基于响应面法的烧结矿还原指数优化

张 聪[a]，韩秀丽[b,c,d]，刘 磊[b,c,d]，段博文[b]，王伟伟[b]
（华北理工大学 a. 冶金与能源学院；b. 矿业工程学院；c. 矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心；
d. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室，河北 唐山 063210）

摘要：烧结矿还原指数是影响高炉生产的一个重要参数，而烧结原料及其配比是决定烧结矿还原性能好坏的根本原因之一。本文运用响应面法对烧结矿还原指数进行目标优化，采用 CCD 模块进行烧结配矿方案设计，以 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 为变量因素，以烧结矿还原指数为目标指数，建立目标指数与变量因素之间的响应面模型；通过试验对响应面模型进行拟合运算，得到烧结矿还原指数预测方程；根据预测模型确定的原料成分最优配比自制烧结矿，对预测模型进行验证。结果表明，3 种原料成分对烧结矿还原指数的影响显著效果由大到小依次为二元碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]、$w(MgO)/w(Al_2O_3)$、$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$，三者之间任意两因素的交互作用均明显。烧结矿还原指数最优时，其原料配比：$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)=0.76$、二元碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]$=2.23$、$w(MgO)/w(Al_2O_3)=0.82$。通过烧结试验验证，烧结矿还原指数预测值为 92.41%，试验值为 92.1%，且烧结矿中针状铁酸钙含量较多，显微结构较好，反映该响应面法确定的最佳配比方案是准确可行的。

关键词：烧结配矿；响应面法；目标优化；交互作用；还原指数
中图分类号：TF046.6；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)04－0001－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.051

Optimization of sinter reduction index based on response surface method

ZHANG Cong[a], HAN Xiuli[b,c,d], LIU Lei[b,c,d], DUAN Bowen[b], WANG Weiwei[b]
(North China University of Science and Technology a. College of Metallurgy and Energy; b. College of Mining Engineering; c. Collaborative Innovation Center for Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources; d. Hebei Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: The reduction index of sinter is an important parameter affecting the production of blast furnace, and the sintering raw materials and their ratio are one of the fundamental reasons for determining the reduction performance of sinter. In this paper, the response surface method is used to optimize the reduction index of sinter, and the CCD module is used to design the ore blending scheme of sinter. With $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$, binary basicity [$w(CaO)/w(SiO_2)$] and $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ as variable factors, the reduction index of sinter is taken as the target index. The response surface model between target index and variable factor is established. By fitting the response surface model through experiments, the prediction equation of sinter reduction index is obtained. According to the optimal ratio of raw material composition determined by the prediction model, the prediction model is verified. The results show that the significant effects of the three

收稿日期：2023－10－24；**修回日期**：2023－11－22
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51574105&51774140)；河北省自然科学基金资助项目(E2021209147)；河北省科技计划资助项目(23564101D)；华北理工大学重点科研项目(ZD－ST－202308)
作者简介：张 聪(1998—)，女，硕士研究生，从事冶金工艺矿物学研究。
通信作者：韩秀丽(1966—)，女，教授，博士生导师，从事冶金工艺矿物学研究。

raw materials on the reduction index of sinter are as follows: binary basicity [$w(CaO)/w(SiO_2)$], $w(MgO)/w(Al_2O_3)$, $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$, and the interaction of any two factors among the three is obvious. When the reduction index of sinter is optimal, the raw material ratio is: $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)=0.76$, binary basicity [$w(CaO)/w(SiO_2)$] = 2.23, $w(MgO)/w(Al_2O_3)=0.82$. Through the sintering test, the predicted reduction index value of sinter is 92.41%, the test value is 92.1%, and the content of aciculate calcium ferrite in sinter is more, and the microstructure is better, reflecting that the optimal ratio scheme determined by the response surface method is accurate and feasible.

Key words: sintering ore blending; response surface method; target optimization; interaction; reduction index

烧结矿还原性是影响高炉冶炼的一项重要指标，烧结原料成分是决定烧结矿还原性的主要因素。国内外研究学者从烧结原料成分方面对烧结矿还原性的影响进行了大量的研究。刘征建等[1]研究表明，碱度的增加可以促进铁酸钙等黏结相的生成，可以有效提高烧结矿还原性，从而改善烧结矿质量。王兴建等[2]通过对比不同碱度烧结矿的冶金性能发现，当碱度为2.0时，烧结矿具有较好的还原性能。潘向阳等[3]研究认为MgO含量在一定范围内，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$比较低时，产生的渣相可以抑制SiO_2与铁酸钙反应，从而增多铁酸钙的生成，进而提高烧结矿的还原性。余骏等[4]研究表明，随着烧结矿中FeO含量的增多，还原性较好的Fe_2O_3含量减少，导致烧结矿还原性变差。关于烧结矿配矿方法及还原性能优化预测技术，国内外研究学者也取得了系列成果。曹跃等[5]采用聚类算法和组合优化智能调度方法，解决了铁矿混匀过程中的预配料问题。廖东等[6]提出了一种基于变量聚类分析的烧结矿还原性能预测模型，可以精准预测烧结矿还原性。王庆顺等[7]采用遗传算法构建烧结配矿优化模型，并对烧结工艺和经济方面进行优化。传统的试验研究仅考虑单一因素影响还原性，所使用的优化方法大多具有主观性，均未考虑到各因素之间的交互作用对烧结矿还原性的影响。响应面法可实现多因素统计，减少试验次数，已广泛应用于各个领域[8-10]。

课题组前期使用响应面——满意度函数法对烧结矿低温还原粉化指数(>3.15 mm)、铁酸钙和气孔率含量进行优化[11-13]，未对烧结矿还原性优化分析进行深入研究，并且前期所使用的方法为响应面法Box-behnken设计(Box-behnken design, BBD)，不比中心复合设计(central composite design, CCD)精度更高。本文选取$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度和$w(MgO)/w(Al_2O_3)$为自变量因素，烧结矿还原指数为目标函数，采用响应面法CCD设计建立烧结配矿优化模型，对优化前后的烧结矿还原指数进行对比分析，验证所使用的目标优化方法的有效性，以期为提高烧结矿还原性提供可靠依据。

1 试验原理与方案

1.1 响应面法设计原理

响应面法是构建近似函数的一种方法。其主要原理：找到并匹配近似函数的格式；统计试验在固定区域内选择足够的样本数；采用最小二乘法拟合试验设计样本结果确定响应面函数[14]。常用的响应面拟合函数有二次多项式。

$$f(x_1,x_2,\cdots,x_n)=a_0+\sum_{i=1}^{n}(b_ix_i+c_ix_i^2) \tag{1}$$

式中：f为响应面函数；x_1，x_2，…，x_n为变量；a_0为常数项响应面系数；b_i为一次项响应面系数；c_i为二次项响应面系数。

对式(1)中的n个变量进行m次样本点取值后，可计算响应面系数向量$\boldsymbol{D}$。

$$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{F} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{F}=(f_1,f_2,\cdots,f_n)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix}1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} & x_{11}^2 & x_{12}^2 & \cdots & x_{1n}^2\\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} & x_{21}^2 & x_{22}^2 & \cdots & x_{2n}^2\\ & & & & \cdots & & & & \\ 1 & x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} & x_{m1}^2 & x_{m2}^2 & \cdots & x_{mn}^2\end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{pmatrix}a_{10} & b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} & c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n}\\ a_{20} & b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} & c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n}\\ & & & & \cdots & & & & \\ a_{m0} & b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} & c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn}\end{pmatrix} \tag{5}$$

$$m=2n+1 \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{F}$ 为响应面函数预测向量；$\boldsymbol{X}$ 为优化参数矩阵；m 为试验样本数量。

1.2　试验方案

课题组前期单因素试验结果表明，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]和$w(MgO)/w(Al_2O_3)$对烧结矿还原指数有显著影响[15-16]，即在此基础上采用响应面法中心复合设计对原料配比进行优化，选取 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$为自变量，烧结矿还原指数为因变量。根据前期预试验结果设计因素与水平，采用 Design-Expert 软件中 CCD 模型对三个因素进行五水平设计，各因素水平分别为 $-\alpha$、-1、0、$+1$、$+\alpha$。响应面试验设计的因素和水平如表 1 所示。

表 1　中心复合设计响应面试验设计因素和水平

Table 1　Factors and levels in central composite design

水平	因素		
	$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$	二元碱度	$w(MgO)/w(Al_2O_3)$
$-\alpha$	0.16	1.60	0.16
-1	0.50	1.80	0.50
0	1.00	2.10	1.00
1	1.50	2.40	1.50
$+\alpha$	1.84	2.60	1.84

1.3　试样制备及还原性测定

以化学纯试剂 Fe_2O_3、Fe_3O_4、CaO、SiO_2、MgO、Al_2O_3 为试验原料（纯度为 99.99%），在 120 ℃的干燥箱内烘干 2 h 后称重—配料—混匀。按照表 2 进行配矿，将 1 300 g 原料放入 1 000 mL 的刚玉坩埚中，使用可控温箱式马弗炉进行微型烧结，升温至 1 400 ℃，恒温 60 min，随炉冷却至室温。

将样品粉碎成粒度为 10 ~ 12.5 mm 的试样，利用 KSZ-2015A 型矿石冶金性能综合测定装置，根据 GB/T 13241—91 标准按表 3 测试条件对烧结矿进行还原性测试，计算烧结矿还原性。

表 2　烧结矿成分设计（质量分数）

Table 2　Sintering ore composition design table　%

序号	Fe_2O_3	Fe_3O_4	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3
1	27.15	54.29	10	5.56	1.00	2
2	26.48	52.96	10	5.56	3.00	2
3	48.86	32.58	10	5.56	1.00	2
4	47.66	31.78	10	5.56	3.00	2
5	27.61	55.22	10	4.17	1.00	2
6	26.94	53.89	10	4.17	3.00	2
7	49.70	33.13	10	4.17	1.00	2
8	48.50	32.33	10	4.17	3.00	2
9	41.46	41.46	10	4.76	0.32	2
10	39.78	39.78	10	4.76	3.68	2
11	11.21	70.03	10	4.76	2.00	2
12	52.64	28.60	10	4.76	2.00	2
13	39.87	39.88	10	6.25	2.00	2
14	41.07	41.08	10	3.85	2.00	2
15	40.62	40.62	10	4.76	2.00	2
16	40.62	40.62	10	4.76	2.00	2
17	40.62	40.62	10	4.76	2.00	2
18	40.62	40.62	10	4.76	2.00	2
19	40.62	40.62	10	4.76	2.00	2
20	40.62	40.62	10	4.76	2.00	2

2　试验结果与分析

2.1　响应面试验结果

利用响应面分析法 CCD 设计建立了 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、$w(CaO)/w(SiO_2)$ 和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$与烧结矿还原指数之间的回归预测模型，分别利用响应面模型对单一因素和两因素交互作用进行分析，探究原料成分对烧结矿还原指数的影响。根据响应面 CCD 设计模型所设计的配矿方案进行试验，试验设计与编码值结果如表 4 所示。其中自变量因素均为编码值水平，与所测得烧结矿还原指数试验结果一一对应，将自变量水平与响应值输入软件中进行模拟，进一步分析所要建立的烧结矿还原指数响应面模型。

表 3　烧结矿还原性测试条件

Table 3　Test conditions for sinter reduction

试验温度/℃	还原时间/h	还原气体流量/($L\cdot min^{-1}$)	还原气体成分（体积分数）/%	试样重量/g	试样粒度/mm
900 ± 10	3	15	N_2(70),CO(30)	500 ± 1	10.0 ~ 12.5

表4 响应面CCD设计试验结果

Table 4 Experimental results of response surface CCD design

序号	因素			还原指数/%
	$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$	二元碱度	$w(MgO)/w(Al_2O_3)$	
1	0	0	0	89.1
2	-1	-1	-1	70.2
3	1	1	1	68.2
4	$-\alpha$	0	0	80.5
5	-1	-1	1	66.0
6	1	-1	-1	73.5
7	1	-1	1	74.9
8	-1	1	-1	89.3
9	-1	1	1	79.6
10	1	1	-1	74.5
11	0	0	$-\alpha$	80.3
12	0	0	α	71.5
13	α	0	0	76.1
14	0	$-\alpha$	0	63.4
15	0	α	0	75.4
16	0	0	0	92.5
17	0	0	0	90.4
18	0	0	0	91.7
19	0	0	0	90.3
20	0	0	0	91.4

2.2 模型建立与分析

2.2.1 模型建立

通过采用响应面CCD设计对试验结果进行拟合，可以得到烧结矿还原指数(Y)和$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$(X_1)、二元碱度(X_2)、$w(MgO)/w(Al_2O_3)$(X_3)的拟合方程：

$$Y = 90.86 - 1.57X_1 + 3.47X_2 - 2.46X_3 - 4.80X_1X_2 + 1.13X_1X_3 - 1.65X_2X_3 - 4.22X_1^2 - 7.49X_2^2 - 5.07X_3^2 \quad (7)$$

2.2.2 方差分析和显著性分析

采用方差分析确定二次回归模型的显著性以及因素的交互作用对烧结矿还原性的影响，方差分析结果见表5。试验设计得到的烧结矿还原性多项式模型中F值为144.43，模型的P值<0.0001，表明该回归方程是极其显著的，具有统计学意义。所建立的多元二次回归模型能够准确地预测烧结矿还原性，其中F值表示各个因素对还原指数的影响程度，P值表示预测值与试验值差异。P值中，$P<0.01$的项对Y影响极显著，$P<0.05$的项对Y影响显著，$P>0.05$的项对Y影响不显著[17-18]。不同因素的F值反映出不同因素对试验指标的影响程度，F值越大说明该因素对试验指标的影响越显著。其中，AB、AC和BC项表示两个自变量因素之间的交互作用，A^2、B^2和C^2为单因素自变量的二次项。结果表明，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$(A)、二元碱度(B)和$w(MgO)/w(Al_2O_3)$(C)对烧结矿还原性的影响均极显著，各因素对烧结矿还原性的影响程度：二元碱度 > $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ > $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$；在烧结矿还原性影响的交互作用方面，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$和二元碱度的影响最为显著，其次是二元碱度和$w(MgO)/w(Al_2O_3)$之间的交互作用影响，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$和$w(MgO)/w(Al_2O_3)$对还原性的影响最小。

表5 还原性回归模型方差分析

Table 5 Analysis of variance in the restoration regression model

方差来源	烧结矿还原性/%					
	平方和	自由度	均方差	F值	P值	显著性
模型	1701.76	9	189.08	144.43	<0.0001	极显著
A	33.54	1	33.54	25.62	0.0005	极显著
B	162.96	1	162.96	124.47	<0.0001	极显著
C	82.66	1	82.66	63.14	<0.0001	极显著
AB	184.32	1	184.32	140.79	<0.0001	极显著
AC	10.13	1	10.13	7.73	0.0194	显著
BC	21.78	1	21.78	16.64	0.0022	极显著
A^2	256.30	1	256.30	195.76	<0.0001	极显著
B^2	786.12	1	786.12	600.45	<0.0001	极显著
C^2	369.92	1	369.92	282.55	<0.0001	极显著
残差	13.09	10	1.31	—	—	—
失拟项	5.79	5	1.16	0.79	0.5971	不显著
纯误差	7.30	5	1.46	—	—	—
总和	1 714.85	19	—	—	—	—

2.2.3 回归方差的可信度分析

二次方程响应面模型对烧结矿还原性的拟合度(R^2)为0.9924，校正系数(R^2_{adj})为0.9855，预测值和实际值具有良好的拟合程度，表明建立的

还原指数优化模型拟合效果显著，回归方差的可信度分析见表 6。由表 6 可知，该模型具有较高的预测决定系数（R^2_{pred}）。精度比为 32.86 > 4，视为合理；变异系数为 1.44% < 10%，说明试验数据准确。建立的 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 优化烧结矿还原性响应面模型可靠。

表 6　还原性回归方差的可信度分析

Table 6　Reliability analysis of reducing regression variance

R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}	变异系数/%	精度比
0.992 4	0.985 5	0.967 8	1.44	32.86

注：精度比大于 4 视为合理，变异系数小于 10% 数据可靠[19]。

2.2.4　残差分析

残差是模型实际值与预测值之间的差值，用来检验模型是否相关、数据是否可靠以及残差是否满足正态分布等。残差分析如图 1 所示。

由图 1(a)可知，模型的内学生化残差未显示任何趋势，以随机方式分布，表明试验的假设是独立的。由图 1(b)可知，模型的内学生化残差正态分布概率图接近于一条直线，反映残差正态分布，证明了模型的正态性假设。图 1(c)为内学生化残差与还原性散点图，回归方程与试验数据拟合良好，不存在异常点。烧结矿还原指数试验值与预测值越靠近一条直线说明模型越稳定。由图 1(d)可知，该模型可以对烧结矿还原指数的影响因素进行阐述和说明。

2.2.5　单因素作用分析

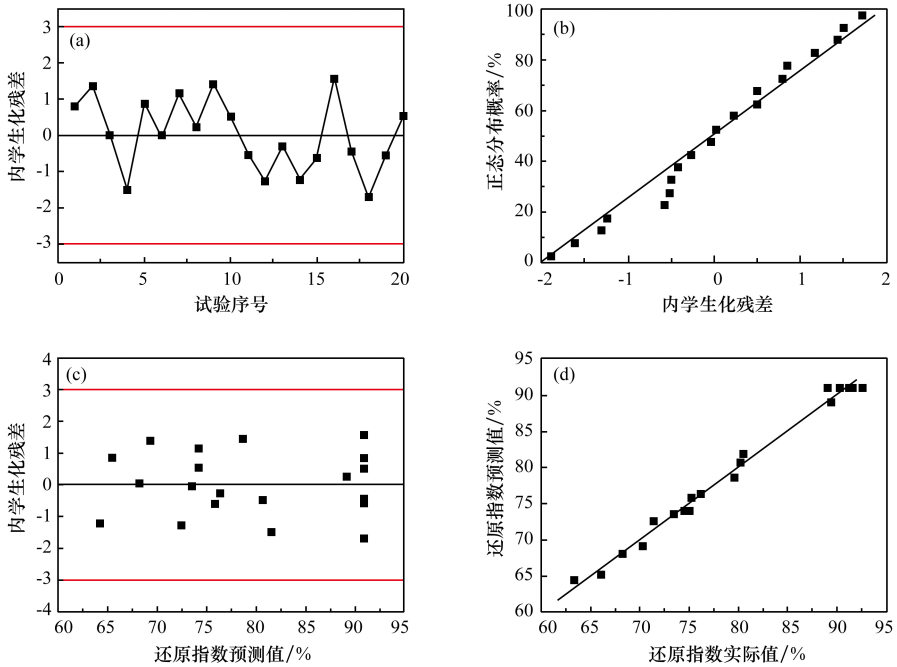
$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 单因素对烧结矿还原指数的影响见图 2。

由图 2 可知，以 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 为自变量，以烧结矿还原指数为响应值构建模型时，随自变量升高，烧结矿还原指数先升高后降低。对烧结矿还原指数的影响大小：二元碱度 > $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ > $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$，这与方差表的分析一致。

2.2.6　交互作用分析

$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 交互作用对烧结矿还原性影响的响应曲面图及等高线分别见图 3 ~ 图 5。

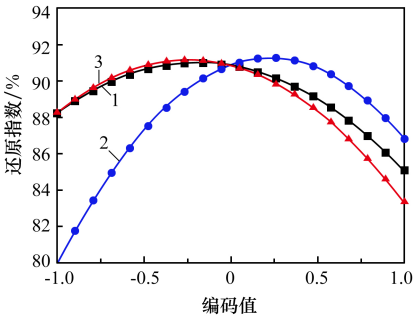
图 3 中，以 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 为 x 轴，以二元碱度为 y 轴，以还原指数为 z 轴绘制 3D 图。



（a）残差与试验序号关系；（b）残差正态分布概率；（c）残差与预测值关系；（d）实际值与预测值关系

图 1　还原指数残差分析

Fig. 1　Residual analysis of restoration index



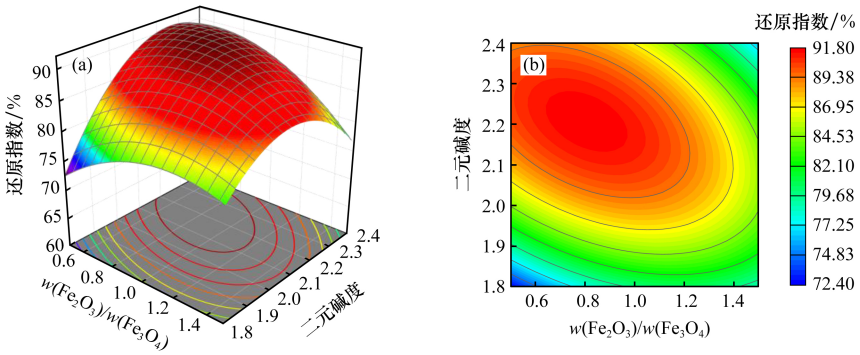
1—$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$；2—二元碱度；3—$w(MgO)/w(Al_2O_3)$。

图 2 单因素对还原指数的影响

Fig. 2 Effect of a single factor on the reduction index

由图 3(a)可知：当 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 和二元碱度在较低水平时，烧结矿还原指数变化较大；当二元碱度不变时，随着 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 的增加，烧结矿还原指数呈现先增加后快速下降的趋势。从图 3(b)可以看出(接近椭圆形)，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 和二元碱度交互作用极明显。这主要是因为结晶良好的赤铁矿和均匀分布的孔隙有效地提高了烧结矿的强度和还原性[20-21]。随着 SiO_2 含量的增加，烧结矿中被还原的 Fe_3O_4 含量降低，FeO 含量增加，SiO_2 与 FeO 产生的铁橄榄石渣相较多，铁橄榄石具有较差的还原性，并且烧结矿被液相填充后孔洞开始减少且尺寸变小，不利于还原性气体 CO 与铁氧化物接触，所以导致还原度下降[22-23]。

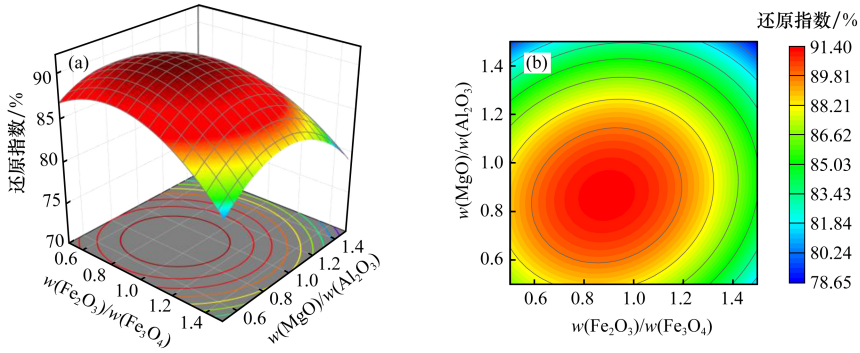
由图 4(a)可知，当 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 在较低水平时，烧结矿还原指数也处于较低值；且随着 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 逐渐增大到较大值时，烧结矿还原指数呈现先增大后减小的趋势。由等高线图 4(b)可知，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 之间的交互作用明显。这主要是因为不同镁铝比对复合铁酸钙生成有所影响，铁酸钙的形态由块状向针柱状发展，再由针状向柱状转变[24]。$w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 为一定范围时，烧结矿具有效果比较好的矿物组成，并且在这个时候具有比较好的铁酸钙组成[25-26]。



(a) 响应面；(b) 等高线

图 3 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 和二元碱度对烧结矿还原指数的影响

Fig. 3 Effect of $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ and alkalinity on sinter reduction index



(a) 响应面；(b) 等高线

图 4 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ 与 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 对烧结矿还原指数的影响

Fig. 4 Effect of $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ and $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ on sinter reduction index

因此，可以通过调节镁铝比来改变烧结矿的矿物组成，从而影响烧结矿的还原性。

由图 5(a)可知，烧结矿还原指数随着二元碱度增加而逐渐增大，且随着$w(MgO)/w(Al_2O_3)$增加，呈现先增大后减小的趋势；二元碱度的曲线变化较为陡峭，说明二元碱度对烧结矿还原指数的影响显著。由等高线图 5(b)可知，$w(MgO)/w(Al_2O_3)$和二元碱度之间的交互作用极显著。分析认为，适当提高烧结矿二元碱度可以提高铁酸钙含量，改善烧结矿显微结构和矿物组成，进而影响烧结矿冶金性能[27-28]。

2.3　最佳烧结条件

利用 Design-expert 软件对所得的编码值回归方程进行回归计算，得到烧结矿还原指数最大时的最佳原料配比：$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$为 0.76、二元碱度为 2.23、$w(MgO)/w(Al_2O_3)$为 0.82。原料成分配比优化还原指数的最佳结果可以通过响应面分析的结果进行预测，预测值与试验值见表 7。

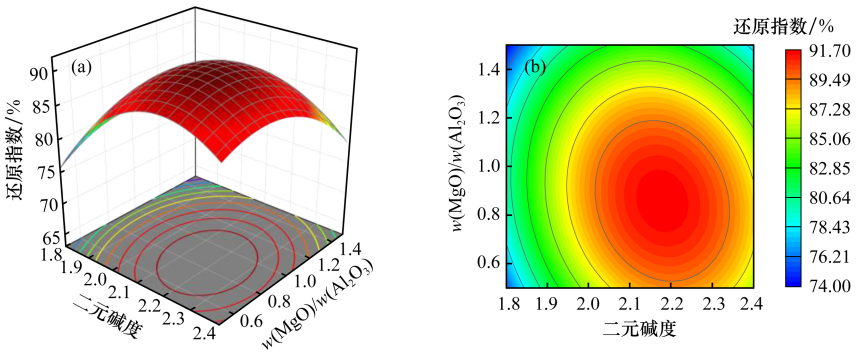
由表 7 可知，最佳原料配比下烧结矿还原指数预测值为 92.41%，试验值为 92.1%，误差较小，表明由响应面设计优化还原指数具有一定的可行性。

表 7　预测值与试验值参数表

Table 7　Predictive value and experimental parameter table

$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$	二元碱度	$w(MgO)/w(Al_2O_3)$	预测值/%	试验值/%
0.76	2.23	0.82	92.41	92.1

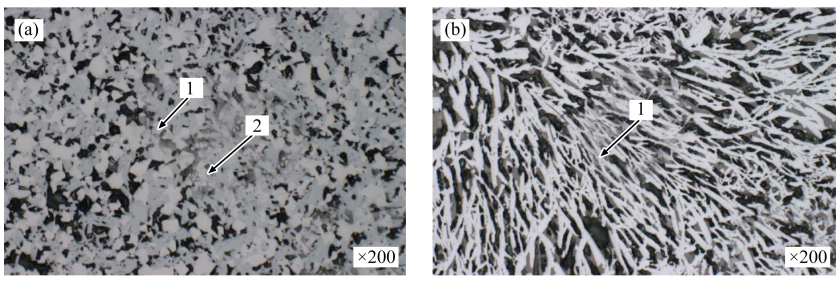
在最佳原料成分配比条件下，试验得到烧结矿矿相结构特征如图 6 所示。由图 6 可知：烧结矿中金属相以磁铁矿为主，主要被他形铁酸钙胶结成熔蚀结构[图 6(a)]；赤铁矿含量较少。铁酸钙为主要黏结相矿物，含量较高，主要呈他形，局部可见大量针状铁酸钙集中分布[图 6(b)]；此外，矿物中硅酸二钙含量较少，玻璃质呈无定型，气孔分布均匀，以不规则状小气孔为主，裂隙较不发育。可见，此烧结条件下，烧结矿中针状铁



（a）响应面；（b）等高线

图 5　二元碱度与 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 对烧结矿还原指数的影响

Fig. 5　Effect of alkalinity and $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ on sinter reduction index



1—铁酸钙；2—磁铁矿。

（a）熔蚀结构；（b）针状铁酸钙

图 6　烧结矿矿相结构特征

Fig. 6　Structural characteristics of the sinter ore phase

酸钙含量较多，显微结构较好，还原性最佳，与预测情况相符。

3 结 论

（1）以 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$、二元碱度和 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 为影响因素，烧结矿还原指数为响应值建立的 CCD 设计模型极显著（$P<0.01$），失拟项不显著（$P>0.05$），模型的拟合度 R_2 值和校正系数 R_2adj 分别为 0.992 4 和 0.985 5，表明回归拟合程度较好；方差可信度分析中模型的合理性、稳定性和可信度良好；残差分析中模型相关性、数据可靠性和残差正态性均较好。

（2）三个自变量对烧结矿还原指数的影响显著程度大小：二元碱度 > $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ > $w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$，三个自变量中任意两个因素之间的交互作用都影响显著。

（3）通过响应面法 CCD 设计预测得到烧结矿还原指数最优时的原料配比：$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_4)$ = 0.76、二元碱度 = 2.23、$w(MgO)/w(Al_2O_3)$ = 0.82，最佳还原指数为 92.41%，与试验值 92.1% 基本一致。在此烧结条件下，烧结矿中针状铁酸钙含量较多，显微结构较好，还原性最佳，验证了采用响应面法 CCD 设计对还原指数进行优化的可行性。

参考文献：

[1] 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.

[2] 王兴建,孙长余,孟凡俭,等. 不同碱度和 Al_2O_3 质量分数烧结矿还原行为的研究[J]. 辽宁科技大学学报,2021,44(2):81－84,.
WANG Xingjian, SUN Changyu, MENG Fanjian, et al. Study on reduction behaviors of sinters with different basicities and Al_2O_3 contents[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning,2021,44(2):81－84.

[3] 潘向阳,龙跃,李神子,等. MgO/Al_2O_3 对烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁钒钛,2019,40(4):100－105.
PAN Xiangyang, LONG Yue, LI Shenzi, et al. Effect of MgO/Al_2O_3 on metallurgical properties of sinter[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2019,40(4):100－105.

[4] 余骏,孟飞,陈生利,等. FeO 含量对烧结矿冶金性能影响研究[J]. 矿业工程,2021,19(5):41－45.
YU Jun, MENG Fei, CHEN Shengli, et al. Study on the influence of FeO content on the metallurgical properties of sinter[J]. Mining Engineering,2021,19(5):41－45.

[5] 曹跃,王雅琳,何海明,等. Canopy-Kmeans 聚类和组合优化的铁矿预配料智能调度[J]. 控制理论与应用,2017,34(7):947－955.
CAO Yue, WANG Yalin, HE Haiming, et al. Intelligent scheduling in pre-burdening of iron ore: Canopy-kmeans clustering algorithm and combinatorial optimization[J]. Control Theory & Applications,2017,34(7):947－955.

[6] 廖东,郑兆颖,邢相栋,等. 基于变量聚类分析的烧结矿还原性能预测模型[J]. 鞍钢技术,2023(5):17－23.
LIAO Dong, ZHENG Zhaoying, XING Xiangdong, et al. Prediction model for reducibility of sintered ore based on variable cluster analysis[J]. Angang Technology, 2023(5):17－23.

[7] 王庆顺,杨军. 炼铁烧结配矿优化模型及其应用分析[J]. 冶金管理,2021(21):1－2.
WANG Qingshun, YANG Jun. Optimization model of iron-making sintering ore blending and its application analysis[J]. China Steel Focus,2021(21):1－2.

[8] 孙志莹,施正贤,申明廷. 基于响应面法的柱形壳内高压胀形工艺优化[J]. 锻压技术,2023,48(10):95－101
SUN Zhiying, SHI Zhengxian, SHEN Mingting. Optimization on internal high-pressure bulging process for cylindrical shell based on response surface method[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(10):95－101.

[9] 王哲,王灵娟,杨静,等. 响应面法优化冷冻鸡血豆腐的制备工艺[J]. 食品工业科技,2024,45(8):247－253.
WANG Zhe, WANG Lingjuan, YANG Jing, et al. Response surface method optimizes the preparation process of frozen chicken blood tofu[J]. Science and Technology of Food Industry,2024,45(8):247－253.

[10] 翟红旭,尹泽希,孙希云,等. 响应面法优化草莓混合凝胶 3D 打印配方[J]. 食品工业科技,2024,5(9):147－158.
ZHAI Hongxu, YIN Zexi, SUN Xiyun, et al. Strawberry

mixed gel 3D printing formula optimization[J]. Science and Technology of Food Industry,2024,45(9):147 – 158.

[11] 包国营,刘磊,韩秀丽,等. 基于 $RDI_{+3.15\ mm}$ 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 $RDI_{+3.15\ mm}$ response surface methodology[J]. Iron & Steel,2023,58(1):31 – 38.

[12] 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.

[13] 包国营. 基于响应面法的烧结原料配矿优化研究[D]. 唐山:华北理工大学,2023.
BAO Guoying. Optimization of sintering raw material blending based on response surface method[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2023.

[14] 占玉林,许江辉,许俊,等. 基于响应面法和粒子群算法的桥梁高耸临时提升支架优化[J]. 中国铁道科学,2022,43(6):39 – 46.
ZHAN Yulin,XU Jianghui,XU Jun,et al. Optimization of bridge high temporary lifting support based on response surface method and particle swarm algorithm[J]. China Railway Science,2022,43(6):39 – 46.

[15] 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.

[16] 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.
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.

[17] 樊红波,刘惠娟,辛斌全,等. 中心组合设计法响应面法优化宣肺解毒胶囊填充工艺[J]. 中医临床研究,2022,14(3):17 – 19.
FAN Hongbo, LIU Huijuan, XIN Binquan, et al. Optimization of the capsule filling process of Xuanfei Jiedu capsule with central composite design-response surface method[J]. Clinical Journal of Chinese Medicine,2022,14(3):17 – 19.

[18] 金磊,朱景超,张泽宇,等. 中心复合设计响应面法优化山茱萸山药果冻制备工艺的研究[J]. 中国现代应用药学,2021,38(4):385 – 390.
JIN Lei,ZHU Jingchao,ZHANG Zeyu,et al. Optimization of cornus officinalis-yam jelly production process by central composite design response surface methodology[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy,2021,38(4):385 – 390.

[19] 严伟. 基于响应面法的冷板微通道散热性能优化研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
YAN Wei. Research on thermal performance optimization of microchannel based on response surface method[D]. Changchun:Jilin University,2020.

[20] 张浩. 烧结工艺对白云鄂博铁精矿预还原烧结矿组成结构与气化脱磷的影响[D]. 包头:内蒙古科技大学,2021.
ZHANG Hao. Effect of sintering process on composition struction and gasification dephosphorization of pre-reduction sinter from Bayan Obo iron concerntrate[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2021.

[21] HUANG Z C,YI L Y,JIANG T,et al. Hot airflow ignition with microwave heating for iron ore sintering[J]. ISIJ International,2012,52(10):1750 – 1756.

[22] 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.
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.

[23] 李金莲,任伟,童晓宇,等. 铁焦中铁氧化物还原特性的研究[J]. 鞍钢技术,2016(5):13 – 16.
LI Jinlian, REN Wei, TONG Xiaoyu, et al. Study on reduction characteristics of iron oxide in ferrocoke[J]. Angang Technology,2016(5):13 – 16.

[24] 胡长庆,闫龙飞,张国柱,等. MgO/Al_2O_3 对复合铁酸钙显微形貌和显微硬度的影响[J]. 烧结球团,2018,43(2):14 – 19.
HU Changqing, YAN Longfei, ZHANG Guozhu, et al. Effect of MgO/Al_2O_3 on microscopic structure and micro-hardness of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA)[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(2):14 – 19.

（下转第 18 页）

Science and Technology,2020.

[11] LIU S Y,FENG J B,ZHANG Q,et al. A real-time smoke and fire warning detection method based on an improved YOLOv5 model[C]//2022 5th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence. Piscataway:IEEE,2022:728 – 734.

[12] 王月明,李世翔,翟容清,等. 基于YOLOv3算法的烧结厂台车算条缺失检测研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):30 – 34.
WANG Yueming, LI Shixiang, ZHAI Rongqing, et al. Research on detection of missing trolley grate bars in sintering plant based on YOLOv3 algorithm[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):30 – 34.

[13] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7:Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway:IEEE,2023:7464 – 7475.

[14] JIANG P Y,ERGU D J,LIU F Y,et al. A review of yolo algorithm developments[J]. Procedia Computer Science,2022,199:1066 – 1073.

[15] DING X H, ZHANG X Y, MA N N, et al. RepVGG: Making VGG-style ConvNets great again[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway:IEEE,2021:13728 – 13737.

[16] JEONG E,KIM J,HA S. TensorRT-based framework and optimization methodology for deep learning inference on jetson boards[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems,2022,21(5):1 – 26.

[17] 王伟伟,项世珍,董盛鹏,等. PAL视频监控系统实时性分析和优化[J]. 计算机应用,2021,41(S2):330 – 334.
WANG Weiwei, XIANG Shizhen, DONG Shengpeng, et al. Real-time analysis and optimization of PAL video monitoring system[J]. Journal of Computer Applications,2021,41(S2):330 – 334.

(上接第9页)

[25] 王喆,张建良,左海滨,等. MgO/Al_2O_3 比对烧结矿矿物组成及冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2013,38(5):1 – 4.
WANG Zhe, ZHANG Jianliang, ZUO Haibin, et al. Influence of MgO/Al_2O_3 ratio on sinter mineral composition and metallurgical properties[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(5):1 – 4.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 汪正杰,甘敏. CaO和SiO_2对烧结矿产质量的影响[J]. 烧结球团,2014,39(6):12 – 16.
WANG Zhengjie,GAN Min. Effects of CaO and SiO_2 on the quality and yield of sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(6):12 – 16.