

包钢白云鄂博特殊矿炼铁技术进步及创新发展(二)

邬虎林

(内蒙古包钢钢联股份有限公司院士工作站, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 文章对包钢炼铁系统的技术进步进行了总结分析, 认为白云鄂博特殊矿选矿、烧结、冶炼难题的技术攻关及技术创新, 是炼铁生产实现高效、优质、低耗、长寿、环保的根本保障, 也是包钢炼铁跨越式发展的技术支撑。

关键词: 白云鄂博特殊铁矿; 炼铁系统; 技术进步

中图分类号: TF543

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)05-0001-07

Technical Progress and Innovative Development of Ironmaking for Special Ore of Bayan Obo of Baotou Steel (Part 2)

Wu Hu - lin

(Academician Workstation of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the paper, the technical progress of ironmaking system of Baotou Steel is summarized and analyzed. It is thought that the technological breakthrough and innovation of beneficiation, sintering and smelting problems for special iron ore of Bayan Obo are fundamental guarantee for achieving the ironmaking production with high efficiency and quality, low consumption, long service life and environmental protection as well as technical support of great-leap-forward development for ironmaking of Baotou Steel.

Key words: special iron ore of Bayan Obo; ironmaking system; technical progress

(接上期)

3 包钢高炉操作创新

3.1 “三口一瘤”冶炼难题攻关

3.1.1 风口损坏问题的解决

造成风口烧损的原因既有外部原因, 又有属于风口自身的内部原因。外部原因指铁矿石特性、焦炭质量、高炉炉况变化、炉缸堆积等; 内部原因指风口本身的冷却参数, 而冷却参数又与风口结构、制造材质、冷却水量及水质等有关。

炉缸工作差或炉缸堆积是导致风口破损的主要外部原因。1979年底, 用矩形截面铜管制造、以0.98 MPa 高压水冷却(原风口冷却压力为0.37 MPa)的螺旋铜管风口在包钢高炉推广使用, 极大地扭转了包钢高炉风口损坏多的被动局面。1980—1983年全厂共损坏风口289个, 平均每个风口的出铁量达到1.8万吨t以上, 创造了当时包钢风口寿命的最好记录。1982年底, 高压水螺旋铜管风口获冶金科学技术奖。

为了适应喷吹煤粉的需要, 从1986年起高炉改

用铸焊结合的贯流式风口,1993 年又在风口前端表面共渗重金属,风口种类有长度不等、直径不同的水平风口和倾斜 5° 的斜风口。每个风口出铁量可达 3.0 万 ~ 3.5 万 t。

如今,随着风口结构和材质的不断改进,控制风口供水压力为 1.5 MPa、水量为 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 、风口水速为 8 m/s,风口平均使用寿命为 1 年,最长使用寿命为 2.5 年。

3.1.2 渣口损坏问题的解决

造成渣口损坏的主要原因是渣中带铁,放渣时铁液与渣口接触。使渣口瞬时热负荷过高而烧坏。渣中带铁多属炉缸工作不活跃、炉凉、炉缸堆积导致,其次是渣口承受热负荷的能力不够。

1979 年以后,在将渣口热负荷最大的部位由铸铜改为紫铜轧材的基础上,将渣口的冷却水压由 0.39 MPa 提高到 0.98 MPa,从而使渣口寿命得到了提高。1992 年以后,随着高炉原料条件改善,渣量减少,开始不排放上渣而增加出铁次数,新建高炉增加出铁次数,高炉不再设渣口。

3.1.3 铁口难以维护问题的解决

白云鄂博矿高炉渣中 CaF_2 对耐火材料有很强的侵蚀作用,炉渣对堵口时形成的“泥包”侵蚀严重。这样,铁口总是不能形成稳定牢固的“泥包”,铁口工作始终处于恶性循环状态。由于炉渣强烈的侵蚀冲刷作用,出铁过程中铁口通道易被“涮”大,造成“跑大流”,经常被迫改常压堵口;由于经常铁出不净堵口,造成炉况不顺,甚至烧穿事故,更为严重的是铁口深度不够,使铁口区炉衬破损加剧,易发生炉缸烧穿事故。

解决铁口问题主要是改善与渣铁直接接触的炮泥的质量,以适应和抵御含氟炉渣的侵蚀。

1960 年包钢首创使用碳素料铁口泥套。1964 年底,包钢研制的碳素无水炮泥获得成功。同有水炮泥相比,碳素无水炮泥抗渣侵蚀性能、抗渣铁冲刷性能有了根本的改善,具体表现在出铁全过程中铁口通道孔径保持不变,铁流稳定,堵铁口后干燥速度快,而且用泥量节约 30% ~ 50%,解决了铁口难于维护的问题。随后,这项技术很快在全国得到了推广。

3.1.4 高炉防止结瘤措施及操作

(1)改进原料、燃料质量。选矿采用弱磁 - 强磁 - 反浮选工艺,铁精矿的 F 含量降至 1% 以下, K_2O 、 Na_2O 含量不断下降,降低了入炉原料的氟、

钾、钠含量。使用高碱度高氧化镁烧结矿,使用低氟球团矿,球团矿的膨胀率降至 15%。强化筛分,入炉烧结矿含粉率降至 4% 以下。提高焦炭质量,焦炭转鼓强度 M_{40} 大于 80%,焦炭抗碱性要强,热性能指标 CSR 大于 60%。

(2)改进高炉操作。冶炼白云鄂博矿的高炉操作制度既要遵循冶炼普通矿的一般规律,更要重视白云鄂博矿的特殊性,二者缺一不可。

热制度和造渣制度选择。除降低原料的含碱量外,在高炉操作中排碱始终处于重要地位。为此,炉缸热制度、造渣制度的选择,必须满足有足够高的炉缸温度,既要有高的脱硫能力,又要有利于排碱。

包钢高炉排碱操作的研究表明,生铁 Si 含量变化 $\pm 0.1\%$,影响渣中碱金属含量 $\pm 0.045\%$;炉渣 F 含量变化 $\pm 1.0\%$,影响渣中含碱金属含量 $\pm 0.16\%$;炉渣自由碱度变化 ± 0.1 ,影响渣中碱金属含量 $\pm 0.3\%$;炉渣 MgO 含量变化 $\pm 1.0\%$,影响渣中碱金属含量 $\pm 0.21\%$ 。

在炉渣 MgO 含量为 8% 的情况下,选择炉渣自由碱度 1.05 是合适的。控制铁水物理温度在 $1\ 500 \pm 20\ ^\circ\text{C}$ 、铁水 Si 含量为 0.45% ~ 0.75% 较好。

送风制度改进。摒弃了过去长时间采用的较大风口和低风速大风量的操作方法,高炉操作以炉料透气性为基点,限制高压差操作,选择适宜的送风制度,采取吹透中心、活跃炉缸的措施,随着原料条件的改善,不断提高风速与鼓风动能。

装料制度调整。装料制度应采用重点开放中心、适当疏松边缘的方法。煤气 CO_2 曲线呈双峰型,以保持炉况顺行。在上下部调剂上,获得适当发展且稳定的边缘煤气流,是防止炉墙粘结的重要措施。

(3)不定期洗炉。如果吨铁碱负荷升高到 7 ~ 8 kg 以上,或由某种原因造成炉墙有轻度粘结而尚未影响顺行时,应及时果断地采取降低终渣碱度和发展边缘气流的措施,严格控制压差,进行 1 ~ 2 天洗炉即可消除,然后恢复至正常操作制度。洗炉时从炉顶煤气带出的碱金属量可达入炉量的 20%^[1]。

3.2 高炉富氧大喷煤技术进步

包钢高炉喷煤工程于 1985 年建成投产,采用全无烟煤喷吹,结束了包钢高炉全焦冶炼的历史。随着原燃料条件的改善和操作水平的提高,实现了高风温、高富氧、高煤比的生产。1999 年,煤比首次达到 100 kg/t,目前保持在 150 kg/t 左右。

1990年6月,开展了富氧大喷煤(无烟煤)工业试验,在冶炼含氟矿的条件下,探索富氧喷煤的冶炼规律,高炉利用系数到达了 $1.7\text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以上,煤比超过了 $150\text{ kg}/\text{t}$,达到了预期目标。在富氧大喷煤试验中,开发了高炉富氧喷煤单支管流量测定及控制和喷吹罐连续计量技术,实现了煤粉的均匀喷吹和计量调节的自动控制。试验中使用了氧煤枪设备,有效的强化了煤粉的燃烧,为在低富氧率的条件下提高煤比创造了有利条件。该项目荣获冶金科学技术一等奖。

1993年,开始混喷烟煤生产,配比为 $40\% \sim 45\%$ 的烟煤和 $55\% \sim 60\%$ 的无烟煤。

1999年,炼铁厂全年煤比首次达到 $101\text{ kg}/\text{t}$,风温为 $1\ 168\text{ }^\circ\text{C}$,富氧率为 1.51% 。

2012年,开发了混喷低温半焦技术。随着无烟煤资源日趋紧张,且价格呈大幅度增长趋势,研究采用一种中等挥发分及可磨性能、爆炸性能、燃烧性能满足高炉喷吹的低温半焦替代无烟煤,在 $2\ 500\text{ m}^3$ 高炉采用 85% 低温半焦+ 15% 烟煤混合喷吹,炉况顺行,效果良好,降低了煤粉成本。该项目荣获冶金科学技术一等奖。

随着原燃料条件的改善和操作水平的提高,实行了高温、高富氧、高煤比生产,2023年炼铁厂炉顶压力达到 0.230 MPa ,风温达到 $1\ 180\text{ }^\circ\text{C}$,富氧率达到 4.80% ,煤比达到 $160\text{ kg}/\text{t}$ 左右。

3.3 停炉和开炉操作技术进步

从1971年起包钢首创采用打水空料线并送煤气法停炉,料线降至炉腰、炉腹交界处切断煤气,改由炉顶放散。这样可以回收 75% 以上煤气并用大风量停炉,缩短降料线时间,减少煤气放散对大气的污染,实现简便、快速、环保、安全、经济的停炉要求。20世纪80年代送煤气法停炉技术在全国炼铁系统推广。

近几年炼铁厂通过大胆创新和实践,在高炉大中修快速开炉和降料面停炉取得历史性突破。在开炉炉料结构、风口布局、装料制度、送风参数控制和炉前出渣、出铁进行了大量改进。

3.3.1 停炉技术进步

2022年7月8日1号高炉停炉,零爆震,实现全程煤气回收,整个停炉用时 15 h ,料线降至风口大套上沿,实现环保停炉的高要求。

优化停炉方案,采用一段式重负荷停炉(调轻 5%),高盖面焦设计,高顶压低压差,初始风量不超过全风的 80% 。

3.3.2 开炉技术进步

2023年2月1日5号高炉开炉,达产利用系数达到 $2.778\text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 24 h 风量回全,炉前渣铁清理量为零,首炉铁水温度达到 $1\ 522\text{ }^\circ\text{C}$,再创包钢开炉历史新高。

优化开炉参数,确定合理渣焦比为 $0.31 \sim 0.33\text{ t}/\text{t}$ 、总焦比为 $3.1 \sim 3.3\text{ t}/\text{t}$,保证开炉炉缸热量充足,恢复快速。建立开炉渣铁积存理论模型,准确计算出铁时间和渣铁量,优化快速降硅标准,实现快速降硅。

3.4 逐步掌握了大型高炉的操作技术

随着包钢 $3\ 000\text{ m}^3$ 和 $4\ 150\text{ m}^3$ 高炉的投产,由于炉喉和炉缸截面积相对较大,导致布料和煤气流控制难度加大,增加了白云鄂博特殊铁精矿在大高炉上应用的难度。近年来,高炉操作技术进步突出表现在逐步掌握了大型高炉的操作技术,实现高产、稳产、低耗。

3.4.1 改善原燃料质量,持续优化炉料结构

随着高炉容积的扩大,对原燃料质量指标提出更高的要求,才能保证高炉的稳定顺行。焦炭强度高,以保证炉缸的透气性、透液性。烧结矿和球团矿品位、强度、冶金性能的改善是高产低耗的必要条件。

采用大烧结机、大焦炉与大高炉匹配供应的组织生产模式,稳步提高原燃料质量,发挥出大型高炉高效、低耗的优势。

坚持强化过筛,降低入炉粉末,小于 5 mm 入炉粉末量小于 4% 。入炉焦炭质量见表3,入炉烧结矿质量见表4,入炉球团矿质量见表5,炉料结构见表6。

表3 包钢大高炉入炉焦炭质量(质量分数)

%

炉容/ m^3	时间	A_d	$S_{1,d}$	M_{40}	M_{10}	CRI	CSR	备注
3 000	2023年	12.85	0.811	88.47	6.16	24.20	65.40	5 [#] —8 [#] 焦炉
4 150	2020年	12.70	0.870	89.63	5.46	22.53	68.07	1 [#] —4 [#] 焦炉

表 4 包钢大高炉入炉烧结矿质量

炉容 /m ³	时间	化学成分(质量分数)/%							碱度	转鼓指数 /%	平均粒径 /mm	备注
		TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	F	K ₂ O + Na ₂ O				
3 000	2023 年	55.91	8.92	10.50	5.11	2.12	0.12	0.13	2.02	80.05	21.33	265 m ² 烧结机
4 150	2020 年	56.65	8.68	10.05	4.99	1.81	0.28	0.19	2.01	78.45	17.66	500 m ² 烧结机

表 5 包钢大高炉入炉球团矿质量

炉容 /m ³	时间	化学成分(质量分数)/%							碱度	转鼓指数 /%	抗压强度 /N	膨胀率 /%
		TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	F	K ₂ O + Na ₂ O				
3 000	2023 年	63.44	1.88	1.42	4.34	0.97	0.05	0.315	0.33	95.83	2 156	16.5
4 150	2020 年	63.43	0.87	1.28	4.43	1.15	0.05	0.220	0.29	96.05	2 507	15.5

表 6 包钢大高炉炉料结构

炉容 /m ³	烧结矿配比 /%	球团矿配比 /%	澳矿块配比 /%	矿批 /t	焦批 /t	焦丁批 /t	碱负荷 /(kg·t ⁻¹)	锌负荷 /(kg·t ⁻¹)
3 000	73.07	26.86	0.07	93	18.20	1.7	4.51	0.427
4 150	72.96	25.02	2.02	116	27.15		4.07	0.597

3.4.2 控制合理的煤气流分布,确保炉况稳定顺行

根据每座高炉各自炉型特点,通过上下部调剂达到炉内煤气流的合理分布,不断提高煤气利用率,保证高炉的稳定顺行和能量的最佳利用。

上部调剂注重保持中心气流畅通,边缘气流稳定,构建“边沟+平台+漏斗”的装料形式。合理利用炉顶十字测温装置、炉身温度检测、炉顶热图像仪等可以反映气流分布的检测设备。用 W、Z、C 三个指数定量地反映边沿、中间、中心气流的强弱,实现了气流分布控制的定量管理,提高了控制精度。

下部调剂注重提高鼓风动能,保证炉缸活跃、均匀,以控制合理的炉缸初始煤气流分布和炉体热负荷。3 000 m³ 高炉风口面积为 0.392 m²,标准风速为 230 m/s 左右,鼓风动能为 14 000 kJ/s。4 150 m³ 高炉为了保证吹透中心,活跃炉缸,进风面积确定为

0.471 m²,标准风速为 210 m/s 左右。

3.4.3 强化有害元素控制,减少炉内循环富集

监控入炉的氟负荷、碱负荷、锌负荷,针对包钢大高炉 4.5 kg/t 左右碱负荷的冶炼条件,适当控制炉渣二元碱度 $R = (\text{CaO} - 1.473\text{F}_2)/\text{SiO}_2$ 为 1.15 ± 0.05 ,将炉渣 MgO 含量控制在 8.0% ~ 9.0%,加大排碱力度,使炉渣排碱率达到 70% 以上。

3.4.4 采用高风温、高顶压、富氧、高煤比技术,实施强化冶炼

高风温、高顶压、富氧鼓风是高炉提高产量、降低燃料比的有效手段。富氧、喷煤相结合可以控制合适的理论燃烧温度。大高炉适宜的理论燃烧温度为 $2\,250 \pm 50$ °C,铁水物理温度在 $1\,500 \pm 10$ °C,铁水含硅在 0.4% ~ 0.6%。表 7 为包钢大高炉技术经济指标。

表 7 包钢大高炉技术经济指标

炉容 /m ³	时间	利用系数 /(t·m ⁻³ ·d ⁻¹)	焦比 /(kg·t ⁻¹)	煤比 /(kg·t ⁻¹)	燃料比 /(kg·t ⁻¹)	渣铁比 /(t·t ⁻¹)	富氧率 /%	风温 /°C	顶压 /MPa	煤气利 用率/%	休风率 /%	鼓风动能 /(MJ·s ⁻¹)
3 000	2023 年	2.191	368.13	166.43	534.56	0.331	6.29	1 183	0.217	41.90	1.41	36.4
4 150	2020 年	2.150	412.55	146.15	558.69	0.320	3.09	1 180	0.231	42.63	0.89	44.8

3.4.5 强化炉前均衡出铁

加强炉前操作管理及铁口维护,提高铁口合格

率。改进炮泥质量,稳定打泥量,保证各铁口深度在3 m以上,减少渣铁排放不及时对高炉的不利影响。制定有效的倒铁口作业、单厂作业、放砂口操作的作业标准,确保安全、高效生产。

3.4.6 加强炉体维护管理

通过炉体检测,掌握炉衬的侵蚀状况,及时采取维护措施。开发出炉底侵蚀模型,推算炉缸、炉底剩余砖衬厚度,并据此采取相应护炉措施。

关注软熔带根部处炉身温度的变化,确定合理的冷却制度以稳定渣皮。包钢3 000 m³高炉和4 150 m³高炉采取的冷却参数见表8。

表8 包钢大高炉冷却参数

名称	3 000 m ³ 高炉	4 150 m ³ 高炉
软水总流量/(m ³ ·h ⁻¹)	4 300~4 800	6 000
软水压力/MPa	0.45	0.85
水速/(m·s ⁻¹)	1.8~2.0	2.0~2.3
进水温度/°C	43~45	37~42
水温差/°C	2.5~4.5	4~6

3.5 包钢1号高炉实现大比例球团矿冶炼

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,高炉开始配加大比例球团矿进行冶炼试验。

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3 700 m³/min,焦炭负荷为4.20 t/t,煤气利用率为44%,高炉产量为4 800 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。

针对入炉白云鄂博矿比例升高,为增加炉缸热量储备,炉渣二元碱度控制在1.18~1.22,炉渣MgO含量不小于9.0%。

针对入炉球团矿比例升高,采用中心加焦的装料制度,通过大流量保持中心煤气流通稳定,通过调整压量关系、风口参数来促进中心煤气流发展,保持活跃炉缸。

4 高炉生产系统装备的进步

4.1 装备大型化

本着逢修必改、逢修必扩的理念,包钢高炉逐步实现大型化、自动化、智能化。包钢现有7座高炉生产,

总产能达到1 650万t。包钢高炉有效容积见表9。

表9 包钢高炉有效容积变化

高炉	新建投产时间	原炉容/m ³	扩容投产时间	新炉容/m ³
1号	1959-09-26	1 513	2001-10-20	2 200
2号	1960-09-13	1 513	2004-07-06	1 780
3号	1970-10-01	1 800	1994-06-01	2 200
4号	1995-11-14	2 200	2014-11-19	3 000
5号	2005-01-20	1 500		
6号	2006-12-12	2 500		
7号	2014-05-27	4 150		
8号	2015-10-12	4 150		

注:2号高炉于2015年8月26日停炉,退出生产序列。

4.2 包钢无料钟炉顶设备

由于无料钟炉顶设备较双料钟炉顶设备具有更好的密封性和布料灵活性,有利于提高炉顶压力和实现多环布料。1号高炉1985年3月大修,首次采用并罐式无料钟炉顶和包钢自主开发的BG-I型布料器,3号高炉1989年大修也采用了BG-I型布料器,4号高炉则引进PW型布料器,之后包钢高炉全部使用了并罐式无料钟炉顶和包钢BG-III型布料器,2014年5月和2015年10月投产的7号高炉、8号高炉安装了由美国制造的包钢BG-III型布料器。2020年以来,包钢高炉布料器逐步使用了合作开发的具有更长寿命和精准布料功能的新型矩形出口溜槽^[2]。

4.3 高炉的炉体长寿优化

包钢投产后相当长时间,高炉炉龄普遍比较低,无中修炉龄更短,高炉基本上是2~3年就小修,5年就大修。随着白云鄂博矿冶炼难题的攻关和长寿技术的不断进步,包钢高炉的炉龄不断提高,1995年投产的有效容积2 200 m³的4号高炉炉龄达18年6个月,单位炉容产铁量达到12 532 t,1994年扩容改造后的有效容积2 200 m³的3号高炉炉龄为21年,单位炉容产铁量为14 834 t。

4.3.1 包钢高炉炉体变化

(1)炉型设计。包钢高炉炉型设计逐步趋于矮胖,高径比从最初的2.92降到2.04。炉缸高度和死铁层厚度不断加深,死铁层厚度最初724 mm增至2 400 mm以上。表10为包钢高炉炉型参数。

(2)炉衬耐材。原苏联设计的高炉炉衬为炉底采用炭砖-高铝砖综合炉底,自炉缸向上,直至炉身上部支梁式水箱均为炭砖,再向上至炉喉为粘土砖。

由于炉腹至炉身中下部软熔带区域承受化学侵蚀、高温气流的磨损、氟和碱侵蚀等破坏作用,导致炉腹至炉身中下部寿命很短。这种炉衬结构一直延用至 20 世纪 90 年代初。

自 1994 年起,为适应白云鄂博特殊矿冶炼,在各高炉的大中修时使用了烧成铝碳砖后,炉腹至炉身中下部的寿命有了提高。

在 1994 年 3 号高炉的扩容改造和 1995 年 4 号高炉建设中,炉缸炉底采用法国 UCAR 公司的高导

热的热压小炭砖并相应衬以国产陶瓷杯材料,由低导热炉缸改为了高导热炉缸。将厚炉衬逐步改为薄炉衬。

2014 年 5 月和 2015 年 10 月投产的包钢 7 号、8 号高炉炉衬按薄炉衬设计,炉底满铺砖第 1 层为国产石墨砖,第 2 层为国产高导炭砖,第 3、4 层为西格里微孔炭砖,第 5、6 层中心部分为陶瓷垫,炉缸侧壁为陶瓷杯。炉缸侧壁环形砖第 3~14 层采用西格里超微孔炭砖,第 15~18 层采用西格里微孔炭砖。

表 10 包钢高炉炉型参数

项目	1 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号、8 号
有效容积 (V_u)/ m^3	2 200	2 200	3 000	1 500	2 500	4 150
计算有效容积 (V_u)/ m^3	2 317	2 317	3 239.2	1 892.4	2 828.4	4 508
炉缸直径(d)/mm	10 500	10 500	12 000	9 600	11 500	14 200
炉腰直径(D)/mm	12 000	12 000	13 800	11 260	12 980	15 600
炉喉直径(d_1)/mm	8 200	8 200	8 800	7 600	8 400	10 500
有效高度(H_u)/mm	27 400	27 400	30 020	25 850	29 250	31 800
死铁层厚度(h_0)/mm	2 410	2 410	2 540	1 960	2 380	3 200
炉缸高度(h_1)/mm	4 600	4 600	4 860	4 400	4 600	5 400
炉腹高度(h_2)/mm	3 400	3 400	3 700	3 400	3 500	4 000
炉腰高度(h_3)/mm	2 000	2 000	2 100	1 800	2 000	2 000
炉身高度(h_4)/mm	15 400	15 400	17 300	14 450	17 150	18 000
炉喉高度(h_5)/mm	2 000	2 000	2 000	1 800	2 000	2 400
炉腹角 α /($^\circ$)	77.560	77.560	76.32	76.257 2	78.062	80.074
炉身角 β /($^\circ$)	82.967	82.967	81.80	81.814 6	82.394	81.937
高径比 H_u/D	2.28	2.28	2.18	2.27	2.25	2.04
炉缸横截面积(A)/ m^2	86.59	86.59	113.10	72.36	103.87	158.29
V_u/A	26.84	26.84	28.64	26.14	27.23	28.48
风口/个	28	28	32	24	30	38
铁口/个	3	2	4	2	3	4

(3) 冷却装置与介质。包钢建厂初期,1 号、2 号、3 号高炉炉底、炉缸采用光面冷却壁,炉腹采用双层水管、镶砖冷却壁;1 号、2 号高炉炉腰为 1 段铜冷却板加 1 段镶砖冷却壁,炉身采用冷却壁加支梁式水箱结构;3 号高炉炉腰、炉身为铜冷却板加冷却壁。

1994 年 3 号高炉改造和 1995 年新建成的 4 号高炉($2\ 200\ m^3$)炉身采用卧式冷却板和立式冷却壁结合、工业水开路循环冷却。2005 年建成的 5 号高炉($1\ 500\ m^3$)采用双层冷却板壁结合、工业水开路循环冷却。

2006 年 12 月 12 日建成投产的 6 号高炉以及 2014 年 11 月 19 日扩容改造后的 4 号高炉采用除盐水密闭循环冷却,炉体部分采用铜冷却壁。

包钢两座 $4\ 150\ m^3$ 高炉通体采用全冷却壁结

构。炉底侧面、炉缸区采用 5 段光面灰铸铁冷却壁,冷却壁厚为 160 mm。风口区采用 1 段异形光面灰铸铁冷却壁。炉腹下部采用两层铜冷却板过渡,炉腹至炉身下部设 5 段轧制铜冷却壁,炉身中上部设置 6 段镶砖球墨铸铁冷却壁,镶砖材质为氮化硅结合碳化硅砖。炉喉采用双层耐磨水冷结构,炉壳侧为水冷球墨铸铁冷却壁,热面为耐磨衬板。风口共设 38 个,风口长度为 683 mm,直径为 $\Phi 120\ mm$ 、 $\Phi 130\ mm$ 两种尺寸,设计水流量为 $35\ m^3/h$,水速为 $15.5\ m/s$ 。

4.3.2 加强高炉施工质量

在优化炉型设计的基础上,强化高炉施工质量控制,严格按标准控制炭砖砌筑缝隙,捣实填缝料减少气隙,保证传热畅通,压浆密实防止煤气贯通串漏。

4.3.3 加强高炉日常管控

加强高炉炉体监测管控,使用炉衬侵蚀预测模型,制定高炉长寿预警标准和措施。

不断改善原燃料质量,提高入炉综合品位至58%以上,提高焦炭冷强度和热性能,降低有害元素的入炉负荷,减少K、Na、F、Zn等有害元素在高炉内循环富集;定期排碱,维持充足的中心煤气流进行排锌;稳定边缘气流,适当提高炉渣碱度、炉渣黏度,形成稳定的渣皮。注重活跃炉缸,保持较高炉温有利于提高炉缸热储备,保证炉缸活跃;减少铁水环流对炉缸的侵蚀,减弱铁水“象脚”状侵蚀,延长高炉炉缸、炉底的寿命。

当高炉生产进入炉役后期,采取不同的修补措施,如更换冷却壁和炉皮、喷涂造衬、压力灌浆、安装水冷柱、增加监控手段等,使炉体重新形成保护层,

能有效延长高炉的使用寿命。

4.4 包钢热风炉系统

包钢每座高炉配备四座热风炉,热风炉有内燃式、外燃式和顶燃式,送风温度为1 150~1 250℃,见表11。

包钢两座4 150 m³高炉配备四座卡卢金顶燃式热风炉,首次设计使用37孔Φ20 mm孔径格子砖,边砖全部设计加工;设计下部使用粘土格子砖,中上部使用硅质格子砖,减小投资。上部硅质格子砖采用纳米高辐射涂层技术,增加蓄热能力,降低煤气消耗。首次应用煤气、空气双预热板式换热器,煤气、空气预热温度在200℃以上,热风炉拱顶温度控制在1 350℃,烟气温度控制水平为450℃。设计单烧高炉煤气风温为1 200℃,掺烧转炉煤气风温为1 250℃。热风炉操作系统设计手动、自动换炉系统。

表11 包钢高炉热风炉设计参数

项目	1号高炉	3号高炉	4号高炉	5号高炉	6号高炉	7号、8号高炉
送风温度/℃	1 150~1 170	1 160~1 190	1 170~1 190	1 170~1 190	1 180~1 200	1 250
拱顶温度/℃	1 350	1 350	1 350	1 350	1 350	1 350
废气温度/℃	450	450	450	450	450	450
烟气温度/℃	200~320	200~320	200~320	200~320	200~320	200~320
热风炉形式	4座内燃式	4座外燃式	4座外燃式	3座内燃式1座顶燃式	4座内燃式	4座顶燃式
热风炉全高/mm	46 125	52 843	52 170	46 800	47 800	44 000
热风炉蓄热室外径/mm	11 022	9 980	9 982	11 010	11 010	13 700
蓄热室格子砖高度/mm	33 000	34 600	33 600	34 000	35 000	19 320
蓄热室截面积/m ²	38.25	36.317	40.715	41	40	94.12
燃烧器形式	陶瓷	陶瓷	陶瓷	陶瓷	陶瓷	陶瓷
助燃风机台数	2	2	2	2	2	2
送风形式	集中鼓风	集中鼓风	集中鼓风	集中鼓风	集中鼓风	集中鼓风
风量/(m ³ ·台 ⁻¹ ·h ⁻¹)	161 060	116 970	170 000	116 970	160 000	240 000

5 结束语

白云鄂博特殊矿选矿、烧结、冶炼技术攻关成就是包钢炼铁的跨越式发展的强大支撑。只有重视基础理论研究和坚持系统技术攻关,才能有技术突破。要继续深入研究白云鄂博特殊矿中钾、钠、氟、硫、磷的有效控制措施,开发新的工艺流程,提高白云鄂博矿的综合利用水平。

坚持创新发展,就会实现包钢炼铁生产的绿色化、低碳化、智能化、数字化。

在此,特向70年来为包钢白云鄂博特殊矿冶炼技术进步做出贡献的炼铁工作者表示崇高的敬意!

参 考 文 献

- [1] 林东鲁,李春龙,邬虎林.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.包钢炼铁系统技术进步[J].包钢科技,2004,30(3):10-16.