

顶吹炉连续炼铜工艺决策优化系统研究

崔景瑞¹, 陈一波², 刘 晔¹

(1. 江西铜锐信息技术有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 江铜国兴(烟台)铜业有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要: 多枪顶吹吹炼炉是国产新兴“热态三连炉”炼铜工艺中的核心装备之一, 由于炉况波动性大, 常出现参数调整滞后、生产连续性不佳等问题, 其过程感知能力及智能决策水平有待提升。本研究基于冶金机理建模、工业数据采集以及软件开发等技术, 构建了一套顶吹炉工艺决策优化系统。基于冶金反应机理建立了顶吹炉投入产出数学模型, 实现了对熔剂量、风量等核心操作参数的定量计算; 构建了关键过程参数推算模型, 有效突破了连续冶炼工艺中的状态感知限制; 通过系统集成将数据采集、模型计算等模块封装, 搭建了完整的决策优化系统, 实现了核心控制参数的精准计算与决策支持。该系统的应用不仅显著降低了人工操作的不确定性, 也为热态三连炉连续炼铜工艺多工序间的动态协同调控提供了有效技术支持。

关键词: 铜冶炼; 冶金数模; 多枪顶吹吹炼炉; 连续炼铜; 数值模拟; 正交试验

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.003

中图分类号: TF811 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)03-0024-09

国产新兴“富氧侧吹熔炼-多枪顶吹吹炼-回转式阳极炉精炼”热态三连炉工艺, 采用炉间溜槽取代传统行车吊运完成物料与产物流转, 实现了从铜精矿至冰铜、粗铜的连续冶炼, 具有流程短、规模灵活、环保能效高等优点^[1-2]。顶吹吹炼是三连炉的中间工序, 需在连续接收冰铜原料的同时, 稳定产出粗铜。在这种连续生产的状态下, 其粗铜含硫量难以实现精确控制, 需要在多变量耦合工况下维持生产的动态平衡。

铜的火法冶炼过程涉及高温、多相的物理化学变化, 具有多变量、非线性、强耦合、大滞后、不确定性等特点, 导致生产过程难以精确判断及控制^[3-4]。针对这一问题, 业内诸多专家学者开展了大量研究^[5-8]。现有成果表明, 在工况稳定、感知系统完善的成熟冶炼工艺中, 基于冶金机理构建的数学模型已得到广泛应用, 并展现出良好的控制效果。处于工艺技术升级和智能化建设初期的三连炉, 更多依靠炉长经验进行参数控制, 人工感知炉况变化滞后, 不同操作人员间经验差异大, 易导致参数调整滞后、波幅大、连续性差等问题, 使得产品质量波动大, 燃料消耗高, 风氧利用率低。

针对上述问题, 本研究提出了一种多枪顶吹炉吹炼的冶金数学计算模型, 在采集现有 DCS 所有实

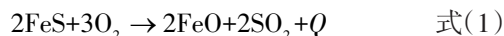
时生产数据的基础上, 实现顶吹炉吹炼的智能辅助决策, 为顶吹炉风量、氧量的调配以及熔剂等辅料的投加提供指导。

1 多枪顶吹连续吹炼冶金数学模型

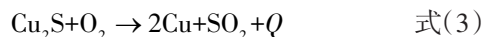
1.1 吹炼反应过程

铜吹炼作业是在熔剂存在的条件下, 将富氧压缩空气吹入炉内熔融的冰铜, 除去其中的铁、硫及部分其他有害杂质, 获得粗铜的过程。

冰铜主要成分为 Cu_2S 与 FeS , 当冰铜进入到顶吹炉内, 高压富氧空气从顶部喷枪进入熔体内部, 搅动熔体并发生氧化反应, 首先发生的为 FeS 与氧和造渣剂的反应:



反应将冰铜中的 FeS 变为铁酸钙相炉渣, 当 FeS 完全氧化去除后, 炉内发生的反应主要为 Cu_2S 氧化成 Cu_2O , 其与 Cu_2S 发生交互反应, 得到金属铜:



该反应为强放热反应(式中“+Q”表示放热), 可以满足吹炼所需要的温度, 但当温度过高时, 将缩短炉体寿命, 因此需要加入冷料来平衡炉温。

收稿日期: 2025-09-08; 修订日期: 2025-12-24

作者简介: 崔景瑞(1996—), 女, 河南郑州人, 硕士, 电子信息工程师, 研究方向: 检测信息与技术, E-mail: cuijingrui@jxccc.com; 通信作者: 刘晔, 高级工程师, E-mail: 100481000@qq.com

1.2 冶金计算模型

顶吹炉吹炼是一个复杂的反应过程,在进行数值模拟时,需要综合考虑顶吹炉内发生的化学反应,由于顶吹炉吹炼系统高温、多变量等特点,难以通过试验和取样分析等方式来确定反应过程。基于物质守恒和能量守恒原理,见式(4)(5),对吹炼过程的关键反应环节,采用金属平衡和热平衡实现仿真计算。

$$\sum_{j=1}^m (C_{in,j}^E \times M_{in,j}) = \sum_{k=1}^n (C_{out,k}^E \times M_{out,k}) \quad \text{式(4)}$$

$$\sum Q_{收入} = \sum Q_{支出} \quad \text{式(5)}$$

其中, $C_{in,j}^E$ 为入炉物料中元素 E 品位, $M_{in,j}$ 为入炉

物料量, $C_{out,j}^E$ 为出炉物料中元素 E 品位, $M_{out,j}$ 为出炉物料量, $Q_{收入}$ 为热收入, $Q_{支出}$ 为热支出。

顶吹炉工艺如图1所示。在吹炼生产过程中,粗铜含硫量、渣铁钙比、铜温、渣温是顶吹吹炼过程控制的关键指标,即数模软件约束的控制目标;风量、氧量、熔剂加入量为顶吹吹炼过程控制中需要调节的变量,即数模软件输出的用于控制生产的参数。

参考闪速熔炼过程的平衡求解思路^[9],结合顶吹炉吹炼的生产实际,形成了适用于本工艺的金属平衡计算方法:

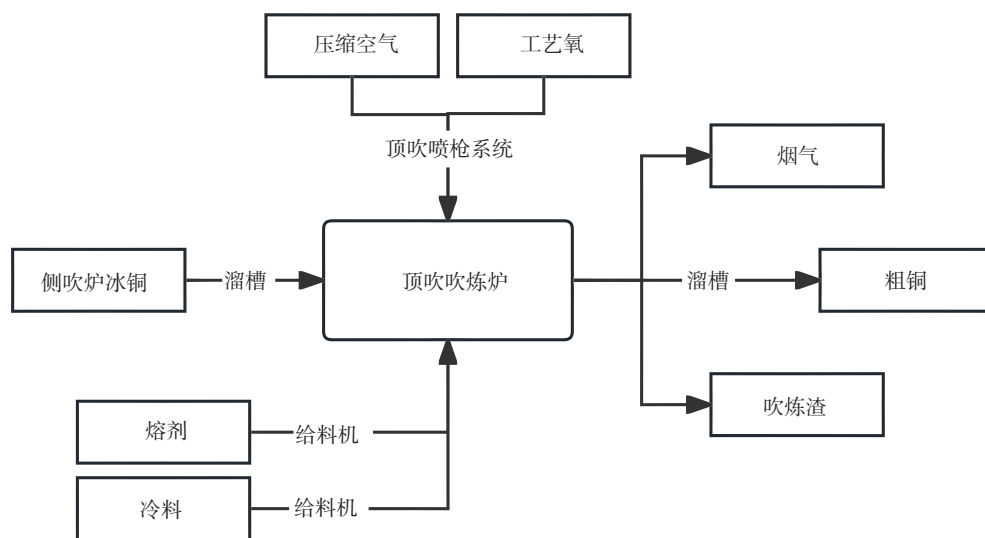


图1 顶吹炉简化工艺流程图

Fig. 1 Simplified process flow diagram of top-blown furnace

金属平衡1(metal balance 1, MB1): 根据顶吹炉的入炉冰铜量、成分以及目标渣铁钙比要求,计算入炉石灰石熔剂加入量。

金属平衡2(metal balance 2, MB2): 在已知加入顶吹炉的物料量及成分,根据目标粗铜的品位要求,求解氧气量、产出粗铜量及渣量。

根据质量守恒定律,参与化学反应的物质质量总和不变,即顶吹炉吹炼过程中入炉物料及产出物料的质量之和与各元素量总和相等,如表1所示。

表中, C 为推算值, S 为测量值, G 为给定值, X 为未知量。

根据能量守恒定律^[10],进行炉内反应的热量平衡计算。在整个模型构建中,研究各物料在炉体反应过程中的放热、吸热机理,构建适配顶吹炉的热

平衡计算模型,以化合物推定计算投入产出物料成分,为热平衡计算提供依据,并以金属平衡计算结果为基础,推算实际装入炉内的物料量及其成分与热量、顶吹炉产物成分与热量、炉内反应过程中的反应热。综合考虑氧气利用率等关键影响参数,计算维持顶吹炉热平衡所需要的风量和氧量,并将其转换为现场的控制参数,如表2所示,其中热平衡计算方法如下:

热平衡(heat balance, HB): 在确保顶吹炉达到目标要求的一定温度分布情况下,对于不同冷料处理需求,进行顶吹炉吹炼所需工艺风量计算。

1.3 粗铜品位、粗铜温度控制模型

当投入冰铜品位、物料量发生改变或生产过程受到扰动时,模型在线计算顶吹炉控制参数,实现

表 1 顶吹炉出入炉物料质量平衡表

Table 1 Mass balance of top-blown furnace

投入/产出	物料明细	物量/t	Cu/%	Si/%	Fe/%	CaO/%	...
投入	冰铜	C	S	S	S	S	...
	残极	S	S	S	S	S	...
	铜米	S	S	S	S	S	...
	石灰石	S	S	S	S	S	...
产出	粗铜	X	G	G	G	G	...
	顶吹渣	X	G	G	X	X	...
	烟灰	X	G	G	G	G	...
	排烟	X	$/$	G	$/$	$/$	...

表 2 顶吹炉吹炼过程热量平衡表

Table 2 HB of top-blown furnace

类型	明细项	备注
热收入	冰铜带入热	—
	工艺风氧带入热	—
	造渣放热	$\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3\rightarrow\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
	FeS 氧化放热	$2\text{FeS}+3\text{O}_2\rightarrow 2\text{FeO}+2\text{SO}_2+Q$
	Cu_2S 氧化放热	$\text{Cu}_2\text{S}+\text{O}_2\rightarrow\text{Cu}_2\text{O}+\text{SO}_2+Q$
	$\text{Cu}_2\text{S}+2\text{Cu}_2\text{O}\rightarrow 6\text{Cu}+\text{SO}_2-Q$	
热支出	Cu 氧化放热	$4\text{Cu}+\text{O}_2\rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$
	粗铜带出热	—
	顶吹渣带出热	—
	烟灰带出热	—
	烟气带出热	$\text{SO}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ 烟气带走热
	冷却水带走热	—
	炉衬带走热	—
	冷料消耗热	铜米消耗热、残极消耗热

对粗铜品位和温度的控制。计算结果反应所需工艺风量、氧量、熔剂量的设定值,使得产出的粗铜品位、目标渣 Fe/CaO、粗铜温度趋近目标值,计算流程如图 2 所示。

模型以入炉物料成分及投料量、目标渣 Fe/CaO、目标渣温度、目标渣含铜量为约束条件,计算

反应所需工艺风量、氧量的设定值。MB1 共有 9 个未知量,组成 9 个平衡方程,求解时可先计算系数矩阵,在组织方程组时应避免对角线系数为 0。

以金属平衡计算的产出粗铜量、吹炼渣量、吹炼烟尘量、烟气量及其成分量为基础,结合热平衡模型,将投入冷料量、各目标温度作为已知条件,求取工艺风量。

2 关键影响控制条件推算

在顶吹炉作业中,冰铜、风氧、熔剂均为关键投入物料,其中冰铜装入量、氧气利用率等均为数模计算过程中的关键控制条件。冰铜品位数据的获取除传统检测化验外,通过引入先进智能检测设备——冰铜成分在线检测仪^[11],实现了高频率快反馈地进行冰铜品位化验。此外,在顶吹炉作业中,冰铜装入量与氧气利用率这两项控制条件的获取方式均存在一定的局限性,本研究就相关推算进行了深入研究分析。

2.1 冰铜装入量推算

在连续炼铜工艺过程中,顶吹炉的冰铜装入方式与传统作业中转炉所采用的铜包运输方式不同,

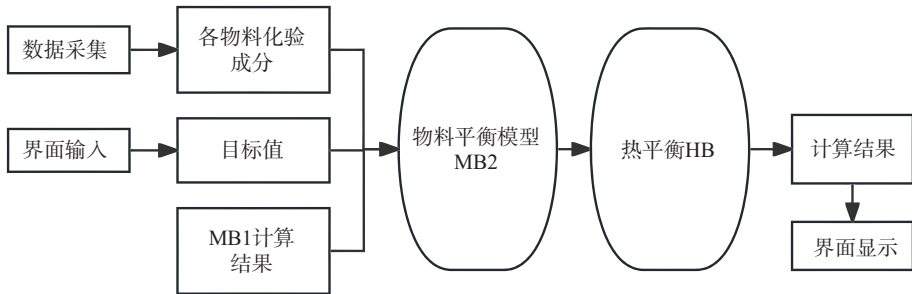


图 2 顶吹炉冶金模型计算流程图

Fig. 2 Flow diagram of the top-blown furnace metallurgical model

其采用溜槽运输方式,大幅降低了SO₂逸散及冰铜的热损失,但也为过程控制带来了新的挑战。

溜槽运输方式受工艺制约,一方面无法采用铜包作业称重来有效计量装入冰铜的质量,另一方面受冰铜熔体高温、强侵蚀性等因素影响,暂无有效可靠的计量装置。因此,本研究提出了一种顶吹炉溜槽冰铜装入量的推算模型。

模型通过侧吹炉所投入的含铜物料量以及其品位,并考虑熔炼直收率 k ,可计算冰铜的理论产出量,但由于侧吹-顶吹为连续冶炼作业,冰铜理论产出量并不直接等于顶吹炉装入量。经工艺分析,可通过侧吹炉内熔体液位高度对理论冰铜量进行修正,见公式(6)。

$$G_{\text{冰铜}} = \frac{G_{\text{含铜物料量}} \times \alpha \times k_{\text{熔炼}}}{\beta_{\text{冰铜}}} - \Delta L_{\text{侧吹冰铜液位}} \times \rho \quad \text{式(6)}$$

式中, $G_{\text{冰铜}}$ 为顶吹炉冰铜装入量推算值, $G_{\text{含铜物料量}}$ 为入炉含铜物料量测量值, α 为含铜物料化验的Cu品位, $k_{\text{熔炼}}$ 为熔炼直收率, $\beta_{\text{冰铜}}$ 为冰铜化验Cu品位, $\Delta L_{\text{侧吹冰铜液位}}$ 为单位时间内侧吹炉液位变化差值, ρ 为修正系数。

2.2 氧气利用率推算

顶吹炉吹炼作业所需的富氧空气,是通过炉体顶部的直立非浸没式喷枪向炉内输送。目前风量及氧气浓度均已具备有效的在线检测手段,但由于炉内冰铜与吹炼渣的物质密度不同而导致分层,且吹炼渣层位于冰铜层上部,因此渣型的差异在一定程度上会影响氧气与冰铜的反应效果^[12],因此在进行氧气量控制时,需要对氧气利用率进行分析。

氧气利用率受炉内多因素制约,很难直接得到有效的计算公式。通过对顶吹炉内物料的投入产出分析,可简化推算模型:假设投入炉内的氧气与冰铜进行了充分接触,则排出烟气中的残氧量主要由两部分构成:一是氧枪输入但未发生氧化反应的剩余氧气,二是由于顶吹炉漏风导致的额外输入的氧气。据此建立顶吹炉的氧气利用率推算模型:

$$\eta_{\text{O}_2} = 1 - \frac{Q_{\text{排出烟气}} \times \phi(\text{残O}_2) - Q_{\text{漏风}} \times \phi(\text{空气O}_2)}{\sum_{i=1}^8 Q_{\text{氧枪O}_2, i} \times \phi(\text{工艺风O}_2)} \quad \text{式(7)}$$

$$Q_{\text{漏风}} = \lambda \times Q_{\text{入炉风量}} \times n_{\text{开窗时长}} \quad \text{式(8)}$$

式中, η_{O_2} 指顶吹炉氧气利用率, $Q_{\text{排出烟气}}$ 指烟气产出量, $\phi(\text{残O}_2)$ 指排出烟气中的氧气浓度, $\phi(\text{空气O}_2)$ 指空气中的氧气浓度, $Q_{\text{氧枪O}_2, i}$ 指第 i 根氧枪的工艺风量, $\phi(\text{工艺风O}_2)$ 指入炉工艺风的氧气浓度, λ 指漏风量计算修正系数, $n_{\text{开窗时长}}$ 为顶吹炉加料皮带的运行时长。

根据顶吹炉作业情况分析, $Q_{\text{漏风}}$ 主要来自两种工艺过程。一方面是来自炉内负压导致的漏风,这类漏风量需对顶吹炉炉体整体的漏风量进行计算;另一方面是来自炉顶开炉加料时的漏风,受工艺设计影响,顶吹炉在加冷料时需打开炉顶加料口,并通过皮带运输将冷料加入炉内,因此这段开窗时间的漏风量可通过采集并统计皮带运行状态数据进行获取。

3 优化及验证

为了进一步优化顶吹炉数模参数,匹配现场生产的实际情况,验证参数计算分析的正确性,本研究针对顶吹炉模型提出了一套基于正交试验设计思路的优化验证方案^[13-16],有效解决了生产现场缺少数据基准集的验证难题。通过控制影响模型计算的关键因素及其数据水平,深入探究顶吹炉吹炼过程中各关键参数之间的交互作用及其与产出物的关联,为后续模型的改进和完善提供了宝贵的数据支持和理论依据。

3.1 正交试验设计

通过选取顶吹炉吹炼作业中具有代表性的工况点,以较少的试验次数获得较为全面的炉况信息。本研究以顶吹炉冰铜装入量、冰铜Cu品位、石灰石量、冷料量、总风量为影响因素的考察指标,设计三水平正交试验,即L₂₇(3⁸)正交表。

受顶吹炉实际送风能力等限制,部分试验项会导致炉内热负荷不够或溢出、产出物不符合生产标准等问题;又因冰铜装入量作为波动性最大的影响因素,需提升其试验影响占比。基于上述考量,对原正交表进行修正,并根据核心验证需求进行拆分,形成顶吹炉生产试验最终方案,见表3和表4。

3.2 基准值收集

为更高效地开展顶吹炉生产基准值收集工作,并最大程度发挥历史生产数据价值,本研究开发了配套的生产试验报表自动生成工具,该工具以2 h为间隔生成顶吹炉生产报表,可实现生产过程关键

表 3 顶吹炉生产试验方案 1

Table 3 Experimental design table 1 for top-blown furnace production

No.	冰铜装入量	冰铜 Cu 品位	冷料量	石灰石	氧量 / 渣铁钙比
H1	低	低	低	低	结果记录
H2	低	低	中	高	结果记录
H3	低	中	低	高	结果记录
...	...	...	...	...	...
H15	高	中	高	低	结果记录
H16	高	高	中	低	结果记录
H17	高	高	高	高	结果记录

表 4 顶吹炉生产试验方案 2

Table 4 Experimental design table 2 for top-blown furnace production

No.	冰铜装入量	冰铜 Cu 品位	冷料量	总风量	氧量 / 铜温 / 渣温
H1	低	低	低	高	结果记录
H2	低	低	中	中	结果记录
H3	低	中	低	低	结果记录
...	...	...	...	...	...
H13	高	中	高	高	结果记录
H14	高	高	中	中	结果记录
H15	高	高	高	低	结果记录

数据的采集及关键指标的推算。

基于收集的历史生产数据报表，先按报表时间倒排，后按正交试验方案筛选有效数据，再按设计方案匹配工况，完成试验用例落盘。在此过程中，对于收集到的重复生产数据进行排查，并按设计算法进行数据统计；对于欠缺有效数据的试验用例项，安排现场生产试验补测，最终分别以顶吹炉生产试验方案 1、顶吹炉生产试验方案 2 为基础，收集不同装入量下的炉况基准数据，用于辅助顶吹炉数模计算参数的优化校准。

3.3 模型计算结果优化及验证

本研究选取半年内顶吹炉生产作业相对稳定情况下的实际生产数据，用于模型计算结果的精确性验证。将经采集处理后不同工况下的冰铜装入量、冰铜品位、冷料量、渣铁钙比、粗铜品位、铜温渣温、冷却水等炉况数据作为模型计算的输入参数，以入炉风氧量、熔剂量作为模型计算的指导结果，将模型计算出的关键控制参数与生产实际数据进行对比，结果如图 3~5 所示。为了对模型计算精度进行定量评估，计算了各关键参数的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)，以及平均绝对误差(MAE)，并

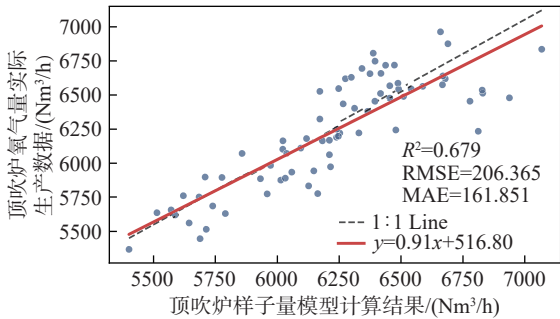


图 3 氧气量数据对比分析

Fig. 3 Comparative analysis of oxygen volume data

在图中进行了标注。

以入炉总氧量为例，图 3 为吹炼作业所需入炉氧气量的模型计算结果与实际生产数据对比分析，变化趋势高度一致，说明模型能够有效捕捉生产过程中关键参数的内在规律。此外，定量分析结果显示， R^2 为 0.679，RMSE 为 206.365 Nm^3/h ，MAE 为 161.851 Nm^3/h 。考虑到实际氧气流量在 5500~7000 Nm^3/h 范围内波动，该误差约占实际值范围的 1.3%~3.7%，在工业过程的容错范围之内，证明了模型具有较高的工程应用精度。

为进一步提升模型性能，我们在初始模型的基础上叠加了线性回归算法进行二次拟合修正，模型

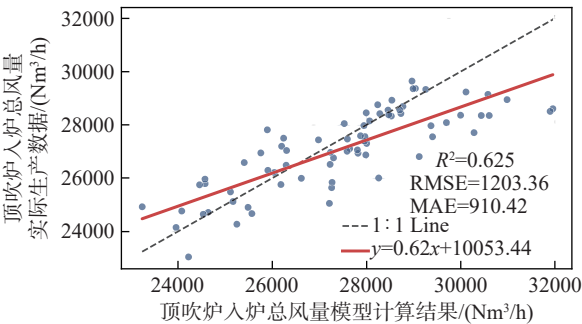


图4 入炉总风量数据对比分析

Fig. 4 Comparative analysis of total blast volume data

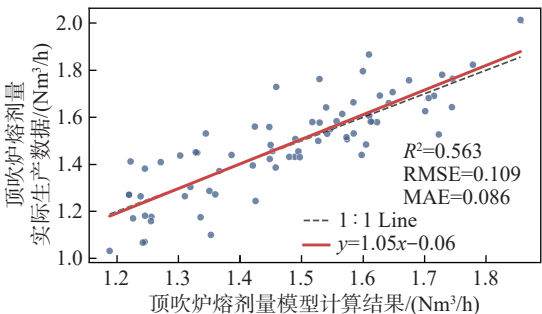


图5 熔剂量数据对比

Fig. 5 Flux dosage data comparison

计算精度见表5。

修正后，入炉风氧量、熔剂量模型计算结果的RMSE和MAE得到进一步降低，补偿了初始模型的线性偏差，提升了预测的准确性。

表5 关键参数模型计算精度验证

Table 5 Calculation accuracy verification of key parameters

关键参数	RMSE		MAE	
	初始模型	修正后	初始模型	修正后
入炉氧气量	206.4	203.5	161.9	159.2
入炉总风量	1203.4	864.4	910.4	721.4
熔剂量	0.109	0.109	0.086	0.086

综上所述，本研究提出的吹炼冶金数学模型较为准确地反映了顶吹炉的实际生产过程，核心参数的计算误差处于可接受的工程范围内，具备用于工业过程优化与控制的潜力。

3.4 顶吹炉决策优化系统开发

在完成机理模型构建与关键参数推算的基础上，本研究设计并开发了顶吹炉决策优化系统。该系统采用分层解耦的设计理念，将数据采集模块、模型计算模块、用户界面模块封装，整体分为用户界面层、服务接口层、模型层、接入层以及感知层，系统软件技术架构如图6所示。

感知层与接入层有效解决了多源异构数据的统一治理与关键影响控制条件参数的感知瓶颈，不仅支持OT类及IT类多源数据的接入，还通过内置的“流式数据处理”模块，将工业数据转换为可供模型直接使用的统一格式，提取的数据特征为上层模型

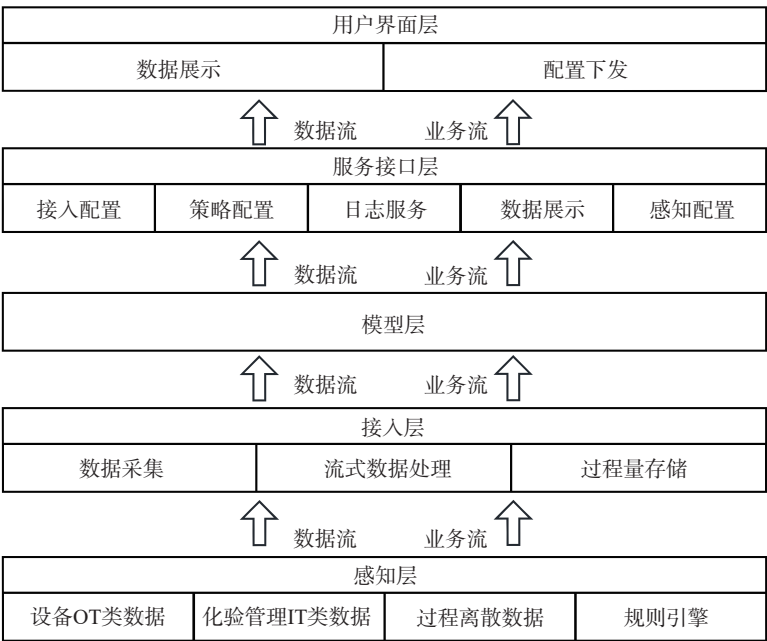


图6 系统软件技术架构

Fig. 6 Technical architecture of the software system

提供数据驱动，并通过存储模块进行关键信息存储。

模型层集成本研究提出的顶吹连续吹炼冶金数学模型，接收来自下层的实时数据，最终在线计算出符合设定控制目标及当前控制条件的熔剂量、风氧量等核心操作参数。

服务接口层提供和用户交互的接口，接入配置模块用于接收用户输入，策略配置为模型计算接口，日志服务记录生产操作，对生产进行全链路跟踪。

用户界面层满足用户的读写需求，包括顶吹炉控制目标的相关配置、控制条件的修改优化、控制参数计算结果的数据展示，同时数据展示模块可调用设备数据以及关键指标，实现生产全过程的数据可视化。

图7以序列图的形式，直观地展示了从用户发起请求到获取计算结果的完整内部交互过程，重点突出了主后端与算法微服务之间的协同工作机制。

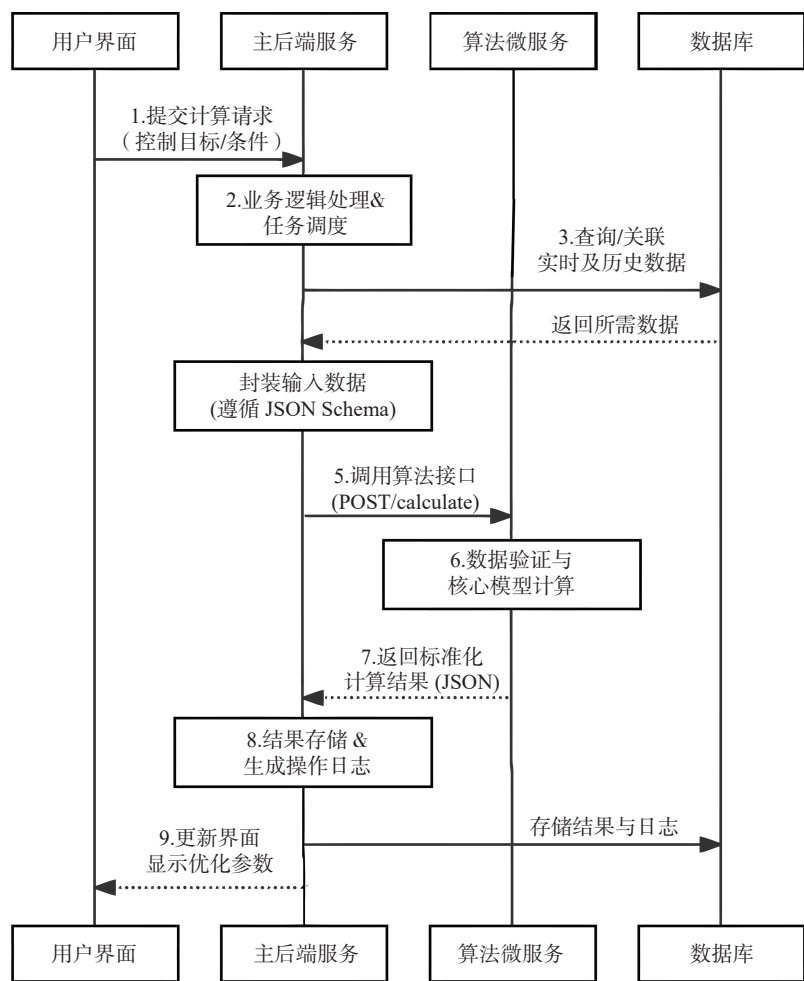


图7 系统算法交互流程
Fig. 7 Algorithm interaction flow of the system

4 结 论

本研究围绕“富氧侧吹熔炼—多枪顶吹吹炼—回转式阳极炉精炼”热态三连炉工艺体系中的顶吹吹炼环节，基于冶金反应机理构建了数学模型。针对该工艺过程中难以在线检测的关键控制变量，创新性地提出了定量推算模型，并以此为核心开发了顶吹炉连续炼铜工艺决策优化系统。为验证模型的

准确性与适用性，研究采用了正交试验设计，结合稳态工况下的历史生产数据，系统评估了模型在不同装入量等工况下对熔剂量、风氧量等关键控制参数的计算精度。验证结果表明，模型计算误差处于工程可接受范围内，证实了其作为科学决策工具替代传统经验操作的可靠性，为现场的精细化操作提供了关键理论依据与技术支撑。

基于当前研究成果,后续工作将重点围绕两个方向展开:一是推动模型上线应用与闭环验证,量化对比系统应用前后粗铜品位、渣型、温度及生产连续性等方面的核心指标,完成最终效果的精准评估;二是致力于算法的持续升级与系统集成,重点研究模型的在线自学习机制,使其能够自适应原料变化与设备工况状态,并探索三连炉全流程的智能协同控制策略。本研究为实现三连炉炼铜工艺实现连续、稳定、高效生产奠定了坚实的理论基础,提供了有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 韩志.双炉侧顶吹粗铜连续吹炼代替PS转炉吹炼[J].有色冶金设计与研究,2015,36(5):18-21.
- [2] 刘京超.多枪顶吹连续吹炼炉高浓度富氧炼铜生产工艺[J].山西冶金,2022,45(9):107-108,129.
- [3] 李卫民.铜吹炼技术的进展[J].云南冶金,2008,37(5):24-28.
- [4] Taskinen P, Jokilaakso A. Reaction sequences in flash smelting and converting furnaces: an in-depth view[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52(5): 3524-3542.
- [5] 涂延安, 刘建群.贵冶闪速熔炼冶金数模控制系统的应用[J].有色金属(冶炼部分),2011(2):38-41.
- [6] Anderson A, Kumar V, Rao V M, et al. A review of computational capabilities and requirements in high-resolution simulation of nonferrous pyrometallurgical furnaces[J]. JOM, 2022, 74(4): 1543-1567.
- [7] 马英奕, 周子民, 郑忻.利用规划求解工具实现闪速炉在线冶金数模系统的验证[J].自动化博览,2014,31(1):78-81.
- [8] Davenport W G, Partelpoeg E H. Flash smelting: analysis, control and optimization[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015: 50-62.
- [9] Bacedoni M, Moreno-ventas I, Rfos G. Copper flash smelting process balance modeling[J]. Metals, 2020, 10(9): 1229.
- [10] Liu P, Li B K, Cheung S C P, et al. Material and energy flows in rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy with energy saving[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 542-559.
- [11] 潘从元, 赵荣升, 徐勇, 等.激光诱导击穿光谱设备在线冰铜成分检测应用进展[J].冶金分析,2021,41(1):41-46.
- [12] 薛立华, 时章明, 梅焄, 等.冰铜吹炼过程耗氧量及氧利用率仿真计算[J].有色金属,2003,(1):72-74.
- [13] 牛虎明, 陈伟, 宋大庆, 等.铝电解用高导磷生铁性能优化试验[J].轻金属,2025(6):14-22.
- [14] 杨春牛.直流电弧炉喷吹冶炼过程数值模拟研究[D].石家庄:河北科技大学,2024.
- [15] Yin Z Y, Li R, Lin H, et al. Analysis of influencing factors of cementitious material properties of lead-zinc tailings based on orthogonal tests[J]. Materials, 2023, 16(1): 361.
- [16] 薛小蒙, 路丰豪, 李国骁, 等.基于正交设计的复杂破碎岩层巷道支护数值模拟与优化[J].铜业工程,2025(4):88-98.

Decision Optimization System for Continuous Copper Smelting Process in Top Blown Furnace

Cui Jingrui¹, Chen Yibo², Liu Ye¹

(1. Jiangxi Tongrui Information Technology Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. JCCL Guoxing (Yantai) Copper Co., Ltd., Yantai 264000, China)

Abstract: As the core equipment of the domestically developed hot-state triple-furnace continuous copper smelting system, the multi-lance top-blown furnace still requires further improvement in process monitoring and intelligent decision-making capabilities. Current challenges include delayed parameter adjustments, pronounced fluctuations in furnace conditions, and suboptimal continuity in production. This research developed a decision optimization system for top-blown furnace operations by integrating metallurgical modeling, industrial data acquisition, and software development. Based on the metallurgical reaction mechanism, the input-output mathematical model of the top-blown furnace was established to enable quantitative determination of core operating parameters such as flux dosage and oxygen volume. A calculation model for key process parameters was created to overcome limitations in real-time process state perception during continuous smelting. Through systematic integration, modules for data acquisition and model computation were encapsulated into a comprehensive decision optimization system. The system provided accurate calculation and decision support for core control parameters. It significantly reduced the uncertainty associated with manual operations but also provided effective technical support for dynamic multi-process coordination and control within the hot-state triple-furnace continuous copper smelting process.

Key words: copper smelting; metallurgical modeling; multi-lance top-blown furnace; continuous copper smelting; numerical calculation; orthogonal test

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.003

引文格式: 崔景瑞, 陈一波, 刘晔. 顶吹炉连续炼铜工艺决策优化系统研究[J]. 铜业工程, 2026(3): 24-32.

Cui Jingrui, Chen Yibo, Liu Ye. Decision optimization system for continuous copper smelting process in top blown furnace [J]. Copper Engineering, 2026(3): 24-32.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc