基于雷达料位监测和机尾红外热成像的自动布料系统

张开发[1]，余正伟[2]，刘海洋[3]，熊大林[2]，张学锋[2]，程绍年[3]，龙红明[2]
(1. 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司，江苏 淮安 223002；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032；3. 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司，烧结原料厂 江苏 淮安 223002)

摘要： 为了提高烧结生产控制的自动化程度、烧结过程均匀性和烧结产、质量指标，开发了烧结混合料自动布料系统。该系统通过采用雷达料位仪监测料面宽度方向的分区料厚值，并与目标料厚进行比对，获得直接的分区料厚偏差量。通过红外热成像技术采集烧结机尾断面红外热成像视频及特征图像，分析烧结断面宽度方向分区温度分布、高温带厚度、烧结终点位置，获得间接的分区料厚偏差量。结合这两个分区料厚偏差量，反馈调节烧结布料圆辊转速和小闸门开度，在原料结构稳定的情况下，实现了烧结自动布料。实践表明：雷达料位监测系统和红外热成像系统可以准确检测料层厚度、识别烧结断面热状态，自动布料系统运行稳定，显著减少了主控工作人员对布料过程的干预，对降低操作人员劳动强度具有积极作用。

关键词： 烧结；自动布料；红外热成像；雷达料位仪；布料偏差
中图分类号： TF046.4；TF325 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)06－0139－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.06.095

Automatic distribution system based on radar level monitoring and infrared thermography at tail section

ZHANG Kaifa[1], YU Zhengwei[2], LIU Haiyang[3], XIONG Dalin[2], ZHANG Xuefeng[2], CHENG Shaonian[3], LONG Hongming[2]
(1. Huaigang Special Steel Co., Ltd. of Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002, Jiangsu, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China; 3. Raw Material and sintering plant, Huaigang Special Steel Co., Ltd. of Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002, Jiangsu, China)

Abstract: In order to improve the automation degree of sintering production control, the uniformity of sintering process, and sintering production & specification, an automatic distribution system for sintering mixture is developed. A radar level gauge is used to monitor the material partition thickness value in the direction of the material surface width, and the target material thickness is compared to obtain a direct partition material thickness deviation. Then, the infrared thermography video and characteristic images of the tail section of the sintering machine are collected by infrared thermography technology, the temperature distribution of the sintering section in the width direction, the thickness of high-temperature zone, and the end point position of sintering are analyzed, while the material thickness deviation of indirect partition is obtained. Combined with the deviation of the material thickness of these two partitions, the speed of the sintered distribution roller and the opening of the small gate are adjusted by feedback, and the automatic distribution of sintering is realized under the condition with stable raw material structure. The production and application practice show that the radar level monitoring system and infrared thermography system can accurately detect the thickness of the material layer, identify the

收稿日期： 2022－10－18；**修回日期：** 2022－12－19
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51774005)
作者简介： 张开发(1983—)，男，工程师，从事炼铁生产管理和技术研究工作。
通信作者： 余正伟(1984—)，男，博士，副教授，从事低碳冶金与智能化模型开发研究。

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

thermal state of the sintering section, and the automatic distribution system can run stably, which significantly reduces the intervention of the main control staff in the distribution process and has a positive effect on reducing the labor intensity of the operator.

Key words: sintering; automatic distribution; infrared thermography; radar level gauge; distribution deviation

铁矿烧结混合料布料是指经过混合制粒的烧结料，通过布料装置铺于铺底料上面的工艺过程。混合料布料工序要求混合料的化学成分、粒度组成、含碳量等沿台车宽度均匀分布，且保持料面平整、料层具有均一、良好的透气性；混合料粒度沿料层高度方向自上而下逐渐变粗，碳含量自上而下减少。良好的布料效果可改善料层的气体动力学条件、热量利用效率和烧结矿质量[1-2]，有利于烧结生产提质降耗。

烧结混合料布料效果的好坏，在很大程度上取决于布料装置[2]，典型的烧结机布料系统由梭式布料器、圆辊布料器和多辊布料器组合。梭式布料器沿台车宽度方向往返移动，将混合料布料到混合料槽，有利于提高混合料在台车宽度方向上的均匀性。圆辊布料器将混合料从料槽中给到多辊布料器上，再被布料到台车上，料槽闸门开度和圆辊布料器的转速用于调节总料流量，料槽闸门下的辅门(俗成小闸门)用于调节台车宽度方向的料流量。良好的圆辊布料器、料槽闸门及小闸门设备状况，是保证布料效果的基础。

烧结料层厚度通常采用雷达料位计进行料位监测[3-4]，布料岗位人员根据料位监测结果远程或手动调节圆辊布料器转速和宽度方向辅门开度，提高台车横向布料均匀性和料面平整度。但这种调节方式显著依赖岗位操作人员的经验和精力，具有较大的滞后性，容易造成生产波动，影响烧结生产效率。另一方面，垂直烧结速度不仅取决于烧结点火前的均匀布料和料面平整，还受到混合料水分、压实程度、高温反应状态等的影响，冷态情况下的均匀布料无法确保烧结过程的均匀一致性[7]。

台车宽度方向的烧结速度最终是否均一，需要通过机尾断面热状态来进行判断[5-6]。烧结机机尾断面是烧结过程的重要窗口，通过对机尾断面温度分布、熔融状态、高温带厚度与位置、孔隙结构等信息的观察、分析和判断，可以解析台车宽度方向的烧结均匀性、烧结矿 FeO 含量、烧结矿强度等信息[7-8]。随着红外热分析技术的不断发展，特别是非制冷热像仪在工业领域的推广应用，给烧结机尾红外热成像监测和分析提供了重要的技术支撑[9-10]。

国内烧结机当前大多通过主控岗位远程调节圆辊转速控制下料量，通过看火岗位现场调节小闸门开度实现料面均匀，但存在布料不稳定、下料位置环境恶劣、看火岗位劳动强度大、工作存在安全隐患等问题。因此，实现烧结机布料自动控制，对提高生产稳定性、降低岗位劳动强度以及烧结生产自动化水平具有重要意义。

近年来，大量学者将机尾断面热成像技术用于烧结矿质量的智能预报和控制，并取得了较好的研究成果。ZHANG 等[11] 提出了一种基于烧结机尾红外图像和卷积神经网络(CNN)的 FeO 含量在线测量方法，FeO 含量检测误差在 ±0.5% 以内的命中率达到 91.2%；JIANG 等[12] 提出了一种基于红外热图像异构特征的烧结矿 FeO 含量的多态测量方法，预报结果的均方根误差为 0.48，命中率为 93.33%；USAMENTIAGA 等[13] 提出了一种基于烧结机尾红外成像的烧结终点预报方法，并用于指导前端焦炭配比的调节，该方法具有良好的鲁棒性和可靠性，可有效地指导烧结过程；CHEN 等[14] 提出基于量子粒子群优化算法的 C 均值聚类火焰图像分割方法，有效消除烧结机机尾的晕尾现象，为烧结终点的预报打下基础；YE 等[15] 建立了烧结过程的局部热非平衡模型，并提取烧结机尾断面红外图像的红热层特征，实现了一种数据驱动的转鼓强度预测方案，预测准确率达到 99.49%；然而以上研究大多集中在 FeO 含量、转鼓强度以及烧结终点预测等方面的应用，基于烧结断面红外图像对烧结均匀布料的研究较少，且应用效果不佳。比如张乐文[16] 将机尾断面图像和烧结过程参数相结合，利用加权支持向量机判定烧结横向均匀性；吴晶[17] 从采集到的烧结

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

机尾断面图像中提取红火层和黑矿层以及它们的边缘信息，然后结合冶金专家的经验知识，应用推理规则及模糊聚类分析理论，对烧结布料均匀性进行判断。这些研究仅对烧结均匀性进行了评价，而没有提出具体的指导方案，无法实现烧结布料的自动调整。

因此，为了实现烧结均匀性的闭环控制，本文进行了烧结辅门自动化改造、辅门与雷达料位计一一对应改造以及烧结机尾红外热成像系统配套，实现了基于雷达料位监测和红外热成像分析的布料均匀性控制，能够实现烧结机宽度方向分区料位及料面均匀自动调节，并通过红外热像仪系统分析机尾断面热状态，反馈面向烧结过程均匀一致的布料调节补偿值，促进烧结料面与烧结过程均匀稳定，对稳定烧结生产过程，实现提产降耗具有重要意义。

1　料面均一化布料调节系统

1.1　布料调节系统组成

烧结混合料布料调节系统主要由圆辊布料器、辅门及执行器、平料板及执行器和雷达料位计组成，如图 1 所示。圆辊布料器通过驱动电机频率调节实现远程控制。辅门与雷达料位计一一对应，辅门及平料板通过电动执行器实现远程调节，单个辅门可以独立调节，雷达料位计通过安装导波管实现料位精确监测。雷达料位计监测单个辅门对应的、调节周期内的区域料层厚度平均值，与目标料厚进行比较，计算出料位偏差值并判断，同时反馈调节圆辊电机频率或者对应辅门开度，实现面向料面均匀一致的自动布料调节。

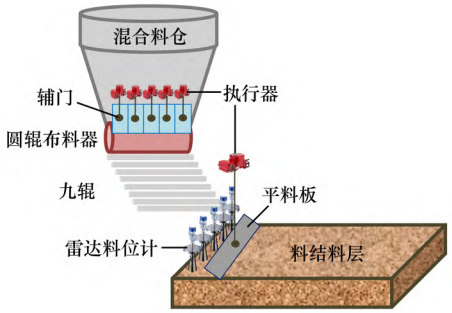


图 1　烧结混合料布料调节系统示意

Fig. 1　Schematic diagram of distribution adjustment system of sintering mixture

1.2　布料调节逻辑设计

烧结混合料布料调节的逻辑设计如图 2 所示。

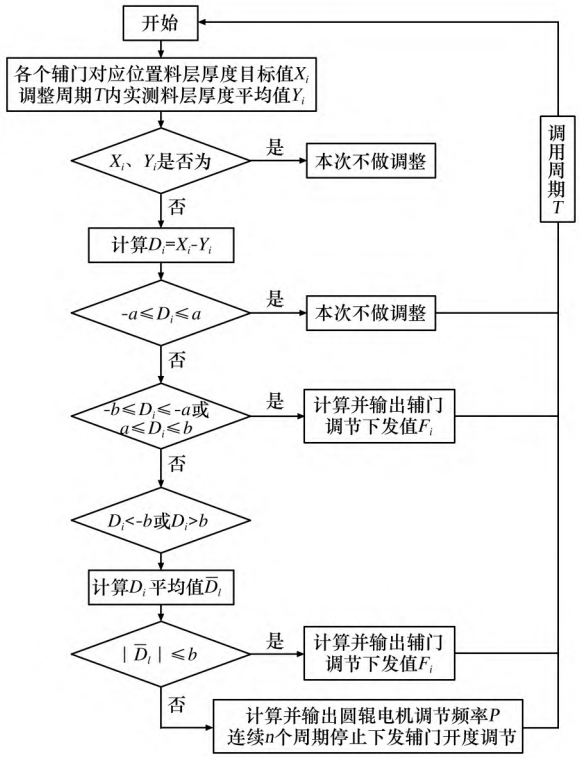


图 2　布料调节逻辑流程

Fig. 2　Logical flow of distribution adjustment system

系统首先读取各个辅门对应位置料层厚度目标值 $X_i(i=1,2,3,4,5\cdots)$、调整周期 T 内实测料层厚度平均值 $Y_i(i=1,2,3,4,5\cdots)$，计算料厚偏差值 $D_i(D_i=X_i-Y_i)$，判断 D_i 的取值范围。当在 $-a \leqslant D_i \leqslant a$ 的调节死区范围内时，圆辊布料器频率和辅门开度不调节；当在 $-b \leqslant D_i \leqslant -a$ 或者 $a \leqslant D_i \leqslant b$ 时，根据其偏离目标值的大小，计算辅门调节下发值 F_i，自动调节辅门开度；当 $D_i < -b$ 或者 $D_i > b$ 时，计算 D_i 平均值 $\overline{D}_i$，并判断其取值范围；若当 $|\overline{D}_i| \leqslant b$，计算对应辅门调节下发值 F_i，继续调节对应辅门开度；若 $|\overline{D}_i| > b$，则根据偏离目标值的大小，计算对应圆辊电机频率调节下发值 P，调节圆辊布料器驱动电机的频率，同时连续 n 个周期停止下发辅门开度调节值 F_i。

通过以上步骤可以实时反馈烧结料层厚度，实现烧结混合料料面均匀一致性调节，提高混合料布料调节的即时性，生产稳定性增强。

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

2 烧结机尾断面红外热成像系统

2.1 系统组成

烧结机尾断面红外热成像系统由红外热像仪、现场控制箱、光电交换机和工控机组成(图 3)。该系统通过安装热成像仪，获取机尾特征图像及温度分布等热状态数据；通过自带数据采集平台从环网 PLC(一级系统)上采集燃料种类及用量、水分、FeO 含量、机速等工艺参数；并通过建立分析和预测模型，分析烧结断面宽度方向分区温度分布、高温带厚度、烧结终点位置，同时预测烧结矿 FeO 含量，指导烧结工艺参数优化调整，提高烧结的均匀稳定性，其界面与功能如图 4 所示。

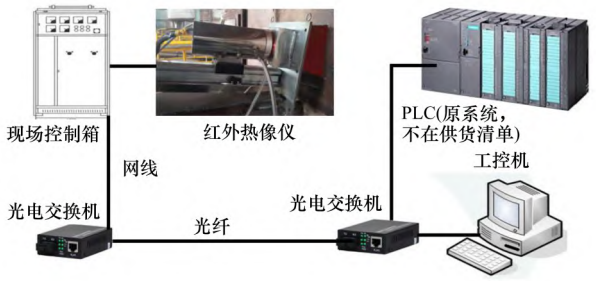


图 3 烧结机尾断面红外热成像系统组成

Fig. 3 System components of the infrared thermal imaging at sintering tail section

2.2 关键帧捕捉

在机尾红外热成像系统中，红外图像的关键帧捕捉是最重要的环节。本文通过采集红外图像分辨率 $i \times j$，其中每个像素点都有相应测量温度值 $T_{i \times j}$对应，利用图像处理中灰度梯度阈值大致分割出烧结矿区域，观察可知：全图下半部分均有出现烧结矿的概率，为避免拍摄到烧结矿燃烧带面积的不同对于温度的影响，截取图像上半部分 $(i/2) \times (j/2)$ 的机尾部分热图像、对应温度，作为筛选关键帧的特征区域，区域的表达式见式(1)：

$$P(m,n),\left[m \in \left(0,\frac{i}{2}-1\right),n \in \left(0,\frac{j}{2}-1\right)\right] \quad (1)$$

特征区域 $P(m,n)$ 对应的温度均值表达式见式(2)：

$$\overline{T} = \frac{4}{i \times j}\sum_{m=0}^{i/2-1}\sum_{n=0}^{j/2-1} T(m,n) \quad (2)$$

式中：$T(m,n)$ 为一帧特征图像每个像素点温度值，℃；$\overline{T}$ 为一张特征区域图的平均温度值，℃。

比较一个周期内全部特征区域图温度均值，平均温度值最大时对应的图像即为被捕获的最佳机尾断面图像。

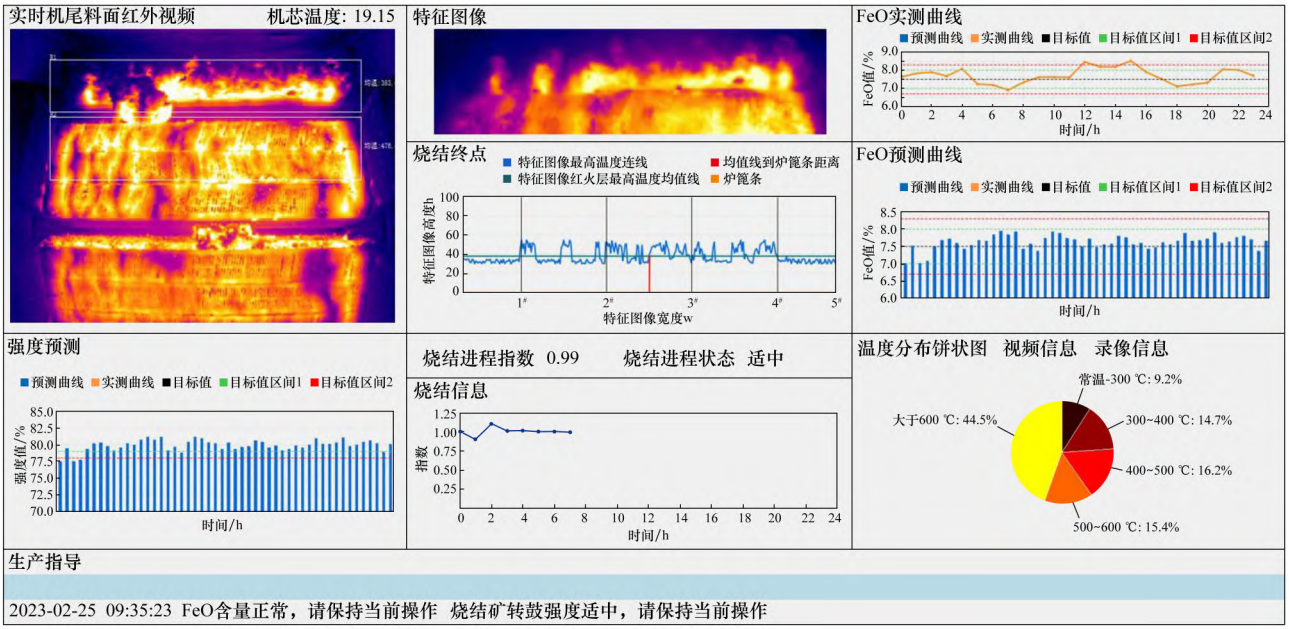


图 4 烧结机尾断面热状态系统界面与功能

Fig. 4 Interface and Functions of the infrared thermal imaging system at sintering machine tail section

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

3　烧结混合料自动布料系统及其运行效果

3.1　系统组成

烧结混合料自动布料系统的调节以料面均一化为基础，控制调节逻辑与料面均一化一致，并可参考机尾实际烧结状态分析结果进行修正，系统组成如图 5 所示。

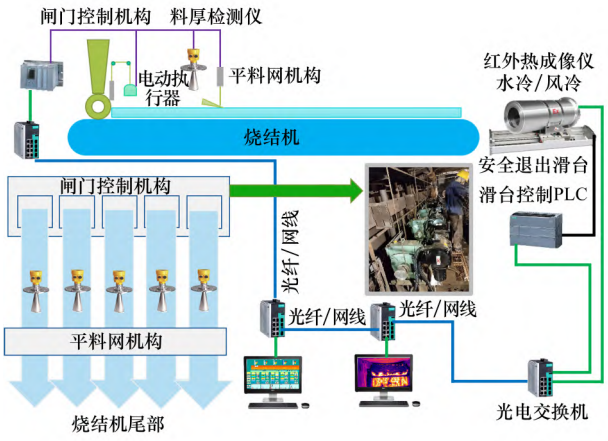


图 5　烧结混合料自动布料系统组成

Fig. 5　System components of the automatic distribution system of sintering mixture

实际运行过程中，通过对烧结机尾断面温度数据和热状态分析，结合台车宽度方向烧结均一化的要求，计算实际终点与目标终点位置的偏差，并将其转化为间接布料厚度的偏差值 d_i。该系统中，明确烧结的辅门调节值 Q_i 的计算公式如式(3)所示。

$$Q_i = D_i + kd_i \tag{3}$$

式中：k 为机尾断面影响系数；D_i 为料位计实测值与目标值的偏差，mm；d_i 为机尾热成像校正偏差，mm。

3.2　运行效果

基于雷达料位监测和机尾红外热成像的混合料自动布料系统在国内某钢铁企业烧结厂投用运行。运行前后月均(取值分别为运行期前 6 个月月均与运行后 3 个月月均)指标见表 1。由表 1 可知：运行 3 个月后，烧结机月平均产量由 1.960×10^5 t 提高到 2.008×10^5 t，提高了 2.46%；烧结机月利用系数由 1.378 t/(m^2·h) 提高到 1.397 t/(m^2·h)，提高了 1.33%；烧结矿月转鼓强度由 74.04% 提高到 74.22%，提高了 1.33%；烧结月固体燃料消耗由 54.57 kg/t 提高到 54.03 kg/t，降低了 0.54 kg/t，降低幅度达到 1.0%。取得了显著的增产降耗效果。且从现场运行效果来看，经过三个月的考核运行，机尾红外热成像系统运行稳定，能够实时监控烧结机尾状态、预测烧结矿 FeO 含量，并可对烧结生产状态进行评价和烧结指导。辅门远程控制及雷达料位计运行稳定，自动布料投用过程中，以料面均一化目标为主，以机尾热状态均匀为辅，圆辊转速和辅门开度协同调节，可实现烧结混合料自动布料。

表 1　混合料自动布料系统运行前后月均指标

Table 1　Application effects of automatic distribution system in a domestic sintering factory

项目	产量/10^5 t	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	转鼓强度/%	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})
应用前	1.960	1.378	74.04	54.57
应用后	2.008	1.397	74.22	54.03

4　结　论

本文开发了一种基于雷达料位监测和机尾红外热成像的自动布料系统。该系统能够实现烧结机宽度方向分区料位及料面均匀自动调节，并通过红外热像仪系统分析机尾断面热状态，反馈面向烧结过程均匀一致的布料调节补偿值，促进烧结料面与烧结过程均匀稳定，对稳定烧结生产过程、实现提产降耗具有重要意义。投运 3 个月后，烧结机产量提高 2.46%，利用系数提高 1.33%，固体燃料消耗降低 0.54 kg/t，取得了显著的增产降耗效果。

参考文献：

[1]　姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2014.
JIANG Tao. Technical manual of sintering and pelletizing production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.

[2]　苏升勇. 炼铁烧结机械设备的技术性分析与研究[J]. 中国设备工程，2022，505(17)：127－129.
SU Shengyong. Technical analysis and research of sintering machinery and equipment for ironmaking [J]. China Equipment Engineering, 2022, 505(17): 127－129.

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

[3] 潘龙. 浅谈称重料位计与雷达料位计的选型[J]. 中国仪器仪表,2014(S1):153-155.
PAN Long. Discussion on the selection of weighing level meter and radar level meter [J]. Chinese Instrument and Instrument,2014(S1):153-155.

[4] 谭戈. 料位计在烧结料仓的应用与分析[J]. 自动化与仪器仪表,2014(6):116-117.
TAN Ge. Application and analysis of level meter in sintering silo [J]. Automation & Instrumentation,2014(6):116-117.

[5] 龙红明. 铁矿石烧结过程热状态模型的研究与应用[D]. 长沙:中南大学,2007.
LONG Hongming. Research and application of thermal state model of iron ore sintering process [D]. Changsha: Central South University,2007.

[6] 向婕. 铁矿石烧结过程智能集成优化控制技术及其应用研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
XIANG Jie. Research on intelligent integrated optimization control technology and its application in iron ore sintering process [D]. Changsha: Central South University,2010.

[7] 刘贺飞. 烧结断面火焰偏振图像特征与烧结状态分析[D]. 唐山:华北理工大学,2021.
LIU Hefei. Flame polarization image characteristics and sintering state analysis of sintered section [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2021.

[8] 熊大林,张功辉,余正伟,等. 基于计算机视觉的烧结机尾断面图像研究进展[J]. 钢铁研究学报,2022,34(9):869-883.
XIONG Dalin,ZHANG Gonghui,YU Zhengwei,et al. Research progress of sintering machine tail section image based on computer vision [J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(9):869-883.

[9] 孙彦广. 钢铁工业数字化、网络化、智能化制造技术发展路线图[J]. 冶金管理,2015(9):4-8.
SUN Yanguang. Development roadmap of digital,networked and intelligent manufacturing technology for iron and steel industry [J]. Metallurgical Management,2015(9):4-8.

[10] 王福斌,刘贺飞,武晨. 烧结断面火焰图像退化模型及断面图像复原[J]. 中国图象图形学报,2020,25(7):1356-1365.
WANG Fubin,LIU Hefei,WU Chen. Flame image degradation model and restoration of sintered section image [J]. Journal of Image and Graphics,2020,25(7):1356-1365.

[11] ZHANG N,CHEN X,HUANG X,et al. Online measurement method of FeO content in sinter based on infrared machine vision and convolutional neural network [J]. Measurement,2022,202:111849.

[12] JIANG Z,GUO Y,PAN D,et al. Polymorphic measurement method of FeO content of sinter based on heterogeneous features of infrared thermal images [J]. IEEE Sensors Journal,2021,21(10):12036-12047.

[13] USAMENTIAGA R,MOLLEDA J,GARCIA D F,et al. Monitoring sintering burn-through point using infrared thermography [J]. Sensors,2013,13(8):10287-10305.

[14] CHEN Z K,WANG Y,WANG Y T,et al. Research of machine vision based recognition of burning through point of sintering [J]. Advanced Materials Research,2012,1612(442):379-385.

[15] YE J,DING X,CHEN C,et al. Tumble Strength Prediction for Sintering: Data-driven Modeling and Scheme Design [C]//Chinese Automation Congress (CAC). CAC Proceedings. Shanghai: CAC,2020:5500-5505.

[16] 张乐文. 基于机尾断面形态及过程参数多参量分析的烧结矿质量在线判定系统的研发[D]. 合肥:安徽大学,2017.
ZHANG Lewen. Development of online sinter quality evaluation system based on multi-parameter analysis of tail section shape and process parameters [D]. Hefei: Anhui University,2017.

[17] 吴晶. 基于烧结机尾断面图像的烧结质量人工智能检测方法的研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.
WU Jing. Research on artificial intelligence detection method of sintering quality based on sintering machine tail section image [D]. Shenyang: Northeastern University,2013.

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