燃料粒度检测机器人系统关键技术研究

曾小信，李宗平，文 武，过宇晟
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205）

摘要： 针对烧结工序燃料粒度无法在线检测，以及人工检测滞后性大的难题，提出了一种基于机器人和多层智能筛分机的燃料粒度检测系统。该系统首先利用取样装置获取燃料样品，再采用微波装置对燃料进行干燥，干燥后的燃料再利用多层智能筛分机进行筛分，最后，利用一体化称重装置获取筛分后的各个粒径的燃料质量，从而计算出燃料粒度分布值。系统在某钢厂投入实际使用，运行结果表明其检测误差 <5%，完全可以取代人工检测。重点阐述了该系统涉及的定质量缩分技术、微波快速干燥技术、多层智能筛分技术等关键技术，以期为该系统的改进以及大范围应用提供借鉴与指导。

关键词： 粒度检测；机器人系统；微波干燥；定质量缩分；多层筛分
中图分类号： TF046.4；TP242 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)06－0069－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.06.086

Research on key technologies of robotic system of fuel grain size measurement

ZENG Xiaoxin，LI Zongpin，WEN Wu，GUO Yusheng
（1. Zhongye Changtian International Engineering Co.，Ltd.，Changsha 410205，Hunan，China；2. National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System，Changsha 410205，Hunan，China）

Abstract: In order to solve the problem that the fuel grain size in the sintering process cannot be detected online and the hysteresis quality of manual detection is large，a fuel grain size measurement system based on robot and multi-layer intelligent screening machine is proposed. The sampling device is used by the system at first to obtain fuel samples，then the microwave device is used to dry the fuel，and the multi-layer intelligent screening machine is used to screen the dried fuel，and finally，the integrated weighing device is used to obtain the fuel quality of each grain size after screening，so as to calculate the fuel grain size distribution value. The system is put into practical use in a steel mill，and the operation results show that its detection error is less than 5%，which could completely replace manual detection. The key technologies involved in the system，such as fixed mass division technology，microwave rapid drying technology and multi-layer intelligent screening technology，are focused on in order to provide reference and guidance for the improvement and large-scale application of the system.

Key words: grain size measurement；robotic system；microwave drying；fixed mass division；multi-layer screening

燃料在铁矿石烧结过程中的主要作用是提供烧结所需的热量与气氛，对烧结矿的产、质量有很大影响[1]。燃料粒度分布是否合适是影响烧结过程顺利进行的关键。粒度过大，燃烧速度慢，燃烧带变宽，烧结透气性变差，垂直烧结速度下降，利用系数会降低；粒度过小，燃烧速度加快，

收稿日期： 2023－07－14；**修回日期：** 2023－08－24
基金项目： 国家重点研发计划课题(2022YFB3304705)
作者简介： 曾小信(1982—)，男，高级工程师，从事冶金自动化、过程控制、智能检测、机器人应用等方面的研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从而使燃烧层变薄，来不及产生足够的液相，导致烧结成品率降低，返矿量增加，能耗增大。而且粒度大小差异较大时，易发生偏析，大颗粒集中在料层下部，容易导致下部料过熔，而小颗粒由于燃烧速度快，在其周围不能保持一定的高温时间，不利于液相的形成会导致成品率降低[2-4]。另外，大量研究表明，燃料的配加量、粒度组成和燃烧性质等对烧结料层的温度分布、透气性指数、热量分布、燃烧带厚度、烧结料层的气氛等方面有直接影响。当焦粉的种类和配加量固定时，焦粉的粒度分布直接影响烧结生产技术经济指标以及烧结矿的产、质量[5-7]。目前，生产现场主要通过对辊破碎机和四辊破碎机两大设备来实现对燃料粒度的控制。首先外购的燃料经过对辊破碎机将烧结燃料破碎至10 mm以下，然后再经过四辊破碎机将燃料破碎到3 mm以下[8]。燃料粒度的精确控制均通过调整四辊破碎机的上两辊缝隙和下两辊缝隙值来实现。目前燃料粒度控制，基本依靠人工凭经验去调整四辊破碎机的辊缝隙值，导致燃料粒度波动大，误差大。为了实现燃料粒度的稳定、精确控制，必须构建燃料粒度闭环控制系统，本文提出的燃料粒度检测系统可实现燃料粒度的在线检测，检测值作为闭环控制系统的反馈值，是实现燃料粒度闭环控制的关键环节，对该系统中的定质量缩分技术、微波快速干燥技术、多层智能筛分技术等关键技术进行了详细阐述，以期为该系统的改进以及大范围应用提供借鉴与指导。

1 系统概述

本文涉及的燃料粒度检测机器人系统的硬件装置主要包括皮带中部采样机、弃料斗提机、弃料皮带、缩分皮带和机器人粒度检测主机等部件(图1)。机器人粒度检测主机由机器人本体、微波干燥设备、多层智能筛分机、一体化称重装置、接料及弃料回收装置等部件构成(图2)。

粒度检测流程：系统首先利用皮带中部采样机截取燃料皮带横截面的燃料样本，通过溜管进入到缩分皮带的缓冲仓内，再利用缩分皮带和定质量缩分算法获取500 g燃料样本，然后样本通过

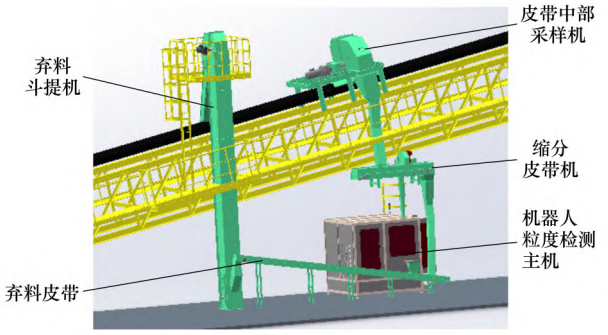


图1 燃料粒度检测机器人系统

Fig. 1 Robot system of fuel particle size detection

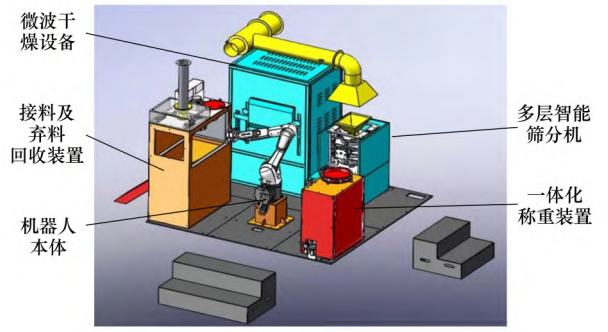


图2 机器人粒度检测主机结构布置

Fig. 2 Structure layout of robot particle size detection host

溜管输送到机器人粒度检测主机内。机器人夹取盛料盘放置在接料和弃料回收装置内获取燃料样本，然后机器人夹起盛料盘放置在一体化称重装置内进行称重，称重完毕，再放置在微波干燥设备内进行干燥。干燥完毕，再把燃料样本倒入多层智能筛分机进行筛分。筛分完毕后，系统称量不同孔径(1、3、5 mm)各筛盘的重量，最后根据粒度组成公式，计算出燃料的粒度组成分布值。检测后的燃料样本通过弃料皮带、弃料斗提机回收到燃料胶带机处。

按照粒度检测流程，系统完成一个完整的检测周期一般需要10～15 min。虽然没有做到实时检测，但是周期性的检测结果，可以作为燃料粒度在线反馈值，参与燃料粒度的闭环控制。燃料粒度闭环控制系统如图3所示。

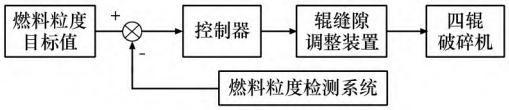


图3 燃料粒度闭环控制系统

Fig. 3 Closed-loop control system for fuel particle size

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

燃料粒度检测的基本原理：利用多层智能筛分机对样本进行筛分，筛分机根据燃料粒度检测需求部署 0、1、3、5 mm 不同孔径的筛网，筛分完毕后，系统称量不同孔径(1、3、5 mm)各筛盘的重量，最后根据粒度组成公式，计算出燃料的粒度组成分布值。假设 <1 mm 的燃料质量为 W_1，1～3 mm 的燃料质量为 W_2，3～5 mm 的燃料质量为 W_3，5 mm 以上燃料质量为 W_4，则燃料样本总质量 $W_z = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$，则不同粒径的燃料质量占比分布如下[8]：

$$\omega_i = \frac{W_i}{W_z} \times 100\% \tag{1}$$

式中：$\omega_i(i = 1、2、3、4)$ 为某粒度区间的粒度组成比例值，无量纲；$W_i(i = 1、2、3、4)$ 为某粒度区间的粒度质量，g；W_z 为样本总质量，g。

2　系统关键技术研究

系统采用的关键技术包括定质量缩分技术、微波快速干燥技术和多层智能筛分技术。为了更好的了解此系统，本文对这些关键技术进行了详细的阐述，以便对系统的广泛应用与改进提供参考。

2.1　定质量缩分技术

缩分装置由底开门称重装置、匀料板、缩分皮带、缩分刮扫器等组成(图 4)。缩分皮带前端设置自动称重斗，对燃料样本重量进行自动称量，根据称量数据自动调节缩分比。缩分采用皮带刮扫式缩分，在缩分皮带机燃料均匀输送中，截取料流全断面作为留样。缩分比应符合燃料样本缩分时其最小重量与粒度级的关系。缩分刮扫器前设计匀料板(整形部件和破拱部件)，将料流形成规则的料流段，提高缩分精度。

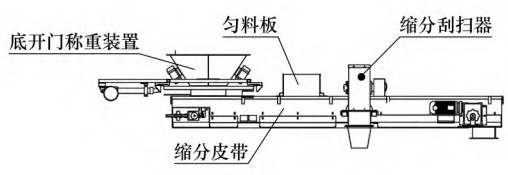


图 4　缩分装置结构

Fig. 4　Structure of ubdivision device

缩分比根据留样量、底开门称重质量等数据，利用缩分控制算法计算。缩分比最终通过调整刮扫器动作间隔时间来设定，每个子样刮扫次数不少于 4 次，缩分控制流程见图 5。

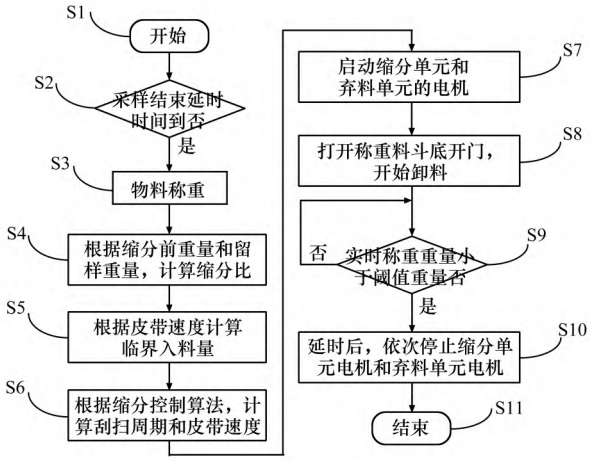


图 5　缩分控制流程

Fig. 5　Process of reduction control

通过底开门称重装置获取皮带中部采样器的燃料质量，按照以下步骤来执行缩分控制算法，通过缩分控制算法来调节缩分皮带速度，以及刮扫间隔周期，最终获取符合国家标准的检测样本。

步骤 1：根据缩分刮扫器的来料质量与留样质量，按照式(2)确定缩分比 i。

$$i = \frac{M_1}{M_2} \tag{2}$$

式中：M_1 为缩分前称重质量，kg；M_2 为留样质量，kg。

步骤 2：根据式(2)确定临界入料量 M_q。

$$M_q = \frac{M_1 \times T_1 \times V_1}{L} \tag{3}$$

式中：L 为刮扫器刮子宽度，m；V_1 为缩分皮带工频速度，m/s；T_1 为最小刮扫周期，单次刮扫一次所需时间，s。

步骤 3：根据缩分前称重质量 M_1 与临界入料量 M_q 相比较，按照两种情况来调节缩分皮带速度和刮扫间隔周期 T_2。当 $M_1 > M_q$ 时，缩分皮带速度 $V = V_1$，则缩分皮带的电机变频器的频率 f_1 = 50 Hz，刮扫周期 T_2 按照式(3)确定。当 $M_1 \leqslant M_q$，刮扫周期 $T_2 = T_1$，缩分皮带速度 V 按照式(4)确定，变频器频率 f_1 按照式(5)确定。缩分控制的具体流程如图 5 所示。

$$T_2 = i \times \frac{L}{V_1} \tag{4}$$

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$V = i \times \frac{L}{T_1} \tag{5}$$

$$f_1 = 50 \times \frac{V}{V_1} \tag{6}$$

2.2 微波快速干燥技术

微波干燥的过程是被干燥物体中具有极性的水分子吸收微波能量，并将其转化为热能，蒸发掉水分的过程。微波可以穿透物质内部进行加热，达到内外同时加热的效果，微波干燥具有速度快的特点。但由于电磁场在微波腔体内分布不均匀，导致微波干燥存在严重的不均匀性，且其不均匀性受到物料位置、微波功率和物料形状等众多因数的影响[10-12]。

根据微波快速干燥物料水分的特点，本系统采用微波干燥燃料样本，干燥后的燃料有利于后续筛分机的筛分作业，根据燃料的样本质量和特点，特制了微波干燥装置。该装置设计了旋转托盘，可以让微波干燥物料时，物料处于转动状态，以及微波腔内增加了搅拌器，使微波磁场更均匀，同时开发了微波功率自适应调节技术，通过以上装置和技术，基本可以解决微波干燥不均匀性的难题。

本文设计的干燥装置包括干燥箱炉体、微波电源、磁控管、红外测温仪、干燥箱炉门、炉门导轨、托盘、称重装置、排湿风机、微波功率调节模块等部件(图 6)。燃料干燥时，当装填物料的料盘进入到干燥箱，系统启动微波，开始微波干燥，直到物料水分被干燥完毕，然后微波装置停机。微波功率的调节通过微波功率调节模块输出信号来调节磁控管的功率实现。

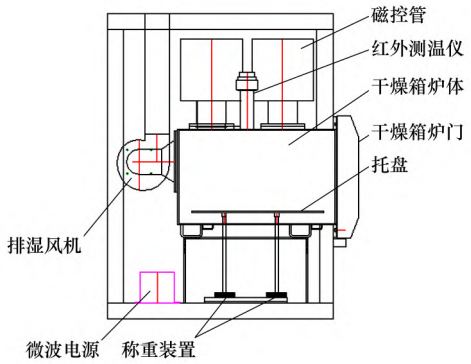


图 6 微波干燥装置侧视图

Fig. 6 Side view of microwave drying unit

为了实现燃料的快速干燥，以及避免燃料干燥过程中结块，或者燃料加热到高温态造成燃烧的事故，需要精确控制微波加热功率。微波干燥时间是根据燃料样本的重量在干燥过程中，单位时间内质量不再发生变化(则认为燃料被干透)，此时停止微波干燥，从开始干燥到停止干燥的这段时间记为微波干燥时间。

微波装置控制系统根据红外测温仪的温度数据 T_1，以及不同的燃料重量 W_1，进行微波功率(P_1)分段加热。当 $T_1 \leqslant 80$ ℃时，P_1 可用式(6)计算；当 80 ℃ $< T_1 \leqslant 100$ ℃，P_1 可用式(7)计算；当 100 ℃ $< T_1 \leqslant 120$ ℃时，P_1 可用式(8)计算；当 $T_1 > 120$ ℃时，$P_1 = 0$

$$P_1 = k_p \times \frac{W_1}{100} \times 500 \tag{6}$$

$$P_1 = k_{p1} \times \frac{W_1}{100} \times 500 + k_{p2} \times 200 \tag{7}$$

$$P_1 = k_{p1} \times \frac{W_1}{100} \times 500 + k_{p2} \times 200 + k_{p3} \times 100 \tag{8}$$

式中：T_1 为红外测温仪的温度，℃；P_1 为微波功率实际值，W；W_1 为燃料的物料重量[13]，g；k_p、k_{p1}、k_{p2}和 k_{p3}为修正系数，无量纲。系统为了避免微波加热时，物料存在局部温度过高的现象，除了控制微波加热功率之外，还采用了其他的技术措施来解决此问题。例如：在微波腔体内，增加搅拌器，可以使微波腔体内的电磁场更均匀；微波加热时利用旋转平台改变物料位置，可以使物料吸波更均匀。微波腔体结构如图 7 所示。

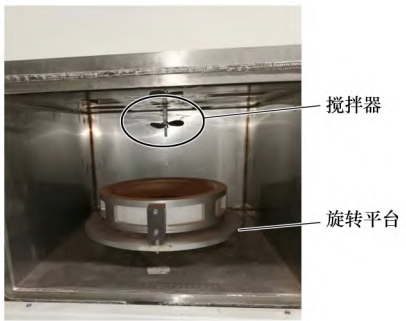


图 7 微波腔体结构

Fig. 7 Structure of microwave cavity

2.3 多层智能筛分技术

燃料粒度检测通过多层筛分技术来实现不同粒径的分级。为了实现燃料粒度的精确分级，本

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文研制了多层智能筛分机，来匹配燃料的特性。

目前，国内外很多学者[14-16]都用筛分效率评价筛分物料的分离程度，所以提高筛分效率一直是提高振动筛性能的核心目标之一[17]。筛分效率是指实际的筛下产物质量与理论筛下产物质量的比值，筛分效率直接影响燃料粒度检测值的准确性。为了提高筛分效率，研究可以从筛孔形状、筛网运动方式、振动频率和振动幅度等方面开展。

本文利用 EDEM 和 SOLDWORKS 软件建立物料筛分运动模式的仿真模型(图 8)，振动筛筛面尺寸为200 mm，含1、3、5 mm三层筛网，筛孔形状采用矩形。仿真结果见如图 9。由图 9 可知，筛分机采用圆形轨迹振动方式时，筛分效率最高。

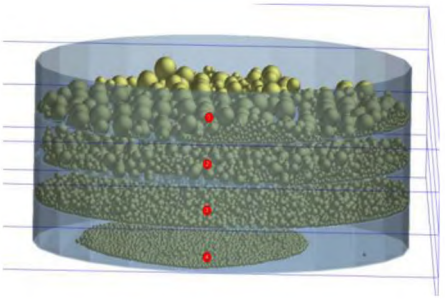
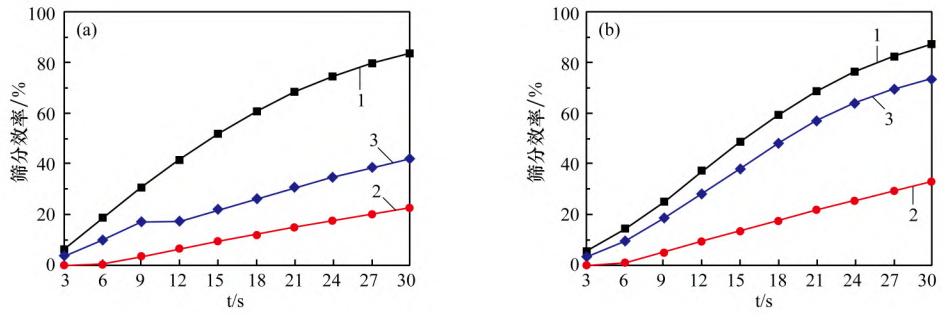


图 8　筛分机仿真模型

Fig. 8　Simulation model of screening machine



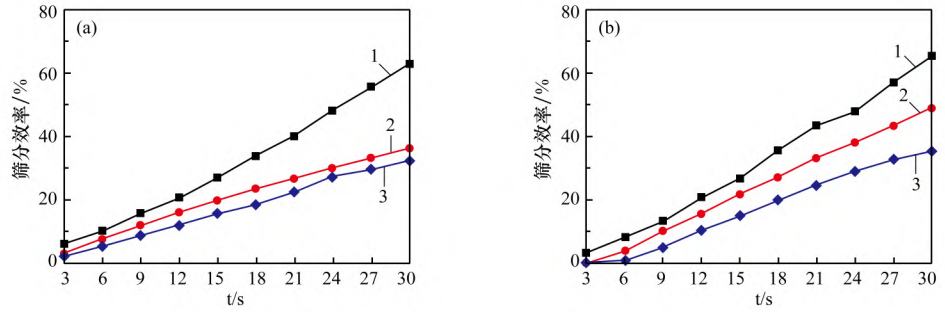
(a) 3 mm 筛网；(b) 5 mm 筛网

1—圆形；2—水平；3—斜向。

图 9　不同运动轨迹的筛分效率

Fig. 9　Screening efficiency of different motion trajectories

同理，利用 EDEM 软件建立不同筛孔形状的仿真模型，仿真结果如图 10 所示。由图 10 可知，筛网采用矩形筛孔形状，筛分效率最高。



(a) 3 mm 筛网；(b) 5 mm 筛网

1—矩形；2—方形；3—圆形。

图 10　不同筛孔形状的筛分效率

Fig. 10　Screening efficiency of of different sieve shapes

因此，研制多层智能筛分机时，建议采用矩形筛孔，筛分机的运动方式采用圆形轨迹振动。

在筛分机装置不变的情况下，系统控制筛分时间、筛分振动频率和振幅等参数，可使筛分效率达到最大值。利用实体筛分机设备进行多次试验，其试验结果表明，当振幅达到 50 mm/s，振动频率为 10 Hz，筛分时间为 180 s 时，其筛分效率达到峰值，此后，即便增加筛分时间，筛分效率也不再增加。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 应用效果

2021年6月，本文研制的烧结燃料粒度检测机器人系统在宝钢湛江钢铁公司三烧结厂正式投入使用，经过第三方专业检测公司检测，其燃料粒度检测与人工筛分做对比，其误差小于5%，结果如表1所示。检测精度完全满足实际生产的工艺要求，可以取代人工筛分的结果。同时，燃料粒度的检测结果利用通讯总线实时传输给上位机控制系统，中控室操作人员根据检测结果，可以及时精确控制燃料粒度，使之满足燃料粒度生产工艺要求，从而节省烧结工序生产的能耗，降低生产运行成本，提高烧结成品矿质量。

表1 人工筛分与筛分机筛分结果对比

Table 1 Comparison of the results of manual screening and screening machine

样本序号	平均粒径/mm（筛分机筛分）	平均粒径/mm（人工筛分）	偏差/mm	绝对值误差/%
样品1	1.96	2.02	-0.06	2.97
样品2	1.91	1.93	-0.02	1.04
样品3	2.05	1.98	0.07	3.41
样品4	2.07	2.15	-0.08	3.72
样品5	2.07	1.98	0.09	4.35
样品6	1.97	2.03	-0.06	2.96
样品7	1.95	1.87	0.08	4.28
样品8	1.90	1.96	-0.06	3.06
样品9	2.07	1.98	0.09	4.54
样品10	1.88	1.93	-0.05	2.59
样品11	1.85	1.83	0.02	1.09
样品12	1.98	2.03	-0.05	2.46

4 结束语

针对烧结燃料粒度检测，本文开发了一套烧结燃料粒度机器人检测系统，系统的检测值是实现燃料粒度闭环控制的关键环节，对燃料粒度的精确控制有重要的指导作用。燃料粒度的精准控制有利于降低烧结工序生产能耗，节省燃料成本，提高烧结矿质量。目前该系统已经在宝钢湛江烧结厂投入使用，使用效果良好，与人工筛选检测相比，系统检测误差 $<5\%$，且检测结果更加及时、准确，排除了主观人为误差。为了满足现场工艺的燃料粒度更高的检测需求，后续工作还需优化单次检测时间，提高检测实时性，提高系统运行的稳定性，以及优化设备成本。

参考文献:

[1] 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):42-49.
LIU Shenhui,BAI Kaikai,NI Guihu,et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):42-49.

[2] 刘桐,张巧玉,盛建华,等. 燃料粒度结构变化对烧结生产的影响[J]. 烧结球团,2020,45(3):17-21.
LIU Tong,ZHANG Qiaoyu,SHENG Jianhua,et al. Effect of fuel grain structure changes on sintering production[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(3):17-21.

[3] 张俊,郭兴敏,张金福,等. 烧结原料对燃料燃烧的影响研究[J]. 钢铁,2011,45(11):12-15.
ZHANG Jun,GUO Xinmin,ZHAN Jinfu,et al. Study on the effect of sintered raw materials on fuel combustion[J]. Iron and Steel,2011,45(11):12-15.

[4] 蒋大军,何木光,宋剑,等. 燃料粒度对烧结性能影响的试验研究[J]. 钢铁研究,2016,44(4):1-7.
JIANG Dajun,HE Muguang,SONG Jian,et al. Experimental research on fuel particle size influence on sintering performance[J]. Research on Iron and Steel,2016,44(4):1-7.

[5] 周明顺,赵东明,李建军,等. 焦粉粒度分布对铁矿石烧结指标的影响[J]. 中国冶金,2018,28(2):11-16.
ZHOU Mingshun,ZHAO Dongming,LI Jianjun,et al. Effects of size distribution of coke breeze on sintering process[J]. China Metallurgy,2018,28(2):11-16.

[6] 欧大明,孙祺,沈红标,等. 焦粉粒度对铁矿石烧结过程的影响[J]. 钢铁,2008,43(10):8-12.
OU Damin,SUN Qi,SHEN Hongbiao,et al. Effect of coke size on iron ore sintering[J]. Iron and Steel,2008,43(10):8-12.

[7] 韩淑峰,周明顺,夏铁玉,等. 烧结固体燃料最佳粒度的研究[J]. 烧结球团,2013,38(2):20-24.
HAN Shufeng,ZHOU Mingshun,XIA Tieyu,et al. Study on optimal particle size of sintering solid fuels[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(2):20-24.

[8] 吴永刚,宫文祥,刘广涛,等. 烧结燃料焦炭细碎工艺优化研究与实践[J]. 中国矿业,2020,29(1),367-371.

(下转第82页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

34(12):1314 – 1324.
SHI Quan, TANG Jue, CHU Mansheng. Research progress of intelligent blast furnace ironmaking technology based on industrial big data [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(12): 1314 – 1324.

[16] 谭戈. 烧结矿取制样品称量数据采集系统的通讯故障分析 [J]. 传感器世界, 2015(7): 20 – 22.
TAN Ge. Communication fault analysis of sinter sample weighing data acquisition systems [J]. Sensor World, 2015(7): 20 – 22.

[17] 齐月松, 储满生, 唐珏, 等. 基于大数据技术的高炉数据治理研究进展 [J]. 冶金自动化, 2023, 47(1): 43 – 52.
QI Yuesong, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Research progress of blast furnace data governance based on big data technology [J]. Metallurgical Industry Automation, 2023, 47(1): 43 – 52.

[18] LAWAL I, BERTRAM D, WHITE C, et al. Application of Boruta algorithms as a robust methodology for performance evaluation of CMIP6 general circulation models for hydro-climatic studies [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2023, 153(1): 113 – 135.

[19] 周海浪, 郭宇, 张浩, 等. 基于加权集成学习的车间生产进度异常预测 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(8): 188 – 192.
ZHOU Hailang, GUO Yu, ZHANG Hao, et al. Prediction of workshop production schedule anomalies based on weighted ensemble learning [J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2023(8): 188 – 192.

(上接第74页)

WU Yonggang, GONG Wenxiang, LIU Guangtao, et al. Research on optimization of sintering coke fine crushing process [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(1), 367 – 371.

[9] 李宗平, 李曦. 烧结燃料水分和粒度组成的智能检测系统及其控制方法: 201810146110.7 [P]. 2018 – 02 – 12.
LI Zongping, LI Xi, An intelligent detection system for sintered fuel moisture and particle size composition and its control method: 201810146110.7 [P]. 2018 – 02 – 12.

[10] WAPPLING-RAAHOLT B, OHLSSON T. Tools for improving the heating uniformity of foods heated in a microwave oven [J]. Microwave World, 2000, 21(1): 24 – 28.

[11] CHAMCHONG M, DATTA A K. Thawing of foods in a microwave oven: Ⅱ. Effect of load geometry and dielectric properties [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1999, 34(1): 22 – 32.

[12] MICHALI A, ANTONI K, ANITA L, et al. Microwave drying of various hape particles suspended in an air stream [J]. Transport in Porous Media, 2007, 66: 173 – 186.

[13] 曾小信, 李宗平. 一种烧结混合料的微波干燥装置及其控制方法、系统: 201910431094.0 [P]. 2019 – 05 – 22.
ZENG Xiaoxin, LI Zongping, The invention relates to a microwave drying device for sintering mixture and a control method and system thereof, 201910431094.0 [P]. 2019 – 05 – 22.

[14] DJOKOVIC J M, TANIKIC D I, NIKOLIC R R, et al. Screening efficiency analysis of vibrosieves with the circular vibrations] . Civil and Environmental Engineering, 2017, 13(1): 77 – 83.

[15] WANG G F, TONG X. Screening efficiency and screen length ofa linear vibrating screen using DEM 3D simulation [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(3): 451 – 455.

[16] BELLOCQ B, RUIZ T, DELAPLACE G, et al. Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates [J]. Journal of Food Engineering: 2017, 195: 235 – 246.

[17] 陈亚哲, 姚红良, 刘刚, 等. 振动参数对筛分效率影响的实验研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(8), 1122 – 1126.
CHEN Yazhe, YAO Hongliang, LIU Gang, et al. Experimental study on influence of vibration parameters on screening efficiency [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science, 2019, 40(8), 1122 – 1126.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net