Metallurgical Engineering 冶金工程, 2017, 4(3), 147-157
Published Online September 2017 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/meng
https://doi.org/10.12677/meng.2017.43022

Analysis and Countermeasures of Using Iron Ore with High Content of Al_2O_3

Weiling Zhang[1], Jiyuan Wang[1], Chaoyang Lin[2]

[1]Technique & Products Manufacturing Department of Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang Guangdong
[2]Iron-Making Plant of Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang Guangdong
Email: 684880@baosteel.com

Received: Jul. 26th, 2017; accepted: Aug. 11th, 2017; published: Aug. 17th, 2017

Abstract

According to the prediction of iron ore price in 2017, the calculation result showed that if the ratio of high Al_2O_3 iron ore in blended ore increased, within the content of Al_2O_3 in blast furnace slag increased by 0.1 percent, the cost of blended ore could reduce 8.08 million yuan per year. However, the increased usage of high Al_2O_3 iron ore resulted in a rise of Al_2O_3 in sinter and blast furnace slag. In order to reduce the negative effect brought by the adoption of high Al_2O_3 smelting in the actual production, the influence of Al_2O_3 on the metallurgical properties of sinter and blast furnace smelting was analyzed and the countermeasures were given based on the present production performance and the slag phase diagrams. The realization of decreasing costs and increasing benefits was expected.

Keywords

High Content of Al_2O_3, Blast Furnace, Sintering, Cost of Blended Iron Ore

使用高Al_2O_3铁矿的影响分析及对策探讨

章苇玲[1]，王纪元[1]，林朝阳[2]

[1]宝钢湛江钢铁有限公司制造管理部，广东 湛江
[2]宝钢湛江钢铁有限公司炼铁厂，广东 湛江
Email: 684880@baosteel.com

收稿日期：2017年7月26日；录用日期：2017年8月11日；发布日期：2017年8月17日

摘 要

根据2017年预测矿价概算，提高高Al_2O_3铁矿配比使高炉渣中Al_2O_3含量每升高0.1%，一年可降低配矿

文章引用: 章苇玲, 王纪元, 林朝阳. 使用高 Al_2O_3 铁矿的影响分析及对策探讨[J]. 冶金工程, 2017, 4(3): 147-157.
DOI: 10.12677/meng.2017.43022

成本808万元。增加高Al_2O_3铁矿石的使用量将导致烧结矿和高炉炉渣Al_2O_3含量上升，针对高Al_2O_3铁矿的生产工艺，结合目前生产实绩和渣系相图等理论方面分析了Al_2O_3对烧结矿冶金性能和高炉冶炼的影响作用，并给出建议优化方向和调节途径。为降低实际生产采用高Al_2O_3冶炼时带来的负面影响、打破因Al_2O_3对降本的限制奠定技术基础，推动降本增效目标的实现。

关键词

高Al_2O_3，高炉，烧结，配矿成本

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着世界范围内有限的铁矿资源不断被使用和高品位铁矿石消耗量逐渐增加，造成优质铁矿石资源稀缺且价格居高不下。图 1 列出了国外四大矿石公司产品近几年的预测 Al_2O_3 含量波动趋势，由图可见进入市场的铁矿石中的 Al_2O_3 含量大部分呈逐渐增加的趋势，澳洲矿中 Al_2O_3 含量普遍要高于巴西矿。故湛江钢铁以“降本增效”为目标，为降低生产成本、提高市场竞争力提高，突破用矿结构、增加价格相对低廉的高 Al_2O_3 铁矿石资源的使用比例是必然的发展趋势。但在湛钢目前的生产指标条件下，Al_2O_3 含量的提高势必会影响烧结矿性能和高炉高效生产。

本文重点结合生产实绩从理论方面就使用高 Al_2O_3 铁矿对烧结、高炉冶炼带来的影响进行分析，并对烧结矿质量、高炉渣系的优化方向进行探讨，为减轻高 Al_2O_3 铁矿在实际使用带来的负面影响提供一定的指导依据，对湛钢的降本增效具有重要的推动作用。

2. 提升高 Al_2O_3 矿配比的配矿成本价差值概算

根据湛江钢铁目前配矿结构和 2017 年年度配矿方案，烧结用矿石主要是使用 2 种巴西矿 + 2 种澳洲矿 + 小部分其它远程矿，其中澳洲矿 Al_2O_3 含量比巴西矿平均高 0.5%，但巴西矿的 17 年预测矿价比澳洲矿高出 40 元/吨。

现假定高炉渣中 Al_2O_3 含量可适度提高 0.1%，对配矿成本差值进行概算：

高炉渣比/kg	280
高炉渣中 Al_2O_3 含量提升/%	0.10
吨铁渣多排放 Al_2O_3/kg	280 × 0.1% = 0.280
澳矿替代部分巴矿计算吨铁渣多排放 Al_2O_3/kg	0.280 × (61 ÷ 65) = 0.263
吨铁可降巴西矿量/kg	0.263 ÷ (2.4% − 1.6%) = 38
吨铁可增澳洲矿量/kg	38 × (65 ÷ 61)=40
800 万吨铁水降巴西矿量/wt	800 × 0.038 = 30.4
800 万吨铁水增澳洲矿量/wt	800 × 0.040 = 32
巴西矿 – 澳洲矿进厂价差值(元/t)	45
配矿差值/万元	30.4 × 45 − 350 × (32 − 30.4) = 808

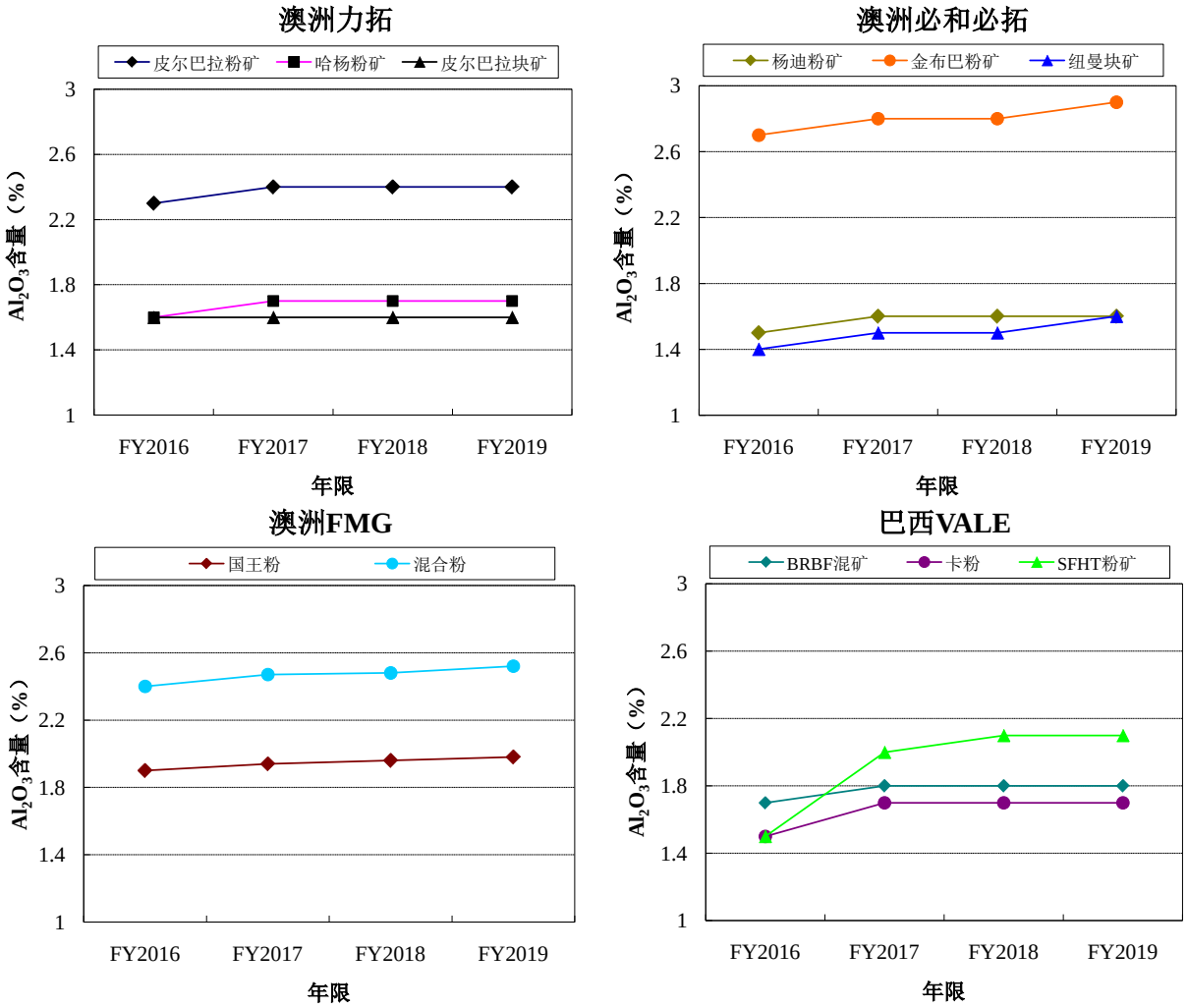


Figure 1. The 2016 performance and post prediction value of Al_2O_3 in the products of four major foreign ore companies
图 1. 四大国外矿石公司产品含 Al_2O_3 量 2016 年实绩及后期预测值

由理论计算，若高炉渣中 Al_2O_3 含量能提升 0.1%，则可增加高铝澳洲矿降低巴西矿使用量，根据 2017 年矿价差异，一年降低配矿成本 808 万元，经济效益可观。

虽提升澳矿使用量对生产有一定负面影响，但在目前的钢铁市场形势下，各钢厂都在寻求提升效益途径，故需对高 Al_2O_3 高炉渣生产的可行性进行探讨，打破因 Al_2O_3 含量对降本的限制。

3. 国外高 Al_2O_3 炉渣冶炼的生产实践

查找相关文献[1] [2]，表 1 统计了近年来国外典型高炉炉渣 Al_2O_3 含量在 15%以上水平冶炼的公司的相关指标。国外采用高 Al_2O_3 渣冶炼，要高于我们的 Al_2O_3 水平。故认为只要采取有效措施，适当提高高 Al_2O_3 铁矿的使用配比、高炉高 Al_2O_3 渣冶炼、达到降低成本的目标在实际生产中是可以实现的。

4. 高 Al_2O_3 矿对烧结影响及优化方向

4.1. 高 Al_2O_3 对烧结矿冶金性能的影响

图 2 是对 2016 年湛钢 1#烧结机生产烧结矿的几个指标汇总。从图中可看出，烧结矿中的 Al_2O_3 含量

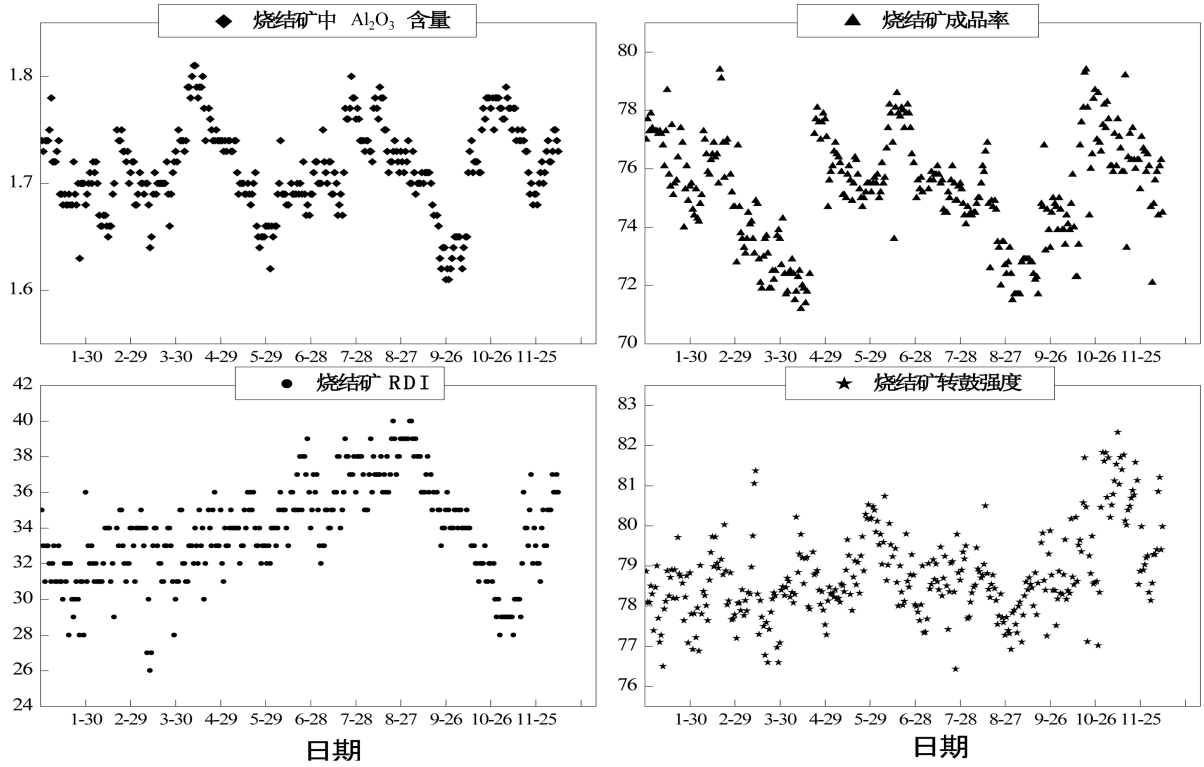


Figure 2. Summary of performance indexes of 1# sintering in 2016
图 2. 2016 年 1#烧结机生产指标实绩汇总

Table 1. Main blast furnace slag components of some typical overseas plants
表 1. 国外典型高炉炉渣的主要成分

高炉	(Al_2O_3)/%	(MgO)/%	炉渣碱度
光阳高炉	16	5	1.18
浦项高炉	15.5	3.3	1.2
霍戈文高炉	17.4	10.2	1.15
印度 Durgapur 高炉	20.1	9.5	1.1

是控制在 1.6%~1.8%范围内波动，对烧结矿的成品率、低温还原粉化(RDI − 2.8 mm)以及转鼓强度(TI + 6.3 mm)无明显的线性影响规律。说明在目前生产实绩范围内的 Al_2O_3 含量相比较于烧结矿其他成分指标，如碱度、SiO_2 含量、MgO 含量等，对烧结矿性能的影响作用较不突出。

结合现场生产实绩和高 Al_2O_3 烧结矿类文献的研究结果[3] [4] [5] [6] [7]，Al_2O_3 是烧结矿中不可缺少的成分，其主要存在于黄长石、铁酸钙和硅酸盐渣相中，一定量的 Al_2O_3 有利于四元系针状交织结构的复合铁酸钙(SFCA)的形成，可提高烧结矿强度。同时由于 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的晶格常数相近，能广泛溶于 Fe_2O_3 中，促进 Fe_2O_3 的生成，故在一定范围内增加 Al_2O_3 含量可明显提升铝固溶复合铁酸钙 $CaO{\cdot}SiO_2$-$CaO{\cdot}3(Fe、Al)_2O_3$，降低磁铁矿相，改善烧结矿的还原性能。但是 Al_2O_3 含量太高时，在赤铁矿中固溶量增加，促使 Fe_2O_3 再结晶连晶，由粒状向骸晶状、片状发展，则在低温还原过程中，晶体结构变化产生的膨胀应力由较为分散变得相对集中，促使膨胀激烈化，故使烧结矿强度和低温还原粉化率性能变坏，影响烧结生产率。

4.2. 高 Al_2O_3 烧结矿质量优化方向

由上分析，高 Al_2O_3 含量主要影响到烧结矿的冷强度低温还原粉化率和强度，宝钢股份大院是通过对烧结台面喷洒 $CaCl_2$ 溶液改善烧结矿低温还原粉化，但在湛钢顾及到 $CaCl_2$ 溶液对生产系统有腐蚀作用且氯化物排放严重污染环境[8]，现结合湛钢实际生产中指标波动及各因素间的相互影响关系(见图 3)，高 Al_2O_3 烧结生产时可考虑从以下几个方向改善烧结矿质量：

1) 根据高炉炉料结构适当提高烧结矿碱度。结合后期高炉炉料优化分析，需适当提高烧结矿碱度。碱度提高，烧结矿中铁酸钙和复合铁酸钙相增多，骸晶 Fe_2O_3 下降，改善烧结矿强度和低温还原粉化；

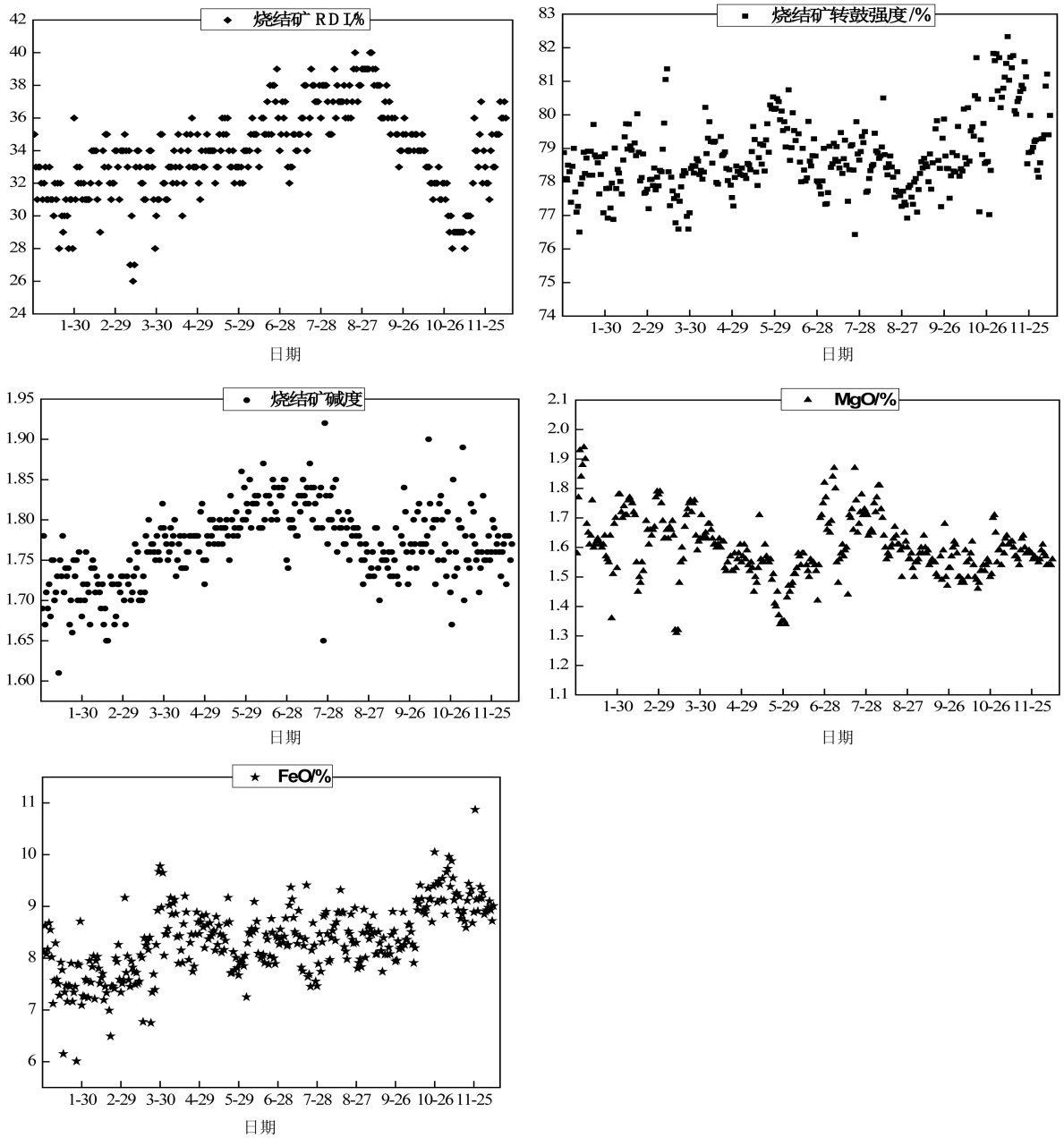


Figure 3. Summary of sinter quality indexes produced by 1# sintering in 2016
图 3. 2016 年 1#烧结机生产烧结矿质量指标实绩汇总

2) 适当提高烧结矿的 MgO 含量。MgO 提高后，更多 Mg^{2+}固溶于磁铁矿促进难还原的磁铁矿稳定存在，减少再生赤铁矿生成量，降低低温还原粉化率。同时也会生成较多难还原的钙镁橄榄石等矿物，这些矿物与磁铁矿、铁酸钙形成熔蚀交织结构，使烧结矿更致密，有利于强度的提高，但更难还原；

3) 适当提高烧结矿的 FeO 含量。相关研究均表明[4] [6]，烧结矿中一定范围内的 FeO 含量对 RDI − 2.8 mm 值由明显的负相关影响。FeO 高，表明还原气氛强，抑制再生赤铁矿的生成，有利于粘结相中发展抗粉化性高的亚铁盐等。但过高的 FeO 含量同样存在着降低烧结矿还原性的问题。

5. 高 Al_2O_3 矿对高炉冶炼的影响及应对措施

5.1. 高 Al_2O_3 对高炉生产过程的影响

5.1.1. 高 Al_2O_3 对高炉终渣性能的影响

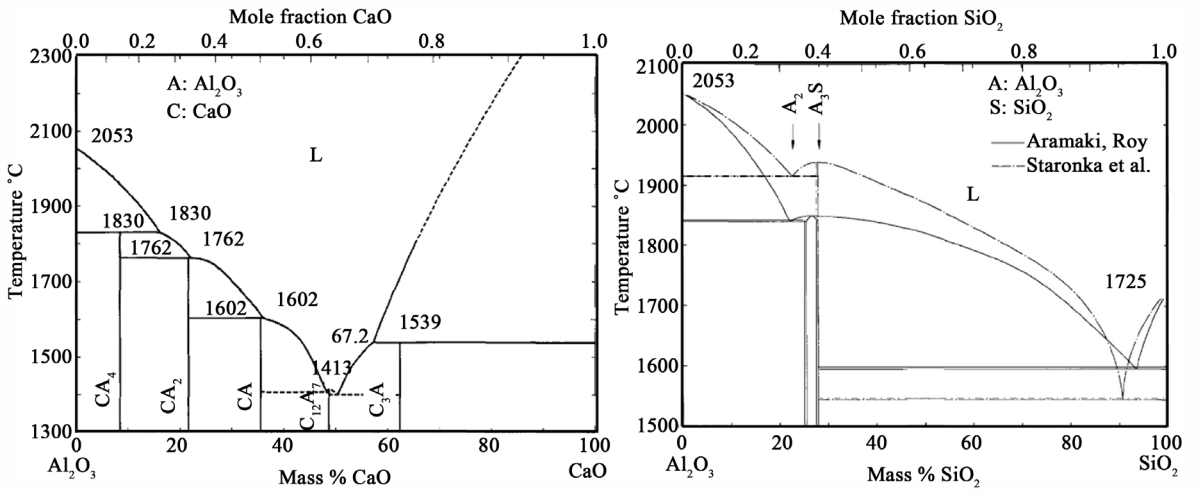
氧化物 Al_2O_3 熔点高 2050℃，根据图 4 的 Al_2O_3-CaO 和 Al_2O_3-SiO_2 二元相图可知，Al_2O_3 单独与 CaO 或 SiO_2 结合的化合物熔点高(>1545℃)。但在高炉冶炼中，根据图 5 的渣系四元相图 Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO 可知，Al_2O_3 会同时与 CaO、SiO_2、MgO 等多种成分结合，在一定条件下可生成低熔点(<1500℃)的物质，形成流动性良好的炉渣。从图 4 也可发现，渣中过低或过高的 Al_2O_3 范围内炉渣熔化温度均有所上升。

图 6 给出了渣中 Al_2O_3 含量在 5%~30%波动时的 Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO 四元渣系等温相图，图中粗实线为 1500℃熔点的等温曲线。从图中可看出，低熔化温度区域在 Al_2O_3 低于 15%时随 Al_2O_3 含量的增加而扩展，在 Al_2O_3 高于 20%后随 Al_2O_3 含量的增加而明显缩小，因而一定条件下适当提高 Al_2O_3 含量是有利于造渣的，但不宜高于 20%。

再通过分析图 7 的 1500℃条件下 Al_2O_3-CaO-SiO_2 三元渣系等粘度相图可见，在同为 1.0 的碱度时 A 点 15% Al_2O_3 渣系粘度比 B 点 20% Al_2O_3 渣系低 0.15 Pa·s；在固定 20% Al_2O_3 改变碱度时，C 点 1.2 碱度渣系粘度比 B 点 1.0 碱度渣系粘度低 2.5 Pa·s。从粘度线间距可看出，Al_2O_3 含量在低于 15%时，炉渣稳定性随 Al_2O_3 含量增加而增强；在高于 20%时，炉渣稳定性随 Al_2O_3 含量增加而变差。

5.1.2. 高 Al_2O_3 对高炉软熔带的影响

使用高 Al_2O_3 铁矿必然引起烧结矿中 Al_2O_3 含量提高，烧结矿作为高炉入炉主要含铁炉料，其软融



(注：文中相图图片均来源于《渣图集－(西德)德国钢铁工程师协会》)

Figure 4. Binary phase diagrams of Al_2O_3-CaO and Al_2O_3-SiO_2
图 4. Al_2O_3-CaO 和 Al_2O_3-SiO_2 二元相图

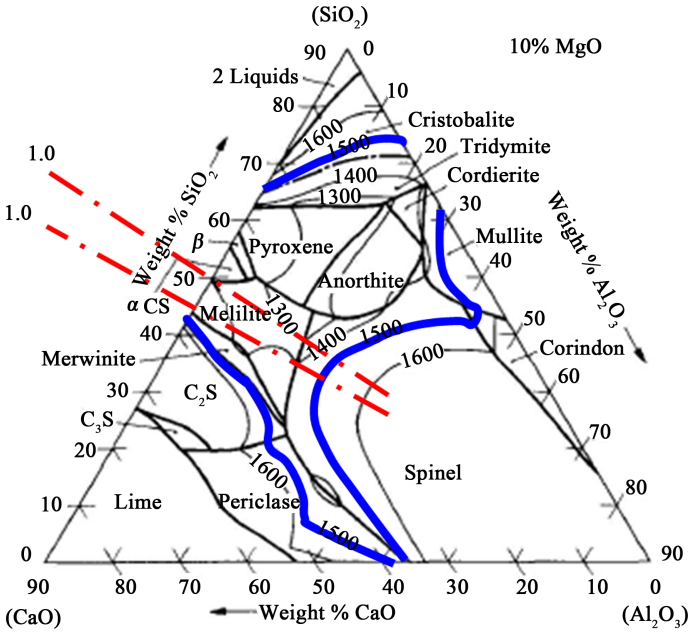


Figure 5. Quarternary phase diagram of Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO melts
图 5. 高炉渣系 Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO 四元相图

滴落性能会对高炉软熔滴落带的大小、位置和透气性等产生影响[9]。烧结矿熔融滴落行为伴随着金属铁的渗碳和聚合过程。通过渗碳反应使得还原得到的金属铁熔点降低并提高其流动性；还原流动的金属铁会产生聚合，但由于金属铁之间被渣相填充，故渣相的性能对金属铁的聚合有较大影响[10] [11]。由图 6 和图 7 可知，在碱度为 1.8 左右使，渣相的液相线温度和粘度均随 Al_2O_3 含量的增加而提高。因此过高 Al_2O_3 烧结矿的滴落温度升高，造成在高炉炉身部位的软熔滴落带变宽，影响炉内压差，造成高炉操作上的困难。

5.1.3. 高 Al_2O_3 对炉渣脱硫能力的影响

高炉内脱硫反应可用式(1)表示：

$$[S]+\left(O^{2-}\right)=\left(S^{2-}\right)+[O] \tag{1}$$

铁水硫容量：

$$[\%S]=\frac{N_{S^{2-}}\cdot[\%O]}{N_{O^{2-}}\cdot K_S}$$

K_S：迁移反应平衡常数

则当炉渣中 Al_2O_3 含量过高时，会与 O^{2-}结合形成铝氧复合负离子，降低了炉渣中 O^{2-}浓度，抑制反应向右进行，故在炉温、炉渣碱度一定的条件下，Al_2O_3 含量上升将导致 CaO 等物质的绝对含量下降，从而减弱炉渣的脱硫能力。

针对高 Al_2O_3 对高炉生产可能带来的几点负面影响，结合目前高炉生产指标和理论分析认为，可从三方面采取应对措施：

1) 增加烧结矿中 MgO 含量，可改善高 Al_2O_3 烧结矿的熔滴性和高炉软熔带特性。MgO 促进含镁磁铁矿、钙镁橄榄石等高熔点矿物，烧结矿软化温度、熔化温度均上升，高炉内软熔区间和滴落区间变薄，压差减小。

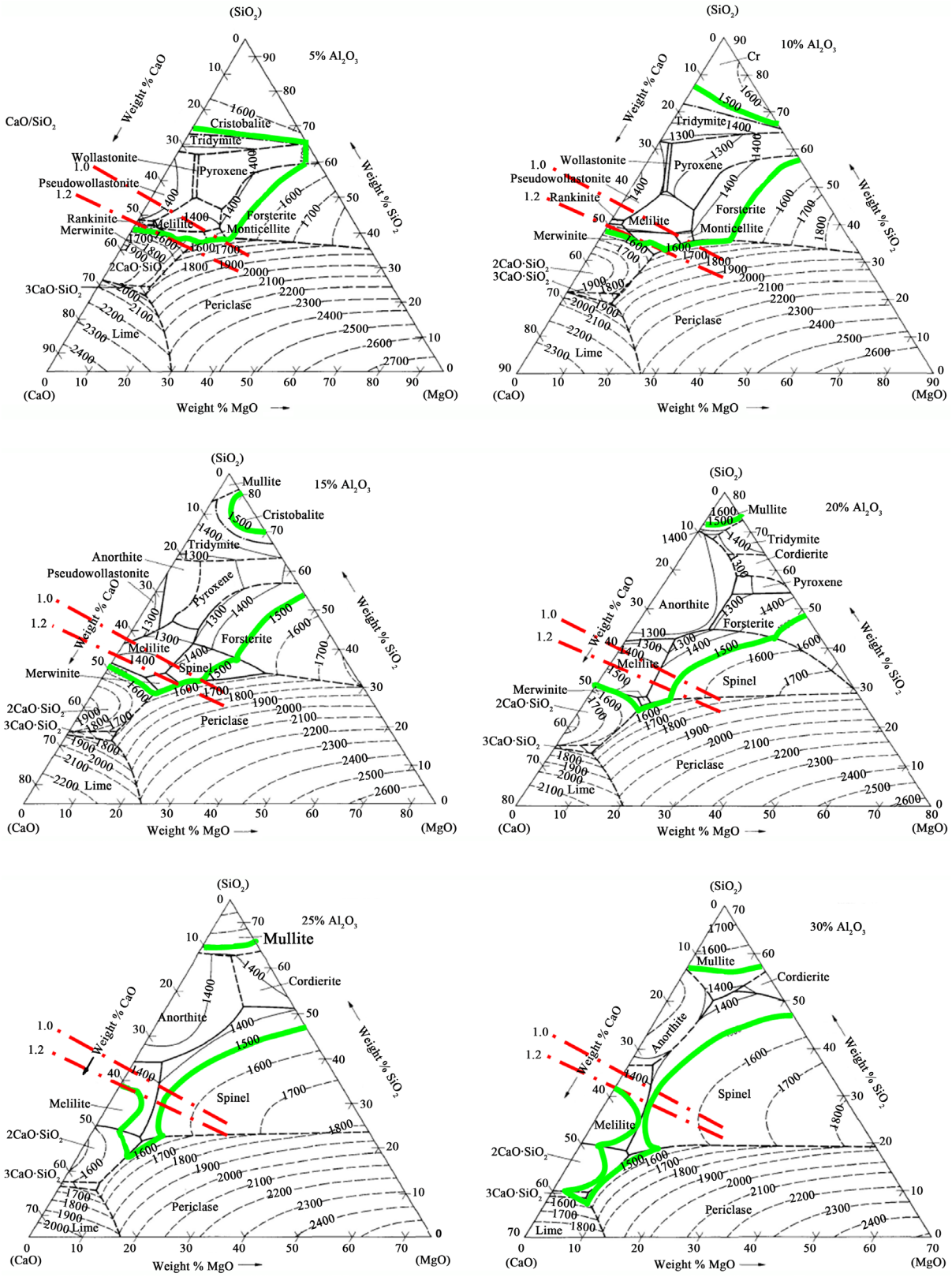


Figure 6. Quarternary isothermal phase diagram of Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO melts
图 6. Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO 四元渣系等温相图

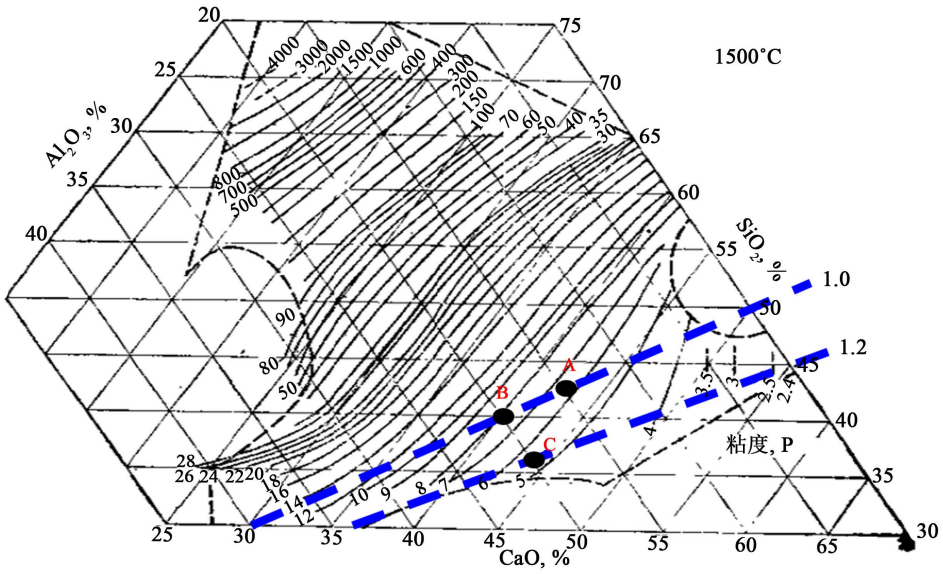


Figure 7. Iso-viscosity contours of Al_2O_3-CaO-SiO_2 melts at 1500˚C
图 7. 1500˚C Al_2O_3-CaO-SiO_2 三元渣系等粘度相图

2) 适当提高炉渣碱度控制目标值，一方面由图 6 和图 7 分析，一定碱度范围内提高炉渣碱度可改善因 Al_2O_3 升高引起的渣系液相温度上升和粘度上升等现象；另一方面碱度适当提高会增强炉渣脱硫能力。可参照目前炉渣碱度 1.22 控制。

3) 适当提高炉渣 MgO 控制目标值。现阶段湛钢高炉渣 MgO 含量是 7.0%~7.5%、(%MgO)/(%Al_2O_3)比值在 0.45~0.5 的水平，炉渣性能良好。图 8 是渣中 MgO 含量在 5%~15%波动时的 CaO-SiO2-MgO-Al_2O_3 四元渣系等温相图，对比发现：MgO 含量低于 10%时，提高 MgO 会增大低温熔化区域；若 MgO 上升至 15%低温区域明显变小。再对比图 9 的 CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3 四元等粘度相图中 D 点和 E 点两处渣系粘度，可见适当提高 MgO 有助于降低炉渣粘度。同时，由于 MgO 属于碱性物质，在熔融状态下会离解出 O^{2-}提高炉渣中自由氧离子，有利于脱硫。

6. 结论

1) 根据 2017 年预测矿价概算，高炉冶炼每提升渣中 Al_2O_3 含量 0.1%，一年可降低配矿成本 808 万元，经济效益可观。

2) 一定量的 Al_2O_3 有利于烧结矿中复合铁酸钙(SFCA)的形成，提高烧结矿强度；Al_2O_3 含量太高会使烧结矿强度和低温还原粉化率性能变坏，影响烧结生产率。

3) 高 Al_2O_3 烧结生产时可考虑从以下几个方向改善烧结矿质量：根据高炉炉料结构适当提高烧结矿碱度；适当提高烧结矿的 MgO 含量；适当提高烧结矿的 FeO 含量。具体量化的最优值需根据生产实绩指标调整总结出。

4) 高炉渣中 Al_2O_3 在 10%~15%区间内时，炉渣流动性、粘度以及稳定性较好，过低或过高均不利于炉渣性能；高 Al_2O_3 冶炼造成在高炉炉身部位的软熔滴落带变宽，影响炉内压差；炉渣中高 Al_2O_3 将导致 CaO 等物质的绝对含量下降，减弱炉渣的脱硫能力。一般渣中 Al_2O_3 不宜高于 20%。

5) 炉渣中适宜的碱度和适宜含量的 MgO 有助于改善因高 Al_2O_3 造成的终渣流动性、脱硫能力变差等负面影响。可根据目前实际生产中的(%MgO/%Al_2O_3)比值控制高 Al_2O_3 生产时适宜的碱度在 1.22 左右、适宜的 MgO 含量在 6%~10%。

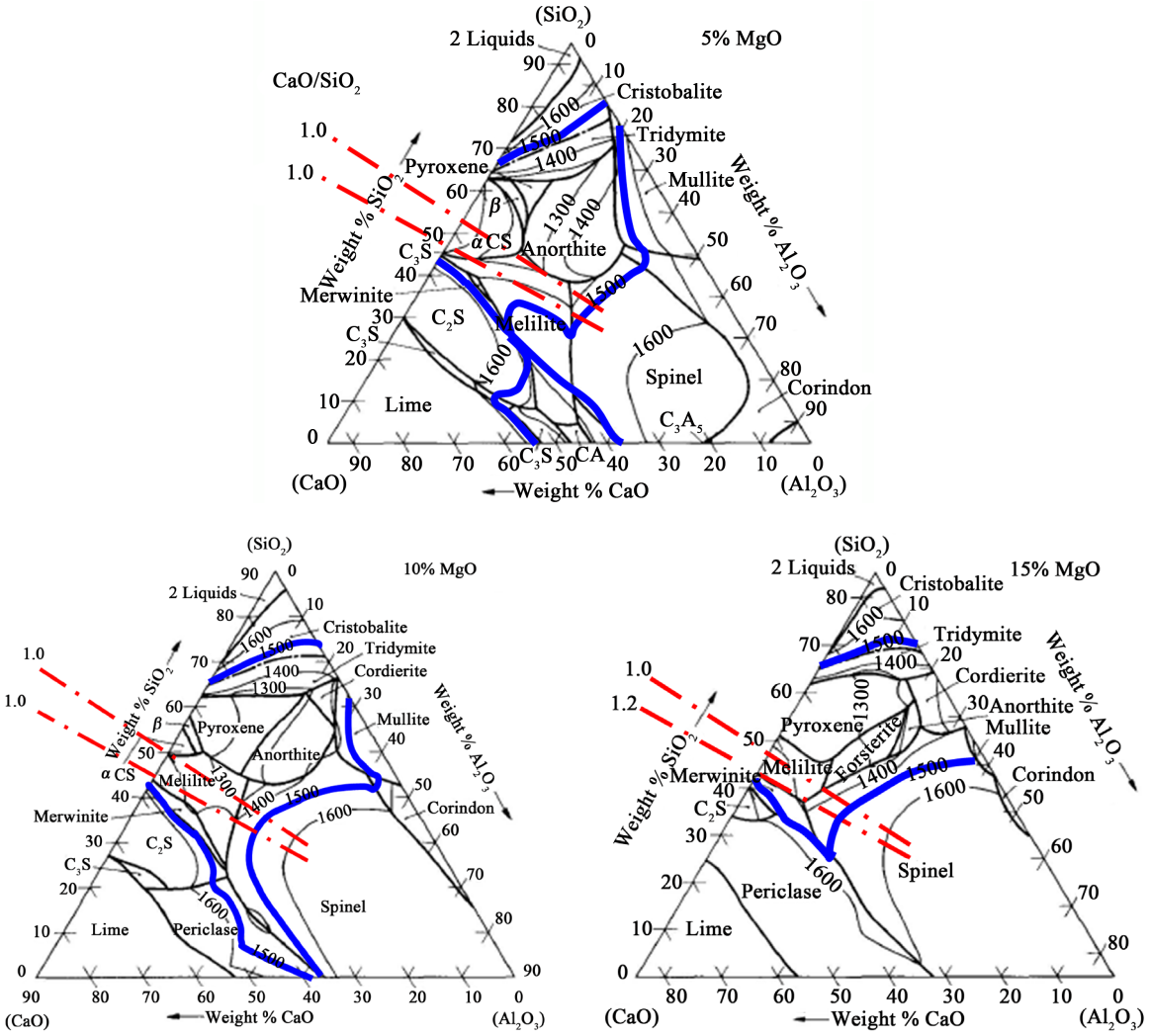


Figure 8. Quarternary isothermal phase diagram of Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO melts
图 8. Al_2O_3-CaO-SiO_2-MgO 四元渣系等温相图

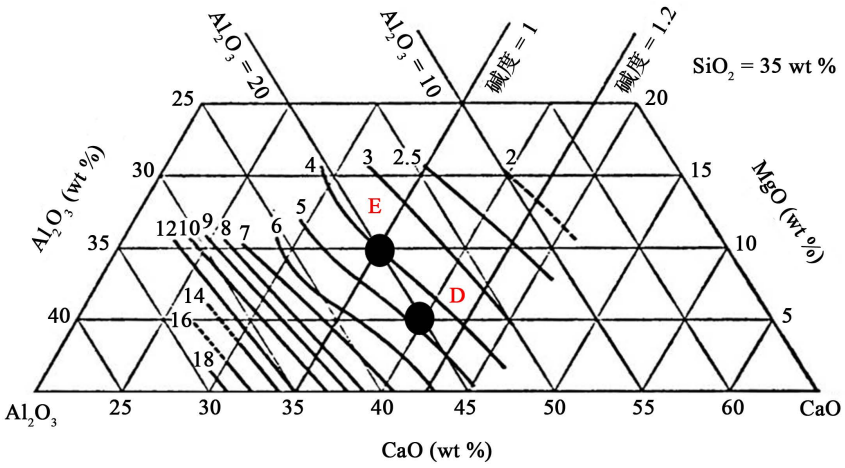


Figure 9. Iso-viscosity contours of CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3 melts at 1500˚C
图 9. 1500˚C CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3 四元等粘度相图

6) 目前实际生产指标：烧结矿碱度 1.75、MgO 含量 1.6%、Al_2O_3 含量 1.75%；高炉炉渣碱度 1.2、MgO 含量 7.2%、Al_2O_3 含量 15%。进一步提高高 Al_2O_3 铁矿配比、达到降低成本的目标在实际生产中是可以实现的。

参考文献 (References)

[1] 沈峰满, 温秋林. 国内外高炉炉渣(MgO)/(Al_2O_3)的对比分析[J]. 炼铁, 2015, 34(2): 1-3.

[2] 李肇毅, 郁庆瑶. 适应高 Al_2O_3 冶炼的高炉炉渣结构调整[J]. 宝钢技术, 2012(3): 1-4, 8.

[3] 丁矩, 尹桂先. Al_2O_3 含量对烧结矿产、质量的影响[J]. 烧结球团, 1987(6): 32-40.

[4] 王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.

[5] 陈耀明. 烧结球团矿微观结构[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011.

[6] 刘竹林. 炼铁原料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

[7] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

[8] 李双奇. 添加 $CaCl_2$ 对烧结矿冶炼系统腐蚀性的实验研究[J]. 辽宁科技学院学报, 2011, 13(2): 20-21.

[9] 王喆, 张建良. Al_2O_3 质量分数对高碱度烧结矿软熔滴落性能影响[J]. 钢铁, 2015, 50(7): 20-25.

[10] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

[11] 刘琦. 高炉基本操作制度的选择[J]. 炼铁, 2004, 23(1): 2-8.

Hans 汉斯

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：meng@hanspub.org