

烧结矿质量提升对高炉降耗的影响分析

方星, 周帅

宁波钢铁有限公司, 浙江 宁波 315800

DOI:10.61369/ERA.2026090026

摘 要： 烧结矿作为高炉炼铁的主要含铁原料，其质量稳定性直接制约高炉顺行与能耗水平。本文结合生产实际，系统分析了烧结矿在化学成分碱度波动、粒度组成与强度、低温还原粉化性能等指标的现状，深入探讨了上述质量缺陷对高炉料柱透气性、软熔带位置及炉缸工作状态造成的负面影响。在此基础上，提出了优化配矿结构、强化制粒与厚料层烧结、改进冷却整粒等关键技术措施。通过对比质量提升前后的生产数据，从燃料比、利用系数及综合经济效益等维度进行综合评价，论证了提升烧结矿质量是实现高炉低碳低成本冶炼的重要途径。

关 键 词： 烧结矿；高炉降耗；低温还原粉化；料柱透气性；燃料比

Impact Analysis of Sinter Quality Improvement on Blast Furnace Energy Consumption Reduction

Fang Xing, Zhou Shuai

Ningbo Iron & Steel Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315800

Abstract： As the primary iron-containing raw material for blast furnace ironmaking, sinter quality stability directly determines blast furnace operation efficiency and energy consumption levels. Based on practical production data, this study systematically analyzes current characteristics of sinter parameters—including chemical composition alkalinity fluctuations, particle size distribution, strength, and low-temperature reduction pulverization performance—and thoroughly examines how these quality defects adversely affect blast furnace charge column permeability, soft melting zone position, and hearth operating conditions. Key technical solutions proposed include optimizing mineral blending composition, enhancing granulation processes and thick-layer sintering, and improving cooling and grading procedures. Through comparative analysis of production data before and after quality improvement, with evaluations based on fuel ratio, utilization coefficient, and overall economic benefits, the study demonstrates that enhancing sinter quality constitutes a critical pathway for achieving low-carbon and cost-effective blast furnace smelting.

Keywords： sinter; blast furnace energy consumption reduction; low-temperature reduction pulverization; material column permeability; fuel ratio

引言

在“双碳”目标与成本控制的双重压力下，高炉炼铁工序的降耗减排刻不容缓。烧结矿在高炉炉料中的占比通常超过70%，其质量波动会直接放大高炉操作的敏感性，导致焦比升高与产量损失。当前，不少企业面临着入炉烧结矿品位波动大、粉末含量高、冶金性能不稳定的问题。要从根本上实现高炉长周期稳定顺行和降低燃料消耗，必须将管控重心前移至烧结工序。本文旨在通过剖析烧结矿关键质量指标与高炉冶炼过程的耦合机理，明确质量提升的重点方向，并结合技术实践评估其降耗实效。

一、烧结矿主要质量指标现状分析

（一）化学成分与碱度波动

由于进口矿和国内精粉混匀手段不够完善，造成烧结矿化学成分出现非周期性的漂移现象，即 TFe 品位上下波动大于

$\pm 1.0\%$ ，SiO₂ 含量不稳定，使得二元碱度经常超出 ± 0.12 的允许偏差范围。碱度变化直接影响到高炉内初渣、终渣的熔化性温度和粘度，使高炉操作人员不断调节焦炭负荷来保证热平衡。碱度过低时炉渣流动性变差，脱硫能力下降；碱度过高容易造成炉况难行甚至悬料。另外 MgO、Al₂O₃ 含量不稳也会引起炉渣结构不

确定,原料端化学成分“先天缺陷”成了高炉燃料比无法继续降低的隐性障碍,严重阻碍了低硅冶炼技术的发展。

(二) 粒度组成与强度现状

由于烧结机布料偏析、机尾破碎工艺等原因造成成品烧结矿的粒度组成出现“两头大、中间小”的劣化分布,大块大于40mm的比例较高,代表最佳冶炼粒级的10~25mm中块含量较少,小于5mm的粉末在转运之后常常能达到5%以上。转鼓强度一般保持在76%~80%之间,但是由于铁酸钙粘结相发育不良、玻璃质含量高,烧结矿在倒运和炉内低温区容易产生脆性碎裂。入炉之前就已经存在大量的粉末,在高炉上部料柱里形成了一个“气塞”,它不但破坏了布料时的偏析效果,而且使边缘气流非理性的扩大,给操作炉型的管理造成了极大的困难,大大降低了高炉接受高风量的能力。

(三) 低温还原粉化性能

低温还原粉化率是评价烧结矿在高炉上部热行为的重要参数。在400~600℃的还原区段内,由于赤铁矿(Fe_2O_3)向磁铁矿(Fe_3O_4)转变时的晶格畸变,如果烧结矿的气孔结构粗大、粘结相强度不够好,很容易造成严重的粉化现象。目前很多烧结矿的RDI+3.15mm指数小于65%,即超过三分之一的炉料在上部块状带已经变成粉末。严重低温粉化直接污染料柱空隙,影响煤气流初始分布,使高炉减风。经过研究和实践得知,控制烧结矿中FeO含量处于合适的范围之内,同时提高复合铁酸钙粘结相的比例,才是抑制低温还原粉化的根本途径,也是打通高炉“咽喉”的重要手段。

二、烧结矿质量对高炉冶炼过程的影响

(一) 料柱透气性与风量接受能力

高炉强化冶炼依靠的是干区料柱良好的透气性,烧结矿粉末就是破坏透气性的主要因素。当烧结矿强度低、低温粉化严重的时候,大量的碎粒会填充到焦窗以及矿石层的空隙里,从而使压差迅速上升。由于存在很高的阻力,使得入炉风量无法再提高,经常出现悬料、滑料的情况,使高炉不得不采取全风运行的方式。粉末含量高时,即使加大风量,煤气流的二次分布也会变得混乱,从而产生管道行程,使煤气利用率大幅度波动。经过实践证明,入炉烧结矿粉末每降低一个百分点,高炉压差就可以下降大约2~3kPa,给高富氧大喷煤操作打下了动力学基础,风量接受能力的提高才是增产降耗的第一步。

(二) 软熔带位置与煤气利用

烧结矿的高温冶金性能决定着软熔带的形状、厚度和透气性。当碱度发生波动或者MgO含量出现异常的时候,初渣的软熔区间变宽,从而造成高炉内软熔带异常增厚,倒V型的理想形状遭到破坏,透气性急剧下降。特别是含铁原料的还原性不好时,大量的未还原FeO进入软熔层,使高FeO初渣对焦炭的润湿性增大,堵塞焦窗气孔。软熔带上移或者下移都会打乱块状带和滴落带的正常热交换区域,造成炉顶煤气温度失控,化学能利用率降低。只有提高烧结矿的高温还原性以及软化熔融温度的稳定性,

才能得到窄而稳定的软熔带,煤气在一次分布时就可以和炉料充分接触,达到煤气化学能的最大利用。

(三) 炉缸工作状态与渣铁排放

烧结矿质量的终极端口在炉缸。化学成分不稳直接引起炉缸热制度以及渣相波动,终渣碱度和MgO/ Al_2O_3 比例经常改变的时候,炉渣的熔性温度和黏度曲线就会出现漂移现象,从而使渣铁不能顺利地分离并排出。炉渣粘稠会抑制铁水脱硫反应的力学条件,并且还会造成风口小套频繁烧损和炉缸堆积。另外,烧结矿粉末和低温粉化碎屑如果未被充分熔化就进入炉缸,会造成死料柱透液性变差,铁水环流受阻,加重炉缸侧壁侵蚀。只有提供成分均匀、强度好的烧结矿才能使炉缸保持活跃的状态,保证热量充足、渣铁畅通,从而减少由于炉况异常造成的额外焦炭消耗。

(四) 烧结矿矿物组成与显微结构缺陷

烧结矿宏观质量波动的原因就是微观结构和矿物组成不稳定。目前很多烧结矿中铁酸钙粘结相发育不好,呈针状或者柱状理想的交织结构比例低,板状赤铁矿、玻璃质和残余石灰等脆性相含量较高。由于矿相界面有较多的微裂纹,在受热冲击或者还原应力的作用下就会成为粉化起裂点。尤其是玻璃相含量每增加一个百分点,烧结矿的低温还原粉化率就会明显变差。另外再生赤铁矿在气孔周围大量堆积,会引起局部晶格膨胀应力集中。所以微观结构的改善是宏观质量提高的基础,只有使粘结相由低强度的复合铁酸钙变成高强度的复合铁酸钙,才能从根本上给烧结矿带来好的冶金性能,从而为后续的技术措施提供矿相学上的依据。

三、烧结矿质量提升的关键技术措施

(一) 优化配矿结构与碱度控制

改善质量要从源头配矿开始。首先应该建立一个依靠铁矿粉高温同化性、液相流动性以及粘结相强度来互相补充的配矿模型,而不是一味地为了降低成本而使用劣质矿石。适量加入有良好反应性的褐铁矿和高铝矿来中和。在线中子活化分析仪可以对混合料成分进行秒级的实时检测,并且可以实现闭环控制,把碱度波动控制在 ± 0.05 之内。合理搭配白云石和蛇纹石来改善MgO的来源,采用钙质熔剂细分加入的方法,使烧结过程中液相得到充分的生成。经由精细配料之后,烧结矿不但能达到成分要求,而且能产生出稳定的渣相于软熔带上,从而在原料微观层面给高炉降耗提供支撑。

(二) 强化制粒与厚料层烧结

制粒效果是厚料层烧结的基础。用三段式强力混合制粒法提高制粒小球的热稳定性和抗机械冲击性能,使混合料粒级中3~8mm颗粒含量大于70%来明显改善料层原始透气性。在此基础上把烧结料层厚度从原来的700mm提高到900mm以上,利用自动蓄热效应大大降低固体燃耗,延长高温保持时间,有利于复合铁酸钙晶体的充分发育。厚料层操作可以有效地防止大颗粒的热炸裂,使烧结矿内部气孔分布更加均匀,表里一致。料层增厚

和制粒优化相辅相成，不但可以降低烧结工序本身的能耗，还可以使成品矿的强度、还原性得到质的飞跃。

（三）改进冷却制度与成品整粒

烧结终点控制精度、冷却制度都会影响到成品粒度。应改善环冷机热工制度，防止由于急冷造成的内部热应力裂纹，利用余热回收段的稳流冷却，让烧结矿物相在降温时完成应力释放。为了解决大块出料率过高这一问题，需要采用椭圆等厚筛分以及双齿辊细破闭路整粒的方式，把成品粒级严格控制在5~50mm这个范围之内，完全去除掉大于50mm的大块，并且保持不变地消除掉-5mm以下的粉末。成品皮带转运点全部装上耐磨落料衬板和落差缓冲装置，把二次破碎产生的粉末降到最少。只有经过充分的整粒净化，把强度合格的“精品”烧结矿送入高炉料罐，才算是打通了质量传递的最后一公里。

四、高炉降耗效果与综合评价

（一）燃料比与焦比的变化

烧结矿质量的好坏直接影响到燃料比的高低。经过该钢铁企业三个月的跟踪数据表明，在烧结矿碱度波动变小、RDI+3.15mm达到75%以上之后，高炉燃料比从原来的535kg/t逐渐降到510kg/t以下，其中焦比降低了15kg/t以上。燃料比降低的主要原因就是炉料有较好的还原性，直接还原度降低，碳素溶解损失反应的热消耗减少；料柱阻损减小使煤气利用率提高2~3个百分点，炉顶温度降低。煤气的化学能和物理热都被有效地回收利用起来，单位铁水能量消耗大幅度降低，说明精料是节能降耗的基础。

（二）产量与利用系数的提升

随着风量接受能力增大、炉况顺行周期变长，高炉利用系数也随之上升。粉末含量急剧减少之后，高炉压差保持平稳可控状

态，日均风量可增长到原来基础上的150~250m³/min左右，料速也由原来的6.5批/天提高到了7.0批/天以上。利用系数由原来的2.25t/(m³·d)提高到现在的2.45t/(m³·d)以上。日产铁水量明显增多，分摊了固定成本，同时休风率和减风率大幅下降。稳定的高质量烧结矿给高炉带来高产效果，高炉摆脱了以前小风慢行的憋屈生产方式，进入了长周期稳定顺行的良性循环之中，真正实现了高炉冶炼强度的突破和飞跃。

（三）综合经济效益与成本分析

综合经济效益要考虑铁前系统成本之间的相互影响。虽然提高质量会使得烧结工序的成本有所上升，但是这部分增加的成本一般只有10到20元每吨烧结矿左右，但是由于高炉焦比降低、产量提高所导致的铁水成本下降幅度可以达到50到80元每吨。吨铁总工序成本明显降低，达到了铁前整个系统的最优利润。另外炉缸活性变好之后铁水中含硅量保持在较低水平，给炼钢工序提供优质的低硅铁水，产生明显的后效。就全生命周期的价值来说，用较小的投入获得烧结矿质量的飞跃，其投入产出比非常大，是高炉由规模驱动向成本和绿色低碳集约化转变的唯一选择。

五、结语

烧结矿质量属于影响高炉能耗水平以及冶炼效率的主要制约因素。通过系统分析可知，减小化学成分的波动、提高强度和低温还原粉化性能，可以直接打破料柱透气性的瓶颈，改善软熔带的热交换，使炉缸更加活跃。采用优化配矿、厚料层烧结、精细整粒等技术，在烧结端增加少量投入的同时却大幅度降低了高炉燃料比和提高了利用系数，给整个系统带来了巨大的综合降本效益。今后高炉低碳化冶炼还要不断挖掘烧结矿的质量潜力，依靠智能化配料和工艺精确控制来推进精料方针的更新换代。

参考文献

- [1] 相里军红, 邓波, 何宝全. 双碳目标下汉钢烧结节能降耗技术生产实践 [J]. 山西冶金, 2025, 48(9): 142-143+149.
- [2] 庄清云, 李光石, 鲁雄刚, 等. 360m²烧结机节能降耗关键技术研究及应用 [J]. 钢铁, 2025, 60(4): 13-20.
- [3] 李晓海. 基于风量再分配的烧结矿提质降耗技术研究. 河北省, 德龙钢铁有限公司, 2023-12-16.
- [4] 秦帅. 热风循环耦合厚料层烧结工艺的基础研究 [D]. 中国石油大学(北京), 2023.
- [5] 薛钰霄, 潘建, 朱德庆, 等. 红土镍矿烧结节能降耗技术研究及应用 [J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 92-97.
- [6] 高向洲. 包钢1#高炉节能降耗途径的研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2020.