烧结工艺参数的相关性分析与生产过程优化

贺 跃[1]，梁臣忠[1]，张 斌[1]，张亚鹏[3]，雷仕江[1]，卢 刚[1]，张周波[1]，欧书海[2]
（1. 首钢水城钢铁（集团）有限责任公司，贵州 水城 553600；2. 北京首钢股份有限公司，
北京 100043；3. 首钢集团有限公司技术研究院，北京 100043）

摘要： 为优化烧结生产指标并降低返矿率，本文通过烧结杯试验结合多元统计分析与模拟，揭示固体燃料配比、碱度（R）、w（CaO）、w（FeO）及 w（MgO）等关键参数对烧结矿转鼓强度、成品率、还原粉化指数（RDI）及熔滴性能的协同作用规律，系统探究烧结工艺参数对烧结矿物化特性及冶金性能的调控机制。结果表明：当固体燃料配比为 4.05%～4.55% 时，试验烧结矿的转鼓强度达到峰值；当 R 为 1.9～2.1、w（CaO）为 11.2%～11.8% 时，两者可协同促进铁酸钙生成（体积分数 >32%），抑制钙铁橄榄石（$CaO·FeO·SiO_2$）等脆性相析出，显著提升烧结矿的结构稳定性（$RDI_{+3.15\ mm}$ 达 78.3%）。蒙特卡罗法模拟结果表明，当 w（FeO）为 8.5%～9.0%、R 为 1.8～2.1、w（CaO）为 11.2%～11.8% 及烧结终点温度≥430 ℃时，返矿率 <16% 的概率达 92.3%。在 w（FeO）为 8.74%、R 为 1.98、w（CaO）为 11.46%、w（MgO）为 2.38% 优化工艺参数下，实际生产的烧结矿转鼓强度提升至 77.70%（增加了 0.49%），烧结机利用系数提升至 1.426 t/（m^2·h），返矿率降至 16.46%（降低了 11.55%），>10 mm 粒级占比达 75.82%（增加了 0.9%），同时固体燃料消耗下降至 50.31 kg/t（降低了 1.47%）。本文研究成果可为烧结工艺的精细化调控提供数据依据。

关键词： 烧结；工艺参数；固体燃料配比；矿相结构；返矿率
中图分类号： TF046.4 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764（2025）06－0025－13
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.093

Correlation analysis of sintering process parameters and optimization of production process

HE Yue[1], LIANG Chenzhong[1], ZHANG Bin[1], ZHANG Yapeng[3], LEI Shijiang[1], LU Gang[1], ZHANG Zhoubo[1], OU Shuhai[2]
(1. Shougang Shuicheng Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Shuicheng 553600, Guizhou, China; 2. Beijing Shougang Co., Ltd., Beijing 100043, China; 3. Research Institute of Technology of Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: To optimize sintering production index and reduce the return fines rate, in the study of this paper through sinter pot test combined with multivariate statistical analysis and simulation, the synergistic effect of key parameters, including solid fuel ratio, basicity (R), w(CaO), w(FeO), and w(MgO), on the tumbler strength, yield, reduction degradation index (RDI), and melting and dripping properties of the sinter was revealed, and the regulatory mechanism of sintering process parameters on the physicochemical characteristics and metallurgical properties of sinter was systematically explored. The results indicate that when the solid fuel ratio is between 4.05% and 4.55%, the tumbler strength of the tested sinter reaches its peak value; when R is 1.9～2.1 and w(CaO) is 11.2%～11.8%, they can synergistically promote the formation of calcium ferrite (volume fraction >32%), suppress the precipitation of brittle phases such as calcium iron

收稿日期： 2025－04－11；**修回日期：** 2025－08－20
作者简介： 贺 跃（1996—），男，助理工程师，从事烧结高温基础特性方面的研究工作。
通信作者： 欧书海（1981—），男，工程师，从事烧结高温基础特性方面的研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

olivine ($CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$), and significantly enhance the structural stability of the sinter ($RDI_{+3.15\ mm}$ reaches 78.3%). The simulation results with Monte Carlo method show that when $w(FeO)$ is 8.5%~9.0%, R is 1.8~2.1, $w(CaO)$ is 11.2%~11.8%, and the sintering terminal temperature is ≥430 ℃, the probability of the ore return rate <16% reaches 92.3%. Under the optimized process parameters that $w(FeO)$ is 8.74%, R is 1.98, $w(CaO)$ is 11.46% and $w(MgO)$ is 2.38%, the drum strength of the sinter actually produced increased to 77.70% (increased by 0.49%), the utilization coefficient of the sintering machine increased to 1.426 t/(m^2·h), the return fines rate decreased to 16.46% (decreased by 11.55%), the proportion of particles larger than 10 mm reached 75.82% (increased by 0.9%), and the solid fuel consumption decreased to 50.31 kg/t (decreased by 1.47%). The findings of this study can provide a data basis for the refined control of the sintering process.

Key words: sintering; process parameters; solid fuel ratio; mineralogical structure; return fines rate

钢铁工业是国民经济的基础性产业，其生产与资源效率直接关系国家工业体系的可持续发展。烧结作为高炉炼铁的前端核心环节，承担着将粉状铁精矿制备成具有良好冶金性能的人造富矿的关键任务[1]。然而，该过程普遍存在返矿率高、能源消耗量大、矿物相稳定性不足等问题，导致生产成本上升、资源浪费和环境负荷加剧[2]。据统计，国内部分企业烧结矿返矿率长期高于17%，严重影响成品率并推高生产成本[3-4]。因此，通过工艺参数优化实现烧结矿质量提升与返矿率降低，已成为行业亟待解决的技术难题。

传统烧结调控多集中于单一参数(如固体燃料配比或碱度)的线性优化，忽视了多因素耦合对矿物相形成与冶金性能的非线性影响。固体燃料配比直接决定燃烧带温度场分布，影响液相生成与矿物结晶行为。燃料过量易导致超温(>1 300 ℃)，引发高强度铁酸钙(SFCA)分解为低强度钙铁橄榄石(C_2F)及粗化赤铁矿，造成转鼓强度下降[5-6]；燃料不足则易导致欠熔，降低成品率。碱度(R)与CaO质量分数的协同作用对SFCA网络结构的形成至关重要，但现有研究对二者的动态平衡机制仍认识不足[7-9]。此外，通过调控氧分压影响赤铁矿-磁铁矿相变，其阈值效应与机制尚未系统量化。近年来，关于矿物相调控的研究已取得显著进展。X射线衍射(XRD)与扫描电镜(SEM)检测方法明确了SFCA交织结构对转鼓强度的主导作用；热力学模拟软件(如FactSage)揭示了CaO质量分数对液相线温度及硅酸盐黏度的调控规律[10-12]。然而，现有研究仍存在以下局限[13-16]：① 多数试验仅针对实验室尺度，缺乏与实际生产数据的联动验证；② 对$w(FeO)$、$w(MgO)$等参数的交互作用机制解析不足，尤其是$w(FeO)$过高时磁铁矿占比骤增引发的晶界应力集中效应；③ 传统统计模型(如单变量回归)难以刻画多参数协同作用下的非线性特征，导致工艺窗口的预测精度受限。

针对上述问题，本文以某钢铁厂烧结生产数据为基础，结合烧结杯试验、矿相表征与数理建模，系统解析燃料配比、碱度(R)、$w(CaO)$、$w(FeO)$及$w(MgO)$等关键参数对烧结矿物化特性与冶金性能的协同调控机制，并提出相应多目标优化策略。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

在烧结配料室直接取生产用的预配料进行试验，将预配料混合均匀后按试验方案进行试验。试验原料的主要化学成分及烧损如表1所示。表1中，TFe与FeO分别表征铁品位与氧化状态；SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3为主要脉石成分，影响炉渣性能；烧损为加热过程中的质量损失。由表1可见，含铁原料中TFe质量分数接近，脉石含量与烧损略有差异。生石灰与白云石作为熔剂用于

表1 原料主要化学成分及烧损(质量分数)

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

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	烧损
配合铁料	54.51	11.79	5.79	10.71	2.34	2.437	1.21
外返矿	54.50	8.50	5.50	10.85	2.47	2.560	1.02
内返矿	53.50	8.50	6.20	10.85	2.29	2.300	0.86
生石灰	—	—	1.26	88.21	4.26	—	—
白云石	—	—	—	32.85	21.25	—	46.62

中国知网 https://www.cnki.net

调整炉渣碱度。焦粉与煤粉的工业分析结果如表 2 所示。固体燃料中各组分含量分别影响着火点、热值、污染物排放种类和数量及工艺结渣特性等。由表 2 可见，煤粉的挥发分、水分及碱金属含量显著高于焦粉，而焦粉的固定碳更高，灰分略高。

表 2　固体燃料工业分析(质量分数)

Table 2　Industrial analysis of solid fuels　%

燃料种类	挥发分	灰分	化学成分					
			S	C	CaO	水分	K_2O	Na_2O
焦粉	0.88	13.12	0.91	82.02	3.25	0.55	0.45	0.30
煤粉	12.38	10.71	0.72	82.85	3.47	2.25	0.96	2.31

1.2　试验方法

烧结杯试验的原料为铁矿、石灰石、生石灰和固体燃料等，其中固体燃料用量为 3.7%～5.4%。烧结杯试验的操作参数如表 3 所示。试验中，将造粒后约 80 kg 的混合料装入直径为 200 mm、高度为 690 mm 的烧结杯中并点火，设置点火温度约为 1 100 ℃、点火时间为 90 s、点火负压为 5.0 kPa、烧结负压为 10.0 kPa。

表 3　烧结杯试验的基本操作参数

Table 3　Basic operational parameters of the sintering cup test

烧结料层厚度/mm	铺底料厚度/mm	点火温度/℃	点火时间/min	点火负压/kPa	烧结负压/kPa
690	30	1 050±50	1.5	5	12

烧结杯试验主要包括配料、混匀、制粒、烧结、成品检测等环节。烧结过程评价指标包括垂直烧结速度、利用系数、成品率、固体燃料消耗和成品烧结矿转鼓强度，具体测定方法参见文献[17-18]。将成品烧结矿经破碎、缩分和取样后进行化学成分和光学显微矿相分析[19]，并按照《铁矿石 还原性的测定方法》(GB/T 13241—2017)和《铁矿石 低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—1991)测定其还原度和低温还原粉化率[20-22]，依据《铁矿石 高温荷重还原软熔滴落性能测定方法》(GB/T 34211—2017)测试烧结矿的荷重软化性能[23-24]。

采用 Python 3.8 及其科学计算扩展库(配合使用 SciPy 1.7+、Pandas 1.3+等)，基于烧结杯试验结果开展数理建模分析，重点解析固体燃料配比、碱度(R)、w(CaO)、w(FeO)及w(MgO)等关键工艺参数对烧结矿物化特性与冶金性能的协同影响机制。通过计算各变量之间的皮尔逊(Pearson)相关系数(r)，定量评估其线性关联程度。相关系数 r 为[-1,1]，绝对值越接近 1，表明线性相关性越强。同时，对相关系数进行显著性检验(设定显著性水平 $p<0.05$)，以判断相关关系是否具有统计学意义。

在上述相关性分析的基础上，进一步提出多目标优化策略，以指导烧结工艺参数的协同调整。需要说明的是，本文在分析中暂未考虑矿粉结构变化对烧结过程的影响，该因素将在后续研究中予以深入探讨。

2　结果与讨论

2.1　9 组试验数据的相关性分析

在 2023 年 6 月—2024 年 9 月进行烧结杯试验，对固体燃料配比、终点温度、终点负压、垂直烧结速度、成品率、利用系数、转鼓指数、综合燃损、平均粒径等数据进行相关性分析，如图 1 所示。由图 1 可见：固体燃料配比与转鼓指数呈现强正相关($r=0.61$)，同时驱动烧结终点温度上升；成品率则主要受烧结终点温度正向影响($r=0.48$)，辅以烧结终点负压的中等关联($r=-0.36$)，

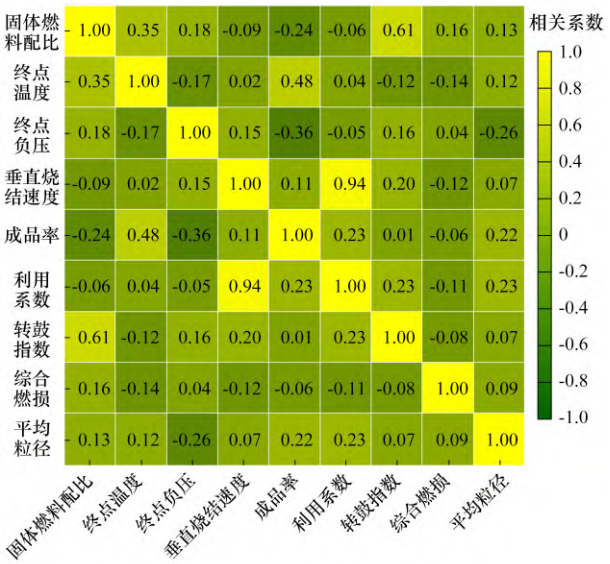


图 1　9 组烧结杯试验数据的相关性分析

Fig. 1　Correlation analysis of 9 sets test data of sintering pot

中国知网　https://www.cnki.net

而固体燃料配比反而呈现弱抑制作用($r = -0.24$)。烧结矿平均粒径与综合烧损率对工艺参数变化的响应较弱($r < 0.15$)。总之，固体燃料配比对烧结矿质量具有显著调控作用。

2.1.1 固体燃料配比对转鼓强度的影响

固体燃料配比对烧结矿转鼓强度的影响如图 2 所示。由图 2 可见，当固体燃料配比处于 4.05%~4.55% 的优化区间时，转鼓强度达到峰值(为 72.7% ±1.2%)，此时固体燃料的燃烧效率与矿物液相生成之间实现动态平衡。当固体燃料配比低于 4.05% 时，转鼓强度随固体燃料用量的提升呈线性增长趋势($\beta = 0.72$，$p < 0.01$)，这归因于燃烧热值不足导致烧结的欠熔现象改善；而当固体燃料配比超过 4.55% 的临界值后，由回归模型计算结果可知，固体燃料用量每增加 0.1%，转鼓强度下降达 0.85%，这与高温过熔引发的矿物结构劣化直接相关。可知，固体燃料配比与烧结矿转鼓强度之间呈现显著非线性调控特征。

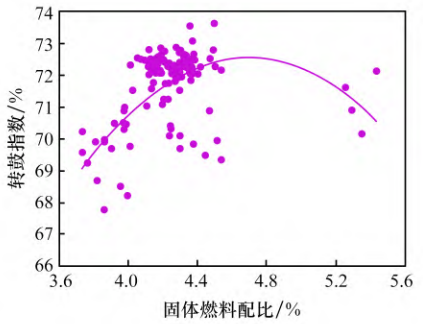
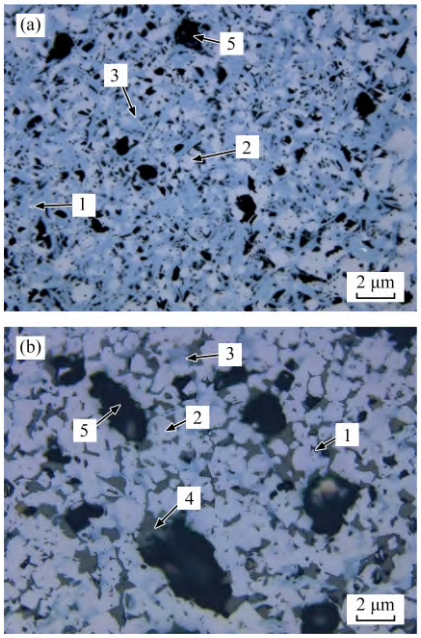


图 2 固体燃料配比对转鼓强度的影响

Fig. 2 The influence of solid fuel ratio on the strength of the drum

不同固体燃料配比下烧结矿的矿相显微结构如图 3 所示。采用计点数法对图 3 中矿相进行分析，图 3(a) 中孔洞、玻璃相、铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿占比分别为 19%、12%、39%、20%、5%；图 3(b) 中孔洞、玻璃相、铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿占比分别为 25%、17%、19%、31%、5%。由图 3 可知，当固体燃料配比为 4.4% 时，烧结矿中磁铁矿和铁酸钙以粒径 0.1~1 μm 的致密粒状晶为主(占比 >60%)，晶间孔洞直径多集中于 1~2 μm，形成连续交织的强化骨架结构。相较而言，当固体燃料配比为 5.3% 时，烧结矿内矿相发生显著异变，玻璃相占比提升，磁铁矿占比增多和铁酸钙减少，晶粒尺寸增大至 1~2 μm。这进一步证实，通过调控固体燃料配比，优化烧结热制度可以改变矿物相组成与微观形貌，进而优化烧结矿的转鼓强度。



固体燃料配比/%：(a) 4.4；(b) 5.3
1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—铁酸钙；
4—玻璃相；5—孔洞。

图 3 不同固体燃料配比下烧结矿的矿相显微结构

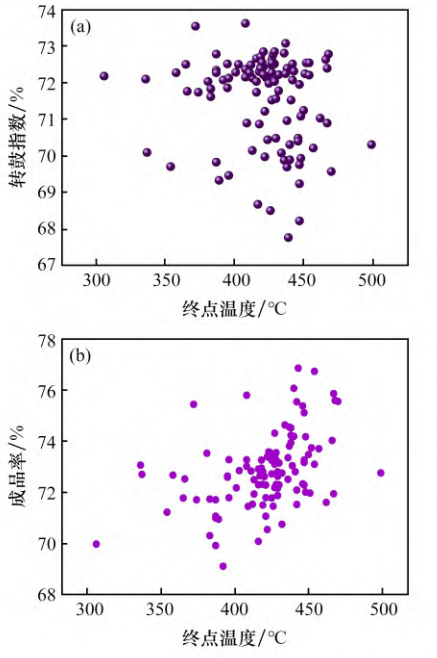
Fig. 3 The microstructure of sinter under different solid fuel ratios

2.1.2 烧结终点温度对转鼓指数和成品率的影响

烧结终点温度对转鼓指数和成品率的影响如图 4 所示。由图 4 可见，烧结终点温度与成品率呈显著正相关($r = 0.48$，$p < 0.05$)，其与转鼓指数的相关性不强($r = -0.12$，$p < 0.05$)。当温度由 300 ℃升至 480 ℃时，成品率提高了 18.6 个百分点。研究表明，360 ℃时形成的亚稳态赤铁矿(Fe_2O_3，质量分数为 42.3% ±1%)，晶粒细小(0.5~1 μm)，其晶格畸变能较高，在冷却中易引发微裂纹扩展，导致成品率下降。

不同烧结终点温度下烧结矿的矿相显微结构如图 5 所示。图 5(a) 中孔洞、玻璃相、铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿占比分别为 39%、7%、6%、6%、42%；图 5(b) 中孔洞、玻璃相、铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿占比分别为 28%、11%、6%、19%、37%。由图 5 可见，当终点温度升至 450 ℃时，

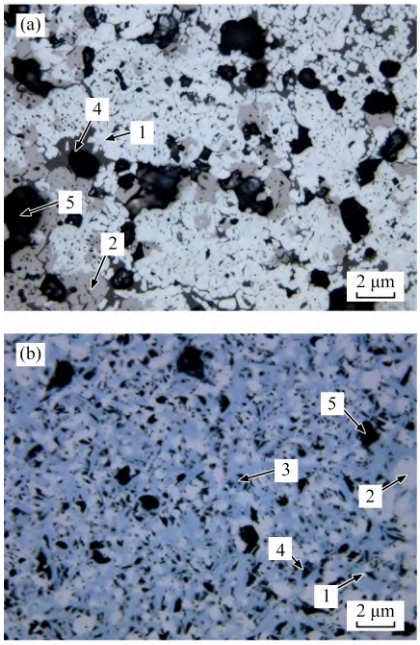
中国知网 https://www.cnki.net



(a) 转鼓指数；(b) 成品率

图 4　烧结终点温度对转鼓指数和成品率的影响

Fig. 4　The influence of sintering end temperature on the drum strength and yield rate



终点温度/℃：(a) 360；(b) 450

1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—铁酸钙；4—玻璃相；5—孔洞。

图 5　不同烧结终点温度下烧结矿的矿相显微结构

Fig. 5　The microstructure of mineral phases in sinter at different sintering end temperatures

赤铁矿发生选择性还原($Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$)，使磁铁矿占比提升至 19%。烧结矿相显示，磁铁矿晶粒大小为 0.5 ~ 1 μm，同时孔隙率下降至 28.2% ± 1.7%。更为重要的是，高温促进了 FeO-SiO_2-CaO 三元共晶液相产生，使流动液相填充了晶间孔隙并形成桥接结构(观察到 0.5 ~ 1 μm 玻璃相)；高温诱导了矿相优化，使烧结矿体积密度提升。高温从热力学稳定性、结构致密性及界面结合强度三个维度协同提升了成品率指标。

2.1.3　终点负压对成品率的影响

终点负压对烧结矿成品率的影响如图 6 所示。由图 6 可知，终点负压与烧结矿成品率呈现显著负向调控特征($r = -0.36$，$p < 0.05$)。从试验结果分析可以得知，当终点负压从 3 500 Pa 提升至 5 000 Pa 时，每提升 100 Pa 成品率的下降幅度达 0.12%。其作用机制可通过矿相演变与孔隙结构协同作用阐释，如图 7 所示。图 7(a) 中孔洞、玻璃相、铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿占比分别为 21%、6%、34%、30%、7%；图 7(b) 中孔洞、玻璃相、铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿占比分别为 25%、11%、19%、44%、2%。

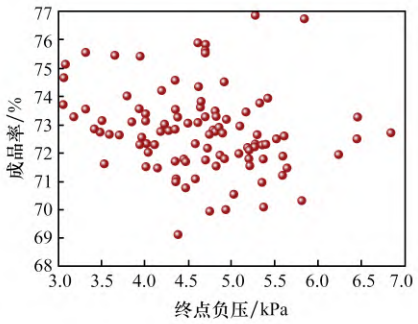


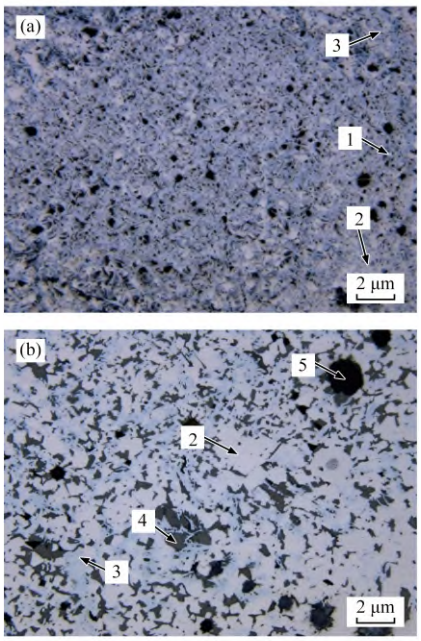
图 6　终点负压对烧结矿成品率的影响

Fig. 6　The influence of final negative pressure on the yield of sinter

在 3 500 Pa 工况下，烧结矿矿相呈现典型交织溶蚀结构，铁酸钙矿相占比达 34%，与磁铁矿形成三维连续网络，促进了 SFCA 相通过固相反应($Fe_3O_4 + CaO \rightarrow SFCA$)稳定生成。当终点负压增至 5 000 Pa 时，烧结矿相分析结果显示，晶粒尺寸增大至 1 ~ 2 μm，较 3 500 Pa 时增大了 58%。SFCA 相占比骤降至 18.7%，代之以板状磁铁矿(占比为 43.8%)和游离 CaO(6.2%)。这种相变源于高速气流(0.85 m/s)导致的燃烧带移效应。

中国知网　https://www.cnki.net

5 000 Pa 时，高温区（ >1 200 ℃）的持续时间缩短，使 $CaO-FeO_x-SiO_2$ 体系未能完成扩散控制反应。同时，高速气流引发强制对流冷却，造成玻璃相的析出，导致板状 Fe_2O_3 优先沿 Fe_3O_4 晶面择优生长。可知，提升终点负压可以调控燃烧带移动速度和高温持续时间，影响矿物反应动力学与结晶行为。因此，将负压控制在 4 000 Pa 以下，可以优化烧结矿矿相组成与孔隙结构。



终点负压/Pa：（a） 3 500；（b） 5 000
1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—铁酸钙；
4—玻璃相；5—孔洞。

图 7 不同终点负压下烧结矿的矿相显微结构

Fig. 7 Microstructural phase of sinter under different final negative pressures

2.2 转鼓强度的相关性分析

转鼓强度和烧结矿化学成分的相关性分析如图 8 所示。由图 8 可见，转鼓强度与碱度（R_0）呈强正相关（$r=0.91$，$p<0.001$），与 CaO 质量分数正相关（$r=0.90$），与 TFe 质量分数呈负相关（$r=-0.72$），与 MgO 质量分数呈弱正相关（$r=0.32$）。当碱度为 1.8～2.2 时，转鼓强度达到峰值72.3% ±1.5%，此时铁酸钙相占比为 34.2%。CaO 通过降低液相线温度、促进硅酸盐液相生成，增强了晶界黏结，从而提升了烧结矿强度。

不同化学成分及碱度对烧结矿转鼓强度的影响如图9所示。由图9可见，实际数据与经典理论之间存在差异。传统理论强调 FeO 对烧结矿强度有正向作用，但试验结果显示，TFe 质量分数与转鼓强度呈现显著负相关（$r=-0.72$）。这主要是因为，当碱度（R_0为 1.9～2.2）与 CaO 质量分数（11.5% ±0.5%）处于优化区间时，CaO 与 FeO_x 优先形成高强度铁酸钙，而非铁橄榄石，FeO 仅作为中间相存在。因此，TFe 质量分数增加反而导致铁酸钙减少，使烧结矿强度下降。因此，实际生产可以通过协同调控碱度-w（CaO）-w（TFe）三元关系，而非单一提高 FeO 质量分数，以实现烧结矿强度提升。

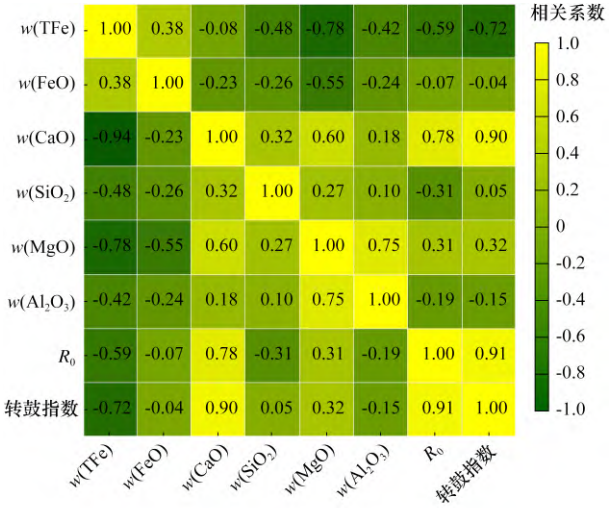


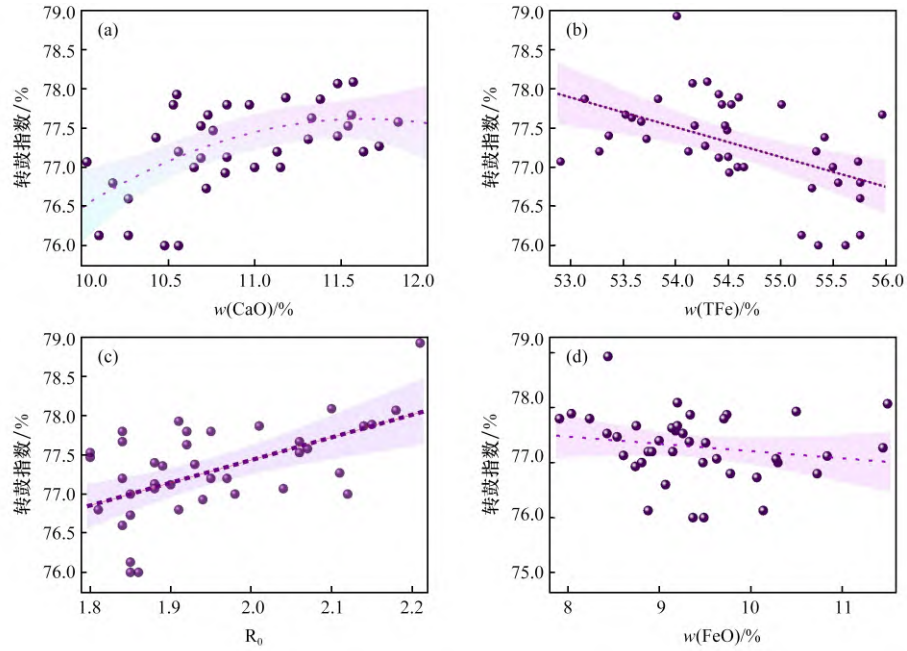
图 8 转鼓强度和烧结矿化学成分的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of drum strength and chemical composition of sinter

当 FeO 质量分数分别为 8.5、9.5 时，不同 CaO 质量分数下烧结矿的矿相显微结构如图 10 所示，矿相组成如表 4 所示。图 10 用以揭示 w（CaO）-w（FeO）-R_0三元体系对矿物组成的耦合作用规律。由图 10 可见，当 FeO 质量分数稳定在 8.5%时，CaO 质量分数从 10%增至 11.5%可使铁酸钙矿相占比从 18.7%提升至 34.7%，同时使赤铁矿（Fe_2O_3）占比从 20.3% 降至 5.3%，使磁铁矿（Fe_3O_4）占比减少 7.1 个百分点和硅酸钙（C_2S）增加 3.5 个百分点。这种相变归因于 CaO 的矿化效应，即 CaO 增加可提升有效液相量，促进 Fe_2O_3 与 CaO 反应生成铁酸钙。

当 FeO 质量分数增至 9.5% 时，高 CaO 质量分数（11.5%）仍能维持 SFCA 占比在 30% 以上，但磁铁矿占比回升至35.2%（较FeO质量分数为

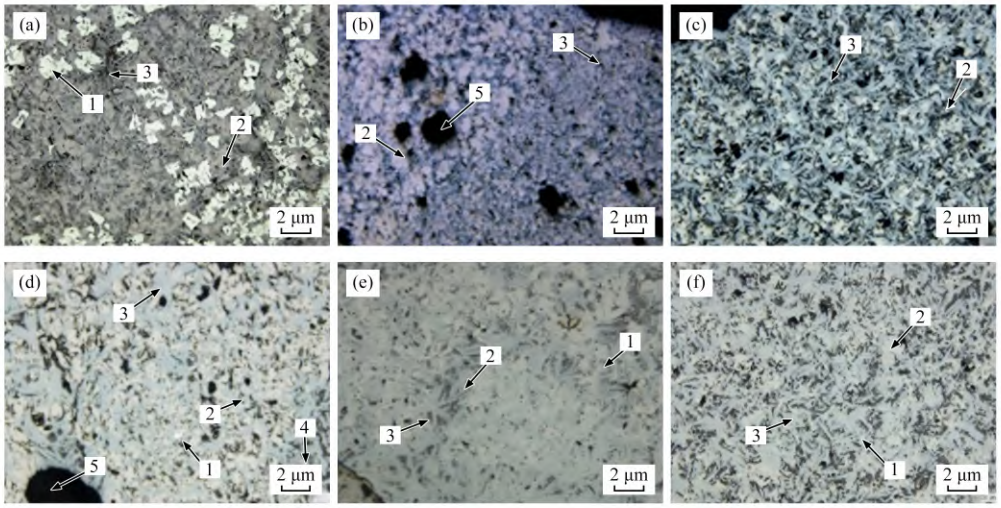
中国知网 https://www.cnki.net



(a) w(CaO)；(b) w(TFe)；(c) R_0；(d) w(FeO)

图 9　不同化学成分及碱度对烧结矿转鼓指数的影响

Fig. 9　The influence of different chemical compositions and alkalinity on the drum strength of sinter



FeO、CaO **质量分数：**(a) 8.5、10；(b) 8.5、11；(c) 8.5、11.5；(d) 9.5、10；(e) 9.5、11；(f) 9.5、11.5

1—**赤铁矿**；2—**磁铁矿**；3—**铁酸钙**；4—**玻璃相**；5—**孔洞**。

图 10　不同 FeO、CaO 质量分数下烧结矿的矿相显微结构

Fig. 10　Microstructural phase of sinter under different mass fractions of FeO and CaO

8.5%**时高** 9.7%)。**这是由于** FeO **作为还原剂可降低体系氧分压，促使部分** Fe_2O_3 **转化为** Fe_3O_4(**通过** Boudouard **反应：** $Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2FeO + CO_2$)。**当** CaO **质量分数≥**11%**时，因其与铁酸钙存在竞争性生成关系** [$\Delta G(C_2S-CF) = -15.6$ kJ/mol]，**硅酸钙(** C_2S**)生成被抑制。**

综上，当 CaO **质量分数为** 11.5%、R_0 **为** 2.0 **时，铁酸钙形成了连续网状交织溶蚀结构，其维氏硬度较磁铁矿高，晶面织构强度提升，有效阻碍了裂纹扩展。这表明，碱度-CaO 协同调控具有较大作用，可以考虑建立** w(CaO)(11.2%～11.8%) − R_0(1.9～2.1) − w(FeO)(<8.8%)**的三元工艺窗口，以实现矿物组成与冶金性能的帕累托最优。**

中国知网　https://www.cnki.net

表 4 不同 CaO、FeO 质量分数条件下烧结矿的矿相组成占比(质量分数)

Table 4 The proportion of mineral phases in sinter under different mass fractions of CaO and FeO %

w(FeO)	w(CaO)	孔洞	玻璃相	铁酸钙	磁铁矿	赤铁矿
8.5	10.0	17	10	21	32	20
	11.0	24	9	27	33	7
	11.5	20	6	35	35	5
9.5	10.0	20	12	29	27	13
	11.0	19	12	32	31	6
	11.5	20	10	32	36	2

2.3 还原粉化指数的相关性分析

还原粉化指数和化学成分的相关性分析如图 11 所示，化学成分和碱度对烧结矿低温还原粉化的影响如图 12 所示。由图 11 可见，碱度(R)、w(CaO)与 $RDI_{+6.3\ mm}$及 $RDI_{+3.15\ mm}$呈显著正相关(r 分别达 0.52/0.65 和 0.75/0.73)，而与 $RDI_{+0.5\ mm}$呈负相关(r 约为 −0.40)。这是因为，高碱度(R = 1.9～2.1)和高 CaO 质量分数(11.2%～11.8%)协同促进了高强度铁酸钙的生成，并抑制了脆性钙铁橄榄石的形成，从而提升了结构稳定性。FeO 质量分数对 $RDI_{+3.15\ mm}$呈阈值调控(r = 0.50)，其值在 9.0% ±0.2%时可平衡赤铁矿与磁铁矿数量，缓解还原应力；过量(>9.5%)则会导致磁铁矿增多和晶界裂纹加剧。

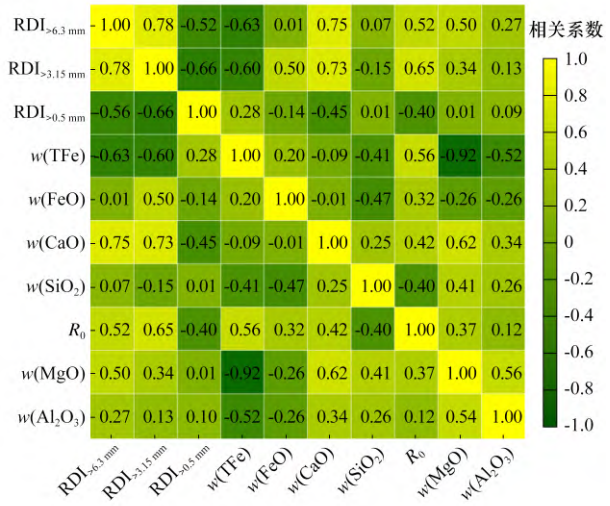
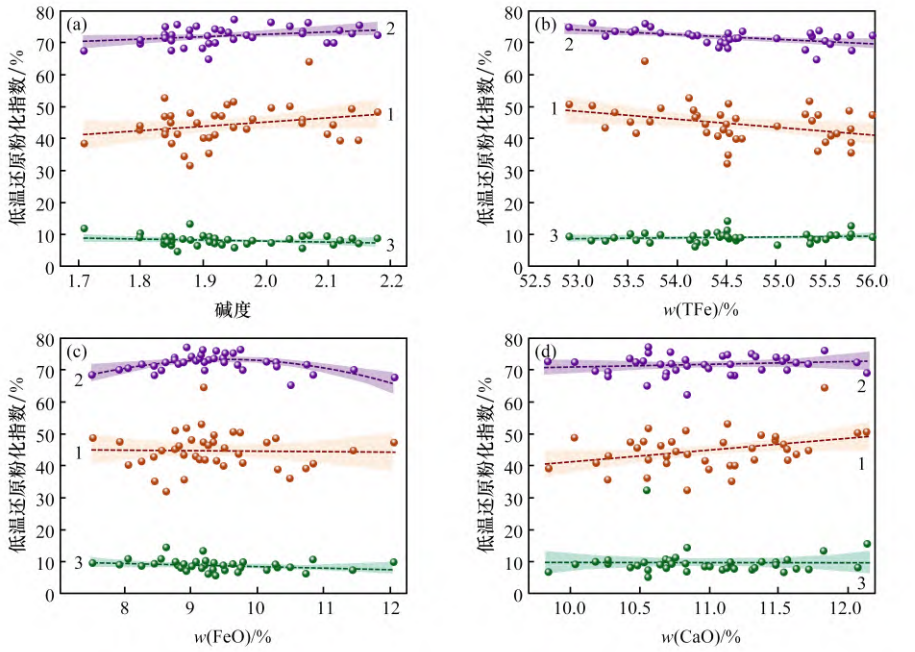


图 11 低温还原粉化指数和化学成分的相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis between low-temperature reduction pulverization index and chemical compositions

因此，在 R 为 2.0、w(CaO)为 11.5%、w(FeO)为 9.0%的优化工艺条件下，$RDI_{+3.15\ mm}$提高至 78.3%，并将 $RDI_{+0.5\ mm}$细粉率控制在 12%以内。



(a) 碱度；(b) w(TFe)；(c) w(FeO)；(d) w(CaO)

低温还原粉化指数：1—>6.3 mm；2—>3.15 mm；3—<0.5 mm。

图 12 化学成分和碱度对烧结矿低温还原粉化的影响

Fig. 12 The influence of chemical compositions and alkalinity on the low-temperature reduction pulverization of sinter

中国知网 https://www.cnki.net

对于 TFe 质量分数，该值通过增加磁铁矿相变应力负向影响还原粉化指数。需通过 R-w(CaO)-w(TFe) 三元协同优化以实现粗粒级最大化与细粉最小化。本文中 $w(SiO_2)$ 与 $w(Al_2O_3)$ 对 RDI 分级的调控未达显著水平($|r|<0.20$)，可能由于碱度和 FeO 质量分数的影响因素更强。

2.4　熔滴性能的相关性分析

熔滴性能和烧结矿化学成分的相关性分析如图 13 所示。由图 13 可见，CaO 与 MgO 质量分数对熔滴温度区间呈现差异化调控作用。熔滴温度区间(ΔT_d)与 CaO 质量分数呈强正相关($r=0.60$)，与 MgO 质量分数呈中等正相关($r=0.40$)，其作用机制可归结于：软熔温度区间(ΔT_s)与 CaO 质量分数呈弱正相关($r=0.34$)，CaO 促进了初生液相(1 280 ℃出现)在软化阶段形成黏弹性网络结构，抑制了孔隙塌缩。而 SiO_2、Al_2O_3等组分因主要参与低温共晶反应(<1 250 ℃)，对高温熔滴特性的影响未达显著水平($|r|<0.18$)。

化学成分对熔滴性能的影响如图 14 所示。由图 14 可见，CaO 与 MgO 质量分数对烧结矿软熔过程的影响呈现显著差异。随着 CaO 质量分数的增加，熔滴温度区间(ΔT_d)与软熔温度区间(ΔT_s)明显扩大($r=0.60$)。当 CaO 质量分数 > 11.5% 时，ΔT_s增速升至 0.85 ℃/%，原因是过量 CaO 促进了高熔点钙铝黄长石($Ca_2Al_2SiO_7$，熔点 > 1 480 ℃)的生成，抑制了熔体流动。与此同时，MgO 质量分数提高使 ΔT_d 以 0.32 ℃/% 的速率稳定扩展($r=0.40$)，这源于 Mg^{2+} 在磁铁矿中的固溶强化作用，使晶格稳定性得到提升。

熔滴渣相分析结果如图 15 所示。由图 15 可见，在 $w(Al_2O_3)$ 为 10% 的 CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3 四元渣系中，物相主要分布于镁硅钙石($Ca_3MgSi_2O_8$)区。热力学计算(FactSage)结果表明，当 MgO 质量分数从 2.5% 降至 1.8% 时，液相线温度降低，渣系成分向低熔点钙长石($CaAl_2Si_2O_8$)区迁移，显著改善了熔体流动性。可将 MgO 质量分数控制在2.2%~2.4%，以兼顾高温结构稳定性和熔渣流动性。

3　生产应用效果

以水钢 265 m^2 烧结机 2023 年 12 月—2025 年 2 月的生产数据(表 5)为例，对烧结返矿率长期偏高(>17%)问题实施技术优化。通过加厚烧结机料层(从 801 mm 提升至≥850 mm)与强化蓄热效能，使初期固体燃料配比由52.35 kg/t降至

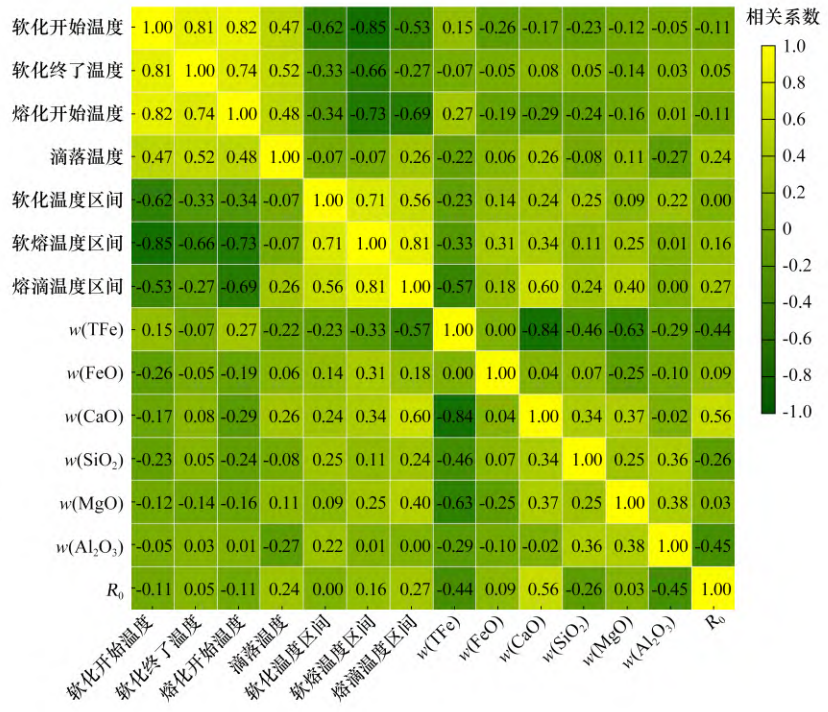
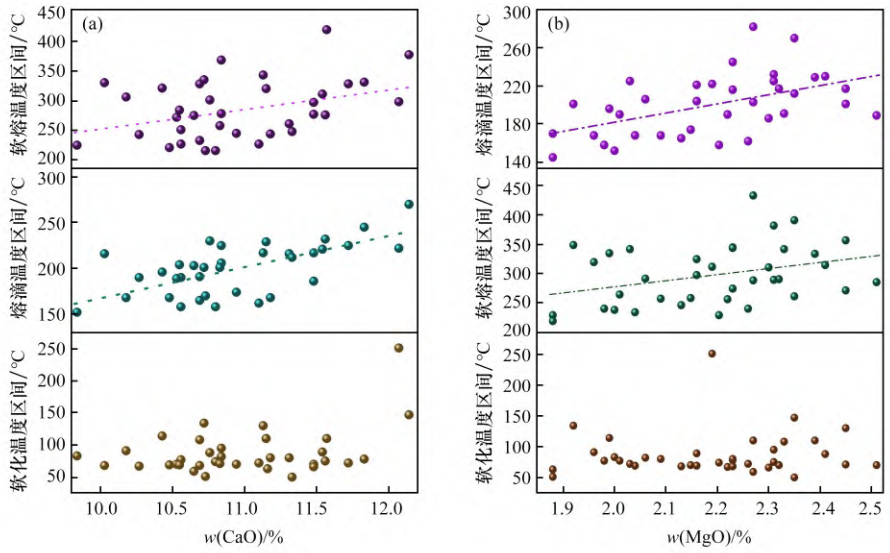


图 13　熔滴性能和烧结矿化学成分的相关性分析

Fig. 13　Correlation analysis of droplet performance and chemical composition of sinter

中国知网　https://www.cnki.net



(a) w(CaO); (c) w(MgO)

图 14 化学成分对熔滴性能的影响

Fig. 14 The influence of chemical composition on the properties of molten droplets

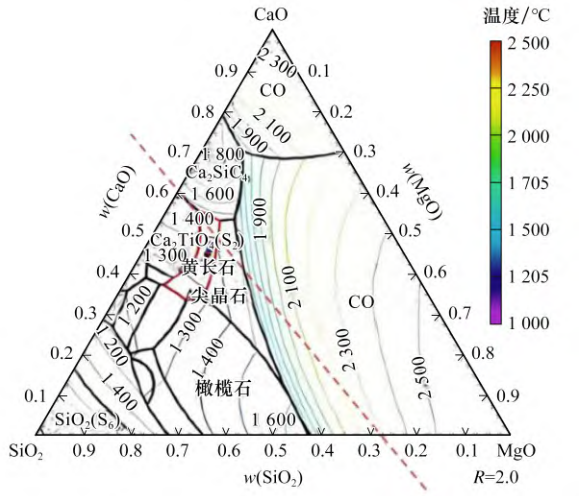


图 15 $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$四元渣系相图[25]

Fig. 15 Quaternary slag system diagram of $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$

50.47 kg/t(2024 年 4 月)。然而，2024 年 2 月后返矿率出现异常波动(由 18.04% 升至 19.46%)，经诊断主要原因为工艺参数失衡。碱度(R)持续低于 1.85(2024 年 2 月 R 为 1.805)，盲目上调 FeO 质量分数以求提高强度，到 2024 年 8 月 FeO 质量分数上调至 9.50%，劣化了烧结矿的矿相组成(铁酸钙占比升高)，叠加终点温度不足(379 ℃)导致烧结矿结构疏松，使转鼓强度降至 77.17%、返矿率飙升到 19.78%。

针对上述问题，于 2023 年 12 月—2025 年 2 月基于前述相关性分析与生产线的实际情况，构建多参数协同控制优化体系，实施以下方法进行精准调控。

(1) 数理模型验证。构建返矿率(Y)与关键参数的多元回归方程关系，如下所示。

$$Y = 21.34 - 0.87R - 0.65w(\mathrm{CaO}) + 0.92w(\mathrm{FeO}) - 0.23T_{\mathrm{BTP}} \quad (R^2 = 0.91, p < 0.001) \tag{1}$$

式中：T_{BTP}为烧结终点温度，℃。

模型显示，FeO 质量分数每超限 0.5%，返矿率增加 0.46%(95% 样本值为 0.38%~0.54%)；终点温度每提升 10 ℃，返矿率降低 0.23%(p = 0.007)。

(2) 工艺窗口验证。蒙特卡罗法(10^4次迭代)模拟结果证实，当 FeO 质量分数为 [8.5,9.0]、R 为 [1.8,2.1]、CaO 质量分数为 [11.2,11.8]、终点温度≥430 ℃时，返矿率 < 16% 的概率达 92.3%(置信度为 95%)。

(3) 多参数调控。① FeO 质量分数精准调控：限制 FeO 质量分数 < 9.0%(目标 8.5%~8.8%)。② 碱度优化：将 R 稳定于 1.9~2.1 区间，促进铁酸钙生成。③ 熔剂协同：CaO 质量分数控制在 11.2%~11.8% 以优化液相量，MgO 质量分数限定为 2.2%~2.4% 强化尖晶石结构。④ 热制度升级：通过提高料层厚度，提升终点温度 > 430 ℃(2025 年 2 月达到 452 ℃)。

中国知网 https://www.cnki.net

表 5　水钢 265 m^2 烧结机固体燃料消耗以及烧结矿产、质量指标

Table 5　Solid fuel consumption of the 265 m^2 sinterstrand of Shuigang and the quality indicators of sinter

日期(YYYY－MM)	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	化学成分(质量分数)/%					R_0	点火温度/℃	终点温度/℃	返矿率/%
		w(FeO)	w(SiO_2)	w(CaO)	w(MgO)	w(Al_2O_3)				
2023－12	52.35	8.76	5.78	10.91	2.38	2.22	1.89	1 026.00	406	18.04
2024－01	51.27	8.95	5.82	10.61	2.35	2.27	1.82	978.00	382	18.79
2024－02	51.33	9.07	6.09	11.00	2.35	2.30	1.81	884.00	378	19.46
2024－03	50.45	8.99	5.79	10.53	2.36	2.31	1.82	929.00	395	19.39
2024－04	50.47	8.99	5.89	10.71	2.38	2.32	1.82	924.00	385	17.62
2024－05	51.44	9.04	5.90	10.75	3.66	2.34	1.82	961.00	378	17.48
2024－06	51.44	9.46	6.05	11.65	2.37	2.33	1.92	935.00	382	17.27
2024－07	51.33	9.18	5.94	11.60	2.34	2.39	1.95	1 125.00	402	19.52
2024－08	50.49	9.50	6.22	11.44	2.31	2.51	1.84	893.00	379	19.78
2024－09	51.36	9.51	6.07	11.53	2.36	2.50	1.90	821.00	386	19.11
2024－10	50.41	9.51	6.07	11.53	2.36	2.50	1.90	916.00	382	18.97
2024－11	50.34	9.45	5.68	11.19	2.32	2.39	1.97	953.00	389	17.86
均值	51.06	9.20	5.94	11.12	2.46	2.37	1.87	945.42	387	18.61
2024－12	50.43	9.04	5.81	11.17	2.28	2.49	1.92	893.00	436	16.95
2025－01	49.42	8.74	5.92	11.73	2.33	2.47	1.98	898.00	425	16.48
2025－02	51.09	8.74	5.80	11.46	2.38	2.48	1.98	902.00	452	15.94
均值	50.31	8.84	5.84	11.45	2.33	2.48	1.96	897.67	437	16.46

265 m^2 烧结机 2023 年 12 月—2025 年 2 月生产调控前、后经济指标对比分析如表 6 所示。由表 6 可见，工艺参数优化后各关键指标呈现显著变化：① 在 w(FeO)-R_0-w(CaO) 协同调控下，固体燃料消耗均值从 51.06 kg/t 降至 50.31 kg/t(降幅 1.47%)，有效改善了燃烧带的热制度(1 250～1 270 ℃)，促进铁酸钙生成，降低 FeO 质量分数，利用系数由 1.364 t/(m^2·h) 提高至 1.426 t/(m^2·h)。② FeO 质量分数降低 0.36%(9.20%→8.84%)，R_0 从 1.87 提升至 1.96(CaO 质量分数均值 11.12%→11.45%)。这一调整抑制了磁铁矿(Fe_3O_4)过量生成，并促进铁酸钙(SFCA)形成，最终转鼓强度均值由 77.32% 提升至 77.70%(提升了 0.38%)，返矿率从 18.61% 降至 16.46%(降低了 11.55%)。③ 粗粒级占比提升：调整后 >10 mm 粒级占比均值从 75.13% 升至 75.82%(提高了 0.9%)，主要得益于燃料比增加与终点温度升高，促进了矿物相均匀结晶。

表 6　水钢 265 m^2 烧结机 2023 年 12 月—2025 年 2 月调控生产前后经济指标对比

Table 6　Comparison of economic indicators before and after production regulation of the 265 m^2 sinterstrand in Shuigang from December 2023 to February 2025

项目	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	返矿率/%	转鼓指数/%	终点温度/℃	R_0	>10 mm 粒级占比/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	FeO 质量分数/%
调控前均值(2023－12—2024－11)	51.06	18.61	77.32	387	1.87	75.13	1.364	9.20
调控后均值(2024－12—2025－02)	50.31	16.46	77.70	437	1.96	75.82	1.426	8.84
变化量	0.75	－2.15	0.38	50	0.09	0.69	0.062	－0.36
变化率/%	1.47	－11.55	0.49	12.92	4.81	0.90	4.500	－3.91

中国知网　https://www.cnki.net

4 结 论

(1) 固体燃料配比与转鼓强度呈显著非线性关系($r=0.61$)，优化区间为 4.05%~4.55%。碱度(1.8~2.1)与 CaO(11.2%~11.8%)协同促进 SFCA 生成(体积分数为 34.2% ±2.8%)，抑制铁橄榄石($2FeO\cdot SiO_2$)等脆性相[$\Delta G(C_2S-SFCA)=-15.6$ kJ/mol]析出。SFCA 的连续网络结构(晶粒接触率>80%)，显著提升了转鼓强度(72.3% ±1.5%)与 $RDI_{>3.15\,mm}$(78.3%)。

(2) 通过调控渣系相组成影响熔滴行为。当 CaO 质量分数>11.5%时，钙铝黄长石($Ca_2Al_2SiO_7$)等高熔点相生成，熔滴温度区间(ΔT_d)扩展 42 ℃($r=0.60$)；当 MgO 质量分数为 2.2%~2.4%时，Mg^{2+}固溶于磁铁矿，晶格稳定性提升，ΔT_d扩展速率稳定于 0.32 ℃/%($r=0.40$)。

(3) 构建返矿率的多元回归方程：$Y=21.34-0.87R-0.65w(CaO)+0.92w(FeO)-0.23T_{BTP}$($R^2=0.91$)。FeO 质量分数每超限 0.5%，返矿率增加 0.46%；终点温度每提升 10 ℃，返矿率降低 0.23%。蒙特卡罗法(10^4次迭代)模拟结果证实，当 FeO 质量分数为[8.5,9.0]、R 为[1.8,2.1]、CaO 质量分数为[11.2,11.8]及终点温度≥430 ℃时，返矿率<16%的概率达 92.3%。

(4) 采用 FeO 质量分数为 8.74%、R 为 1.98、CaO 质量分数为 11.46%、MgO 质量分数为 2.38%的优化参数后，转鼓强度提升至 77.70%(增加了 0.49%)，返矿率降至 16.46%(降低了 11.55%)，利用系数提升至 1.426 t/(m^2·h)，>10 mm 粒级占比达 75.82%，同时固体燃料消耗下降至 50.31 kg/t(降低了 1.47%)。

参考文献:

[1] 王健康. 基于生物质炭替代和气体燃料喷吹的铁矿石低碳烧结工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学,2024.
WANG Jiankang. Research on the low-carbon sintering process of iron ore based on the substitution of biomass char and the injection of gaseous fuel [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2024.

[2] 孙成烽. 返矿镶嵌应用于铁矿石烧结的透气性改善机理与节能潜力[D]. 重庆: 重庆大学,2023.
SUN Chengfeng. Improvement mechanism of permeability and energy-saving potential of return ore mosaic applied in iron ore sintering [D]. Chongqing: Chongqing University,2023.

[3] 王毅璠. 铁矿烧结烟气挥发性有机物产生机制及催化减排研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学,2023.
WANG Yifan. Study on the generation mechanism and catalytic emission reduction of volatile organic compounds in iron ore sintering flue gas [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology,2023.

[4] ZHAO H X,XU X Y,ZHANG J Z,et al. Co-treatment of biological sludge by iron ore sintering process: Effects of flue gas pollutants and production quality indexes [J]. Process Safety and Environmental Protection,2025,196: 106922.

[5] 杨善续. 厚料层烧结工艺中提升混合料温度对燃料消耗的影响分析[J]. 冶金管理,2025(1):52-54;58.
YANG Shanxu. Analysis of the influence of increasing the temperature of the mixed material on fuel consumption in the thick-bed sintering process [J]. China Steel Focus,2025(1):52-54;58.

[6] 钟庭梁,王延江,佘雪峰,等. 燃料燃烧特性及其对烧结烟气 CO 排放的影响[J]. 烧结球团,2024,49(3):97-105;113.
ZHONG Tingliang, WANG Yanjiang, SHE Xuefeng, et al. Fuel combustion property and their influence on CO emissions from sintering exhaust gas [J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(3):97-105;113.

[7] PRASAD A, RANASINGHE J, MALAKKAL L, et al. Spark plasma sintering of fuel meats for U_3O_8 based dispersion fuels [J]. Nuclear Engineering and Design, 2024,426: 113398.

[8] 何二喜,赵改革,季志云,等. 超厚料层烧结过程固体燃料的分布规律[J]. 烧结球团,2024,49(1):42-47.
HE Erxi,ZHAO Gaige,JI Zhiyun,et al. Distribution law of solid fuel in sintering process of ultra-thick bed of material [J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(1):42-47.

[9] HE J Y,ZOU C,ZHAO J X,et al. Comparison of semi-coke with traditional pulverized coal injection and iron ore sintering fuels based on chemical structure and combustion behavior [J]. Journal of Iron and Steel

中国知网 https://www.cnki.net

Research International，2022，29(5)：725－740.

[10] 李保良，贾宪，张超民，等．烧结燃料粒度的优化实验研究[J]．山东冶金，2024，46(1)：63－64；67.
LI Baoliang，JIA Xian，ZHANG Chaomin，et al. Optimization experiment study on particle size of fuels on sintering[J]. Shandong Metallurgy，2024，46(1)：63－64；67.

[11] 冯艳平，侯健，陈灿，等．高铝铁矿比例提高对烧结矿冶金性能的影响[J]．河北冶金，2024(10)：8－13.
FENG Yanping，HOU Jian，CHEN Can，et al. The influence of increasing the proportion of high alumina iron ore on the metallurgical properties of sintered ore[J]. Hebei Metallurgy，2024(10)：8－13.

[12] 杨双平，张紫涵，王苗，等．钒钛矿烧结配碳量对烧结矿质量及矿相结构影响[J]．钢铁研究学报，2024，36(7)：875－884.
YANG Shuangping，ZHANG Zihan，WANG Miao，et al. Influence of sintered carbon content of vanadium titanium ore on sinter quality and mineral phase structure[J]. Journal of Iron and Steel Research，2024，36(7)：875－884.

[13] 刘磊，朱旺，赵俊花，等．不同富氧阶段下烧结矿的矿相结构及软熔滴落性能[J]．烧结球团，2024，49(1)：65－71；79.
LIU Lei，ZHU Wang，ZHAO Junhua，et al. Mineral structure and softening dropping property of sinter under different oxygen-rich stages[J]. Sintering and Pelletizing，2024，49(1)：65－71；79.

[14] CHIWANDIKA E K，JUNG S M. Effects of ilmenite ore on phase development of hematite ore sinter[J]. Metallurgical and Materials Transactions B，2020，51(4)：1469－1484.

[15] YANG C，YANG C J. Deep fusion of time series and visual data through temporal Features：A soft-sensor model for FeO content in sintering process[J]. Expert Systems with Applications，2025，268：126243.

[16] 唐佳润，刘月明，张福明，等．烧结矿 FeO 含量预测技术的探讨[J]．烧结球团，2025，50(1)：21－30；37.
TANG Jiarun，LIU Yueming，ZHANG Fuming，et al. Discussion on prediction technology of FeO content in sinter[J]. Sintering and Pelletizing，2025，50(1)：21－30；37.

[17] 黄鼎堯，黄晓贤，向家发，等．基于 TCN-DenseNet 的烧结矿 FeO 含量预测[J]．河北冶金，2024(10)：14－19；49.
HUANG Dingyao，HUANG Xiaoxian，XIANG Jiafa，et al. Prediction of FeO content in sinter based on TCN-DenseNet[J]. Hebei Metallurgy，2024(10)：14－19；49.

[18] 吉伟，冯二莲．烧结矿转鼓强度和冶金性能研究[J]．河北冶金，2024(5)：14－23；34.
JI Wei，FENG Erlian. Research on drum strength and metallurgical properties of sinter ore[J]. Hebei Metallurgy，2024(5)：14－23；34.

[19] 王茗玉，唐珏，储满生，等．基于烧结状态与集成学习的烧结矿转鼓强度预测[J]．烧结球团，2023，48(6)：75－82.
WANG Mingyu，TANG Jue，CHU Mansheng，et al. Sinter tumbler strength prediction based on sintering state and ensemble learning[J]. Sintering and Pelletizing，2023，48(6)：75－82.

[20] 李建，毛晓明，朱德庆．影响八钢烧结矿还原性能的因素分析[J]．烧结球团，2018，43(2)：20－24.
LI Jian，MAO Xiaoming，ZHU Deqing. Analysis of influencing factors of Bayi Steel sinter reduction performance[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(2)：20－24.

[21] SALZMANN M F，KAHLENBERG V，KRÜGER B，et al. $Ca_{2.68}Fe_{10.32}Si_{1.00}O_{20}$：A strongly disordered SFCA-related phase in the system CaO-Fe_2O_3-SiO_2[J]. Mineralogy and Petrology，2024，118(4)：485－499.

[22] 韩秀丽，杜亮，陈前冲，等．赤铁矿型烧结矿中不同形态铁酸钙形成规律研究[J]．烧结球团，2021，46(5)：1－7.
HAN Xiuli，DU Liang，CHEN Qianchong，et al. Research on formation law of different forms of calcium ferrite in hematite-type sinter[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(5)：1－7.

[23] 白冬冬，韩秀丽，李昌存，等．钒钛烧结矿矿相特征及其对 RDI 的影响机理[J]．烧结球团，2020，45(2)：1－4；9.
BAI Dongdong，HAN Xiuli，LI Changcun，et al. Study on mineralogical characteristics of vanadium-titanium sinter and its effect on RDI[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(2)：1－4；9.

[24] 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.

(下转第 55 页)

中国知网　https://www.cnki.net

回收利用[J]. 矿产保护与利用,2008,28(5):38 – 41.
ZHANG Jianting,CHEN Bi. Occurrence and recycling of main elements in Panxi vanadium-titanium magnetite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2008,28(5):38 – 41.

[9] 江少卿,郝梓国,孙静,等. 河北承德大庙黑山钒钛磁铁矿床岩石地球化学特征[J]. 地质与勘探,2013,49(3):458 – 468.
JIANG Shaoqing, HAO Ziguo, SUN Jing, et al. Geochemistry of the Heishan V-Ti-bearing magnetite deposit in the damiao rocks of Chengde,Hebei Province [J]. Geology and Exploration,2013,49(3):458 – 468.

[10] 李庆禄. 哈密低品位钒钛磁铁矿选矿研究[J]. 中国资源综合利用,2017,35(10):10 – 13.
LI Qinglu. Study on mineralization of low grade vanadium titanium magnetite in Hami [J]. China Resources Comprehensive Utilization,2017,35(10):10 – 13.

[11] 刘庆华. 钒钛磁铁矿生产氧化球团试验研究[J]. 矿业工程,2020,18(3):50 – 53.
LIU Qinghua. Experimental study on oxidized pellet production of vanadium titano-magnetite [J]. Mining Engineering,2020,18(3):50 – 53.

[12] 范建军,王永章,史永林,等. 链箅机—回转窑工艺生产碱性球团矿工业试验[J]. 钢铁研究学报,2021,33(5):394 – 399.
FAN Jianjun, WANG Yongzhang, SHI Yonglin, et al. Industry trials on production of fluxed pellets by grate-rotary process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021,33(5):394 – 399.

[13] ZHANG S,ZONG Y B,HUANG Y,et al. Investigation of basicity on compressive strength and oxidation induration mechanism of vanadium-titanium magnetite pellets [J]. Steel Research International,2024,95(10):2400461.

[14] 黄柱成,易凌云,彭虎,等. 焙烧温度对氧化球团性质及其气基直接还原过程的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(8):2889 – 2895.
HUANG Zhucheng,YI Lingyun,PENG Hu,et al. Effects of roast temperature on properties of oxide pellets and its gas-based direct reduction [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2012,43(8): 2889 – 2895.

[15] 陈许玲,黄云松,范晓慧,等. 钒钛磁铁矿球团氧化焙烧行为和固结特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(2):359 – 366.
CHEN Xuling,HUANG Yunsong,FAN Xiaohui,et al. Oxidation roasting behavior and concretion properties of vanadium-titanium magnetite pellet [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016,47(2):359 – 366.

[16] 蒙飞宇,黄帮福. 钒钛磁铁矿氧化球团固结性能强化研究[J]. 烧结球团,2020,45(5):49 – 53.
MENG Feiyu,HUANG Bangfu. Research on strengthening consolidation performance of oxidized pellets of vanadium titanium magnetite [J]. Sintering and Pelletizing,2020, 45(5):49 – 53.

[17] CHEN W B,DONG Z Q,JIAO Y,et al. Preparation, sintering behavior and consolidation mechanism of vanadium-titanium magnetite pellets [J]. Crystals,2021, 11(2):188.

[18] 杨锐. 钒钛磁铁矿氧化球团制备研究[J]. 四川冶金,2025,47(1):42 – 46.
YANG Rui. Preparation of oxidized pellet from vanadium-titanium magnetite [J]. Sichuan Metallurgy, 2025, 47(1):42 – 46.

[19] 项心如. 钒钛磁铁矿球团氧化固结机理研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2025.
XIANG Xinru. Study on oxidation consolidation mechanism of vanadium titanomagnetite pellets [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2025.

(上接第 37 页)

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.

[25] 郭永春,郑海燕,胡心光,等. $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$ 四元渣系 Al_2O_3 活度预测模型[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(5):652 – 657.
GUO Yongchun,ZHENG Haiyan,HU Xinguang,et al. Prediction model of Al_2O_3 activity in $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ quaternary slag system [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2021,42(5):652 – 657.

中国知网　https://www.cnki.net