

MgO 对含钛烧结矿矿相结构及软熔滴落性能的影响

郑安阳, 刘征建[✉], 苍大强, 王耀祖, 张建良

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: liuzhengjian@ustb.edu.cn

摘 要 为了深入探究 MgO 对烧结矿矿物组成及冶金性能的影响, 采用扫描电子显微镜和荷重软化熔滴设备研究了 MgO 对含钛烧结矿矿相结构与软熔滴落性能影响。实验结果表明, 随着烧结料中 MgO 质量分数从 2.04% 增加到 3.96%, 烧结过程液相生成量逐渐减少, 烧结矿中的赤铁矿和铁酸钙等含量都有不同程度的降低, 赤铁矿质量分数从 13.57% 降低到 9.99%, 铁酸钙的质量分数由 38.7% 降低到 30.17%, 磁铁矿、硅酸盐和烧结矿中的孔洞逐步增加。因此, 增加烧结矿中 MgO 会降低烧结矿中液相生成量, 不利于烧结矿转鼓强度和还原性的提高。高碱度含钛烧结矿中的镁主要分布于烧结矿中复合铁酸钙相中, 进一步提高烧结矿中镁的质量分数, 烧结矿的磁铁矿相比例将增加, 有一部分镁固溶于磁铁矿中; 在高镁烧结矿中, 也会形成一定量的橄榄石, 其中固溶有少量镁、钛等元素。随着烧结矿中 MgO 质量分数的增加, 开始软化温度逐渐升高, 试样软化开始温度均在 1120 °C 以上, 软化温度区间 Δt_s 随着 MgO 含量的升高而逐渐变宽。

关键词 烧结矿; MgO; 矿相结构; 含钛烧结矿; 液相生成量; 荷重软化熔滴性能

分类号 TF046

Effects of MgO on the mineral structure and softening-melting property of Ti-containing sinter

ZHENG An-yang, LIU Zheng-jian[✉], CANG Da-qiang, WANG Yao-zu, ZHANG Jian-liang

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: liuzhengjian@ustb.edu.cn

ABSTRACT Certain requirements regarding the chemical composition of slag have to be satisfied to perform a stable blast furnace operation. Particularly, the ratio of MgO to Al_2O_3 in the slag is observed to have a significant influence on the fluidity and desulfurization ability of the slag, along with the stability of the blast furnace. However, the amount of MgO in the ore could not satisfy the smelting requirement of the blast furnace. Thus, Mg-containing flux has to be added into the ferrous burden. In the ferrous burden structure of the blast furnace that is observed in China, sinter generally accounts for more than 70%. Therefore, the effects of various concentrations of MgO on the quality of sinter are of great significance and must be investigated in further detail. In this study, the influence of MgO on the mineral structure and softening-melting property of Ti-containing sinter were investigated using scanning electronic microscopy (SEM) -energy dispersive spectrometer (EDS) and drop testing. The results depict that increasing the concentration of MgO from 2.04% to 3.96% results in a decrease in the contents of hematite and complex calcium ferrite in the sinter, whereas there is an increase in the mass of liquid phase, magnetite, and silicate. Further, the pore size also gradually increases. Additionally, the hematite content reduces from 13.57% to 9.99%, and the complex calcium ferrite in sinter reduces from 38.7% to 30.17%. Therefore, the increase of MgO in sinter is unfavorable for the development of a liquid phase, which depicts a negative effect on the tumbler strength and reduction index of sinter. Mg in sinter is mainly distributed in complex calcium ferrite. Further, an increase in the concentration of MgO causes a gradual increase in the concentration of magnetite. Additionally, it also causes a part of Mg to be dissolved in magnetite.

收稿日期: 2017-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504216)

An olivine solid solution, which contains a minor amount of Mg and Ti, can be observed in high-Mg sinter. Finally, by increasing the concentration of MgO in the sinter, the softening temperature can increase, which is observed to be greater than 1120 °C. Further, the softening interval (Δt_A) of the sinter is observed to increase gradually with an increasing MgO content.

KEY WORDS sinter magnesium oxide; mineral structure; Ti-containing sinter; liquid phase mass; softening-melting property

高炉冶炼对炉渣化学成分有一定的要求,特别是炉渣中镁铝比的平衡,对于保证炉渣的流动性及脱硫能力等冶金性能,甚至于高炉炉况的稳定都具有十分重要的影响^[1-2]。然而,矿石本身中所含 MgO 量不能够满足高炉炉渣冶炼所需,因此通常需要在高炉炉料中添加镁质熔剂。含镁熔剂白云石、菱镁石属于碳酸盐矿物,直接向高炉内添加白云石、菱镁石后,碳酸盐分解吸热,会使高炉燃料比大幅上升。因此,烧结生产工艺中通常在烧结原料中添加白云石、蛇纹石等含 MgO 量较多的物质来提高高炉炉渣中的 MgO 含量,以改善高炉炉渣的流动性和脱硫能力,适应高炉炉渣中的高 Al_2O_3 含量^[3]。因此,研究 MgO 含量对烧结矿质量的影响具有极为重要的意义。

目前,关于 MgO 含量对烧结矿性能影响的研究已有大量的报道。吴胜利等^[4]采用微型烧结装置研究了烧结矿中 MgO 对烧结液相生成温度、液相流动性及黏结相强度的影响机理,并在此基础上通过烧结杯试验进行验证。姜鑫^[5]、Yadav 等^[6]和 Panigrahy 等^[7]研究了 MgO 对烧结矿矿相、还原性及还原粉化性能的影响规律,对综合炉料的软熔性能也进行了试验研究,为优化 MgO 在综合炉料中的添加方式提供了依据。甘勤等^[8-9]、周密等^[10]、刘然等^[11]及李志民等^[12]研究了含钛矿烧结过程中 MgO 对矿相结构及冶金性能的影响机制,通过烧结杯实验获得了适宜的 MgO 含量,为进一步提高含钛烧结矿产、质量,改善高炉冶炼的技术经济指标提供依据。吕庆等^[13]和陈立杰^[14]则重点研究了 MgO 含量对含钛炉料熔滴性能影响,探讨了炉料中不同 MgO 含量对含钛高炉炉料软化温度、熔化温度、最大压差、荷重软化融滴综合指标等高温物理性能的影响规律。综合以往的研究成果发现,对于 MgO 对烧结矿各项性能影响的研究主要集中在烧结矿相结构和矿冶金性能的影响,而关于 MgO 含量对钒钛磁铁矿烧结质量的影响的研究比较少见,特别是涉及 MgO 质量分数对含钛烧结矿矿相结构、镁元素在含钛烧结矿中的赋存状态以及单矿荷重还原软化熔滴性能的影响的研究相对较少。

本文通过调整含镁熔剂的配比,使烧结混合料中 MgO 质量分数为 2.04% ~ 3.96%,并通过扫描电

子显微镜研究了不同 MgO 含量烧结矿的微观结构及矿物组成变化,进一步总结了烧结矿中 Mg 的分布规律,采用 Factsage 6.4 热力学软件计算 1150 ~ 1450 °C 下烧结过程的液相生成量,利用荷重软化装置研究了烧结矿荷重软化熔滴性能,揭示了 MgO 质量分数对烧结矿矿相及软化熔滴性能的影响机理,为优化含镁熔剂在烧结中的使用提供了理论基础和实践经验。

1 试验条件与方案

1.1 试验原料与方案

烧结杯试验所用原、燃料化学成分见表 1,表 2 为试验配矿方案,混合料的 MgO 质量分数主要通过菱镁石粉配比来调节,焦粉配比控制在 4.0%。从方案 1 至方案 5, MgO 质量分数选取 5 个水平,分别为 2.04%、2.49%、3.08%、3.53% 和 3.96%,烧结矿二元碱度为 2.30。烧结杯试验过程中,点火负压和烧结负压分别控制在 6 和 12 kPa,通过废气温度来判断烧结终点。荷重软化熔滴试验所使用的不同 MgO 质量分数的烧结矿取自 5 组平行的烧结杯试验。烧结所用取烧结矿的粒度为 10.0 ~ 12.5 mm,其主要的化学成分见表 3。

1.2 试验设备及检测

荷重软化熔滴试验采用北京科技大学自制的炉料软熔滴落试验测定装置。试验工艺参数见表 4,试验采用内径为 75 mm 的石墨坩埚,试验过程烧结矿的装样高度为 60 mm,并在烧结矿上下层均铺有 10 g 焦炭,焦炭粒度为 8 ~ 10 mm。试验过程中,荷重为 $1 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$,升温速度、煤气成分均模拟高炉实际生产情况,如图 1 所示。10 ~ 12.5 mm 的烧结矿试样灌入环氧树脂后,先经砂纸磨平抛光后,通过扫描电子显微镜表征烧结矿的微观结构。

2 结果与讨论

2.1 MgO 质量分数对烧结矿矿相结构的影响

为了研究 MgO 质量分数对烧结矿矿相结构的影响,通过扫描电子显微镜观察烧结矿微观结构,如图 2 所示。其中, M 为磁铁矿, H 为赤铁矿, SFCA 为复合铁酸钙, P 为孔洞, S 为硅酸盐相。不同烧结矿的矿物组成通过图像处理软件计算扫描电镜中不同

表 1 实验用原、燃料化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of the experimental materials									%
原料名称	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	H ₂ O	烧损
矿粉 A	61.85	1.47	0.15	1.06	3.33	6.61	0.95	8.50	-2.98
矿粉 B	60.17	11.31	0.08	0.41	1.12	0.08	0.02	5.70	0.45
矿粉 C	63.71	0.81	0.42	5.90	1.91	1.13	0.14	1.41	-3.10
矿粉 D	65.59	5.50	0.60	0.55	0.31	0.13	0.03	9.60	-1.89
矿粉 E	65.65	5.41	2.04	0.61	0.95	0.32	0.02	8.80	-5.05
矿粉 F	54.78	1.18	6.58	5.20	0.48	0.04	0.01	0.60	9.37
除尘灰	41.23	6.37	12.62	2.85	2.10	1.35	0.23	0	0
高炉返矿	55.52	4.92	3.69	3.20	2.07	1.64	0.31	0	0
冷返矿(外配)	51.41	6.24	6.24	2.97	2.12	1.86	0.37	0	0
菱镁石粉	0	2.90	1.32	44.00	0	0	0	0	51.78
生石灰	0	4.62	78.80	0.69	0	0	0	0	15.89
石灰石粉	0	8.00	48.00	0.91	0	0	0	0	43.09
焦粉	0	7.52	0.67	0.70	0	0	0	14.60	—

表 2 烧结杯试验配矿方案(质量分数)

Table 2 Experimental scheme of sintering													%
配矿方案	矿粉 A	矿粉 B	矿粉 C	矿粉 D	矿粉 E	矿粉 F	除尘灰	高炉返矿	冷返矿	菱镁石粉	生石灰	石灰石粉	焦粉
1	20	12	7.0	7	5.0	2	2	8	20	0	11.0	2	4
2	20	12	7.0	7	5.8	2	2	8	20	1.2	9.0	2	4
3	20	12	6.5	7	5.0	2	2	8	20	2.5	9.0	2	4
4	20	12	7.0	7	3.8	2	2	8	20	3.4	8.8	2	4
5	20	12	7.0	7	1.0	2	2	8	20	4.3	10.7	2	4

表 3 烧结矿化学成分(质量分数)及性能

Table 3 Chemical compositions and performance of the sinter										
方案	w(TFe) /%	w(SiO ₂) /%	w(CaO) /%	w(MgO) /%	w(Al ₂ O ₃) /%	w(TiO ₂) /%	转鼓指数	还原度	碱度	
1	51.39	5.32	12.24	2.04	1.71	1.95	66.71	84.68	2.30	
2	51.09	5.32	12.23	2.49	1.72	2.05	66.00	83.14	2.30	
3	50.59	5.35	12.32	3.08	1.71	2.06	64.67	81.85	2.31	
4	50.37	5.33	12.21	3.53	1.72	2.07	63.33	80.25	2.30	
5	48.66	5.32	12.22	3.96	1.70	2.07	61.27	79.57	2.30	

表 4 荷重软化熔滴试验工艺参数

Table 4 Process parameters of the softening-melting test under load

项目	试验条件参数
试样尺寸/mm	粒度为 10~12.5, 试样高度约为 60
坩埚/mm	石墨坩埚, 内径 75
还原气体成分(体积分数)	30% CO + 70% N ₂
试验荷重/(kg·cm ⁻²)	1
还原气体流量/(L·min ⁻¹)	10

矿物面积占比得到, 为了保证统计结果尽可能准确, 每种烧结矿取 10 张扫描电镜图并求得平均值, 其结

果如图 3 所示。由于烧结过程的温度一般为 1150~1450℃, 利用 Factsage 6.4 热力学软件中 Equilib 模块计算了在该温度区间下不同 MgO 添加量对烧结过程液相生成量的影响, 如图 4 所示, 计算结果表明, 随着 MgO 含量的升高, 烧结过程产生的液相量逐渐较少, 当 MgO 质量分数为 1.72% 时, 烧结矿产生的液相量最多。通过扫描电子显微镜表征发现, 烧结矿主要由赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙、镁尖晶石、硅酸盐液相和钙钛矿等矿物组成。当 MgO 质量分数为 2.04% 时, 烧结矿中含有较多的赤铁矿和复合铁酸钙, 如图 2(a) 所示, 赤铁矿、磁铁矿和铁酸钙形呈

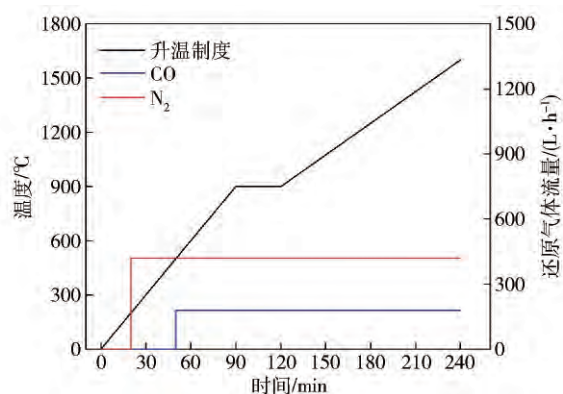


图1 荷重软化熔滴试验升温制度和气体组分

Fig.1 Temperature schedule and atmospheric conditions to perform softening-melting test under load

交织状,这使得烧结矿具有很好的转鼓强度和还原性,而计算结果表明低 MgO 条件下烧结过程会产生更多的液相,而铁酸盐液相的生成和流动有助于扩大反应物界面,从而增加烧结过程中黏结相的质量分数,加速烧结矿化反应的进行,改善烧结矿质量。

当 MgO 质量分数增加到 2.49% ~ 3.08% 时,烧结矿微观结构如图 2(b) 和 (c) 所示,从扫描电镜图中可以看出,烧结矿中不规则的孔洞有所增加,硅酸盐液相也开始有明显的聚集,烧结矿中的赤铁矿和复合铁酸钙的含量有所降低,这主要是因为 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 离子半径相近,价位相同,因此很容易发生置换反应形成 $(Mg, Fe)O \cdot Fe_2O_3$, 由于 Mg^{2+} 半径较小,且 Mg—O 键比 Fe—O 键长短、键能大,能够稳定磁

铁矿晶格,因此在烧结矿中会有一部分磁铁矿因为 Mg^{2+} 的存在而难以转换为赤铁矿,使得烧结矿中铁酸钙和赤铁矿的含量有所降低^[15]。值得注意的是,当 MgO 质量分数增加到 2.49% 时,烧结矿中的液相量明显减少,也就是说增加一定的 MgO 可以提高烧结矿液相线温度,这使得烧结矿中液相量降低,不利于烧结矿强度的提高,同时烧结矿中磁铁矿质量分数的升高对烧结矿的还原性的改善也是不利的。

当进一步提高烧结矿中 MgO 质量分数到 3.53% ~ 3.96% 时,烧结矿微观结构如图 2(d) 和 (e) 所示,铁酸钙质量分数减少到 30.17% ~ 31.98%,不规则孔洞进一步增加,值得注意的是,烧结矿中含磁铁矿质量分数进一步升高到 26.05% ~ 26.75%,硅酸盐聚集区域增加,磁铁矿将硅酸盐矿物包裹。同时,通过热力学计算发现烧结矿的液相量进一步降低,这主要是因为,在高碱度烧结矿中的 MgO 质量分数增加到一定程度时,会增加烧结矿中钙镁橄榄石体系的生成,钙镁橄榄石是橄榄石类中的钙和镁的硅酸盐矿物,其相对于硅酸盐是一种高熔点物质,在一定程度上阻碍了液相的生成,因此高碱度烧结矿中 MgO 质量分数的升高,烧结过程液相量降低,烧结矿转鼓强度降低。

2.2 镁在烧结矿的分布

通过矿相结构分析与 Factsage 热力学计算可知, MgO 对铁矿石烧结过程液相生成和矿相结构有着十分显著的影响,诸多文献报道 MgO 含量提高后, MgO 将固溶于磁铁矿,从而使得难还原的磁铁

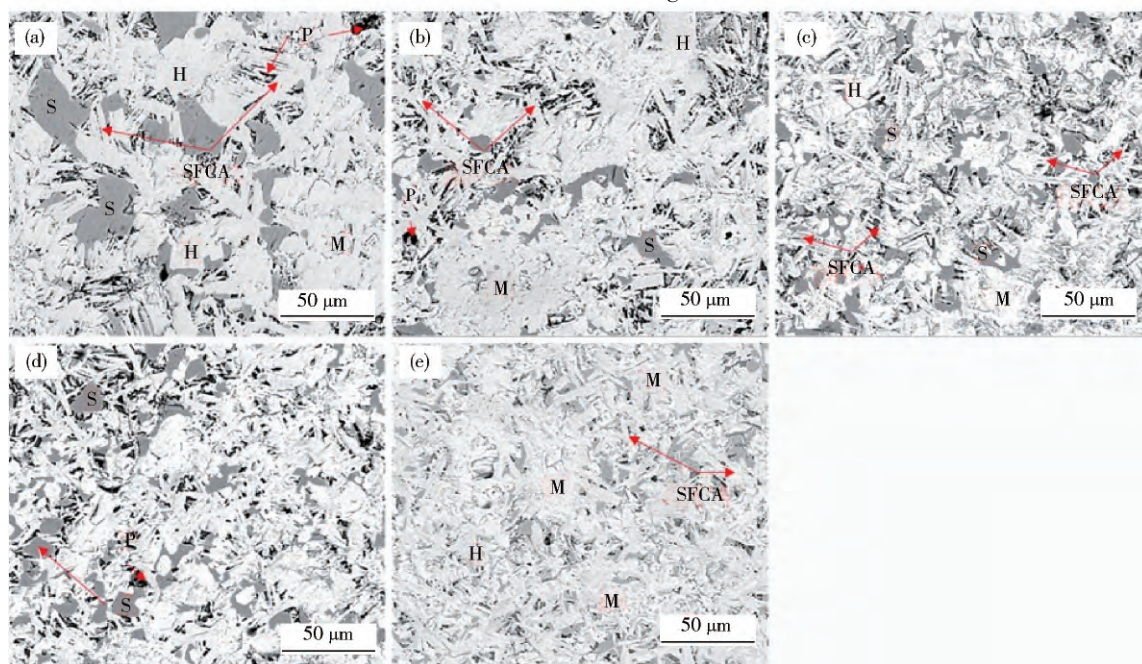


图2 不同 MgO 质量分数烧结矿矿相扫描电镜图。(a) 2.04%; (b) 2.49%; (c) 3.08%; (d) 3.53%; (e) 3.96%

Fig.2 Microstructure of sinters with different MgO contents: (a) 2.04%; (b) 2.49%; (c) 3.08%; (d) 3.53%; (e) 3.96%

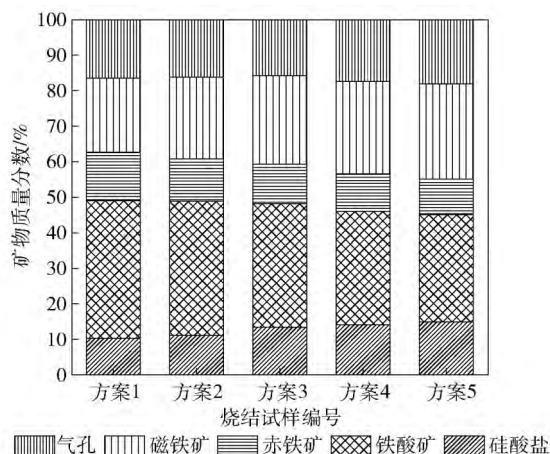


图3 不同 MgO 质量分数烧结矿矿物组成

Fig. 3 Mineral composition of sinters with different MgO contents

矿、辉石等矿物稳定存在。任允笑等^[16]采用电子探针等手段发现对于碱度 R 为 1.54 ~ 1.76 的烧结矿, MgO 主要分布于除赤铁矿之外的铁相矿物中, 在烧结矿中形成含镁磁铁矿, 在球团矿中形成镁铁矿, 少部分分布于渣相中。周密等^[10]通过扫描电子显微镜发现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。然而对于高碱度含钛烧结矿中镁元素的分布, 却鲜有文献报道。图 5 给出了烧结矿碱度 $R = 2.3$ 时, 不同 MgO 含量对烧结矿中

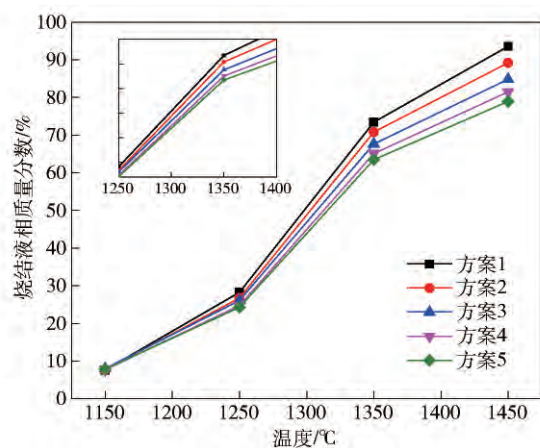


图4 1150 ~ 1450 °C 各烧结试验方案液相生成量

Fig. 4 Mass of the liquid phase of sinters at 1150–1450 °C

对镁分布的影响, 能谱结果表明, 当 MgO 质量分数为 2.04%, 烧结配料为自然 MgO 时, 烧结矿中的复合铁酸钙含量相对较高, Mg 主要存在于复合铁酸钙中, 如图 5(a) 中 P1、P2, 而硅酸盐等矿物中的 Mg 含量很少 (P3)。随着 MgO 含量的提高, 烧结矿中磁铁矿含量明显增加, 晶粒明显增大, Mg 不仅存在于复合铁酸钙中 (P4), 在磁铁矿中也发现了镁 (P5), 同时也证实 MgO 可以固溶于磁铁矿中。进一步提高烧结矿中 MgO , 磁铁矿面积扩大, 除铁氧化物外, 会有极少量的镁存在于硅酸盐中 (P9), 而在低镁烧结矿

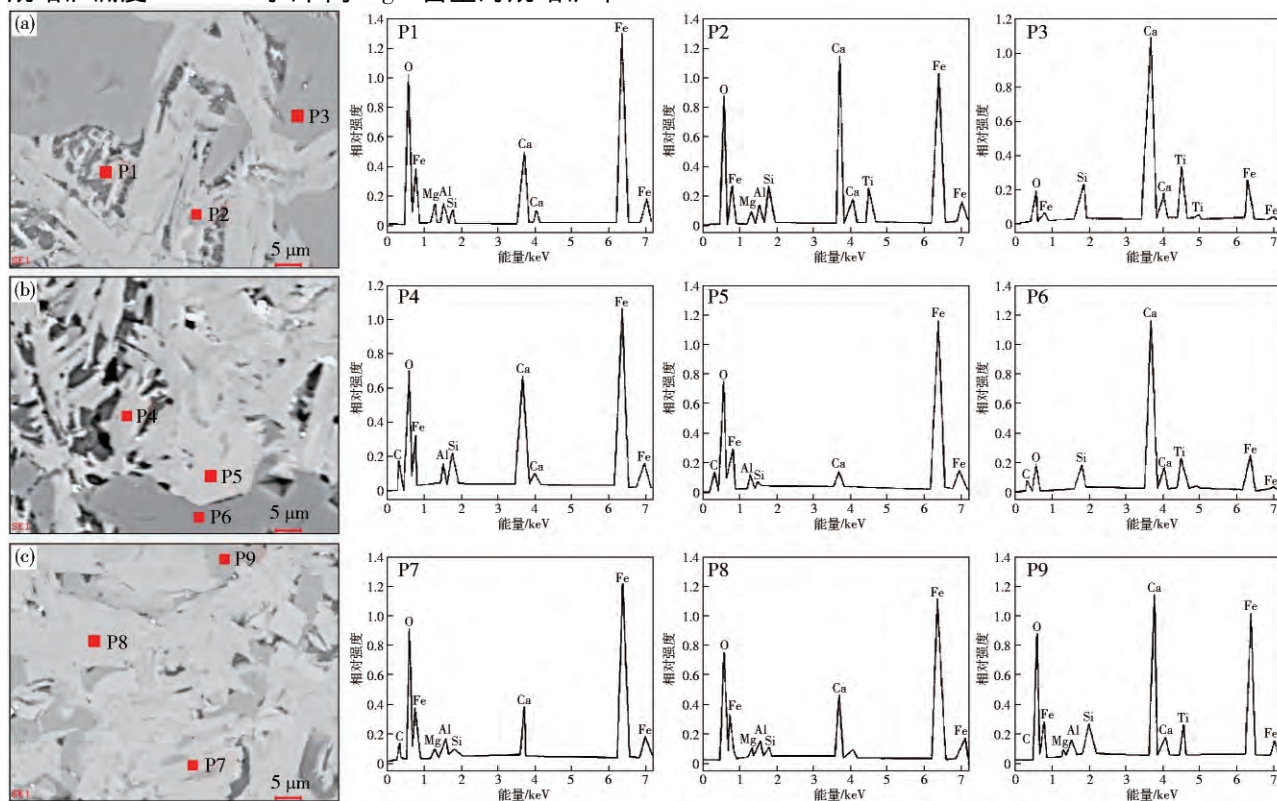
图5 含不同 MgO 质量分数的烧结矿能谱图. (a) 2.04%; (b) 3.08%; (c) 3.96%

Fig. 5 EDS patterns of sinter with different MgO contents: (a) 2.04%; (b) 3.08%; (c) 3.96%

中硅酸盐几乎不含镁。因此,对于高碱度含钛烧结矿中的镁主要以分布于烧结矿中复合铁酸钙相中;进一步提高烧结矿中镁的质量分数,烧结矿的磁铁矿相比比例将增加,有一部分镁固溶于磁铁矿中;在高镁烧结矿中,也会形成一定量的橄榄石,其中固溶有少量镁、钛等元素。

2.3 MgO 对含钛烧结矿软化熔滴性能的影响

炉料的软熔性能影响对于高炉顺行,特别是高炉的透气性和软熔带结构及整个炉况的影响非常大,是评价铁矿石的重要参考指标之一。烧结矿软化熔滴性能试验,是荷重条件下模拟烧结矿在高炉还原气氛下的软化、熔融、滴落的过程。试验主要测试指标有软化开始温度、熔融开始温度、滴落温度等,这几个指标与高炉生产有直接关系。表 5 是试验所涉及部分符号及其意义^[17]。

表 5 熔滴实验标准参数及其意义

Table 5 Standard parameters of the softening-melting test under load

参数	意义
$t_{10}/^{\circ}\text{C}$	软化开始温度,试样软化收缩 10% 的温度
$t_{40}/^{\circ}\text{C}$	软化终了温度,试样软化收缩 40% 的温度
$\Delta t_A/^{\circ}\text{C}$	软化区间($t_{40} - t_{10}$)
$t_s/^{\circ}\text{C}$	压差陡升温度
$t_d/^{\circ}\text{C}$	滴落温度
$\Delta t_B/^{\circ}\text{C}$	熔融区间($t_d - t_s$)

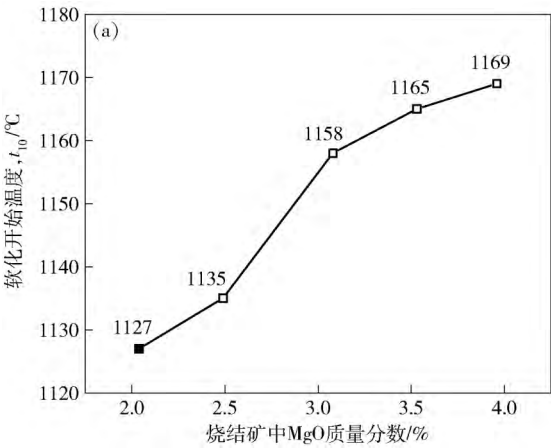


图 6 为不同 MgO 质量分数条件下含钛烧结矿软熔过程中软化开始温度 t_{10} 和软化终了温度 t_{40} 的变化曲线。从图 6 中可以看出,各组烧结矿的软化开始温度 t_{10} 均在 1120 $^{\circ}\text{C}$ 以上,与普通烧结矿相比,其软化开始温度较高,这与烧结矿中 MgO 质量分数增加及烧结矿含有一定的 TiO_2 有直接关系。随着烧结矿中 MgO 质量分数的增加,烧结矿中出现了含镁磁铁矿、钙镁橄榄石等高熔点矿物,这些高熔点物质的存在,使初渣流动困难。当 MgO 质量分数为 2.04% 时,烧结矿的软化开始温度最低 t_{10} 为 1127 $^{\circ}\text{C}$,其软化温度相对较低的原因是其配料过程为自然 MgO 含量较低,烧结矿还原性能较好,在进入高温区时大部分 Fe_2O_3 被还原成 FeO,且部分 FeO 被还原成金属铁,FeO 会与脉石矿物生成低熔点化合物,如正硅酸铁或钙铁橄榄石(熔点为 1100 ~ 1200 $^{\circ}\text{C}$),形成液相,从而使烧结矿软化开始温度 t_{10} 降低;当 MgO 质量分数为 3.96% 时,烧结矿软化开始温度最高($t_{10} = 1169^{\circ}\text{C}$),通过对比可以发现烧结矿的软化开始温度 t_{10} 与烧结矿的还原度指数(表 3)之间存在明显的负相关关系,高 MgO 烧结矿含有相对较多的难还原钙镁橄榄石等矿物,且容易与磁铁矿、铁酸钙形成熔蚀交织结构,使烧结矿更致密,造成烧结矿还原性变差,不利于低熔点钙铁橄榄石的形成。

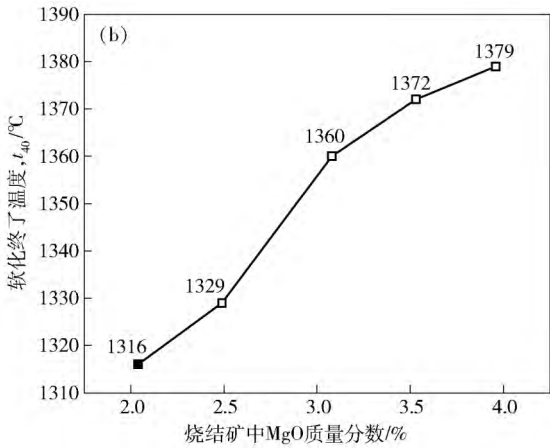
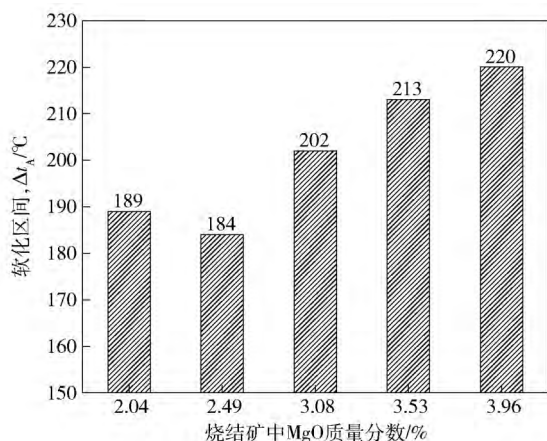


图 6 不同 MgO 质量分数的各组烧结矿的软化开始温度 t_{10} (a) 和软化终了温度 t_{40} (b) 比较

Fig. 6 Comparison of initial softening temperatures t_{10} (a) and the finished softening temperatures t_{40} (b) of sinter with different MgO contents

不同 MgO 质量分数时烧结矿的软化温度区间 Δt_A 变化如图 7 所示。随着烧结矿中 MgO 质量分数的增加,烧结矿的软化区间从 189 $^{\circ}\text{C}$ 增加到 220 $^{\circ}\text{C}$ 。当 MgO 质量分数为 3.96% 时,烧结矿的软化区间达到最大, Δt_A 为 220 $^{\circ}\text{C}$ 。对高炉冶炼钒钛磁铁矿而言,在一定的范围内,软化区间适当变宽有利于改善气-固相还原反应的动力学条件,可以促进钒钛矿

的还原,有利于保持炉况的稳定,降低焦比^[14]。实验过程中,各组烧结矿在 1550 $^{\circ}\text{C}$ 内均未发生滴落。这主要是因为,一方面烧结矿中 MgO 含量增加,烧结矿中温还原性变差,造成含 MgO 的高熔点物质增多,如镁黄长石、钙镁橄榄石和镁硅钙石等,恶化了初渣流动性,因此软化开始温度、软化终了温度、软化区间均有所增高。

图7 各组烧结矿的软化温度区间 Δt_A Fig. 7 Softening temperature Δt_A of sinter with different MgO contents

3 结论

(1) 烧结矿主要由赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙、镁尖晶石、硅酸盐液相和钙钛矿组成。当 MgO 质量分数为 2.04% 时, 烧结矿中含有较多的赤铁矿和复合铁酸钙, 进一步提高烧结矿中 MgO 含量, 烧结矿中不规则的孔洞有所增加, 赤铁矿和复合铁酸钙的含量有所降低, 硅酸盐聚集区域增加, 磁铁矿将硅酸盐矿物包裹。

(2) 高碱度含钛烧结矿中的镁主要分布于烧结矿中复合铁酸钙相中; 进一步提高烧结矿中镁的质量分数, 烧结矿的磁铁矿相比比例将增加, 有一部分镁固溶于磁铁矿中; 在高镁烧结矿中, 也会形成一定量的橄榄石, 其中固溶有少量镁、钛等元素。

(3) 各组烧结矿的软化开始温度 t_{10} 均在 1120 °C 以上, 与普通烧结矿相比, 其软化开始温度较高, 这与烧结矿中 MgO 质量分数增加及烧结矿含有一定的 TiO_2 有直接关系, 当 MgO 质量分数为 2.04% 时, 烧结矿的软化开始温度最低, t_{10} 为 1127 °C。随着烧结矿中 MgO 质量分数的增加, 烧结矿的软化区间从 189 °C 增加到 220 °C。当 MgO 质量分数为 3.96% 时, 烧结矿的软化区间达到最大, Δt_A 为 220 °C。综合考虑烧结矿冷强度 and 冶金性能, 当 MgO 质量分数为 2.04% 时, 能够获得转鼓强度高、冶金性能好的优质的烧结矿。

参 考 文 献

[1] Jiang D J, Lin Q G, He M G, et al. Industrial experimentation on influence of MgO on sinter and BF slag smelting properties and technical parameters. *China Metall*, 2010, 20(1): 35
(蒋大军, 林千谷, 何木光, 等. MgO 对烧结矿与高炉渣冶炼

性能及工艺参数影响的试验. *中国冶金*, 2010, 20(1): 35)

[2] Umadevi T, Nelson K, Mahapatra P C, et al. Influence of magnesia on iron ore sinter properties and productivity. *Ironmaking Steelmaking*, 2009, 36(7): 515

[3] Shi J S, Zhao J J, Pei Y D, et al. Shougang Jingtang natural magnesium sintering research and application // *Proceedings of China Iron Annual Meeting*. Zhengzhou, 2014: 364
(石江山, 赵景军, 裴元东, 等. 首钢京唐自然镁烧结研究及应用 // 2014 年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会. 郑州, 2014: 364)

[4] Wu S L, Han H L, Jiang W Z, et al. MgO interaction mechanism in sinter. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(4): 428
(吴胜利, 韩宏亮, 姜伟忠, 等. 烧结矿中 MgO 作用机理. *北京科技大学学报*, 2009, 31(4): 428)

[5] Jiang X. *Study on Effect of MgO Addition on Sinter Process and Sinter's Metallurgical Property* [Dissertation]. Shenyang: Northeastern University, 2005
(姜鑫. MgO 对烧结工艺及烧结矿冶金性能影响的研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2005)

[6] Yadav U S, Pandey B D, Das B K, et al. Influence of magnesia on sintering characteristics of iron ore. *Ironmaking Steelmaking*, 2002, 29(2): 91

[7] Panigrahy S C, Verstraeten P, Dilewijn J. Influence of MgO addition on mineralogy of iron ore sinter. *Metall Trans B*, 1984, 15(1): 23

[8] Gan Q, He Q, Wen Y C. Study on influence of MgO on mineral composition and metallurgical properties of V-bearing titaniferous magnetite sinter. *Iron Steel*, 2008, 43(8): 7
(甘勤, 何群, 文永才. MgO 对钒钛烧结矿矿物组成及冶金性能影响的研究. *钢铁*, 2008, 43(8): 7)

[9] Gan Q, He Q, Wen Y C. Influence of MgO content on productivity and quality of V-bearing titaniferous magnetite sinter. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2008, 29(1): 54
(甘勤, 何群, 文永才. MgO 对钒钛烧结矿产质量的影响. *钢铁钒钛*, 2008, 29(1): 54)

[10] Zhou M, Yang S T, Jiang T, et al. Transference and influences of MgO in sintering of Cr-bearing vanadium and titanium magnetite. *Chin J Nonferrous Met*, 2014, 24(12): 3108
(周密, 杨松陶, 姜涛, 等. MgO 在含铬型钒钛烧结矿制备中的迁移及作用. *中国有色金属学报*, 2014, 24(12): 3108)

[11] Liu R, Li H W, Li H J, et al. Effect of MgO content on the quality of low-titanium sinter. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2015, 36(3): 73
(刘然, 李红玮, 李豪杰, 等. MgO 含量对低钛烧结矿质量的影响. *钢铁钒钛*, 2015, 36(3): 73)

[12] Li Z M, Liu L N, Duan S, et al. Influence of MgO on structure of vanadium-titanium sinter. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35(3): 69
(李志民, 刘丽娜, 段珊, 等. MgO 对含钛烧结矿矿相结构的影响. *钢铁钒钛*, 2014, 35(3): 69)

[13] Lü Q, Wang F J, Chen S J. Influence of MgO content in sinter on droplet performance of vanadium-titanium burden. *J Iron Steel Res*, 2016, 28(9): 24

- (吕庆,王福佳,陈树军. 烧结矿 MgO 含量对含钒钛炉料熔滴性能影响. 钢铁研究学报, 2016, 28(9): 24)
- [14] Chen L J. *Optimization on Softening-Dripping Behaviors of Blast Furnace Comprehensive Burdens for Vanadium-Titanium Magnetite Smelting* [Dissertation]. Shenyang: Northeastern University, 2014
- (陈立杰. 高炉冶炼钒钛磁铁矿综合炉料熔滴性能优化研究 [学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2014)
- [15] Jin M F, Li G S, Chu M S, et al. Diffusion between MgO and hematite during sintering. *Iron Steel*, 2008, 43(3): 10
- (金明芳,李光森,储满生,等. 烧结过程中 MgO 在赤铁矿中的扩散行为的研究. 钢铁, 2008, 43(3): 10)
- [16] Ren Y F, Jiang L Y, Wang S T. The existing state of MgO and its effect on the properties of iron ore agglomerates. *J Beijing Univ Iron Steel Technol*, 1983(4): 1
- (任允芙,蒋烈英,王树同. MgO 在人造富矿中的赋存状态及作用. 北京钢铁学院学报, 1983(4): 1)
- [17] Wang Z, Zhang J L, Zuo H B, et al. Influence of Al_2O_3 content on softening-melting property of high basicity sinter. *Iron Steel*, 2015, 50(7): 20
- (王喆,张建良,左海滨,等. Al_2O_3 质量分数对高碱度烧结矿软熔滴落性能影响. 钢铁, 2015, 50(7): 20)