

包钢白云鄂博特殊矿炼铁技术进步及创新发展(一)

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, 认为白云鄂博特殊铁矿选矿、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)04-0007-07

Technical Progress and Innovative Development of Ironmaking for Special Ore of Bayan Obo of Baotou Steel (Part 1)

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

自 1983 年大学毕业分配到包钢, 本人在包钢炼铁厂和包钢技术中心工作近 40 年。经历了白云鄂博特殊矿冶炼的艰苦攻关和包钢炼铁的跨越式发展过程。值此包钢厂庆 70 周年之际, 特回顾包钢炼铁技术进步历程及成就, 以兹纪念。

包钢所使用的铁矿石来自白云鄂博矿, 自 1959 年 9 月高炉投产以来, 出现了难选、难烧、难炼的技术难题。世界上成分复杂的铁矿莫过于白云鄂博矿, 该矿共发现了 71 种元素和 170 多种矿物, 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, 高炉炼铁出现的“三口一瘤”冶炼难题, 是古今中外冶金科技史上未曾遇到过的难题。

结合攀枝花钒钛矿攻关经验, 1978 年原冶金部在包钢成立了 4 个攻关组(采矿组、选矿组、烧结组、高炉组), 招集国内上百家科研单位大力协同, 联合攻关。包钢的科研技术人员一直继承光荣传统, 不断开展技术攻关和技术创新工作。

包钢炼铁的跨越式发展离不开白云鄂博特殊矿

选矿、烧结、冶炼技术攻关成果的支撑,离不开高炉容积及其配套装备系统的不断扩大及产能的不断提高。炼铁装备达到大型化、自动化、节能化、环保化,炼铁生产实现了高效、优质、低耗、长寿、环保的目标。

经过几代人的技术攻关,包钢技术人员逐渐掌握了白云鄂博铁矿的冶炼规律,探索出了与之相适应的高炉强化之路。炼铁生产可分为四个阶段:1959—1978 年为艰难探索阶段;1978—1995 年为攻关创新阶段;1995—2015 年为引进发展阶段;2015 至今为绿色低碳阶段。包钢炼铁投产至 2023 年累计生铁产量为 3.18 亿 t。

1 白云鄂博矿的特殊性及高炉冶炼难题^[1]

1.1 白云鄂博矿的特殊性

1927 年 7 月,我国地质学家丁道衡发现了白云鄂博铁矿。1935 年,我国地质学家何作霖发现了白云鄂博矿中的两种稀土矿物,分别命名为白云矿和鄂博矿,白云矿即氟碳铈矿(RECO_3F),鄂博矿即独居石矿(CePO_4)。

白云鄂博矿床是铁、稀土、铈共生的综合性矿床,分为主矿、东矿、西矿和东介勒格勒等铁矿,东起都拉哈拉,西至阿布达,东西长 16 km,南北宽 3 km,形成一个窄长的铁、铈、稀土矿化带。

白云鄂博矿的成因复杂,导致矿体不同部位的矿石成分有较大变化,按铁矿石磁性率(氧化度) TFe/FeO 大于或小于 3.5,分为氧化矿石和原生磁铁矿石;根据其品位的高低分为富铁矿石和中贫铁矿石;同时又根据其稀土氧化物总含量大于或小于 7%,分为高、低稀土中贫铁矿石;按主要脉石的种类、含量和选冶性能,分为萤石型和霓石型两大工艺类型。

白云鄂博矿可利用的有价成分多,属于铁、稀土、铈的共生矿。与普通铁矿相比,铁矿石中氟、钾、钠含量都高,有害杂质种类多,对炼铁而言,属于含氟、钾、钠的特殊矿。

铁的独立矿物主要有磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿等,约占铁总量的 90%,其中绝大部分赋存于磁铁矿和赤铁矿中。含铁矿物主要有铁白云石、钠辉石、钠闪石、黑云母、黄铁矿、磁黄铁矿等。以萤石形式存在的氟占 94.26% ~ 97.84%,少量以氟碳铈矿形式存在。钾主要赋存在钾长石、云母类矿物

及钠闪石中。钠主要以钠辉石、钠闪石及钾长石形式存在。磷多数以独立矿物形式存在于磷灰石和独居石中。

1.2 白云鄂博矿高炉冶炼难题

由前苏联黑色冶金设计院设计的包钢 1[#]、2[#]高炉的有效容积为 1 513 m³,分别于 1959 年 9 月 26 日和 1960 年 10 月 1 日投产,设计年产 150 万 t 生铁。

由于投产前没有对白云鄂博铁矿石进行系统的试验研究,没有弄清白云鄂博矿的特殊性,没有掌握含氟、钾、钠特殊矿的冶炼技术,投产后高炉采用白云鄂博富矿块直接入炉冶炼,高炉生产极不正常,相继出现风口、渣口、铁口大量破损,炉缸严重堆积,高炉频繁结瘤等世界炼铁史上罕见的“三口一瘤”冶炼难题。

1959 年 10 月—1966 年 4 月,高炉平均利用系数只有 0.6 t/(m³·d),吨铁焦比达 900 kg,休风率为 12.9%,带瘤作业率在 50% 以上。

1966 年—1976 年,高炉配加 30% ~ 50% 的自熔性烧结矿,由于烧结矿质量差、粉末多,作业率低,导致原料供应不足,高炉轮流待料休风,高炉平均利用系数为 0.59 ~ 0.99 t/(m³·d),吨铁焦比在 900 kg 以上,休风率为 23.28%,带瘤作业率高达 88%,风口月均破损 135 个。

高炉频繁结瘤严重危害包钢高炉生产长达 35 年之久,造成了巨大的经济损失。

1.3 高炉冶炼难题的成因

1978 年包钢开始进行系统的冶炼难题技术攻关。研究白云鄂博矿的冶炼特性,研究改善原料冶金性能的技术措施和有效的高炉操作制度。

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。

(1) 钾、钠的破坏作用。对焦炭的破坏表现在提高焦炭反应性,促进焦炭气化反应,降低焦炭孔壁厚度,降低焦炭机械强度,促进产生粉末;对铁矿石的破坏表现在降低其软化温度,加剧球团矿灾难性膨胀;对高炉料柱的破坏表现在降低料柱透气性,尤其是降低软熔带气窗透气性,升高压差梯度促进成渣带上移。

(2) 氟的存在加剧了钾、钠的危害作用。氟以 CaF_2 形态存在, CaF_2 可降低初渣熔点,促进软熔带

上移;含氟炉渣熔点比普通炉渣低 100 ~ 150 °C, 熔化区间只有 50 °C, 属于短渣, 且黏度低, 初渣中 FeO 含量高。

(3) 烧结矿质量差。1978 年以前, 入炉烧结矿的含粉率 (< 5 mm 占比) 都在 27% 以上, 包钢高炉结瘤在 1966 年后加剧, 与烧结矿的冶金性能差、配比不稳定及含粉率高有直接关系。

(4) 高炉操作不适应。炉渣碱度高, 碱度在 1.5 以上。煤气流分布不当, 边缘煤气流较强, 中心煤气流较弱。生铁硅含量偏低, 常出现连续低硅铁。

1980 年在 55 m³ 的高炉进行专门的特殊矿冶炼试验, 进行炉瘤攻关。探明包钢高炉炉瘤 (尤其上部瘤) 的主要矿物是难熔的枪晶石 ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaF}_2$), 还有难熔的钾 (钠) 钙硅石 ($2\text{K}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2, 2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)。下部炉瘤则含有钾冰晶石 ($\text{NaF} \cdot 2\text{KF} \cdot \text{AlF}_3$)。这些矿物的存在, 使得炉瘤性质很复杂, 大部分炉瘤熔点为 1 160 ~ 1 245 °C, 超过了矿石软熔温度。高炉投产初期, 吨铁碱负荷达到 8 kg, 炉渣氟含量在 7.5% 左右, 大量钾、钠、氟的存在, 是冶炼白云鄂博矿时易于结瘤的根本原因。

2 包钢炼铁原料生产技术进步

2.1 选矿降氟技术攻关

2.1.1 工艺矿物学特征

白云鄂博铁矿石的工艺矿物学有四大特点, 就是多、贫、细、杂。“多”指矿石中元素多, 矿物组成多;“贫”指矿石铁品位不高, 铁品位在 30% 左右;“细”指矿石中各有用矿物的结晶粒度细, 铁矿物粒度一般在 0.01 ~ 0.20 mm 之间, 稀土矿物粒度在 0.01 ~ 0.06 mm 之间;“杂”指矿物组成变化大, 矿石种类繁多。因此, 给矿石的分离提取带来了极大的困难。1966 年包钢选矿厂投产, 边生产, 边试验, 边改造。

2.1.2 磁铁矿选别工艺

磁铁矿选别采用连续磨矿 - 弱磁选 - 浮选 (选稀土) 工艺。直至 1991 年改为连续磨矿 - 弱磁选 - 反浮选 (降氟) 工艺, 生产的铁精矿品位达到 65% 以上, 氟含量降至 1.0% 以下。

2.1.3 中贫氧化矿选别工艺

中贫氧化矿占整个矿床储量的 60% 以上, 选矿极其困难而复杂。

20 世纪 60—80 年代, 采用弱磁选 - 浮选 - 多梯度磁选工艺、磁化焙烧 - 浮选工艺。铁精矿收得

率低, 铁精矿氟含量高达 2.5%。

1991 年长沙矿冶研究院研发的弱磁 - 强磁 - 反浮选工艺进行了生产应用, 取得了良好的选矿指标。由原矿铁品位为 31.5%, F 含量为 7.85%, REO 含量为 5.2%, 获得铁精矿品位为 60.38%, F 含量为 0.58%, P 含量为 0.124%, 铁回收率为 73.43%; 稀土精矿 REO 含量在 61.26% ~ 62.61%, 稀土理论回收率为 12.16%。

此项成果是白云鄂博选矿技术史上的一次重大突破, 荣获冶金科技进步特等奖。

选矿降氟工艺的应用对包钢高炉抑制结瘤起到了决定性的作用。

不同时期综合铁精矿含氟情况为: 1966 年开始选矿到 1977 年, 氟含量为 3.0% ~ 3.5%; 1977—1984 年, 氟含量为 2% ~ 3%; 1985—1993 年, 氟含量为 1% ~ 2%; 1993 年, 进入低氟时期, 氟含量小于 1%。随着铁精矿品位的提高和氟含量的降低, 为烧结矿和球团矿质量改善打下良好的基础。

2.2 改善烧结矿质量技术攻关^[2]

2.2.1 自熔性烧结矿

1966 年 9 月, 包钢 4 台 75 m² 烧结机投产, 结束了包钢 7 年的原矿冶炼历史。

白云鄂博铁精矿具有以下特殊性: 铁品位偏低, SiO₂ 含量偏低, 氟、钾、钠含量高; 矿物组成复杂; 磨矿粒度细。

包钢烧结投产至 1976 年, 生产的自熔性烧结矿强度低、粉末多、冶金性能差, 烧结产量低、能耗高, 满足不了高炉生产的要求。

包钢自熔性烧结矿碱度为 1.0 左右, 宏观结构为薄壁多孔结构。微观结构磁铁矿晶体发育不完全, 多为半自形或他形晶体密集分布于粘结相中, 形成不均匀的粒状结构。粘结相主要为强度低、易脆的枪晶石 ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaF}_2$) 和玻璃体, 这是包钢烧结矿独有的特点。虽然在烧结矿生产过程中采用高配炭 (控制 FeO 含量大于 20%) 及采用双强化, 配消石灰 3% ~ 4%, 提硅至 8% ~ 10%, 但仍未能解决其质量问题, 粒度小于 5 mm 部分大于 20%, 小于 10 mm 部分占 60% ~ 70%, 转鼓指数 (旧转鼓) 约 76%。

研究表明包钢烧结矿强度低, 与氟含量有关。粘结相中氟离子取代了氧离子会破坏原有结构的电价平衡, 大体积的复杂的硅氧四面体分割成小体积的硅氧四面体, 降低了粘结相的强度。

2.2.2 高碱度烧结矿

1976 年 10 月,为了提高烧结矿强度,开发出了碱度为 1.8~2.0 的高碱度烧结矿,解决了烧结矿转鼓强度低的问题。碱度提高之后,烧结矿宏观结构变成大孔薄壁结构,烧结矿粘结相中铁酸钙大量出现,由于铁酸钙本身的强度高,一方面以磁铁矿熔蚀交织,另一方面又加固了枪晶石,从而提高了粘结相的强度。

研究表明当包钢含氟高的烧结矿转鼓指数和粘结相的抗压强度在二元碱度为 1.5 处是个拐点。因为枪晶石中自由的 $\omega(\text{CaO})/\omega(\text{SiO}_2)$ 等于 1.5,碱度在 1.5 时正适合枪晶石生成,当碱度小于 1.5 时,多余的 SiO_2 形成玻璃体,烧结矿强度随之降低;只有当碱度大于 1.5 时,多余的自由 CaO 才能形成铁酸钙,烧结矿强度随之提高。

2.2.3 高碱度高氧化镁烧结矿

高碱度烧结矿使烧结矿转鼓强度低的问题基本得到解决,但是,包钢高炉仍然频繁结瘤,改善烧结矿的高温冶金性能成为关键。

1982 年 7 月,经过大量的试验研究,开发了高碱度高氧化镁烧结矿,在碱度为 1.8 的情况下,用部分白云石代替石灰石,将氧化镁含量从 1.4% 提高到 2.8%~3.0%。氧化镁含量的提高,烧结矿矿相发生变化,高氧化镁烧结矿的矿相具有以下特点。

(1) 含氧化镁矿物增多。随着氧化镁含量的增加,在渣相中形成一些镁黄长石、钙镁橄榄石及含镁浮氏体等。其余的氧化镁固溶于磁铁矿中,形成含镁磁铁矿($\text{FeMg})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

(2) 赤铁矿、铁酸钙含量减少。高氧化镁烧结矿由于有较多的镁离子(Mg^{2+})固溶于磁铁矿晶格中的八面体晶位,因而使磁铁矿晶格中空位减少,铁离子(Fe^{2+})减少,电价不平衡程度、晶格缺陷程度降低,致使含镁磁铁矿稳定,在烧结过程中不易再氧化而形成赤铁矿,因而使赤铁矿生成量减少,也使铁酸钙数量明显下降。

(3) 熔蚀交织结构减少。由于熔点升高,铁酸钙减少,烧结矿由普通高碱度的交织熔蚀结构变成粒状结构,导致了烧结矿冷强度的有所下降。

烧结矿氧化镁含量的提高,使得烧结矿的冶金性能改善,软熔温度提高,烧结矿的软化温度提高了 60~80℃;低温还原粉化指标改善,中温还原性变差及高温还原性提高。

使用高碱度高氧化镁烧结矿后,高炉冶炼炉况顺行,提高了渣、铁水温度,增加了炉渣热稳定性和排碱能力,生铁产量提高,焦比降低。

用含氟精矿(氟含量 2.0%~2.5%)生产的高碱度高氧化镁烧结矿,在包钢炼铁技术攻关上是一次重大突破。1983 年生产出高碱度高氧化镁烧结矿后,高炉结瘤基本得到控制。

随着选矿降氟工艺的应用,1993 年以后,铁精矿氟含量降低至 0.7% 左右,1995 年以后包钢高炉不再结瘤。

随着烧结矿中氟含量的降低,将烧结矿的 SiO_2 含量适当降低,在保持一定的液相量时铁酸钙量增加,烧结矿的还原度、软熔温度提高。因此,目前烧结矿的 SiO_2 含量按 5.5% 控制为宜。

2.2.4 复合烧结矿

2003 年随着白云鄂博西矿(巴润矿)的投产,超细粒度的白云鄂博铁精矿产量增加。由于酸性球团矿的不足,为了维持高炉炉渣碱度的平衡,高炉配加矽石量高达 30 kg/t,导致高炉渣量大,焦比升高。

只有在高比例配加白云鄂博铁精矿情况下,生产出碱度在 1.5 的烧结矿,才能减少高炉添加矽石的量,维持高炉入炉料的酸碱平衡,因此研发能够满足高炉冶炼质量要求的碱度在 1.5 的烧结矿,成为急需攻克的难题。

白云鄂博铁精矿配比在达到 75%~100% 时,烧结料层透气性变差,能耗增加,烧结矿产量显著下降,生产低碱度含氟烧结矿强度大幅度降低。

2008 年与中南大学合作开发了复合造块工艺,该工艺将铁精矿单独分出制备成球团,再与烧结料混匀后铺到烧结机上进行烧结,制成由酸性球团矿“嵌入”高碱度烧结矿而组成的优质复合炼铁炉料。

经过系统的实验室研究和工业试验,在强化生球质量和减小生球在转运过程中破损的基础上,探索生球在烧结料中的合理分布,解决了烧结过程中过熔层的产生,优化烧结操作参数。

采用复合造块工艺后,烧结料层透气性改善,更有利于厚料层烧结,保持原有的铁料种类及配比,在提高料层厚度至 700 mm 的条件下,料层透气性改善,提高了料层的氧位,促进 Fe_3O_4 的氧化,从而促进铁酸钙的生成和发展。低碱度复合烧结矿具有高碱度烧结矿良好的冶金性能,有利于高炉生产提高产量,降低能耗,见表 1。

表1 复合造块工艺及复合烧结矿与常规烧结性能指标对比

工艺	平均日产量/t	作业率/%	台时产量/(t·h ⁻¹)	利用系数/(t·m ⁻² ·h ⁻¹)	烧结矿化学成分(质量分数)/%						烧结矿碱度	转鼓强度/%	固体燃料/(kg·t ⁻¹)
					TFe	FeO	CaO	SiO ₂	F	MgO			
常规	6 692	95.17	292.99	1.106	56.90	8.34	9.77	4.89	0.221	1.98	1.93	75.97	56.63
复合	7 283	96.88	313.24	1.182	57.28	9.17	8.92	5.53	0.208	1.92	1.57	74.41	54.30

复合造块工艺先后在包钢三台 265 m² 烧结机应用,为国内首家,极大地改善了包钢烧结高精粉率难烧的问题,为超细精矿烧结提供了成功经验,为解决白云鄂博特殊矿难烧问题提供了新的途径。复合烧结矿碱度范围较宽,有利于解决炉料结构酸碱不平衡的问题。该成果荣获冶金科技进步二等奖。

2.2.5 高碱度低硅烧结矿

2002 年至今生产高碱度低硅烧结矿。随着铁产量的增加,炉料结构中富矿比例增大,烧结矿碱度提高到 1.9 以上。随着自产混合铁精矿的品位提高至 64.5%,烧结矿品位提高到 56.5% ~ 57.0%, SiO₂ 含量降低到 5% 左右,烧结矿的转鼓强度达到 70% 以上,烧结矿的冶金性能有了明显改善。

2.3 烧结装备技术进步

1998 年,将 4 台 75 m² 烧结机改为 4 台 90 m² 机上冷却烧结机,现已停产。2004 年 12 月 31 日包钢一台 265 m² 烧结机建成投产,2006 年 6 月 16 日、2006 年 10 月 30 日,包钢第二、三台 265 m² 烧结机相继建成投产。

2021—2022 年先后开展了 3 台 265 m² 烧结机厚料层烧结技术攻关,烧结料层由 700 mm 提高到 750 mm,同时进行了步梯型布料设计,实际布料厚度达到 780 mm。完成了烧结风系统漏风治理,烧结机漏风率由 60% ~ 70% 降低到 40% 左右,烧结有效风量增加,生产效能提高。烧结矿转鼓强度指标由 2020 年的 78.91% 提高至 2023 年的 80.01%; 烧结利用系数由 2020 年的 1.268 t/(m²·h) 提高至 2023 年的 1.296 t/(m²·h)。

包钢两台 500 m² 烧结机分别于 2014 年 3 月、12 月相继投产,年产烧结矿 1 029 万 t,为两座 4 150 m³ 大型高炉供应优质经济的烧结矿,是国内最大的烧结工程之一,在装备大型化、自动化、环保化的基础上,实现了烧结生产的高效低耗。

五烧 2 台 500 m² 烧结机,采用双斜式节能点火炉、台车扩宽技术、液压伺服自动布料技术。配套 2 台 580 m² 液密封环冷机,采用双层卸料,节省散料处理工序,动态漏风率降至 10% 以下。

烧结烟气净化系统采用石灰石-石膏法进行烟气脱硫,脱硫率大于 98.33%,实现出口烟气 SO₂ 浓度小于 100 mg/m³。

烧结机采用自动化智能控制技术,实现点火自动控制、混合料加水自动控制、台车布料自动调整、环冷卸矿自动控制等。

配套 500 m² 烧结机混匀料场采用球形网架结构封闭,为国内环保型封闭料场的代表。混匀料场长 450 m,跨度 110 m,内设一台悬臂式堆料机、两台滚筒式取料机,设计处理量为 942.95 万 t/年。

混匀料场中设置两个料条,采用“两条两堆”制,料条长 390 m,宽 38 m,高 14.3 m,混匀矿每个料条贮量约 21.75 万 t,可满足两台 500 m² 烧结机 8.4 天生产的用量。

采用新型 BLOCK 堆料方式,2019 年混匀矿 SiO₂ 合格率达到 88.74%,标准偏差为 0.13,为烧结矿质量的稳定打下坚实的基础。

2.4 包钢球团矿技术攻关

2.4.1 含氟酸性球团矿的生产

1978—1982 年,包钢使用 100% 含氟铁精矿生产球团矿,球团矿自然碱度为 0.3 ~ 0.7,钾、钠含量为 0.5% 左右,生球氟含量为 1.3% ~ 2.0%,成品球团还原膨胀率大于 30%,异常高,并且还原软化温度低。1982—1984 年采用了含氟白云鄂博铁精矿配加 10% 包头黑脑包铁矿粉的方案,生球氟含量降低至 0.86%,球团 SiO₂ 含量提高了 2 ~ 3 个百分点,球团还原膨胀率有所降低,达到 20% 左右。

随着铁精矿中氟含量小于 0.5%,1990 年后,摸索出一条 35% 的低氟铁精矿配加 65% 的无氟铁精矿生产酸性球团的铁料配置技术路线,成品球团矿膨胀率小于 15%,满足了高炉生产要求,沿用至今。

含氟铁精矿球团焙烧的最大特点是不宜采用过高的温度,也不宜在高温下焙烧过长时间,否则会使熔体液相过分发展,使球团矿强度降低。生产中含氟球团矿常用的焙烧温度在 1 250 °C 以下,而且可以采用比较快的机速,随着铁精矿铁品位的升高、氟

含量的降低,这一特点趋于缓和。

经过大量的试验研究,表明球团矿碱度对膨胀率影响很大,将含氟球团矿碱度控制在 0.3 以下或者 1.2 以上,可以获得低的还原膨胀率。

2.4.2 高镁低硅含氟熔剂性球团矿的开发

基于白云鄂博铁精矿铁品位高, SiO_2 含量低至 1.05% 左右, CaO 含量和 MgO 含量为 1.0%, K_2O 含量为 0.1%, Na_2O 含量为 0.07%, F 含量为 0.25%, 管道输送要求精矿粒度超细, $<0.074\text{ mm}$ 占比达到 95%, $<0.045\text{ mm}$ 占比达 75% 的特点,制作高镁低硅熔剂性球团矿用于高炉生产。氧化球团工序能耗

仅为烧结工序能耗的一半, NO_x 、二噁英排放少,更加符合节能减排、提铁降耗的要求。

2017 年在链篦机-回转窑-环冷机工艺开始生产高镁低硅含氟熔剂性球团矿,并应用于包钢 2 200 m^3 高炉冶炼。

通过研究,综合生球性能,成品球团矿化学成分、还原性能,以及包钢球团工艺脱硫能力,优化出包钢生产高镁低硅熔剂性球团矿的铁料配置为 85%~90% 白云鄂博铁精矿配加 10%~15% 外购铁精矿。生产的成品球团矿化学成分见表 2。

表 2 高镁低硅熔剂性球团矿化学成分及碱度

化学成分(质量分数)/%							碱度
TFe	FeO	CaO	SiO_2	S	MgO	F	
62.35	<0.50	3.59	3.15	0.10	2.54	0.260	1.02

高镁低硅含氟熔剂性球团矿制备技术在链篦机-回转窑-环冷机工艺的生产表明,在 90% 白云鄂博铁精矿配加 10% 外购铁精矿、膨润土配比为 2.0%~2.2% 及白云石配比为 4.5% 的原料配置条件下,工艺参数控制为:料层厚度 190~195 mm,机速 2 m/min 左右,鼓干温度 240 $^{\circ}\text{C}$ 左右,抽干温度 320 $^{\circ}\text{C}$ 左右,预热一段温度 630 $^{\circ}\text{C}$,预热二段温度 970 $^{\circ}\text{C}$ 左右。生球质量满足工艺生产要求。所生产球团矿碱度为 1.0 左右,成品球抗压强度达到 2 400 N 以上,转鼓强度达到 96% 以上,成品球还原膨胀率控制在 20% 以内,还原性较酸性球团矿提高了 15%,产量最高可达 4 200 t/d。

包钢 2 200 m^3 高炉冶炼熔剂性球团工业试验结果表明,高镁低硅含氟熔剂性球团矿在高炉炉料结构中的比例提高到 37%,综合炉料性能不仅可以满足高炉正常冶炼的要求,而且取得了节能减排、降本增效的高炉冶炼效果。该项目荣获冶金科学技术二等奖。

2.4.3 碱性氧化球团的生产

随着环保限产,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,高炉开始配加高比例球团矿。以包钢自产铁精矿为主要原料,开发链篦机-回转窑-环冷机工艺生产碱性氧化球团矿制备关键技术,探索球团矿配比 50% 的高炉冶炼技术。

(1) 针对固阳链篦机-回转窑-环冷机工艺生

产酸性球团过程存在的预热球 FeO 含量较高(约 10%)、焙烧球 FeO 含量较高(1%~2%)、预热阶段脱硫率低等问题,进行干燥、预热和焙烧制度优化。

(2) 以固阳链篦机-回转窑-环冷机工艺制备碱性球团矿,要求巴润铁精矿配比不低于 75%,混合料全铁含量不低于 62.50%,进行膨润土选型,以及球团干燥、预热和焙烧制度优化。

(3) 供应给高炉生产的碱性球团矿,铁品位为 62.5%,碱度为 1.15,抗压强度为 2 100 N,还原膨胀率为 15.1%,8~16 mm 粒级占 85%。

2.4.4 白云鄂博铁精矿球团矿还原膨胀机理研究

白云鄂博铁精矿球团矿还原膨胀机理研究表明,球团矿中 Fe_2O_3 的逐级还原过程分为三个阶段,即 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_x\text{O} \rightarrow \text{Fe}$,钾、钠、氟对球团矿还原第三阶段膨胀率的促进作用最为显著,导致了球团矿的异常还原膨胀。主要原因在于钾、钠、氟促进了铁晶须的生长,同时降低了渣相的熔点和其抵抗还原膨胀应力的能力。

在球团矿还原第一阶段,由于含钾、钠、氟的球团矿赤铁矿晶粒细小,矿相结构均匀,所以呈现出了较低的还原膨胀率。在还原第二阶段,钾、钠、氟促进了还原产物 Fe_xO 的定向层状结晶,并且降低了渣相熔点,对第二阶段球团矿的还原膨胀具有促进作用。在还原第三阶段,钾、钠、氟使还原产物 Fe 主要以细长的铁晶须方式生长,且降低了渣相熔点,导致球团矿还原膨胀严重。

2.4.5 白云鄂博铁精矿球团矿还原膨胀的抑制措施

当球团矿碱度较低时, CaO 可固溶于 Fe_3O_4 晶格中, 具有促进铁氧化物晶格畸变、铁晶须定向生长的作用, 致使球团矿还原膨胀加重; 但随着球团矿碱度升高, CaO 在 Fe_3O_4 晶格中固容量有限, 多余的 CaO 可与 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等形成复杂化合物, 增大球团矿渣相量, 抑制铁氧化物晶格畸变和铁晶须定向生长, 起到显著抑制球团矿还原膨胀的作用。

添加适量的 MgO 可以降低白云鄂博铁精矿生产球团矿还原过程中铁氧化物的晶体膨胀, 提高球团矿渣相熔点和抵抗还原膨胀的能力, 抑制 Fe_xO 的定向结晶及铁晶须的生长, 有效抑制球团矿还原各阶段的体积膨胀。

提高球团矿碱度、生产含镁熔剂性球团矿是抑制钾、钠、氟产生的异常还原膨胀、提高白云鄂博铁精矿在球团矿中配比的有效途径。

2.5 球团装备技术进步

1973年6月设计年产110万t球团矿的162 m²带式焙烧机投产, 2014年停产。2009年年产120万t球团矿的链篦机-回转窑-环冷机生产线投产, 2013年年产240万t球团矿的链篦机-回转窑-环冷机生产线投产, 2015年12月29日国内最大的年产500万t球团矿的624 m²带式焙烧机投产。每条生产线均有烟气脱硫、脱硝装置, 能够达到超低排放的要求。

包钢624 m²带式焙烧机球团生产线所应用的工艺技术与装备水平达到国内领先水平, 在布料、焙烧、密封、风流等方面采用新技术, 开发应用了烘干、辊压、造球的智能技术。包钢624 m²带式机在产能、节能、环保等方面的经济技术指标达到国内同行

业先进水平。2018年包钢624 m²带式焙烧机工序能耗(含脱硫)为18.96 kgce/t, 为行业领先水平。2019年达到年产550万t球团矿的设计生产能力。

包钢624 m²带式焙烧机配备了1400 mm × 1400 mm进口高压辊压机、R33立式强力混合机、12台Φ7.5 m的圆盘造球机。焙烧机配备232块台车, 台车宽4 m, 长1.5 m; 风箱采用6 m大风箱, 以减少漏风率。带式焙烧机共设置了142个测温点, 45个测压点, 72个工艺控制阀, 这些组成了带式焙烧机的控制神经网络, 从而实现带式焙烧机和风机系统的全自动控制。采用了将梭式皮带与集料皮带合二为一布料技术, 生球直接由生球集料皮带(梭式皮带)布到宽皮带上, 采用双层辊筛作为生球入炉前的筛分设备, 保证入炉生球质量, 铺料平稳、均匀, 基本消除风量偏析现象, 焙烧后产品质量稳定。根据自身原料特性以及保护除尘系统、延长设备寿命的原则, 将主抽风管道与回热管道交叉布置。回热风机抽取部分低温热风, 不仅可以起到保护设备、延长耐材使用寿命的作用, 同时可降低抽干罩和预热罩的温度。各系统之间由炉罩、风箱、管道以及调节机构组成一整套完整的风流系统, 以及带式焙烧工艺先天的风系统循环优势, 路径短、热损耗少, 可充分利用焙烧系统烟气的物理显热, 最大限度循环利用热能。

(未完待续)

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.