

高炉冶炼白云鄂博矿炼铁技术进步

高向洲, 张 斌, 于恒亮, 卢俊慧, 郭卓团, 韩 磊, 张志斌

(内蒙古包钢钢联股份有限公司炼铁厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:包钢积极践行绿色低碳冶炼技术发展理念,以“高效、低耗、高质量”为原则,近年随着自产矿比例增加,通过积极改善原燃料质量,控制入炉有害元素含量,高富氧、高风温、高煤比,选择适宜理论燃烧温度,优化装料制度,细化炉前基础管理和生产设备标准化作业,强化工序协同保障,全厂煤气利用率提高 2.43 个百分点,累计降低燃料比 33.1 kg/t,提高高炉利用系数 0.132 t/(m³·d),各项技术经济指标取得较大进步。

关键词:高炉;白云鄂博矿;燃料比;有害元素

中图分类号:TF54

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2026)02-0005-05

Progress of Ironmaking Technology for Smelting Baiyuneboite with Blast Furnace

Gao Xiangzhou, Zhang Bin, Yu Hengliang, Lu Junhui,
Guo Zhuotuan, Han Lei, Zhang Zhibin

(Iron-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The development idea of green and low-carbon smelting technology is actively practiced in Baotou Steel by taking the principle of “high efficiency, low consumption and high quality”. In recent years, with the increase of proportion of self-produced ore, gas utilization rate of the whole plant is increased by 2.43 percentage points, fuel ratio is cumulatively reduced by 33.1 kg/t and utilization factor of blast furnace is increased by 0.132 t/(m³·d) through actively improving quality of raw materials and fuel, controlling contents of harmful elements as fired, high oxygen enrichment, high blast temperature and coal ratio, selecting suitable theoretical combustion temperature, optimizing charging system, refining basic management of stokehole and standardized operations of production equipment as well as strengthening collaborative guarantee of working procedures. As a result, all technical and economic indicators are with greater progress.

Key words: blast furnace; baiyuneboite; fuel ratio; harmful element

世界上成分复杂的铁矿莫过于白云鄂博矿,该矿共发现 71 种元素和 170 多种矿物,高出普通矿的数倍甚至 10 倍以上,而且还有氟、磷、钾、钠等有害

元素的大量存在,更增加了处理的难度,是古今中外冶金科技史上未曾遇到过的难题^[1]。20 世纪 70 年代中期白云鄂博铁精矿含钾、钠、氟较高,影响烧结

生产,对高炉冶炼不利,通过选矿小组主攻精矿提铁,同时降磷,降氟,降钾、钠,全国共试验 60 多种选矿工艺。80 年代初期,经过反复比较,从试验的 60 多种选矿工艺中选择采用长沙矿冶研究院提出的弱磁-强磁-浮选流程,获得铁品位 60% 的精矿,氟、钾、钠也降了下来,氟含量降到 0.8%。现阶段,包钢自产白云鄂博铁精矿品位已达到 66% 左右,最高达到 69%,氟含量为 0.3% 左右,为烧结攻关创造了条件^[1]。后续又贯彻原冶金部提出的“五高”(高顶压、高风温、高富氧、高喷吹、高寿命)“一低”(低硅)的操作方针,高炉生产水平持续提高。

1 近几年高炉自产矿比例变化

由表 1 可知,过去几年高炉炉料结构以烧结矿为主,搭配部分酸性球团矿和澳矿。

2023 年全厂入炉自产矿配比为 45.28%,较 2018 年升高 13.77 个百分点。自产矿比例升高,高炉透气性降低,压差升高,煤气流表现出中心不稳,边缘气流增强,故包钢高炉送风制度应以吹透中心为主,积极采取上风措施,保持炉况的稳定顺行。

表 1 包钢高炉炉料结构与自产矿配比(质量分数) %

时间	烧结矿	球团矿	澳矿	自产矿配比
2018 年	71.50	21.70	6.80	31.51
2019 年	73.00	25.00	2.00	38.58
2020 年	69.09	28.20	2.71	40.31
2021 年	70.20	27.58	2.22	39.27
2022 年	74.41	20.71	4.88	42.36
2023 年	71.30	28.52	0.18	45.28

2 各项指标进步

表 2 为近年包钢高炉技术经济指标。

由表 2 可知,近几年通过强化冶炼,高炉各项技术经济指标取得较大进步,全厂燃料比由 582.1 kg/t 降到 549.0 kg/t;煤比由 143.7 kg/t 提高到 168.3 kg/t;利用系数由 2.123 t/(m³·d) 提高到 2.255 t/(m³·d);煤气利用率由 42.73% 提高到 45.16%;富氧率由 2.46% 增加到 4.41%;热风温度由 1 115 °C 升高到 1 176 °C。

表 2 包钢高炉技术经济指标

时间	利用系数/(t·m ⁻³ ·d ⁻¹)	富氧率/%	热风温度/°C	煤比/(kg·t ⁻¹)	燃料比/(kg·t ⁻¹)	煤气利用率/%
2018 年	2.123	2.46	1 115	143.7	582.1	42.73
2019 年	2.129	2.93	1 156	149.7	580.1	43.04
2020 年	2.173	3.03	1 143	152.5	573.6	42.47
2021 年	2.234	3.84	1 145	157.0	564.8	43.10
2022 年	2.255	4.41	1 162	165.6	552.8	44.46
2023 年	2.225	4.19	1 176	168.3	549.0	45.16

3 包钢高炉原燃料条件及有害元素控制

表 3 为酸性球团矿化学成分及性能。由表 3 可知,近五年酸性球团矿 FeO 含量波动比较大,碱度不稳定,抗压强度呈现上升态势。

表 4 为烧结矿化学化学成分及转鼓强度。由表 4 可知,近五年烧结矿化学成分整体稳定,铁品位呈降低态势,转鼓强度是向好的趋势,为高炉技术进步奠定了基础。

表 3 包钢球团矿化学成分及性能

时间	化学成分(质量分数)/%								性能		
	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	F	MgO	S	P	碱度	膨胀率/%	抗压强度/N
2018 年	62.28	1.64	1.50	5.99	0.07	1.11	0.015	0.042	0.25	14.76	2 156.90
2019 年	62.49	1.46	1.54	6.18	0.07	1.08	0.009	0.038	0.25	14.18	2 179.04
2020 年	62.37	2.39	1.82	5.06	0.09	1.35	0.010	0.056	0.36	15.93	2 214.06
2021 年	62.10	2.70	1.78	5.02	0.08	1.19	0.009	0.057	0.35	15.46	2 339.36
2022 年	62.05	3.50	1.84	5.19	0.08	1.17	0.007	0.060	0.35	14.92	2 219.76
2023 年	62.04	2.25	1.85	5.01	0.08	1.30	0.011	0.051	0.37	14.83	2 284.27

表4 包钢烧结矿化学成分及转鼓强度

时间	化学成分(质量分数)/%								二元碱度	转鼓强度 /%
	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	F	S	MgO	P		
2018年	56.80	9.44	9.93	4.80	0.137	0.028	2.07	0.073	2.07	77.01
2019年	56.36	9.38	10.45	5.07	0.138	0.031	2.16	0.070	2.06	78.62
2020年	55.96	9.18	10.84	5.10	0.123	0.036	2.14	0.070	2.13	78.92
2021年	56.01	9.21	10.66	5.11	0.116	0.034	2.10	0.066	2.08	78.68
2022年	56.04	9.21	10.52	5.12	0.122	0.028	2.06	0.065	2.05	78.57
2023年	55.71	8.90	10.74	5.11	0.124	0.035	2.10	0.067	2.10	79.02

表5为焦炭反应后强度及灰分。由表5可知,焦炭灰分波动幅度较大,呈下降趋势,焦炭反应后强度呈上升趋势,总体趋势对高炉冶炼的进程是有利的。

表5 包钢焦炭反应后强度及灰分(质量分数) %

时间	CSR	灰分
2018年	61.18	13.05
2019年	63.91	12.84
2020年	65.85	12.63
2021年	65.05	12.71
2022年	65.26	12.75
2023年	65.31	12.82

在现代高炉冶炼条件下,随着喷煤量的提高,入炉焦比降低,焦炭负荷增加,焦炭在高炉内滞留时间延长,熔损率增加,焦炭质量恶化。通过优化高炉操作,优化含铁炉料和工艺参数,既可以缓解焦炭劣化,又可以满足高炉冶炼需求。

表6为入炉锌负荷及碱负荷变化趋势。按照行业同级别高炉有害元素控制要求,入炉碱负荷小于3.00 kg/t,锌负荷小于0.150 kg/t^[2]。炼铁厂近年通过采取降低铁精矿有害元素、优化配矿结构等措施,2023年全厂入炉碱负荷为4.753 kg/t,锌负荷为0.460 kg/t,整体呈现降低趋势。但是高炉入炉碱负

荷、锌负荷均高于行业控制标准,仍然影响高炉入炉原燃料性能,对高炉顺行及燃料比的降低造成不利影响。

表6 包钢高炉入炉有害元素变化 kg/t

时间	碱负荷	锌负荷
2018年	4.834	0.995
2019年	5.220	1.050
2020年	5.706	0.911
2021年	5.376	0.727
2022年	4.934	0.579
2023年	4.753	0.460

造成高炉冶炼难的主要原因为白云鄂博铁矿石有害元素钾、钠、氟含量高,钾、钠、氟在高炉内的循环富集,钾、钠、氟对烧结矿、焦炭、高炉的破坏作用大^[2]。

4 高炉操作制度进步

4.1 送风制度

送风制度主要是保持适宜的风速和鼓风动能以及理论燃烧温度,使得高炉初始煤气流得到合理的分布,炉缸工作均匀活跃,热量充沛,炉况维持长期稳定顺行。表7为包钢高炉进风面积。

表7 包钢高炉进风面积

项目	A高炉	B高炉	C高炉	D高炉	E高炉
有效容积/m ³	2 200	2 200	1 500	3 000	2 500
进风面积/m ²	0.311	0.311	0.271	0.391	0.339
风速/(m·s ⁻¹)	200	211	185	211	217

近几年高炉进风面积保持不变,风速相比行业同级别高炉(>230 m/s)处于偏低水平。随着冶炼条件的变化,煤比逐年升高,边沿气流增强了,这时

进风面积不但不能扩大,反而需要缩小风口面积。因此在煤比变动量大时,鼓风动能和风速的变化方向应根据实际情况决定。

适宜的理论燃烧温度,应能满足高炉正常冶炼所需的炉缸温度和热量,保证液态渣铁充分加热和还原反应的顺利进行^[3]。包钢高炉目前理论燃烧温度控制在 $2\ 250 \pm 50\ ^\circ\text{C}$,既不会因为其过高造成压差升高,也不会因太低造成冶炼困难。

4.2 装料制度

通过持续优化“中心加焦”装料制度,调整档位、布料圈数、批重和料线等,减少中心焦量和增加

中心环带矿量(充分利用次中心环带截面积)等手段适当抑制中心气流,同时利用中心焦外移以及整体环带平移,达到边缘稳定、中心带变窄,中心气流聚而强,形成节能型气流^[4],以达到改善煤气利用的目的,最终促进了低燃料比生产。2023 年全厂煤气利用率为 45.16%,较 2018 年的 42.73% 增加了 2.43 个百分点。表 8 为高炉装料制度的演变过程。

表 8 包钢高炉布料矩阵

阶段	料种	42.5°	42°	40°	37.5°	34.5°	32°	12°	结束角
调整前	焦炭	3	3	3	2	0.5		3	12°
	矿石		2.5	3	3	2			36°
调整后	焦炭	3		3	3	2	2	1	22°
	矿石		2	3	3	2	1		36°

由表 9 可知,2023 年 A、B 高炉矿石批重由 60 t 加到 63 t,不断优化上部装料制度,改善煤气利用率;C 高炉矿石批重 50 t,料罐基本达到极限状态;D 高炉矿石批重调至 94 t(增加 13 t);E 高炉矿石批重调至 73 t(增加 13 t),以满足厚料层生产的需求。

表 9 包钢高炉矿石批重 t

时间	A 高炉	B 高炉	C 高炉	D 高炉	E 高炉
2019 年	60	60	45	81	60
2024 年	63	63	50	94	73

批重对炉料在炉喉分布影响很大,批重小时布料不均匀;批重增大,则矿石分布均匀,相对加重中心而疏松边缘,而且软熔带气窗增大,料柱界面效应减小,有利改善透气性。通过实践摸索,包钢高炉适宜的焦批厚度为 0.45~0.50 m,矿批厚度为 0.40~0.45 m,随着煤比提高,焦批与矿批厚度已接近。

4.3 热制度、造渣制度

由于白云鄂博矿主要特点是易熔、易凝和难重熔,高炉软熔带宽,透气性较差,所以高炉日常操作杜绝持续低炉温及长时间高碱度冶炼。为保证炉缸活跃度,特制定了铁水物理温度和铁水化学热的控制标准,全厂铁水物理温度控制在 $1\ 500 \pm 10\ ^\circ\text{C}$,铁水硅含量控制在 0.40%~0.60%,为高炉低碳冶炼奠定基础。炉渣二元碱度控制在 1.13~1.18,炉渣 MgO 含量大于 8.5%,目的是让炉渣具有良好的流动性和脱硫能力,冶炼过程中根据入炉硫负荷变化情况及时对炉渣二元碱度进行调整。

4.4 炉前均衡出铁

炉前量化出铁参数,各高炉根据装备水平和炉况特性,量身定做炉前操作标准,控制打泥量、打泥压力等操作参数的稳定。表 10 为包钢高炉炉前出铁参数。

表 10 包钢高炉炉前出铁参数

项目	A 高炉	B 高炉	C 高炉	D 高炉	E 高炉
每次堵泥量/格	2.0~2.5	2.0~2.5	2.0~2.5	2.0~2.5	2.0~2.5
每次堵口压力/MPa	18~20	18~20	19~21	19~22	19~22
间隔时间/min	0~10	0~10	0~10	0~10	0~10
铁口深度/m	3.0~3.2	3.0~3.2	2.8~3.0	3.1~3.5	3.0~3.4
下渣时间/min	5~10	5~10	5~10	5~10	5~10
每日出铁次数	12	9	9	9	9
每次出铁时间/min	100~120	140~180	140~180	160~200	160~200

加强炉前操作管理及铁口维护,提高铁口合格率,稳定合理的打泥量,避免铁口难开、过浅而引起渣铁排放不及时给高炉带来憋压。细化落实倒铁口、单场作业、放砂口等特殊操作的作业标准是高炉生产的重要环节。

4.5 操作和设备巡检标准化

全面建立高炉操作标准化体系、数据化,推进日常技术管理标准化,量化高炉各项参数的调整幅度和调整区间,不断统计、回归、分析,最终收窄量化控制范围,减少人为干预和主观经验判断,不断实行数据化和趋势化操作。同时要重视和完善操作炉型管理,确定关键区域的热负荷控制范围,建立不同产能规模及不同原燃料结构的煤气流控制范围,做到用数据说话。

制定更为严格的岗位点检、专业点检制度,将设备按部位细分,明确每一个部位的点检周期、点检标准及点检方法,做到点检有依据、数据有标准,使点检作业规范化,避免因设备事故影响高炉生产。及时发现、消除事故隐患,制定突发事件应急预案。开展布料器长寿化攻关,制定高炉顶温控制管理办法,降低设备休减风率,进一步夯实高炉增产的设备保障基础。

4.6 强化工序协同保障

立足选矿,将混合精矿的质量在稳定中再有所提高,特别是硫含量、铁品位的稳定。

服务炼钢,各类突发事故及时向炼铁厂通报,以便炼铁工序能够在第一时间采取有效措施,争取主动,减少由于应对不及时造成高炉不必要的待罐减风,甚至休风。夯实鼓风、电力、燃气、氧气、给水等能源介质保障工作,保证相关设备的稳定高效运行,减少设备突发故障引起高炉休、减风,从而造成高炉不必要的炉况波动。

5 大球比冶炼技术进步

2023年11月炼铁厂一烧1[#]、2[#]烧结机退出生产序列后,烧结矿产量日趋紧张,“链篦机-回转窑-环冷机”工艺生产以包钢自产铁精矿为主要原料的碱性氧化球团矿,高炉开始大比例配加球团矿冶炼试验。

同年包钢1号高炉球团矿比例用到52%,炉料结构为48%烧结矿+15%酸性氧化球团矿+37%碱性氧化球团矿,炉况整体稳定、顺行,风量为3700 m³/min,焦炭负荷为4.20 t/t,煤气利用率为

44%,高炉产量为4800 t/d,燃料比为570 kg/t,试验主要问题是燃料比偏高,球团矿质量有波动。

2025年5号、3号高炉先后增加球团矿比例,5号高炉于8月中旬球团矿比例突破40%,到9月底球团矿比例逐步用至45%,高炉利用系数达到2.678 t/(m³·d),环比提高0.019 t/(m³·d);燃料比完成561 kg/t,环比降低5 kg/t。10月上旬,5号高炉进一步实现高产低耗,系数达到2.71 t/(m³·d),燃料比完成538.5 kg/t。目前球团矿比例为55%,燃料比为550 kg/t。3号高炉于12月球团矿比例突破45%,生铁产量为5731 t/d,高炉利用系数达到2.61 t/(m³·d),燃料比为547.29 kg/t。

6 结论

(1)在包钢高炉碱负荷、锌负荷、氟负荷高,自产矿比例高的原燃料条件下,高炉探索出一条通过优化装料制度、完善高炉标准化作业、强化基础工作等的增产降耗的技术体系。

(2)不断突破传统观念,通过合理调整装料制度,提高热风温度(1115~1176℃),提高富氧率(2.46%~4.41%),改善燃烧条件,适时加重矿焦比,延长煤气在炉内停留时间,改善软熔带位置与形状,提高煤气利用率,促进低硅冶炼,降低吨铁能耗。

(3)各项技术经济指标取得较大进步,全厂燃料比由582.1 kg/t降到549.0 kg/t;利用系数由2.123 t/(m³·d)提高到2.255 t/(m³·d),煤气利用率由42.73%提高到45.16%,高炉球团矿比例最高用至55%,高炉利用系数提高,燃料比稳步降低。

(4)应对原燃料条件变化,全厂高炉炉渣二元碱度控制在1.13~1.18,炉渣MgO含量大于8.5%。

参 考 文 献

- [1] 林东鲁,李春龙,邬虎林,等.白云鄂博特殊矿采选冶工艺攻关与技术进步[M].北京:冶金工业出版社,2007.
- [2] 邬虎林.包钢白云鄂博特殊矿炼铁技术进步及创新发展(一)[J].包钢科技,2024,50(4):8-9.
- [3] 周传典.高炉炼铁生产技术手册[M].北京:冶金工业出版社,2012.
- [4] 李磊,高向洲,王宇,等.大比例球团矿在包钢2200 m³高炉的生产实践[J].包钢科技,2022,48(4):15-17.