钢铁冶金与材料

烧结过程中铁矿粉粒度组成对适宜黏结相量的影响

范欣生[1,2], 都　昱[1,2], 郭兴敏[1,2*]

（1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083）

摘　要: 铁酸钙是高碱度烧结矿的主要黏结相, 其生成量与烧结矿质量有着密切关系, 而适宜的黏结相量也是烧结过程中节能降碳的一个重要因素。以铁酸一钙(CF)为初始黏结相, 用赤铁矿(Fe_2O_3)模拟铁矿粉, 研究铁矿粉粒度组成对烧结中适宜的黏结相量的影响。结果表明, 随着铁矿粉粒级的增加, 获得同一抗压强度时烧结试样所需的黏结相量增加。相同粒度范围下, 随着 CF 含量增加, 抗压强度呈先增大后减小的变化趋势, 其最大值对应于该粒度下适宜的黏结相量。不同粒级范围下, 随着 Fe_2O_3 粒级的增加, 最大抗压强度呈下降趋势。同时, 适宜黏结相量向增加方向偏移。试验还发现, CF 与 Fe_2O_3 反应有低熔点液相—高铁铁酸钙($Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$)生成, 增加了烧结中黏结相量。新相 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 的生成随着 CF 含量增加和 Fe_2O_3 粒级减小而增加, 揭示了初始黏结相与实际黏结相生成量的关系。

关键词: 烧结矿; 铁矿粉; 粒度; 黏结相; 铁酸一钙; 抗压强度

中图分类号: TF046　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2023)06−0117−09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.06.017　　**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 particle size composition of iron ore fines on the suitable amount of bonding phase in sintering process

Fan Xinsheng[1,2], Du Yu[1,2], Guo Xingmin[1,2*]

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Calcium ferrite is main bonding phase in high-basicity sinter, its formation is closely related to the sinter quality, and the appropriate amount of bonding phase is also an important factor of energy saving and carbon reduction in the sintering process. In this work, mono-calcium ferrite (CF) as an initial bonding phase and pre-sintered hematite (Fe_2O_3) powder as iron ore fines were used to investigate the influence of particle size composition of iron ore fines on the appropriate amount of bonding phase in sintering process. The results show that the amount of bonding phase needed for obtaining the same compressive strength of sintered samples increases with the increase of iron ore fines size. At same particle size range of iron ore fines, the compressive strength increases first and then decreases with in-

收稿日期: 2023−02−01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20175, 51774029)。

作者简介: 范欣生, 1996 年出生, 男, 河北隆化人, 硕士研究生, 研究方向: 烧结, E-mail: xinshengsunny@163.com; *通讯作者: 郭兴敏, 1959 年出生, 男, 博士, 教授, 研究方向: 烧结、传感器、电化学等, E-mail: guoxm@ustb.edu.cn。

crease of CF addition, and its maximum value should be corresponding to the suitable amount of bonding phase. At different particle size range, the maximum compressive strength decreases with increase of iron ore fines size, simultaneous the suitable amount of bonding phase shiftes to the direction of increasing bonding phase amount. Besides, CF reacts with Fe_2O_3 to form a calcium rich-ferrate ($Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$) with the low melting point, increasing the amount of bonding phase in sintering process. The $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ formation as a new phase increases with the increase of CF addition and the decrease of iron ore fines size, which revealed the relationship of amount between actual bonding phase and initial one in sintering process.

Key words: sinter, iron ore fines, particle size, bonding phase, CF, compression strength

0 引言

铁酸钙是高碱度烧结矿的主要黏结相，具有熔化温度低、还原性好、与铁矿粉润湿性好等特点，其生成量对烧结矿的质量有着重要影响[1−5]，直接决定着烧结矿的强度和成品率[6−9]。可以说烧结矿质量好坏很大程度上取决于铁酸钙黏结相的数量[10−12]。黏结相量过少，烧结矿强度较低[13−14]；但是，黏结相量过多，阻碍了气体的扩散和传热，不利于烧结过程，冷凝过程中也易形成大孔薄壁结构，破坏烧结矿的强度[15−16]；特别是数量过多也增加燃料的消耗，提高了生产成本[17−18]。因此，烧结中将黏结相量控制在合理的范围是必要的。

有研究表明，在关于铁酸钙的生成方面，烧结最初在氧化铁表面发生固相反应形成 $CaO·Fe_2O_3$(CF)，随着温度升高，CF 熔化，吸收少量的 SiO_2 和 Al_2O_3，增加黏结相量，结晶时生成了复合铁酸钙 SFCA[19]。Scarlett 等[20−21] 通过原位 X 射线衍射技术发现复合铁酸钙生成之前主要是二元铁酸钙，添加 Al_2O_3 可以降低铁酸钙的开始生成温度。李光森等[22] 研究了黏结相的熔化特性随组成的变化规律。刘然等[23] 研究了中钛型钒钛烧结矿液相量的影响因素，发现提高碱度有利于 Fe_2O_3 和 CaO 反应，促进了铁酸钙的生成。以上都表明 CF 是铁矿粉烧结生产高碱度烧结矿的初始黏结相[24−29]。

铁矿粉是烧结原料，它具有一定粒度，与 CF 接触面积大小直接影响低熔点黏结相生成动力学条件，但是这方面研究很少有报道。特别是由于影响烧结中黏结相量的因素非常复杂，在不同条件下的适宜黏结相量的研究更是少之又少。

笔者选用赤铁矿作为铁矿粉，CF 作为初始黏结相进行烧结试验，利用光学显微镜、XRD、SEM-EDS 观察和抗压强度测试，并结合 Image-Pro Plus 6.0(IPP 6.0)软件对试样断面进行黏结相定量，研究了不同粒级 Fe_2O_3 与不同量 CF 对黏结相量的影响规律，建立了烧结试样抗压强度与黏结相量的关系，得到不同粒度组成铁矿粉烧结中适宜的黏结相量，为改善烧结矿质量和烧结节能降耗提供理论指导。

1 试验方法

1.1 试验原料

采用纯化学试剂，包括分析纯的 Fe_2O_3(>99.0%，国药集团化学试剂有限公司)和 $CaCO_3$(>99.0%，国药集团化学试剂有限公司)。其中，由于 CaO 易吸水易导致称量误差，用等摩尔 $CaCO_3$ 代替 CaO。

1.2 试样制备

1)CF 制备

首先，把 Fe_2O_3 和 $CaCO_3$ 按摩尔配比 1∶1 混匀，在 5 MPa 下压制成Ø40 mm×5 mm 圆饼，放入铂金坩埚，置于高温管式炉内，在空气气氛下 1 200 ℃烧结 8 h，自然冷却。后经破碎、混匀再压块，重复烧结。直至经 XRD 确认为单一 CF 相，破碎至粒度≤50 μm 粉末作为初始黏结相使用。

2)赤铁矿粒度分级

赤铁矿(Fe_2O_3)试剂经压样后放入铂金坩埚，置于高温管式炉内，在空气气氛下 1 200 ℃ 预烧 2 h，自然冷却后把赤铁矿平均分成四份，分别利用粉碎机粗破后再用震动筛反复筛分，直至每份全部透过标准筛为一个粒级，粒度选取为≤0.15 mm，≤0.30 mm，≤0.60 mm 和≤0.90 mm 四个粒级。

尽管实际烧结过程中铁矿粉粒度大于试验中所选粒级范围，但 CF 粒度为≤50 μm，根据相似原理可知是有可比性的。预试验表明，烧结后仍有 40%左右赤铁矿以固相残留，与烧结矿结构是相近的。

1.3　试验步骤

每个粒级赤铁矿粉中加入不同量 CF, 试样混合组成, 如表 1 所示。对混匀后的每组试样平均分成 4 等份, 每份为 1.0 g 进行压块, 在压力 5 MPa、成型时间 1 min 条件下, 压制成Ø8 mm×5 mm 圆饼, 放入铂金坩埚内, 置于高温管式炉内, 空气气氛下 1 250 ℃ 烧结 10 min, 自然冷却。

表 1　试样的混合组成
Table 1　Mixed compositions of samples

试样	成分组成/g		w(CF)/%	w(Fe_2O_3)/%
	CF	Fe_2O_3		
1	0.00	4.00	0	100
2	0.20	3.80	5	95
3	0.40	3.60	10	90
4	0.60	3.40	15	85
5	0.80	3.20	20	80
6	1.20	2.80	30	70
7	1.60	2.40	40	60
8	2.00	2.00	50	50

试验后, 选取一个圆饼破碎至小块, 一部分通过玛瑙研钵研磨至粒度≤50 μm, 利用 X 射线衍射仪确定其物相组成。衍射仪的辐射源采用 Cu-Kα, 并附有石墨单色器, 采用连续扫描方式, 扫描范围 10° ~ 90°, 扫描速度为 10°/min。另一部分, 随机选取 3 个碎块, 用电木粉镶嵌成型、磨样抛光, 通过光学显微镜观察试样断面显微结构, 每个断面拍摄 4 张光学照片, 共计 12 张照片。利用 SEM 观察试样断面结晶形貌, 并用 EDS 验证物相组成。

1.4　黏结相定量

通过 IPP 6.0 对光学照片进行黏结相定量, 全部数值取平均值作为最终结果, IPP 6.0 对试样断面光学照片上黏结相定量流程如图 1 所示。

由于冷却速度较快, 结晶不完善, 黏结相中矿物之间很难区分。借助于光学照片上赤铁矿和孔洞的颜色较为明显, 黏结相定量时, 在 IPP 6.0 软件中计量/尺寸工具栏下, 采用测量元选择面积, 把光学照片上赤铁矿和孔洞的面积分别统计出来, 通过照片总面积减去两者的面积, 得到黏结相的面积。据此计算生成黏结相的面积分数 (φ_B), 如式(1)、(2)。

$$S_B = S_{总} - S_H - S_P \tag{1}$$

$$\varphi_B = \frac{S_B}{S_B + S_H} \times 100\% \tag{2}$$

式中, S_B为黏结相面积; $S_{总}$为照片总面积; S_H为赤铁矿面积; S_P为孔洞面积。

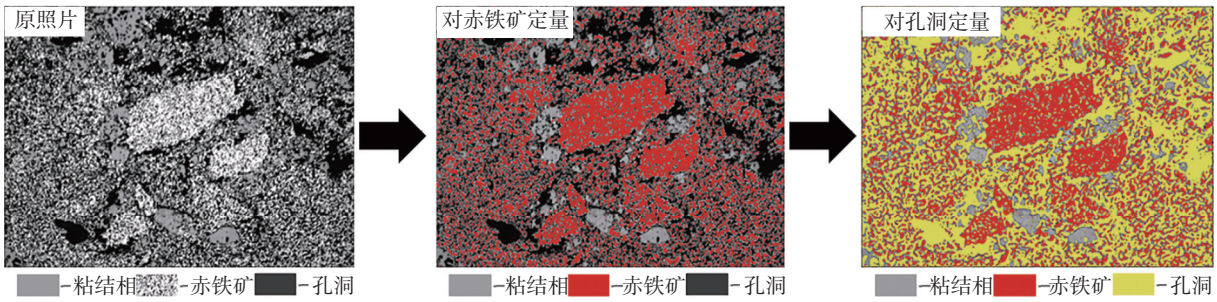


图 1　IPP 6.0 对试样断面光学照片上物相的定量流程
Fig. 1　IPP 6.0 quantitative process of phase on the optical photos of sample cross-section

测量烧结试样中孔隙的平均孔径, 在 IPP 6.0 软件中计量/尺寸工具栏下, 参数选取直径(Diameter)。通过设定标尺让软件计算出每个像素所对应的实际长度尺寸, 再选中矿相照片中所有孔隙进行测量, 软件会自动计算出等积圆直径, 得到每张图片中孔洞的平均孔径, 各照片基础上取平均值。

1.5　抗压强度测定

取表 1 不同粒级中每个组成的三个烧结试样, 在抗压强度试验机上分别进行抗压强度测试, 利用传感器记录烧结试样的承压负荷, 根据测量结果取平均值作为试样的抗压强度。依据每组粒级中试样抗压强度随 CF 添加量的变化, 取最大抗压强度对应的实际黏结相量为该粒级中适宜黏结相量。

2　结果与讨论

2.1　铁矿粉粒级和 CF 加入量对黏结相生成量的影响

图 2 和图 3 分别给出粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉

中加入不同量 CF 在 1 250 ℃ 烧结 10 min 后的矿相照片和生成黏结相量与加入 CF 量关系。可以看出，随着 CF 量增加，烧结试样中生成的黏结相量逐渐增加；实际生成的黏结相量远多于初始加入 CF 量，表明存在赤铁矿与 CF 反应，它促进了黏结相生成。同时也能看出随着 CF 量增多，单位质量促进黏结相生成的趋势φ_B/w(CF) 减小。稍后将通过物相组成来进一步给出产生上述现象的原因。

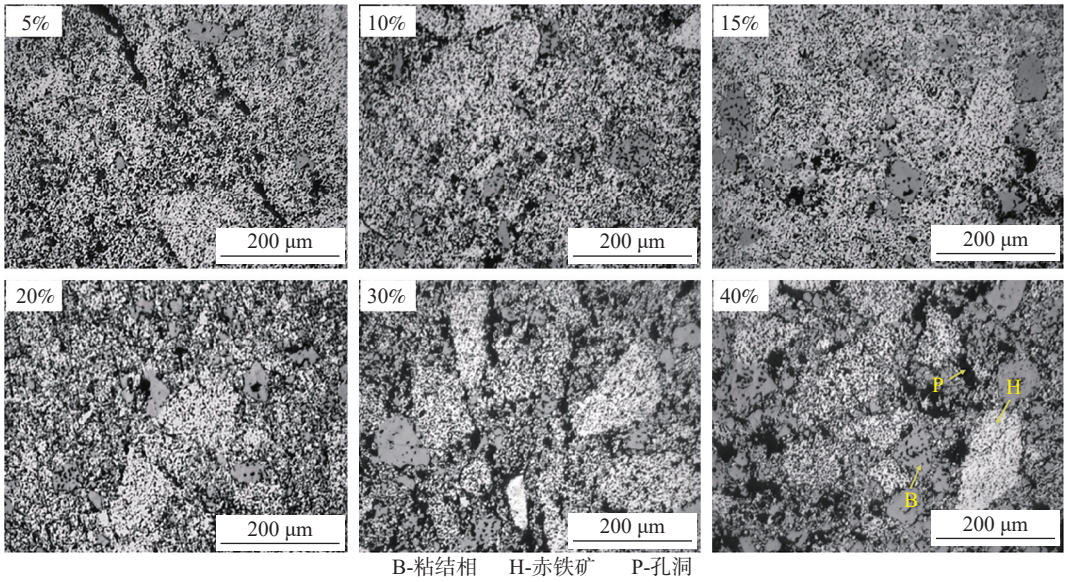


图 2　1 250 ℃ 下粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉加入不同量 CF 烧结 10 min 后试样断面光学形貌

Fig. 2　Optical photos of cross-section of sample where adding different amount of CF into hematite fines with particle size ≤ 0.15 mm after sintering at 1 250 ℃ for 10 min

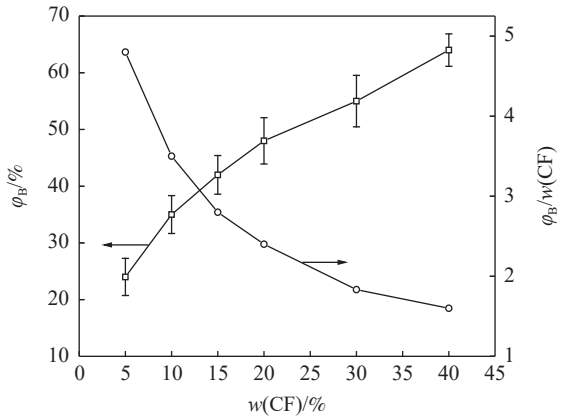


图 3　1 250 ℃ 下烧结 10 min 粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉试样黏结相生成量与加入 CF 量的关系

Fig. 3　Relationship of bonding phase amount with CF added in hematite samples with particle size ≤ 0.15 mm after sintering at 1 250 ℃ for 10 min

为了得到不同粒级铁矿粉对黏结相量生成的影响，仅选取不同粒级赤铁矿粉中分别加入 10% 和 20%CF 后的烧结试样进行试验，结果如图 4 和图 5 所示，可以看出，当加入相同量 CF 时，随着赤铁矿粉粒级增加，生成的黏结相量逐渐减少。同时，随着赤铁矿粉粒级增大，单位质量 CF 促进黏结相生成的趋势φ_B/w(CF) 减小。比较加入 10%CF 和 20%CF 试样，对于相同粒级赤铁矿粉，CF 加入量增加，φ_B/w(CF) 也减小，这与前面的结果（图 3）是一致的。

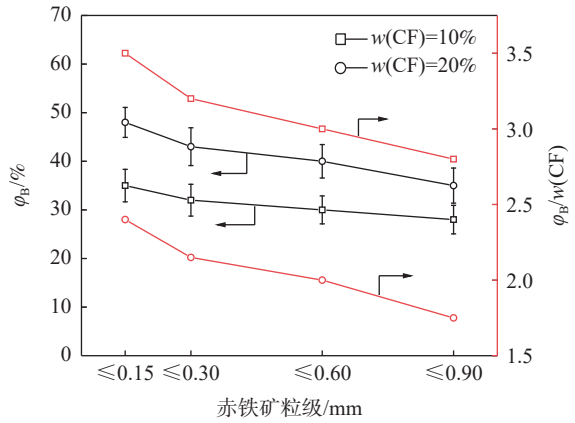


图 4　加入 10% 和 20%CF 不同粒级赤铁矿粉 1 250 ℃ 烧结 10 min 试样黏结相量变化

Fig. 4　Relationship of bonding phase amount of sample with different particle size of hematite fines addition of 10% and 20% CF respectively afrer sintering at 1 250 ℃ for 10 min

2.2　不同粒级铁矿粉烧结所需的适宜黏结相量

不同粒级赤铁矿粉中加入不同量 CF 烧结试样抗压强度变化如图 6 所示。可以看出，在同一粒级，

随着 CF 添加量增加, 抗压强度由低变高, 再由高变低, 出现一个最大值; 不同粒级下, 随着赤铁矿粉粒级增加, 抗压强度下降。但是, 抗压强度最大值随着赤铁矿粉粒级增大向 CF 添加量增多的方向移动, 如图 7 所示。可以看出, 随着赤铁矿粉粒级增加, 所需的适宜黏结相量逐渐增加, 即赤铁矿粉粒级从≤0.15 mm 增到≤0.90 mm, 对应黏结相量从 35% 增到 58%。但是, 尽管黏结相量增加, 抗压强度却降低, 表明从提高烧结强度上讲, 降低赤铁矿粉粒级是有利的。

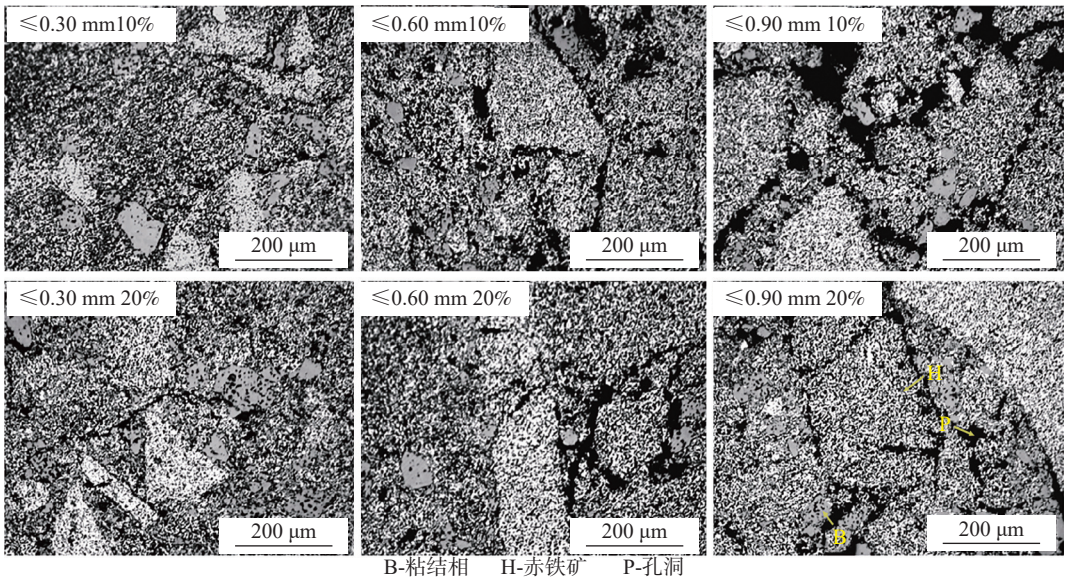


图 5　加入 10% 和 20%CF 不同粒级赤铁矿粉试样 1 250 ℃ 烧结 10 min 的断面光学照片

Fig. 5　Optical photos of cross-section of samples with different particle size hematite fines addition of 10% and 20%CF respectively after sintering at 1 250 ℃ for 10 min

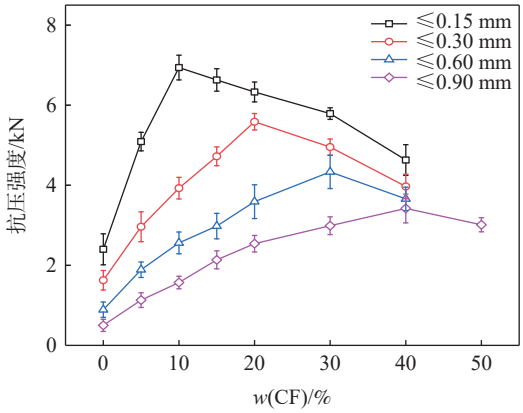


图 6　1 250 ℃ 烧结 10 min 后不同粒级赤铁矿粉中加入不同量 CF 烧结试样的抗压强度变化

Fig. 6　Variation curve of compressive strength of sintered samples with different amount of CF in different particle size of hematite fines

图 8 给出粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉中加入不同量 CF, 在 1 250 ℃ 烧结 10 min 后试样内平均孔径变化, 与图 6 比较, 抗压强度与试样内孔径有很好的对应关系, 即随着孔径增大强度降低。因此, 推测出抗压强度大小与黏结相充填矿粉空隙有关。同样地, 1 250 ℃ 烧结 10 min 后不同粒级赤铁矿粉中不加 CF 烧结试样的断面光学照片和抗压强度、平均孔径分别如图 9 和图 10 所示, 证实了以上推测, 粒级大的赤铁矿粉“先天”具有较大的孔径, 导致抗压强度较低。也是由于较大的孔径, 充填孔隙需要较多黏结相, 而 CF 在赤铁矿粉中是均匀的, 使局部大孔处黏结相不足。在同一粒级下, 随着黏结相量的增加, 赤铁矿粉孔隙得到充填, 烧结试样的抗压强度得到改善, 逐渐增强。但是, 当黏结相的量达到某极限时, 一方面烧结试样中黏结相的自身强度不及赤铁矿[30]; 另一方面, 黏结相量过多会导致黏度下降, 流动性变好, 冷却过程中发生冷凝收缩形成大孔薄壁结构[31], 故烧结矿的抗压强度开始下降。在不同粒级下, 随着赤铁矿粉粒级的增大, 比表面积降低, 颗粒之间接触面积相对减少, 一方面形成的较大孔隙自身没有被 CF 填充好; 再者黏结相冷凝收缩时难以均匀。因此, 烧结试样的抗压强度随着赤铁矿粉粒级的增加而逐渐降低, 需要更多的黏结相来维持足够的强度, 因此抗压强度的峰值随着赤铁矿粉粒级的增大逐渐向 CF 量增加的方向偏移。

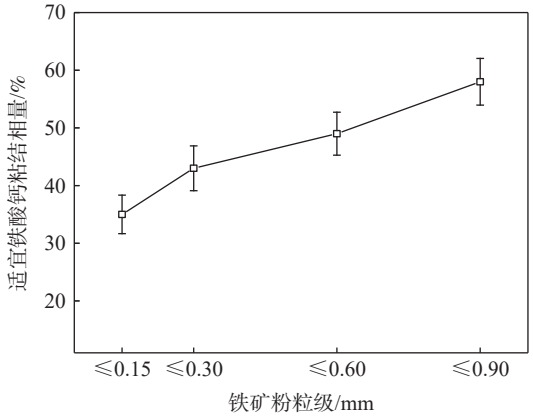


图 7　不同粒级赤铁矿粉试样 1 250 ℃ 烧结 10 min 对应的适宜黏结相量变化

Fig. 7　Relationship of suitable amount of bonding phase with particle size of hematite fines in sample sintered at 1 250 ℃ for 10 min

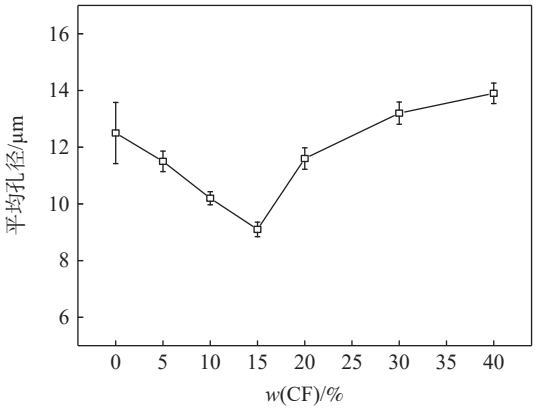
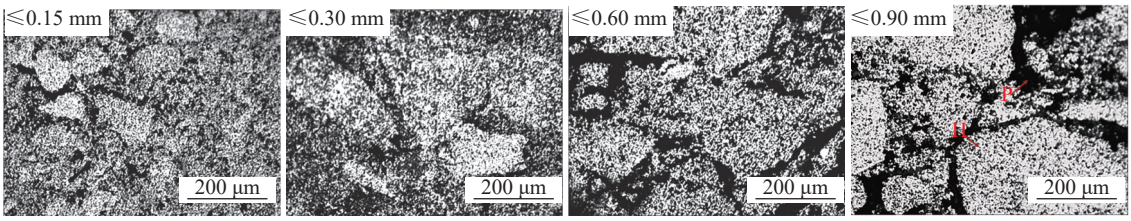


图 8　粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉中加入不同量 CF 在 1 250 ℃ 烧结 10 min 后试样内平均孔径变化

Fig. 8　Relationship of average pore diameter with different amounts of CF in samples with particle size ≤ 0.15 mm hematite after sintered at 1 250 ℃ for 10 min



H-赤铁矿　P-孔洞

图 9　1 250 ℃ 烧结 10 min 后不同粒级赤铁矿粉中不加 CF 试样的断面光学照片

Fig. 9　Optical photo of cross-section of samples with different particle size of hematite fines without CF after sintered at 1 250 ℃ for 10 min

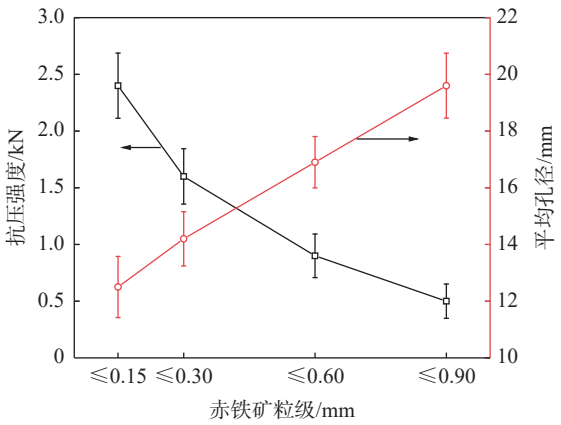


图 10　1 250 ℃ 烧结 10 min 后不同粒级 Fe_2O_3 中不加 CF 试样的抗压强度和平均孔径关系

Fig. 10　Relationship of compressive strength with average pore diameter in samples with different particle sizes of hematite fines without CF after sintered at 1 250 ℃ for 10 min

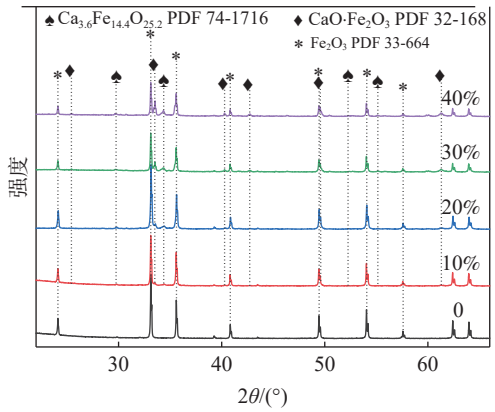


图 11　粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉加入不同 CF 量在 1 250 ℃ 烧结 10 min 试样 XRD 谱

Fig. 11　XRD pattern of samples with particle size ≤ 0.15 mm hematite fines with different amounts of CF after sintered at 1 250 ℃ for 10 min

2.3　物相组成的变化

粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉加入不同量 CF 在 1 250 ℃ 烧结 10 min 试样 XRD 图谱如图 11 所示。

可以看出，Fe_2O_3 与 CF 反应生成一种新的铁酸钙-高铁铁酸钙（$Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$），当 CF 从 0 增到 40% 时，$Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 生成量随着 CF 量增加而增加，CF 的衍射峰逐渐增强，Fe_2O_3 衍射峰逐渐减弱。

不同粒级赤铁矿粉加入 20% CF 试样, 经 1 250 ℃烧结 10 min 后的 XRD 图谱如图 12 所示。可以看出, $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 生成量还与铁矿粉粒级有关, 在加入相同量 CF 时, 随着粒级减小而增加。以上反应包含式(3)。

$$CF + Fe_2O_3 \rightarrow Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2} \quad (3)$$

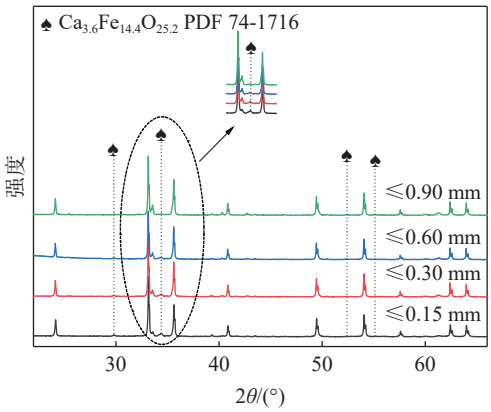


图 12　不同粒级赤铁矿粉中加入 20% CF 试样 1 250 ℃烧结 10 min 后 XRD 谱

Fig. 12　XRD pattern of samples with different particle size hematite fines and 20% CF after sintered at 1 250 ℃ for 10 min

从动力学上, 赤铁矿粉量充足, 随着 CF 量增加, 有更多的 Fe_2O_3 参与反应生成 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$。同时, 粒级越小, 比表面积越大, 越容易与 CF 接触, 有利于 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 生成。综上所述, 烧结试样中生成的黏结相量远多于初始加入 CF 量, 主要是 Fe_2O_3 与 CF 反应增加了低熔点黏结相 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 量。

为了进一步了解 CF、$Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 和赤铁矿在烧结后试样内几何形态, 对 1 250 ℃烧结 10 min 后粒级≤0.15 mm Fe_2O_3 中加入 10%CF 和 20%CF 试样断面进行 SEM 观察及能谱分析, 结果如图 13 所示。赤铁矿比铁酸钙电子反射像稍亮一些, 但是 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 和 CF 很难区分, 仅把 EDS 分析结果列于表 2。可以看出, CF 和 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 充填在赤铁矿颗粒之间, 矿物组成与图 11 中试样 XRD 结果一致。赤铁矿粉呈球形颗粒, 而 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 和 CF 结晶形貌均为灰色熔蚀状, 由于冷却速度较快, 结晶不完善, 晶界也不明显。$Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 存在于赤铁矿与 CF 之间, 还有部分 CF 没有反应, $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 和 CF 共同成为烧结试样的黏结相。

在铁矿粉烧结的实际过程中铁酸钙黏结量是含 SiO_2 和 Al_2O_3 的, 但随着不同元素的加入, 研究内容也会变得更加复杂。本工作是对铁矿粉粒度组成对适宜黏结相量影响的初步研究, 后续将进一步做含 SiO_2 和 Al_2O_3 铁矿粉烧结的探索。

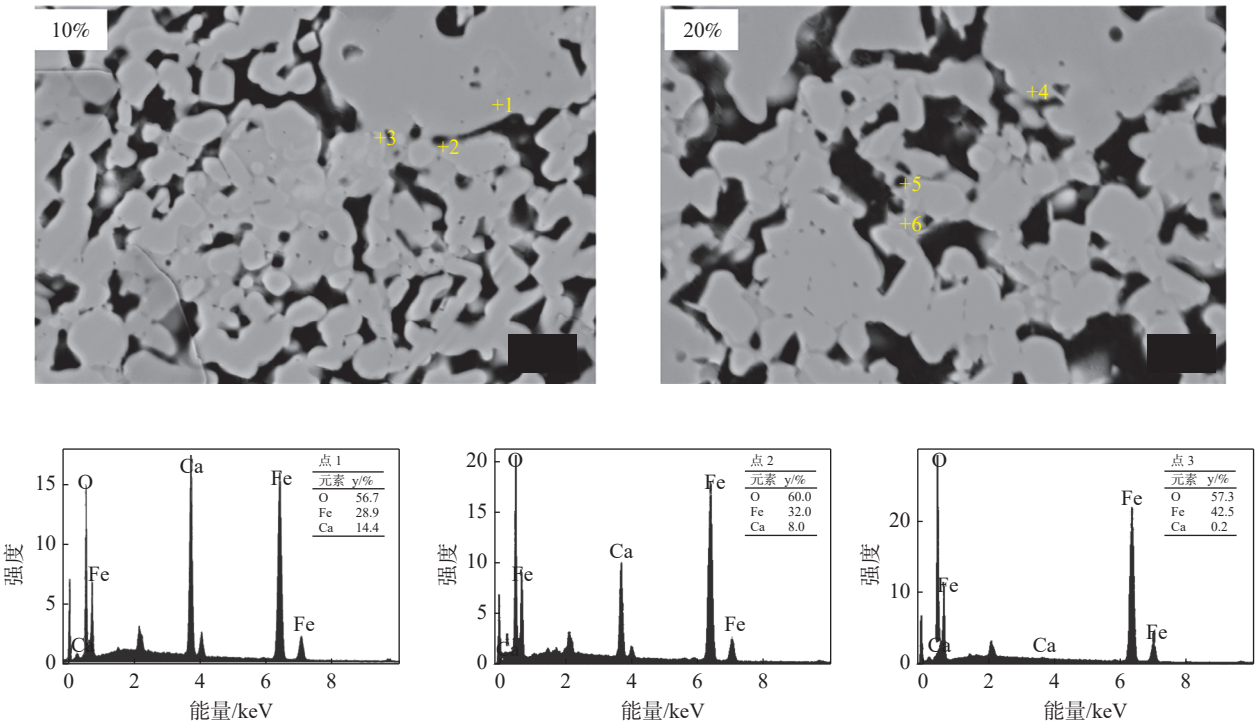


图 13　粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉中加入不同量 CF 在 1 250 ℃烧结 10 min 试样断面的 SEM 形貌及能谱

Fig. 13　SEM photos and EDS images of samples of ≤ 0.15 mm hematite fines with different amounts of CF after sintered at 1 250 ℃ for 10 min

表 2 粒级≤0.15 mm 赤铁矿粉中加入不同量 CF 烧结试样断面 EDS 分析结果

Table 2 EDS result of cross-section of sintered sample of ≤0.15 mm hematite fines with different amounts of CF

w(CF)/%	位置	元素含量(y/%)			物相
		Fe	Ca	O	
10	P_1	28.9	14.4	56.7	CF
	P_2	32.0	8.0	60.0	$Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$
	P_3	42.5	0.2	57.3	Fe_2O_3
20	P_4	27.9	14.1	58.0	CF
	P_5	32.5	7.6	59.9	$Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$
	P_6	41.8	0.2	58.0	Fe_2O_3

3 结论

选用赤铁矿作为铁矿粉，CF 作为初始黏结相进行烧结试验，利用光学显微镜、XRD、SEM-EDS 观察和抗压强度测试，并结合 IPP 6.0 软件对试样断面进行黏结相定量，研究了不同粒级赤铁矿与不同量 CF 对黏结相生成量的影响规律，得到如下结论：

1）随着铁矿粉粒级的增加，烧结试样所需的适宜黏结相量逐渐增加，赤铁矿粉粒级从≤0.15 mm 增加到≤0.90 mm 时，对应适宜黏结相量从 35% 增到 58%，即保证相同强度所需要的黏结相量增加。

2）随着 CF 含量增加，抗压强度呈先增大再减小的变化，存在一个强度最大值。结果表明，最大值与烧结试样内孔径大小有关，揭示了随着黏结相在赤铁矿粉颗粒间充填量增加，抗压强度增大；但随着黏结相量增多，黏度降低，产生薄壁大气孔，抗压强度减小。

3）1 250 ℃ 烧结 10 min 下，CF 与 Fe_2O_3 反应生成 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$，使得烧结试样中生成的黏结相量远大于初始加入的 CF 量。而 $Ca_{3.6}Fe_{14.4}O_{25.2}$ 生成量随着 CF 含量增加和 Fe_2O_3 粒级减小而增多。

参考文献

[1] Long Hongming. Sintering principle and technology of iron ore powder[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 5-9.
（龙红明. 铁矿粉烧结原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 5-9.）

[2] Fan Xiaohui. Principle and technology of optimized ore blending by sintering of iron ore[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 62-72.
（范晓慧. 铁矿烧结优化配矿原理与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 62-72.）

[3] Guo Xingmin. Formation of calcium ferrite during sintering and its mineralogy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999: 59-64.
（郭兴敏. 烧结过程铁酸钙生成及其矿物学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 59-64.）

[4] Mumme W G, Clout J M F, Gable R W. The crystal structure of SFCA-I, $Ca_{3.18}Fe^{3+}_{14.66}Al_{1.34}Fe^{2+}_{0.82}O_{28}$, a homologue of the aenigmatite structure type and new crystal structure refinements of ß-CFF, $Ca_{2.99}Fe^{3+}_{14.30}Fe^{2+}_{0.55}O_{25}$ and Mg-free SFCA, $Ca_{2.45}Fe^{3+}_{9.04}Al_{1.74}Fe^{2+}_{0.16}Si_{0.6}O_{20}$[J]. Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen, 1998, 173(1): 93−117.

[5] Xin R F, Du Y, Guo X M. Effect of alumina on crystallization behavior of calcium ferrite in Fe_2O_3-CaO-SiO_2-Al_2O_3 system[J]. Materials, 2022, 15(15): 5257.

[6] Ding X, Guo X M. The formation process of silico ferrite of calcium (SFC) from binary calcium ferrite[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(4): 1221−1231.

[7] Liu Zhengjian, Wang Jiabao, Zhang Jianliang, *et al*. Status of energy consumption and prospect of consumption reduction technology in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 14(1): 1−14.
（刘征建, 王家保, 张建良, 等. 高炉能耗现状及降耗技术展望[J]. 钢铁研究学报, 2022, 14(1): 1−14.）

[8] Dong J J, Wang G, Gong Y G, *et al*. Effect of high alumina iron ore of gibbsite type on sintering performance[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2014, 42(1): 34−40.

[9] Peng J, Zhang L, Liu L X, *et al*. Relationship between liquid fluidity of iron ore and generated liquid content during sintering[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(1): 538−544.

[10] Lv X W, Bai C G, Deng Q Y, *et al*. Behavior of liquid phase formation during iron ores sintering[J]. ISIJ International, 2022, 51(5): 722−727.

[11] Wu Shengli, Du Jianxin, Ma Hongbin, *et al*. Self-intensity of bonding phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(4): 69−72.
（吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结黏结相自身强度特性[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(4): 69−72.）

[12] Huang Zhucheng, Jiang Yuan, Mao Xiaoming, *et al*. Study on rational distribution of fuel in sintering iron ore[J]. Journal of

Central South University: Natural Science Edition, 2006, (5): 884−890.
(黄柱成, 江源, 毛晓明, 等. 铁矿烧结中燃料合理分布研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2006, (5): 884−890.)

[13] Liu Lina, Han Xiuli. A review on influence of sintering quality[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2006, 28(2): 18−22.
(刘丽娜, 韩秀丽. 影响烧结矿质量的因素[J]. 河北理工学院学报, 2006, 28(2): 18−22.)

[14] Chen Yaoming. Microstructure of sintered pellets[M]. Changsha: Central South University Press, 2011: 69.
(陈耀铭. 烧结球团矿微观结构[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011: 69.)

[15] Zhang Hanquan. Theory and technology of sintered pellets[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2015: 70-75.
(张汉泉. 烧结球团理论与工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 70-75.)

[16] Li Guangsen. Discussion on the influence mechanism of bonding on the strength of sinter and its reasonable components[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 4-6.
(李光森. 黏结相对烧结矿强度的影响机理及其合理组分的探讨[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 4-6.)

[17] Chen Hong, Zhang Meifang. Study on reactivity of iron ore powder[J]. Bao-Steel Technology, 2001, (5): 35−38.
(陈宏, 张美芳. 铁矿粉反应性研究[J]. 宝钢技术, 2001, (5): 35−38.)

[18] Gao Feng. Production practice of high precision powder and low silicon sintering in TISCO[J]. Sintering and Pelletizing, 2004, 29(6): 38−41.
(高峰. 太钢高精粉低硅烧结生产实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(6): 38−41.)

[19] Hida Y, Okazaki J, Itoh K, *et al*. Formation mechanism of acicular calcium ferrite of iron ore sinter[J]. Tetsu-to-Hagane, 1987, 73(15): 1893−1900.

[20] Scarlett N V Y, Madsen I C, Pownceby M I, *et al*. In situ X-ray diffraction analysis of iron ore sinter phases[J]. Journal of Applied Crystallography, 2004, 37(3): 362−368.

[21] Scarlett N V Y, Pownceby M I, Madsen I C, *et al*. Reaction sequences in the formation of silico-ferrites of calcium and aluminum in iron ore sinter[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35B(5): 929−936.

[22] Li Guangsen, Jin Mingfang, Jiang Xin, *et al*. Research on melting characteristics of sinter bonding phase[C]// Proceedings of China Steel Annual Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
(李光森, 金明芳, 姜鑫, 等. 烧结矿黏结相熔化特性的研究[C]//中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2007.)

[23] Liu Ran, Liu Chaoqing, Lü Qing, *et al*. Study on liquid phase generation of vanadium-titanium sinter with moderate titanium content[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2014, 35(5): 72−77.
(刘然, 刘朝卿, 吕庆, 等. 中钛型钒钛烧结矿液相量的研究[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(5): 72−77.)

[24] Cores A, Babich A, Muniz M, *et al*. The influence of different iron ores mixtures composition on the quality of sinter[J]. ISIJ International, 2010, 50(8): 1089−1098.

[25] Webster N A S, Pownceby M I, Madsen I C, *et al*. Effect of oxygen partial pressure on the formation mechanisms of complex Ca-rich ferrites[J]. ISIJ International, 2013, 53(5): 774−781.

[26] Webster N A S, Churchill J G, Tufaile F, *et al*. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminium(SFCA) and SFCA-Ⅰ iron ore sinter bonding phase formation: effects of titanmagnetite-based ironsand and titanium addition[J]. ISIJ International, 2016, 56(10): 1715−1722.

[27] Webster N A S, Pownceby M I, Pattel R. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminium(SFCA) and SFCA-Ⅰ iron ore sinter bonding phase formation: effects of mill scale addition[J]. Power Diffraction, 2017, 32(S2): 85−89.

[28] Ding X, Guo X M, Ma C Y, *et al*. Effect of SiO_2 on the crystal structure stability of SFC at 1473 K (1200 ℃)[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(2): 1147−1153.

[29] Guo H, Guo X M. Effect of aluminum dissolved in hematite on formation of calcium ferrites at 1473 K[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49B: 1974−1984.

[30] Wang Ruying. The study on microhardness of sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 1995, (3): 9−13.
(王如英. 烧结矿显微硬度的研究[J]. 烧结球团, 1995, (3): 9−13.)

[31] Qiao Ruiqing, Du Hegui. Formation mechanism of micropores in low fluoride sinter and its influence on sinter strength[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999, 11(6): 1.
(乔瑞庆, 杜鹤桂. 低氟烧结矿微气孔的形成机理及对烧结矿强度的影响[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(6): 1.)

编辑　杨冬梅