

Research on the Reasonable Composition of High Al_2O_3 Slag in the Blast Furnace Based on Thermodynamic Calculation

Xiaochuan Hou*, Runde Yang, He Li

Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha
Email: [houxc1716@sina.com](mailto:houx1716@sina.com)

Received: Dec. 23rd, 2013; revised: Dec. 26th, 2013; accepted: Dec. 30th, 2013

Copyright © 2014 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

Abstract

Under the background of rising usage of high Al_2O_3 content iron ore, the Al_2O_3 content in the blast furnace slag has been over 15% of the limit that is given in the traditional iron making. Besides, both the stability and liquidity of the slag will be worse with high Al_2O_3 content. This paper, combining with the relevant research results at home and abroad, investigates the influence of the changed furnace burden composition with high Al_2O_3 content on the slag composition from the theoretical analysis. It also uses $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ as the research object and applies thermodynamic software FactSage to study the influence of Al_2O_3 in the blast furnace slag on liquidus temperature and viscosity of the slag theoretically. All of these are intend to offer theoretical and technical basis for modification methods on which high Al_2O_3 iron ore is being used.

Keywords

Blast Furnace Slag; Slag Composition; Thermodynamic Calculation; Liquidus Temperature; Viscosity

基于热力学计算的高炉高 Al_2O_3 渣系合理组成的解析

侯晓川*, 杨润德, 李 贺

长沙矿冶研究院, 长沙

*通讯作者。

Email: *[houxc1716@sina.com](mailto:houx1716@sina.com)

收稿日期: 2013年12月23日; 修回日期: 2013年12月26日; 录用日期: 2013年12月30日

摘要

在高含量 Al_2O_3 铁矿石使用量不断升高, 高炉渣中 Al_2O_3 含量超过传统炼铁15%极限值, 从而影响炉渣的流动性和稳定性的背景下, 本文采用理论的方法, 考察了高含量 Al_2O_3 铁矿石对炼铁炉料成分及炉终渣成分的影响, 探讨了 Al_2O_3 含量对炉渣性质影响的规律; 并以 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 四元系终渣为研究对象, 应用FactSage热力学软件理论解析综合炉料终渣中 Al_2O_3 对其熔化温度和粘度的影响, 并对其渣相组成进行优化, 为深入研究高 Al_2O_3 铁矿石条件下高铝渣改性方法提供理论基础和技术依据。

关键词

高炉渣; 渣成分; 热力学计算; 液相线; 粘度

1. 引言

随着工业化进程的快速推进, 我国钢铁产量逐年增长, 预计到“十二五”末我国生铁年产量可能接近8亿吨, 消耗铁矿石将达到13亿吨。我国铁矿石资源相对匮乏, 大量铁矿石需要进口, 进口的铁矿石具有含铁品位高、有害杂质少等优点, 但存在 Al_2O_3 含量较高的不足, 其含量往往是国内精矿粉的2~4倍, 铁矿石中 Al_2O_3 含量逐步升高已成为当前及未来炼铁工艺难以避免的问题。在高含量 Al_2O_3 铁矿石使用量不断升高的背景下, 高炉渣中 Al_2O_3 含量已超过传统炼铁学给出的15%极限值, 渣中 Al_2O_3 含量在16%~19%范围内波动较为普遍, 这一状况无疑对炼铁工艺产生不容忽视的负面影响。

国内外关于炉渣中 Al_2O_3 的研究很多, Hyuk Kim等人研究表面在1773 K下, 碱度为1.0和1.3的炉渣粘度随着 Al_2O_3 的增加有升高的趋势, 但在 Al_2O_3 含量相同时, 其变化规律是一致的。这表明炉渣中 Al_2O_3 含量对渣粘度的影响比碱度对渣粘度的影响更显著[1]。此外, 日本的研究工作表明, 当炉渣中 Al_2O_3 含量超过13%时, 炉渣粘度依然随着 Al_2O_3 含量增加而降低, 直到其含量达到15%左右, 炉渣粘度才达到一个最低值[2], 而日本使用的是高 Al_2O_3 (13%)、低 MgO (4%~7%)渣型, 入炉矿石品位也很高, 碱度(CaO/SiO_2) = 1.2~1.3。济钢通过对炉渣性能的研究, 得出了渣中 $(\text{Al}_2\text{O}_3) \leq 17\%$ 时, (MgO) 在9%~10%时, 能明显降低炉渣黏度; 当渣中 $(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 17\%$ 时, (MgO) 达到10%以上时, 能明显降低炉渣黏度, 改善炉渣流动性[3]。安钢通过高炉高 Al_2O_3 炉渣冶炼的综合分析表明, Al_2O_3 的含量在17%到20%的范围内, 炉渣熔点随着 Al_2O_3 含量增加而逐渐增加, 炉渣粘度随着 Al_2O_3 含量的增加而升高, 每增加0.1%的 Al_2O_3 含量, 炉渣粘度增加约0.008~0.035 Pa·S[4]。通过对唐钢炼铁厂的研究表明, 炉渣中的 Al_2O_3 含量不宜超过16%[5]。

本文基于高炉物质守恒原理, 结合某钢厂高炉实际生产数据, 解析高炉含铁炉料成分变化对高炉终渣成分的影响; 进而以 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 四元系终渣为研究对象, 采用FactSage热力学软件理论解析综合炉料终渣中 Al_2O_3 对其熔化温度和粘度的影响, 为深入研究高含量 Al_2O_3 铁矿石条件下高铝渣改性方法提供理论基础和技术依据。

2. 实验

2.1. 原料

根据某钢厂高炉的实际生产数据, 该厂高炉入炉原料为烧结矿、球团矿和块矿, 其中球团矿包括 PUK

球团矿、PSC-1 球团矿、PSC-2 球团矿、CVRD 球团矿四种，块矿包括 SISHEN 块矿、罗布河块矿两种，计算中原始配比选取为烧结矿 65.97%、球团矿 18.05%、块矿 15.98%，所选用各种矿成分组成如表 1 所示。

考虑该厂高炉实际炉料使用情况，将原料按照一种烧结矿、一种球团矿、一种块矿的形式进行配料组合，共得到 8 种不同矿石组合，依次记为 A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1、D2，各组组成如表 2 所示。然后根据入炉原料实际配比，采取烧结矿 65.97%、球团矿 18.05%、块矿 15.98% 的配比，通过各矿石的成分计算得到混合矿原料中各元素的比例，如表 3 示。

2.2. 仪器

研究的主要仪器为 FactSage 数据处理系统[6]。

2.3. 试验方法

通过高炉物料平衡计算[7]，理论上得到高炉终渣渣量及成分。首先，根据 Fe 平衡算出不同配料下的矿石消耗量；然后，以某钢厂日平均出铁量以及高炉生产的焦比、小焦比、煤比、熔铁比、灰比等数据，计算得出对应的铁水流量、焦炭流量、煤粉流量、熔剂流量和炉尘流量；最后，采用控制变量法，在不同原料组成，不同碱度下，考察 Al₂O₃ 含量变化对炉渣熔化温度和粘度的影响规律及碱度变化对炉渣熔化温度和粘度的影响规律。

3. 结果及讨论

3.1. 物料平衡计算

炉渣主要成分为 CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO、MnO 等，该类组分主要来源于混合矿、焦炭、煤粉和熔剂，在生产过程中，这些成分的流失主要集中在炉尘、炉渣以及元素相互反应消耗等。因此，根据前面计算的各物质流量，可以得出炉渣成分的计算含量，如表 4 所示。

3.2. 基于 FactSage 热力学软件的高炉渣高温性能理论计算

采用控制变量法，在不同原料组成，碱度分别为 1.0、1.1 下，考察 Al₂O₃ 含量变化对炉渣熔化温度和粘度的影响规律及碱度变化对炉渣熔化温度和粘度的影响规律。

以矿石组合 A1 组(烧结矿 + PUA + SISHEN)为研究对象，考察炉渣中 Al₂O₃ 成分变化对炉渣熔化温度及粘度的影响规律。将 A1 组计算所得的实际渣相组成进行碱度调整，得到四元渣系在碱度分别为 1.0 和 1.1 的成分组成，如表 5 所示。

由表 5 可知，碱度为 1.0 时，Al₂O₃ 含量为 14.85%；碱度为 1.1 时，Al₂O₃ 含量为 14.76%。根据宝钢高炉实际生产数据和以往研究经验，确定考察 Al₂O₃ 含量的变化范围分别为 10.85%~18.85% 和 10.76%~18.76%，步长为 1.00%。调整 Al₂O₃ 时，为了减少单一调整 Al₂O₃ 所产生的系统误差，CaO、SiO₂、MgO 的含量依据 Al₂O₃ 含量的变化进行同比例修正。具体修正公式如下：

$$\omega_{\text{CaO}} = \omega_{\text{原CaO}} / \left((1 - \omega_{\text{原Al}_2\text{O}_3}) \times (1 - \omega_{\text{Al}_2\text{O}_3}) \right)$$

$$\omega_{\text{SiO}_2} = \omega_{\text{原SiO}_2} / \left((1 - \omega_{\text{原Al}_2\text{O}_3}) \times (1 - \omega_{\text{Al}_2\text{O}_3}) \right)$$

$$\omega_{\text{MgO}} = \omega_{\text{原MgO}} / \left((1 - \omega_{\text{原Al}_2\text{O}_3}) \times (1 - \omega_{\text{Al}_2\text{O}_3}) \right)$$

式中： ω_{CaO} ——调整后 CaO 的含量，%；

Table 1. Mineral compositions (%)

表 1. 矿石组成成分(%)

成分	烧结矿	球团矿				块矿	
		PUA	PSC-1	PSC-2	CVRD	SISHEN	罗布河
FeO	8.29	0.10	0.52	0.47	1.29	0.69	1.22
Fe ₂ O ₃	73.27	92.40	94.68	95.23	92.33	92.90	82.06
MnO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12
MnO	0.25	2.72	0.09	0.09	0.10	0.00	0.00
CaO	9.46	0.45	1.59	1.70	2.74	0.21	0.39
SiO ₂	5.01	3.58	2.10	1.54	2.48	4.37	5.19
Al ₂ O ₃	1.77	0.45	0.56	0.57	0.76	1.01	2.66
MgO	1.67	0.08	0.13	0.13	0.03	0.02	0.01
P ₂ O ₅	0.14	0.03	0.11	0.10	0.07	0.08	0.04
TiO ₂	0.10	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.04
H ₂ O _化	0.00	0.10	0.11	0.10	0.10	0.55	8.24
CO ₂	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00
FeS	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00
FeS ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 2. Raw material combination

表 2. 原料配料组合

组号	组成	组号	组成
A1	烧结矿 + PUA + SISHEN	A2	烧结矿 + PUA + 罗布河
B1	烧结矿 + PSC-1 + SISHEN	B2	烧结矿 + PSC-1 + 罗布河
C1	烧结矿 + PSC-2 + SISHEN	C2	烧结矿 + PSC-2 + 罗布河
D1	烧结矿 + CVRD + SISHEN	D2	烧结矿 + CVRD + 罗布河

Table 3. Compositions of mixed mineral/%

表 3. 混合矿成分/%

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
FeO	5.60	5.68	5.67	5.76	5.66	5.75	5.81	5.90
Fe ₂ O ₃	79.86	78.13	80.27	78.54	80.37	78.64	79.85	78.12
MnO ₂	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MnO	0.66	0.66	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
CaO	6.36	6.39	6.56	6.59	6.58	6.61	6.77	6.80
SiO ₂	4.65	4.78	4.38	4.51	4.28	4.41	4.45	4.58
Al ₂ O ₃	1.41	1.67	1.43	1.69	1.43	1.69	1.47	1.73
MgO	1.12	1.12	1.13	1.13	1.13	1.13	1.11	1.1
P ₂ O ₅	0.11	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
TiO ₂	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08
H ₂ O _化	0.11	1.34	0.11	1.34	0.11	1.34	0.11	1.34
CO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
FeS	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
FeS ₂	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 4. The calculation results of the quantities and compositions of the slag
表 4. 渣量及成分计算结果

成分/%	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
CaO	38.85	38.13	40.50	39.74	40.83	40.06	41.05	40.29
SiO ₂	35.39	35.26	34.12	34.01	33.67	33.57	33.93	33.83
MgO	7.03	6.86	7.15	6.97	7.19	7.01	6.91	6.75
Al ₂ O ₃	15.21	16.33	15.53	16.64	15.61	16.74	15.45	16.55
S	1.07	1.03	1.08	1.05	1.08	1.05	1.06	1.03
MnO	1.20	1.18	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.34
TiO ₂	0.78	0.76	0.80	0.78	0.79	0.76	0.78	0.76
FeO	0.47	0.45	0.48	0.46	0.48	0.46	0.47	0.45
CaS	2.40	2.33	2.43	2.36	2.44	2.36	2.38	2.32
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
渣量/kg/t	249.01	259.61	245.25	255.72	243.78	254.21	250.35	260.95

Table 5. Composition of quaternion slag
表 5. 四元渣系成分

成分	R = 1.0		R = 1.1	
	含量/kg/t	比例/%	含量/kg/t	比例/%
CaO	96.48	38.67	105.81	40.52
SiO ₂	96.48	38.67	96.16	36.83
MgO	19.46	7.80	20.61	7.89
Al ₂ O ₃	37.06	14.85	38.55	14.76
Σ	249.47	100	261.13	100

$\omega_{\text{原CaO}}$ ——调整之前 CaO 的含量，%；

ω_{SiO_2} ——调整后 SiO₂ 的含量，%；

$\omega_{\text{原SiO}_2}$ ——调整后 SiO₂ 的含量，%；

ω_{MgO} ——调整后 MgO 的含量，%；

$\omega_{\text{原MgO}}$ ——调整后 MgO 的含量，%；

$\omega_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ ——调整后 Al₂O₃ 的含量，%；

$\omega_{\text{原Al}_2\text{O}_3}$ ——调整后 Al₂O₃ 的含量，%。

在每种矿石组合下，经过调整 Al₂O₃ 含量，在碱度为 1.0 和 1.1 时，分别得到了 9 组不同的四元渣系成分。在此基础上，采用相同的方法，考察八种不同矿石组合下的四元渣系成分。通过计算液相线温度和 1200℃~1520℃ 温度范围内的粘度，考察液相线温度随着 Al₂O₃ 含量变化的趋势，以及不同温度下炉渣粘度随着 Al₂O₃ 含量变化的趋势。通过 FactSage 热力学软件计算，得到 A1 组的液相线温度随 Al₂O₃ 变化的规律，结果如表 6、表 7 所示，粘度随 Al₂O₃ 含量变化的规律如表 8、表 9 所示。

以上为矿石组合 A1 组的炉渣液相线温度与粘度计算结果，其他各组矿石组合的四元渣系计算方法与过程类似，得到的数据结果分析与 A1 组相似。

Table 6. The calculation results of liquidus temperature under the change of Al₂O₃ (A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.0)
表 6. Al₂O₃ 变化时液相线温度计算结果(A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.0)

CaO/%	SiO ₂ %	MgO/%	Al ₂ O ₃ %	液相线温度/℃
40.49	40.49	8.17	10.85	1321.55
40.04	40.04	8.07	11.85	1311.93
39.58	39.58	7.98	12.85	1302.24
39.13	39.13	7.89	13.85	1292.36
38.68	38.67	7.80	14.85	1282.42
38.22	38.22	7.71	15.85	1289.51
37.77	37.77	7.62	16.85	1307.58
37.31	37.31	7.53	17.85	1324.08
36.86	36.86	7.43	18.85	1338.93

Table 7. The calculation results of liquidus temperature under the change of Al₂O₃ (A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.1)
表 7. Al₂O₃ 变化时液相线温度计算结果(A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.1)

CaO/%	SiO ₂ %	MgO/%	Al ₂ O ₃ %	液相线温度/℃
42.42	38.55	8.26	10.76	1369.06
41.95	38.12	8.17	11.76	1359.19
41.47	37.69	8.08	12.76	1349.13
41.00	37.26	7.99	13.76	1339.10
40.52	36.83	7.89	14.76	1328.75
40.04	36.39	7.80	15.76	1340.98
39.57	35.96	7.71	16.76	1356.81
39.09	35.53	7.62	17.76	1371.04
38.62	35.10	7.52	18.76	1383.97

Table 8. The calculation results of slag viscosity under the change of Al₂O₃ (A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.0)/Pa·S
表 8. Al₂O₃ 变化时炉渣粘度计算结果(A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.0)/Pa·S

Al ₂ O ₃ %	1200℃	1240℃	1280℃	1320℃	1360℃	1400℃	1440℃	1480℃	1520℃
10.85	2.21	1.60	1.17	0.87	0.66	0.51	0.40	0.31	0.28
11.85	2.30	1.65	1.21	0.90	0.68	0.52	0.41	0.32	0.29
12.85	2.38	1.71	1.25	0.93	0.70	0.54	0.42	0.33	0.29
13.85	2.48	1.78	1.30	0.96	0.73	0.56	0.43	0.34	0.30
14.85	2.57	1.84	1.34	1.00	0.75	0.57	0.44	0.35	0.31
15.85	2.67	1.91	1.39	1.03	0.78	0.59	0.46	0.36	0.32
16.85	2.78	1.98	1.44	1.07	0.80	0.61	0.47	0.37	0.33
17.85	2.89	2.06	1.49	1.10	0.83	0.63	0.49	0.38	0.34
18.85	3.00	2.13	1.55	1.14	0.85	0.65	0.50	0.39	0.35

Table 9. The calculation results of slag viscosity under the change of Al₂O₃ (A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.1)/Pa·S
表 9. Al₂O₃ 变化时炉渣粘度计算结果(A1/Sinter + PUK + SISHEN, R = 1.1)/Pa·S

Al ₂ O ₃ /%	1200℃	1240℃	1280℃	1320℃	1360℃	1400℃	1440℃	1480℃	1520℃
10.76	1.84	1.34	0.99	0.74	0.56	0.44	0.34	0.27	0.24
11.76	1.91	1.38	1.02	0.76	0.58	0.45	0.35	0.28	0.25
12.76	1.98	1.43	1.05	0.79	0.60	0.46	0.36	0.28	0.25
13.76	2.05	1.48	1.09	0.81	0.62	0.48	0.37	0.29	0.26
14.76	2.12	1.53	1.12	0.84	0.64	0.49	0.38	0.30	0.27
15.76	2.20	1.58	1.16	0.87	0.66	0.50	0.39	0.31	0.28
16.76	2.28	1.64	1.20	0.89	0.68	0.52	0.40	0.32	0.28
17.76	2.36	1.70	1.24	0.92	0.70	0.53	0.42	0.33	0.29
18.76	2.45	1.76	1.28	0.95	0.72	0.55	0.43	0.34	0.30

3.3. Al₂O₃ 含量对液相线温度影响规律理论解析

根据上述计算，得到不同矿石组成、碱度分别为

1.0 和 1.1 下的四元渣系随组分 Al₂O₃ 变化的液相线温度数据，得到如图 1 所示结果。

由图 1 可以看出，在不同矿石组成及不同炉渣碱度下，液相线温度都随着 Al₂O₃ 的增加呈现先降低后升高的趋势。当 Al₂O₃ 含量在 14%~15% 时，每条液相线温度曲线都出现一个拐点，在拐点处液相线温度达到最低。由于液相线温度代表熔化温度，熔化温度低，炉渣流动性较好，有利于高炉顺行。这表明终渣适宜的 Al₂O₃ 含量为 14%~15%，此时炉渣的液相线最低，流动性最好。此外，碱度为 1.1 时的炉渣液相线温度明显高于碱度 1.0 时的炉渣液相线温度，碱度对炉渣的流动性有一定的影响，表明终渣碱度越高，熔化温度就越高。

出现上述变化规律的原因为，在 Al₂O₃ 含量 > 15% 的 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ 系相图中，渣相已发生变化，在高炉渣成分范围内有黄长石、镁硅钙石和尖晶石(MgO、Al₂O₃)等相存在。由于尖晶石区的扩大和钙铝黄长石的增加，液相线温度低于 1450℃ 的黄长石区域缩小。因此，随着 Al₂O₃ 含量的增加，炉渣的熔化性温度升高。另外，高 Al₂O₃ 含量的碱性渣中，容易出现尖晶石，尖晶石为高熔点矿物，并且结晶能力很强，在炉渣熔体中最早结晶出来，形成以固溶体质量状态存在于炉渣熔体中，造成炉渣流动性差。因此，随着渣中 Al₂O₃ 含量增高，其相应的熔化性温度也会升高。

3.4. Al₂O₃ 含量对炉渣粘度影响规律理论解析

根据计算得到不同矿石组合、碱度分别为 1.0 和 1.1 下的四元渣系随组分 Al₂O₃ 变化的炉渣粘度数据，作图后得到如图 2 所示结果。

由图 2 可知，在相同的碱度和温度下，随着炉渣中 Al₂O₃ 含量的增加，炉渣粘度逐渐升高；温度越低，随着 Al₂O₃ 含量的增加粘度增大的趋势变小。此外，比较图 2 中 a) 和 b)，同一温度与同一 Al₂O₃ 含量下，碱度升高，终渣粘度略有降低。

出现上述变化规律的主要原因为 Al₂O₃ 是一种弱酸性氧化物，在碱性渣中能够形成类似于 SiO₂ 那样的复合阴离子 Al_xO_y²⁻。并且，Al³⁺ 可以部分取代 Si_xO_y²⁻ 中的 Si⁴⁺，形成硅—铝—氧复合阴离子。因此，

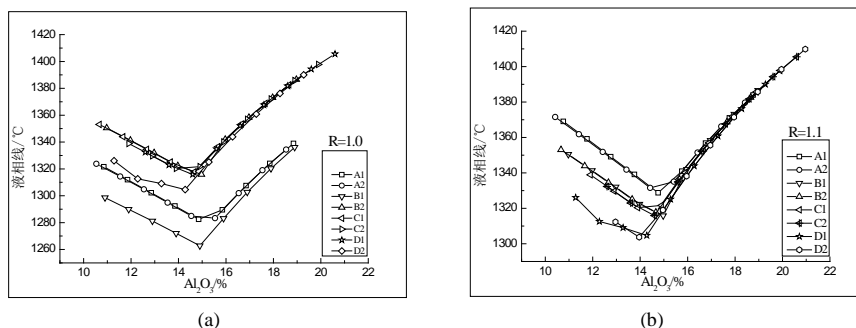


Figure 1. The liquidus temperature of quaternion slag under the change of Al₂O₃ with basicities at 1.0 and 1.1 based on A1~D2

图 1. A1~D2 组四元渣系液相线温度随 Al₂O₃ 含量变化图

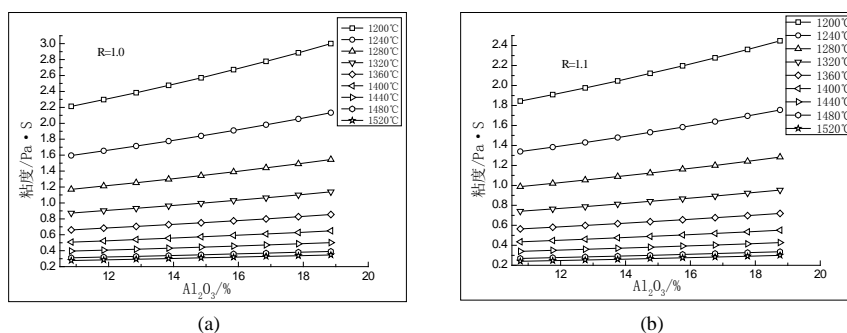


Figure 2. The viscosity of quaternion slag under the change of Al₂O₃ with basicities at 1.0 and 1.1 based on A1

图 2. A1 组四元渣系在 R = 1.0 和 R = 1.1 的粘度随 Al₂O₃ 含量变化图

随着渣中 Al₂O₃ 含量的增加，熔渣的粘度增大，流动性下降。

4. 结论

- 1) 随着 Al₂O₃ 含量的增加，炉渣液相线先降低后升高，当 Al₂O₃ 含量为 14%~15% 时，对应炉渣液相线温度最低。
- 2) 碱度升高，炉渣液相线温度升高；相反，碱度降低，炉渣粘度降低。当 Al₂O₃ 含量为 14%~15% 时，炉渣碱度控制在 1.0 左右时，炉渣液相线温度最低。
- 3) 炉渣中 Al₂O₃ 含量大于 16%，MgO 含量在 5%~10% 范围变化时，炉渣液相线先升高后降低，但变化幅度较小；

项目基金

国际海域资源调查与开发“十二五”资助项目(No. DY125-11-T-02)，长沙矿冶研究院基金资助项目(No. A2012-102)，湖南省自然科学基金资助项目(No. 14JJ4065)。

参考文献 (References)

- [1] Kim, H., Matsuura, H. and Tsukihashi, F. (2012) Effect of Al₂O₃ and CaO/SiO₂ on the viscosity of calcium-silicate—Based slags containing 10 mass Pct MgO. *ISIJ International*, **44**, 5-12.
- [2] Choim J.Y., Lee, H.G. and Kim, J.S. (2000) Dissolution rate of Al₂O₃ into Molten CaO-SiO₂-Al₂O₃ slags. *ISIJ International*, **42**, 852-856.
- [3] 李荣, 郭江, 王玉莲 (2012) 济钢 1750 m³ 高炉高 Al₂O₃ 炉渣性能研究与冶炼实践. *特殊钢*, **6**, 25-28.

- [4] 龙防, 徐方, 赵颖 (2009) 高炉高 Al_2O_3 炉渣冶炼综合分析. *冶金能源*, **2**, 21-23.
- [5] 杨建炜 (2005) 高 Al_2O_3 高炉炉渣冶金性能的研究. 河北理工大学, 唐山, 54-55.
- [6] 曹战民, 宋晓艳, 乔芝郁 (2008) 热力学模拟计算软件 FactSage 及其应用. *稀有金属*, **2**, 216-219.
- [7] 成兰伯 (1997) 高炉炼铁工艺及计算. 冶金工业出版社, 北京, 57-61..