

文章编号 :1000-582X( 2007 )11-0032-05

# 水钢高炉最佳炉料结构的试验

贾碧<sup>1</sup>,白晨光<sup>2</sup>,施金良<sup>1</sup>,常进<sup>3</sup>,张家相<sup>3</sup>,张东升<sup>3</sup>

(1. 重庆科技学院 冶金学院,重庆 400050; 2. 重庆大学 人事处,重庆 400030;  
3. 水城钢铁集团有限责任公司 生产处,贵州 水城 553028)

**摘要**:采用正交试验方法研究了现有原燃料及设备条件下水钢高炉的最佳炉料结构,在此基础上进一步优化炉料结构,并对它们的冶金性能进行了试验。结果表明:目前水钢高炉最佳炉料结构为86%的烧结矿(二元碱度为1.8)配加14%的印度块矿与越南块矿的混合矿(混合比例为1:1);此种炉料结构的软熔性能好,还原性能达到优良水平,炉渣碱度合适,但低温还原粉化性能不佳,若采用二元碱度为1.7的烧结矿,使炉渣的碱度低于1.2,则熟料率达到90%的炉料结构是完全可行的。

**关键词**:炉料结构;冶金性能;正交试验;优化

**中图分类号**:TF041

**文献标志码**:A

水钢目前常用的炉料结构有3种:I—新烧结矿:兰坪 格顶 = 86 : 8 : 6; II—新烧结矿:印度矿:兰坪 = 76 : 18 : 6; III—新烧结矿:印度矿:硅石 = 73 : 26 : 1。实验研究表明,它们的软熔性能和熔滴性能都不太好,并且第3种加硅石的炉料结构还不合理。铁矿石荷重软化性能对高炉中下部的透气性和间接还原的发展有直接的影响,软化温度低,一方面造成软熔带位置高,缩小了高炉中部的间接还原区,使焦比增加;另一方面也增大了软熔带的厚度,使高炉中下部的透气性恶化,影响高炉顺行。据测定,一般高炉软熔带的压损约占高炉总压损的60%以上。因此铁矿石熔滴性能对高炉顺行和增产节焦有重要影响<sup>[1]</sup>。

水钢4号和5号烧结机的顺利投产,可使高炉的熟料率达到90%。为应对此变化,采用正交试验法特别研究了熟料率、炉渣碱度和块矿种类对高炉冶炼的影响,在水钢现有的原燃料及设备条件下,确定最佳的炉料结构,研究熟料率达到90%的炉料结构状况等。对水钢高炉生产的高产、优质、低耗和长寿提供重要的指导意见。

## 1 试验研究的原料条件及试验方法

### 1.1 原料条件

炉料结构试验所用的原料为水钢现场生产所用的第二次选取的新烧结矿(以下简称新烧II)、越南块矿、印度块矿、澳大利亚块矿及清镇块矿等。其原料的化学成分、二元碱度及多元碱度(以下简称R综)列于表1。

### 1.2 炉料结构试验方案的确定

结合水钢高炉生产实际,采用正交试验方法<sup>[2]</sup>,特别研究了熟料率、天然矿种类对高炉冶炼的影响,确定最佳的炉料结构;在此基础上,研究熟料率达到90%的水钢未来炉料结构状况。

试验考查的因素	试验比较的条件
A:熟料率	$A_1 = 83\%$ $A_2 = 86\%$
B:天然矿种及配比	$B_1 = \text{澳块:清镇} = 70:30$ $B_2 = \text{印度:越南块} = 50:50$

正交试验方案设计见表2。

收稿日期:2007-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70571060)

作者简介:贾碧(1964-),女,重庆科技学院教授,主要从事冶金工程方向的研究(E-mail:jiabi1127@163.com)。

由于软熔性能试验能够模拟高炉条件下的荷重、还原、软化、熔融、滴落过程。以往的研究表明,一般高炉软熔带的压损约占高炉总压损的 60% 以上,而软熔带的压损又主要集中在熔融滴落部分。因此软熔性能最能反映不同炉料组成在冶炼过程的变化特性,所以实验研究中以不同炉料组成的软熔性能试验作为炉料结构的试验方法,用软熔性能的指标作为以上正交试

验的考查指标。

通过对正交试验结果分析,确定出最佳炉料结构;并对最佳炉料结构的低温还原粉化性能和还原性能进行研究。此外,在最佳炉料结构的基础上,研究熟料率达到 90% 的水钢未来炉料结构的软熔性能。炉料结构的组成及化学成分分别见表 3、表 4。

表 1 炉料结构试验所用原料的化学成分

%

试样	TFe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	(K,Na)O	S	Ig	碱度
新烧 II	54.68	7.69	11.14	6.27	2.20	2.35	0.30	0.07	0.025	0.33	1.80
越南矿	66.47	19.89	0.89	2.46	0.38	1.07	0.31	0.02	0.015	2.59	0.45(综)
印度矿	64.01	0.84	0.28	3.97	0.01	2.40	0.05	0.03	0.012	3.74	0.06(综)
澳矿	62.32	0.67	0.22	8.72	0.05	0.97	0.25	0.02	0.010	2.88	0.06(综)
清镇矿	53.77	1.95	0.00	8.08	0.52	8.62	0.31	1.03	0.044	3.86	0.11(综)

表 2 正交试验表

项目	A	B	C	试验指标
	熟料率/%	块矿种类	炉渣碱度(R <sub>2</sub> )	软熔性能
	1	2	3	
1	1(83.0)	1(澳清=70 30)	1.14	
2	1(83.0)	2(印越=50 50)	1.15	
3	2(86.0)	1(澳清=70 30)	1.18	
4	2(86.0)	2(印越=50 50)	1.19	

表 3 水钢高炉炉料结构组成

%

炉料结构	新烧 II	澳块	清镇块	印度块	越南块
I	83.0	11.9	5.1		
II	83.0			8.5	8.5
III	86.0	9.8	4.2		
IV	86.0			7.0	7.0
V	90.0			5.0	5.0

表 4 水钢高炉炉料结构的化学成分

%

炉料结构	TFe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	(K,Na)O	S	Ig	二元碱度	综合碱度
I	55.54	6.56	9.27	6.65	1.86	2.51	0.30	0.11	0.024	0.81	1.39	1.26
II	56.48	8.14	9.35	5.75	1.86	2.45	0.29	0.06	0.023	0.81	1.63	1.41
III	55.39	6.76	9.60	6.59	1.92	2.48	0.30	0.11	0.024	0.72	1.46	1.31
IV	56.16	8.06	9.60	5.84	1.93	2.26	0.28	0.07	0.023	0.73	1.64	1.47
V	55.72	7.96	10.08	5.96	2.00	2.29	0.29	0.07	0.024	0.61	1.69	1.51

### 1.3 炉料结构的试验方法

#### 1) 炉料结构软熔性能试验方法

该性能的试验方法目前国内外尚无统一标准。试验采用的方法是在分析比较国内外试验方法的基础上确定的。

采用集散控制系统,按给定曲线对炉温进行全自

动控制,每 4 s 采集过程参数:料柱压差( $\Delta P$ )、料柱位移变化( $\Delta H$ )及料柱温度( $T$ )一次,按要求对实验数据进行处理并输出相应实验结果的图形、报表。

#### 2) 炉料结构低温还原粉化性能试验方法

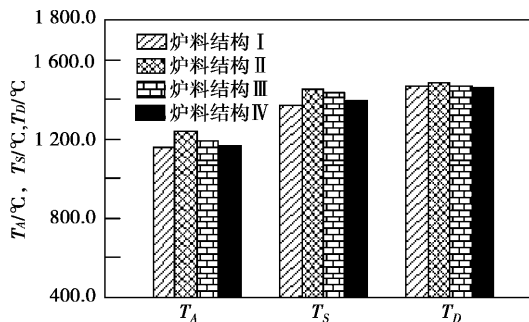
试验是按照国家标准 GB/T 13242-91 规定的“低温粉化试验静态还原后使用冷转鼓的方法”进行的。

### 3) 炉料结构中温还原性能试验方法

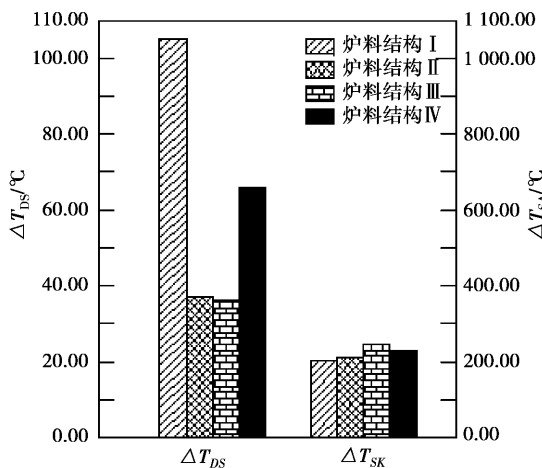
试验是按照国家标准 GB/T 13241 - 91 规定的“铁矿石还原性的测定方法”进行的。

## 2 水钢炉料结构的试验结果

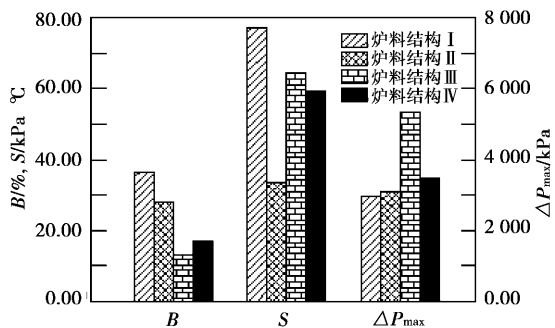
1) 正交试验及其分析结果见表 5 及图 1。



(a) 炉料结构 T<sub>A</sub>、T<sub>S</sub> 及 T<sub>D</sub> 对比



(b) 炉料结构 ΔT<sub>DS</sub> 及 ΔT<sub>Sd</sub> 对比

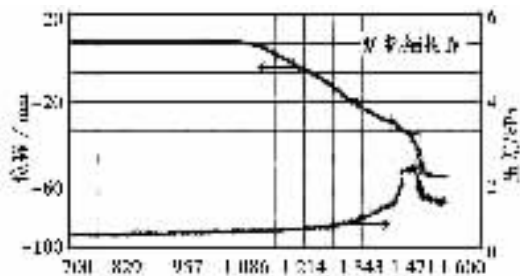


(c) 炉料结构 B、S 及 ΔP<sub>max</sub> 对比

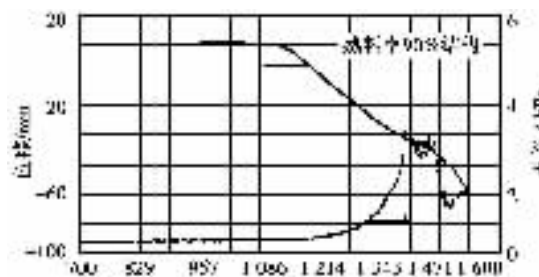
图 1 炉料结构软熔性能对比

2) 最佳炉料结构及熟料率为 90% 炉料结构的软熔性能试验结果列于表 6 及图 2。

3) 最佳炉料结构低温还原粉化性能和还原性能的试验结果见表 7 及图 3。



(a) 最佳炉料结构



(b) 熟料率为 90% 炉料结构

图 2 软熔曲线

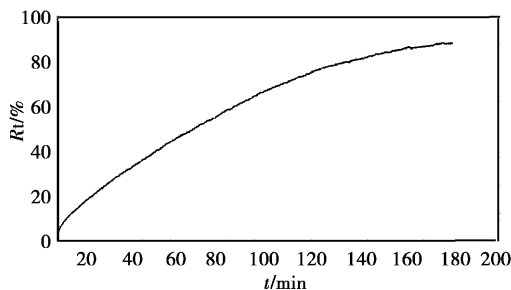


图 3 最佳炉料结构还原度曲线

## 3 水钢高炉炉料结构试验结果的分析与评价

### 3.1 最佳炉料结构的确定

对炉料结构的正交试验结果进行分析<sup>[2]</sup>, 并将分析结果列于表 5 及图 1 中。从表 5 及图 1 中比较各组试样的软化、熔滴性能指标可以大致看出以下几点规律。

软化开始温度 块矿种类比熟料率对它的影响大, 其中又以熟料率为 83% 和印度: 越南 = 50: 50 这两种水平效果好。

软化终了温度 块矿种类对之的影响比熟料率大, 其中又以熟料率为 86% 和印度与越南块搭配这两种水平效果好。

滴落温度 熟料率比块矿种类对其的影响大, 其中又以熟料率为 86% 和澳块: 清镇块 = 70: 30 这两种水平效果好。

软化温度区间 熟料率比块矿种类对其的影响大, 其中又以熟料率为 83% 和印度与越南块搭配这两种水平效果好。

软熔温度区间 熟料率比块矿种类对其的影响稍

大,其中又以熟料率为 86% 和印度与越南块搭配这两种水平效果好。

软熔层的压缩率:熟料率比块矿种类对其的影响大,其中又以熟料率为 86% 和印度块与越南块搭配这两个水平为好。

最大压差:熟料率比块矿种类对其影响大,其中又以熟料率为 83% 和印度与越南块搭配这两种水平效果好。

熔滴性能总特性值:块矿种类对其的影响比熟料

率大,其中又以熟料率为 83% 和印度:越南 = 50:50 这两种水平效果好,熟料率为 83% 和 86% 的极差不大。

通过对以上 8 个软化、熔滴性能指标的分析发现:

1)熟料率为 86% 的炉料结构所对应的软化终了温度、滴落温度、软熔温度区间及软熔层的压缩率 4 个指标好;熟料率为 83% 的炉料结构所对应的软化开始温度、软化温度区间、熔滴特性指数及最大压差 4 个指标好,但熔滴特性指数二者相差不大。经过综合比较与研究,最后确定最佳熟料率为 86%。

表 5 正交试验及分析结果

性能指标	$T_A/^\circ\text{C}$	$T_S/^\circ\text{C}$	$T_D/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{SA}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{DS}/^\circ\text{C}$	$B/\%$	$\Delta P_{\max}/\text{Pa}$	$S/\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}$
炉料结构 I	1 161	1 366	1 471	205	105	36.49	2 968	77.0
炉料结构 II	1 239	1 449	1 486	210	37	27.84	3 092	33.7
炉料结构 III	1 189	1 434	1 470	245	36	12.95	5 341	64.4
炉料结构 IV	1 168	1 396	1 462	228	66	17.00	3 491	59.2
熟料率 %	83 I <sub>1</sub>	2 400	2 815	2 957	415	142	6 060	110.7
	86 II <sub>1</sub>	2 357	2 830	2 932	473	102	8 832	123.6
	83 I <sub>1</sub>	1 200	1 408	1 479	208	71	3 030	55.4
	86 II <sub>1</sub>	1 179	1 415	1 466	237	51	4 416	61.8
	极差	21	7	13	29	20	17.19	1 386
块矿种类 %	澳清 I <sub>2</sub>	2 350	2 800	2 941	450	142	8 309	141.4
	印越 II <sub>2</sub>	2 407	2 845	2 948	438	103	6 583	92.9
	澳清 I <sub>2</sub>	1 175	1 400	1 471	225	71	4 155	70.7
	印越 II <sub>2</sub>	1 204	1 423	1 474	219	52	3 292	46.5
	极差	29	23	3	6	19	2.30	863

表 6 最佳炉料结构及熟料率为 90% 炉料结构的软熔性能

性能指标	$T_A/^\circ\text{C}$	$T_S/^\circ\text{C}$	$T_D/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{SA}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{DS}/^\circ\text{C}$	$B/\%$	$\Delta P_{\max}/\text{Pa}$	$S/\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}$
最佳炉料结构	1 168	1 396	1 462	228	66	17.00	3 491	59.2
熟料率 90% 结构	1 178	1 366	1 474	188	108	18.16	5 172	163.3

表 7 最佳炉料结构低温还原粉化性能和还原性能

试 样	低温还原粉化性能/%			还原性能	
	$\text{RDI}_{+6.3}$	$\text{RDI}_{+3.15}$	$\text{RDI}_{-0.5}$	$\text{RI}/\%$	$\text{RVI}/\% \cdot \text{min}^{-1}$
最佳炉料结构	37.49	66.63	6.80	87.69	0.64

2)对两种块矿不同水平炉料结构的 8 个软化、熔滴性能指标的分析表明,8 个指标中印度与越南块搭配(50:50)的炉料结构软熔性能好的就占 7 个;而澳块与清镇搭配的炉料结构软熔性能好的仅占 1 个,并且这个开始滴落温度指标二者仅差 3℃。所以最后确定最佳块矿种类为印度:越南块 = 50:50。

综上所述,通过 8 个软熔性能指标的分析、比较,最后确定的最佳炉料结构即为炉料结构 IV:熟料率为 86% 的新烧结矿( $R_2 = 1.8$ )搭配 14% 的印度与越南块

的混合矿(印度:越南块 = 50:50)。

### 3.2 最佳炉料结构冶金性能的分析与评价

用 86% 的新烧结矿 II( $R_2 = 1.8$ )同 14% 的印度与越南的混合块矿(二者混合比例为 50:50)搭配构成最佳炉料结构,分别对其进行了软化、熔滴试验、还原试验和低温还原粉化试验(表 6、表 7 及图 2、图 3)。

由表 6、表 7、图 2 及图 3 可见:

1)最佳炉料结构的软化熔滴性能指标好:分别为软化开始温度 1 168℃、软化终了温度 1 396℃、滴落

时温度 1 462 °C、软化温度区间 228 °C、软熔温度区间 66 °C、软熔层压缩率 17.00%、最大压差 3 491 Pa、熔滴特性指数 59.2 kPa·°C。

这是因为开始软化温度决定于渣相的熔点,而融化与滴落温度则取决于渣相或铁相的熔点<sup>[3]</sup>。渣相的熔点主要取决于其矿物组成,如钙铁橄榄石熔点较低,正硅酸钙熔点则较高,若含有较高的碱金属氧化物 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O,则熔点可低于 1 000 °C。因此 MgO、FeO 含量升高,则渣相熔点降低,而碱度升高时,则渣相熔点升高。从表 4、表 6、及图 2 可见,由于在 I、II、III、IV 4 个炉料结构中,最佳炉料结构(炉料结构 IV)的 FeO 含量位居第二, MgO 含量也高,易形成低熔点的渣相,但其碱度略高,易形成高熔点的渣相。二者综合作用的结果,最终形成了较低熔点的渣相,使最佳炉料结构的开始软化温度、软化终了温度、滴落温度均较低,软化温度区间与软化温度区间均较窄,料柱透气性和熔滴特性指数也好。这些指标均表明最佳炉料结构的软熔性能好。

2)最佳炉料结构的还原度指数为 87.69%,还原速率指数为 0.64%,其还原性能达到了优良水平。

这是因为矿相研究表明,铁矿石的还原性与其矿物组成和气孔结构有密切关系<sup>[4]</sup>,各矿物组成的还原性为:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>49.4%, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>25.2%, 2FeO·SiO<sub>2</sub>5.0%, CaO·FeO·SiO<sub>2</sub>12.8%, CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>49.2%, 2CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>25.5%<sup>[5]</sup>。通过 X 射线物相衍射仪及矿相显微镜分析,烧结矿随着碱度的提高,其矿物组成中含有较多易还原的铁矿物 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和粘结相 CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,难还原的 FeO·SiO<sub>2</sub> 含量减少。从表 4、表 7 及图 3 可见,最佳炉料结构(炉料结构 IV)的 FeO 含量低,为 8.06%,二元碱度高为 1.64,所以其还原性能好,达到了优良水平。

3)最佳炉料结构的粉化性能不太好(RDI<sub>+6.3</sub> = 37.49%, RDI<sub>+3.15</sub> = 66.63%, RDI<sub>-0.5</sub> = 6.80%)。究其原因主要是所配烧结矿的 FeO 含量太低所致<sup>[6]</sup>。

4)由表 2 可见,最佳炉料结构对应炉渣的二元碱度为 1.19,符合水钢的实际情况。

因此,最佳炉料结构的选择是合理的;只要改善烧结矿的低温还原粉化性能,那么最佳炉料结构的冶金性能会更理想,必将全面提升水钢炼铁工艺的产量和质量。

### 3.3 水钢未来炉料结构试验结果的分析与评价

在最佳炉料结构中,仍然采用新烧结矿 II,将熟料率由 86% 提高到 90%,就构成了水钢未来的炉料结构。只是没法获得与现场烧结矿性能完全一致而二元碱度又为 1.7 的烧结矿,所以采用现场生产的二元碱度为 1.8 的烧结矿 II 代替。因此,该炉料结构对应的

二元炉渣碱度偏高,为 1.25,将此炉料结构的软化、熔滴试验结果列于表 6 及图 2 中。

由上可见,软化开始温度 1 178 °C、软化终了温度 1 366 °C、滴落时温度 1 474 °C、软化温度区间 188 °C、软熔温度区间 108 °C、软熔层压缩率 18.16%、最大压差 5 172 Pa、熔滴特性指数 163.3 kPa·°C。该炉料结构的软熔性能指标基本可以,只是透气性太差,滴落温度偏高,软熔区间偏宽,熔滴特性指数偏大。主要是因为此炉料结构所对应的炉渣碱度太高,为 1.25 造成的。

因此,在未来的生产中建议采用二元碱度为 1.7 的烧结矿,使炉渣的碱度低于 1.2,那么熟料率达到 90% 的炉料结构是完全可行的。

## 4 结 论

1)在现有的原燃料及设备条件下,水钢高炉最佳炉料结构为 86% 的碱度为 1.8 的烧结矿配加 14% 的印度与越南块的混合矿(其混合比例为 50:50)。

2)最佳炉料结构的软熔性能好,还原性能达到优良水平,炉渣碱度合适,但低温还原粉化性能不太好。只要改善烧结矿的低温还原粉化性能,那么最佳炉料结构的冶金性能将会更理想。因此,最佳炉料结构的选择是合理的。

3)在未来的生产中,采用冶金性能达到要求二元碱度为 1.7 的烧结矿,使炉渣碱度低于 1.2,那么熟料率达到 90% 的炉料结构的冶金性能将会更好,该炉料结构是完全可行的。

4)采用炉料冶金性能研究方法,优化水钢现有炉料结构和探寻水钢未来炉料结构,将有利于提升水钢炼铁工艺产量和质量。

### 参考文献:

- [1] 许满兴,张宗旺.邯钢高炉原料的质量及分析[J].烧结球团,1999,24(1):5-8.
- [2] 高允彦.正交及回归试验设计方法[M].北京:冶金工业出版社,1991.
- [3] 周取定,孔令坛.铁矿粉造块理论及工艺[M].北京:冶金工业出版社,1989.
- [4] 由文泉,赵民革.实用高炉炼铁技术[M].北京:冶金工业出版社,2002.
- [5] 傅菊英,姜涛,朱德庆.烧结球团学[M].长沙:中南工业大学出版社,1996.
- [6] 王海涛,李光辉,范晓慧,等.几种高炉炉料结构冶金性能的对比研究[J].钢铁,2006,41(1):23-27.

(下转第 63 页)

## Hardware in Loop ABS Test Simulation Platform

ZHENG Tai-xiong

( College of Automation , Chongqing University of Posts and Telecommunications , Chongqing 400065 , P R China )

**Abstract** :The hardware in loop test approach was proposed. The dynamic model of vehicle was studied ;the simulator on chip ( SOC ) based on FPGA was designed. The characteristic model of electromagnetic valve , the model of tire and the simulation technique based on SOC were put forward. Based on SOC , the hardware in loop simulation platform was developed to simulate the status of vehicle. It provided the electronic control unit with simulated environment , so as to reduce the cost of experiment. After tryout , it was shown that the platform was independent with the real system of vehicle , suitable for many kinds of vehicles. The ABS system was tested and the control parameters were calibrated on this platform. The experimental results show the platform can reduce ABS development time.

**Key words** :ABS ;simulator on chip ;hardware in loop simulation platform ;ABS test

( 编辑 吕建斌 )

~~~~~  
( 上接第 36 页 )

## Study on the Best Burden Structure for the Blast Furnace

JIA Bi<sup>1</sup> , BAI Chen-guang<sup>2</sup> , SHI Jin-liang<sup>1</sup> , Chang Jin<sup>3</sup> ,  
ZHANG Jia-xiang<sup>3</sup> , ZHANG Dong-shen<sup>3</sup>

( 1. School of Metallurgical Engineering , Chongqing University of Science and Technology , Chongqing 400050 , P R China 2. Human Resource Department , Chongqing University , Chongqing 400030 , China ;  
3. Shuicheng Iron and Steel Co. Ltd. , Shuicheng 553028 , Guizhou , P R China )

**Abstract** :By means of the method of Orthogonal test , the best burden structures were studied under the present condition of raw material , fuel and equipment for the blast furnace in the Shuicheng I&S Co , the further burden structure was optimized , and the metallurgical properties were tested. The results show that the present best burden structure for the BF in the Shuicheng I&S Co consist of 86% sinter whose basicity is 1.8 and 14% natural ore which is the mixture of 50% India ore and 50% Vietnam ore. This burden structure has good performance in indexes of softening , melting and dropping , the choice R<sub>I</sub>( reduction index ) and the proper basicity of slag , but its R<sub>D</sub>( low temperature reduction degradation index ) is not good. If the sinter with basicity being below 1.7 and the basicity of its slat being below 1.2 , the burden structure that has 90% sinter is completely practicable.

**Key words** :burden structure ; metallurgical property ; orthogonal test ; optimization

( 编辑 陈移峰 )