

## 首钢 2号高炉喷煤置换比试验研究

竺维春 王颖生  
(首钢总公司)

**摘要** 对2号高炉提高煤比过程中的一些操作经验进行了总结,分析了影响置换比的因素,提出了提高置换比的措施。

**关键词** 高炉 喷煤 置换比 分析

### Test of PCI replacement ratio at Shoudu Steel's No. 2 BF

Zhu Weichun Wang Yingsheng  
(Shoudu Iron and Steel Co.)

**Abstract** Operation experiences of No. 2 BF at Shoudu Steel during injecting coal were summed up, the basic factors affecting replacement ratio were analysesed and some measures increasing replacement ratio were put forward.

**Key words** BF PCI replacement ratio analysis

#### 1 引言

为了提高高炉喷煤置换比,找到影响置换比的因素,2002年6月以来,在首钢2号高炉稳定喷吹A、B(A无烟煤、B烟煤)混合煤。选择不同时期进行对比分析,以探索置换比变化规律,并提出提高置换比的措施。

#### 2 试验情况及分析

以2002年6月2~12日(扣除4、5、9、10日)喷吹A煤与潞安煤混合煤作为基准期(A煤比例50%);以7月1~12日(扣除3、5日)喷吹A、B混合煤为试验一期(A煤比例>70%);以7月16日~8月12日(扣除7月22、24日)喷吹A、B混合煤为试验二期(A煤比例≥60%);以8月29日~9月8日喷吹A煤为试验三期;以9月14~17日(扣除16日)喷吹A、B混合煤为试验四期(A煤比例≥60%,中速磨分离器转速16 r/min);以9月21~26日喷吹A、B混合煤为试验五期(扣除22日,A煤比例≥66%,中速磨分离器转速20 r/min);以10月2~16日为试验

六期(扣除6日);以10月18~23日为试验七期;以10月26~27日为试验八期(A煤比例≥60%)。试验六~七期喷吹煤种、比例同试验五期。从试验六期开始用一炼焦(干熄法)代替二炼焦(湿熄法),替代前后在入炉焦炭组成中所占比例同为70%,且试验七、八期焦比进一步降低,小焦块比升高。

试验期间煤粉化学成分及热值见表1,试验有关技术经济指标及原燃料条件见表2。由表2可知,试验四期以后的各期风温水平较高,产量稳定在较高水平,焦比不断降低。阶段燃料比最低至470 kg/t,用一炼焦代替二炼焦后,焦炭负荷由5.09提高到5.33,炉况比较稳定;焦炭负荷提高至5.40时炉况欠稳,于是开始增加小焦块用量(由200 kg/批→600 kg/批→800 kg/批),目的是增加料柱透气性,进一步降低焦比。从高炉生产指标分析可知,一炼焦的使用为2号高炉降焦创造了条件,说明通过增加小焦块比例并使用一炼焦,焦比能够稳定在290 kg/t。

表 1 煤粉化学成分

项目	取样日期	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	O <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	M <sub>ad</sub>	Q <sub>b</sub> MJ/kg
基准期	6.4	81.28	3.59	2.24	1.07	80.01	0.74	31.92
试验一期	7.9	80.34	3.72	4.27	1.05	77.06	2.24	30.90
试验二期	8.9	77.71	3.71	4.59	0.68		2.34	30.46
试验三期	9.12	78.87	3.51	2.35	0.99	78.92	1.15	30.57
试验四期	9.17	75.83	3.43	4.89	0.97		3.14	29.64
试验六期	10.16	75.88	3.56	5.33	0.80	71.43	2.66	
试验七期	10.23	76.35	3.50	4.35	0.95	70.69	3.00	29.29
试验八期	10.31	75.01	3.71	5.87	0.90	68.59	3.65	29.05

表 2 2号高炉生产指标及原燃料条件

项目	平均日产 t/d	总焦比 kg/t	煤比 kg/t	燃料比 kg/t	校正燃料比 kg/t	矿石 TFe %	焦炭灰分 %	煤粉挥发分 %	煤粉灰分 %	富氧率 %
基准期	3893.2	396.0	105.7	501.7	501.7	59.7	12.46	8.95	10.67	0
试验一期	4009.2	354.0	145.5	499.5	500.5	60.1	12.19	8.82	10.23	0.56
试验二期	3901.8	340.0	167.7	507.7	502.9	60.0	12.41	15.97	9.70	0.96
试验三期	4176.4	329.5	176.6	506.1	504.9	59.9	12.30	7.95	12.32	1.07
试验四期	4311.3	328.0	171.0	499.0	501.2	59.7	12.47	12.81	11.00	0.79
试验五期	4316.1	316.8	156.8	473.6	481.9	59.5	12.33	14.75	10.66	0.75
试验六期	4504.5	307.4	162.5	469.9	486.4	59.9	12.40	14.72	11.05	1.08
试验七期	4335.5	314.3	162.3	476.7	483.2	59.7	12.38	14.57	11.03	0.72
试验八期	4397.1	314.5	166.5	481.0	489.1	59.8	12.23	16.08	11.75	1.05

  

项目	风量 Nm <sup>3</sup> /min	风温 C	鼓风湿分 g/m <sup>3</sup>	风压 MPa	顶压 MPa	压差 MPa	透气性指数 m <sup>3</sup> /(min · MPa)	顶温 C	炉腹煤气量 Nm <sup>3</sup> /h	[Si] %	T <sub>气</sub> C
基准期	3424	1004	9.67	0.306	0.158	0.148	23135	191	293812	0.56	2035
试验一期	3366	1078	18.32	0.311	0.169	0.142	23704	220	293053	0.42	2017
试验二期	3268	1098	18.26	0.310	0.168	0.142	23014	218	286577	0.38	2020
试验三期	3351	1103	14.20	0.311	0.168	0.142	23430	238	306464	0.39	2032
试验四期	3351	1202	11.0	0.312	0.169	0.143	23440	202	309552	0.35	2116
试验五期	3334	1212	9.80	0.312	0.169	0.142	23780	219	296658	0.36	2140
试验六期	3360	1236	6.84	0.312	0.169	0.143	23470	208	305262	0.34	2181
试验七期	3315	1212	4.88	0.312	0.169	0.143	23230	197	302168	0.38	2170
试验八期	3346	1227	3.10	0.316	0.170	0.146	22995	206	306296	0.36	2199

注:①煤种变化对校正燃料比的影响是通过其发热值的变化得出的(按燃炭中 1 kg C 生成 CO 放热量 9 797 kJ 计算);②试验六期及以前各期,总焦比中小焦块比一般在 7.5 kg/t 左右;试验七期小焦块比 20.9 kg/t, 焦比 293.4 kg/t, 试验八期小焦块比 24.0 kg/t, 焦比 290.5 kg/t。

### 3 操作制度

#### 3.1 布料制度

整个试验期内,焦炭负荷从 4.30 提高到 5.40, 最后稳定在 5.40。7 月 31 日以前, 矿石布料制度变化为  $O_{4\frac{1}{3}}^{30^{\circ}33^{\circ}30^{\circ}} \rightarrow O_{4\frac{2}{3}}^{30^{\circ}33^{\circ}30^{\circ}} \rightarrow O_{3\frac{3}{3}}^{30^{\circ}33^{\circ}30^{\circ}}$ , 焦炭布料制度变化为  $C_{5\frac{3}{1}}^{34^{\circ}32^{\circ}29^{\circ}25^{\circ}} \rightarrow C_{5\frac{3}{1}}^{34^{\circ}32^{\circ}29^{\circ}25^{\circ}} \rightarrow C_{5\frac{3}{1}}^{34^{\circ}32^{\circ}29^{\circ}27^{\circ}}$ , 总体是不断加重边缘, 目的是保持炉喉两股稳定的煤气通路, 炉喉十字测温边

缘(除西 1 点外)与中心值控制在 300 ± 50 C, 这也说明在煤比提高的过程中煤气流是发展边缘的。通过布料控制才保持了炉喉煤气流分布的相对稳定。8 月 26 日至 9 月 9 日, 在煤比提高的过程中, 通过增加矿石布料倾角 33° 的环数来抑制边缘。9 月 18 日布料设备发生故障, 造成 α 角偏差(与恢复前相比), 9 月 21~26 日通过同时同比例增大矿

表 3 滲铁指标

项目	铁水温度, °C	[S], %	[Si], %	CaO/SiO <sub>2</sub>
基准期	1498	0.022	0.56	1.04
试验一期	1488	0.023	0.42	1.04
试验二期	1481	0.025	0.38	1.04
试验三期	1486	0.024	0.39	1.04
试验四期	1479	0.026	0.35	1.04
试验五期	1487	0.022	0.36	1.04
试验六期	1484	0.025	0.34	1.04
试验七期	1487	0.025	0.38	1.04
试验八期	1489	0.022	0.36	1.04

本稳定(见表 4)。试验四期以后,由于风温较高,实际风速、鼓风动能稳定在较高水平。欲进一步提高煤比,在送风制度上宜继续保持稳定。

#### 4 校正置换比分析

##### 4.1 校正置换比

设基准期煤粉置换比 0.8, 校正置换比计算结果见表 5。由表 5 可知:除试验四、八

石、焦炭布料倾角的手段来保证炉喉煤气流分布的稳定,但炉喉十字测温东 1 点较高,北 1 点较低。10 月,在稳定煤比,不断降低焦比的过程中,装料制度保持稳定,炉喉十字测温边缘温度趋于一致(除西 1 点外),高炉圆周工作趋于均匀。

欲进一步提高煤比、降低焦比,首先需要稳定原燃料。在装料制度调节上,首先是提高焦炭负荷,看炉喉煤气十字测温的分布情况,再作调整。布料制度调节是适度抑制边缘,又不让中心过开(如调焦炭环数,38°减少 1 环,30°增加 1 环)。

#### 3.2 炉缸热制度及造渣制度

试验期与基准期相比,铁水温度及 [Si] 降低,但在正常范围之内;造渣制度保持稳定。具体情况见表 3。

#### 3.3 送风制度

试验期与基准期相比,风速、鼓风动能基

表 4 2号高炉送风制度

项目	风量 m <sup>3</sup> /min	风温 ℃	风压 kPa	风口面积 m <sup>2</sup>	标准风速 m/s	实际风速 m/s	鼓风动能 kJ/s
基准期	3424	1004	0.306	0.284	201	221	91.6
试验一期	3366	1078	0.311	0.285	197	226	90.3
试验二期	3268	1098	0.310	0.281	194	227	88.0
试验三期	3351	1103	0.311	0.286	195	229	91.8
试验四期	3351	1202	0.312	0.295	189	237	94.5
试验五期	3334	1212	0.312	0.295	188	237	94.4
试验六期	3360	1236	0.312	0.295	190	243	99.7
试验七期	3315	1212	0.312	0.295	187	236	92.8
试验八期	3346	1227	0.316	0.295	189	238	95.5

表 5 试验各期煤比及校正置换比

项目	入炉总焦比, kg/t	煤比, kg/t	煤粉校正置换比
基准期	396.0	105.7	0.80
试验一期	354.0	145.5	0.76
试验二期	340.0	167.7	0.72
试验三期	329.5	176.6	0.72
试验四期	328.0	171.0	0.65
试验五期	316.8	156.8	0.76
试验六期	307.4	162.5	0.73
试验七期	314.3	162.3	0.72
试验八期	314.5	166.5	0.66

期外,校正置换比均在 0.72 以上;试验四期置换比最低;试验七、八期焦比降低,小焦块比升高,由于小焦块不能等比例替代大焦块,造成总焦比及燃料比升高,也就造成煤粉置换比的降低。另外,试验八期煤粉灰分较高,也是置换比降低的原因之一。

##### 4.2 影响置换比的因素

(1) 煤气利用率。从表 6 可知,除试验一

期外,试验各期的煤气利用率均好于基准期。

(2) 氧气过剩系数。试验期氧气过剩系数与基准期相比明显偏低(见表7),是置换比略低的原因之一。在喷吹A、B混合煤时,较高煤比情况下,氧气过剩系数一般在0.85以上,但置换比仍保持在较好水平(0.72以上),校正燃料比较低,说明A、B混合煤在风口区虽然不能完全燃烧,但在炉内通过参与化学反应,仍保持了较好的利用。在目前条件下,喷吹A、B混合煤氧气过剩系数可控制在<0.85。

表6 煤气成分分析和煤气利用率,%

项目	$\eta_{CO}$	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
基准期	44.7	1.3	23.1	18.6	57.0
试验一期	43.3	1.3	23.7	18.2	56.8
试验二期	49.1	3.4	22.5	21.7	52.4
试验三期	48.2	2.4	21.4	19.9	56.2
试验四期	48.8	2.6	21.7	20.8	54.8
试验五期	48.9	2.8	21.5	20.6	54.8
试验六期	50.5	2.4	20.6	21.0	56.0
试验七期	51.0	2.3	20.1	20.9	56.5
试验八期	50.5	2.5	21.1	21.5	54.9

注:基准期、试验一期煤气分析为炼铁厂化验室分析,其他时期为炉顶煤气连续分析。

(3) 未燃煤粉。瓦斯灰、瓦斯泥中的未燃煤粉比表面积百分含量见表8。从表8可以看出,试验四期的未燃煤粉比表面积百分含量较高。这是因为煤粉大粒径比例升高,说明在喷吹A、B混合煤时应控制大粒径煤粉的比例。从表9可以看出,A、B混合煤燃烧性好于A煤与潞安煤混合煤的燃烧性。A、B混

合煤中不同粒径区间中A煤的比例(通过电镜分析)见表10,说明不同粒径区间B煤的比例基本相同。由于混合煤中A煤比例高,且B煤的燃烧性好于A煤的燃烧性,故混合煤的燃烧性对粒度的要求可参考A煤的粒度控制。2001年对3号高炉喷吹A煤得出的结论是,喷吹A煤的适宜粒度:-200目不低于45%、+80目不高于20%,故建议A、B混合煤的粒度控制在+80目不高于20%。

试验八期未燃煤粉比表面积含量不高,说明置换比相对其他时期略低并非煤粉燃烧性不好所致。

表7 氧气过剩系数( $\mu$ )计算结果

项目	喷枪数 支	单枪喷煤量 kg/h	$\mu$
基准期	22	779	1.41
试验一期	23	1057	1.09
试验二期	23	1186	1.00
试验三期	23	1336	0.87
试验四期	24	1278	0.87
试验五期	24	1175	0.98
试验六期	24	1271	0.87
试验七期	24	1222	0.85
试验八期	24	1271	0.87

注: $\mu$ 指煤粉在单个风口前完全燃烧成CO<sub>2</sub>及H<sub>2</sub>O时的氧气过剩系数。

(4) 风温。由表2可知,从试验四期开始风温超过了1200℃,理论燃烧温度也由以前的2017~2035℃上升至2116~2199℃。除试验四期外(煤粉大粒径比例升高),风温较高的其他各期在保持较高焦炭负

表8 瓦斯灰矿相分析,%

项目	取样日期	煤粉粒度		焦炭比表面积 百分含量	未燃煤粉(比表面积百分含量)		
		+80目	-200目		原煤	未完全燃烧无烟煤残粒	烟煤残粒
试验一期	7.1	8.02	56.19	65.9	0	0	5.5
试验二期	8.12	12.56	54.98	47.7	0	1.1	10.8
试验三期	9.11	13.80	40.70	51.0	0	2.7	0
试验四期	9.17	23.80	42.70	39.0	2.4	5.0	3.3
试验六期	10.14	9.40	58.50	48.4	0.8	4.7	1.3
试验七期	10.21	16.98	48.55	48.3	0.4	4.3	1.8
试验八期	10.28	13.68	55.23	57.8	0.6	2.4	1.2

表9 不同煤种的实验室燃烧率, %

18.1% B 煤	34.6% B 煤	A 煤	50% A 煤 + 50% 路安煤
+ 81.9% A 煤	+ 65.4% A 煤		
48.0	50.0	36.3	35.1

表10 A 煤比表面积百分含量, %

粒 级	煤样 1	煤样 2
+80 目	73.3	80.2
80~180 目	73.5	73.2
180~200 目	75.1	71.6
-200 目	83.4	72.6

注: 煤样 1、煤样 2 为生产用煤粉。

荷、稳定煤气利用的前提下, 燃料比、校正燃料比明显降低。说明在喷吹 A、B 混合煤时,

表11 喷吹效益核算结果

项 目	试验一期	试验二期	试验三期	试验四期	试验五期	试验六期	试验七期	试验八期
总焦比降低, kg/t	42.0	56.0	66.5	68.0	79.2	88.6	102.6	105.5
小焦块比升高, kg/t	0	0	0	0	0	0	13.4	16.5
氧气量升高, m <sup>3</sup> /t	2.69	8.57	9.98	5.68	5.06	5.10	2.46	5.30
小焦块比升高影响成本, 元/t	0	0	0	0	0	0	+4.4	+5.4
总焦比降低影响成本, 元/t	-20.6	-27.5	-32.7	-33.4	-38.9	-43.5	-50.4	-51.8
氧气量升高影响成本, 元/t	+1.5	+4.7	+5.5	+3.1	+2.8	+2.8	+1.4	+2.9
煤种变化影响成本, 元/t	-2.0	-2.3	-1.1	-2.3	-2.1	-2.1	-2.1	-2.3
煤比升高影响成本, 元/t	+11.6	+17.9	+21.3	+18.9	+14.9	+16.5	+16.5	+17.6
生铁成本变化, 元/t	-9.5	-7.2	-6.9	-13.7	-23.4	-26.3	-30.3	-28.3

注: 煤粉成本按原煤进厂价加上制粉成本, 制粉成本 45 元/t。2002 年上半年燃料进厂价格: A 煤 256 元/t, 路安煤 275 元/t, B 煤 225 元/t; 外购焦炭价格 491 元/t; 氧气价格 0.55 元/m<sup>3</sup>; 小焦块价格 325 元/t。

## 6 结论

(1) 2 号高炉保持较高煤比的主要原因是送风制度和装料制度选择合理。在送风制度上, 试验期与基准期相比, 风速、鼓风动能基本稳定; 在装料制度上, 在提高煤比的过程中通过加重边缘获得边缘、中心两股稳定的煤气通路。

(2) 试验期与基准期相比校正置换比略低, 原因是氧气过剩系数降低。试验四期由于煤粉大粒径比例升高, 因而校正置换比最低。试验八期小焦块比升高、灰分较高是置换比降低的原因之一。

(3) 喷吹 A、B 混合煤氧气过剩系数控制在  $\geq 0.85$ , 较高煤比下, 校正置换比仍保持

• 18 •

在低富氧、较高煤比情况下, 高风温对降低燃料比有明显的功效, 前提是保持较高的焦炭负荷、稳定煤气利用、适宜的煤粉粒度。

## 5 最佳效益计算

与基准期相比, 试验七期的喷吹效益最好, 每吨生铁降低成本为 30.3 元(见表 11), 说明使用小焦块并非越多越好。在稳定煤粉置换比、使用适量小焦块的基础上, 积极降低焦比才能创造最大的经济效益。试验二期与试验三期相比, 技术经济指标接近, 但从喷吹效益上讲, 试验二期更好一点, 说明喷吹 A、B 混合煤好于喷吹单一 A 煤。

在较好水平(0.72 以上)。在较高煤比下, 要想提高校正置换比, 可以通过在保持较高风温、较高焦炭负荷、稳定煤气利用的前提下提高富氧量和在不影响喷吹的条件下降低煤粉的粒度来实现。

(4) 喷吹 A、B 混合煤的试验七期的喷吹效益最好, 降低生铁成本 30.3 元/t。在稳定置换比、使用适量小焦块的基础上, 积极降低焦比才能创造最大的经济效益。

(责任编辑 胡慧丽)

联系人: 立维春 高级工程师 电话: 010-88296019  
(100041) 北京市石景山区首钢炼铁厂

收稿日期: 2003-03-12