钢渣配入烧结的工艺参数试验及响应曲面法优化

杨双平，王玉萍，高文彬，李江菡
(西安建筑科技大学，冶金工程学院，陕西 西安 710055)

摘要：为了优化钢渣配入烧结的最佳工艺参数，本文对钢渣及烧结原料进行性能分析，通过烧结试验研究碱度、抽风负压、配碳量和钢渣配加量对烧结参数与烧结矿质量的影响作用，同时采用响应曲面法对最佳钢渣配比及烧结参数进行优化。结果表明：在 Design Expert 模拟下，通过方差分析得到对烧结矿冶金性能影响程度较大的 4 个因素，其从大到小依次为烧结矿碱度、钢渣配比、烧结负压、燃料配比，优化后的烧结参数：碱度为 1.85，钢渣配比为 7.5%，烧结负压为 8.9 kPa，配碳量为 3.8%；在模拟最优条件下进行烧结矿质量检验，其还原性为 77.2%，低温还原粉化性为 73.4%，转鼓强度为 71.6%，烧结矿冶金质量符合高炉冶炼的需求。

关键词：钢渣；烧结；Design Expert 模拟；优化研究；冶金性能
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)04－0025－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.050

Process parameter test and response surface method optimization of steel slag blending into sintering

YANG Shuangping, WANG Yuping, GAO Wenbin, LI Jianghan
(*School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an* 710055, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In order to optimize the optimal process parameters of steel slag blending into sintering, the properties of steel slag and sintering raw materials are analyzed; the effect of alkalinity, suction negative pressure, proportions of carbon and steel slag addition on sintering parameters and sinter quality is studied through sintering test, and the optimal steel slag ratio and sintering parameters are optimized by the response surface method. The results show that, under the Design Expert simulation, 4 factors with greater influence on the metallurgical performance of sinter are obtained through ANOVA, including sinter alkalinity, steel slag ratio, sintering negative pressure and fuel ratio from large to small, and the optimized sintering parameters are: alkalinity is 1.85, steel slag ratio is 7.5%, sintering negative pressure is 8.9 kPa, and carbon allocation is 3.8%. Under the simulated optimal conditions, the quality inspection of sinter is 77.2%, the low-temperature reduction chalkability is 73.4%, the bowl strength is 71.6%, and the metallurgical quality of sinter meets the needs of blast furnace smelting.

Key words: steel slag; sintering; Design Expert simulation; optimization research; metallurgical properties

冶金工业生产中会积蓄大量的固体废料，而钢渣作为钢铁工业冶炼过程中的必然产物，主要来源于造渣工艺中的渣料，其所含成分包括氧化镁、氧化钙、二氧化硅等[1－4]。近年来，随着我国对环境资源保护和节能减排的重视程度日益增高，企业想要提高核心竞争力的重要

收稿日期：2021－08－18；**修回日期**：2021－12－21
基金项目：陕西省四主体一联合电炉工程平台创新项目(Z20200233)
作者简介：杨双平(1967—)，男，教授，从事炼铁新技术方面的研究。
通信作者：王玉萍(1997—)，女，硕士研究生，从事冶金节能与资源综合利用方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

途经之一就是通过降低烧结过程中的能耗，并降低生产成本[5]。作为烧结熔剂的石灰，其开采不但会造成土地资源破坏造成地质灾害频发，还会污染水资源破坏生态平衡[6]。因此提升钢渣的使用率，降低石灰资源挖掘对环境系统的影响，是促进冶金行业稳定绿色化发展的关键举措。

钢渣的成分与烧结熔剂类似[7-9]，在烧结过程中混入部分钢渣代替石灰，不仅可以节约石灰的使用量，还可以最大限度实现钢渣中氧化铁、氧化锰的回收二次利用[10-11]。张俊等[12]为了提高熔炼渣的利用率和经济性，提出通过泡沫化改善粒化工艺得到合理的钢渣成分和组织，为熔渣利用难题提供了思路。戎玉萍等[13]利用太钢转炉钢渣进行烧结试验研究，结果表明：向烧结配加4%~5%的钢渣最佳，且配加钢渣不会造成磷富集而使生铁含磷超标，1 t钢渣可节约成本12.27元，经济效益可观。

本文在烧结料中配入一定量的钢渣，通过试验分析钢渣作为熔剂后烧结矿的冶金性能，研究各参数对烧结矿冶金性能的影响程度，并采用响应曲面法设计方案进行优化试验，最终得到最优的烧结工艺指标，以期可为实际生产中钢渣替代熔剂(石灰、生石灰)实现资源的合理利用，并精确控制烧结工艺参数提供理论支撑。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用的铁精矿粉、转炉钢渣和焦粉的化学成分如表1所示，钢渣粒度组成如表4所示。试验设备为SJ-150烧结杯、MK-2000转鼓机。

表1 试验原料的主要化学组成(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw material %

原料名称	TFe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	S	P	MnO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2
铁精矿	58.20	8.02	—	2.14	0.17	0.62	0.005 8	0.088	—	5.99	—	—	—	1.07
钢渣	19.20	—	8.64	12.48	47.67	7.58	—	—	3.34	1.35	—	—	0.48	—
焦粉	—	—	8.64	25.37	13.45	1.67	—	—	—	6.74	0.51	1.39	0.29	0.81

由表1可知，钢渣中氧化钙和氧化镁的质量分数较高，分别为47.67%和7.48%，它们在烧结试验中能够改善烧结矿质量，因此钢渣可以替代部分石灰用于烧结。钢渣磁选粉中P_2O_5质量分数为0.48%，生产中其配比随着铁精粉中P的质量分数增加而减小。根据铁精粉中P质量分数的高低，在满足实际高炉入炉料P的要求后，试验将钢渣配比定在4%~12%。由表2可知，钢渣的+0.075 mm粒级占比为97.34%，基本满足要求。

表2 钢渣的粒度组成(质量分数)

Table 2 Grain size composition of steel slag %

<0.038 mm	0.038 ~0.048 mm	0.048 ~0.074 mm	0.074 ~0.120 mm
2.66	8.49	7.46	81.39

1.2 试验方法

试验选用单因素变量法，确定烧结碱度、烧结负压、烧结配碳量以及钢渣配比对烧结矿冶金性能的影响水平来进行烧结杯试验，烧结杯尺寸为∅300 mm×500 mm，料层厚度为400 mm，其内配返矿配比为18%，每次装料40 kg，点火时长为3 min，水分控制在8%~10%。试验将烧结烟气达到最高温度后开始降低时的温度视为烧结终点温度，对不同参数下烧结矿冶金性能进行测试，并根据软件中Box-Behnken原理设计[15]试验方案，并对试验结果与模拟结果进行拟合优化分析，创建响应曲面图，最终获到最优的烧结参数。

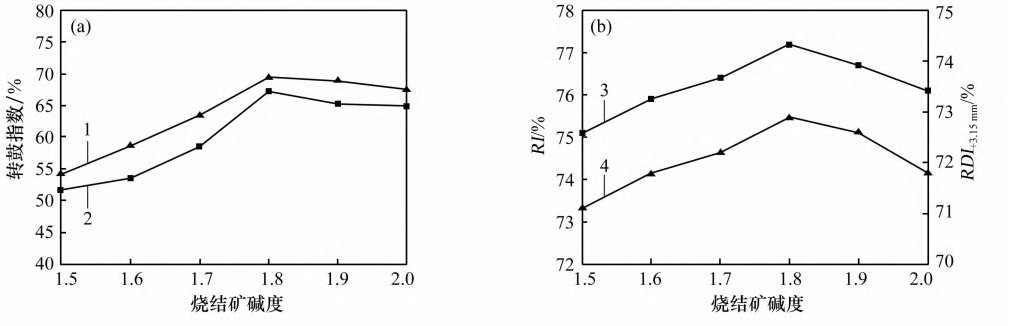
2 结果与讨论

2.1 单因素作用对烧结矿冶金性能的影响

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.1.1　碱度对烧结矿冶金性能的影响

由于烧结矿的碱度不同，其矿相组成也不同，伴随着碱度的增加，铁酸钙、硅酸钙质量分数会逐渐增多，磁铁矿被固结形成熔蚀结构和粒状结构，因此适当地提高烧结矿的碱度，有利于烧结矿强度的提高。本文在配碳量为4%，烧结负压为9 kPa，钢渣配比为8%的基础上，探究碱度对烧结矿冶金性能的影响规律，其结果如图1所示。



(a) 转鼓强度；(b) 碱度

1—配加8%钢渣；2—未配加钢渣；3—*RI*；4—$RDI_{+3.15\ mm}$。

图1　碱度对烧结矿冶金性能的影响

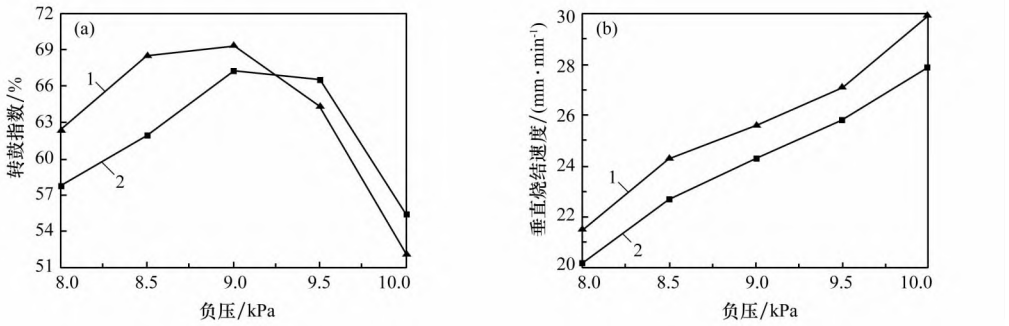
Fig. 1　Effece of alkalinity on the metallurgical properties of sinter

由图1可知：当碱度从1.5上升到2.0时，配加8%钢渣的烧结矿转鼓强度普遍高于未配加钢渣烧结矿的转鼓强度；当碱度为1.8时转鼓强度最优，其中未配钢渣的烧结矿与配加8%钢渣烧结矿的转鼓强度分别为67.2%和69.3%；烧结矿的*RI*和$RDI_{+3.15\ mm}$伴随着碱度的增加，均呈现出先上升后减小的趋势，其中配加钢渣的烧结矿*RI*和$RDI_{+3.15\ mm}$指标最高分别为77.2%和72.9%，随后碱度逐渐增大，烧结矿冶金性能均呈缓慢下降趋势。

2.1.2　烧结负压对烧结矿冶金性能的影响

由于烧结负压对于烧结矿质量有着一定程度的影响，负压过大则会使转鼓强度降低，从而减少了烧结矿的成品效益，究其原因主要还是由于负压太高，烧结料各个组分之间没有提供足够的空隙进行互相黏结，导致烧结矿强度下降。所以本文在碱度为1.8，配碳量为4%，钢渣配比为8%的基础上，研究烧结负压对烧结矿冶金性能影响规律，其结果如图2所示。

由图2(a)可知，当烧结抽风负压为9.0 kPa时，未配钢渣和配加8%钢渣的烧结矿转鼓强度均达到最高值，分别为67.2%和69.3%。结合图2(b)分析可知，垂直烧结速度随着抽风负压的增加而加快，当烧结负压小于9.0 kPa



(a) 转鼓强度；(b) 还原性

1—配加8%钢渣；2—未配加钢渣。

图2　烧结负压对烧结矿冶金性能的影响

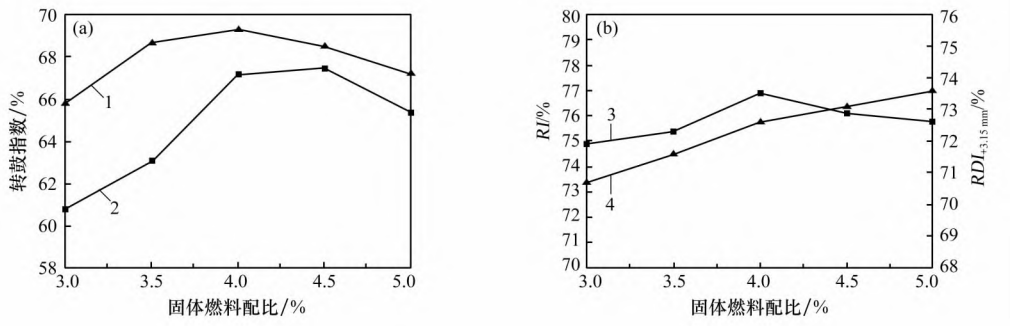
Fig. 2　The influence of negative pressure on the metallurgical properties of sinter

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时，抽风负压的升高对转鼓强度的增加起正向作用；当烧结抽风负压大于9.5 kPa时，抽风负压过大致使烧结风量增大，垂直烧结速度加快，最终烧结混合料之间没有充足的时间进行物理化学反应，产生数量不足的黏性液相导致烧结不够充分，使得转鼓强度降低。

2.1.3 配碳量对烧结矿冶金性能的影响

烧结燃料对烧结矿质量和供需能耗影响较大，燃料使用量过高，烧结矿强度提高的同时供需能耗增大，这样会增加烧结的成本；燃料使用量过低，烧结矿的强度降低，供需能耗降低，虽然烧结的生产成本降低，但是烧结矿的质量也同时降低。所以烧结过程中要根据原燃料的情况来确定合适的配碳量。本文在碱度为1.8，烧结负压为9 kPa，钢渣添加量为8%时，研究配碳量对烧结矿冶金性能的影响规律，结果如图3所示。由图3可知：烧结矿还原性随配碳量的增加呈现先增高后降低的趋势，当配碳量为4%时，此时添加钢渣的烧结矿转鼓强度最高值为69.3%，还原性最高为76.9%。



(a) 转鼓强度；(b) 还原性能

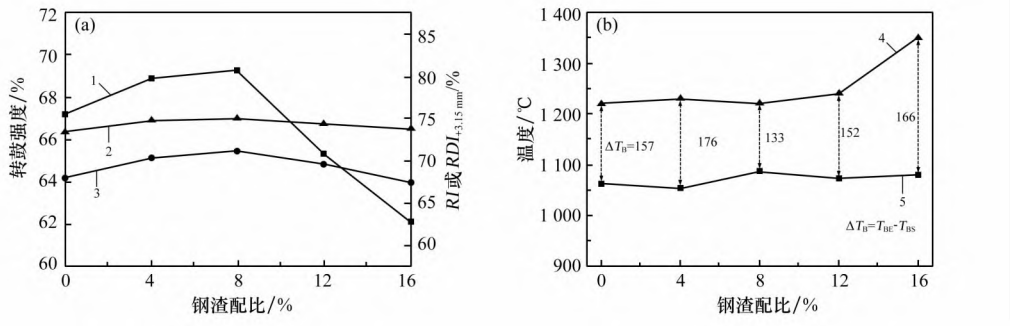
1—配加8%钢渣；2—未配加钢渣；3—RI；4—$RDI_{+3.15\ mm}$。

图3 配碳量对烧结矿冶金性能的影响

Fig. 3 Effects of carbon content on the metallurgical properties of the sintered ore

2.1.4 钢渣配加量对烧结矿冶金性能的影响

钢渣代替部分石灰不但能够节约烧结时石灰的使用量，还能够充分利用钢渣表面凹凸不平的特点，使烧结料层间的间隙增大，有利于烧结的顺行。本文在烧结燃料配比为4%，碱度为1.8，抽风负压为9 kPa时，研究钢渣添加量对烧结矿冶金性能和软化始末温度的影响，结果如图4所示。由图4可知，烧结矿转鼓强度随着钢渣配比的增加，呈现先逐渐升高后下降的趋势，当钢渣配比为8%时，烧结矿转鼓强度最高可达69.3%，RI为77.1%，$RDI_{+3.15\ mm}$为71.1%，在最佳钢渣配比下该矿的软化温度区间为133 ℃。



(a) 冶金性能；(b) 软化温度

1—转鼓强度；2—RI；3—$RDI_{+3.15\ mm}$；4—T_{BE}(终了软化温度)；5—T_{BS}(开始软化温度)。

图4 钢渣配加量对烧结矿冶金性能和烧结软化始末温度的影响

Fig. 4 Effects of steel slag dosage on metallurgical properties of sinter and sinter softening start and end temperatures

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2　响应曲面法优化烧结配比试验

参考上述试验结果，采用响应曲面法对烧结工艺过程进行优化试验，试验参数方案设计、试验设计结果分别如表 3、4 所示。依据表 4 中的设计结果数据，建立二次数学模型并对其进行回归性拟合与方差分析，分析结果如表 5 所示。

表 3　试验参数方案设计

Table 3　Scheme design of test parameter

参数名称	编号	水平		
		−1	0	1
配碳量/%	X_1	3.5	4.0	4.5
碱度	X_2	1.7	1.8	1.9
抽风负压/kPa	X_3	8.5	9.0	9.5
钢渣配比/%	X_4	4.0	8.0	12.0

表 4　响应曲面试验设计和结果

Table 4　Response surface test design and results

编号	配碳量(X_1)/%	碱度(X_2)	抽风负压(X_3)/kPa	钢渣配比(X_4)/%	转鼓强度(R)/%
1	4.5	1.8	8.5	8.0	63.1
2	4.5	1.9	9.0	8.0	68.3
3	4.0	1.9	9.0	4.0	68.3
4	4.5	1.8	9.5	8.0	64.5
5	4.0	1.8	8.5	4.0	63.3
6	4.0	1.9	9.0	12.0	65.9
7	4.0	1.8	9.0	8.0	69.3
8	4.0	1.8	9.5	4.0	63.9
9	4.0	1.8	9.0	8.0	70.2
10	4.5	1.8	9.0	12.0	63.4
11	3.5	1.7	9.0	8.0	62.5
12	4.0	1.7	9.5	8.0	59.2
13	4.5	1.8	9.0	4.0	67.0
14	4.0	1.7	9.0	4.0	61.9
15	3.5	1.8	8.5	8.0	68.7
16	4.0	1.8	9.5	12.0	59.3
17	4.0	1.7	8.5	8.0	61.8
18	4.0	1.9	9.5	8.0	64.3
19	4.0	1.8	9.0	8.0	67.9
20	4.0	1.8	9.0	8.0	68.5
21	4.0	1.9	8.5	8.0	66.6
22	4.5	1.7	9.0	8.0	63.2
23	4.0	1.8	8.5	12.0	64.3
24	4.0	1.8	9.0	8.0	71.2
25	4.0	1.7	9.0	12.0	59.1
26	3.5	1.9	9.0	8.0	68.5
27	3.5	1.8	9.0	4.0	67.2
28	3.5	1.8	9.5	12.0	64.1
29	3.5	1.8	9.5	8.0	62.2

表 5　方差分析结果

Table 5　Variance analysis results

组合	自由度	平方和	均方和	F 值	P 值
模型	14	303.270	21.660	26.450	<0.000 1
X_1	1	1.140	1.140	1.390	0.257 6
X_2	1	97.470	97.470	119.000	<0.000 1
X_3	1	17.280	17.280	21.100	0.000 4
X_4	1	20.020	20.020	24.440	0.000 2
X_1X_2	1	0.200	0.200	0.250	0.626 8
X_1X_3	1	15.600	15.600	19.050	0.000 6
X_1X_4	1	0.063	0.063	0.076	0.786 4
X_2X_3	1	0.022	0.022	0.027	0.870 7
X_2X_4	1	0.040	0.040	0.049	0.828 3
X_3X_4	1	7.840	7.840	9.570	0.007 9
X_1^2	1	7.350	7.350	8.970	0.009 7
X_2^2	1	47.340	47.340	57.800	<0.000 1
X_3^2	1	91.300	91.300	111.460	<0.000 1
X_4^2	1	56.030	56.030	68.410	<0.0001

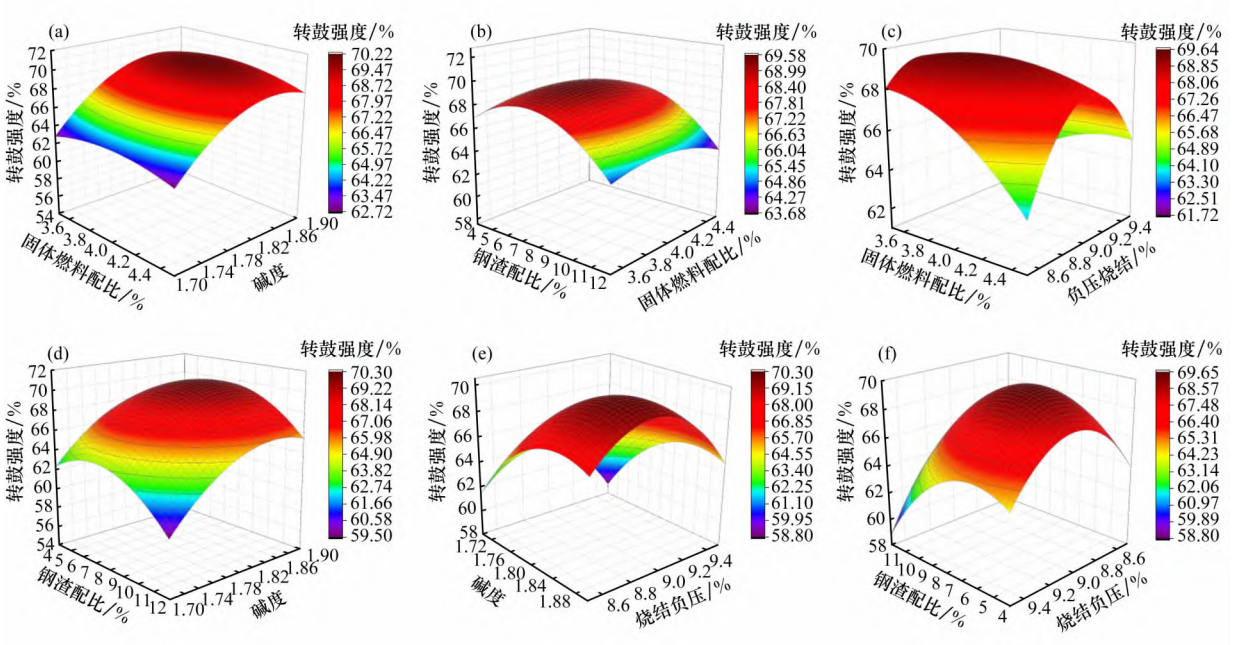
注：F 值指组间均方与组内均方之间的绝对比值；P 值指相应 F 值下的概率值。

当二次模型中的 P 值 <0.000 1 时，模型的拟合效果好，具有重要的统计价值[14]；当 P 值小于 0.05 时，该模型影响显著[15]。综合以上分析可知，各因素对烧结矿转鼓强度的影响程度从大到小依次为烧结矿碱度、烧结钢渣配加量、烧结负压、烧结配碳量。

各参数交互作用下对转鼓强度影响的响应曲面图如图 5 所示。在 3D 响应曲面图中，曲面的斜率越大，说明两种因子的交互影响的程度越大，结果越显著，反之越小[17]。由图 5 可知，响应曲面中(c)、(f)的曲面斜率较大，坡

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度整体较陡，结合方差分析结果可以说明：烧结负压和烧结配碳量之间的交互影响与烧结负压和钢渣配加量之间的交互影响均较为显著，而其他因素之间的交互影响不显著。

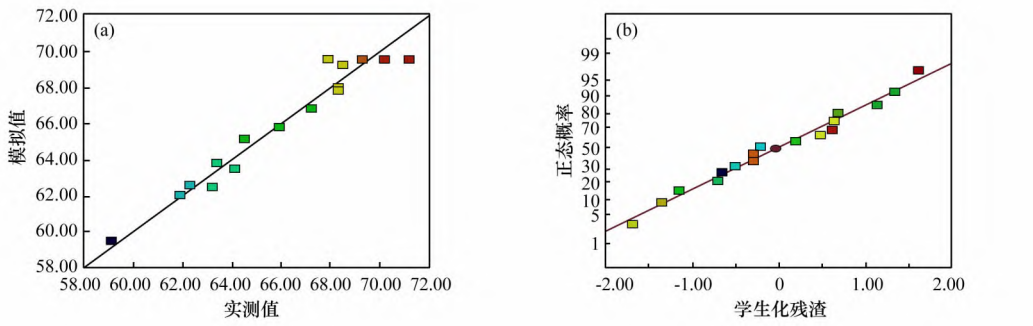


(a) 碱度与配碳量；(b) 钢渣配比与配碳量；(c) 负压与配碳量；(d) 碱度与负压；(e) 碱度与钢渣配比；(f) 负压与钢渣配比

图 5 各参数对转鼓强度影响的响应曲面分析

Fig. 5 Response surface plot of the influence of various parameters on the drum strength

烧结矿转鼓强度试验结果与模拟值对比、学生化残差正态分布如图 6 所示。由图 6(a) 可知，试验实测结果与模拟预测值紧临直线两侧，表明响应曲面分析所选的模型中实测值与预测值的相似度很高[16]。由图 6(b) 可知，残差数据点与正态分布的数据点基本吻合，表明系统误差很小。综上所述，模型用于优化和预测烧结矿转鼓强度是合理准确的[17]。



(a) 实测值与模拟值对比；(b) 学生化残差分布

图 6 烧结矿转鼓强度模拟数据分析

Fig. 6 Analysis chart of sinter drum strength simulation data

3 试验验证

采用 Design Expert 软件中的优化模块(Optimization)计算得到最佳烧结条件：配碳量为 3.79%，烧结矿碱度为 1.85，抽风负压为 8.88 kPa，钢渣配加量为 7.42%，在此最优组合下烧结矿转鼓强度为 71.8%。为了验证响应曲面模型优化后的烧结工艺，结合实验室现有条件，最佳烧结条件：烧结配碳量为 3.8%，烧结矿碱度为 1.85，烧结抽风负压为 8.9 kPa，钢渣配加量为 7.5%。在此条件下重复进行 3 次烧结试验取平均值，冶金性能检测结果如表 7 所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 7　最佳烧结条件下的烧结矿冶金性能

Table 7　Metallurgical properties of sinter under optimal sintering conditions

RI/%	$RDI_{+3.15\ mm}$/%	T_{BS}/℃	T_{BE}/℃	ΔT_B/℃	转鼓强度/%
77.2	73.4	1 087	1 220	133	71.6

由表 7 可知，验证试验得到烧结矿的转鼓强度达到 71.6%，还原度为 77.2%，还原性较好；低温还原粉化性能为 73.4%，软化初始温度为 1 087 ℃，终了软化温度为 1 220 ℃，软化区间为 133 ℃。综上分析可知，采用优化后的烧结参数生产的烧结矿冶金质量得到了改善，可以满足高炉冶炼要求。

4　结　论

(1) 通过单因素试验得到最优烧结区间：烧结负压为 8.5 ~ 9.5 kPa，配碳量为 3.5% ~ 4.5%，烧结碱度为 1.7 ~ 1.9，钢渣配加量为 4% ~ 12%。

(2) 通过响应曲面法软件建立模型，结合响应曲面分析得到对烧结矿转鼓强度影响显著性的 4 个因素：烧结矿碱度 > 钢渣配比 > 烧结负压 > 配碳量，其中对烧结矿转鼓强度影响较显著的交互作用组合为烧结配碳量和抽风负压以及抽风负压和钢渣配比。

(3) 通过响应曲面法模拟计算得到烧结矿转鼓强度为 71.8% 时的最佳烧结工艺参数：配碳量为 3.8%，烧结矿碱度为 1.85，烧结负压为 8.9 kPa，钢渣配比为 7.5%。在最优烧结工艺参数基础下进行验证性试验，得到优化后的烧结矿转鼓强度为 71.6%，误差为 0.27%，表明响应曲面法对烧结工艺优化具有较好的预测性。

参考文献：

[1] ZHENG Q. Review of resource utilization technology of steel slag and carbon capture utilization [J]. E3S Web of Conferences, 2020: 218(3 - 4): 01033.

[2] 杨素洁，张冰，杨亚东，等. 钢渣综合利用现状研究 [J]. 化工矿物与加工，2021，50(4)：31 - 35.
YANG Sujie, ZHANG Bing, YANG Yadong, et al. Research on comprehensive utilization of steel slag [J]. Chemical minerals and processing, 2021, 50(4): 31 - 35.

[3] 孙业长，代梦博，罗邦曹，等. 激发剂强化钢渣磁选尾渣胶凝活性的研究 [J]. 烧结球团，2021，46(1)：8 - 13；22.
SUN Yechang, DAI Mengbo, LUO Bangcao, et al. Research on cementitious activity of steel slag tailings after magnetic separation by activator [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 8 - 13; 22.

[4] 杜传明，于耀辉，袁磊，等. 钢渣中磷分离及回收的研究现状和发展趋势 [J]. 钢铁，2020，55(12)：1 - 9.
DU Chuanming, YU Yaohui, YUAN Lei, et al. Research status and development trend of phosphorus separation and recovery from steelmaking slag [J]. Iron and Steel, 2020, 55(12): 1 - 9.

[5] 李乾坤. 影响武钢烧结矿质量的工艺因素试验研究 [D]. 武汉：武汉科技大学，2017.
LI Qiankun. Experimental study on process factors affecting WISCO sintering quality [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2017.

[6] 杨东杰，吴海林. 石灰石矿山开采对生态环境的影响及生态保护措施 [J]. 城市建设理论研究(电子版)，2015(9)：3692 - 3693.
YANG Dongjie, WU Hailin. The impact of limestone mining on the ecological environment and ecological protection measures [J]. Theoretical Research on Urban Construction (Electronic Edition), 2015(9): 3692 - 3693.

[7] 袁洁，姚嘉斌，朱伟中，等. 酒钢转炉钢渣用于烧结的试验研究 [J]. 甘肃冶金，2018，40(1)：4 - 8.
YUAN Jie, YAO Jiabin, ZHU Weizhong, et al. Experiment study on converter steel slags of JISC used to sinter [J]. Gansu Metallurgy, 2018, 40(1): 4 - 8.

[8] 钱强. 转炉钢渣烧结杯调渣改性试验研究 [J]. 烧结球团，2019，44(4)：67 - 69；78.
QIAN Qiang. Experimental study on slag modification of converter steel slag in sinter pot [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4): 67 - 69; 78.

[9] 万新源，王玺堂，王周福，等. 以钢渣为烧结剂制备白云石熟料 [J]. 耐火材料，2019，53(4)：298 - 301；307.
WAN Xinyuan, WANG Xitang, WANG Zhoufu, et al. Preparation of dolomite clinker with steel slag as sintering agent [J]. Refractories, 2019, 53(4): 298 - 301; 307.

[10] BENNETH C C, BONIFACE A O. Evaluation of the physical and mechanical properties of ceramic tiles processed using steel slag [J]. Advanced Materials Research, 2013: 257 - 261.

[11] 张丽，吴胜利，张永忠，等. 烧结用生石灰性能评价方法研究 [J]. 烧结球团，2015，40(3)：7 - 11.
ZHANG Li, WU Shengli, ZHANG Yongzhong, et al. Study on the performance evaluation method of the quicklime used for

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(3):7 – 11.

[12] 张俊,严定鎏,齐渊洪,等. 钢铁冶炼渣的处理利用难点分析[J]. 钢铁,2020,55(1):1 – 5.
ZHANG Jun, YAN Dingliu, QI Yuanhong, et al. Difficulty analysis on treatment and utilization of iron and steel smelting slag[J]. Iron and Steel,2020,55(1):1 – 5.

[13] 戎玉萍,何小平,蔡湄夏,等. 太钢转炉钢渣用于烧结的试验研究[J]. 钢铁,2001(6):1 – 4.
RONG Yuping,HE Xiaoping,CAI Meixia,et al. Study on reasonable utilization of converter slag at TISC[J]. Iron and Steel,2001(6):1 – 4.

[14] 左君,严丽君,杨秀琴,等. 响应曲面法优化超细氧化亚铜光催化降解对硝基苯酚[J]. 北京科技大学学报,2010,32(8):1045 – 1052.
ZUO Jun,YAN Lijun,YANG Xiuqin,et al. Photocatalytic degradation optimization of p-nitrophenol liquid by using ultrafine cuprous oxide with response surface methodology[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(8):1045 – 1052.

[15] 杨双平,张攀辉,郭拴全,等. 响应曲面法优化内配兰炭赤铁矿球团焙烧工艺[J]. 钢铁,2017,52(1):13 – 18.
YANG Shuangping,ZHANG Panhui,GUO Shuanquan,et al. Roasting technology of semicoke-burdened hematite pellets optimized by response surface methodology[J]. Iron and Steel, 2017,52(1):13 – 18.

[16] 王永良,肖力,付国燕,等. 响应曲面法优化 Na_2S-NaOH 体系浸出硫酸烧渣中的砷[J]. 工程科学学报,2018,40(9):1036 – 1042.
WANG Yongliang,XIAO Li,FU Guoyan,et al. Arsenic removal from pyrite cinders in Na_2S-NaOH solution with parameters optimized using the response surface methodology[J]. Journal of Engineering Science,2018,40(9):1036 – 1042.

[17] 杨双平,曹栓伟,贺峰. 响应曲面法优化红土镍矿富集镍[J]. 钢铁研究学报,2019,31(10):897 – 903.
YANG Shuangping, CAO Shuanwei, HE Feng. Optimizing process of extracting nickel from laterite nickel based on response surface methodology[J]. Journal of Iron and Steel Research,2019,31(10):897 – 903.

(上接第17页)

[12] 郑呈祥. 混匀铁料粒度组成对烧结生产的影响研究[J]. 南方金属,2020,233(2):39 – 42;46.
ZHENG Chengxiang. Effect of grain size composiition of mixed iron-contained materials on sintering[J]. Southern Metals, 2020,233(2):39 – 42,46.

[13] 冯根生,吴胜利,赵佐军. 改善厚料层烧结热态透气性的研究[J]. 烧结球团,2011,36(1):1 – 5.
FENG Gensheng, WU Shengli, ZHAO Zuojun. Research on improving hot permeability of deep bed sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(1):1 – 5.

[14] TODA H, KATO K. Theoretical investigation of sintering process[J]. Ironmaking and Steelmaking,1991,18(2):89 – 95.

[15] 贵永亮,刘连继,肖洪,等. 固体燃料种类和配比对烧结矿质量的影响[J]. 中国冶金,2014,24(5):5 – 8.
GUI Yongliang,LIU Lianji,XIAO Hong,et al. Effect of solid fuel type and proportion on quality of sinter[J]. China Metallurgy,2014,24(5):5 – 8.

[16] 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.

[17] 刘衍辉,吕学伟,陈攀,等. 镍铬复合烧结矿制备工艺与固结机理[J]. 钢铁研究学报,2016,28(3):19 – 28.
LIU Yanhui,LYU Xuewei,CHEN Pan,et al. Preparation and consolidation mechanism for nikel-chromium composite sinters[J]. Journal of Iron and Steel Research,2016,28(3):19 – 28.

[18] 李文琦. 优化烧结料层透气性和温度场的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
LI Wenqi. Investigation on optimizing permeability and temperature filed of sintering bed[D]. Changsha: Central South University,2012.

[19] 王艳玲. 浅析偏析布料对烧结的影响[J]. 包钢科技,2002,28(3):4 – 6.
WANG Yanling. Analysis of the effect of segregation on sintering[J]. Science & Technology of Baotou Steel(Group) Corporation,2002,28(3):4 – 6.

[20] 王永红,刘建波,周俊兰,等. 燃料粒度对烧结指标的影响研究[J]. 烧结球团,2018,43(3):37 – 42.
WANG Yonghong,LIU Jianbo,ZHOU Junlan,et al. Study on influence of particle size of fuels on sintering indexes[J]. Ironmaking and Steelmaking,2018,43(3):37 – 42.

[21] 刘桑辉,白凯凯,倪桂虎,等. 燃料粒度对铁矿烧结的影响研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):17 – 22.
LIU Shenhui,BAI Kaikai,NI Guihu,et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Ironmaking and Steelmaking,2019,44(6):17 – 22.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net