

高铁铝土矿热压块抗压强度影响因素响应曲面优化

柳政根, 储满生, 王 峥, 王宏涛
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于响应曲面优化法, 采用中心组合设计, 系统研究了配煤量、矿粉粒度、煤粉粒度等工艺参数及其交互作用对高铁铝土矿热压块抗压强度的影响, 并建立了相关的数学预测模型。研究表明, 各工艺参数对高铁铝土矿热压块抗压强度的影响显著, 其程度大小依次为配煤量、矿粉粒度、煤粉粒度; 所建立的数学模型相关系数为 0.958 9, 该模型能够预测高铁铝土矿热压块抗压强度随各参数的变化规律; 利用该模型对高铁铝土矿热压块的制备工艺进行了参数优化, 优化制备工艺参数为: 配煤量 19.0%, 矿粉粒度 96 μm , 煤粉粒度 80 μm , 在此条件下制备的热压块抗压强度为 1 024.3 N, 与模型预测值 1 000 N 接近, 相差只有 2.43%, 说明该数学模型能够为高铁铝土矿热压块制备工艺的优化提供参考。

关 键 词: 高铁铝土矿热压块; 含碳球团; 抗压强度; 响应曲面优化法; 数学模型

中图分类号: TF 046.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)09-1278-05

Influencing Factors Optimization on the Compressive Strength of High Iron Bauxite Hot Briquettes with Response Surface Methodology

LIU Zheng-gen, CHU Man-sheng, WANG Zheng, WANG Hong-tao

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHU Man-sheng, E-mail: chums@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The central composite design with response surface methodology was used to systemically research the effects of process parameters such as coal additive amount, ore particle size and coal particle size and their interaction on the compressive strength of high iron bauxite hot briquettes (HIBHB). The relevant mathematical prediction model was established as well. The results showed that these process parameters had significant effects on the compressive strength of HIBHB, ranking from coal additive amount, ore particle size to coal particle size. The established mathematical model with a correlation coefficient of 0.958 9 could predict the changing rules for the compressive strength of HIBHB. Based on the model, the process parameters were optimized as follows: coal additive amount 19.0%, ore particle size 96 μm and coal particle size 80 μm . Under the manufacturing condition of optimized process parameters, the compressive strength of HIBHB was 1 024.3 N, very close to the predicted value of 1 000 N by the model. The difference between the experimental value and the predicted value was simply 2.43%, which indicated that the mathematical model could help to optimize the production process for HIBHB.

Key words: high iron bauxite hot briquette (HIBHB); carbon composite agglomerate; compressive strength; response surface methodology; mathematical model

在我国广西、河南、海南等地存在一种高铁三水铝土矿, 该矿是一种富含铁铝的复合矿产资源。由于该矿铁铝质量比大于 1.0、铝硅质量比小于

3.0, 作为拜耳法生产氧化铝的原料并不合适^[1]。为了实现该类型高铁铝土矿铁铝的高效分离, 国内外先后提出了物理选矿法、酸浸碱溶法、熔炼

法、生物法和直接还原法等工艺^[1-8],但由于高铁铝土矿资源禀赋较差,至今未能得到有效利用.近年来,随着“还原-磨矿-磁选”工艺的研究发展,将该工艺应用于高铁铝土矿的铁铝分离成为可能^[4-7].含碳球团由于其还原速度快、制备工艺简单等优点,其在含铁资源综合利用流程中得到了广泛的应用.

当前高铁铝土矿含碳球团的研究主要集中在冷固结含碳球团^[3-6].冷固结含碳球团存在着很多优点,但也存在着大量使用昂贵的黏结剂且高温失黏等问题.热压块作为新型炼铁原料一直备受重视,它是将煤粉和矿粉按一定的比例混合后,利用煤的热塑性进行热压成型的新型炼铁原料,其具有还原性能好、原料适应性强、无需黏结剂等优点^[9-10].

对于含碳球团而言,冷态抗压强度是其入炉冶炼的先决条件.国内外对于含碳球团抗压强度的研究多采用单因素分析或者正交实验方法,定性地描述各个因素的影响规律,并未考虑各因素交互作用的影响.而响应曲面法是一种可用于多因素系统中的优化方法^[11].响应曲面回归模型是集统计、数学和计算机科学相结合的结果.相对单因素实验法和正交实验法,响应曲面法具有实验设计合理、可以确定实验结果的最佳值并且可以把得出的模拟方程与真实值进行拟合.

因此,本文首次采用响应曲面法研究含碳球团抗压强度的影响因素,提出了高铁铝土矿热压块抗压强度影响因素的响应曲面优化.将响应曲面回归模型应用于实验研究,通过分析实验指标与各影响因素间的定量规律,获得各因子水平的最佳组合,建立热压块抗压强度各影响因素的数学预测模型,用于热压块制备工艺参数的优化.本研究可为高铁铝土矿热压块制备工艺的优化提供依据,也可冷固结含碳球团生产工艺的优化提供参考.

1 实验原料与方法

1.1 实验原料

本实验使用的高铁铝土矿来自于广西贵港,热压工艺中使用的煤粉为烟煤,二者的化学成分分别列于表 1 和表 2.

表 1 高铁铝土矿化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of high iron bauxite %

TFe	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	其他
38.19	54.56	13.42	26.22	0.05	0.56	5.19

表 2 烟煤的化学成分(质量分数)
Table 2 Chemical composition of soft coal %

固定碳	挥发分	灰分(8.79)					其他
		CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	其他	
61.55	28.05	4.95	55.15	2.18	21.92	15.80	1.61

1.2 响应曲面优化设计

相关研究表明,热压块的影响因素主要有热压温度、热压压力、配煤量、矿粉粒度和煤粉粒度等.热压温度主要由煤种决定,热压压力主要由热压设备决定^[9-10].因此,本研究在选定热压用煤、热压设备热压温度 450 ℃,热压压力 50 MPa 的前提下,考察配煤量、矿粉粒度和煤粉粒度对热压块抗压强度的影响.采用统计软件 Design Expert 8.0 中心组合设计方法,以配煤量、矿粉粒度和煤粉粒度为自变量,分别用 x_1, x_2, x_3 代表,以高铁铝土矿热压块的抗压强度(以 Y 表示)为因变量进行研究,实验中的因子编号及水平列于表 3.其中配煤量选择的范围为 13.8%~21.8%,对应的高铁铝土矿热压块的碳氧比为 0.8~1.4.矿粉粒度和煤粉粒度的选择以筛下物为准,其过筛粒度范围设定为 74~150 μm .

表 3 响应曲面分析因素与水平
Table 3 Response surface analysis factors and levels

水平	因素		
	配煤量/%	矿粒度/ μm	煤粒度/ μm
-1	13.8	74	74
0	17.8	112	112
+1	21.8	150	150
-1.682	11.1	48	48
+1.682	24.5	176	176

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

按照表 4 中的实验方案进行热压块的制备实验,制备出的热压块为椭球形颗粒,其尺寸为 23 mm×19 mm×13 mm.每组条件下制备 22 个高铁铝土矿热压块,采用 GB/T 14201—93《铁矿球团抗压强度测定方法》检测高铁铝土矿热压块的抗压强度,取其平均值,抗压强度测试结果列于表 4.

2.2 数据回归拟合

分别采用线性模型、交互模型和二次模型对表 4 中的数据进行回归拟合,拟合结果列于表 5.

表 4 实验方案与结果
Table 4 Experimental design scheme and results

编号	配煤量	矿粉粒度	煤粉粒度	抗压强度
	%	μm	μm	N·个 ⁻¹
1	13.8	74	74	590.5
2	21.8	74	74	1 422.9
3	13.8	150	74	481.5
4	21.8	150	74	926.8
5	13.8	74	150	494.7
6	21.8	74	150	1 221.3
7	13.8	150	150	330.9
8	21.8	150	150	700.1
9	11.1	112	112	317.0
10	24.5	112	112	1 014.5
11	17.8	48	112	1 265.5
12	17.8	176	112	564.3
13	17.8	112	48	701.7
14	17.8	112	176	748.1
15	17.8	112	112	801.8
16	17.8	112	112	798.2
17	17.8	112	112	804.3
18	17.8	112	112	802.1
19	17.8	112	112	799.6
20	17.8	112	112	800.4

表 5 数据模拟结果
Table 5 Statistic summary of simulated results

模型	标准差	R^2	校正 R^2
线性模型	115.09	0.868 0	0.843 2
交互模型	102.93	0.914 2	0.874 6
二次模型	81.20	0.958 9	0.922 0

从表 5 可知,在线性模型、交互模型以及二次模型中,二次模型的相关系数 R^2 和校正 R^2 的值最大,说明在所选用的三个模型当中,二次模型的回归拟合结果最好.该模型的校正决定系数(校正 R^2)为 92.20%,表明此模型拟合程度较好.相关系数 R^2 为 0.958 9,表明实测值与预测值之间的相关性较高,实验误差较小.因此,采用二次模型对数据进行回归拟合,建立的高铁铝土矿热压块抗压强度各影响因素的数学预测模型如下:

$$Y = -2\,094.611 + 254.562\,x_1 + 0.522\,x_2 + 6.316\,x_3 - 0.612\,x_1x_2 - 0.150\,x_1x_3 - 0.007\,x_2x_3 - 2.930\,x_1^2 + 0.029\,x_2^2 - 0.018\,x_3^2. \quad (1)$$

式中: Y 为高铁铝土矿热压块的抗压强度,N/个; x_1 为配煤量,%; x_2 为矿粉粒度,μm; x_3 为煤粉粒度,μm.

从回归拟合方程可以看出,方程一次项、二次项、交互项影响显著,各个具体实验因素对响应值的影响并不是简单的线性关系.

2.3 拟合模型方差分析

采用方差分析对所选用的模型的精确度进行分析,结果列于表 6.由表 6 可知,模型中 $P < 0.000\,1 < 0.01$,表明实验所选用的模型极显著.对于热压块的抗压强度,一次项中 x_1, x_2 的影响极显著($P < 0.01$),而 x_3 影响相对更小,其影响程度大小依次为 x_1, x_2, x_3 ;二次项中 x_1^2, x_2^2, x_3^2 的影响不显著($P > 0.05$),其影响大小依次为 x_1^2, x_2^2, x_3^2 ;交互项中 x_1x_2 的影响显著($P < 0.05$), x_1x_3 和 x_2x_3 的影响不显著($P > 0.05$).因此,对高铁铝土矿热压块抗压强度的影响大小依次为配煤量、矿粉粒度和煤粉粒度.

表 6 二次模型响应曲面方差分析结果
Table 6 ANOVA for response surface quadratic model

项目	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值
模型	1.540E+6	9	1.711E+5	25.95	<0.000 1
x_1	9.210E+5	1	9.210E+5	139.69	<0.000 1
x_2	4.465E+5	1	4.465E+5	67.72	<0.000 1
x_3	26 068.15	1	26 068.15	3.95	0.074 8
x_1x_2	69 285.03	1	69 285.03	10.51	0.008 8
x_1x_3	4 135.95	1	4 135.95	0.63	0.446 7
x_2x_3	798.00	1	798.00	0.12	0.735 1
x_1^2	31 675.56	1	31 675.56	4.80	0.053 2
x_2^2	24 468.63	1	24 468.63	3.71	0.082 9
x_3^2	9 719.42	1	9 719.42	1.47	0.252 6

图 1 为高铁铝土矿热压块抗压强度预测值与实际值对比图,从图 1 中可以看出,实际值与预测值基本处于直线附近,说明所选模型的预测值与实际值很相符.

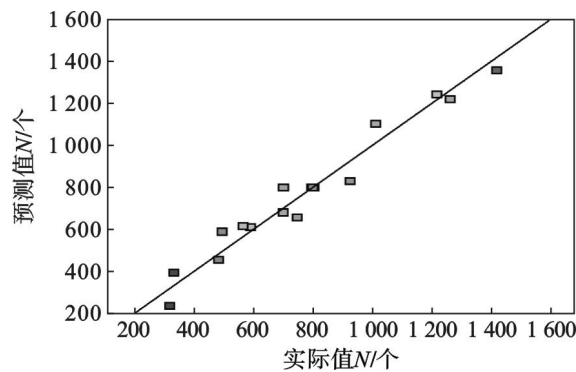


图 1 高铁铝土矿热压块抗压强度预测值与实际值对比
Fig. 1 Predicted value vs actual value for the compressive strength of HIBHB

2.4 响应曲面分析及优化

根据模型方程,应用响应曲面法绘制响应值高铁铝土矿热压块抗压强度与影响因素的三维响应曲面分析图. 最佳水平范围在响应曲面顶点附近的区域. 如果响应曲面坡度相对平缓,表明该因素对响应值的影响程度不明显,相反则表明响应值对于该因素的改变非常敏感. 配煤量、矿粉粒度、煤粉粒度及其交互作用对响应值的影响如图2~图4所示.

图2为配煤量与矿粉粒度对高铁铝土矿热压块抗压强度的影响. 从图2可知,煤粉粒度在中心水平条件下时(图中心点),高铁铝土矿热压块抗压强度随着配煤量的增加而增加,在本实验的范围内,当配煤量达到21.8%时,抗压强度达到最大. 其他因素中心水平时,热压块的抗压强度随着矿粉粒度的细化逐渐增大. 图2中响应曲面坡度陡峭,配煤量与矿粉粒度对响应值的影响显著,且配煤量方向的陡峭程度更大. 因此,与矿粉粒度相比,配煤量的影响更为显著. 另外,从下方投影的等高线图可以看出,当配煤量更高时,矿粉粒度对

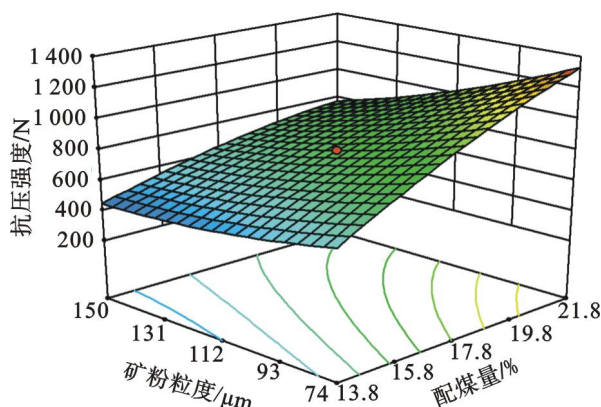


图2 配煤量和矿粉粒度对高铁铝土矿热压块抗压强度影响

Fig. 2 Effects of coal additive amount and ore particle size on the compressive strength of HIBHB

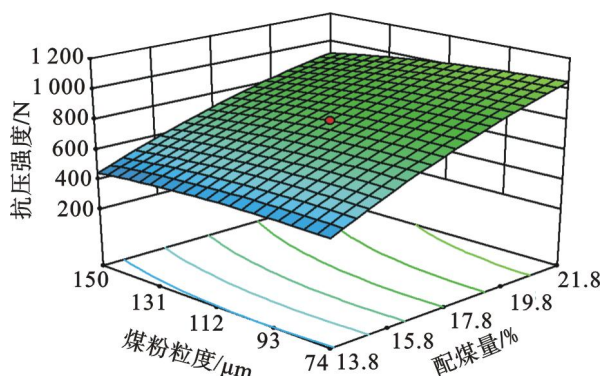


图3 配煤量和煤粉粒度对高铁铝土矿热压块抗压强度影响

Fig. 3 Effects of coal additive amount and coal particle size on the compressive strength of HIBHB

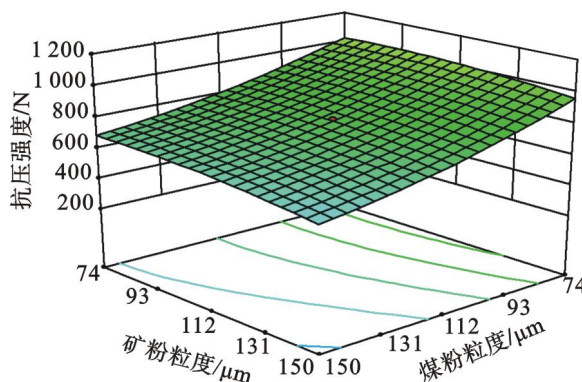


图4 矿粉、煤粉粒度对高铁铝土矿热压块抗压强度影响
Fig. 4 Effects of ore particle size and coal particle size on the compressive strength of HIBHB

热压块抗压强度的影响更为显著.

图3为配煤量与煤粉粒度对高铁铝土矿热压块抗压强度的影响. 从图3可知,矿粉粒度在中心水平条件下时,高铁铝土矿热压块的抗压强度随着配煤量的增加而增加,当配煤量达到21.8%时,热压块的抗压强度达到最大. 其他因素中心水平时,抗压强度随着煤粉粒度的细化逐渐增大. 图3中的响应曲面坡度陡峭,配煤量与煤粉粒度对响应值的影响显著,且配煤量方向的陡峭程度更为明显. 与煤粉粒度相比,配煤量的影响更为显著. 从投影的等高线图可以看出,当配煤量更高时,煤粉粒度对热压块抗压强度的影响更为显著,但整体而言,煤粉粒度对高铁铝土矿热压块的影响程度较小.

图4为矿粉粒度与煤粉粒度对高铁铝土矿热压块抗压强度的影响. 从图4可知,配煤量处于中心水平时,高铁铝土矿热压块抗压强度随着矿粉粒度的细化而增加,当矿粉粒度小于74 μm 时,抗压强度达到最大. 其他因素中心水平时,抗压强度随着煤粉粒度的变小逐渐增大. 与图2和图3相比,图4中的响应曲面坡度更为平缓,矿粉粒度与煤粉粒度对响应值的影响较小,但矿粉粒度方向的陡峭程度较大. 因此,与煤粉粒度相比,矿粉粒度的影响更为显著.

由以上研究结果可知,配煤量、矿粉粒度和煤粉粒度对热压块的抗压强度影响显著. 其中,配煤量影响最大,而在各因素的作用当中,配煤量和矿粉粒度的交互作用对热压块的抗压强度影响最大,这与拟合模型的方差分析结果一致.

因此,提高配煤量、细化矿粉粒度与煤粉粒度均可增加热压块的抗压强度. 对于含碳球团的制备工艺而言,提高配煤量会增加整个工艺的能耗,且细化矿粉粒度和煤粉粒度均会增加磨矿的能

耗,而含碳球团应用的基本前提是其抗压强度满足一定的使用要求.以热压块为例,若其抗压强度需 1 000 N,采用响应曲面优化法,基于拟合出的数学预测模型(式(1))对各影响因素进行优化,得到的优化条件为:配煤量 18.98%,矿粉粒度 94.18 μm ,煤粉粒度 82.81 μm .在此条件下,高铁铝土矿热压块的抗压强度为 1 000 N.

2.5 实验验证

为了验证模型方程的合适性与可靠性,考虑到实际实验操作中达不到优化值的精确程度,因此选取配煤量 19.0%,矿粉粒度 96.0 μm ,煤粉粒度 80.0 μm ,进行高铁铝土矿热压块制备优化实验,结果列于表 7.从表 7 可知,实验值与模型优化值接近,相差只有 2.43%,说明模型合适可靠.

表 7 模型预测值与实验值对比

Table 7 Predicted value vs actual experimental value

名称	配煤量 %	矿粉粒度 μm	煤粉粒度 μm	预测值 N	实验值 N	误差 %
模型	18.98	94.18	82.81	1 000.0	—	2.43
实验	19.00	96.0	80.0	—	1 024.3	

3 结 论

1) 采用响应曲面法中心组合设计回归拟合得到的模型能够解释各参数及其交互作用对响应值的作用规律,具有良好的预测作用;各工艺参数对高铁铝土矿热压块抗压强度的影响程度大小依次为配煤量、矿粉粒度、煤粉粒度.

2) 建立的高铁铝土矿热压块抗压强度预测模型为: $Y = -2\,094.611 + 254.562 x_1 + 0.522 x_2 + 6.316 x_3 - 0.612 x_1 x_2 - 0.150 x_1 x_3 - 0.007 x_2 x_3 - 2.930 x_1^2 + 0.029 x_2^2 - 0.018 x_3^2$,其相关系数为 0.958 9.该方程能够预测高铁铝土矿热压块抗压强度随各工艺参数的变化规律.

3) 热压块的目标抗压强度为 1 000 N 时,响应曲面法得到的最佳制备工艺参数为:配煤量 19.0%,矿粉粒度 96.0 μm ,煤粉粒度 80.0 μm ,在此条件下制备的热压块抗压强度为 1 024.3 N,与模型预测值 1 000 N 接近,相差只有 2.43%.

参考文献:

[1] 李光辉,董海刚,肖春梅,等.高铁铝土矿的工艺矿物学及

铝铁分离技术[J].中南大学学报:自然科学版,2006,37(2):235-240.

(Li Guang-hui, Dong Hai-gang, Xiao Chun-mei, et al. Mineralogy and separation of aluminum and iron from high ferrous bauxite [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2006, 37(2): 235-240.)

[2] 李殷泰,毕诗文,段振瀛,等.关于广西贵港三水铝石型铝土矿综合利用工艺方案的探讨[J].轻金属,1992(9):6-12.

(Li Yin-tai, Bi Shi-wen, Duan Zhen-yin, et al. Discussion on the comprehensive utilization technology of high iron gibbsite ore in Guigang city Guangxi region [J]. *Light Metals*, 1992(9): 6-12.)

[3] Papassiopi N, Vaxevanidou K, Paspaliaris I. Effectiveness of iron reducing bacteria for the removal of iron from bauxite ores [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(1): 25-31.

[4] Pickles C A, Chambers T L B, Forster J. A study of reduction and magnetic separation of iron from high iron bauxite ore [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2012, 51(4): 424-433.

[5] Hu W T, Wang H J, Liu X W, et al. Effect of nonmetallic additives on iron grain grindability [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2014, 130(7): 108-113.

[6] Li G H, Jiang T, Liu M D, et al. Beneficiation of high aluminium content hematite ore by soda ash roasting [J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2010, 31(3): 150-164.

[7] Liu Z G, Chu M S, Tang J, et al. Appropriate reduction and Fe-Al separation of high iron gibbsite [C] // TMS Light Metals, Light Metals 2013. San Antonio: The Minerals, Metals & Materials Society, 2013: 223-227.

[8] Zhang Z L, Li Q, Zou Z S. Reduction properties of high alumina iron ore cold bonded pellet with CO-H₂ mixture [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2014, 41(8): 561-567.

[9] 储满生,王兆才,艾名星,等.热压含碳球团冷态强度的实验研究[J].东北大学学报:自然科学版,2009,30(5):696-700.

(Chu Man-sheng, Wang Zhao-cai, Ai Ming-xing, et al. Experimental study on cold strength of carbon composite iron ore hot briquette [J]. *Journal of Northeastern University: National Science*, 2009, 30(5): 696-700.)

[10] Chu M S, Liu Z G, Wang Z C, et al. Fundamental study on carbon composite iron ore hot briquette using as blast furnace burden [J]. *Steel Research International*, 2011, 82(5): 521-528.

[11] 王鹏,魏德洲.响应曲面法优化氨法焙烧后粉煤灰除铁工艺[J].东北大学学报:自然科学版,2014,35(11):1617-1621.

(Wang Peng, Wei De-zhou. Optimization of iron removal process for calcine of fly ash and ammonium sulfate via response surface methodology [J]. *Journal of Northeastern University: National Science*, 2014, 35(11): 1617-1621.)