不同 $w(SiO_2)$ 铁精矿高温烧结性能研究与优化配矿

李浩鸣[1,2]，杨永昇[2]，唐银华[1]，杨永斌[2]，聂绍昌[1]，彭志伟[2]
（1. 新余钢铁股份有限公司，江西 新余 338001；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：本文以新钢 4 种不同 $w(SiO_2)$ 的铁精矿为研究对象，深入探讨同化性能、液相流动性能、烧结体固结强度和铁酸钙生成特性等高温烧结性能，并以此为基础，结合现场生产方案进行优化配矿烧结试验。结果表明：在固定碱度为 1.95 的条件下，随着铁精矿中 $w(SiO_2)$ 提高，液相生成温度降低，液相生成量显著增加，液相流动性改善，但 $w(SiO_2)$ 过高会对同化性能和烧结体固结强度产生负面影响；合理调控 $w(SiO_2)$ 是优化烧结成矿过程的液相特性以及改善烧结矿质量的关键；通过优化精矿配比使含铁原料的 $w(SiO_2)$ 分数由 3.90% 提高至 3.99%，烧结机利用系数提高 0.25 t/(m²·h)，烧结矿成品率和转鼓强度分别提高 5.91% 和 8.12%，固体燃料消耗则降低 5.59 kg/t，烧结矿指标显著改善。

关键词：铁精矿；高温烧结性能；SiO_2 含量；液相；优化配矿
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)04－0033－11
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.055

Study of high-temperature sintering properties and proportioning optimization of iron concentrates with different $w(SiO_2)$

LI Haoming[1,2], YANG Yongsheng[2], TANG Yinhua[1], YANG Yongbin[2],
NIE Shaochang[1], PENG Zhiwei[2]
(1. Xinyu Iron & Steel Group Co., Ltd., Xinyu 338001, Jiangxi, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In this paper, the high-temperature sintering properties such as assimilation performance, liquid phase fluidity, sinter body bonding strength and calcium ferrite generation characteristics of four kinds of iron concentrates with different $w(SiO_2)$ from Xinyu Iron & Steel Group Co., Ltd. were investigated. Based on the findings, the proper proportioning schemes of raw materials including the concentrates were determined to seek optimal sintering performance, with the consideration of on-site production demand. It was found that under the condition of a fixed basicity(1.95), with increasing $w(SiO_2)$ in the iron concentrate, the liquid phase generation temperature decreased. Additionally, the liquid phase generation quantity increased significantly, with improved liquid phase fluidity. However, with excessively high $w(SiO_2)$, the assimilation performance and the sinter body bonding strength declined. Regulating $w(SiO_2)$ would be crucial to the liquid-phase generation characteristics during the sintering process and to the quality of iron ore sinter. The sinter pot tests showed that as the $w(SiO_2)$ increased from 3.90% to 3.33% after optimizing the proportions of iron concentrates, the productivity, sinter yield and tumble index of the sinter product were increased by 0.25 t/(m²·h), 5.91% and 8.12%, respectively. Meanwhile, the solid fuel consumption was decreased by 5.59 kg/t. The sintering indexes improved considerably.

Key words: iron concentrate; high temperature sintering performance; SiO_2 content; liquid phase; ore proportioning optimization

收稿日期：2024－01－24；**修回日期**：2024－07－08

作者简介：李浩鸣(1984—)，男，高级工程师，从事烧结球团研究。
通信作者：杨永斌(1969—)，男，教授，从事烧结球团与资源综合利用研究。

为降低生产成本，国内钢铁生产除了大量采用进口高品位铁矿粉外，还积极利用国内低品位矿，造成铁矿石原料种类多、来源广、变化快，显著增加了烧结配矿的难度[1]。基于铁矿粉常温基础性能，包括化学成分、物相组成、粒度组成等进行优化配矿是目前主流的配矿方案。然而，常温基础性能较大程度决定烧结制粒料粒度结构和烧结矿化学成分，但在铁矿的烧结指标和烧结成矿行为等方面，其影响可能存在巨大差异[2-3]。铁矿粉高温性能可以有效表征不同铁矿粉在烧结过程中液相变化规律与成矿行为机制[4]。北京科技大学吴胜利等[5]提出以铁矿粉的高温性能弥补常温基础性能作为优化烧结配矿依据的不足之处，包括同化性能、液相流动性、黏结相强度特性、铁酸钙生成特性等，现已成为指导优化烧结配矿的重要理论依据，并获得了广泛的应用[6-12]。

尽管目前铁矿石高温性能在烧结过程的应用较多，但在烧结生产过程中，通常需要配加细粒级含量较多的铁精矿充当黏附粉。不同 $w(SiO_2)$ 铁精矿的成矿机制可能存在显著差异，影响烧结成矿过程[13]，主要体现在烧结过程液相生成、液相流动性、矿相结构及烧结矿强度等方面。因此，实现高质量烧结产品和高效烧结过程关键之一在于合理控制 $w(SiO_2)$[14-15]。对于不同铁精矿原料烧结，需要明确其 $w(SiO_2)$ 对烧结成矿过程的影响，调控 $w(SiO_2)$ 及与之相适配的烧结二元碱度，获得最佳的烧结效果。

新余钢铁股份有限公司地处内陆，高炉和烧结机数量多，铁矿原料种类多样，终端产品多元。铁精矿在烧结配矿和高炉炉料结构中影响显著，不同高炉的原料结构差别较大，为更合理利用新钢铁精矿原料，本研究选取4种具有代表性的不同 $w(SiO_2)$ 的铁精矿（A、B、C和D矿）为原料，基于常温基础性能和高温性能研究，以期揭示不同 $w(SiO_2)$ 铁精矿原料特性与烧结成矿行为特点，深化对烧结过程中液相变化规律与成矿行为机制的理解。进一步结合现有烧结原料配比，开展优化精矿配比和 $w(SiO_2)$ 的烧结杯试验，为改善现场烧结多目标分级柔性优化配料和提高烧结质量提供理论依据和技术指导。

1 试验原料

研究选取的4种铁精矿中，A矿产自智利地区，B矿和C矿产自江西省，D矿自澳大利亚进口。化学试剂主要包括CaO和 $Ca(OH)_2$ 分析纯。原料主要化学成分及烧损分析见表1；铁精矿粒度组成见表2；固体燃料为焦粉，其工业分析和灰分主要化学组成见表3；4种铁精矿的物相分析见图1。

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	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	烧损
铁精矿A	68.080	28.31	1.77	0.78	0.39	0.82	-2.36
铁精矿B	61.580	5.51	5.25	1.31	0.54	0.33	2.81
铁精矿C	63.600	24.99	5.69	1.08	0.29	0.27	-0.47
铁精矿D	62.520	25.98	9.76	0.86	0.18	0.30	-1.85
混匀矿	62.830	0.53	3.29	1.68	0.03	0.07	4.06
返矿	56.000	8.75	5.10	2.02	9.94	2.30	0.16
白云石	0.096	—	0.76	0.21	29.87	2.39	43.29
石灰石	0.230	—	1.69	0.54	50.97	1.82	39.55
钙质生石灰	0.130	—	1.52	0.47	79.87	3.41	9.81
镁质生石灰	0.120	—	1.12	0.43	42.30	22.71	26.91
焦粉	1.580	—	7.02	3.91	0.58	0.16	84.30

表2 铁精矿的粒度组成（质量分数）

Table 2 Particle size composition of iron concentrates %

铁精矿	粒度组成/mm					
	>8	(5,8]	(3,5]	(1,3]	[0.5,1]	<0.5
A	0.00	0.45	0.70	1.27	0.80	96.78
B	1.32	10.02	10.57	11.67	5.13	61.30
C	0.00	2.42	4.05	7.55	6.43	79.55
D	0.00	1.20	0.47	0.52	0.38	97.43
混匀矿	3.16	11.41	17.28	26.82	18.66	22.67

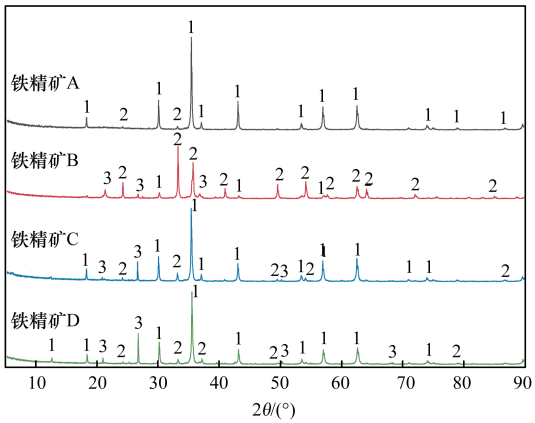
由表1可知，4种铁精矿中A矿的铁品位高达68.08%，其他铁精矿品位高低依次为C矿（63.60%）、D矿（62.52%）和B矿（61.58%）。除B矿亚铁质量分数仅为5.51%外，其他3种精矿的亚铁质量分数均高于20%。4种铁精矿（A、B、C和D矿）的 $w(SiO_2)$ 依次升高，分别为1.77%、5.25%、5.69%和9.76%。由图1精矿的

表 3　焦粉工业分析及其灰分主要化学组成(质量分数)

Table 3　Proximate analysis of coke breeze and main chemical composition of its ash　　%

工业分析				灰分主要化学成分				
水分	灰分	挥发分	固定碳	TFe	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3
0.30	12.53	3.67	83.51	10.53	7.95	0.79	43.35	21.63

X 射线衍射(X-ray diffraction，XRD)图谱分析可知，A 矿主要由磁铁矿(Fe_3O_4)和赤铁矿(Fe_2O_3)组成。B 矿、C 矿和 D 矿主要物相除赤铁矿和磁铁矿外，还含有一定量的石英，物相分析结果与表 1 化学成分分析相符。焦粉固定碳质量分数为 83.51%，满足烧结试验要求。



1—磁铁矿；2—赤铁矿；3—石英。

图 1　4 种铁精矿 XRD 图谱

Fig. 1　XRD patterns of four iron concentrates

2　试验方法

2.1　软熔特性

铁矿粉的软熔特性表征铁矿石在烧结过程液相生成特性，参照煤灰软熔温度的测定方法测定。将铁矿粉磨细至 <0.074 mm，用 $Ca(OH)_2$ 调节碱度为 1.95，并制成底边为 8 mm、高为 20 mm 的正三角锥，缓慢推入温度为 800 ℃的矿物熔点炉中，升温过程由设备设定的升温程序控制，采用图像传感器记录样品在升温过程中的外观变化，测定过程形状变化如图 2 所示。值得注意的是，灰熔点测定仪可测定的温度上限为 1 600 ℃，因此，软熔特性测定温度区间为 25 ~ 1 600 ℃，超过设备温度上限的数据记录为 >1 600 ℃。

2.2　同化性能

同化性能是指铁矿石在烧结过程中与 CaO 的反应能力。采用铬钢模具和压团机，将1 g研磨至

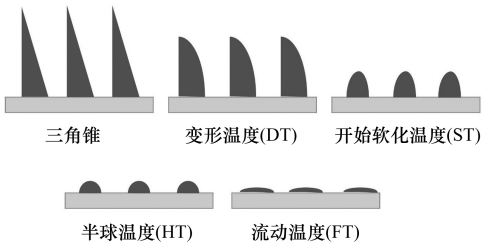


图 2　软熔特性测定过程样品形状变化

Fig. 2　Schematic of sample shape changes during the measurement of softening-melting properties

0.074 mm 以下的铁矿粉和 2.0 g 分析纯 CaO 分别压制成∅10 mm × 10 mm 和∅20 mm × 4 mm 的圆柱形团块。烘干后，将铁矿粉团块置于 CaO 团块上，如图 3 所示。通过模拟烧结试验，每组样品在 5 min 内分成 5 段进入高温管式炉焙烧区，在设定的温度焙烧 5 min，然后在 5 min 内分成5 段取出冷却。同化性测定温度区间为 1 260 ~ 1 320 ℃，温度间隔为 15 ℃。对铁矿粉和 CaO 样品进行宏观观察，确定出现接触角或液相形成时的最低温度，作为评价同化性指标的最低同化温度[16]。

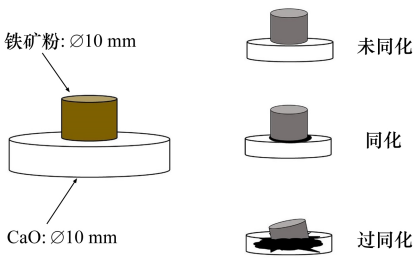


图 3　同化性试验示意图

Fig. 3　Schematic of assimilation property test

2.3　液相流动性

液相流动特性是指在烧结过程中铁矿石与 CaO 生成的液相的流动能力，表征的是黏结相的“有效黏结范围”。液相流动性指数的测定是基于前人研究的方法，结合实际生产中高碱度烧结矿液相特点[17]，测定碱度为 4.0 的团块经烧结后流动的投影面积，团块流动后的面积采用图像处理软件 Image J 进行分析测量，并采用公式(1)计算

试样的流动性指数：

$$\varphi = \frac{A - B}{B} \quad (1)$$

式中：φ 为液相流动性指数；A 为团块流动后面积，mm^2，B 为团块原始截面积，即压团模具的截面积，mm^2。

采用 $Ca(OH)_2$ 将铁矿粉碱度调节至 4.0，并在设定压力下制备∅10 mm × 8 mm 圆柱形压块。干燥后团块置于∅40 mm × 2 mm 的刚玉片上，按照前述焙烧方式，得到冷却后的样品，如图 4 所示。液相流动性指数测定温度区间为 1 240 ~ 1 360 ℃，温度间隔为 20 ℃。液相流动性指数为负值是由于团块在特定温度下体积收缩，导致焙烧后面积小于团块原始截面积。

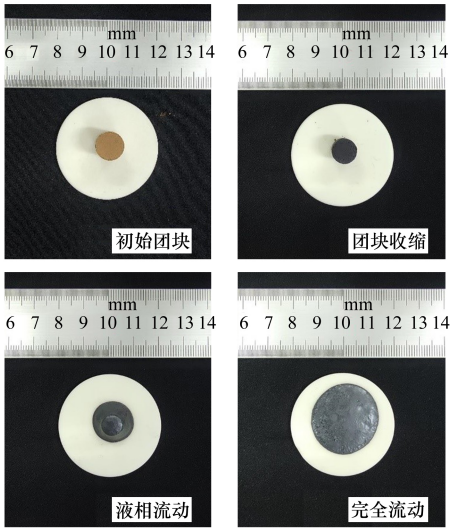


图 4 液相流动性试验示意

Fig. 4 Illustration of liquid phase fluidity test

2.4 铁酸钙生成特性

铁酸钙是烧结过程中自身强度及相间接触强度较好的理想液相结晶，铁酸钙生成特性是指在烧结过程中生成复合铁酸钙的能力。用与上述相同的条件进行样品混合和压团，得到碱度为 1.95 的团块，然后将干燥的团块放入瓷舟中并按照上述焙烧方式在 1 280 ℃下进行焙烧，冷却后得到样品，最后用环氧树脂将烧结团块制成∅30 mm × 15 mm 的圆柱形样品。随后，采用半自动研磨抛光机处理，并将样品置于光学显微镜下采集照片，通过矿物学分析阐明铁酸钙生成特性，并采用图像处理软件 Image J 分析测量铁酸钙分布面积。

2.5 烧结体固结强度

铁矿石生成液相对其周围核矿石进行固结的能力常采用黏结相自身强度表征，但这通常不能准确代表烧结矿整体的机械强度。通过微型烧结试验获得的烧结体固结强度可以模拟烧结矿整体强度性能，因此，本研究采用烧结体固结强度表征烧结矿强度。根据铁酸钙生成特性的要求，再次制备碱度为 1.95 的烧结体团块，通过自动压缩试验机测量团块的抗压强度，如图 5 所示，结果以 10 个样本结果的平均值表示。

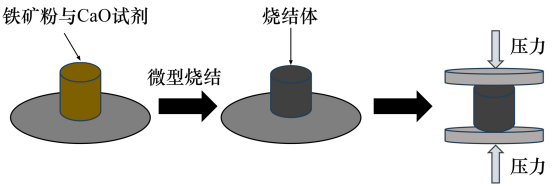


图 5 烧结体固结强度试验示意

Fig. 5 Schematic of sinter body bonding strength test

2.6 烧结杯试验

针对新钢烧结现场实际生产需求，开展烧结杯试验。烧结杯尺寸为∅140 mm × 720 mm，混合料制粒过程中消化时间为 5 min、一混时间为 3 min、二混圆筒转速为 18 r/min、二混时间为 5 min、制粒水分 8.0%。烧结过程中点火温度为 1 080 ℃、点火时间为 90 s、点火负压为 5 kPa、烧结负压为 12 kPa，烧结后在 5 kPa 的负压下冷却 5 min。

3 结果与讨论

3.1 软熔特性

烧结过程中，液相的生成以升温过程中生成的低熔点物质为先导，尤其是在准颗粒上黏附层中熔剂微细颗粒分布丰富的局部区域，液相往往在此首先出现。软熔特性研究可以揭示铁矿石形成液相及其与熔剂发生成矿反应的难易程度，通过变形温度、软化温度、半球温度和流动温度的高低反映铁矿石开始生成和完全生成液相的温度高低、形成液相的速度以及在烧结温度下液相的生成量。4 种铁矿粉碱度（$R = 1.95$）条件下的软熔特性如图 6 和表 4 所示。

由图 6 和表 4 可知，4 种铁精矿的 $w(SiO_2)$ 与其软熔特性间仍呈现出显著的相关性，$w(SiO_2)$ 越高，生成液相的温度越低。A 矿的开始软化温度、

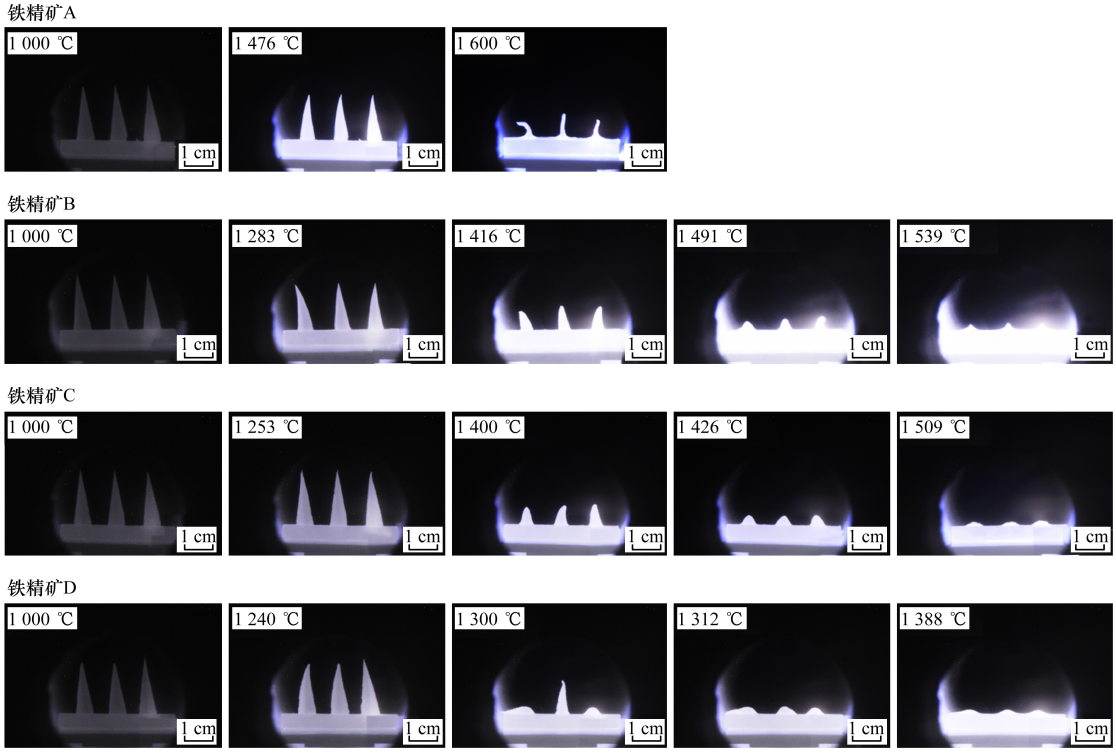


图 6　4 种铁精矿不同温度对应的外观变化（$R=1.95$）

Fig. 6　Appearance changes of four iron concentrates at different temperatures（$R=1.95$）

表 4　4 种铁精矿软熔性能对应的温度（$R=1.95$）

Table 4　Softening-melting properties of four iron concentrates（$R=1.95$）

铁精矿	变形温度/℃	开始软化温度/℃	半球温度/℃	流动温度/℃
A	1 476	>1 600	>1 600	>1 600
B	1 283	1 416	1 491	1 539
C	1 253	1 400	1 426	1 509
D	1 240	1 309	1 312	1 388

半球温度以及流动温度均高于 1 600 ℃，变形温度为 1 476 ℃，而 B、C、D 矿的变形温度均为 1 300 ℃以下，随着 $w(SiO_2)$ 由 1.77% 提高至 9.76%，铁精矿软熔特性对应的温度均逐渐降低。说明在适宜的碱度条件下，$w(SiO_2)$ 越高，越有助于与 CaO 反应形成低熔点化合物，致使初生液相温度降低，铁精矿可在更低的温度下开始熔融，液相生成更加容易。

值得注意的是，SiO_2 在烧结成矿过程中不直接形成液相，如没有足够的 CaO 与铁矿石中高含量 SiO_2 反应，可能导致液相生成不充分。因此，需要调整适应铁矿石中 $w(SiO_2)$ 变化的烧结碱度条件，以优化烧结矿的结构和提升其强度[18-19]。

3.2　同化性能

同化性能的主要影响因素为铁矿石和 CaO 之间的化学反应及后续的传递过程，包括熔体的形成和流动扩散能力。4 种铁精矿同化性能如图 7 所示。由图 7 可知，A 矿和 B 矿的最低同化温度为 1 260 ℃，同化温度区间在 1 260 ~ 1 275 ℃，B 矿和 C 矿的最低同化温度为 1 275 ℃，同化温度区间在 1 275 ~ 1 290 ℃，在 1 290 ℃下，A 矿和 B 矿生成较多液相，并在 CaO 团块中明显扩散，C 矿和 D 矿仅在 CaO 团块的表面生成了少量腐蚀，表明在原始碱度下，随着 $w(SiO_2)$ 升高，铁精矿的最低同化温度升高，即同化性能变差。上述结果是由于虽然 A 矿 $w(SiO_2)$ 为 1.77%，但其内部相对的 $w(CaO)$ 较高，有利于初期液相生成和后续在 CaO 团块上的扩散，而 B 矿主要为赤铁矿，可直接与 CaO 发生同化作用，因此 A 矿和 B 矿的同化温度较低。当铁矿石中 $w(SiO_2)$ 较高时，可能会导致铁矿石整体的熔点升高，此外，熔融状态下的 SiO_2 通常具有较高的黏度，不利于熔体的流动和扩散，含有较多 SiO_2 的铁矿石在形成液相时通

常需要更高温度或更长时间[20]，C 矿和 D 矿与 CaO 反应的动力学条件变差，相同温度下在 CaO 团块界面扩散较慢，同化温度升高。因此，过高的 $w(SiO_2)$ 会导致铁矿石熔点提高、熔体黏度增加以及化学反应活性降低，从而对同化性能产生负面影响，导致烧结效率下降[21]。

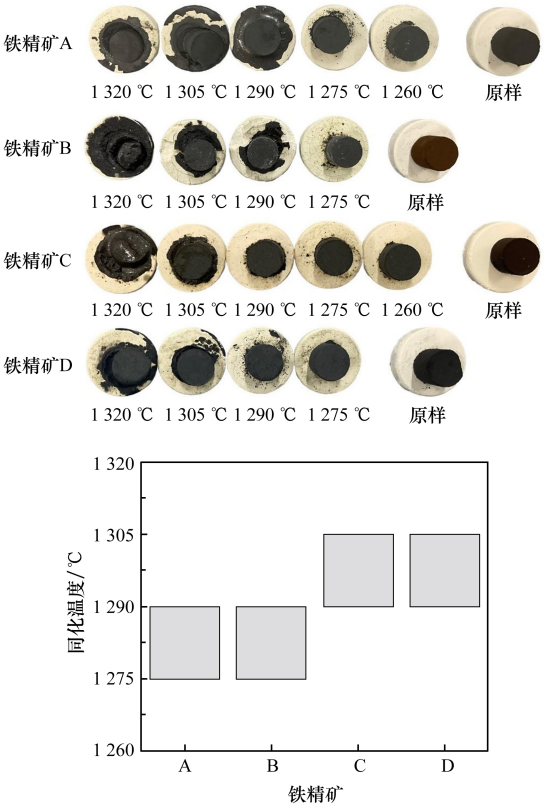


图 7 4 种铁精矿的同化性能

Fig. 7 Assimilation properties of four iron concentrates

3.3 液相流动性

液相流动性能表征了黏结相有效黏结的范围，即在一定温度和碱度下，铁矿石与 CaO 反应生成液相的数量和黏度[22-23]。而在实际的烧结过程中，液相的生成主要受黏附粉的物理化学特性的影响，黏附粉中较高的 $w(CaO)$ 使其在烧结过程中形成液相的能力较强，从而促进形成黏结相。因此，液相的流动性主要取决于黏附粉形成液相的流动特性，4 种铁精矿碱度 4.0 时的液相流动性如表 5 所示。

由表 5 可知，A 矿在 1 360 ℃下液相流动性指数仍为负值，B 矿在 1 300 ℃下液相流动性指数为负值，C 矿在 1 300 ℃下液相流动性指数为 0.09，D 矿在 1 240 ℃下液相流动性指数为负值，表明 4 种铁精矿液相流动性排序为 D 矿 > C 矿 > B 矿 > A 矿，即 $w(SiO_2)$ 越高，液相流动性越好。这是由于烧结过程中，SiO_2 是低共熔物质的重要组成部分，也是保证铁矿石可以在较低温度下熔融生成液相的基础，铁矿石较低的 $w(SiO_2)$ 不利于烧结液相的形成和扩散。而 A 矿的 $w(SiO_2)$ 较低，导致其液相流动性能较差，B 矿和 C 矿的 $w(SiO_2)$ 接近，因此液相流动性能也较为接近，B 矿主要成分为 Fe_2O_3，只能与 SiO_2 形成有限的固熔体，C 矿主要成分为 Fe_3O_4，容易与 SiO_2 反应形成易熔化合物和共熔混合物，因此 C 矿的液相流动性更好，D 矿在较高的 $w(SiO_2)$ 下，其液相流动性显著好于其他 3 种铁精矿。

通常情况下，较高的液相流动性代表生成的液相能够增加其黏结周围物料的能力，从而提高烧结矿的固结强度。相反，如果液相流动性过低，生成的液相对周围物料的黏结能力会减弱，可能导致烧结矿的气孔率增加，进而降低烧结矿的强度。然而，液相流动性也不宜过高，过高的流动性会导致周围物料的黏结层变薄，形成薄壁大孔结构，使烧结矿整体变脆，强度降低，并且影响烧结料层的透气性[24]。因此，维持适宜的液相流动性是确保烧结矿有效固结的关键[25]。

表 5 4 种铁精矿不同温度液相流动性(R = 4.0)

Table 5 Liquid phase fluidity of four iron concentrates under different temperature(R = 4.0)

铁精矿	液相流动性指数						
	1 240 ℃	1 260 ℃	1 280 ℃	1 300 ℃	1 320 ℃	1 340 ℃	1 360 ℃
A	0	0	0	0	−0.17	−0.02	−0.08
B	0	0	0	−0.14	9.69	13.72	12.91
C	0	0	0	0.09	12.93	13.62	13.95
D	−0.14	8.92	13.76	11.41	14.69	14.67	11.94

3.4　铁酸钙生成特性及烧结体固结强度

黏结相强度是决定烧结矿强度的主要特性[26]。铁酸钙是烧结矿液相中强度及黏结性较好的黏结相，其适宜含量能够改善烧结矿的强度和冶金性能[27]。因此，需要评价铁矿石在烧结过程中生成铁酸钙黏结相的能力以及黏结相对其黏结范围内铁矿物的固结能力。试验通过模拟烧结试验考察试样的铁酸钙生成特性和烧结体固结强度。在碱度为 1.95 条件下 4 种铁矿粉显微结构铁酸钙生成特性分析如图 8 所示，4 种铁矿粉烧结团块的抗压强度如图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知，碱度 1.95 条件下，A、B、C、D 矿烧结体固结强度依次降低，分别为 5 618、2 678、2 469、1 520 N。A 矿中除主要的磁铁矿成分大量氧化为次生赤铁矿外，由于 CaO 的存在，矿相中还存在部分黏结相板状铁酸钙，面积占比为 8.79%，其主要固结方式为赤铁矿再结晶固结与铁酸钙连生固结，固结形式类似球团矿，因此团块抗压强度较高。B 矿主要成分为赤铁矿，烧结后主要分布仍为赤铁矿晶粒，其结晶呈现孔洞结构，铁酸钙占比为 58.67%，液相生成量较 A 矿显著增加，其主要固结方式为赤铁矿再结晶固结与大片铁酸钙连生固结，因此团块抗压强度低于 A 矿。C 矿主要成分为磁铁矿，烧结后绝大部分磁铁矿氧化形成赤铁矿，新生赤铁矿呈较大粒状，铁酸钙占比为 58.47%，液相大量生成，大片铁酸钙与赤铁矿连生，并呈现较多孔洞结构，虽然 C 矿的主要固结形式同样为铁酸钙液相固结与 Fe_2O_3 连接，但在 C 矿的固结结构中显示出较多孔洞，导致烧结团块的强度低于 B 矿。由于 D 矿的 $w(SiO_2)$ 较高，主要生成液相为占比 25.69% 的铁酸钙，矿相结构中还存在磁铁矿氧化生成的赤铁矿以及未完全氧化的磁铁矿，赤铁矿晶粒分散，通过条状铁酸钙桥连，且呈现出孔洞结构，团块强度主要由相间黏结强度决定，导致 D 矿团块抗压强度较低。

烧结成矿过程中，过高或者过低的 $w(SiO_2)$ 均不利于铁酸钙液相的形成[28-30]。适宜的碱度条件下，足量且均匀分布的液相会形成均匀黏结相，确保烧结颗粒间的良好黏结相固结，从而提高烧结矿强度。如果液相量不足，烧结矿中的颗粒无法通过液相充分黏结，而过多的液相可能导致黏结相周围形成过多的大孔隙，形成的松散结构，不利于烧结矿强度的提高。

4　不同配矿方案对烧结矿产、质量指标的影响

上述铁精矿高温烧结性能相关研究表明，烧结成矿过程中，过高或者过低的 $w(SiO_2)$ 均不利于铁酸钙液相的形成，因此烧结配矿需考虑不同

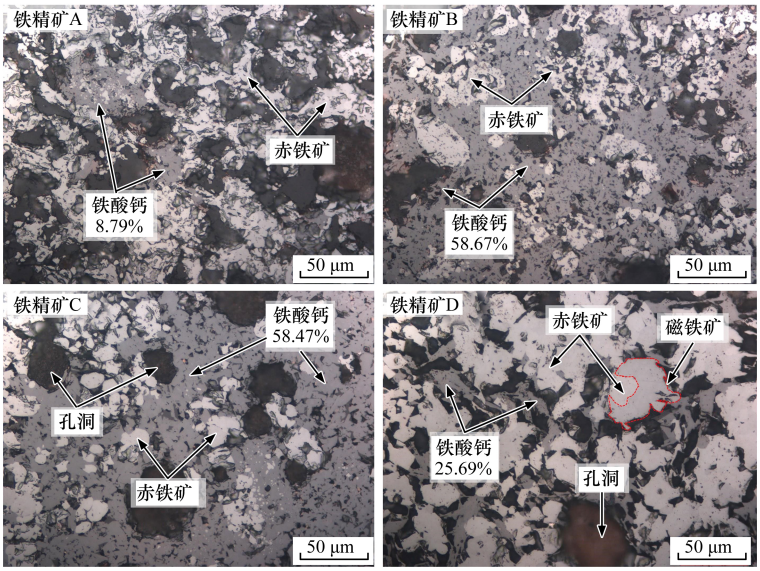


图 8　4 种铁精矿铁酸钙生成特性（R = 1.95）

Fig. 8　Calcium ferrite generation characteristics of four iron concentrates (R = 1.95)

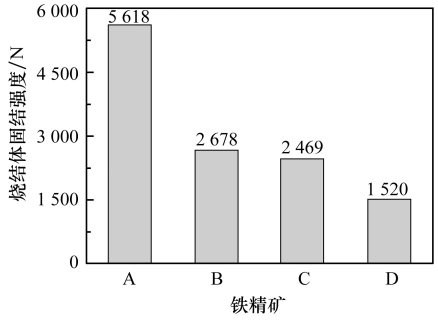


图9 4种铁精矿的烧结体固结强度($R=1.95$)

Fig. 9 Sinter body bonding strength of four iron concentrates($R=1.95$)

$w(SiO_2)$铁精矿的合理搭配。本文中4种铁精矿的高温烧结性能存在较大差异，B矿和C矿的$w(SiO_2)$相对接近，高温性能差别较小，而A矿与D矿互补搭配。当前新钢烧结原料结构中，精矿比例为30%左右，铁精矿以B矿为主，仅从铁酸钙生成特性和烧结体固结强度角度考虑，A矿与B矿互补，而从软熔特性、同化温度和液相流动性角度考虑，D矿与B矿互补。基于现场烧结生产原料配比和优化配矿要求，以高温特性互补原理为参考，探究低硅铁精矿A矿和高硅铁精矿D矿的合理配比，并通过烧结杯试验考察了优化配矿方案中$w(SiO_2)$变化对烧结矿质量的影响。具体配矿方案如表6所示，除不同比例的4种铁精矿外，还配加固定比例的匀矿作为主要核颗粒结构。由表6可知，1#方案作为基准烧结试验配比，含铁原料的$w(SiO_2)$为3.90%，再分别以A矿和D矿取代B矿，2#方案和3#方案中含铁原料的$w(SiO_2)$随A矿比例增加而降低，分别为3.83%和3.76%，4#方案和5#方案中含铁原料的$w(SiO_2)$随D矿比例增加而提高，分别为3.99%和4.08%。调节熔剂添加量，固定烧结碱度为1.95、$w(MgO)$为2.00%，返矿部分作为外配。不同方案烧结矿的产、质量指标见表7。

由表7可知，基准配矿方案下，垂直烧结速率、烧结机利用系数、转鼓强度和成品率均较低，固体燃料消耗较高。当分别采用A矿、D矿取代部分B矿后，4组优化配矿方案的烧结矿的强度、成品率、垂直烧结速率及烧结机利用系数均有不同程度的提高，固体燃料消耗有所下降。随着A矿比例提高，含铁原料的$w(SiO_2)$由3.90%(1#基准方案)降至3.83%(2#方案)，再降至3.76%(3#方案)，成品率、烧结机利用系数及转鼓强度均呈先升高后下降趋势。这主要归因于A矿活跃的固相反应，适宜增加用量可以降低烧结成矿过程中的液相反应，增强固相固结。但当A矿用量过高时，原料中$w(SiO_2)$较低，颗粒由于液相量

表6 烧结配矿方案(质量分数)

Table 6 Proportioning schemes for sintering %

方案编号	铁精矿A	铁精矿B	铁精矿C	铁精矿D	混匀矿	含铁原料$w(SiO_2)$	白云石	石灰石	钙质生石灰	镁质生石灰	焦粉	返矿	烧结矿$w(SiO_2)$
1#(基准)	1	24	3	1	71	3.90	1.5	3.00	3.0	1.5	4.5	25	4.48
2#	3	22	3	1	71	3.83	1.5	2.85	3.0	1.5	4.5	25	4.43
3#	5	20	3	1	71	3.76	1.5	2.78	3.0	1.5	4.5	25	4.38
4#	1	22	3	3	71	3.99	1.5	3.19	3.0	1.5	4.5	25	4.53
5#	1	20	3	5	71	4.08	1.5	3.38	3.0	1.5	4.5	25	4.58

表7 不同配矿方案烧结指标

Table 7 Sintering indexes for different proportioning schemes

方案编号	垂直烧结速率/(mm·min^{-1})	成品率/%	烧结机利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	转鼓强度/%	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})
1#(基准)	23.56	75.39	1.62	55.40	67.01
2#	25.45	81.30	1.85	61.89	61.49
3#	24.42	76.97	1.73	57.52	65.33
4#	25.63	81.49	1.87	63.52	61.42
5#	24.73	82.53	1.81	62.87	60.79

不足导致无法充分黏结，引起烧结矿强度下降。相反地，随着 D 矿比例提高，含铁原料的$w(SiO_2)$由 3.90%（1#基准方案）提高至 3.99%（4#方案），再提高至 4.08%（5#方案），成品率、烧结机利用系数及转鼓强度同样均呈先升高后下降趋势。在$w(SiO_2)$适宜时，烧结成矿过程生成的足量液相能保证良好的黏结相固结，而过高的 $w(SiO_2)$会导致烧结矿强度下降。上述结果表明，$w(SiO_2)$可显著影响烧结矿产、质量。同时，烧结杯试验结果与不同 $w(SiO_2)$铁精矿的高温烧结性能的研究结论相符。因此，适宜调整 D 矿用量，更有助于改善烧结矿的产、质量及能耗指标，推荐 A 矿的用量为 1% ~3%，B 矿用量为 20% ~22%，C 矿用量为 3%，D 矿的用量为 1% ~5%，4 种铁精矿总用量为 29%。

优化配矿后，4#方案获得了最佳的烧结矿指标，相比于基准方案，其 D 矿用量从 1% 提高至 3%，而 B 矿配比从 24% 降到 22%，相应地，含铁原料的 $w(SiO_2)$由 3.90% 提高至 3.99%，烧结机利用系数由 1.62 t/(m²·h)提高至 1.87 t/(m²·h)，成品率由 75.39% 提高至 81.30%，转鼓强度从 55.40% 提升到 63.52%，固体燃料消耗由 67.01 kg/t降低至 61.42 kg/t。

4　结　论

（1）铁精矿中 $w(SiO_2)$对烧结矿的高温性能具有显著影响，尤其是在液相的生成、流动性和烧结矿强度方面。此外，液相的流动性和数量直接影响烧结体的结构和固结强度。

（2）在固定碱度为 1.95 的条件下，随着铁精矿中 $w(SiO_2)$从 1.77% 提高到 9.76%，液相生成温度降低，液相生成量显著增加，液相流动性明显改善，但 $w(SiO_2)$过高（9.76%）会导致同化性能降低以及烧结体固结强度下降。

（3）烧结杯试验结果表明，当含铁原料的 $w(SiO_2)$由 3.90% 提高至 3.99%，烧结机利用系数由 1.62 t/(m²·h)提高至 1.87 t/(m²·h)，成品率由 75.39% 提高至 81.30%，转鼓强度从 55.40% 提升到 63.52%，固体燃料消耗由 67.01 kg/t 降低至 61.42 kg/t。相较于基准方案，优化配矿后获得了良好的烧结矿指标。

参考文献：

[1] 杨聪聪，朱德庆，潘建，等. 铁矿石高温烧结基础特性评价方法的国外研究进展[J]. 钢铁，2022，57(5)：11－21.
YANG Congcong，ZHU Deqing，PAN Jian，et al. Overseas research advances in evaluation methods of high-temperature fundamental sintering characteristics of iron ores[J]. Iron & Steel，2022，57(5)：11－21.

[2] 王峰，向家发，郭宇峰，等. 基于铁矿粉基础工艺性能的烧结优化配矿方法研究进展[J]. 钢铁研究学报，2020，32(2)：89－95.
WANG Feng，XIANG Jiafa，GUO Yufeng，et al. Research progress of sintering optimization ore blending method based on basic process performance of iron ore[J]. Journal of Iron and Steel Research，2020，32(2)：89－95.

[3] 寇明银，张众，曾旺，等. 铁矿粉烧结优化配矿及其模型研究进展[J]. 钢铁，2022，57(2)：1－11.
KOU Mingyin，ZHANG Zhong，ZENG Wang，et al. Research progress on optimization technology and its model of ore-blending for sinter process[J]. Iron & Steel，2022，57(2)：1－11.

[4] 翟晓波，吴胜利，阙志刚. 加拿大铁精粉对烧结体固结强度的影响及其改善方法[J]. 钢铁，2019，54(6)：27－36.
ZHAI Xiaobo，WU Shengli，QUE Zhigang. Effect of Canadian iron concentrate on bonding strength of sinter body and thereof improvement method[J]. Iron & Steel，2019，54(6)：27－36.

[5] 吴胜利，刘宇，杜建新，等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报，2002，24(3)：254－257.
WU Shengli，LIU Yu，DU Jianxin，et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2002，24(3)：254－257.

[6] LU L. Important iron ore characteristics and their impacts on sinter quality-a review[J]. Minerals & Metallurgical Processing，2015，32(2)：88－96.

[7] 付忠旺，莫朝兴，陈小敏，等. 铁矿粉烧结液相流动性特征数的影响因素[J]. 钢铁，2018，53(12)：18－23.
FU Zhongwang，MO Chaoxing，CHEN Xiaomin，et al.

Influence factors of fluidity characteristic number of iron ore powder[J]. Iron & Steel,2018,53(12):18 – 23.

[8] 陈小敏,吴锵,秦喧柯,等. 基于黏结强度特征数的烧结矿强度评价方法[J]. 重庆大学学报,2018,41(7):23 – 29.
CHEN Xiaomin, WU Keng, QIN Xuanke, et al. Bonding strength characteristic number: A new method to evaluate sinter strength [J]. Journal of Chongqing University, 2018,41(7):23 – 29.

[9] XUE Y X,ZHU D Q,PAN J,et al. Distinct difference in high-temperature characteristics between limonitic nickel laterite and ordinary limonite[J]. ISIJ International, 2022,62(1):29 – 37.

[10] OKAZAKI J,HIGUCHI K,HOSOTANI Y,et al. Influence of iron ore characteristics on penetrating behavior of melt into ore layer [J]. ISIJ International, 2003, 43 (9): 1384 – 1392.

[11] 沈峰满,安海玮,姜鑫,等. 烧结工艺中复合铁酸钙黏结相的研究进展[J]. 钢铁,2024,59(2):1 – 12.
SHEN Fengman, AN Haiwei, JIANG Xin, et al. Research progress on sillico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) bonding phase in sintering process[J]. Iron & Steel,2024,59(2):1 – 12.

[12] 丁成义,杨涛,龙红明,等. $w(MgO)/w(Al_2O_3)$对烧结矿成矿特性及冶金性能的影响[J]. 钢铁,2023,58(3):25 – 33.
DING Chengyi, YANG Tao, LONG Hongming, et al. Effect of $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ on sintered ore mineralization characteristics and metallurgical properties [J]. Iron & Steel,2023,58(3):25 – 33.

[13] 杨楠,郭兴敏. SiO_2 对 $CaO\text{-}Fe_2O_3$ 熔体结晶矿物组成及显微结构的影响[J]. 钢铁研究学报,2019,31(8):712 – 717.
YANG Nan,GUO Xingmin. Effect of SiO_2 on composition and microstructure of crystal products of $CaO\text{-}Fe_2O_3$ melt [J]. Journal of Iron and Steel Research,2019,31(8):712 – 717.

[14] 闫志武,张建良,张亚鹏,等. SiO_2 对烧结矿冶金性能及微观结构的影响[J]. 工程科学学报,2016,38(7):913 – 919.
YAN Zhiwu, ZHANG Jianliang, ZHANG Yapeng, et al. Effects of SiO_2 on the metallurgical properties and microstructure of sinter[J]. Chinese Journal of Engineering,2016,38(7):913 – 919.

[15] 伍英,高立华. 高硅型铁矿对烧结工艺及烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁,2024,59(2):25 – 35.
WU Ying, GAO Lihua. Effect of high-silicon iron ore on sintered on ore sintering process and metallurgical properties[J]. Iron & Steel,2024,59(2):25 – 35.

[16] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):258 – 261.
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. Experiment study of assimilation ability between iron ores and CaO[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002,24(3):258 – 261.

[17] 朱利,吴锵,申威,等. 表征铁矿粉烧结液相流动性能的新方法[J]. 钢铁研究学报,2016,28(6):13 – 18.
ZHU Li, WU Keng, SHEN Wei, et al. A new characterization method for the liquid phase fluidity of iron ore powder during sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research,2016,28(6):13 – 18.

[18] 刘征建,李思达,张建良,等. 国内超高碱度烧结矿生产实践及发展趋势[J]. 钢铁,2022,57(1):39 – 47.
LIU Zhengjian, LI Sida, ZHANG Jianliang, et al. Production practice and development trend of iron ore sinter with ultra-high basicity [J]. Iron & Steel, 2022, 57(1):39 – 47.

[19] 陈子罗,张建良,张亚鹏,等. 烧结矿适宜的 SiO_2 质量分数和碱度[J]. 钢铁,2016,51(12):8 – 14,19.
CHEN Ziluo, ZHANG Jianliang, ZHANG Yapeng, et al. Influence of basicity and $w(SiO_2)$ on sinter mineral quality[J]. Iron & Steel,2016,51(12):8 – 14,19.

[20] 杨双平,于成刚,何少红,等. 铁矿粉化学成分对烧结高温基础特性的影响[J]. 中国冶金,2023,33(2):47 – 54.
YANG Shuangping, YU Chenggang, HE Shaohong, et al. Influence of chemical composition in iron ore powder on basic characteristics of sintering at high temperature[J]. China Metallurgy,2023,33(2):47 – 54.

[21] 妥建德,侯名强,付光军. 高硅烧结矿适宜碱度及经济性[J]. 钢铁,2018,53(3):16 – 21.
TUO Jiande, HOU Mingqiang, FU Guangjun. Optimum basicity and economy of high silicon sinter[J]. Iron & Steel,2018,53(3):16 – 21.

[22] 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.

[23] 吴胜利，杜建新，马洪斌，等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报，2005，27(3)：291 – 293.
WU Shengli, DU Jianxin, MA Hongbin, et al. Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3): 291 – 293.

[24] 王小艾，姜鑫，高远，等. 基于相图分析铁酸钙流动性及烧结矿强度[J]. 钢铁，2019，54(5)：9 – 13.
WANG Xiaoai, JIANG Xin, GAO Yuan, et al. Investigation on fluidity of SFCA and sintering strength based on phase diagram[J]. Iron & Steel, 2019, 54(5): 9 – 13.

[25] 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.

[26] 吴胜利，杜建新，马洪斌，等. 铁矿粉烧结粘结相自身强度特性[J]. 北京科技大学学报，2005，27(2)：169 – 172.
WU Shengli, DU Jianxin, MA Hongbin, et al. Self-intensity of binding phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(2): 169 – 172.

[27] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙：中南大学出版社，2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.

[28] 郅亚娜，李宇壮，白诗皓，等. 碱度对富矿粉厚料层烧结固相反应及矿物生成的影响[J]. 中国冶金，2023，33(2)：38 – 46.
QIE Yana, LI Yuzhuang, BAI Shihao, et al. Influence of basicity on solid phase reaction and mineral formation in high feed sintering of ore-rich[J]. China Metallurgy, 2023, 33(2): 38 – 46.

[29] 孟凡俭，孙长余，李廷乐，等. 烧结矿中复合铁酸钙形成影响因素[J]. 钢铁，2018，53(7)：16 – 23.
MENG Fanjian, SUN Changyu, LI Tingle, et al. Formation and influencing factors of silico-ferrite of calcium and aluminum in sinter[J]. Iron & Steel, 2018, 53(7): 16 – 23.

[30] 张国成，罗果萍，柴轶凡，等. 碱度对烧结矿液相形成性能和微观结构特性的影响[J]. 钢铁研究学报，2021，33(7)：584 – 592.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Effect of basicity on liquid phase formation properties and microstructure of sinter[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(7): 584 – 592.

(上接第 32 页)

[17] 范晓慧，李文琦，甘敏，等. MgO 对高碱度烧结矿强度的影响及机理[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2012，43(9)：3325 – 3330.
FAN Xiaohui, LI Wenqi, GAN Min, et al. Influence and mechanism of MgO on strength of high basicity sinter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9): 3325 – 3330.

[18] 阎丽娟，吴胜利，尤艺，等. 各种铁矿粉的同化性及其互补配矿方法[J]. 北京科技大学学报，2010，32(3)：298 – 305.
YAN Lijuan, WU Shengli, YOU Yi, et al. Assimilation of iron ores and ore matching method based on complementary assimilation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(3): 298 – 305.

[19] 宋亚超，王平，李家新，等. 马钢 4 000 m^3 高炉高 Al_2O_3 炉渣渣系优化实验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版)，2009. 26(4)：327 – 332.
SONG Yachao, WANG Ping, LI Jiaxin, et al. Experimental study on slag optimization of 4 000 m^3 BF with Al_2O_3-rich slag in MaSteel[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural science), 2009, 26(4): 327 – 332.

[20] WANG P, MENG Q M, LONG H M. Influence of basicity and MgO on fluidity and desulfurization ability of high-aluminum slag[J]. High Temperatre Materials and Processes, 2016, 35(7): 669 – 675.