



基于 RSM 和 NSGA-III 算法的铁酸钙特征与 烧结原料成分定量关系

房世隆¹, 韩秀丽¹, 刘磊¹, 段博文¹, 包国营², 王伟伟¹

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210;

2. 中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院, 河北涿州 072750)

摘要: 烧结矿中的铁酸钙作为一种黏结相, 其形态特征直接决定了烧结矿质量的好坏。为提高烧结矿综合质量, 本文提出了一种烧结矿原料化学成分与不同形态铁酸钙矿物定量方法。首先, 使用响应面的实验设计方法设计试验方案, 以化学纯试剂为原料制备烧结矿样品; 再通过偏光显微镜对烧结矿中的铁酸钙形态进行分类, 使用面测法对不同形态的铁酸钙含量进行统计; 拟合此烧结原料化学成分与铁酸钙特征的响应面回归模型, 并使用 NSGA-III 算法对响应面回归模型进行了多目标寻优。结果表明: 响应面回归模型的决定系数 R^2 均大于 0.9, P 值均小于 0.01, 表明模型拟合程度较高, 能够通过显著性检验, 具有统计学意义; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与 R_2 的交互作用对铁酸钙含量影响显著, $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 以及 $w(\text{MgO})$ 与 R_2 之间的交互作用对柱状铁酸钙以及他形铁酸钙含量影响显著; 多目标寻优确定了烧结矿中铁酸钙形态最为理想时的原料配比为 $w(\text{MgO}) = 1.8$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.7$, $R_2 = 2.3$, 在此配比条件下的烧结样品中各形态铁酸钙预测值与实际值接近, 验证了模型的可靠性。

关键词: 烧结矿; 铁酸钙形态; RSM; RSM 交互作用; NSGA III

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0010-11

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.020

Research on quantitative relationship between calcium ferrite characteristics and sinterfeed composition based on RSM and NSGA-III algorithm

FANG Shilong¹, HAN Xiuli¹, LIU Lei¹, DUAN Bowen¹, BAO Guoying², WANG Weiwei¹

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;

2. GPI CNACG, Zhuozhou 072750, Hebei, China)

Abstract: As a kind of binder phase, the morphological characteristics of calcium ferrite in sinter directly determine the quality of sinter. In order to improve the comprehensive quality of sinter, a quantitative method for the chemical composition of sinter feed and the content of calcium ferrite in different forms is proposed. In this method, RSM is used to design the test scheme at first, and the sinter samples are prepared with chemically pure reagents as raw materials. Then, the calcium ferrite form in the sinter is classified by polarizing microscopy, and the calcium ferrite content of different forms is counted by surface measurement. Finally, a response surface regression model of the chemical composition of sinter feed and calcium ferrite characteristics is established, and the NSGA-III algorithm is used to optimize the response surface model

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-07-18

基金项目: 河北省科技计划资助项目(23564101D); 河北省自然科学基金资助项目(E2021209147); 中央引导地方科技发展资金项目(246Z4102G); 华北理工大学重点科研项目(ZD-ST-202308)

作者简介: 房世隆(2000—), 男, 硕士研究生, 从事工艺矿物学研究。

通信作者: 韩秀丽(1966—), 女, 教授, 从事工艺矿物学研究。

with multiple objectives. The results show that the R^2 coefficient of determination of the response surface model is greater than 0.9, and the P value is less than 0.01, indicating that the model has a high degree of fitting and can pass the significance test, which is statistically significant. The interaction between $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ and R_2 had a significant effect on the calcium ferrite content. The interactions between $w(\text{MgO})$ and $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ and $w(\text{MgO})$ and R_2 had significant effects on the contents of calcium columnar ferrite and other calcium ferrite. At the same time, NSGA-III is used to optimize the response surface model with multiple objectives, and it is determined that the raw material ratio of the most ideal form of calcium ferrite in the sinter is $w(\text{MgO}) = 1.8$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.7$, and $R_2 = 2.3$. The predicted values of calcium ferrite in the sintered samples under this ratio are close to the actual values, which verify the reliability of the model.

Key words: sinter; (SFCAM) morphology of calcium ferrite; RSM; interaction of RSM NSGA III

复合铁酸钙(SFCA)作为高碱度烧结矿中主要的黏结相,其形态以及含量直接决定了烧结矿质量^[1-3]。烧结原料的化学成分是烧结矿中SFCA矿物含量及其矿物形态的决定性因素,因此,优化烧结原料以得到理想的SFCA含量及SFCA矿物形态成为提高烧结矿质量的重要途径^[4-6]。ZHU等^[7]研究了碱度对褐铁质红土矿烧结过程中SFCA的影响规律,发现当碱度过低时,SFCA生成量较低,而过高的碱度增加了硅酸钙和玻璃相的生成,且SFCA的形态从针状向网状结构劣化发展。辛瑞峰^[8]系统分析了 Fe_2O_3 -CaO-SiO₂-Al₂O₃体系中SFCA的结晶规律,结果表明随着 Fe_2O_3 与CaO的摩尔比以及SiO₂的提高,均会使SFCA向柱状形态发展。司天航等^[9]研究了烧结原料中MgO的含量对矿相结构的影响规律,发现随着MgO的提升,矿相结构逐渐均匀,矿相中的SFCA由针状向板柱状形态发展。XUE等^[10]、韩秀丽等^[11]发现烧结原料中适量Al₂O₃有助于形成针状SFCA,从而具有良好的强度和还原性,减少低温还原粉化现象,过量的Al₂O₃会使SFCA结晶形态向板片状发展。上述研究仅通过单一化学成分对烧结矿中SFCA含量和形态的影响规律确定合适的烧结配料比例。为实现更精准的烧结配矿,前人提出了基于线性规划、多目标优化算法、神经网络等众多配矿算法^[12-14]。目前大多数配矿算法仅考虑烧结矿原料与某一性能指标之间的联系,未能将烧结原料与烧结矿中最根本的SFCA含量及其矿物形态联系,且未考虑烧结过程中原料之间的交互作用对烧结过程的影响。韩秀丽团队综合考虑了 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、二元碱度 $[R_2 = w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)]$ 三者的交互作用,使用响应面法(response surface

methodology, RSM)计算出了低温还原粉化指数(RDI指数)、气孔率以及SFCA含量指标最高时的配比^[15-16]。本文进一步使用RSM建立烧结原料的化学成分与SFCA总体含量以及不同形态SFCA含量的定量模型,并采用第三代遗传算法(NSGA-III算法)对得到的响应面回归模型进行多目标寻优,以得到铁酸钙形态最为理想时的原料配比,为烧结配矿提供理论依据。

1 试验原理与方法

1.1 RSM原理

RSM是一种结合了数学和统计学的试验设计方法,其包括响应面法实验设计和拟合响应面回归模型两个步骤,能够在相对较少次数的试验后通过拟合自变量和响应值之间的函数关系进行规律分析和数值优化。Box-Behnken设计(Box-Behnken design, BBD)是响应面试验设计的常用方法之一^[17-18]。BBD设计中所有试验点处于试验空间边缘中点,试验点用于分析因子对响应值的影响关系,中心点用于计算试验精度,如图1所示。

1.2 烧结样品微观分析方法

使用偏光显微镜进行物相分析是对矿物进行微观研究的重要手段之一^[19-20]。本次试验使用研究型偏光显微镜(Scope-A1)对试验制备得到的烧结矿样品进行系统的镜下矿物鉴定、矿相结构分析、矿物含量统计。根据烧结矿矿相结构中SFCA的形态特点,对SFCA进行分类。

烧结矿中SFCA作为一种黏结相,形态变化较大,且多数情况下不规则,对此,本文采用镜下面积法测量SFCA总体含量以及各种形态SFCA的含量。面积测量法是显微镜下统计矿物含量的

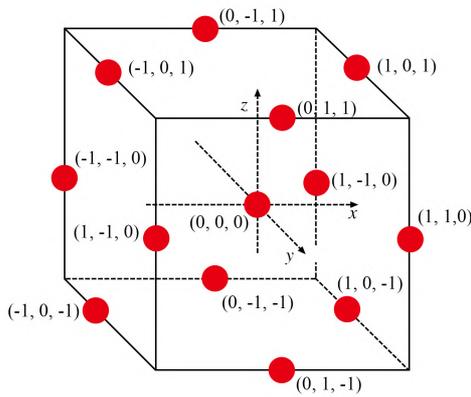
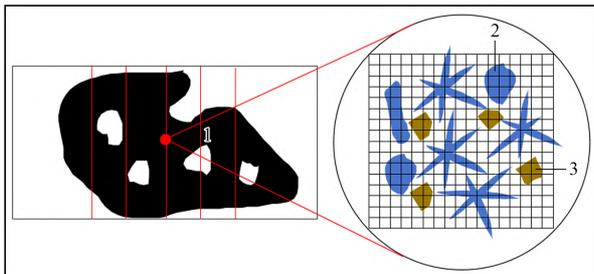


图 1 BBD 设计原理

Fig. 1 Design principles of BBD

常用方法。其测量方法为在目镜筒中放入一个含有 400 个大小相同网格组成的目镜测微网，并选择 5 条均匀分割光薄片上烧结矿样品的测量路径，如图 2 所示。从左侧第一条测量路径的上端第一个视域开始测量，扫描至右侧最后一条测量路径下端的最后一个视域，测量大约 100 个视域。最后，对每个视域中每种矿物所占的格子进行计数，当部分目标矿物占不满一格时，采用不满格子相互合并的计数方法，最终目标矿物所占格子数除以所有矿物总格子数即为目标矿物的含量。根据抽样统计原理，选择 5 条测量路径的 100 个视域统计结果可以代表整个烧结样品的情况。



1—测量路径；2—SFCA；3—其他矿物。

图 2 面测法示意

Fig. 2 Area measurement method diagram

1.3 NSGA III 算法

本文以 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 R_2 为自变量，以 SFCA 总体含量和三种不同形态 SFCA 含量为响应值拟合四个 SFCA 回归模型。为得出矿相结构中 SFCA 形态最为理想时的烧结原料中 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 R_2 的配比，需要对得到的四个 RSM 模型进行优化。由于响应值之间存在竞争关系，

且优化目标个数较多，本文采用 NSGA III 算法对 RSM 模型进行多目标寻优。针对超多目标优化问题(一般大于等于 4 个目标)，2013 年 Deb 提出了基于参考点机制的 NSGA III 算法，弥补了 NSGA II 中拥挤距离机制在高维目标空间中寻优的劣势^[21]。从解空间中选择规定数量的、均匀分布的、能够覆盖整个目标空间的、自适应调整的参考点，这些参考点就相当于在解空间中打下的标记，告诉后续的解搜索算法，这里还有一块被标记的区域需要搜索。NSGA III 算法使用边界交叉构造权重的方法构造产生结构化参考点。在标准化参考平面上，如果将 M 个目标空间维度中的每一维目标均匀地分割成 P 份，那么将均匀地产生多个参考点。对于一个均匀分割 4 份的 3 目标优化问题，其参考点构成了一个三角形，根据公式可知其产生 15 个参考点，见图 3 所示。

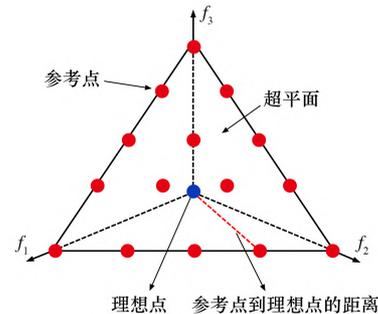


图 3 三目标优化问题的参考点分布

Fig. 3 Reference point distribution for three objective optimization problems

由于参考点是均匀分布在目标空间的，而每个解的各个目标函数尺度不一致导致解的偏向性不一致，使用参考点机制计算个体适应度就需要对种群个体进行自适应归一化操作，其计算公式见式(1)。

$$f_i^n(x) = \frac{f_i(x) - z_{i,\min}}{z_{i,\max} - z_{i,\min}}, i = (1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

式中： $f_i^n(x)$ 为对个体 x 在第 i 维度上的目标值进行自适应归一化后的值； $z_{i,\max}$ 、 $z_{i,\min}$ 分别为第 i 个目标函数的最小值和最大值； $f_i(x)$ 为个体 x 的第 i 个目标函数值。

完成种群自适应归一化操作后，计算种群中每个解到理想点的距离，并将每个解与其最近的参考点关联。依次选择最不拥挤的参考点后，选

择距离参考点最近的解作为适应度最高的个体,加入下一代种群中进行进化。

NSGA-III算法大致流程如图4所示。首先,在 M 个优化目标空间的超平面上均匀生成 C_{M+H-1}^P 个参考点并产生规模为 N 的父代种群,采用随机取值的方法对父代种群进行赋值。其次,使用锦标赛方法选择出由参考点机制计算出的适应度高的个体后,进行交叉、变异并产生新一代种群,将新一代的种群与父代种群进行合并后进行非支配排序。最后,判断进化代数是否达到设定进化代数,如果达到设定值,则算法结束并获得帕累托前沿,未达到设定值则重复进行选择、交叉、变异、子代父代合并、非支配排序,直至达到设定的进化代数。

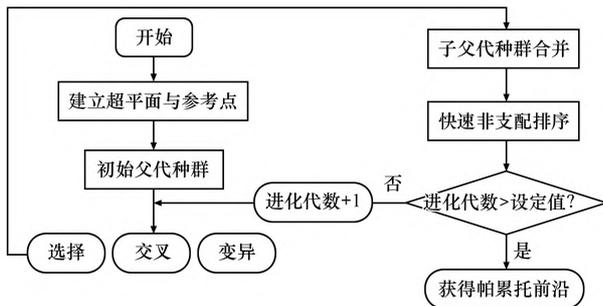


图4 NSGA-III算法流程

Fig. 4 Flowchart of NSGA-III algorithm

2 试验

2.1 烧结样品制备

本文选取对SFCAM形态影响较大的 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 R_2 3种成分指标作为考察因素,以-1, 0, 1代码分别代表低、中、高水平,每种因素的水平设置如表1所示。使用Design-Expert 12.0软件进行Box-Behnken试验设计得到的烧结矿配矿试验方案如表2所示。

表1 RSM试验设计因素与水平

Table 1 Response surface test design factors and levels

因素	代码	水平		
		-1	0	1
$w(\text{MgO})$	X_1	1.0	2.0	3.0
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	X_2	1.0	2.0	3.0
R_2	X_3	1.8	2.1	2.4

表2 烧结矿的配矿方案

Table 2 Ore matching scheme of sinter

序号	质量分数/%					R_2
	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	
1	81.24	10	4.76	2	2	2.1
2	80.83	10	4.17	3	2	2.4
3	80.83	10	4.17	2	3	2.4
4	81.24	10	4.76	2	2	2.1
5	83.24	10	4.76	1	1	2.1
6	81.44	10	5.56	1	2	1.8
7	79.44	10	5.56	3	2	1.8
8	81.24	10	4.76	2	2	2.1
9	81.24	10	4.76	2	2	2.1
10	79.24	10	4.76	3	3	2.1
11	81.24	10	4.76	1	3	2.1
12	79.44	10	5.56	2	3	1.8
13	82.83	10	4.17	2	1	2.4
14	81.24	10	4.76	3	1	2.1
15	81.24	10	4.76	2	2	2.1
16	82.83	10	4.17	1	2	2.4
17	81.44	10	5.56	2	1	1.8

本试验使用纯度为99.99%的化学纯试剂 Fe_2O_3 、CaO、 SiO_2 、MgO、 Al_2O_3 作为试验原料。按照表2中的配比方案,将1300g试验原料混匀后,在120℃的干燥箱内干燥2h后,放入1000mL刚玉坩埚中,再放入AF1700-40箱式马弗炉中进行微型烧结,以10℃/min的速率从室温升温至1400℃,并恒温60min以保证样品充分反应,以20℃/min的速率随炉冷却至室温获得烧结矿样品。对得到的烧结矿进行切割、打磨、抛光后使用环氧树脂制备成光薄片以便于在偏光显微镜下观察。

3 试验结果与分析

3.1 RSM试验结果

采用面测法测定的17个烧结矿样品中各种矿物的含量如表3所示。由表3可知,金属相磁铁矿和赤铁矿体积分之和维持在40%左右,玻璃相和硅酸二钙的体积分维持在5%~7%左右。烧结矿中SFCAM的体积分均大致在50%~60%之间。

表 3 烧结样品中矿物组成(体积分数)

Table 3 Types and contents of minerals in sintered samples

序号	SFCA-I	SFCA-II	SFCA-III	磁铁 矿	赤铁 矿	玻璃 相	硅酸 钙
1	10.49	7.92	38.28	31.26	5.04	3.51	3.50
2	4.79	8.25	38.92	22.32	19.89	2.39	3.44
3	7.89	14.23	32.73	32.44	6.91	3.42	2.38
4	9.83	8.67	41.61	31.17	1.87	3.65	3.20
5	6.32	8.43	41.33	30.27	7.85	2.47	3.33
6	3.39	15.91	33.01	22.71	19.22	2.78	2.98
7	2.57	28.91	18.66	21.17	21.01	3.73	3.95
8	10.27	6.17	40.22	30.81	7.25	2.43	2.85
9	10.28	9.26	39.24	30.54	5.86	2.56	2.26
10	3.39	15.91	33.01	36.25	4.32	2.79	3.54
11	5.20	27.86	24.65	15.46	19.94	3.95	2.94
12	5.82	18.49	25.61	20.17	24.47	2.94	2.50
13	8.41	3.17	39.15	34.72	8.99	3.35	2.21
14	4.02	19.03	27.77	38.38	6.14	2.32	2.34
15	9.67	8.93	34.17	21.83	18.91	3.78	2.71
16	9.24	10.35	37.16	32.28	4.21	3.81	2.95
17	9.67	8.93	34.17	21.83	18.91	3.78	2.71

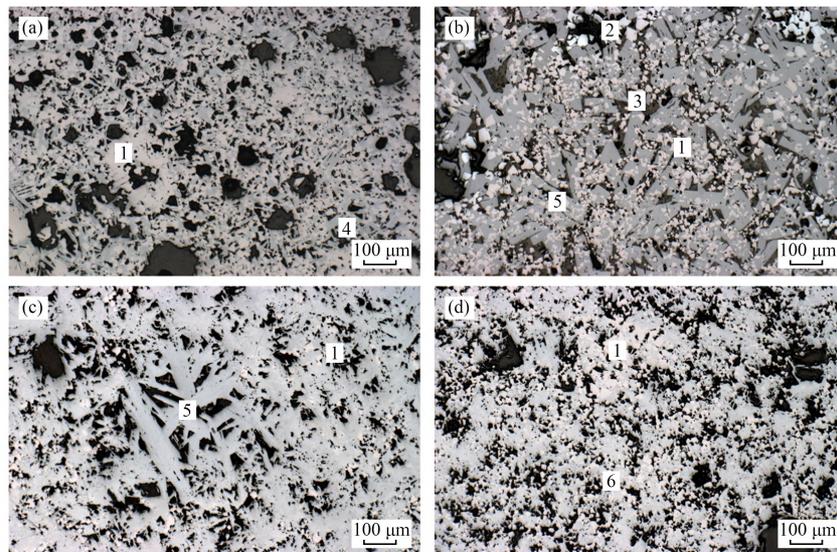
样品中矿物组成和各矿物含量较为相似,不同形态SFCA的含量差别较大。经过显微镜下系

统的矿相结构分析,发现烧结样品中矿相结构变化与形态的变化密切相关。针状复合铁酸钙(SFCA-I)在视域中所占面积较小,主要与磁铁矿胶结成交织熔蚀结构,如图5(a)所示。柱状复合铁酸钙(SFCA-II)中较长的主要存在于熔蚀结构中,主要呈少量局部集中分布,较短的多与磁铁矿、玻璃质胶结呈斑状结构,如图5(b)、(c)所示。他形复合铁酸钙(SFCA-III)主要与磁铁矿胶结形成熔蚀结构,如图5(d)所示。高碱度烧结矿中SFCA作为黏结相具有较好的还原性和强度,且其含量可以直接反映整个烧结样品的熔蚀程度,而SFCA-I为主的交织结构有助于提高烧结矿转鼓强度和还原性,减少低温还原粉化,因此,SFCA-I为最理想的SFCA形态^[22-23]。SFCA-III和长SFCA-II形成的熔蚀结构以及短SFCA-II形成的斑状结构相对较差。

3.2 RSM 回归模型建立与分析

3.2.1 模型拟合

以SFCA总体含量和三种不同形态SFCA的含量为响应值,使用Design-Expert 12.0软件对各响应值进行多元非线性回归拟合,建立烧结矿SFCA含量(Y_1)、SFCA-I含量(Y_2)、SFCA-II含量(Y_3)和SFCA-III含量(Y_4)与 $w(\text{MgO})$ (X_1)、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (X_2)、 R_2 (X_3)的RSM模型如下。



(a) SFCA-I; (b) 短 SFCA-II; (c) 长 SFCA-II; (d) SFCA-III
1—磁铁矿; 2—赤铁矿; 3—硅酸二钙; 4—SFCA-I; 5—SFCA-II; 6—SFCA-III。

图 5 样品中不同形态的 SFCA

Fig. 5 Different forms of SFCA in samples

$$Y_1 = -130.75 + 7.84X_1 - 3.30X_2 + 173.01X_3 + 0.16X_1X_2 - 2.18X_1X_3 + 5.81X_2X_3 - 1.42X_1^2 - 2.14X_2^2 - 42.01X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = -57.70 + 24.57X_1 + 1.00X_2 + 39.31X_3 - 0.56X_1X_2 - 3.03X_1X_3 + 2.78X_2X_3 - 4.65X_1^2 - 1.70X_2^2 - 8.36X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = -22.57 + 0.24X_1 - 6.79X_2 + 42.26X_3 - 2.87X_1X_2 - 12.58X_1X_3 + 1.25X_2X_3 + 8.63X_1^2 + 3.98X_2^2 - 8.26X_3^2 \quad (4)$$

$$Y_4 = -50.48 - 16.97X_1 + 2.49X_2 + 91.44X_3 + 3.60X_1X_2 + 13.43X_1X_3 + 1.78X_2X_3 - 5.40X_1^2 - 4.42X_2^2 - 25.39X_3^2 \quad (5)$$

3.2.2 模型可靠性评估

评价烧结原料的化学成分与 SFCA 含量和三种不同形态的 SFCA 含量的二阶 RSM 回归模型拟合显著性的参数如表 4 所示。其中 R^2 为决定系数, R^2 越接近 1, 代表拟合值与观测值越接近。由表 4 可知, 4 个模型的 R^2 均大于 90%, 说明模型中的自变量可以解释因变量变化 90% 以上的原因。 F 检验的是模型中各自因变量对因变量的总贡献程度。 P 值为模型显著性检验指标, P 值 < 0.01 表示模型极其显著, 具有统计学意义。由表

4 可知, 4 个模型均极其显著。

表 4 RSM 模型摘要

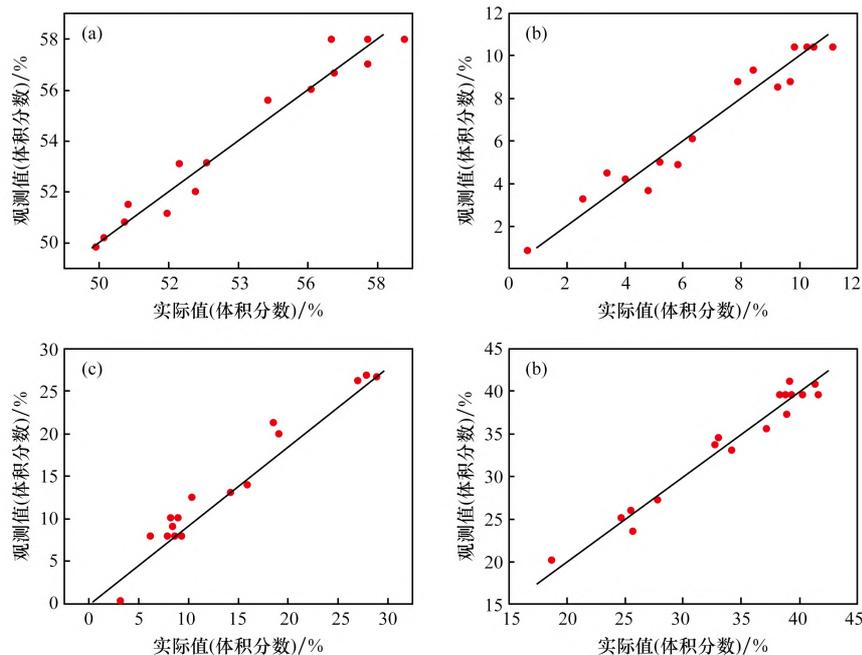
Table 4 Summary of RSM model

模型	R^2	均方差	F	P
Y_1	0.930	17.73	10.34	<0.01
Y_2	0.952	17.52	15.69	<0.01
Y_3	0.957	110.23	17.49	<0.01
Y_4	0.964	84.28	21.09	<0.01

拟合 RSM 模型的预测值与实际值接近一条直线, 如图 6 所示, 表明模型拟合程度较高, 预测值与实际值基本一致。RSM 回归方程 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 的拟合参数如表 5 所示, 其中 P 值为参数显著性检验, P 值 < 0.05 表明该自变量对因变量 Y 影响显著, P < 0.01 表明自变量对因变量的影响极其显著, P 值越小代表越显著。

3.2.3 RSM 单因素作用分析

分析单因素对 SFCA 含量和三种不同形态 SFCA 含量的影响时, 将其余 2 因素固定在 0 编码水平[即 $w(\text{MgO}) = 2\%$ 或 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 2\%$ 或 $R_2 = 2.1$, 下同], 并且忽略因素间的交互作用。根据表 5 方差分析结果可知, 各因素对烧结矿 SFCA 含量的影响显著程度大小为 $w(\text{MgO}) > R_2 > w(\text{Al}_2\text{O}_3)$,



(a) SFCA 总量; (b) SFCA-I; (c) SFCA-II; (d) SFCA-III

图 6 RSM 模型拟合效果

Fig. 6 Fitting effect of RSM model

表 5 RSM 模型拟合参数评价

Table 5 Fitting parameter evaluation of RSM model

变异来源	平方和				F 值				P 值			
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	35.41	18.36	53.15	80.20	20.65	16.45	8.44	20.07	<0.01	<0.01	0.02	<0.01
X_2	3.35	9.81	288.00	144.16	1.96	8.79	45.71	36.07	0.21	0.02	<0.01	<0.01
X_3	10.47	9.86	164.17	166.62	6.10	8.83	26.06	41.69	0.04	0.02	<0.01	<0.01
X_1X_2	0.11	1.27	32.95	51.70	0.06	1.13	5.23	12.93	0.81	0.32	0.06	<0.01
X_1X_3	1.72	3.29	57.00	64.88	1.00	2.95	9.05	16.23	0.35	0.13	0.02	<0.01
X_2X_3	12.15	2.77	0.56	1.14	7.08	2.48	0.09	0.29	0.03	0.16	0.77	0.61
X_1^2	8.50	91.13	313.33	122.56	4.96	81.64	49.73	30.66	0.06	<0.01	<0.01	<0.01
X_2^2	19.35	12.20	66.58	82.17	11.29	10.93	10.57	20.56	0.01	0.01	0.01	<0.01
X_3^2	60.19	2.38	2.33	21.99	35.11	2.13	0.37	5.50	<0.01	0.19	0.56	0.05
残差	12.00	7.81	44.10	27.98	—	—	—	—	—	—	—	—
失拟项	3.35	6.90	38.69	20.94	0.52	10.09	9.53	3.97	0.69	0.02	0.03	<0.01
纯误差	8.65	0.91	5.41	7.03	—	—	—	—	—	—	—	—
总和	171.53	165.49	1036.15	786.52	—	—	—	—	—	—	—	—

$w(\text{MgO})$ 和 R_2 对烧结矿 SFCA 含量有显著影响, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 影响不显著。各因素对烧结矿中 SFCA-I 含量的影响显著程度大小为 $w(\text{MgO}) > R_2 > w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 。各因素对 SFCA-II 含量的影响显著程度大小为 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > R_2 > w(\text{MgO})$ 。各因素对 SFCA-III 含量的影响显著程度大小为 $R_2 > w(\text{Al}_2\text{O}_3) > w(\text{MgO})$ 。

随着 $w(\text{MgO})$ 和 R_2 单一因素水平的改变, 对 SFCA 含量的影响如图 7(a) 所示。随着 $w(\text{MgO})$ 增加, 固熔体系中高熔点物质增加, 导致液相生成量减少, 进而导致 SFCA 含量下降^[24-25]。随着 R_2 增加烧结矿中 SFCA 含量先上升后下降, R_2 的增加会促使烧结过程中液相的生成, 从而增加 SFCA 的生成, 过高的碱度导致更多的 Ca^{2+} 参与 Ca_2SiO_4 的生成^[26-27]。

随着 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 R_2 单一因素水平的升高, 对三种形态 SFCA 含量的影响分别如图 7(b)、(c)、(d) 所示。随着 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 增加, SFCA-I 和 SFCA-III 含量均出现先增加后减少的趋势, SFCA-II 含量呈现出先减少后增加, 由于 Al^{3+} 熔入 SFCA 中, 使 SFCA 晶体沿着针柱状生长, 过量的 Al^{3+} 会促使 SFCA 向板柱状发展^[28-29]。 Mg^{2+} 能够溶入进 SFCA-I 中稳定其晶体结构抑制其分解成 SFCA-III, 过量的 Mg^{2+} 会使得

烧结过程液相黏度上升, 使 SFCA 更容易结晶成板柱状形态^[30-31]。随着 R_2 增加, 烧结矿中 SFCA-I 含量和 SFCA-III 呈上升趋势, SFCA-II 呈减少趋势, 碱度水平的提高使得含铁原料能够更好的固溶, 从而使更多的 FeO 参与 SFCA 的生成, 这可能是导致 SFCA-I 升高的原因^[32-33]。烧结过程中碱度的升高导致液相含量的增加以及液相黏度的下降可能是导致 SFCA-III 含量增加的原因^[34-35]。

3.2.4 RSM 交互作用分析

由表 5 方差分析可知, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与 R_2 交互作用对 SFCA 总含量影响显著, $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 之间和 $w(\text{MgO})$ 与 R_2 之间的交互作用对 SFCA-II 和 SFCA-III 含量有显著影响。由图 8(a) 可知, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 分别在高水平和低水平时, SFCA 含量均随着 R_2 的增加先增大后减小, 当 R_2 分别处于高水平和低水平时, SFCA 含量均随着 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的增加而减少; 对于 SFCA 的生成, 两者表现为叠加作用。由图 8(b)、(c) 可知, 相较 $w(\text{MgO})$ 在低水平时, $w(\text{MgO})$ 在高水平时 SFCA-II 含量随着 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的变化而变化的幅度小, 随着 R_2 的变化而变化的幅度大, 且对于 SFCA-II 的生成, $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 之间表现为相互促进作用, $w(\text{MgO})$ 与 R_2 之间表现为相互抑制作用。由图 8(d)、(e) 可知, 相较 $w(\text{MgO})$ 在低水平时, $w(\text{MgO})$

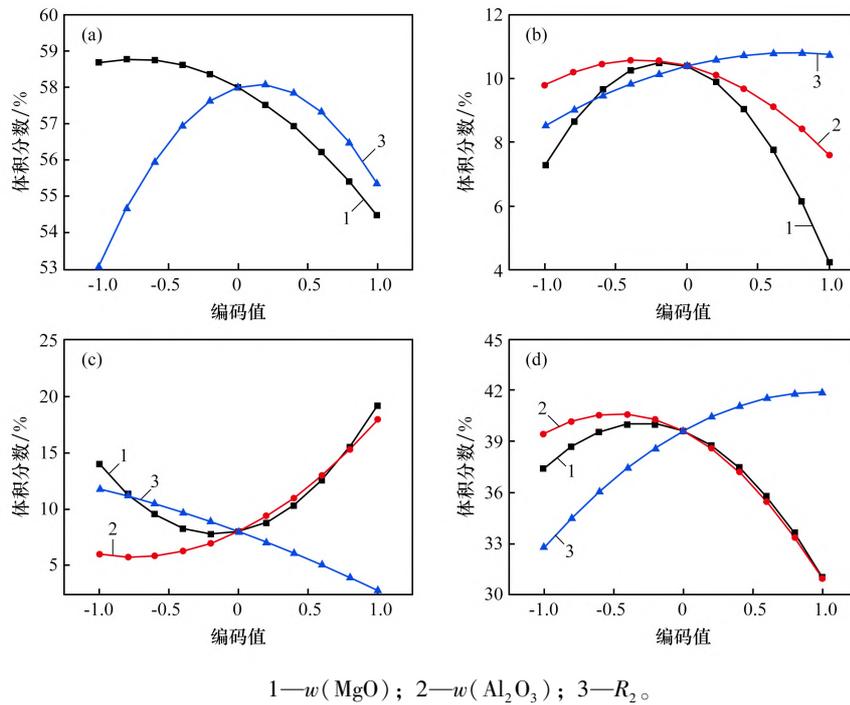


图 7 RSM 单因素影响分析

Fig. 7 Effect analysis of single factor on RSM

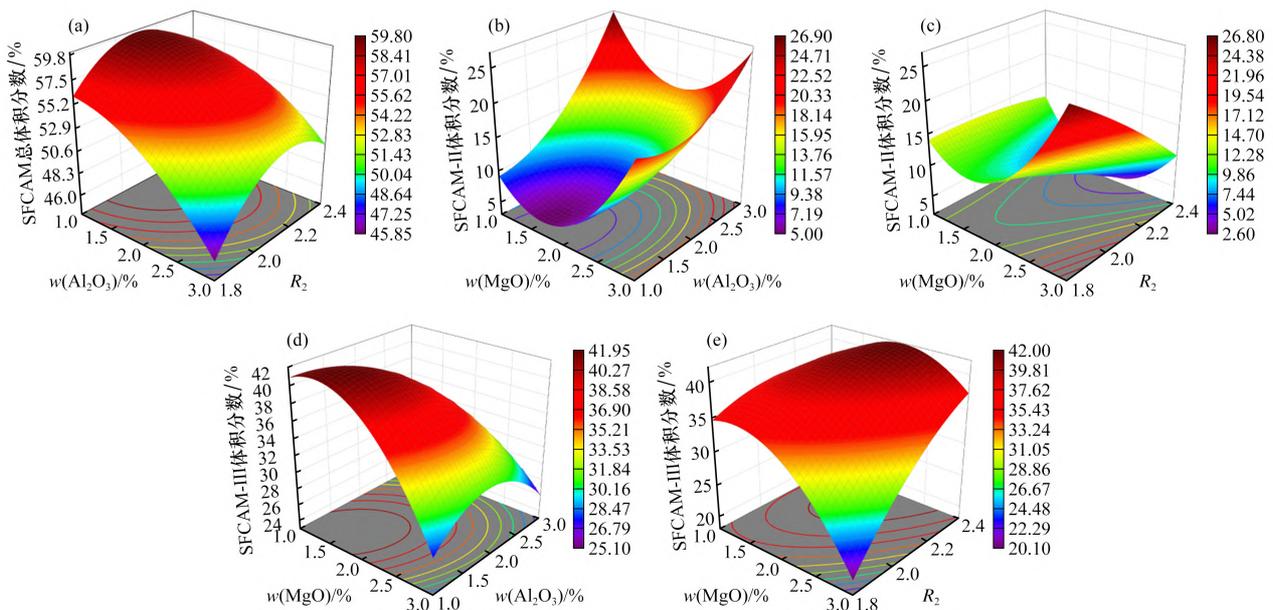


图 8 原料成分之间的交互作用对响应值的影响

Fig. 8 Effect of interactions between raw material components on response values

在高水平时 SFCA-III 随着 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的变化而变化的幅度小, 随着 R_2 的变化而变化的幅度大, 对于 SFCA-III 的生成, $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 以及 $w(\text{MgO})$ 与 R_2 之间均表现为相互抑制作用。

3.3 基于 RSM-NSGA III 的 SFCA 形态优化模型

3.3.1 RSM-NSGA III 模型设计

为探究烧结矿中 SFCA 形态最为理想时的原料配比, 本文以 SFCA 总体含量和不同形态 SFCA

含量为目标, 建立 RSM-NSGA III 优化算法, 对得到的 RSM 回归模型进行多目标寻优。NSGA III 算法使用 Python 程序运行。基于 2.1 节中的试验设计, NSGA III 算法以 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 R_2 作为优化变量, 以 SFCA 总体含量和不同形态的 SFCA 含量为优化目标, 取 SFCA 总体含量以及 SFCA-I 含量最高, SFCA-II 和 SFCA-III 含量最少为最优建立优化模型。

优化变量:

$$X = (X_1, X_2, X_3) \quad (6)$$

优化目标:

$$Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) \quad (7)$$

约束条件: $1 < x_1 < 3$; $1 < x_2 < 3$; $1.8 < x_3 <$

2.4。

3.3.2 RSM-NSGA III 多目标优化结果

NSGA III 算法初始化参数如下: 初始种群大小为 100, 交叉变异概率为 0.8, 染色体上最小片段发生变异的概率为 0.2; 分别设置最大进化代数为 100、200、300 和 500, 发现算法在迭代 200 次后, 解集中 SFCA-I 最高时解的数值趋于稳定。以上述参数初始化的 NSGA III 算法对 RSM 回归模型进行多目标寻优得到的 Pareto 前沿如图 9 所示。所得到的 Pareto 前沿中的个体均可作为多目标优化的解, 以 SFCA 总含量和不同形态 SFCA 含量为优化目标, 得到 Pareto 最优解集, 其中 SFCA-I 含量最高的 5 个最优解如表 6 所示。

由表 6 可知, 确定烧结原料的化学成分中 $w(\text{MgO}) = 1.8$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.7$, $R_2 = 2.3$ 时烧结 SFCA-I 含量以及 SFCA 总体含量较多, 矿相结构最为理想。经过镜下统计及观察, 此时烧结矿中 SFCA 总体积分数以及三种不同形态 SFCA 体积分

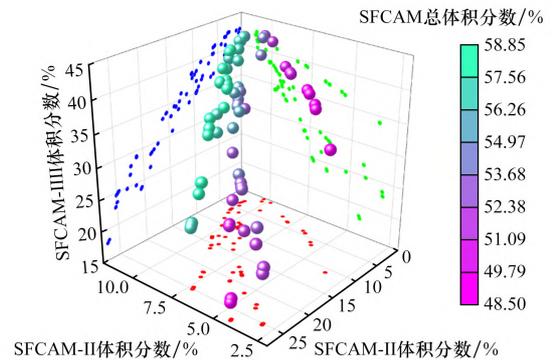


图 9 SFCA 形态优劣程度的帕累托前沿

Fig. 9 Pareto front for the degree of structural superiority of sintered ore phases

数的实际值分别为 58.48%、10.48%、4.73%、43.27%, 与各自预测值 (57.27%、10.99%、4.12%、42.12%) 相近。在此原料成分分配比条件下烧制的样品中, 以 SFCA-I 与磁铁矿胶结的交织熔蚀结构明显增加, 样品以交织熔蚀结构以及熔蚀结构为主, SFCA-II 和 SFCA-III 含量明显减少, 验证了 RSM-NSGA III 模型的可靠性。

4 结论

(1) 以 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 以及 R_2 为自变量, 以 SFCA 总体含量以及三种不同形态 SFCA 含量为响应值建立的 RSM 回归模型的拟合度 R^2 分别为 0.930、0.952、0.957 和 0.964, P 值均小于 0.01, 表明各模型具有较高的可靠度, 模型均可通过显著性检验, 具有统计学意义。

(2) 响应面单因素分析表明各因素对 SFCA 含量以及 SFCA-I 含量的影响显著程度大小为 $w(\text{MgO}) > R_2 > w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 。各因素对 SFCA-II 和 SFCA-III 含量的影响显著程度大小分别为 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > R_2 > w(\text{MgO})$ 和 $R_2 > w(\text{Al}_2\text{O}_3) > w(\text{MgO})$ 。响应

表 6 NSGA III 模型运行部分结果

Table 6 Selected results from NSGA III model runs

序号	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	R_2	体积分/%			
				SFCA	SFCA-I	SFCA-II	SFCA-III
1	1.77	1.86	2.34	56.68	11.05	3.54	42.06
2	1.70	1.81	2.36	56.38	11.01	3.28	42.05
3	1.81	1.71	2.32	56.44	10.99	2.88	42.53
4	1.81	1.70	2.32	56.42	10.98	2.86	42.54
5	1.84	1.70	2.33	56.19	10.97	2.62	42.56

面交互作用分析表明 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与 R_2 的交互作用对SFCA含量影响显著, $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 以及 $w(\text{MgO})$ 与 R_2 之间的交互作用对SFCA-II以及SFCA-III含量影响显著。

(3) 使用NSGA III对得到的RSM回归模型进行多目标寻优,得到SFCA形态优劣程度的Pareto前沿,确定了本次试验水平值范围内SFCA形态最优的原料成分配比为 $w(\text{MgO}) = 1.8$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.7$, $R_2 = 2.3$ 。在此条件下烧制的样品中SFCA含量和三种不同形态SFCA含量的实际值与预测值接近,矿相结构中以SFCA-I为主的交织熔蚀结构明显增加,验证了RSM-NSGA III模型的可靠性。

参考文献:

- [1] 李国旺,韩秀丽,刘磊,等. 烧结成矿过程中铁酸钙特征与冶金性能定量关系[J]. 烧结球团,2023,48(1):44-49.
LI Guowang, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Quantitative relationship between characteristics of calcium ferrite and metallurgical properties during the process of sintering and mineralization[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(1):44-49.
- [2] 刘佳文,陈铁军,周仙霖,等. 基于无碳烧结的褐铁矿型红土镍矿固结机理研究[J]. 烧结球团,2022,47(3):1-7.
LIU Jiawen, CHEN Tiejun, ZHOU Xianlin, et al. Research on consolidation mechanism of limonite-type laterite nickel ore based on carbon-free sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(3):1-7.
- [3] 雷仕江,杜东,蔡源,等. 杨迪矿替代巴西矿对烧结过程的影响机理[J]. 烧结球团,2024,49(2):1-7.
LEI Shijiang, DU Dong, CAI Yuan, et al. Influence mechanism of Yandicoogina substitution of Brazilian ore on sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(2):1-7.
- [4] XU L P, LIU H B, CHENG D, et al. Insight into mechanisms of CaCl_2 for improving reduction disintegration of iron ore sinter; An experimental and DFT investigation[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 366:120334.
- [5] 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.
- [6] PARK J, RAJAVARAM R, SUH I K, et al. Effects of basicity and Al_2O_3 content on the chemistry of phases in iron ore sinter containing ZnO [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(6):3016-3027.
- [7] ZHU D Q, XUE Y X, PAN J, et al. An investigation into the distinctive sintering performance and consolidation mechanism of limonitic laterite ore[J]. Powder Technology, 2020, 367:616-631.
- [8] 辛瑞峰. 高碱度烧结矿黏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.
- [9] 司天航,韩秀丽,刘磊,等. 镁铝对烧结矿矿相结构的影响规律[J]. 烧结球团,2021,46(2):24-31.
SI Tianhang, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Influence of Mg and Al on mineralogical structure in sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2):24-31.
- [10] XUE Y X, PAN J, ZHU D Q, et al. Effect of alumina occurrence on sintering performance of iron ores and its action mechanism[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021(12):1157-1170.
- [11] 韩秀丽,司天航,刘盈盈,等. 不同含量 Al_2O_3 烧结矿矿相结构与 $\text{RDI}_{>3.15\text{mm}}$ 的定量关系[J]. 中国冶金, 2022, 32(2):34-38.
HAN Xiuli, SI Tianhang, LIU Yingying, et al. Relationship between mineralogical structure and $\text{RDI}_{>3.15\text{mm}}$ of sinter with different contents of Al_2O_3 [J]. China Metallurgy[J], 2022, 32(2):34-38.
- [12] 唐珏,王茗玉,储满生,等. 国内外烧结优化配矿研究进展[J]. 钢铁,2024,59(9):102-113.
TANG Jue, WANG Mingyu, CHU Mansheng, et al. Process of ore blending optimization in sintering at home and abroad[J]. Iron & Steel, 2024, 59(9):102-113.
- [13] 冯茜,李擎,王耀祖,等. 约束多目标粒子群算法在烧结配矿优化中的应用[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(5):923-932.
FENG Qian, LI Qing, WANG Yaozu, et al. Application of constrained multi-objective particle swarm optimization to sinter proportioning optimization[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(05):923-932.
- [14] 任鑫英. 耦合神经网络的烧结矿质量优化研究[D].

- 唐山:华北理工大学,2023.
- REN Xinying. Research on sinter quality optimization with coupled neural network[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology. 2023.
- [15] 包国营,刘磊,韩秀丽,等. 基于 $RDI_{>3.15\text{mm}}$ 响应面法的烧结原料配矿方案优化[J]. 钢铁,2023,58(1):31-38.
- BAO Guoying, LIU Lei, HAN Xiuli, et al. Optimization of sintering raw material blending scheme based on $RDI_{>3.15\text{mm}}$ response surface methodology[J]. Iron & Steel,2023,58(1):31-38.
- [16] 包国营,刘磊,韩秀丽,等. 响应面-满意度函数法优化烧结配矿[J]. 钢铁,2023,58(8):41-50.
- BAO Guoying, LIU Lei, HAN Xiuli, et al. Optimization of sintering ore blending by response surface-satisfaction function method[J]. Iron & Steel,2023,58(8):41-50.
- [17] 陶士振,吴义平,陶小晚,等. 氦气地质理论认识、资源勘查评价与全产业链一体化评价关键技术[J]. 地学前缘,2024,31(1):351-367.
- TAO Shizhen, WU Yiping, TAO Xiaowan, et al. Helium: Accumulation model, resource exploration and evaluation, and integrative evaluation of the entire industrial chain[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(1):351-367.
- [18] 麻玉清,柳海云,郭伟,等. 基于响应面法优化脂质纳米颗粒的配方及表征[J]. 中国兽医科学:2024,54(10):1399-1407.
- MA Yuqing, LIU Haiyun, CUO Wei, et al. Optimization and characterization of lipid nanoparticles based on response surface method[J]. Chinese Veterinary Science, 2024, 54(10):1399-1407.
- [19] FANG S L, LI M D, LIU L, et al. A quantitative and optimization model for microstructure uniformity of sinter based on multiple regression-NSGA2[J]. Metals, 2024, 14(2):169.
- [20] LIU L, HAN X L, LI M D, et al. Influence of mineralogical structure of mold flux film on heat transfer in mold during continuous casting of peritectic steel[J]. Materials,2022,15(9):2980.
- [21] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: Solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(4):577-601.
- [22] NICOL S, CHEN J, POWNCEBY M I, et al. A review of the chemistry, structure and formation conditions of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) phases [J]. ISIJ International,2018,58(12):2157-2172.
- [23] CHEN X H, WANG W, YANG D W, et al. Mineralization characteristics of iron ore sinter and the effects of cooling rate on mineral phase structure [J]. ISIJ International, 2023,63(2):261-270.
- [24] ZHANG L H, YANG S T, TANG W D, et al. Investigations of MgO on sintering performance and metallurgical property of high-chromium vanadium-titanium magnetite[J]. Minerals,2019,9(5):324.
- [25] YI Z M, LIU Q, SHAO H J. Effect of MgO on highly basic sinters with high Al_2O_3 [J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2021,38(5):2175-2183.
- [26] TOM H, TUYEN N T B, DAVID P, et al. Variation in iron ore sinter mineralogy with changes in basicity[J]. Minerals,2022,12(10):1249.
- [27] WEBSTER N A S, POWNCEBY M I, MANUEL J R, et al. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) and SFCA-I iron ore sinter bonding phase formation: Effects of MgO on phase formation during heating[J]. JOM,2021,73(1):299-305.
- [28] 韩秀丽,司天航,李鸣铎,等. 镁铝对烧结矿中铁酸钙的矿物学特性影响[J]. 地学前缘,2020,27(5):280-290.
- HAN Xiuli, SI Tianhang, LI Mingduo, et al. Influences of MgO and Al_2O_3 on the mineralogical properties of calcium ferrite in iron ore sinter[J]. Earth Science Frontiers,2020,27(5):280-290.
- [29] KAHLENBERG V, KRÜGER H, TRIBUS M. Structural systematics of SFCA-I type solid-solutions in the system $CaO-Fe_2O_3-FeO-Al_2O_3$ [J]. Physics and Chemistry of Minerals,2021,48(7):25.
- [30] WEBSTER N A S, POWNCEBY M I, PATTEL R, et al. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) iron ore sinter bonding phase formation: Effects of basicity and magnesium on crystallisation during cooling[J]. ISIJ International,2019,59(2):263-267.
- [31] WU S L, ZHANG W L, KOU M Y, et al. The macroscopic flow direction and microscopic distribution of Mg in sintered products and its influence [J]. Metals, 2018, 8(12):1008.

(下转第29页)

- discrete element method[J]. *Iron & Steel*,2019,54(1):14-18.
- [12] 申雷丹,王国文. 块煤防破碎螺旋溜槽技术在新田煤矿的应用[J]. *煤炭加工与综合利用*,2024(4):49-50.
- SHEN Leidan, WANG Guowen. Application of block coal anti-breaking spiral conveyor technology in Xintian Coal Mine[J]. *Coal Processing and Comprehensive Utilization*, 2024(4):49-50.
- [13] 韩梅. 模拟算法在高炉布料溜槽旋转角度推算中的应用[J]. *山东冶金*,2016,38(3):59-60.
- HAN Mei. Application of simulation algorithm in the rotation angle calculation of BF distributing chute[J]. *Shandong Metallurgy*,2016,38(3):59-60.
- [14] 曹孟兵,曾剑武,吁伟俊,等. 螺旋溜槽分选技术发展现状和展望[J]. *矿产保护与利用*,2024,44(3):127-134.
- CAO Mengbing, ZENG Jianwu, YU Weijun, et al. Development status and prospect of spiral concentrator separation technology[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*,2024,44(3):127-134.
- [15] 周学军,门洪滔,王振,等. 储煤筒仓内钢制螺旋溜槽脱落事故分析[J]. *山东建筑大学学报*,2024,39(2):115-121.
- ZHOU Xuejun, MEN Hongtao, WANG Zhen, et al. Analysis of steel spiral chute detachment accidents in coal storage silos[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*,2024,39(2):115-121.
- [16] 孟令国,高淑玲,周孝洪,等. 入口流量对螺旋溜槽首圈流场演变及矿物颗粒分布的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2023,44(6):856-862.
- MENG Lingguo, GAO Shuling, ZHOU Xiaohong, et al. Influence of the inlet flow rate on flow field evolution and mineral particle distribution in the first turn of spiral separators[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2023,44(6):856-862.
- [17] 王绍岩. 螺旋溜槽的设计计算与应用[J]. *机械管理开发*,2021,36(8):8-9.
- WANG Shaoyan. Design calculation and application of a spiral chute[J]. *Mechanical Management and Development*, 2021,36(8):8-9.
- [18] 李鹏波,赵维英,马闫涛,等. 螺旋溜槽在王坡选煤厂块煤转载环节的应用及改造[J]. *煤炭加工与综合利用*,2020(5):34-36.
- LI Pengbo, ZHAO Weiyang, MA Yantao, et al. Coal Processing & Comprehensive Utilization,2020(5):34-36.
- [19] 富佳兴,李济洋. 螺旋溜槽关键参数的研究与应用[J]. *煤矿机械*,2020,41(2):161-164.
- FU Jiaying, LI Jiyang. Research and application of key parameters of spiral chute [J]. *Coal Mine Machinery*, 2020,41(2):161-164.
- [20] 董敏,王延遐,相培,等. 储煤仓用螺旋溜槽结构的设计改进[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*,2020,34(1):18-21.
- DONG Min, WANG Yanxia, XIANG Pei, et al. Design and improvement of spiral chute structure for coal storage[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*,2020,34(1):18-21.

(上接第20页)

- [32] TU Y K, ZHANG Y B, SU Z J, et al. Mineralization mechanism of limonitic laterite sinter under different fuel dosage: Effect of FeO [J]. *Powder Technology*, 2022, 398:117064.
- [33] JIANG X, ZHAO J D, WANG L, et al. Effects of liquidus temperature and liquid amount on the fluidity of bonding phase and strength of sinter[J]. *ISIJ International*,2021, 61(1):86-92.
- [34] CHAI Y F, YU W T, ZHANG J L, et al. Influencing mechanism of Al_2O_3 on sintered liquid phase of iron ore fines based on thermal and kinetic analysis[J]. *Ironmaking & Steelmaking*,2019,46(5):424-430.
- [35] CHEN C L, LU L M, JIAO K X. Thermodynamic modelling of iron ore sintering reactions[J]. *Minerals*, 2019,9(6):361.