生产实践

405 m²烧结机超厚料层透气性改善实践

颜庆双[1],王宝东[1],王小强[1],张立朝[1],吴官印[2]
(1.鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司,辽宁 营口 115007;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009)

摘要: 针对405 m²烧结机900 mm超厚料层生产时透气性下降影响烧结质量的问题,分析认为厚料层操作条件下料层下部静压增大、过湿层与燃烧带增厚是形成透气性下降的主要原因,采取提高混合料温度、优化混合料加水、降低点火强度以及合理控制烧结风量分布等措施后,料层厚度逐渐稳定在880~900 mm,固体燃耗由56.58 kg/t降至49.63 kg/t,吨矿电耗由46.77 (kW·h)/t降至36.50 (kW·h)/t,烧结利用系数由1.241 t/(m²·h)提高至1.402 t/(m²·h),实现了烧结机超厚料层的高质量生产。

关键词: 烧结烟气;减排;降碳;均质烧结;余热利用
中图分类号: TF046 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)04-0053-05
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 04. 007

Practice on Improving Permeability of Ultra-thick Bed for 405 m² Sintering Machine

YAN Qingshuang[1], WANG Baodong[1], WANG Xiaoqiang[1], ZHANG Lichao[1], WU Guanyin[2]
(1. Bayuquan Branch of Angang Steel Co., Ltd., Yingkou 115007, Liaoning, China;
2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: In response to the issue that the decrease in permeability impairs the sintering quality during the production of a 900 mm ultra-thick bed on a 405 m² sintering machine, it was analyzed that the main reasons for the decrease in permeability under thick bed operation were the increase in static pressure at the lower part of the bed and the thickening of the over-wet layer and combustion zone. After taking measures such as increasing the temperature of the sintering mixture, optimizing the water addition to the sintering mixture, reducing the ignition intensity, and rationally controlling the distribution of sintering airflow, the bed thickness gradually stabilized at 880 mm to 900 mm. The solid fuel consumption decreased from 56.58 kg/t to 49.63 kg/t, and the power consumption per ton of ore decreased from 46.77 (kW·h)/t to 36.50 (kW·h)/t. Meanwhile, the sintering utilization coefficient increased from 1.241 t/(m²·h) to 1.402 t/(m²·h), which enabled high-quality production with an ultra-thick bed on the sintering process.

Key words: sintering flue gas; emission reduction; carbon reduction; homogeneous sintering; waste heat utilization

厚料层烧结是烧结工艺实现提质降耗的重要手段[1-2],目前国内300 m²以上大型烧结机基本上都进行了800~900 mm超厚料层工艺改造,以充分利用烧结过程自动蓄热的工艺特点,实现低碳厚料层烧结,进一步降低烧结工序能耗,提升烧结矿

颜庆双,高级工程师,1997年9月毕业于武汉冶金科技大学钢铁冶金专业。E-mail: 317634912@qq. com

质量[3-6]。2018年,鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司(以下简称"鲅鱼圈")对两台405 m²烧结机进行了超厚料层改造,通过台车栏板升高的方式,将烧结机料层由原750 mm提高到900 mm,在设备及工艺配置上实现了900 mm超厚料层烧结生产,达到了国内领先水平。但在后续超厚料层生产过程中,出现了料层透气性降低,操作负压升高,烧结质量下降,固体燃耗和电耗升高等问题。鲅鱼圈针对上述问题,详细分析了影响厚料层透气性的主要因素,并采取了一系列工艺措施,取得较好的效果,实现了烧结机超厚料层高质量生产。本文对此做一介绍。

1 影响烧结料层透气性的因素分析

烧结料层透气性是衡量有效风量通过烧结料层难易程度的指标,烧结机在一定抽风负压下,料层单位面积通过的风量越大,表明料层的透气性越好。一般来说,透气性变差时,有效风量减少,有害漏风增加,操作负压升高,烧结产、质量降低,消耗升高。烧结料层透气性(T)可以用沃伊斯公式计算[7],即:

$$T=\frac{Q}{A}\left(\frac{H}{\Delta P}\right)^{n} \quad (1)$$

式中,T为料层透气性,代表单位料层高度和单位负压条件下料层单位面积通过的空气量,$m^3/(m^2\cdot min)$;Q为单位时间内通过料层的风量,m^3/min;A为烧结机抽风面积,m^2;H为料层高度,m;ΔP为料层的负压,Pa;n为经验指数,与原料粒度、烧结过程相关,通常为0.6。

在实际生产中,料层透气性一般包括料层原始透气性和点火后烧结过程透气性。料层原始透气性主要受混合料粒度组成、孔隙率、燃料结构等因素影响;烧结过程透气性主要受烧结过程中各带阻力变化趋势影响,与混合料水分、烧结操作制度、点火强度等多方面因素有关。

超厚料层烧结工艺中,料层透气性对烧结过程和产、质量均有直接影响。料层厚度增加后,上层物料对下层物料的静压显著增大,特别是在高负压抽风的作用下,下层物料被压实,孔隙率减小,气体通道变窄、变曲折,导致气流通过的阻力急剧上升,这是原始料层透气性下降最直接的原因。燃烧带是料层中阻力最大的区域,厚料层蓄热效果好,下部获得的热量更多,使得燃烧带温度更高、维持时间更长,造成燃烧带宽度增加,而燃烧带变宽意味着高阻力区变厚,整体气流阻力显著增加。料层越厚,过湿层越容易变得更厚、更湿,过量的冷凝水会堵塞物料颗粒间的孔隙,使该区域透气性极度恶化,成为气流的主要瓶颈。实际上厚料层对混合料水分的敏感性更高,水分过高,过湿层透气阻力会被放大;水分不足,则料层上部松散,易被吹通产生风洞,破坏烧结过程均匀性。厚料层对布料均匀性要求极高,稍有不当就会加剧下部压实,导致透气性不均和下降。而混合料中细粉(-3 mm)比例过高,在厚料层的高压下更容易形成致密层。总之,在厚料层操作中,上述因素往往会形成一个恶性循环:料层增厚—下部压实、过湿层与燃烧带增厚—透气性下降—为保持产量,需增加抽风负压—更高的负压进一步压实料层,增加漏风率,并可能加剧气流分布不均—透气性进一步恶化。

2 鲅鱼圈烧结机超厚料层生产存在的问题

2018年鲅鱼圈对两台405 m²烧结机进行了超厚料层改造,但是生产过程中出现料层透气性明显降低,烧结风量减少,终点温度降低等现象;而采用增加风量操作后,在大风量、高负压作用下,料层透气性更加恶化,表现为烧结负压异常升高,漏风率升高,有效风量减少,风量分布不均,烧结质量下降,烧结矿产能降低,返矿率升高,生产过程稳定性变差,负压、废气温度等主要运行参数频繁波动,为了稳定操作质量,被迫降低料层生产。

图1为厚料层烧结改造前后料层透气性、垂直烧结速度对比。从图1中可以看出,改造后的料层透气性和垂直烧结速度下降明显。

表1为2019年烧结机料层与负压、成品率数据统计。从表1可以看出,2019年1~2月份,烧结实际操作料层平均为880 mm,操作负压均值17.8 kPa,成品率仅74%左右,实际生产中返矿率达26%。为了稳定烧结矿质量,从3月份开始被迫降料层生产,料层降至860 mm以下,9月份料层最低仅为820 mm,虽然成品率得到了一定改善,但900 mm超厚料层工艺优势没有实现,而且对比实际生产中的消耗指标,烧结固体燃耗增加了1.29 kg/t,电耗增加了0.3 (kW·h)/t。

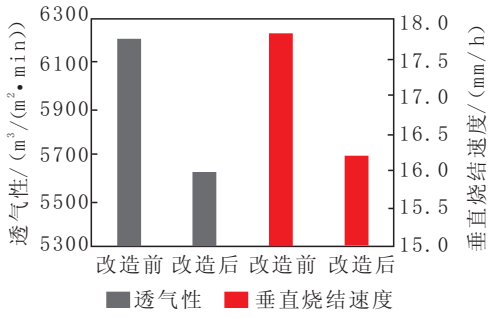


图1 厚料层烧结改造前后料层透气性、垂直烧结速度对比

Fig. 1 Comparison of Permeability and Vertical Sintering Speed before and after Thick-bed Modification

表1 2019年烧结机料层与负压、成品率数据统计

Table 1 Data Statistics of Bed Thickness, Negative Pressure and Yield of the Sinter Machine in the Year of 2019

月份	料层厚度/mm	操作负压/kPa	成品率/%
1	880	17.7	73.9
2	880	17.9	74.2
3	860	16.9	74.0
4	860	16.8	74.1
5	855	16.8	77.8
6	850	16.5	77.8
7	830	16.6	78.0
8	830	16.5	77.0
9	820	16.5	77.3
10	830	16.2	78.1
11	850	16.2	76.0
12	855	15.8	77.0

3 改善超厚料层透气性措施

3.1 提高混合料温度

混合料温度是影响料层透气性的一个重要因素，料温达到露点温度(60 ℃)以上可以显著减少料层中水蒸汽冷凝形成的过湿现象，有效降低过湿层对气流的阻力，因此提高混合料温度是改善原始料层透气性和烧结过程料层透气性的重要手段[8]，而实际上，鲅鱼圈烧结混合料温度偏低，尤其冬季料温仅20~25 ℃，远低于工艺要求，因此必须有效提升混合料温度。

3.1.1 引入蒸汽提升生产水水温

鲅鱼圈烧结混合料加水量45 kg/t，根据以往经验，生产水水温每提升10 ℃，混合料温度提升约3 ℃。2019年2月中旬之前，生产水温维持在22~32 ℃，2月中旬以后，通过将外网蒸汽引入生产水池，生产水温度得到大幅提高，最高达到90 ℃左右；在实践过程中，当蒸汽通入量为8~10 t/h时，水温可提升到75~80 ℃，比原始水温提升50 ℃左右。

另外，通过对二次混合处加水管线进行改造，将110 ℃蒸汽与二次混合处加水管并接，使蒸汽伴随生产加水进入二次混合筒体内部，并适当增加二次混合内部出水孔径，调整出水角度，使水与蒸汽垂直喷向料面。据统计，当二次混合蒸汽通入量为2~3 t/h时，二次混合加水温度会提升3~5 ℃。二次混合提温对混合料终点温度的保持起到关键作用，可以有效减少混合料运输过程中的热量损失，还可以改善混合料制粒，提高颗粒表面润湿效果，改善混合料层原始透气性。

3.1.2 改善生石灰质量

鲅鱼圈烧结使用的生石灰来源于炼钢部回转窑自产生石灰，通过现场取样跟踪回转窑生石灰质量波动情况发现，炼钢生石灰CaO含量均值仅为75.57%，活性度168 mL，且生石灰质量波动大，个别批次CaO含量仅65%，不能有效发挥生石灰的强化作用，对混合料温度、制粒效果等都有较大影响。因此，调整了生石灰活性度和CaO含量，生石灰活性度由168 mL提升至200 mL，CaO含量稳定在80%以上。生石灰质量提高后，生石灰预热效果和制粒效果都得到明显改善。

另外，鲅鱼圈生石灰采用压缩空气风送输灰，夏季空气湿度大，压缩空气中含水较多，为了避免影响生石灰质量，加强了空压机放水操作，更换了干燥剂，减少了储运期间生石灰的质量波动。

通过采取蒸汽预热工艺及改善生石灰质量等措施，混合料温度得到明显改善，如表2所示，经计算，2020年混合料平均温度比2018年提升12 ℃。

随着料温的提高，减轻了过湿层对烧结过程的不利影响，改善了料层透气性，从而降低大烟道负压。

3.2 优化混合料加水及强化返矿润湿

水分在烧结过程中起到关键作用，水分在混合料制粒、烧结过程传质传热、颗粒表面润湿、燃烧反应助燃等过程中都起到关键作用，烧结过程控制好水分，是保证烧结过程顺利进行，提高烧结

表2 混合料温度月均值同期比较

Table 2 Comparison of Monthly Average Sinter Mixture Temperature over the Same Period ℃

年度	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2018	21	22	26	29	41	41	42	45	44	46	41	42
2019	23	37	43	50	53	59	59	59	59	44	40	41
2020	39	39	44	49	53	56	56	56	58	48	42	44

矿质量和产量必不可少的重要条件[9]。

3.2.1 合理控制混合料水分

水分可以改善料层透气性,改善物料的制粒使其易于成球,不同配矿混合料水分都有一个适宜值,如鞍钢本部以精矿为主,混合料水分适宜值较鲅鱼圈低,一般在7.0%~7.4%,而鲅鱼圈以粉矿为主矿,其适宜的水分控制较高,一般在7.8%~8.2%。另外,根据混匀料堆实际配矿情况对水分进行精调微调,如当杨迪等褐铁矿品种配比增加时,混合料实际水分值采取8.0%~8.4%的上限控制,以提高水分在混合制粒中的作用。

3.2.2 优化调整混合机加水方案

优化调整了混合机加水方案,表3为优化前后加水方案对比。原二次混合加水量仅为2~4 t/h,占总加水量的10%左右。为了提升二次混合制粒效果,在总加水量不变的前提下,适当提高了二次混合加水量至4~8 t/h,在蒸汽高温作用下,水分参与制粒的作用得到更好的发挥,颗粒表面润湿效果得到改善,表面变得光滑,减小了混合料层对气流的阻力。

表3 优化前后加水方案对比

Table 3 Comparison of Water Addition Schemes before and after Optimization t/h

项目	生石灰配加水	一次混合加水	二次混合加水	总加水量	总上料量	混合料加水
优化前	10~12	19~23	2~4	31~39	800	0.038 8~0.048 8
优化后	10~12	17~19	4~8	31~39	800	0.038 8~0.048 8

3.2.3 强化返矿润湿稳定料返比

适量稳定的返矿配比可以优化混合料粒度组成,改善料层透气性,返矿量波动大会影响混合料混匀和制粒效果。为了稳定料返比,采取以下措施:

(1)做好返矿平衡,减少料返比调整次数,目前料返比周期稳定且≥5 d;

(2)严格控制返矿筛使用周期,防止返矿粒度和返矿量出现大幅波动;

(3)合理控制返矿槽位,避免槽位波动带来的返矿粒度偏析。

加强返矿润湿度可以提高返矿参与制粒的效果,通过控制系统升级,实现对冷返、高返加水量的远程精准控制,根据流量自动调节加水量,提升返矿润湿效果。

采取上述优化措施后,混合料制粒效果得到明显改善,表4为优化前后烧结混合料制粒效果对比。由表4可以看出,混合料中-1 mm部分含量得到有效控制,+3 mm含量提高7个百分点,有效改善了混合料的粒度组成。

表4 优化前后烧结混合料制粒效果对比

Table 4 Comparison of Granulation Performance of the Sintering Mixture before and after Optimization %

项目	+8 mm	(8~5] mm	(5~3] mm	(3~1] mm	-1 mm	+3 mm
优化前	12.4	17.2	27.6	26.5	16.3	57.2
优化后	14.0	19.5	31.1	27.4	8	64.2

3.3 降低点火强度

烧结点火的目的是将表层混合料中的固体燃料点燃,点火强度主要包括点火温度和点火煤气量两个指标。改造初期,点火强度控制在上限水平,点火炉膛温度维持在(1 050±50)℃,焦炉煤气用量约为0.072 GJ/t,点火后料层表面呈青黑色微熔状态,料层表面形成硬壳,增加了气流阻力,造成料层透气性的恶化。因此,适当降低了点火强度,将点火炉膛温度控制在(975±25)℃,焦炉煤气用量约降

至0.068 GJ/t,在控制微负压点火的同时,调整火焰状态,使火焰垂直于料层表面,调整后点火表面呈现出微黄色,有效避免了过熔的硬壳对气流造成过大阻力,既达到点火目的,又能节省点火成本。

3.4 合理控制烧结风量分布

合理控制烧结风量是强化烧结生产的重要措施之一,烧结风量对烧结矿产、质量与能耗指标有重要的影响[10]。合理的烧结风量能满足烧结机不同位置对风量的差异需要,而且风量在烧结料层中的均匀分布也非常重要,透气不均匀会造成气流分布不均,导致各处的垂直烧结速度不同,而料层不同的垂直烧结速度反过来又会加重气流分布的不均匀性,破坏均质烧结氛围,降低烧结成品率。为了达到合理用风,采取以下工艺措施。

3.4.1 降低烧结机边缘效应

原混合料矿槽内料面呈梯形分布,两侧料面较低,布料时两侧偏析严重。为了抑制边缘漏风,将布料小车在两端点停留时间延长1 s,减少大颗粒料在两端的偏析,同时台车两端增加无篦缝的盲篦条,抑制边缘风速,降低烧结机边缘效应,最大限度实现均质烧结。

3.4.2 优化铺底料粒度及铺底厚度

原设计铺底料粒度为10~16 mm,铺底厚度为30~50 cm,铺底料中-8 mm占比15.5%,小颗粒占比大易影响料层下部透气性,导致风量分配不均。通过调整整粒筛网眼大小将铺底料粒度提升至12~18 mm,铺底料中-8 mm粒级降为3%~5%,同时调整铺底料门子高度以将铺底料厚度增加至70~90 cm,显著提升了料层透气性,使气流分布更均匀,有效保护烧结机箅条,减少细料漏损,从而稳定烧结过程,提高烧结矿产、质量。

3.4.3 构建微负压点火智能分区控制系统

原点火器下部风箱安装扇形翻板,其开口度的定位和调整精度不足,点火器下部风箱负压不能有效精准控制,前端原始松散的物料层在高负压作用下容易产生不均匀收缩,造成料层透气性降低,气流分布不均,对烧结过程产生不利影响。为此,对鲅鱼圈烧结机点火器下部风箱系统进行了微负压自动控制升级改造,将1#、2#、3#风箱原有风门完全打开,并在1#~2#、2#~3#、3#~4#风箱间的上平台上安装平行阻流器,使1#、2#、3#风箱分别成为相对独立的密封腔体,同时在1#、2#、3#风箱管道的适当位置(烧结机下一层地面以上直管位置)安装自制的烧结机微负压特种耐磨阀门及配套的传动装置,自动控制系统通过对点火器下部风箱压力、温度等参数的实时监控,在线精准调整与控制风箱翻板阀,满足点火器下部风箱微负压工况稳定控制的工艺要求,解决原风箱因翻阀调整精度不足,点火器下部风箱负压不能有效控制,风量分配不均,原始料层透气性恶化,点火质量差,点火煤气利用率低,焦炉煤气消耗高,风箱易堵塞无法在线处理等生产难题,实现烧结过程节能减排、提质降耗的目的。

4 取得的生产效果

2020年采取上述工艺优化措施,运行至今,烧结机料层透气性得到明显改善,表5为2018年—2024年烧结机运行参数统计。由表5可以看出,优化后,料层厚度逐渐稳定在880~900 mm,各项生产指标较前期均有显著提高,固体燃耗由56.58 kg/t最低降至49.63 kg/t;吨矿电耗由46.77 (kW·h)/t最低降至36.50 (kW·h)/t,烧结利用系数由1.241 t/(m²·h)提高至最高1.402 t/(m²·h),实现了405 m²烧结机超厚料层的生产优势。

表5 2018—2024年烧结机运行参数统计

Table 5 Statistics of Operating Parameters of the Sinter Machine from the Year of 2018 to the Year of 2024

年份	料层厚度/mm	固体燃耗/(kg/t)	吨矿电耗/((kW·h)/t)	利用系数/(t/(m²·h))
2018年	835	56.58	46.77	1.241
2019年	852	59.55	44.52	1.293
2020年	886	56.61	39.88	1.327
2021年	891	55.97	39.75	1.386
2022年	900	55.70	36.50	1.401
2023年	895	49.63	39.02	1.378
2024年	886	55.82	38.88	1.402

5 结语

鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司针对405 m²烧结机900 mm超厚料层生产时透气性降低、操作负压升高、烧结质量下降等问题,通过采取提高混合料温度、优化混合料加水方式、强化返

(下转第67页)

inclusions[J]. Materials,2019,20(12):3443-3457.
[7] HE Xiaofei,WANG Maoqiu,HU Chengfei,et al. Study of the relationship among total oxygen, inclusions and fatigue properties of gear steel[J]. Materials Science and Engineering A,2021,826:152101.
[8] 李俊国,曾亚南,王树华,等. 20CrMnTi冶炼过程中夹杂物行为研究[J]. 钢铁钒钛,2010,31(1):56-61.
[9] 张立峰. 钢中非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
[10] 耿鑫,宋波,刘涛,等. 38CrMoAl钢精炼过程夹杂物生成及演变规律[J]. 中国冶金,2022, 32(11):106-114.
[11] Luis Truebra Jr. Nozzle clogging during the continuous casting of aluminum-killed steel[D]. Rolla: University of Missouri-Rolla. 2003.
[12] Holappa L. Thermodynamic examination of inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified steel [J]. Ironmaking and Steelmaking,2003,30(2):111-115.
[13] Bielefeldt W V,Vilela A C F. Study of inclusions in high sulfur, Al-killed Ca-treated steel via experiments and thermodynamic calculations [J]. Steel Research International, 2015, 86(4): 375-385.
[14] 韩志军,林平,刘浏,等. 20CrMnTiH1齿轮钢钙处理热力学[J]. 钢铁,2007,42(9):32-36.
[15] Inoue R,Suito H. Calcium desulfurization equilibrium in liquid iron[J]. Steel Research International,1994,65(10):403-409.
[16] Suito H,Inoue R. Thermodynamics on control of inclusions composition in ultraclean steels[J]. ISIJ International,1996,36(5): 528-536.
[17] 张立峰. 钢中非金属夹杂物几个需要深入研究的课题[J]. 炼钢,2016,32(4):1-15.
[18] 张立峰,李菲,方文. 钢液钙处理过程中钙加入量精准计算的热力学研究[J]. 炼钢,2016, 32(2):1-8.
[19] Yang W,Zhang L F,Wang X H,et al. Characteristics of inclusions in low carbon Al-killed steel during ladle furnace refining and calcium treatment[J].ISIJ International,2013,53(8):1401-1410.
[20] Yang G W,Wang X H,Huang F X,et al.Influence of calcium addition on inclusions in LCAK steel with ultralow sulfur content [J].Metallurgical and Materials Transactions B,2015,46(1): 145-154.
[21] Abdelaziz S,Megahed G,El-Mahallawi I, et al. Control of Ca addition for improved cleanness of low C, Al killed steel[J]. Ironmaking & Steelmaking,2009,36(6):432-441.
[22] Zhang L F,Liu Y,Zhang Y,et al.Transient evolution of nonmetallic inclusions during calcium treatment of molten steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2018,49(4):1841-1859.
[23] 季莎,张立峰,罗艳,等.钙处理对20CrMnTiH齿轮钢中非金属夹杂物的影响[J]. 工程科学学报,2021,43(6):825-832.
[24] 邢佳,杜晓建,张欣杰,等. 喂钙量与软吹氩对316L不锈钢中夹杂物的影响[J]. 特殊钢,2022,43(2):31-35.
[25] 李树森,任英,张立峰,等. 管线钢精炼过程中夹杂物CaO和CaS的研究[J]. 北京科技大学学报,2014,36(增刊1):168-171.
[26] Wang W J, Wang J J, Ren Y, et al. A thermodynamic model to predict the composition of inclusions in Al-killed Ca-treated steels[J]. Steel Research International, 2023, 94(7): 2200845.
[27] 王伟健,杨文,任英,等.精准钙处理指导软件开发及在特殊钢生产中的应用[J].特殊钢,2023,44(6):25-30.
[28] Abraham S, Bodnar R, aines J, et al. Inclusion engineering and metallurgy of calcium treatment[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2018,25(2):133-145.

(编辑 许营)
修回日期:2025-12-10

(上接第57页)

矿润湿、降低点火强度以及合理调节烧结风量分布等措施,实现了900 mm料层长期稳定生产,固体燃耗由56.58 kg/t降至49.63 kg/t,吨矿电耗由46.77 (kW·h)/t降至36.50 (kW·h)/t,烧结利用系数由1.241 t/(m²·h)提高至1.402 t/(m²·h),实现了厚料层烧结工艺的优势生产,达到了超厚料层改造的目标。

参考文献

[1] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2015:8-10.
[2] 翟江南. 厚料层烧结优化技术综述及其实践[J]. 烧结球团,2017,42(2):2-5.
[3] 王洪江,安钢,王全乐. 首钢京唐1号烧结机800 mm厚料层烧结生产实践[J]. 烧结球团,2010,35(3):47-51.
[4] 郑兴荣,徐冰,张群山. 900 mm超厚料层烧结设备改造实践[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2016,26(4):27-29.
[5] 郑兴荣,黄世来,戚义龙. 马钢三铁总厂900 mm厚料层烧结生产实践//[C]2012年全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会论文集,无锡:中国金属学会,2012.
[6] 邹凡球,赵改革,梁高铭. 湘钢360 m²烧结机920 mm厚料层烧结生产实践[J]. 烧结球团,2019,44(3):6-9.
[7] 罗吉敖. 炼铁学[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
[8] 敬大宾. 提高烧结混合料料温实践//[C]2014年全国中小高炉炼铁学术年会论文集,成都:中国金属学会炼铁分会中小高炉学术委员会,2014:913-914.
[9] 郭会良,纪召毅,玄振法. 水分在烧结中的行为探讨与分析[J]. 山东冶金,2023,45(2):23-26.
[10] 周江虹,章裕东,黄世来. 烧结过程风量合理分布实验研究[J]. 烧结球团,2021,46(1):37-42.

(编辑 许营)
修回日期:2026-01-27