



有色金属冶炼自动控制研究现状与展望

潘 岩, 鄢 锋, 郭 徽, 唐昭辉, 杨静雅, 曾祥吉

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 长沙 410019)

摘 要: 有色金属冶炼需要大量消耗能源, 且生产过程废料存在环境污染等问题, 以节能减排为目标有必要提升其自动控制水平。从控制角度出发, 将有色金属冶炼相关研究成果按控制要素即冶炼模型、控制系统进行划分。针对常规建模方法难以全面反映有色冶炼流程特性的问题, 提出未来模型应同时包含化学机理、流场分布等因素; 为实现有色金属冶炼控制品质的提升, 提出先进控制算法尤其是深度控制是未来有色冶炼的发展趋势。在总结已有成果的基础上, 阐明融合优化模型与先进算法并最终形成完整的有色金属冶炼控制体系是未来发展的主要方向。

关键词: 有色金属; 冶炼; 自动控制; 优化

文章编号: 1004-0609(2021)-01-0096-10

中图分类号: TP273

文献标志码: A

引文格式: 潘 岩, 鄢 锋, 郭 徽, 等. 有色金属冶炼自动控制研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 96–105. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-39636

PAN Yan, YAN Feng, GUO Hui, et al. Review and prospect of automatic control system for non-ferrous metal smelting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 96–105. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-39636

人类最早从矿石中冶炼金属的过程就可归类为有色金属(铁、锰、铬之外的所有金属统称)冶炼, 出土的铜制文物可追溯至公元前上千年; 在当前工业时代背景下, 有色金属材料以其独有的性能在军事、经济、民生等领域中发挥着不可替代的作用, 有色冶金工业作为重要产业得到各国重视。

进入 20 世纪以来, 国家实力稳步增强, 以金属铜和铝为例, 2018 年我国消费金属铜 1305 万 t, 同比增长 2.5%; 金属铝消费 4031 万 t, 同比增长 2.6%, 总体上看有色金属消费量稳步提升。然而另一方面, 受需求金属元素在地壳中含量的限制和不同金属冶炼工艺自身复杂程度的影响, 目前许多种类有色金属的产能规模还难以实现预期, 这也造成了部分金属价格居高不下的问题, 日渐增长的有色金属消费需求和生产力不足的矛盾逐渐凸显。我国具有地理幅员辽阔的优势, 金属矿藏种类较全并且

总储量大; 但高品位矿石少, 导致冶炼经济成本与技术成本高。这也在一定程度上限制了有色冶炼从生产设备到工厂整体的规模, 小型冶炼炉使用较为普遍, 污染及能耗高。部分工厂依赖进口矿石, 存在国家战略安全层面的风险。因此, 提升有色金属冶炼综合实力, 从自动化升级为智能化并转进为智慧冶炼, 实现从粗放式生产到精细化管理的跨越, 符合国家战略需求和未来的发展方向。

自有色金属冶炼技术诞生以来, 有关高效获取优质金属资源的探索就一直在进行, 目前已经积累了丰硕的理论与实践成果; 国内行业高校和科研院所也已完成了数百台有色金属冶炼锅炉的优化改造, 并取得了显著成绩^[1]。但另一方面, 现场生产情况总体落后于实验室模拟; 且很多现场历经多次改造, 设备细节变化较大, 传统的理想状态模型很难全面反映真实的现场情况。因而, 有色金属冶炼

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1704705)

收稿日期: 2020-01-17; **修订日期:** 2020-09-16

通信作者: 潘 岩, 工程师, 博士; 电话: 13298654679; E-mail: panyan_cinf@163.com

对象系统自身(即模型系统、控制系统)及外部扰动因素诸如环保、节能等研究领域,仍有进一步优化发展的空间,实现智慧化有色冶炼对国家战略层面可持续发展有着重要意义。

1 有色金属冶炼工艺优化

有色金属冶炼的最终目标是制备纯度满足要求的金属单质,冶炼形式主要可归类为火法、湿法和电解法三大类别。火法冶炼即通过高温方式处理矿石或精矿,藉此直接获取金属或其化合物;湿法冶炼是将金属元素转入液相,再进行回收;电解冶炼法是向电解质溶液或熔融的电解质中通入电流,在极板上进行氧化还原反应完成制备。不同种类金属受自身活性和制备成本等因素的影响,其工业生产通常选定一类方法为主,辅以电解等手段,通过逐步提高纯度从而得到最终产品,即金属锭块。

文献[2]实验验证了高纯度金属镓提取的优化工艺,通过离子交换树脂 D5240 完成金属富集,再用钙盐除钒,得到的金属镓纯度达到 99.94%;文献[3]针对铜冶炼废渣中铁、锌有价金属富余的情况,提出新型转底炉直接还原-磁选工艺,实验验证了转底炉回收铜渣中铁元素与锌元素的可行性和高效率;文献[4]探究了两种嗜热细菌对黄铜矿浸出的影响与作用,实验证实了采用两种菌群混合后自由生长的方式效果最佳;文献[5]针对品味较低的单宁锗矿提出了“盐酸浸出-逆流洗涤-高温煅烧”的锗精矿制备优化工艺,煅烧产率约 15%,锗收率大于 95%;文献[6]设计了一种由废旧印刷电路板回收金属钯的工艺并完成了实验验证,为向小规模工业循环利用金属钯资源提供了参考,也为从废料中回收其他稀贵金属提供了新思路;文献[7]实验验证了 9335 型离子交换树脂对钯元素的吸附和再生作用,回收率达到 98.06%;文献[8]对于白云鄂博矿选铈尾矿常规盐酸铈浸出法效率低下的问题,提出采用包括“除杂-富集-提纯-沉淀-焙烧”的新型工艺,所得氧化铈纯度达到 99.99%;文献[9]详细阐述了金属钼(铌)生产过程的工艺特点,指出酸分解-溶剂萃取过程应对料液和洗剂浓度进行严格控制,且在沉淀-煅烧过程采取控制沉淀条件、调整元素价态或控制 pH 进行分步沉淀能有效除去某些杂质;文献[10]以贵州威宁宣威组底部高岭土为原料,定量

研究了反应温度、酸碱度对于分离铝、铁、硅元素的作用效果并给出了最佳工艺参数,实现了铈和钪的高效富集,体现出一定的参考价值。

从形式上看,60 余种有色金属的冶炼方法百花齐放,很多种类金属冶炼策略并不唯一,且同一方案中所使用的添加物料也存在多种选择。但从工艺控制角度分析,针对一种金属的工业化生产所涉及的理化原理和风险控制具有相似性,其现场基本的控制理念与控制难点是相近的。有色冶金自动化正是将不同有色金属冶炼工艺机理作为基础,在大工业时代背景下,通过控制学科与冶金、采矿学科的交叉实现有色冶金生产在产品纯度、经济效益、环保水平等多方面的全面升级。

2 有色金属冶炼模型研究

完成有色金属冶炼通常需要多个步骤,这其中既要考虑金属的氧化还原反应过程,又需要考虑生产现场添加物料的混合与分布情况,影响因素众多,工艺流程相对复杂,总体上看有色冶金系统属于复杂对象。目前,有关有色金属冶炼设备和流程的模型研究已经取得了相当进展,按模型研究范围进行划分,分为冶炼子系统模型和全局冶炼模型;以建模方法为依据可分为冶炼机理模型和冶炼系统流场分布模型。分类方式只代表研究角度的不同,各模型之间并无本质差别,且从不同侧重点出发的模型研究本质上实现了学科方向的相互补充,共同构建了有色金属冶炼模型体系,为有色金属冶炼自动控制系统设计提供了重要参考。

2.1 有色金属冶炼系统流场分布模型

有色金属冶炼系统流场分布模型能够描述指定范围内的物质场、温度场的空间分布情况,所选取的边界条件精度越高、条件设置越全面,则流体方程求解的结果也越能接近实际工况。文献[11]针对富氧底吹炼铜设备,融合水模实验和数值模拟方法设计了入料口位置顶吹气幕装置,优化改造对抑制熔池飞溅具有较好的效果;文献[12]设计了新型机械搅拌喷气精炼装置优化方案,提出偏心打孔搅拌方案有助于气泡微细化,水模实验验证了方案的可行性;文献[13]建立了铝电解槽三维瞬态三相磁流体模型,并基于有限元分析方法对电解过程中的

阳极板结构和电流密度分布进行了研究,指出倒角阳极和倾斜底面有助于改善电极电流的分布效果;文献[14–15]基于边界有限元耦合法对典型槽膛内形的熔体电流分布进行了定量计算,指出电解槽热场设计考虑槽膛内部形状的必要性;文献[16–17]建立了电解槽阳极板位置的流体数值模拟模型,仿真得出侧方位布置策略效果更佳;文献[18]针对采用生物柴油顶吹加热炼铜工艺的燃料散布情况进行了流场模拟,仿真实验定量给出了油滴雾化分散特性,为喷吹装置优化改造提供了重要参考依据;文献[19]基于 $k-\varepsilon$ 方程研究了氧枪喷口直径和排布方式对吹炼过程的影响,仿真比较给出了底吹炉氧枪最佳排布方式和安装角度建议;文献[20]建造了按比例缩小的底吹炉全局水模实物模型,对当下流行的大口径单氧枪方案进行了研究,给出了混合时间判别定量依据;文献[21]调用不同类型多相流模型和多孔介质模型,对单底吹管情况进行了数值模拟,并采用水力模型进行定量实验验证,给出了最佳流速与位置参数;文献[22]建立了基于数值模拟的侧吹三维流体模型,对射流情况给出修正建议,仿真结果证实了改造方案的可行性;文献[23]针对闪速吹炼过程进行了数值模拟,指出喷枪区域中心高氧量有助于提高冶炼效果,并有助于减少粉尘率。

有色金属冶炼系统流场分布模型以其经济型好、直观性强的优势成为有色冶炼流程优化管控的重要方法,作为冶炼现场优化升级改造的重要参考依据,很多研究成果已取得了较好的经济效益。

2.2 有色金属冶炼机理模型

有色金属冶炼流场仿真效果取决于所选用机理模型对生产过程的描述水平,从理论层面出发描述有色金属冶炼的静态与动态特性,建立基于现场数据的机理模型有助于深入理解冶炼流程,对控制参数仿真调试具有参考价值。文献[24]对一阶连续流体系统停留时间进行了分解分析,通过仿真定量指出系统入口喷射动量变化率可以用于表征并修正 CSTR 模型参数;文献[25]建立了金属锌湿法冶炼铜离子去除过程机理模型,针对主反应和副反应分别采用伪一阶速率方程和缩核模型进行描述,并提出了优选策略进行参数估计,仿真证实了模型对除杂过程的反应能力;文献[26]从反应机理出发,

对锌元素浸出液纯化过程进行了分析,比较了砷氧化物和锑氧化物除钴元素的作用效果,给出了机理关系模型;文献[27]建立了广义化学反应过程非线性参数估计模型,并设计了反应动力学模型辨识优化策略,推导证明了模型的可信度和优越性;文献[28]针对复杂条件下多目标化学反应流程,在最大期望算法中引入粒子过滤器,提出一种关于时变系统模型非线性参数辨识算法,仿真结果与实际数据相近,证实了方案的实用价值;文献[29]基于化学流程输入输出数据建立了拟合工作点动态变化过程的多参数线性模型,引入反应釜数据验证了其机理模型的有效性;文献[30]针对湿法铜冶炼萃取流程组分质量浓度测量困难的问题,提出一种结合独立成分分析法与支持向量机算法的机理建模方法,实验测得的萃取余液与反萃取余液中目标元素质量浓度与仿真结果基本吻合,验证了其方案的有效性;文献[31]对于非线性复杂工业过程,提出了具备自适应在线预测和过程监测功能的混合高斯回归模型,实现了由输入变量对输出变量的预测,并实现了系统仿真验证;文献[32]针对红外光谱化学成分检测流程传统模型结构无法改变的情况,设计了基于波长自适应优化的在线变结构数值模型,仿真证实了所述策略的准确性;文献[33]以铁矿湿法冶炼溶液元素离子无法实现在线检测为研究背景,提出了基于误差补偿的整合机理模型,并针对模型中未知参数改进了粒子群算法用于优化辨识过程,最终仿真实现了亚铁离子的高效在线检测;文献[34]对于有色金属冶炼矿物种类繁多,工艺流程复杂,高精度模型建立困难的问题,以3种典型不确定性问题为代表对有色冶金过程优化方法描述进行了综述,并进一步以湿法冶炼金属锌去除铜元素过程为例进行了说明,指出物联网、云计算等新技术将为有色金属生产带来更大的支持与动力。

研究有色金属冶炼机理,有益于工艺改进与新型冶炼装备的研发,相关成果与流场分布模型相辅相成,从不同侧重点出发共同丰富了有色冶炼系统模型。

3 有色金属冶炼优化控制

3.1 有色金属冶炼控制策略优化方案

有色金属冶炼系统工艺流程复杂,且通常具有

较大的惯性与迟延时间。只有设计适合的控制策略并搭配更为高效的控制算法才能实现冶炼流程的高效与稳定,这一研究方向也是有色金属冶炼过程优化控制的重点。文献[35]针对粉末冶金制粉流程矿物细度过程参数控制设计了优化的人工神经网络逼近策略,为系统参数设置提供了重要参考依据;文献[36]研究了采用火法冶炼金属铜的炉渣贫化流程,设计加装了智能传感器用以估计煤粉注入率,并在此基础上进一步设计了改进的预测算法,实验验证其策略提高了废渣中金属铜的还原率,并减少了污染物产出;文献[37]设计了两种模糊控制策略,用于控制金属镍闪速熔炼生产过程,所述方案均实现了系统稳定运行,且控制品质优于传统方案;文献[38]建立了包含两级结构的实时专家控制系统用于金属锌电解精炼过程,通过保证局部工艺指标最优以实现全局优化的效果,并实验证实了设计的可行性;文献[39]设计了改进的主成分分析方法,提出了连续优化控制策略以实现系统延迟最小化,实际运行效果证实了方案的优越性;文献[40]系统地论述了铅锌冶炼密闭鼓风烧结流程的特点与存在的问题,建立集成模型并以此为基础提出了集成优化算法与相应策略,仿真与实验均表明所述方案的控制速度、精度等品质优于传统方案,实用意义较好;文献[41]基于蚁群算法设计了铝电解连续铸造流程优化控制策略,方案实现了多任务目标的同时优化,仿真证实了策略的可行性;文献[42]以金属铝铸造流程为背景,提出一种线性最大化控制策略,提升了系统对未建模变量的处理能力,缩短了大中型难题的计算时间;文献[43]提出了电解铝流程负荷分级优化控制策略,针对低负荷段引入基于动态阈值的本地新型直流控制方案以降低总能耗,仿真实现了铝电解系统的最优经济化运行,为改善企业效益提供了重要参考;文献[44]针对铜闪速熔炼过程控制现状,设计了基于柯西-施瓦茨不等式的最优工况匹配控制策略,借助现场数据仿真,证实了其方案对降低系统运行成本的促进作用;文献[45]针对湿法炼锌除铜过程,以反应器出口杂质浓度指标为依据,提出分级控制策略优化锌粉添加量,工业试验证实了所述策略的实用价值;文献[46-47]从控制角度详述了电弧熔炼炉的控制要点与难点,提出了基于无模型自适应的真空自耗电弧炉控制策略,仿真实验结果优于传统方案;文

献[48]以金属镍泡沫浮选流程为研究对象,以传统机器学习算法为基础,开发了基于新型策略的集成控制系统,实现了现场系统优化控制;文献[49]以加拿大萨德伯里镍冶炼厂电弧炉为研究对象,借助多元统计方法设计了匹配进料量的功率控制策略,实现了熔炼温度等参数的优化稳定控制,对生产现场有一定的借鉴意义;文献[50]系统分析了影响金属钢生产过程的主要因素,实验给出了酸碱度与各影响变量之间的关系并给出对应控制策略,对现场有一定的指导意义;文献[51]采用连续时间范式表征金属镍冶炼工况,并以此为基础提出了生产流程调度优化控制策略,提供了优化生产决策参考依据;文献[52]针对冶金工业流程长且涉及化学反应的情况,提出了一种基于遗传算法的多步状态转移优化控制策略,通过系统评价确定目标函数,实验验证了其策略对复杂系统过程控制的有效性;文献[53]以金属镍火法冶炼为背景,分析了烟气负压子系统的控制需求,设计了增加前馈环节的优化控制策略,并系统性地对静态前馈方案于动态前馈方案进行了仿真,仿真优化效果较为显著。

目前,有关控制策略优化设计的研究各具特色,且在生产过程或仿真环境下均表现出较好的技术性能与经济收益,相关研究发展势头迅猛;但另一方面,有色金属冶炼系统针对性强,使得案例成功经验难以大规模推广应用,直接复制套用甚至会适得其反。随着控制科学的进一步发展,优化策略将打破工艺壁垒,适用范围逐步扩大;智能化程度也将进一步增强,逐步实现摆脱对人员经验的依赖。总体上看,有关控制策略的研究将成为有色金属冶炼的必由之路。

3.2 有色金属冶炼控制优化算法研究

在科技迅速发展的大时代背景下,先进控制理论的推广应用成为大势所趋。一方面计算机芯片技术的发展为优化算法奠定了物质实施基础,新型高速处理器使得控制的实时性要求不再成为限制优化算法的鸿沟;另一方面,算法本身也在不断完善并朝向更加智能化的方向发展。利用先进算法的优势性能实现有色冶金品控提升成为当前优化控制的重要手段。文献[54]提出了改进的蚁群智能优化算法,通过增加粒子概率参数实现系统过程参数的自适应控制,仿真验证了算法的可行性;文献[55]

以降低金属锌电解过程全天综合成本为目标,建立了包含总电耗费用的多目标优化模型,并进一步提出加速度粒子群算法用于寻优,仿真实验证实了算法的效率与可行性;文献[56]针对湿法炼锌砷盐除钴过程参数整定困难的问题,提出了一种基于最小二乘支持向量机优化算法,用以评估操作模糊匹配参数自适应调整效果,工业验证了所述方法的稳定性并报道了所取得的经济效益;文献[57]从非线性系统辨识与控制问题向寻优问题转化过程入手,提出一种状态转移算法并设计了离线控制器调节策略,通过与其他策略型算法对比,仿真证实了所述方案能够快速收敛并具备较好的稳定性;文献[58]提出了一种离散状态转移算法,通过设计转移算子改善了算法的收敛性并降低了时间复杂度,仿真验证了其方案较经典蚁群算法、粒子群算法在快速性、适应性等方面的优势;文献[59–60]分别设计了双种群协同优化控制算法,提高了全局寻优能力和求解精度,仿真结果为实际生产过程提供了一定的参考价值;文献[61]比较了状态转移算法、和声搜索算法和人工蜂群算法的区别与特点,指出了各算法的适用范围,对控制器选型有一定的指导价值;文献[62]设计了五层结构的模糊神经网络,针对金属锌电解控制流程启发式训练,仿真证实了系统的准确性,为现场参数设置提供了参考依据;文献[63]提出一种混杂系统理论用以解决针铁矿沉铁过程铁离子浓度和酸碱度控制问题,给出了系统控制器切换策略,仿真证实了方案的可行性,提供了针铁矿处理控制层面的新思路。

目前,不少先进控制算法和理念已投入现场应用,并取得了一定的经济成果,在此基础上进一步应用深度学习思想也是当前的研究热门方向。文献[64]采用深层信念网络算法以传统PID控制器为目标进行训练,仿真结果证实了深度控制的可行性与控制品质;文献[65]提出了改进的卷积网络算法,针对合金构件裂纹问题进行图像识别处理,为成品检验提供了参考依据;文献[66]针对有色金属回收分拣流程,提出了一种改进的深度残差网络识别方法,实验完成了静态金属碎料的高精度分拣,对连续自动化辨识有一定的参考意义;文献[67–68]从环保角度出发,提出了深度控制理念,设计了面向控制的策略型深度算法,对深度学习理论向控制领域迈进起到了积极作用;文献[69]利用深度学习算法

对焊接工艺形成的局部熔池进行分析,实现了熔融金属的检测分析,为有色金属工业冶炼提供了新思路;文献[70]综述了深度理论在控制行业的应用,指出其优势并对深度控制的发展给出了积极的评价。

深度学习理论在金属探伤等领域已在一定程度上投入工业应用,但用作控制器对有色金属冶炼流程进行直接控制的案例目前少见报道。总体上看,深度控制所具备的精细化调节等优势势必推进这一研究方向不断前进。

4 结论

目前,我国有关有色金属冶炼的研究已经取得了很多成绩,部分研究结果达到世界领先水平,经济效益初步显现;但有色冶金工业属于高能耗重污染行业,在连续工业生产条件下,降低单位时间燃料消耗与污染物排放量有着重要意义,相关研究属于长期优化课题。从控制角度出发,有色金属冶炼优化改进的发展趋势如下。

1) 以需求为导向的工艺融合与新型工艺开发是未来研究的重点。伴随科技成果转化进程加速,新型工艺投产创效势必获得更大的发展空间;与此同时,集成已有技术成果诸如网络技术、信息管理手段等,也成为重要的发展方向。即协同研发与集成两条路线,相互促进从而实现工艺流程管控力度与精度的提升。

2) 冶炼模型的实用性会进一步提升。未来模型将更加切合生产现场,即减少或取消近似条件,使得对象特性不再因建模角度的因素而被迫选择性忽略;同时,融合流场、机理及数据反馈的综合模型将更加全面地为控制研究提供参考依据。

3) 成熟的控制策略带来更优控制品质。新型控制策略的设计将更加合理,优化策略与工艺之间能够紧密结合,相互促进,实现控制系统从物理层到控制层的协调运行,从而实现综合控制品质的全面提升。

4) 新型控制优化算法将逐步并最终替换传统控制器投入生产。大数据时代背景下,精细化管理成为未来工业控制的主流,具备自适应能力、强鲁棒性的先进控制算法借助自身优势实现冶金流程控制品质的提升符合冶金优化控制技术发展规律,

对向冶金生产智能化有着重要意义。

综上所述, 有关有色金属冶炼的研究成果经过不断积累与沉淀, 最终形成由新型工艺、综合模型、优化策略和先进算法组成的优化冶炼体系, 终将实现节能减排与可持续发展的时代要求, 取得更美好的成绩。

REFERENCES

- [1] 桂卫华, 阳春华, 陈晓方, 等. 有色冶金过程建模于优化的若干问题及挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 197–207.
GUI Wei-hua, YANG Chun-hua, CHEN Xiao-fang, et al. Modeling and optimization problems and challenges arising in nonferrous metallurgical processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 197–207.
- [2] 朱茂兰, 黄中省, 衷水平, 等. 镓精矿中镓的提取工艺[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(11): 2351–2357.
ZHU Mao-lan, HUANG Zhong-sheng, ZHONG Shui-ping, et al. Extraction process of gallium from gallium concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(11): 2351–2357.
- [3] 曹志成. 铜渣转底炉直接还原回收铁锌工艺[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
CAO Zhi-cheng. Study on process and mechanism of recovery of iron and zinc from copper slag by rotary hearth furnace direct reduction[D]. Beijing: University of Science and Technology, 2018.
- [4] LIANG Yu-ting, HAN Jun-wei, AI Chen-bing, et al. Adsorption and leaching behaviors of chalcopyrite by two extreme thermophilic archaea[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(12): 2538–2544.
- [5] 杨贵生. 提高锗精矿质量研究[J]. 有色金属, 2019(4): 60–63.
YANG Gui-sheng. Study on upgrading of germanium concentrate[J]. Nonferrous Metals, 2019(4): 60–63.
- [6] DAMIEN B, VALENTIN L, RÉGIS M, et al. A simple process for the recovery of palladium from wastes of printed circuit boards[J]. Hydrometallurgy, 2020, 191: 1–10.
- [7] 徐 涛. 离子交换树脂法吸附、解吸附钯工艺研究[J]. 贵金属, 2016, 37(S1): 102–104.
XU Tao. Study on adsorption and desorption of palladium by ion exchange resin[J]. Precious Metals, 2016, 37(S1): 102–104.
- [8] 马升峰, 徐 惠, 许延辉, 等. 白云鄂博选钽尾矿浸出液制备高纯 Sc_2O_3 的工艺研究[J]. 中国稀土学报, 2019, 37(6): 724–729.
MA Sheng-feng, XU Hui, XU Yan-hui, et al. High purity scandium oxide from leaching solution of niobium tailings by Bayan obo ore[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2019, 37(6): 724–729.
- [9] 晏慧娟, 唐德胜. 传统工艺生产氧化钽(铌)除杂技术特点及研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2016, 44(4): 14–19.
YAN Hui-juan, TANG De-sheng. Technological features and the latest development of impurity separation during tantalum(niobium) oxide production by traditional process[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2016, 44(4): 14–19.
- [10] WANG Ning, GU Han-nian, WEN Han-jie, et al. Enrichment of niobium and titanium from Kaoling using an acid-alkali leaching process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49: 3552–3558.
- [11] 王东兴. 氧气底吹熔炼炉内流体流动行为的模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
WANG Dong-xing. Modeling studies on flow behavior in bottom blow oxygen copper smelting furnace[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [12] 刘 燕. 新型机械搅拌喷气精炼装置的气泡微细化及分散的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
LIU Yan. Bubble disintegration and dispersion in new type mechanical stirring injection refine equipment[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [13] 刘 伟, 杨晓东, 周东方, 等. 铝电解槽三维稳态磁流体动力学建模[J]. 轻金属, 2011, 12(S1): 173–177.
LIU Wei, YANG Xiao-dong, ZHOU Dong-fang, et al. Development of 3D steady-state magneto-hydro-dynamics model of aluminum electrolysis cells[J]. Light Metals, 2011, 12(S1): 173–177.
- [14] 贺志辉, 陶先绪, 陈世玉. 电解槽槽膛内形对电流分布的影响[J]. 轻金属, 1987(6): 28–30.
HE Zhi-hui, TAO Xian-xu, CHEN Shi-yu. The influence of aluminum electrolysis cells internal shape on current distribution[J]. Light Metals, 1987(6): 28–30.
- [15] 李 劫, 王志刚, 赖延清, 等. 5 kA 惰性阳极铝电解槽槽膛内形及热平衡[J]. 过程工程学报, 2008, 8(1): 54–58.
LI Jie, WANG Zhi-gang, LAI Yan-qing, et al. Cell profile and heat balance of 5 kA inter anode aluminum reduction cell[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(1): 54–58.
- [16] LI Xiang-peng, LI Jie, LAI Yan-qing, et al. Mathematical simulation of gas induced bath flow in drained aluminum

- reduction cell[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(6): 1221–1226.
- [17] LI Xiang-peng, LI Jie, LAI Yan-qing, et al. Physical modeling of gas induced bath flow in drained aluminum reduction cell[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(5): 1017–1022.
- [18] DENG Wei-peng, ZHANG Xiao-hui, WANG Hua, et al. Dispersion characteristics of biodiesel spray droplets in top-blown injection smelting process[J]. Chemical Engineering & Processing (Process Intensification), 2018, 126: 168–177.
- [19] 闫红杰, 刘方佩, 张振扬, 等. 氧枪布置方式对底吹熔池熔炼过程的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(8): 2393–2400.
- YAN Hong-jie, LIU Fang-kan, ZHANG Zhen-yang, et al. Influence of lance arrangement on bottom-blowing bath smelting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(8): 2393–2400.
- [20] HUI Lang, CUI Zhi-xiang, MA Xiao-dong, et al. Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter: A water model study[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46, B, 1217–1225.
- [21] 雷 鸣, 王周勇, 张捷宇, 等. 多相流模型拟熔融还原炉内流体流动[J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 420–425.
- LEI Ming, WANG Zhou-yong, ZHANG Jie-yu, et al. Study on modeling of fluid flow in iron-bath smelting reduction furnace with multi-phase model[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(1): 420–425.
- [22] 詹树华, 赖朝斌, 萧泽强. 侧吹金属熔池内的搅动现象[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(2): 148–151.
- ZHAN Shu-hua, LAI Chao-bin, XIAO Ze-qiang. CFD analysis of gas stirring behavior in side-blown metallic bath[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2003, 34(2): 148–151.
- [23] LI Jia-dong, ZHOU Ping, LIAO Zhou, et al. CFD modeling and optimization of oxygen supply mode in KIVCET smelting process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(7): 1560–1568.
- [24] JONES P N, ÖZCAN-TAŞKIN N G, YIANNESKIS M. The use of momentum ratio to evaluate the performance of CSTRs[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(4): 485–491.
- [25] ZHANG Bin, YANG Chun-hua, ZHANG Hong-qiu, et al. Kinetic modeling and parameter estimation for competing reactions in copper removal process from zinc sulfate solution[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(48): 17074–17086.
- [26] TOZAWA K, NISHIMURA T, AKAHORI M, et al. Comparison between purification processes for zinc leach solutions with arsenic and antimony trioxides[J]. Hydrometallurgy, 1992, 30(1/3): 445–461.
- [27] BUZZI-FERRARIS G, MANENTI F. Kinetic models analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(5): 1061–1074.
- [28] DENG Jing, HUANG Biao. Identification of nonlinear parameter varying systems with missing output data[J]. AIChE Journal, 2012, 58(11): 3454–3467.
- [29] JIN Xing, HUANG Biao, SHOOK S D. Multiple model LPV approach to nonlinear process identification with EM algorithm[J]. Journal of Process Control, 2011, 21(1): 182–193.
- [30] 于 亮, 毛志忠, 贾润达. 基于 ICA-LSSVM 的铜萃取混合模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(10): 1369–1372.
- YU Liang, MAO Zhi-zhong, JIA Run-da. Hybrid model based on ICA-LSSVM for copper extraction[J]. Journal of Northeastern University(Nature Science), 2014, 35(10): 1369–1372.
- [31] RATKO G, DRAŽEN S, PETR K. Adaptive soft sensor for online prediction and process monitoring based on a mixture of gaussian process models[J]. Computers and Chemical Engineering, 2013, 58: 84–97.
- [32] HE Kai-xun, CHEN Hui, DU Wen-li, et al. Online updating of NIR model and its industrial application via adaptive wavelength selection and local regression strategy[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2014, 134: 79–88.
- [33] XIE Yong-fang, XIE Shi-wen, CHEN Xiao-fang, et al. An integrated predictive model with an on-line updating strategy for iron precipitation in zinc hydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy, 2015, 151: 62–72.
- [34] 杨春华, 韩 洁, 周晓君, 等. 有色冶金过程不确定优化方法探讨[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 856–865.
- YANG Chun-hua, HAN Jie, ZHOU Xiao-jun, et al. Discussion on uncertain optimization methods for nonferrous metallurgical processes[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 856–865.
- [35] CHERIAN R P, SMITH L N, MIDHA P S. A neural network approach for selection of powder metallurgy materials and process parameters[J]. Artificial Intelligence in Engineering,

- 2000, 14(1): 39–44.
- [36] BERGH L G, YIANATOS J B, CHACANA P B. Technical note intelligent sensor for coal powder rate injection in a slag cleaning furnace[J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13(7): 777–781.
- [37] 万维汉, 万百五, 史维祥, 等. 镍闪速熔炼过程的模糊动态质量模型与控制[J]. *西安交通大学学报*, 2000, 34(3): 54–59.
- WAN Wei-han, WAN Bai-wu, SHI Wei-xiang, et al. Fuzzy dynamic quality models and control of nickel flash smelting process[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2000, 34(3): 54–59.
- [38] 阳春华, 桂卫华. 锌电解过程实时专家控制系统的设计[J]. *计算机应用*, 1999, 19(4): 37–39.
- YANG Chun-hua, GUI Wei-hua. Optimization design of ECS of zinc electrolysis process[J]. *Computer Applications*, 1999, 19(4): 37–39.
- [39] SEBZALLI Y M, WANG X Z. Knowledge discovery from process operational data using PCA and fuzzy clustering[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2001, 14(5): 607–616.
- [40] 王春生. 铅锌烧结配料过程的智能集成建模与优化控制策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- WANG Chun-sheng. Intelligent integrated modelling and optimization control strategy for lead-zinc sintering blending process[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [41] MARC G, WILSON L P, CAROLINE G. Scheduling continuous casting of aluminum using a multiple objective ant colony optimization metaheuristic[J]. *Journal of Operational Research*, 2002, 143: 218–229.
- [42] PRADEEP P, CHRISTOS T M, JEFFREY K. Optimization of aluminum smelter casthouse operations[J]. *American Chemical Society*, 2006, 45(22): 7603–7617.
- [43] BAO Peng, ZHANG Wen, CHEN Ding-yi, et al. Hierarchical control of aluminum smelter loads for primary frequency support considering control cost[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 122: 1–14.
- [44] XIE Yong-fang, LIU Jian-hua, XU De-gang, et al. Optimal control strategy of working condition transition for copper flash smelting process[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 46: 66–76.
- [45] ZHANG Bin, YANG Chun-hua, ZHU Hong-qiu, et al. Evaluation strategy for the control of the copper removal process based on oxidation-reduction potential[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 294–304.
- [46] 李春玉. 基于 PLC 的真空自耗炉控制系统设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- LI Chun-yu. Vacuum arc remelting furnace control system based on PLC[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [47] 杨永维. 真空自耗电弧炉数学模型的实验研究及控制策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- YANG Yong-wei. Experimental study on the mathematical model and control strategy of vacuum consumable arc furnace[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [48] 梁 帅. 镍矿浮选控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- LIANG Shuai. Research on control of Cu-Ni sulphide flotation process[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [49] JUAN J F, PEDRO T, FELIX G, et al. Automatic control development for the falcondo ferronickel electric arc smelting furnaces[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2007, 40(11): 65–70.
- [50] 曾冬铭, 周智华, 舒万良. 精钢生产中酸度的影响与控制[J]. *稀有金属*, 2001, 25(2): 147–150.
- ZENG Dong-ming, ZHOU Zhi-hua, SHU Wan-gen. Effect and control of acidity in refining indium[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2001, 25(2): 147–150.
- [51] EWASCHUK C M, SWARTZ C L E, ZHANG Ya-le. An optimization framework for scheduling of converter aisle operation in a nickel smelting plant[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2018, 119(1): 195–214.
- [52] CHEN Xiao-fang, GUI Wei-hua, WANG Ya-lin, et al. Multi-step optimal control of complex process: A genetic programming strategy and its application[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2004, 17(5): 491–500.
- [53] SHANG H, SCOTT J A. Minimizing leakage from a smelter off-gas system by enhanced control[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(1): 70–77.
- [54] 周晓静, 吕翠英. 基于改进蚁群算法的催化裂化分馏塔在线多目标优化[J]. *计算机与应用化学*, 2009, 26(4): 443–446.
- ZHOU Xiao-jing, LÜ Cui-ying. Online multi-objective optimization of catalyzing & cracking fractionating tower based on improved ant colony algorithm[J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2009, 26(4): 443–446.
- [55] 桂卫华, 张美菊, 阳春华, 等. 基于混合粒子群算法的锌电解过程能耗优化[J]. *控制工程*, 2009, 16(6): 748–751.
- GUI Wei-hua, ZHANG Mei-ju, YANG Chun-hua, et al.

- Energy consumption optimization of zinc electrolysis process based on hybrid particle swarm algorithm[J]. *Control Engineering of China*, 2009, 16(6): 748–751.
- [56] 伍铁斌, 阳春华, 李勇刚, 等. 基于模糊操作模式的重盐除钴过程操作参数协同优化[J]. *自动化学报*, 2014, 40(8): 1690–1697.
- WU Tie-bin, YANG Chun-hua, LI Yong-gang, et al. Fuzzy operational-pattern based operating parameters collaborative optimization of cobalt removal process with arsenic salt[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8): 169–179.
- [57] ZHOU Xiao-jun, YANG Chun-hua, GUI Wei-hua. Nonlinear system identification and control using state transition algorithm[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 40(8): 169–179.
- [58] 阳春华, 唐小林, 周晓君, 等. 一种求解旅行商问题的离散状态转移算法[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(8): 1040–1046.
- YANG Chun-hua, TANG Xiao-lin, ZHOU Xiao-jun, et al. A discrete state transition algorithm for traveling salesman problem[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(8): 1040–1046.
- [59] 熊富强, 桂卫华, 阳春华, 等. 一种双种群协同进化算法在湿法炼锌过程中的应用[J]. *控制与决策*, 2013, 28(4): 590–595.
- XIONG Fu-qiang, GUI Wei-hua, YANG Chun-hua, et al. A double population co-evolution algorithm for process of zinc hydrometallurgy[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(4): 590–595.
- [60] 暴 励, 曾建潮. 一种双种群差分蜂群算法[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(2): 266–272.
- BAO Li, ZENG Jian-chao. A bi-group differential artificial bee colony algorithm[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(2): 266–272.
- [61] ZHOU Xiao-jun, DAVID Y G, YANG Chun-hua. A comparative study of state transition algorithm with harmony search and artificial bee colony[J]. *Advances in Intelligent System and Computing*, 2013, 212: 651–659.
- [62] 孙 强, 桂卫华, 王雅琳. 锌电解过程电流效率的模糊神经网络模型设计[J]. *系统仿真学报*, 2001, 13(S1): 105–107.
- SUN Qiang, GUI Wei-hua, WANG Ya-lin. Fuzzy neural network model design of power frequency in the course of zinc electroanalysis[J]. *Journal of System Simulation*, 2001, 13(S1): 105–107.
- [63] 陈 宁, 范 勇, 桂卫华, 等. 针铁矿法沉铁过程的混杂建模与控制[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1): 254–261.
- CHEN Ning, FAN Yong, GUI Wei-hua, et al. Hybrid modeling and control of iron precipitation by goethite process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(1): 254–261.
- [64] KANGBEOM C, JAEHOON K, MOUSSA H, et al. On replacing PID controller with deep learning controller for DC motor system[J]. *Journal of Automation and Control Engineering*, 2015, 3(6): 452–456.
- [65] 王 森. 非受限场景裂纹图像分割方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- WANG Seng. Segmentation of crack images in unconstrained scenes[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [66] 李 成, 汪小凯, 章振原, 等. 基于深度残差网络的有色金属破碎料视觉识别方法[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(8): 127–134.
- LI Cheng, WANG Xiao-kai, ZHANG Zhen-yuan, et al. Visual recognition method for nonferrous metal crushed aggregates based on deep residual network[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(8): 127–134.
- [67] 牛玉广, 潘 岩, 陈 曦. 选择性催化还原烟气脱硝深度结构和深度控制[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(1): 65–72.
- NIU Yu-guang, PAN Yan, CHEN Xi. Depth structure control and depth control of selective catalytic reduction flue gas denitration system[J]. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(1): 127–134.
- [68] 潘 岩. 火电机组SCR烟气脱硝机理建模与智能控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- PAN Yan. Intelligent control of power plant SCR flue gas denitration system based on mechanism modeling[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [69] 刘新锋. 基于正面熔池图像和深度学习算法的PAW穿孔/熔透状态预测[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- LIU Xin-feng. Topside visual sensing and deep learning algorithm based prediction of keyhole status/penetration in plasma arc welding[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017.
- [70] 段艳杰, 吕宜生, 张 杰, 等. 深度学习在控制领域的研究现状与展望[J]. *自动化学报*, 2016, 42(5): 643–654.
- DUAN Yan-jie, LÜ Yi-sheng, ZHANG Jie, et al. Deep learning for control: The state of the art and prospects[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(5): 643–654.

Review and prospect of automatic control system for non-ferrous metal smelting

PAN Yan, YAN Feng, GUO Hui, TANG Zhao-hui, YANG Jing-ya, ZENG Xiang-ji

(Changsha Nonferrous Metallurgy Design and Research Institute Company Limited, Changsha 410019, China)

Abstract: To smelt the non-ferrous metal, a lot of energy needs to be consumed, and there are environmental pollution and other problems caused by the waste during the production process. To meet the needs of energy saving and environment protection, promoting the automatic control level is necessary. For controlling, the research results of non-ferrous metal smelting was divided as two parts according to the control factor, namely smelting model and control system. In view of the problem that the general modeling method is hard to fully reflect the characteristics of the smelting process of non-ferrous metal, it is suggested that the future model should include both chemical mechanism and flow field distribution, and in order to improve the quality control of non-ferrous metal smelting, using advanced control algorithm such as the depth control as controller, becomes the development trend of the future non-ferrous smelting. On the basis of the summary of the existing achievements, it is expounded that combining the optimization model with advanced algorithms and eventually forming a complete non-ferrous metal smelting control system is the main direction of future development.

Key words: non-ferrous metal; smelt; automatic control; optimization

Foundation item: Project(2019YFB1704705) supported by the National Key Research and Development Program of China

Received date: 2020-01-17; **Accepted date:** 2020-09-16

Corresponding author: PAN Yan; Tel: +86-13298654679; E-mail: panyan_cinf@163.com

(编辑 龙怀中)