

烧结过程数学模型与人工智能

Mathematical Model and Artificial Intelligence of Sintering Process

范晓慧 王海东 著

Fan Xiaohui Wang Haidong



中南大学出版社
Central South University Press

本书得到国家自然科学基金和高校骨干教师资助项目资助

Mathematical Model and Artificial Intelligence of Sintering Process

烧结过程数学模型 与人工智能

阮晓慧 王海东 著

中南大学出版社
Central South University Press

图书在版编目(CIP)数据

烧结过程数学模型与人工智能/范晓慧 王海东著. —长沙:
中南大学出版社, 2002. 7

ISBN 7-81061-525-4

I. 烧... II. 范... III. 人工智能—应用—烧结
过程—数学模型 IV. TF046. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 055029 号

烧结过程数学模型与人工智能

范晓慧 王海东 著

☐责任编辑 邓立荣

☐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

电子邮件:csucbs @ public. cs. hn. cn

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 长沙环境保护学校印刷厂

☐开 本 850×1168 1/32 ☐印张 8.5 ☐字数 216 千字

☐版 次 2002 年 7 月第 1 版 ☐2002 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-525-4/TF·016

☐定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换



作者简介

范晓慧，女，1969年3月出生于河北省昌黎县。1987年考入中南大学（原中南工业大学）学习，1996年获该校工学博士学位，毕业后留校任教。1997年9月破格晋升为副教授。主要研究领域为：钢铁冶金数学模型与人工智能，铁矿石造块与直接还原，钢铁新材料与新工艺等。获省部级科技进步奖2项，部级发明奖1项，发表论文50余篇。曾获国家自然科学基金和高校骨干教师资助项目资助，被列为跨世纪学术带头人培养对象。

序

作为钢铁大国,我国钢铁工业的自动化水平目前还比较低,即便在国家重点和地方骨干企业中,基础自动化尚不足 20%,过程自动化只占 14%,管理自动化则处于初始阶段。因此,尽快提高钢铁企业的自动化水平以提高企业的竞争力,是由钢铁大国走向钢铁强国的必由之路。

铁矿石烧结是钢铁工业的基础,烧结矿质量的好坏直接影响高炉生产的质量。随着烧结设备大型化和高炉对烧结矿质量要求的提高,烧结过程计算机控制技术的成效日益显著。因此,提高烧结过程计算机控制的水平已成为烧结技术发展的主要方向之一。

20 世纪 80 年代以来,我国各大、中型烧结厂装备了集散型控制系统。但由于系统软件研究与开发的严重滞后,我国烧结过程控制水平与国际先进水平相比还存在很大的差距。为此,本书作者从 90 年代初就开始进行烧结过程数学模型和人工智能方面的研究工作,综合运用烧结理论、计算机科学、现代控制理论和人工智能理论等多学科知识,对烧结过程及其控制的机理和方法进行了深入的

研究,开发了多功能的烧结过程控制人工智能系统,已取得显著成效。

《烧结过程数学模型与人工智能》一书正是作者在总结多年研究成果的基础上撰写而成的。作者根据烧结过程的特征和控制特点,详细论述了烧结过程数学模型、烧结专家系统、烧结人工神经网络和烧结过程模糊控制的开发理论和开发方法,并重点研究了烧结矿化学成分的控制、烧结过程透气性状态的控制、烧结过程热状态的控制、烧结过程的工况识别和异常状况的诊断等系统的设计与开发。这些研究成果具有重要的理论意义和广阔的应用前景。该书反映了这一领域的最新研究成果和水平,是目前惟一一本如此系统、全面、深入地介绍烧结过程计算机控制的专著。此书的出版将对提高烧结过程控制水平,进一步进行烧结过程自动控制的研究与开发作出贡献。

中国工程设计大师

唐先觉

2002年4月于长沙

前 言

烧结生产在我国钢铁企业中有着重要的地位。随着市场经济体制在我国的确立和发展,集约化经营思想的提出和规模经济等原则的被确认,意味着炼铁原料工业经济的增长必须建立在提高劳动生产率和降低消耗的基础上,其意义对于我国的烧结生产自动化而言,显得尤为重要。烧结过程计算机控制的目的是为了_{提高劳动生产率,实现优质高产和降低能源消耗。随着烧结设备的大型化和高炉对烧结矿质量要求的提高,烧结过程计算机控制技术的成效日益显著。正因如此,提高烧结过程计算机控制水平已成为烧结技术发展的主要方向之一。}

国外 20 世纪 60 年代初期就开始在烧结生产过程中采用计算机控制,70 年代后期开始装备集散型计算机控制系统。我国也于 80 年代初开始在各大、中型烧结厂应用集散型控制系统。当计算机控制的硬件系统确定之后,自动控制的技术水平则主要取决于应用软件系统的研究与开发。

烧结过程控制按控制的方法,可分为基于数学模型的控制和基于人工智能原理的控制两类。由于数学模型难以描述机理复杂的烧结过程,进入 20 世纪 80 年代,日本等钢铁工业发达的国家开始大力开发基于人工智能原理的烧结生产过程控制系统,并取得了显著的效果,在硬件系统和软件系统两方面均达到了三级控制水平。我国烧结过程数学模型的研究始于 80 年代,而将人工智能

原理应用于烧结过程控制的研究则刚刚起步。目前我国的烧结过程控制还处于一级定值控制阶段,与国际先进水平存在很大的差距。

为了尽快提高我国烧结生产过程计算机控制水平,在国家“八五”重点攻关项目、国家自然科学基金、高校骨干教师资助项目的资助以及宝钢、武钢、鞍钢企业的支持下,作者从1991年起进行了烧结过程控制数学模型和人工智能方面的研究和开发工作,所研究开发的系统用于烧结过程,取得了比较满意的效果。为了推进烧结过程数学模型和人工智能在我国的科学研究和实际应用,作者总结自己从事这项研究工作的体会和已取得的部分成果,结合培养研究生的经验,并参阅国内外有关文献撰写了此书。

本书根据烧结过程的特点,论述了烧结过程的控制方法和控制方案,并重点研究了烧结过程数学模型、烧结专家系统、烧结人工神经网络和烧结过程模糊控制的开发理论和开发方法,提出了简化的黑板系统结构、通用的复杂过程多级目标推理机模型、有限广度优先搜索策略等;根据烧结过程控制的目标和特点,分别进行了烧结矿化学成分控制、烧结过程透气性状态控制、烧结过程热状态控制、烧结过程工况识别和异常状况诊断等的研究和开发,提出区间优化控制策略、透气性中心控制策略和预报控制策略等,具有较强的理论意义和应用价值。

作者自攻读硕士和博士学位开始,在导师陈荃教授和黄天正教授的指导下,进行烧结过程数学模型和人工智能的研究,留校任教后又得到邱冠周教授和姜涛教授的指导和关心,继续从事这方面的研究工作。中国工程设计大师唐先觉教授在百忙之中审阅书

稿并撰写了序言。藉此书出版之际,作者向这些专家表示衷心的感谢。研究生李桃、陈许玲、姜波、申炳昕、郑耀东、刘代飞等协助作者做了大量工作,作者深表谢意,并向多年关心和支持作者的同事们表示诚挚的谢意。

鉴于作者的水平和时间所限,书中疏漏之处在所难免,恳请专家学者指正。

作 者

2002年3月于长沙

目 录

1 烧结过程的特征和控制方案	(1)
1.1 烧结技术的发展	(1)
1.2 烧结过程的特征	(2)
1.3 烧结过程控制方案	(6)
1.3.1 烧结过程的控制方法	(6)
1.3.2 烧结过程的控制方案	(7)
参考文献	(7)
2 烧结过程检测和自动控制	(9)
2.1 烧结过程计算机控制现状	(9)
2.1.1 国外研究的现状与发展	(9)
2.1.2 国内研究的现状与发展	(12)
2.2 烧结过程在线信息的实时采集	(13)
2.2.1 烧结过程人工智能控制系统的在线实时要求	(13)
2.2.2 烧结过程的信息分类与采集	(14)
2.2.3 数据的预处理	(17)
2.3 烧结过程检测和自动控制	(19)
2.3.1 原料准备系统	(19)
2.3.2 配料系统	(20)
2.3.3 混合系统	(20)

2.3.4	烧结系统	(23)
2.3.5	冷却系统	(26)
2.3.6	成品管理系统	(27)
2.3.7	余热回收及主排气系统	(27)
2.3.8	除尘和水处理系统	(27)
参考文献		(28)
3	烧结过程数学模型	(30)
3.1	数学模型基础	(30)
3.1.1	数学模型及其分类	(30)
3.1.2	数学模型的作用	(32)
3.1.3	建模的步骤	(33)
3.2	数学模型的建立方法	(34)
3.2.1	机理分析法	(34)
3.2.2	数据分析法	(34)
3.2.3	综合分析法	(41)
3.3	数学模型在烧结过程中的应用	(42)
3.3.1	过程模拟模型	(42)
3.3.2	参数优化模型	(43)
3.3.3	过程控制模型	(45)
3.3.4	新工艺开发模型	(45)
参考文献		(46)
4	烧结过程人工智能	(50)
4.1	人工智能概述	(50)
4.1.1	专家系统	(51)
4.1.2	人工神经网络	(52)

4.1.3 模糊控制	(53)
4.2 人工智能技术在烧结过程中的应用现状	(54)
4.2.1 国外研究与应用的现状	(55)
4.2.2 国内研究与应用的现状	(57)
4.3 烧结过程专家系统	(58)
4.3.1 专家系统基础	(58)
4.3.2 专家系统的总体结构	(61)
4.3.3 知识表示与知识库组织	(65)
4.3.4 推理机	(80)
4.3.5 知识库的管理	(88)
4.3.6 学习机理	(89)
4.3.7 软件开发方法	(92)
4.3.8 专家系统的开发工具	(94)
4.4 烧结过程人工神经网络	(105)
4.4.1 人工神经网络基本原理	(105)
4.4.2 基于神经网络的专家系统	(108)
4.4.3 基于神经网络的系统辨识	(110)
4.4.4 用 VC++ 实现人工神经网络技术	(114)
4.5 烧结过程模糊理论	(118)
4.5.1 模糊综合评判	(118)
4.5.2 模糊控制	(124)
参考文献	(128)
5 烧结矿化学成分的控制	(134)
5.1 配料控制系统	(134)
5.1.1 配料自动控制系统	(134)
5.1.2 配料模糊控制系统	(136)

5.2 烧结矿化学成分的预报模型	(138)
5.2.1 基于时间序列的预报模型	(138)
5.2.2 基于神经网络的预报模型	(153)
5.2.3 基于灰色系统的预报模型	(167)
5.2.4 基于物料平衡的预报模型	(167)
5.3 烧结矿化学成分的控制	(170)
5.3.1 烧结矿化学成分的闭环控制系统	(170)
5.3.2 烧结矿化学成分控制专家系统	(171)
参考文献	(177)
6 烧结过程透气性状态的控制	(179)
6.1 原始料层透气性的控制	(179)
6.2 烧结过程透气性的控制	(181)
6.2.1 烧结过程操作指导系统	(181)
6.2.2 以透气性为中心的烧结过程状态控制专家系统	(185)
6.3 返矿控制	(196)
参考文献	(199)
7 烧结过程热状态的控制	(202)
7.1 烧结过程热状态的判断	(202)
7.1.1 烧结终点的判断	(202)
7.1.2 烧结废气温度上升点的计算	(206)
7.1.3 烧结过程热状态的识别	(207)
7.2 烧结终点的预报	(209)
7.2.1 预报参数的确定	(209)
7.2.2 基于时间序列模型的烧结终点预报	(210)

7.2.3 基于人工神经网络的烧结终点预报	(211)
7.2.4 基于专家经验规则的烧结终点预报	(213)
7.3 烧结过程热状态的控制	(214)
7.3.1 基于烧结废气温度上升点的热状态控制	(214)
7.3.2 基于烧结终点的热状态控制	(217)
7.3.3 基于烧结能耗的热状态控制	(232)
参考文献	(235)
8 烧结过程工况识别和异常状况诊断	(238)
8.1 烧结过程工况识别	(238)
8.1.1 烧结过程工况识别方法	(238)
8.1.2 烧结过程工况识别模型的建立	(240)
8.1.3 烧结过程工况的专家综合评判	(245)
8.2 烧结过程异常状况诊断	(246)
8.2.1 烧结过程异常状况诊断的问题描述	(246)
8.2.2 烧结过程异常状况的模糊诊断策略	(249)
参考文献	(250)

Contents

1 Characteristics and Control Schemes of Sintering Process	
.....	(1)
1.1 Development of Sintering Technology	(1)
1.2 Characteristics of Sintering Process	(2)
1.3 Control Schemes of Sintering Process	(6)
References	(7)
2 Detection and Automatic Control of Sintering Process	
.....	(9)
2.1 Present Situation of Computer Control for Sintering Process	
.....	(9)
2.2 Acquisition of Sintering Real-time Information	(13)
2.3 Detection and Automatic Control of Sintering Process	
.....	(19)
References	(28)
3 Mathematical Models of Sintering Process	(30)
3.1 Basement of Sintering Mathematical Models	(30)
3.2 Methods for Building Mathematical Models	(34)
3.3 Application of Mathematical Models in Sintering Process	
.....	(42)
References	(46)
4 Artificial Intelligence of Sintering Process	(50)
4.1 Brief Summary of Artificial Intelligence	(50)

4.2	Application of Artificial Intelligence in Sintering Process	(54)
4.3	Expert System of Sintering Process	(58)
4.4	Artificial Neural Networks of Sintering Process	(105)
4.5	Fuzzy Theory of Sintering Process	(118)
	References	(128)
5	Sinter Chemical Composition Control	(134)
5.1	Control System of Proportioning	(134)
5.2	Predictive Models of Sinter Chemical Composition	(138)
5.3	Control of Sinter Chemical Composition	(170)
	References	(177)
6	Sintering Permeability State Control	(179)
6.1	Control of Pre-ignition Bed Permeability	(179)
6.2	Control of Sintering Permeability	(181)
6.3	Control of Sinter Returns	(196)
	References	(199)
7	Sintering Thermal State Control	(202)
7.1	Judgement of Sintering Thermal State	(202)
7.2	Prediction of Sintering Burn Through Point	(209)
7.3	Control of Sintering Thermal State	(214)
	References	(235)
8	Recognition of Sintering Operation Mode and	
	Diagnosis of Sintering Abnormality	(238)
8.1	Recognition of Sintering Operation Mode	(238)
8.2	Diagnosis of Sintering Abnormality	(246)
	References	(250)

1 烧结过程的特征和控制方案

1.1 烧结技术的发展^[1~9]

烧结(Sintering)是将粉状物料(如粉矿和精矿)进行高温加热,在不完全熔化的条件下烧结成块的方法。烧结所得产品为外形不规则多孔状的烧结矿。

在黑色冶金中,造块尤其是烧结和球团两大方法,对促进国内外钢铁工业的发展起着举足轻重的作用。自 20 世纪 70 年代中期以来,除北美外,烧结矿一直是国内外高炉的主要原料。尤其在我国,烧结矿已占高炉炉料的 90% 以上,因此,烧结生产在我国钢铁企业中有着更重要的地位。高炉生产论其指标,七分在精料,三分在操作。对钢铁厂内部来说,讲七分在精料,就是七分在烧结。

目前,钢铁企业的竞争日益激烈,高炉炼铁生产技术经济指标的改善和技术进步,主要是依靠入炉原料性质的改善。我国炼铁界将高炉精料的要求概括为“高、熟、净、匀、小、稳”六个字,其含义是铁矿石入炉品位高,使用烧结矿或球团矿等熟料,尽可能筛除小于 5 mm 的细粉,粒度均匀、粒度小,化学成分稳定。烧结矿是我国高炉炉料的主要组成部分,可以说,我国钢铁工业的发展在很大程度上与烧结矿的用量和质量紧密相关,所以必须保证在高炉用料中有足够的烧结矿用量和良好的烧结矿质量。随着市场经济体制在我国的确立和发展,集约化经营思想的提出和规模经济等原则的被确认,特别是加入 WTO 组织,参与到国际市场竞争之