成分在线检测技术进展及其在铁矿烧结应用趋势

唐艳云[1]，代梦博[2]，春铁军[2]，龙红明[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002）

摘要： 成分在线检测技术能够有效地解决传统化学分析方法的滞后性问题，是实现成分智能控制的关键一环。本文在重点介绍瞬发γ射线中子活化分析、激光诱导击穿光谱、近红外光谱等三种成分在线检测技术的原理、优点、应用案例及存在的问题的基础上，阐述了其在铁矿烧结中应用的可行性及发展趋势，以期为钢铁企业智能控制稳定生产提供一定的参考。

关键词： 铁矿；烧结；在线成分检测；进展；发展趋势
中图分类号： TF046.4；TF325.1　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2021)03－0001－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.03.031

Development of online composition detection technology and its application tendency in iron ore sintering

TANG Yanyun[1]，DAI Mengbo[2]，CHUN Tiejun[2]，LONG Hongming[2]
（1. *Zhongye Changtian International Engineering Co.，Ltd.，Changsha* 410205，*Hunan*，*China*；
2. *School of Metallurgical Engineering*，*Anhui University of Technology*，*Ma'anshan* 243002，*Anhui*，*China*）

Abstract: Online component detection technology can effectively solve the lag problem of traditional chemical analysis methods. It is a key step to realize the intelligent control of components. Based on the introduction of principles，advantages，application cases and existing problems on such three kinds of online component detection technologies，as prompt gamma-ray neutron activation analysis，laser-induced breakdown spectroscopy and near-infrared spectroscopy，the feasibility and development tendency of the technology application in iron ore sintering are expounded，which is expected to provide a certain reference for the intelligent control and stable production of iron and steel enterprises.

Key words: iron ore；sintering；online component detection；progress；development tendency

近年来，随着互联网、移动通讯、物联网、云计算、大数据、智能机器人等技术的发展，传统制造业迎来了革命性的变革与挑战[1-3]。钢铁行业作为国民经济支柱行业，正在从高速发展阶段转向高质量发展阶段，市场需求由大批量生产向小批量定制开发模式转变，质量管理的作用日渐凸显，加快推进信息化、数字化与钢铁制造技术融合发展是实现钢铁工业转型升级的现实需要和必然选择[4]。烧结矿是目前钢铁制造过程高炉炼铁最重要的入炉原料，烧结矿成分的稳定与烧结矿成品率、转鼓强度等指标存在密切关系，直接影响到高炉的稳定顺行及技术经济指标的改善。由于各种铁矿原料的质量差异、熔剂成分波动和下料偏差等，烧

收稿日期：2021－03－29；修回日期：2021－04－05
基金项目：中国博士后科学基金面上项目(2019M662130)
作者简介：唐艳云(1983—)，女，高级工程师，从事烧结球团相关技术研究及期刊编审工作。
通讯作者：春铁军(1984—)，男，教授，从事烧结球团新技术及污染物减排研究。

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

结工序中混匀料场处理的混匀矿成分以及烧结混合料成分仍存在较大的波动，影响烧结的矿产、质量和高炉顺行。目前，大部分钢铁企业主要采用人工取样化验的方法来检测烧结矿成分，并以化验结果为依据来对现场生产进行调整，其主要存在的问题有：① 人为因素影响大：生产管理、操作习惯、随机性等影响着原料的取样制样，检测结果存在一定的偏差；② 样品代表性差：成分检验结果只代表样品，不能反应全部原料成分；③ 检测时间长：从配料到实验室分析烧结矿成分的烧结工序流程需要4～5 h，导致烧结矿的质量长期受配料调整严重滞后的影响。目前，基于工业大数据构建的全流程质量管理体系，对生产过程中的质量数据进行在线收集、存储、分析、预警等，深入挖掘产品质量的相关信息，发现隐匿在数据背后的一些规律性、趋势性关系，可以更加科学地指导产品生产、质量标准修订及其他产品质量管理的工作[5-6]。因此，开展烧结矿成分智能控制系统的研究及运用对提高碱度稳定率，改善烧结矿质量，促进高炉顺行意义重大。

本文经过对目前在线检测系统主要采用的瞬发γ射线中子活化分析(Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis，PGNAA)、激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy，LIBS)和近红外光谱分析(Near Infrared Spectroscopy，NIR) 3种技术的原理、优点、应用案例及存在的问题进行阐述，展望在线检测技术在铁矿烧结中应用的可行性及发展趋势，以期为钢铁企业智能控制稳定生产提供一定的参考。

1 PGNAA技术

1.1 原理

PGNAA作为一种应用广泛的核分析技术，是从粒子源发出带有相当能量和束流强度的中子、粒子或光子，轰击试样各元素的原子核，经过辐射俘获和非弹性散射等“活化”反应，形成放射性同位素，核素“活化”后按自身规律衰变，放出2～10 MeV的γ射线(图1)，被探测器的光敏元件放大处理后，依照其能量、强度与核素的特定关系，在短时间内定性、定量的分析试样元素组成，具有在线、灵敏、非破坏的特点，理论上可测定的元素种类超过70种[7-8]。



图1 中子与物料作用示意

Fig. 1 Diagram of neutron-material interaction

PGNAA在线分析仪广泛应用于冶金、建工等行业，可在烧结工序中实现对原料、混合料和烧结矿中Ca、Fe、Si、Al、S等元素的非接触实时监测，极大地提高了配料调节的响应速度，使在线调节配料以稳定烧结矿指标的智能化目标得以实现，从而提高烧结生产质量和企业效益。如：DF-5704型PGNAA在线调节系统在鞍钢炼铁厂三烧车间得到应用，该系统主要分为测量、PGNAA元素分析、信号处理等模块，测量对象为二次混合机后皮带上的混合料，测量装置含有中子放射源及探测器，在测量装置附近通过电子皮带秤称量质量，以减少料层厚度不同引起的元素质量分数的误差。探测器捕捉γ射线，其信号与质量信号经由信号处理柜处理，通过光纤传送至配料室的主机，进行元素分析、碱度及全铁计算，结果在中控室以实时的动态曲线展出，工作人员据此可对配料作出及时调整。相比化验烧结矿成分进行反馈的传统方法，PGNAA在线检测系统可避免4.25 h的滞后时间，调节后的配料仅需15 min即可到达测量点，有效减少了碱度和全铁的波动，实现了烧结矿质量的稳定[9]。

1.2 应用

宝钢炼铁厂于2016年10月，在四号烧结机上开始探索应用PGNAA在线分析仪，以指导控制烧结碱度，并于2017年初正式投入使用，使用前后的效果如表1所示[10]。由表1可知：2018年相较2016年，平均碱度提高了1.48%，利用系数增长了1.4 t/(m^2·d)，烧结矿成品率提高了1.7%。宝钢随后于2018年2月采用自动控制技术对PGNAA在线分析的数据进行分析整理，针对CaO、SiO_2、MgO等组成成分的检

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

测结果，可提出利用蛇纹石、石灰石和白云石等调节配料的建议，再经人员采纳后实施，以实现智能烧结的目的。

表 1　宝钢应用 PGNAA 前后效果对比

Table 1　Comparison effect of PGNAA on Baosteel before and after application

项目	质量分数/%		利用系数/(t·m^{-2}·d^{-1})
	碱度一级品率	烧结矿成品率	
2016 年	97.12	78.86	32.2
2017 年	98.18	79.81	33.1
2018 年	98.60	80.56	33.6
2018 年和 2016 年差值	1.48	1.70	1.4

蒂森克虏伯钢铁公司的德国 Duisburg 工程采用 PGNAA 系统即时监控进料皮带上的关键指标对配料占比做实时调整。现场运行效果表明：通过在线分析仪的实时分析数据，配料数据降低了近 50% 的波动，减少了燃料及石灰石的使用量，在提高烧结矿质量的同时，节省了超过 0.11 欧元/t 的成本[11-12]。

柳钢于 2017 年在 3#360 m^2 烧结机尝试应用 PGNAA 在线检测系统，通过采样化验及拟合调整，标定了 PGNAA 在线检测 CaO 和 SiO_2 的数值，使在线测试值误差符合规定波动范围的比例超过 80%，随后将其投入应用。为减小烧结过程导致的成分差异，同样采用动态标定的方法，进一步对烧结矿的成分进行了预测验证，也获得了理想的效果。PGNAA 在线检测系统经过调整后接入专家系统形成了闭环反馈自动控制，实现了精确的碱度控制和成分检测效果，应用前后的烧结矿质量指标对比如表 2 所示。由表 2 可知：该系统使碱度($R \pm 0.08$)的稳定率提高了 9.65%，返矿率和固体燃料消耗分别降低 4.14% 和 0.14%[13]，对烧结和高炉工序的节能降本有积极意义。

表 2　柳钢 3#360 m^2 烧结机自动配料前后烧结矿质量指标对比

Table 2　Comparison of sinter quality indexes before and after automatic batching in Liusteel 3#360 m^2 sintering machine

项目	投入前	投入后	差值
$R \pm 0.08$ 稳定率/%	88.27	97.92	9.65
$R_{出格}(\pm 0.12)$ 稳定率/%	5.52	1.04	−4.48
返矿率/%	30.89	26.75	−4.14
吨矿固体燃耗/(kg·t^{-1})	57.70	56.30	−1.40

2　LIBS 技术

2.1　原理

激光技术的发展，应用光谱原理分析物质元素的方法于 20 世纪后期被提出，在待测试样表面聚焦高功率脉冲激光束，使样品中的原子、分子等持续电离，形成等离子体火花，在其冷却退激的过程发射本征辐射，通过光谱仪对其特征谱线的波长和强度进行测量，可定性并定量地分析元素[14-15]。其检测机理如图 2 所示。由图 2 可知：与其他元素分析技术相比，LIBS 具有无需预处理即可分析所有元素、样品形式不限、灵敏度高和实时分析等优点。近年来，由于上述优点，国际和国内对激光诱导击穿光谱的关注日益增加。LIBS 逐渐从实验室研究扩展到环境检测、文物鉴定与保护、医疗和制药领域，甚至开始进入工业应用，是冶金工业中一种极具潜力的分析技术。

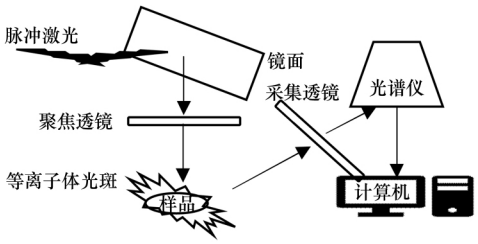


图 2　LIBS 检测机理示意

Fig. 2　Diagram of LIB Sdetection mechanism

2.2　应用

日本研究人员通过利用 LIBS 分别照射镀锌钢板的缺陷部位和常规部位，进行对比，可以发现不同元素在强度上的差异，据此判断造成缺陷的类型。该法能快速表征钢材的缺陷，指导炼钢过程采取合理措施，以提高钢材的产、质量[16]。HARILAL 等[17] 分别在氩气、氮气、氦气环境中利用 LIBS 检测了钢铁中的碳，结果

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

表明样品表面的气体压力对碳元素光谱强度的影响很大，相对氮气和氦气，在氩气中测试样品的温度和强度最大。有研究表明，增大激光功率和降低气压有助减小此类影响[18]。杨立飞[19]利用 LIBS 技术以检测钢铁结构的失效，其步骤：依据其原理搭建实验平台，通过实验优化测试参数，拟合数据矫正误差，建立定量分析模型；结果认为放大晶体结构的测试差异可用于辨别不同晶体组织，对研究结构演变具有广阔的应用前景。

LIBS 作为一种可直接分析液体样品成分的技术[20]，早在 1991 年，就被 CARLHOFF 等[21]利用以在线分析冶炼能力 80 t 的 AOD(氩氧脱碳)转炉钢水含碳量，由转炉侧面的气孔射入激光至炉底，钢水受激发形成等离子体，测试结果表明，LIBS 能够快速准确地测定钢水中的含碳量，有助于高钢合金钢的提产增效。STURM 等[22-23]通过多脉冲激发并结合真空紫外光谱观察，使定量测试钢水中 P、S、C 等元素的检测限度降低到 10 μg/g 以下，结果表明 LIBS 测试钢水可以通过物理手段实现像测试固体一样具有较高的精度。GRUBER 等[24]在真空装置中以较远的距离对钢水中 Cr、Mn、Ni 等元素进行了校准分析，讨论了不同压力变化对结果的影响，结果表明 LIBS 适用于压力较小的环境。

自由定标法的提出是为了消除由化学组成变化、散射、吸收等引起光谱强度与元素占比对应关系偏离的基体效应影响，无需标准物质的对比。刘海东等[25]介绍了自由定标模型的同时，总结了大量检测实验认为，LIBS 技术的分析精度和稳定性受多种实验因素的影响，包括激光器的特性、延迟时间、烧蚀孔效应、装置部件、聚焦距离等，诸此参数的优化可进一步提高 LIBS 检测钢中碳元素的精度，以满足不同工业应用。陈兴龙等[26]阐述了自由定标法的步骤，根据局部热平衡和光学薄假设，采用玻尔兹曼图法确定等离子体温度，由谱线 Stark 展宽估算等离子体电子密度，对矿渣中 Ca、Mg、Si、Al 等元素的氧化物进行了测定，与 XRF 对比得出，自由定标法对占比较高的元素具有较高的精度，为采用无标准物质定标的快速检测提供了理论基础。

由于 LIBS 技术起步较晚，与传统技术相比仍存在一定的差距，有待进一步在应用中研究消除精度影响的措施。该技术在国内烧结工序中的应用研究较少报道，陈雨娟等[27]采用非在线取样检测的方式，借助神经网络建立了烧结矿中含硅量的预测模型，相对误差为 1.42%，并提出通过人工智能减小 LIBS 在线检测烧结矿成分误差的新途径；韩旭[28]针对烧结矿表面不平、成分分布不均等特性，搭建了多功能 LIBS 平台，开发了对烧结矿碱度定量分析的测控软件，取得了较高的预测精度以及较好的重复性，为 LIBS 智能控制烧结矿成分提供了理论依据。作为一种优势明显的新型技术，LIBS 在烧结矿成分在线检测方面的推广，有待更多研究。

3 NIR 技术

3.1 原理

近红外光是指波长为 780 ~ 2 526 nm 的非可见光区域，包含分子振动的倍频与合频信息，透射样品产生吸收光谱，通过傅里叶光谱检测仪进行信号处理，进而分析出样品的成分及质量分数等信息[29-31]。根据 Lambert-Beer 定律[5]：

$$A = \sum_{i=1}^{n} a_i(\lambda)\, c_i L \tag{1}$$

式中：A 为吸光度，无量纲；L 为光程长，cm；c 为吸收物的质量浓度，g/L；a 为吸光系数，L/(g·cm)；n 为物质成分数；个。

不同样品组成对应的 NIR 吸收峰位置和强度不同，组合表现有重叠峰和肩峰，且由于其吸收信号弱等问题使得难以通过直接观察特征图谱完成定性或定量分析，这就需要借助信号处理实现对光谱不同波长下吸光度的微弱差别进行有效提取[32]。随计算机技术发展诞生的化学计量学，实现了数学统计及信息分析的结合，使得 NIR 解析成为可能。NIR 解析步骤包括：① 根据应用范围，建立具代表性的校正样本 NIR 数据库；② 测定关注的组分及性质数据，采集其光谱特征指标；③ 依托化学计量学建立

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

并修正模型，形成关联模型；④ 未知样品测试数据对比关联模型，实现定性定量分析。NIR 在线检测仪同样是一种间接测量装置，将其应用于在线成分检测，应先建立标准氧化物特征光谱的校正模型，再将样品的 NIR 检测数据输入校正模型中，计算其含有量，其分析过程示意如图 3 所示。

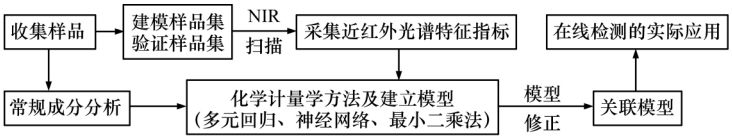


图 3　NIR 在线检测仪分析过程示意

Fig. 3　Diagram of analysis process of NIR online detector

3.2　应用

NIR 在线检测技术在医药、石油化工、食品饲料等领域得到了广泛应用。以汽油管道自动调和技术为例，目前在线近红外光谱分析仪已成为该技术的标配[33]。我国经过 10 多年的积累，较为完备的汽油近红外光谱数据库得以建立，在以分钟计的时间内即可预测出多种汽油的关键物理性质，包括蒸气压、辛烷值、抗爆指数以及烯烃、芳烃、苯、MTBE 等质量分数，根据预测值对配方进行调和优化，以满足所需的质量规格要求，企业利用 NIR 技术每年可产生数千万元的经济效益[34]。饲料领域，新希望六和公司建立的 NIR 数据库已在 100 多家子公司实现了应用，检测项目涵盖饲料、药物的多种营养组分，且愈加重视 NIR 的监控作用[35]。合盛硅业将 NIR 技术用于快速测量甲基乙烯基硅橡胶的相对分子质量和乙烯基的质量分数，可以有效地指导产、质量的提高[36]。万华化学公司利用 NIR 技术取代化学滴定法来测定异氰酸酯基(NCO)的质量分数，在满足准确度和精密度的同时，降低了成本并减少了分析时间[37]。李晶晶等[38]运用系统工程的思路集成建模工具，使 NIR 预测中草药口服液中多糖、可溶性固体的质量分数及 pH 值的误差分别减少至 10%、5%、4% 以内，可有效地应用于在线预测。

NIR 技术在有机基团、络合物等的检测应用较多，而在无机矿物成分方面的报道较少。土壤矿物学方面，FANG 等[39]对常用的土壤黏性矿物 NIR 图谱特征及处理方法进行了综述，并对 NIR 在土壤矿物学领域建模建库进行了评估，提出建立土壤 NIR 总库的概念。早在上世纪 80 年代，SINGER[40]采用 NIR 技术测试了斜辉石、正辉石、橄榄石、褐铁矿等复合矿物的吸收光谱，表明其是一种复杂的非线性的光谱；TOWNSEND[41]通过实验室与现场对比，认为在高光谱分辨率遥感数据中，峰位在 900 nm 附近达到最小值来估算赤铁矿和针铁矿的相对比例是可行的；GAFFEY[42]利用 NIR 检测了碳酸盐矿物，无论样品处于哪种形式(粉末、细颗粒、破碎面、剖光面)，方解石、文石和白云石的光谱均可在 1.60 ~ 2.55 μm 范围检测到至少 7 种吸附特征，此可用于定性判别这 3 种矿物。但 NIR 在铁矿烧结领域的报道较少，SpectraFlow 在线分析仪是一款利用 NIR 技术在线检测的商品，业务涵盖水泥、矿山、铁矿石等领域，由探测器、光源、传送带等部件组成。其在烧结矿方面的应用是基于矿物的 NIR 特征，可进行每分钟 48 个结果的检测，几乎没有元素限制，相较 PGNAA 和 LIBS，NIR 在线技术操作简单、无辐射、成本及维护要求低，具有广阔的市场前景[43]。

4　烧结在线成分检测发展趋势

综上所述的 3 种在线技术在烧结工序的应用对比如表 3 所示。由表 3 可知：3 种技术各有优缺点，其中 NIR 技术成本较低，可同时检测样品的含碳量和水分，未来在铁矿烧结行业具有广阔应用前景。

烧结生产是一种影响因素繁多、流程长、

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

表 3 3 种在线检测技术在铁矿烧结中的应用对比

Table 3 Comparison of application of three online detection technologies in iron ore sintering

项目	PGNAA	LIBS	NIR
分析依据	原子核	原子、分子	分子、矿物
建模或定标或建库	建模或定标	建模或定标	建模或建库
影响因素	皮带负载	多种因素	信号
危险性	低辐射	低辐射	无
安装及维护成本	高	高	低
精确度	高	高	高
可测元素	70 多种(不含水分)	所有元素(不含水分)	所有元素(含水分)
工业应用	较多	较少	较多

控制滞后时间长的复杂过程，影响因素之间的交互作用多呈现非线性、时变性与不确定性，属于典型的复杂非线性被控制对象。烧结矿成分主要受原料环节的影响，从配料到成品烧结矿的烧结工艺流程，需经约 4 ~ 5 h，表现出烧结过程的大滞后性。在线成分检测系统在烧结工序上的应用，使烧结矿成分得到闭环控制，生产滞后性得到有效解决。冶金工业规划研究院目前对烧结球团混合料水分在线检测系统技术规范等标准开展拟定工作，在线成分检测是未来实现智能烧结的重要技术。其在烧结工序上的应用方案主要分为混匀矿成分智能控制和烧结矿成分智能控制。

混匀矿成分智能控制是在预配料或混匀矿场的出料皮带上安装成分在线检测系统，以检测混匀矿的成分(包括水分)。根据在线检测结果及数据分析，以模糊控制与专家系统相结合的方式控制各铁矿的配比或下料量，实现混匀矿成分的智能控制，具体方案如图 4 所示。

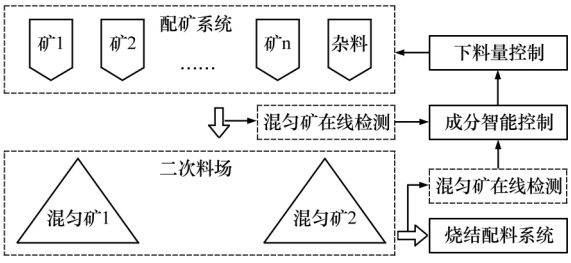


图 4 混匀矿成分智能控制示意

Fig. 4 Diagram of intelligent control of blended ore composition

烧结矿成分智能控制是在一混或二混的出料皮带上安装在线检测系统，检测混合料的成分(包括含碳量、水分)。根据混合料在线检测结果，以模糊控制和专家系统相结合的方式调控混匀矿、熔剂、燃料等的配比或下料量，实现混合料成分的智能控制，根据烧结矿成分预测模型，结合专家系统技术，实现烧结矿成分的梯级控制，具体方案如图 5 所示。其中，成分自动控制系统根据测试结果、设定的碱度值或其他参数值，自动调节给料机下料，稳定烧结矿成分，提高烧结矿碱度稳定率。

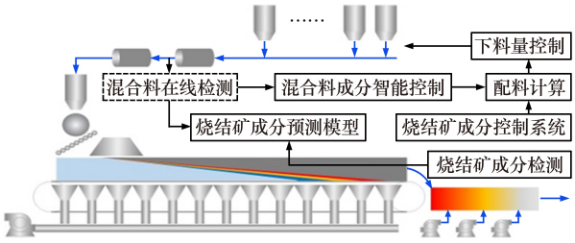


图 5 烧结矿成分智能控制示意

Fig. 5 Diagram of intelligent control of sinter composition

5 结 语

在线成分检测技术在诸多领域发挥着重要作用，具有无需取样、制样、较高的精确度、能够反映成分实时变化等特点，在钢铁行业中的应用场景不断扩大，其与烧结配料信息系统的结合，能够形成烧结矿成分闭环控制，在解决烧结矿成分控制滞后性问题方面有着广阔的应用前景，可促进炼铁企业降本增效。目前，在线成分检测技术主要有 PGNAA、LIBS 和 NIR 3 种，其各有优缺点。在国内，PGNAA 在烧结

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

成分在线检测方面已有应用实例，LIBS 起较晚、应用案例较少，NIR 在其他行业已有工业应用实例，由于该技术成本较低，可同时检测样品含碳量和水分，未来在铁矿烧结行业具有广阔应用前景。

参考文献:

[1] 张伯旭，李辉．推动互联网与制造业深度融合——基于“互联网 +”创新的机制和路径［J］．经济与管理研究，2017，38(2)：87 – 96.
ZHANG Boxu，LI Hui. Promoting the convergence of internet and manufacturing industry-based on the path and mechanism of innovation by “internet plus”［J］. Research on Economics and Management，2017，38(2)：87 – 96.

[2] 李毅仁，李铁克．基于大数据的钢铁智能制造体系架构［J］．冶金自动化，2021，45(2)：1 – 8.
LI Yiren，LI Tieke. Architecture based on big data for iron and steel intelligent manufacturing systems［J］. Metallurgical Industry Automation，2021，45(2)：1 – 8.

[3] 赵宏博，刘伟，李永杰，等．基于炼铁大数据智能互联平台推动传统工业转型升级［J］．大数据，2017，3(6)：15 – 26.
ZHAO Hongbo，LIU Wei，LI Yongjie，et al. Transformation and upgrade of the traditional industry based on big data intelligent interconnection platform for iron-making［J］. Big Data Research，2017，3(6)：15 – 26.

[4] 樊三彩．钢铁智能转型应做好这几件事［N］．中国冶金报，2021 – 4 – 27(4).
FAN Sancai. Iron and steel intelligent transformation should do these things［N］. China metallurgical news，2021 – 4 – 27(4).

[5] 冶金规划院工业智能中心．大数据技术在钢铁行业质量管理中的应用研究［EB/OL］．2020 – 03 – 02［2021 – 05 – 28］．http：//www.mpi1972.com/ztyj/zngc/ztjd_525/202003/t202003 – 02_88563.html.
Intelligence center of China metallurgical industry planning and research institute. Research on the application of big data technology in quality management of steel industry［EB/OL］. 2020 – 03 – 02［2021 – 05 – 28］. http：//www.mpi1972.com/ztyj/zngc/ztjd_525/202003/t20200302_88563.html.

[6] 邓小龙，陈虎，杨雄文，等．智能化烧结控制系统开发与应用［J］．冶金自动化，2021，45(3)：67 – 78.
DENG Xiaolong，CHEN Hu，YANG Xiongwen，et al. Development and application of intelligent sintering controlsystem［J］. Metallurgical Industry Automation，2021，45(3)：67 – 78.

[7] 罗顺忠．核技术应用［M］．哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2009.
LUO Shunzhong. Application of nuclear technology［M］. Harbin：Harbin Engineering University Press，2009.

[8] 张伟，于海明，龚亚林．数字 γ 多道谱仪在旁线煤质分析仪中的应用［J］．现代矿业，2017，33(7)：78 – 79，82.
ZHANG Wei，YU Haiming，GONG Yalin. Application of digital gamma multichannel spectrometer in sideline coal quality analyzer［J］. Modern Mining，2017，33(7)：78 – 79，82.

[9] 杨伯利，王力东，张伟，等．DF-5704 中子活化烧结元素在线分析仪在鞍钢炼铁厂的应用［J］．山东工业技术，2019(12)：29，27.
YANG Boli，WANG Lidong，ZHANG Wei，et al. Application of DF-5704 neutron activation sintering element online Analyzer in anshan iron and steel plant［J］. Shandong Industrial Technology，2019(12)：29，27.

[10] 向家发．跨带式在线元素分析仪在宝钢烧结配料中的应用［J］．宝钢技术，2019(3)：74 – 78.
XIANG Jiafa. Application of cross belt online elemental analyzer on sintering burdening in Baosteel［J］. Baosteel Technology，2019(3)：74 – 78.

[11] DELWIG Christoph，FETTWEIS Hans，SCHNITZLER Thomas，et al. Sinter process optimisation by prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) based basicity control system［J］. Sintering，2011(2)：1 – 6.

[12] WIENSTROER Stefan，江同收．利用 PGNAA 在线元素分析仪减少烧结进料波动［C］//2011 年度全国烧结球团技术交流年会论文集．全国烧结球团信息网，2011：113 – 115.
WIENSTROER Stefan，JIANG Tongshou. Using PGNAA online element analyzer to reduce sintering feed fluctuation［C］// Proceedings of the 2011 National Sintering Pellet Technology Exchange Annual Conference. National Sintered Pellet Information Network，2011：113 – 115.

[13] 甘牧原，李宗社，刘巍，等．在线成分测控系统在柳钢烧结生产的应用实践［J］．烧结球团，2018，43(3)：32 – 36.
GAN Muyuan，LI Zongshe，LIU Wei，et al. Application practice of online composition measurement and control system for the sintering plant of Liusteel［J］. Sintering and Pelletizing，2018，43(3)：32 – 36.

[14] 刘木华．农产品质量安全光学无损检测技术及应用［M］．武汉：华中科技大学出版社，2011.
LIU Muhua. Technology and application of optical nondestructive testing for quality and safety of agricultural products［M］. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology Press，2011.

[15] 陆同兴，路轶群．激光光谱技术原理及应用［M］．合肥：中国科学技术大学出版社，2009.
LU Tongxing，LU Yiqun. Principle and application of laser

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

spectrum technology [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.

[16] KONDO Hiroyuki, AIMOTO Michihiro, YAMAMURA Hideaki, 等. 激光诱导击穿光谱技术对钢中缺陷的快速表征 [J]. 冶金分析, 2009, 29(1): 13 - 16.
KONDO Hiroyuki, AIMOTO Michihiro, YAMAMURA Hideaki, et al. Rapid characterization of defects in steel by laser-induced breakdown spectroscop [J]. Metallurgical Analysis, 2009, 29(1): 13 - 16.

[17] HARILAL S S, BINDHU C V, NAMPOORI V P N, et al. Influence of ambient gas on the temperature and density of laser produced carbon plasma [J]. Applied physics letters, 1998, 72(2): 167 - 169.

[18] MCNAGHTEN E D, PARKES A M, GRIFFITHS B C, et al. Detection of trace concentrations of helium and argon in gas mixtures by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 2009, 64(10): 1111 - 1118.

[19] 杨立飞. 激光诱导击穿光谱技术对钢铁元素分析的实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
YANG Lifei. Research on element analysis of Steel by laser induced breakdown spectroscopy technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

[20] 季振国, 李铁强, 席俊华, 等. 激光诱导击穿光谱及其在元素分析中的应用 [J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(3): 455 - 460; 428.
JI Zhenguo, LI Tieqiang, XI Junhua, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy and its application in elemental analysis [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2011, 29(3): 455 - 460; 428.

[21] CARLHOFF C, KIRCHHOFF S. Laser-induced emission spectroscopy for on-line analysis of molten metal in a steel converter [J]. Laser and Optoelektronik, 1991, 23: 50 - 52.

[22] STURM V, PETER L, NOLL R. Steel analysis with laser-induced breakdown spectrometry in the vacuum ultraviolet [J]. Applied Spectroscopy, 2000, 54(9): 1275 - 1278.

[23] PETER Laszlo, STURM Volker, NOLL Reinhard. Liquid steel analysis with laser-induced breakdown spectrometry in the vacuum ultraviolet [J]. Applied Optics, 2003, 42: 6199 - 6204.

[24] GRUBER J, HEITZ J, ARNLLD N, et al. In situ analysis of metal melts in metallurgic vacuum devices by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Applied Spectroscopy, 2004, 58(4): 457 - 462.

[25] 刘海东, 吴少波, 房庆海. 基于 LIBS 技术的钢水含碳量测量方法研究 [C]//全国冶金自动化信息网 2010 年会论文集. 冶金自动化, 2010: 523 - 525.
LIU Haidong, WU Shaobo, FANG Qinghai. Research on the measurement method of carbon content in molten steel based on LIBS technology [C]//Proceedings of the 2010 Annual Conference of the National Metallurgical Automation Information Network. Metallurgical Industry Automation, 2010: 523 - 525.

[26] 陈兴龙, 董凤忠, 王琦, 等. 自由定标激光诱导击穿光谱技术在炉渣成分定量分析中的应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(12): 3289 - 3293.
CHEN Xinglong, DONG Fengzhong, WANG Qi, et al. Application of free-calibration laser-induced breakdown spectroscopy in quantitative analysis of slag composition [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(12): 3289 - 3293.

[27] 陈雨娟, 丁宇, 朱绍农, 等. 神经网络与激光诱导击穿光谱技术结合的烧结矿中硅元素定量分析方法探究 [J]. 冶金分析, 2021, 41(1): 24 - 29.
CHEN Yujuan, DING Nong, ZHU Shaonong, et al. Study on quantitative analysis method of silicon in sinter based on neural network and laser-induced breakdown spectroscopy [J]. MetallurgicalAnalysis, 2021, 41(1): 24 - 29.

[28] 韩旭. 基于 LIBS 的烧结矿碱度分析技术开发 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
HAN Xu. Development of sinter basicity analysis technology based on LIBS [D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[29] 俞良莉, 王硕, 孙宝国. 食品安全化学 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
YU Liangli, WANG Shuo, SUN Baoguo. Food safety chemistry [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2014.

[30] 张丽, 尹华. 中药分析学 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
ZHANG Li, YIN Hua. Analysis of Chinese medicine [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2015.

[31] 刘燕德. 无损智能检测技术及应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
LIU Yande. Nondestructive intelligent testing technology and its application [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2007.

[32] 李庆波, 倪勇, 周定文, 等. 成分含量近红外快速检测技术及系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(6): 555 - 558; 617.
LI Qingbo, NI Yong, ZHOU Dingwen, et al. Research on fast near-infrared detection technology and system of component content [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(6): 555 - 558; 617.

[33] SILVA N, ROSA C, DOMINGOS D, et al. NIR-based octane rating simulator for use in gasoline compounding processes [J]. Fuel, 2019, 243(6): 381 - 389.

(下转第58页)

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

烧结球团,2012,37(5):40 – 44.
LI Conggui,ZHANG Yunping,HU Huanqiong,et al. Production test of pellet adding magnesium powder [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(5):40 – 44.

[3] 张永中,卢志武. 碱度、SiO_2 及 MgO 含量对烧结矿产质量的影响 [J]. 烧结球团,2001,26(5):47.
ZHANG Yongzhong,LU Zhiwu. Influence of basicity,SiO_2 and MgO content on sinter quality [J]. Sintering and Pelletizing,2001,26(5):47.

[4] 潘建,王硕,甘牧原,等. 带式焙烧机制备镁质球团的工艺及机理研究 [J]. 烧结球团,2019,44(3):27 – 33.
PAN Jian,WANG Shuo,GAN Muyuan,et al. Study on technology and mechanism of magnesia pellet prepared by belt roasting [J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(3):27 – 33.

[5] 邬虎林,薛向欣,陈革,等. 含氟氧化镁球团矿的研究与实践 [J]. 钢铁,2005(7):9 – 12;16.
WU Hulin,XUE Xianxin,CHEN Ge,et al. Research and practice of fluorinated magnesia pellets [J]. Iron & Steel,2005(7):9 – 12;16.

[6] 王黎光,傅菊英. 不同 SiO_2 源对酸性球团结构和性能的影响 [J]. 钢铁研究,2001(3):1 – 5.
WANG Liguang,FU Juying. The influence of different SiO_2 sources on the structure and properties of acid pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research,2001(3):1 – 5.

[7] 夏雷阁,苏步新,李新宇,等. 焙烧温度与球团矿强度和还原性的关系 [J]. 烧结球团,2014,39(1):21 – 24.
XIA Leige,SU Buxin,LI Xinyu,et al. Relationship between roasting temperature and strength and reducibility of pellets [J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(1):21 – 24.

[8] 林国太. 三钢高炉长期低硅冶炼生产实践 [J]. 福建冶金,2018,176(3):14 – 16.
LIN Guotai. Production practice of long term low silicon smelting in blast furnace of Sansteel [J]. Fujian Metallurgy,2018,176(3):14 – 16.

[9] 刘文权. 对我国球团矿生产发展的认识和思考 [J]. 炼铁,2006(3):10 – 13.
LIU Wenquan. Understanding and thinking on the development of pellet production in China [J]. Iron Making,2006(3):10 – 13.

[10] PANIGRAPHY S C,JALLOULI M,RIGAUD M,等. 烧结矿球团矿的气孔率与某些性能之间的关系 [J]. 烧结球团,1985,10(6):81 – 87.
PANIGRAPHY S C,JALLOULI M,RIGAUD M,et al. Relationship between porosity and some properties of sinter pellets [J]. Sintering and Pelletizing,1985,10(6):81 – 87.

(上接第8页)

[34] 褚小立,陈瀑,李敬岩,等. 近红外光谱分析技术的最新进展与展望 [J]. 分析测试学报,2020,39(10):1181 – 1188.
CHU Xiaoli,CHEN Pu,LI Jingyan,et al. The latest progress and prospects of near-infrared spectroscopy analysis technology [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory,2020,39(10):1181 – 1188.

[35] 隋莉,郭团结,杨红伟,等. 饲料企业近红外规模化应用关键控制点 [J]. 中国畜牧杂志,2017,53(11):108 – 113.
SUI Li,GUO Tuanjie,YANG Hongwei,et al. The key control points of large-scale near-infrared application in feed enterprises [J]. Chinese Journal of Animal Husbandry,2017,53(11):108 – 113.

[36] 聂长虹,方红承,谭军,等. 甲基乙烯基硅橡胶相对分子质量和乙烯基含量的快速测定 [J]. 化工生产与技术,2016,23(4):37 – 39;49.
NIE Changhong,FANG Hongcheng,TAN Jun,et al. Rapid determination of relative molecular mass and vinyl content of methyl vinyl silicone rubber [J]. Chemical Production and Technology,2016,23(4):37 – 39;49.

[37] 刘翔,李键,陈艳玲. NIRS 测定水性树脂预聚体中 NCO 的方法研究 [J]. 广州化工,2016,44(13):128 – 130;142.
LIU Xiang,LI Jian,CHEN Yanling. Study on the method of measuring NCO in waterborne resin prepolymer by NIRS [J]. Guangzhou Chemical Industry,2016,44(13):128 – 130;142.

[38] 李晶晶,周昭露,黄生权,等. 近红外光谱技术应用于中草药口服液在线质量控制的化学计量学建模 [J]. 化工进展,2018,37(5):1923 – 1932.
LI Jingjing,ZHOU Zhaolu,HUANG Shengquan,et al. Application of near-infrared spectroscopy to online quality control of Chinese herbal medicine oral liquid chemometric modeling [J]. Progress in Chemical Industry,2018,37(5):1923 – 1932.

[39] FANG Qian,HONG Hanlie,ZHAO Lulu,et al. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy: areview [J]. Journal of spectroscopy,2018(2),1 – 14.

[40] SINGER Robert B. Near-infrared spectral reflectance of mineral mixtures: systematic combinations of pyroxenes,olivine,and iron oxides [J]. Journal of Geophysical Rsearch,1981,86(B9):967 – 7982.

[41] TOWNSEND Timothy E. Discrimination of iron alteration minerals in visible and near-infrared reflectance data [J]. Journal of Geophysical Rsearch,1987,92(B2):1441 – 1454.

[42] GAFFEY Susan J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35 – 2.55 microns): calcite,aragonite,and dolomite. American Mineralogist,1986,71:151 – 162.

[43] Spectra Flow Analytics Ltd. Ironore/sinter application [EB/OL]. [2021 – 05 – 28]. https://www.spectraflow-analytics.com/iron-oresinter.html.

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