

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2014.02.009

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 对烧结矿冶金性能的影响

张新建<sup>1</sup>, 朱博洪<sup>2</sup>, 牛德良<sup>2</sup>, 杨 剑<sup>2</sup>, 徐敏人<sup>2</sup>, 肖扬武<sup>1</sup>

(1. 首钢水城钢铁(集团)有限责任公司, 贵州 六盘水 553000; 2. 重庆大学, 重庆 400044)

**摘 要:** 针对目前首钢水城钢铁(集团)有限责任公司高炉入炉烧结矿 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值变化波动大的问题, 通过实验室烧结矿试验和烧结矿冶金性能测试方法, 研究了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值对烧结矿冷强度性能、还原性能和低温粉化性能的影响, 以及与烧结矿中 FeO 含量的关系。结果表明: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 对烧结矿冷强度影响明显。当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 在质量比值 0.3~0.35 时, 烧结矿的冷强度较好, 可达 84%; 当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值大于 0.35 后, 冷强度随 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 的升高而显著下降, 碱度为 2.0, 燃料配为 6.5%; 当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值为 0.35 时, 烧结矿还原指数达 92%, 还原粉化 RDI<sub>+3.15</sub> 为 67%; 当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值在 0.25~0.45 间变化时, 烧结矿中 FeO 的含量并没有出现有规律的变化, 只是在 8%~10% 间波动。

**关键词:** 烧结; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 比值; 冶金性能; FeO 含量

中图分类号: TF01

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2014)02-0040-05

## Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> on Sinter for Its Metallurgical Properties

ZHANG Xin-jian<sup>1</sup>, ZHU Bo-hong<sup>2</sup>, Niu De-liang<sup>2</sup>,  
YANG Jian<sup>2</sup>, XU Min-ren<sup>2</sup>, XIAO Yang-wu<sup>1</sup>

(1. Shougang Shuicheng Iron & Steel Corporation, Liupanshui 553028, China;

2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In allusion to the issues of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio of sinter changes in volatility, the effect of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio to cold strength properties, reductive properties, reduction degradation index and relationship with FeO content were researched, through laboratory sintering tests and metallurgical properties of sinter test methods. The results show that the influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio on sinter for its cold strength properties is obvious. When Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio is at 0.3-0.35, the cold strength property is best which reaches to 84%. But when Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio is higher than 0.35, the cold strength decreases significantly with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio elevating. When alkalinity at 2.0, fuel ratio at 6.5% and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio at 0.35, Sinter reduction index reached 92%, and reduction degradation index was 67%. Moreover, when Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio changed between 0.25 and 0.45, the FeO content of sinter does not appear to have the law changed, only to fluctuate between 8% and 10%.

**Key words:** sintering; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio; metallurgical properties; FeO content

收稿日期: 2013-10-28

作者简介: 张新建(1960—), 男, 高级工程师, 主要从事炼钢工艺流程优化研究。

引用格式: 张新建, 朱博洪, 牛德良, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 对烧结矿冶金性能的影响[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2014(2): 40-44.

Citation format: ZHANG Xin-jian, ZHU Bo-hong, Niu De-liang, et al. Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> on Sinter for Its Metallurgical Properties[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2014(2): 40-44.

目前,首钢水城钢铁(集团)有限责任公司(以下简称水钢)入炉综合炉料中烧结矿占75%左右,其余均用块矿和球团矿进行补充。水钢因无自己的矿山和球团厂,所有块矿和球团矿均需外购,故来源多样,品种较复杂。因Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>的熔化性温度较高,在高炉冶炼过程中会引起高炉渣黏度增加和产生流动性变化,导致焦比升高、脱硫能力降低、渣铁分离困难,以及铁损失率增加等问题。有少量的研究表明:一定的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值是烧结生产获得铁酸钙矿物组成的必要条件,但当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值过高将会促进烧结矿中玻璃体的形成,抑制结晶程度,使烧结矿的冷强度迅速恶化,低温还原粉化加剧。适量的二氧化硅和氧化铝有利于降低铁酸钙液相熔点,从而促使铁酸钙液相的形成,但是会生成尺寸较大酸性离子团,提高液相的黏度,降低粘结相流动性<sup>[1-2]</sup>。此外,很多针对铝元素对烧结矿性能和质量的影响研究表明<sup>[3-6]</sup>:对于不同原料条件的高碱度烧结矿,当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值控制在0.40~0.45以下时,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值的增加

可以显著地促进铁酸钙物相的生成,降低烧结矿混合料的初熔温度;当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值大于0.40~0.45时,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值的增加会使烧结矿性能恶化。

针对以上问题可以看出:烧结矿中铝元素的分布和硅元素密切相关,而且这种分布的差异是影响烧结矿强度和冶金性能的重要因素,而单独研究这2种元素对烧结矿性能的影响是有失偏颇的。因此,本文通过烧结试验及冶金性能测试方法,研究了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值对烧结矿冷强度性能、还原性能和低温粉化性能的影响,以及与烧结矿中FeO含量的关系。

## 1 实验

### 1.1 实验原料特性

本实验根据水钢现有烧结原燃料条件进行研究,其烧结使用的原料其化学成分如表1所示,烧结所使用的熔剂及其成分如表2所示。实验中所使用的原料取自水钢高炉原料场。

表1 烧结原料化学成分(质量分数)

%

矿种	TFe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	S	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	碱度	A/S比
62 澳粉	61.5	1.9	0.26	4.19	0.18	0.08	1.92	0.06	0.46
57 澳粉	57.5	0.78	0.58	7.22	0.22	0.05	1.58	0.08	0.22
铁精粉	59.16	18.75	2.5	7.8	1.74	0.57	1.32	0.32	0.17
巴西粉	64.5	0.5	0.11	3	0.08	0.02	1.15	0.04	0.38
南非粉	63.5	0.8	0.4	5.2	0.15	0.02	2.1	0.08	0.4
富矿粉	56.1	0.8	3.3	10.4	1.8	2.6	2.4	0.31	0.23
返矿	54.21	7.8	10.33	7.15	1.98	0.05	1.65	1.45	0.23
混合料	48.5	6.05	9.5	4.96	2.31	0.2	1.47	1.92	0.3
烧结矿	55.21	9.4	11.13	5.46	2.37	0.02	1.8	2.04	0.33

表2 烧结熔剂化学成分(质量分数)

%

名称	TFe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	S	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
煤焦炭分	16.2	8.58	4.40	54.26	1.63	0.95	29.89
生石灰	-	-	83.84	3.78	1.26	0.00	-
石灰石	0.63	-	52.17	3.06	1.33	0.07	0.82
白云石	0.7	-	29.01	3.83	19.8	0.03	1.98

## 1.2 实验方案

### 1.2.1 烧结实验

烧结使用的燃料组成为焦粉:煤粉(质量比)=3:1,燃料固定碳质量分数为84.15%,挥发成分质量分数为2.6%,灰分质量分数为13.24%,灰分成分和烧结所用溶剂成分如表2所示。烧结实验过程的参数:点火温度为1100℃,点火时间为1min,烧结矿料层厚度为700mm。

### 1.2.1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值对烧结矿冷态强度的影响

固定碱度为2.0,燃料配比为6.5%,测得Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值在0.25~0.4间变化时烧结矿的落下强度和转鼓强度特性。落下强度实验采用日本标准(JIS-M8711-7)规定的参数,转鼓强度实验根据国家标准(GB8209-87)进行。

### 1.2.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 对烧结矿还原性能和低温还原粉化性能的影响

固定碱度为2.0,燃料配比为6.5%,测定Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值在0.25~0.4间变化时烧结矿的还原性、还原粉化率及与烧结矿中FeO含量的关系。烧结矿还原性的测定按照国标(GB/T13241-91)检测方法进行实验,而铁矿石低温还原粉化指数根据国标(GB/T13242-91)采用静态法测定。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 对烧结矿冷态强度的影响

在固定碱度为2.0,燃料配比为6.5%的条件下,测得Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值从0.25变化到0.4时与烧结矿冷态强度的关系,如图1所示。

烧结矿的主要粘结相为复合铁酸钙相。当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值较低时,铝元素过少,而铝元素是形成复合多元铁酸钙的必须元素,这导致多元复合铁酸钙的形成受阻,烧结矿液相减少,因而强度下降;当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>比为0.3~0.35时,烧结矿的冷强度较好,可达84%;而当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>比大于0.35后(此时氧化铝含量大于2.0%),多元复合铁酸钙中的铝元素过多,会使它的流动性变差,粘结效果变差,强度明显下降。另外,由于此时铁

酸钙中固溶的铝已经饱和,铝元素开始向玻璃相中富集并促进玻璃相的生成,而玻璃相是烧结矿中强度最差的相,它的增加势必会导致烧结矿的强度下降<sup>[7-9]</sup>。

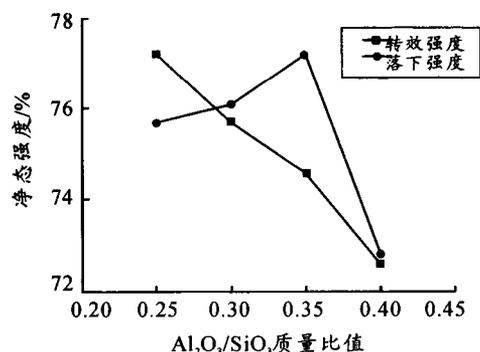


图1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值与烧结矿冷态强度的关系

### 2.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 质量比值对烧结矿还原性能和低温还原粉化性能的影响

碱度为2.0,燃料配比为6.5%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值在0.25~0.4间变化时,烧结矿还原指数结果如表3所示。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值与烧结矿还原性能的关系如图2所示。

表3 还原指数结果

试样	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> 比值	还原指数(R)
实验1	0.25	85.8
实验2	0.30	87.3
实验3	0.35	91.7
实验4	0.40	87.8
实验5	0.45	85.0

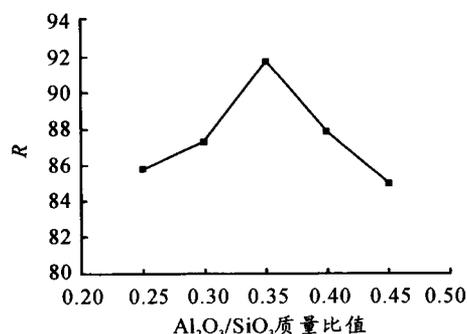


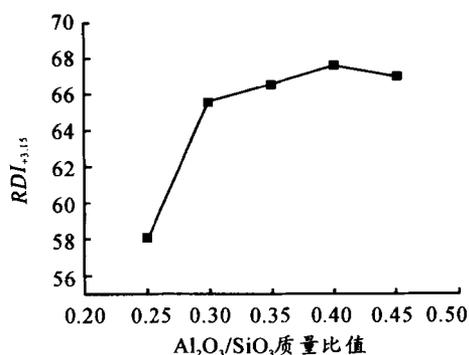
图2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 与烧结矿还原性能的关系

从图2中可以看出:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值对烧结矿还原性能有较大影响。当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量

比值小于0.35时,随着Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值的提高烧结矿的还原性能也在提高。其原因是Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值的提高有利于多元复合铁酸钙的形成,而铁酸钙特别是多元复合铁酸钙还原性强于磁铁矿,当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值高于0.40后,随着Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>比值的提高,烧结矿的还原性能出现了较快的下降。由此表明:在本实验条件下,当烧结矿原料组成中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值为0.35~0.40时,烧结矿具有较高的还原指数。还原指数达到92%时,还原性能最好。

表4 低温还原粉化结果

试样	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> 质量比值	还原粉化指数 ( <i>RDI</i> <sub>+3.15</sub> )
实验1	0.25	58.1
实验2	0.30	65.6
实验3	0.35	66.6
实验4	0.40	67.6
实验5	0.45	67.0

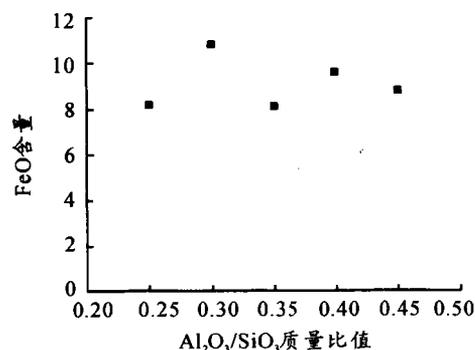
图3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值与烧结矿低温还原粉化性能的关系

从图3中可以看出:烧结矿的*RDI*<sub>+3.15</sub>随Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值的增加而增加。当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值为0.35时,还原粉化*RDI*<sub>+3.15</sub>为67%;在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值大于0.35后,烧结矿的*RDI*<sub>+3.15</sub>的增加速度减缓。铝元素在烧结矿中并不是均匀分布的,而是富集在铁酸钙相和玻璃相中。当铝硅值比较低时(小于0.2),铝元素的增加主要促进了复合多元铁酸钙的形成,而对玻璃相的影响较小。由于铁酸钙相强度和冶金性能优良,而玻璃相强度最差,因此有利于提高烧结

矿的低温还原指数*RDI*<sub>+3.15</sub>。而随着Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值的提高,铁酸钙中可以固溶的铝元素达到极限,铝元素开始大量存在于玻璃相中促进玻璃相的形成,并使得玻璃相的断裂韧性降低,而玻璃相是烧结矿中强度最差的相,这个变化伴随着烧结矿综合断裂韧性的降低,势必导致烧结矿的还原粉化性能变差<sup>[10-12]</sup>。

### 2.3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值与烧结矿FeO含量的关系

固定碱度为2.0,燃料配比为6.5%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值在0.25~0.45间变化时与烧结矿FeO含量关系如图4所示。

图4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>与烧结矿中FeO含量的关系

从图4可以看出:就水钢烧结目前的工艺和原料条件而言,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>和FeO含量之间并不存在明显的相关性。当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值在0.25~0.45间变化时,烧结矿中FeO的含量并没有出现有规律的变化,只是在8%~10%间波动。但是为了保持合理的烧结矿还原性和强度的关系,FeO的含量控制仍十分关键。在保证烧结矿合理的强度和低温还原粉化性能的前提下,最经济的控制FeO含量的方法就是减少燃料的配比,用尽量少的燃料消耗达到产生满足烧结矿强度所需的FeO量<sup>[13]</sup>。通过对烧结矿冷强度、还原性和还原粉化等性能的研究分析,在水钢目前的原料条件下,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>质量比值在0.35左右时,烧结矿具有较好的强度和冶金性能。因此,在目前的原料条件下,应保持烧结矿Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>在0.35左右时,通过控制配碳量保证烧结矿中FeO的含量为8%左右。

### 3 结论

1) 当  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  质量比值为 0.3 ~ 0.35 时, 烧结矿的冷强度较好, 可达 84%; 当  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  大于 0.35 后, 落下强度随  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  的升高而显著下降。

2)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  质量比值对烧结矿的还原性和低温还原粉化的影响十分明显, 当烧结矿原料组成中  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  质量比值为 0.35 ~ 0.40, 烧结矿具有较高的还原指数, 还原性能好; 烧结矿碱度为 2.0, 燃料配为 6.5%,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  质量比值为 0.35 左右时, 还原指数达到 92%, 还原粉化  $RDI_{+3.15}$  为 67%。

3)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  质量比值和烧结矿中 FeO 的含量之间并不存在明显的相关性。当  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  质量比值在 0.25 ~ 0.45 间变化时, 烧结矿中 FeO 的含量并没有出现有规律的变化, 只是在 8% ~ 10% 间波动。

### 参考文献:

- [1] 李光森, 金明芳, 姜鑫, 等. 烧结矿粘结相流动的研究[J]. 中国冶金, 2008(5): 20-23.
- [2] Kasai E, Sakano Y, Kawaguchi T, et al. Influence of properties of fluxing materials on the flow of melt formed in the sintering process [J]. ISIJ International, 2000, 40(9): 857-862.
- [3] Patrick T R C, Pownceby M I. Stability of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) in air-solid solution limits between 1240 degrees C and 1390 degrees C and phase relationships within the  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -CaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  (FCAS) system [J]. Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2002, 33(1): 79-89.
- [4] Pownceby M I, Clout J M F. Phase relations in the Fe-rich part of the system  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )-CaO- $\text{SiO}_2$  at 1240 ~ 1300 degrees C and oxygen partial pressure of  $5 \times 10^{-3}$  atm: implications for iron ore sinter [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section C-Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2000, 109: C36-C48.
- [5] 李光森. 粘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.
- [6] 刘旭望, 郭兴敏. 添加剂对烧结过程中铁酸钙形成的影响[C]//第八届中国钢铁年会. 中国: [出版者不详], 2011: 41-42.
- [7] 习乃文. 三氧化二铝对澳矿烧结性能的影响[J]. 武钢技术, 1995(12): 8-13.
- [8] 刘继彬, 李辽沙.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量对烧结矿平衡相组成及特性的影响[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2009(4): 333-337.
- [9] 武軼. 高铝烧结矿性能的研究[C]//2005 中国钢铁年会. 中国: [出版者不详], 2005: 214-217.
- [10] Sugiyama K, Monkawa A, Sugiyama T. Crystal structure of the SFCAM phase  $\text{Ca}_2(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Si})_6\text{O}_{20}$  [J]. ISIJ International, 2005, 45(4): 560-568.
- [11] 杨华明, 邱冠周, 唐爱东.  $\text{CaCl}_2$  对烧结矿 RDI 的影响[J]. 中南工业大学学报, 1998(3): 28-31.
- [12] 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-Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2004, 35(5): 929-936.
- [13] WU Sheng-li, WANG Qing-feng, BIAN Miao-lian, et al. Influence of Iron Ore Characteristics on FeO Formation During Sintering [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(5): 5-10.

(责任编辑 刘 舸)