

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180425

不同炉料结构高炉实现低碳排放的解析

金永龙¹, 何志军², 王 川³

(1. 河钢集团有限公司钢研总院, 河北 石家庄 050023;

2. 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114016; 3. Swerim AB, 瑞典 Luleå SE-971 25)

摘 要: 为了进一步实现高炉低碳排放目标,对以烧结矿或球团矿为主导的炉料结构进行比较分析。首先列举了国内外不同炉料结构高炉的操作参数和生产指标,并利用炉料冶金性能试验、物料平衡和热平衡计算、Rist 操作线等分析方法对典型的以烧结矿为主的宝钢炉料结构和低燃料消耗进行深入解析,同时对以球团矿占主导的瑞典 SSAB 炉料结构的低燃料消耗指标进行比较。从高炉实际数据分析可以得出,低燃料消耗和炉料结构的关系是十分密切的,高入炉矿品位、低渣量、高的煤气利用率是实现低燃料消耗的关键。在宝钢的实际操作中,通过优化炉料结构、降低燃料消耗可以减少 8%~10% 的碳排放,而瑞典高炉燃料消耗更低,可实现更低的碳排放。研究结果可对国内外高炉低碳排放的生产操作提供借鉴。

关键词: 高炉; 炉料结构; 物料平衡和热平衡; 低燃料比; 低碳排放

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)07-0008-09

Analysis on low carbon emission of blast furnace with different raw materials structure

JIN Yong-long¹, HE Zhi-jun², WANG Chuan³

(1. Technology Research Institute, HBIS Group, Shijiazhuang 050023, Hebei, China;

2. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning,

Anshan 114016, Liaoning, China; 3. Swerim AB, Luleå SE-971 25, Sweden)

Abstract: The differences in structure characteristics of raw materials predominated by sinters or pellets were analyzed in order to realize low carbon emission at BF processes. Some operation parameters and production indexes with different raw materials structures all over the world were enumerated. The methods, i. e. test of metallurgical properties of raw materials, balance of materials and heat and the Rist operation line were utilized to analyze the low fuel consumption and low carbon emission in Baosteel BFs with the dominated ratio of sintering ore. At the same time, the comparable of SSAB Sweden BF with the pellet ore as the main materials were analyzed in details. According to results of analyzing in theory and calculation from the practical data, there is a highly significant correlation between the low fuel consumption ratio and the raw materials structure. A high grade of burden materials, a low slag volume and a high CO utilization ratio are the key factors to reduce the fuel consumption. During the practice in Baosteel, the carbon emission could be decreased by 8%—10% by reducing the fuel consumption ratio, while the BF of SSAB Sweden has lower fuels ratio that the carbon emission would be less. This research results would be benefit to operators of blast furnace for realizing the low carbon emission.

Key words: blast furnace; raw materials structure; balance of materials and heat; low fuel ratio; low carbon emission

随着环保法规的日益严苛,占据钢铁行业 CO₂ 排放总量 70% 的高炉炼铁工艺^[1-3], 低碳排放必将成为重要的发展趋势。国际上曾经有过较为普遍认同的提法,即所谓高炉低燃料消耗,就是首先要求高炉的燃料比降低到 500 kg/t 以下。而随着焦煤资

源的日益紧缺,焦炭资源和价格波动较大,加上直接还原和熔融还原工艺对高炉产生的压力,以煤粉、天然气、重油等作为替代燃料的喷吹技术迅速发展,近几年还提出了一些新的喷吹技术^[4-10],如高炉煤气循环喷吹,当然前提是需要将煤气中的 CO₂ 全部或

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474124,51874171)

作者简介: 金永龙(1969—),男,博士,正高级工程师; E-mail: yonglongjin@126.com; 收稿日期: 2018-11-08

通讯作者: 何志军(1979—),男,博士,教授; E-mail: hzhj2002@126.com

部分去除才能使用循环煤气,而脱除 CO₂ 的技术目前还不成熟或 CO₂ 利用的问题成为了技术瓶颈。比较普遍的喷吹技术是粉煤喷吹,有的高炉曾经短期达到 260 kg/t,有的高炉长期稳定在 200 kg/t 以上,为此,国际上进一步提出了焦比不超过 300 kg/t,煤比 200 kg/t 的高炉低燃料消耗目标^[11]。高炉燃料结构的优化离不开原料结构的调整,高质量的原燃料条件是保持高炉稳定顺行的基础^[12-13]。为实现低碳排放,喷吹含氢燃料能起一定的作用^[14],但要大幅度降低碳排放,同时降低能耗,原料结构仍是物质基础,而先进的操作是必要的技术保障。

1 炉料结构的发展

合理炉料结构的演变伴随着高炉炼铁整个发展历史进程。从生料到熟料、从热矿入炉到冷矿整粒,从单一炉料到炉料性能优势互补的搭配,最终形成了酸碱炉料合理搭配的所谓合理炉料结构,提出了“高、稳、熟、小、匀、净”的精料方针。如高低碱度烧结矿、双碱度球团、高碱度烧结矿配加酸性球团等在国内外都有实践,为了降低成本,有的还增加了一定

比例的天然矿。国内宝钢的燃料比是持续最低的,沙钢、首钢京唐、太钢等企业的大型高炉燃料比也陆续达到 490 kg/t 的水平^[15]。而随着碳排放要求的进一步提高,北欧用全球团和添加转炉渣、钢铁企业固废压块和废钢等形成了独特的炉料结构,也创造了低碳排放的世界记录。以下将以低燃料消耗为讨论重点,对国内外的一些典型高炉的炉料结构、操作参数等进行解析,其结果对国内高炉降低燃料消耗,实现低碳排放有很好的借鉴作用。

1.1 以烧结矿为主的炉料结构

日本、韩国、西欧、中国、俄罗斯等大多数高炉的炉料结构都是以烧结矿为主。如韩国浦项阳光厂高炉指标见表 1,有 5 座高炉,炉料结构烧结矿比例占 70% 以上,球团占比 20% 左右,以高富氧、高利用系数为特点,燃料比平均为 487.9 kg/t,其中焦比为 309.5 kg/t,煤比为 174.1 kg/t。其中有效容积为 5 500 m³ 的 4 号高炉,高炉有效容积利用系数达到最高日记录 2.84 t/(m³·d) 和月记录 2.79 t/(m³·d),焦比从 2009 年下半年的 350 kg/t 下降到 2010 年年末到 2011 年全年的小于 300 kg/t 水平,近些年指标一直保持较好。

表 1 浦项阳光高炉指标

Table 1 Operation indexes of BF in Gwangyang, Pohang

指标	1BF	2BF	3BF	4BF	5BF	平均		
高炉有效容积/m ³	3 950	4 350	4 600	5 500	3 950			
有效容积利用系数/(t·m ⁻³ ·d ⁻¹)	2.471	2.445	2.581	2.682	2.465	2.539		
燃料结构	燃料比/(kg·t ⁻¹)	493.9	491.4	485.7	474.2	501.2	487.9	
	焦比/(kg·t ⁻¹)	304.8	315.4	302.5	297.9	333.7	309.5	
	煤比/(kg·t ⁻¹)	189.1	161.5	183.2	176.3	158.5	174.1	
鼓风参数	风量(标准态)/(m ³ ·min ⁻¹)	5 751	6 112	6 023	6 925	5 515	6 140	
	风温/℃	1 116	1 226	1 198	1 248	1 221	1 206	
	风压/kPa	412.5	405.5	420.5	420.9	393.0	411.7	
	风速/(m·s ⁻¹)	243	274	246	262	273	260	
	富氧率/%	6.35	6.73	8.63	9.39	7.77	7.93	
鼓风湿度(标准态)/(g·m ⁻³)	8.64	9.13	9.09	9.14	8.64	8.96		
理论燃烧温度/℃	2 153	2 264	2 269	2 289	2 332	2 264		
煤气参数	η _{CO} /%	50.30	49.53	48.98	49.35	46.62	48.95	
	中心/℃	455	342	235	258	322	322	
	十字测温	边缘/℃	64	49	66	50	65	59
	平均/℃	271	234	120	114	167	181	

西欧比较典型的钢厂,如德国 ThyssenKrupp 的 Schwelgern 高炉指标见表 2,2011 年有 5 座高

炉,包括 1、2、4、8 和 9 号高炉,其中 4 号高炉停炉待修。8 号和 9 号高炉有效容积分别为 2 500 和 2 132 m³,

1 号和 2 号高炉有效容积分别为 4 407 和 5 513 m³。生产高炉燃料比都在 500 kg/t 以下,其中最佳的 8 号高炉燃料比为 490 kg/t 左右。炉料结构以烧结矿为主,烧结矿:球团:块矿质量比为 67:19:12,烧结矿中 $w(\text{SiO}_2)$ 约为 5%, $w(\text{MgO})$ 约为 1%。渣比为 290 kg/t 以下,炉渣碱度 R_3 为 1.37,炉渣中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 11.5%, $w(\text{MgO})$ 为 6.5%,铁水中硅

的质量分数约为 0.35%,硫的质量分数约为 0.040%。该厂采用世界最大焦炉生产的焦炭,炭化室高度为 7.88 m,年产量为 250~280 万 t 湿熄焦。焦炭 CRI、CSR 等指标较好,性能比较稳定。风温为 1 100 °C 左右,富氧率为 3.5%~6.0%,理论燃烧温度为 2 130~2 200 °C。

表 2 ThyssenKrupp 的 Schwegern 高炉指标

Table 2 Indexes of BF operation in Schwegern, ThyssenKrupp

指标	1BF	2BF	8BF	9BF
高炉有效容积/m ³	4 407	5 513	2 500	2 132
有效容积利用系数/(t·m ⁻³ ·d ⁻¹)	2.19	1.85	2.24	2.30
炉缸单位断面效率/(t·m ⁻³ ·d ⁻¹)	66.4	58.5	61.9	60.0
燃料比/(kg·t ⁻¹)	498.5	497.7	490.5	497.8
燃料结构				
焦比,小块焦/(kg·t ⁻¹)	346.5,71.5	345.4,61.9	326.5,85.5	341.8,81.8
煤比/(kg·t ⁻¹)	152	152	164	156
CSR,CRI/%	67.4,22.6	68.0,22.3	66.1,22.9	66.1,22.9
炉料结构				
烧结矿,比例/(kg·t ⁻¹ ,%)	1 044,63.8	1 041,63.9	1 090,66.7	1 062,64.8
球团矿,比例/(kg·t ⁻¹ ,%)	374,22.9	368,22.6	309,18.9	351,21.4
块矿,比例/(kg·t ⁻¹ ,%)	193,11.8	188,11.6	190,11.6	193,11.8
入炉料总计(包括熔剂、护炉料、回收料等)/(kg·t ⁻¹)	1 636	1 628	1 633	1 640
渣比/(kg·t ⁻¹)	287	289	287	288
鼓风参数				
风量(标准态)/(m ³ ·min ⁻¹)	6 653	6 952	3 568	3 148
风温/°C	1 096	1 119	1 113	1 092
风压/kPa	476.3	475.3	401.9	372.3
风速/(m·s ⁻¹)	205	217	209	202
富氧率/%	3.8	3.7	5.0	4.2
鼓风湿度(标准态)/(g·m ⁻³)	11.5	17.6	10.9	10.0
理论燃烧温度/°C	2 156	2 133	2 166	2 142
炉顶煤气利用率(γ_{CO})/%	48.8	49.2	48.3	49.2

荷兰 Coros 的大富氧高煤比技术。Coros 现存 6 号、7 号两座高炉在生产,就是以前著名的 Ijmuiden Hoogavon 高炉。其中 6 号高炉的主要生产情况:工作容积为 2 350 m³,产量为 8 000 t/d,球团和烧结配比各为 50%,富氧鼓风(氧体积分数为 34%~37%),风温为 1 170 °C,风量为 3 600 m³/min(标准态),煤比为 240~280 kg/t(试验最高喷煤记录为 280 kg/t),焦比为 250 kg/t 左右,燃料比小于 500 kg/t,使用本厂湿熄焦,焦炭性能: $I_{10} = 45\%$, $I_{10} = 20\%$;顶压为 170 kPa,料柱压差为 42.6 kPa,料尺为 1.0 m,炉顶温度为 120~154 °C,煤气中 CO 体积分数为 26.88%,CO₂ 体积分数为 24.6%,CO

利用率为 48.17%,H₂ 体积分数为 4.94%~5.50%,风口前理论燃烧温度为 2 300 °C 左右。铁水中 $w(\text{Si})$ 约为 0.40%, $w([\text{P}])$ 约为 0.070%, $w(\text{Ti})$ 为 0.04%, $w([\text{S}])$ 为 0.037%,炉渣碱度 R_3 为 1.48,渣中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 13.25%。

1.2 以球团矿为主的炉料结构

北美和北欧是以球团矿为主的炉料结构占主导。其中,北欧高炉的情况将在后续详细解析。而据和北美交流的资料统计,2012 年,北美(美国、加拿大、墨西哥)有 32 座高炉,其炉料结构如图 1 所示。图中,高炉编号 1~5 为加拿大高炉,6~9 为墨西哥高炉,10~32 为美国高炉。其中 1 座高炉是全

熔剂性球团,14座高炉的球团配比达到90%以上,酸性球团超过70%的有10座,熔剂性球团超过70%的有14座,还有其他3座在50%~60%之间;烧结矿比例超过40%的仅有2座,超过20%的有4座。因此,可以说北美的炉料结构以高比例球团为主,但与北欧不同的是,北美普遍使用熔剂性球团。从典型炉料结构和燃料消耗看,北美入炉矿品位较北欧低,加上熔剂性球团的性能和酸性球团相比,强

度、还原膨胀等指标略差,导致其燃料消耗比北欧偏高,如美国 ArcelorMittal IH7 高炉,有效容积为 4 680 m³,炉缸直径为 13.76 m,风口数量为 40 个,风口面积为 0.706 9 m²,风温为 1 270 °C,富氧率为 9%。炉料结构:85%球团+15%烧结矿+50 kg 废铁,燃料比为 503 kg/t(焦比为 335 kg/t,煤比为 130 kg/t,天然气为 38 kg/t)。其球团矿和烧结矿性能见表 3。

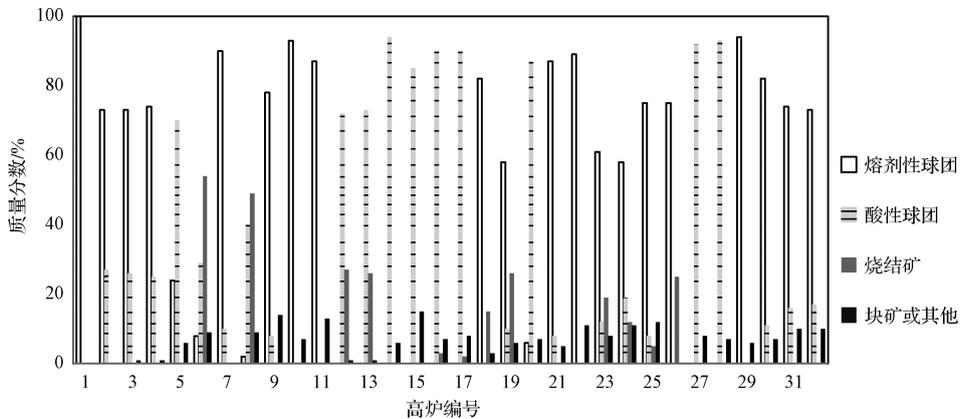


图 1 北美高炉炉料结构统计

Fig. 1 Statistics of BF raw materials structure in North America

表 3 美国 IH7 高炉生产用球团和烧结矿质量分数和碱度

Table 3 Mass percent of sinter and pellet utilized on IH BF No. 7 in USA and basicity

项目	$w(\text{TFe})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	$w(\text{P})/\%$	$w(\text{S})/\%$	R_2	R_4
总督球	60.2	5.53	6.31	1.7	0.29	0.033	0.02	0.02	1.14	1.38
米诺球	62.8	4.19	4.68	1.41	0.2	0.077	0.01	0	1.12	1.39
烧结矿	52.8	5.44	14.7	1.43	1.49		0.025	0	2.70	2.32

另外,美钢联 U. S. Steel Gary 共有 4 座高炉:4BF、6BF、8BF、14BF。其中 14BF 最大,有效容积为 3 257 m³,料车上料,3 个铁口,34 个风口,风口面积为 0.600 8 m²,风温为 1 205 °C,富氧率为 5%。炉料结构:80%球团+20%烧结矿,其中球团矿 $w(\text{TFe})$ 为 63.5%, $w(\text{SiO}_2)$ 为 3.70%, $w(\text{CaO})$ 为 3.50%,碱度 R_2 为 0.95。燃料比为 485 kg/t(其中,焦比为 300 kg/t,煤比为 160 kg/t,天然气为 25 kg/t)。

2 低碳排放的技术解析

以上分别介绍了以烧结矿或球团矿为主导的典型炉料结构,以及燃料消耗等指标和其他重要参数。以下以宝钢和瑞典 SSAB 的超低燃料消耗为例进行深度解析。

2.1 宝钢低碳技术解析

宝钢是国内低燃料操作的最先实践者,最低燃

料比曾经达到过 480 kg/t 以下。表 4 为不同时期宝钢 3BF、2BF 和 4BF 实测物料平衡表,是基于宝钢当时实际生产实测的数据,根据参考文献^[16-17]的计算方法自编的物料平衡和热平衡计算软件,以及 Rist 操作线等进行深入分析。

从 1998 年到 2006 年,尽管已经实现大喷煤,但宝钢高炉的燃料比和燃料结构还是发生了较大变化^[18],燃料比从接近 520 降到 480 kg/t 左右,煤比最高达到 260 kg/t,4 号高炉热平衡测试期间稳定在 240 kg/t 左右。为了确定最佳的煤比和煤种结构,从提高煤的置换比、经济性煤种和高炉稳定顺行等多元角度出发,对不同种类、不同比例的无烟煤、烟煤都进行了大量的基础性研究。这些研究成果,也是目前宝钢高炉保持较好操作指标的技术基础。根据宝钢的实际操作结果,低燃料消耗具有如下几个主要特点:

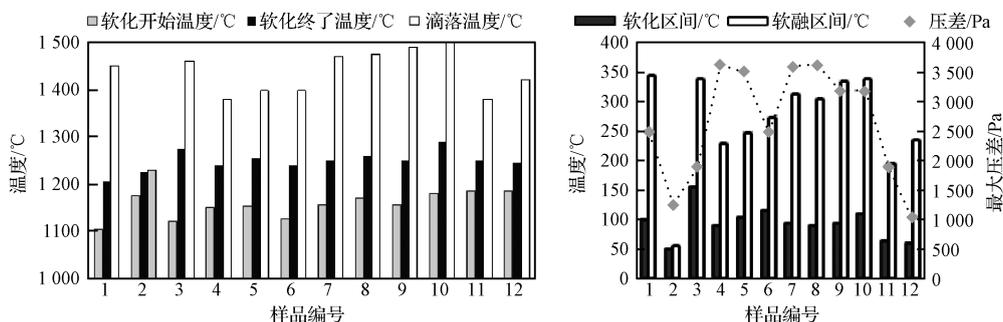
表 4 不同时期物料平衡计算结果比较

Table 4 Comparison of raw materials balance during different operation periods

不同时期高炉	3BF(1998年)	2BF(2000年)	2BF(2005年)	4BF(2006年)
收入项对比				
混合矿/(kg·t ⁻¹)	1 613.475	1 579.363	1 609.244	1 611.261
焦比/(kg·t ⁻¹)	333.143	305.470	303.57	238.476
煤比/(kg·t ⁻¹)	185.669	182.408	176.437	240.180
风量/(kg·t ⁻¹)	1 478.983	1 322.104	1 235.839	1 267.830
熔剂/(kg·t ⁻¹)	1.646	5.798	3.065	0
燃料比/(kg·t ⁻¹)	518.812	487.878	480.007	478.656
富氧率/%	1.883	1.21	3.57	3.37
风温/℃	1 199.0	1 248.0	1 231.0	1 264.5
混合矿对比				
$w(\text{TFe})/\%$	59.423	60.633	60.036	59.684
$w(\text{SiO}_2)/\%$	4.855	4.171	4.437	4.019
$w(\text{CaO})/\%$	7.050	6.191	6.848	6.390
$w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$	1.452	1.482	1.543	1.590
支出项对比				
渣比/(kg·t ⁻¹)	287.508	254.694	276.000	254.362
炉渣碱度(R_2)	1.22	1.23	1.22	1.23
干煤气/(kg·t ⁻¹)	2 240.713	2 051.058	1 948.792	2 031.050
炉顶煤气温度/℃	157	239	188	191

(1)合理的炉料结构。炉料结构是否合理,首先是炉料的综合性能是否能满足高炉的生产要求。高碱度烧结矿配加球团、天然矿等酸性炉料,充分发挥炉料各自特性,达到最优的混合料软融滴落性能,有利于形成合理的软融带根部位置、适宜的软融带宽度和高度,优化透气性指数,从操作角度实现理想的煤气流分布^[19-20];各矿种高温软熔特性测试结果如图2所示,可以看出,宝钢烧结矿(样品7、8)性能优于对标

企业(样品10),烧结、球团和天然矿混合后(样品11、12)的炉料特性远远优于单种物料。宝钢典型的炉料结构:球团比例为5%~7%,块矿比例为15%~20%,两者之和为22%~25%,其余为烧结矿。合理的炉料结构,配加适量熔剂微调,使宝钢高炉的炉渣特性相对稳定,从炉渣碱度、炉渣主要成分看,波动都比较小,初渣、中间渣和终渣对焦炭的侵蚀和劣化影响变化不会太大,有利于操作者对高炉状态的掌控。



样品1—OHANL(天然矿); 样品2—OHNN(天然矿); 样品3—ONENL(天然矿); 样品4—PBLNL(球团矿); 样品5—秘鲁球团;
 样品6—PRANL(球团矿); 样品7—S3(3DL 烧结矿); 样品8—S1(1DL 烧结矿); 样品9—S1落(1DL 落地烧结矿);
 样品10—外单位烧结矿; 样品11—S1+澳矿+球团矿 PRANL; 样品12—10AS1+澳矿+天然矿 ONENL。

(a)软化开始温度、软化终了温度和滴落温度;(b)软化区间、软融区间和最大压差。

图 2 各矿种高温软熔特性测试结果

Fig. 2 Test results of softening and melting characteristics of different raw materials

合理的炉料结构要达到控制高炉低渣比的目标,从而有利于改善软融滴落带的透气性。从表4看,通过炉料结构改善,宝钢入炉混合矿品位高,达到59%以上,高炉渣比从接近290 kg/t下降到254 kg/t,下降幅度达到30 kg/t以上。但是,品位并不是低渣比的唯一影响因素。从混合矿主要成分对渣比影响看,在1998年到2006年之间,高炉渣比的变化较大。如同样是2号高炉,2000年渣比为254.694 kg/t,而2005年渣比为276 kg/t,入炉矿品位分别为60.633%和60.036%,相差不大;但混合矿消耗量差别较大,分别为1 579.363和1 609.244 kg/t。原因是混合矿中CaO、SiO₂的质量分数差别较大,2000年两者分别为6.191%和4.171%,2005年两者分别为6.848%和4.437%;另外,因为成分不同,为了调整炉渣成分,熔剂的添加量和种类也是变化的,这也是2号高炉2005年高炉渣比较高的原因之一。对于不同的高炉,2006年4号高炉的炉渣量与2005年2号高炉炉渣量相比也有较大差别,4号高炉只有254.362 kg/t,与2号高炉2000年水平差不多。造成炉渣量差别的原因也是CaO、SiO₂质量分数的不同,对于4号高炉两者分别为6.390%和4.019%;而2006年4号高炉的入炉矿耗只比2005年2号高炉高出2.017 kg/t。

(2)高热效率。高炉内碳热利用率(K_C)和有效

热利用率(K_T)是衡量高炉热效率的主要指标。实测表明,宝钢的 K_C 和 K_T 分别达到了65.5%和91.5%以上的高水平。 K_C 和 η_{CO} (CO利用率)呈正比。炉顶煤气成分的差别见表5。表5显示,宝钢保持较高的 η_{CO} 操作水平(51.3%以上),而高顶压、合理的煤气流分布是实现高 η_{CO} 的基本条件。4号高炉的CO利用率比3号高炉高1.1%以上,比2号高炉高1.20%~1.45%,这说明4号高炉的煤气利用率较高。4号高炉的顶压达到了247 kPa,其煤气利用率达到了53.12%;同时,煤气利用率与还原气体的成分、直接还原度等有关。而从 K_T 分析,炉顶煤气带走的热量属于无效热,除了炉顶煤气温度以外,煤气量是最重要的因素。其中富氧对炉顶煤气量有重要影响。2000年前后的富氧率为1.21%~1.88%,2005年以后的富氧率为3.37%~3.57%,富氧率的提高,使得鼓风量明显下降,在风温水平相差不大的条件下,使得炉顶煤气量降低。根据物料平衡计算(表4),3号高炉风量为1 478.98 kg/t,4号高炉为1 267.83 kg/t,2000年2号高炉为1 322.10 kg/t,2005年2号高炉为1 235.84 kg/t。3号高炉风量最高的原因是风温和富氧率低;加上混合矿品位低,SiO₂、CaO质量分数高,渣比高;所以在煤比较低条件下,燃料比偏高,从而需要更多的风量。

表5 炉顶煤气成分的差别

Table 5 Different composition of top gas

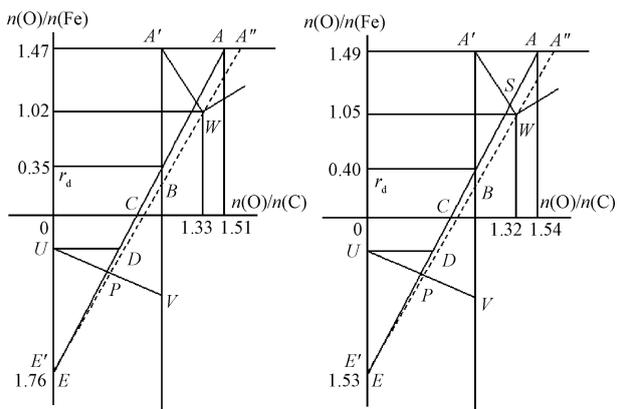
成分	H ₂	CO ₂	CO	N ₂	煤气量	$\eta_{CO}/\%$
4BF—2006年	气体量/(m ³ ·t ⁻¹)	48.065	347.955	307.016	747.552	1 450.754
	体积分数/%	3.31	23.98	21.16	51.53	53.120
2BF—2000年	气体量/(m ³ ·t ⁻¹)	45.188	335.122	314.800	796.199	1 491.309
	体积分数/%	3.03	22.47	21.11	53.39	51.563
2BF—2005年	气体量/(m ³ ·t ⁻¹)	33.024	329.579	312.728	725.670	1 401.001
	体积分数/%	2.36	23.52	22.32	51.80	51.312
3BF—1998年	气体量/(m ³ ·t ⁻¹)	74.172	361.189	338.188	879.147	1 654.449
	体积分数/%	4.48	21.90	20.48	53.14	51.666

根据操作线分析(图3),在测定期间的操作条件下,2005年2号高炉炉身工作效率很高,达到了99.3%,节焦潜力仅剩2.43 kg/t;4号高炉比2号高炉的炉身效率略差,节焦潜力也相对略高。1998年,3号高炉的炉身效率为95.4%,在当时条件下节焦潜力还有17 kg/t。以上数据说明宝钢高炉已经达到了较高的操作水平,能耗水平达到了较为理想

的状态。已经超过了日本釜山高炉报道的炉身效率98%和瑞典2001年的94.5%的水平^[8]。

2.2 瑞典SSAB的低碳排放技术解析

北欧(瑞典和芬兰)在役高炉在2012年以后都实现了全球团冶炼,主要原因包括环保压力因素和当地资源条件,尤其是对CO₂排放的限制,倒逼北欧采用全球团冶炼技术。主要炉料结构是球团+固废



(a) 3号高炉(1998); (b) 2号高炉(2005)。

图 3 3号高炉(1998)和2号高炉(2005)的 Rist 操作线

Fig. 3 Rist operation line of No. 3 BF(1998) and No. 2 BF(2005)

压块+钢渣+废钢+熔剂的模式,其中固废压块是取代原烧结矿生产消耗固废的一种专有技术路径。以瑞典 Lulea 3号高炉 2013年实际生产数据为例,该高炉有效容积为 3 003 m³,平均利用系数为 1.95 t/(m³·d),炉缸断面效率为 57.3 t/(m²·d),保持产量和效率相对平稳,全年平均作业率保持在 95%以上的水平。燃料消耗降到了 450 kg/t 的水平,其中焦比和煤比的水平分别为 310 kg/t(包括小块焦 11 kg/t,10~20 mm)和 140 kg/t;焦比最低月均达到 299 kg/t,煤比 147 kg/t(2013年5月)。该高炉全球团冶炼技术主要特点如下:

(1)高炉炉型的优化。为了满足全球团冶炼对

高炉炉型的要求,比如球团还原膨胀和软融滴落特点,以及适应现代高炉冶炼发展趋势,瑞典和芬兰的高炉在炉型上都有一定的改进^[21-22]。如 3号高炉的炉型尺寸,比较明显的变化或不同是炉身角(81.2°)和炉腹角(71.3°)较小。炉身角变小,适应球团低温还原膨胀的特点;炉腹角变小,和高炉实际操作炉型变化吻合度高,有利于渣皮的形成和稳定,有利于提高炉腹寿命。炉身高度降低,和球团在间接还原区还原比较快速充分,且球团软融滴落区间较窄的特点有关;炉缸高度增加,适应入炉品位提高,单位时间铁量增加的要求。另外,高炉冷却系统也要适应全球团冶炼的热负荷变化和温度分布特点做相应的调整。这些参数和北欧其他几座高炉有类似的变化趋势,这是全球团冶炼值得重点关注的技术特点。

(2)高入炉品位、低渣比。高品位是低渣比的前提^[23-24]。Lulea 3号高炉炉料结构和物料成分见表 6 和表 7。渣比达到 160 kg/t 水平, $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ 约为 1.0, $w(\text{MgO}+\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ 约为 1.43, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均为 12.9%, $w(\text{MgO})$ 为 14.9%,根据炉渣四元成分查得的炉渣黏度为 0.20~0.35 Pa·s^[25],炉渣性能良好,硫的分配比 $w(\text{S})/w([\text{S}])$ 为 32.1。这样的炉渣成分是靠添加部分固废压块、熔剂、钢渣等实现的,石灰石等天然熔剂对高炉降低燃耗不利,因此要尽量避免。为了改善料柱内初渣和中间渣的炉渣结构,降低料柱和软融带的阻力,同时回收部分尘泥或粉尘,在高炉风口喷吹少量含碳或含熔剂的回收物^[22]。

表 6 Lulea 3号高炉的球团矿成分

Table 6 Composition of pellet ore of No. 3 BF in Lulea

$w(\text{TFe})$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{V}_2\text{O}_5)$	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	烧损
66.9	0.43	1.80	0.32	1.25	0.037	0.041	0.02	0.38	0.25	0.001	0.006	0.001

表 7 Lulea 3号高炉入炉原燃料结构

Table 7 Raw materials structure of No. 3 BF in Lulea

MPB 球团/ (kg·t ⁻¹)	返料压块/ (kg·t ⁻¹)	LD 渣/ (kg·t ⁻¹)	小块焦/ (kg·t ⁻¹)	石灰石/ (kg·t ⁻¹)	焦炭/ (kg·t ⁻¹)	煤比/ (kg·t ⁻¹)	燃料比/ (kg·t ⁻¹)	富氧率/%
1 363	60	47	8	33	349	103	460	2.40

(3)高炉操作。上部调剂,主要是布料模式的适应性变化。如球团相对比较容易滚动,LKAB 为此特别生产不规则的球团来降低球团布料的偏析;对于高炉操作,不管是钟式布料或无钟旋转溜槽布料,都要避免球团滚动造成的偏析或球团滚到中心区,甚至可在中心人为形成焦炭堆尖以阻隔球团向中心

滚动,同时将小块焦布到中心圈以防球团渗透到焦层。下部调剂,以低风量(950 m³/t)(标准态)、较低富氧率(1.5%~4.0%,平均为 3.5%)、较低风温(1 080℃)为特点,鼓风速度为 204 m/s,火焰温度为 2 098℃,顶压为 150 kPa、风压为 350 kPa。这样的操作制度实现了很高的 η_{CO} ,最高可以超过

55.7%。

3 结论

(1)国内高炉普遍以所谓“低成本战略”为主要操作方针,低价料的使用使高炉燃料消耗居高不下,高炉生产不稳定导致各项技术经济指标进一步恶化。国内外以精料为基础的炉料结构和低燃料消耗技术值得学习和借鉴。

(2)通过炉料结构的合理调整以及操作制度优化,高炉能够实现较高煤比条件下的低燃料比操作。炉料结构球团矿占主导的北欧高炉低燃料比达到了450 kg/t的水平,煤比为150 kg/t以上;炉料结构以烧结矿为主的宝钢最低燃料比达到480 kg/t以下,其中煤比为200 kg/t以上。经计算和分析,宝钢高炉内碳热利用率和有效热利用系数、炉腹煤气利用率等指标都达到国际一流的水平。根据宝钢实践,通过炉料结构和燃料结构优化、高炉操作制度调整等措施,炉顶煤气总量可降低10%~15%,其中CO、CO₂的排放总量可以降低8%~10%,实现低碳排放。

(3)低燃料比的前提条件是炉料结构和燃料结构合理,通过脉石成分调控、高品位等实现低渣比。渣比和高炉透气性指数以及高炉稳定运行是相辅相成的,低渣比使高炉生产稳定、顺行、可控的关键要素之一。

(4)球团生产的工序能耗和废气排放要远远低于烧结工序。全球团或高比例球团冶炼技术已经成熟,直接的效果是实现全系统低碳生产,满足国家对碳排放的控制要求。但表现成本的增加,必须有好的操作指标和低燃料消耗做支撑,同时还需要做一些基础工作,比如炉型优化、渣型选择、操作制度设计等。

参考文献:

[1] Koki T, Yusuke K, Toshiyuki H, et al. Optimization of coke mixed charging based on discrete element method[J]. ISIJ International, 2017, 57(10):1804.

[2] 赵沛,董鹏莉. 碳排放是中国钢铁业未来不容忽视的问题[J]. 钢铁, 2018, 53(8):1. (ZHAO Pei, DONG Peng-li. Carbon emission cannot be ignored in future of Chinese steel industry[J]. Iron and Steel, 2018, 53(8):1.)

[3] 王海洋,张建良,王广伟,等. 铁前系统的二氧化碳减排技术浅析[J]. 中国冶金, 2018, 28(1):1. (WANG Hai-yang, ZHANG Jian-liang, WANG Guang-wei, et al. Analysis of carbon dioxide emission reduction before ironmaking[J]. China

Metallurgy, 2018, 28(1):1.)

[4] Louis W Lherbier, Jr Michael F Riley. Fundamental evaluation of natural gas co-injection with coke oven gas or coal [C]//Iron and Steel Conference. Pittsburg USA: AISTech, 2013:559

[5] Mark Aronovitch T, Serge Evgeny L, Gennady Michail S. A flow-chart for iron making on the basis of 100% usage of process oxygen and hot reducing gases injection[J]. ISIJ International, 1994(7):570.

[6] Hiroshi N, Jun-ichiro Y, Shin-ya K, et al. Analysis on material and energy balances of ironmaking systems on blast furnace operations with metallic charging, top gas recycling and natural gas injection[J]. ISIJ International, 2006(12):1759.

[7] Ryota M, Michitaka S, Tatsuro A, et al. Design of innovative blast furnace for minimizing CO₂ emission based on optimization of solid fuel injection and top gas recycling[J]. ISIJ International, 2004(12):2168.

[8] 毕传光,唐珏,储满生. 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气数值模拟[J]. 钢铁, 2018, 53(4):89. (BI Chuan-guang, TANG Jue, CHU Man-sheng. Mathematical modeling of Mei Steel No. 2 BF with coke oven gas injection[J]. Iron and Steel, 2018, 53(4):89.)

[9] 孙敏敏,宁晓钧,张建良,等. 炼铁系统节能减排技术的现状和发展[J]. 中国冶金, 2018, 28(3):1. (SUN Min-min, NING Xiao-jun, ZHANG Jian-liang, et al. Research status and progress of energy saving and emission reduction technology for ironmaking[J]. China Metallurgy, 2018, 28(3):1.)

[10] 刘颂,吕庆,张旭升,等. 高炉喷吹煤气工艺中炉顶煤气循环的变化规律[J]. 钢铁, 2018, 53(2):78. (LIU Song, LÜ Qing, ZHANG Xu-sheng, et al. Change rule of top gas circulation in blast furnace gas injection process[J]. Iron and Steel, 2018, 53(2):78.)

[11] Saxen H, Bramming M, Wikatrom J O, et al. Theoretical limits on operation under high oxygen enrichment in the blast furnace [C]//60th ISS Conference. Baltimore USA: AISI, 2001:89

[12] 张寿荣,姜曦. 中国大型高炉生产现状分析及展望[J]. 钢铁, 2017, 52(2):1. (ZHANG Shou-rong, JIANG Xi. Production and development of large blast furnace in China[J]. Iron and Steel, 2017, 52(2):1.)

[13] Tatsuya K, Sohei S, Shigeru U. Dynamic wettability of liquids on gasified metallurgical cokes[J]. ISIJ International, 2017, 57(7):1166.

[14] 金永龙,何志军,关志刚,等. H₂含量对冶炼过程影响的实践与理论分析[J]. 钢铁, 2011, 46(5):15. (JIN Yong-long, He Zhi-jun, GUAN Zhi-gang. Practice and theoretical analysis about effect of H₂ content on ironmaking process[J]. Iron and Steel, 2011, 46(5):15.)

[15] 卫继刚. 大型高炉合理炉腹煤气量指数的控制及探讨[J]. 钢铁, 2012, 47(3):15. (WEI Ji-gang. Control and discussion of suitable furnace bosh gas volume index for large capacity blast furnace[J]. Iron and Steel, 2012, 47(3):15.)

- [16] 成兰伯. 高炉炼铁工艺及计算[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991. (CHENG Lan-bo. Technology and Calculation of Blast Furnace Ironmaking [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991.)
- [17] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008. (ZHOU Chuan-dian. Handbook of Blast Furnace Ironmaking Production and Technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.)
- [18] 朱仁良. 宝钢大型高炉操作与管理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2015. (ZHU Ren-liang. Operation and Management of Large Scale BF in Baosteel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.)
- [19] Mats B, Jan-Olov W. A blast furnace view on slags[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2002(31):88.
- [20] Yang Y L, Yin Y X, Donald W, et al. Development of blast furnace distribution process modeling and control[J]. ISIJ International, 2017, 57(8): 1350.
- [21] Jun I, Ryota M, Ikuhiro S, et al. Gas permeability in cohesive zone in the ironmaking blast furnace[J]. ISIJ International, 2017, 57(9):1531.
- [22] Axelsson O, Bramming M, Karsrud K. Rebuild of SSAB oxelosund blast furnace No. 4 and introduction the ROAX-TOP [C]//56th Ironmaking Conference Proceedings. Chicago IL USA: AISI, 1997: 507
- [23] Kimmo K, Timo P, Jarmo L, et al. (STSI-156) Modelling and simulation of blast furnace process for switch from sinter to pellet operation[C]//4th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking. Dusseldorf: METEC, 2011: 1
- [24] Timo P, Kimmo K, Jarmo L, et al. Experience of full scale research test with 100% pellet blastfurnace operation in ruukki-authors[C]//6th European Coke and Ironmaking Congress. Dusseldorf: METEC, 2011: 1
- [25] 联邦德国钢铁工程师协会. 渣图集[M]. 北京:冶金工业出版社, 1989. (VDEh. Slag Atlas[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.)

《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于1954年,由中国科学技术协会主管,中国金属学会、钢铁研究总院和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办,是中国冶金界历史较长的综合性科技期刊,也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一。《钢铁》设有由53名国内知名学者、企业家等组成的编委会,编委会顾问徐匡迪、殷瑞钰、张寿荣、翁宇庆和编委会主任委员干勇、编委会委员毛新平、谢建新等7位均为中国工程院院士。《钢铁》办刊宗旨是面向生产、结合实际;坚持为中国钢铁工业生产建设服务,报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用、企业经营管理和专业理论应用研究等,以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平,促进钢铁工业的发展。

2001年10月《钢铁》入选由国家新闻出版总署创建的中国《期刊方阵》;名列双百第74名。2009年以前为EI收录期刊,自1992年开始,《钢铁》连续7次入编北大图书馆核心期刊(中文核心期刊);为中信所“中国科技核心期刊”;被国际著名检索机构Scopus收录。

《钢铁》主要栏目有:综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、装备技术、技术交流等。《钢铁》现为月刊;大16开;页码为88页;期刊为自办发行。

1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理人员等。

2 征稿范围

钢铁冶金领域具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上,特向作者征集涉及钢铁工业关键技术的原创文章和综合论述文章。

特别欢迎作者针对钢铁企业资源优化配置和节能减排、资源综合利用等方面撰写技术文章。

3 投稿和联系方式

请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击“钢铁”的图标或刊名导航条,进入期刊的首页了解详情。

联系人:尚海霞,党玉华,何 祺;

邮 箱:gangtiebianjibu@126.com;

电 话:010-62182345;

传 真:010-62185134;

通讯地址:北京市海淀区学院南路76号;

邮 编:100081。