

钢铁冶金与材料

高碱度磁铁矿型烧结矿显微结构特征 及冶金性能研究

韩秀丽¹, 刘磊¹, 陈前冲¹, 张均¹, 白冬冬¹, 赵喆²

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘 要: 采用偏光显微镜对两种高碱度磁铁矿型烧结矿的显微结构进行了定量研究, 并结合冶金性能测试, 探讨了烧结矿显微结构对其冶金性能的影响规律。结果表明, 两种烧结矿(1[#]和2[#])均主要由抗压强度较好的磁铁矿、赤铁矿和铁酸钙等矿物组成, 具有良好且相似的转鼓指数。1[#]烧结矿的显微结构较均匀, 交织熔蚀—熔蚀结构所占比例高达90%以上; 2[#]烧结矿结构相对不均匀, 由65%的交织熔蚀结构、30%的粒状结构组成和5%的骸晶结构等组成; 骸晶状、粒状赤铁矿的大量发育和结构的不均匀性, 致使2[#]烧结矿抗低温还原粉化的能力明显较1[#]烧结矿弱。2[#]烧结矿的还原性却略好于1[#]烧结矿, 这与2[#]烧结矿显微结构以大气孔为主, 且气孔率高达30%有关。

关键词: 高碱度烧结矿; 矿物组成; 交织熔蚀结构; 粒状结构; 低温还原粉化

中图分类号: TF046.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2003)04-0095-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.04.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Research on Microstructural Characteristics and Metallurgical Properties of the High Basicity Sinter Made of Magnetite

Han Xiuli¹, Liu Lei¹, Chen Qianchong¹, Zhang Di¹, Bai Dongdong¹, Zhao Zhe²

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: The microstructures of two kinds of high basicity sinters made of magnetite were studied quantitatively by means of polarization microscope, and their metallurgical properties were tested. The influence of microstructure of sinter on its metallurgical properties was discussed. The results show that both sinters (1[#] and 2[#]) are mainly composed of magnetite, hematite and calcium ferrite with good compressive strength, thus they have good and similar drum index. The sinter 1[#] has the uniform microstructure in which interlaced erosion and erosion structure accounts for more than 90%. The sinter 2[#] has the inhomogeneous microstructure, consisting of 65% interlaced erosion, 30% granular structure and 5% skeletal structure. The sinter 2[#] has obviously lower reduction pulverization index compared with sinter 1[#], since the former has large amount of skeletal and granular hematite and the inhomogeneous microstructure. The reducibility of sinter 2[#] is slightly better than that of sinter 1[#], which is related to the macro-porous structure, as its the porosity is as high as 30%.

Key words: high basicity sinter, mineral composition, interlaced erosion structure, granular structure, low temperature reduction pulverization

收稿日期: 2019-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574105); 河北省钢铁联合基金资助项目(E2016209299)。

作者简介: 韩秀丽(1965—), 女, 河北高阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事工艺矿物学研究, E-mail: hanxl1965@126.com。

通讯作者: 刘磊, 主要从事工艺矿物学研究, E-mail: heutliulei@163.com。

0 引言

低温烧结技术生产的高碱度烧结矿具有粒度均匀、强度高、稳定性好的特点,目前已在我国炼铁生产实践中广泛使用^[1-2]。但是由于国内铁矿石资源紧缺,烧结原料中大量的低品位、高铝、含钛型铁矿石及复合造块技术的引入,高碱度烧结矿质量仍然会存在低温还原粉化严重、还原性差等质量问题^[3-4]。烧结矿的矿物组成和显微结构是影响其质量的重要因素^[5-10],为此,笔者以高碱度磁铁矿型烧结矿为研究对象,从工艺矿物学的角度出发,定量研究烧结矿中矿物的种类、形态、含量、粒度及分布等显微结构特征,探明烧结矿显微结构与其冶金性能的内在联系,旨在为优化烧结矿质量,提高高炉生产效率提供理论依据。

1 试验材料与方法

试验所用烧结矿由河北某钢铁集团公司炼铁厂提供,两种烧结矿均为典型的高碱度磁铁矿型烧结矿,化学成分见表 1。挑选完整且具有代表性的烧结矿试样,沿横切面经切割、研磨、抛光至 0.03 mm,用环氧树脂胶将其粘接于载玻片上制成光薄片,并采用德国蔡司透/反两用 Axioskop A1 pol 研究型偏光显微镜,观察烧结矿试样的显微结构特征。采用 SQZ-25 烧结球团转鼓试验机对烧结矿试样的抗压强度进行测定,执行国家标准为 GB8209—1987;采用 MTLQ-HY-6 铁矿石粉化/还原性能综合测定装置,检测烧结矿试样的还原性和低温还原粉化性能,执行国家标准分别为 GB/T13241—1991 和 GB/T13242—1991。

表 1 烧结矿的化学成分
Table 1 Chemical components of studied sinters

类型	样号	w/%							二元碱度
		TFe	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	
磁铁矿型	1 [#]	56.70	8.51	4.87	10.12	1.91		0.46	2.07
	2 [#]	56.79	8.77	5.41	9.93	2.09	1.81	0.12	1.84

2 试验结果与分析

2.1 高碱度磁铁矿型烧结矿的矿物组成

在偏光显微镜下采用目估法对两种高碱度磁铁矿型烧结矿中矿物的种类、形态、含量及气孔率进行定量分析,结果见表 2。两种高碱度磁铁矿型烧结矿的金属

相均以粒状的磁铁矿和赤铁矿为主,但相比而言,2[#]烧结矿中粒状赤铁矿含量明显较高,且局部还出现了少量的骸晶状。两种烧结矿粘结相含量相当,均由铁酸钙、硅酸二钙和玻璃质组成,但不同之处在于,1[#]烧结矿中钛酸钙呈板柱状而 2[#]烧结矿中钛酸钙主要呈针状。此外,2[#]烧结矿的气孔率明显较高,且多以大气孔为主。

表 2 烧结矿的矿物组成、含量及气孔率
Table 2 Mineral composition, content and porosity of studied sinters

样号	赤铁矿		磁铁矿 粒状	铁酸钙		硅酸二钙 麦粒状	玻璃质 无定形	残余 CaO 浑圆状	气孔率	
	骸晶状	粒状		针状	板柱状				微气孔	大气孔
1 [#]	微量	8~10	35~40	少量	45~50	5~7	少量	1~2	8~10	3~5
2 [#]	1~3	15~17	30~35	35~40	5~7	3~5	1~3	1~2	3~5	25~30

2.2 高碱度磁铁矿型烧结矿的显微结构

烧结矿的显微结构是烧结原料在一定的烧结生产工艺条件下形成的,一方面它记录了生产工艺条件的历史过程,研究它可以推断烧结工艺条件的变化;另一方面显微结构又是烧结矿性能优劣的直接反映,研究它可以进一步改善烧结矿的质量。因此,采用偏光显微镜对两种高碱度磁铁矿型烧结矿中各矿物的结晶形态、粒度及胶结形式等微观结构进行

定量分析。表 3、4 为两种高碱度磁铁矿型烧结矿的显微结构组成及所占比例,图 1、2 为对应的显微结构照片。

两种烧结矿同属于高碱度磁铁矿型,均以典型的交织熔蚀结构为主、赤铁矿粒状结构为辅,矿物种类基本一致,而不同之处主要表现在以下四个方面:

1) 结构均匀度: 1[#]烧结矿显微结构均匀,交织熔蚀—熔蚀结构达到 90%,赤铁矿粒状结构所占比例

不足 10%; 2[#] 烧结矿显微结构相对不均匀, 存在多种显微结构类型, 交织熔蚀结构占 65% 左右, 而赤铁矿粒状结构和骸晶结构等局部其他结构占 35%。

2) 胶结方式: 两种烧结矿的交织熔蚀结构均由

铁酸钙、硅酸二钙及玻璃质胶结主晶相磁铁矿而成。对于赤铁矿粒状结构而言, 1[#] 烧结矿由再结晶晶键相连接, 而 2[#] 烧结矿还存在由少量铁酸钙、玻璃质等胶结而成的赤铁矿粒状结构。

表 3 1[#] 烧结矿显微结构组成及所占比例
Table 3 Microstructure composite and content of sinter 1[#]

样号	局部显微结构及比例	显微结构描述
1 [#]	交织熔蚀结构-60% (图 1a)	磁铁矿(40%~50%, 15~30 μm) 为主要金属相, 他形晶, 期间多被板柱状铁酸钙(45%~50%)、麦粒状硅酸二钙(5%~7%) 和玻璃质(1%~3%) 胶结形成交织熔蚀结构。赤铁矿、硫化物微量出现, 微气孔达 8%~10%
	熔蚀结构-30% (图 1b)	磁铁矿(40%~45%, 15~30 μm) 和赤铁矿(10%~15%, 20~30 μm) 为主要金属相, 两者他形晶出现, 多被板状铁酸钙(30%~40%)、麦粒状硅酸二钙(7%~10%) 和玻璃质(1%~3%) 胶结形成熔蚀结构。微气孔含量 5%~7%, 大气孔含量 3%~5%
	粒状结构-10% (图 1c)	金属相为粒状的赤铁矿(70%~75%, 5~25 μm), 大量以再结晶晶键相连。局部可见含有大量残余 CaO 和少量硅酸二钙。大气孔偏多, 含量达 15%~20%

表 4 2[#] 烧结矿显微结构组成及所占比例
Table 4 Microstructure composite and content of sinter 2[#]

样号	局部显微结构及比例	显微结构描述
2 [#]	交织熔蚀结构 I-60% (图 2a)	磁铁矿(35%~40%, 15~25 μm) 为主要金属相, 他形晶, 期间多被针状铁酸钙(50%~55%)、麦粒状硅酸二钙(3%~5%) 和玻璃质(5%~7%) 胶结形成交织熔蚀结构, 微气孔率 5%~7%, 大气孔 1%~3%
	交织熔蚀结构 II-5% (图 2b)	磁铁矿(45%~55%, 5~15 μm) 为主要金属相, 他形晶, 期间多被板状铁酸钙(35%~45%)、粒状硅酸二钙(7%~10%) 和玻璃质(3%~5%) 胶结形成交织熔蚀结构, 微气孔少量分布
	粒状结构 I-15% (图 2c)	金属相为半自形-他形的赤铁矿(90%~95%, 5~20 μm), 多以再结晶晶键相连。玻璃质(含量<5%) 为主要粘结相, 存在微量铁酸钙、硅酸二钙和残余 CaO, 大气孔偏多(20%~25%), 为较规则的浑圆状
	粒状结构 II-15% (图 2d)	金属相为粒状、卵状赤铁矿(85%~90%, 5~30 μm) 晶粒连接较疏松, 铁酸钙、硅酸二钙(1%~3%) 及残余 CaO(2%) 粒状均匀分布于赤铁矿间, 气孔率达 30%~40%, 多以粗大不规则状出现
	局部其他结构-5% (图 2e、f)	存在少量赤铁矿骸晶结构、树枝状铁酸钙和微量硫化物集中分布

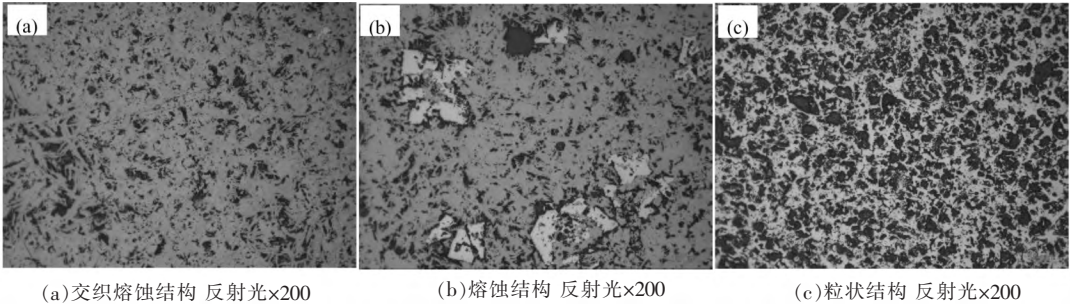
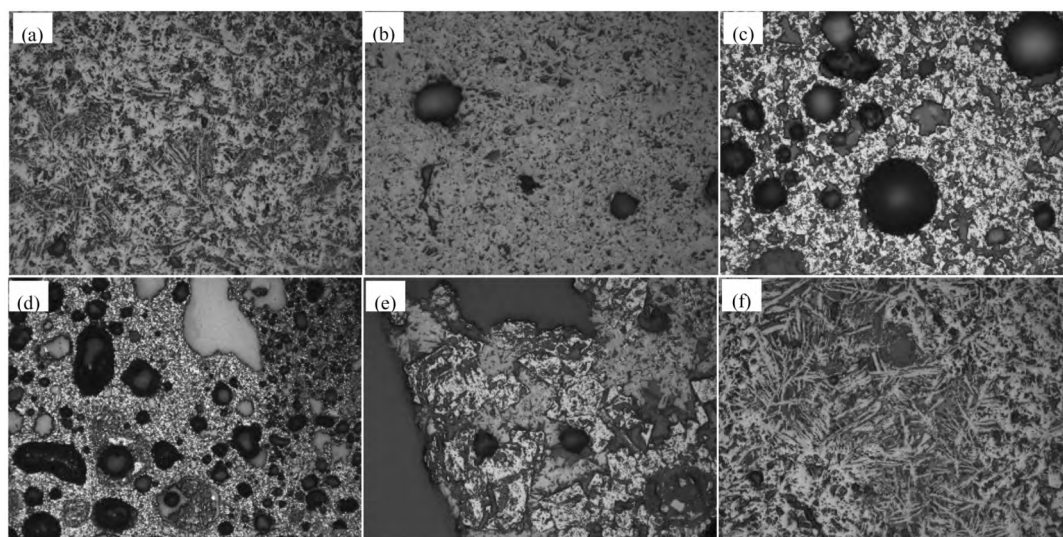


图 1 1[#] 烧结矿显微结构照片
Fig.1 Microstructure of sinter 1[#]

3) 结晶矿物特征: 1[#] 烧结矿中的铁酸钙多呈板柱状, 硅酸二钙多为麦粒状和柳叶状, 赤铁矿以致密粒状为主。而 2[#] 烧结矿中的铁酸钙多为针状、少量板柱状, 硅酸二钙多为他形粒状, 赤铁矿有半自形、粒状、卵状、骸晶状等多种晶形, 且晶粒间连接较为疏松。

4) 气孔裂隙: 1[#] 烧结矿以微气孔为主, 均匀分布

于交织熔蚀结构中, 少量大气孔出现于赤铁矿粒状结构中, 气孔率为 10% 左右。2[#] 烧结矿以不规则大气孔为主, 不均匀分布于赤铁矿粒状结构中, 少量微气孔零散分布于交织熔蚀结构中, 气孔率达 30% 左右。两种烧结矿均未发现较明显的裂隙, 表明两种烧结矿的结构强度均较好。



(a) 交织熔蚀结构 反射光×200; (b) 交织熔蚀结构 反射光×200; (c) 粒状结构 反射光×200 (d) 粒状结构 反射光×50; (e) 骸晶结构 反射光×200; (f) 树枝状铁酸钙 反射光×200

图 2 2[#] 烧结矿显微结构照片

Fig.2 Microstructure of sinter 2[#]

2.3 高碱度磁铁矿型烧结矿的冶金性能

烧结矿的抗压强度、还原性和低温还原粉化性是其重要的三大冶金性能,是衡量烧结矿质量的重要标志。烧结矿中的矿物组成及显微结构对其冶金性能有较大的影响,所以研究改善烧结矿的冶金性能、提高烧结矿的质量,必须与其内部的显微结构特征联系起来。

图 3 展示了两种高碱度磁铁矿型烧结矿的各项冶金性能指标,由图 3 可以看出,1[#]和 2[#]烧结矿转鼓指数相似,而在低温还原粉化和还原性方面存在较大的差别;1[#]烧结矿的还原性指数略低于 2[#]烧结矿,但低温还原粉化指数 ($RDI_{+3.15}$) 却明显较高。

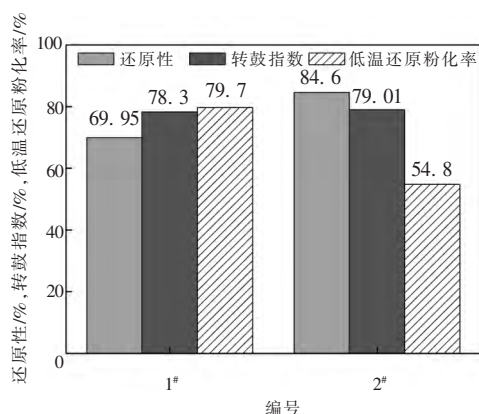


图 3 烧结矿的冶金性能

Fig.3 Metallurgical properties of sinters

结合显微结构特征分析认为,1[#]和 2[#]高碱度烧结矿显微结构都是以赤铁矿、磁铁矿和铁酸钙胶结而成的交织熔蚀结构为主,而这些矿物和交织熔蚀结构本身就表现出良好的抗压强度(见表 5),所以 1[#]和 2[#]烧结矿具有较高的转鼓指数,表现出良好的抗压强度。

表 5 烧结矿中主要矿物的抗压强度、还原性和还原膨胀率^[1]

Table 5 Metallurgical performance index of main minerals in sinter

主要矿物	抗压强度/MPa	还原性/%	还原膨胀率/%
赤铁矿(Fe_2O_3)	2 670	49.9	+20~25
磁铁矿(Fe_3O_4)	3 690	26.7	+4~11
铁酸钙($CaFe_2O_4$)	3 700	40.1	未定

烧结矿还原性主要由气孔率、气孔大小和矿物自身的还原性所决定,烧结矿中主要矿物在 CO 气体中还原性:赤铁矿>铁酸钙>磁铁矿^[1](见表 5)。2[#]烧结矿以大气孔为主,气孔率达 30%左右,并且赤铁矿含量明显比 1[#]烧结矿高,因此还原性优于 1[#]烧结矿。

2[#]烧结矿的低温还原粉化指数明显低于 1[#]烧结矿,说明 2[#]烧结矿抗低温还原粉化的能力较差。究其原因有以下三点:① 2[#]烧结矿中具有 30%的赤铁矿粒状结构,赤铁矿总含量明显高于 1[#]烧结矿,而粒状赤铁矿向磁铁矿还原过程中体积膨胀增加 20%~25%^[1](见表 5),从而可能引起烧结矿的碎

裂粉化。②2[#]烧结矿中局部还出现了赤铁矿的骸晶结构,而骸晶结构往往在还原时比其周围基质的还原膨胀速度快,这样就容易造成烧结矿更大的碎裂粉化。③相比2[#]烧结矿而言,1[#]烧结矿具有均匀的显微结构,交织熔蚀—熔蚀结构所占比例高达90%,这使得烧结矿还原过程中产生的相变应力能够较均匀的释放出来,从而可以有效地抑制还原粉化的发展。

3 结论

1) 性能优良的高碱度磁铁矿型烧结矿,矿物组

成中金属相多以粒状的磁铁矿和赤铁矿为主,黏结相由铁酸钙、硅酸二钙和玻璃质组成;具有较均匀的显微结构,由金属相和黏结相组成的交织熔蚀—熔蚀结构所占比例达90%。

2) 高碱度磁铁矿型烧结矿的还原性主要与其赤铁矿含量和气孔分布有关,赤铁矿含量越小且大气孔越少、气孔率越小,其对应的还原性越差。

3) 高碱度磁铁矿型烧结矿中骸晶状、粒状赤铁矿的大量发育和显微结构的不均匀性,是导致其低温还原粉化严重的主要原因。

参考文献

- [1] Liao Jiyong, He Guoqiang. Progress and development of sintering technologies during the last five years [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(5): 1-11.
(廖继勇, 何国强. 近五年烧结技术的进步与发展 [J]. 烧结球团, 2018, 43(5): 1-11.)
- [2] Wang Xinjiang. Key technology research and engineering practice of sintering equipment [J]. Value Engineering, 2018(17): 129-130.
(王新江. 烧结设备关键技术研究及工程实践 [J]. 价值工程, 2018(17): 129-130.)
- [3] Fan Yaogui. Practice of improving low temperature reduction pulverization property of sinter [J]. Southern Metals, 2017(5): 47-51.
(樊尧桂. 改善烧结矿低温还原粉化性能实践 [J]. 南方金属, 2017(5): 47-51.)
- [4] Han Tao. Microstructure research and practice based of improving reducibility of sinters [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(6): 49-53.
(韩涛. 提升宣钢烧结矿还原性的微结构研究与实践 [J]. 烧结球团, 2018, 43(6): 49-53.)
- [5] Ma Yongguang, Chen Wei, Gao Bingyin. Microstructure research and practice based of improving reducibility of sinters [J]. Henan Metallurgy, 2012, 20(6): 27-29.
(马永广, 陈伟, 高丙寅. 提高烧结矿质量的技术措施 [J]. 河南冶金, 2012, 20(6): 27-29.)
- [6] Deng Ming, Wang Wei, Xu Runsheng. Comparative research on micro-mechanical properties of vanadium-titanium sinter and ordinary sinter [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(2): 104-111.
(邓明, 王伟, 徐润生. 钒钛烧结矿和普通烧结矿显微力学性能对比 [J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(2): 104-111.)
- [7] Liu Lina, Han Xiuli, Liu Lei. Study on texture of sinter with different basicity [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(2): 112-115.
(刘丽娜, 韩秀丽, 刘磊. 不同类型烧结矿随碱度变化的矿相结构研究 [J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(2): 112-115.)
- [8] Bai Dongdong, Han Xiuli, Li Changcun, et al. Influence of mineral structure of vanadium-titanium sinter on its metallurgical properties [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(5): 111-115.
(白冬冬, 韩秀丽, 李昌存, 等. 钒钛烧结矿矿相结构对其冶金性能的影响 [J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(5): 111-115.)
- [9] Wu Qi. Research on related regulation between sinter bond-phase microstructure and sinter quality [D]. Guiyang: Guizhou University, 2008.
(吴奇. 烧结矿粘结相的微观组织结构与烧结矿质量的相关规律研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.)
- [10] Zhang Ce. Influence of mineral composition and microstructure on the sinter quality of Nanjing Steel Co [D]. Shenyang: University of Science and Technology Liaoning, 2016.
(张策. 矿物组成及微观结构对南钢烧结矿质量影响的研究 [D]. 沈阳: 辽宁科技大学, 2016.)
- [11] Ren Yunfu. Petrographic of steel metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982.
(任允芙. 钢铁冶金岩相矿相学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982)