

钒钛磁铁矿对烧结及炼铁的影响分析^①

李 建, 毛晓明

(宝山钢铁股份有限公司 中央研究院, 上海 201900)

摘 要: 研究了烧结配矿中钒钛磁铁矿用量对烧结利用系数、燃耗和低温还原粉化率的影响, 结果表明, 烧结矿中 TiO₂ 含量增加 1 个百分点, 烧结产量下降 11.1%, 固体燃耗增加 3.99%, RDI_{+3.15 mm} 降低 3.96 个百分点; 根据烧结低温还原粉化率与高炉产量和燃料比的影响关系, 将使得高炉铁水产量降低 3.04%, 焦比增加 11.01 kg/tHM。通过本分析, 可定量地评估钒钛磁铁矿对烧结、高炉炼铁的影响。

关键词: 配矿; 钒钛磁铁矿; 烧结; 低温还原粉化; 高炉产量

中图分类号: TF046

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2018.04.025

文章编号: 0253-6099(2018)04-0098-04

Effect of Vanadium Titanium Magnetite on Sintering and Iron Making

LI Jian, MAO Xiao-ming

(Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co Ltd, Shanghai 201900, China)

Abstract: Effect of vanadium titanium magnetite on sintering productivity, fuel rate and low-temperature reduction degradation index (RDI) was studied. Results indicated that when TiO₂ content in sinter was increased by 1 percentage point, the sintering output was decreased by 11.1%, the solid fuel consumption rose by 3.99% and RDI_{+3.15 mm} fell by 3.96 percentage points. According to the correlation between RDI and fuel rate, the hot metal production from blast furnace will be reduced by 3.04% and coke rate will be increased by 11.01 kg/tHM. Based on such analysis, the effect of vanadium titanium magnetite on sintering and blast furnace iron-making can be quantitatively evaluated.

Key words: ore blending; vanadium titanium magnetite; sinter; low temperature reduction degradation; blast furnace production

随着钢铁市场回暖, 高品位铁矿石价格重新上涨。含一定量 TiO₂ 的钒钛磁铁矿价格相对较低, 但其配入烧结时, 对烧结和高炉都将带来一定的影响, 但目前对具体影响程度缺乏定量分析。

国内学者对攀枝花、承德的钒钛磁铁矿烧结研究较多^[1-6], 烧结矿中 TiO₂ 含量达到 7%~10%, 在该原料条件下, 烧结的技术指标及产质量与普通烧结矿存在较大差异, 高炉需匹配相应的冶炼制度。另有部分学者对钒钛磁铁矿在直接还原和含碳球团方面的应用开展了深入研究^[7-10]。传统钢厂在考虑配少量钒钛磁铁矿降低配矿成本的同时需兼顾钒钛对高炉冶炼的影响, 烧结中 TiO₂ 含量通常在 1% 左右。本文就钒钛磁铁矿对烧结和高炉的影响进行了定量试验和分析。

1 原料性能及试验方法

试验所用原料化学成分如表 1 所示。

表 1 原料化学成分(质量分数)/%

原料	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂
钒钛精粉	56.02	25.70	4.39	3.68	1.07	1.70	10.55
铁原料 A	64.70	27.49	4.54	1.54	1.48	1.14	0.28
铁原料 B	63.32	28.45	4.83	0.59	1.89	0.72	0.13
铁原料 C	57.23	4.67	6.47	1.96	2.50	1.05	0.31
铁原料 D	73.45	65.44	0.38	0.08	0.85	0.035	0.11
铁原料 E	38.11	24.41	6.05	2.18	6.22	1.05	0.51
生石灰	0.14	—	3.60	0.66	81.55	2.04	0.02
石灰石	0.20	—	1.51	0.45	51.78	2.53	0.03
焦粉	2.51	—	6.97	3.75	2.03	0.41	0.04

原料	MnO	P	S	Na ₂ O	K ₂ O	烧失	水分
钒钛精粉	0.026	0.016	0.200	0.012	0.006	0.93	3.10
铁原料 A	0.018	0.012	0.024	0.015	0.012	0.96	3.70
铁原料 B	0.977	0.025	0.297	0.221	0.110	0.86	3.13
铁原料 C	0.016	0.032	0.193	0.013	0.007	5.58	3.80
铁原料 D	0.098	0.008	0.037	0.007	0.001	0.04	0.92
铁原料 E	0.020	0.045	0.370	0.001	0.051	29.49	1.46
生石灰	0.007	0.001	0.001	0.058	0.115	11.72	—
焦粉	0.029	0.034	0.110	0.036	0.042	82.91	6.77

① 收稿日期: 2018-01-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0304300, 2017YFB0304301)

作者简介: 李 建(1979-), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事烧结、球团及非高炉炼铁技术研究。

分析结果表明,含铁原料中,钒钛精粉含 TiO_2 最高;其次为铁原料 E;其它含铁原料 TiO_2 含量均低于 0.5%。铁原料 A、B 铁品位较高,FeO 含量较高,均为磁铁矿类型铁精矿。铁原料 D、E 为钢铁厂内部含铁二次资源。从原料分析结果还能发现,铁原料脉石成分中,均含有一定量的 CaO 和 MgO。

原料粒度组成如表 2 所示。可见铁原料 B 粒度最细,其次为铁原料 B、E,其它几种铁原料粒度略粗。

表 2 原料粒度组成及平均粒度

原料	各粒级(mm)物料含量/%							平均粒度/mm
	+8	5~8	3~5	1~3	0.5~1	0.25~0.5	-0.25	
钒钛精粉	1.42	2.34	4.38	30.48	14.13	6.81	40.43	1.23
铁原料 A	0	1.08	3.06	4.10	2.05	0.86	88.85	0.40
铁原料 B	0	0	0	0	1.06	2.13	96.81	0.14
铁原料 C	0.00	2.14	9.47	26.40	9.67	3.04	49.28	1.19
铁原料 D	3.76	7.57	13.93	42.08	14.39	4.35	13.91	2.33
铁原料 E	1.58	1.25	0.72	2.19	6.32	6.06	81.89	0.45
生石灰	0	0	1.38	27.59	14.51	11.20	45.33	0.81
石灰石	0	0.18	8.20	46.74	19.99	3.66	21.23	1.46
焦粉	2.82	12.27	10.32	23.06	17.92	6.39	27.22	2.09

原料的制粒性与亲水性存在密切关系,通常用静态成球性指数表征亲水性的强弱。试验用原料成球性指数如表 3 所示。试验研究所用铁矿中,除铁原料 D 外,其余铁矿的静态成球性指数均在 0.36 以上。根据对成球性指数的定义及其对物料成球性难易程度的区分,铁原料 D 的成球指数在 0.2 以下,属无成球性物料,结合粒度分析,其细粒级部分含量较少,对烧结制粒影响不大。其余铁原料静态成球性指数大于 0.35 但小于 0.6,属弱成球性物料。铁原料 A 成球性指数大于 0.60,属于具有良好成球性的原料。

表 3 原料静态成球性指数

原料	最大毛细水/%	最大分子水/%	静态成球性指数
钒钛精粉	17.42	4.62	0.361
铁原料 A	17.63	6.71	0.614
铁原料 B	17.08	5.00	0.414
铁原料 C	16.25	4.40	0.372
铁原料 D	0.00	0.60	—
铁原料 E	26.69	8.16	0.441

表 5 钒钛磁铁矿对比对烧结指标的影响

钒钛精矿配比/%	燃料/%	水分/%	成品率/%	垂直烧结速度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	利用系数/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	固体燃耗/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	转鼓强度/%	返矿平衡系数
0	5.93	7.93	78.12	12.83	1.02	111.25	44.93	1.04
5	7.66	8.12	77.66	10.88	0.88	113.16	41.91	1.05
15	7.66	8.22	78.37	10.71	0.84	114.59	46.65	1.00
20	7.66	8.33	78.31	9.58	0.73	122.62	51.47	0.99

烧结采用质量配料法配料,人工干混 3 次,加水湿混 3 次,混匀后在 $\Phi 600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的圆筒混合制粒机内进行制粒。制粒完毕后,将混合料布料至直径 100 mm 的烧结杯中,杯底铺有 0.5 kg 铺底料,装料高度 700 mm;采用天然气点火,点火时间 1.5 min,点火温度 $1180 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$,点火负压 6 kPa,烧结负压 13 kPa,抽风负压 13 kPa。从点火至烧结废气温度达到最高后开始降温时所需时间即为烧结时间。到达烧结终点时,抽风负压调低至 6 kPa,冷却 5 min 后卸料,然后进行落下,检测成品率、转鼓强度等冷态性能。取成品烧结矿按 GB/T 24204-2009/ISO 13930:2007 检测其低温还原粉化指数(RDI)。

2 试验结果及讨论

2.1 钒钛磁铁矿对比对烧结的影响

按照表 4 所示的配矿方案,通过烧结杯试验,研究钒钛磁铁矿对烧结的影响。主要考察钒钛精粉 TiO_2 含量对烧结产质量的影响,以达到返矿平衡(1.00 ± 0.05)为前提,调整混合料的水和碳。

表 4 配矿方案及烧结矿主要成分

编号	配比/%			烧结矿成分/%		
	钒钛精粉	铁原料 B	生石灰	MgO	TiO_2	TFe
P6	0.00	60.95	7.65	0.92	0.17	58.97
P7	5.00	55.95	7.65	0.98	0.72	58.58
P8	15.00	45.95	7.65	1.08	1.82	57.81
P9	20.00	40.90	7.70	1.13	2.38	57.40

注:① 4 种配方的计划碱度均为 1.64;② 4 种配方中铁原料 A、C、D 和 E 的配比均为 18.00%、7.00%、1.20% 和 1.20%;③ 4 种配方中焦粉的配比均为 4.00%。

随着钒钛精矿配比由 0% 增加到 20%,烧结矿中 TiO_2 含量由 0.17% 增加到 2.38%。在确保返矿平衡(1.00 ± 0.05)的条件下,调整烧结过程燃料、水分含量,钒钛磁铁矿对比对烧结指标的影响如表 5 所示。可见,烧结成品率和转鼓强度变化无明显的规律性,但利用系数显著下降,烧结固体燃耗明显增加。

将钒钛磁铁矿与烧结利用系数、固体燃耗的关系进行相关性分析,如图 1 所示。随着烧结矿中 TiO_2 含量增加,烧结利用系数显著下降,对其进行线性模拟,

得到回归方程为： $y = -0.1124x + 1.0105$ ，回归系数 R^2 达到 0.8931，说明在本次烧结试验中，利用系数的变化有 89.3% 是由烧结矿中 TiO_2 含量即钒钛磁铁矿配比变化引起的。根据该回归方程可知，烧结矿中 TiO_2 含量增加 1 个百分点，烧结产量下降 11.1%。随着烧结矿中 TiO_2 含量增加，烧结矿固体燃耗显著增加，得到回归方程为： $y = 4.3864x + 109.82$ ，回归系数 R^2 为 0.7814，即固体燃耗增加有 78.1% 是由钒钛磁铁矿配比增加导致的。烧结矿中 TiO_2 每增加 1 个百分点，固体燃耗增加 3.99%。

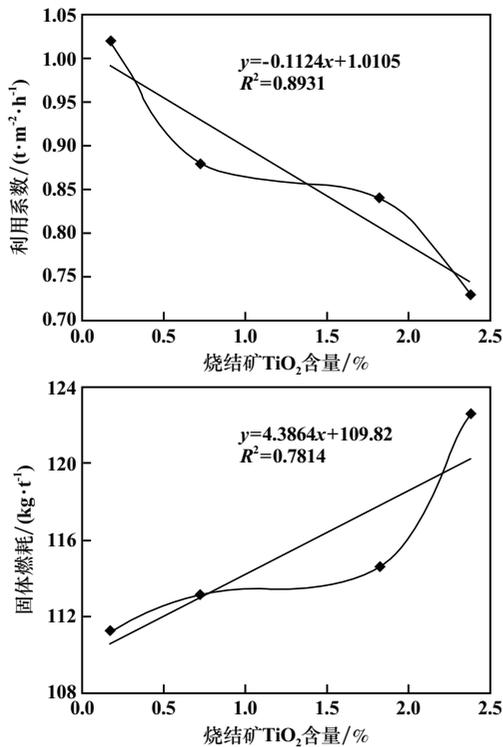


图1 TiO_2 含量对烧结利用系数及固体燃耗的影响

2.2 钒钛磁铁矿对高炉指标的影响

李涛^[11]介绍了钛矿对八钢高炉的影响：2014年，八钢高炉入炉 TiO_2 负荷为 10~15 kg，日本鹿岛 3[#]高炉 5 050 m³ 操作实践表明， TiO_2 负荷 15 kg，铁水和炉渣的流动性并没有恶化到影响高炉操作的程度^[12]。国内研究者也对含钛烧结矿的软熔性能进行了深入的研究^[13-15]，表明随着矿石 TiO_2 含量提高，矿石的软化温度升高，软熔区间变宽，但其研究的矿石含 TiO_2 通常达到 6%~14%，且未能得出软熔性能变化对高炉消耗指标的影响。鉴于八钢所用烧结矿 TiO_2 含量远低于国内其它研究者的研究值，且软熔性能与高炉消耗的指标缺乏量化的关系，故本文将研究重点放在不同 TiO_2 含量烧结矿的低温还原粉化变化上，进而根据低温还原粉化对高炉产量及消耗指标的影响，分析矿石

中 TiO_2 含量变化对高炉指标的影响。

图2为不同 TiO_2 含量烧结矿的低温还原粉化指标。研究表明，随着烧结矿中 TiO_2 含量提高，烧结矿低温还原粉化指数显著恶化。这是由于随着钒钛矿配比增加，烧结矿内钙钛矿、钛赤铁矿、钛磁铁矿等含量增多，烧结矿矿相组成更加复杂，抵抗低温还原应力能力变差，故粉化指数恶化。2个回归方程的回归系数 R^2 均大于 0.9，表明低温还原粉化的变化与烧结矿 TiO_2 含量显著相关。烧结矿 TiO_2 含量每增加 1 个百分点， $RDI_{+6.3\text{mm}}$ 降低 4.2697 个百分点， $RDI_{+3.15\text{mm}}$ 降低 3.9645 个百分点。

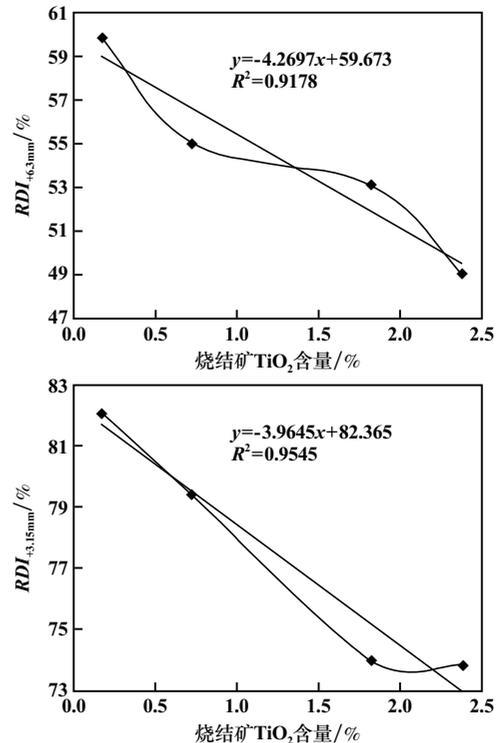


图2 烧结矿 TiO_2 含量对低温还原粉化指数的影响

国内炼铁工作者通过烧结矿喷洒 $CaCl_2$ 溶液工业试验，研究了低温还原粉化与高炉操作指标之间的关系^[16-19]，表6为比较典型的研究结论。

表6 低温还原粉化指标对高炉的影响

项目	炼钢单位	产量增加 /%	焦比降低 / (kg·tHM ⁻¹)
$RDI_{+6.3\text{mm}}$ 增加 10 个百分点	柳钢	2.07	8.58
	湘钢	—	—
$RDI_{+3.15\text{mm}}$ 增加 10 个百分点	柳钢	5.02	20.76
	湘钢	10.30	34.77

注：① 柳钢数据来源于文献^[16]，4[#]高炉，306 m³；
② 湘钢数据来源于文献^[17]，2[#]高炉，750 m³。

对比研究结论，可发现有如下规律： $RDI_{+3.15\text{mm}}$ 的变化对高炉消耗影响更为明显。取两者数据的平均值作

为参考,即 $RDI_{+3.15\text{ mm}}$ 增加 10 个百分点,对产量的影响为 7.66%,焦比为 27.77 kg/tHM,结合前面 $RDI_{+3.15\text{ mm}}$ 研究结果推算,烧结矿中 TiO_2 含量增加 1 个百分点,高炉产量降低 3.04%,焦比增加 11.01 kg/tHM。

3 结 论

综合上述研究和分析,烧结过程中增加钒钛磁铁矿配比,虽然配矿成本降低,但烧结矿产量降低、固体燃料增加,且烧结矿低温还原粉化指数恶化,进而影响高炉产量和燃料消耗。具体影响幅度为:烧结矿中 TiO_2 含量在 0.17%~2.38% 之间,随着烧结矿中 TiO_2 含量增加 1 个百分点,烧结矿产量降低 11.1%,固体燃料增加 3.99%,低温还原粉化率 $RDI_{+3.15\text{ mm}}$ 降低 3.96 个百分点,高炉铁水产量预计降低 3.04%,焦比增加 11.01 kg/tHM。

参考文献:

- [1] 李凤臣,孙艳芹,孙丽芬,等. 承德钒钛磁铁矿低碱度烧结试验研究[J]. 钢铁研究, 2012,40(5):1-4.
- [2] 孙艳芹,王瑞哲,吕 庆,等. TiO_2 质量分数对中钛型烧结矿质量影响的研究[J]. 中国冶金, 2013,23(10):6-9.
- [3] 蒋大军,何木光,甘 勤,等. 钒钛磁铁矿低硅烧结强化试验与应用[J]. 矿业工程, 2011,9(2):29-33.
- [4] 张义贤,何木光,饶家庭,等. 中钛型钒钛磁铁矿烧结试验[J]. 四川冶金, 2011,33(5):18-21.
- [5] 刘 然,李 超,吕 庆,等. 承德钒钛磁铁矿粉基础特性及烧结试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2014,35(4):71-76.
- [6] 汪智德,石 军,何 群. 不同富矿配比下钒钛磁铁矿烧结制度的

探讨[J]. 烧结球团, 1998,23(4):8-14.

- [7] 洪陆阔,武兵强,李鸣铎,等. 钒钛磁铁矿含碳球团直接还原工艺分析[J]. 矿冶工程, 2017,37(3):86-89.
- [8] 张 波,文 雯,张建良,等. 低镁钒钛磁铁矿内配碳球团还原控制机制研究[J]. 矿冶工程, 2014,34(6):65-69.
- [9] 汪云华. 内配碳固态还原钒钛磁铁矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2013,33(4):91-93.
- [10] 李俊翰,邱克辉,杨绍利,等. 钒钛磁铁矿内配碳球团强度性能研究[J]. 矿冶工程, 2014,34(1):57-60.
- [11] 李 涛,王宗乐,杜学义. 高炉配加钒钛矿的生产实践[J]. 新疆钢铁, 2011(2):28-29.
- [12] 小岛政辉. 鹿岛 3 号高炉操作状况[J]. 武钢技术, 1990(4):9-16.
- [13] 刁日升. 钒钛矿与普通矿在高炉各带行为差异的研究[J]. 钢铁, 1996,31(2):12-16.
- [14] 杜 钢,杜鹤桂. 钒钛磁铁矿的还原、软化和滴落特性的研究[J]. 钢铁钒钛, 1984(2):74-78.
- [15] 宋国才,苑天宇,陈小武. 高炉冶炼钒钛烧结矿软熔滴落带物相组成研究[J]. 钢铁钒钛, 1996,17(2):25-27.
- [16] 尹 怡,黄 宁,朱尚朴. 降低我厂烧结矿低温还原粉化的试验研究[J]. 柳钢科技, 1998(z):16-20.
- [17] 王中一. 降低湘钢烧结矿低温还原粉化率的试验[J]. 烧结球团, 1997,22(3):27-29.
- [18] 金龙忠,张永中,文振国. 马钢一铁烧结矿喷洒水新型抑制粉化剂的效果[J]. 烧结球团, 2009,34(3):55-58.
- [19] 郑 皓,梁世标. 韶钢烧结矿喷洒水 CaCl_2 溶液工业试验[J]. 炼铁, 1999,18(5):20-22.

引用本文: 李 建,毛晓明. 钒钛磁铁矿对烧结及炼铁的影响分析[J]. 矿冶工程, 2018,38(4):98-101.

(上接第 97 页)

参考文献:

- [1] 林 梅,王湘平. 铅和镉胁迫对黄瓜种子萌发期间的毒害效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012,38(1):41-45.
- [2] 舒 艳,李科林,宋金凤,等. 狭叶香蒲活性炭对 Cd^{2+} 与 Pb^{2+} 的吸附及机理分析[J]. 环境工程学报, 2016,10(1):181-188.
- [3] 晋玉秀,杨秀培,刘建军,等. 阴极还原法治理含铜废水的影响因素[J]. 矿冶工程, 2005,25(6):55-56.
- [4] 程建国,林永树,阳华玲,等. 石灰絮凝法去除矿坑废水中锰离子的研究[J]. 矿冶工程, 2012,32(2):45-48.
- [5] 鲁雪梅,熊 鹰,张广之,等. 锰氧化物-阳离子交换树脂复合材料的制备及其对水中重金属的吸附性能[J]. 环境化学, 2012,31(10):1580-1589.
- [6] 张 蕊,葛 滢. 稻壳基活性炭制备及其对重金属吸附研究[J]. 环境污染与防治, 2011,33(1):41-45.
- [7] 谈 宇,付 旺,廖好婕,等. 复合改性膨润土固定尾矿中 Zn 的研究[J]. 环境工程学报, 2015,9(1):381-386.
- [8] 官章琴,金春姬,任 娟,等. 松果对废水中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸附特性研究[J]. 工业用水与废水, 2010,41(4):59-63.
- [9] Md Juned K Ahmed, Ahmaruzzaman M. A review on potential usage of industrial waste materials for binding heavy metal ions from aqueous

solutions [J]. Journal of Water Process Engineering, 2016,10(4):39-47.

- [10] Ouyang X K, Yang L P, Wen Z S. Adsorption of $\text{Pb}(\text{II})$ from solution using peanut shell as biosorbent in the presence of amino acid and sodium chloride [J]. BioResources, 2014,9(2):2446-2458.
- [11] Ding Z H, Yu R, Hu X, et al. Graft copolymerization of epichlorohydrin and ethylenediamine onto cellulose derived from agricultural by-products for adsorption of $\text{Pb}(\text{II})$ in aqueous solution [J]. Cellulose, 2014,21(3):1459-1469.
- [12] 黄红丽,罗 琳,王 寒,等. 猪粪堆肥中铜锌与腐殖质组分的结合竞争[J]. 环境工程学报, 2014,8(9):3978-3982.
- [13] 袁 宇,黄红丽,罗 琳. 堆肥对水体重金属铜和锌的吸附性能研究[J]. 湖南农业科学, 2014(4):32-34.
- [14] 赵 玲,尹平河, Yu Qi Ming, 等. 海洋赤潮生物原甲藻对重金属的富集机理[J]. 环境科学, 2001,22(4):42-45.
- [15] Pehlivan E, Yanik B H, Ahmetli G, et al. Equilibrium isotherm studies for the uptake of cadmium and lead ions onto sugar beet pulp [J]. Bioresource Technology, 2008,99(9):3520-3527.

引用本文: 魏东宁,杜淑雯,罗 琳,等. 改性吸附剂对水中 $\text{Cu}(\text{II})$ 的去除效果研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(4):94-97.