~500 °C 时的还原过程中, 发生 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ 还原相变, 体积发生膨胀, 导致发生粉化。根据下文对含铬型钒钛烧结矿中 MgO 迁移研究可知: MgO 固溶于含铬型钒钛磁铁矿的八面体晶位, 因而使含铬型钒钛磁铁矿晶格中空位减少, Fe^{2+} 减少, 电价不平衡程度降低, 晶格缺陷程度降低, 故含镁磁铁矿比不含镁的磁铁矿稳定, 这样在烧结冷却过程中, 镁磁铁矿不易被二次氧化生成赤铁矿, 使易还原的赤铁矿逐渐减少, 有效地抑制了再生赤铁矿的产生, 减轻了再生赤铁矿的作用, 改善了烧结矿的低温还原粉化性能。同时, 对于钒钛磁铁矿^[12], 固溶于硅酸盐相中的 TiO_2 和 Al_2O_3 能显著地破坏其断裂韧性, 在钙钛矿聚集区, 特别是大颗粒钙钛矿聚集区, 都有粗大的裂纹穿过, 这些裂纹在还原过程中受应力的作用进一步扩大, 使烧结矿产生粉化。随着 MgO 含量的增加, 粗大的菱形赤铁矿生成量减少, 烧结矿形成微孔厚壁结构, 强度提高; 同时, 由于 MgO 能提高硅酸盐熔体的结晶能力, 减少玻璃质含量, 玻璃相中析出较多的含镁橄榄石和辉石矿物起骨架作用, 增强了抵御应力变化和裂纹扩展的能力, 因此, 低温还原粉化指数 $\text{RDI}_{+3.15}$ 增大。

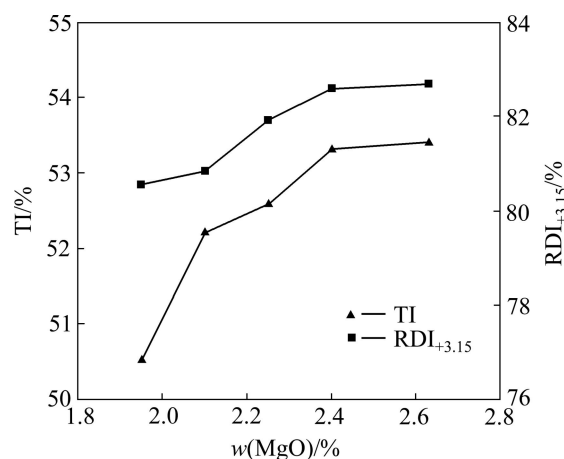


图 1 MgO 对含铬型钒钛烧结矿 TI 和 $\text{RDI}_{+3.15}$ 的影响

Fig. 1 Influences of MgO content on TI and $\text{RDI}_{+3.15}$ of V-Ti-Cr magnetite sinters

2.3 MgO 在含铬型钒钛烧结矿中的迁移行为

分别对 MgO 含量为 1.95%、2.25% 和 2.63% 的含铬钒钛烧结矿试样进行 SEM-EDS 分析, 结果如图 2 所示。图 2 结果表明, 在试样 a ($w(\text{MgO})=1.95\%$) 中, Mg^{2+} 面分布较为稀疏, 在磁铁矿中 $w(\text{Mg})=2.68\%$, 如图 2(a₃) 所示; 随着 MgO 含量的提高, 在试样 b 中 ($w(\text{MgO})=2.25\%$), Mg^{2+} 面分布强度稍微增强, 在磁铁矿中的分布密度有所增加 ($w(\text{Mg})=2.76\%$) 如图 2(b₃) 所示; 在试样 c 中 ($w(\text{MgO})=2.63\%$), 可以明显发现 Mg^{2+} 分布密度显著增加, 在磁铁矿中分布密度明显增加 ($w(\text{Mg})=3.65\%$) 如图 2(c₃) 所示。同时, 由图 2 分析可以, 发现赤铁矿处 Mg^{2+} 密度很低, 在硅酸盐粘结相中 Mg^{2+} 分布密度也不高, 并且当 MgO 含量在 1.95%~2.63% 的范围内时, 固溶在硅酸盐粘结相中的 Mg^{2+} 密度没有太大增加。同时, 在图 2(a₁)~(c₁) 中, 随着 MgO 含量的提高, 磁铁矿晶粒明显增大。以上分析结果表明, 在含铬型钒钛烧结矿中, 当 MgO 含量在 1.95%~2.63% 范围内变化时, Mg^{2+} 主要分布在铁相中, 主要以固溶于磁铁矿的方式存在, 并随着烧结矿中 MgO 含量的增加, 固溶量明显增加, 并且促使磁铁矿晶粒长大, 使其更加稳定。在 $w(\text{MgO})=2.63\%$ 的试样局部发现有少量环状铁酸镁生成, 如图 3 所示, 其 Mg 元素相对强度达到 22.15% (图 3(a) 中 E 点和图 3(b)), 甚至高达 51.08% (图 3(a) 中 D 点和图 3(c))。

从图 2 和 3 中可以发现, Mg^{2+} 在烧结过程中集中固溶于磁铁矿中形成含镁磁铁矿, 磁铁矿中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的半径相近 ($R(\text{Fe}^{2+})=0.83 \text{ \AA}$, $R(\text{Mg}^{2+})=0.78 \text{ \AA}$, Mg^{2+} 的半径稍小于 Fe^{2+} 的半径), 二者等电价, 化学键均为离子键。因此, Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 可以相互取代,

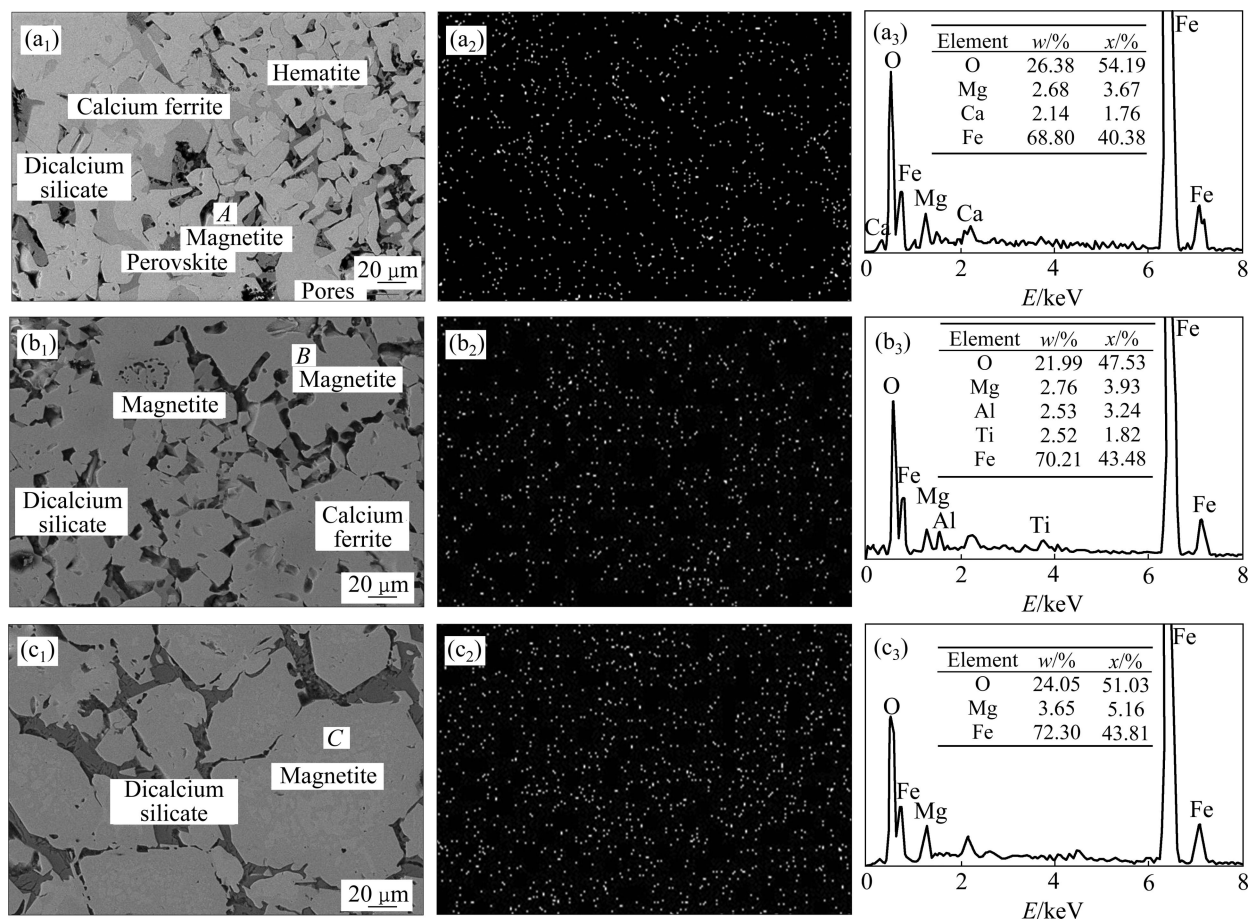


图2 不同MgO含量含铬型钒钛烧结矿的SEM-EDS像及EDS谱

Fig. 2 SEM images and EDS spectra of V-Ti-Cr magnetite sinters with different MgO contents: (a₁) SEM image, w(MgO)=1.95%; (a₂) Area scanning image, w(MgO)=1.95%; (a₃) EDS spectrum, w(MgO)=1.95%; (b₁) SEM image, w(MgO)=2.25%; (b₂) Area scanning image, w(MgO)=2.25%; (b₃) EDS spectrum, w(MgO)=2.25%; (c₁) SEM image, w(MgO)=2.63%; (c₂) Area scanning image, w(MgO)=2.63%; (c₃) EDS spectrum, w(MgO)=2.63%

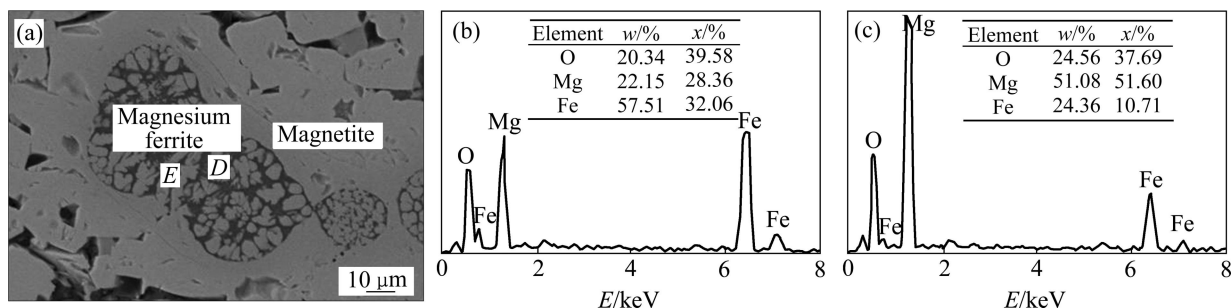


图3 铁酸镁的SEM-EDS像

Fig. 3 SEM images and EDS spectra of magnesium ferrite: (a) SEM image; (b) EDS spectra of point E; (c) EDS spectrum of point D

形成连续的完全类质同象。即在一定的温度条件下, Mg^{2+} 很容易扩散迁移到磁铁矿晶格中, 取代 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 并占据磁铁矿晶格中铁离子空位, 形成含镁磁铁矿 $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 而其晶体结构则基本不变, 其迁

移变化历程为 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 磁铁矿及镁铁矿均属于等轴晶系的尖晶石型结构, 其晶体结构相近, 在电子显微镜下和 XRD 分析中均难以区分。根据对烧结前的天

然磁铁矿粉和烧结后磁铁矿的穆斯堡尔学研究分析可知^[14-15], 烧结前天然磁铁矿由 Fe^{3+} 构成 A 晶位(四面体晶位)和由 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 构成的 B 晶位(八面体晶位)。两个谱峰面积比 $S_B/S_A \neq 2$, 而完美无空位的理论值 $S_B/S_A = 2$ 。说明天然磁铁矿中八面体晶位存在空位。烧结后 S_B/S_A 明显变小, 充分说明含 MgO 烧结矿中磁铁矿晶格内八面体晶位 Fe^{2+} 发生严重空位, 由此可以证明有大量非 Fe^{2+} 进入磁铁矿晶格的八面体晶位中以及有 Fe^{2+} 离开晶格中八面体晶位^[14-16]。从图 2 和 3 可以看出, 以菱镁石形式添加到含铬型钒钛烧结混合料中的 MgO 在高温烧结之后主要以 Mg^{2+} 的形式分布于含铬型钒钛磁铁矿中, 这也充分说明 Mg^{2+} 在磁铁矿中以类质同象形式取代 Fe^{2+} 而形成含镁磁铁矿 $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, Mg^{2+} 的含量随着烧结矿中 MgO 含量的提高而增多。

3 结论

1) 当 MgO 质量分数在 1.95%~2.63% 范围内变化时, 随着 MgO 含量的提高, 含铬型钒钛矿烧结液相开始生成温度及有效液相终止温度有所提高, 熔化区间变宽, 熔化时间延长, 由于含铬型钒钛矿本身的矿物特性, MgO 含量的增加对含铬型钒钛烧结矿液相生成不产生明显不利影响。

2) 在含铬型钒钛矿烧结过程中, 当 MgO 质量分数由 1.95% 提高到 2.63% 时, 随着 MgO 质量分数的提高, 含铬型钒钛烧结矿转鼓指数由 50.33% 增加到 53.40%, 低温还原粉化指数由 80.57% 上升到 82.71%。

3) 在含铬型钒钛矿烧结过程中, 当 MgO 质量分数在 1.95%~2.63% 范围内变化时, MgO 的迁移主要以 Mg^{2+} 的形式分布于磁铁矿中, 也充分说明 Mg^{2+} 在磁铁矿中以类质同象形式取代 Fe^{2+} 而形成含镁磁铁矿 $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, Mg^{2+} 的含量随着烧结矿中 MgO 含量的提高而提高, 其迁移变化历程为 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

REFERENCES

- [1] 余永富. 国内外铁矿选矿技术进展及对炼铁的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 47-51.
YU Yong-fu. Advance in iron ore dressing technology at home and abroad and their influence on iron-smelting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 47-51.
- [2] 邓志敢, 魏 昶, 李兴彬, 徐红胜, 李旻廷, 李存兄, 樊 刚. 钒钛磁铁矿提钒尾渣浸取钒[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1770-1777.
DENG Zhi-gan, WEI Chang, LI Xing-bin, XU Hong-sheng, LI Min-ting, LI Cun-xiong, FAN Gang. Leaching vanadium from extracted vanadium residue of vanadium titanomagnetite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1770-1777.
- [3] 蒋大军, 林千谷, 何木光, 甘 勤, 付卫国. MgO 对烧结矿与高炉渣冶炼性能及工艺参数影响的试验[J]. 中国冶金, 2010, 20(1): 35-41.
JIANG Da-jun, LIN Qian-gu, HE Mu-guang, GAN Qin, FU Wei-guo. Industrial experimentation on influence of MgO on sinter and BF slag smelting properties and technical parameters[J]. China Metallurgy, 2010, 20(1): 35-41.
- [4] UMADEVI T, NELSON K, MAHAPATRA P C, PRABHU M, RANJAN M. Influence of magnesia on iron ore sinter properties and productivity[J]. Iron making and Steel Making, 2009, 36(7): 515-520.
- [5] YADAV U S, PANDEY B D, DAS B K, JENA D N. Influence of magnesia on sintering characteristics of iron ore[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2002, 29(2): 91-95.
- [6] EIKI K, YORITO S, TAKAZO K, TAKASHI N. Influence of properties of fluxing materials on the flow of melt formed in the sintering process[J]. ISIJ International, 2000, 40(9): 857-859.
- [7] 范晓慧, 李文琦, 甘 敏, 陈许玲, 袁礼顺, 季志云, 余志元, 黄晓贤, 苏 道. MgO 对高碱度烧结矿强度的影响及机理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(9): 3325-3330.
FAN Xiao-hui, LI Wen-qi, GAN Min, CHEN Xu-ling, YUAN Li-shun, JI Zhi-yun, YU Zhi-yuan, HUANG Xiao-xian, SU Dao. Influence and mechanism of MgO on strength of high basicity sinter[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(9): 3325-3330.
- [8] 杜鹤桂. 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 9-13.
DU He-gui. Principle of blast furnaces melting vanadium-titanium magnetite[M]. Beijing: Science Press, 1996: 9-13.
- [9] 张 勇, 周 密, 储满生, 薛向欣, 姜茂发. 进口高铬型钒钛磁铁矿烧结基础特性研究[J]. 钢铁, 2012, 47(12): 1-6.
ZHANG Yong, ZHOU Mi, CHU Man-sheng, XUE Xiang-xin, JIANG Mao-fa. Study on basic sintering characteristics of imported vanadium and titanium magnetite with high chrome content[J]. Iron and Steel, 2012, 47(12): 1-6.
- [10] 张 勇, 周 密, 储满生, 薛向欣. 高铬型钒钛磁铁矿烧结试验[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(3): 383-387.
ZHANG Yong, ZHOU Mi, CHU Man-sheng, XUE Xiang-xin. Sintering experiment of high-Cr vanadium and titanium magnetite[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2013, 34(3): 383-387.
- [11] 吴胜利, 韩宏亮, 姜伟忠, 朱锦明, 冯根生, 张作程. 烧结矿中 MgO 作用机理[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(4): 428-432.
WU Sheng-li, HAN Hong-liang, JIANG Wei-zhong, ZHU

- Jin-ming, FENG Gen-sheng, ZHANG Zuo-cheng. MgO interaction mechanism in sinter[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(4): 428–432.
- [12] 甘 勤, 何 群, 文永才. MgO 对钒钛烧结矿产质量的影响[J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(1): 54–60.
- GAN Qin, HE Qua, WEN Yong-cai. Influence of MgO content on productivity and quality of V-bearing titaniferous magnetite sinter[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2008, 29(1): 54–60.
- [13] SHARMA T, GUPTA R C, PRAKSH B. Effect of firing condition and ingredients on the swelling behaviour of iron ore pellets[J]. ISIJ International, 1993, 33(4): 446–453.
- [14] 任允芙, 蒋烈英, 王树同, 凤 林. 配加白云石烧结矿中 MgO 的赋存状态和矿物组成及其对冶金性能影响的研究[J]. 烧结球团, 1984(2): 1–9.
- REN Yun-fu, JIANG Lie-ying, WANG Shu-tong, FENG Ling. The existing state of MgO in the form of dolomite and its effect on the properties of sinter[J]. Sinter Pelletiz, 1984(2): 1–9.
- [15] 任允芙, 蒋烈英, 王树同. MgO 在人造富矿中的赋存状态及作用[J]. 北京钢铁学院学报, 1983, 4: 1–12.
- REN Yun-fu, JIANG Lie-ying, WANG Shu-tong. The existing state of MgO and its effect on the properties of iron ore agglomerates[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1983, 4: 1–12.
- [16] PANIGRAHY S C, VERSTRAETEN P, DILEWIJNS J. Influence of MgO addition on mineralogy of iron ore sinter[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15: 23–32.
- (编辑 陈卫萍)