

冶金反应工程学丛书

有色冶金炉窑 仿真与优化

梅 炽 等 编著

YEJIN FANYING
GONGCHENGXUE
CONGSHU

冶金工业出版社

TF806
2001314

国家自然科学基金资助

冶金反应工程丛书

有色冶金炉窑仿真 与优化

梅 炽 等编著

北 京
冶金工业出版社
2001

内 容 简 介

本书在简单介绍一般火焰、熔体和气-粒广义流态化系统的流场、温度场、浓度场、电磁场数学模拟原理和方法的基础上,重点介绍了作者及其课题组近十余年来按“数学模拟—全息仿真—整体优化”的思路研究有色冶金炉窑仿真和优化的实例,包括铝电解槽、熔炼电炉、贫化电炉、碳阳极焙烧炉、闪速熔炼炉、锅炉以及单端辐射管仿真和优化的过程与结果。本书可供热能工程、冶金工程、动力工程以及建材、化工专业的研究生和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

有色冶金炉窑仿真与优化/梅炽等编著. —北京:冶金工业出版社, 2001. 2

(冶金反应工程学丛书)

ISBN 7-5024-2692-2

I. 有… II. 梅… III. ①有色冶金炉—计算机仿真②有色冶金炉—最佳化 IV. TF806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 56875 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 谭学余 杨传福 美术编辑 王耀忠 责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2001 年 2 月第 1 版, 2001 年 2 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 12.125 印张; 322 千字; 368 页; 1—2000 册

32.50 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044235 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



作者简介

梅炽，湖南人，1934年生，1956年毕业于中南矿冶学院(现名中南大学)后留校任教，一直从事有色冶金炉窑热工理论与设计的教学与研究工作，历任教研室主任、学校图书馆馆长、副校长等职，现任该校学术顾问、应用物理及热能工程系教授、博士生导师、热工设备仿真与优化研究所所长。20世纪80年代开始研究有色冶金炉窑的数学模拟与计算机仿真。编著出版《有色冶金炉》、《冶金炉热工基础》、《冶金传递过程原理》和《有色冶金炉设计手册》等著作8种，在国内外学术刊物上发表论文90余篇。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 有色冶金炉窑分类	(1)
1.2 有色冶金炉窑热工过程与一般炉窑热工系统	(2)
1.3 有色冶金炉窑设计与研究方法的发展	(3)
1.3.1 炉窑设计与研究常用方法	(3)
1.3.2 数学模型-全息仿真-整体优化方法的特点	(5)
1.4 有色冶金炉窑数学模型及一般建模方法	(6)
1.4.1 现代有色冶金炉窑数学模型的种类	(6)
1.4.2 建模步骤特点	(7)
参考文献	(9)
2 有色冶金炉窑热工过程数学模型	(10)
2.1 炉内气体流动与流场模拟	(10)
2.1.1 概述	(10)
2.1.2 雷诺时均方程与法夫尔平均法	(12)
2.1.3 湍流模型	(14)
2.1.4 低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型	(20)
2.1.5 归一化重整组合 $k-\epsilon$ 模型	(23)
2.1.6 雷诺应力模型	(25)

2.2	炉内传热过程与温度场模拟	(26)
2.2.1	炉内传热过程特点	(26)
2.2.2	区域法(Zone Method)辐射模型	(28)
2.2.3	蒙特卡罗辐射换热模型	(32)
2.2.4	离散辐射传热模型	(34)
2.3	燃烧过程与浓度场模拟	(37)
2.3.1	化学反应流体力学基本方程	(38)
2.3.2	气相燃烧模型	(42)
2.3.3	颗粒与液滴燃烧模型	(49)
2.3.4	NO_x 模型	(55)
2.4	磁场模拟	(62)
2.4.1	物理模型	(62)
2.4.2	电流场数学模型	(63)
2.4.3	导电元件的磁场数学模型	(64)
2.4.4	铁磁元件的磁场模型	(69)
2.4.5	磁场三维数学模型	(71)
2.4.6	磁场模拟的应用	(72)
2.5	炉内熔体流动与流场模拟	(72)
2.5.1	炉内熔体流动的数学模型	(72)
2.5.2	电磁流动	(74)
2.5.3	喷射气流作用下的熔体流动	(78)
	参考文献	(84)
3	有色冶金炉窑的全息仿真	(91)
3.1	全息仿真概念与特点	(91)
3.2	全息仿真数学模型	(92)
3.3	全息仿真中的多场耦合问题	(95)
3.3.1	多场耦合类型	(95)
3.3.2	三场相内耦合实例	(96)
3.3.3	四场多重耦合实例	(97)
3.4	全息仿真模型的求解方法	(100)

参考文献	(101)
4 热工-工艺过程的人工智能模拟	(103)
4.1 有色冶金炉窑内热工-工艺过程特点	(103)
4.2 人工智能方法原理简介	(104)
4.2.1 专家系统	(105)
4.2.2 模糊模拟	(106)
4.2.3 人工神经网络模型	(107)
4.3 智能模糊分析法建模	(109)
4.3.1 多变量系统智能模糊自适应优化决策模型 建模方法	(109)
4.3.2 实例——炼镍矿热电炉生产过程模糊自适应 优化决策模型	(113)
4.4 模糊神经网络分析法建模	(119)
4.4.1 多变量系统模糊神经网络自适应优化决策 模型建模方法	(119)
4.4.2 实例——渣贫化电炉生产过程模糊神经网络 自适应优化决策模型	(123)
参考文献	(128)
5 铝电解槽的全息仿真	(131)
5.1 概述	(131)
5.2 铝电解槽的电磁场解析	(135)
5.2.1 母线电流解析模型	(136)
5.2.2 阳极电流解析模型	(136)
5.2.3 熔体电流场解析	(139)
5.2.4 阴极电流场解析	(142)
5.2.5 磁场解析	(144)
5.2.6 铁磁性物质对磁场分布的影响	(147)
5.3 熔体流场解析	(150)
5.3.1 熔体内的电磁力	(150)
5.3.2 铝液运动分析	(151)

5.3.3	电解质运动分析	(152)
5.3.4	熔体流场计算	(154)
5.4	铝电解槽热场解析	(156)
5.4.1	控制方程与边界条件	(157)
5.4.2	计算方法	(159)
5.5	铝电解槽的动态仿真	(161)
5.5.1	铝电解槽运行工况的影响因素与动态仿真 基本原理	(161)
5.5.2	模型与算法	(162)
5.5.3	动态仿真技术方案及软件系统功能	(16)
5.6	铝电解槽的电流效率模型	(16)
5.6.1	电流效率的影响因素及其测定方法	(16)
5.6.2	电流效率模型	(168)
	参考文献	(171)
6	矿热电炉仿真与优化	(175)
6.1	概述	(175)
6.2	矿热电炉自焙电极烧结过程模型	(176)
6.2.1	电极烧结过程电、热解析模型	(178)
6.2.2	计算机仿真软件	(181)
6.2.3	计算结果及烧结过程分析	(182)
6.2.4	自焙电极结构与操作制度的优化	(188)
6.3	矿热电炉熔池流场模型	(191)
6.3.1	熔池流场数学模型	(191)
6.3.2	炉渣受力分析	(193)
6.3.3	流场求解方法与特点	(195)
6.4	矿热电炉熔池传热和温度场模型	(198)
6.4.1	熔池热场数学模型	(199)
6.4.2	计算机仿真软件	(202)
6.4.3	计算结果及验证	(202)
6.4.4	电炉生产条件的评价及优化	(208)

参考文献	(209)
7 火焰炉炉膛四场耦合仿真	(213)
7.1 概述	(213)
7.2 碳阳极焙烧炉燃烧室仿真与优化	(215)
7.2.1 物理模型	(216)
7.2.2 数学模型	(216)
7.2.3 仿真和优化过程实例	(218)
7.3 闪速炉反应塔内四场耦合仿真	(225)
7.3.1 数值模拟方法	(225)
7.3.2 铜闪速炉仿真实例	(229)
7.3.3 结论	(234)
7.4 煤粉锅炉炉膛内的四场耦合模型	(234)
7.4.1 物理模型	(236)
7.4.2 数学模型	(236)
7.4.3 仿真的燃烧工况及边界条件	(240)
7.4.4 仿真结果及分析	(242)
参考文献	(248)
8 广义流态化中稀相与浓相模型	(251)
8.1 关于气-粒广义流态化系统	(251)
8.2 粉料粒度分布模型	(253)
8.2.1 正态分布模型	(255)
8.2.2 对数概率分布模型	(255)
8.2.3 韦布尔概率分布函数	(256)
8.2.4 R-R 分布模型	(257)
8.2.5 拔山-棚泽分布函数	(258)
8.3 稀相模型	(259)
8.3.1 气-粒两相流动理论模型概述	(259)
8.3.2 无滑移模型	(260)
8.3.3 小滑移模型	(261)
8.3.4 多流体模型	(263)

8.3.5	颗粒群轨道模型	(265)
8.3.6	颗粒群轨道模型的求解方法	(270)
8.4	浓相数学模型	(271)
8.4.1	概述	(271)
8.4.2	简单气泡两相模型	(273)
8.4.3	鼓泡床模型	(274)
8.4.4	气泡聚合模型	(275)
8.4.5	用于气固反应的气泡聚合模型	(280)
8.4.6	浓相中固体反应率模型	(283)
	参考文献	(287)
9	单端辐射管的多重数值仿真	(290)
9.1	概述	(290)
9.1.1	单端辐射管及研究背景简介	(290)
9.1.2	单端辐射管仿真的总体思想	(293)
9.2	单端辐射管的三维冷态模型	(294)
9.3	单端辐射管的二维模拟	(298)
9.3.1	流场计算	(298)
9.3.2	燃烧计算	(301)
9.3.3	二维模型计算结果与分析	(305)
9.4	单端辐射管的一维模拟	(308)
	参考文献	(313)
10	有色冶金炉窑多目标整体优化	(315)
10.1	概述	(315)
10.1.1	优化概念及其发展	(315)
10.1.2	炉窑整体优化三原则	(315)
10.2	炉窑整体优化的一般目标	(317)
10.2.1	单位生产率函数	(317)
10.2.2	产品质量控制函数	(322)
10.2.3	炉窑寿命控制函数	(324)
10.2.4	炉窑能耗函数	(326)

10.2.5	大气污染物排放控制函数	(327)
10.3	多目标整体优化的常用方法	(333)
10.3.1	人工智能优化方法	(333)
10.3.2	统一目标法	(336)
10.3.3	主要目标法	(338)
10.3.4	协调曲线法	(339)
10.3.5	分层求解法	(339)
10.3.6	多目标模糊优化	(340)
10.4	炉窑整体优化的技术载体	(342)
10.4.1	设计优化 CAD	(342)
10.4.2	炉窑操作优化智能决策支持系统	(343)
10.4.3	在线优化系统	(351)
10.4.4	监-控-管一体化集成系统	(354)
	参考文献	(357)
	索引	(360)
	译名对照	(367)

1

绪论

1.1 有色冶金炉窑分类

在工业生产中习惯地把金属分为铁和非铁两大类,并将铬、锰和铁列在一起,其余的金属统称为非铁金属或有色金属(Nonferrous Metals)。通常有色金属按现代用途又可划分为^[1]:

重金属:铜、铅、锌、锡

轻金属:铝、镁、钛

贵金属:金、银及铂族金属

钢铁工业金属:镍、铬^①、钴、钼、钨、钒、铌和钽

电子工业金属:镉、镓、锗、汞、铟、铊、硒、碲、锰^①

核工业金属:铀、钍、钷、铯、钷、铷、铯、稀土金属

化学工业金属:铍、锑、锂

可见,有色金属是一个非常庞大的家族,在国民经济中占有十分重要的位置。有色冶金炉窑,即是用于上述金属的提取和加工过程中的高温设备。有色冶金炉按名称已达 100 余种,其种类十分繁杂。为便于研究,通常将其按用途、热源、加热方式、工作原理、结构特点、热工特性等进行分类,见表 1-1。

表 1-1 有色冶金炉(窑)分类^[2]

分类依据	炉窑名称举例
按用途	干燥炉(窑)、焙烧炉(窑)、煅烧炉(窑)、加热炉、氯化炉、熔炼炉、熔 化炉、吹炼炉、精炼炉、热处理炉、还原炉、烟化炉、挥发炉、蒸馏炉、 扩散炉、阳极炉、阴极炉

① 铬、锰是钢铁冶金的两种合金元素,无论从其本身的性质、用途及世界年产量都不能与钢铁相比,所以将其列入非铁金属比较合理。

续表 1-1

分类依据	炉窑名称举例
按热源	自热炉、燃料炉、电炉
按加热方式	火焰炉、倒焰炉(窑)、隔焰炉、电阻炉、感应炉、电弧炉、矿热炉、电子轰击炉、等离子体炉
按工作原理	流态化炉、旋风炉、鼓风炉、闪速炉、顶吹转炉、侧吹转炉、底吹式炉、熔池熔炼炉、热空气循环炉、气垫式炉、悬浮焙烧炉
按结构特点	回转炉(窑)、反射炉、多膛炉、竖井式炉、坩埚炉、室状炉、竖罐蒸馏炉、塔盘式精馏炉、碳管炉、钨棒炉、钼丝炉、罩式炉、步进式炉、碳粒炉、马弗炉
按热工特性	简单炉灶型(如燃烧室、热风炉等) 加热炉型(如加热炉、热处理炉、熔化炉、倒焰窑、隧道窑等) 高温反应器型(如吹炼炉、熔池熔炼炉、熔盐电解槽等)

1.2 有色冶金炉窑热工过程与一般炉窑热工系统

炉窑热工过程多种多样,从本质上看,可以分解为如下几类:

- (1) 燃料燃烧或电热转换过程;
- (2) 炉内气体流动过程,或气-粒多相流与广义流态化过程;
- (3) 炉内物料的机械运动与电磁流体运动过程;
- (4) 炉内传热传质过程;

(5) 高温物理-化学反应过程。这一过程既是炉窑工作的目标,也是以上诸热工过程效果的综合体现。

与此对应,炉窑热工系统通常由炉窑本体与各种热工辅助设施组成(见表 1-2)。

表 1-2 一般炉窑热工系统结构

名 称	主要组成部分	说 明
炉窑本体	炉基 炉膛与耐火砌体 保温层 作业孔口与炉门 炉壳与外围加固构件 运转机械	混凝土结构 耐火砖砌体与捣筑材料 隔热材料制品与散料 钢结构
热工辅助设施	燃烧供热系统或电热系统与供电系统 供风排烟系统 加排料系统 炉体冷却系统 余热利用系统 监控系统	燃料准备、燃烧装置 变压变频、电热元件 热风装置、真空系统 水冷或汽冷装置 换热器、蓄热室、余热产汽系统 检测仪表与控制系统

以上这两部分是一个功能紧密配合的整体,任何一个组成部分的工作滞后或受阻,都将直接影响炉窑整体功能的正常发挥甚至导致破坏,在设计与研究中必须作为一个完整系统同时考虑,并且要求功能匹配。这就是炉窑热工设计与研究中至关重要的整体性原则与炉窑热工系统设计概念。

1.3 有色冶金炉窑设计与研究方法的发展^[3]

1.3.1 炉窑设计与研究常用方法

(1) 经验分析-类比估计-近似定量法。此种方法虽然是一种原始的知识积累,但在特定的场合和对某些小型企业的小型炉窑的情况下使用,仍有直观、可靠、简便的特点。但此方法很难创新,难解决复杂问题。

(2) 模型实验-相似分析-经验公式法。此方法从 19 世纪中叶开始逐步发展,一直沿用至今。它以相似理论(相似正定理、相似

逆定理、方程分析 π 定理)为指导,设计和进行相似模型实验,然后将实验结果整理成为各种准数方程或实验公式。

进行模拟实验可以有两种方式,一种是相似模型实验,即模型中的现象与实物设备中的现象属于同一类的,如风洞中测试机翼性能、高速列车外形设计等;另一种是类似模拟实验(或称异类模型实验),即利用容易观察与测试的现象来模拟另一种不易观测的现象,然后利用类似分析整理出定量的关系式,如传热现象的电模拟与水力模拟等。这种方法在研究炉窑合理结构内形与尺寸设计,以及研究炉内流体流动、传热传质等方面发挥过重要作用,但对于复杂炉型以及高温、高压、高速、有毒等条件下,此法的应用很困难。

(3) 数学模拟-数值解析法。20世纪60年代末70年代初,随着电子计算机的发展,国外已研究出电解槽磁场、热场计算、槽壳应力计算等单一过程数学模型与数值解软件,并开始用于电解槽的工程设计。80年代初,我国已开始利用计算机进行电阻炉与周期作业炉窑内衬结构的优化设计。随着计算流体力学、计算传热传质学、计算燃烧学的逐步发展,炉窑热工领域开始研制更加完整和实用的数学模型。

(4) 数学模型-全息仿真-整体优化法。从炉窑结构设计优化与操作参数优化的可靠性与精确性要求出发,在热工过程单一过程或单目标参数的数学模型基础上,国内外研究人员开始研制更为完善的数学模型,用多过程同时模拟代替单一过程模拟,用多变量多过程之间的耦合作用模型代替多过程孤立模型或叠加模型,并用实验或实践数据验证之后,即形成炉窑热工的全息模型。利用计算机求解全息模型的过程称为全息仿真。利用全息仿真软件在计算机上进行一系列的计算,从中寻找出目标参数值最佳的变量组合;或预先设定好目标函数,自动寻找出最佳设计方案的过程,通称为全息仿真试验。以全息数学模型为基础,以全息仿真软件为核心和主要工具,以炉窑多目标整体优化为目的,进行寻优试验或自寻优运算,这种技术的综合即称为“数学模拟-全息仿真-整

体优化”方法。

1.3.2 数学模型-全息仿真-整体优化方法的特点^[3,6]

(1) 从研究过程看,它是从宏观观测与测试入手,通过数学模拟与数值法求解,求得各有关参数场的微观结构,经过对参数分布微观结构的分析,找出对应的炉窑宏观功能与技术经济指标,进一步就可以按这种宏观功能的优劣,逆向地去调整炉窑结构与操作条件,从而改变参数场的微观结构,使之满足实现最佳功能的要求。这就是微观与宏观的结合与统一;

(2) 从研究方法看,它是从定性地确定简化物理模型入手,通过解算控制方程组或搜索某些特定符号的人工智能方法,得出近似定量决策,继而通过实践应用对定量决策进行检验与修正,使结果更为准确可靠,这就是定性与定量的结合与统一;

(3) 从应用效果来看,它是通过模拟与仿真计算,使炉窑结构与操作技术条件进一步改善,从而上升到一个新的整体优化水平,这既是研究的最终目标,又是对研究结果的自然检验,因而这一方法和技术路线永远紧密地与实验测试或实践数据联在一起,也就是说它具有较强的实践性。

另外,较之传统研究方法,这种数学模型-全息仿真-整体优化的方法获得的信息更多、更全面、更加可靠和直观。

当然,采用此种方法需要更完善的数学模型或人工智能模型和更简捷高效的算法,需要有性能更优的计算机。同时需要更有效、最好能进行在线检测的测试技术与仪表与之配合。为了进一步地了解现代研究方法,表 1-3 中列出了现代研究方法与传统研究方法的多方面比较。

表 1-3 现代研究方法与传统方法的比较

比较方面	传统方法	现代研究方法
研究视角	宏观的投入产出关系,“宏观结构”与“宏观功能”的对应	宏观功能与微观机理的结合,目前着重于开发微观信息

续表 1-3

比较方面	传统方法	现代研究方法
主要依据 与原理	实践数据、统计规律 相似模型实验 近似解析	利用计算流体力学、计算传热传质学、计算燃烧学、冶金反应工程学、人工智能方法等建立数学模型,用实测或生产统计数据验证
模型特点	投入产出式“黑箱模型”	半理论半经验“灰色模型” 人工智能模型
信息特点	空间平均,时间平均 某些监控点瞬时数据	场信息(如流场、温度场、浓度场等) 动态或准动态信息
手段	简易计算工具	仿真软件与计算机(仿真系统) 各种检测元件,在线传感器等(监测系统) 人工神经网络(辅助分析综合系统)

1.4 有色冶金炉窑数学模型及一般建模方法

1.4.1 现代有色冶金炉窑数学模型的种类^[3~5]

从应用的角度,凡是反映某过程或某生产设备中主控变量与各种操作变量之间定量关系的方程、图表、数列等都可称之为该过程或设备的数学模型。由于建立这种关系的途径、方法以及模型的数学物理特点和使用功能的不同,数学模型的种类也可以是多种多样的,其分类方法至今并无统一的规定与惯例,可根据研究者或使用者的视角重点不同,出现不同的命名与叫法,例如可以针对研究对象的行业领域与模型的具体用途建立起诸如国家、地区或企业的能源模型、污染物排放模型、某设备运转处理能力模型、使用寿命模型、产品的能耗模型、有价元素回收率模型等等。也可以按模型变量的变化态势特点不同分为线性模型、抛物线模型、正态