

宣钢烧结工艺参数优化试验研究

张玉柱, 李杰, 邢宏伟, 张伟, 尹海生
(河北理工大学, 河北 唐山 063009)

摘要:烧结工艺参数与烧结矿质量有着密切的关系。为了得到最佳的烧结工艺参数,必须进行大量烧结试验来优化。均匀设计利用试验点的充分均匀性,比正交设计更能减少试验量,极大节省试验投资,但仍能得到接近最优的工艺参数。在宣钢原料条件下,采用均匀设计试验分析了伊朗矿配比、烧结矿碱度、配碳量和MgO含量对烧结矿质量的影响,最终确定了最优的工艺参数。

关键词:均匀设计; 工艺参数优化; 烧结试验

中图分类号:TF124.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6532(2008)03-0021-04

1 前言

烧结工艺参数与烧结矿的质量和产量有着密切的关系。选择较好的工艺参数对降低烧结成本以及节能降耗有着非常重要的作用。

烧结过程是一个复杂的物理化学过程,影响烧结的因素也很繁杂。为了得到最佳的烧结工艺参数,必须进行大量烧结试验来优化。例如:采用四因素六水平(6⁴)进行全面烧结试验,需做1296次,工作量太大;采用正交试验也要进行72次;而采用均匀试验,只需6次即可。均匀设计已在我国飞航导弹的设计中取得有效的应用,使设计周期大大缩短,并节省了大量的费用^[1]。

均匀试验的最大优点是可以节省大量的试验工作量。对于多因素多水平的试验特别适用。均匀试验所获得的适宜条件虽然不一定是全面试验中的最优条件,但至少也在某种程度上接近最优条件,仍能得到接近最优的工艺参数。均匀设计还可以筛选因素、缩小优化工艺参数的范围,为烧结工艺参数进一步优化提供参考。

本论文在宣钢原料条件下,结合现场生产要求,采用均匀设计,对伊朗矿配比、烧结矿碱度、配碳量以及MgO含量与烧结矿质量的关系进行了试验和分析,最终确定了最优的工艺参数。

2 试验原料

2.1 原料化学成分

试验所用原料均由宣钢烧结厂提供,各种原料、燃料的化学成分见表1、表2及表3。

表1 原料化学成分/%

原料名称	TFe	CaO	SiO ₂	MgO	烧损
半自熔精粉	62.49	1.88	5.14	1.60	1.5
委粉	65.70	—	1.59	—	3
印粉	63.75	—	4.28	—	3
伊朗矿	58.88	—	6.44	—	3
混料	47.62	8.5	11.23	3.02	8
返矿	51.4	15.2	7.21	2.50	2
红矿	40.78	—	22.84	—	3
灰石	—	50.56	3.57	0.68	40
钙灰	—	74.13	9.63	2.08	15
镁灰	—	40	6.4	26.93	13
球返	62.49	0.56	6.24	1.05	0

表2 焦粉工业分析/%

C	A	V	S	烧损
75.52	16.13	8.35	0.62	83.87

表3 焦粉灰分化学成分/%

TFe	SiO ₂	CaO	MgO
6	50	10	—

由表1可以看出,委粉、印粉、半自熔精粉的TFe品位都较高,均在60%以上,尤其是委粉含铁品位高达65.70%,但SiO₂的含量仅1.59%。SiO₂过

收稿日期:2007-11-26

作者简介:张玉柱(1956-),男,教授,博导,主要从事资源综合利用与原料优化的研究。

低会造成液相生成不足、烧结矿质量下降。而伊朗矿含铁品位较低, SiO_2 含量较高。配加部分伊朗矿, 比较符合烧结成矿规律。

2.2 原料粒度组成

原料的粒度组成见表4、表5。

表4 原矿粒度组成/%

项目	粒度/mm					
	>10	5~10	3~5	1~3	0.5~1	<0.5
委粉	2.7	12.0	6.0	11.6	10.7	57.0
印粉	3.5	13.4	8.4	18.7	15.8	40.2
伊朗矿	0.7	30.7	40.1	9.2	4.1	15.3
混料	5.6	15.1	8.3	17.0	12.0	42.1
返矿	1.6	17.0	29.8	24.9	11.2	15.6
红矿	2.7	29.0	14.8	22.0	12.2	19.3
灰石	0.0	0.0	13.8	38.8	18.4	28.9
球返	0.0	2.7	17.3	40.1	16.4	23.6

表5 半自熔精粉的粒度组成

粒度/目	+90	-90+140	-140+200	-200
分布率/%	4.8	17.6	9.4	68.2

3 试验方法及方案

3.1 试验方法

烧结杯 $\Phi 200\text{mm} \times 380\text{mm}$, 烧结点火负压为 3.92kPa。点火温度为 1150℃ 左右, 选用气体燃料(液化气)点火, 点火时间为 1min, 烧结抽风负压为 7.84kPa。

烧结矿倒出后, 进行落下试验, 筛分后, 测粒度组成及成品率。将 >10mm 的烧结矿缩分取样, 采用 1/5ISO 标准转鼓, 进行强度指标检验。按 GB/T13242-91 标准进行烧结矿低温还原粉化性能测定, 按 GB/T13241-91 标准进行烧结矿还原性能测定, 并进行荷重软化性能试验。

3.2 试验方案

结合目前宣钢的原料条件 and 生产要求, 采用均匀设计的方法安排试验。试验主要考察伊朗矿配比、烧结矿碱度、配碳量和 MgO 含量四个因素, 对烧结速度、烧结矿的成品率、转鼓强度、粒度组成、荷重软化、RDI 及 RI 等指标的影响。每个因素取三个水平, 即伊朗矿取 5%、10% 和 15% 三个水平, 碱度取 1.7、1.9 和 2.1 三个水平, 配碳量取 3.5%、3.75% 和 4.0% 三个水平, MgO 含量取 2.2%、2.6% 和 3.

0% 三个水平。采用均匀表 $U_6^*(6^4)$, 试验安排如表 6 所示。

根据原料的化学成分和一些原料的固定配比进行配料计算, 其结果见表 7。

表6 均匀设计试验方案

试验号	伊朗矿配比/%	碱度	MgO/%	配碳量/%
1	1(5)	2(1.7)	3(2.6)	6(4.0)
2	2(5)	4(1.9)	6(3.0)	5(4.0)
3	3(10)	6(2.1)	2(2.2)	4(3.75)
4	4(10)	1(1.7)	5(3.0)	3(3.75)
5	5(15)	3(1.9)	1(2.2)	2(3.5)
6	6(15)	5(2.1)	4(2.6)	1(3.5)

表7 均匀设计配料计算结果/%

项目	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
半自熔精粉	16.621	13.402	6.144	10.765	3.455	0.242
委粉	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
印粉	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
伊朗矿	5.000	5.000	10.000	10.000	15.000	15.000
混料	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
返矿	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
红矿	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
灰石	0.982	2.735	7.621	0.046	5.012	6.771
钙灰	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
镁灰	4.397	5.863	3.235	6.189	3.533	4.986
球返	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
焦粉	5.297	5.297	4.966	4.966	4.635	4.635

注: 焦粉外加, 即在 100% 干配比之外。混合料水分控制在 8%。

4 试验结果与分析

4.1 试验结果

烧结矿化学成分见表 8, 烧结矿强度、成品率和烧结速度见表 9, 烧结矿冶金性能见表 10。

4.2 试验结果分析

将回归分析所用相关数据列于表 11。

用相关的软件进行逐步回归分析, 得到的回归方程如下:

$$T = 25.622 \times R + 3.65 \times \text{MgO} - 2.645 \times C + 13.257 \quad (1)$$

$$\text{RDI}_{+3.15} = 17.977 \times R + 6.01 \times \text{MgO} - 6.478 \times C + 50.419 \quad (2)$$

$$\text{RI} = -9.701 \times R - 4.753 \times \text{MgO} - 6.952 \times C + 148.221 \quad (3)$$

表 8 烧结矿化学成分

方案	TFe/%	FeO/%	SiO ₂ /%	CaO/%	MgO/%	Al ₂ O ₃ /%	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	R
1	54.14	10.55	6.79	11.60	2.61	2.50	0.37	1.71
2	51.73	11.70	7.06	13.40	2.99	2.50	0.35	1.90
3	50.93	9.60	7.14	15.20	2.23	2.27	0.32	2.13
4	51.93	10.00	7.33	12.60	3.02	2.27	0.31	1.72
5	50.93	8.50	7.10	13.60	2.18	2.50	0.35	1.92
6	49.53	8.30	7.25	15.30	2.58	2.32	0.32	2.11

表 9 烧结矿强度、成品率和烧结速度

方案	强度指标/%		成品率 /%	烧结速度 /mm·min ⁻¹
	转鼓指数	抗磨指数		
1	55.60	6.10	77.83	22.22
2	63.23	5.23	81.79	20.00
3	65.50	5.17	85.32	24.24
4	57.90	5.90	72.50	25.00
5	62.00	5.80	81.01	27.59
6	67.17	5.80	80.71	28.57

$$\Delta T = 52.513 \times R + 16.606 \times \text{MgO} + 14.106 \times C$$

-84.466 (4)

式中：
T——转鼓指数，%；
RDI_{+3.15}——低温还原粉化指数，%；
RI——还原度，%；
ΔT——软化区间，℃；
R——烧结矿的二元碱度；

表 10 烧结矿冶金性能

方案	低温还原粉化/%			还原		荷重软化/℃		ΔT
	RDI _{+6.3}	RDI _{+3.15}	RDI _{-0.5}	RVL/%·min ⁻¹	RI/%	T _{10%}	T _{40%}	
1	29.98	70.02	8.83	0.69	90.89	1148	1251	103
2	49.08	76.58	7.94	0.67	88.51	1120	1242	122
3	54.69	78.78	6.94	0.68	90.67	1127	1246	119
4	46.67	76.16	7.47	0.69	91.91	1144	1255	111
5	45.40	75.46	7.77	0.76	95.59	1131	1234	102
6	53.96	80.12	6.49	0.68	90.68	1142	1258	116

表 11 回归分析所用相关数据

方案	伊朗矿配比/%	R	MgO/%	C/%	转鼓指数/%	RDI _{+3.15} /%	RI/%	ΔT	T _{10%}
1	5	1.71	2.61	4.00	55.60	70.02	90.89	103	1148
2	5	1.90	2.99	4.00	63.23	76.58	88.51	122	1120
3	10	2.13	2.23	3.75	65.50	78.78	90.67	119	1127
4	10	1.72	3.02	3.75	57.90	76.16	90.91	111	1144
5	15	1.92	2.18	3.50	62.00	75.46	95.59	102	1131
6	15	2.11	2.58	3.50	67.17	80.12	90.68	116	1142

MgO——烧结矿中的 MgO 含量，%；
C——烧结配碳量，%。
显然，伊朗矿配比量对上述指标影响不显著，回归方程直接将其剔除。在试验范围内，从上述方程可以看出：
(1)碱度是影响转鼓指数和低温还原粉化指数最重要的因素。在宣钢原料条件下，当 R=1.7~2.1 时，转鼓指数和低温还原粉化指数随碱度的提高

而明显改善。主要原因是随碱度提高，烧结矿中强度和还原性较好的铁酸钙数量大大增加的结果。资料^[2]表明，当碱度高于 2.2，将有相当量的铁酸二钙出现，不利于烧结矿强度和还原性的改善。
(2)MgO 含量对烧结矿转鼓指数和低温还原粉化指数的影响同碱度，但效果不如碱度明显。稻角志弘^[3]认为，凡是能降低赤铁矿至磁铁矿相变点，则赤铁矿生成困难。MgO 能降低 T_{HM}，因此能稳定

磁铁矿,使粉化率降低。

(3)配碳量降低,为烧结过程提供良好的氧化气氛,为铁酸钙的生成提供了有利条件。适量的配碳不仅可以节能,而且对于烧结矿质量改善有着重要意义。

(4)软化区间随烧结矿碱度、MgO 含量以及配碳量的提高而增大。宣钢烧结矿软化区间普遍较窄,开始软化温度较低。Bogdandy 和 Engell^[4]认为,孔隙度愈高,开始软化温度则愈低。宣钢烧结矿的还原度及还原速率高、孔隙度高可能是导致宣钢烧结矿开始软化温度低、软化区间窄的原因。

虽然上述烧结试验的次数少,但仍可以利用上述方程寻求试验范围内接近最优的工艺条件。可以采用直观法,从已做试验点中挑一个指标最优的,相应的因素组合条件即为预选的较优工艺条件。由于试验点充分均匀分散,试验点中最优的工艺条件离全面试验寻求的最优工艺条件不会很远。如果想进一步选优,可在第一次均匀设计最优结果附近再进行第二次均匀设计试验,进而找到更优的工艺条件。这个方法看起来粗糙,但大量试验证明,它是十分有效的。

用直观法可以看出, $R = 2.1$ 、 $MgO = 2.6\%$ 和 $C = 3.5\%$ 时,烧结矿的质量最好。为了检验模型的合理性和适用性,根据宣钢烧结厂降低碱度的要求,结合上述的模型方程,确定以较好的工艺参数进行了烧结杯试验。结果表明,当 $R = 2.0$ 、 $MgO = 3.0\%$ 和 $C = 3.5\%$ 时,烧结矿的转鼓指数为 64.33%、 $RDI_{+3.15} = 79.63\%$,误差均小于 3%。从检验性的

烧结杯试验看出,烧结矿的机械性能和冶金性能较好,能满足高炉生产要求。

烧结过程是一个非常复杂的物理化学变化过程,影响因素十分复杂,想建立一个实用模型来预测和控制烧结过程,需结合神经网络和模糊数学理论,再用遗传算法进行优化。

5 结 论

1. 伊朗矿配比的变化对烧结矿性能的影响不明显。

2. 在 1.7 ~ 2.1 的碱度范围内,随碱度提高烧结矿的综合性能改善,在适当改变配矿工艺参数的条件下,宣钢烧结矿的碱度可以降至 2.0。

3. 在 MgO 含量为 2.2% ~ 3.0% 范围内,随 MgO 含量提高烧结矿的综合性能改善,宣钢烧结矿中的 MgO 含量以控制在 3.0% 为宜。

4. 在配碳为 3.5% ~ 4.0% 范围内,随配碳量增加烧结矿的综合性能变差,宣钢原料条件下的配碳量以 3.5% 为宜。

参考文献:

- [1] 任露泉. 试验优化设计与分析(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [2] 潘宝巨,张成吉. 中国铁矿石造块实用技术[M]. 北京:冶金出版社,2000.
- [3] 周取定,孔令坛. 铁矿石造块理论与工艺[M]. 北京:冶金出版社,1989.
- [4] A. K. 比斯瓦斯. 高炉炼铁原理—理论与实践[M]. 北京:冶金出版社,1989.

An Experimental Investigation on Optimization of Technological Parameters of Sintering Process in Xuanhua Iron & Steel Co.

ZHANG Yu-zhu, LI Jie, XING Hong-wei, ZHANG Wei, YIN Hai-sheng
(Hebei University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: The technological parameters of sintering process are closely related with the quality of sintered ores. In order to establish optimal technological parameters of sintering process, a lot of experimental researches must be performed. Uniform design making the best of test point uniformity, uniform test times is less than orthogonal test. It can reduce the test investment, but still get near optimal technological parameters. According to the material conditions of Xuangang, this paper analyzes the effects different blending ratio of Iranian ore, basicity, carbon and MgO contents in sintering ore on the quality of sintered ore, and the optimal technological parameters are finally determined.

Key words: Uniform design; Optimization of technological parameter; Sintering test