

基于热平衡模型的镍铁电炉功率在线优化控制

李 刚, 徐小锋

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100083)

[摘 要] 目前,电炉功率设定大都由操作人员根据经验和现场运行情况人为确定,受人体的经验和操作等影响较大,难以保证功率给定的实时最优性,从而影响生产指标。本文针对回转窑-电炉镍铁冶炼工艺(RKEF工艺)熔炼电炉,提出一种在线控制电炉功率的优化方法。该方法通过建立电炉热平衡模型,对电炉进料、烟气和炉体冷却系统相关过程变量进行在线检测,实现电极功率最优设定值的在线计算;通过构建BP神经网络误差模型,利用出渣周期实测数据生成数据样本对网络模型进行训练和更新,实现对热平衡计算误差的预测和在线修正,提高热量计算的准确性和适应性。本文还基于工程数据采用仿真试验验证了该方法的有效性,指出该控制系统可以解决镍铁电炉智能冶炼的核心问题,下一步还需与其他子系统结合,形成完整智能冶炼厂解决方案。

[关键词] 镍铁冶炼; 电炉熔炼; 功率控制; 热平衡; 在线优化控制; 在线修正; 仿真验证; 智能冶炼

[中图分类号] TF644; TF801.2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)03-0060-06

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.03.010

0 引言

回转窑-电炉工艺(以下称RKEF工艺)是目前火法冶炼镍铁合金的主流工艺,由于其具有产品品位高、熔炼电炉可控性强、生产效率高、易于实现生产扩大化等优点^[1-2],在实际工程中获得了广泛的应用。近年来由于不锈钢、新能源汽车动力电池等行业对金属镍的需求旺盛^[3],促进了众多新兴RKEF镍铁工程。

RKEF主工艺流程包括干燥窑干燥、配料、回转窑预还原焙烧、电炉还原熔炼、镍铁精炼等^[4],其中电炉还原熔炼是整个流程的核心。在能耗上,电炉消耗的电能占整个冶炼厂电能消耗的80%以上,电费成本占到整个产品成本的30%左右^[5-6];在工艺上,电炉的运行最为复杂,其操作和控制水平对最终

工艺指标和生产效益有着决定性的影响^[7]。

镍铁电炉通常采用埋弧或遮弧运行方式,其原理是通过电极对渣层施加电压并借助电弧及渣电阻产生热能,使进入炉内的焙砂不断熔化、反应并分离出镍铁合金。在电炉操作中,对电极功率的控制至关重要,其决定了整个系统的热量平衡:电极功率不足会导致渣温过低,使得渣黏度变大,影响镍还原和分离效果并造成排渣困难;电极功率过高则会导致渣温过高,降低炉衬寿命并导致能耗升高^[8]。目前,电炉功率设定大都由操作人员根据经验和现场运行情况人为确定,可满足基本的生产要求,但由于电炉生产过程中干扰因素较多,比如进料量波动、焙砂温度变化、烟气波动等,受人的经验和操作等问题影响,传统方式难以保证功率给定的实时最优性,从而对产品指标、产量和能耗等产生影响。

对于电炉的功率调节和控制目前已有众多的研究成果^[9-12],但解决的是底层控制问题,即如何有效地控制功率在人为给出的设定值,而对于如何在线确定电炉的最优设定功率,实现上层优化控制鲜有文献涉及。

本文提出一种镍铁电炉功率在线优化方法,通过建立电炉的热平衡模型,并利用对电炉进料、烟气和冷却系统相关过程变量的实时检测,实现电炉功

[收稿日期] 2021-11-05

[作者简介] 李刚(1977—),男,辽宁葫芦岛人,博士研究生,高级工程师,主要从事电气及自动化设计工作,研究方向为大型熔炼电炉供电与优化控制。

[基金项目] 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1902504)。

[引用格式] 李刚,徐小锋.基于热平衡模型的镍铁电炉功率在线优化控制[J].中国有色冶金,2022,51(3):60-65.

率最优设定值的在线计算。为减小热平衡计算误差和提高可靠性和适应性,构建了神经网络误差模型并用于热平衡计算的在线修正。最后采用数据仿真试验验证方法的有效性。

1 电炉功率在线优化

1.1 热平衡模型

镍铁熔炼电炉热量收支情况如图1所示^[13],其中热收入项包括电能发热 Q_{i1} ,进料焙砂显热 Q_{i2} 及化学反应热 Q_{i3} ;热支出项包括炉体损失热量 Q_{o1} ,烟气损失热量 Q_{o2} ,炉渣显热 Q_{o3} 及镍铁水显热 Q_{o4} 。

$$Q_{i1} + Q_{i2} + Q_{i3} = Q_{o1} + Q_{o2} + Q_{o3} + Q_{o4} \quad (1)$$

由式(1)可知,通过确定其他6项热量收支项($Q_{i2}, Q_{i3}, Q_{o1}, Q_{o2}, Q_{o3}, Q_{o4}$),即可得到电炉所需的电能发热 Q_{i1} ,进而得出所需的电加热功率。

1.2 热量收支项在线计算

各热量收支项的在线测量和计算方法如下所述,各式中热量单位为J,温度单位为K,时间单位为s,重量单位为kg,体积单位为 m^3 。

1.2.1 进料焙砂显热 Q_{i2}

通过在线测量焙砂温度 $T_C(t)$ 和焙砂进料量 $W_C(t)$,可由式(2)计算出 Q_{i2} 。

$$Q_{i2} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} W_C(t) \times Q_C(t) dt \quad (2)$$

式中: $Q_C(t)$ 为每千克焙砂在温度 $T_C(t)$ 下携带的显热,J/kg,其值可通过对焙砂中各成分的比热熔从298 K至温度 $T_C(t)$ 进行积分,并根据各成分所占的

质量分数进行折算后求和得出; Δt 为优化控制周期; t_0 为周期的起始时间。以下同字符参数意义相同。

1.2.2 化学反应热 Q_{i3}

Q_{i3} 可通过式(3)计算得出。

$$Q_{i3} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} W_C(t) \times H_{298,\Delta} dt \quad (3)$$

式中:热焓 $H_{298,\Delta}$ 为每千克焙砂对应的化学反应热,J/kg,其值可通过参与反应的各产出化合物的标准生成焓减去各投入化合物的标准生成焓,并根据化合物的摩尔质量折算得出。

1.2.3 炉体损失热量 Q_{o1}

Q_{o1} 主要由炉墙、炉盖和炉底热量损失构成。其中炉墙部分热量损失可通过在线测量炉体冷却水进出口温度(得到温度差 $\Delta T_W(t)$)和冷却水流量 $F_W(t)$ 经计算得到,炉盖、炉底及其他未知热量损失由经验数据确定(设其总和为 Q_{o1_Others}),最终炉体的总热量损失计算见式(4)。

$$Q_{o1} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} C_W \rho_W F_W(t) \Delta T_W(t) dt + Q_{o1_Others} \quad (4)$$

式中: C_W 为冷却水的比热容,J/kg·K; ρ_W 为冷却水的密度,kg/ m^3 。

1.2.4 烟气损失热量 Q_{o2}

Q_{o2} 可通过在线测量烟气温度 $T_C(t)$ 和烟气流量 $F_C(t)$,经式(5)计算得出。

$$Q_{o2} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \rho_C F_C(t) Q_C(t) dt \quad (5)$$

式中: ρ_C 为烟气密度,kg/ m^3 ; Q_C 为每千克烟气在温

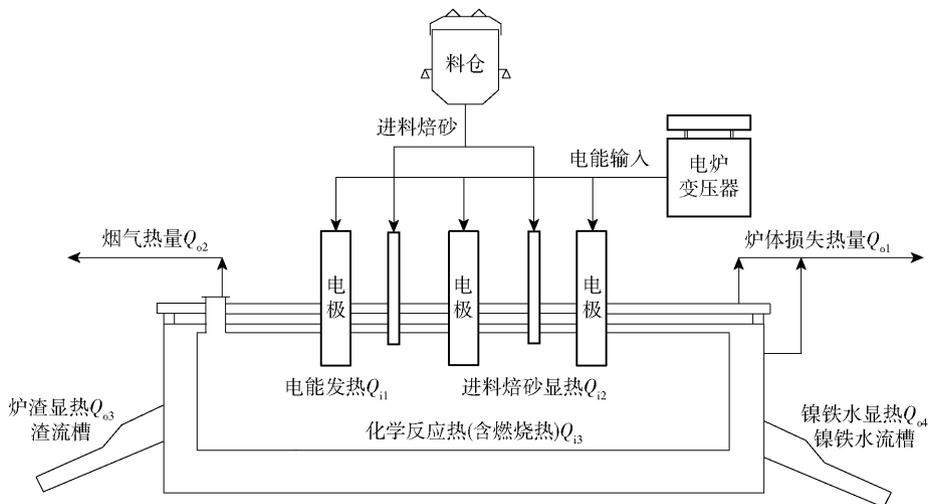


图1 镍铁电炉热量收支情况示意

Fig. 1 Schematic diagram of heat input and output of ferronickel electric furnace

度 $T_C(t)$ 下携带的显热, J/kg; 其值可通过对烟气中各成分的比热容从 298 K 升至温度 $T_C(t)$ 进行积分, 并根据各成分所占的质量分数进行折算后求和得出。

1.2.5 炉渣显热 Q_{03}

Q_{03} 可通过式(6)计算得出。

$$Q_{03} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} W_S(t) \times (Q_S(t) + \Delta H_{SP}(t)) dt \quad (6)$$

式中: $W_S(t)$ 为每秒产生的炉渣量, kg/s; 由焙砂进料量 $W_C(t)$ 经物料衡算得出; $Q_S(t)$ 为每千克炉渣在温度 T_{S_SET} (设定的理想炉渣温度) 下携带的显热, J/kg; 其值可通过对炉渣中各成分的比热容从 298 K 升至温度 T_{S_SET} 进行积分, 并根据各成分所占的质量分数进行折算后求和得出; $\Delta H_{SP}(t)$ 为每千克炉渣对应的相变热, J/kg; 其值由炉渣各成分及其所占的质量分数决定。

1.2.6 镍铁水显热 Q_{04}

Q_{04} 可通过式(7)计算得出。

$$Q_{04} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} W_F(t) \times (Q_F(t) + \Delta H_{FP}(t)) dt \quad (7)$$

式中: $W_F(t)$ 为每秒产生的镍铁量, kg/s, 由焙砂进料量 $W_C(t)$ 经物料平衡计算得出; $Q_F(t)$ 为每千克镍铁水在温度 T_{F_SET} (设定的理想镍铁水温度) 下携带的显热, J/kg; 其值可通过对镍铁水中各成分的比热容从 298 K 升至温度 T_{F_SET} 进行积分, 并根据各成分所占的质量分数进行折算后求和得出; $\Delta H_{SP}(t)$ 为每千克镍铁水对应的相变热, 其值由镍铁水各成分及其所占的质量分数决定, J/kg。

1.3 优化控制周期的选取

控制周期 Δt 的选取需综合考虑镍铁电炉的热量波动频度以及电极调节系统硬件限制等因素。 Δt 过大, 无法对进料及烟气等扰动作出及时的响应, 导致功率给定不能适应不断变化的热平衡需求, 控制效果变差; Δt 取值过小, 则会导致电极调节系统因频繁动作而影响寿命。根据现场运行情况, Δt 的经验取值范围为 300 ~ 600 s。

1.4 电功率计算

由前述各热量收支项计算所需电能发热量, 并由 J 折算为 kW 得到电炉功率的最优设定值 P_{SET} , 具体计算见式(8)。

$$P_{SET} = (Q_{01} + Q_{02} + Q_{03} + Q_{04} - Q_{12} - Q_{13}) / (1000 \times \Delta t) \quad (8)$$

2 误差修正

理论热平衡计算与实际过程不可避免存在一定程度的偏差, 过程量的测量等环节也可能产生误差, 为保证控制效果需对总的误差加以修正。由于误差的形成原因复杂且不确定, 难以采用解析的分析方法, 因此采用 BP 神经网络方法对其进行建模和预测^[15-16]。

2.1 神经网络误差模型

选取进料焙砂显热 Q_{12} 、炉体损失热量 Q_{01} 和烟气损失热量 Q_{02} 作为输入层变量, 热平衡热量偏差 Q_{Δ} 作为输出层变量, 选用 sigmoid 函数作为隐含层函数, 构建如图 2 所示的 3 层 (3-4-1) BP 神经网络模型。

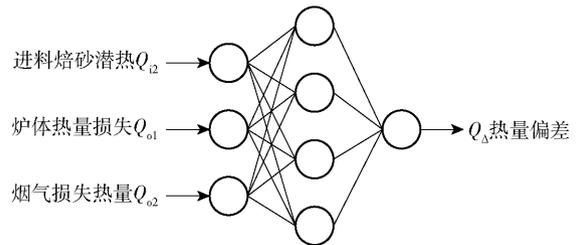


图 2 神经网络结构

Fig. 2 Neural network model

2.2 神经网络训练

利用实测过程数据生成数据样本, 并用于神经网络误差模型的迭代训练, 具体步骤如下所述。

2.2.1 模型输出数据 (Q_{Δ}) 生成

热平衡模型的热量计算偏差可通过实际渣温的偏差计算得出, 设排渣时测得的实际渣温为 T_{S_Real} , 理想渣温设定值为 T_{S_SET} , 则热量偏差 Q_{Δ} 可由式(9)计算得出。

$$Q_{\Delta} = Q_S(T_{S_Real}) - Q_S(T_{S_SET}) \quad (9)$$

式中: $Q_S(T_{S_Real})$ 为实际渣温对应的炉渣潜热, $Q_S(T_{S_SET})$ 为理想渣温对应的炉渣潜热, 二者可利用式(6)进行计算求得。由于实际生产中, 渣温只能在排渣时通过离线测量得到, 故将 1 个排渣周期 t_{SP} (相邻 2 次排渣结束点之间时间间隔) 作为热量计算和数据样本采集的周期。

2.2.2 模型输入数据 (Q_{12}, Q_{01}, Q_{02}) 生成

对应步骤 2.2.1 中的排渣周期, 分别借助公式(2)(4)(5)得到该周期内的进料焙砂显热 Q_{12} , 炉体损失热量 Q_{01} 和烟气损失热量 Q_{02} 。

2.2.3 数据预处理

将各排渣批次 i 生成的数据 $(Q_{\Delta})_i$ 和 $(Q_{i2}, Q_{o1}, Q_{o2})_i$ 进行归一化处理,使其值分布在 $[0, 1]$ 区间,以适应神经网络的取值要求,得到最终样本集合 $[(Q_{i2}, Q_{o1}, Q_{o2}, Q_{\Delta})'_{i=1 \sim n}]$ 。

2.2.4 网络训练和更新

将归一化处理后的数据样本集合用于神经网络进行迭代训练,经误差收敛后即得到神经网络误差模型。为适应生产过程的不断变化,可定期更新数据样本并重复以上训练步骤,实现误差模型的更新。

2.3 误差在线修正

利用神经网络误差模型对热平衡计算误差进行在线修正。在各优化控制周期内,将热平衡计算得到的 (Q_{i2}, Q_{o1}, Q_{o2}) 代入神经网络误差模型的输入,将模型输出的 Q_{Δ} 用于热量修正,修正后的功率计算公式见式(10)。

$$P_{\text{SET}} = (Q_{o1} + Q_{o2} + Q_{o3} + Q_{o4} - Q_{i2} - Q_{i3} - Q_{\Delta}) / (1000 \times \Delta t) \quad (10)$$

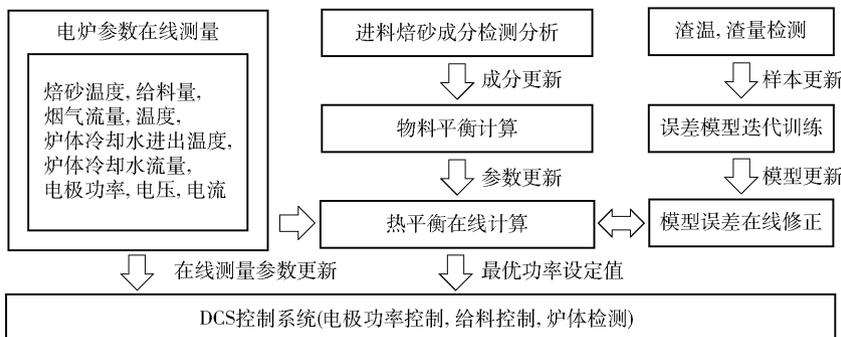


图3 镍铁电炉在线优化控制系统流程

Fig. 3 Online optimization control system process for nickel-iron electric furnace

4 数据仿真验证试验

某 RKEF 镍铁冶炼工程,电炉额定设计功率为 55 MW,电炉渣温和铁水温度的设定值分别为 1 580 °C、1 480 °C,排渣周期平均在 6 h 左右。对 30 个排渣批次的样本数据进行考察,其中 15 组数据用于热平衡计算和仿真,剩余 15 组数据用于神经网络误差模型的训练。

假定炉渣温度设定值为 1 580 °C,根据各组样本数据得到各排渣批次的分项热量计算结果如图 4 所示。图中,热收入项计为正值,热支出项计为

3 电炉在线优化控制

镍铁电炉功率的在线优化控制步骤如下所述。

1) 对进料焙砂成分进行检测分析,确定物料成分并进行物料平衡计算。

2) 根据物料平衡计算结果,确定热量计算公式(2)~(7)中的相关系数。

3) 设定优化控制计算周期 Δt ,与 DCS 控制系统通信获得焙砂温度 T_C 、进料量 W_C 、炉体冷却水进出口温度差 ΔT_W 及流量 F_W 、烟气温度 T_C 及流量 F_C 的实时测量值。

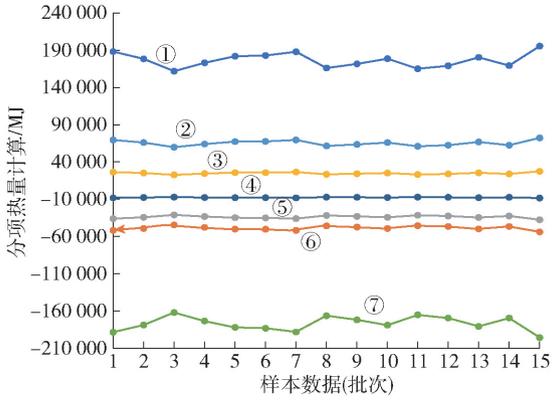
4) 利用公式(2)~(7)计算各项热量收支值: $Q_{i2}, Q_{i3}, Q_{o1}, Q_{o2}, Q_{o3}, Q_{o4}$;利用神经网络误差模型计算热量修正值 Q_{Δ} ;利用公式(10)计算最优功率值并发送至 DCS 系统作为功率设定。

5) 在电炉排渣周期测量实际出渣温度 T_{S_Real} ,根据 2.2 节中的步骤生成数据样本并用于神经网络模型的定期训练更新。

镍铁电炉在线优化控制系统流程如图 3 所示。

负值。

将实测渣温与其设定值相比较并折算为热量偏差,结果如图 5 中实线所示,其中最大批次热量偏差值为 58 000 MJ,约占炉渣潜热的 5%。采用第 2 节中给出方法构建神经网络误差模型,并利用样本数据进行迭代训练。由训练好的神经网络误差模型对热量偏差进行预测,结果如图 5 中虚线所示。误差模型修正后,最大批次热量误差减小到 6 000 MJ,占炉渣潜热的不到 1%。上述仿真试验结果表明,采用热平衡模型及神经网络误差模型可实现准确的热量计算,进而实现有效的电炉功率优化控制。



①电能发热;②焙砂潜热;③反应热;④镍铁水潜热;⑤炉体损失热量;⑥烟气损失热量;⑦炉渣潜热

图4 热平衡计算

Fig. 4 Heat balance calculation

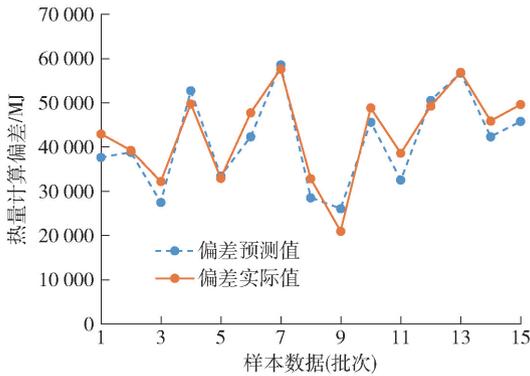


图5 热量偏差及预测

Fig. 5 Heat calculation deviation and prediction

5 结语

本文建立了镍铁电炉的在线热平衡模型,通过在线测量相关过程变量并经热平衡计算得到所需电能发热功率,实现了电炉的最优功率设定;并通过构建神经网络误差模型实现了对热平衡模型误差的实时修正,提高了方法的准确性和适应性。

镍铁电炉功率在线优化控制系统解决了人工设定功率不准确、不及时的问题,实现了输入电能与冶炼需求的精确匹配,使渣温能够得到有效的控制,保证了镍回收率、生产效率、产品单耗等指标的最优性,解决了镍铁电炉智能冶炼的核心问题。该系统下一步研究重点是与其他子系统相结合,形成从原料分析到配料优化、在线优化控制、炉体监控、智能诊断等环节的完整智能冶炼厂解决方案^[17]。

[参考文献]

- [1] 杨泽宇, 张文, 申亚芳, 等. 红土镍矿处理方法现状[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(4): 1-6.
YANG Zeyu, ZHANG Wen, SHEN Yafang, et al. Current status of smelting process of laterite nickel ore[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(4): 1-6.
- [2] 武兵强, 齐渊洪, 周和敏, 等. 红土镍矿火法冶炼工艺现状及进展[J]. 矿产综合利用, 2020(3): 78-83.
WU Bingqiang, QI Yuanhong, ZHOU Hemin, et al. Status and progress in pyrometallurgy processes of a laterite nickel ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources. 2020(3): 78-83.
- [3] 任鑫, 陈其慎, 邢佳韵, 等. 2021—2035 年全球硫酸镍供需形势分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(9): 1-7.
REN Xin, CHEN Qishen, XING Jiayun, et al. Analysis of global supply and demand situation of nickel sulfate from 2021 to 2035[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(9): 1-7.
- [4] 李小明, 白涛涛, 赵俊学, 等. 红土镍矿冶炼工艺研究现状及进展[J]. 材料导报, 2014, 28(5): 112-116.
LI Xiaoming, BAI Taotao, ZHAO Junxue, et al. Status and progress of metallurgical technology on laterite nickel ore[J]. Materials Review, 2014, 28(5): 112-116.
- [5] 储少军, 刘培骁, 王海丽, 等. 镍铁合金吨产品理论电耗及生产成本的计算[J]. 铁合金, 2009, 40(4): 1-7.
CHU Shaojun, LIU Peixiao, WANG Haili, et al. Calculation of theoretical power consumption and production cost of nickel ferroalloy[J]. Ferro-Alloys, 2009, 40(4): 1-7.
- [6] 丁雪, 刘培骁, 刘华, 等. RK-EF 法镍铁合金生产理论电耗计算[J]. 铁合金, 2014, 45(5): 5-9.
DING Xue, LIU Peixiao, LIU Hua, et al. The theoretical electricity consumption calculation for RKEF process of ferronickel alloy[J]. Ferro-Alloys, 2014, 45(5): 5-9.
- [7] 潘凯. RKEF 工艺冶炼镍铁密闭电炉电极操作探索与研究[J]. 铁合金, 2019, 50(3): 13-19.
PAN Kai. Exploration and research on electrode operation of smelting ferronickel with submerged arc furnace by RKEF process[J]. Ferro-Alloys, 2019, 50(3): 13-19.
- [8] 赵景富. RKEF 工艺处理缅甸镍红土矿[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013, (1): 8-10.
ZHAO Jingfu. Treatment for Myanmar nickel laterite with RKEF process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(1): 8-10.
- [9] 刘郁乔. 矿热炉三相电极升降自动控制系统的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
LIU Yuqiao. Research and application of automatic control system of three phase electrode lifting in submerged arc furnace [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [10] 谢子洪, 王炳金, 汤顺祥, 等. 25 MVA 矿热炉功率自动调节控制的设计与实践[J]. 铁合金, 2018, 39(3): 43-48.
XIE Zihong, WANG Bingjin, TANG Shunxiang, et al. Design

- and practice of power automatic adjustment and control system in 25 MVA submerged arc furnace [J]. *Ferro-Alloys*, 2018, 39 (3): 43 - 48.
- [11] 中国恩菲工程技术有限公司. 电炉功率的自动控制方法: CN201010279277.4 [P]. 2011.
China ENFI Engineering Technology Co. LTD.. Automatic control method of electric furnace power; CN201010279277.4 [P]. 2011.
- [12] 中国恩菲工程技术有限公司. 电炉的电极功率控制方法及系统: CN201310447006.9 [P]. 2013.
China ENFI Engineering Technology Co. LTD.. Electric furnace electrode power control method and system; CN201310447006.9 [P]. 2013.
- [13] 孙海阔. METSIM 在红土镍矿回转窑-电炉 (RKEF) 工艺中的模拟应用 [J]. *中国有色冶金*, 2013, 42(5): 101 - 104.
SUN Hsiku. Application of METSIM modeling in laterite rotary kiln-electric (RKEF) process [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2013, 42(5): 101 - 104.
- [14] 张家芸. 冶金物理化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004. 9.
ZHANG Jiayun. *Metallurgical Physical Chemistry* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004. 9.
- [15] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989. 9.
LI Shiyong. *Fuzzy control, neural control and intelligent cybernetics* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1989. 9.
- [16] 袁曾任. 人工神经网络及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
YUAN Zengren. *Artificial neural network and its application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [17] 向成喜, 邓戈, 王晓武. 铜冶炼智能工厂设计架构和方案 [J]. *云南冶金*, 2021, 50(4): 128 - 134.
XIANG Chengxi, DENG Ge, WANG Xiaowu. Design framework and solutions of copper smelting smart plant [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2021, 50(4): 128 - 134.

Online optimization and control of ferronickel electric furnace power based on heat balance model

LI Gang, XU Xiao-feng

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100083, China)

Abstract: At present, most of electric furnace power setting has been determined by operators according to their experience and onsite operation conditions, it is greatly affected by personal experience and operation, which makes it difficult to guarantee the real-time optimality of given power as to affect the production indicators. As regards smelting furnace of RKEF ferronickel smelting process, this paper proposes an optimization method for online control of electric furnace power. By using this method the online testing is performed for the process variables related to furnace charge, off-gas and furnace cooling system by establishing the electric furnace heat balance model to achieve online calculation of optimum set value of electrode power; by building Error BP network model, the measured data of slag tapping cycle are utilized to produce data sample for training and updating the network model, which realizes prediction and online modification of calculation error of heat balance and enhances the accuracy and adaptability of heat calculation. The effectiveness of this method is verified by simulation experiment based on engineering data. This paper indicates that using this control system can solve the core issue of intelligent smelting by ferronickel furnace. In the next step, the system needs to be combined with other subsystems to form a complete solution of intelligent smelter.

Key words: ferronickel smelting; electric furnace smelting; power control; heat balance; online optimization and control; online modification; simulation verification; intelligent smelting