

稀土在烧结过程中的行为与机理研究

刘周利^{1,2}, 王敏¹, 梁海全³, 何晓义⁴, 王璐¹

1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢炼铁厂, 内蒙古 包头 014010;
4. 内蒙古包钢钢联股份有限公司制造部, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 采用烧结杯系统研究了稀土对烧结矿质量、冶金性能以及矿物组成的影响, 并结合扫描电镜和能谱分析了稀土在烧结矿不同矿物中的赋存状态。研究表明: 随着稀土配比的增加, 烧结成品率、利用系数以及转鼓强度呈先增加后降低的趋势, 烧结矿还原性和低温还原粉化指数呈先改善后恶化的趋势, 熔融区间变宽, 烧结矿矿物组成中铁酸钙的生成量呈降低的趋势。在烧结过程中稀土进入赤铁矿、铁酸钙及玻璃相中, 在玻璃相中以柱状稀土矿物状态存在。

关键词: 稀土; 烧结矿; 行为; 机理研究

中图分类号: TF046.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)03-0017-06

Study on Behavior and Mechanism of Rare Earth in Sintering Process

Liu Zhou-li^{1,2}, Wang Min¹, Liang Hai-quan³, He Xiao-yi⁴, Wang Lu¹

1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Rare Earth Steel Iron-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
4. Manufacturing Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In this paper, the effects of rare earth on the quality, metallurgical performances and mineral composition of sinter are systematically studied with sinter cup as well as the occurrence states of rare earth in different minerals of sinter are analyzed with scanning electron microscope and energy spectrum. The results showed that the sinter product ratio, utilization coefficient and drum strength tended to be increased first and then decreased, reducibility and low-temperature reduction degradation index of sinter tended to be improved first and then deteriorated, melting range was widened as well as the amount of formation for calcium ferrite in the mineral composition of sinter tended to be decreased with the proportion of rare earth increased. During the sintering process, the rare earth is into hematite, calcium ferrite and glass phase as well as

it exists as columnar rare earth mineral in glass phase.

Key words: rare earth; sinter; behavior; mechanism study

近年来,广大科技工作者围绕白云鄂博铁精矿中的 K、Na、F 开展了大量的基础性能研究^[1-5],从机理上弄清了 K、Na、F 在烧结过程中的行为以及对烧结矿质量的影响,而对稀土在烧结过程中的行为与机理方面的研究很少,本文采用烧结杯研究了稀土对烧结矿质量和冶金性能的影响,为研究稀土在烧结过程中的行为和作用机理提供技术指导。

1 试验原料及研究方法

1.1 试验原料

试验用铁料包括白云鄂博自产精矿(简称自产精矿)、稀土精矿;熔剂包括蛇纹石、石灰石、生石灰、白云石;燃料为焦粉。试验用原料化学成分见表 1,燃料工业分析见表 2。

表 1 试验原料化学成分及烧损(质量分数)

原料名称	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	F	REO	I _g
自产精矿	66.46	28.83	0.92	2.50	0.83	0.12	0.13	0.12	0.38		1.74
稀土精矿	3.75								8.42	54.05	
蛇纹石			1.00	38.00	35.00						10.00
石灰石			51.05	2.84	1.86						39.91
生石灰			87.67	3.63	4.07						2.31
白云石			31.09	2.36	19.86						45.87

表 2 燃料工业分析(质量分数)

名称	F _{cad}	A _d	V _{daf}	S _{t,d}	M _t
焦粉	82.0	16.0	2.1	0.9	2.4

由表 2 可以看出,焦粉的固定碳含量为 82.0%,灰分较高,为 16.0%,硫含量较高,为 0.9%。

1.2 研究方法及试验方案

本文采用烧结杯,结合熔滴炉和矿相显微镜研究稀土对烧结矿质量、冶金性能以及矿物组成的影响。为了摸清稀土对烧结矿质量的影响,以自产精矿为原料,通过配加不同比例的稀土精矿,使得烧结混合料中稀土含量呈现不同的变化趋势。具体试验

方案以 100% 自产铁精矿为基准点(SJ),通过添加稀土精矿,使烧结混合铁料稀土含量分别为 0.5%(SXT0.5)、1.0%(SXT1.0)、1.5%(SXT1.5)、2.0%(SXT2.0)。烧结试验采用直径为 300 mm 的烧结杯,料层厚度为 700 mm,点火负压为 4.9 kPa,烧结负压为 9.8 kPa。烧结矿碱度控制为 2.00 ± 0.08,烧结矿 MgO 含量为 2.0% ± 0.1%,通过蛇纹石调整烧结矿 SiO₂ 含量在 4.8% ± 0.1%。

2 试验结果及分析

2.1 烧结杯试验结果及分析

2.1.1 化学成分

含稀土烧结矿化学成分见表 3。

表 3 烧结矿化学成分及碱度

编号	烧结矿化学成分(质量分数)/%							R
	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	F	REO	
SJ	58.50	10.44	9.88	4.84	2.08	0.07	0.20	2.04
SXT0.5	58.22	10.72	9.48	4.78	1.96	0.37	0.50	1.98
SXT1.0	57.54	10.60	9.50	4.81	2.01	0.52	0.95	1.98
SXT1.5	56.83	10.22	9.63	4.86	1.95	0.58	1.44	1.98
SXT2.0	55.01	10.31	9.72	4.80	2.03	0.62	2.11	2.03

由表3可以看出,由于稀土精矿铁品位较低,F含量高,替代自产精矿后,随着稀土精矿配比的增加,烧结矿铁品位降低,F含量增加。

2.1.2 工艺指标

烧结工艺指标见表4。

表4 烧结工艺指标

编号	成品率 /%	利用系数 $/(t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	垂速 $/(mm \cdot min^{-1})$	能耗 $/(kg \cdot t^{-1})$	转鼓(+6.3 mm) /%
SJ	70.31	1.42	20.00	65.88	64.40
SXT0.5	71.81	1.41	21.20	65.71	64.50
SXT1.0	74.54	1.44	20.60	63.39	65.80
SXT1.5	75.60	1.45	20.50	62.90	66.50
SXT2.0	74.40	1.41	19.40	63.29	65.90

由表4可以看出,与基准点相比,随着稀土含量的增加,烧结矿成品率、利用系数以及转鼓强度均呈先增加后降低的趋势,固体能耗呈先降低后增加的

趋势,当稀土含量为1.44%时,各项工艺指标最优。

2.1.3 冶金性能

含稀土烧结矿冶金性能见表5。

表5 烧结矿冶金性能

编号	RI /%	$RDI_{+3.15mm}$ /%	软融性能/°C							$\Delta P_{max}/Pa$
			T_4	T_{10}	T_{40}	$T_{40} - T_{10}$	T_S	T_D	$T_D - T_S$	
SJ	76.50	77.60	1 104	1 122	1 256	134	1 246	1 505	259	14 910
SXT0.5	77.60	78.60	1 111	1 142	1 254	112	1 245	1 504	259	15 018
SXT1.0	78.80	79.40	1 127	1 151	1 258	107	1 247	1 515	268	15 854
SXT1.5	79.20	80.50	1 120	1 150	1 256	106	1 246	1 517	271	16 005
SXT2.0	78.00	79.60	1 114	1 151	1 246	94	1 235	1 515	280	16 539

由表5可以看出,随着稀土含量的增加,烧结矿还原性(RI)、低温还原粉化指数($RDI_{+3.15mm}$)呈现先改善后变差的趋势。烧结矿的软化温度区间 $T_{40} - T_{10}$ 随着稀土含量的增加有变窄的趋势,从基准点的134 °C到烧结矿稀土含量为2.11%时降低至94 °C。 T_S 呈降低的趋势, T_D 呈增加的趋势,导致

熔化区间变宽,从基准点的259 °C到烧结矿稀土含量为2.11%时的280 °C,最大压差也随着稀土含量的增加而呈升高的趋势。

2.1.4 矿物组成和显微结构

烧结矿矿物组成分析结果见表6,显微结构见图1。

表6 烧结矿矿物组成(体积分数)

编号	磁铁矿	赤铁矿	铁酸钙	硅酸二钙	玻璃相	铈钙硅石	橄榄石	含稀土铁矿物	枪晶石
SJ	50	12	23	3	11		1		
SXT0.5	49	15	15	1	10	<1		9	<1
SXT1.0	46	13	14	1	12	1		12	1
SXT1.5	45	14	13	1	11	1		14	1
SXT2.0	45	13	13	1	7	2		17	2

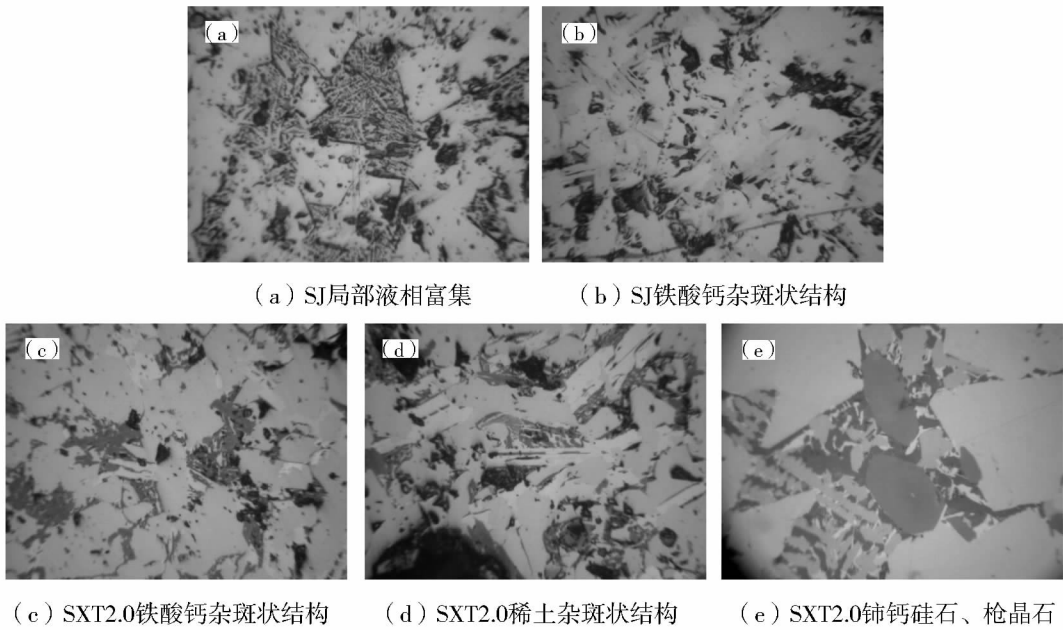


图 1 烧结矿显微结构

由表 1 矿物组成并结合图 1 显微结构可以看出,基准点(SJ)矿物组成中主要以磁铁矿、赤铁矿、玻璃相及铁酸钙构成,含有 3% 的硅酸二钙;四个试验点矿物组成中主要以磁铁矿、赤铁矿、玻璃相、铁酸钙和含稀土铁矿物构成。随着稀土含量的增加烧结矿的铁酸钙生成量降低,含稀土铁矿物增加,铈钙硅石及枪晶石呈增加的趋势。由于液相中铈钙硅石和枪晶石的生成增加了玻璃相的强度,所以,随着稀土含量的增加烧结矿转鼓强度提高。硅酸二钙随着稀土含量的增加呈降低的趋势,由于硅酸二钙在冷

却过程中发生一系列的晶型转变,体积膨胀,产生内应力,导致烧结矿粉碎,严重影响烧结矿强度,因此硅酸二钙的减少使烧结矿粉化性能得到改善。

2.1.5 扫描电镜微区分析结果

为了进一步摸清稀土在烧结过程中的走向和在烧结矿各个矿物中的分布情况,对稀土含量为 2.11% 的烧结矿矿物中的赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙、玻璃相和含稀土铁矿物进行了扫描电镜和能谱分析。分析结果见图 2—图 6。

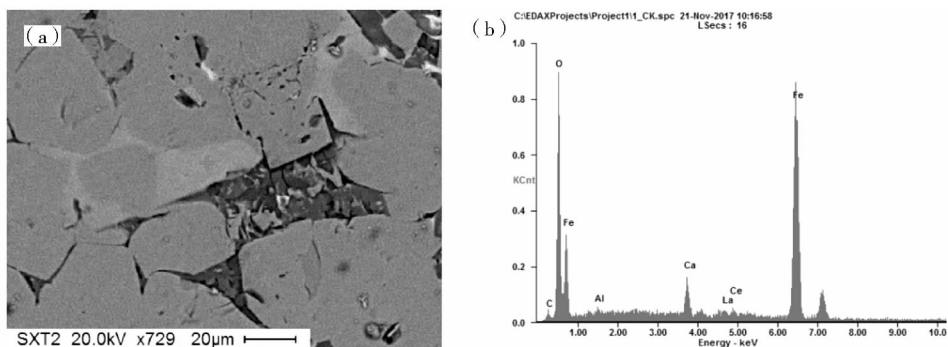


图 2 烧结矿(SXT2.0)赤铁矿能谱分析

图 2 中十字所标定的矿物为赤铁矿,可以看出,

其中 Ca 较多,有大量稀土进入赤铁矿。

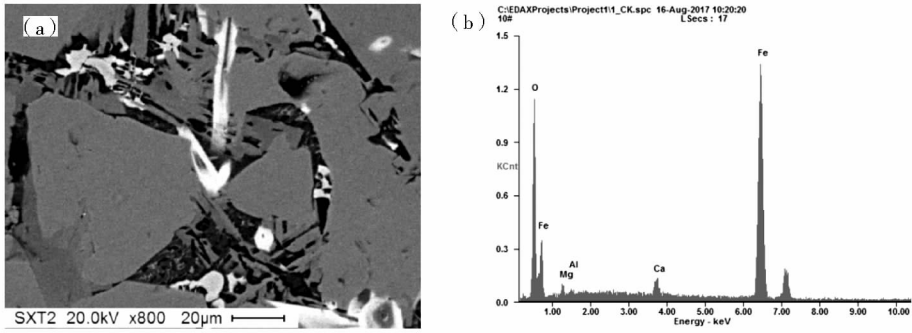


图3 烧结矿(SXT2.0)磁铁矿能谱分析

图3中十字所标定的矿物为磁铁矿,可以看出, 其中Ca、Mg较多。

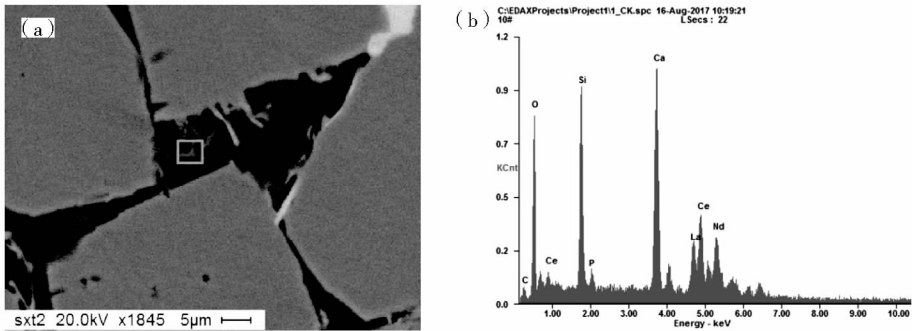


图4 烧结矿(SXT2.0)铁酸钙能谱分析

图4中红色方框所标定的矿物为复合铁酸钙, 可以看出,有较多的稀土进入复合铁酸钙中。

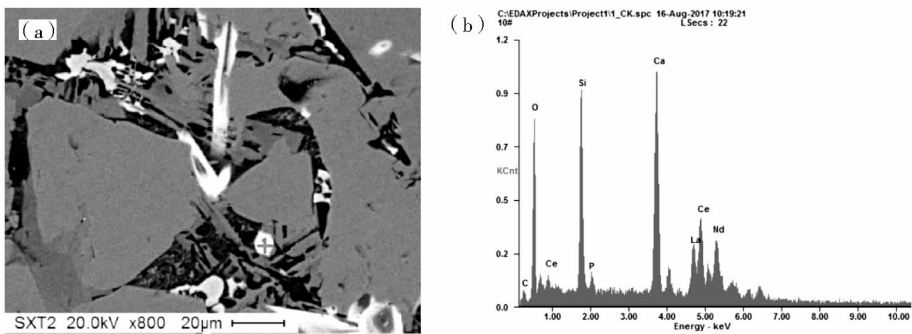


图5 烧结矿(SXT2.0)铈钙硅石能谱分析

图5中十字所标定的矿物为铈钙硅石,从能谱图及其所含各元素的重量结果可以看出,铈钙硅石

中的稀土含量较高。

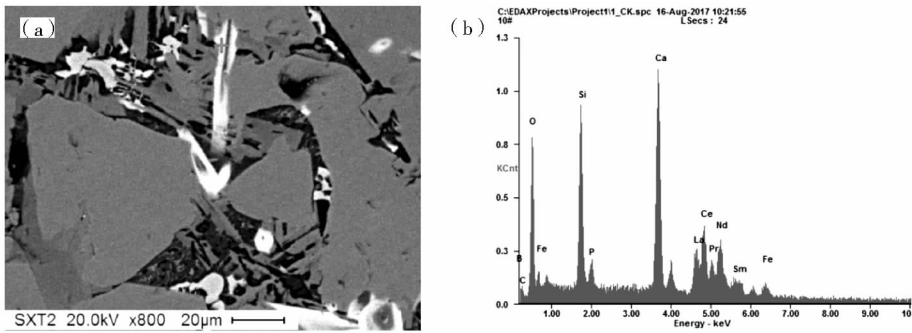


图 6 烧结矿(SXT2.0)稀土铁矿物能谱分析

图 6 中十字标定的矿物为稀土铁矿物,从能谱图及其所含各元素的重量结果可以看出,该矿物中稀土含量较高。

3 结论

(1)与基准点相比,随着稀土含量的增加,烧结矿成品率、利用系数以及转鼓强度呈先增加后降低的趋势。配加稀土后,烧结矿铁酸钙的生成量降低,稀土铁矿物的含量增加,由于稀土铁矿物的出现,烧结矿玻璃相强度增强,最终使得烧结矿转鼓强度提高。固体燃耗随着稀土含量的增加呈先降低后增加的趋势。

(2)从烧结矿的冶金性能试验结果得出,稀土进入烧结矿后,烧结矿还原性、低温还原粉化指数呈先改善后恶化的趋势, $T_{40} - T_{10}$ 变窄, $T_D - T_S$ 变宽,最大压差变大。

(3)从烧结矿的微区检测分析得出,烧结配加稀土后,形成含稀土的铁矿物和铈钙硅石,同时稀土

进入赤铁矿和复合铁酸钙。

参 考 文 献

- [1] 吴胜利,刘宇.铁矿粉与 CaO 同化能力试验研究[J].北京科技大学学报,2002,24(3):258-261.
- [2] 沈茂森,康文革,王敏.基于检测数据的烧结矿质量研究[J].包钢科技,2006,32(S1):8-10.
- [3] 邬虎林,薛向新,沈茂森,等.包钢烧结矿的化学成分及显微结构对其冶金性能的影响[J].烧结球团,2007,32(2):22-26.
- [4] 赵艳霞,罗果萍,孙国龙,等.包钢烧结优化配矿的基础研究[J].内蒙古科技大学学报,2007,26(2):100-103.
- [5] 韩淑霞,刘铃声.稀土对烧结矿质量的影响研究[J].稀土,2010,31(4):88-91.