烧结生产自动加水控制的难点及实现途径

聂慧远
(上海梅山钢铁股份有限公司 炼铁厂,江苏 南京 210039)

摘要: 烧结生产过程中的自动加水控制,对稳定烧结工艺"风、水、碳"三要素中的"水"起到了关键作用。本文通过研究配料量、物料性质、流量及检测方式对混合料水分控制的影响,系统分析自动加水控制的难点和关键点,并提出应对策略。实际方案中,考虑一混、二混水分测量值,以及典型亲水、疏水物料和除尘灰料量等波动对水分控制的影响,并采用多变量融合控制算法进行加水自动控制;进行安全防错设计,以避免设备及控制参数异常导致的"跑干料、跑稀料"风险,提高生产系统的可靠性。实际运行数据表明,实施上述自动加水系统后,水分的稳定性和烧结机的利用系数都有了较明显提高。

关键词: 烧结物料; 亲水性; 透气性; 电导式测水; 多变量融合; 自动加水
中图分类号: TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2021)06-0069-06
doi: 10.13403/j.sjqt.2021.06.087

Difficulties and realization ways on controlling automatic water addition in sintering production

NIE Huiyuan
(*Ironmaking Plant, Shanghai Meishan Iron & Steel Co., Ltd., Jiangsu* 210039, *Nanjing, China*)

Abstract: Controlling automatic water addition in the sintering process plays a key role in stabilizing the "water" in such three elements as "wind, water and carbon" in the sintering process. By studying the influence of batching quantity, material properties, flow rate and detection method on the moisture control of the mixture, the difficulties and key points on controlling automatic water addition are analyzed systematically, and countermeasures are proposed. In the actual solution, the influence of the moisture measurement values of the first and second mixtures, as well as the fluctuations of the typical hydrophilic and hydrophobic materials and the amount of dust removal ash material, on the moisture control are considered, and the multi-variable fusion control algorithm is used to automatically control the water addition. A safety and error-proof design is carried out to avoid the risk of "running dry material and thin material" caused by abnormal equipment and control parameters, and to improve the reliability of the production system. The actual operation data shows that the stability of moisture and the utilization coefficient of the sintering machine have been significantly improved after the implementation of the above automatic water addition system.

Key words: sintering material; hydrophilicity; air permeability; conductive water measurement; multivariate fusion; automatic water addition

烧结矿是高炉炼铁的最主要原料之一,其生产过程包括配料、加水混合、布料点火、风温和台车机速控制等[1]。其中,混合加水工序的主要作用是在混合料准备过程中起到润湿、促进物料成球,从而确保烧结过程料层的透气性[2]。作为烧结工艺"风、水、碳"核心三要素之一,混合料水分的稳定性、适宜性至关重要[3]。早期烧结厂专门设置混合加水岗位,通过"眼观、手摸"等方法,手动调节加水量,后多采用中控方式,但因多变量复杂过程的加

收稿日期: 2021-05-07; **修回日期:** 2021-05-27
作者简介: 聂慧远(1978—),男,工程师,从事烧结技术研究及生产管理工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

水混合过程自动控制难度很大，多数厂家依然采用中控手动控制方式[4]。随着智慧制造在冶金行业的推广，实施烧结生产的自动加水控制系统势在必行，也十分迫切。

本文通过分析影响烧结加水自动控制的难点和应对策略，通过细化并改进控制方案，最大限度消除对加水控制的不稳定影响因素，优化控制设备，并采用多变量联动前馈融合加水控制方案，以期为类似项目提供参考。

1 自动加水控制的难点及应对策略

1.1 控制难点

烧结生产自动加水控制是一个较复杂的系统，影响因素众多且复杂[5]。

1.1.1 配料量变化的影响

在烧结配料过程中，配料量处于动态变化中[6]。配料量变化有两个方面：① 主动变化，指中控室操作人员根据生产调度主动调整配料量；② 被动变化，指物料在下料过程中，受物料性质、配料设备、电子秤精度、控制偏差等因素产生的波动。因不同物料水分质量分数的不同，配料量的变化必然影响物料总水分的变化。

梅钢4号烧结机配料现场有19个大型物料仓和对应配料系统，受生产节奏、配料设备、物料性质等因素影响，实际配料量波动幅度较大，具体波动范围如表1所示。

表1 物料配比及实际配料量波动范围

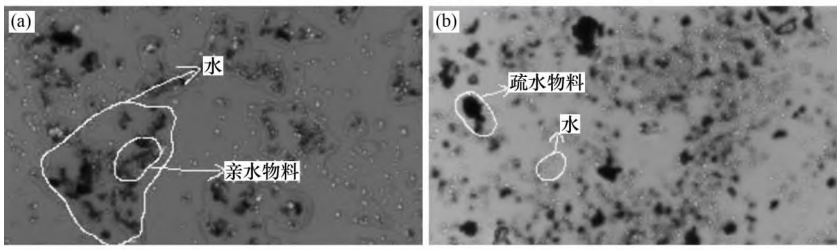
Table 1 Fluctuation range of material ratio and actual batching

物料仓号	物料名称	常规配比(质量分数)/%	配料波动量/($t \cdot h^{-1}$)
1,2,3,4	混匀矿	57.14	354.27~399.98
5,6	梅精	19.00	117.80~133.00
7,8	焦粉	4.10	25.42~28.70
9,10	石灰石	2.29	14.20~16.03
11,12	白云石	3.47	21.51~24.29
13	槽下返矿	9.50	58.90~66.50
14,15	内返矿	外配	100.00~160.00
16,17	除尘灰	外配	8.00~16.00
18,19	生石灰	4.50	27.90~31.50

1.1.2 物料性质的影响

烧结混合料由多种粉体物料经配料组成，每种物料都有亲水或疏水特性。亲水性指对水具有亲和能力的性质。物料的亲水或疏水性可由接触角进行衡量，在固、液、气三相交界处，气体和液体界面与固体和液体界面的夹角称为接触角[7]。接触角小于90°，亲水性较好；接触角大于90°，亲水性较差。实践表明，物料的亲水或疏水性对于加水混合过程中游离水的质量分数会产生一定影响，不同亲水性物料数量波动时产生的物料之间游离水的形态会有明显变化，导致采用电导法测定水分的数值会有偏差，更容易引起混合料含水量的波动。

烧结混合料中，亲水性最强的物料是生石灰，疏水性最强的是除尘灰。图1为生石灰和除尘灰的显微图。由图1可看出，生石灰与水之间的融合较好，物料之间游离水的密度稍低；除尘灰与水之间的离散度较高，融合度较低。为消除影响，加水过程中可以根据物料的亲水和疏水特性，有针对地进行加水补偿，保证混合料的总含水量满足工艺要求。



(a) 生石灰；(b) 除尘灰

图1 亲水性和疏水性粉体物料的显微照片

Fig. 1 Micrograph of hydrophilic and hydrophobic powder material

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.1.3　检测的影响

混合料水分在线检测是烧结自动加水控制的关键之一。水分检测，既要考虑灵敏度、精确度，又要考虑稳定性、代表性。常见的混合料在线水分检测方法有 NIR 近红外检测法、微波检测法、电导法等，以往个别场合还采用中子检测法[8-9]。由于中子具有放射性，其安装、使用、维护，以及后期的处置，均存在较大安全风险，目前使用较少。

各检测方法均有其测量精度缺陷，如：现场粉尘、光线、温度等均会对红外检测法的精度造成影响；微波检测法只能测定物料的吸附水，且现场带磁性粉尘、皮带内的金属钢丝等会对检测造成极大干扰[10]；电导测定法因其检测探头只能接触物料的表面，且接触电阻的波动较大，其检测值的代表性存在一定局限性[11]。

1.1.4　流量调节的影响

水分检测值偏离目标时，水量调整环节也是影响自动加水精度的难点之一，主要表现在：流量计检测不准确，电磁调节阀灵敏度降低，检测与调节时滞导致电磁调节阀大开大合。

1.2　应对策略

1.2.1　下料量的控制

下料量的控制技术已经比较成熟，但因设备结构特性所限，实际下料量与期望值之间的偏差难以完全消除。为使下料更流畅，控制更准确，采取以下措施：

(1) 将配料矿槽衬板改为表面光洁且耐磨的聚乙烯材质，避免物料在矿槽内流动不畅，减少积料概率。

(2) 调整配料设备的闸门或翻板，使电子秤在其量程的 1/2 ~ 2/3 范围工作，以保证精度。

(3) 将矿槽料位持续控制在 1/3 ~ 2/3，以保证排料口压力的相对稳定。

(4) 采用柔性控制技术调节配料变频，防止大幅调整引起下料量更大的波动。

(5) 设计实际下料量与期望值偏差报警，当偏差大于 5% 时，在中控机上发出颜色和声音报警，当偏差大于 10% 时，将配料圆盘停机。

1.2.2　亲水或疏水性物料的使用原则

烧结生产所使用的物料中，亲水性最好的是生石灰，疏水性最好的是除尘灰。以往 3、4 号机曾两度使用预润湿办法来使用除尘灰，但均因其亲水性太差、水分吸收极不均匀、堵料频繁等原因而弃用。经长期实践，除尘灰使用依据“细水长流”的原则，配比不超过 3%，单次调整幅度不大于 0.5%。除尘灰经一混充分混合后，基本不会对二次混合产生明显影响。因生石灰需要和一定的水分进行化学反应，其配比一般固定，若因特殊原因需要调整配比时，根据反应消耗量同时调整加水量。

1.2.3　复合式水分测量值拟合修正

电导式在线水分仪因测量原理所限，难以保证全量程范围内数据准确，但变化趋势是较准确的。为此，在二混后增设快速失重式水分仪作为辅助测量信号，两个测量信号同时送入计算机，由计算机对测量信号进行间断复合校正处理，以修正补偿在线水分仪的连续测量值，实现电导式水分仪的高性能测量。

1.2.4　加水量调节使用水泵变频控制

鉴于调节阀的灵敏度和滞后性问题，改用变频泵进行加水量的调节和控制。变频泵具有稳定性高、滞后小、可源头控制等优势，结合流量计，实现加水量的精准控制、快速调节。

2　自动加水控制的实现

烧结混合料水分控制系统能否将关键影响因素逐一识别，并适时调节修正，是自动加水最终有效控制的关键。合理的程序控制逻辑，需要将物料下料量的波动、亲水或疏水物料的变化、水量调节的幅度和时机，以及检测值本身的误差等诸多因素考虑进来，进行合适的融合运算，方可使水分值无限趋近目标值。

2.1　程序控制原理

烧结厂采用二次混合工艺，实现烧结物料的混匀、加水、造球功能。一混阶段达到物料混匀、润湿、生石灰反应等目的，加水量一般占总加水量的 80% 左右，水分值控制在(6.3 ± 0.3)%。二混阶段达到物料造球的目的，加水

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

主要为物料表面补充水，使其造球效果更好、更紧密，加水量一般占总加水量的20%左右，水分值控制在(6.9±0.3)%。但因混合机加水控制系统滞后和惯性都较大，且受影响因素较多，仅靠二次混合的常规闭环控制难以达到理想的水分控制目标，因此采用多变量联动前馈控制方式，通过融合控制算法，以克服系统的滞后和惯性。控制系统结构如图2所示。

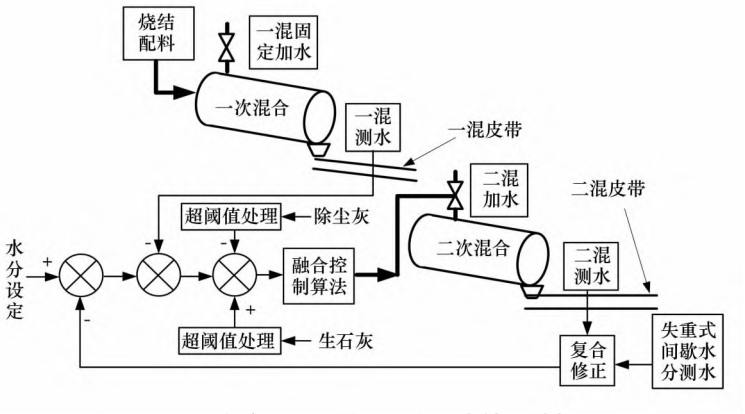


图2 多变量联动前馈融合加水控制结构

Fig. 2 Fusion water adding control structure using multi-variable linkage feedforward method

为简化控制系统，一混加水采用固定加水，设定目标值为6.3%。系统主要控制二混的加水量，水分设定目标值为6.9%。通过二混在线测水值结合快速失重式间歇水分检测值的复合修正，作为反馈量，构成闭环。其中，生石灰和除尘灰采用小流量添加，当流量超阈值时，通过超阈值处理程序将其影响加入控制系统。前馈的主要信号为一混在线测水值，当一混水分发生波动时，及时反馈到输入信号，经输入变量融合算法获得二混加水控制量信号，从而控制二混加水。整个控制逻辑和融合算法由计算机系统完成。实践证明，采用该控制结构和原理，其水分控制的稳定性和控制精度远大于常规单回路控制系统。

2.2 防错设计

为了防止设备突发故障和异常导致实际加水量过大或过小，引起烧结混合料“跑稀料”或“跑干料”，结合现场生产经验和出错类型，实施如下的防错设计。

(1) 检测到混合机圆筒停机，加水系统立即停止，提醒操作人员接管控制并进行检查。

(2) 一混加水量超出限值±2 t/h、二混加水量超出±1 t/h时，锁定当前加水量，退出自动加水程序并报警，由人工确认实际加水变化情况。

(3) 当一混、二混水分检测到超目标值±0.5%时，锁定当前的加水量，退出自动加水程序并报警，由人工确认实际加水变化情况。

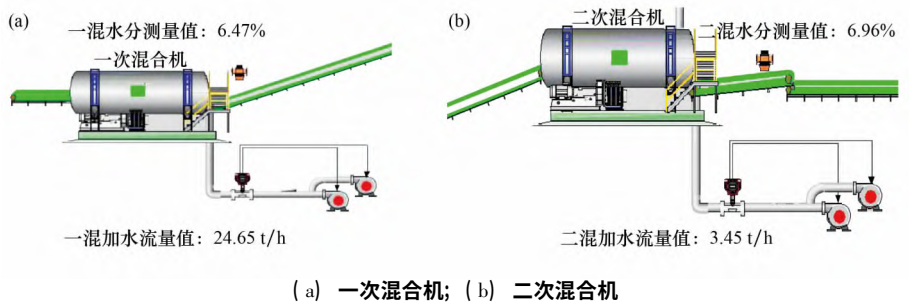
2.3 系统实现

由于两级混合过程的惯性和滞后性，导致物料从进入混合机到混合完成需要3~4 min，一混完成后又要经过几十米的胶带机输送到二次混合机混合。系统控制的目标是把二次混合后的水分控制在(6.9±0.3)%。为了简化控制过程，在正常工况下，一次混合相当于粗调，可以采用固定加水量，目标值设为6.5%，这样一混后的水分波动主要为配料改变时引起的微小波动；同时将该水分波动作为二次混合加水控制系统的前馈输入量。在二混加水自动控制逻辑中，加入生石灰和除尘灰的门限逻辑：当生石灰和除尘灰配料量在门限以下，则对控制系统无影响；当达到门限以上，则根据对水分的影响性质适当加入修正量输入到融合控制算法的输入端。控制算法采用常规BP-PID控制算法，控制系统界面如图3所示。

3 应用效果对比

烧结混合料自动加水控制前、后的水分、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

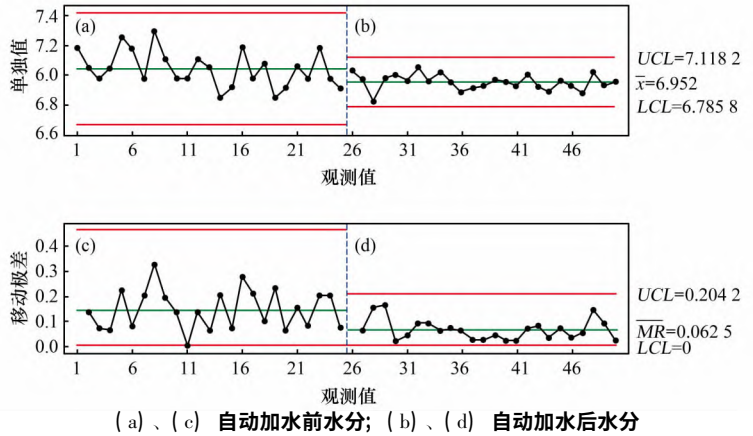


（a）一次混合机；（b）二次混合机

图 3　一、二次混合加水监控界面

Fig. 3　Primary and secondary mixed water adding monitoring interface

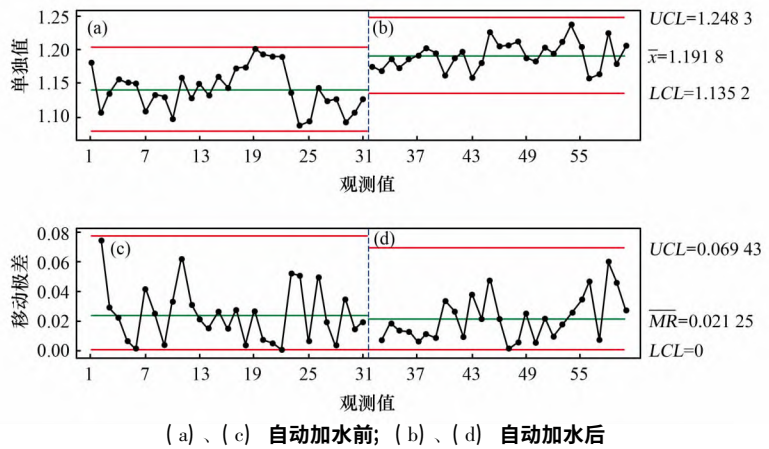
烧结机利用系数对比如图 4、5 所示。由图 4 可看出：自动加水实施后，水分均值为 6.95%，与工艺目标值 6.9% 相差 0.05%，水分波动更小；在其他条件基本不变时，自动加水实施前、后，烧结利用系数由 1.141 t/(m²·h) 提高到 1.192 t/(m²·h)，上升了 0.051 t/(m²·h)。



（a）、（c）自动加水前水分；（b）、（d）自动加水后水分

图 4　烧结混合料水分自动加水前、后水分对比

Fig. 4　Comparison of moisture value of mixture before and after automatic water addition



（a）、（c）自动加水前；（b）、（d）自动加水后

图 5　自动加水前后烧结机利用系数对比

Fig. 5　Comparison of sintering utilization coefficient before and after automatic water addition

烧结混合料实现自动加水后，二混制粒效果及料层透气性指数明显提升，具体如表 2 所示。由表 2 可知，混合料平均粒度上升了 0.45 mm，透气性指数上升了 1.17。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 自动加水前、后制粒效果及料层透气性指数对比

Table 2 Comparison of granulation effect and air permeability before and after automatic water addition

项目	粒度组成(质量分数)/%				平均粒度/mm	透气性指数
	-1 mm	1~3 mm	3~5 mm	+5 mm		
自动加水前	14.38	34.16	31.57	19.89	3.27	7.99
自动加水后	7.15	29.18	37.59	26.08	3.72	9.16
前后对比	-7.23	-4.98	+6.03	+6.19	+0.45	+1.17

4 结 语

本文通过分析烧结混合料对加水控制的影响因素和自动加水控制的难点，并逐一采取针对性措施，使梅钢4号烧结机的混合料水分调节和控制趋于稳定。具体结论如下。

(1) 烧结生产加水量主要受配料量变化、物料性质、检测结果、流量调节精度等因素影响。

(2) 为了保证加水的稳定性，应保证下料量的流畅、严格控制疏水性和亲水性物料的配比、加强水分仪测量精度、采用变频泵调节加水量。

(3) 采用多变量联动的一混加水前馈控制及二混加水融合控制算法，有助于克服传统加水控制系统的滞后和惯性，该策略实施后，水分均值与目标值仅差0.05%，制粒效果得以改善，混合料平均粒度上升0.45 mm，烧结机利用系数提高0.05 t/(m^2·h)。

参考文献:

[1] 潘存俭. 高炉炼铁节能减排技术探析[J]. 中国金属通报,2019(8):105-107.
PAN Cunjian. Analysis of energy-saving and emission-reduction technologies for blast furnace ironmaking[J]. China Metal Bulletin,2019(8):105-107.

[2] 刘燊辉,白凯凯,倪桂虎,等. 燃料粒度对铁矿烧结的影响研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):17-22.
LIU Shenhui,BAI Kaikai,NI Guihu,et al. The effect of fuel particle size on iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):17-22.

[3] 蔡泉. 铁矿石烧结过程终点控制方法研究与应用[D]. 沈阳:东北大学,2013.
CAI Quan. Research and application of endpoint control method in iron ore sintering process[D]. Shenyang: Northeastern University,2013.

[4] 顾亚楠. 宣钢超高碱度烧结生产实践[J]. 河北冶金,2014(2):21-23.
GU Yanan. Production practice of ultra-high basicity sintering in Xuan Steel[J]. Hebei Metallurgy,2014(2):21-23.

[5] 董亚锋,沙永志,曹军. 微波测量烧结混合料水分的试验研究[J]. 烧结球团,2008,33(6):18-21.
DONG Yafeng,SHA Yongzhi,CAO Jun. The experimental research of microwave moisture measuring technique on sinter mixture[J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(6):18-21.

[6] 范永坤. 烧结机混料自动加水控制系统设计与应用[J]. 数字通信世界,2020(3):180;206.
FAN Yongkun. Design and application of automatic water adding control system for sintering machine mixing[J]. Digital Communication World,2020(3):180;206.

[7] 丁晓峰,管蓉,陈沛智. 接触角测量技术的最新进展[J]. 理化检验(物理分册),2008(2):84-89.
DING Xiaofeng,GUAN Rong,CHEN Peizhi. The latest development of contact angle measurement technology[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part(Physics),2008(2):84-89.

[8] 李万新,郭荣强,于洋,等. 烧结混合料水分在线检测[J]. 烧结球团,2001,26(3):37-39.
LI Wanxin,GUO Rongqiang,YU Yang,et al. On-line measurement of sinter mixture moisture[J]. Sintering and Pelletizing,2001,26(3):37-39.

[9] CLEVERS J G P W,KOOISTRA L,SCHAEPMAN M E. Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2008,10(3):388-397.

[10] 赵晶,黄操军,李博识. 谷物含水率检测方法综述[J]. 农业科技与信息,2018(16):46-49.
ZHAO Jing,HUANG Caojun,LI Bozhi. A review of methods for detecting grain moisture content[J]. Agricultural Science and Technology and Information,2018(16):46-49.

[11] 谢鹏宇,刘泽鑫. 土壤水分测量原理与技术方法研究[J]. 现代农业科技,2020(23):166-168.
XIE Pengyu,LIU Zexin. Research on the principles and technical methods of soil moisture measurement[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2020(23):166-168.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net