

## 碱度对烧结矿致密化行为的影响

肖扬武<sup>1</sup>, 刘 强<sup>2</sup>, 易正明<sup>2</sup>

(1. 首钢水城钢铁(集团)有限责任公司, 贵州 六盘水 553028; 2. 武汉科技大学  
材料与冶金学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**为定量分析烧结过程中的聚结行为, 本文采用热力学软件 FactSage 对不同碱度条件下熔体的组成及性质进行计算, 并根据计算结果进一步得出了各条件下熔体的表面张力以及表观黏度, 用于烧结矿致密化系数的计算。结果显示, 随着碱度升高, 熔体的表观黏度不断减小, 在温度为 1 350 °C 时, 表观黏度有最小值(0.114 Pa·s); 表面张力随碱度的升高而先减小后增大, 在温度为 1 300 °C 时有最小值(约为 0.32 N)。烧结矿的聚结行为受表观黏度与表面张力共同驱动, 提高碱度有利于烧结过程的聚结行为, 使得致密化系数增大, 温度越高, 致密化系数也越大。烧结试验表明, 在碱度为 1.85~2.25 范围内, 致密化系数与烧结矿孔隙率和转鼓指数有关联, 致密化系数在一定程度上可以表征烧结矿强度的大小。

**关键词:** FactSage 计算; 表面张力; 表观黏度; 致密化系数; 烧结矿强度

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0030-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.022

## Effect of alkalinity on sinter densification behavior

XIAO Yangwu<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>, YI Zhengming<sup>2</sup>

(1. Shougang Shuicheng Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Liupanshui 553028, Guizhou, China; 2. School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract:** In order to quantitatively analyze the coalescence behavior during the sintering process, the composition and properties of the melt under different alkalinity conditions are calculated by using the thermodynamic software FactSage, and the surface tension and apparent viscosity of the melt under each condition are further obtained according to the calculation results, which are used to calculate the densification coefficient of sinter. The results show that the apparent viscosity of the melt decreases with the increase of alkalinity, and the apparent viscosity has a minimum value (0.114 Pa·s) at a temperature of 1 350 °C. The surface tension decreases first and then increases with the increase of alkalinity, and has a minimum value (about 0.32 N) at a temperature of 1 300 °C. The coalescence behavior of sinter is driven by the apparent viscosity and surface tension, and increasing the alkalinity is conducive to the coalescence behavior of the sintering process, so that the densification coefficient increases, and the higher the temperature, the greater the densification coefficient. The sintering test shows that in the alkalinity range of 1.85~2.25, the densification coefficient is related to the porosity of the sinter and the drum index, and the densification coefficient can characterize the sinter strength to a certain extent.

**Key words:** FactSage computation; surface tension; apparent viscosity; densification coefficient; sinter strength

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11402180); 耐火材料与冶金国家重点实验室基金资助项目(2014QN20)

作者简介: 肖扬武(1974—), 男, 高级工程师, 从事铁前技术工艺优化研究。

通信作者: 易正明(1973—), 男, 教授, 从事冶金过程数学模型及烧结工艺优化研究。

烧结矿是高炉炼铁的主要原料,其结构可以分为两个部分:矿物成分和孔隙。普遍认为,烧结矿中的孔隙在高炉炼铁环节发挥重要作用:一方面,孔隙为反应物气体提供扩散路径;另一方面,孔隙也增大了反应面积。对烧结体孔隙与强度间关系的讨论,早在1953年,DUCKWORTH<sup>[1]</sup>在研究报告中指出,对于一般烧结体,孔隙率的增大往往会使得其强度降低。于是,有学者开始研究铁矿石烧结过程中的孔隙形成机制,YANG等<sup>[2]</sup>发现烧结矿中的孔隙主要在液相流动时、石灰石颗粒部位和焦炭颗粒燃烧后形成。另外,有研究结果证实孔隙对烧结矿质量参数有重要影响<sup>[3]</sup>。因此,孔隙率可以表征烧结矿的强度大小,对于高炉生产的顺行与否有着重要意义。从烧结机理上来讲,烧结过程可以描述为扩散过程、黏性流动及冷凝的结果,而这些过程最终引起烧结矿的致密化<sup>[4]</sup>。致密化行为是烧结矿孔隙演变的主要方式,是固相烧结和液相烧结两个阶段的结果<sup>[5]</sup>。在烧结床中,主要的结构变化发生在熔体形成位置,这个过程通常被称为聚结<sup>[6]</sup>,聚结过程非常复杂,受众多变量的控制。在烧结过程中,强化聚结过程将会形成更大更致密的烧结颗粒<sup>[7-8]</sup>,从而改善高炉生产。

当前,烧结矿聚结过程的研究主要在液相流动性方面,系统流动性越高,烧结过程的聚结和致密性越好。王春来等<sup>[9]</sup>通过试验,研究了在烧结中添加硼镁铁精粉对液相流动性的影响。杨双平等<sup>[10]</sup>通过烧结杯试验,研究了矿粉中SiO<sub>2</sub>质量分数对液相生成及流动性的影响。康健等<sup>[11]</sup>通过SEM-EDS、荷重软化熔滴等性能测定试验,研究了矿粉配比对混匀料液相生成的影响。试验结果表明,矿粉配比对混匀料液相生成行为有影响,进而影响烧结矿质量。此外,也有研究人员采用FactSage模拟计算,对烧结过程进行热力学分析,从化学平衡的角度探讨各因素对烧结过程的影响。吴胜利等<sup>[12]</sup>采用FactSage热力学计算和微型烧结可视化试验方法,研究了固定CaO配比条件下铁矿粉的液相流动性及其主要的热力学液相生成特征的影响因素,KIMURA等<sup>[13]</sup>利用化学平衡技术研究了不同氧分压下CaO-SiO-FeO-FeO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系

统的相图,CHEN等<sup>[14]</sup>研究了氧分压和添加Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MgO对FeO<sub>x</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub>体系液相线的影响。翟晓波等<sup>[15]</sup>以7种铁矿粉为研究对象,在试样测定两种氧分压下高温熔体流动行为的基础上,通过FactSage热力学计算、XRD矿相分析及矿相数点法探究烧结高温熔体的流动行为,对烧结矿强度的影响。李小明等<sup>[16]</sup>采用FactSage热力学软件研究了不锈钢酸洗污泥对铁矿粉烧结液相生成特性和CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-CaF<sub>2</sub>体系液相分布的影响。通过FactSage研究了不同温度和碱度条件下烧结液相生成行为,结合熔体成分与性质,对烧结过程聚结行为作出了定量评估,得到了不同温度和碱度条件下的致密化系数,对于实际的烧结生产有着理论指导意义。但目前对于铁矿石烧结过程中的聚结行为研究相对较少,因为真实的烧结生产存在火焰前锋,熔体的数量与性质是火焰前锋处烧结反应的结果,对此进行测量较为困难。理论研究表明,聚结过程是表面力、黏性力、惯性力和重力的综合结果,其中惯性力和重力通常比表面力和黏性力小。尽管烧结是由各种反应的动力学控制,并且远离平衡,但是热力学分析可以提供关于熔体形成的有用输入,并且有助于理解与实际工艺条件的偏差。实践研究表明,原料结构、燃料质量、工艺操作、布料设备等均对烧结矿强度有不同程度的影响,通过优化原料结构、调整燃料粒度、精细化操作、工艺设备改造等方法能显著改善烧结矿转鼓强度。

因此,本文基于实际的烧结生产,通过FactSage对烧结过程中的熔体数量及性质进行计算,然后结合熔体的各项参数,得到不同温度和不同碱度条件下熔体的表面张力和与表观黏度值,根据致密化系数值的大小来定量描述烧结过程中的聚结行为程度,再结合烧结试验,评估计算所得的致密化系数与烧结矿孔隙率和转鼓指数间的关联。通过FactSage计算得到的致密化系数,对烧结矿孔隙率及转鼓强度的提前预估和评价,能为实际烧结配矿和生产过程提供优化指导。

## 1 试验准备

### 1.1 试验原料

试验原料主要来自某钢铁厂,其主要化学成

分和烧损如表 1 所示。基于 FactSage 6.4 软件的计算要求,对混匀料配加 CaO 来调节其碱度,再折成相应的氧化物形式,设定  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  以及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等氧化物的总和为 100 g,用于 FactSage 热力学计算的试样化学成分如表 2 所示。烧结验证试验配料方案如表 3 所示。

表 1 原料主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and losses on ignition of raw materials %

原料名称	TFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	烧损
混匀料	59.71	3.89	3.74	0.72	1.44	7.00	9.43
生石灰	0.00	1.04	80.00	0.00	0.00	0.00	8.00
白云石	0.00	1.38	33.00	20.00	0.00	6.00	44.00
石灰石	0.00	1.20	52.00	0.00	0.00	8.00	44.00
焦煤粉	0.50	8.50	1.00	0.30	0.00	9.00	80.00
返矿	56.30	5.55	11.00	1.90	2.45	1.00	1.00

表 2 用于 FactSage 计算的试样化学成分和碱度(质量分数)

Table 2 Chemical compositions and basicity of the sample for FactSage calculation %

试样	碱度	化学成分(质量分数)/%					
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
OA	1.85	59.58	26.85	7.37	3.98	1.47	0.74
OB	1.95	59.34	26.74	7.74	3.97	1.47	0.73
OC	2.05	59.11	26.64	8.10	3.95	1.46	0.73
OD	2.15	58.88	26.54	8.46	3.94	1.46	0.73
OE	2.25	58.65	26.43	8.82	3.92	1.45	0.73

表 3 烧结杯试验配料方案(质量分数)

Table 3 Experimental mixing scheme of sintering cup %

试样	混匀料	生石灰	白云石	石灰石	固体燃料
OA	86.5	2.5	3	2	6
OB	86.0	3.0	3	2	6
OC	85.5	3.5	3	2	6
OD	85.0	4.0	3	2	6
OE	84.5	4.5	3	2	6

## 1.2 试验方法

在烧结过程中,熔体的形成十分复杂,不可能直接测量熔体的物理性能,因此可以通过熔体成分来预测熔体的性能。液相聚结使得烧结矿孔表面积减少,通常认为聚结行为受表面力、黏性力、惯性力和重力的综合结果。因此,评估烧结

矿聚结行为的致密化因子可以表示为

$$F_{\text{Den}} = A W_e^B C_a^C B_o^D \quad (1)$$

$$\text{其中: } W_e = \frac{\rho v^2 L}{\sigma_M} \quad (2)$$

$$C_a = \frac{\mu_{\text{App}} v}{\sigma_M} \quad (3)$$

$$B_o = \frac{\rho g L^2}{\sigma_M} \quad (4)$$

式中:  $F_{\text{Den}}$  为致密化因子,其值越大,表示烧结过程中的聚结过程越充分,致密化程度越好;  $W_e$  为韦伯数;  $C_a$  为毛细管数;  $B_o$  为邦德数;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为常数;  $v$  为特征速度, m/s;  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$  为黏度  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $L$  为与界面张力作用的(气-液-固)界面曲率半径相关的特征长度, m;  $\mu_{\text{App}}$  为表观黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\sigma_M$  为熔体表面张力,  $\text{kg/s}^2$ 。其中,  $\sigma_M$  可以通过相关文献[17]获得,  $\rho$  可以通过 Factsage 计算得到,  $v$  和  $L$  是未知项。

采用假设  $C_a$  和  $B_o$  指数的方法来消除未知项  $v$  和  $L$ , 最终得到式(5)。

$$F_{\text{Den}} = A \left( \frac{\sigma_M^{\frac{3}{2}}}{\mu_{\text{App}}^2} \sqrt{\frac{\rho}{g}} \right)^E \quad (5)$$

对表面张力  $\sigma_M$  的计算方程见式(6)。

$$\sigma_M = \sum x_i \sigma_i + (T - 1773) \sum x_i \left( \frac{\sigma_i}{dT} \right) \quad (6)$$

式中:  $x_i$  为熔体中组分  $i$  的摩尔分数;  $\sigma_i$  是熔体中组分  $i$  的偏摩尔表面张力, N/m;  $T$  为熔体温度, K;  $\sigma_i/dT$  为熔体组分的偏摩尔表面张力温度系数;  $E$  为常数。熔体组分的  $\sigma_i$  和  $\sigma_i/dT$  取值如表 4 所示。

表 4 熔体组分的偏摩尔表面张力和温度系数

Table 4 Partial molar surface tension and temperature coefficients of melt components

项目	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
$\sigma_i$	-216.2/ $x_i$ + 516.2	645	625	260	655	635
$\sigma_i/dT$	-0.050	0.100	-0.094	0.031	-0.177	-0.130

表观黏度可以使用两相(液-固)系统的 Vand 方程来确定,对于表观黏度的计算, Vand 模型基于理论和试样输入,并且已被证明对低固体浓度和高固体浓度都有效。因此比较适合用于烧结熔体表观黏度的计算。方程见式(7)。

$$\mu_{\text{App}} = \mu_M \exp\left(\frac{2.5S + 2.7S^2}{1 - 0.61S}\right) \quad (7)$$

式中:  $\mu_M$  为熔体黏度, Pa·s;  $S$  为熔体中固体颗粒的体积分数, %。

对于一般的氧化物体系, 可以采用求和原则来确定体系的摩尔体积。但是含有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  的矿渣由链、环和配合物组成, 它们取决于现有阳离子的数量和性质, 该部分摩尔体积取决于该类型的氧化物的组成。MILLS 等<sup>[18]</sup> 概述的 BOS 数学模型考虑了这些影响, 在大量试样数据的基础上建立了渣系成分中二氧化硅和氧化铝的偏摩尔体积计算式, 该模型对矿渣的密度预测误差约为 2%, 具有较高的准确度, 因而得到了广泛的应用。而烧结熔体也属于渣相体系, 因此 BOS 数学模型可以合理应用在铁矿石烧结熔体中, 方程见式(8)。

$$V = \sum x_i V_i \quad (8)$$

式中:  $V$  为熔体的摩尔体积,  $\text{cm}^3/\text{mol}$ ;  $x_i$  为熔体中组分  $i$  的摩尔分数, 无量纲;  $V_i$  为熔体组分  $i$  偏摩尔体积,  $\text{cm}^3/\text{mol}$ (表 5)。

表 5 熔体组分的偏摩尔体积

Table 5 Partial molar volumes of melt components

						$\text{cm}^3/\text{mol}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	FeO	CaO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MgO	
38.4	15.8	20.7	$19.55 + 7.966x_i$	$28.31 + 32x_i - 31.452x_i^2$		16.1

### 1.3 试验步骤

试验分为 FactSage 热力学计算和烧结杯试验两部分。表 3 中为用于 FactSage 计算的 5 组试样成分, 首先通过“Equilib”模块对 5 组试样的液相生成温度和液相成分进行计算, 然后通过“Phase Diagram”模块计算  $\text{SiO}_2$ -CaO- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  体系的液相投影, 最后通过“Viscosity”模块计算渣相体系的黏度。

烧结杯试样中, 点火温度为  $(1\ 050 \pm 50)^\circ\text{C}$ ,

点火负压为 4 kPa, 持续 120 s。在烧结过程中, 将烧结负压控制在 10 kPa。烧结结束, 直到烧结终点, 烟气温度达到峰值。再利用环境空气冷却 10 min, 然后除去烧渣。烧结试验参数保持固定, 列于表 6。冷却后, 使用 CSIRO 联合滴塔/颚破碎机对烧结矿进行处理, 然后对烧结颗粒进行进一步取样, 以测定烧结矿成分和质量指标, 包括转鼓和耐磨指数的测定(根据 GB/T 24531—2009/ISO3271:2007 国家标准测量)和孔隙率(采用 AutoPore IV9510 型压汞仪测量)。

## 2 结果与分析

### 2.1 碱度对液相生成的影响

采用 Factsage 6.4 中“Equilib”模块对不同碱度条件下的理论液相生成温度以及不同温度下的液相生成量进行计算, 结果如表 6 所示。在不同碱度条件下, 烧结矿的液相生成量随温度的变化如图 1 所示。通过“Phase Diagram”模块计算  $\text{SiO}_2$ -CaO- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  体系: 氧分压固定为 21 278 Pa,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组元固定为 1.47%, MgO 组元固定为 0.73% 情况下的液相投影, 温度区间设置为  $1\ 100 \sim 1\ 600^\circ\text{C}$ , 升温梯度为  $50^\circ\text{C}$ , 计算结果如图 2 所示(图中  $s_2$ 、 $s_4$ 、 $s_6$  代表同种物质的晶型结构)。

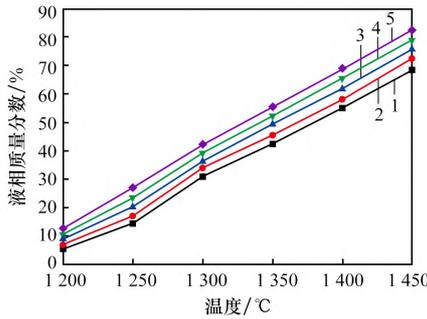
由表 6 可知, 当碱度从 1.85 增大到 2.25 时, 其理论初始液相形成温度略微降低, 这主要是因为碱度影响了液相生成温度, 较高的碱度将导致较低的液相温度。从图 1 可以看出, 液相生成量随温度升高而增大, 当温度高于  $1\ 250^\circ\text{C}$  时, 液相形成加快。试验中, 碱度主要由改变 CaO 的含量来调节, 其它各组分基本不变。图 2 中, 当烧结温度从  $1\ 100^\circ\text{C}$  升高到  $1\ 600^\circ\text{C}$  时, 液相区域迅

表 6 不同碱度条件下液相形成温度

Table 6 Liquid phase formation temperature under different alkalinity conditions

试样	初始液相形成温度/ $^\circ\text{C}$	不同温度下的液相质量分数/%					
		1 200 $^\circ\text{C}$	1 250 $^\circ\text{C}$	1 300 $^\circ\text{C}$	1 350 $^\circ\text{C}$	1 400 $^\circ\text{C}$	1 450 $^\circ\text{C}$
OA	1 138.49	5.44	14.08	31.10	42.62	55.36	68.69
OB	1 138.49	7.25	17.26	33.91	45.97	58.95	72.52
OC	1 138.48	9.06	20.55	36.70	49.25	62.34	75.64
OD	1 136.46	10.83	23.66	39.44	52.47	65.63	79.46
OE	1 133.51	12.63	26.94	42.22	55.70	68.88	82.73

速增大, 向  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  角移动, 此时有更多的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  熔化在液相中, 有利于高强度铁酸钙的生成。随着碱度提高(如图中箭头所示), 在 1 500  $^{\circ}\text{C}$  左右时, 硅酸二钙 ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) 发生由  $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  向  $\alpha'\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$  的晶型转变, 晶型转变引起体积膨胀, 会影响烧结矿的强度<sup>[19]</sup>。



碱度: 1—1.85; 2—1.95; 3—2.05; 4—2.15; 5—2.25。

图 1 不同碱度条件下液相生成量与温度的关系

Fig. 1 Relationship between liquid phase production and temperature under different alkalinity conditions

2.2 碱度对混匀料熔体黏度的影响

通过 Factsage 中“Viscosity”计算板块对 5 组试样熔体在不同温度下的黏度进行了计算, 并通过公式(7)计算得出相应的表观黏度值, 结果如表 7 所示。

由表 7 可知, 当碱度从 1.85 增大到 2.25 时, 相同温度下熔体的黏度变化很小, 而随着温度升高, 熔体的黏度显著减小。当温度从 1 200  $^{\circ}\text{C}$  提高到 1 250  $^{\circ}\text{C}$  时, 表观黏度显著减小, 而当温度继续增加时, 表观黏度稍有减小。这主要是由于温度升高导致更多的熔体形成, 而根据公式(7)可知, 对于两相(液-固)系统, 熔体占比增加, 固体颗粒占比(S)减小, 会使得其表观黏度减小; 而当 S 趋于 0.5 时, 其对  $\mu_{\text{App}}$  的影响减小。表观黏度也随

表 7 不同碱度及温度条件下熔体黏度的变化

Table 7 Changes of melt viscosity under different alkalinity and temperature conditions

试样	R	$\mu_M$				$\mu_{\text{App}}$			
		1 200 $^{\circ}\text{C}$	1 250 $^{\circ}\text{C}$	1 300 $^{\circ}\text{C}$	1 350 $^{\circ}\text{C}$	1 200 $^{\circ}\text{C}$	1 250 $^{\circ}\text{C}$	1 300 $^{\circ}\text{C}$	1 350 $^{\circ}\text{C}$
OA	1.85	0.035	0.030	0.025	0.022	525.996	11.153	2.170	0.456
OB	1.95	0.035	0.030	0.026	0.022	210.090	3.096	1.320	0.299
OC	2.05	0.036	0.030	0.026	0.022	97.552	1.522	0.798	0.203
OD	2.15	0.036	0.030	0.026	0.022	49.088	0.884	0.524	0.147
OE	2.25	0.037	0.031	0.026	0.023	59.322	0.565	0.354	0.114

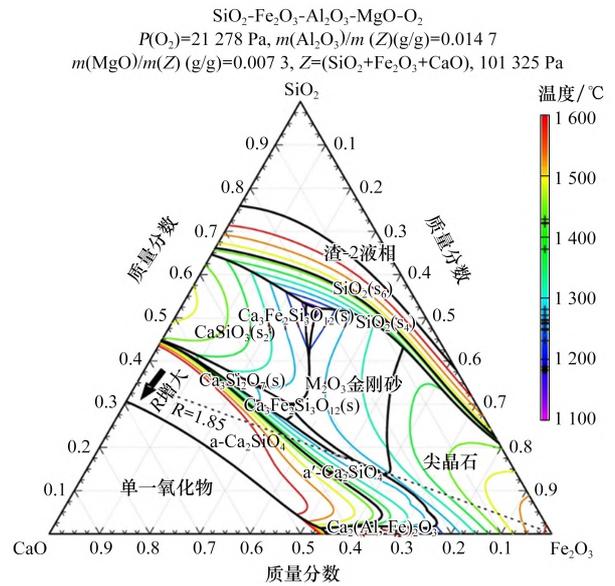


图 2 不同温度条件下液相投影

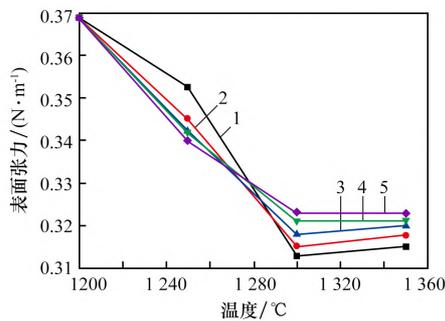
Fig. 2 Projection of liquid phase at different temperatures

着碱度提高而减小, 这主要是碱度提高降低了液相形成温度, 使得同温度下有更多的熔体形成, 从而使得表观黏度减小。表观黏度减小, 使得熔融混合物的流动性更好, 利于烧结矿的致密化。

2.3 碱度对混匀料熔体表面张力的影响

由物理化学可知, 表面张力指的是液相自主收缩其表面的力, 在烧结过程的聚结行为中, 表面张力是推动聚合的主要驱动力。表面张力的大小主要取决于液相的物质组成, 与熔体中表面活性物质的多少密切相关。

5 组试样在不同温度下的表面张力如图 3 所示。由图 3 可知, 在温度为 1 200 ~ 1 300  $^{\circ}\text{C}$  时, 熔体的表面张力急剧减小, 随碱度的升高先减小后增大; 当温度为 1 300 ~ 1 350  $^{\circ}\text{C}$  时, 熔体的表面张力趋于稳定, 碱度升高时, 表面张力增加。



碱度: 1—1.85; 2—1.95; 3—2.05; 4—2.15; 5—2.25。

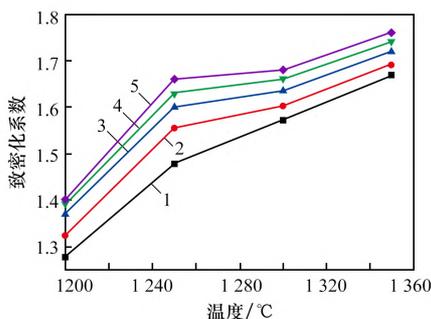
图 3 不同碱度条件下烧结矿表面张力与温度的关系

Fig. 3 Relation between surface tension and temperature of sinter under different alkalinity conditions

由前文可知, 约在 1 140 °C 液相生成, 随着温度继续升高, 质点的热运动和质点的间距增加, 作用力减弱, 同时熔体中的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  等表面活性物质增加, 熔体的表面张力减小。当温度上升到 1 350 °C 时, 熔体中  $\text{MgO}$  成分稍有降低, 而熔体中适量的  $\text{MgO}$  可使周围的  $\text{O}^{2-}$  被  $\text{Mg}^{2+}$  吸引, 减小熔体表面聚集的  $\text{O}^{2-}$ , 使熔体的表面张力降低<sup>[20]</sup>, 因此在 1 350 °C 时, 熔体的表面张力稍有增大。

#### 2.4 碱度对烧结矿致密化的影响

在烧结过程中, 熔体表面张力是主要驱动力, 而熔融混合物的表观黏度是主要阻力。因此, 这两个因素是定量分析烧结过程中聚结行为的关键。根据公式(5), 并参考文献[17]中 A 和 E 的拟合值, 得到了不同碱度及温度条件下烧结矿的致密化系数, 结果如图 4 所示。



碱度: 1—1.85; 2—1.95; 3—2.05; 4—2.15; 5—2.25。

图 4 不同碱度条件下致密化系数与温度的关系

Fig. 4 Relation between densification coefficient and temperature under different alkalinity conditions

由图 4 可知, 在 1 200 ~ 1 350 °C 内, 随着碱度升高, 烧结矿致密化系数均增大, 并随着温度升高, 致密化系数也增大。从液相形成开始, 出

现固-液两相系统, 随着温度升高, 液相量增多, 熔融混合物中的固相占比逐步降低, 使得熔体的表观黏度减小, 表面张力先减小后增大。因此, 在温度区间为 1 250 ~ 1 300 °C 内, 烧结矿的聚结行为放缓, 致密化系数稍有增大, 随着温度升高, 聚结行为加速, 致密化系数在 1 350 °C 时达到最大值。

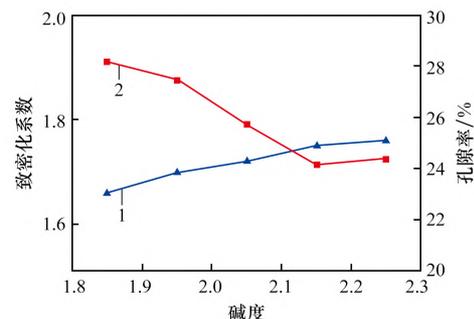
#### 2.5 致密化系数与烧结矿孔隙率及强度的关系

为了探究本试验中得到的致密化系数与烧结矿强度的关系, 通过烧结杯试验, 研究了碱度为 1.85 ~ 2.25, 烧结矿孔隙率及转鼓指数的变化, 试验方案如表二所示, 通过压汞仪测量烧结矿的孔隙率, 试样结果如表 8 所示, 不同碱度条件下烧结矿致密化系数与孔隙率的关系如图 5 所示。

表 8 烧结杯试验结果

Table 8 Results of sintering cup experiment

试样	碱度	孔隙率/%	转鼓指数/%
OA	1.85	28.2	66.1
OB	1.95	27.6	66.8
OC	2.05	25.9	67.1
OD	2.15	24.3	69.4
OE	2.25	24.6	71.2



1—致密化系数; 2—孔隙率。

图 5 不同碱度条件下烧结矿致密化系数与孔隙率的关系

Fig. 5 Relation between densification coefficient and porosity of sinter under different alkalinity conditions

从表 8 可以看除, 在碱度为 1.85 ~ 2.15 范围内, 随着碱度的提高, 烧结矿的孔隙率呈不断降低趋势, 其转鼓指数不断增大, 烧结矿强度增大。当碱度达到 2.25 时, 相比前一碱度 2.15 孔隙率增加, 原因可能是当碱度逐渐提高, 烧结矿内逐渐产生气孔与裂纹, 透气性提高, 孔隙率略微上升。由图 5 可知, 通过计算所得的烧结矿致密化系数与试验所称量的孔隙率负相关, 即致密化系

数增大, 烧结矿孔隙率降低。这表明评估烧结矿聚结行为程度的致密化系数可以在一定程度上表征烧结矿的强度。

### 3 结论

(1) 烧结过程中, 理论初始液相生成温度在 1 138 °C 附近, 且理论初始液相生成温度随碱度的提高而稍有降低, 随着温度升高, 液相生成量增多。

(2) 表观黏度随碱度的增大而减小, 当碱度为 2.25 时有最小值(0.114 Pa·s)。熔体的表观黏度随温度升高而减小, 当温度从 1 200 °C 提高到 1 250 °C 时, 表观黏度显著减小, 而当温度提高到 1 350 °C 时, 表观黏度稍有减小。

(3) 熔体的表面张力取决于熔体成分, 随碱度增大而先减小后增大, 当温度为 1 300 °C 时有最小值, 约为 0.32 N。

(4) 烧结矿的聚结行为受表观黏度与表面张力共同驱动, 碱度提高利于烧结过程的聚结行为, 同时温度越高, 致密化系数也越大。

(5) 在碱度为 1.85 ~ 2.25 范围内, 计算所得的致密化系数与烧结矿的孔隙率负相关, 致密化系数越大, 烧结矿的孔隙率越小; 与烧结矿的转鼓指数正相关, 致密化系数越大, 烧结矿转鼓指数也越大。

(6) 通过分析烧结矿的致密化系数获得了碱度 - 孔隙率 - 转鼓强度之间的规律, 为提前预知并优化烧结工艺提供了理论依据和生产指导, 后期可在不同的钢厂混匀料下进行反复试验计算, 对结果进一步分析、论证与细化, 为烧结生产提供更加切实可信的技术保障和操作支持。

### 参考文献:

- [1] DUCKWORTH W. Discussion of ryshkewitch paper by winston duckworth[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1953, 36(2): 68.
- [2] YANG Y H, STANDISH N. Fundamental mechanisms of pore formation in iron ore sinter and pellets[J]. ISIJ International, 1991, 31(5): 468 - 477.
- [3] UMADEVI T, BANDOPADHYAY U K, MAHAPATRA P C, et al. Influence of limestone particle size on iron ore sinter properties and productivity[J]. Steel Research

International, 2010, 81(6): 419 - 425.

- [4] LIU D M, EVANS G, LOO C E. Iron ore sinter structure development under realistic thermal conditions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 130: 129 - 137.
- [5] 程铭. 连续氧化铝纤维高温烧结的相变行为及致密化机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.  
CHENG Ming. Phase transformation behavior and densification mechanisms during high-temperature sintering of continuous alumina fibers[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [6] 吕学伟, 郭家宝, 游洋, 等. 铁矿粉烧结制粒过程颗粒行为研究综述[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 1084 - 1094.  
LÜ Xuewei, GUO Jiabao, YOU Yang, et al. Particles behavior of iron ore fine during granulation process: A review[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1084 - 1094.
- [7] 郭家宝. 高剪切制粒工艺中混合料颗粒的聚结长大行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
GUO Jiabao. Research on the agglomeration and growth behavior of mixture particles in high shear granulation process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [8] 吴珊珊. 烧结原料在高剪切运动中的颗粒聚结行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
WU Shanshan. Research on particle coalescence of granulated raw material in high shear movement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [9] 王春来, 潘文, 辛越, 等. 硼镁铁精粉的烧结性能试验及工业应用[J]. 烧结球团, 2024, 49(1): 72 - 79.  
WANG Chunlai, PAN Wen, XIN Yue, et al. Sintering character test and industrial application of ludwigite powder[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(1): 72 - 79.
- [10] 杨双平, 孙海兴, 张甜甜, 等. 低硅矿烧结高温基础特性及优化配矿研究[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(6): 659 - 670.  
YANG Shuangping, SUN Haixing, ZHANG Tiantian, et al. Research on high temperature basic characteristics and optimized ore blending of low silicon ore sintering blending[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(6): 659 - 670.
- [11] 康健, 宁晓钧, 张建良, 等. 烧结混匀料液相生成行为对烧结矿质量的影响[J]. 钢铁研究学报, 2020,

- 32(10):860-867.
- KANG Jian, NING Xiaojun, ZHANG Jianliang, et al. Effect of liquid phase generation behavior of sintering mixture on sinter quality[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(10):860-867.
- [12] 吴胜利, 苏博, 齐渊洪, 等. 铁矿粉液相流动性的主要液相生成特征因素解析[J]. 工程科学学报, 2018, 40(3):321-329.
- WU Shengli, SU Bo, QI Yuanhong, et al. Major melt formation characteristic factor analysis of iron ore liquid phase fluidity during the sintering process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(3):321-329.
- [13] KIMURA H, OGAWA T, KAKIKI M, et al. Effect of  $Al_2O_3$  and MgO additions on liquidus for the CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO<sub>x</sub> system at 1 573 K[J]. ISIJ International, 2005, 45(4):506-512.
- [14] CHEN C L, ZHANG L, LU L M, et al. Thermodynamic calculation of liquidus surface of FeO<sub>x</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> system[J]. ISIJ International, 2010, 50(11):1523-1531.
- [15] 翟晓波, 王刚, 邹忠平, 等. 2种氧分压下铁矿粉烧结高温熔体的流动行为[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(1):75-87.
- ZHAI Xiaobo, WANG Gang, ZOU Zhongping, et al. Flow behavior of high-temperature melt during iron ore sintering under two oxygen partial pressures[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(1):75-87.
- [16] 李小明, 王翀, 邢相栋, 等. 不锈钢酸洗污泥对铁矿粉烧结液相生成的影响[J]. 烧结球团, 2018, 43(5):12-19.
- LI Xiaoming, WANG Chong, XING Xiangdong, et al. Influence of stainless steel pickling sludge on liquid phase formulation during iron ore fines sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(5):12-19.
- [17] LOO C E, LEUNG W. Factors influencing the bonding phase structure of iron ore sinters[J]. ISIJ International, 2003, 43(9):1393-1402.
- [18] MILLS K C, KEENE B J. Physical properties of BOS slags[J]. International Materials Reviews, 1987, 32(1):1-120.
- [19] GUO H, GUO X M. Effect of alumina on liquid phase formation in sintering process of iron ore fines[J]. Steel Research International, 2019, 90(8):1900138.
- [20] XU J F, ZHANG J Y, CHEN D, et al. Effects of MgO content and CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio on surface tension of calcium aluminate refining slag[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(12):3079-3084.
- ~~~~~
- (上接第9页)
- [27] 周茂军, 张文亮, 袁兵, 等. 烧结工序能效因子识别与控制的探讨[J]. 烧结球团, 2010, 35(3):10-13.
- ZHOU Maojun, ZHANG Wenliang, YUAN Bing, et al. Discussion on identification and control of energy efficiency factors for sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2010, 35(3):10-13.
- [28] 张春霞, 上官方钦, 酆秀萍, 等. 中美钢铁工业能效对标研究[J]. 钢铁, 2013, 48(1):87-92.
- ZHANG Chunxia, SHANGGUAN Fangqin, LI Xiuping, et al. Study on energy efficiency benchmarking of the steel industry between China and the U. S[J]. Iron & Steel, 2013, 48(1):87-92.
- [29] 李富鹏. 烧结工序能效分析与能耗预测[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
- LI Fupeng. Energy efficiency analysis and energy consumption prediction of sintering process. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2021.
- [30] 陈丽锦, 邓帅, 王珺瑶, 等. 变温吸附碳捕集系统能效性能对标分析[J]. 过程工程学报, 2021, 21(10):1225-1235.
- CHEN Lijin, DENG Shuai, WANG Junyao, et al. Benchmarking analysis on energy efficiency performance of temperature swing adsorption carbon capture system[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(10):1225-1235.
- [31] 张学强. 原油集输系统能效对标评价体系研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- ZHANG Xueqiang. Study on energy efficiency benchmarking evaluation system of crude oil gathering and transportation system. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.
- [32] 高琨. 基于Petri网理论的钢铁企业生产过程能效分析研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- GAO Kun. Study on energy efficiency analysis in the production process of the iron and steel enterprises based on Petri net. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.