

# MgO对包钢高炉渣流变特性及熔化性影响的实验研究

冯聪<sup>1</sup>, 李玉柱<sup>1</sup>, 白晓光<sup>1</sup>, 郑占斌<sup>2</sup>, 于恒亮<sup>2</sup>, 卢俊慧<sup>2</sup>

(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. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼铁厂, 内蒙古包头 014010)

**摘要:** 基于包钢高炉炼铁生产原燃料条件, 在实验室条件下以包钢4<sup>#</sup>高炉渣为基础, 采用纯化学试剂配制渣样, 在N<sub>2</sub>气氛下分析了MgO对包钢高炉渣流变特性的影响。同时, 探索了MgO对包钢高炉渣熔化性能和热焓的影响。结果表明, 实验条件下, 炉渣MgO含量由8.00%升高至13.00%, 包钢高炉渣熔化性温度呈升高趋势, 黏度和黏流活化能呈先降低后升高的趋势, 炉渣流动性和热稳定性先变好后变差。另外, 随炉渣MgO含量升高, 包钢高炉渣熔化性能特征温度呈先降低后升高趋势, 炉渣热焓呈升高趋势, 表明炉渣在高炉炉缸蓄热能力增强。综合考虑实验研究结果、相关理论计算及包钢现有高炉炉渣MgO含量控制水平, 建议包钢高炉渣MgO含量控制为10.00%。

**关键词:** 白云鄂博矿; 高炉渣; MgO; 流变特性; 熔化性

中图分类号: TF534.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)03-0014-08

## Experimental Study on Effects of MgO on Rheological and Melting Properties of Blast Furnace Slag of Baotou Steel

Feng Cong<sup>1</sup>, Li Yu-zhu<sup>1</sup>, Bai Xiao-guang<sup>1</sup>, Zheng Zhan-bin<sup>2</sup>,  
Yu Heng-liang<sup>2</sup>, Lu Jun-hui<sup>2</sup>

(1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. Iron-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The effects of MgO on rheological property of blast furnace slag of Baotou Steel are analyzed by preparing slag specimen with pure chemical reagent under N<sub>2</sub> atmosphere based on the 4<sup>#</sup> blast furnace slag of Baotou Steel under laboratory conditions and crude fuel conditions of blast furnace ironmaking production of Baotou Steel. Moreover, the effects of MgO on melting property and enthalpy of blast furnace slag of Baotou Steel are also explored. The results showed that the MgO content of slag was increased from 8.00% to 13.00%, melting temperature of blast furnace slag of Baotou Steel was on the rise, viscosity and viscous flow activation energy showed a trend of first decreasing and then increasing, fluidity and thermal stability of slag became first good and then poor under experimental conditions. In addition, the characteristic tem-

perature of melting property for blast furnace slag of Baotou Steel shows a trend of first decreasing and then increasing as well as enthalpy of slag shows a trend of increasing with the increase of MgO content of slags, which show that the heat storage capacity of slag in blast furnace hearth is enhanced. The MgO content of blast furnace slag of Baotou Steel is suggested to be controlled at 10.00% by comprehensively considering the experimental study results, relevant theoretical calculations and control level of MgO content of existing blast furnace slag of Baotou Steel.

**Key words:** baiyuneboite; blast furnace slag; MgO; rheological property; melting property

白云鄂博矿为一种典型的多金属元素共生复合矿,含有铁、稀土、铈、钾、钠、氟、硫等元素,是包钢高炉炼铁的主要原料<sup>[1-2]</sup>。在实际高炉炼铁过程中,合理的造渣制度是稳定高炉生产、实现高炉强化冶炼的前提,其中高炉渣的流变特性和熔化性直接影响着高炉炼铁脱硫、排碱等过程,对高炉顺行和长寿等有着显著的影响<sup>[3-5]</sup>。通常,根据高炉炼铁原料特性和冶炼生铁品种等条件,为获取较好的高炉利用系数、燃料比和高炉寿命等技术经济指标,需要选取一个流动性、稳定性、熔化性、热焓等冶金性能适宜的炉渣成分结构<sup>[6]</sup>。因此,探析炉渣成分对包钢高炉渣流变特性和熔化性的影响对确定合适的高炉操作制度和实现高炉生产效率最大化意义重大。

本研究以包钢4#高炉渣为基础,按照实验方案采用分析纯化学试剂配制渣样,探究炉渣MgO含量对包钢高炉渣流变特性和熔化性的影响,以期强化高炉冶炼,实现节能降耗,为实际的生产提供一定的理论指导。

## 1 实验原料及方法

实验用包钢高炉渣样是以包钢4#高炉渣为基础,按照实验方案采用分析纯化学试剂配制获得的,具体步骤为:①将CaO、SiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>分析纯化学试剂置于马弗炉,在1000℃高温条件下焙烧1h,以消除化学试剂中水分等对称重配料的影响;②将干燥焙烧处理后的纯化学试剂与干燥细磨处理后的包钢4#高炉渣按一定比例混匀置于石墨坩埚,在N<sub>2</sub>气氛下于高温电阻炉内1500℃条件下熔化,形成均相渣;③均相渣随炉冷却至室温,而后进行破碎、研细处理,获得的渣样粉末供实验使用。本文考察MgO含量对包钢高炉渣流变特性及熔化性的影响,MgO含量变化范围为8.00%~13.00%,二元碱度 $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ 固定为1.20。实验用包钢4#高炉渣化学成分如表1所示,具体实验方案如表2所示。

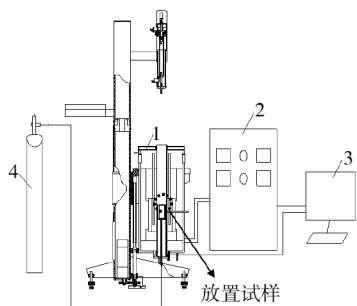
表1 包钢4#高炉现场渣化学成分及碱度

组元含量(质量分数)/%								二元碱度
CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F	
40.18	33.83	9.07	11.76	1.15	0.545	0.553	0.368	1.19

表2 实验考察因素及实验方案

编号	组元含量(质量分数)/%								二元碱度
	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F	
1	8.00	42.04	35.04	11.41	1.15	0.32	0.33	0.22	1.20
2	9.00	41.49	34.59	11.41	1.15	0.32	0.33	0.22	1.20
3	10.00	40.95	34.14	11.41	1.15	0.32	0.33	0.22	1.20
4	11.00	40.40	33.68	11.41	1.15	0.32	0.33	0.22	1.20
5	12.00	39.85	33.23	11.41	1.15	0.32	0.33	0.22	1.20
6	13.00	39.31	32.77	11.41	1.15	0.32	0.33	0.22	1.20

运用鞍山科翔实验设备商研发的 RTW - 2010 型熔体物性综合测定仪 (结构示意图如图 1 所示) 在  $N_2$  气氛下由  $1\ 500\ ^\circ C$  连续降温测试包钢高炉渣流变特性, 熔渣降温速率为  $3\ ^\circ C/min$ , 最终得到相应实验炉渣的黏度 - 温度 ( $\eta - t$ ) 曲线, 进而分析获得炉渣的熔化性温度、黏度及黏流活化能。采用熔点熔速仪 (结构示意图如图 2 所示) 分析包钢高炉渣熔化性能, 最终获得各实验炉渣的熔化特性指标温度, 包括炉渣的变形温度、半球温度、流动温度。同时, 运用 Factsage 8.2 热力学软件进行实验炉渣相图、物相组成及热焓理论计算, 以揭示炉渣 MgO 含量对包钢高炉渣流变特性及熔化性的影响机理。



1-二硅化钼高温炉;2-控制柜;3-主机与显示器;4-氮气

图 1 RTW - 2010 熔体物性测定仪

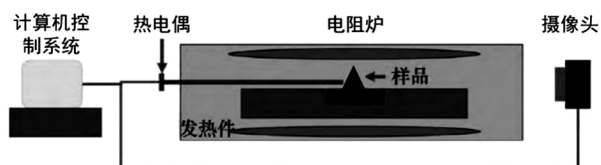


图 2 实验用熔点熔速仪

## 2 实验结果及分析

### 2.1 MgO 含量对包钢高炉渣熔化性温度的影响

通过实验检测分析, 获得不同 MgO 含量包钢高炉渣黏度 - 温度 ( $\eta - t$ ) 曲线, 如图 3 所示。可见, 各高炉渣  $\eta - t$  曲线上存在一个临界温度点。当炉渣温度高于该临界温度时, 随着温度降低, 炉渣黏度呈缓慢升高趋势; 而当炉渣温度低于该临界温度时, 随着温度降低, 炉渣黏度呈急剧升高趋势, 炉渣流动性显著恶化。该临界温度即为高炉渣的熔化性温度, 是炉渣的一个重要流变特性指标, 表征高炉渣在高温条件下自由流动的临界温度<sup>[7]</sup>。通常, 将炉渣  $\eta - t$  曲线与横坐标成  $135^\circ$  斜线相切点温度定义为

高炉渣的熔化性温度<sup>[8]</sup>。需要注意的是, 高炉渣熔化性温度与液相线温度相异。熔化性温度是指高炉渣黏度随温度降低而急剧增长时的临界温度, 其在一定意义上可表征高炉渣流动性好坏的分界线, 该温度下高炉渣一般为固液两相共存的状态<sup>[9]</sup>。高炉渣液相线温度则是指固相颗粒从完全熔态渣中初始析出时的温度, 其为高炉渣完全液相与固液两相共存的分界点<sup>[10]</sup>。

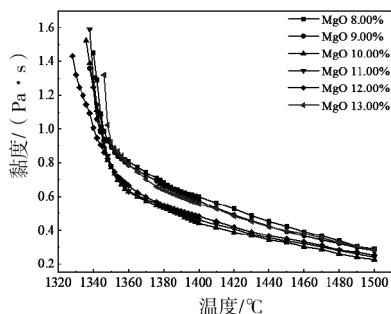


图 3 不同 MgO 含量实验炉渣  $\eta - t$  曲线

依据高炉渣熔化性温度的定义, 不同 MgO 含量包钢高炉渣熔化性温度如图 4 所示。可见, 炉渣 MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00% 时, 包钢高炉渣熔化性温度呈升高趋势。炉渣 MgO 含量为 8.00% 时, 包钢高炉渣熔化性温度较低, 为  $1\ 355\ ^\circ C$ ; 炉渣 MgO 含量为 13.00% 时, 包钢高炉渣熔化性温度较高, 为  $1\ 370\ ^\circ C$ 。尽管高炉渣熔化性温度与液相线温度不同, 但这两者之间存有一定的关联, 可通过高炉渣液相线温度变化间接分析炉渣熔化性温度的变化<sup>[10]</sup>。

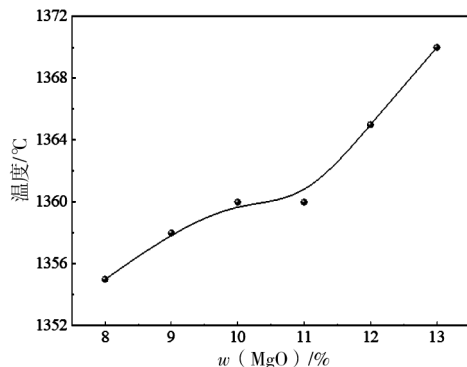


图 4 MgO 含量对包钢高炉渣熔化性温度的影响

采用 Factsage 8.2 热力学软件 Phase Diagram 模

块(选取数据库为 FToxid), 计算  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - 11.41\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.15\% \text{TiO}_2$  五元渣系相图, 并标注不同 MgO 含量实验炉渣成分点以分析其液相线温度, 如图 5 所示。当 MgO 含量从 8.00% 升高至 13.00%, 实验炉渣成分点由黄长石初晶区向  $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$  初晶区过渡, 炉渣液相线温度呈升高趋势, 分别为 1 391.82 °C、1 398.52 °C、1 408.48 °C、1 416.06 °C、1 421.28 °C、1 424.46 °C。实验过程

中, 当熔渣由 1 500 °C (高于各实验炉渣液相线温度) 高温条件下以 3 °C/min 连续降温时, 液相线温度高的实验炉渣高温结晶能力强, 易较早地在熔渣中形成固相颗粒, 使高温均质的熔态炉渣转变为非均质流体<sup>[11]</sup>, 从而促使炉渣黏度急剧升高, 使高炉渣熔化性温度升高。因此, 随炉渣 MgO 含量升高, 包钢高炉渣液相线温度升高, 使得炉渣熔化性温度升高。

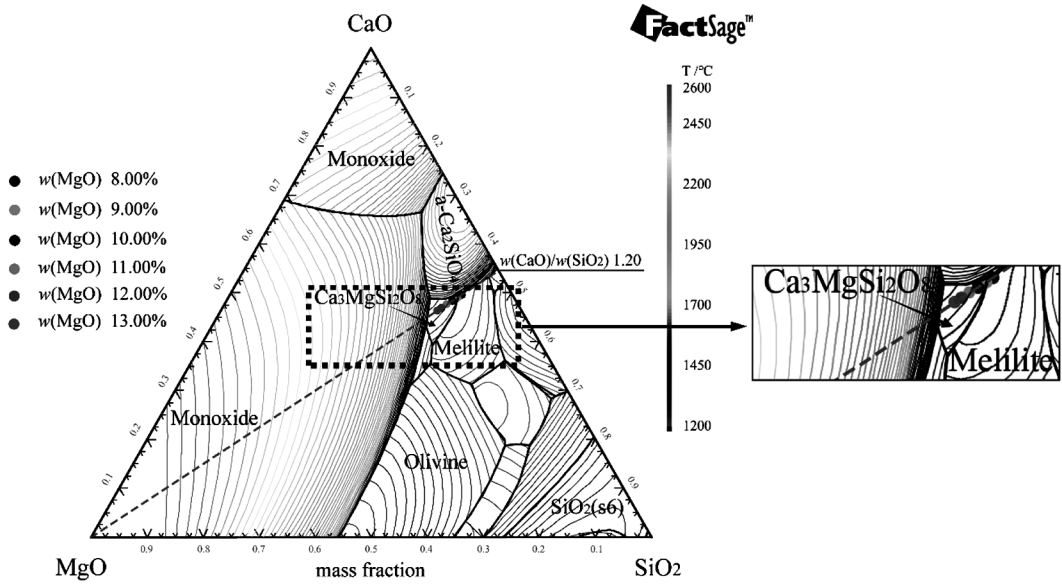


图 5  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - 11.41\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.15\% \text{TiO}_2$  渣系相图

### 2.2 MgO 含量对包钢高炉渣黏度的影响

根据不同 MgO 含量包钢高炉渣  $\eta - t$  曲线, 分析获得 MgO 对包钢高炉渣黏度的影响, 如图 6 所示。可见, 炉渣 MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00%, 包钢高炉渣黏度呈先降低后升高的趋势。炉渣 MgO 含量为 10.00% 时, 包钢高炉渣黏度值最低, 炉渣流动性最好。依据分子与离子共存理论, 炉渣物相组成及熔态时熔渣中复杂黏滞流动单元的聚合程度共同决定着碱性高炉渣流动性<sup>[12-13]</sup>。MgO 为一种碱性氧化物, 其可向高温熔渣中提供自由  $\text{O}^{2-}$ , 并与渣中复杂黏滞流动单元  $[\text{Si}_x\text{O}_y]^{2-}$ 、 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$  中的桥氧相结合, 形成非桥氧, 使渣中桥氧数高的复杂黏滞流动单元解体为桥氧数低的简单黏滞流动单元, 从而简化炉渣结构, 降低炉渣黏度, 改善炉渣流动性<sup>[14-15]</sup>。但是, 当炉渣 MgO 含量增加到一定程度后, MgO 对熔渣中复杂黏滞流动单元的解聚作用减弱, 而渣中易形成一些高

熔点的物相, 如镁铝尖晶石 ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , 熔点为 2 135 °C)、镁橄榄石 ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , 熔点为 1 890 °C), 易导致熔渣非均质化, 反而升高了炉渣黏度, 恶化了炉渣流动性<sup>[16]</sup>。因此, 随炉渣 MgO 含量升高, 包钢高炉渣黏度呈先降低后升高的趋势。

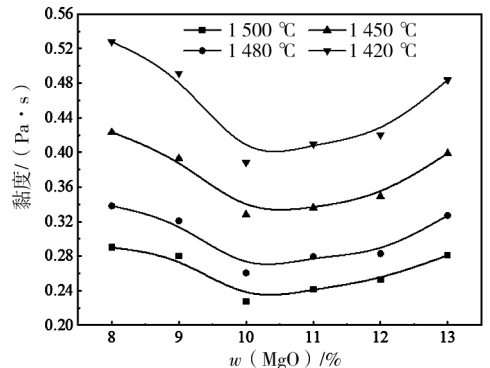


图 6 MgO 含量对包钢高炉渣黏度的影响

### 2.3 MgO 含量对包钢高炉渣黏流活化能的影响

黏流活化能是高炉渣的一个重要流变特性指标,其可反映炉渣黏度对温度的敏感性,炉渣黏流活化能越高,温度波动对炉渣黏度的影响越大,炉渣的热稳定性越差<sup>[17]</sup>。结合炉渣温度高于熔化性温度时的黏度数据和阿伦尼乌斯黏度公式,可拟合计算实验炉渣的黏流活化能。阿伦尼乌斯黏度公式如式(1)所示。对公式(1)两边取对数,可变形为公式(2)。代入实验数据并按照  $\ln(\eta/T) - 1/T$  作图,进行线性回归处理,斜率与  $R$  的乘积即为黏流活化能。

$$\eta = A T \exp\left(\frac{E_{\eta}}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{\eta}{T}\right) = \ln A + \frac{E_{\eta}}{R} \times \frac{1}{T} \quad (2)$$

式中, $\eta$  为炉渣黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ ;  $A$  为频率因子;  $E_{\eta}$  为炉渣黏流活化能,  $\text{J/mol}$ ;  $R$  为气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

实验条件下,不同 MgO 含量包钢高炉渣  $\ln(\eta/T)$  与  $1/T$  线性拟合结果如图 7 所示。各实验炉渣  $\ln(\eta/T)$  与  $1/T$  呈高度线性关系,线性拟合度  $r$  高于 0.99,表明实验炉渣黏度与温度紧密遵从阿伦尼乌斯黏度公式。不同 MgO 含量包钢高炉渣黏流活化能  $E_{\eta}$  见表 3。

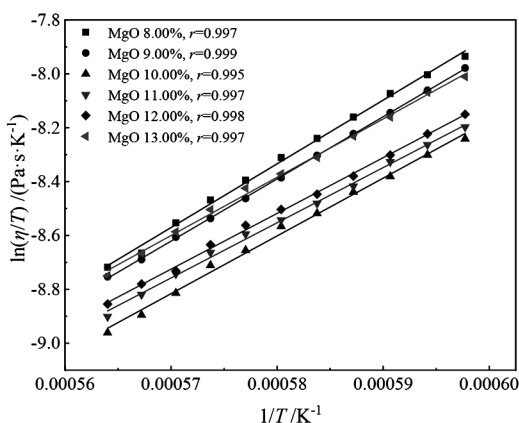


图 7 不同 MgO 含量包钢高炉渣  $\ln(\eta/T)$  与  $1/T$  的线性拟合结果

由表 3 可见, MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00%,包钢高炉渣黏流活化能  $E_{\eta}$  呈先降低后升高趋势,变化范围为  $170.35 \sim 196.63 \text{ kJ/mol}$ ,炉渣黏度对温度波动的敏感性先变弱后变强,包钢高炉渣热稳定性先变好后变差。提高 MgO 含量,包钢高

炉渣中自由  $\text{O}^{2-}$  数量增加,促进熔渣中黏滞流动单元  $[\text{Si}_x\text{O}_y]^{z-}$ 、 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$  等的解体,使高炉渣热稳定性变好。但进一步提高 MgO 含量,包钢高炉渣中镁铝尖晶石等高熔点物相增多,导致高炉渣在高温下结晶能力增强,反而恶化了高炉渣的热稳定性。此两方面的综合作用使包钢高炉渣黏流活化能先降低后升高,热稳定性先变好后变差。

表 3 不同 MgO 含量包钢高炉渣黏流活化能  $E_{\eta}$  ( $1400 \sim 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

MgO 含量 /%	回归阿伦尼乌斯方程	黏流活化能 $E_{\eta}$ / ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
8.00	$y = 23\ 650.21x - 22.05$	196.63
9.00	$y = 23\ 087.47x - 21.78$	191.95
10.00	$y = 21\ 448.98x - 21.04$	178.33
11.00	$y = 20\ 489.33x - 20.44$	170.35
12.00	$y = 20\ 685.38x - 20.52$	171.98
13.00	$y = 21\ 641.31x - 20.94$	179.93

### 2.4 MgO 含量对包钢高炉渣熔化性能的影响

MgO 含量对包钢高炉渣熔化性能的影响如图 8 所示。可见,炉渣 MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00%,包钢高炉渣变形温度、半球温度及流动温度均呈先降低后升高的趋势。MgO 含量为 11.00% 时,包钢高炉渣熔化性能较好,炉渣变形温度、半球温度及流动温度分别为  $1\ 372 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\ 382 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1\ 390 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本研究获得的 MgO 对包钢高炉渣熔化性能影响规律与宝钢 2 号高炉降低镁铝比工业试验和关于国内外高炉炉渣  $w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  对比分析文献研究中相关的研究结论一致<sup>[18-19]</sup>。

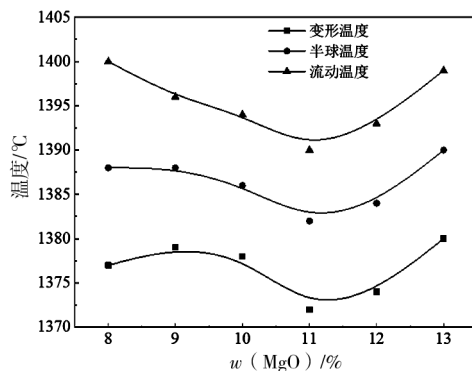


图 8 MgO 含量对包钢高炉渣熔化性能的影响

为探索 MgO 对包钢高炉渣熔化性能的影响机

制,运用 Factsage 8.2 热力学软件 Equilib 模块(选取数据库为 FToxid)计算分析了包钢高炉渣从 1 500 ℃到 1 000 ℃冷却过程中炉渣内部主要平衡析出物相组成变化规律,如图 9 所示。由计算结果可知,包钢高炉渣平衡冷却过程中,主要的物相为液态渣相、黄长石相( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ )、镁蔷薇石相( $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ )、镁橄榄石相( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )及镁铝尖晶石相( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )。炉渣 MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00%,渣中黄长石相数量不断减少,而镁蔷薇石相数量不断增加。另外,炉渣 MgO 含量高于 10.00% 时,渣中出现高熔点的  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  相,且随 MgO 含量增加, $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  数量增加。当炉渣 MgO 含

量进一步增加至 12.00% 和 13.00% 时,渣中还出现了  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  相。依据相关文献分析<sup>[20-21]</sup>,碱性高炉渣主要组成物相熔点由高到低的顺序为: $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、黄长石、镁蔷薇石。因此,从计算结果分析可知,炉渣 MgO 含量升高,包钢高炉渣中熔点相对较高的黄长石相数量减少,而熔点相对较低的镁蔷薇石相数量增加,从而改善了包钢高炉渣熔化性能。但随着 MgO 含量进一步增加,渣中高熔点的  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  相数量增加,提高了包钢高炉渣的熔化温度。因此,实验条件下,随炉渣 MgO 含量增加,包钢高炉渣变形温度、半球温度及流动温度呈先降低后升高的趋势。

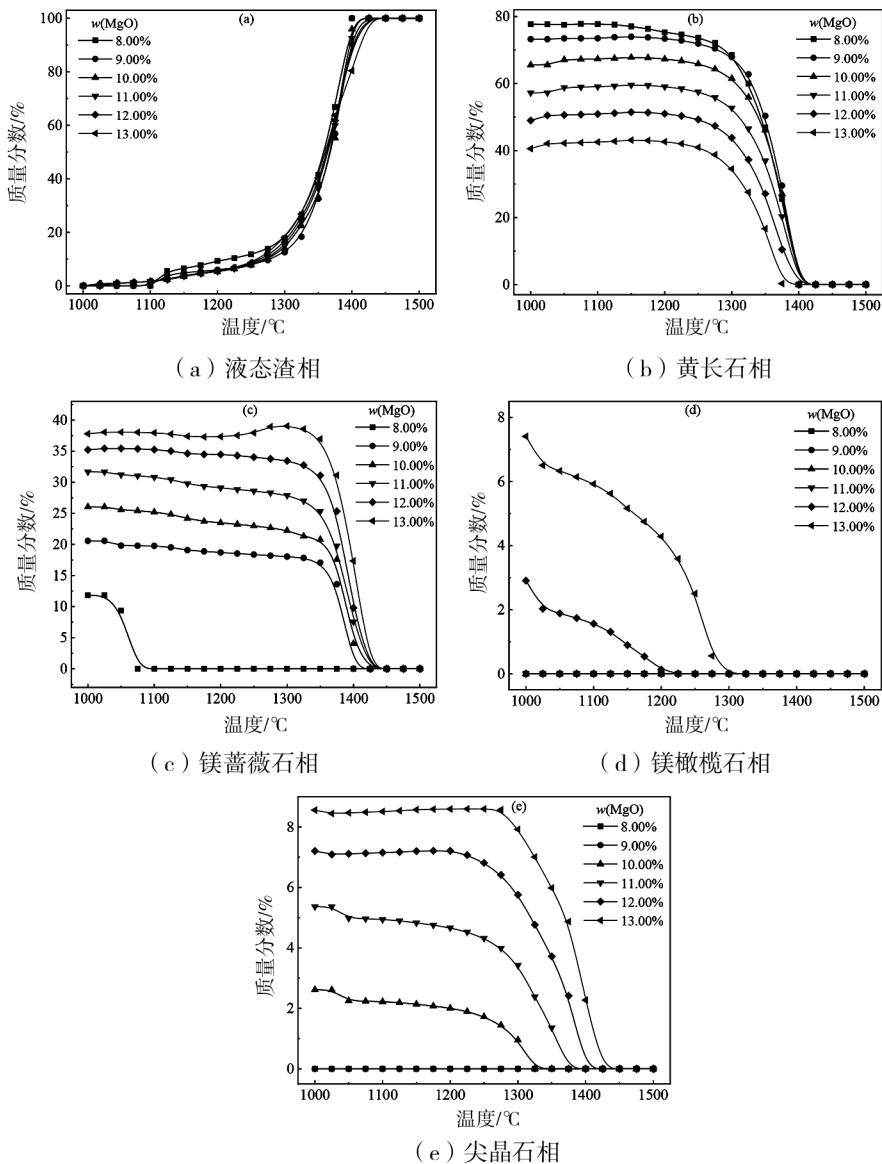


图9 不同 MgO 含量包钢高炉渣平衡冷却析出物相组成

## 2.5 MgO 含量对包钢高炉渣热焓的影响

炉渣热焓是指单位质量或摩尔的炉渣升高到一定温度时所吸收的热量,炉渣热焓值大小可反映一定成分炉渣的蓄热能力<sup>[22]</sup>。高炉渣热焓值越大,表明其储备的热量越多,有利于保持高炉炉缸热量充沛。同时,高炉渣损失一部分热量时,炉渣温度变化较小,有助于减小炉渣黏度的波动。本研究运用 Factsage 8.2 热力学软件 Equilib 模块(选取数据库为 FToxid),计算分析了不同 MgO 含量包钢高炉渣在各高温条件下的热焓值,如图 10 所示。可知,炉渣 MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00%,包钢高炉渣热焓值逐渐升高,表明包钢高炉渣在高炉炉缸的蓄热能力增强。

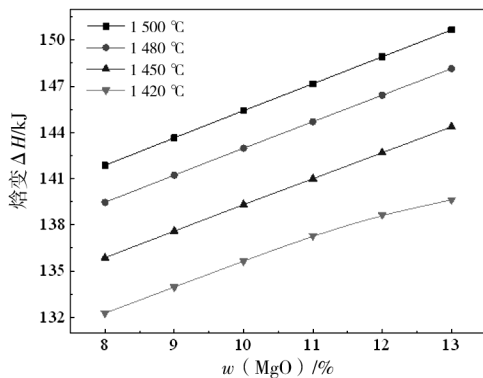


图 10 MgO 含量对包钢高炉渣热焓的影响

综合考虑包钢高炉渣流变特性指标(熔化性温度、黏度和黏流活化能)和熔化性能随炉渣 MgO 含量的变化规律以及炉渣热焓的理论计算结果,并结合包钢现有的高炉炉渣 MgO 含量控制水平(MgO 含量为 9.07%),建议可适当提高包钢高炉渣 MgO 含量至 10.00%,但不建议大幅升高炉渣 MgO 含量,以免高炉渣量增加而导致包钢高炉燃料比升高。

## 3 结论

(1) 实验条件下,炉渣 MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00%,包钢高炉渣熔化性温度呈升高趋势,黏度和黏流活化能呈先降低后升高的趋势,炉渣流动性和热稳定性先变好后变差。

(2) 炉渣 MgO 含量由 8.00% 升高至 13.00%,包钢高炉渣中黄长石相数量减少,而熔点较低的镁蔷薇石相、高熔点的  $MgAl_2O_4$  和  $Mg_2SiO_4$  相数量增加,使得包钢高炉渣变形温度、半球温度及流动温度

呈先降低后升高的趋势。

(3) 基于 Factsage 8.2 热力学软件计算结果,炉渣 MgO 含量从 8.00% 升高至 13.00%,包钢高炉渣热焓逐渐升高,炉渣储热能力增强,有利于保持高炉炉缸热量充沛。

(4) 综合考虑本研究实验结果、Factsage 8.2 热力学软件理论计算及包钢现有高炉炉渣 MgO 含量控制水平,建议可适当提高包钢高炉渣 MgO 含量至 10.00%。

## 参 考 文 献

- [1] 张凯旋,金永丽,蒋锦韬,等. 磁场下白云鄂博贫铁矿的热力学模拟[J]. 中国冶金,2023,3(7):21-30.
- [2] 柴轶凡,樊莹杰,高兴,等. 碱度对白云鄂博矿球团矿还原膨胀性能的影响[J]. 钢铁,2023,58(1):13-21.
- [3] 于森. 高炉渣体系研究及其对炼铁过程的影响[J]. 冶金与材料,2023,43(9):138-140.
- [4] 艾国梁,陈生利,彭厅,等. 韶钢高炉炉渣性能研究[J]. 南方金属,2022(6):15-18.
- [5] GAO H B, TANG J, CHU M S, et al. Effects of MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO/SiO<sub>2</sub> Ratios on Viscosity of High Titanium - Bearing Blast Furnace Slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023,30(3):456-464.
- [6] 陈玉成,赵金巍,王庆鲲. 高碱度负荷条件下昆玉高炉造渣制度实践及分析[J]. 新疆钢铁,2019(4):50-53.
- [7] KIM G H, SOHN I. A Study of the Viscous Properties with NaF Additions in the CaO - SiO<sub>2</sub> - 12 Mass Pct Na<sub>2</sub>O Based Slags [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011,42(6):1218-1223.
- [8] 潘玉柱,徐益军,郑林,等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 含量对高炉渣熔化和流动性能的影响研究[J]. 金属材料与冶金工程,2023,51(6):31-37,44.
- [9] KIM J B, SOHN I. Effect of SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Ratios on the Viscosity and Structure of the TiO<sub>2</sub> - MnO - SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Welding Flux System[J]. ISIJ International, 2014, 54(9): 2050-2058.
- [10] GAO Y M, WANG S B, HONG C, et al.

- Effects of Basicity and MgO Content on the Viscosity of the  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - 9\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  Slag System [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2014, 21(4):353-362.
- [11] FENG C, CHU M S, TANG J, et al. Effect of  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on Viscous Behaviors of the Titanium - Bearing Blast Furnace Slag [J]. *Steel Research International*, 2016, 87(10):1274-1283.
- [12] 邓美乐. 高炉渣矿相结构对其流动性能的影响规律[D]. 唐山:华北理工大学, 2021.
- [13] HU X J, REN Z S, ZHANG G H, et al. A Model for Estimating the Viscosity of Blast Furnace Slags with Optical Basicity [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2012, 19(12):1088-1092.
- [14] XING X D, PANG Z G, MO C, et al. Effect of MgO and BaO on Viscosity and Structure of Blast Furnace Slag [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2020, 530:1-8.
- [15] LI Q H, YANG S F, ZHANG Y L, et al. Effects of MgO,  $\text{Na}_2\text{O}$ , and  $\text{B}_2\text{O}_3$  on the Viscosity and Structure of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  - Bearing  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  Slags [J]. *ISIJ International*, 2017, 57(4):689-696.
- [16] 邓美乐, 韩秀丽, 刘磊, 等. MgO 对中钛型高炉渣矿相结构及冶金性能的影响 [J]. *钢铁*, 2016, 51(4):14-17.
- [17] FENG C, CHU M S, TANG J, et al. Effects of MgO and  $\text{TiO}_2$  on the Viscous Behaviors and Phase Compositions of Titanium - Bearing Slag [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2016, 23(8):868-880.
- [18] 王超, 居勤章. 宝钢 2 号高炉降低镁铝比工业试验 [J]. *炼铁*, 2020, 39(1):7-11.
- [19] 沈峰满, 温秋林, 姜鑫, 等. 国内外高炉炉渣 ( $\text{MgO}/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ) 的对比分析 [J]. *炼铁*, 2015, 34(2):1-3.
- [20] 任允芙. 钢铁冶金岩石学 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1982.
- [21] 姜鑫, 吴钢生, 魏国, 等. MgO 对烧结工艺及烧结矿冶金性能的影响 [J]. *钢铁*, 2006, 41(3):8-11, 35.
- [22] 常治宇, 焦克新, 张建良, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 MgO 对炉渣热焓的影响及热力学分析 [J]. *冶金能源*, 2018, 37(4):24-28, 32.

(上接第 8 页)

高了 40.71 t/h, 细碎机作业率大幅度降低, 年节省电费 33.7 万元。

(2) 改造后破碎机运行平稳, 无异常冲击, 衬板使用寿命明显提高, 同时设备的稳定运行降低了其他部件损耗, 降低了设备故障率, 提高了设备运转效率。中碎机衬板使用寿命延长了 15 天, 细碎机衬板使用寿命延长了 30 天, 年节省衬板费用 26 万元。

(3) 振动筛筛网规格改为 11 mm × 45 mm, 筛分效率提高至 84.70%, 其筛下细粒级含量明显增加, 一次磨机给料 - 12 mm 粒级含量能达到 94.12%, 实现了多碎少磨, 球磨机处理量增加至 380 t/h, 为

铁精矿、稀土精矿、萤石精矿的增产创造了条件。

### 参 考 文 献

- [1] 王维维, 李二斗, 金海龙, 等. 白云鄂博萤石型稀土 - 铁矿石工艺矿物学研究 [J]. *有色金属: 选矿部分*, 2020(6):14-18.
- [2] 赵建强, 曾永杰, 常文, 等. CH-870 破碎机在宝山矿业公司的应用及改进 [J]. *包钢科技*, 2022, 48(1):82-84, 98.
- [3] 罗敏. CH870 圆锥破碎机的技改实践 [J]. *现代矿业*, 2020, 36(1):184-185, 212.