基于粒度识别的烧结智能配水技术研究与应用

安秀伟[1]，续飞飞[2]，孙宝芳[1]，郑向国[1]，何 波[1]
（1. 青岛特殊钢铁有限公司，山东 青岛 266400；2. 北京智冶互联科技有限公司，北京 100144）

摘要：针对烧结混合料水分难以精准测量的问题，本文将粒度识别技术与智能配水相结合，开发了烧结智能配水系统。该系统直接将水分的调整与混合料粒级组成建立关系，通过建立基于混合料粒度的有监督自学习优化控制算法对加水量进行实时调整，以达到烧结混合料加水的自动闭环控制。经工业实践跟踪发现：应用该智能配水系统后，烧结利用系数由 1.36 t/(m²·h)增加到 1.41 t/(m²·h)，烧结矿转鼓指数由 78.10% 增加到 78.64%，烧结负压由 12.71 kPa 下降到 12.14 kPa，烧结主抽频率由 39.4 Hz 下降到 38 Hz。

关键词：烧结；粒度识别；有监督学习算法；智能配水；闭环控制
中图分类号：TF046.4；TP18 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0048－05
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.040

Research and application of intelligent sintering water distribution technology based on particle size identification

AN Xiuwei[1], XU Feifei[2], SUN Baofang[1], ZHENG Xiangguo[1], HE Bo[1]
(1. Qingdao Special Iron & Steel Co., Ltd., Qingdao 266400, Shandong, China; 2. Beijing Zhiye Interconnection Technology Co., Ltd., Beijing 100144, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to accurately measure the moisture of sintering compound, particle size recognition technology and intelligent water distribution are combined, and an intelligent sintering water distribution system is developed. The system directly establishes the relationship between the adjustment of moisture and the size fraction of the compound, and adjusts the water addition in real time by establishing a supervised self-learning optimization control algorithm based on the particle size of the compound, so as to achieve the automatic closed-loop control of the water addition of the sintering compound. It is found that after the application of the intelligent water distribution system, the sintering utilization coefficient increases from 1.36 t/(m²·h) to 1.41 t/(m²·h), the sinter drum index increases from 78.10% to 78.64%, the negative sintering pressure decreases from 12.71 kPa to 12.14 kPa, and the main sintering pumping frequency decreases from 39.4 Hz to 38 Hz.

Key words: sintering; particle size identification; supervised learning algorithm; intelligent water distribution; closed-loop control

受原料采购市场的影响，烧结所用各种原料的成分和比例经常发生变化，导致混合料造球性能不稳定，对烧结过程和烧结矿质量造成一定影响。混合料制粒造球的粒度大小会直接影响烧结混合料的透气性和烧结矿的质量。加水量是控制混合料制粒造球的关键环节，传统的水分测量方法是人工定时取样测量，数据滞后性明显，满足不了连续生产的需求；现有市场上的在线水分测定仪受环境影响较大，对水分的敏感度较低，其仅能作为参考数据使用，很难应用于连续智能闭环自动控制。针对烧结智能配水，国内许多专家也开展了相关研究，如：孙乐针等[1]对烧结料加

收稿日期：2023－03－11；**修回日期**：2024－01－03
作者简介：安秀伟(1984—)，男，高级工程师，从事炼铁烧结工艺方面的研究。
通信作者：孙宝芳(1984—)，男，高级工程师，从事炼铁烧结工艺方面的研究。

水混合过程自动控制，采用改进的 BP 神经网络建立该过程的模型，对混合料水分进行控制；蔡洪岩[2]以物料平衡为理论基础建立加水模型，对各种物料的含水量采用智能辨识方法进行了自学习建模研究；吴晓峰等[3]采用模糊前馈控制对控制量进行修正的方法研究烧结混合料加水控制策略。实际生产中各种原料的水分、下料量、质量等均存在较大波动，导致各种现有模型的控制效果并不稳定，尤其在混合料加水控制方面，由于混合料的不均匀性、环境的恶劣性和皮带的高速运转等因素，使得水分测量和智能控制面临很大的挑战。同时，由于烧结生产过程中物料变动的不确定性，混料过程的时滞性以及控制过程中的复杂性，要想以水分仪实现闭环控制，从目前研究结果及现场应用的效果来看还有较大难度[4-9]。

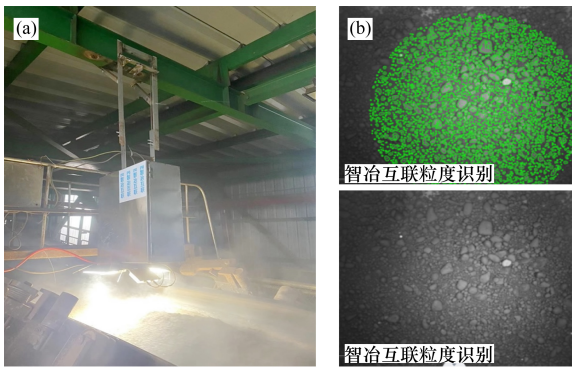
针对以上存在的问题，本文开发了一种全新的烧结智能配水系统。该系统首次将粒度识别技术应用到了烧结混合料加水的实际生产过程，避开了水分数据难以获取的弊端，通过直接检测混合料的粒度组成，采用前馈因素与和后馈因素相结合的方式指导并调整加水量，实现了烧结生产中混合料的智能闭环配水。

1　粒度识别仪可靠性验证

在青岛特钢 265 m^2 烧结生产线上安装粒度识别设备并试验运行，将高速摄像仪安装至二混后平缓皮带处（图 1），通过网络把照片传输至主控室电脑，并对图片进行智能图像识别[10]，计算其粒级组成。设定高速摄像仪每分钟拍照 50 张，取粒度识别平均值作为该时段的混合料粒级组成。

同时，在实际应用过程中发现，尤其是在室外气温低于零下 10 ℃后，混合料皮带上蒸汽会大到影响识别结果。因此，在试验过程中对图像识别算法进行了优化，采用高通滤波法，增强照片中颗粒边缘的高频信号，使带有雾气模糊的图片变得更加清晰。

为验证粒级识别仪分析结果与实际结果的一致性，做如下对比试验：取粒级识别仪 5 min 数据的平均值作为一组数据；同时，按照每份1 min一个样，每个样200 g进行人工取样，最后将5 min



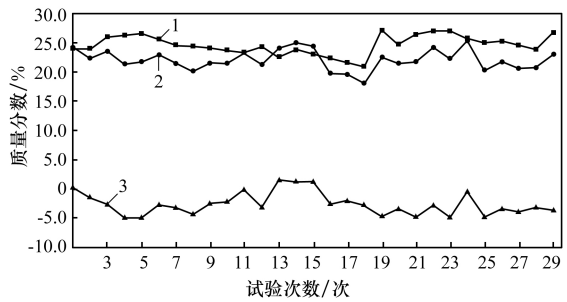
（a）二混后粒度识别仪设备；（b）粒度识别效果

图 1　二混后粒度识别仪设备及识别效果

Fig. 1　Particle size detector and recognition effect on top of the rear belt of the second mix

所取的 5 个样 1 000 g 混合后，送冰柜速冻 30 min 后，对其进行筛分试验（自动筛分过程中采用 0.5、1、3、5 mm 的方孔筛）；然后统计两种情况下 >3 mm 和 <3 mm 粒级占比。

筛分试验结果与设备识别结果对比如图 2 所示。由图 2 可知，粒级识别仪对混合料粒度的识别结果和人工取样结果趋势基本吻合，整体偏差在 ±5% 以内，可以满足大规模工业生产的需求。



1—识别结果 <3 mm；2—实验结果 <3 mm；
3—偏差（识别结果与试验结果的差值）。

图 2　粒度识别仪与人工取样结果对比

Fig. 2　Comparison of particle size identification instrument and manual sampling results

由于图像识别仪能对皮带表面的混合料进行粒级识别，为了进一步验证皮带上混合料表面与整体的粒度组成是否一致，又分别从二混后皮带下料口处和皮带表面进行人工取样 10 组（每组三次）进行比对。具体试验结果如表 1 所示。由表 1 可以看出，两者偏差均在 ±5% 以内，也就是说皮带表面的粒级组成基本可以表征混合料的整体特征，即图像粒级识别仪在对混合料的粒级组成判定方面是准确可靠的。

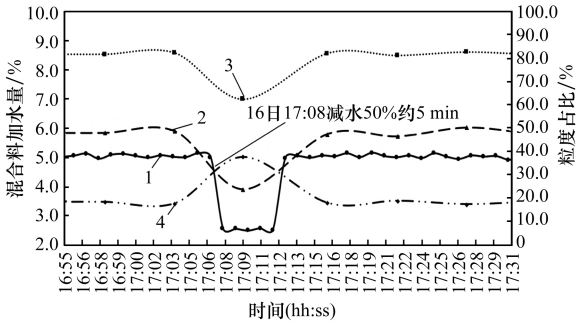
表 1 混合料表面与整体粒级组成对比

Table 1 Comparison of surface and overall particle size composition of the mixture

序号	二混后皮带下料口 >3 mm 粒级质量分数/%	二混后皮带表面 >3 mm 粒级质量分数/%	偏差/%
1	59.29	57.28	2.01
2	62.58	64.86	-2.28
3	61.88	58.67	3.21
4	68.09	71.03	-2.94
5	64.14	66.24	-2.10
6	61.79	64.45	-2.66
7	64.44	68.65	-4.21
8	61.24	60.53	0.71
9	62.87	64.22	-1.35
10	66.87	66.30	0.57
平均值	63.32	64.22	-0.90

2 粒度组成与加水量的关系

为了研究混合料粒度组成与混合料水分的相关性及敏感性关系，进行人为干预加减水量 50%，并取生产稳定时段的数据进行分析，试验结果如图 3 和图 4 所示。



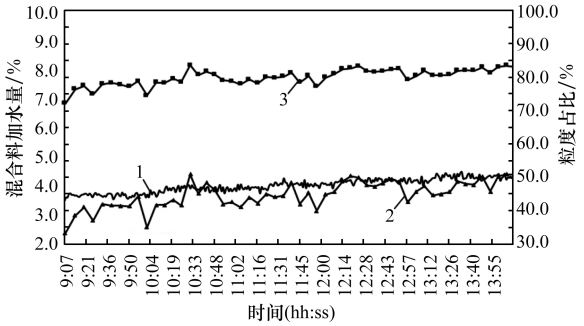
1—混合料加水量；2—>5 mm；3—>3 mm；4—<3 mm。

图 3 减水对混合料粒级组成的影响

Fig. 3 Effect of water reduction on the particle size composition of the mix

由图 3 可以看出，在 8 月 16 日下午 5：08 分开始减小一混加水量 50%，从设备识别结果上可明显得出：其 >5 mm 和 >3 mm 的粒级组成占比均明显降低，且粒级组成的变化对加水量的变化较为敏感。

由图 4 可以看出，粒级组成的变化与加水量的跟随性较好，在生产稳定过程中，当混合料单位料批加水量逐渐上升时，其 >3 mm 和 >5 mm 的粒级组成占比均随之增加，且 >3 mm 的粒级对水分的变化更为敏感。



1—混合料加水量；2—>5 mm；3—>3 mm。

图 4 加水对混合料粒级组成的影响

Fig. 4 Effect of water addition on the particle size composition of the mixture

3 智能配水控制原理和流程

本文开发的智能配水系统主要是在粒度识别仪满足识别要求的基础上，采用制粒效果来控制加水量。其基本路径是将粒级识别技术应用在混合料加水制粒过程中，通过实时对二混后混合料粒度进行分析，基于分析数据结合前馈因素和后馈因素智能控制算法实现烧结混合料工业生产的配水智能闭环控制。

整体控制逻辑：通过对混合料粒度分布值的在线检测，建立烧结制粒影响模型以及不同烧结原料质量下水分控制标准模型，作为反馈环节，对配水量进行微调。同时，建立配料稳定性评价模型对下料状态的波动，及时反馈到输入信号，经输入变量融合算法获得一混加水控制量信号，从而优化稳定控制混合料加水，作为前馈控制环节。总之，基于配料稳定性的自适应前馈控制 + 基于粒度识别的模糊反馈控制，可实现烧结过程稳定水分的控制。

3.1 前馈因素分析

前馈因素主要包含配料稳定性对混合料水分与粒度的影响，包括下料量、熔剂配比、除尘灰配比、返矿配比、燃料配比等，根据实时波动量进行实时主动调控加水量来消除由于前端配料环节的波动对水分的影响，进而影响到制粒效果。具体参数设置如表 2 所示。

表 2　前馈自动配水设计参数

Table 2　Design parameters of feed – forward automatic water distribution

生产参数	具体数据	生产参数	具体数据
初始物料粒级/%	46.00	一混进水管流量控制容错量/($t \cdot h^{-1}$)	0.30
初始物料粒级上限/%	49.00	单位白灰加水量基准/t	0.60
初始物料粒级下限/%	43.00	白灰配比控制容错/%	1.00
计时周期/s	960.00	总下料量控制容错量($t \cdot h^{-1}$)	10.00
二混出口物料水分上限/%	8.50	除尘灰配比上限/%	3.00
二混出口物料水分下限/%	7.20	白灰下料瞬间波动量上限($t \cdot h^{-1}$)	2.00
单位料批加水量基准/%	2.70	总下料量下限值($t \cdot h^{-1}$)	300.00
单位料批加水量下限值/%	3.00	配比变化及料批变化控水等待时间/s	60.00
粗调水量设定值/($t \cdot h^{-1}$)	0.50	手动模式确认等待时间/s	300.00
精调水量设定值/($t \cdot h^{-1}$)	0.30	阀位下发容错量/%	0.70
阀门控制补偿值/%	0.40	设定值变化等待时间/s	180.00
开机后阀门开度增加量/%	0.00	设定白灰下料量波动上限($t \cdot h^{-1}$)	0.20
开机加水后减水时机/s	360.00	开机后后台程序投入时间/s	1 200.00

3.2　后馈因数分析

后馈控制主要是基于粒度数据，依据混合料粒度组成数据(表 3)进行实时优化调整：① 当混合料粒级组成 < 3 mm 超过上限或 > 8 mm 低于下限时，触发加水指令，每次增加 0.5 t 水；② 当混合料粒级组成 > 8 mm 超过上限或 < 3 mm 低于下限时，触发加减水指令，每次降低 0.5 t 水；③ 当混合料粒级组成 3 ~ 8 mm 占比超过上限时，触发减水指令，每次减水 0.3 t，当低于下限时，触发加水指令，每次加水 0.3 t。

表 3　后馈水分闭环控制参数

Table 3　Control parameters of feed-back moisture closed-loop

项目	< 3 mm	3 ~ 8 mm	> 8 mm
控制上限标准/%	27	65	30
控制下限标准/%	15	52	15

3.3　基于混合料粒度的监督自学习优化控制算法

在前馈因素与后馈因素综合作用的情况下，提出了基于混合料粒度的有监督自学习优化控制算法进行优化控制，在实现过程中采用下料量、熔剂配比、除尘灰配比、返矿配比、燃料配比、粒度分布等影响因子的主成分分析法，通过该方法找出主成分，然后通过相似度算法在历史生产数据中找出若干个相似案例，利用这些案例的加水量求解最新一次加水量(图 5)。

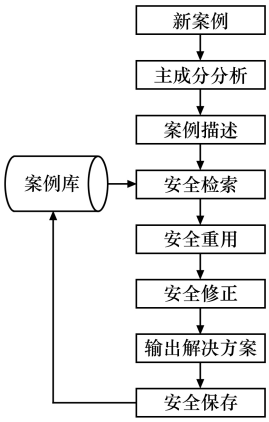


图 5　模型算法流程

Fig. 5　Process of model algorithm

4　系统应用

为了更好地对烧结混合料加水进行闭环控制跟踪，根据以上原理研究开发的智能配水系统经过不断调试摸索，目前已经在青岛特钢 3# 烧结机实现自动闭环控制，且已连续运行一年以上，运行情况良好。表 4 为该系统投用前后生产参数对比。由表 4 可知，投用后，烧结生产各项参数得到了明显改善。

5　结　论

粒级识别仪在对烧结混合料粒度组成进行检测时误差可控制在 ±5% 以内，可以满足生产需

表4 智能配水系统投入前后生产参数对比

Table 4 Comparison of production parameters of before and after the implementation of intelligent water distribution system

参数	投入前	投入后
烧结利用系数/($t\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$)	1.36	1.41
烧结矿转鼓指数/%	78.10	78.64
烧结负压/kPa	12.71	12.14
烧结主抽频率/Hz	39.40	38.00

求，通过混合料粒级组成与加水量建立关系，进而实现烧结的智能配水，避开了水分测定稳定性差的限制性环节，构建的基于有监督自学习算法的烧结混料配水算法，建立了从粒度感知到模型优化控制的新路径，通过前馈和后馈控制策略相结合实现了基于混合料粒度的有监督自学习优化配水闭环控制的工业应用。

参考文献：

[1] 孙乐针，金伟．烧结料加水混合过程的改进神经网络建模[J]．大连工业学院学报，2003(4)：288－292.
SUN Lezhen，JIN Wei. Improved neural network modeling for mixing process of sinter with water[J]. Journal of Dalian Institute of Technology，2003(4)：288－292.

[2] 蔡洪岩．烧结混合料水分智能控制应用与自学习建模研究[D]．沈阳：东北大学，2016.
CAI Hongyan. Application of intelligent control and self-learning modeling of sintering mixture moisture[D]. Shenyang：Northeastern University，2016.

[3] 吴晓峰，匡式文，张佳华，等．烧结混合料加水控制策略分析与应用[J]．山东冶金，2009，31(3)：49－51.
WU Xiaofeng，KUANG Shiwen，ZHANG Jiahua，et al. Analysis and application of water addition control strategy for sintering mixture[J]. Shandong Metallurgy，2009，31(3)：49－51.

[4] 聂慧远，李邵铭．粒子群优化算法优化BP神经网络联合PID模型的烧结自动加水控制[J]．冶金自动化，2022，46(1)：44－53.
NIE Huiyuan，LI Shaoming. Optimization of BP neural network combined with PID model based on PSO algorithm auto wetting control of sintering[J]. Metallurgical Industry Automation，2022，46(1)：44－53.

[5] 范晓慧，甘敏，李文琦．烧结混合料适宜制粒水分的预测[J]．北京科技大学学报，2012，34(4)，373－377.
FAN Xiaohui，GAN Min，LI Wenqi. Prediction of suitable water content on the granulation of a sintering mixture[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2012，34(4)：373－377.

[6] 谭奇兵，文虹力，蒋杰．烧结混合料水分自动控制系统的开发及应用[J]．烧结球团，2019，44(2)：18－23.
TAN Qibing，WEN Hongli，JIANG Jie. Optimization of particle size of sintering mixture based on fuzzy PID control[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(2)：18－23.

[7] 杨小明，吴岳明．烧结混合料自适应前馈积水控制算法[J]．烧结球团，2021，46(4)：20－24.
YANG Xiaoming，WU Yueming. Self-adaptive feedforward water addition control algorithm for sinter mixture[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(4)，20－24.

[8] 冶飞．生石灰对烧结混合料水分控制的影响分析和探讨[C]//2011年度全国烧结球团技术交流年会论文集：长沙：烧结球团编辑部，2011：107－110.
YE Fei. Analysis and discussion on the influence of quick lime on the water control of sintering mixture[C]// Proceedings of 2011 National Sinter Pelletizing Technology Exchange Annual Conference：Changsha：Editorial Department of Sintering and Pelletizing，2011：107－110.

[9] 聂慧远．烧结生产自动加水控制的难点及实现途径[J]．烧结球团，2021，46(6)：69－74.
NIE Huiyuan. Difficulties and realization ways on controlling automatic water addition in sintering production[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：69－74.

[10] 郭相君，张良力，贺敬岩，等，基于模糊PID控制的烧结混合料粒度优化[J]．烧结球团，2019，44(6)：1－6.
GUO Xiangjun，ZHANG Liangli，HE Jingyan，et al. Optimization of particle size of sintering mixture based on fuzzy PID control[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(6)：1－6.