

碱度对石钢烧结矿矿相结构及冶金性能的影响

刘丽娜^{1,2}

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063009; 2. 河北省矿业开发与安全技术实验室, 河北唐山 063009)

摘要:采用偏光显微镜研究了石钢不同碱度烧结矿的矿物组成及显微结构特征, 烧结矿矿相结构与冶金性能之间的关系。研究发现: 随着碱度的升高, 烧结矿矿物组成简单化, 粘结相含量升高, 其中铁酸钙含量增加明显; 显微结构均匀化, 由斑状-粒状结构过渡为交织熔蚀结构, 气孔率升高, 出现骸晶状及菱形定向排列的赤铁矿, 铁酸钙由他形晶形态过渡为针状形态。相应的烧结矿强度、还原性能及低温还原粉化性能有所改善。

关键词:烧结矿; 碱度; 矿物组成; 显微结构; 冶金性能

中图分类号: TF046 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)03-0125-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Influence of basicity on mineralogical microstructure and metallurgical property of sinter in shijiazhuang iron & steel

Liu Lina^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Mining Development and Safety Technology Key Lab of Hebei Province, Tangshan 063009, Hebei, China)

Abstract: The mineralogical compositions and microstructure of sinter with different basicity had been investigated by means of polarization microscope, and the relationship between the mineralogical microstructure and the metallurgical property of sinter had been analyzed. The result shows that when the basicity of the sinter varies from 1.8 to 2.4, the mineral composition of sinter is simple, and the content of the binder phase increases. With the basicity of sinter increased, the microstructure of the sinter is uniform gradually and changes from porphyritic-granular texture to erosion interleaving texture, the content of the pore is elevated, the skeleton crystals hematite appear, the form of calcium ferrite is anhedral to needle-shaped. Consequently the metallurgical property of the sinter is improved.

Key words: sinter, basicity, mineral composition, microstructure, metallurgical

0 引言

石家庄钢铁有限责任公司(石钢)烧结矿存在强度差、低温还原粉化严重等问题, 严重影响了现场高炉顺行, 为此, 提高石钢烧结矿冶金性能是目前亟

待解决的问题^[1-3]。碱度是烧结生产过程中最重要的控制参数, 提高烧结矿的碱度, 可改善烧结过程中的热态透气性, 提高CaO的分散性和均匀性, 增加粘结相尤其铁酸钙的含量, 改善烧结矿冶金性能^[4-5]。而烧结矿矿物组成及显微结构是影响烧结矿冶金性

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1360106, 51574105)。

作者简介: 刘丽娜(1978—), 女, 河北博野人, 副教授, 博士生, 主要从事工艺矿物学研究, E-mail: 43116039@qq.com。

能的根本因素,为此,笔者对比分析石钢不同碱度烧结矿矿相结构特征,探讨烧结矿矿相结构对冶金性能的影响,为改善石钢烧结矿冶金性能提供理论依据。

1 试验方案

试验所用烧结原料取自石钢烧结现场,烧结原料化学成分列于表1。通过调节原料中白灰含量调节烧结矿碱度,其中 $\omega(\text{MgO})=2.3\%$,二元碱度(R_2)分别为1.8、2.1、2.4,烧结矿配矿方案见表2。利用

烧结杯制作不同碱度烧结矿,采用冶金性能测定仪测试烧结矿的转鼓指数、还原性能及低温还原粉化性能。通过对比不同碱度烧结矿冶金性能,选取差异性最大的两个样品 $R_{1.8}$ 、 $R_{2.4}$,利用PQJ-200切割机、SMJ磨片机、SPZ-250抛光机制作光薄片,采用德国蔡司研究型透/反两用偏光显微镜(ZESS Axioskop40)对烧结矿进行矿物组成及显微结构鉴定,分析碱度对烧结矿矿相结构的影响,找出烧结矿冶金性能与矿相结构之间的关系。

表1 原料化学成分
Table 1 Chemical compositions of raw materials

原料	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	烧损
精矿1	64.23	27.95	4.6	0.82	1.11	0.81	0.306	0.016	1.14
精矿2	62.42	25.2	4.77	0.9	4.28	0.48	0.305	0.001	25.2
麦克矿	61.74	1.2	3.05	0.02	0.14	1.74	0.047	0.055	6.2
杨迪矿	57.87	0.5	4.96	0.05	0.13	1.35	0.027	0.035	10.06
澳矿	62.3	0.45	5.01	0.25	4.4	1.92	0.037	0.068	3.02
巴西矿	65.85	0.5	2.37	0.02	0.14	0.98	0.02	0.026	1.87
白灰			6.22	71.9	1.55				12.2
高镁粉			7.51	1.85	80.9				7.05
煤粉灰分			35.5	5.71	0.42	20.5			

表2 烧结矿配矿方案
Table 2 Mixture of sinter

样号	精矿1	精矿2	麦克矿	杨迪矿	澳矿	巴西矿	白灰	高镁粉	煤粉灰分	返矿
R1.8	4.62	1.00	1.01	6.56	2.02	5.02	2.65	0.32	1.25	5.55
R2.1	4.51	0.98	0.99	6.40	1.97	4.90	3.14	0.32	1.25	5.56
R2.4	4.40	0.95	0.97	6.24	1.92	4.78	3.64	0.31	1.25	5.56

2 试验结果与分析

2.1 烧结矿冶金性能

不同碱度石钢烧结矿冶金性能见图1。

由图1可以看出,增加碱度,石钢烧结矿的强度、还原性能及低温还原粉化性能均有所改善。为找出碱度对烧结矿冶金性能影响的原因,分析差异性最大的两个样品 $R_{1.8}$ 与 $R_{2.4}$ 烧结矿的矿相结构特征,探讨烧结矿矿相结构与冶金性能之间的关系。

2.2 烧结矿矿相结构

2.2.1 烧结矿矿物组成

碱度为1.8、2.4时石钢烧结矿矿物组成及体积

百分含量列于表3。与碱度为1.8相比,碱度为2.4时烧结矿矿物组成相对简单,金属相为磁铁矿、赤铁矿,未出现富氏体;粘结相为铁酸钙、硅酸二钙、钙镁橄榄石、玻璃质,未出现钙铁橄榄石、黄长石及硅灰石;金属相含量有所降低,其中磁铁矿含量降低明显,而赤铁矿含量略有增加;粘结相含量有所升高,其中铁酸钙含量增加明显,硅酸二钙、钙镁橄榄石及玻璃质均略有降低。

2.2.2 烧结矿显微结构

图2给出了在偏光显微镜下碱度分别为1.8、2.4时具有代表性的烧结矿矿相结构照片。

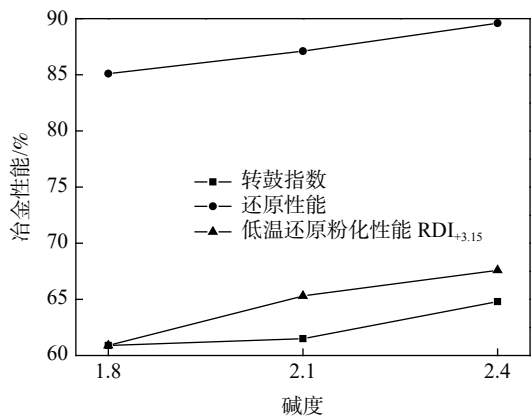


图 1 烧结矿冶金性能

Fig. 1 Metallurgical property of sinter

从图 2a-d 可以看出, 碱度为 1.8 时烧结矿矿相结构分布不均匀, 主要为斑状-粒状结构(图 2a), 部

分熔蚀结构(图 2b)、共晶结构(图 2c)。气孔分布不均匀且多连通, 气孔率为 30% ~ 35%, 裂隙裂纹发育。磁铁矿结晶粒度在 0.01 ~ 0.52 mm, 多呈自形、半自形晶及他形晶, 其间被钙镁橄榄石、硅酸二钙和少量钙铁橄榄石、玻璃质胶结形成斑状-粒状结构; 部分他形晶磁铁矿分布于气孔、矿块边缘被铁酸钙、硅酸二钙和少量玻璃质胶结形成熔蚀结构; 部分磁铁矿呈锥形晶被钙镁橄榄石、硅酸二钙胶结形成共晶结构。赤铁矿多呈他形晶、半自形晶连接成片, 其间被硅酸二钙、钙镁橄榄石胶结形成粒状结构, 局部呈条形分布于气孔边缘。富氏体呈圆点状、树枝状集中分布(图 2d)。硅酸二钙为主要粘结相, 呈他形粒状、针状存在。铁酸钙多呈板柱状、他形晶存在, 局部见细小他形、针状铁酸钙集中分布。钙镁橄榄石主要呈柱状。

表 3 烧结矿矿物组成及体积百分含量
Table 3 Mineral compositions and their volume fraction of sinter

样号	金属相			粘结相						
	磁铁矿	赤铁矿	富氏体	铁酸钙	硅酸二钙	钙镁橄榄石	钙铁橄榄石	玻璃质	黄长石	硅灰石
R _{1.8}	40 ~ 45	25 ~ 30	1 ~ 2	10 ~ 12	12 ~ 15	2 ~ 3	少量	3 ~ 5	少量	少量
R _{2.4}	25 ~ 30	30 ~ 35		25 ~ 30	10 ~ 12	少量		1 ~ 2		

从图 2e ~ f 可以看出, 碱度为 2.4 时烧结矿矿相结构均匀, 为交织熔蚀结构; 气孔率为 35% ~ 40%。磁铁矿多呈他形晶形态, 粒度为 0.005 ~ 0.36 mm, 被铁酸钙及硅酸二钙胶结形成交织熔蚀结构。赤铁矿多呈细小他形晶连接成片, 局部见菱形定向排列及骸晶状赤铁矿。铁酸钙为主要粘结相, 呈针状、板状形态。

碱度为 2.4 时烧结矿显微结构与 1.8 相比, 烧结矿显微结构均匀化, 由斑状-粒状结构过渡到交织熔蚀结构, 气孔率升高了 5%, 但未连通, 且未出现裂隙裂纹。磁铁矿由自形、半自形晶形态过渡为他形晶形态, 赤铁矿变化不大, 但出现了骸晶状及菱形定向排列的赤铁矿。铁酸钙由他形晶形态过渡为针状形态。

2.3 烧结矿相结构对冶金性能的影响

影响烧结矿强度的主要因素有烧结矿矿物组成、显微结构、裂隙裂纹、烧结过程中产生的内应力等^[6]。烧结矿主要矿物的抗压强度及还原度^[7]见表 4。由表 4 可知, 抗压强度由大到小为铁酸一钙 > 磁铁矿 > 赤铁矿 > 铁酸二钙 > 玻璃质。烧结矿矿物组成简单^[8], 显微结构均匀, 金属相含量少且由铁酸一钙胶结形

成的交织熔蚀结构强度较好。而烧结矿矿物组成复杂, 金属相含量多且由玻璃相、硅酸二钙胶结形成的斑状结构强度较差。裂隙裂纹发育, 对烧结矿强度也有不利影响。从烧结矿矿物组成及显微结构分析可知, 碱度为 2.4 与 1.8 相比, 烧结矿矿物组成简单, 粘结相含量较多且主要为铁酸钙, 铁酸钙形态由他形晶向针状转变, 有关研究^[9]表明, 针状铁酸钙为复合铁酸钙, 其强度及还原性能均优于铁酸一钙; 烧结矿显微结构均匀, 为交织熔蚀结构, 气孔间不连通且未出现裂隙裂纹。因此, 随着碱度的增加, 烧结矿的强度得到改善, 这与图 1 的分析结果是一致的。

烧结矿的还原性能是还原性气体扩散到反应界面形成的, 故影响烧结矿还原性的因素有矿物组成、矿物晶粒大小、分布情况、粘结相的多少及气孔率等。由表 4 可知, 烧结矿主要矿物的还原度由大到小为赤铁矿 > 铁酸一钙 > 铁酸二钙 > 磁铁矿 > 玻璃质。烧结矿金属相主要为赤铁矿, 且晶粒细小, 粘结相为铁酸一钙时还原性能较好, 而金属相晶粒粗大, 由难还原的玻璃相胶结时还原性能较差。气孔率含量高, 有助于还有助于还原气体扩散, 改善烧结矿的还原性能。从烧结矿矿物组成及显微结构分析可知, 碱

度为 2.4 时烧结矿相结构与碱度为 1.8 相比,还原性能较好的赤铁矿及针状铁酸钙(复合铁酸钙)含量增加,气孔率升高了 5%。故随碱度的增加,烧结矿

的还原性能有所升高,这与不同碱度烧结矿还原性能的变化规律是一致的。

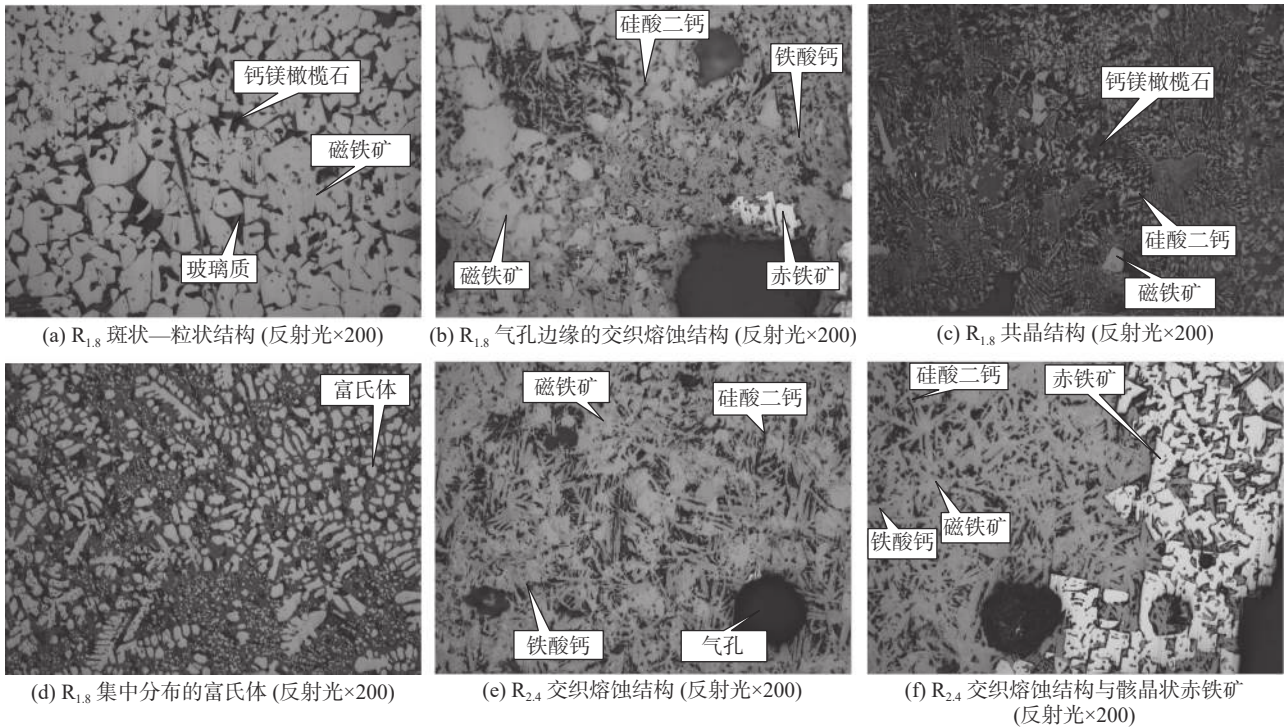


图 2 不同碱度烧结矿显微结构照片

Fig. 2 Microstructure of sinters with different basicity

表 4 烧结矿中主要矿物的抗压强度及还原度^[7]

Table 4 Compressive strength and reducibility of main minerals in sinter

矿物名称	瞬时抗压强度/(kg·mm ⁻²)	还原度/%
赤铁矿	26.7	49.9
磁铁矿	36.9	26.7
玻璃质	4.6	3.1
铁酸一钙	37.0	40.1
铁酸二钙	14.2	28.5

烧结矿的低温还原粉化主要原因是由于低温还原过程中六方晶系 Fe₂O₃ 转化为等轴晶系 Fe₃O₄ 体积增大所致,影响烧结矿低温还原粉化性能的因素有矿石的种类、粒度、气孔率、赤铁矿的结晶形态等^[10]。据有关研究报道,烧结矿中二次赤铁矿是导致 RDI 恶化的主要原因,其中,粒状赤铁矿影响不大,另一种是由烧结熔体中赤铁矿或铁酸钙在高温分解出的磁铁矿在氧化生成或高熔体在降温过程中直接析出的赤铁矿,一般呈骸晶状、菱形,可使烧结矿 RDI 恶化^[11-14]。碱度为 2.4 时石钢烧结矿矿相结

构与碱度为 1.8 相比,局部出现了骸晶状赤铁矿及菱形定向排列赤铁矿,但因其含量很少,对烧结矿低温还原粉化性能影响不大。分析碱度为 2.4 时烧结矿低温还原粉化性能优于碱度为 1.8 时的原因有:①烧结矿中粘结相含量增多,且以还原性及强度较好的复合铁酸钙为主,抵抗还原产生的内应力能力增强;②烧结矿中气孔含量增多,还原过程中产生的内应力集中较差,不易形成粗大的裂纹^[15],也降低了烧结矿的低温还原粉化。

3 结论

1)与碱度 1.8 相比,碱度为 2.4 时烧结矿矿物组成相对简单,未出现富氏体、钙铁橄榄石、黄长石及硅灰石,有利于烧结矿强度及还原性能;粘结相含量升高,其中铁酸钙含量增加明显,对烧结矿冶金性能有利。

2)随碱度的升高,烧结矿显微结构均匀化,由斑状-粒状结构过渡到交织熔蚀结构,其中铁酸钙由他形晶形态过渡为针状形态,可提高烧结矿的冶金性能;气孔率增加,裂隙裂纹降低,有利于烧结矿的强

度及还原性能;出现了骸晶状及菱形定向排列的赤铁矿,对烧结矿低温还原粉化性能有不利影响。

3)随碱度的升高,烧结矿强度、还原性能及低温还原粉化性能得到改善。

参考文献

- [1] Zuo Jingyu, Bai Xiongfei. Discussion about increasing content of MgO in sinter[J]. *Hebei Metallurgy*, 2013, (5): 1-3.
(左静宇,白熊飞. 石钢提高烧结矿中MgO含量探讨[J]. *河北冶金*, 2013, (5): 1-3.)
- [2] Li Jie, Wang Xingjuan, Liu Ran, *et al.* Study of the sintering property of malaysia mines powder at Shijiazhuang iron & steel works[J]. *Journal of Hebei United University Natural Science Edition*, 2011, 33(1): 27-31.
(李杰,王杏娟,刘然,等. 石钢马来西亚粉烧结性能[J]. *河北理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(1): 27-31.)
- [3] Li Jie, Lv Qing. Research about adding malaysia ore powder in ore proportioning of sintering in Shijiazhuang steel[J]. *Hebei Metallurgy*, 2011, (5): 3-6.
(李杰,吕庆. 石钢烧结配加马来西亚粉烧结性能的研究[J]. *河北冶金*, 2011, (5): 3-6.)
- [4] 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.)
- [5] Han Tao. Microstructure research and practice based of improving reducibility of sinter in Xuan steel[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.)
- [6] Liu Ran, Wang Longhao, Yan Zhaozhao, *et al.* Present situation of research on impact of chemical composition on low temperature reduction degradation of sinter[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2018, 43(1): 1-5.
(刘然,王龙浩,严照照,等. 化学成分对烧结矿低温还原粉化影响的研究现状[J]. *烧结球团*, 2018, 43(1): 1-5.)
- [7] Ren Yunfu. Petrographic of steel metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982: 179-202.
(任允芙. 钢铁冶金岩相矿相学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 179-202.)
- [8] Guo Yufeng. Effect of MgO on mineralization mechanism of sinter for inhibiting the low-temperature reduction degradation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
(郭玉峰. MgO抑制烧结矿低温还原粉化的成矿机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.)
- [9] Guo Xingmin, Zhu Li. Mineralogical composition and microstructure of high basicity sinters[J]. *Iron and Steel*, 2007, 42(1): 17-19.
(郭兴敏,朱利. 高碱度烧结矿的矿物组成与矿相结构特征[J]. *钢铁*, 2007, 42(1): 17-19.)
- [10] Li Jian, Mao Xiaoming, Peng Xin. Effect of micro-characteristics on reduction degradation index of sinter[J]. *Iron and Steel*, 2018, 53(8): 15-19.
(李建,毛晓明,彭新. 微观性能对烧结矿低温还原粉化的影响[J]. *钢铁*, 2018, 53(8): 15-19.)
- [11] Pimenta H P, Seshadri V. Influence of Al₂O₃ and TiO₂ on reduction degradation behavior of sinter and hematite at low temperatures[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2002, 29(3): 175-179.
- [12] Panigrahy S C, Verstraeten P, Dilewijns J. Influence of MgO addition on mineralogy of iron ore sinter[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1984, 15B: 23-32.
- [13] Shigaki I, Sawada M, Gennai N. Increase in low-temperature reduction degradation of iron ore sinter due to hematite-alumina solid solution and columnar calcium ferrite[J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1986, 26: 503-511.
- [14] Panigrahy S C, Verstraeten P, Dilewijns J. Effect of MgO addition on strength characteristics of iron ore sinter[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1984, 11: 17-22.
- [15] Guo Yufeng, Guo Xingmin. Effect of MgO on low temperature reduction process of hematite fines sinter[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2017, 29(9): 697-703.
(郭玉峰,郭兴敏. MgO对赤铁矿粉烧结产物低温还原过程的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2017, 29(9): 697-703.)