

球团链算机系统仿真与工艺优化

许 源, 周会军, 周翔宇, 胡仲磊, 周鹏宇, 肖 禹

(本元智慧科技有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 针对球团链算机系统存在球团预热烘干效果差和鼓风干燥段进料口漏风严重的问题, 借助 CFD 软件对球团链算机系统进行仿真计算分析, 计算结果表明: 球团预热烘干效果差是由于各工艺段串风严重导致; 鼓风干燥段进料口漏风严重是由于链算机烟囱排烟能力不足导致。链算机回热风量在 $2\ 500 \sim 2\ 750\ \text{m}^3/\text{min}$ 时(各工艺段互不串风时), 链算机对球团的预热干燥效果最好; 关闭预热 I 段下侧一对风箱的阀门, 能有效的强化抽干段预热干燥球团的效果; 将鼓风干燥段引入主抽的工艺, 可解决进料口漏风严重的问题, 其在管道内增设阀门, 通过阀门来调节鼓干段的压力。模拟表明, 当阀门开度在 55%~60% 时, 鼓干段压力维持在微负压。

关键词: 球团; 链算机; 过程建模; 热工过程; 数值模拟

中图分类号: TF046. 4; X701

文献标志码: A

文章编号: 1000 - 8764(2025) 05 - 062 - 06

doi: 10. 13403/j. sjqt. 2025. 05. 079

Simulation and process optimization of travelling grate system for pelletizing

XU Yuan, ZHOU Huijun, ZHOU Xiangyu, HU Zhonglei, ZHOU Pengyu, XIAO Yu

(Bestone Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: In view of the problems of poor pellet preheating and drying effect and serious air leakage at the feed port in the blast drying section, the pellet grate system is simulated and analyzed by CFD software, and the calculation results show that the poor pellet preheating and drying effect is caused by serious air cross-winding in each process section. The serious air leakage at the feed port in the blast drying section is caused by the insufficient smoke exhaust capacity of the grate chimney. When the reheating air volume of the grate is $2\ 500 \sim 2\ 750\ \text{m}^3/\text{min}$ (when each process section is not cross-winded) , the grate has the best effect on the preheating and drying of the pellets. Closing the valves of a pair of bellows on the lower side of the preheating I section can effectively strengthen the effect of preheating and drying pellets in the draining section. The blast drying section is introduced into the main pumping process, which can solve the problem of serious air leakage at the feed port, and a valve is added in the pipeline to adjust the pressure of the drum dry section. Simulation shows that when the valve opening is between 55% and 60% , the pressure in the drum dry section is maintained at a slightly negative pressure.

Key words: pellet; travelling grate; process modeling; thermal process; numerical simulation

随着富矿资源日益枯竭, 为了充分利用贫矿资源, 20 世纪早期烧结球团法被开发出来用于铁精粉造块。由于现代高炉炼铁对炉料的要求越来越苛刻及钢铁冶炼短流程的兴起, 球团矿作为一

种不可或缺的优质冶金炉料在钢铁工业中的作用愈加重要。

链算机一回转窑球团法是一种联合机组生产球团矿的方法。它的主要特点是生球的干燥氧化

收稿日期: 2025 - 02 - 11; 修回日期: 2025 - 04 - 02

作者简介: 许 源(1991—), 男, 工程师, 从事流场和流固传热传质等方面的研究

预热、预热球的焙烧固结、焙烧球的冷却分别在三个不同的设备中进行。链算机是生产球团过程中最主要的设备,链算机热工过程控制的优劣直接影响生球物料的干燥和预热效果。因此,对链算机热工过程控制的设计研究尤为关键。THURLBY^[1]对链算机一回转窑系统做了气流-压力平衡计算,对球团温度分布、焓平衡、热力损失做了分析,并通过实验的方法对整个系统进行了分析。冯俊小等^[2]对首钢矿业公司链算机一回转窑进行质能平衡测试,发现链算机内串风、算板带走热量多等问题,并提出了优化改进建议。李洋等^[3]利用计算流体动力学和多孔介质理论建立单个球团干燥过程的数学模型,对球团干燥过程中冷凝与蒸发进行了研究。王琳^[4]利用 Fluent 软件对链算机内球团矿干燥、预热和焙烧过程进行数值模拟,分析了链算机内球团料层温度变化趋势。冯军胜^[5]采用实验和数值计算手段,对竖罐内烧结矿层气固传热基本规律、主要影响因素及其影响规律加以研究,进而确定竖罐适宜的结构和操作参数。孙红星等^[6]提出了一种有限差分法求解温度场优化控制模型的方法,准确的反映链算机运行的实际情况。储太山^[7]基于传热传质原理的过程模拟模型,对链算机进行优化计算。王祎等^[8]针对链算机漏风现有测定方法的不足,通过分析链算机各漏风部位的特点,制定基于气体温差和基于气流平衡的链算机漏风状态判断方法。可见,目前关于对链算机内对流传热的数值模拟研究,国内外大部分学者都是基于单个球团矿或单个链算机工艺段进行的模拟研究,缺乏对链算机整个系统的流场和温度场的研究。

为解决某钢厂球团链算机系统存在球团预热烘干效果差和鼓风干燥段进料口漏风严重的问题,本文借助 CFD 软件对某钢厂球团车间链算机工艺系统进行数值模拟分析,并针对分析原因对链算机系统内流场、球团料层温度和各工艺段压力提出改进方案。

1 烟气循环系统模型的构建与验证

1.1 物理模型

根据球团车间链算机工艺系统,建立链算机

三维仿真模型,三维仿真模型如图 1 所示。链算机长度为 60 m,高度为 4 m,链算机按照球团预热干燥过程可分为四段:鼓风干燥段,抽风干燥段,预热 I 段和预热 II 段,各段长度分别为 6、18、15、21 m。各工艺的热废气来源、废气流量及废气温度如表 1 所示。

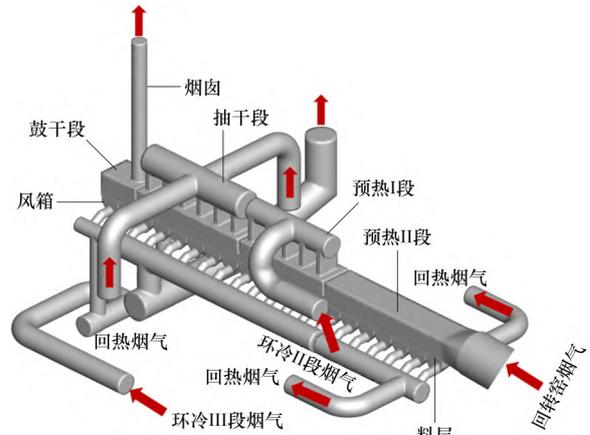


图 1 链算机系统三维仿真模型

Fig. 1 Three dimensional simulation model of traveling grate system

表 1 链算机各工艺进口段热废气物性参数

Table 1 Physical parameters of hot waste gas from each process inlet section of traveling grate machine

项目	鼓风干燥段	抽风干燥段	预热 I 段	预热 II 段
热废气来源	环冷机 III 段	预热 II 段	环冷机 II 段	回转窑
流量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	3 700	7 000	4 000	6 540
温度/ $^{\circ}\text{C}$	200	300	800	850

链算机工艺系统涉及到气相湍流流动和对流换热等复杂过程。所以为了运算简便,速度较快,在保证仿真结果正确性和准确性的前提下,对链算机模型进行简化处理。由于球团矿间空隙较大,球团粒度较小,气流与球团换热的过程较为复杂,一般将料层简化为粒度均匀,分布平均的工况。将料层空隙近似于多孔介质区域,气流流过料层孔隙的过程近似于流体穿过多孔介质区域的过程。因此,根据以上分析做出假设:①将气流视为不可压缩气体;②球团料层视为多孔介质;③球团矿体积随温度变化无明显变化。

1.2 控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x_j}(\rho_g u_j) = 0 \quad (1)$$

动量传输方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(P_{ij}) + g_i - f_i + S_i \quad (2)$$

式中: ρ_g 为流体密度, kg/m^3 ; u_i, u_j 分别为流体在 i, j 方向上的速度, m/s ; P_{ij} 为表面压力矢量, 包括静压力和流体黏性压力, Pa ; g_i 为流体在 i 方向上的体积作用力, N/m^3 ; f_i 为作用在单位体积流体上的反方向阻力, N/m^3 ; S_i 为源项。

考虑到多孔介质对流体黏性和惯性的影响, 可以通过增加 S_i 对多孔介质模型中动能传输方程进行修正, 如式(3)所示。源项由两部分组成: 第一部分为黏性损失项, 第二部分为惯性损失项。

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + \frac{1}{2} C_2 \rho_g |u| u_i \right) \quad (3)$$

式中: μ 为空气黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; $1/\alpha$ 为空气阻力系数; C_2 为空气惯性阻力系数; u 为液体速度, m/s 。

当球团床层内气固两相热容和热导率相差较大时, 各相局部温度变化率明显不同。本文将固相温度 T_s 和气相温度 T_g 作为 2 个独立的变量, 分别表征同一微元内固相和气相的热状态, 把多孔介质内的传热视为气固间的传热, 热能平衡能量方程见式(4)与式(5)。

对于固相:

$$\rho_s c_s u_s \cdot \nabla T_s = (1 - \varepsilon) \nabla \cdot (\lambda_s T_s) - h_v (T_s - T_g) \quad (4)$$

对于气相:

$$\rho_g c_g u_g \cdot \nabla T_g = \varepsilon \nabla \cdot (\lambda_g T_g) + h_v (T_s - T_g) \quad (5)$$

式中: ρ_s, ρ_g 分别为球团矿和废气的密度, kg/m^3 ; c_s, c_g 分别为球团矿和废气的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; u_s, u_g 分别为球团矿和废气的速度, m/s ; T_s, T_g 分别为球团矿和废气的温度, K ; λ_s, λ_g 分别为球团矿和废气的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; h_v 为气固对流体换热系数, $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s}\cdot\text{K})$ 。

1.3 模型边界条件设定和网格独立性验证

各工艺段进口采用速度入口边界条件, 出口采用压力出口边界条件。链算机系统三维仿真模

型采用四面体网格划分, 网格独立性验证如图 2 所示。由图 2 可知, 网格数量从 8.36×10^6 增加到 8.91×10^6 , 烟气出口速度变化不超过 1.45%, 因此本文选取的计算模型网格数量为 8.91×10^6 。

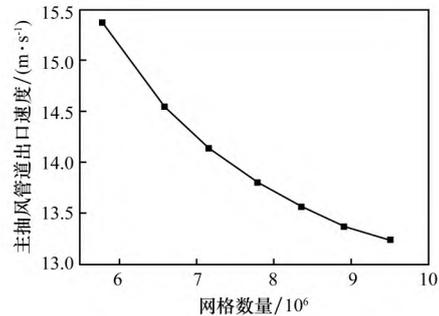


图 2 链算机系统仿真模型的网格独立性验证

Fig. 2 Verification of mesh independence for the chain belt machine system simulation model

1.4 模型的验证

对于所建立模型的合理性和正确性, 需要通过试验的对比来验证, 在测点的直径方向取 3 个测量点, 每个点测 5 次取平均值为测试值, 得出测量的链算机主烟道速度。将实际测量的主烟道速度与相同工况条件下数值模拟得出的主烟道的速度进行对比, 如表 2 所示。由表 2 可知, 各测量点误差均在 5% 以内。将链算机各工艺段测点的实际温度与相同工况条件下模拟得出的温度进行对比, 如表 3 所示。由表 3 可知, 各测量点误差也均在 5% 以内, 说明了模型的准确性。造成误差的原因有两方面, 一是对计算模型的简化, 二是数学计算模型的假设和简化。

表 2 主烟道速度模拟值和与测试值对比

Table 2 Simulation value and comparison with test value of main flue gas velocity

测量点	速度 / (m·s ⁻¹)		误差 / %
	测试值	模拟值	
1	12.77	13.25	3.62
2	12.72	13.25	4.00
3	13.00	13.25	1.89

2 结果分析

2.1 回热风量对链算机各工艺段球团料层温度的影响

由表 1 可知, 各工艺段热废气温度差异较大,

表3 链算机各工艺段测点温度的模拟计算值与实际值对比

Table 3 Simulated calculation values and comparison with actual values of temperature measurement points in each process section of traveling grate machine

项目	鼓风干燥段	抽风干燥段	预热 I 段	预热 II 段
模拟值/°C	52	283	745	845
实际值/°C	50	277	736	830
误差/%	4.00	2.17	1.22	1.81

注:温度测点实际值是在系统稳定运行后,一段时间实时温度的平均值。

如果各工艺段串风会影响球团预热烘干效果。不同回热风量下链算机各工艺段气体流动矢量分别如图3、4所示。由图3、4可知,当回热风量较大时($3\ 500\ \text{m}^3/\text{min}$),受各工艺段压力的影响,抽干段废气流入预热 I 段,预热 I 段废气流入预热 II 段。当回热量较小时($2\ 500\ \text{m}^3/\text{min}$),受各工艺段压力的影响,预热 II 段废气流入预热 I 段,预热 I 段废气流入抽干段。可见,各工艺段串风严重是由于回热风量不合理导致,因此可通过改变回热风量改善各工艺段串风问题,进而改善球团预热烘干效果,具体如图5~8所示。由于回热风量的改变对链算机各工艺段料层温度的影响不同,在讨论回热风量对球团温度的影响时需要分别针对鼓干段、抽干段、预热 I 段和预热 II 段进行分析。由图5~8可知:①在改变回热风量时鼓干段球团温度基本不变(图5、6)。②随着回热风量的减小,抽干段预热干燥后球团温度先减小后增加。导致这种变化趋势的主要原因:一方面是因为随着回热风量的减小导致抽干段料层风速的减小(图7),从而导致抽干段预热干燥后球团温度减小;另一方面则是由于链算机一回转窑烧结球团工艺和链算机结构的原因,链算机抽干段、预热 I 段和预热 II 段存在串风现象,当回热风量小于 $2\ 500\ \text{m}^3/\text{min}$ 时,虽然抽干段风速减小,但由于各工艺段压力的变化导致预热 I 段的高温气体会流入抽干段(图8),强化抽干段预热干燥球团的效果。③随着回热风量的减小,预热 I 段预热干燥后球团温度逐渐增加。这主要是因为随着回热风量的减小,预热 I 段料层的风速逐渐增加(图7),进而强化预热 I 段预热干燥球团的效果。

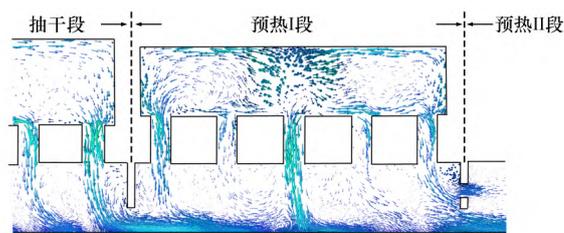


图3 链算机各工艺段气体流动矢量(回热风量为 $3\ 500\ \text{m}^3/\text{min}$)

Fig. 3 Vector diagram of gas flow in each process section of traveling grate machine(with a reheating air volume of $3\ 500\ \text{m}^3/\text{min}$)

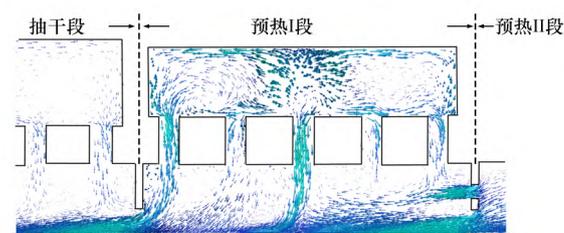
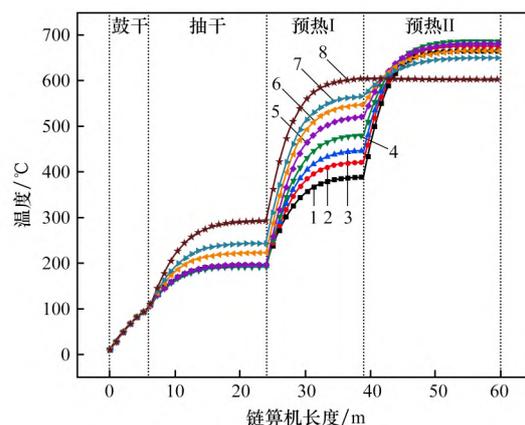


图4 链算机各工艺段气体流动矢量(回热风量为 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{min}$)

Fig. 4 Vector diagram of gas flow in each process section of traveling grate machine(with a reheating air volume of $1\ 500\ \text{m}^3/\text{min}$)



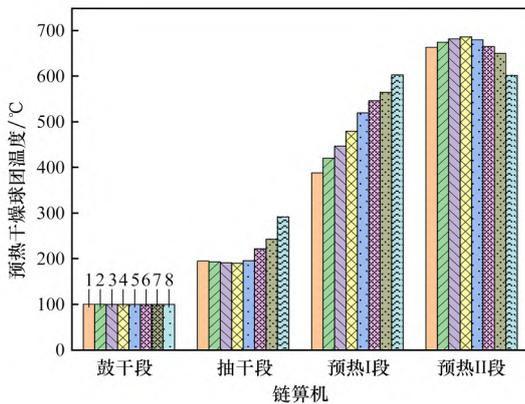
回热风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$: 1— $3\ 500$; 2— $3\ 250$; 3— $3\ 000$; 4— $2\ 750$; 5— $2\ 500$; 6— $2\ 250$; 7— $2\ 000$; 8— $1\ 500$ 。

图5 不同回热风量时球团的温度

Fig. 5 Temperature of pellets under different heat recovery air volumes

④随着回热风量的减小,预热 II 段预热干燥后球团温度先增加后减小,在回热风量为 $2\ 750\ \text{m}^3/\text{min}$ 时,预热干燥后球团温度最高。这主要是因为:随着回热风量的减小导致预热 II 段料层风速的减小(图7),料层风速的减小导致预热 II 段预热干

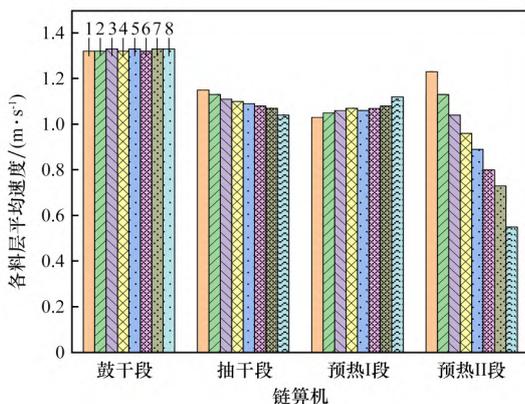
燥后球团温度减小;此外,由于链算机预热 II 段算板下侧设有水冷系统,回热风量的减小,导致水冷系统带走的热量减小,进而使球团温度增加。



回热风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$: 1—3 500; 2—3 250; 3—3 000;
4—2 750; 5—2 500; 6—2 250; 7—2 000; 8—1 500。

图 6 不同回热风量时链算机各工艺段预热干燥后球团温度

Fig. 6 The temperature of the pellets after preheating and drying in each process section of traveling grate machine under different heat recovery air volumes



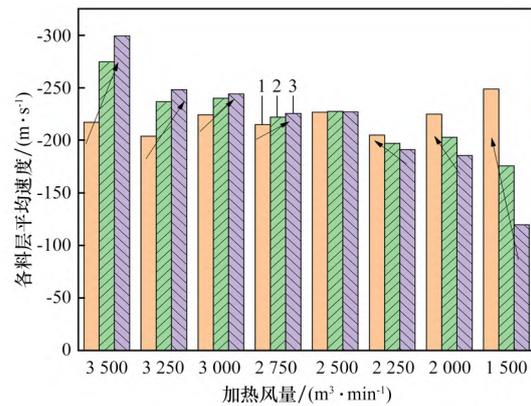
回热风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$: 1—3 500; 2—3 250; 3—3 000;
4—2 750; 5—2 500; 6—2 250; 7—2 000; 8—1 500。

图 7 不同回热风量时链算机各工艺段料层平均速度

Fig. 7 Average velocity of material layer in each process section of traveling grate machine under different heat recovery air volumes

2.2 关闭预热 I 段下侧任意一对风箱阀门对链算机各工艺段球团料层温度的影响

由于在回热风量减小较少时,抽干段预热干燥后球团温度变化不明显。为了强化抽干段预热干燥球团的效果,模拟研究在改变回热风量,同时关闭预热 I 段下侧任意一对风箱的阀门时,抽

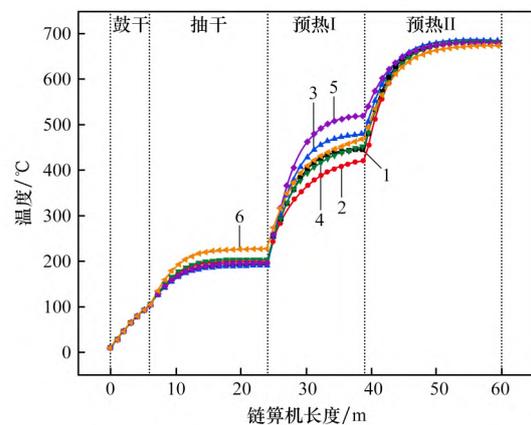


1—抽干段; 2—预热 I 段; 3—预热 II 段。

图 8 不同回热风量时链算机各工艺段压力

Fig. 8 Pressure of each process section of the grate machine under different heat recovery air volumes

干段预热干燥球团的效果,模拟结果分别如图 9、10 所示。由图 9、10 可知,在回热风量为 3 000、2 750、2 500 m^3/min 时,关闭预热 I 段下侧的任意一对风箱的阀门时,抽干段预热干燥后球团温度分别提高 8.39、14.04 $^{\circ}\text{C}$ 和 31.03 $^{\circ}\text{C}$,预热 I 段预热干燥后球团温度分别降低 25.84、25.98、51.13 $^{\circ}\text{C}$,预热 II 段预热干燥后球团温度分别降低 1.11、3.94、6.21 $^{\circ}\text{C}$ 。可见,关闭预热 I 段下侧任意一对风箱阀门主要是影响抽干段和预热 I 段的热工过程,对链算机预热干燥球团的整体效果影响不大。因此,可通过调节预热 I 段下侧任意



回热风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$: 1—3 000; 2—3 000*;
3—2 750; 4—2 750*; 5—2 500; 6—2 500*。

图 9 不同回热风量时球团的温度

Fig. 9 Temperature of pellets under different heat recovery air volumes

(注: 3 000* 为回热风量为 3 000 m^3/min , 同时关闭预热 I 段下侧的一对风箱的阀门, 其他类似。)

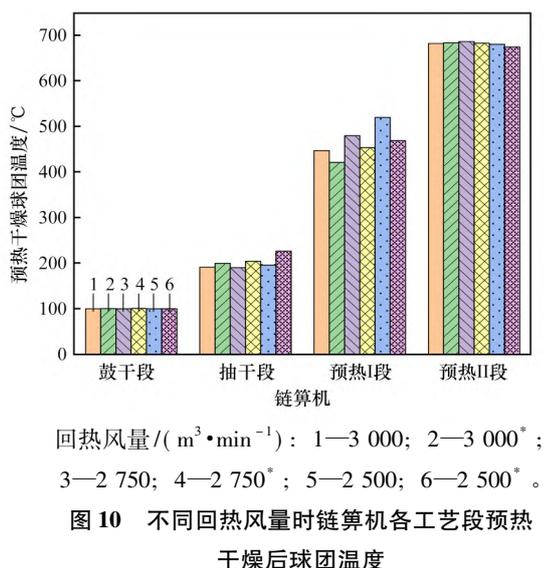


图 10 不同回热风量时链算机各工艺段预热干燥后球团温度

Fig. 10 The temperature of the pellets after preheating and drying in each process section of the grate machine under different heat recovery air volumes

一对风箱阀门开闭, 来控制抽干段和预热 I 段的热工过程, 进而控制抽干段和预热 I 段的预热干燥球团的效果。

2.3 将鼓风干燥段废气引入主抽

受限于工艺的原因, 链算机鼓风干燥段进料口漏风严重, 大量的烟尘从链算机鼓出, 造成球团车间环境差, 且链算机烟囱排烟能力不足, 鼓风干燥段湿蒸汽不能及时外排, 影响鼓风干燥段脱水能力。基于这个原因, 对链算机鼓干段进行改造, 改造后的系统如图 11 所示。在系统中增设管道, 将鼓干段烟囱的外排烟气引入主抽风机, 并在烟囱顶部和管道中设置阀门, 通过调节管道中阀门的开度来调节鼓干段压力, 进而解决链算

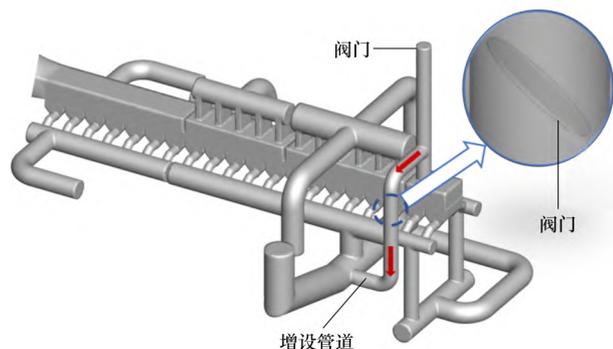


图 11 某钢厂 2# 球团链算机—回转窑改造后工艺系统
Fig. 11 Process system of 2# pellet chain grate machine rotary kiln renovation in a certain steel plant

机鼓风干燥段进料口漏风等问题。

图 12 为管道阀门在不同开度时鼓干段的压力。由图 12 可知, 鼓干段压力随着阀门开度的增加逐渐减小。当阀门开度在 55%~60% 时, 鼓干段压力维持在微负压。

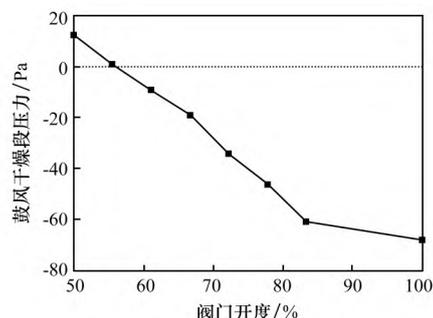


图 12 不同阀门开度时链算机鼓干段压力

Fig. 12 Pressure in the drum dry section of the chain grate machine at different valve openings

3 结 论

(1) 当链算机回热风量在 $2\ 500 \sim 2\ 750 \text{ m}^3/\text{min}$ 时(各工艺段互不串风时), 链算机对球团的预热干燥效果最好。

(2) 关闭预热 I 段下侧任意一对风箱的阀门, 能有效的强化抽干段预热干燥球团的效果。

(3) 将鼓风干燥段引入主抽的工艺, 可解决进料口漏风严重的问题, 在增设管道内增设阀门, 可通过阀门来调节鼓干段的压力, 模拟表明当阀门开度在 55%~60% 时, 鼓干段压力维持在微负压。

参考文献:

- [1] THURLBY J A. Gas flow and pressure balancing in modeling grate/kiln induration [J]. Metallurgical Transactions B, 1988, 19(1): 113-121.
- [2] 冯俊小, 孙志斌, 张宇, 等. 链算机—回转窑系统的热诊断与节能分析 [J]. 烧结球团, 2007, 32(6): 29-34.
FENG Junxiao, SUN Zhibin, ZHANG Yu, et al. Mass and thermal balance and energy-saving analysis of the grate-kiln system [J]. Sintering and Pelletizing, 2007, 32(6): 29-34.
- [3] 李洋, 李伯全, 张西良, 等. 球团干燥过程的数学建模与数值模拟研究 [J]. 烧结球团, 2018, 43(4): 33-39.

(下转第 93 页)

- through polymer-bridging flocculation: A study of flocculation performance and mechanism [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308: 122882.
- [15] HAN W J, ZHU Y M, LIU J, et al. A novel depressant HPAM of the hematite in reverse cationic flotation of iron ore [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 641: 128547.
- [16] 张爽, 李文博, 程绍凯, 等. 淀粉及其改性产品对东鞍山细粒赤铁矿聚团磁选的影响 [J]. *金属矿山*, 2024 (3): 83 - 88.
ZHANG Shuang, LI Wenbo, CHENG Shaokai, et al. Effect of starch and its modified products on agglomeration and magnetic separation of fine-grained hematite in Donganshan [J]. *Metal Mine*, 2024 (3): 83 - 88.
- [17] LI W B, ZHOU L B, HAN Y X, et al. Effect of carboxymethyl starch on fine-grained hematite recovery by high-intensity magnetic separation: Experimental investigation and theoretical analysis [J]. *Powder Technology*, 2019, 343: 270 - 278.
- [18] ZHOU L B, HAN Y X, LI W B, et al. Study on polymer-bridging flocculation performance of ultrafine specular hematite ore and its high gradient magnetic separation behavior: Description of floc microstructure and flocculation mechanism [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 276: 119304.
- [19] CHENG K, WU X Q, TANG H H, et al. The flotation of fine hematite by selective flocculation using sodium polyacrylate [J]. *Minerals Engineering*, 2022, 176: 107273.
-
- (上接第 67 页)
- LI Yang, LI Boquan, ZHANG Xiliang, et al. Mathematical modeling and numerical simulation of pellet drying process [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2018, 43(4): 33 - 39.
- [4] 王琳. 链算机中氧化球团温度场有限元分析研究 [J]. *矿业工程*, 2015, 13(1): 52 - 55.
WANG Lin. Finite element analysis of temperature field of oxidized pellets in travelling grate [J]. *Mining Engineering*, 2015, 13(1): 52 - 55.
- [5] 冯军胜. 烧结矿余热回收竖罐内气固传热过程及其应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
FENG Junsheng. Gas solid heat transfer process and application research in vertical tank for sinter waste heat recovery [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [6] 孙红星, 刘东昆, 高宝威, 等. 关于链算机焙烧温度场优化控制仿真研究 [J]. *计算机仿真*, 2016, 33(9): 350 - 353.
SUN Hongxing, LIU Dongkun, GAO Baowei, et al. Simulation of optimal control of chain grate's temperature field [J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(9): 350 - 353.
- [7] 储太山. 基于过程模拟和多目标评价的氧化球团链算机优化计算 [J]. *烧结球团*, 2015, 40(4): 24 - 27.
CHU Taishan. Optimized computation of oxidized pellet traveling grate based on a combination of process simulation and multi-criterion evaluation [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2015, 40(4): 24 - 27.
- [8] 王祎, 范晓慧, 陈许玲. 铁氧化球团链算机漏风状态的软测量模型 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(3): 671 - 676.
WANG Yi, FAN Xiaohui, CHEN Xuling. Soft sensing model of air leak status in grate during iron ore oxide pellet production [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(3): 671 - 676.