

The development of soft measurement of key parameters in copper smelting process

Bin Wang^{1,2,3}, Mingzhe Yuan^{1,3}, Zhuo Wang^{1,3}, Haibin Yu^{1,3} and Guang Zhu^{1,3}

¹⁾ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning Province, China(wangbin@sia.cn, mzyuan@sia.cn, zwang@sia.cn, yhb@sia.cn and zhuguang@sia.cn)

²⁾ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

³⁾ Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning Province, China

Abstract—Recently, although the technique and the equipment of copper smelting in China has been among advanced international levels, there are still some problems on high energy consumption and instable quality of products. These problems need to be solved by improving automation technique urgently. Soft measurement of key parameters is one of these technologies to improve the automation level of copper smelting process. This review summarizes the main differences of kinds of copper smelting processes. We also conclude the current situation on soft measurement of key parameters at home and abroad, and present the possible direction in the future.

Keywords—copper smelting process, soft measurement

铜熔炼过程关键参数软测量研究进展

王斌^{1,2,3} 苑明哲^{1,3} 王卓^{1,3} 于海斌^{1,3} 朱光^{1,3}

¹⁾ 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳, 辽宁, 中国

²⁾ 中国科学院大学, 北京, 中国

³⁾ 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳, 辽宁, 中国

摘要 近年来, 虽然我国铜熔炼工艺和装备已经达到国际先进水平, 但还存在能耗高和产品质量不够稳定的问题, 迫切需要对自动化水平进行提升以进一步节能降耗, 并稳定产品质量。铜熔炼过程关键参数的软测量技术是提升其自动化水平的关键技术之一。文章总结了主要铜熔炼工艺的差别, 综述了国内外主要铜熔炼过程的关键参数软测量研究现状, 并给出可能的进一步研究方向。

关键词 铜熔炼过程, 软测量

1. 引言

铜作为第二大有色金属, 具有最佳的导电导热性、很强的耐腐蚀性和延展性等综合优异性能, 在电气电子、机械等众多领域具有十分广泛的应用, 是支撑国家安全和国家重大战略工程的关键材料, 在国民经济发展中占有重要的地位。随着全球经济的发展, 世界各国对铜的需求量日益加大, 我国的铜产量近十年来稳居世界第一[1]。但是, 作为铜冶炼行业主要原料的各类铜精矿供应越来越不足, 品位越来越低, 这种现状成为制约铜冶炼行业发展的关键因素。同时, 铜冶炼行业的发展还受到能源和环境的严

重制约, 节能降耗减排形势严峻[1]。

铜熔炼过程是铜冶炼行业中的一个主要生产环节。目前, 世界上主要的铜熔炼工艺分为闪速熔炼和熔池熔炼两大类, 其中熔池熔炼又分为顶吹、侧吹和底吹三种。由于铜熔炼过程是一个非常复杂的高温、封闭、多相、物理变化与化学反应共存的过程, 具有时变非线性、多变量强耦合、不确定性等特点, 生产环境极为恶劣, 而且我国的铜熔炼过程还存在原料复杂多变的特殊情况, 导致关键参数难以采用传统的检测仪表在线检测, 从而难以采用传统的控制方法进行稳定控制。目前, 我国大多数铜冶炼厂关键参数的检测和控制主要由操作人员凭经验进行。这种现状使得熔炼过程不够平稳, 关键参数波动较大, 不仅增加了能源和资源消耗, 而且也影响了产品质量。因此, 针对我国铜熔炼过程的特点开展关键参数软测量技术的研究, 对稳定产品质量, 减少能源和资源消耗均具有十分重要的意

本文得到国家 863 计划项目 (2013AA040705)、中国科学院支撑服务国家战略性新兴产业科技行动计划专项支持项目“氧气底吹铜熔炼过程智能优化技术示范与推广”和中国科学院重点部署项目 (KGZD-EW-302) 支持

义。

2. 铜熔炼过程需要检测和控制的关键参数

铜熔炼过程是一个连续进料、间歇放出铜铕和炉渣、连续排出烟气的生产过程。在封闭的熔炼炉中，混合精矿和石英等原料与富氧空气在 1150~1250℃ 的高温下完成一系列分解、氧化、造铕和造渣反应，并伴随着质量、动量和热量的传递过程。原料中大部分铜和少量的铁、硫进入铜铕中，大部分铁和二氧化硅进入炉渣中，大部分硫进入烟气中。铜熔炼过程的示意图如图 1 所示。

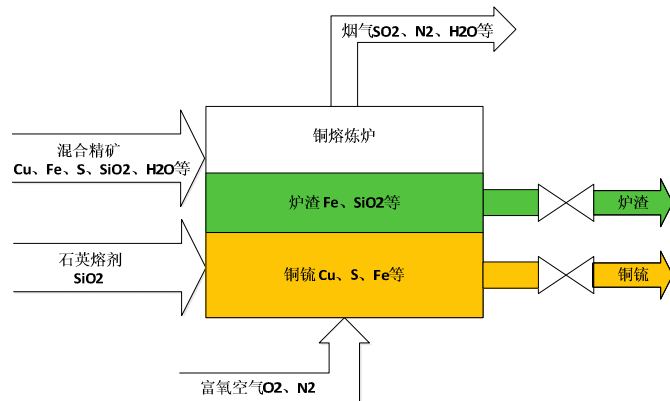


图 1 铜熔炼过程示意图

对于闪速熔炼过程，在加料量不变的情况下，需要检测和控制的关键参数是铜铕品位、炉渣铁硅比和铜铕温度，只要稳定这三个关键参数就能够稳定生产[2]。

对于顶吹艾萨熔池熔炼过程，需要检测和控制的关键参数是铜铕品位、炉渣铁硅比和铜铕温度[3]。

对于侧吹熔池熔炼过程，需要检测和控制的关键参数

是铜铕品位（或白铜铕品位）、炉渣铁硅比（或炉渣 Fe_3O_4 品位）、熔体温度、铜铕液位、渣层厚度和总体液位[2,4]。对于底吹熔池熔炼过程，生产实践表明，需要检测和控制的关键参数是铜铕品位、炉渣铁硅比、熔体温度、铜铕液位、渣层厚度和总体液位。铜铕品位过高，则铜铕产量下降，不利于后续的转炉生产；铜铕品位过低，铜铕产量增加，也不利于后续的转炉生产。炉渣铁硅比过高，则 SiO_2 过多，炉渣的黏度增大，流动性差，排放困难，不利于铜铕的沉降，渣含铜上升；炉渣铁硅比过低，则 FeO 的活度增加， FeO 容易氧化成为 Fe_3O_4 ，造成 Fe_3O_4 含量上升，炉渣的黏度增大，流动性差，排放困难，严重时甚至会形成“泡沫渣”，引发“喷炉”事故。熔体温度过高，则耐火材料强度下降，熔体对炉衬的侵蚀加重，炉寿缩短，氧气消耗量增加，堵住放渣口的操作变得困难，炉内的熔体容易将放渣口冲开，造成事故；熔体温度过低，则炉渣的黏度增大，流动性差，排放困难，渣含铜上升，入炉物料反应不完全流出放渣口，严重时会造成“死炉”事故。铜铕液位过高，会使铜铕从放渣口流出，渣含铜上升；铜铕液位过低，会使氧气进入渣层，大量 FeO 氧化成为 Fe_3O_4 ，形成“泡沫渣”，引发“喷炉”事故。渣层过厚，不利于铜铕的沉降，渣含铜上升；渣层过薄，放渣时容易带铜铕，渣含铜上升，不利于操作。总体液位过高，一旦遇到停电等突发事件时，无法将风口或氧枪转出处理问题，导致熔体流出，造成事故；总体液位过低，容易造成入炉物料反应不完全流出放渣口，浪费原料。

表 1 几种主要铜熔炼工艺在机理方面的差异

比较项目	闪速熔炼	特尼恩特熔炼	艾萨熔炼	诺兰达熔炼	底吹熔炼
原料预处理	需磨细，深度脱水	干精矿需磨细，深度脱水	无需磨细和脱水	无需磨细和脱水	无需磨细和脱水
原料来源	较高品位矿	较高品位矿	广泛	广泛	更广泛，低品位矿为主
原料成分稳定程度	国外较稳定，国内不稳定	较稳定	国外较稳定，国内不稳定	国外较稳定，国内不稳定	不稳定
燃料加入情况	加入重油	不加入燃料	加入天然气	加入煤	不加入燃料
原料化验信息	元素	化合物	元素	元素	元素
熔池内熔体搅动状况	相对平静	强烈	较强烈	强烈	强烈

3. 铜熔炼过程关键参数软测量研究现状

为了解决铜熔炼过程关键参数在线检测的难题，国内外学者针对几种主要的铜熔炼工艺关键参数软测量进行了很多研究。

3.1 几种主要铜熔炼工艺机理方面的差异

几种主要的铜熔炼工艺在机理方面的主要差异如表 1 所示。由表 1 可以看出，这几种铜熔炼工艺在原料预处理、来源和化验信息、以及是否加入燃料方面存在着较大的差

别，因此影响关键参数的辅助变量有所不同，同时炉内发生的物理变化和化学反应也不完全一致，所以对每一种工艺的关键参数软测量都应根据工艺的实际情况进行具体分析，而不能直接应用其他工艺的已有成果。

3.2 几种主要铜熔炼工艺的关键参数软测量研究进展

在闪速熔炼过程关键参数软测量方面，Goto 等[5]开发了多相多组分平衡模型，求解出体系平衡时的温度和各相组分；申勇峰等[6]提出了闪速炉热平衡计算方法；王吉林[7]采用平衡常数法和神经网络方法建立了铜闪速熔炼过程的机理模型；刘建华等[8]根据闪速熔炼过程的反应机理建立了铜铈品位的动态模型；喻寿益等[9]采用人工神经网络方法建立了铜闪速熔炼过程关键参数的预测模型；曾青云等[10,11]采用神经网络的方法建立了铜闪速熔炼过程的温度模型；彭晓波等[12]采用 T-S 动态递归模糊神经网络方法对关键参数进行预测；刘建华等[13]采用投影寻踪回归方法对关键参数进行预测；谢永芳等[14]采用最小二乘支持向量机方法对关键参数进行预测；颜青君等[15]采用稳态机理模型和模糊神经网络模型相结合的智能集成建模方法对关键

参数进行预测；阳春华等[16,17]采用基于平衡常数法建立的多相多组分平衡模型、热平衡模型与神经网络模型加权得到的智能集成模型对关键参数进行预测。

在顶吹艾萨熔池熔炼的关键参数软测量方面，程利平[18]采用平衡常数法建立了艾萨熔炼过程的热力学模型；张晓龙[3]提出了一种基于广义最大熵回归的自适应艾萨炉铜熔炼过程关键参数软测量方法，仿真结果表明，该方法能为实际生产提供有益的指导；Juan 等[19]根据质量平衡和能量平衡建立了艾萨炉的简化动态机理模型，并将其在稳态工作点附近进行泰勒展开，从而获得了熔体温度在稳态工作点附近的线性模型。

在侧吹特尼恩特熔池熔炼的关键参数软测量研究方面，Catipillan[20]在冶金分析的基础上建立了动态模型来预测白铜铈品位和熔体温度；Schaaf 等[4,21]采用经验公式和实测数据相结合的质量能量平衡动态模型来预测关键参数。

在侧吹诺兰达炉的关键参数软测量方面，Nagamori 等[22]采用经验公式来预测达到热力学平衡状态下的铜铈和炉渣相中的成分。

表 2 几种主要铜熔炼工艺在关键参数软测量方面的代表性成果

比较项目	闪速熔炼	特尼恩特熔炼	艾萨熔炼	诺兰达熔炼	底吹熔炼
软测量目标	铜铈温度、铜铈品位、炉渣铁硅比	白铜铈品位、炉渣 Fe_3O_4 品位、白铜铈温度、白铜铈液位和渣层厚度	铜铈温度、铜铈品位、炉渣铁硅比	铜铈品位、炉渣铁硅比	——
辅助变量	给矿量，含 Cu 率，含 Fe 率，含 S 率，含 SiO_2 率，空气量，氧气量，空气含水率等	原料量（包括 $CuFeS_2$ 量， CuS 量， Cu_5FeS_4 量， FeS_2 量， Fe_2O_3 量， SiO_2 量）， O_2 量	富氧鼓入量，鼓风量，精矿量等	氧气浓度，精矿组分，熔体温度等	——
国外建模方法	热力学模型	质量能量平衡机理模型	质量能量平衡机理模型	热力学模型	——
国内建模方法	智能集成模型，数据驱动模型，热力学模型，机理模型	——	智能集成模型，热力学模型	——	——

上述研究成果对揭示铜熔炼过程的机理，对不同工艺铜熔炼过程关键参数的在线检测都起到了非常重要的作用。从研究方法来看，主要包括基于质量平衡与能量平衡的机理模型方法，基于数据驱动模型的方法，基于热力学模型的方法，以及智能集成建模方法[1,23]。表 2 总结了几种不

同工艺关键参数软测量方面的代表性成果。

在国外，由于所用原料种类比较稳定，品位较高，成分波动不大，因此多采用基于质量平衡与能量平衡的机理模型方法和基于热力学模型方法，预测精度相对较高。基于质量平衡与能量平衡的机理模型方法利用了很多经验公

式、半经验公式和经验数据,揭示出原料中主要物质的去向,并计算出铜硫温度,具有较强的泛化能力;基于热力学模型的方法以平衡常数法、最小自由能法和经验公式法为代表,能够在给定压力和温度下,预测熔炼过程达到热力学平衡时整个体系中的物料组成,但是这类模型不能反映熔炼过程的动态特性,而且经验公式法适用范围有限。

在国内,长期以来,由于所用原料来源广泛,成分波动较大,以及对机理了解程度不够,因此上述两类方法的预测精度均不够高。由于相关企业在长期的生产中积累了大量的历史数据和生产经验,从而基于数据驱动模型的方法和智能集成建模方法得到了较多应用,并获得了较高的预测精度。基于数据驱动模型的方法主要以回归方法、神经网络方法和最小二乘支持向量机方法为代表,属于经验模型,将熔炼过程看成一个黑箱,依靠从生产中获得的样本数据建立输入输出关系,建模过程较为简单,在建模样本空间内的工况下预测精度较高,但是单一结构的数据驱动模型受到建模样本分布情况的制约,泛化能力有限,对于超出建模样本空间工况下的预测精度不高,而且没有论述如何选择建模样本;智能集成建模方法将基于质量平衡与能量平衡的机理模型方法或基于热力学模型的方法和基于数据驱动模型的方法采用模糊加权的方式相结合,能够改善单一方法的预测精度,但是对于集成方式与预测精度之间的关系,以及系统化的模型集成方法还有待于更深入的研究。此外,随着机理研究的不断深入,对闪速熔炼过程中的铜硫品位预测精度有了较大的提高[8],因此近年来对机理模型的研究又重新受到重视。

4. 可能的进一步研究方向

虽然已有的研究成果为铜熔炼过程的关键参数在线测量起到了重要作用,但是铜熔炼过程具有本质复杂性,表现出动态特性和分布参数特点,而且所用原料的品位日趋降低,而表2中的模型属于稳态模型或集总参数模型,对熔炼过程的动态行为、以及炉内参数分布状况研究不多,较少考虑模型的校正。所以,未来可能的研究方向有以下两个。

4.1 开展对底吹熔池熔炼工艺关键参数软测量方法研究

底吹熔池熔炼工艺是我国具有完全自主知识产权的新工艺。与国外引进的奥托昆普闪速熔炼、艾萨顶吹熔池熔炼和诺兰达侧吹熔池熔炼等工艺相比,底吹熔池熔炼工艺具有原料适应性强、熔炼强度高、无需加入碳质燃料、二氧化碳零排放、耗氧量低、生产能力调节范围大、金银等贵金属捕集率高、环境污染小和投资低等优点[24];与特尼恩特侧吹熔池熔炼工艺相比,具有原料适应性强、熔炼强

度高、耗氧量低的优点,因此受到了国内外冶金领域专家的高度评价,成为发展前景最好的新型铜熔炼工艺。

由于铜冶炼行业的发展越来越受到资源、能源和环境的制约,因此底吹熔池熔炼工艺必将得到越来越广泛的应用,所以对底吹熔池熔炼工艺的关键参数软测量的研究也将成为未来的重要研究方向之一。

4.2 加强对铜熔炼过程建模的研究

可靠的铜熔炼过程模型是关键参数软测量的核心。由于铜熔炼过程包含复杂的传质、传热和化学反应过程,化学反应和温度场、浓度场、速度场相互耦合,难以达到理想的热力学平衡状态,表现出动态和分布参数的特点,而且我国的铜熔炼过程所用原料来源广泛,因此需要以冶金反应工程学等为基础,继续深入研究铜熔炼过程的化学反应、传质和传热过程机理,揭示铜熔炼炉内物质质量和温度随空间和时间的分布情况,从而建立更为细致准确的机理模型,这将成为一个可能的研究方向。

近年来,由于集成学习在理论和实践中被证明能够提高模型的预测性能[25],具有提升已有模型泛化能力的优点而成为研究热点,因此将集成学习算法与已有建模方法相结合,研究基于集成学习的铜熔炼过程软测量模型成为可能的研究方向之一。

由于我国的铜熔炼过程普遍具有原料来源广,成分波动大的特点,且品位逐渐降低,因此随着生产的进行,熔炼过程会逐渐发生变化,需要对已经建立好的软测量模型的性能进行实时监控,并根据监控结果对软测量模型采取必要的校正措施,以保证模型的精度。因此研究铜熔炼过程软测量模型的评价性能指标,以及相应的模型校正方法也是可能的研究方向之一。

5. 结论

由于我国铜熔炼过程使用的原料来源广泛,成分不稳定,且品位逐渐降低,比国外的情况更为复杂,因此增大了关键参数软测量方面研究工作的难度,也导致了国外的研究结果不完全适用,同时已有成果还具有一定局限性。因此需要继续加深对铜熔炼工艺机理的了解,加强对铜熔炼过程建模方法的研究。

目前,关于闪速熔炼、艾萨熔炼、特尼恩特熔炼和诺兰达熔炼的关键参数软测量的研究已经取得了较多的成果,但是关于底吹熔炼工艺关键参数软测量的研究尚未见到报道。由于工艺机理方面的差异,其他工艺的已有成果不能直接推广到底吹熔池熔炼工艺中,因此需要针对底吹熔池熔炼过程开展其关键参数的软测量方法的研究。

参考文献

- [1] 桂卫华, 阳春华, 陈晓方, 王雅琳, 有色冶金过程建模与优化的若干问题及挑战. 自动化学报, 2013,39(3): 197-207
- [2] 朱祖泽, 贺家齐. 现代铜冶金学. 科学出版社, 2003.
- [3] 张晓龙. 艾萨铜熔炼配料优化及状态控制参数预测方法研究. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [4] M. Schaaf, Z. Gómez, A. Cipriano, "Real-time hybrid predictive modeling of the Teniente Converter," *Journal of Process Control*, vol. 20, pp. 3-17, 2010.
- [5] G. Sakichi. "Equilibrium calculations between matte slag and gaseous phases in copper smelting copper metal metallurgy—practice and theory.," in *Institute of Mining and Metallurgy*, London, 1974, pp. 23-29
- [6] 申勇峰. 金川镍闪速熔炼过程热平衡模拟. 有色冶炼, 2001, 1: 12-14
- [7] 王吉林. 基于质量平衡的铜闪速熔炼过程模型及关键参数预测研究. 长沙:中南大学, 2006.
- [8] J.H. Liu, W.H. Gui, Y.F. Xie, C.H. Yang, "Dynamic modeling of copper flash smelting process at a Smelter in China," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, pp. 2206-2213, 2014.
- [9] 喻寿益, 王吉林, 彭晓波. 基于神经网络的铜闪速熔炼过程工艺参数预测模型. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(3):523-527.
- [10] 曾青云, 汪金良. 铜闪速熔炼神经网络模型的建立. 南方冶金学院学报, 2003, 24(5):15-18.
- [11] 曾青云, 汪金良, 张传福. 基于自适应模糊神经网络的铜闪速熔炼渣含 Fe/SiO₂ 模型研究. 有色金属科学与工程, 2011,2(1): 5-8.
- [12] 彭晓波, 桂卫华, 李勇刚, 王凌云, 陈勇. 基于动态 T-S 递归模糊神经网络的闪速熔炼过程参数软测量. 仪器仪表学报, 2008, 29(10):2029-2033.
- [13] 刘建华, 桂卫华, 谢永芳, 王雅琳, 蒋朝辉. 基于投影寻踪回归的铜闪速熔炼过程关键工艺指标预测. 中国有色金属学报, 2012,22(11):3255-3260.
- [14] 谢永芳, 夏巨龙, 刘建华, 桂卫华. 基于 DLSSVM 的铜闪速熔炼过程工艺参数预测. 中国科技论文, 2012,7(1):52-57
- [15] 颜青君. 铜闪速熔炼操作参数优化的研究与应用. 长沙:中南大学, 2007.
- [16] 阳春华, 谢明, 桂卫华, 彭晓波. 铜闪速熔炼过程冰铜品位预测模型的研究与应用. 信息与控制, 2008, 37(1): 28-33
- [17] 谢明. 铜闪速熔炼过程三大工艺参数预测模型的研究. 长沙: 中南大学, 2007.
- [18] 程利平. 云南铜业股份有限公司艾萨炉熔炼计算机模拟. 昆明: 昆明理工大学, 2001.
- [19] M. O. Juan, M. F. Josep, and G. Eul'alia, "Holistic indices for productivity control assessment, applied to the comparative analysis of PID and fuzzy controllers within an Isasmelt furnace," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 92-98, 2014
- [20] M. Catipllan, Modelos metalúrgicos fundición Potrerillos. MSc Thesis, Universidad de Santiago de Chile, 2003.
- [21] M. Schaaf, A. Cipriano, "Hybrid Predictive Modeling and Simulation of the Teniente Converter," in *Proc of the 27th Chinese Control Conf.*, Kunming, Yunnan, July 16-18, 2008, pp. 666-670.
- [22] M. Nagamori, P. J. Mackey. "Thermodynamics of Copper Matte Converting: Part I. Fundamentals of the Noranda Process," *Met Trans B*, vol. 9B, pp. 255-265, 1978.
- [23] 桂卫华, 阳春华. 复杂有色冶金生产过程智能建模、控制与优化. 北京: 科学出版社, 2010
- [24] 崔志祥, 申殿邦, 王智, 李维群, 边瑞民. 富氧底吹熔池炼铜的理论与实践. 中国有色冶金(A 卷生产实践篇. 重金属), 2010(6): 21-26.
- [25] P. Kadlec, B. Gabrys, S. Strandt, "Data-driven Soft Sensors in the process industry," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 33, pp. 795-814, 2009.