

铁矿造块数学模型 与专家系统

Mathematical Models and Expert Systems of
Iron Ore Agglomeration

范晓慧 著



科学出版社

013045452

TF5
07

铁矿造块数学模型与专家系统

Mathematical Models and Expert Systems of Iron Ore Agglomeration

范晓慧 著



国家自然科学基金(编号:51174253,59474005,50374080)和
教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0630)项目资助

科学出版社

北京



北航

C1653892

TF5
07

35724013

内 容 简 介

本书是作者在 20 多年从事铁矿造块数学模型和专家系统研究的基础上撰写而成的。本书共三篇:第一篇为烧结过程数学模型与专家系统,介绍了烧结矿化学成分、烧结过程状态和烧结过程异常诊断的软测量模型、预报模型和控制专家系统;第二篇为球团生产过程数学模型与专家系统,介绍了链篦机干燥、预热和回转窑焙烧过程的模拟模型,以及链篦机-回转窑优化控制专家系统;第三篇为系统开发与应用,介绍了烧结、球团过程优化控制系统的软件开发和在实际生产中的应用。

本书可供高校钢铁冶金、烧结球团和矿物加工专业的师生和从事相关专业的科研、设计、生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁矿造块数学模型与专家系统 = Mathematical Models and Expert Systems of Iron Ore Agglomeration / 范晓慧著. — 北京:科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-036650-4

I. ①铁… II. ①范… III. ①铁矿物-造块-数学模型②铁矿物-造块-专家系统 IV. ①TF5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 022391 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:彭 涛
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 5 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 244 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我国粗钢产量已连续十余年保持世界第一,有力地支撑了国民经济的快速发展。然而,钢铁生产中存在的自动控制水平低、能耗高、污染大等问题,致使我国钢铁企业竞争力不高,无法在国际竞争中立于不败之地。提高钢铁生产的自动化水平有助于节能降耗,是提高我国钢铁企业竞争力的主要途径之一。

铁矿造块是现代钢铁生产的第一道工序,其技术经济水平对钢铁工业生产具有重要影响。为提高我国铁矿造块过程的控制水平,中南大学范晓慧教授从20世纪90年代初开始从事造块数学模型和专家系统方面的研究工作,将铁矿造块理论与人工智能理论和计算机技术相结合,开发了包括烧结和球团两类造块过程的控制系统,并成功应用于国内钢铁企业。

《铁矿造块数学模型与专家系统》一书为作者多年的研究成果的总结。该书详细分析了造块过程的工艺特点,提出了实现造块过程优化控制的理论和方法。在此基础上,作者研究开发了烧结矿化学成分控制、烧结过程状态控制、烧结过程异常状况诊断、链篦机-回转窑优化控制、链篦机漏风状态诊断等系统,并详细阐述了各系统在实际生产中的应用。这是国内外第一部反映铁矿造块数学模型和专家系统最新研究成果和水平的专著,该书的出版将对提高我国造块生产过程控制水平,并推动相关领域的进一步研究作出积极贡献。



2012年10月于长沙

前 言

钢铁工业是国家的重要基础产业和国民经济的支柱产业,其发展水平已成为一个国家综合国力提升的重要标志。铁矿造块是现代钢铁冶炼的第一工序,是实现优质、高产、低耗钢铁生产的基础。目前,国内外钢铁企业普遍采用烧结和球团两类造块方法。

造块生产过程的自动化水平与其产量、质量和能耗密切相关。随着钢铁工业的快速发展,我国烧结、球团厂的自动化水平取得了长足进步,但与国际先进水平相比,还存在很大的差距。因此,提高造块过程的控制水平已成为造块技术发展的主要方向之一。

在国家自然科学基金、教育部新世纪优秀人才支持计划、高校骨干教师资助计划等项目的资助,以及宝钢、武钢、鞍钢、攀钢等企业的支持下,作者从 20 世纪 90 年代初开始从事造块过程数学模型和专家系统方面的研究工作,所开发的系统已成功应用于实际生产,取得了显著的经济效益。本书正是作者总结 20 多年的研究成果和经验而撰写的。

本书由三篇构成,第一篇为烧结过程数学模型与专家系统。根据烧结过程的特征,将其控制分为烧结矿化学成分控制、烧结过程状态控制和烧结过程异常状况诊断;针对烧结过程透气性状态和热状态难检测的问题,建立了软测量模型;建立的预报模型解决了烧结矿化学成分和烧结终点滞后时间长的问题;应用专家系统技术解决了烧结矿化学成分和烧结过程异常诊断复杂的问题。第二篇为球团生产过程数学模型与专家系统。根据链篦机球团料层的物理化学变化和回转窑焙烧的传热特点,建立了水分迁移模型、磁铁矿氧化模型、料层温度分布模型和回转窑三维温度场模型,实现了链篦机水分、氧化率和温度状态的软测量,以及回转窑气体和球团温度的透明化;依据质量、能量守恒定律,建立了链篦机-回转窑-环冷机物料、气流和热量平衡模型;根据链篦机-回转窑生产特点,建立了链篦机-回转窑生产过程优化控制和链篦机漏风状况诊断专家系统。第三篇为系统开发与应用。主要介绍了造块过程的数据采集、数据预处理及数据库的建立,阐述了系统软件的开发及其在工业生产中的应用。

本书 6.1 节和 6.2 节由王伟撰写,8.1 节、8.2 节和 9.1 节由陈许玲撰写。在

本书完稿之际,作者特别感谢中国工程院院士邱冠周教授在百忙之中审阅书稿并撰写了序,同时感谢邱冠周院士、胡岳华教授和姜涛教授多年的指导和培养,感谢同事和研究生的支持和帮助。

对书中的不足、疏漏之处,恳请各位读者批评指正。

范晓慧

2012年10月于长沙

目 录

序

前言

第 0 章 绪论	1
0.1 造块工艺发展	1
0.1.1 烧结工艺发展	2
0.1.2 球团工艺发展	3
0.2 数学模型和专家系统在造块中的应用	4
0.2.1 数学模型和专家系统基础	4
0.2.2 数学模型和专家系统在烧结生产中应用	7
0.2.3 数学模型和专家系统在球团生产中应用	9
参考文献	11

第一篇 烧结过程数学模型与专家系统

第 1 章 烧结过程特征和控制方案	21
1.1 烧结过程的特征	21
1.2 烧结过程控制方案	23
1.2.1 烧结过程的控制方法	23
1.2.2 烧结过程控制系统的总体结构	23
参考文献	25
第 2 章 烧结矿化学成分控制	26
2.1 烧结矿化学成分控制的特点	26
2.2 烧结矿化学成分预报模型	27
2.2.1 基于时间序列的预报模型	27
2.2.2 基于人工神经网络的预报模型	31
2.2.3 基于灰色系统理论的预报模型	35
2.2.4 预报模型预报准确度的评价方法	38
2.3 烧结矿化学成分控制专家系统	39

2.3.1	知识表示与知识库组织	39
2.3.2	推理机与搜索策略	45
2.3.3	烧结矿化学成分控制策略	48
	参考文献	50
第3章	烧结过程状态控制	52
3.1	烧结过程状态软测量模型	52
3.1.1	烧结料层透气性的软测量	52
3.1.2	烧结过程热状态的软测量	54
3.2	烧结过程状态预报模型	65
3.2.1	基于数学模型的状态预报	65
3.2.2	基于专家系统的状态预报	67
3.3	烧结过程状态的控制	68
3.3.1	烧结过程纵向状态控制	68
3.3.2	烧结过程横向热状态的控制	75
	参考文献	76
第4章	烧结过程异常状况诊断和能耗控制	79
4.1	烧结过程异常状况诊断	79
4.1.1	异常诊断基本原理	79
4.1.2	烧结生产异常现象分析	80
4.1.3	异常状况诊断方法	82
4.2	返矿控制	84
4.3	烧结能耗控制	86
	参考文献	87

第二篇 球团生产过程数学模型与专家系统

第5章	链篦机-回转窑球团生产过程控制方案	91
5.1	链篦机-回转窑工艺特点	91
5.2	系统结构	92
	参考文献	94
第6章	链篦机-回转窑过程模拟模型	95
6.1	链篦机干燥、预热过程模拟模型	95

6.1.1	干燥段水分分布模型	95
6.1.2	预热段磁铁矿氧化率分布模型	97
6.1.3	球团料层温度场模型	98
6.1.4	干燥、预热模拟模型计算	99
6.2	回转窑焙烧过程模拟模型	104
6.2.1	回转窑一维轴向传热模型	104
6.2.2	回转窑二维截面传热模型	107
6.2.3	焙烧模拟模型计算	109
6.3	环冷机冷却过程模拟模型	110
6.4	物料、气流和热量平衡模型	111
6.4.1	物料平衡模型	111
6.4.2	气流平衡模型	112
6.4.3	热量平衡模型	115
	参考文献	120
第7章	链篦机-回转窑优化控制专家系统	122
7.1	链篦机-回转窑生产过程控制策略	122
7.2	链篦机漏风状况的判断方法	124
7.3	知识库与推理机	126
	参考文献	127

第三篇 系统开发与应用

第8章	系统数据库与数据预处理	131
8.1	数据采集	131
8.2	数据库设计	134
8.2.1	数据库系统和编程技术	134
8.2.2	系统数据库建立	136
8.3	数据预处理	139
	参考文献	142
第9章	系统软件开发及应用	144
9.1	软件开发	144
9.1.1	软件开发工具	144

9.1.2 软件开发关键技术	145
9.2 烧结生产异常诊断子系统	158
9.3 烧结矿化学成分控制子系统	161
9.4 烧结过程状态控制子系统	163
9.5 链篦机-回转窑控制系统	167
9.6 其他辅助系统	170
9.6.1 知识库管理子系统	170
9.6.2 评估子系统	171
9.6.3 解释子系统	172
9.6.4 系统安全	172
9.7 工业应用	173
9.7.1 系统配置	173
9.7.2 应用效果	173
参考文献	182

第 0 章 绪 论

0.1 造块工艺发展

钢铁工业是国家的重要基础产业和国民经济的支柱产业,其发展水平成为一个国家综合国力提升的重要标志。在欧美等发达国家的工业化进程中,钢铁工业经历了第一次高速发展阶段,世界钢铁工业取得了巨大的进步^[1~3]。进入 21 世纪,以我国为首的发展中国家及新兴工业国家的工业化和大规模基础设施建设,使世界钢铁工业进入了第二个高速增长期,粗钢产量由 8 亿 t 左右增至 2011 年的 15.27 亿 t,其中,我国粗钢产量由 2000 年的 1.29 亿 t 增加到 2011 年的 6.96 亿 t,占世界钢产量的 45.56%^[4,5](见图 0-1)。

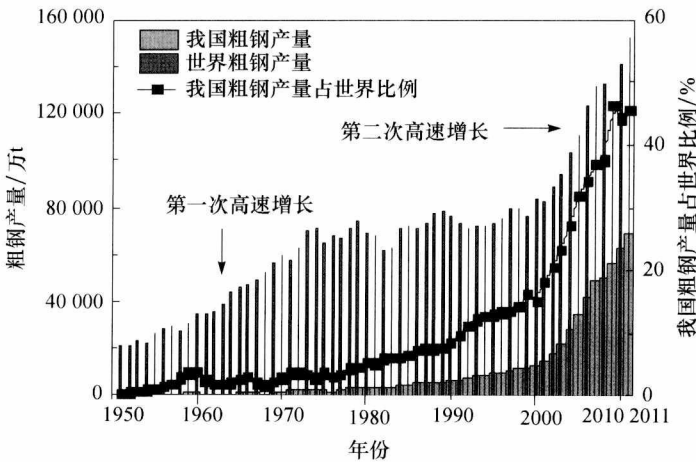


图 0-1 1950~2011 年世界和我国粗钢产量

造块是现代钢铁冶炼的第一工序,其生产的精料是实现优质、高产、低耗钢铁生产的基础,是现代钢铁联合企业中物料处理量和能源消耗仅次于炼铁的重要生产工序^[6,7]。目前国内外钢铁企业普遍采用烧结和球团两类造块方法。我国炼铁系统以烧结球团-高炉流程为主,高炉炼铁主要采用高碱度烧结矿配加球团矿或块矿的炉料结构^[8,9],烧结矿和球团矿占含铁炉料的 90%以上。2011 年我国生铁产量达到 6.3 亿 t,烧结矿产量 7.9 亿 t,球团矿产量 1.2 亿 t(见图 0-2)。

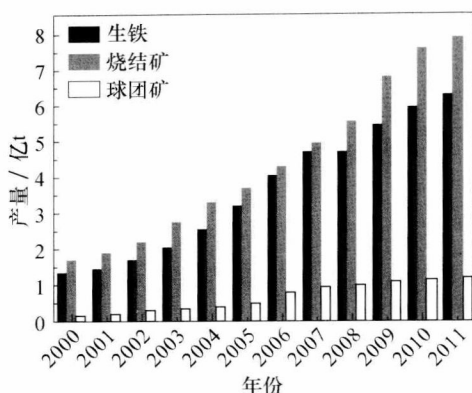


图 0-2 我国 2000~2011 年生铁、烧结矿和球团矿产量

0.1.1 烧结工艺发展

烧结法是将粉状物料(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矿的方法,所得的产品为烧结矿。在我国,烧结一直是铁矿石造块的主要方法,烧结矿已占高炉炉料的 75%以上,因此,烧结生产在我国钢铁企业中有着重要的地位,其技术进步为钢铁工业的快速发展提供了强有力的支撑。

长期以来,对烧结新技术和基础理论的研究一直为国内外冶金界所重视。进入 21 世纪,随着钢铁工业的飞速发展,烧结行业也以前所未有的速度发展,无论是烧结矿产量、质量,还是烧结工艺和技术装备,都取得了长足进步,且自动化水平也大大提高。现阶段,我国烧结生产主要呈现以下特点^[10,11]。

1. 烧结设备大型化

我国在烧结机大型化方面已取得长足进步,单机面积也从新中国成立初期的 50m² 发展到了现在的 660m²,规定新建烧结机使用面积大于等于 180m²。我国现已能够自主设计、制造具有国际先进水平的 300~660m² 级的大型烧结机。目前,我国已投产和在建单台面积 180~660m² 的大中型烧结机 163 台,总面积达 49350m²。其中有 80 台 300~660m² 大型烧结机,面积达 31066m²,平均单机面积 388m²。我国烧结机设备大型化以后,生产量增大,平均能耗降低,而且设备的维修、管理费用也大大降低,生产效益明显增加,是烧结生产“降本增效”的有效途径之一。

2. 烧结工艺技术不断进步

我国在烧结工艺和新技术的研究开发和应用方面取得了巨大的进步。烧结工艺方面有混合料强化制粒、偏析布料、冷却筛分、整粒技术及铺底料技术等;新技术

主要表现为球团烧结技术、低温烧结技术、低硅烧结技术等。我国烧结机的日作业率和劳动生产率逐年稳步提升,烧结矿强度和合格率越来越高,固体燃料消耗和工序能耗逐年下降,烧结机利用系数和碱度趋于稳定。经过近十年的发展,我国不仅在烧结产量上遥遥领先其他国家,而且一批重点大中型企业的技术经济指标也跨入世界先进行列。

3. 清洁生产水平不断提高

钢铁行业作为高能耗、高污染行业,节能减排的任务十分繁重。我国钢铁企业强调环境保护和重视综合利用,积极推动节能减排,发展循环经济。通过采用高效率除尘设备,开发新工艺,如烟气循环烧结、烟气脱硫等,大大减小了烧结工业对环境的污染,有效利用了烧结烟气的热能,加强了烟尘捕集和回收,重新返回到烧结料中再利用,从环保的角度不断改善了烧结厂的生产环境。

4. 自动化程度不断提高

烧结生产过程的自动化水平与烧结矿产、质量的稳定均息息相关。随着工业自动化技术的快速发展,目前国内外烧结厂自动化水平逐年提高,广泛采用了自动配料,对混合料水分、料层厚度、点火温度、烧结终点等都采用了自动监控装置。目前我国很多烧结厂的自动化控制系统中采用先进的网络结构和硬件设备,实现了烧结生产过程自动控制、监视及管理,以达到提高烧结矿质量、降低能耗之目的。

0.1.2 球团工艺发展

球团法是将细粒物料(尤其是细精矿)在加水条件下在造球设备上经滚动而成生球,然后再经高温焙烧固结的方法,所得的产品称为球团矿。球团矿具有强度高、粒度均匀、形状规则、含铁品位高、还原性好等优点,在高炉冶炼中起到增产节焦、改善炼铁技术经济指标、降低生铁成本、提高经济效益的作用。

为适应钢铁工业的快速发展、高炉精料技术和合理炉料结构的要求,球团矿作为优质原料得到青睐和高度重视。近年来,不管是球团矿产量,还是球团生产技术,都取得了重大的突破。我国氧化球团的发展呈现以下特点^[11~14]。

1. 链篦机-回转窑工艺发展迅速

铁矿氧化球团矿主要采用竖炉法、带式焙烧机法、链篦机-回转窑法三种工艺进行生产。链篦机-回转窑氧化球团生产工艺具有原料适应性强、生产规模大、生产的产品质量均匀且强度高、可用煤做燃料等众多优点,因此在我国得到迅速发展。生产线由2000年的2条增加到2010年的91条,生产能力12200万t,占球团生产总量的56.51%,这标志着我国链篦机-回转窑球团厂的设计、设备制造和生

产迈上了一个新台阶。我国武钢矿业有限公司鄂州球团厂拥有世界上单体最大的链篦机-回转窑生产线,生产能力为 500 万 t/a。之后,湛江龙腾物流有限公司也于 2009 年建成投产了年产 500 万 t 的链篦机-回转窑生产线。

2. 球团生产技术不断提高

进入新世纪以来,我国球团矿生产不仅在产能和产量上取得了快速的发展,而且在质量和矿耗、能耗等方面也取得了长足的进步。主要表现在球团矿品位提高、膨润土配加量降低、链篦机-回转窑利用系数提高、工序能耗下降、冶金性能得到改善,且对原料的适应性加强,赤铁矿、镜铁矿等也越来越多地应用到球团生产中。

3. 重视清洁生产

球团矿生产工艺较烧结生产对环境的污染较小,但是环境保护标准越来越严格,不但在粉尘方面,而且在 SO_2 和 CO_2 的排放方面也提出了更为严格的要求,因而必须十分重视球团矿生产中的环境保护问题。

0.2 数学模型和专家系统在造块中的应用

0.2.1 数学模型和专家系统基础

1. 数学模型基础^[15~19]

数学模型(mathematical model)是指对于现实世界的某一特征对象,为了某个特征目的,作出必要的简化和假设,运用适当的数学工具所得到的一个数学结构。它或者能解释特定现象的现实性态,或者能预测对象的未来状态,或者能提供处理对象的最优决策或控制。

数学模型分类方法很多,按照变量性质可分为确定性模型、随机模型、灰色模型和模糊模型,也可分为单变量模型和多变量模型;按照动态特征与时间的依存关系可分为参数定常模型和参数时变模型,或者分为动态模型和静态模型;按照描述方式和问题要求的粗细程度可分为定性模型、定量模型和定性定量相结合的模型;按照研究对象的内部结构和性能的了解程度可分为白箱模型、灰箱模型和黑箱模型;按照建模的依据或方法可分为机理模型(理论模型)、经验模型和综合模型,等等。

数学模型的用途可分为三个方面:用于分析和设计实践系统、用于预报实际系统的物理量和用于设计控制系统等。对于同一个实际系统,可以根据不同的用途建立不同的数学模型,在分析、设计实际系统和预报实际物理量时,要使用准确的数学模型,而控制用的数学模型不必都是很准确的,尤其是在设计一些有效的自适应

应控制器时,就可以使用比较粗糙的数学模型。

一个理想的数学模型须是既能反映系统的全部重要特征,同时在数学上又易于处理,即它满足:①模型的可靠性,在允许的误差范围内,能反映出该系统有关特性的内在联系;②模型的适用性,易于数学处理和计算。

一般,建立数学模型可分为以下几个步骤(见图 0-3)。

(1) 模型准备:了解问题的实际背景,明确建模的目的。掌握研究对象的各种信息(如数据资料等),并弄清对象的特征。

(2) 模型假设:根据实际对象的特性和建模目的,在掌握必要资料的基础上,对问题进行必要的简化,并且用精确的语言作出假设,是建立模型的第二步,也是关键的一步。

(3) 模型建立:根据所作的假设,利用适当的数学工具刻划各变量之间的关系,建立相应的数学结构(公式、表格、图形等)。在建模过程中,尽量采用简单的数学工具,以便使得到的模型被更多的人了解和利用。

(4) 模型检验:检验内容包括简化的合理性、数学表达式的正确性、参数估计的可靠性、(模型求解)条件和环境的变动性等,检验的标准是模型预测值与试验观察值是否吻合。

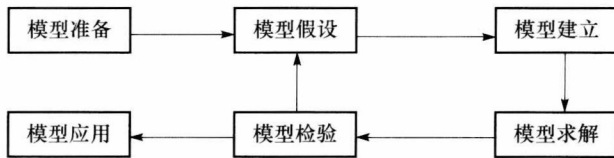


图 0-3 建模的一般步骤

2. 专家系统基础

专家系统(expert system, ES),是目前在人工智能应用方面最成熟的一个领域,是人工智能从一般思维规律探索走向专门知识利用的突破口。所谓 ES,是一个基于知识的程度设计方法建立起来的计算机系统(在现阶段主要表现为计算机软件系统)。它拥有某个特殊领域内专家的知识 and 经验,并能像专家那样运用这些知识,即具有在专家级水平上工作的知识、经验和能力,通过推理,在该领域内作出智能决定,在一定范围内取代专家或起专家助手作用^[20]。

专家系统从完成的功能分类,可包括诊断、预测、解释、调试、修理、规划、设计、监督、控制等多种类型。

专家系统之所以受到欢迎和重视,是因为它具有下列主要特点:

(1) 可以综合许多专家的知识 and 经验,从而博采众长,能以接近专家的水平在特定领域内工作。

(2) 具有透明性,能解释其如何作出结论,检查自身推理过程及其合理性。

(3) 具有自学习能力,能在使用过程中不断通过实例来修正系统建立时不可避免存在的错误知识,并增添尚缺乏的知识,使系统功能更加完善和强大。

(4) 避免了人类专家由于生理、心理因素造成的不足。

(5) 系统具有丰富的知识,可以用来训练生产的操作者,使其尽快达到专家水平。

专家系统是应用相当广泛的一类系统,其技术还处于不断发展时期,因此,专家系统的结构也没有一个固定不变的模式。依据当前人们普遍的认识以及现有的发展状况,通常,一个以规则为基础,以问题为核心的专家系统主要包括下述五个组成部分:

- (1) 知识库(knowledge base);
- (2) 推理机(inference engine)或推理(控制)机制;
- (3) 综合数据库(data base)或工作存储器(working memory);
- (4) 解释接口(explanatory interface)或人-机界面(man-machine interface);
- (5) 知识获取(knowledge acquisition)或预处理程序。

各个部分之间的相互关系如图 0-4 所示。

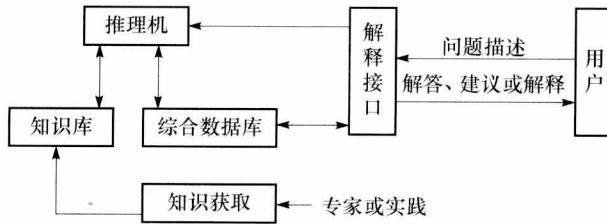


图 0-4 专家系统一般功能结构

知识库是专家系统的核心之一,其主要功能是存储和管理专家系统中的知识。知识库存储的知识主要有两种类型:一类是相关领域中所谓公开性的知识,包括领域中的定义、事实和理论,这些知识通常收录在相关学术著作和教科书中;另一类是领域专家的所谓个人知识,它们是领域专家在长期业务实践中所获得的一类实践经验,其中的很多知识被称为启发性知识。在知识库中,这些知识必须表达为一定的规范形式。

对知识表示的要求有以下几个方面。

(1) 表示能力:能正确、有效地将问题求解所需的各类知识表示出来。

(2) 可理解性:所表示的知识应易读、易懂,便于知识获取、知识库的检查修改及维护。

(3) 可访问性:能有效地利用知识库的知识。

- (4) 可扩充性:能方便地扩充知识库。
- (5) 相容性:知识库中的知识应保持一致。
- (6) 简洁性:知识表示应简单、明了,便于操作。

目前常见的知识表示有谓词逻辑表示、产生式规划表示、框架表示、语义网络表示、面向对象的表示和过程表示等。

推理机(推理控制机制)是一组计算机程序,其主要功能是控制整个系统,决定如何选用知识库的知识,对用户提供的证据进行推理,最终以对用户提出的特定问题作出回答。在专家系统中,问题的求解有赖于系统对已存储的各类常规的和专门的知识综合运用。

推理方法可分为正向推理、反向推理及正反向混合推理。正向推理是由原始数据出发向结论方向的推理,即所谓事实驱动方式;反向推理是先提出假设,然后由此出发,进一步寻找支持假设的证据,即所谓目标驱动方式;正反向混合推理是先根据原始数据通过正向推理帮助提出假设,再用反向推理进一步寻找支持假设的证据,反复这个过程。

0.2.2 数学模型和专家系统在烧结生产中应用

1. 烧结过程数学模型

国外对烧结数学模型的研究是从20世纪60年代开始的,而我国的研究工作始于80年代。随着烧结技术和计算机技术的发展,烧结数学模型的发展很快,应用范围也在不断扩大,它向着过程模拟、参数优化向过程控制及新工艺开发等方面发展。

1) 过程模拟模型

人们最早研究的数学模型是应用于烧结过程的模拟,大部分模拟模型是基于烧结过程物理化学反应的机理模型。

国外模拟模型包括基于13种物理变化、11种化学反应和26个状态变量的铁矿石烧结模拟模型^[21],模拟焦粉粒度、混合料预热、气流分布等操作因素对烧结料层热曲线影响的数学模型^[22],模拟混合料布入台车时化学成分及物理状态偏析现象的数学模型^[23],基于细粒黏附在较粗的颗粒表面上的制粒机理建立的制粒模型^[24],基于水分再冷凝机理和过湿带的形成机理建立的烧结水分迁移数学模型^[25],以及铁矿石烧结过程颗粒粒度分布和冷料层透气性的复合数学模型^[26],等等。

国内模拟模型包括对烧结过程床层结构参数变化进行模拟的床层模型^[27],基于湿料带传热、传质机理的烧结水分迁移数学模型^[28],烧结料层温度分布模型^[29],等等。