

引用格式: 郝亮钧, 楚金旺, 张哲铠, 等. 复杂铅基多金属固废协同熔炼高效监控与智能预警[J]. 有色设备, 2024, 38(5): 84-90.

HAO Liangjun, CHU Jinwang, ZHANG Zhekai, et al. Efficient monitoring and intelligent warning for the synergistic smelting process of lead-based solid waste with multiple metals[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(5): 84-90.

复杂铅基多金属固废协同熔炼高效监控与智能预警

郝亮钧, 楚金旺*, 张哲铠, 张 理, 刘 屹

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 复杂铅基多金属固废协同熔炼对实现铅基固废的绿色处理和高效回收, 避免环境污染, 促进“双碳”目标有着重要意义。高效监控与智能预警系统采用数字机理建模与数字仿真建模相融合的技术, 不仅构建了入料分解、元素分配和产物凝合的复杂机理模型, 而且搭建了铅基固废双底吹连续熔炼过程的三维生产场景, 直观、真实地展示了熔炼车间建筑结构、生产设备属性信息和动态生产过程, 实现了整个熔炼过程的数字化、可视化, 并且通过生产数据监控与机理模型的耦合分析、设备关键参数预警分析和现场人员安全预警分析, 使工艺人员能够实时了解任意生产细节, 作出更加科学高效的决策, 保证生产过程的安全稳定运行。

[关键词] 铅基固废; 协同熔炼; 数字化; 高效监控; 智能预警; “双碳”目标

[中图分类号] TF812

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2024)05-0084-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.05.012

0 引言

铅基固废主要包括铅锌铜冶炼过程中的冶炼渣、烟灰、粉尘、含铅污泥以及再生系统中的铅膏等, 属于危险废物, 处理不当将对环境造成严重污染^[1]。铅基固废协同熔炼技术, 不仅实现了铅基固废的绿色处理, 而且通过矿渣的再提炼、再利用, 促进了“双碳”目标的实现^[2]。中国恩菲工程技术有限公司研发的氧气底吹熔铅技术^[3-4], 在 2002 年首次工业化应用成功, 最终形成稳定的“底吹熔炼-熔融还原-富氧挥发”三连炉连续炼铅作业流程, 是氧气底吹熔铅法最新和最先进的技术成果^[5]。

然而, 熔炼过程反应机理相当复杂^[6-8], 传统的数学模型存在精度低、波动大、误差大等问题, 现有有色金属冶炼控制系统是建立在传统简化机理模型

基础上的, 难以实现精准的有效控制, 为此, 基于冶炼过程机理模型, 结合实际生产大数据, 建立冶炼过程数字机理模型, 并以实景模型为载体, 匹配精准在线监测设备与手段, 实现信号、场景及流程数字化与可视化, 开发协同熔炼智能预警与高效控制系统, 有利于提升工厂管理效率, 提高工厂的运行安全性与经济性, 进而实现工厂在全周期内运行效益的最大化^[9-12]。

本文基于氧化熔炼和还原熔炼的工艺机理, 搭建了协同熔炼过程的数字机理模型。结合三维数字化仿真技术, 构建了熔炼过程的三维动态仿真模型, 实现了氧化熔炼加料、底吹氧化熔炼、还原熔炼加料、底吹还原熔炼、粗铅排放等铅基固废协同熔炼过程的数字化、可视化。

1 铅基多金属固废协同熔炼工艺机理

协同熔炼工艺过程, 主要包括氧气底吹熔炼和氧气底吹还原 2 个阶段, 如图 1 所示。其中, 氧气底吹熔炼过程主要将硫化铅通过氧化反应生成氧化铅, 氧气底吹还原过程则是将氧化铅通过与碳反应还原为金属铅。具体过程为: 复杂铅基多金属固废经配料系统形成混合物料, 与石英石、电石渣等物料从入料口加入熔炼炉, 工业氧、氮气、除氧水等从喷枪

[收稿日期] 2024-07-24

[第一作者] 郝亮钧(1990—), 男, 山西忻州人, 高级工程师, 博士, 主要从事数字建模和算法开发研究工作。

[通信作者] 楚金旺(1977—), 男, 山东禹城人, 正高级工程师, 硕士, 主要从事数字智能技术研发与工程应用工作。

[基金项目] 国家重点研发计划-复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备-协同熔炼过程自适应在线智能优化控制系统(2019YFC1907305)。

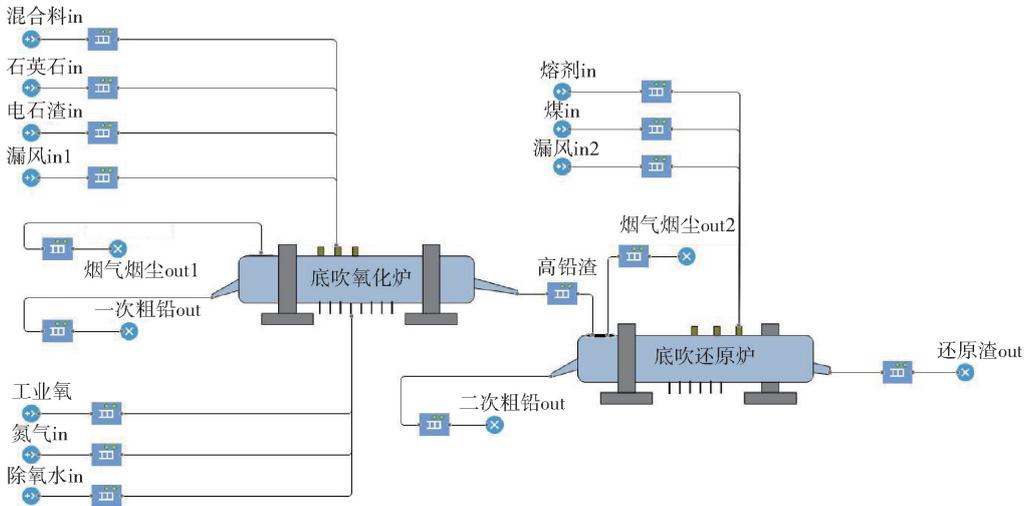


图1 协同熔炼工艺过程

Fig. 1 Collaborative melting process

加入熔炼炉,同时有漏风从烟气口进入,在炉膛中发生一系列反应后,生成少量的金属铅从一次粗铅口排出,大部分氧化为高铅渣进入还原炉,烟气烟尘从排烟口排出。高铅渣进入还原炉后,与从加料口进入的熔剂、煤等发生一系列反应,被还原后的金属铅从二次粗铅口排出,剩余部分还原渣口排出,烟气烟尘从排烟口排出。

2 数字模型的搭建

2.1 入料元素量的计算

虽然底吹氧化炉、底吹还原炉发生的主反应是可以确定的,但实际反应历程、反应程度难以精确描述。因此,采用元素分配的计算方法,通过元素守恒与平衡约束求解输出产物。

首先,定义投料参数,包括各物相质量以及每种物相中不同成分的占比。投料包括混合料、石英石、电石渣、工业氧、氮气、漏风、冷却水、除盐水等8种物相。其中,混合料包括 PbS 、 $PbSO_4$ 、 ZnS 、 $ZnSO_4$ 、 ZnO 、 $CuFeS_2$ 、 FeS_2 、 Fe_7S_8 、 Fe_2O_3 、 S 、 SiO_2 、 CaO 、 $CaSO_4$ 、 As_2S_3 、 As_2O_3 、 Sb_2S_3 、 Sb_2O_3 、 Bi_2S_3 、 Ag_2S 、 PbO 等20种主要成分;石英石包括 SiO_2 、 $CaCO_3$ 、 Fe_2O_3 、 $MgCO_3$ 、 Al_2O_3 、 H_2O 等6种主要成分;电石渣包括 $Ca(OH)_2$ 、 $CaCO_3$ 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 $MgCO_3$ 、 Al_2O_3 、 H_2O 等7种主要成分。

基于投料参数,结合各元素的物质的量,可以计算得到投料中所有元素的质量,计算过程见式(1)。

$$input_Ele = \sum_i Phase_i \times$$

$$\left(\sum_j n_j \times Phase_i_Comp_j \div M_Comp_j \right) \quad (1)$$

式中: $input_Ele$ 表示投料中元素 Ele 的物质的量, mol;元素 Ele 包括 Pb 、 S 、 O 、 Zn 、 Cu 、 Fe 以及 $Other$ 等18种; $Phase_i$ 表示第 i 种投入物料的质量流量, g/h; $Phase_i_Comp_j$ 表示第 i 种投入物料种成分 $Comp$ 的质量占比, %; M_Comp_j 表示成分 $Comp$ 的摩尔质量, g/mol; n_j 表示组分 $Comp$ 中元素的 Ele 个数。

2.2 产物元素分配计算

基于产物元素分配的约束参数,计算不同输出物相中各元素的占比,从而确定反应过程中各元素的分配系数。

产物元素分配参数分为3种类型:定义、推断和计算。其中,定义参数直接给出了物相中元素的占比,推断参数基于元素守恒直接得到物相中未给出的元素剩余占比,计算参数通过元素守恒方程求解得到。

为了实现输出物相中不同元素的分配功能,构造元素分解器,如图2所示。通过设置不同输出分支中的比例参数,即产物分配参数,分别聚集于各自物相中。

图2中, $delayTime$ 表示元素分配过程中的聚集能力, $paramOut1$ 、 $paramOut2$ 、 $paramOut3$ 、 $paramOut4$ 、 $paramOut5$ 分别表示元素去往5种物相的分配参数,当不存在某种物相时,参数默认为0。

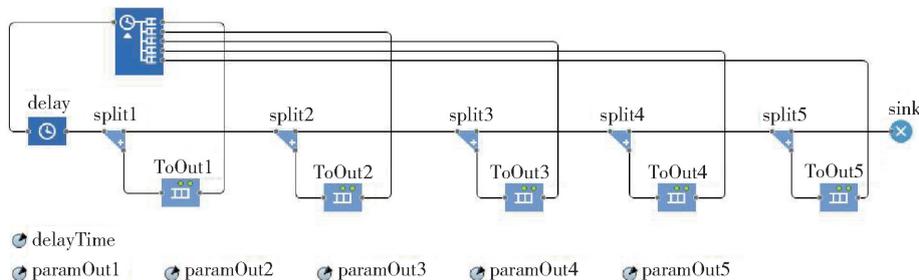


图2 元素分解器的构造

Fig. 2 Construction of element decomposer

2.3 产物凝合过程计算

基于每种物相的元素分配量,结合物相中含该元素的成分种类及化学式,计算各成分的百分比,从而确定最终的产物输出结果。其中,富铅渣的主要成分包括 PbO 、 SiO_2 、 $2\text{ZnO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 ZnO 、 FeO 、 $\text{ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 Cu_2S 、 FeS 、 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 As_2O_5 、 Sb_2O_5 、 Bi_2O_3 、 AgO 及 Other 等 17 种主要成分。

为了实现物相中各元素的重新凝合并生成输出组分,构造元素凝合器,其构造方法与元素分解器相反。

在上述元素凝合过程中, delayTime 参数的凝聚功能与 paramOut 参数的分配功能,共同实现了各成分化学式的精准匹配,使得各输出物相中不同成分基于生成元素不断进行动态输出,保证了各成分占比的正确性。

2.4 完整数字机理模型

经过上述投入元素计算、产物元素分配以及产物凝合计算 3 个过程,实现了从投料到产出整个过程的复杂化学过程计算。从进料端口加入的物料,首先通过进料分支函数,分为混合料、石英石、电石渣及漏风 4 个物相。底部含 2 个入料端口,其中 1 个端口包含 2 个物相,即通过分支函数分为工业氧和除盐水,另 1 个端口仅包含氮气。

各物相通过分支比例函数,分为不同成分。各成分在元素分解器的作用下,基于化学表达式分离出不同元素,各元素分别进行化合,作为整个复杂化学过程的中间节点。各元素首先基于产物中各成分的种类以及化学式中元素的需求个数进行镜像复制计算,其中,氧元素复制成 30 个镜像元素,构成的产出成分最多;然后,各元素在元素凝合器的作用下,按照成分的化学表达式进行凝合计算,并最终流向

不同输出物相。

3 数字三维模型构建

随着数字科技的不断进步与发展,当今模型数据体系所需承载的维度、基数与结构均越来越复杂,传统的二维平台已无法满足当前对数据快速且清晰的理解与吸收。三维可视化运维平台具有多维度与多层次的数据体现方式,可对宏观场景、设备运行场景、数据统计分析等多方面进行可视化,通过对物体进行全方位的监控,让数据变得更加直观易懂。

3.1 熔炼车间三维建模

基于厂房配置图,运用数字化仿真技术,以 Unity3D 开发软件构建相应三维熔炼车间模拟现实场景,包括建筑外墙、结构梁柱、建筑平台、生产设备等所有因素,包含物理层、虚拟层、数据层、连接层和服务层 5 个层级,将实际主体、信息属性、生产数据、功能数据进行了有效耦合。协同熔炼车间主要包含混合配料、氧化熔炼和还原熔炼等 3 个工艺过程,涉及主要工艺设备包括上料系统、底吹氧化熔炼炉、底吹还原熔炼炉等。车间三维模型如图 3 所示。

3.2 生产设备信息查询

整个生产过程中,设备种类和数量繁多,不同设备均有着各自的属性参数。通过生产设备与属性参数的一一映射,当设备管理人员选中生产设备时,系统能够自动从设备属性数据库中获取该设备的全部属性数据,使得设备管理人员或现场工艺人员可以实时直接查看相关数据,从而提升工作效率。核心生产设备氧化熔炼炉、氧化还原炉的设备信息,主要包括设备名称、规格、厂家等基本属性以及氧枪数量、氧气用量、工作温度、工作压力、下料口数等生产属性,如图 4 所示。

3.3 熔炼工艺动态仿真

基于铅基多金属固废协同熔炼的实际生产过程

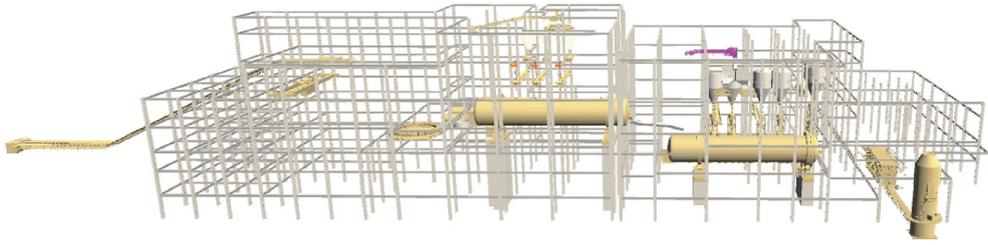
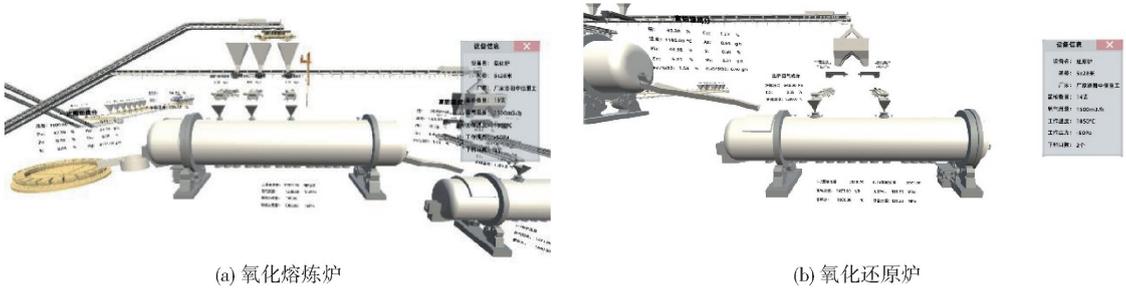


图3 协同熔炼车间三维模型

Fig. 3 Three dimensional model of collaborative melting workshop



(a) 氧化熔炼炉

(b) 氧化还原炉

图4 核心生产设备信息

Fig. 4 Production equipment information

以及氧化熔炼、还原熔炼的工艺流程机理,结合三维数字化仿真技术,实现了整个熔炼过程的动态仿真,包括配料、物料输送、进料、熔融态金属熔炼和流动、烟气排出、喷氧、除渣等全部生产细节,为熔炼过程的高效监控提供了数字底座。

其中,底吹氧化炉通过顶部加入含铅混合料,底部枪射入工业氧气和氮气,经过分解、燃烧、氧化熔融反应生成一次粗铅和富铅渣,一次粗铅从出铅口排出进行铸锭,而熔融的富铅渣排入底吹还原炉进行后序还原熔炼。底吹氧化炉的工艺动态模型如图5所示。

底吹氧化炉的热态熔融富铅渣通过流槽排入底吹还原炉,底吹还原炉的工艺动态模型如图6所示。底吹还原炉通过底部气体枪喷吹富氧空气、氮气和粉煤,进行富铅渣发生还原熔炼反应,生成二次粗铅和还原炉渣。

4 可视化智能监控与预警计算

4.1 生产数据可视化实时监控

可视化技术是生产过程监控的重要手段,通过对生产流程数据的实时采集,并进行生产结果与数字机理模型的耦合再学习,对数据背后的实际工艺逻辑进行及时有效分析,挖掘出监控数据背后的真正意义,

进而使生产人员能够作出更加科学高效的决策。

针对复杂铅基多金属固废协同熔炼过程中的配料、熔炼和还原工艺流程,进行了多维度数据的监测和分析,主要包括运行数据概览、运行指标监测、运行状态信息等。实时监测整个生产过程中各配料仓的下料量、氧化炉进料量、熔池压力、烟道压力、氧枪压力、熔池液位等运行参数,风量、富氧量、风压、喷吹气体温度等喷吹气体参数,风温、炉温、烟气温度等安全温度参数,熔体液面高度、炉渣厚度和冷却壁温度等炉体运行参数,以及每股物料中各元素的含量(图7)。

4.2 高效预警

针对协同熔炼过程中的重点关注设备,结合生产实际与工艺机理分析其关键工艺参数,对于底吹氧化炉熔炼工艺,高铅渣品位、高铅渣铁硅比、高铅渣钙硅比、高铅渣温度等目标参数是底吹氧化炉监测的重要关注参数,当前物料情况下需要的富氧空气量、粉煤量以及产物粗铜的成分、吹炼渣的成分和吹炼烟气烟尘成分等参数为氧气底吹还原炉的重点监测对象。通过生产数据、机理数据的耦合分析,设定关键参数的安全阈值范围,一旦关键参数过低或过高,超出安全阈值范围,则立即做出预警,并通过参数背景色变化、声音警报

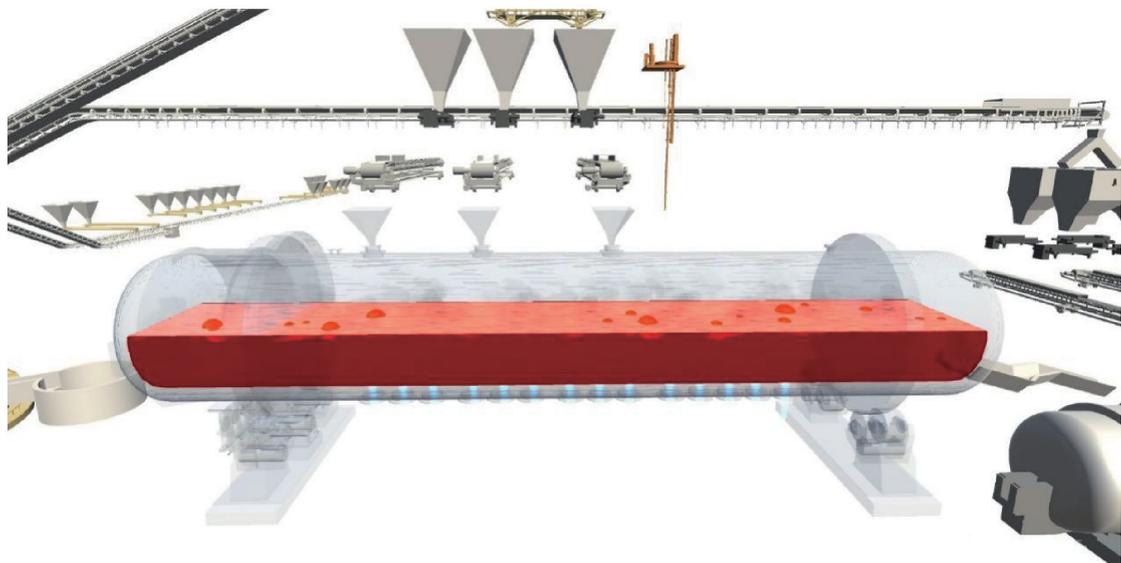


图 5 底吹氧化炉的工艺动态模型

Fig.5 Process dynamic model of bottom blown oxidation furnace

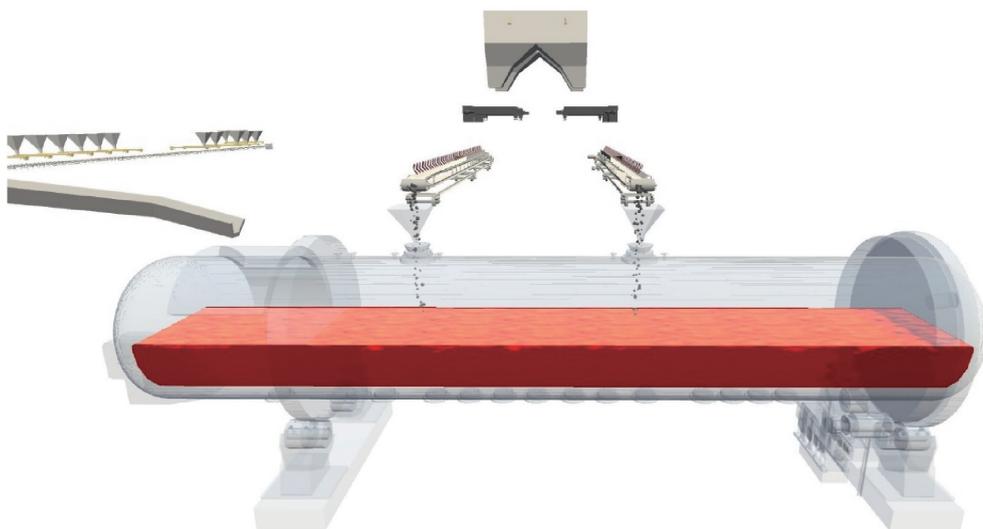


图 6 底吹还原炉的工艺动态模型

Fig.6 Process dynamic model of bottom blowing reduction furnace

等多种方式,及时向工艺人员发出提醒,确保生产过程的安全稳定运行(图 8)。

此外,通过人员导航功能和电子围栏功能,实现人员安全预警。一旦非本岗位人员进入熔炼工作区,或者工作人员在工作区出现停留异常时,则会发出相应的报警类型,避免工作人员发生紧急情形而不能及时作出反应,保证工作人员的安全,同时确保生产过程的安全运行(图 9)。

综上,实时监测和分析生产过程中关键指标与最佳值之间的差异,提高工厂运作决策效率,并加入

智能预警分析功能,一旦设备数据超过安全阈值并结合历史数据进行分析研判,将在三维场景内对异常数据进行标红闪烁以呈告警状态。

5 结论

本文通过数字机理建模与数字仿真建模相融合的技术,实现了入料元素计算、产物元素分配以及产物凝合计算等复杂工艺机理模型的求解,搭建了铅基固废双底吹连续熔炼工艺过程的三维生产场景,直观、真实地展示了熔炼车间建筑结构、生产设备属

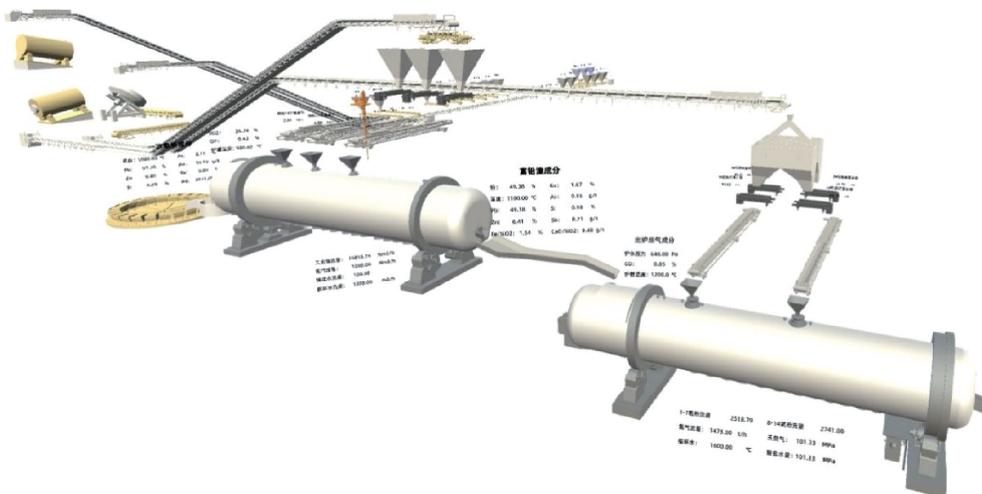


图 7 协同熔炼过程实时生产数据

Fig. 7 Real time production data of collaborative melting process

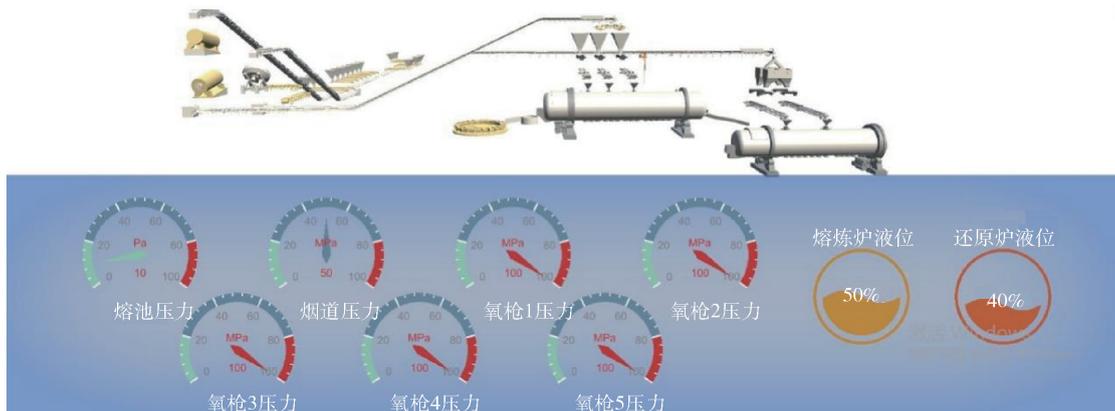


图 8 生产异常预警

Fig. 8 Production abnormal warning

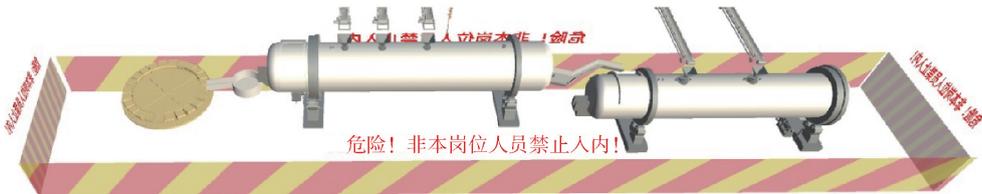


图 9 人员安全预警

Fig. 9 Personnel safety warning

性信息和动态生产过程,实现了从配料输送、加料口进料、底吹喷氧、氧化熔炼、还原熔炼直到粗铅排放整个熔炼过程的数字化、可视化,使得工艺人员能够实时了解任意生产细节。同时,通过生产数据监控,并与机理模型数据的耦合分析,挖掘其背后的真正工艺逻辑,使工艺人员能够作出更加科学高效的决策。此外,通过设备关键参数预警分析以及现场人

员的安全预警分析,便于工艺人员及时响应,保证生产过程的安全稳定运行。进而,实现铅基固废的绿色处理和高效回收,避免环境污染,助力“双碳”目标的实现。

[参考文献]

[1] 刘巍. 中国铅酸蓄电池行业清洁生产和铅元素流研究 [D]. 北京:清华大学, 2016.

- [2] 吴卫国, 宋言. 含铅锌多金属固废的处理工艺创新及工业应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6):95-100.
- [3] 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.
- [4] 郭春霞, 刘德杰, 谢静, 等. 河南省铅锌冶炼行业发展现状[J]. 广东化工, 2017, 44(11):180-183.
- [5] 李东波. 现代氧气底吹熔炼铅技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2021.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李利丽, 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.
- [9] 杨程,刘涛,陈念年, 等. 3D 数字工厂监控系统的设计与实现[J]. 化工自动化及仪表,2012,39(1):108-111.
- [10] 张利利,李仁义,李晓京, 等. Unity3D 与数据库通信方法的研究[J]. 计算机技术与发展,2014,24(3):229-232.
- [11] 柯榕. 车间制造状态三维虚拟监控与预警方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
- [12] 梁兴明,董伯麟,何其昌, 等. 车间生产过程实时虚拟监控系统研究与设计[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2017,10(8):838-844.

Efficient monitoring and intelligent warning for synergistic smelting process of lead-based solid waste with multiple metals

HAO Liangjun, CHU Jinwang*, ZHANG Zhekai, ZHANG Li, LIU Yi

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The synergistic smelting process for lead-based solid waste with multiple metals is of great significance to achieving green treatment and efficient recovery, avoiding environmental pollution, and promoting carbon peaking and carbon neutrality. The efficient monitoring and intelligent warning system adopts the technology of integrating digital mechanism modelling and digital simulation modelling. Not only the complex mechanism model containing feed decomposition, element distribution and product coalescence is constructed, but also the three-dimensional production scene for continuous smelting process of lead-based solid waste is built. It intuitively and realistically displays the workshop building structure, production equipment attribute and dynamic production process, achieving digitalization and visualization of the entire smelting process. Moreover, through production data monitoring with the coupling analysis of mechanism models, as well as the warning analysis for equipment key parameter and on-site personnel safety, process personnel can understand any production details in real time, make more scientific and efficient decisions, and ensure the safe and stable operation of the production process.

Keywords: lead-based solid waste; synergistic smelting process; digitization; efficient monitoring; intelligent warning; “dual carbon” target ▲