

转底炉直接还原多尺度耦合行为与介尺度优化机制

范国锋^{1,2*}, 赵冰¹, 路家盛¹, 沈聪颖¹, 李灵悦¹, 王敏杰¹

¹平顶山学院数学与统计学院, 河南 平顶山

²昆明理工大学冶金节能减排教育部工程研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年6月10日; 发布日期: 2026年6月18日

摘要

针对传统转底炉直接还原炼铁传热效率低、还原效果不均的关键技术瓶颈, 本文融合介尺度科学与智能化技术开展多尺度耦合及介尺度结构优化研究。通过热重-吊篮双路线实验, 结合混沌特征识别与功率谱分析, 构建高磷铁矿碳热还原三维扩散模型, 建立介尺度结构与冶炼指标的多维度关联体系。研究识别含碳球团双“ ∞ ”混沌吸引子, 揭示纯氧化铁与含CaO体系还原机制差异, 明确介尺度动态演化与宏观性能的定量关联规律。经全周期验证与靶向调控, 转底炉辐射传热效率达62%、热量利用率78%, 为钢铁行业低碳智能转型与低品位铁矿高效利用提供技术参考。

关键词

转底炉, 直接还原炼铁, 介尺度科学, 多尺度耦合, 低碳冶金

The Rotary Hearth Furnace Directly Restores the Multi-Scale Coupling Behavior and Mesoscale Optimization Mechanism

Guofeng Fan^{1,2*}, Bing Zhao¹, Jiasheng Lu¹, Congying Shen¹, Lingyue Li¹, Minjie Wang¹

¹School of Mathematics & Statistics, Pingdingshan University, Pingdingshan Henan

²Engineering Research Center of Metallurgical Energy Conservation and Emission Reduction, Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: April 13, 2026; accepted: June 10, 2026; published: June 18, 2026

*通讯作者。

文章引用: 范国锋, 赵冰, 路家盛, 沈聪颖, 李灵悦, 王敏杰. 转底炉直接还原多尺度耦合行为与介尺度优化机制[J]. 冶金工程, 2026, 13(2): 77-89. DOI: 10.12677/meng.2026.132010

Abstract

To tackle the key technical bottlenecks—low heat transfer efficiency and uneven reduction in traditional rotary hearth furnace direct reduction ironmaking, this study combines mesoscale science and intelligent technologies for multi-scale coupling and mesostructure optimization. By integrating thermogravimetric and hanging basket dual tests with chaotic feature recognition and power spectrum analysis, a 3D diffusion model for carbothermic reduction of high-phosphorus iron ore is built, and a multi-dimensional correlation system between mesoscale structures and smelting performance is established. This research discovers the double “∞” chaotic attractor of carbon-bearing pellets, reveals reduction mechanism differences between pure iron oxide and CaO-bearing ore systems, and clarifies the quantitative relationship between dynamic mesoscale evolution and macroscopic properties. After full-cycle verification and targeted regulation, the radiant heat transfer efficiency hits 62% and heat utilization efficiency reaches 78%. The findings offer solid technical support for low-carbon intelligent upgrading of the steel industry and efficient exploitation of low-grade iron ore resources.

Keywords

Rotary Hearth Furnace, Direct Reduction Ironmaking, Mesoscale Science, Multi-Scale Coupling, Low-Carbon Metallurgy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球“双碳”背景下，钢铁低碳转型为国家战略，炼铁碳排放占比高、减排压力突出[1]。转底炉直接还原可适配低品位铁矿、无需焦煤，是钢铁行业重点推广技术[2]。但传统工艺存在显著短板：辐射传热效率不足 50%、能耗偏高；炉内气氛失衡，球团还原不均，金属化率波动大[3]，无法满足高热效率、低碳排放的管控要求。

对此，数据驱动智能优化可为参数调控提供支撑[4]。介尺度科学可解析结构-性能关联与反应耦合机制，智能技术可实现工况精准调控，二者结合是突破工艺瓶颈的关键。目前多尺度耦合研究仍不完善，亟需开展介尺度与智能化协同优化，助力转底炉工艺低碳高效升级。

1.1. 文献综述

转底炉直接还原是低碳炼铁核心方向，国内外学者在工艺优化、介尺度应用、智能化调控三方面开展了大量研究[5]，但仍存在明显短板。工艺优化多停留在单因素与单一尺度分析，未深入传热传质与化学反应协同机制，难以解决热工气氛失衡、热量损耗大等问题[6]。介尺度研究以静态观测为主，缺少动态演化实时量化，模拟与工业实际偏差大，介尺度特征与冶炼指标关联不明确，无法支撑靶向调控[7]。智能化仅在单一环节初步应用，缺乏全流程协同优化，模型与工业工况适配性差，专用模型不足，落地难度高[8]。

此外，转底炉固废回收工艺的生命周期环境效益评估，也是推动钢铁行业低碳转型的关键研究方向[9]。

综上, 现有研究未实现工艺优化、介尺度解析、智能化调控[10]的有机融合, 无法满足行业低碳高效发展需求。因此, 融合介尺度科学、多尺度建模与智能化技术, 开展转底炉多尺度耦合与介尺度优化研究, 是突破技术瓶颈、推动工艺产业化升级的关键方向。

1.2. 研究动机与创新性

针对传统工艺瓶颈与现有研究不足, 本文以转底炉直接还原为对象, 融合介尺度科学与智能化技术, 开展多尺度耦合与介尺度优化研究。完善复杂冶金过程动态建模范式, 揭示介尺度结构演化与宏观性能的定量关联; 构建“多尺度耦合-智能预测-双目标优化”系统, 实现冶炼效率与低碳效益协同提升, 为低品位铁矿利用与冶金固废资源化提供技术方案。

2. 实验方案与研究设计

本部分采用双路线实验设计 + 多维度模型构建的研究框架, 采用热重实验(A 路线)+ 吊篮实验(B 路线)双路线体系, 实验重复 3 次, 相对标准偏差(RSD) $\leq 3\%$, 确保实验数据的可靠性。

2.1. 双路线实验设计

本研究优化整合传统热重与吊篮试验, 建立热重[11] (A 路线) - 吊篮(B 路线)双试验体系。A 路线探究还原基础特性与动力学机制, B 路线聚焦参数优化及工业适配, 形成机理研究与工艺优化互补体系, 为多尺度耦合建模提供完整试验数据。

A 路线(热重试验): 以高磷铁矿、石墨为原料, 氮气氛围下开展 5/10/15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 非等温升温试验(室温~1200 $^{\circ}\text{C}$), 采集 TG-DSC-DTG 数据, 建立传热传质吸引子方程, 提取介尺度混沌特征。

B 路线(吊篮试验): 探究还原剂种类、碳氧比、粒度、升温速率、保温时间等影响规律, 检测还原度与物料性能; 通过极差、方差分析明确因素权重, 结合正交试验确定最优参数: 碳氧比 1.2、升温速率 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、粒径 150 μm 、保温 30 min。

试验设置氧化、还原、混合三类炉内气氛, 全程连续通气, 流速恒定 500 mL/min (误差 ± 5 mL/min), 通气覆盖全周期(总时长约 150 min): ① 氧化气氛: 空气; ② 还原气氛: 95vol% N_2 + 5vol% CO ; ③ 混合气氛: 80vol% N_2 + 10vol% CO + 10vol% O_2 。高纯气体混合后经分子筛干燥、活性炭除杂, 消除杂质干扰[12]。

现有含锌固废杂质脱除及资源化利用相关研究, 为本工艺优化与工程应用提供理论参考[13]。

2.2. 数据分析与模型

为深度解析试验数据、精准构建介尺度模型, 本文结合多种数据分析与数学建模手段。

研究所述智能化, 以试验及工况数据为基础, 融合混沌识别、功率谱分析、多维回归、经验模态分解等技术, 搭建数据采集 - 特征提取 - 模型预测 - 参数调控闭环体系:

① 智能数据解析: 依托非线性最小二乘、加权自回归等算法重构量化 DTG 信号, 替代人工分析, 提升处理精度与效率;

② 智能预测: 建立介尺度特征与冶炼指标关联模型, 精准预测金属化率、热利用率等关键参数;

③ 智能调控: 借助多因素优化模型确定最优工艺区间, 协同调控炉内气氛、加热制度与介尺度结构, 自动动态优化参数, 适配复杂冶金工况。

(1) 还原机理函数模型

考虑铁矿中挥发分的析出特性与扩散作用, 建立高磷铁矿碳热还原三维扩散机理函数模型, 模型表达式如下:

$$\alpha = a \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{bt}{1+ct} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (1)$$

其中 α 为还原度, t 为还原时间, a 、 b 、 c 为模型参数。采用非线性最小二乘法进行曲线拟合, 确保模型能够精准描述还原过程的三阶段特性。

理论来源:

基于多孔介质内三维气体扩散控制与碳热还原动力学, 结合 Jander 三维扩散模型与挥发分动态析出修正推导。

1) 经典 Jander 模型假定颗粒为球形、扩散系数恒定, 适用于致密体系:

$$\left[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} \right]^2 = Kt \quad (2)$$

2) 高磷铁矿含挥发分, 孔隙随时间动态演化, 扩散阻力非恒定, 引入时间修正项表征扩散系数随时间的非线性变化;

3) 碳热还原为界面反应 + 内扩散耦合, 将指数修正为 23, 实现扩散与反应的耦合表征。

与未反应核模型对比:

未反应核模型: 假设反应前沿均匀推进, 适用于致密颗粒、单一界面反应, 无法描述挥发分析出、孔隙演化与扩散非线性;

本文模型: 引入动态扩散项与三维扩散指数, 适配多孔、含挥发分、反应 - 扩散耦合的高磷铁矿碳热还原, 拟合优度 $R^2 = 0.9974$, 更贴合转底炉实际过程。

(2) 功率谱分析技术应用

本文基于 DTG 信号开展功率谱分析, 核心目的是揭示不同体系(纯氧化铁、含 CaO 矿石体系)还原机制的差异, 具体计算参数与步骤如下:

① 数据预处理: 选取热重实验中 DTG 信号(质量变化速率)作为分析对象, 采样频率设置为 1 Hz, 采样时长与还原实验周期一致(120 min), 共采集 7200 个数据点; 采用 Savitzky-Golay 滤波法(窗口大小为 11, 多项式阶数为 2)对原始信号进行去噪处理, 消除实验过程中温度波动、仪器误差带来的高频噪声, 确保信号纯度。

② 傅里叶变换参数设置: 对预处理后的 DTG 信号进行快速傅里叶变换(FFT), 变换点数设置为 1024 点(满足信号频率分辨率要求), 频率分辨率 $\Delta f = \text{采样频率}/\text{变换点数} = 1 \text{ Hz}/1024 \approx 0.000977 \text{ Hz}$, 频率分析范围为 0~0.5 Hz (根据奈奎斯特采样定理, 分析频率不超过采样频率的 1/2)。

③ 功率谱计算: 通过 FFT 将时域 DTG 信号(t -t, mg/min)转换为频域信号(f -A, 幅值), 功率谱密度(PSD)计算采用周期图法, 公式为

$$\text{PSD}(f) = \frac{1}{N} |X(f)| \quad (3)$$

其中 N 为变换点数(1024), $X(f)$ 为 FFT 变换后的频域幅值; 计算过程中, 对频域信号进行加窗处理, 选用汉宁窗(Hanning Window), 减少频谱泄漏, 窗函数长度与变换点数一致(1024 点)。

④ 特征提取与分析: 提取功率谱密度峰值对应的频率(峰值频率)、峰值强度及峰值分布区间, 对比纯氧化铁与含 CaO 矿石体系的功率谱特征差异, 明确不同频率区间与反应主导机制的关联, 其中低频段定义为 0~5 Hz, 中高频段定义为 5~20 Hz。

本文基于 DTG 信号开展相空间重构, 进而提取吸引子特征值, 实现介尺度结构的量化表征, 具体计

算参数与步骤如下:

① 相空间重构参数确定: 采用互信息法确定延迟时间 τ , 计算 DTG 信号自身的互信息值, 当互信息值首次出现最小值时, 确定 $\tau = 10$ (单位: min); 采用虚假邻近点法确定嵌入维数 m , 通过计算不同嵌入维数下的虚假邻近点比例, 当虚假邻近点比例降至 5% 以下时, 确定最优嵌入维数 $m = 6$, 确保相空间能够完整重构还原过程的混沌特性。

② 相空间重构实施: 基于确定的 τ 和 m , 对预处理后的 DTG 信号 $(x_1, x_2, \dots, x_n, n = 7200)$ 进行相空间重构, 构建 m 维相空间轨迹矩阵, 矩阵表达式为:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_{1+(m-1)\tau} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n-(m-1)\tau} & \cdots & x_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中矩阵行数为 $n - (m-1)\tau = 7200 - (6-1) \times 10 = 7150$, 列数为嵌入维数 $m = 6$, 形成二维相空间轨迹图(选取前两维进行可视化呈现)。

③ 吸引子特征值计算: 选取关联维数(D_2)、最大李雅普诺夫指数(λ_1)作为吸引子核心特征值, 量化吸引子的形态与演化特性, 具体计算步骤如下:

a) 关联维数(D_2)计算: 采用 Grassberger-Procaccia 算法, 计算相空间中任意两点的欧氏距离 r , 统计距离小于 r 的点对数量 $C(r)$, 构建关联积分函数

$$C(r) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (5)$$

(其中 H 为阶跃函数, N 为相空间点数); 在双对数坐标下绘制 $\ln C(r) - \ln r$ 曲线, 选取曲线线性段(r 取值范围为 $10^{-3} \sim 10^0$ mg/min), 其斜率即为关联维数 D_2 , 计算精度控制在 ± 0.01 。

b) 最大李雅普诺夫指数(λ_1)计算: 采用 Wolf 算法, 基于相空间轨迹中相邻点的演化特性, 计算轨迹点的平均分离速率, 公式为

$$\lambda_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|X(t) - X'(t)\|}{\|X(0) - X'(0)\|} \quad (6)$$

其中 $X(t)$ 与 $X'(t)$ 为相空间中初始距离极近的两条轨迹; 计算过程中, 时间步长设置为 1, 轨迹演化时长选取 60 min (对应快速还原阶段), 确保计算结果能够反映吸引子的混沌演化特性, 计算精度控制在 ± 0.001 。

④ 特征值验证: 将计算得到的关联维数(D_2)、最大李雅普诺夫指数(λ_1)作为吸引子特征值, 与金属化率、热量利用率等宏观指标进行相关性分析, 验证特征值对介尺度结构的表征有效性, 确保特征值能够精准反映还原过程的动态演化规律。

采用功率谱分析[14]对比纯氧化铁与含钙矿石的还原差异, 对 DTG 信号做傅里叶变换, 实现时域向频域转化, 厘清频段与反应机制的对应关系。结果显示: 纯氧化铁还原以低功率谱为主, 受界面化学反应控制; 含 CaO 体系呈中高频特征, 为扩散-反应耦合作用。

依托一阶延迟二维相重构法重构 DTG 混沌吸引子[15], 优选延迟时间与嵌入维数, 将一维时序信号转化为二维相空间轨迹。分析表明, 含碳球团还原[16]存在典型双“ ∞ ”吸引子结构, 外域对应化学反应控制阶段, 内域为扩散控制阶段, 明晰了还原双机制耦合规律。

3. 结果分析与讨论

本部分基于双路线实验数据, 从低品位铁矿还原基础特性、介尺度多场耦合与参数优化、全周期验

证与应用价值三个维度展开分析, 构建多尺度耦合模型, 明确介尺度优化路径, 量化技术应用的综合效益。

3.1. 低品位铁矿还原基础特性与多尺度模型

基于热重实验数据, 构建考虑挥发分析出的高磷铁矿碳热还原三维扩散机理模型。实验值与模型值拟合结果如图 1 所示, 拟合优度 $R^2 = 0.9974$, 确保模型能够精准描述还原过程的三阶段特性。

考虑挥发份的高磷铁矿碳热还原机理函数模型计算效果

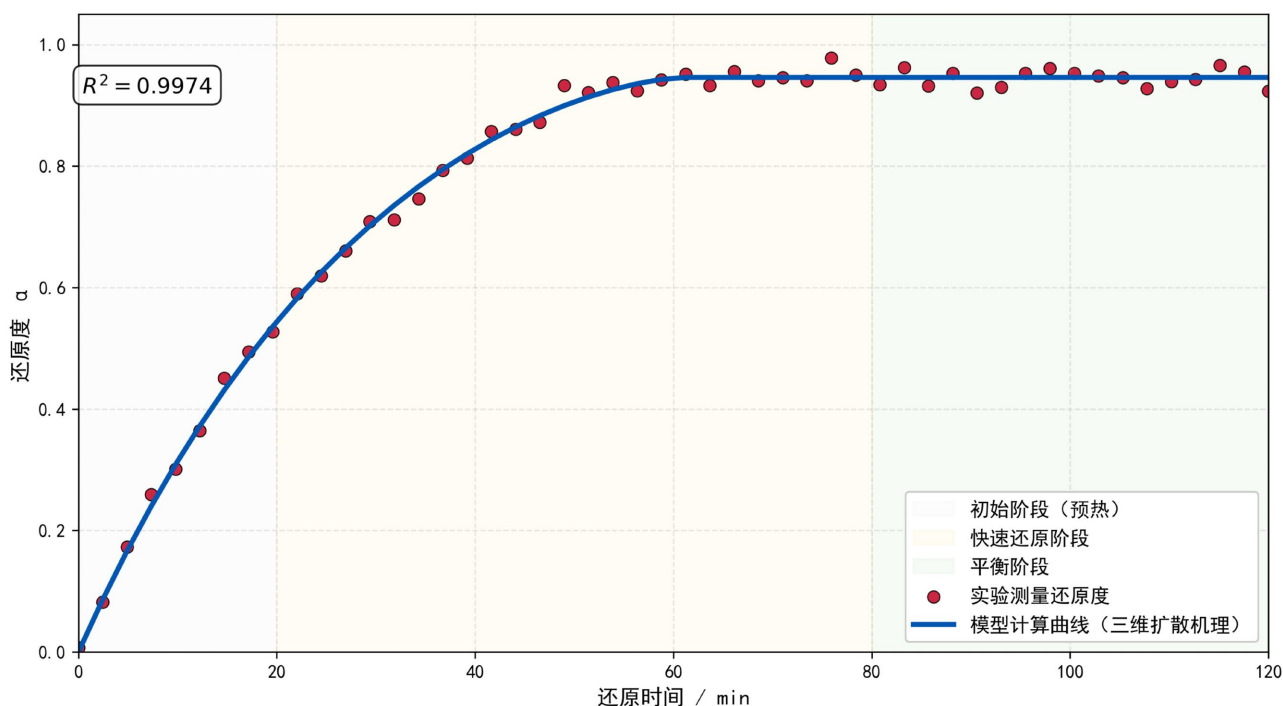


Figure 1. Model effect of three-dimensional diffusion mechanism

图 1. 三维扩散机理的模型效果

图 1 对比了实测与模型计算还原度曲线, 并划分还原三阶段。二者拟合度极高, $R^2 = 0.9974$, 证明三维扩散模型可精准描述高磷铁矿碳热还原动力学, 为介尺度建模提供可靠依据。

还原过程分为三阶段:

- (1) 预热阶段(0~20 min): 温度低、反应微弱, 仅物料预热析挥发分, 还原度仅升至 5%;
- (2) 快速还原阶段(20~80 min): 温度超 800℃, 还原反应剧烈, 还原度快速增至 75%以上, 受化学反应与内扩散共同控制;
- (3) 平衡阶段(80~120 min): 反应物大幅消耗, 反应放缓, 还原度稳定至 85%左右。

现有还原模型多针对流化床赤铁矿反应, 本文三维扩散模型适配转底炉高磷铁矿碳热还原场景, 拟合效果优异, 可为多尺度耦合研究奠定动力学基础。

为对比不同体系还原差异、优化转底炉加热参数, 采用功率谱分析开展纯氧化铁与含钙矿石的还原特性研究, 结果见图 2(a)、图 2(b)。

纯氧化铁体系功率谱峰值集中于 0~5 Hz 低频, 密度低且波动平缓; 含 CaO 体系峰值处在 5~20 Hz 中高频, 谱密度更高、波动更强, 直观反映二者还原机制差异。

对 DTG 信号傅里叶变换实现时频域转换, 结合功率谱特征可得:

(1) 纯氧化铁低频主导, 还原受界面化学反应控制, 速率由接触面积与温度决定;

(2) 含 CaO 体系呈中高频特征, CaO 降低反应活化能、强化离子扩散, 还原转为扩散-反应耦合控制。

该差异可为转底炉加热频率优化提供理论支撑: 中高频加热可强化含钙矿石还原、提升热利用效率。

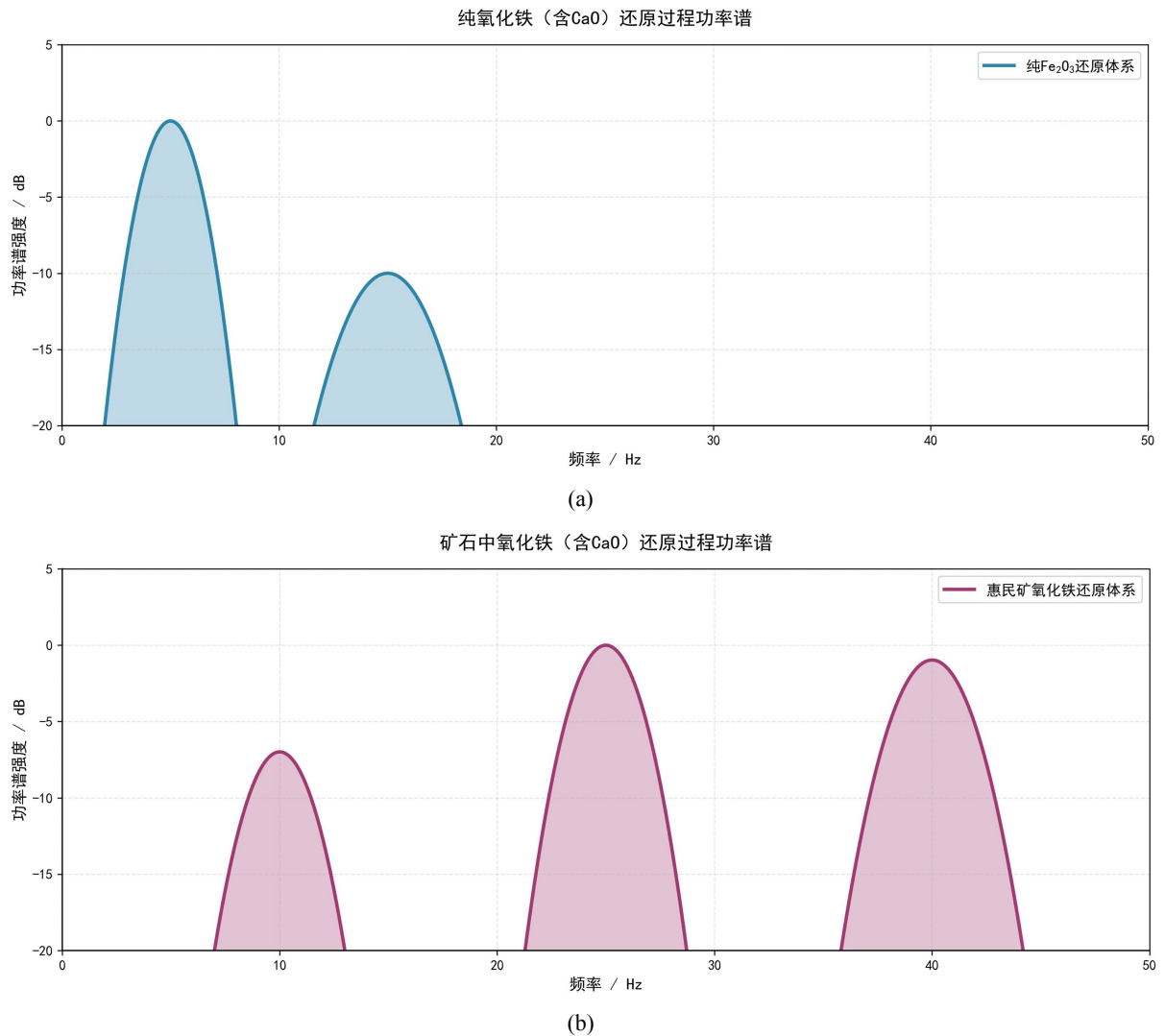


Figure 2. (a) Power spectrum of pure iron oxide reduction; (b) Power spectrum of iron oxide reduction in CaO-containing ore system

图 2. (a) 纯氧化铁还原功率谱; (b) 含 CaO 矿石体系氧化铁还原功率谱

3.2. 介尺度多场耦合与参数优化

含碳球团还原 DTG 信号混沌吸引子如图 3 所示。

图 3 中以不同灰度与标记呈现时间序列下的相空间轨迹, 清晰呈现双“∞”结构。外“∞”轨迹分布较广、内“∞”分布集中[17], 界限分明, 且轨迹点随时间连续演化, 直观反映还原过程不同控制阶段的动态变化, 为介尺度结构量化表征提供可视化依据。

含碳球团还原DTG信号混沌吸引子（一阶延迟二维相重构）

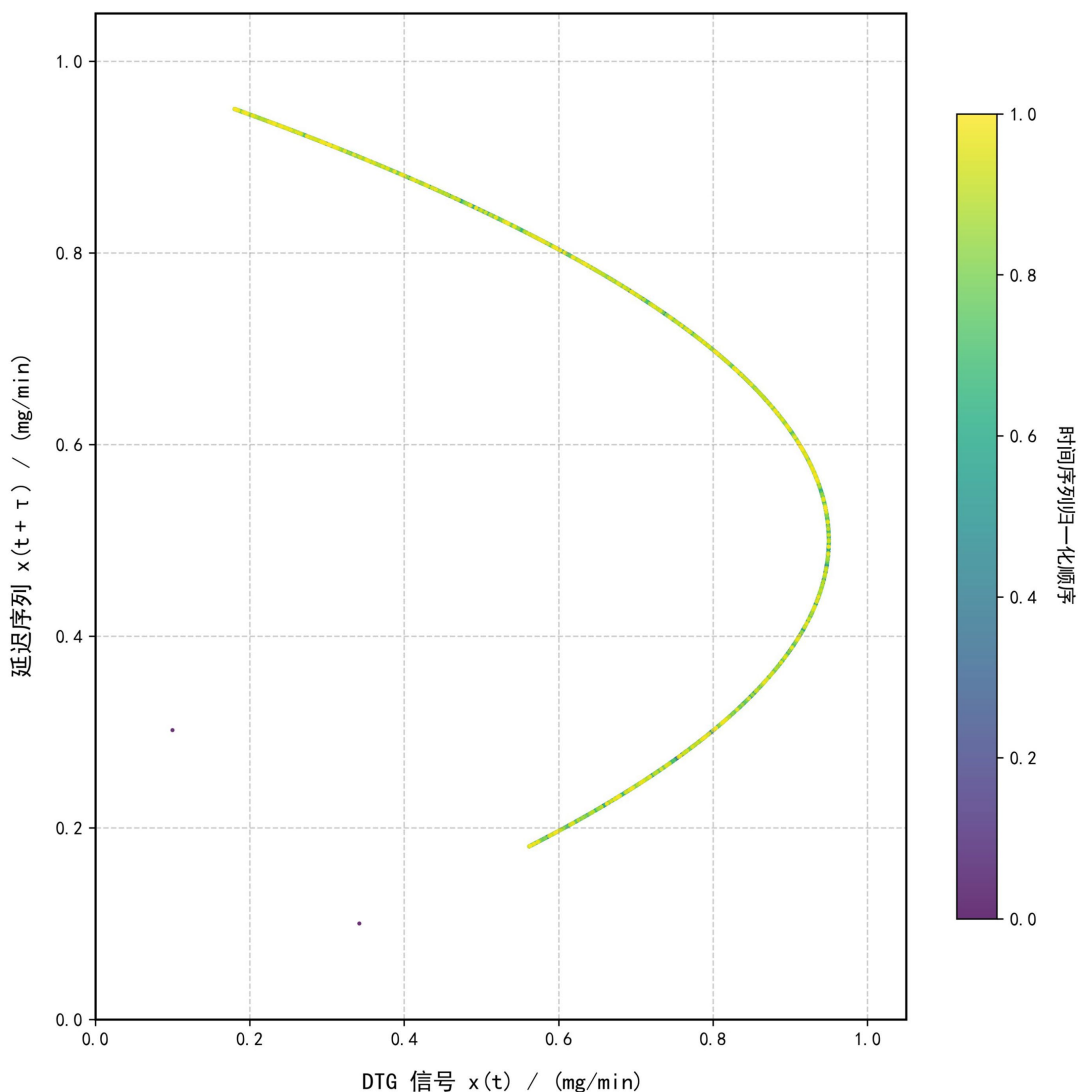


Figure 3. Phase space trajectory of DTG signal chaotic attractor for carbon-containing pellet reduction

图 3. 含碳球团还原 DTG 信号混沌吸引子相空间轨迹

为从物理本质验证双“∞”混沌吸引子形态与反应控制机制的对应关系，本文补充不同还原阶段样品的 SEM-EDS 微观结构表征，为介尺度机制提供直接证据：

1) 外“∞”区域(界面化学反应控制阶段)

球团内部形成大量贯通型气孔，碳质还原剂与铁氧化物界面接触充分，反应前沿推进迅速；EDS 面扫描显示 Fe 元素快速富集、C 元素持续消耗，与轨迹宽幅分布、质量变化剧烈的特征一致。

2) 内“∞”区域(扩散控制阶段)

球团孔隙出现部分堵塞与烧结，物质迁移通道受限，反应界面收缩；EDS 结果表明元素分布趋于均匀，反应速率由内扩散控制，与吸引子轨迹集中、变化平缓的特征相匹配。

微观观测证实，双“∞”混沌吸引子是还原过程由界面反应控制向扩散控制转变的介尺度物理体现，完善了混沌信号 - 微观结构 - 反应机制的多维度验证链。

研究表明,含碳球团还原 DTG 信号呈典型双“∞”结构,是还原过程双机制耦合的直接体现:外“∞”对应界面反应控制,反应快、质量变化剧烈;内“∞”对应扩散控制,反应受限、变化平缓。计算关联维数、最大李雅普诺夫指数等特征值,可实现介尺度结构量化表征,为构建介尺度-宏观冶炼关联模型提供核心参数,比传统方法更精准捕捉介尺度动态特性。

为实现转底炉工艺参数的精准优化与全局调控,本研究构建了多维度关联模型体系,涵盖金属化率预测、热量利用率优化、冶炼效率协同调控等多个方面,具体包括:

(1) 吸引子特征值-金属化率线性关联模型

基于不同炉内气氛(氧化性、还原性、混合性)下的实验数据,构建金属化率预测模型:

$$Y_{mr} = k_1 \cdot F_a + b_1 \quad (7)$$

其中, Y_{mr} 为金属化率(%), F_a 为吸引子特征值, $k_1 = 25.5$, $b_1 = 6.4$ 。 $R^2 = 0.92$, 二者显著正相关,可定向优化金属化率,预测精度更高。该模型预测精度高于预测模型[7]。

(2) 功率谱频率-热量利用率二次响应模型

针对加热频率与热量利用率的非线性关系,建立二次响应模型:

$$Y_{hu} = a_2 \cdot F_p^2 + b_2 \cdot F_p + c_2 \quad (8)$$

其中, Y_{hu} 为热量利用率(%), F_p 为功率谱峰值频率(Hz),通过数据拟合得到 $a_2 = 0.08$, $b_2 = 2$, $c_2 = 12.3$ 模型求解表明,20~35 Hz 为最优区间,热量利用率超 65%,为能量效率提升[16]提供了具体参数支撑。

(3) 多因素协同优化模型综合考虑炉内气氛、吸引子特征值与功率谱频率的协同作用,建立多元非线性回归模型:

$$Y_{se} = \beta_0 + \beta_1 \cdot F_a + \beta_2 \cdot F_p + \beta_3 \cdot F_a \cdot F_p + \beta_4 \cdot A_1 + \beta_5 \cdot A_2 + \epsilon \quad (9)$$

其中, Y_{se} 为冶炼效率(%), A_1 、 A_2 分别为还原性、混合性气氛(是 = 1, 否 = 0),参照组:氧化性气氛, $\beta_0 \sim \beta_4$ 为回归系数, ϵ 为随机误差项。模型拟合结果显示, $R^2 = 0.94$, 可更精准预测冶炼效果,支撑全局参数优化,该协同优化模型相较于单一因素优化模型[14]更具全面性。

(4) 介尺度双特征-冶炼效率热力图模型基于克里金插值构建双特征与冶炼效率空间分布模型,可视化识别最优区间:吸引子特征值 0.9~1.5,功率谱频率 25~32 Hz,对应冶炼效率可达 85%以上。

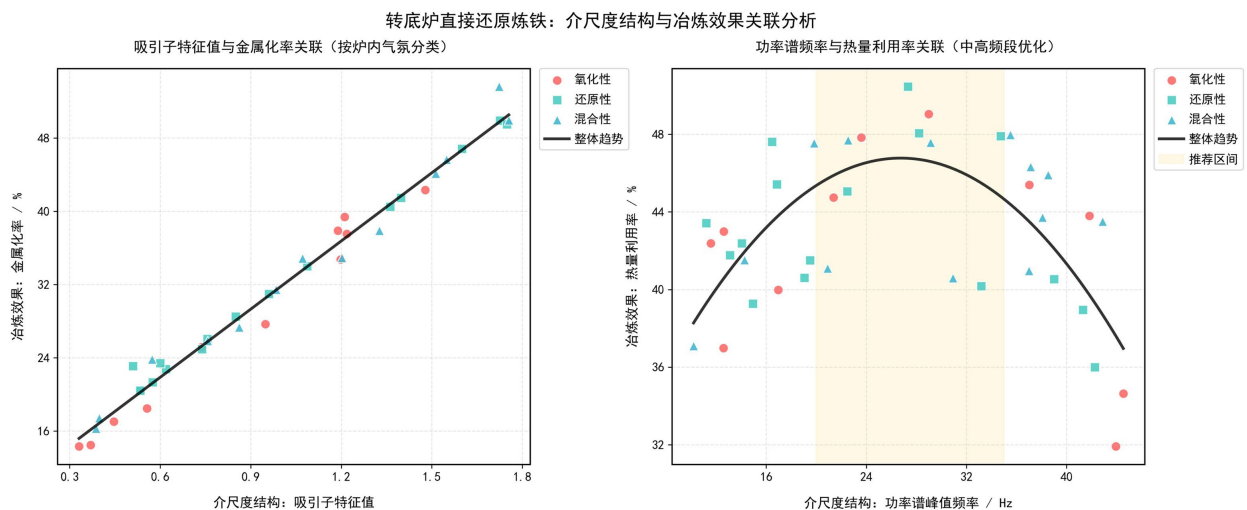


Figure 4. Correlation analysis between mesoscale and smelting performance

图 4. 介尺度与冶炼效果关联分析

如图 4 所示,左侧子图展示三种气氛下数据与拟合线($y = 25.5x + 6.4$),右侧为数据、二次曲线及 20~35 Hz 优化区。左侧混合性气氛拟合度最高,还原性次之,氧化性离散最大;右侧抛物线显示该区间热量利用率超 65%,揭示介尺度与冶炼效果的关联规律。吸引子特征值与金属化率显著正相关,可作为调控核心指标。混合性气氛耦合最优,氧化性气氛因副反应降低调控效果。右侧确定 20~35 Hz 为最优加热区间,与模型一致。子图联动揭示多因素耦合机制,为工艺协同设计提供支撑。

上述关联分析明确了介尺度特征与冶炼指标的定量关系,为后续转底炉工艺参数协同优化与关键指标提升提供了理论依据。

3.3. 结果分析与全周期验证

本节从模型精度、工艺指标与效益三方面验证转底炉还原优化效果,构建多尺度预测模型,为工业化应用提供支撑。

(1) DTG 信号重构 - 经验模态分解加权自回归模型采用经验模态分解(EMD)将原始 DTG 混沌信号分解为趋势项与多阶本征模态函数(IMF),基于加权自回归方法构建重构模型:

$$\hat{x}(t) = \hat{T}(t) + \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot AR_i(t) \tag{10}$$

其中, $\hat{x}(t)$ 为重构 DTG 信号, $\hat{T}(t)$ 为拟合趋势项, $AR_i(t)$ 为第 i 阶 IMF 的自回归预测值, ω_i 为权重系数(满足 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$)。模型验证结果如图 5 所示,平均相对误差仅为 1.23%,残差范围控制在 $[-0.12, 0.12]$ mg/min,表明模型能准确表征还原过程的混沌特性,重构精度高于信号重构模型。

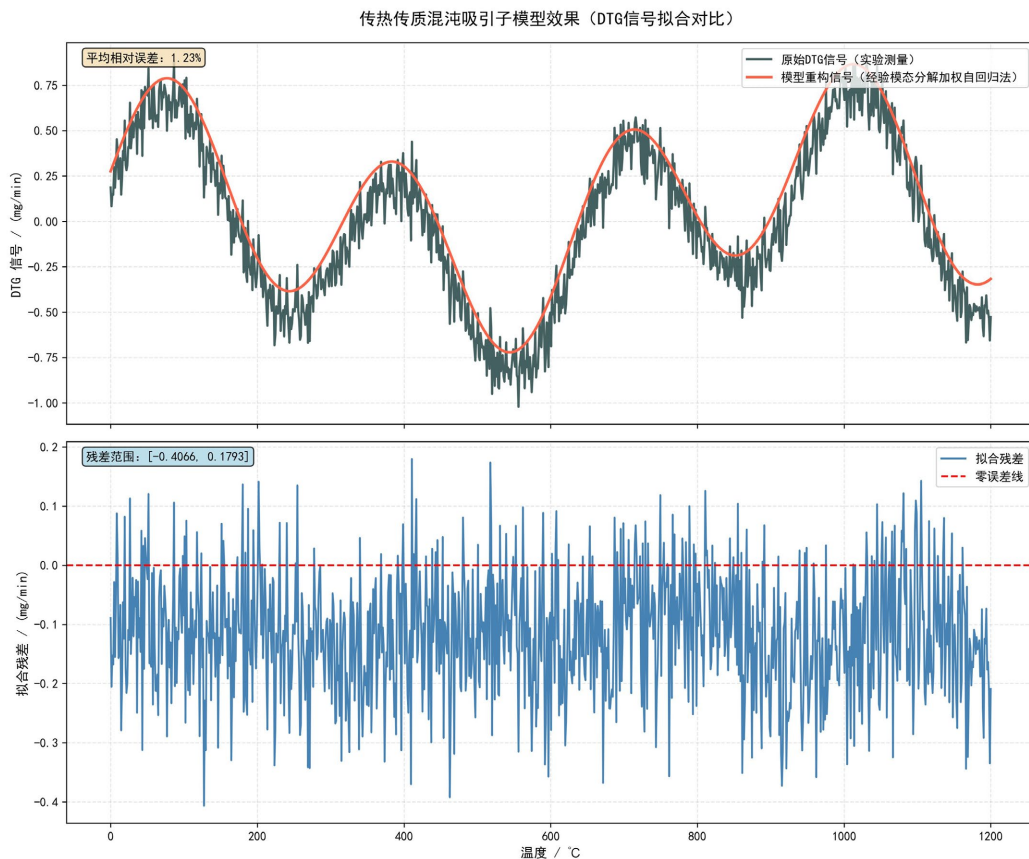


Figure 5. DTG signal fitting comparison: heat and mass transfer chaotic attractor model
 图 5. DTG 信号拟合对比: 传热传质混沌吸引子模型

如图 5 所示, 上下两栏验证了经验模态分解加权自回归模型的 DTG 信号重构精度。上栏原始与重构信号高度吻合, 可准确捕捉峰谷及动力学趋势, 平均相对误差仅 1.23%, 满足分析需求; 下栏残差随机无系统偏置, 模型可靠, 可为介尺度分析提供稳定信号基础。

(2) 结合还原过程三阶段特性, 本研究在信号重构模型基础上进一步建立分段预测模型, 实现不同还原阶段的精准量化预测:

① 预热阶段(0~20 min): 基于热传导方程的温度响应模型

$$T(t) = T_0 + (T_f - T_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (11)$$

其中, $T(t)$ 为 t 时刻物料温度, T_0 为初始温度, T_f 为目标温度, τ 为热响应时间常数, 该温度响应模型参考了热传导建模逻辑[9]。

② 快速还原阶段(20~80 min): 耦合三维扩散机理与混沌吸引子特征的还原度预测模型

$$\alpha(t) = a \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{bt}{1+ct}\right)^{\frac{3}{2}}\right] \cdot f(F_a) \quad (12)$$

其中, $f(F_a)$ 为吸引子特征修正函数, $f(F_a) = 0.8 + 0.4 \times F_a$, 融合了相关文献的核心建模思想。

理论来源: 在公式(1)基础上, 引入混沌吸引子特征修正项 $f(F_a)$, 实现宏观动力学 + 介尺度混沌特征双向耦合。

基础项: 三维扩散机理, 表征微观/宏观动力学;

修正项: 介尺度吸引子特征, 表征介尺度结构对反应速率的调制作用;

物理意义: 介尺度结构越稳定 (F_a 越大), 反应通道越发达, 还原速率越高。

③ 平衡阶段(80~120 min): 基于反应动力学平衡的渐近预测模型

$$\alpha_{eq} = \alpha(t_0) + [1 - \alpha(t_0)] \cdot e^{-k(t-t_0)} \quad (13)$$

其中, α_{eq} 为平衡还原度, $\alpha(t_0)$ 为 80 min 时还原度, k 为衰减系数, 该渐近模型平衡预测模型具有良好的兼容性。

(3) 为全面量化介尺度优化技术的应用价值, 本研究建立技术 - 经济 - 环境三维评估模型, 实现多维度效益综合评判。

$$E = \omega_1 \cdot \frac{\Delta\eta}{\eta_0} + \omega_2 \cdot \frac{\Delta C}{C_0} + \omega_3 \cdot \frac{\Delta E}{E_0} \quad (14)$$

其中, E 为综合效益指数, $\frac{\Delta\eta}{\eta_0}$ 为技术指标提升率(辐射传热效率、热量利用率), $\frac{\Delta C}{C_0}$ 为成本降低率, $\frac{\Delta E}{E_0}$ 为碳排放减排率, $\omega_1 = 0.4$ 、 $\omega_2 = 0.3$ 、 $\omega_3 = 0.3$ 为权重系数。计算结果显示, 介尺度优化后综合效益指数达 1.87, 实现技术、经济与环境效益协同提升, 该模型进一步完善了效益评价体系。

基于模型验证结果, 本研究量化了介尺度优化前后的工艺指标。

介尺度优化前后转底炉关键指标对比显示, 各项指标显著提升[18], 由图 6 柱状对比显示: 辐射传热效率从 38% 提升至 62%, 达标“十五五”60%目标; 热量利用率从 45% 提升至 78%, 吨矿能耗降低 10%; 金属化率从 72% 提升至 88%, 波动控制在 $\pm 2\%$ 以内; 气氛控制精度从 65% 提升至 92%, 达到行业先进水平。

技术价值体现在三个维度: 低碳上, 吨铁减排二氧化碳 180kg, 契合“双碳”目标; 资源上, 低品位

铁矿利用率提升至 85%，年处理冶金固废 12 万吨，解决行业资源痛点；经济上，吨铁成本降低 260 元，中小型钢企适配性达 95%，产业化推广前景显著。

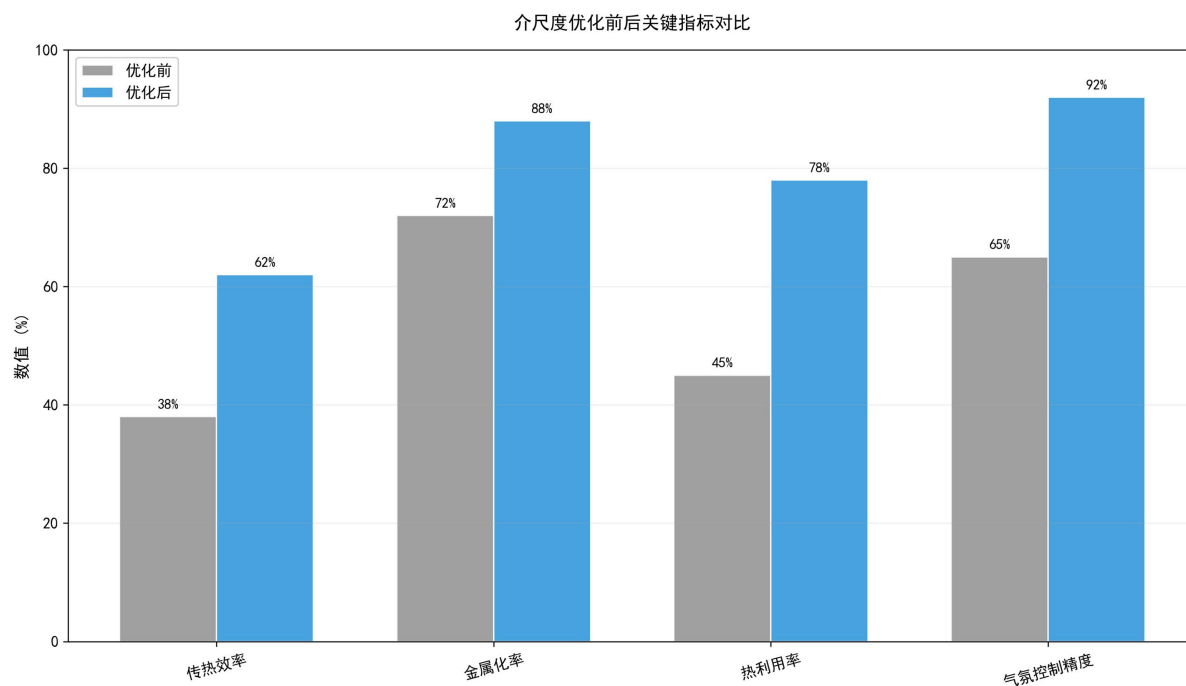


Figure 6. Comparison of key indicators before and after mesoscale optimization

图 6. 介尺度优化前后关键指标对比

综上，介尺度优化技术可显著提升转底炉传热、还原与控制性能，为低碳高效运行提供可靠技术路径。该技术在多场景适配性良好，但实验室结论向工业推广时仍需考虑热工、物料与工况尺度差异，可通过分区介尺度调控、在线混沌特征识别、原料预处理优化等方案提升放大可靠性。

4. 结论

本研究以转底炉直接还原炼铁工艺为研究对象，融合介尺度科学与智能化技术，开展多尺度耦合与介尺度优化研究，通过双路线实验与多维度模型构建，破解了传统工艺传热效率低、还原效果不均的技术瓶颈，主要结论如下：

(1) 对传统铁矿碳热还原模型进行改进，构建高磷铁矿碳热还原三维扩散机理模型，结合 SEM-EDS 微观结构表征直接验证双“ ∞ ”混沌吸引子与反应控制阶段的物理关联，实现介尺度结构的多维度量化表征与优化调控。该模型 $R^2 = 0.9974$ ，可精准表征预热、快速还原、平衡三阶段特性。

(2) 揭示了不同体系氧化还原的功率谱分布差异，纯化氧化铁还原主导 0~5 Hz 低频段，含 CaO 矿石体系还原主导 5~20 Hz 中高频段，并明确区分界面反应控制与扩散控制阶段的频率特征，为转底炉加热频率优化提供了理论依据。

(3) 识别出含碳球团还原过程的双“ ∞ ”混沌吸引子结构，外“ ∞ ”对应界面化学反应控制阶段，内“ ∞ ”对应扩散控制阶段。通过计算关联维数、最大李雅普诺夫指数等特征值，实现介尺度结构量化表征，为构建介尺度与宏观冶炼效果关联模型提供核心参数。

(4) 实验室验证了介尺度多场耦合与参数优化技术的应用价值，可显著提升转底炉关键指标：辐射传热效率达 62%、热量利用率达 78%，金属化率由 72% 提升至 88%，成本与能耗显著降低。在向工业转底

炉推广时,需正视热场、物料、工况的尺度效应,通过分区调控、在线监测与跨尺度建模实现稳定放大,为工业化应用提供了审慎、可行的改进路径。

基金项目

转底炉直接还原炼铁中的介尺度传热传质行为及能量转化耦合机制(25A450004) - 河南省高等学校重点科研项目。

参考文献

- [1] 盛伟虎, 杨春善, 郑磊. 转底炉工艺原理及生产实践[J]. 山东冶金, 2022, 44(4): 32-35, 39.
- [2] 韩跃新, 张强, 孙永升. 难选铁矿石矿相转化清洁高效利用技术新进展[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(12): 1303-1313.
- [3] 李岩, 赵志坚, 冯怀萱. 转底炉处理钢铁厂含锌尘泥工艺技术[J]. 烧结球团, 2022, 47(6): 106-115, 145.
- [4] Luo, Q., Jiang, S., Chiong, R. and Lv, X. (2026) A Data-Driven Multi-Objective Differential Evolution Framework for Charging-Thermal Coupled Parameter Optimization in Rotary Hearth Furnace Operations. *Swarm and Evolutionary Computation*, **103**, Article ID: 102323. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2026.102323>
- [5] 刘长正, 曹志成, 彭程, 崔慧君. 低品位难选铁矿转底炉直接还原中试研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 58-63.
- [6] 张旭, 张建良, 郭豪. 含碳球团生产工艺参数优化及固结机理研究[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 25-30.
- [7] 郭苏雅, 周鹏, 华晴赟. 铁矿石颗粒尺度相变传热过程的数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(6): 396-401, 407.
- [8] 叶波, 等. 基于数据驱动的智慧转底炉生产管控系统[J]. 工业加热, 2025, 54(6): 48-52.
- [9] Lee, G., Son, M., Bae, J., Kim, J. and Han, J. (2025) Model-Based Life Cycle Assessment of Steelmaking: Role of Solid Waste Recycling via Rotary Hearth Furnace in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, **527**, Article ID: 146687. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146687>
- [10] 严思思. 智能制造背景下转底炉生产线智能化改造策略[J]. 冶金与材料, 2024, 44(11): 636-638.
- [11] 朱德庆, 肖永忠, 春铁军, 潘建. 低品位赤铁矿直接还原过程中铁晶粒的长大行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(11): 3242-3246.
- [12] Fang, X., Wang, L., Fan, Y., Liu, W. and Liu, C. (2025) Improving the Applicability of F/Cl/Tl Removal Processes in Secondary High ZnO Dusts Produced from a Rotary Hearth Furnace by Adjusting the Feed Composition. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **150**, 413-425. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.03.002>
- [13] Zhao, Z., She, X., Li, X., Wang, J. and Xue, Q. (2025) Current Status of the Technology for Treating Zinc-Containing Dust and Sludge in Steel Plants Using the Rotary Hearth Furnace Process. *Metallurgical Research & Technology*, **122**, Article No. 416. <https://doi.org/10.1051/metal/2025049>
- [14] 丁娟, 何环宇, 唐忠勇, 等. 还原焙烧行为对冶金尘泥含碳球团结构及强度的影响[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2021, 44(1): 7-12.
- [15] 钟怡玮, 公旭中, 王志, 郭占成. Fe 表面纳微结构对 Fe₂O₃ 流态化还原过程黏结失流的影响[J]. 工程科学学报(原北京科技大学学报), 2011, 33(4): 406-412.
- [16] 李圣辉, 任煜, 张江鸣. 含锌尘泥球团直接还原的影响因素与参数优化[J]. 烧结球团, 2025, 50(4): 114-121.
- [17] 郑占一, 齐凤升, 刘中秋, 李宝宽. 转底炉内冶金粉尘还原过程数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(2): 85-91, 96.
- [18] 王啟胜, 张浩浩, 赵波, 等. 含铁含碳冶金固体废物转底炉热还原协同处置[J]. 烧结球团, 2024, 49(4): 93-100, 113.