

引文格式:张哲铠,楚金旺,郝亮钧,等. 铅基固废协同熔炼过程在线智能优化控制[J]. 中国有色冶金,2024,53(4):65-74.
ZHANG Zhekai, CHU Jinwang, HAO Liangjun, et al. Online intelligent optimization control for the lead-based solid waste synergistic smelting process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024,53(4):65-74.

铅基固废协同熔炼过程在线智能优化控制

张哲铠¹, 楚金旺¹, 郝亮钧¹, 许潇枫², 张理¹, 陈金水²

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 浙江大学 控制科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

[摘要] 铅基固废是生产端和消费端产生的常见固体废物,具有很强的污染性,其绿色处理技术是实现含铅废物污染防治的关键环节。双底吹炼铅工艺协同处理铅基固废是一种经济合理的铅基固废处理方式,相对于传统矿铅冶炼生产操作更为复杂,为确保生产状况处于稳定、经济的状态,对工艺控制系统有了更高要求。中国恩菲工程技术有限公司研发了一套铅基固废协同熔炼过程在线智能优化控制系统,整个系统由在线优化控制系统、智能预警与高效监控系统和系统数据库集成,主要实现以下功能:①针对铅基固废协同熔炼过程自动化水平不高的问题,基于冶炼过程机理与生产运行大数据,应用计算机建模和神经网络方法建立了冶炼过程关键参数预测模型,开发了一套铅基固废协同熔炼在线优化控制系统;②以车间实景模型为载体,建立了铅基固废协同熔炼智能预警与高效监控系统,实现了工业信号、场景及流程的数字化与可视化;③控制系统集成了现场相关软硬件,详细展示各模块间的数据交互与协同运行情况,形成了智能、高效、安全的协同熔炼车间。

[关键词] 铅基固废; 协同熔炼; 智能控制; 优化配料; 智能预警; 神经网络模型; 三维可视化

[中图分类号] TF812; TF355 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)04-0065-10

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.04.008

0 引言

铅是重要有色金属,其消费量仅次于铝、铜和锌,80%以上的铅用于铅酸蓄电池生产。铅产业链环节包括铅锌矿采选、铅冶炼、终端产品生产、含铅物料回收等,其中铅物料回收是铅基固废产生最主要环节,主要包括铅锌冶炼渣、铅粉尘、含铅污泥、铅膏等。除铅产业链外,其他有色金属生产,特别是冶炼过程也会产生含铅固废。铅基固废属于危险废物,如不能合理处置将会对周围环境造成严重污染,铅基固废的绿色处理技术则是实现含铅固废污染防治的关键环节。

铅冶炼过程中存在铅原料的多元性、铅及其化

合物的高挥发性、铅液的高渗透性以及铅蒸气的高毒性等处理技术难点,由中国恩菲工程技术有限公司自主开发的“底吹氧化熔炼-底吹还原熔炼”连续炼铅新技术,解决了传统铅冶炼工艺存在的环境污染严重、能耗高、原料适应性差、冶炼过程不连续、生产成本高等问题^[1-4]。随着我国经济的快速发展,铅基固废的大量产生给生态环境带来了巨大压力。利用当前双底吹炼铅工艺进行原生矿协同处理铅基固废,在不增加额外设备投资情况下,对铅基固废进行协同熔炼,是一种较为经济合理的铅基固废处理方式^[5-7]。

目前有关氧气底吹炉炼铅的研究主要集中在对内部流场、温度场及元素分配等的模拟,包括对富氧底吹炼铅氧化熔炼元素分配的热力学模拟^[8]、对富铅熔渣底吹熔炼还原过程热平衡及热场分布规律研究^[9]和对底吹炼铅炉内流动进行数值模拟研究^[10]等。对于冶炼过程模型及控制系统方面的研究,包括融合机理模型与改进的神经网络模型对铜熔炼过程关键参数的预测^[11]、基于 Smith 预估控制器的自

[收稿日期] 2023-12-29

[第一作者] 张哲铠(1989—),男,汉族,浙江嘉兴人,博士,工程师,研究方向为有色冶金工艺流程计算、智能控制系统。

[基金项目] 国家重点研发计划“协同熔炼过程自适应在线智能优化控制系统”(2019YFC1907305)。

适应控制算法对氧气底吹炉炼铅过程熔炼温度进行控制^[12]及双底吹连续炼铜工艺与铜闪速熔炼-转炉吹炼工艺全流程的模拟计算^[13-14]。对于冶炼过程监控预警系统方面的研究,开发了基于智能能耗预测和异常能耗识别的预警系统,采用自适应遗传算法优化最小二乘支持向量回归(LSSVR)模型,对铅冶炼过程的能耗进行预测^[15];建立了基于大数据的高炉炉温监测预警系统,可有效解决传统冶炼工艺带来的弊端,同时能起到延长设备生命周期、提前预测炉况走向等作用,有效推动高炉智能化转型^[16]。

铅基固废协同熔炼过程反应机理复杂,冶炼过程关键数据无法实时感知,传统数学模型存在精度低、波动大、误差大等问题,难以实现精准在线控制,制约了生产的稳定性。随着智能控制技术的发展,利用工业大数据建立蕴含复杂函数关系的数据驱动模型,与传统工艺计算模型进行融合优化,同时利用可视化技术协同精准在线监测技术实现冶炼场景及流程可视化,是智能冶炼的发展方向。因此,本研究拟以铅基固废协同熔炼过程为研究对象,建立铅基固废协同熔炼过程在线智能优化控制系统,具备工艺过程优化控制与监控预警功能,以实现工艺过程的优化控制及稳定生产,减轻生产现场工作人员负担。

1 铅基固废协同熔炼工艺流程简介

原生铅精矿中铅的存在形态主要为硫化物,在

底吹氧化熔炼过程中发生氧化反应,同时释放大热量,特别是高富氧浓度熔炼情况下,底吹氧化炉热量过剩;而铅基固废,如含铅粉尘、铅膏、铅玻璃,铅的形态主要是氧化物或者硫酸盐,熔炼过程中均为不发热物料。在传统底吹炉氧化熔炼原生铅精矿过程中,协同处理铅基固废,充分利用矿铅冶炼的过剩热量,是一种较为经济合理的铅基固废处理方式。

铅基固废协同熔炼工艺流程如图 1 所示,主要设备由底吹氧化炉和底吹还原炉两个冶金炉窑构成。铅基固废、原生铅精矿、熔剂、返尘烟尘、备用煤等物料经过配料、混料、制粒后从底吹氧化炉上部加料口加入到炉内,底部通过氧枪喷吹富氧空气对铅精矿及铅基多金属固废进行氧化熔炼,混合含铅物料在熔池中迅速完成加热、脱水、熔化、氧化、产粗铅和造渣等熔炼过程,熔融态一次粗铅和高铅渣因比重的不同而在熔池内分层,通过底吹炉炉体两端的粗铅排放口和渣排放口分别排放;底吹氧化炉产生的熔融态高铅渣经流槽流入底吹还原炉,从还原炉底部喷吹粉煤及富氧空气进行还原熔炼,熔融态二次粗铅和还原渣因比重的不同而在熔池内分层,通过底吹炉炉体两端的粗铅排放口和渣排放口分别排放。通过流槽连接底吹氧化炉和底吹还原炉,充分利用了熔融态高铅渣的显热,节省了大量燃料,使铅冶炼能耗下降;同时,富氧熔炼提高了熔炼效率,降低熔炼烟气量,提升烟气 SO₂ 浓度,有利于烟气制酸。

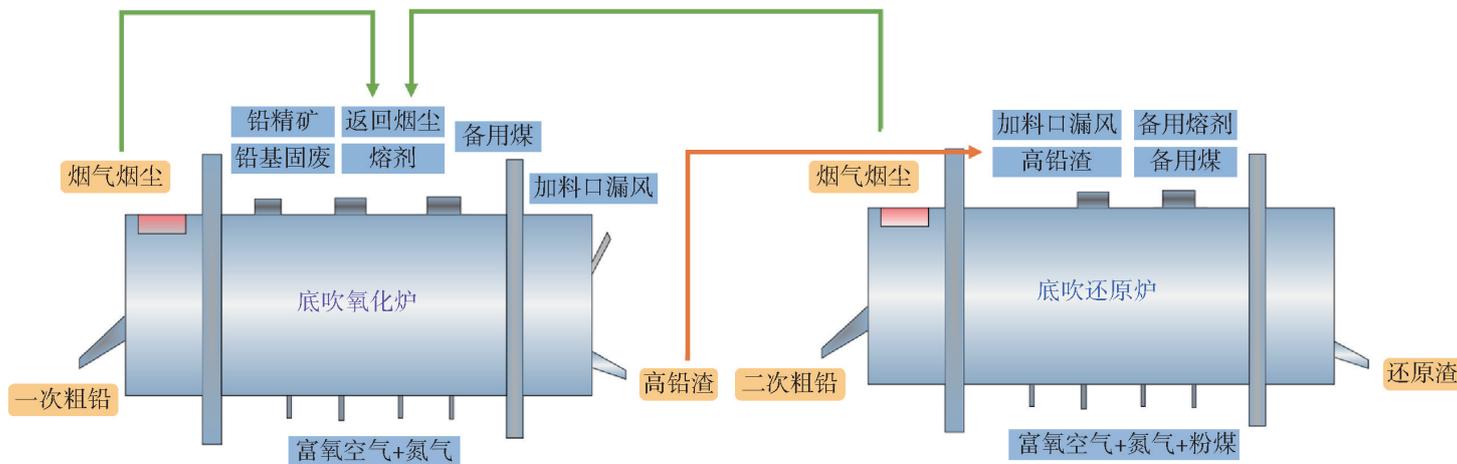


图 1 铅基固废协同熔炼工艺流程

Fig. 1 Collaborative smelting process of lead-based solid waste

2 铅基固废协同熔炼在线优化控制系统

铅基固废协同熔炼在线优化控制系统由优化配

料模型、工艺计算模型及数据驱动模型三个模块构成,各模块相辅相成,其架构如图 2 所示。

由图 2 可知,优化配料模型通过读取原料成分

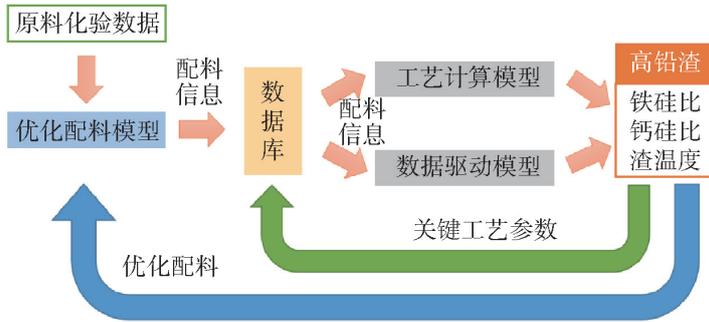


图2 铅基固废协同熔炼在线优化控制系统架构

Fig.2 Architecture of on-line optimization control system for lead-based solid waste collaborative smelting

的输入数据,根据已建立的过程模型和工艺指标进行各种原料配比计算,并将优化后的原料成分及配比保存到系统数据库供其他模型使用;协同熔炼过程工艺计算模型利用配料模型存储的原料成分及配比数据,通过铅基固废协同熔炼工艺计算模型,计算得到各种冶炼参数,并将计算结果输出及存储到系统数据库中供模型融合使用。协同熔炼过程数据驱动预测模型基于现场实际生产工业大数据,通过构建、训练、优化得到关键参数预测模型,根据输入混合球料成分可以预测铅基固废协同熔炼过程的关键参数。通过融合工艺计算模型和数据驱动模型对协同熔炼过程关键参数的预测结果,可判断当前配料条件是否合适,氧化熔炼高铅渣渣型以及温度是否能满足氧化熔炼的要求。假如满足要求,就按当前配料条件进行原料配料;若不满足要求,则将偏差反馈至配料优化模块进行配料调整。

2.1 工艺计算模型

在解析铅基固废协同熔炼工艺的基础上,该系统采用 MetCal desk 冶金计算平台,基于冶炼过程物料平衡、热平衡及化学平衡的原理,建立了双底吹炼铅协同处理铅基固废工艺计算模型,并通过现场实际生产数据进行不断反馈修正。该计算模型界面如图3所示,通过读取系统数据库存储的优化配料模型中原料成分及配比数据,计算得到关键工艺参数,并将计算结果输出,存储到系统数据库相应的表中。

2.2 数据驱动模型

针对铅基固废协同熔炼过程工艺复杂,输入的生产原料铅基固废来源广、成分复杂、差异大等特点,基于神经网络对协同熔炼进行建模,与传统工艺计算模型互补。模型架构如图4所示,分别采用基

于可解释多元预测网络和多尺度特征提取的时序预测模型,克服循环神经网络模型不能并行计算的限制,具有更好的可解释性。通过采集某铅基固废协同熔炼企业历史积累的工艺生产数据,建立了基于底吹氧化炉球料成分数据的炉温预测模型,可用于指导与优化入炉物料配比;利用原料的历史配料数据与物料的成分分析数据,并结合底吹氧化炉与底吹还原炉的历史工况数据,建立了预测高铅渣成分数据的时序模型,具有良好的预测效果。

2.3 优化配料模型

原料配比最优控制可分解为两个步骤:第一步,根据工艺目标值,利用工艺计算模型与数据驱动模型相融合的混合模型,优化搜索得出最优的混合入炉球料成分指标;第二步,基于球料配料过程模型,结合生产企业库存原料种类、储备量及化验成分数据,利用非线性规划技术,计算搜索出最优的原料配比。课题组针对原料配比优化开发了一套配料优化控制软件,该软件具备对熔炼原料的仓储量及对应成分化验数据进行录入、更新、删除等管理功能。

2.4 协同熔炼在线优化控制系统应用与优势

工艺计算模型、数据驱动模型和优化配料模型构成了铅基固废协同熔炼在线智能优化控制系统。该系统可以进行自动优化配料及预测熔炼需要的工艺参数,减轻铅基固废协同熔炼现场配料工程师及工艺工程师的负担。同时,通过协同熔炼工艺计算模型与数据驱动模型对于关键工艺参数的预测,可提前对配料方案与氧料比等重要工艺参数进行优化,从而减少协同熔炼过程中高铅渣铁硅比、钙硅比、温度的波动,稳定协同熔炼工艺状态。

铅基固废协同熔炼在线优化控制系统在河南某企业的铅基固废协同处理工艺进行了应用。该企业之前采用人工手动配料作业方式,配料工程师只能依据积累的经验不断反复尝试,容易造成混合料的成分存在较大波动,也难以最优统筹使用当前库存的各种原料,配料过程具有一定随机性,配料精度也相对较低。此外,完成一种配料方案最大耗时将近4h,配料效率相对较低。使用本系统配料模型后,完成一个配料方案的时间可降低至20min左右,配料效率大幅度提升,同时,系统有能力统筹目标工况指标和当前原料库存条件,并将配料后混合料的成分波动控制在一个最小的范围内,减少了原料条件变化对协同熔炼过程的影响。

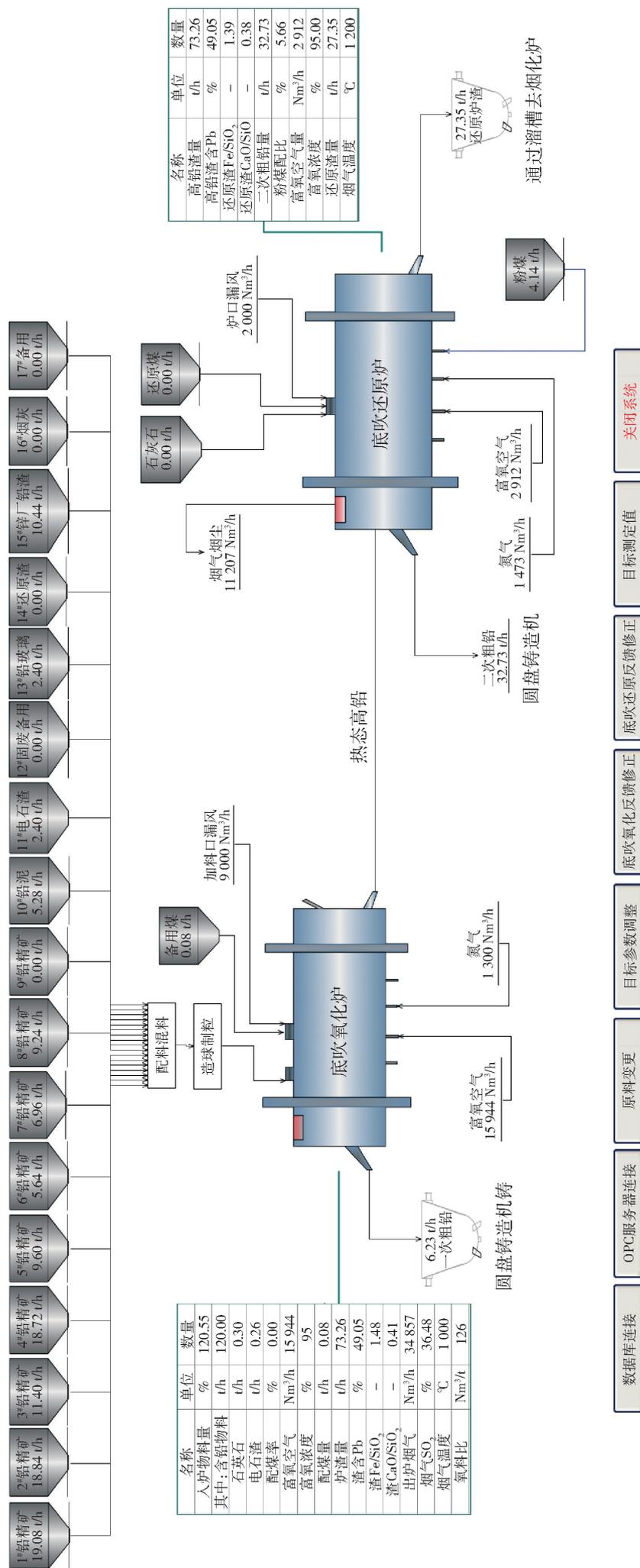


图3 铅基固废协同熔炼工艺计算模型

Fig.3 Calculation model of lead-based solid waste collaborative smelting process

中国恩菲版权所有

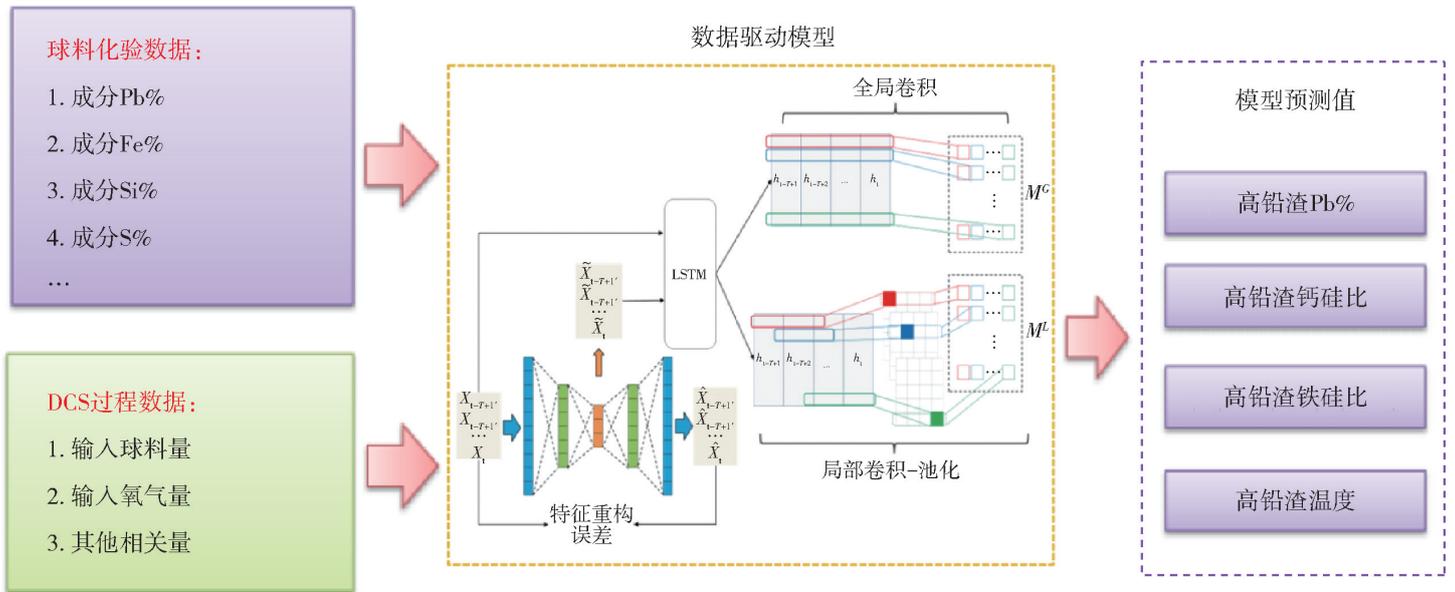


图4 铅基固废协同熔炼数据驱动模型

Fig. 4 Data-driven model of lead-based solid waste collaborative smelting process

原先生产现场工艺工程师依据高铅渣成分、温度等检测结果,结合生产经验,进行氧料比等工艺参数的调整,但由于高铅渣的取样、送样、制样及分析检验需要耗费时间,得到高铅渣化学成分化验结果一般需要1 h左右时间,工艺工程师根据检测结果进行工艺参数的调整,存在严重滞后。此外,依赖工程师经验进行调控的传统作业方式,存在粗放、不确定性及随意性等缺点,不利于协同熔炼过程的稳定性。在使用本系统后,以高铅渣渣型、温度等参数为导向,在协同熔炼前和冶炼过程中,基于工艺计算模型和数据驱动模型反向优化配料及氧料比等工艺参数,使得高铅渣成分、温度等关键参数控制在适宜的范围内,具有提前预测与提前校正的优点。

3 铅基固废协同熔炼智能预警与高效监控系统

铅基固废协同熔炼智能预警与高效监控系统由熔炼车间三维模型、熔炼过程三维可视化模型、熔炼过程参数智能预警与监控系统等三个模块构成。

3.1 熔炼车间三维模型

该系统利用数字化仿真技术,构建了上文企业铅基固废处理熔炼车间的三维模型,如图5所示。模型可直观展示协同熔炼车间建筑、设备等信息,将三维立体场景、现场运行数据集成,满足远程工厂三维展示及运营数据同步呈现的需求,有效集成、整合了工厂三维设计数模与实时运营数据,利用工厂三维场景实现了查询、管理、演示等功能。



图5 铅基固废协同熔炼车间三维模型

Fig. 5 3D model of lead-based solid waste collaborative smelting plant

3.2 熔炼过程三维可视化模型

根据铅基固废处理工艺机理,该系统采用三维数字化仿真技术,构建了协同熔炼过程的三维动态仿真模型,实现了底吹氧化炉加料、底吹氧化熔炼、底吹还原炉加料、底吹还原熔炼、粗铅与渣排放等过程的数字化、可视化,如图6、图7所示。该模型可对熔炼车间的主要设备进行数据采集,实现生产设备的可视化管理,交互式查询厂区设备相关信息;同时,设备列表也可以链接到Web端读取数据列表,实现数据的单次录入与跨平台复用。

3.3 熔炼过程参数智能预警与监控模型

针对于上文企业铅基固废系统处理工艺配料、氧化熔炼及还原熔炼过程,构建了关键参数智能预警与监控模型,如图8所示。该模型通过多维度数据面板采集并展示协同熔炼过程整体的主要数据,基于生产运行成果,将枯燥、分散的数据图形化、可

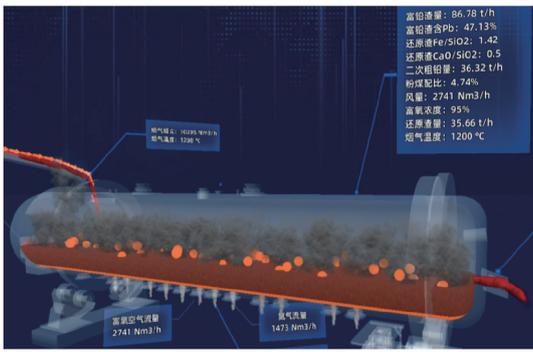


图 6 铅基固废协同熔炼工艺还原熔炼过程

Fig. 6 Reduction smelting process of lead-based solid waste collaborative smelting

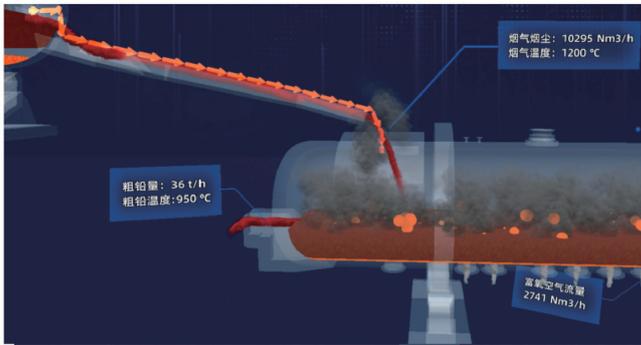


图 7 铅基固废协同熔炼工艺高铅渣流动过程

Fig. 7 High lead slag flow process of lead-based solid waste collaborative smelting

可视化,被监控数据包括协同熔炼过程参数、喷吹气体参数以及炉体运行参数。通过实时监测生产过程中氧气利用率、燃料比、入炉品位等工艺指标,分析和比较其与适宜标准参数之间的差异,可有效提高工厂的运作决策效率。

模型还具有智能预警分析功能,通过对接数据接口实现三维场景里重要设备、关键参数的可视化,可在页面中展示重要设备运行状态、关键工艺参数值,如图 9 所示。一旦数值超过既定阈值,预警模型将根据历史数据对设备运行状态进行分析研判,并

在三维场景内对设备进行标红闪烁呈现告警状态。通过人员导航功能和电子围栏功能,还可以实现人员安全预警,界面如图 10 所示。

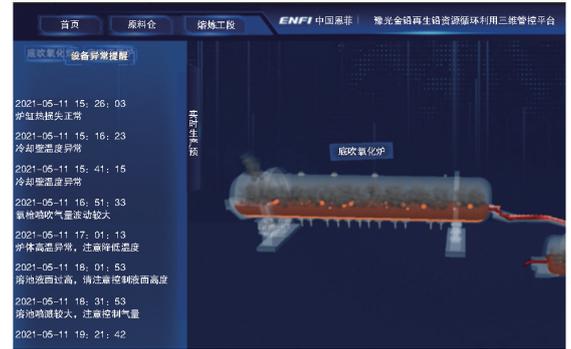


图 9 铅基固废协同熔炼工艺设备异常预警分析

Fig. 9 Abnormal early warning analysis of lead-based solid waste collaborative smelting equipment

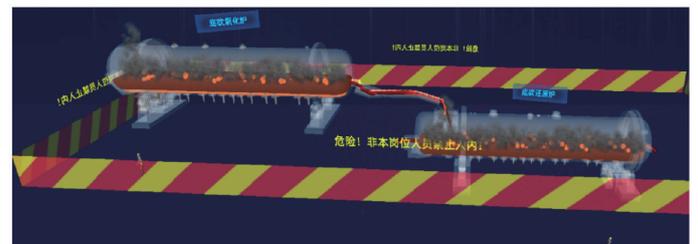


图 10 铅基固废协同熔炼车间人员安全预警分析

Fig. 10 Early warning analysis of personnel safety in lead-based solid waste collaborative smelting workshop

3.4 协同熔炼智能预警与高效监控系统应用与优势

铅基固废协同熔炼智能预警与高效监控系统在上文企业铅基固废协同处理熔炼车间完成了部署。系统将多种管理系统的复杂信息融合在虚拟仿真环境之中,以符合人类视觉的方式自然呈现,从而大大提升了信息交互的效率,降低了信息损耗和时间损耗,确保了信息传递的准确性和及时性,降低了信息



图 8 铅基固废协同熔炼过程生产实时数据的监测与分析

Fig. 8 Monitoring and analysis of real-time production data in lead-based solid waste collaborative smelting

查询和浏览的难度。同时,系统将各种监控设备的运行数据和状态信息与虚拟车间相结合。通过实时接收监控及预警数据,能够高效扩展系统功能,允许用户在三维系统中从任意时间、任意地点、任意视角查看任意对象的任意信息,为高效生产管理打下基础。

4 铅基固废协同熔炼过程智能控制系统集成与应用

协同熔炼过程智能控制系统的现场布置原理如图 11 所示,整体架构是将铅基固废协同熔炼在线优化控制系统、铅基固废协同熔炼智能预警与高效监控系统、数据库布置在某铅基固废协同熔炼企业现场服务器上,同时通过统一标准接口服务平台与现场 DCS 系统数据、分析检验数据、铅基固废资源环境属性数据进行交互。

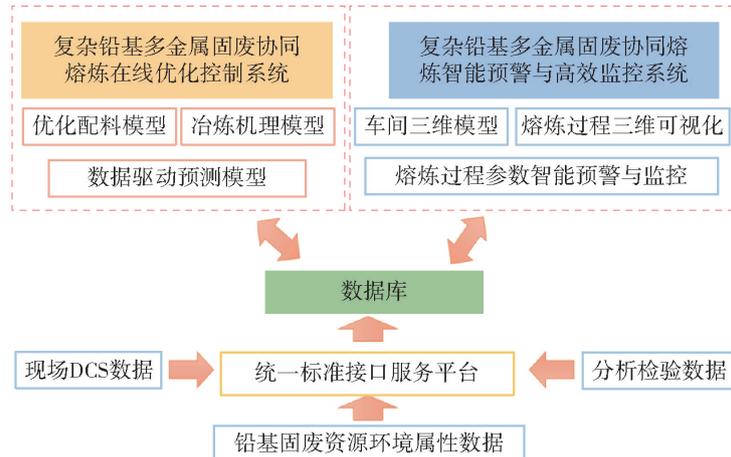


图 11 现场布置原理图

Fig. 11 Schematic diagram of site layout

4.1 统一标准接口服务平台

为解决铅基固废处理企业数据源繁杂多样,无法高效采集存储,难以充分满足各应用间的数据交互需求的难题,开发建设了一套承接数据与应用的统一标准接口服务平台。

厂区整体工艺流程的信息化数据采集采用 iFX60 SCADA 数据采集软件,软件授权 50 000 点,数据采集统一采用 OPC 协议。该平台可实时采集、储存工业生产数据,数据可远程上传至企业大数据平台,实现信息资源的全汇聚与集中、高效、便利管理。同时该平台预留了相应数据接口,为协同熔炼智能优化控制系统、协同熔炼智能预警与高效监控系统现场安装调试、数据交互提供便利,成为了数据有效的中转站。

课题组对统一标准接口服务平台的系统界面进

行了设计,并根据设计采集数据点位,与相应位置仪器仪表实现了通讯,所采集数据能实时传输至系统并存储,同时这些现场生产数据可通过该平台实时传输至其他系统。

4.2 系统数据库

该系统在上文企业铅基固废协同熔炼现场服务器上构建了一个共享数据库,数据库中化验数据表用于存储生产现场高铅渣、还原炉渣、氧化炉粗铅、还原炉粗铅等分析化验数据,通过统一标准接口服务平台实现数据交互,使得系统数据库能实时读取化验室样品的分析化验数据,并存储于数据库对应表中;数据库中 DCS 数据表用于存储生产现场关键参数的 DCS 系统数据,通过统一标准接口服务平台实现数据交互,使得系统数据库能实时读取现场关键工艺参数的 DCS 数据,并存储于数据库对应表中;数据库中工艺计算模型表用于存储复杂铅基固废协同熔炼过程工艺计算模型关键工艺参数的计算输出数据,实现与工艺计算模型的数据交互;数据库中原料数据表用于存储复杂铅基固废协同熔炼配料数据,包括原料成分、湿度及相应的配比等信息,为配料优化系统的数据输出表及机理模型的数据输入表,成为配料优化模型和复杂铅基固废协同熔炼过程机理模型数据传递的纽带。

该系统将铅基固废协同冶炼过程中的 DCS 生产数据实时采集存储在系统数据库中,实现 DCS 数据与系统数据库数据交互,同时将冶炼生产过程中粗铅、渣等样品化验检测数据实时上传,实现系统数据库对分析检验数据的实时采集。

5 应用案例

协同熔炼智能优化控制系统与协同熔炼智能预警与高效监控系统在上文企业的铅基固废协同熔炼工艺完成了集成与应用,形成了智能、高效、安全的协同熔炼车间。系统应用前后对比如表 1 所示,存在如下优势:①随着智能控制系统的建成,协同熔炼工艺长期依赖工人操作决策,自动化、智能化水平严重不足的顽疾得到了有效的缓解,人工成本显著降低;②熔炼原料配比自动优化策略的提出有助于改善熔炼炉的反应效率,维持系统的最优、稳定运行,提高工厂的铅基固废处理能力,降低精铅及其他副产品的生产成本;③可视化监测与实时预警系统的健全提升了协同熔炼过程的运行稳定性和应急处置

能力,降低了企业运营维护成本,并能将潜在的事故风险维持在较低水平。

综上所述,铅基固废协同熔炼过程在线智能优化控制系统提高了原生矿协同多形态铅基固废强化

冶炼过程的配料效率与精度,减少了原料条件变化对协同熔炼过程的冲击,形成了智能、高效、安全的协同熔炼工艺流程,后续可将该技术逐步推广至同领域其他企业。

表 1 某铅基固废协同熔炼企业系统应用前后对比

Table 1 Comparison before and after system application in a lead-based solid waste collaborative smelting enterprise

对比项	应用前	应用后
配料	采用配料工程师手动配料,存在以下问题: 依据积累的经验不断反复尝试,效率低; 混合料成分存在主观波动; 无法最优统筹使用当前库存各种原料; 配料过程随机,配料精度较低。	采用优化配料系统,具有以下优点: 程序化配料,效率高; 配料完成后混合料成分波动小; 最优统筹使用当前库存各种原料; 配料过程系统化,配料精度较高。
工艺控制	采用传统工艺工程师控制,存在以下问题: 滞后性,延迟 1~2 h; 粗放、不确定性及随意性; 不利于协同熔炼过程的稳定性。	采用优化控制系统控制,具有以下优点: 提前预测与提前校正; 集约、确定性及目的性; 提升了协同熔炼过程的稳定性。
数据采集	采用传统工厂数据采集,存在以下问题: 全厂数据离散,不能集中显示; 数据二维平面显示; 厂房、设备空间关系不明确。	采用智能预警与高效监控系统,具有以下优点: 全厂数据集中,集中显示; 数据三维动态显示,可智能预警; 厂房、设备三维可视化,空间关系明确。

6 结论

针对铅基固废协同处理工艺反应机理复杂,冶炼过程关键数据无法实时感知,传统数学模型存在精度低、波动大、误差大等问题,中国恩菲工程技术有限公司研发了铅基固废协同熔炼在线优化智能控制系统,整个系统由在线优化控制系统、智能预警与高效监控系统 and 系统数据库集成,目前已在企业得到应用,主要成效是人工成本显著降低、铅基固废系统处理能力提高,并维护生产系统稳定运行,将事故风险维持在较低水平。

1) 铅基固废协同熔炼在线优化控制系统基于原生矿协同处理铅基固废过程的工业生产场景,采用工艺计算模型结合数据驱动模型,实现了对协同熔炼过程中关键工艺参数的实时预测与评估;针对配料工艺中长期未解决的不同产地铅精矿、各来源铅基固废与各种辅料混合最优配比计算问题,采用已建立的混合系统模型,配合优化搜索算法,从最优目标工况出发搜索计算得出最优原料配比,实现了协同熔炼过程优化控制,有效减轻了现场配料工程师及工艺工程师的负担。

2) 铅基固废协同熔炼智能预警与高效监控系

统将多种管理系统的复杂信息融合在虚拟仿真环境之中,以符合人类视觉的方式自然呈现,大大提升了信息交互的效率,降低了信息损耗和时间损耗,确保了信息传递的准确性和及时性,降低了信息查询和浏览的难度;系统将各种监控设备的运行数据和状态信息与虚拟车间相结合,通过实时接收监控及预警数据,能够高效地扩展系统功能,允许用户在三维系统中从任意时间、任意地点、任意视角查看任意对象的任意信息,为高效生产管理打下基础。

[参考文献]

- [1] 蒋继穆. 国内外铅冶炼技术现状及发展趋势[J]. 有色冶金节能, 2013, 29(3): 4-8.
JIANG Jimu. Situation and development trend of lead smelting technology at home and abroad[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2013, 29(3): 4-8.
- [2] 安剑刚. 富氧底吹炼铅技术的工业实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(12): 4-7.
AN Jianguang. Plant practice of oxygen enrichment bottom blowing process for lead smelting[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(12): 4-7.
- [3] 吴卫国, 宋言. 中国铅冶炼工业技术创新与应用实践[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(2): 7-13.
WU Weiguo, SONG Yan. Industrial technological innovation and application practice of lead smelting in China [J]. China

- Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(2): 7-13.
- [4] 王成彦, 郜伟, 尹飞. 国内外铅冶炼技术现状及发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(4): 1-5.
WANG Cengyan, GAO Wei, YIN Fei. Lead smelting technology home and abroad and its developing trend[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(4): 1-15.
- [5] 辛鹏飞. 氧气底吹技术处理脆硫铅锑矿工艺原理及实践[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(4): 28-31.
XIN Pengfei. Principle and practice of oxygen bottom blowing technology for treatment of brittle sulphur lead-antimony ore[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(4): 28-31.
- [6] 周忠跃, 韦勇, 韩开远. 利用“双底吹炉”处理低品位复杂含铅物料的工业实践[J]. 云南冶金, 2016, 45(5): 52-57.
ZHOU Zongyue, WEI Yong, HAN Kaiyuan. The industrialization practice on treatment of low grade complex lead materials by double bottom blowing furnace[J]. Yunnan Metallurgy, 2016, 45(5): 52-57.
- [7] 李丽丽, 赵振波, 陈选元. 双底吹熔炼铅膏生产再生铅的工业实践[J]. 资源再生, 2019(1): 58-60.
LI Lili, ZHAO Zhenbo, CHEN Xuanyuan. Industrial practice of producing recycled lead by double bottom blowing and smelting lead paste[J]. Resource Recycling, 2019(1): 58-60.
- [8] 陈霖, 王振虎, 陈威, 等. 富氧底吹炼铅氧化熔炼元素分配热力学模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(9): 1-6.
CHEN Lin, WANG Zhenhu, CHEN Wei, et al. Thermodynamic simulation on elements distribution of lead concentrate oxidative smelting in oxygen-rich bottom-blow smelting process [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(9): 1-6.
- [9] 邓志敢, 魏昶, 李卫峰, 等. 富铅熔渣底吹熔炼还原过程热平衡及热场分布规律[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(10): 15-18, 22.
DENG Zhigan, WEI Chang, LI Weifeng, et al. Heat balance and thermal field distribution of rich lead molten slag reduction in bottom blowing furnace [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(10): 15-18, 22.
- [10] 张红亮, 汤卓, 陈永明, 等. 底吹炼铅炉内流动的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(3): 637-647.
ZHANG Hongliang, TANG Zhuo, CHEN Yongming, et al. Numerical simulation of multiphase flow in bottom-blowing furnace for lead smelting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 27(3): 637-647.
- [11] 曹宇博. 底吹炉铜冶炼过程智能控制技术研究与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
CAO Yubo. Bottom blowing furnace copper smelting process research and application of intelligent control technology [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [12] 李源. 氧气底吹炉熔炼温度控制算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
LI Yuan. The research of the smelting temperature control algorithm on the oxygen bottom blown furnace [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] 汪金良, 周瑞, 刘远, 等. 基于 MetCal 的双底吹连续炼铜工艺全流程模拟计算[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(3): 1-11.
WANG Jinliang, ZHOU Rui, LIU Yuan, et al. Simulation calculation of overall process of double bottom blowing continuous copper smelting process based on MetCal[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(3): 1-11.
- [14] 李明周, 童长仁, 黄金堤, 等. 基于 Metcal 的铜闪速熔炼-转炉吹炼工艺全流程模拟计算[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(9): 20-25.
LI Mingzhou, TONG Changren, JIN Di, et al. Simulated calculation of overall process flow of copper flash smelting and converting based on Metcal [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(9): 20-25.
- [15] WANG Hongcai, FANG Hongru, MENG Lei, et al. A pre-warning system of abnormal energy consumption in lead smelting based on LSSVR-RP-CI[J]. Journal Central South University of Technology, 2019, 26(8): 2175-2184.
- [16] 刘小杰, 张玉洁, 李欣, 等. 基于大数据的高炉炉温监测预警系统[J]. 中国冶金, 2023, 33(2): 98-105, 140.
LIU Xiaojie, ZHANG Yujie, LI Xin, et al. Blast furnace temperature monitoring and early warning system based on big data[J]. China Metallurgy, 2023, 33(2): 98-105, 140.

Online intelligent optimization control for the lead-based solid waste synergistic smelting process

ZHANG Zhekai¹, CHU Jinwang¹, HAO Liangjun¹, XU Xiaofeng², ZHANG Li¹, CHEN Jinshui²

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Lead-based solid waste is a common waste produced at both production and consumption ends, and has a strong pollution effect. Its green treatment technology is a key link to achieve the prevention of lead containing waste pollution. The collaborative treatment of lead based solid waste by double-bottom blowing process is an economical and reasonable way to treat lead based solid waste. Comparing with the traditional ore lead smelting, its production operation is more complex for co-processing lead solid waste. In order to ensure its production status in

a stable and economic state, there are higher requirements for its process control system. A set of online intelligent optimization control system for lead-based solid waste collaborative smelting process has been developed by China ENFI Engineering Corporation. The whole system is integrated of online optimization control system, intelligent early warning and efficient monitoring system and system database, which mainly realizes the following functions : ① In response to the low level of automation in treatment process, based on smelting process mechanism and big data of production operation, a prediction model of key parameters of smelting process is established by applying computer modeling and neural network method, and a set of online optimization control system for lead-based solid waste collaborative smelting is developed; ② Using the workshop reality model as the carrier, an intelligent early warning and efficient monitoring system for lead-based solid waste synergistic smelting is established to realize the digitalization and visualization of industrial signals, scenes and processes; ③ The control system integrates the relevant hardware and software on site, and displays the data interaction and collaborative operation between the modules in detail, forming an intelligent, efficient and safe synergistic smelting workshop.

Key words: lead-based solid waste; synergistic smelting; intelligent control; burden optimization; neural network prediction model; 3D visualization

上半年规模以上有色企业利润总额显著增长

7月29日,中国有色金属工业协会以线上线下相结合的形式召开2024年上半年有色金属工业经济运行情况新闻发布会。有色协会党委常委、副会长兼新闻发言人陈学森通报上半年有色金属工业经济运行情况。陈学森表示,今年以来,我国有色金属工业运行良好,各项经济指标均呈现积极向上的态势,具体表现在5个方面。

一是生产增长势头稳健合理。上半年,有色金属企业工业增加值比去年同期增长10.8%,高出工业领域4.8个百分点。其中,矿山采选企业工业增加值增长9.1%,增幅较一季度扩大2.3个百分点;冶炼加工企业工业增加值增长11.1%。

二是固定资产投资持续增长,投资结构持续优化。上半年,有色金属工业完成固定资产投资比去年同期增长23.5%,增幅比全国工业投资增幅高出10.9个百分点。其中,上游矿山采选业固定资产投资累计增长43.5%,较一季度增幅扩大10个百分点;中下游冶炼和压延加工固定资产投资累计增长19.8%。

三是对外贸易规模稳步提升,重点产品进出口量均有增长。上半年,有色金属进出口贸易总额1875.2亿美元,同比增长11.5%。其中,进口额1558.2亿美元,同比增长13.2%;出口额317.1亿美元,同比增长3.9%。

四是主要常用有色金属价格高位波动,新能源金属价格低位运行。上半年,主要金属品种铜、铝、铅、锌的国内市场价格走势偏强。国内现货市场铜均价74490元/吨,同比增长9.6%;国内现货市场铝均价19798元/吨,同比增长6.9%;国内现货市场铅均价17043元/吨,同比增长11.7%;国内现货市场锌均价22112元/吨,同比持平。

五是规模以上有色金属企业利润总额显著增长。上半年,规模以上有色金属工业企业实现营业收入42532.2亿元,同比增长14.0%;实现利润总额1884.9亿元,同比增长56.9%,较一季度增幅扩大26.5个百分点。

陈学森指出,虽然国际形势仍然错综复杂,行业依旧面临全球贸易保护加剧、地缘冲突不断以及国内房地产行业复苏缓慢等不确定性因素影响,但受国家扩大内需系列政策逐步到位、全球绿色高质量发展趋势不变等有利因素影响,初步预计,下半年有色金属市场需求仍将保持平稳增长。

(资料来源:中国有色金属报)