球团

链算机布料厚度和回转窑填充率自动化控制研究

李国全[1]，刘 奇[2a]，周晓军[1]，劳 逸[2a]，黄 雯[1]，杨聪聪[2b]，黄劲松[1]，赵士林[2a]

（1. 武钢资源集团 程潮矿业有限公司，湖北 鄂州 436051；2. 中南大学 a. 能源科学与工程学院；
b. 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：目前，链算机—回转窑是我国氧化球团生产的主要工艺，由于其连续、封闭的高温特性，生产过程中部分参数无法进行实时检测，会给工艺的自动化和运行改善带来困难，并会使生产线长期处于被动控制状态。鉴于链算机布料厚度和回转窑填充率的自动化控制在实现球团自动化生产中起着重要的作用，本文以某企业典型的球团生产工艺为对象，基于现场运行数据和控制方法优选，建立链算机布料厚度和回转窑填充率自动化控制方法。结果表明：采用基于生球堆比重 K 值计算的机速值可以与实际运行计算值较好地吻合，基于理论计算来获得填充率具有很好的参考意义，为实现 7%～8% 填充率的稳定运行，给料速率和转速之比值需控制在 1.27～1.45。研究结果可为球团生产的自动化控制提供指导和借鉴。

关键词：链算机；布料厚度；回转窑；填充率；自动化控制

中图分类号：TF046.6；TF325 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)03－0067－07

doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.043

Research on automatic control of fabric thickness of chain grate machine and fill rate of rotary kiln

LI Guoquan[1], LIU Qi[2a], ZHOU Xiaojun[1], LAO Yi[2a], HUANG Wen[1], YANG Congcong[2b], HUANG Jinsong[1], ZHAO Shilin[2a]

(1. Chengchao Mining Company Limited, WISCO Resources Group, Ezhou 436051, Hubei, China; 2. a. School of Energy Science and Engineering, b. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: At present, the grate-kiln is the main process of oxidation pellet production in China, due to its continuous and closed high temperature characteristics, some parameters in the production process cannot be detected in real time, which will bring difficulties to the automation and operation improvement of the process, and will make the production line in a passive control state for a long time. In view of the fact that the automatic control of the fabric thickness and the fill rate of the rotary kiln plays an important role in the automatic production of pelletizing, a typical pelletizing production process of an enterprise is taken as the object, and an automatic control method for the fabric thickness of the chine grate machine and the fill rate of the rotary kiln is established based on the optimization of on-site operation data and control methods. The results show that the machine speed value calculated based on the specific gravity K value of the green pellet pile can be in good agreement with the actual operation calculation value, and the fill rate based on the theoretical calculation has good reference significance, and in order to achieve stable operation of 7%～8% fill rate, the ratio of fill rate to rotation speed should be controlled at 1.27～1.45. The results can provide guidance and reference for the automatic control of pelletizing production.

收稿日期： 2023－03－24；**修回日期：** 2023－05－05

基金项目： 湖南省重点研发计划资助项目(2022SK2075)

作者简介： 李国全(1978—)，男，工程师，从事球团生产技术管理方面的工作。

通信作者： 赵士林(1992—)，男，特聘教授，从事烟气减污降碳、固废资源化综合利用、热工过程检测与自动控制方面的研究。

Key words: chain grate machine; fabric thickness; rotary kiln; fill rate; automatic control

链算机、回转窑是氧化球团生产过程中的主要设备。热工参数是球团生产控制的核心，不仅直接关系到生产过程和产品质量的稳定，而且制约着链算机、回转窑的稳定运行。事实上在球团生产的过程中，链算机的布料厚度、回转窑填充率的自适应调整对球团生产的质量有较大的影响，例如链算机料层厚度超过一定偏差不仅会导致生球容易出现炸裂，也严重影响到成品球的产量与质量；回转窑填充率是指窑内熟球团所占体积与回转窑本身总体积之比，它是反映给料量大小和熟料从窑尾到窑头在窑内流动性的重要特征[1]。若熟料的填充率过高则说明球团堆积密度高，将不利于热传递，填充率过小则说明球团量少，会导致生产周期延长并造成能源浪费，影响球团产量[2]。目前，国内主流氧化球团生产工艺的稳定运行主要采用人工控制的方式，如链算机的布料控制主要是通过雷达料位计、图像等获得现场链算机料位高度和回转窑内的物料堆积高度，然后由工人进行手动调节链算机、回转窑转速等以实现，由于在连续生产过程中，链算机、回转窑总是处于运转状态，因而人工控制不可避免的会存在控制不及时、滞后的问题[3]。因此，实现链算机布料厚度、回转窑填充率的自动化控制对球团生产工艺的高效、稳定运行，节省工人工作量具有重要的意义。

1 链算机布料厚度自动控制

1.1 链算机布料厚度变化原因

链算机—回转窑—环冷系统运行工艺流程如图 1 所示。链算机作为整个系统的球团入口，其布料厚度会直接影响成品球的质量以及能耗水平等。当料层过薄时，可能会产生过烧，算床可能会被烧损；而料层过厚时，生球难以获得足够的预热时间、热风流量、预热温度和热气体含氧量，导致球整体的耐磨性和抗压强度达不到要求[4]。影响链算机布料厚度控制的主要因素有：① 圆盘造球机本身在生产过程中存在的不稳定性和不均匀性等干扰因素，可能会导致球团产量不稳定、粒径不均匀；② 大辊筛长期运行存在磨损，两侧漏球量不一致，难以进行预测和控制；③ 球团返

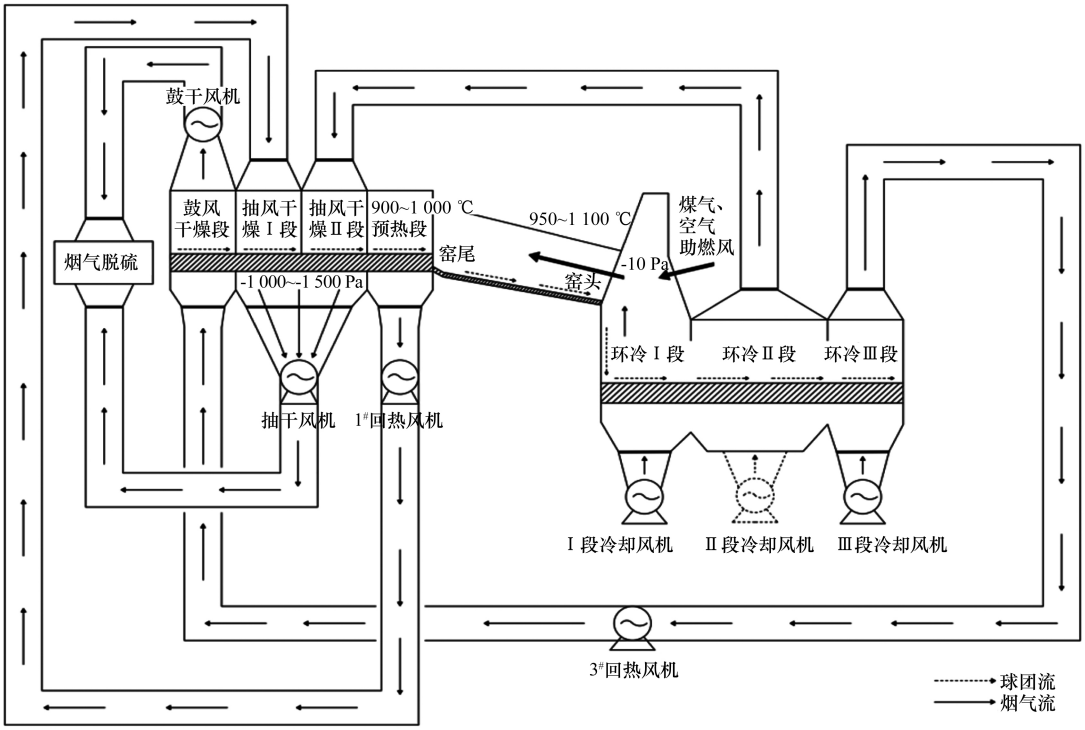


图 1 链算机—回转窑—环冷机工艺流程

Fig. 1 Process flow of grate-kiln-cooler

球率波动较大，导致实际进入链算机球量变化较大；④ 布料量和返矿量测量点安装位置距离较远，厚度检测存在时间滞后，不利于即时调整；⑤ 位于链算机入口处的雷达料位检测计与机头之间存在一定的距离，也会导致厚度反馈存在一定的时间滞后问题。

以某球团企业在一段时间内现场实际生产数据为例，链算机布料量随时间变化如图 2 所示。由图 2 可以看出，短期内，实际布料量发生突变主要是因为返料量的变化。长期内，实际布料量发生较大变化主要是因为总生球量变化大。在正常工艺生产过程中，机速应依据实际布料量的变化实时做出调整，以使链算机布料厚度满足正常的范围(120 ± 10) mm。

1.2　链算机布料厚度自动控制

球团生产系统中可以参照的控制策略是“标定三大主机速度，整体调节，单独控制”，各段相对独立，当链算机部分料厚发生波动时，可主要通过链算机机速的自动控制来实现[5]。本文采用的链算机布料厚度基本控制方案如图 3 所示。

结合图 3，链算机布料厚度的控制方式：① 根据球团生产过程中的参数计算出链算机设定速度S_0(m/min)；② 以链算机机速设定值和实际检测值的差值为控制系统输入信号；③ 通过 PID 控制器控制链算机传动电机进行链算机机速调整；④ 检测链算机料厚输出是否满足工艺生产要求(120 ± 10) mm。

可见，当布料量发生变化时，采用何种合理的计算方案计算链算机输出机速是决定控制系统控制效果好坏的关键，目前关于机速设定值 S_0 的计算方案主要有以下两种。

(1) 基于定比值计算机速。此种方法无需进行生球布料量检测，通过检测的链算机料厚和机速进行链算机速度设定，计算公式如式(1)所示[6]：

$$S_0 = \frac{V_p L_p}{L_0} \tag{1}$$

式中：V_p 为链算机机速检测值，m/min；L_p 为链算机布料厚度检测值，mm；L_0 为链算机布料厚度设定值，mm。

该公式简单认为布料厚度和机速为单一函数关系，不考虑生球布料量的因素。但在实际球团生产工艺中，布料量在很大程度上影响、决定料厚；而生球料量又具有波动范围较大、波动频率较快的特点。故而若在生球料量变化频率较大时使用此方案进行计算可能导致机速调整部分偏差幅度较大，其结果很可能会如图 4 所示。

(2) 基于生球堆比重 K 值计算机速。为了充分考虑布料量的变化因素，采用电子秤测定生球布料量 W_p，按式(2)计算链算机速度设定值[7]。

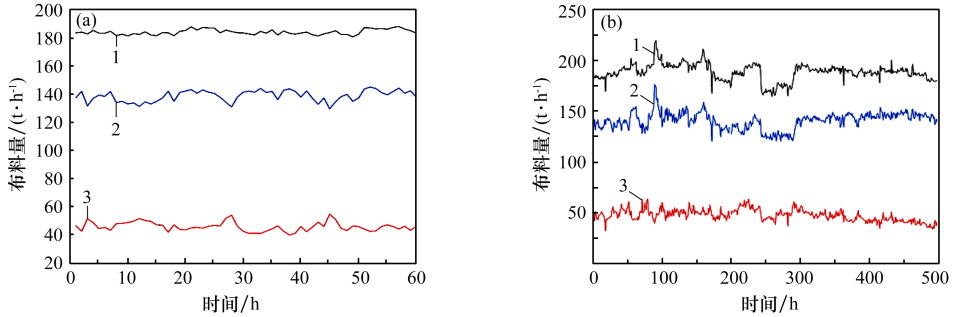
$$S_0 = \frac{W_p}{K L_0 H_0} \times 10^6 \tag{2}$$

式中 K 可由式(3)计算得到：

$$K = \frac{W_p}{V_p L_p H_0} \times 10^6 \tag{3}$$

式(2)、(3)中：S_0 为链算机机速设定值，m/min；W_p 为生球布料量，t/h；K 为生球堆比重，t/m^3；H_0 为链算机宽度，mm。

本方案中采用生球堆比重K值是基于前期运



(a) 短期(60 h 内)；(b) 长期(500 h 内)

1—总生球量 W_1；2—实际布料量 W_p；3—返料量 W_2。

图 2　链算机布料量随时间变化曲线

Fig. 2　Variation curves of material quality with time for chain grate machine

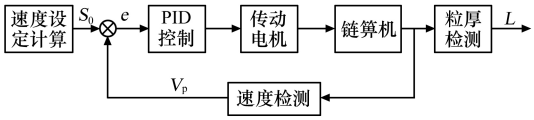
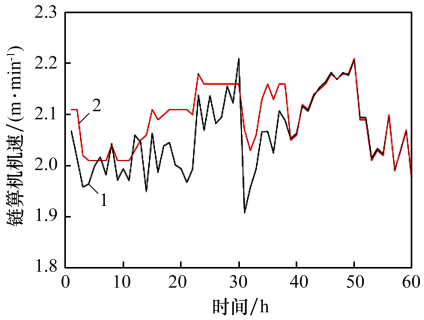


图 3 链算机机速基本控制方案

Fig. 3 Basic control scheme for the speed of the chain grate machine



1—链算机机速计算值 S_0；2—链算机机速检测值 V_p。

图 4 链算机机速计算值和实际值随时间变化曲线

Fig. 4 Variation curve of calculated and actual values of chain grate machine speed with time

行数据来推测即将进行的运行数据，综合了更多的检测参数。因此，相较于基于定比值计算获得的机速对链算机布料厚度的控制效果更佳。

1.3 基于 K 值预测计算进行链算机布料厚度控制

在链算机机速基本控制方案（图 4）基础上，基于 K 值预测来计算 S_0，计算思路如图 5 所示。本方案基于实时采集的 W_p、V_p、L_p，采用之前已经记录的数据使用加权均值公式(4)进行此时 K 值的预测，并采用逐渐取代的方法，实时更新参与计算的数据，以保证计算结果的准确性。

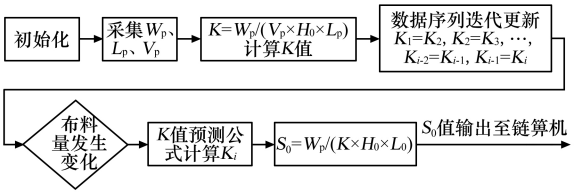
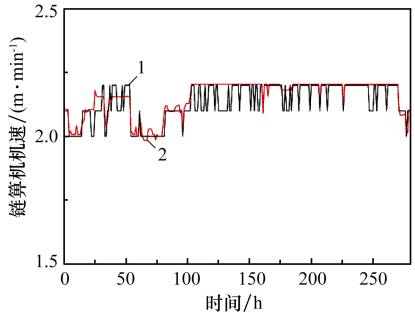


图 5 机速控制流程

Fig. 5 Flow chart of machine speed control

$$K_i = K_1\alpha_1 + K_2\alpha_2 + K + K_{i-2}\alpha_{i-2} + K_{i-1}\alpha_{i-1} \quad (4)$$

式中：K_i 为链算机生球堆比重 K 的预测值，$K_1 \sim K_{i-1}$ 为参与预测的生球堆比重 K 的计算值，$\alpha_1 \sim \alpha_{i-1}$ 为各个数据所占的权重，越靠近当前时间的数据所占权重越大。本方案选前 20 个已经记录的 W_p、V_p、L_p 来进行 K 值的预测计算，结果如图 6 所示。由图 6 可以看出：采用加权均值滤波优化 K 值算法后的链算机机速输出较为平稳，且能够快速跟随链算机原实际输出机速的波动趋势变化调整，能够满足球团料厚控制的要求。基于 K 预测计算机速，进而获得链算机料层厚度随时间变化如图 7 所示。由图 7 可知：链算机料层厚度绝大部分数据仍在(120 ± 5) mm范围内，基本符合实际球团生产过程中的料厚要求。



1—链算机机速计算值 S_0；2—链算机机速检测值 V_p。

图 6 基于 K 值预测机速值随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curve of machine speed value with time based on K value prediction

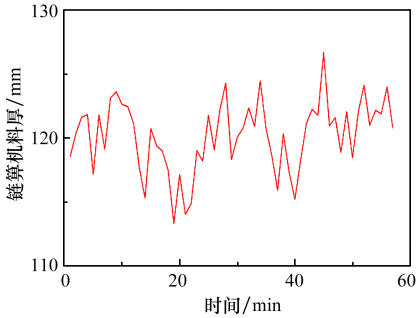


图 7 基于 K 值预测理论料厚随时间变化曲线

Fig. 7 Variation curve of material thickness with time based on K value prediction

2 回转窑填充率自适应调整

2.1 回转窑填充率影响因素

回转窑的填充率是指在回转窑内填充物料的比例，主要受物理颗粒大小和分布、原料密度、回转窑内料层厚度、回转窑转速以及窑内结圈状况等影响[8]。回转窑的填充率直接影响了球团的产量和质量。当填充率偏高时，物料在回转窑中的停留时间变长，温度分布不均，部分球团会因受热不均匀而形成裂缝，从而导致球团的强度下降，同时也会增加能源消耗。当填充率偏低时，可能导致球团的产量下降，同时回转窑中的矿物

原料数量不足也会导致球团生产周期的延长，增加生产成本[9]。因此回转窑的填充率需要根据企业生产的需求进行控制（一般控制在 7%～8%），正常工况下填充率的大小取决于进料口给料量的多少，可以利用物料的填充率来判断给料量是否恰当。其次，当回转窑的斜度和转速固定，进料口给料稳定时，回转窑处于动平衡状态，回转窑的填充率也相对比较稳定，此时一般通过微调整回转窑的转速进行回转窑内填充率的调整。

2.2　回转窑填充率计算方法

回转窑的填充率（f,%）是指回转窑内熟料所占容积（V_0，m^3）与回转窑总容积（V，m^3）之比，数学上也可认为是物料在窑各个截面球团所占截面积（S，m^2）占窑总截面积（S_p，m^2）的百分比沿窑长方向的定积分，式中 L 为窑长度，m。

$$f = \frac{V_0}{V} \times 100\% = \frac{1}{L}\int_0^L \frac{S}{S_p}\mathrm{d}x \times 100\% \qquad (5)$$

目前，回转窑填充率计算主要有图像识别法和数学模型计算。图像识别法主要基于安装在回转窑窑头的摄像机实时采集窑内图像信号，通过图像信号处理计算获得，其会受到窑头摄像机安装位置、角度、窑内燃烧状态的影响[10]。数学模型法是基于理论计算来获得填充率，其较优于图像识别法。回转窑给料速率、物料堆积高度是影响数学模型法计算填充率的重要参数。

（1）回转窑给料速率计算。链算机—回转窑物料流程如图 8 所示。球团从链算机进、出的过程中，引起链算机内球团质量变化的主要因素有：① 生球团中的水分在链算机出口处几乎完全脱除；② 生球团中的磁铁矿（Fe_3O_4）颗粒在链算机中部分被氧化，在回转窑中基本完全氧化成赤铁矿（Fe_2O_3）；③ 在链算机出口斗提处会漏出部分球团；④链算机、回转窑中生球团中的碳酸盐和硫分解；⑤ 煤粉燃烧带来的质量增量[11]。

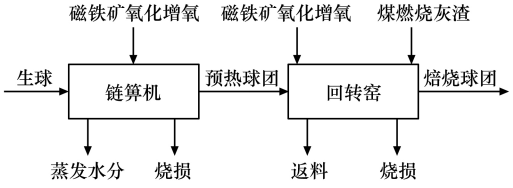


图 8　链算机—回转窑物料流程示意

Fig. 8　Schematic diagram of the material flow of grate-rotary kiln

由于成品球团相较于生球团有部分增重，生球团和成品球团之间的比重约为 96.6%，考虑球团在回转窑内的化学反应过程，取生球布料量和成品球团出料量的平均值作为回转窑给料量，计算得到回转窑给料量和生球布料量的比值约为 1.02。

本方案采用式（3）计算的链算机入口处生球堆密度 K 作为回转窑内球团堆密度，通过式（6）计算回转窑给料速率 Q（m^3/h），具体计算结果见图 9，得到回转窑平均给料速率约为 62 m^3/h。

$$Q = \frac{m}{\rho} \qquad (6)$$

式中：Q 为回转窑给料速率，m^3/h；m 为回转窑给料量，t/h；ρ 为生球堆密度，t/m^3。

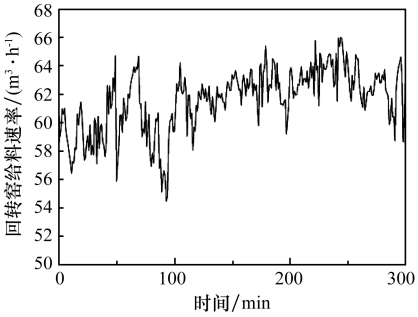


图 9　回转窑给料速率

Fig. 9　Feeding rate of rotary kiln

（2）物料堆积高度计算。回转窑内物料运动状况难以观测，其进、出料示意图如图 10 所示。其中，h 为回转窑内物料堆积高度，为了计算回转窑内物料填充率需要得到物料堆积高度沿回转窑轴向方向的变化情况，因此本方案引入了 Saeman 堆积度稳态预报模型[12]，如式（7）所示，预测物料堆积高度沿回转窑轴向方向的变化情况。模型的输入参数有：① 窑炉尺寸（直径 D、半径 R）；② 操作参数（给料速率 Q、窑转速 n、窑倾斜角 β）；③ 物料属性（物料休止角 γ、物料堆密度 ρ）。

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}x} = \frac{3\tan\gamma}{4\pi n}Q[R^2 - (h-R)^2]^{-3/2} - \frac{\tan\beta}{\cos\gamma} \qquad (7)$$

式中：h 为物料堆积高度，m；γ 为物料休止角，（°）；n 为回转窑转速，r/h；Q 为给料速率，m^3/h；R 为回转窑内半径，m。求解此微分方程的初始条件 $h[x=0]=0.15$ m，采用 Matlab 软件求

解出 $h=h(x)$ 的表达关系式后，根据式(8)计算物料的平均填充率：

$$\bar{f}=\frac{1}{\pi L}\int_0^L(\varphi-\sin\varphi\cos\varphi)\,\mathrm{d}x\times 100\% \tag{8}$$

式中：φ 为某一截面物料填充角的一半，与料层厚度 h 之间的换算通过式(9)进行。

$$\varphi=arccos\left(1-\frac{h}{R}\right) \tag{9}$$

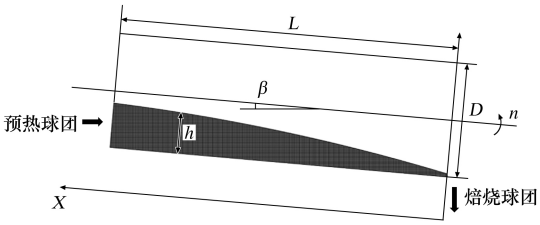


图 10 回转窑进、出料示意

Fig. 10 Schematic diagram of rotary kiln feed and discharge

2.3 回转窑实际填充率计算结果

以某企业∅5 m×33 m 窑(窑直径为 5 m、内径为 4.7 m，窑长为 33 m、倾角为 2.5°、物料休止角为 38°)为计算实例，基于 Saeman 物料堆积度稳态预报模型，通过常微分数值求解，根据企业普遍生产状况，给出了回转窑给料速率和转速之比 X 取 1 的情况下，物料堆积高度沿窑炉轴向分布随距窑头距离变化的曲线见图 11。从图 11 可以看出，稳态下物料堆积高度从窑头至窑尾呈递增趋势，窑头处增长率大，曲线较陡峭，窑尾段增长率较小，曲线较平缓。

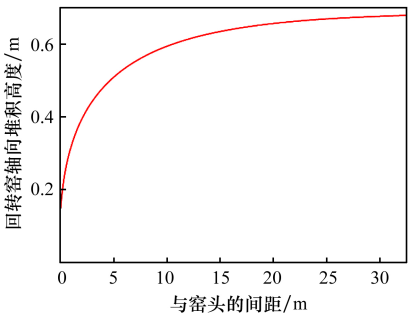


图 11 回转窑轴向堆积高度随与窑头的间距变化曲线

Fig. 11 Variation curve of axial stacking height of rotary kiln with distance from kiln head

根据式(10)计算回转窑内沿轴向方向各个截面的填充率，如图 12 所示。

$$f=\frac{\varphi\times\pi R^2/180-(R-h)\sqrt{2Rh-h^2}}{\pi R^2} \tag{10}$$

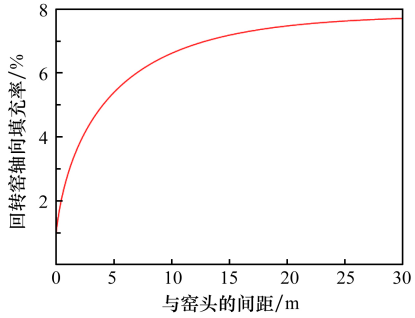


图 12 回转窑轴向填充率随距窑头距离变化曲线

Fig. 12 Variation curve of axial filling rate of rotary kiln with distance from kiln head

根据式(8)、(9)计算回转窑内实际填充率为 5.6%，不满足该企业 7%~8% 填充率要求，这可能是因为模型计算时未考虑窑内结圈情况有关。为满足填充率（7%~8%）要求，需对 Saeman 物料堆积度稳态预报模型中的输入参数 X 进行调整。当填充率设定在 7% 和 8% 时，计算得到的 X 值分别为 1.27 和 1.45。因此，回转窑给料量与转速之比 X 需要控制在 1.27~1.45 的范围以内。

2.4 回转窑填充率控制结果

基于上述的填充率计算结果，本文以回转窑给料速率和回转窑转速为反馈量，组成闭环控制系统，具体如图 13 所示。

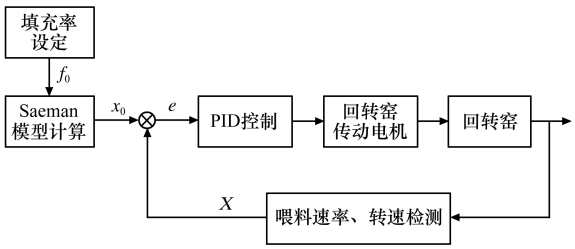


图 13 回转窑填充率自适应控制系统示意

Fig. 13 Diagram of adaptive control system for filling rate of rotary kiln

结合图 13，具体控制过程：① 根据企业产量要求设定所需填充率 f_0；② f_0 输入至 Saeman 模型中计算理论的给料速率与转速比值 X_0；③ 以检测的 X 值与设定值 X_0（1.27~1.45）偏差 e 为控制系统输入信号；④ 通过 PID 控制器控制回转窑传动电机进行回转窑转速调整；⑤ 使回转窑填充率符合企业要求实现回转窑的填充率自适应控制。

3　结　论

（1）采用基于生球堆比重（K）值计算的机速值可以与实际运行计算值较好地吻合，结合 PID 控制可实现链算机布料厚度在设计值（120 ± 10）mm内稳定运行。

（2）基于理论计算来获得填充率具有很好的参考意义，基于给料速率和转速之比 X 值结合 PID 控制可实现回转窑填充率的自适应调整，控制 X 值在 1.27 ~ 1.45，可实现回转窑在 7% ~ 8% 填充率的稳定运行。

参考文献：

[1] 吴静，李选友，陈宝明，等. 大颗粒低填充率外热式回转窑传热系数模型的构建[J]. 农业工程学报，2014(13)：256 - 262.
WU J，LI X Y，CHEN B M，et al. Research progress on collaborative utilization of organic solid waste in iron and steel processes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2014(13)：256 - 262.

[2] 彭俊. 链算机回转窑烧结球团过程建模与优化方法研究[D]. 沈阳：东北大学，2013.
PENG J. Studies on modeling and optimization of iron-ore pellets induration processes[D]. Shenyang：Northeastern University，2013.

[3] 张瑞先，黄世来，高绪松，等. 回转窑焙烧自动控制问题探讨[J]. 冶金动力，2020(1)：60 - 63.
ZHANG R X，HUANG S L，GAO X S，et al. A discussion on the automatic control of rotary kiln roasting[J]. Metallurgical Power，2020(1)：60 - 63.

[4] 谢小玲. 链算机（焙烧机）布料方式的探讨[J]. 烧结球团，2015，40(6)：36 - 39.
XIE X L. Discussion on feeding types of traveling grate (indurating machine) [J]. Sintering and Pelletizing，2015，40(6)：36 - 39.

[5] 林秀强. 莱钢型钢链算机—回转窑智能控制系统及其应用[J]. 烧结球团，2012，37(3)：40 - 42.
LIN X Q. Intelligent control system of grate-kiln in laisteel section steel and its application[J]. Sintering and Pelletizing，2012，37(3)：40 - 42.

[6] 徐少川，井元伟，苟维东. 基于自适应专家控制的链算机料厚自动控制系统设计[J]. 烧结球团，2009，34(5)：38 - 42.
XU S C，JIN Y W，GOU W D. Design of automatic control system for bed depth of chain grate based on adaptive expert control[J]. Sintering and Pelletizing，2009，34(5)：38 - 42.

[7] 罗山林. 链算机—回转窑球团自动控制系统设计与实现[D]. 武汉：武汉科技大学，2015.
LUO S L. Design and realization of grate-kiln automatic control system[D]. Wuhan：Wuhan University of Science and Technology，2015.

[8] 潘建，田宏宇，朱德庆，等. 回转窑结圈形成机理及应对措施的研究进展[J]. 钢铁，2020，55(7)：13 - 22.
PAN J，TIAN H Y，ZHU D Q，et al. Research progress of ringing formation mechanisms in rotary-kiln and its response measures[J]. Iron & Steel，2020，55(7)：13 - 22.

[9] 鲁聪. 回转窑结构优化及高温烟气温度间接测量研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2020.
LU C. Research on rotary kiln structure optimization andindirect measurement of high temperature flue gas temperature[D]. Wuhan：Wuhan University of Science and Technology，2020.

[10] 何敏，章兢，何昭晖，等. 基于回转窑图像的熟料填充率测量[J]. 仪器仪表学报，2009，30(12)：2586 - 2592.
HE M，ZHANG J，HE Z H，et al. Measurement of filling percentage of clinker using rotary kiln image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2009，30(12)：2586 - 2592.

[11] 王祎. 铁矿氧化球团链算机—回转窑模拟模型和控制指导专家系统的研究[D]. 长沙：中南大学，2012.
WANG Y. Research on simulation model and control guidance guidance expert system of grate-kiln process for iron ore oxide pellet production[D]. Changsha：Central South University，2012.

[12] 刘平安. 回转窑内物料堆积度预报系统研究[D]. 长沙：湖南大学，2014.
LIU P A. Prediction system for the filling height of the material in rotary kilns[D]. Changsha：Hunan University，2014.