

基于田口法的钒钛磁铁矿热压块抗压强度的优化

赵 伟, 储满生, 汤雅婷, 唐 珏
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 使用田口法探索了影响钒钛磁铁矿热压块抗压强度的重要因子, 并通过信噪比分析计算各因子对抗压强度的贡献率, 最终给出钒钛磁铁矿热压块的最佳制备条件。实验结果表明, 在热压温度、配碳比、煤粉粒度三个影响因素中, 煤粉粒度对抗压强度的影响程度最大, 其贡献率达到了 79.99%, 温度和配碳比二者的贡献率分别为 15% 和 3.63%。优化后钒钛磁铁矿热压块的制备参数为热压温度 300 ℃、煤粉粒度 < 75 μm、配碳比 1.8。在优化后的参数下进行验证实验, 得到的钒钛磁铁矿热压块的平均抗压强度达到 1 152.1 N。

关 键 词: 田口法, 钒钛磁铁矿热压块, 抗压强度, 信噪比, 贡献率

中图分类号: TF 046.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)10-1441-04

Compressive Strength of Vanadium Titanium Magnetite Hot Briquette Based on Taguchi Method

ZHAO Wei, CHU Man-sheng, TANG Ya-ting, TANG Jue

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

Abstract: The Taguchi method was used to explore the important influence factors on the compressive strength of vanadium titanium magnetite hot briquettes, and then the contribution rates of these factors to the compressive strength were calculated through the signal-to-noise ratio analysis. Finally, the best preparation conditions of vanadium titanium magnetite hot briquettes were established. The results showed that among the three processing parameters including the hot-briquetting temperature, carbon ratio and coal particle size, the coal particle size was the most important factor to the compressive strength, and its contribution rate is up to 79.99%, the contribution rates of the hot-briquetting temperature and the carbon ratio were 15% and 3.63%, respectively. The optimized parameters of the preparation process of vanadium titanium magnetite hot briquette are as follow: hot-briquetting temperature 300 ℃, coal particle size less than 75 μm, carbon ratio 1.8. Verification experiments were conducted with the optimized parameters, and the average compressive strength of the vanadium titanium magnetite hot briquette is up to 1 152.1 N.

Key words: Taguchi method, vanadium titanium magnetite hot briquette, compressive strength, signal-to-noise ratio, contribution rate

随着高品位的铁矿资源日益减少,高炉炼铁面临的压力日益增加。因此,增加各类贫矿、复合矿的综合利用对钢铁工业的健康发展具有重要的意义。钒钛磁铁矿是以铁、钒、钛为主并含有其他元素的多元共生矿,其在我国储量大、分布广^[1]。当前对钒钛磁铁矿含碳球团研究较多的主要是冷固结含碳球团,从生产实际来看,其主要作为转底

炉生产直接还原铁并提取其中有价元素的炼铁原料,钒钛矿冷固结球团存在着大量使用黏结剂且强度低等问题。热压含碳球团作为高还原性的新型炼铁原料一直备受重视,它是通过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而制成,其具有还原性能好、原料适应性强、无需添加剂等良好的冶金性能^[2-3]。冷态强度是炼铁原

收稿日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(51090384);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130602003, N110202001)。

作者简介: 赵 伟(1991-),男,安徽无为,东北大学博士研究生;储满生(1973-),男,安徽岳西人,东北大学教授,博士生导师。

料入炉冶炼的基本前提,因此加强对钒钛磁铁矿热压含碳球团冷态强度的研究,具有基础性意义。

对球团冷态强度已有的研究多采用单因素分析方法,定性地给出各个因素的影响程度,并不能定量地计算出影响程度的大小。因此本研究创新性地通过田口法的运用,提出了制备钒钛磁铁矿热压块的优化方法,研究了热压温度、煤粉粒度和配碳比对钒钛矿热压块抗压强度影响的主次关系,定量计算出各影响因素对所考查指标的贡献率,以进一步探索钒钛磁铁矿热压块的最佳制备工艺^[4-6]。

1 实验原料与方法

1.1 实验原料

本实验采用的含铁原料是产自攀西地区的钒钛磁铁矿(VTM),热压过程中添加的煤粉为普通烟煤,二者的成分分别见表1和表2。

表1 钒钛磁铁矿的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of VTM %

TFe	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	CaO
53.15	42.25	3.29	3.40	0.62	0.71	3.92	11.06	0.08

表2 烟煤的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical compositions of coal %

固定碳		挥发分		灰分(8.79)				
		TFe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃		
61.55	28.05	4.01	4.95	55.15	2.18	21.92		

1.2 田口实验方法

田口法是由日本田口玄一博士提出的一种高效系统的优化设计方法,其广泛运用于工程设计方案中的优化操作,可以大大提高实验效率,增加实验设计的科学性。田口法的核心工具是正交实验和信噪比分析,通过对正交实验结果作信噪比变异数分析得出各个影响因子的贡献率,从而优化产品的设计参数,最终通过验证性实验对分析结果进行验证^[6-7]。本研究通过对实验结果做正交表的极差分析与田口法分析,对二者的分析结果进行对比,以便更加直观地看出田口分析方法的深刻性。

1) 实验步骤。本实验主要包括原料的准备、矿煤的混匀加热、压块、结果分析和验证性实验5个步骤。

具体步骤为:将干燥后的煤粉和矿粉按一定

的比例充分混匀;用自制的热压模具称取一定量的混合料置于马弗炉中加热;当混合料加热到设定的温度时,取出模具在压块装置中进行热压实验;按照 GB/T 14201—93 测量热压块的冷态其抗压强度;基于田口法对实验数据进行信噪比分析并得到优化工艺参数;利用最优工艺参数进行验证性实验。

2) 热压参数的确定。参考已有的研究结果^[8],本研究过程中所选取的影响因素包括煤粉粒度、配碳比和热压温度,三者分别用 A、B、C 表示,每个因素选取 4 个水平,具体见表 3。本实验选择 L₁₆(4³) 正交表做正交实验,每组条件下制备 24 个钒钛磁铁矿热压块,最终所得到的抗压强度为这 24 个热压块的抗压强度的平均值。

表3 热压块抗压强度水平配置

Table 3 Factors and levels of compressive strength of hot briquettes

因子	水平			
	1	2	3	4
A/ μm	150 ~ 300	106 ~ 150	75 ~ 106	< 75
B	1.0	1.4	1.8	2.2
C/ $^{\circ}\text{C}$	150	200	250	300

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

在田口法中,将各品质特性转化为信噪比 SNR,强调用信噪比 SNR 衡量指标的波动以评价产品质量特性。产品的品质特性一般分为望目特性、望小特性和望大特性,在本实验中,由于希望所得到的钒钛矿热压块的抗压强度越大越好,即希望信噪比越大越好,因此信噪比 SNR 的计算公式采用望大特性公式:

$$\text{SNR} = -10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right).$$

式中: y_i 为所测得的品质特性; n 为实验的组数。在本实验中 y_i 为每组实验的平均抗压强度值, $n=16$,具体计算结果见表 4。

2.2 实验结果分析

1) 正交表的极差分析。正交表的极差分析可以定性地分辨出影响因子的主次,预测出更好的水平组合。表 5 是对表 4 中抗压强度值做极差分析得到的。可以定性地看出煤粉粒度对抗压强度的影响最大,其次分别为温度和配碳比^[9]。

表 4 抗压强度平均值及其信噪比
Table 4 Average value of compressive strength and SNR

实验次数	A	B	C	抗压强度/N	信噪比/dB
1	1	1	1	48.37	33.69
2	1	2	2	68.27	36.55
3	1	3	3	103.30	40.28
4	1	4	4	203.97	46.19
5	2	1	2	112.68	41.03
6	2	2	1	107.60	40.63
7	2	3	4	397.64	51.98
8	2	4	3	219.97	46.84
9	3	1	3	417.98	52.41
10	3	2	4	575.43	55.19
11	3	3	1	235.53	47.44
12	3	4	2	295.47	49.41
13	4	1	4	773.18	57.76
14	4	2	3	899.55	59.08
15	4	3	2	988.50	59.89
16	4	4	1	683.98	56.70

表 5 极差分析
Table 5 Typical value analysis of various factors level

水平	可控因素		
	A	B	C
1	105.73	337.98	268.87
2	209.47	412.46	365.98
3	381.03	431.24	410.13
4	836.30	350.85	487.56
极差	730.57	93.26	218.69
排名	1	3	2

对表 5 中 A、B、C 的不同水平下的抗压强度数值作图,得到抗压强度与煤粉粒度、热压温度和配碳比之间的关系。

表 5 中 A 系列给出了煤粉粒度对热压块抗压强度的影响。可以看出煤粉粒度的变化对热压块抗压强度的影响非常大。煤粉粒度越细,热压块的抗压强度越高,这主要是由于煤粉粒度细时,铁矿粉和煤粉之间的接触面积大,而且热压块的致密度相对较大,使得其抗压强度相对较高。

表 5 中 B 系列给出了配碳比对热压块抗压强度的影响。可以看出,在一定范围内,配碳比的增加会增加热压块的抗压强度,这主要是由于配煤量的增加使得热压块内部产生的胶质体量增加,黏结效果更好。但是当配碳比过高时,热压块的抗压强度会下降,这主要是由于矿粉在热压块内起骨架的作用,配煤量过高意味着配矿量的减少,使得矿粉的这种骨架作用被削弱,从而使得抗

压强度降低^[9]。

表 5 中 C 系列给出了热压温度对抗压强度的影响。热压温度对抗压强度的影响较为显著。且随着温度的升高,抗压强度呈逐渐上升的趋势,这主要是由于温度的升高,使得热压块内部的煤粉胶质体黏度变小,流动性变好,黏结效果增加。

2) 田口法分析. 对表 4 中按望大特性公式计算所得到的信噪比进行田口法分析。田口法分析的第一步是对信噪比做极差分析,具体的数据结果如表 6 所示。可以看出当热压温度和煤粉粒度为 4 水平时,信噪比达到最大,分别为 52.79 和 58.36 dB;当配碳比为 3 水平时,信噪比达到了 49.90 dB。此外,当煤粉粒度从 150 ~ 300 μm 变化到 < 75 μm 的过程中,信噪比的增幅相对较大,而温度和配碳比的变化所引起的信噪比的变化幅度则相对较小,即煤粉粒度对热压块抗压强度的影响最大,其次分别为温度和配碳比,与对正交实验结果直接做极差分析的结果相一致。

表 6 信噪比平均效应响应
Table 6 Average effect response for SNR dB

水平	可控因素		
	A	B	C
1	39.18	46.23	44.62
2	45.13	47.87	46.73
3	51.12	49.90	49.66
4	58.36	49.79	52.79
效应	19.18	3.56	8.17
排名	1	3	2
最优水平	4	3	4

正交实验的极差分析只定性地给出了各个因素对抗压强度的影响程度,为定量地给出各因素对抗压强度的影响程度,本研究在对信噪比进行极差分析的基础之上进行了变异数分析,在检验实验数据可信度的同时,进一步计算出了各个因素的贡献率。

表 7 为实验信噪比变异数分析表,由表 7 可知煤粉粒度、配碳比和热压温度的 F 值分别为 115.68, 5.25 和 21.68, 查阅 F 值分布表知 $F_{0.05}(3,16) = 3.24$, $F_{0.01}(3,16) = 5.29$, 因此可以初步判断温度和煤粉粒度的影响较为显著,而配碳比的影响较为一般。误差因子的均方差越小,实验误差越小,本实验过程中的误差均方差为 13.99,远小于热压温度、配碳比和煤粉粒度的均方差,说明实验的误差较小。

表 7 信噪比变异分析表
Table 7 Variance analysis of SNR

因素	偏差平方和	自由度	均方差	F
A	809.27	3	269.76	115.68
B	36.71	3	12.24	5.25
C	151.70	3	50.57	21.68
误差	13.99	6	2.33	
总和	1011.67	15		

对表 7 中的数据处理可得到各个因素的贡献率,从而定量给出了各个影响因素的影响程度,各因素的贡献率如表 8 所示.可以看出,煤粉粒度对热压块抗压强度的影响最大,达到了 79.99%,其次为温度,贡献率为 15.00%,而配碳比的影响最小,其贡献率仅为 3.63%.

因此,综合正交表的极差分析和田口法分析的结果,可以初步预测钒钛磁铁矿热压块抗压强度优化的最佳参数组合为 $A_4B_3C_4$,即热压温度为 300℃,配碳比为 1.8,煤粉粒度 < 75 μm.

表 8 工艺参数贡献率
Table 8 Contribution rates of process parameters

因素	A	B	C
偏差平方和	809.27	36.71	151.70
贡献率/%	79.99	3.63	15.00

3 验证实验

用最优的参数可以对信噪比进行预测,预测的结果如下:

$$\text{SNR} = \overline{\text{SNR}} + (\overline{\text{SNR}}_{A_4} - \overline{\text{SNR}}) + (\overline{\text{SNR}}_{B_3} - \overline{\text{SNR}}) + (\overline{\text{SNR}}_{C_4} - \overline{\text{SNR}}) = 64.15 \text{ dB}.$$

采用热压参数组合为 $A_4B_3C_4$ 进行压块实验,并对压制的热压块进行抗压强度的检测.实验结果显示,当温度为 300℃,配碳比为 1.8,煤粉粒度 < 75 μm 时,热压块的平均抗压强度达到 1 152.1 N,实际信噪比为 61.23 dB,与预测的结果基本一致.

4 结 论

1) 在给出的实验范围内,各因素对抗压强度影响由大到小依次为煤粉粒度、热压温度和配碳比,定量分析的数据表明,煤粉粒度的贡献率达到了 79.99%,而热压温度和配碳比的贡献率分别为 15.00% 和 3.63%.

2) 根据显著性分析,煤粉粒度和热压温度的

影响是显著的.

3) 钒钛矿热压块优化后的最佳制备参数为热压温度 300℃、煤粉粒度 < 75 μm、配碳比 1.8.

4) 由最佳制备参数对信噪比进行预测,所预测得到的信噪比为 64.15 dB,然后利用这些参数进行验证实验,所得到的实际信噪比为 61.23 dB,与预测的结果基本一致.在最优参数下制备得到的热压块平均抗压强度达到了 1 152.1 N,实现了热压块制备过程中抗压强度的优化.

参考文献:

- [1] Zhang Y, Tang J, Chu M S, et al. Optimization of BF slag for high Cr_2O_3 vanadium-titanium magnetite [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2014, 21(2): 144–150.
- [2] Anyashiki T, Fukada K, Fujimoto H. Development of carbon iron composite process [J]. *JFE Technical Report*, 2009, 13: 1–6.
- [3] Matsui Y, Sawayama M, Kasai A. Reduction behavior of carbon composite iron ore hot briquette in shaft furnace and scope in blast furnace performance reinforcement [J]. *ISIJ International*, 2003, 43(12): 1904–1912.
- [4] Senthilkumar K, Srinivasan P S S. Application of Taguchi method for the optimization of system parameters of centrifugal evaporative air cooler [J]. *Journal of Thermal Science*, 2010, 19(5): 473–479.
- [5] Abolfazl B, Mehran R, Zohreh F. Optimization of preparation conditions of Fe-Co nanoparticles in low-temperature CO oxidation reaction by Taguchi design method [J]. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 2012, 21(4): 415–420.
- [6] Mohsen A, Daavood K, Nasrollah A. Improvement of grain size and dome height of microalloyed steels using Taguchi method based on grey relational grade in controlled rolling [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2013, 20(12): 115–123.
- [7] 马致远, 杨洪英, 陈国宝, 等. 基于田口法的生物浸出液萃铜工艺的优化 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(7): 990–993.
(Ma Zhi-yuan, Yang Hong-ying, Chen Guo-bao, et al. Optimization of extraction of copper from bio-leaching solution based on the Taguchi methods [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2013, 34(7): 990–993.)
- [8] 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: Natural Science*, 2009, 30(5): 696–700.)
- [9] 陈建设. 冶金试验研究方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 54–60.
(Chen Jian-she. *Metallurgical test research methods* [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 2005: 54–60.)