

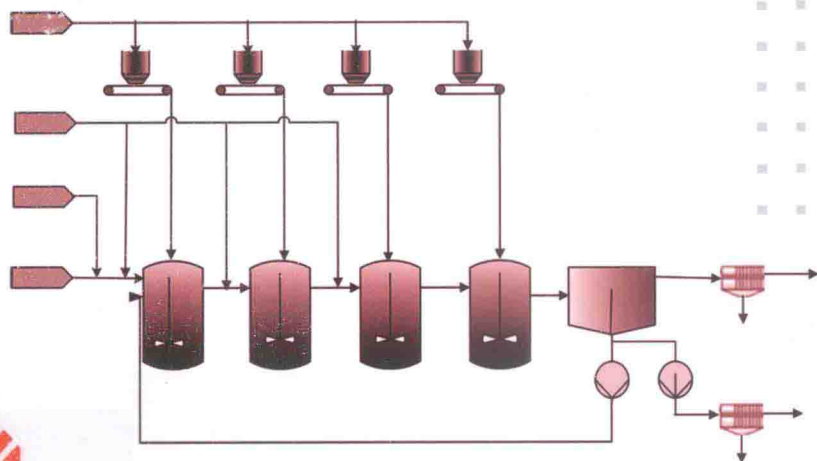


学 | 术 | 专 | 著

锌湿法治炼净化除钴过程 建模与优化

伍铁斌 著

XIN SHI FA YELIAN JINGHUA CHUGU
GUOCHENG JIANMO YU YOUHUA



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

锌湿法冶炼净化除钴过程建模与优化

伍铁斌 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

锌湿法冶炼净化除钴过程建模与优化/伍铁斌著. —长沙:
中南大学出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2760 - 6

I. 锌... II. 伍... III. 炼锌 - 湿法冶金 - 过程模拟
IV. TF813.032

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 077259 号

锌湿法冶炼净化除钴过程建模与优化

伍铁斌 著

☐责任编辑 刘 辉

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731-8876770

传真: 0731-8710482

☐印 装 长沙市井岗印刷厂

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 10.5 ☐字数 207 千字 ☐插页

☐版 次 2017 年 5 月第 1 版 ☐2017 年 5 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2760 - 6

☐定 价 30.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书是关于锌湿法冶炼过程智能建模与优化方法研究与应用方面的专著。湿法炼锌净化除钴是通过向硫酸锌溶液中添加适量的砷盐、锌粉和废酸，使溶液中的钴离子浓度降至工艺要求范围，是锌冶炼生产流程中锌粉消耗最大、控制难度最高的工序。钴离子浓度超标会严重影响锌电解效率和析出锌质量。净化除钴过程生产流程长、锌液入口流量和杂质离子浓度等波动频繁，钴离子浓度人工化验滞后大，造成操作参数优化困难，导致锌粉消耗高、净化后溶液中钴离子浓度合格率低。为此，本书针对钴离子浓度人工化验大滞后的问题，建立了基于分工况的除钴机理模型与模糊特征加权最小二乘支持向量机残差补偿模型的钴离子浓度预测模型。为创造良好的净化除钴的环境，将硫酸锌溶液的BT值控制在合理的范围，提出了一种融合砷盐除钴过程机理与专家规则相融合的废酸添加量优化方法。为克服锌粉添加的盲目性，将锌粉的优化问题转化为可以在线监测的ORP的优化，针对砷盐除钴过程操作参数ORP与砷盐添加量之间的耦合性关系，提出了一种基于模糊操作模式的砷盐添加量与ORP协同优化方法。研发的净化除钴优化控制指导系统已应用于工业过程，实现了废酸添加流量、砷盐添加量、浓密机底流返回量和ORP等操作参数的优化设定和锌粉堵塞、储液罐溢出等异常情况报警，降低了操作员的工作强度，为除钴过程的稳定运行创造了条件。工业验证实验表明，钴渣中的锌元素含量下降5.1%，净化后溶液的钴离子合格率提高6.7%，平均节约锌粉8.2%。本书坚持理论联系实际，相关方法可为钢铁冶炼、铜冶炼等复杂生产过程的建模、优化与控制提供借鉴和参考。

前言

Foreword

锌是重要的有色金属原材料,广泛应用于建筑、电镀、合金和医药工业中。湿法炼锌已成为金属锌的主要生产方法,由于锌精矿浸出后的硫酸锌溶液含有大量的有害杂质离子,会显著降低锌液电解的电流效率,钴离子是其中危害最大和最难除的杂质离子,因此,净化除钴为锌湿法冶炼关键的工序。由于净化除钴过程属于多元多相的复杂反应体系,工艺机理极为复杂,而且国内锌精矿矿源复杂,经常出现溶液中钴、铜等杂质离子大幅度波动,给净化过程的建模与优化带来了许多困难。

本书是作者从事锌湿法冶炼生产过程自动化的研究工作的总结。全书共分7章,涉及数据预处理、过程智能集成建模和智能优化等方面的内容。

本书得到了中南大学阳春华教授、桂卫华教授、李勇刚教授、朱红求副教授的精心指导,此外,还要特别感谢成运教授、谢常清教授、刘建华博士、龙文博士等的大力支持。在本书完成之际,向他们表示崇高的敬意。

本书的基础研究工作还得到了国家杰出青年科学基金“复杂工业过程建模、控制与优化(61025015)”、国家创新研究群体科学基金项目“复杂有色冶金过程控制理论、技术与应用(61621062)”、国家自然科学基金(61673400, 61503131, 61463009)、湖南省自然科学基金(2016JJ3079)、湖南省教育厅优

2 / 锌湿法冶炼净化除钴过程建模与优化

秀青年项目(14B097)、中国博士后基金资助,中南大学博士后科研启动项目(175616),湖南省重点建设学科和娄底市科技计划项目等项目的支持,在此,表示深深的谢意。

由于水平有限、时间仓促,书中所述难免存在不妥和错误之处,恳请读者和同仁们多多批评指正。

伍铁斌

2017年5月

目录

Contents

第1章 绪 论	(1)
1.1 常压富氧直接浸出湿法炼锌工艺简介	(1)
1.2 复杂工业过程建模与优化国内外研究现状	(3)
1.2.1 复杂工业过程建模研究现状	(3)
1.2.2 复杂工业过程优化研究现状	(7)
1.3 净化除钴过程优化研究现状	(10)
1.4 本书的主要内容	(11)
第2章 湿法炼锌净化除钴过程工艺分析及优化控制框架	(13)
2.1 砷盐除钴过程主要影响因素分析	(13)
2.1.1 砷盐除钴过程工艺指标与资源消耗指标	(13)
2.1.2 影响因素分析	(14)
2.2 砷盐除钴过程操作参数优化控制中存在的问题	(18)
2.3 砷盐净化除钴过程操作参数优化控制框架	(20)
2.4 本章小结	(22)
第3章 砷盐除钴过程数据预处理	(23)
3.1 砷盐净化除钴过程数据异常产生的原因	(23)

3.2 常用的异常数据检测方法	(24)
3.2.1 单变量异常值检测方法	(24)
3.2.2 多变量异常值检测方法	(29)
3.3 基于三滑动窗口 - 贝叶斯方法的单变量异常值在线 识别与处理	(31)
3.3.1 基于三滑动窗口 - 贝叶斯方法的异常值在线识别	(31)
3.3.2 基于三滑动窗口 - 贝叶斯方法在砷盐除钴中的应用	(38)
3.4 基于改进 PLS - T^2 椭圆图的多变量异常值识别	(39)
3.4.1 PLS 算法	(42)
3.4.2 基于改进 PLS - T^2 图的多变量异常值识别	(44)
3.5 本章小结	(49)
第4章 基于机理模型的钴离子浓度预测	(50)
4.1 砷盐除钴过程机理建模	(51)
4.1.1 砷盐除钴反应机理模型	(51)
4.1.2 基于BBNE - PSO 的多工况条件下的机理模型参数辨识	(58)
4.1.3 机理模型验证及分析	(69)
4.2 基于模糊特征加权 LSSVM 的残差补偿	(72)
4.2.1 模糊特征加权 LSSVM	(72)
4.2.2 模糊特征加权 LSSVM 关键参数优化	(74)
4.3 钴离子浓度预测模型在线更新策略	(75)
4.4 钴离子浓度预测模型仿真分析	(76)
4.5 本章小结	(79)
第5章 砷盐净化除钴过程操作参数废酸添加量优化	(80)
5.1 废酸添加量对砷盐除钴影响的机理分析	(80)

5.2	废酸添加量与评价指标 BT 的关系	(81)
5.3	废酸添加量优化	(85)
5.3.1	基于除钴化学反应机理与物料平衡的废酸添加量预设	(85)
5.3.2	基于改进的遗传算法-RBF 神经网络的 BT 预测	(95)
5.3.3	基于模糊规则的废酸添加量修正	(103)
5.4	实验结果及分析	(104)
5.5	本章小结	(105)
第 6 章	砷盐除钴过程操作参数 ORP 与砷盐添加量优化	(106)
6.1	各反应器 ORP、砷盐添加量的耦合性关系及其对除钴 的影响	(106)
6.2	基于模糊操作模式的 ORP 与砷盐添加量优化	(109)
6.2.1	操作模式模糊表述	(109)
6.2.2	操作模式匹配	(111)
6.2.3	基于直觉模糊数的操作模式等级综合评估	(112)
6.2.4	操作模式重用	(117)
6.3	基于专家规则的操作参数修正	(119)
6.4	操作模式库的在线更新与维护	(120)
6.5	实验结果及分析	(121)
6.6	本章小结	(122)
第 7 章	砷盐净化除钴过程工业验证	(124)
7.1	砷盐净化除钴优化系统的结构和主要功能	(124)
7.1.1	砷盐除钴优化系统结构简介	(124)
7.1.2	工业数据采集	(125)

4 / 锌湿法冶炼净化除钴过程建模与优化

7.1.3 砷盐除钴过程操作参数优化	(127)
7.1.4 砷盐除钴过程监测、故障诊断与报警	(127)
7.1.5 重要参数曲线与关键报表查询	(132)
7.2 工业验证结果及分析	(134)
7.3 本章小结	(142)
参考文献	(143)

第1章 绪论

锌是重要的有色金属原材料，广泛应用于置换熔炼、电镀、合金和医药工业中。锌冶炼主要分为两大类：湿法冶炼和火法冶炼。目前，湿法炼锌已成为金属锌的主要生产方法，世界上80%以上的锌采用该工艺。矿产资源的日益贫乏和环境保护的紧迫性，对锌湿法冶炼的资源消耗、环境污染提出了更高的要求。因此，在企业现有的设备和生产流程前提下，通过优化与控制，降低资源消耗和环境污染、提高产品质量，具有重要的意义。

1.1 常压富氧直接浸出湿法炼锌工艺简介

OUTOTEC(原奥托昆普)研发的常压富氧直接浸出炼锌工艺，是目前世界上先进的锌冶炼新工艺，主要由磨矿、浸出、净化、电解等工序组成，其工艺流程如图1-1所示，具有锌浸出率高、渣量少、安全性高和污染小等优点。

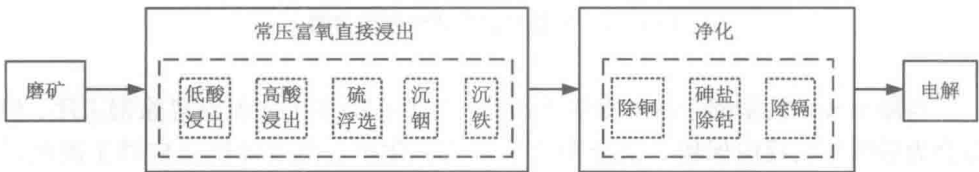


图1-1 直接浸出炼锌工艺流程图

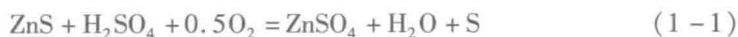
1) 磨矿

锌精矿难以直接溶于硫酸溶液，使锌元素从矿石中分离开来，需要将锌精矿磨碎和浆化，分离难以利用的脉石，磨矿也是一个机械活化的过程，磨细后的精矿产不仅增加了比表面积，而且提高了化学反应活性，有利于精矿浸出。

2) 直接浸出

浸出的目的是使锌精矿中的锌和其他有价金属物质尽可能地溶解。

浸出的主反应为



通过向锌精矿浆中加入电解后的废酸和氧气,在高温、常压条件下,使矿浆中的锌元素和硫元素以锌离子和硫单质的形式分离出来。浸出工段主要包括低酸和高酸浸出、硫浮选、沉钢、沉铁等工序,该工艺中产生的主要副产品是硫精矿、稀有金属钢和针铁矿,浸出后的中性上清液进入净化工段。

3) 净化

在直接浸出过程中,虽然大部分杂质水解沉淀,但浸出液中不可避免地含有 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Ge^{2+} 等对锌电解有害的杂质金属离子^[1-5]。因此,必须将杂质离子浓度降低至工艺要求,净化工段主要分为除铜、砷盐净化除钴和流态化反应器除镉三个工序,如图1-2所示。

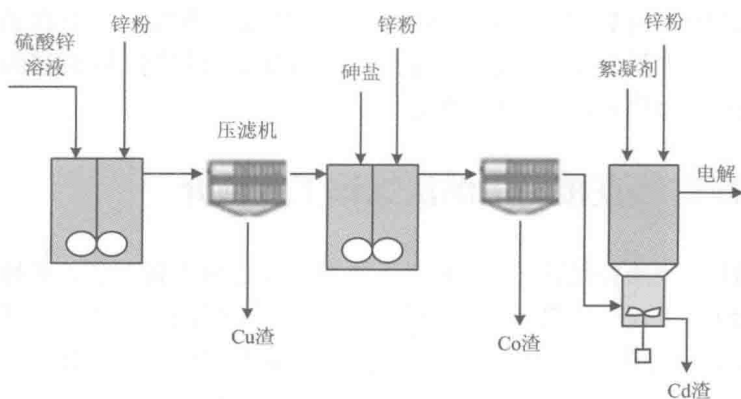
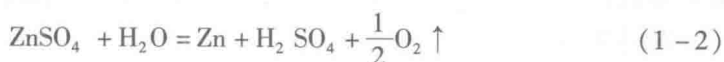


图1-2 砷盐净化工艺流程示意图

当浸出液中的铜离子浓度含量太高时,需要在除钴工序前设置除铜工序,但是会为后续除钴反应保留一部分铜离子作为活化剂。由于除铜反应器工况波动大,造成除铜过程优化困难,导致出口铜离子浓度波动很大,对后续的除钴工序带来了不利影响。除铜后的溶液(简称“除铜后液”)经过浓密机后进入第一个除钴反应器。

4) 电解

净化后的硫酸锌溶液,进入电解工段,电解工段使溶液中的锌离子在电极阴极板处以锌单质析出沉积。主要反应如下式所示:



电解过程中产生大量废酸,大部分加入浸出工段的低酸和高酸浸出工序,少量废酸加入砷盐净化除钴工序,用于抑制溶液的碱式硫酸锌的大量生成,提高了资源的利用率。

电解工序是锌湿法冶炼中最主要的能耗过程,若要有效降低电能的消耗,就需要硫酸锌新液中的杂质含量降到工艺要求,因此,净化工段是电解前极为关键的工序。

1.2 复杂工业过程建模与优化国内外研究现状

1.2.1 复杂工业过程建模研究现状

我国复杂工业过程普遍存在能耗和物耗高的缺点,对工业过程进行优化控制可以有效降低生产的资源消耗,从而降低生产成本;而建立反映操作参数与生产指标间的高品质关系模型是优化控制的必要步骤。常用的模型主要分为基于机理的白箱模型、基于数据的黑箱模型和混合灰箱模型三大类。

1) 基于机理的白箱模型

机理模型是在工艺机理分析的基础上,对过程进行一些合理假设,依据物料平衡、能量平衡和反应动力学建立对象的数学模型^[6],具有较高的准确性及较好的泛化能力。三氯化铁溶液浸取锌精矿提取锌是多相反应过程,王应虎^[7]实验研究了不同的温度、三氯化铁浓度和矿粉粒度下的浸出率与时间关系,在此基础上建立了三氯化铁在固相产物层的扩散与收缩未反应芯表面反应的动力学机理模型,并利用高斯-牛顿法辨识得到模型中的参数,仿真证明机理模型计算值与实际值基本吻合。硫化锌精矿加压浸出是一种新的工艺,具有锌回收率高和环保等优点,Baldwin S A 等^[8]研究了锌精矿中浸出中氧气溶解度、蒸汽压、溶液的温度等因素对浸出的影响,建立了基于动力学的硫化锌精矿加压浸出的机理模型,仿真证明了该模型能较准确地描述加压浸出过程。锌湿法冶炼硫酸锌溶液净化除铜过程中,通过添加锌粉和返回底流品种,经过一系列复杂的化学反应将铜离子除至目标值;张斌等^[9]深入研究了净化除铜过程的化学反应机理,建立了除铜反应过程中的竞争反应动力学系统模型。在该系统模型中,主要分为两部分,一部分是受表面反应控制的一阶方程描述的铜单质沉淀过程,另一部分是基于非催化的液固反应的收缩核模型描述的氧化亚铜沉淀过程。在该系统模型中,有几个未知的动力学参数随着过程的工况条件的变化而改变,故先对工况进行自适应分类,然后采用微粒群算法辨识不同工况下的参数;三组不同的工业数据仿真结果证明了竞争反应动力学模型的有效性。硫酸锌溶液中的钴离子对硫酸锌溶液电解有

害;王凌云等^[10]研究了锌粉铈盐净化除钴过程反应动力学,建立了基于物料平衡与化学反应机理的时滞微分方程。Polcaro A M 等^[11]研究了有铜离子和铈离子存在的情况下,添加锌粉置换除钴的机理,并建立了机理模型,该模型揭示了不同离子浓度和搅拌速率对置换除钴的影响。钴元素广泛应用于航空航天等尖端领域,Safarzadeh M S 等^[12]研究了从硫酸锌溶液净化后的钴渣中提取钴元素的浸出过程,建立了过程的动力学模型,能为过程的优化提供指导。硫酸锌溶液电解过程为溶液中锌离子放电析出的电化学反应过程;Bryson A W 等^[13]研究了电流密度、酸锌浓度对电锌的质量与产量的影响,建立了基于反应动力学、物料与能量守恒的锌电解过程机理模型,Scott 对该机理模型进行了完善^[14];公衍海等^[15]在 Scott 等研究的锌电解机理模型基础上,采用最小二乘法对传质系数、氢析出的标准速率常数进行了估计,从而得到了锌电解过程的能耗模型,然后融入了酸锌浓度的物料动态平衡模型,建立了锌电解过程的动态模型,仿真证明了模型的准确性。

机理建模在化工^[16-17]、钢铁冶炼^[18]和污水处理^[19]等复杂工业过程也得到了广泛应用。但是大多数复杂工业过程,具有高度非线性以及时变等特征,建立过程准确的非线性动态机理模型比较困难,虽然机理模型(或数学模型)能够在某范围具有一定的通用性及准确性,但是机理模型是对现实对象简化、理想的产物,其精度一般不高,这也使得基于数据的建模方法得到了发展。

(2) 基于数据的黑箱模型

复杂工业过程普遍采用 DCS 系统,积累的大量工业数据为基于数据的建模方法提供了前提条件。近年来,大量学者研究了基于数据的智能建模方法,并取得了一些理论和应用成果。下面主要阐述基于主元分析(Principal Component Analysis, PCA)、神经网络和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的数据建模方法。

球磨机在冶金等工业过程中应用广泛,磨机负荷的准确判断是实现磨矿过程优化的前提,实际生产中,主要根据振声或功率等判别,人工判断存在主观性和不精确性,因此,需要建立准确的磨机负荷的软测量模型。Tang J 等^[20]针对磨矿过程的时变性提出了一种改进的在线 PCA 建模方法,该方法采用近似相关性条件检测并选择样本,提出了一种递归算法,根据选择的样本自动更新 PCA 模型,球磨机负荷仿真结果表明,提出的在线 PCA 建模方法具有速度快和精度高的优点。

基于神经网络的建模方法是数据建模中应用最多的方法之一。N. Prakash 等^[22]建立了工业废水在不同的初始铜离子浓度、酸碱度、温度条件下,锯末对铜离子的吸附效率的递归 Elman 神经网络关系模型,该模型采用了带动量因子的 BP 算法训练 Elman 神经网络,模型的精度和泛化能力得到了明显提高,模型的预

测值与实验值非常接近^[22]。Erkan Sahinkaya 在文献[23]的研究基础上,将具有 $\tan - \text{sigmold}$ 函数的隐含层和输出层的神经网络应用于富锌废水处理过程的建模,建立了入口溶液 pH、硫酸盐和锌的浓度、化学需氧量、操作时间等与出口溶液中锌的浓度、硫酸盐浓度的关系模型,实验结果表明,该模型较为真实地反映了实际过程的特点^[24]。神经网络在冶金、化工等工业过程也得到了应用,文献[25]针对炼铜转炉中炉渣重量与成分受铜硫成分、熔剂等多个因素影响的问题,先采用小波方法提取样本数据的特征,在此基础上建立了小波神经网络预测模型,仿真结果表明,该模型的预报误差为 3.1%,满足应用的要求。文献[26]针对锌电解过程参数关系具有强非线性、耦合特点,建立了基于模糊神经网络电流密度、电流效率与酸锌比关系模型,模型训练过程中,先通过聚类方法得到神经网络初始值,再采用模糊逻辑启发式算法训练神经网络,加速了收敛速度,仿真证明了该关系模型的可靠性。

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)泛化能力强,广泛应用于复杂工业过程的建模。Qiao J 等^[28]针对生料预分解过程中生料分解率与输出分解炉出口的温度等有强非线性和耦合关系,并且随着运行条件发生变化,难以建立其精确的数学模型的问题,首先剔除了异常数据样本,然后针对过程的动态特性,提出了一种固定记忆的 PCA 方法提取样本数据的有效信息,并将其与 LSSVM 结合起来,不仅降低了 LSSVM 结构的复杂性,而且提高了 LSSVM 的训练速度。提出的改进 LSSVM 预测模型成功地应用于企业生产,生产数据表明,该模型的预测精度高,对生产过程的操作参数的设定起到了重要的指导作用。针对再生铜熔炼过程中铜成分人工化验大时滞的问题,张宏伟等^[29]深入分析了再生铜样品彩色图像的 RGB 颜色空间、色调和颜色向量角等颜色特征与铜成分的关系,建立了根据铜样品图像特征软测量铜成分的 LSSVM 软测量模型,该模型实时性好,精度满足了工程要求,为铜成分测量提供了一种新的方法。文献[30]针对铝土矿矿物浮选过程中回收率难以在线检测的问题,研究了浮选过程的泡沫图像红色分量、泡沫尺寸、破碎率与回收率的关系,首先提取泡沫图像的特征参数,然后建立了基于 LSSVM 的图像特征参数与回收率的关系模型,工业数据仿真结果表明,该模型可以有效预测回收率。文献[31]针对铈盐除钴过程钴离子浓度化验大时滞问题,建立了净化后溶液的钴离子浓度预测模型;为提高模型的精度,先采用聚类方法将样本进行分类,然后对各类分别建立支持向量机子模型,预测模型的输出为各支持向量机模型的加权输出。生产数据仿真证明该模型具有精度高、泛化性能好的优点。文献[32]针对间歇式反应器的过程的强非线性和工艺指标无法在线检测的特点,利用 KPCA 提取间歇反应过程的非线性特征,将提取的主成分作为 LSSVM 的输入,建立了融合 MKPCA 和 LSSVM 的工艺指标预测模型,揭示了 SBR 间歇过程的条件参数、操作参数和最终出水的 COD 之间的非线性关系。

MKPCA - LSSVM的预测精度和扩展性高于单一的 LSSVM 模型。

另外还有 PLS^[33]、灰色模型^[34]等数据建模方法。虽然基于数据驱动的黑箱模型在样本数据范围内能满足一定的预测精度要求,但是当过程生产条件发生变化时,模型的泛化能力将急剧降低。

将机理建模和数据建模结合起来,充分发挥两者的优势,在满足趋势跟踪准确的基础上,能提高模型的精确性和实用性。

(3)混合灰箱模型

基于机理与数据的混合建模,在工业领域得到了充分的验证,典型的混合模型有并联、串联两种形式^[35-36]。

并联形式即基于数据的模型作为机理模型的残差补偿模型或两者通过某种规则融合起来。冰铜品位是铜闪速熔炼过程中的关键工艺指标,文献[37]首先建立了多相、多组分的冰铜品位的机理模型;由于闪速熔炼过程时滞大、非线性强等复杂特点,机理模型难以精确地描述过程特点,因此,利用生产数据建立了模糊神经网络模型,为提高神经网络参数学习效率,提出了一种受约束梯度下降算法。根据实际生产条件的特点,采用模糊逻辑智能协调器,将机理模型与模糊神经网络模型有机融合起来,工业数据仿真表明,智能融合模型的精度高于单一模型的预测精度,能为过程的优化提供指导。文献[38]针对锑盐净化除钴过程化学反应复杂、关键工艺指标钴离子检测大滞后,导致锌粉优化困难的问题,深入分析了置换除钴反应机理,建立了基于反应动力学的机理模型,由于机理模型对净化过程做了简化,导致模型预测精度低,然后建立了基于最小二乘支持向量机的钴离子浓度预测方法,再对两个预测模型进行智能协调输出。仿真证明了基于机理模型与最小二乘支持向量机的混合模型具有很高的精度,能为锌粉优化提供依据。

串联形式即用数据驱动方法辨识机理模型中未知非线性参数。文献[39]针对现有层流冷却过程带钢温度模型的换热系数、带钢定位、带钢卷取温度计算不准确的问题,提出了由冷却单元阀门开闭状态模型、带钢冷却单元定位模型、不同换热方式下的带钢温度模型组成的带钢卷取温度动态模型,针对动态模型中的参数非线性强,并随工况的变化而改变的复杂特点,将案例推理与神经网络方法相结合,提出了规则与数据驱动的动态模型参数智能辨识方法;并采用某钢厂生产数据进行了实验研究,实验结果表明提出的方法能够有效提高带钢卷取温度模型的精度。

生产过程的准确建模,能为过程的优化提供指导和依据;然而任何预测模型都存在局限性,针对具体的工业过程,必须结合该过程特点,建立能准确反映条件参数、操作参数和工艺指标的关系模型;而混合灰箱模型即能反映过程的特点,又具有较高的精度,将是复杂工业过程建模的重要发展方向。

1.2.2 复杂工业过程优化研究现状

复杂工业过程具有反应机理复杂、原料成分波动大、时滞大、耦合性强和环境恶劣等问题。针对复杂工业过程的难点问题,大量学者进行了深入的研究,力求在现有设备、原料和工艺流程不变的情况下,通过对过程操作参数的优化,提高产品的合格率、降低过程的资源消耗。复杂工业过程操作参数优化主要有基于机理模型(精确数学模型)和基于非机理模型的优化方法两大类。

(1) 基于机理模型的操作参数优化

基于机理模型的操作参数优化可简单描述为:在满足过程机理模型和工艺参数约束的基础上,求解一组操作参数,使得产品质量最好、产量最高和资源消耗最少。转炉吹炼是火法炼铜的重要工序^[40],文献[41]在 Brinkly - Newton - Raphson 方法的基础上提出了后藤模型,计算转炉熔炼过程的铇、气和渣的化学平衡,并应用于佐贺关冶炼厂的转炉熔铇吹炼过程。文献[42]在后藤模型的基础上,建立了动态计算模型模拟闪速炉造铇过程,实现了该过程的操作参数优化。文献[43]针对氧化铝蒸发过程生蒸汽、能源消耗过高的问题,首先建立了基于物料平衡、热平衡的蒸发过程的数学模型,并将其转化为一个约束优化问题,考虑到蒸发过程包含大量的等式约束和不等式约束,提出了一种基于鲁棒函数和谷跳跃修正法的约束处理方法,然后采用涡旋粒子群算法求解蒸发过程的操作参数,得到了最优化的流量、生蒸汽量等操作参数,生产应用结果证明采用提出的方法可以有效降低生蒸汽的消耗。针对锌电解过程电能消耗大的问题,文献[44]研究了电解过程中酸锌比、温度等参数对电解的影响,建立了电解过程的能耗机理模型,在此基础上构建了以电耗及电费最低为目标的多目标、非线性和多约束的综合优化模型,并采用神经网络智能优化方法求解最优的操作参数,工业运行结果表明,该系统将电解直流电耗降到国际先进水平 $3011.6 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$,应用效果显著。碳酸化分解过程是烧结法氧化铝生产过程中的重要工序,具有多变量、大滞后和非线性等特点,在对碳酸化分解过程进行深入研究的基础上,建立该过程的关联 CSTR 模型,并进一步推导出该过程的多重关联时滞非线性状态空间模型,然后在此基础上提出基于 T-S 模糊模型鲁棒 H_∞ 状态反馈跟踪优化控制方法,并仿真验证该方法的有效性^[45]。文献[46]深入研究了铝电解生产机理,分析了各工艺参数和操作参数的影响,建立了基于铝电解机理的以单位能耗最小为目的的多目标优化模型,并采用改进的差分进化算法求解最优化的操作参数,仿真结果表明,电耗降低了 1.75%。电熔镁砂生产过程具有强非线性、反应机理复杂等特点,文献[47]深入研究了该过程热传导和反应机理的特点,建立了电熔镁炉的与熔炼电流相关的三维非稳态温度场,并在分析电熔镁砂品位与熔炼温度关系的基