

二元碱度对印尼钒钛矿烧结过程及 烧结矿质量的影响

高强健, 魏 国, 刘常升, 沈峰满

(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以典型钢铁企业矿石资源为基础, 进行不同碱度条件下配加印尼钒钛矿的烧结试验, 考察了二元碱度($R = m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$)对该矿烧结过程及烧结矿质量的影响. 研究表明: 当碱度 R 由 1.4 逐渐增至 2.3 时, 烧结有效利用系数由 $1.63 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降至 $1.44 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 烧结矿成品率由 78.5% 降至 75.3%; 同时, 垂直烧结速度有所上升; 烧结矿中 $w(\text{FeO})$ 不断下降; 转鼓指数先下降而后逐渐回升, 并在 $R = 1.7$ 时出现最小值. 随着碱度的逐渐增加, 低温还原粉化性能和还原性逐渐改善, 这有利于高炉上部透气性的改善和间接还原的发展.

关 键 词: 碱度; 印尼钒钛矿; 烧结过程; 低温还原粉化性; 还原性

中图分类号: TF 521

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)12-1726-05

Effect of Binary Basicity on Sintering Process and Quality of Indonesia Vanadium Titanium Magnetite

GAO Qiang-jian, WEI Guo, LIU Chang-sheng, SHEN Feng-man

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SHEN Feng-man, E-mail: shenfm@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Basing on raw materials conditions of typical iron and steel plant, the sintering experiments were carried out for the Indonesia vanadium titanium magnetite under different basicity and the effect of binary basicity ($R = m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$) on the sintering process and sinter's quality were investigated in this work. The results showed that when the basicity (R) increased from 1.4 to 2.3, the coefficient of sintering effectiveness decreased from $1.63 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ to $1.44 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and the rate of finished products after sintering decreased from 78.5% to 75.3%. Meanwhile, with the increasing of basicity, the vertical sintering speed increased gradually and the $w(\text{FeO})$ decreased constantly. Moreover, with the increasing of basicity from 1.4 to the 2.3, the drum index firstly dropped to the lowest value at the basicity of 1.7 and then rose gradually. With the increase of basicity, both the reduction degradation index (RDI) and reducibility index (RI) could be improved, which help to develop the gas permeability at the top of the furnace and the indirect reduction ability.

Key words: basicity; Indonesia vanadium titanium magnetite; sintering process; RDI; RI

铁矿烧结是将含铁物料、熔剂以及燃料充分混匀后制粒,并在烧结机上经点火及强制抽风的作用下,使燃料燃烧并产生高温,致使熟料部分达到熔化粘结、最终冷却固结后形成烧结矿^[1-3].

目前,烧结矿是高炉炼铁的主要的熟料形式,在我国约占主要钢铁企业含铁原料的 80%^[4]. 因此烧结矿质量的优劣直接影响高炉的顺行和稳定^[5]. 由于烧结技术的进步以及自动化技术的广

收稿日期: 2015-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604069); 中国博士后科学基金资助项目(2016M591445); 东北大学博士后基金资助项目(20160302); 国家自然科学基金-辽宁联合基金资助项目(U1508213).

作者简介: 高强健(1987-),男,辽宁阜新人,东北大学师资博士后; 刘常升(1963-),男,内蒙古奈曼旗人,东北大学教授,博士生导师; 沈峰满(1958-),男,黑龙江密山人,东北大学教授,博士生导师.

泛应用,烧结工艺得以不断完善,稳定的烧结生产有利于高炉顺行和能耗的降低. 炼铁生产指标的改善,推动了钢铁工业的发展^[6-8]. 但烧结是一个复杂的过程,烧结矿的质量直接关系到高炉顺行,故任何一种新矿石的使用,是非常有必要进行前期研究用以评估其对高炉带来的影响. 碱度是烧结生产中最重要参数之一,它既影响烧结过程和烧结矿的质量,又影响高炉炼铁中炉料的还原以及炉料结构^[9-11]. 本研究拟通过烧结试验考察二元碱度对印尼钒钛矿烧结过程及烧结矿质量的影响,并通过烧结矿显微结构以及矿物组成的变

化,分析其影响原因. 确定在新配矿条件下,二元碱度对烧结矿质量的影响规律.

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

印尼钒钛磁铁矿矿物组成稳定,其中铁、钒、钛及锆等均可综合利用;原矿中磷、铅、硫、锌等有害杂志元素相对较低. 因此,鉴于国内以往钒钛磁铁矿的冶炼经验,可将其高炉冶炼以实现其综合利用. 其化学成分如表 1 所示.

表 1 印尼钒钛矿化学成分(质量分数)							
Table 1	Chemical composition of Indonesia vanadium titanium magnetite (mass fraction)						%
矿种	w(TFe)	w(CaO)	w(MgO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(TiO ₂)	
印尼钒钛磁铁矿	57.28	0.17	2.19	1.68	3.10	12	

1.2 试验方法

为探讨碱度对印尼钒钛矿烧结的影响,试验在配矿过程中设计碱度 R 分别为 1.4,1.7,2.0,2.3. 其所对应的烧结矿编号为:S1,S2,S3,S4.

烧结试验参数见表 2. 根据我国冶炼钒钛磁铁矿的经验,其在烧结矿中的添加量不宜过多. 本研究中其添加量恒定 30%.

表 2 烧结试验工艺参数	
Table 2 Parameters of sintering process	
料层厚度:550 mm	烧结杯直径:150 mm
点火负压:−500 mmH ₂ O 柱	抽风负压:−1 000 mmH ₂ O 柱
点火温度:1 050 ℃	混合料水分:(7.5±0.5)%
混合料配碳量:4%	返矿内配:30%
R :1.4,1.7,2.0,2.3	制粒时间:15 min

还原性试验是依据“铁矿石还原性的测定方法(GB/T1324121991)标准”完成的^[12];低温还原粉化试验是依据“铁矿石低温粉化试验(GB/T13242291)标准”完成的^[13].

2 试验结果与分析

烧结试验所得烧结矿成分如表 3 所示,由表 3 可见;实测碱度与试验设计碱度基本相近,波动误差均在允许范围内.

2.1 碱度对烧结指标的影响

二元碱度对印尼钒钛矿烧结指标(垂直烧结速度、成品率、有效利用系数及转鼓指数)的影响如图 1 所示.

表 3 烧结矿的化学成分(质量分数)								
Table 3 Chemical composition of sintered production(mass fraction)								
试验号	w(TFe)	w(FeO)	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(MgO)	w(Al ₂ O ₃)	w(TiO ₂)	R
S1(1.4)	57.67	14.11	6.52	4.70	1.80	2.22	3.15	1.39
S2(1.7)	56.82	12.92	7.99	4.67	1.80	2.16	3.11	1.72
S3(2.0)	55.93	10.33	9.36	4.64	1.78	2.16	3.20	2.02
S4(2.3)	55.07	8.92	10.65	4.61	1.76	2.20	3.14	2.31

由图 1a 可见:当碱度 R 由 1.4 增至 2.3 时,垂直烧结速度由 19.2 mm/min 上升至 24.9 mm/min. 这主要是因为随着碱度的提高,熔剂使用量逐渐增加,烧损也相应增加,烧结料层透气性变好,故垂直烧结速度逐渐增大.

由图 1b 可见;成品率随着碱度的增加逐渐下降,原因是在保持配碳量不变的情况下,由于碱度

的提高,烧结矿中液相生成温度逐渐提高,液相量相对不足,故成品率下降. 由图 2 可见, $R=1.4$ 时烧结矿液相量要大于 $R=2.3$ 时烧结矿的液相量,故烧结矿成品率逐渐下降.

由图 1c 可见:当碱度 R 由 1.4 增至 2.3 时,烧结利用系数由 1.63 t/(m²·h)下降至 1.44 t/(m²·h). 由于烧结利用系数与垂直烧结速

度和成品率有关,碱度的逐渐提高,虽烧结速度提高,但是降低了成品率,综上两因素,烧结有效利

用系数略有下降.

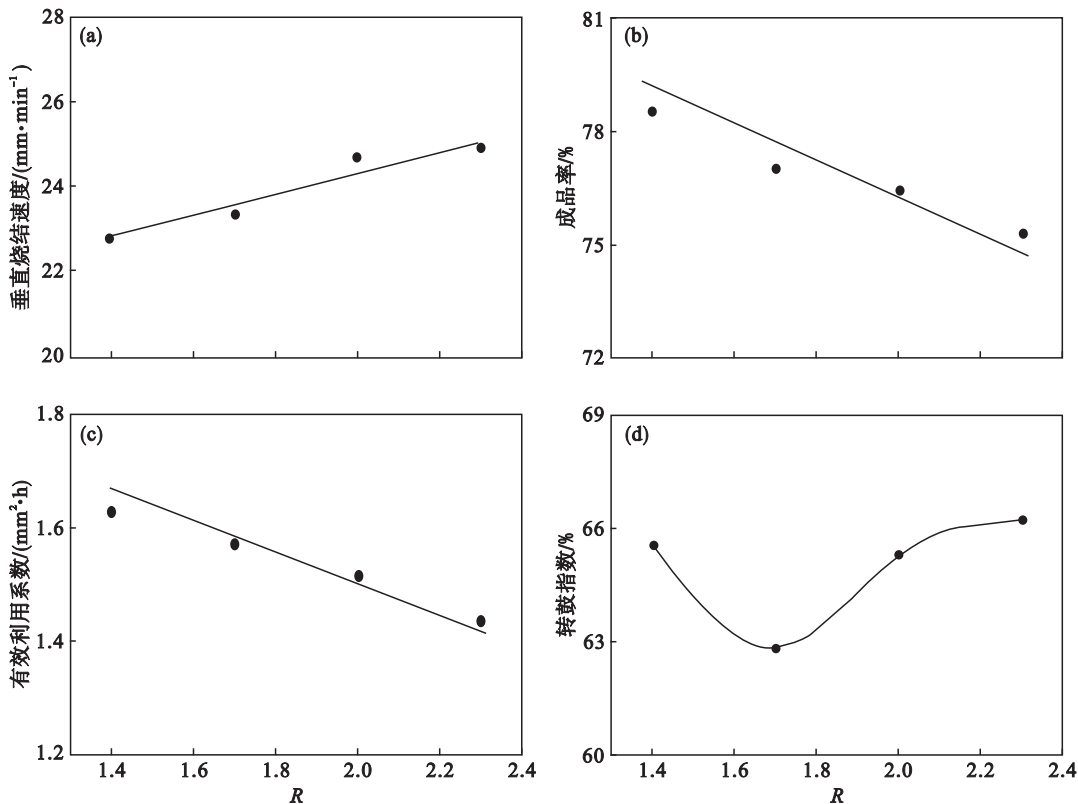


图 1 碱度对主要烧结指标的影响
Fig. 1 Effect of the basicity on the sintering index

(a)—垂直烧结速度; (b)—成品率; (c)—有效利用系数; (d)—转鼓指数.

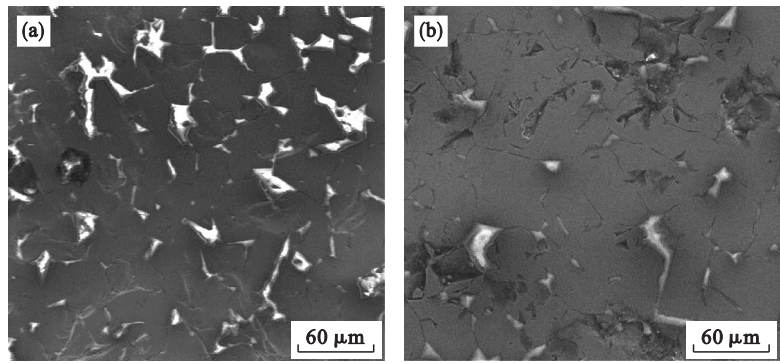


图 2 不同碱度时烧结矿液相发展对比
Fig. 2 Development of liquid phase in different basicity of sintered productions
(a)— $R=1.4$; (b)— $R=2.3$.

由图 1d 可见:转鼓指数随着碱度由 $R=1.4$ 上升到 $R=1.7$ 有所下降,由 65.57% 下降到 62.83%,当碱度继续增至 2.3 时,转鼓指数迅速回升,当碱度 $R=1.7$ 时烧结矿转鼓指数出现最低值. 由烧结矿的矿物组成(表 4)可知:当碱度 $R=1.7$ 时,烧结矿中硅酸二钙(C_2S)体积分数达到最大值. 而硅酸二钙冷却过程中转变成 $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 体积增大,这是造成烧结矿转鼓指数

下降的主要原因^[14].

由图 3 中烧结矿碱度 $R=1.7$ 的 SEM 分析可见,当碱度 $R=1.7$ 时,烧结矿黏结相微观结构存在一定的裂纹,而黏结相结构是烧结矿获得较好强度的基础,黏结相的裂纹必定会影响烧结矿的固结状态和强度水平. 故当碱度 $R=1.7$ 时,烧结矿的转鼓强度较低.

表 4 烧结矿矿物组成(体积分数)							
Table 4 Mineral composition of sintered productions (volume fraction)							
编号	赤铁矿	磁铁矿	铁酸钙	硅酸二钙	玻璃相	脉石、熔剂	钙钛矿
S1 (1.4)	35(2)	25	23	2	1	4	1
S2 (1.7)	32(3)	25	24	6~7	2	2~3	1
S3 (2.0)	30(3~4)	26	29	4	2	3	1
S4 (2.3)	26(3)	27	33	3	1~3	3~4	1~2

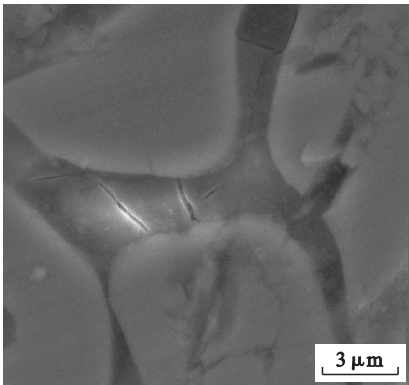


图 3 $R=1.7$ 烧结矿黏结相的微观裂纹图
Fig. 3 SEM of microcrack in sintered phase with the basicity of 1. 7

2. 2 碱度对印尼钒钛烧结矿中 FeO 含量的影响

烧结矿中 FeO 含量的多少直接影响烧结矿质量,FeO 含量适当提高可以改善烧结矿强度,但 FeO 过高,则影响烧结矿还原性,碱度对烧结矿 $w(\text{FeO})$ 的影响如图 4 所示. 由图 4 可见:相同配碳量情况下,当碱度 R 由 1.4 增加至 2.3 时,烧结矿中 FeO 质量分数随着碱度提高而下降,由 14.11% 下降至 8.92%,这主要因为随着碱度的提高,烧结矿内 $w(\text{CaO})$ 逐渐提高,致使 Ca^{2+} 浓度随之提高,液相中的氧位得以提高^[14],从而有

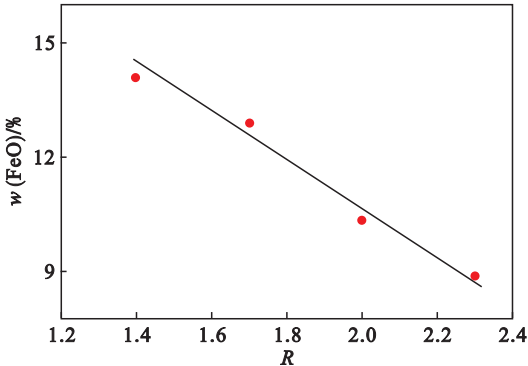


图 4 碱度对烧结矿中 FeO 含量的影响
Fig. 4 Effect of the basicity on mass fraction of FeO

利于 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ;另外,CaO 与 SiO_2 的亲合力要大于 FeO 和 SiO_2 的亲合力,CaO 和 SiO_2 大量结合,一定程度抑制了铁橄榄石液相的生产,故 $w(\text{FeO})$ 逐渐下降.

2. 3 碱度对低温还原粉化性和还原性的影响

低温还原粉化性和中温还原性是高炉炼铁原料重要的冶金性能. 低温还原粉化是对高炉上部的模拟,其性能的好坏直接影响到高炉炉料在间接还原过程中强度的优劣;中温还原性是对高炉中部的模拟,是评价矿石还原性优劣的一种指标. 碱度对印尼钒钛烧结矿的低温还原粉化性 $\text{RDI}_{+3.15}$ 和中温还原性 RI 的影响如图 5 所示.

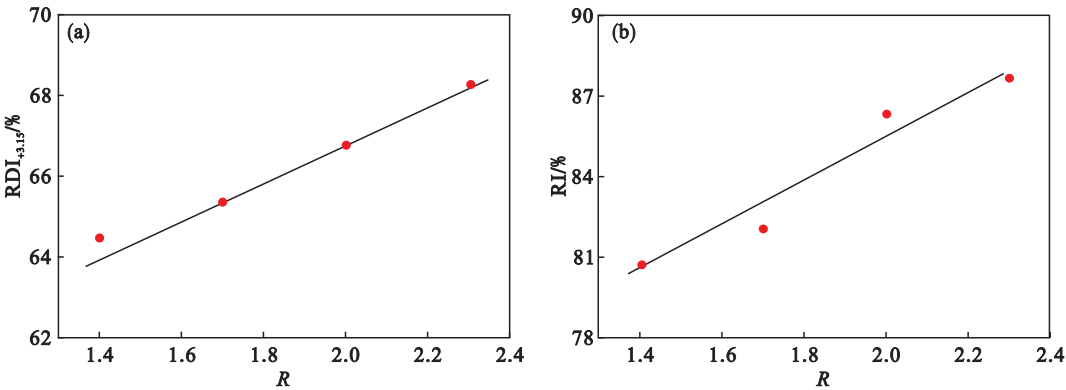


图 5 碱度对烧结矿低温还原粉化率及还原性的影响
Fig. 5 Effect of the basicity on the RDI and RI
(a)—RDI; (b)—RI.

由图 5a 可见:烧当碱度 R 由 1.4 增加至 2.3 时,烧结矿的低温还原粉化性能 $\text{RDI}_{+3.15}$ 逐渐改

善. 而矿石的低温还原粉化正是由于赤铁矿还原过程中发生晶型的转变而引起的. 由表 4 可知随

着碱度的提高,烧结矿中赤铁矿含量减少,强度较好的铁酸钙含量增加,故低温还原粉化性能得以改善.由图 5b 可见,烧结矿的还原性 RI 随着碱度提高而增大.从表 3,表 4 可以看出,随着烧结矿碱度的增大,烧结中还原性较好的铁酸钙逐渐增加,而不利于烧结矿还原性改善的 FeO 逐渐减少.

通过对 $R = 2.3$ 和 $R = 1.4$ 的两组烧结矿进行 XRD 分析(图 6)亦可知:随着碱度的升高,烧结矿中出现了铁酸钙黏结相,该种黏结相强度高,还原性好.故碱度提高后,烧结矿还原性得以改善.

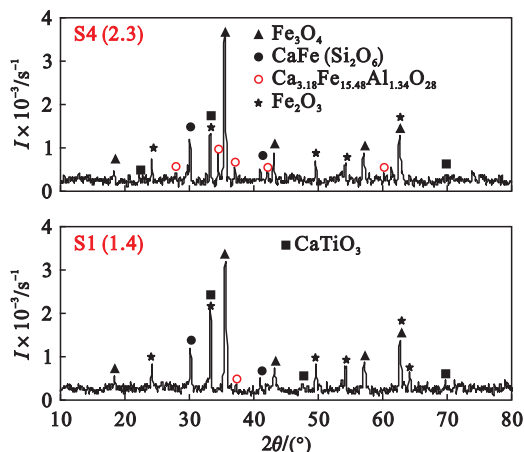


图 6 S4(2.3)与 S1(1.4)烧结矿 XRD 分析结果
Fig. 6 XRD analysis of the S4 (2.3) and S1 (1.4) samples

3 结 论

在某典型钢铁的原料条件下,配加 30% 印尼钒钛矿进行烧结试验,并考察了二元碱度对烧结过程及烧结矿冶金性能影响,得到如下结论:

1) 当碱度由 1.4 逐渐增至 2.3 时,烧结矿的垂直烧结速度由 19.2 mm/min 升至 24.9 mm/min;烧结利用系数由 1.63 t/(m²·h)降至 1.44 t/(m²·h);同样,成品率由 78.5% 逐渐降至 75.3%.

2) 当碱度由 1.4 增至 1.7 时,转鼓指数呈下降趋势,而后随着碱度增加至 2.1,转鼓指数逐渐回升.在碱度 1.7 时,转鼓指数存在最小值.

3) 碱度由 1.4 逐渐增至 2.3 时, $w(\text{FeO})$ 逐渐降低,由 14.11% 下降至 8.92%. 烧结矿低温还原粉化性能和还原性能不断改善,这有利于高炉上部透气性的改善.

参考文献:

- [1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:50-60.
(Zhou Chuan-dian. Technical manuals of blast furnace ironing production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2002:50-60.)
- [2] Matsumura M, Hoshi M, Kawaguchi T. Improve of sinter softening property and reducibility by controlling chemical compositions [J]. *ISIJ International*, 2005, 45 (4): 598-607.
- [3] Loo C E, Leung W. Factors influencing the bonding phase structure of iron ore sinters [J]. *ISIJ International*, 2003, 43 (9): 1393-1402.
- [4] Biswas A K. Principles of blast furnace ironmaking [M]. Brisbane: Cootha Publishing House, 1981: 48-76.
- [5] Shen F M, Gao Q J, Wei G, et al. Densification process of MgO bearing pellets [J]. *Steel Research International*, 2015, 86(6): 644-650.
- [6] Gao Q J, Shen F M, Wei G, et al. Gas-solid reduction kinetic model of MgO-fluxed pellets [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2014, 21(1): 12-17.
- [7] Coetsee T, Poslorius P C, Viuiers E E. Rate-determining steps for reduction in magnetite-coal pellets [J]. *Mineral Engineering*, 2002, 15(11): 919-929.
- [8] Loo C E, Wan K T, Howes V R. Mechanical properties of natural and synthetic mineral phases in sinters having varying reduction degradation indices [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1998, 25(6): 279-285.
- [9] Shen F M, Jiang X, Wu G S, et al. Proper MgO addition in blast furnace operation [J]. *ISIJ International*, 2006, 46 (1): 65-69.
- [10] Kemppainen A, Mattila O, Heollomem E P, et al. Effect of H₂-H₂O on the reduction of olivine pellets in CO-CO₂ gas [J]. *ISIJ International*, 2012, 52(11): 1973-1978.
- [11] Kasai E. Influence of properties of fluxing materials on the flow of melt formed in the sintering process [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(9): 857-862.
- [12] Mu L, Jiang X, Gao Q J, et al. Effect of hydrogen addition on low temperature metallurgical property of sinter [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, 19(4): 6-10.
- [13] 中国冶金建设协会. 铁矿球团工程设计规范[M]. 北京:中国计划出版社,2009:10-22.
(China Metallurgical Construction Association. Code for design of iron pelletizing engineering [M]. Beijing: China Planning Press, 2009: 10-22.)
- [14] Wright S, Zhang L, Sun S Y, et al. Viscosities of calcium ferrite binding phases and calcium aluminosilicate binding phases containing spinel particles [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001, 282: 15-23.