

冶金反应工程学丛书

高炉过程数学模型 及计算机控制

毕学工 著

YEJIN FANYING
GONGCHENGXUE
CONGSHU

冶金工业出版社

《冶金反应工程学丛书》书目预告

冶金反应工程学基础

冶金传输原理基础

传递过程原理及应用

传输理论和计算

冶金传输原理习题集

冶金体系物化性质的测定及计算

化工冶金模型实验研究及其测试技术

● 高炉过程数学模型及计算机控制

钢冶金学

铝冶金学 (英文版)

有色冶金动力学和新工艺 (英文版)

转炉炼钢过程的分析和控制

钢的精炼过程数学物理模拟

有色金属材料的真空冶金

电冶金过程速率现象

中间包过程数学物理模拟

钢的连铸过程数学模型

金属轧制过程人工智能优化

电磁冶金学

铁合金冶金工程

肖兴国 谢蕴国著

沈颐身 李保卫 吴懋林著

查金荣 陈家镛著

贺友多著

张捷宇著

翟玉春著

蔡志鹏著

毕学工著

F.奥特斯著 倪瑞明等译

邱竹贤著

刘纯鹏著

李远洲著

朱苗勇 萧泽强著

戴永年著

傅杰著

王建军 曲英著

蔡开科等著

王国栋 刘相华著

韩至成著

戴维著

ISBN 7-5024-1878-4



9 787502 418786

ISBN 7-5024-1878-4/TF-437 定价 28.00 元

冶金反应工程学丛书

高炉过程数学模型 及计算机控制

毕学工 著

北 京
冶金工业出版社
1996

内 容 简 介

本书共分八章,内容包括高炉过程计算机控制的概述,过程数据的采集和检测仪表,检测数据的预处理,高炉基本传输现象的数学描述,高炉过程的模拟模型,高炉过程的控制模型,高炉过程的人工智能控制,热风炉模拟模型和人工智能控制等。

本书可以作为高等院校钢铁冶金专业本科生和研究生的参考教材,可供与高炉炼铁有关的教学、科研、生产、设计、仪表制造等单位的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高炉过程数学模型及计算机控制/毕学工-北京:冶金工业出版社,1996

(冶金反应工程学丛书)

ISBN 7-5024-1878-4

I. 高… II. 毕… III. 高炉炼铁-过程控制:计算机控制-数学模型 IV. TF543

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 07429 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

外文印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1996 年 5 月第 1 版, 1996 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 10.5 印张; 280 千字; 320 页; 1-3000 册

定价 28 元

序 言

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属和制造材料的科学。从人类最早使用金属到今天，已有数千年历史。在近一百多年的现代工业生产发展中，冶金工业作为一门基础材料工业，发挥了重大作用。本世纪上半叶以来，许多冶金学家应用化学热力学知识，对冶金过程中气体-熔渣-金属间的反应平衡和熔体的物理化学性质进行了大量的测定和研究，这些研究成果促进了现代冶金工艺的发展。冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

近几十年来，冶金学知识体系和结构，随着冶金技术的发展和相关学科的进步，也在发生变化。计算机技术的发展和广泛应用，使冶金学理论和工艺的研究方法、冶金生产及其控制技术发生了重大变革。由传统冶金学和传统冶金工艺学所构成的知识体系和结构，已不能完全满足现代冶金工艺发展和理论研究的需要。因此，诸如，对微观和宏观过程的认识、单元过程或现象的定量解析、反应过程的数学物理模拟、反应和生产速率的预测、反应器的仿真研究和设计、人工智能技术的应用以及反应器运行和整体生产过程的控制等等，均逐渐成为现代冶金学必须包括的内容。近二三十年中，许多冶金学学者努力学习相关学科，如现代化学工程学、计算流体力学 (CFD)、传输理论等方面的知识，积极利

用数学解析方法和计算技术，来定量分析和解决冶金学理论和工艺方面的问题，并获得重要进展。日本学者鞭岩、瀬川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新发展，于70年代提出冶金反应工程学概念，并分别出版了《冶金反应工程学》和《铁冶金反应工程学》等专著。

我国在冶金学上述新兴内容的研究方面，起步于70年代末。近二十多年，国内许多冶金学者根据现代冶金学发展的趋势，吸收国外先进经验，注意促进多学科知识的交叉，逐步将传输理论、反应工程学的方法以及计算技术引入冶金学的理论研究和工艺开发中，并取得较大的进展。为及时总结冶金学近几十年的发展成果，增进国内外学术交流，改善专业教学、基础研究和工艺发展的条件，中国金属学会冶金反应工程学学术委员会决定组织我国冶金领域内的专家学者，并争取国外学者的参与或合作，编辑出版一套《冶金反应工程学丛书》。

本套丛书可大致划分为介绍冶金反应工程学理论的著作（一部分为高校教材或教学参考书）和介绍冶金反应工程学知识应用成果和经验的专著两类。第一批著作于1996年开始出版发行。欢迎国内外冶金学者参加《冶金反应工程学丛书》书目的著述。

《冶金反应工程学丛书》的编委会，由下列学者组成（按姓氏笔画排列，带*号者为执行小组成员）：

干 勇（冶金部钢铁研究总院）

* 曲 英（北京科技大学）

任崇信（冶金工业出版社）

仲增墉（中国金属学会）

杨天钧（北京科技大学）

张丙怀（重庆大学）

贺友多（包头钢铁学院）

柯家骏（中国科学院化工冶金研究所）

徐德龙（西安建筑科技大学）

梅 炽（中南工业大学）

- * 萧泽强 (东北大学)
- 赫冀成 (东北大学)
- * 蔡志鹏 (中国科学院化工冶金研究所)
- 戴永年 (昆明理工大学)
- 魏季和 (上海大学)

由于《冶金反应工程学丛书》内容涉及面较宽,编写工作量大,且系初次组织,经验不足,错误和不足之处在所难免,请读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会

1996年5月

前言

高炉炼铁过程十分复杂，它涉及到气、固、液三相的交互作用，因此，全面而正确地理解高炉内发生的各种现象很困难。长期以来，工长操作高炉基本上依赖于自身的经验。正是这些特点使得高炉过程控制成为计算机的最佳应用领域。

计算机控制是高炉现代化的一个重要标志，它在提高高炉生产率和生铁质量、降低燃料消耗、延长高炉寿命等方面可以发挥巨大作用。芬兰罗塔鲁基公司拉赫厂的高炉是60年代由前苏联设计和建造的，当时的各项生产指标都比较落后。而最近十几年来，这些高炉已经跻身于世界最先进高炉的行列。他们自己总结的经验主要有两条，一是提高了烧结矿和焦炭的质量，二是建立了性能优良、工作可靠的计算机控制系统。芬兰的经验对于我们很有启发意义和借鉴价值。

现在，世界各主要产钢国都采用了计算机控制高炉，其中水平最高的当属日本。我国在高炉计算机控制方面起步较晚，但是发展迅速。近年来新建和大修改建的大、中型高炉，甚至一些小型高炉都上了计算机控制系统，但是与世界先进水平相比较，仍然存在以下三个方面的差距：

——发展不平衡，大多数中小型高炉还没有建立计算机控制系统；

- 普遍缺少品种齐全、性能优良、工作可靠的检测仪表；
- 普遍缺少必要的高炉数学模型。

冶金部领导同志对高炉计算机控制十分关心和重视，最近提出了有条件的高炉要尽快上计算机控制系统，已有的高炉计算机系统要尽快提高水平，从基础自动化级控制上升到过程级控制的战略目标。本书就是在这样的历史背景下写作的。它的宗旨是在广泛地收集自 60 年代以来国内外在高炉数学模型和计算机控制的理论研究成果和实际应用经验的基础上，结合作者自己多年科研和教学的实践，系统而简要地介绍高炉控制的基本思想、计算机控制系统的软硬件配置、高炉检测仪表、高炉数模，以及热风炉数模等方面的知识。本书可以作为高等院校钢铁冶金专业本科生和研究生的参考教材，也可以作为与高炉炼铁有关的教学、科研、生产、设计、仪表制造等单位的工程技术人员参考书。如果本书的出版能够对我国高炉计算机控制的发展发挥一点微薄的作用，我将感到万分的高兴。

本书共分八章。为了使读者对高炉计算机控制有一个整体的了解，在第 1 章讨论了高炉过程控制的特点和基本思想、大中小型高炉计算机系统的软硬件配置、高炉计算机控制的发展历史及现状，以及如何评价计算机控制所带来的经济效益等问题。鉴于我国在高炉检测仪表方面的落后状况和对开发、研制及进口高炉检测仪表的紧迫需求，在第 2 章以较大的篇幅介绍了主要高炉检测仪表的原理、构造和实际应用。应用冶金反应工程学的理论和研究方法，定量地描述高炉内能量、质量和动量的传输是建立高炉数学模型的基础。第 4 章详细介绍了炉顶布料、炉内各相的运动、化学反应速度、各相间的传热等高炉基本现象的数学表达式或数学模型。为了突出重点以及考虑到本书篇幅有限，第 5 和第 6 章着重介绍了本书作者认为比较重要而且读者有可能自己建立实用计算机程序的一些高炉过程模拟模型和控制模型。第 7 章讨论了高炉专家系统和人工智能控制问题。第 8 章介绍了与高炉生产密切相关的热风炉的模拟模型和人工智能应用系统。大量的过

程数据和检测信息，必须经过预处理才能够用于模型计算。所以在第三章专门讨论了数据预处理的数学模型和人工智能方法。由于篇幅限制书中没能介绍的某些重要模型，例如宝钢的炉热指数模型和热风炉燃烧控制模型等，请读者参阅有关的书籍。

对瑞典 K. 托赛尔教授、T. 布林达先生、R. 律连拉姆先生和 J-O. 维克斯特若姆先生等，芬兰罗塔鲁基公司的 L. 派森宁先生，湘潭钢铁公司的刘坤庭副经理、陈濂厂长和张文志先生等对我在高炉数模和计算机控制方面的科学研究工作所给予的宝贵支持和帮助，武汉冶金科技大学的周世倬教授、傅世敏教授、罗庭和副教授、曾小宁先生等炼铁教研室诸位同仁对本书的写作所提供的宝贵意见和支持，研究生田铁路先生和何环宇小姐对书中部分图表的整理所做出的努力，以及我的妻子赵德怡女士和女儿毕燕对本书的写作所给予的支持，谨在此一并表示最衷心的感谢！

本书承蒙北京科技大学曲英教授审阅，并提出许多宝贵意见，在此特表示诚挚的谢意。

由于本人的学术水平有限，书中难免存在许多不足甚至谬误之处，敬请读者给予批评指正。

毕学工

1995-08-29

目 录

1 高炉计算机控制的概述	1
1.1 高炉炼铁在国民经济中的重要地位	1
1.2 高炉过程的特点	1
1.3 高炉过程面临的挑战	3
1.4 高炉过程控制的基本思想	5
1.5 高炉计算机控制系统软硬件的基本配置	5
1.5.1 控制系统的分级结构及功能	5
1.5.2 计算机系统的硬件组成	7
1.5.3 计算机系统的软件组成	9
1.6 几种典型的高炉计算机控制系统	9
1.6.1 超大型高炉的计算机控制系统	9
1.6.2 中型高炉的计算机控制系统	14
1.6.3 小型高炉的计算机控制系统	15
1.7 高炉计算机控制的发展概况和现状	16
1.8 高炉计算机控制的发展趋势	17
1.9 高炉计算机系统的效益分析	27
参考文献	28
2 高炉过程信息的采集和检测仪表	29
2.1 过程信息的种类和采集部位	29

2.1.1	炉外信息的种类	29
2.1.2	炉内信息的种类	31
2.1.3	过程信息的采集部位	31
2.2	焦炭和矿石含水量的在线检测仪表	31
2.2.1	焦炭中子测水仪	31
2.2.2	矿石中子测水仪	33
2.3	炉顶安装的检测仪表	35
2.3.1	料面形状和料面位置的检测仪表	35
2.3.2	料面上炉料粒度的检测仪表	44
2.3.3	料面温度分布的检测	45
2.3.4	炉顶煤气成分的连续检测仪表	50
2.3.5	炉顶煤气流速的检测仪表	56
2.4	块状带的检测仪表	59
2.4.1	磁性层厚仪	60
2.4.2	微波层厚仪	61
2.4.3	电极层厚仪	63
2.4.4	块状带煤气流速仪	63
2.4.5	炉身探尺	64
2.5	软熔带的检测仪表	67
2.5.1	炉身静压力计	67
2.5.2	垂直下降探尺	68
2.5.3	时域检测系统	69
2.5.4	软熔带根部检测系统	70
2.5.5	炉腰探尺	71
2.6	死料柱、风口循环区和炉缸的检测仪表	72
2.6.1	风口亮度计	72
2.6.2	风口循环区激光检测系统	73
2.6.3	死料柱探尺	75
2.6.4	风口探尺	78
2.6.5	风口前端热电偶	81
2.6.6	风口漏水检测仪	82
2.6.7	送风支管热风流量计	83

2.6.8	磁性炉缸温度计	84
2.7	炉体振动计	85
2.8	铁水和熔渣的温度、化学成分及流量的 检测仪表	87
2.8.1	铁水温度的检测仪表	87
2.8.2	铁水含硅量快速分析探头	90
2.8.3	铁水流量的检测方法	96
2.8.4	熔渣流量的检测方法	97
2.9	炉墙残存厚度的检测仪表	99
2.9.1	精密多头热电偶	100
2.9.2	电阻法炉衬厚度仪	101
2.9.3	冲击弹性波炉衬厚度仪	103
2.9.4	炉缸和炉底砖衬内热电偶的布置方法	104
2.10	入炉物料的高精度计量仪表	105
2.10.1	重油的计量	105
2.10.2	冷风流量的检测	106
	参考文献	107
3	检测数据的预处理	112
3.1	数据有效性的检验	112
3.2	数据可靠性和一致性的检验	114
3.3	数据变化规律的辨识	116
3.3.1	数理统计方法	116
3.3.2	神经网络方法	117
3.3.3	时间序列分析方法	124
3.3.4	低通滤波器方法	125
	参考文献	126
4	高炉过程中传输现象的数学描述	128
4.1	炉顶布料的数学描述	128
4.1.1	研究布料规律的先进试验装置	129
4.1.2	料流轨迹和落点的计算	130
4.1.3	炉料堆角的计算	138
4.1.4	矿/焦混合层厚度的计算	139

4.1.5	炉料粒度径向分布的计算	140
4.1.6	RABIT 炉顶布料模型	142
4.2	料柱和煤气流运动的数学描述	145
4.2.1	气体流动	145
4.2.2	滴下带内液体的流动	154
4.2.3	固体炉料的运动	158
4.2.4	出铁时液体渣铁的流动	159
4.3	热传输现象的数学描述	164
4.3.1	高炉内各相间的热传输	164
4.3.2	炉缸耐火砖衬温度场的计算	167
4.4	化学反应速度的数学表达式	170
4.4.1	铁矿石还原的速度的数学模型	171
4.4.2	焦炭溶解反应速度的数学模型	179
4.4.3	水煤气反应速度的数学模型	181
4.4.4	石灰石分解速度的数学模型	182
4.4.5	熔渣中 FeO 还原速度的数学模型	183
4.4.6	硅还原和氧化速度的数学模型	185
4.4.7	熔渣中 MnO 被 C 还原速度的数学模型	190
4.4.8	焦炭燃烧反应速度的数学模型	192
	参考文献	193
5.	高炉过程的模拟模型	198
5.1	热化学模型	198
5.1.1	里斯特操作线	198
5.1.2	C-DRR 图	200
5.2	风口循环区数学模型	203
5.2.1	风口循环区简易模型	203
5.2.2	风口循环区一维模型	204
5.2.3	风口循环区的二维模型	207
5.3	高炉的一维数学模型	212
5.3.1	KTH 高炉模拟和预报模型	213
5.3.2	久保高炉一维动态模型	221

5.3.3	简化的用于控制铁水温度的高炉一维动态模型	225
5.4	高炉的二维数学模型	230
5.4.1	软熔带模型	231
5.4.2	全高炉的二维模型	235
5.5	高炉的三维数学模型	248
	参考文献	250
6	高炉过程的控制模型	254
6.1	炉热指数模型	254
6.1.1	W_r 指数模型	255
6.1.2	E_r 指数模型	257
6.1.3	T_r 指数模型	258
6.2	铁水含硅量综合预报模型	260
6.3	铁水含硅量预报的时间序列模型	262
6.3.1	模型的结构	262
6.3.2	模型的特点	264
6.3.3	预报结果及讨论	266
	参考文献	267
7	高炉过程的人工智能控制	269
7.1	专家系统和人工智能技术在世界高炉炼铁业中的应用	269
7.1.1	人工智能和专家系统简介	269
7.1.2	高炉炼铁业已经应用的专家系统和 AI 系统	270
7.1.3	人工智能和专家系统的效益及在我国的应用前景	275
7.2	专家系统开发的基本问题	276
7.2.1	知识的表达方式	276
7.2.2	推理方式	278
7.2.3	人工智能语言	278
7.3	高炉专家系统的结构	280

7.4	炉况诊断专家系统	281
7.4.1	先进的 GO-STOP 系统	281
7.4.2	炉凉、炉皮脱落和结瘤预报的专家系统	286
7.5	炉热监测和控制专家系统	288
7.5.1	当前炉热水平的判断	288
7.5.2	炉热变化趋势的预报	289
7.5.3	调整炉热的措施决策	292
7.6	炉料下降异常预报和控制的专家系统	293
7.7	高炉炉顶布料控制的 AI 系统	297
7.7.1	布料控制专家系统	297
7.7.2	基于事例的自学习布料控制 AI 系统	299
7.8	出铁操作指导专家系统	300
	参考文献	305
8	热风炉模拟模型和人工智能控制	307
8.1	热风炉模拟模型	307
8.1.1	热风炉系统流程简介	307
8.1.2	基础方程	308
8.1.3	基础方程求解	311
8.2	热风炉模糊控制系统	313
	参考文献	316
	索引	317

1

高炉计算机控制的概述

1.1 高炉炼铁在国民经济中的重要地位

钢铁是现代社会最重要的原材料之一，钢铁工业是现代国家的支柱产业之一，钢铁的产量和质量是一个国家的发达程度和经济实力的重要标志。全世界对钢铁的需求量和钢铁产量随着经济的发展在不断地增加。据欧洲钢铁协会统计，1987年全世界的钢产量已达7.37亿t。1994年我国的生铁产量已达0.964亿t，位居世界第一位，而钢产量已达0.915亿t，位居世界第二位。

炼钢所用的含铁原料，除去废钢和少量的直接还原铁以外，绝大部分是高炉生产的铁水。在炼钢的高炉—氧气转炉流程（BF—BOF）、直接还原—电炉流程和废钢—电炉流程这三大流程中，BF—BOF占主导地位。例如，1987年世界钢产量的69.52%是用高炉铁水冶炼出来的。从能源的角度看，高炉所消耗的能量约占BF—BOF流程总能耗的60%~70%。十分明显，高炉炼铁对于我国乃至全世界的经济发展都起着十分重要的作用。因此，研究高炉过程的理论和规律，努力增加高炉的产量，提高生铁的质量，降低燃料的消耗和生铁成本，必将产生巨大的经济效益和社会效益。

1.2 高炉过程的特点

图1-1为从铁矿石到钢的冶炼过程示意图。图1-2为高炉内部结构示意图。

焦炭、铁矿石（烧结矿、球团矿、块矿等）和熔剂（石灰石、白云石、硅石、锰矿等）等固体炉料从高炉上部装入。到达风口的焦炭被从风口鼓入的热风中的氧燃烧而产生平均温度为1700℃左右的高温煤气，同时燃烧的还有随鼓风一道喷入的煤粉、