烧结

$w(MgO)/w(Al_2O_3)$对 SFCA 流动性的影响

胡长庆，任建松，师学峰，赵升举，靳京，李志强
（华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063210）

摘要：本文研究了 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$对高碱度烧结矿中复合铁酸钙（SFCA）黏结相流动性的影响，重点从流动性指数、液相生成温度及熔化时间 3 个方面进行了分析。结果表明，随着 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$比值的增大，Fe_2O_3 向 SFCA 熔体的溶解增强，SFCA 衍射峰强度提高，Fe_2O_3 衍射峰强度降低，促进了 SFCA 的生成。在流动性方面，高铝体系因易形成高熔点不均匀相而流动性较差，中铝体系因成分匹配合理表现出最优流动性，低铝体系受比值变化影响较小，流动性较为稳定。液相生成温度整体随 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$升高而上升，且温度呈现高铝 > 中铝 > 低铝。液相开始生成温度在低铝和中铝体系中随 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$增大整体呈上升趋势，仅在个别比例下出现降低状态，高铝体系则呈“升 – 降 – 升”波动，这与熔化前期的黏度和温度变化有关。终止生成温度在各体系均上升，高铝体系终止生成温度始终最高，其原因在于 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$增大导致润湿性下降，阻碍熔化进程。液相终止生成温度与流动温度的温区区间在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.4 时最大，表明此比值下液相生成区间最宽，而过高的 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$比值则会抑制液相生成与流动。熔化时间在低铝体系为 0.3，以及中铝体系在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.4 时最短，高铝体系整体较长，不利于液相生成。

关键词：流动性；$w(MgO)/w(Al_2O_3)$；复合铁酸钙；烧结液相
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000 – 8764(2026)03 – 0022 – 08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.043

Effect of $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ on SFCA liquidity

HU Changqing, REN Jiansong, SHI Xuefeng, ZHAO Shengju, JIN Jing, LI Zhiqiang
(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: The effect of $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ on the liquidity of the composite calcium ferrate (SFCA) binder phase in high-basicity sinter is investigated, focusing on three aspects: liquidity index, liquid phase formation temperature and melting time. The results show that as the ratio of $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ increases, the dissolution of Fe_2O_3 into the SFCA melt increases, the intensity of the SFCA diffraction peak increases, while the intensity of the Fe_2O_3 diffraction peak decreases, thereby promoting the formation of SFCA. In terms of liquidity, high-aluminum systems tend to form high-melting-point ununiform phases and thus have poor fluidity, the medium-aluminum system exhibits optimal fluidity due to reasonable composition matching, the low-alumina system is less affected by proportional changes and has relatively stable liquidity. The liquid phase formation temperature generally increases with the increase of $w(MgO)/w(Al_2O_3)$, and the order of temperature is high-aluminum > medium-aluminum > low-aluminum. The temperature at which the liquid phase begins to form generally rises as $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ increases in low and medium aluminum systems, with only a decrease in certain proportions. In high-alumina systems, the fluctuation is “rise-decrease-rise”, which is related to viscosity and temperature changes before melting. The termination formation temperature rises in all systems, with the high

收稿日期：2025 – 09 – 01；**修回日期**：2025 – 10 – 14
基金项目：燕赵钢铁实验室区域创新能力提升项目（YZISL2024034）
作者简介：胡长庆（1973—），博士，教授，从事冶金节能与资源优化方面的研究。
通信作者：师学峰（1984—），博士，讲师，从事冶金资源综合利用及新工艺方面的研发。

aluminum system always having the highest termination temperature due to increased $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ levels, which reduces wettability and hinders the melting process. The temperature range between the termination temperature of liquid phase formation and flow temperature is highest when $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ is 0.4, indicating that the liquid phase formation range is widest at this ratio, while an excessively high $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ ratio inhibits liquid phase formation and flow. The melting time is shortest at 0.3 in low-alumina systems and 0.4 in mid-aluminum systems, in contrast, the high-alumina system is generally longer, which is unfavorable for liquid phase formation.

Key words: liquidity; $w(MgO)/w(Al_2O_3)$; compound calcium ferrate; sintering liquid phase

在烧结造块过程中，液相作为烧结造块的基础，其性质与数量在很大程度上决定了烧结矿固结强度的大小[1]，同时也影响着其冶金性能的好坏。因此，液相流动性成为烧结领域的研究热点。吴胜利等[2-4]、王伟伟等[5]以不同组成的铁酸盐为研究对象，通过实验系统探究了 CaO 对液相流动性的影响规律，并分析了 SiO_2 的作用机制，阐明了铁酸盐液相中 CaO、SiO_2 及碱度的匹配原则。同时，关于烧结矿黏结相自身强度的实验研究还证实，过高的 MgO 含量会使液相形成温度升高、液相量减少，不仅降低黏结相的流动性，还会弱化其强度。马保良[6]研究烧结过程中 MgO 对 $CaO\text{-}Fe_2O_3$ 系初期液相生成的影响中发现，MgO 会促使烧结过程中生成高熔点物相，抑制铁酸钙的形成，从而导致液相流动性下降。杨楠等[7]通过高碱度烧结矿中的铁酸盐黏结相为研究对象，发现适当提高 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$，铁矿粉烧结液相生成能力增强，液相开始生成温度降低，液相量增加。铁酸钙黏结相主要通过烧结过程中液相对矿粉和核矿石的黏附作用形成，因此良好的液相流动性是构建高强度黏结相的基础[8]。在实际烧结条件下，复合铁酸钙黏结相会因 MgO、SiO_2、Al_2O_3 的持续溶入，其性能也会出现较大差异[9]。因此，针对不同镁铝比的复合铁酸钙，系统研究其化学组成与熔化特性、流动性之间的关联，对优化烧结配矿方案、提升成品烧结矿质量具有重要指导意义。同时，该研究可为实现低温烧结、降低固体燃料消耗及减少气体污染物排放提供理论支撑。

在已有关于复合铁酸钙生成机制[10-12]以及 MgO 和 Al_2O_3 对烧结性能(如流动性)影响[13-15]研究基础上，本研究采用化学纯试剂制备铁酸一钙。通过固定 SiO_2 含量并改变 MgO 与 Al_2O_3 的添加比例，系统考察了 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 对复合铁酸钙黏结相的流动性指数、熔化时间及液相生成温度的影响，旨在揭示 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 对复合铁酸钙黏结相熔化行为与流动性的作用规律。

1　试验方案

1.1　试验原料

研究采用分析纯试剂 Fe_2O_3、$CaCO_3$、SiO_2、Al_2O_3 及 MgO 为原料进行复合铁酸钙(SFCA)制备。其中，MgO、Al_2O_3 对烧结成矿液相生成和烧结质量有重要影响，因为在实际生产经验中通常认为低铝(质量分数 <2.0%)，中铝(质量分数为 2.0%~2.5%)，高铝(质量分数 >2.5%)，以此为依据，分别设计了低铝为 1.6%、中铝为 2.3% 以及高铝为 3.0% 3 种铝配比，并且针对不同 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 比值，参照现场烧结矿进行优化配置，制备方案如表 1 所示。复合铁酸钙的具体试验步骤：首先将铁酸一钙(CF)按 Fe_2O_3:$CaCO_3$ 物质的量之比为 1∶1 混合(其质量比为 61.54%∶38.46%)，所需 CF 样品中，钙以 CaO 的形式存在，但由于制备过程中 CaO 易受潮，导致称量不准确，而 $CaCO_3$ 质量稳定，并且在后续的焙烧中，重新变为 CaO，所以制备 CF 样品采用 $CaCO_3$。为确保固相反应完全并提高矿物结晶度，于 1 473 K 烧结12 h；随后按表 1 中的化学计量比混合，经玛瑙研钵研磨、混匀、压实，最后将压好的样品放置于刚玉坩埚中，将坩埚推入马弗炉的恒定烧结区，在 1 523 K 烧结 14 h，烧结设备示意如图 1 所示。烧结结束，并随炉冷却后，试样研磨至粒度小于 0.074 mm 的粉末备用，抽取部分试验样品进行 XRD 检测。

1.2　流动性试验

试验主要探讨镁铝比对黏结相流动性的影响

表 1 制备复合铁酸钙原料主要化学成分和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$

Table 1 Main chemical composition and $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ of raw materials for SFCA synthesis %

编号		化学成分(质量分数)/%					$w(MgO)/w(Al_2O_3)$
		CF	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	SiO_2	
低铝	L-1#	44.13	47.80	0.32	1.6	6.15	0.20
	L-2#	44.13	47.64	0.48	1.6	6.15	0.30
	L-3#	44.13	47.48	0.64	1.6	6.15	0.40
	L-4#	44.13	47.32	0.80	1.6	6.15	0.50
	L-5#	44.13	47.16	0.96	1.6	6.15	0.60
	L-6#	44.13	46.84	1.28	1.6	6.15	0.80
中铝	M-1#	44.13	46.96	0.46	2.3	6.15	0.20
	M-2#	44.13	46.73	0.69	2.3	6.15	0.30
	M-3#	44.13	46.50	0.92	2.3	6.15	0.40
	M-4#	44.13	46.27	1.15	2.3	6.15	0.50
	M-5#	44.13	46.04	1.38	2.3	6.15	0.60
	M-6#	44.13	45.58	1.84	2.3	6.15	0.80
高铝	H-1#	44.13	46.12	0.60	3.0	6.15	0.20
	H-2#	44.13	45.82	0.90	3.0	6.15	0.30
	H-3#	44.13	45.52	1.20	3.0	6.15	0.40
	H-4#	44.13	45.22	1.50	3.0	6.15	0.50
	H-5#	44.13	44.92	1.80	3.0	6.15	0.60
	H-6#	44.13	44.32	2.40	3.0	6.15	0.80

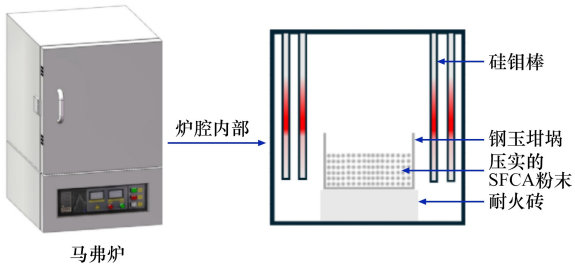
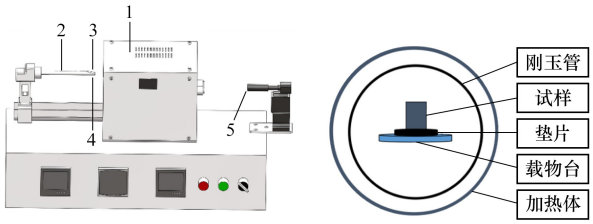


图 1 烧结设备示意

Fig. 1 Sintering equipment and equipment schematic diagram

规律。首先，将试样粉末与适量无水乙醇混合，调制成糊状，随后使用模具将其制成∅3 mm × 3 mm 的圆柱体。并将制备好的圆柱体试样置于刚玉垫片上，放入熔点熔速测定仪中，如图 2(a)所示。采用座滴法测量黏结相的特征熔化温度和熔化时间，其示意图如图 2(b)所示。试验过程中，详细记录了熔融过程的时间、图像及温度等参数。



(a) 仪器整体结构示意；(b) 炉膛内部截面示意

1—铂铑丝加热炉体；2—刚玉管；3—试样；4—测炉温热电偶；5—CCD 电子摄像机。

图 2 熔点熔速测定仪示意

Fig. 2 Schematic diagram of melting point and melting rate tester

其中：① 熔化时间为试样发生形变到试样完全流动所用的时间，即收缩率为 25%～75% 阶段所用的时间，熔化时间越短，流动性越好。② 熔化温度主要指试样熔化过程中液相生成的 3 个特征温度，即收缩率为 25% 时对应的温度为有效液相开始形成温度，记为 T_{25}；收缩率为 50% 时对应的温度为有效液相形成终止温度，记为 T_{50}；收缩率为 75% 时对应的温度为流动温度，记为 T_{75}，如图 3 所示。而流动性指数的计算如式(1)所示。

$$F = \frac{S_1 - S_2}{S_2} = \frac{\pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d_2}{2}\right)^2}{\pi \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

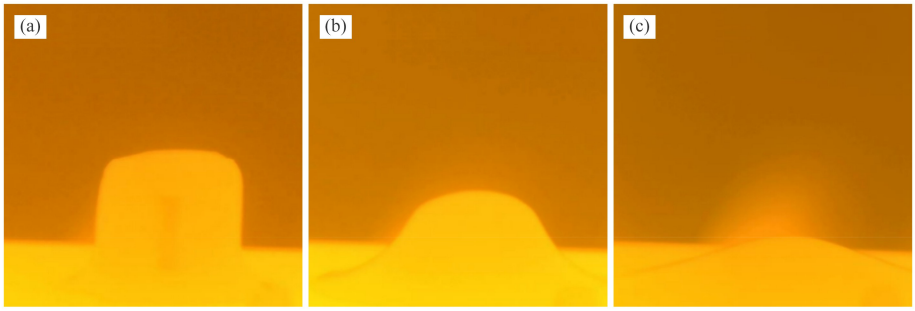
式中：F 为流动性指数；S_1、S_2 分别为流动性面积与流动前面积，mm^2；d_1、d_2 分别为流动后圆饼直径与原始圆柱体直径，mm。

流动性指数测试：控制试样温度为 1 320 ℃，试样冷却后测定小饼试样的液相流动性。考虑到焙烧后试样的流动面积形状不规则，为降低测量误差，采用 Photoshop 软件对其流动面积进行精确计算。

2 试验结果与讨论

2.1 SFCA 制备与表征

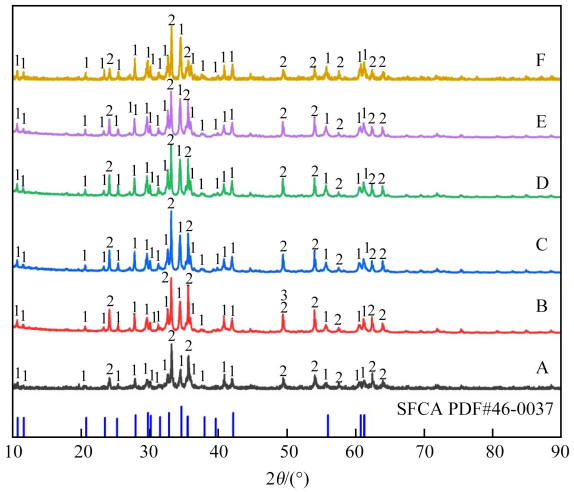
研究采用 Jade 9.0 软件对 X 射线衍射结果进行定量分析，SFCA 样品的 XRD 图谱与其 PDF 标准卡片(PDF#46－0037，化学式为 $Ca_{2.3}Mg_{0.8}Al_{1.5}Fe_{8.3}Si_{1.1}O_{20}$)的对比结果如图 4～图 7 所示。



收缩率/%：（a）25；（b）50；（c）75

图 3　样品熔化过程

Fig. 3　Melting process of the sample

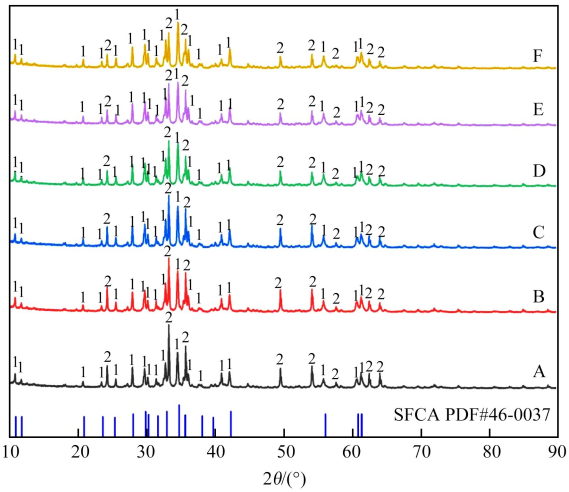


$w(MgO)/w(Al_2O_3)$：A—0.2；B—0.3；C—0.4；D—0.5；E—0.6；F—0.8。

1—SFCA；2—Fe_2O_3。

图 4　低铝 SFCA 的 XRD 分析对比结果

Fig. 4　Comparative XRD analysis of low-aluminum SFCA samples



$w(MgO)/w(Al_2O_3)$：A—0.2；B—0.3；C—0.4；D—0.5；E—0.6；F—0.8。

1—SFCA；2—Fe_2O_3。

图 5　中铝 SFCA 的 XRD 分析对比结果

Fig. 5　Comparative XRD analysis of medium-aluminum SFCA samples

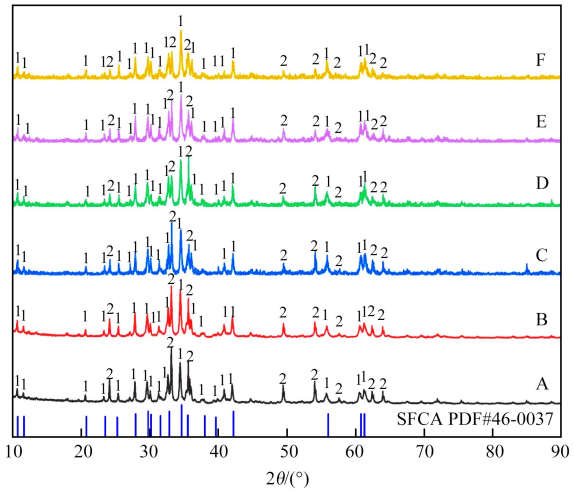
由图 4（低铝体系）、图 5（中铝体系）和图 6（高铝体系）可知，在 3 个铝含量体系中均呈现一致规律：随着 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$的增大，SFCA 的特征衍射峰强度持续增强，而未反应 Fe_2O_3 的衍射峰强度相应降低。这表明 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$是调控 SFCA 生成量的关键因素。同时选取相同水平镁铝比烧结的 SFCA 样品[$w(MgO)/w(Al_2O_3)$ = 0.8]，如图 7 所示，即使镁铝比相同，但因添加的 Al_2O_3 质量不同而导致衍射峰强度不同，可以看出高铝时，SFCA 衍射峰强度最高，而低铝 SFCA 强度最低，不仅如此，Fe_2O_3 衍射峰强度随着镁铝比的增加而出现锐减，即 Al_2O_3 含量在一定范围内对复合铁酸钙的生成有一定的促进作用。

2.2　$w(MgO)/w(Al_2O_3)$对 SFCA 黏结相流动性指数的影响

$w(MgO)/w(Al_2O_3)$对 SFCA 黏结相流动性指数的影响如图 8 所示。

由图 8 可知，中铝体系的流动性指数整体偏高，低铝体系次之，高铝体系普遍较低，且流动性指数随着 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$的增大呈现先递减后增加的趋势。分析认为，此现象主要由 MgO 和 Al_2O_3 含量的变化导致。高铝体系因 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$比值较高，易生成高熔点化合物，以不均匀相存在于液相中，阻碍流动，导致流动性较差；中铝体系成分匹配合理，使得液相流动性最强；低铝体系受 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$的限

制较小，流动性相对稳定。烧结矿的流动性指数一般控制在0.7～1.6范围内最为适宜[16]。过小则会导致烧结矿液相生成量较少，过大则易形成薄壁多孔结构，影响烧结矿的强度。因此，在低铝体系下，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$在0.2～0.8范围内，复合铁酸钙黏结相具有较好的流动性；在中铝体系下，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$在0.4～0.8范围内，流动性较好；在高铝体系下，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$仅在0.2和0.8时表现出较好的流动性。

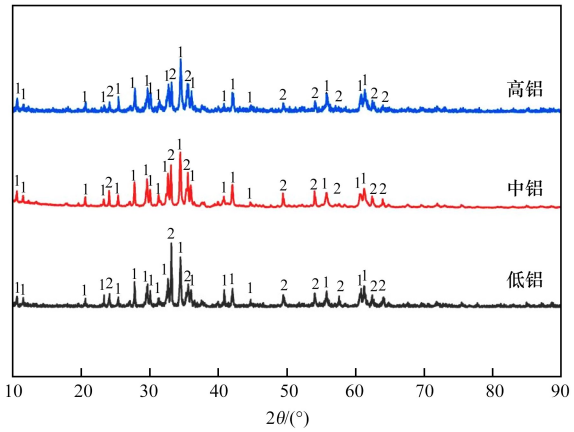


$w(MgO)/w(Al_2O_3)$：A—0.2；B—0.3；C—0.4；D—0.5；E—0.6；F—0.8。

1—SFCA；2—Fe_2O_3。

图6 高铝SFCA的XRD分析对比结果

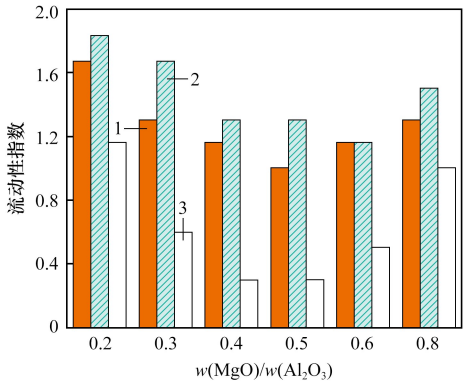
Fig. 6 Comparative XRD analysis of high-aluminum SFCA samples



1—SFCA；2—Fe_2O_3。

图7 $w(MgO)/w(Al_2O_3)=0.8$的SFCA的XRD分析对比结果

Fig. 7 Comparative XRD analysis of SFCA samples with identical $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ ratios



1—低铝；2—中铝；3—高铝。

图8 不同$w(MgO)/w(Al_2O_3)$条件下SFCA黏结相的流动性指数

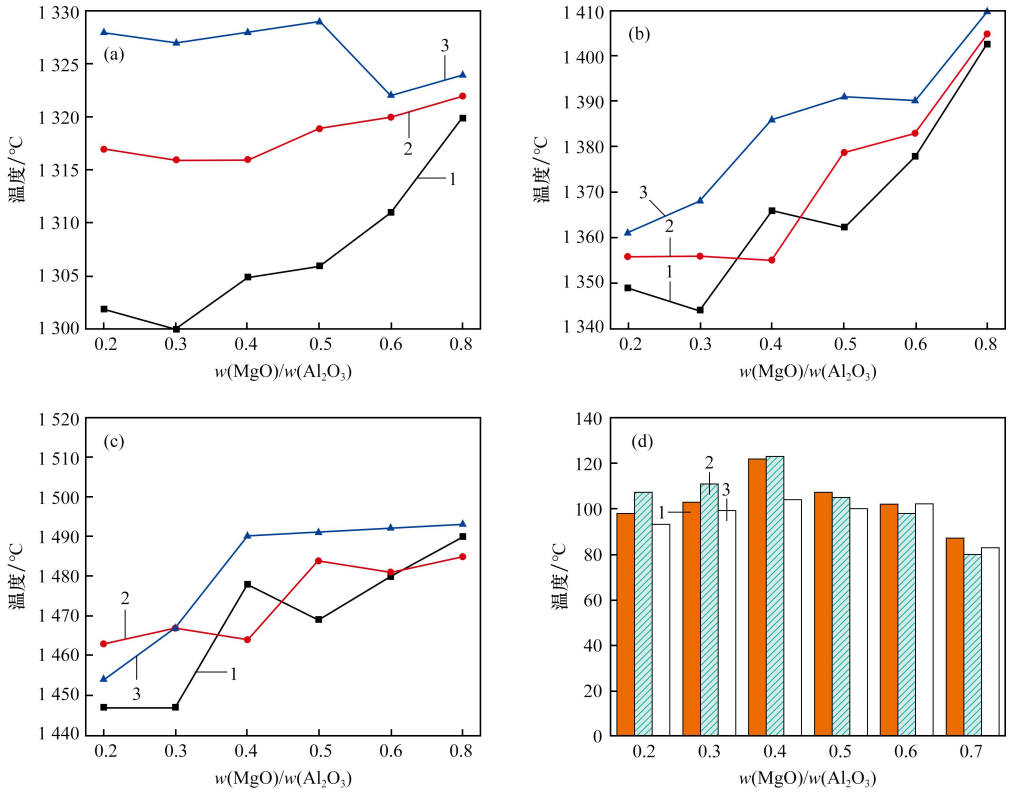
Fig. 8 Fluidity index of SFCA under different $w(MgO)/w(Al_2O_3)$

综上所述，SFCA黏结相流动性指数的变化趋势主要由$w(MgO)/w(Al_2O_3)$决定：高铝体系因易生成高熔点不均匀相阻碍流动，流动性普遍较低；中铝体系成分匹配合理，液相流动性较好；低铝体系受$w(MgO)/w(Al_2O_3)$波动影响小，流动性相对稳定。

2.3 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$对SFCA黏结相液相生成的影响

图9为不同$w(MgO)/w(Al_2O_3)$条件下复合铁酸钙基液相生成特性参数(包括液相开始生成温度、液相终止生成温度、流动温度以及终止生成温度与流动温度的差值温度)。由图9可知，在低铝、中铝和高铝体系下，液相开始生成温度、液相终止生成温度和流动温度整体呈现上升趋势，且不同阶段的温度整体表现为高铝＞中铝＞低铝。但由于$w(MgO)/w(Al_2O_3)$的不同，仍会出现差异。

由图9(a)可知，低铝体系下，随着$w(MgO)/w(Al_2O_3)$从0.2增至0.8，液相生成温度上升，期间发生轻微跌落，但整体呈上升趋势；中铝体系中，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$在0.2～0.8区间时，温度基本保持稳定上升的趋势；高铝体系下，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$从0.2～0.5时整体呈现温度上升的趋势，在0.5～0.6区间温度下降，0.6之后又随$w(MgO)/w(Al_2O_3)$增大而回升，呈现“升－降－升”的波动趋势。造成上述现象原因主要是样品熔化前期，随着$w(MgO)/w(Al_2O_3)$的增加，使得样品的熔化黏度和熔化温度发生了改变，导致液



（a）液相开始生成温度；（b）液相终止生成温度；（c）流动温度；（d）终止生成与流动的差值温度

1—低铝；2—中铝；3—高铝。

图 9　不同 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$条件下 SFCA 液相生成特性参数

Fig. 9　Characteristics of liquid phase formation of SFCA under varying $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ ratios

相生成温度整体呈现升高的状态。

由图 9（b）可知，低铝体系中，液相终止生成温度在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 ~ 0.5 时呈波动上升，0.5 ~ 0.8 时则快速上升；中铝体系在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 ~ 0.4 时基本保持稳定，0.5 ~ 0.8 时明显上升；高铝体系的温度整体随 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$增大而上升，在 0.6 ~ 0.8 区间上升速率加快。同时，高铝体系的液相终止生成温度始终高于中、低铝体系。分析认为，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$对于液相终止生成温度有显著影响，试样熔化后期，样品的熔化更多的是靠熔化的液相部分与周围未熔化部分的润湿作用来完成的，样品的特征温度有很大一部分受 SFCA 润湿性的影响，随着 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$比值的增大，润湿性能变差，熔化过程变得不顺利。

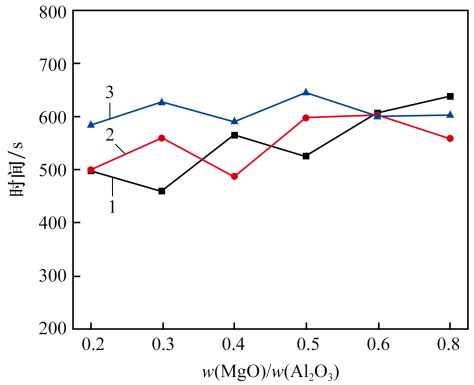
由图 9（c）可知，低铝体系的流动温度在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 和 0.3 时稳定在1 447 ℃，当$w(MgO)/w(Al_2O_3)$增至 0.4 时出现极大值，温度为 1 478 ℃。在 0.5 时温度有小幅度下降，0.6 ~ 0.8 时温度逐步上升，温度波动后呈上升趋势；中铝体系的流动温度在$w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 ~ 0.3 时上升（由 1 463 ℃升至 1 467 ℃），0.4 时下降，0.5 ~ 0.8 时缓慢回升，变化相对有起伏；高铝体系的流动温度整体波动较小，在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 时为 1 454 ℃，0.3 ~ 0.4 时快速升至 1 490 ℃左右，之后在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.5 ~ 0.8 时温度基本保持稳定。

由图 9(d)可知，低铝体系液相终止生成温度与流动温度的温度区间在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 ~ 0.4 时逐渐增加，0.4 ~ 0.8 时缓慢下降，整体呈现先升后降的趋势；中铝体系液相终止生成温度与流动温度的温度区间在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 ~ 0.4 时保持稳定增长的趋势，0.5 ~ 0.8 时出现明显递减；高铝体系、变化较为平缓，同样也是在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.2 ~ 0.4 时上升，0.4 ~ 0.8 时逐渐减少。综上所述，在低铝、中铝以及高铝体系中，随着 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$的增大，在

0.4 时液相终止生成温度与流动温度的温区区间出现最大值，且始终呈现中铝 > 低铝 > 高铝。

2.4 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 对 SFCA 黏结相熔化时间的影响

熔化时间对 SFCA 黏结相的流动性和液相生成具有显著影响。较短的熔化时间有助于提高流动性，并增强液相生成能力。在实际烧结生产中，由于达到最高烧结温度的时间较短，反应过程处于非平衡状态，因此需要在短时间内生成更多的液相。$w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 对 SFCA 熔化时间的影响如图 10 所示。



1—低铝；2—中铝；3—高铝。

图 10 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 对 SFCA 熔化时间的影响

Fig. 10 Effect of $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ on the melting time of SFCA

由图 10 可知，低铝体系熔化时间随 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 增大呈波动上升趋势，在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)=0.3$ 时为最小值；中铝体系呈波动变化，在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)=0.4$ 时出现明显低谷；高铝体系熔化时间整体显著高于低、中铝体系，且波动幅度小，无明显低值区间。

综上所述，熔化时间平均水平为高铝体系 > 中铝体系 > 低铝体系。$w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 的增大会延长 SFCA 黏结相的熔化时间。低、中铝体系在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 分别为 0.3、0.4 时，熔化时间最短，更有利于缩短熔化时间，并增强流动性与液相生成能力。在高铝体系下，整体熔化时间较长，不利于液相生成。

3 结 论

（1）随着 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 的增加，MgO 通过固溶进入 SFCA 结构，推动 Fe_2O_3 向 SFCA 熔体溶解，使 SFCA 衍射峰强度增强，Fe_2O_3 衍射峰强度降低。此外，当 $w(Al_2O_3)$ 从 1.6% 提高至 2.3% 和 3.0%，SFCA 衍射峰强度增强，表明 $w(Al_2O_3)$ 的提高同样会进一步促进 SFCA 生成。

（2）SFCA 黏结相流动性指数的变化趋势主要由 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 决定：高铝体系因易生成高熔点不均匀相阻碍流动，流动性普遍较低；中铝体系成分匹配合理，液相流动性最强；低铝体系受 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 波动影响较小，流动性相对稳定。

（3）液相生成不同阶段的温度整体呈现上升趋势，且温度整体表现为高铝 > 中铝 > 低铝。然而，由于 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 的比值不同，液相开始生成温度在低铝及中铝体系中总体随 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 增大呈上升趋势，而高铝体系则呈现‘升－降－升’的波动变化，这与熔化前期黏度及熔化温度的变化密切相关。液相终止生成温度在各体系中均随 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 增加而上升，且高铝体系始终高于中铝和低铝体系。液相终止生成温度与流动温度的温度区间在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 为 0.4 时达到最大，说明该比值下液相的生成区间最宽，而过高的 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 则会抑制液相的有效生成与流动。

（4）$w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 的增大会延长 SFCA 黏结相的熔化时间。低、中铝体系在 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 分别为 0.3、0.4 时，熔化时间最短，更有利于缩短熔化时间，并增强流动性与液相生成能力。在高铝体系下，整体熔化时间较长，不利于液相生成。

参考文献：

[1] 张光强. 铁酸钙黏结相流动性及其对烧结矿强度影响的试验研究[D]. 沈阳：东北大学，2017.
ZHANG Guangqiang. Investigation on the fluidity of SFCA bonding phase and its effect on the strength of sinter[D]. Shenyang：Northeastern University，2017.

[2] 吴胜利，贝纪承，朱娟，等. 化学成分对铁酸盐烧结液相流动性的影响[J]. 钢铁研究学报，2015，27(9)：7－13.
WU Shengli，BEI Jicheng，ZHU Juan，et al. Influence of chemical composition on liquid fluidity of ferrite[J].

Journal of Iron and Steel Research,2015,27(9):7 – 13.

[3] 吴胜利,裴元东,陈辉,等. 铁矿粉烧结液相流动性评价[J]. 北京科技大学学报,2008,30(10):1095 – 1100.
WU Shengli,PEI Yuandong,CHEN Hui,et al. Evaluation on liquid phase fluidity of iron ore in sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2008,30(10):1095 – 1100.

[4] 吴胜利,边妙莲,王清峰,等. 铁矿粉的烧结熔融特性及其评价方法[J]. 北京科技大学学报,2010,32(12):1526 – 1531.
WU Shengli, BIAN Miaolian, WANG Qingfeng, et al. Fusion characteristics of iron ore fines and its evaluation method[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2010,32(12):1526 – 1531.

[5] 王伟伟,韩秀丽,段博文,等. 铁矿粉矿物学特性及其黏结相强度影响机理[J]. 烧结球团,2025,50(4):122 – 130.
WANG Weiwei, HAN Xiuli, DUAN Bowen, et al. Mineralogical characteristics of iron ore powder and its influencing mechanism of bonding phase strength[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(4):122 – 130.

[6] 马保良. Al_2O_3、MgO 对烧结成矿行为影响的基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2022.
MA Baoliang. Basic study on the influence of Al_2O_3 and MgO on sintering mineralization behavior[D]. Shenyang: Northeastern University,2022.

[7] 杨楠,郭兴敏. MgO 对烧结矿 CaO-Fe_2O_3 系初期液相生成的影响[J]. 中国冶金,2019,29(5):22 – 27.
YANG Nan,GUO Xingmin. Effect of MgO on formation of CaO-Fe_2O_3 based initial liquid phase in iron ore sinter [J]. China Metallurgy,2019,29(5):22 – 27.

[8] 王宁. Fe_2O_3-CaO-SiO_2系黏结相流动性及其强度的试验研究[D]. 沈阳:东北大学,2018.
WANG Ning. Investigation on the fluidity and strength of the bonding phase in Fe_2O_3-CaO-SiO_2[D]. Shenyang: Northeastern University,2018.

[9] 辛瑞峰. 高碱度烧结矿黏 a 结液相中铁酸钙结晶机理及其形态特征的研究[D]. 北京:北京科技大学,2022.
XIN Ruifeng. Mechanism and morphology of calcium ferrite crystallization in liquid binding-phase of high-basicity sinter[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2022.

[10] 马保良,张玉柱,杨锦涛,等. 氧化性气氛下 MgO 含量对富镁复合铁酸钙生成的影响[J]. 烧结球团,2019,44(1):1 – 5.
MA Baoliang,ZHANG Yuzhu,YANG Jintao,et al. Effects of MgO on the formation of Mg-rich Silico-Ferrite of Calcium and Aluminum (SFCA) under oxidizing atmosphere[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(1):1 – 5.

[11] 汪书朝,胡长庆,贾济通,等. SiO_2含量对富镁复合铁酸钙生成的影响[J]. 烧结球团,2018,43(6):34 – 37.
WANG Shuchao,HU Changqing,JIA Jitong,et al. Effects of SiO_2 content on the formation of Mg-rich silico-ferrite of calcium and aluminum[J]. Sintering and Pelletizing, 2018,43(6):34 – 37.

[12] MENG F J, SUN C Y, LI T L, et al. Primary slag formation behavior during reduction process of SFCA-I and SFCA[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2022,29(11):1748 – 1759.

[13] CHOUDHARY M K,BHATTACHARJEE D,BANNERJEE P S,et al. Effect of variation of alumina on development of phases during iron ore sintering[J]. ISIJ International, 2008,48(12):1804 – 1806.

[14] YANG F, QIN Q, LI Y, et al. Effect of MgO content in sintered ore on viscosity of blast furnace slag bearing high Al_2O_3[J]. Metalurgia,2024,63 (3 – 4):341 – 343.

[15] 李占国,张建良,刘征建,等. 基于化学成分的铁矿粉烧结基础特性预测研究[J]. 烧结球团,2022,47(2):38 – 45.
LI Zhanguo, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Prediction research on basic properties of sintering based on chemical composition of iron ore powder[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):38 – 45.

[16] 刘颂,李福民,吕庆. 低钛型混匀矿的烧结基础特性[J]. 钢铁钒钛,2015,36(5):74 – 78.
LIU S, LI F M, LÜ Q. Basic sintering characteristics of low titanium mixed iron ore[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2015,36(5):74 – 78.