

# 金属初级加工过程的 数学和物理模型

J. 舍克里 J. W. 埃文斯 J. K. 布里马科姆 著  
蔡开科 译



冶金工业出版社

# 金属初级加工过程的 数学和物理模型

J. 舍克里

J.W.埃文斯      著

J.K.布里马科姆

蔡开科    译

曲英    刘新华    校

冶金工业出版社

(京) 新登字036号

## 内 容 提 要

本书原文版“The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations” (1988年出版) 由美国麻省理工学院的J.舍克里 (Szekely)、加利福尼亚大学的J.W.埃文斯 (Evans) 和加拿大不列颠哥伦比亚大学的J.K.布里马科姆 (Brimacombe) 三位知名学者所著。

冶金过程的数学模拟和物理模拟是优化现有冶金工艺和设备, 进而改进现有工艺和设备, 提高生产效率和产品质量的非常有效的科学方法。国内外正对其进行广泛研究, 并且已在生产应用方面取得了显著效果。

本书主要内容有数学模型原理; 冶金过程物理模型; 测量技术; 固-液反应器模型; 钢包冶金操作; 连续铸钢模型; 铝电解槽模型等。本书可供冶金行业科研、工程技术人员学习和应用, 也可作为冶金院校的教学参考书。

## 金属初级加工过程的数学和物理模型

J. 舍克里

J.W. 埃文斯 著

J.K. 布里马科姆

蔡开科 译 曲英 刘新华 校

\*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街属祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北省阜城县印刷厂印刷

\*

787×1092 1/32 印张 9.125 字数 197千字

1992年2月第一版 1992年2月第一次印刷

印数 90,001~1,700册

ISBN7-5021-1008-2

TF·233 定价7.50元

## 译者的话

现代技术的发展，对材料质量的要求愈来愈高，促使金属（如钢、铝、铜）的生产工艺发生了深刻的变革。就钢生产领域来说，铁水三脱（脱硫、磷、硅）处理、顶底复吹转炉、炉外精炼、连续铸钢等新技术的开发与应用，使钢的质量得到进一步提高，并且可以降低生产成本，节约能源，给钢铁工业带来巨大的经济效益。

一项新的工艺技术在生产上的成功运用，都要经过实验室研究、中间试验和工业应用这三个阶段。只有对工艺过程中传热、传质和流动等基本现象的原理和相互关系有较清楚地认识，才能设计出正确的冶金反应器，制订出合理的工艺对策，实现过程优化以得到高的生产效率和良好的产品质量。现已确认，应用数学模型和物理模拟的方法是达到上述目的的一个有效途径。

数学模型在工业上成功应用的一个例子，就是把传热偏微分方程用于模拟连续铸钢的凝固过程。在60年代，人们的主要精力是用解析法来求解传热偏微分方程，以得到凝固工艺参数之间的定量关系。在70年代，人们用数值法并使用计算机来模拟连铸坯凝固过程取得了很大的成功，这已成为现代连铸机自动控制的理论基础。

从70年代以来，国外学者对冶金过程的数学模型和物理模拟做了许多研究工作，发表了大量的文献，应用在生产上取得了明显效果。国内学者也陆续开展了这方面的研究工作，取得了不少的进展，出版了一些文集。但迄今为止，还

没有一本较为系统介绍数学和物理模型的书。

本书系统的介绍了数学模型和物理模拟的基本原理和方法，以及初炼金属过程的工艺改进、过程优化和新工艺的开发等方面的参数选择和应用效果等。本书包括以下内容：

——数学模型原理

——物理模拟原理

——测试技术的应用

——工业应用实例如流—固相反应器、喷射冶金、连续铸钢和铝电解等。

译者在加拿大麦吉尔 (McGill) 大学工作进修期间将此书译完。全部译稿分别由曲英教授、刘新华副教授审校。对此，译者表示衷心感谢。

希望本书对从事冶金生产科研的工程技术人员、高等学校的教师和研究生有所裨益。

限于译者的理论知识和外文水平，书中会有许多不足和错误之处，恳请读者批评指正。

蔡开科

于北京科技大学

1991.10.

## 前 言

近年来,数学模型和物理模拟已成为开发新工艺和过程优化研究的有效工具之一。发表的有关文献迅速增加,但是迄今还没有出版一本关于模型的综合性专著。

写本书的目的是总结我们在模型领域内所积累的经验 and 资料,它包括数学模型和物理模拟以及有限的中间试验研究。我们确认上述三方面是研究过程问题的完整途径。

在可能条件下,我们力图通过具体运用来阐明模拟的基本原理。本书的后半部分实际上就是对几个特殊加工系统的详细讨论。

在完成本书时,作者感谢从事模拟研究工作的过去和现在的学生及同事们的帮助和鼓励。限于篇幅,在此不能将他们一一列出,但我们特别要感谢乔德哈赖博士(M.Choudhary)、张博士(C.W.Chang)、索恩教授(H.Y.Sohn)、莫罗教授(R.Moreau)、福特尔教授(Y.Fautrelle)、维夫教授(C.Vive)、埃尔·卡达教授(N.El.Kaddah)、林克先生(J.W.Hlinka)、萨马拉斯卡拉教授(I.Samarasekara)、巴尔博士(P.Barr)、里查德博士(J.Richard)、麦凯先生(J.J.Mckay)等提供的有效帮助。

目前,模拟研究是一个很活跃的领域。由于模拟方法的低成本和高效率,特别是由于更高效率的计算机和软件包的应用,预计在近期它还将有大的发展。基于这个原因,模型的应用将比我们现在所能列举的事例更成熟更先进。然而,

其基本原理是一致的。

J. 舍克里 马萨诸塞，剑桥

J.W. 埃文斯 加利福尼亚，伯克利

J.K. 布里马科姆 不列颠哥伦比亚，温哥华

一九八七年五月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>1 引 言</b> .....          | 1  |
| 1.1 数学和物理模型概述.....          | 1  |
| 1.2 数学模型.....               | 4  |
| 1.2.1 数学模型的类型.....          | 4  |
| 1.3 物理模型.....               | 8  |
| 1.4 中间试验装置.....             | 9  |
| 1.5 数学模型、物理模型和中间试验之间关系..... | 10 |
| 参考文献.....                   | 11 |
| <b>2 数学模型的原理</b> .....      | 12 |
| 2.1 数学模型的类型.....            | 12 |
| 2.1.1 基础理论模型或机理模型.....      | 13 |
| 2.1.2 经验模型.....             | 13 |
| 2.1.3 群体一衡算模型.....          | 14 |
| 2.2 数学模型在过程解析和工艺开发中的作用..... | 15 |
| 2.3 数学模型的开发过程.....          | 16 |
| 2.3.1 准备工作.....             | 16 |
| 2.3.2 建立数学方程.....           | 17 |
| 2.3.3 方程的求解.....            | 38 |
| 2.3.4 模型的识别.....            | 54 |
| 2.3.5 模型的应用.....            | 55 |
| 2.4 数学模型的应用实例.....          | 55 |
| 2.4.1 热轧钢坯中温度分布.....        | 55 |
| 2.4.2 AOD炉冶炼不锈钢脱碳速率.....    | 63 |
| 2.4.3 金属液流对气体的卷入.....       | 67 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 2.5 结论 .....               | 70         |
| 参考文献 .....                 | 71         |
| <b>3 金属加工过程的物理模型 .....</b> | <b>74</b>  |
| 3.1 物理模型的定义和类型 .....       | 74         |
| 3.2 精确物理模型的建立 .....        | 76         |
| 3.2.1 几何相似 .....           | 76         |
| 3.2.2 运动相似 .....           | 77         |
| 3.2.3 动力相似 .....           | 78         |
| 3.2.4 热相似 .....            | 78         |
| 3.2.5 化学相似 .....           | 78         |
| 3.2.6 保证相似性的适用技术 .....     | 80         |
| 3.3 半精确模型物理现象的研究 .....     | 97         |
| 3.4 探索性的初步研究 .....         | 101        |
| 3.5 结论 .....               | 102        |
| 参考文献 .....                 | 103        |
| <b>4 测量技术的评述 .....</b>     | <b>105</b> |
| 4.1 模型流体速度和压力的测量技术 .....   | 106        |
| 4.1.1 热线和热膜测速仪 .....       | 110        |
| 4.1.2 电磁速度测量 .....         | 113        |
| 4.1.3 多普勒激光测速仪 .....       | 116        |
| 4.1.4 使用传感探头的速度测量 .....    | 119        |
| 4.2 液体金属、熔渣和熔盐的速度测量 .....  | 120        |
| 4.2.1 表面速度测量 .....         | 120        |
| 4.2.2 传感探头 .....           | 120        |
| 4.2.3 测量溶解速率以确定速度 .....    | 121        |
| 4.2.4 示踪研究 .....           | 123        |
| 4.3 温度测量 .....             | 126        |
| 4.3.1 热电偶 .....            | 126        |

|          |                           |            |
|----------|---------------------------|------------|
| 4.3.2    | 气动高温计和文杜里高温计 .....        | 126        |
| 4.3.3    | 光学高温计 .....               | 126        |
| 4.3.4    | 其他温度测量技术 .....            | 130        |
| 4.4      | 反应速率的测量 .....             | 131        |
| 4.4.1    | 质量分析仪 .....               | 131        |
| 4.4.2    | 扭转技术 .....                | 133        |
| 4.4.3    | 液—固反应 .....               | 134        |
| 4.5      | 结论 .....                  | 135        |
|          | 参考文献 .....                | 136        |
| <b>5</b> | <b>流—固相反应器的模型</b> .....   | <b>140</b> |
| 5.1      | 单一固体颗粒反应模型 .....          | 140        |
| 5.2      | 流—固相反应器的各类模型 .....        | 147        |
| 5.2.1    | 等温填充床 .....               | 147        |
| 5.2.2    | 非等温填充床 .....              | 155        |
| 5.2.3    | 不均匀颗粒度的填充床 .....          | 155        |
| 5.2.4    | 气相和固相流动在空间不均匀分布的反应器 ..... | 159        |
| 5.2.5    | 回转窑模型 .....               | 163        |
| 5.3      | 结论 .....                  | 167        |
|          | 参考文献 .....                | 168        |
| <b>6</b> | <b>钢包冶金操作</b> .....       | <b>169</b> |
| 6.1      | 气体—气泡驱动循环系统 .....         | 173        |
| 6.1.1    | 数学模型 .....                | 173        |
| 6.1.2    | 物理模型 .....                | 178        |
| 6.1.3    | 工厂规模测量 .....              | 187        |
| 6.2      | 电磁驱动流动 .....              | 191        |
| 6.2.1    | 数学模型 .....                | 191        |
| 6.2.2    | 物理模型 .....                | 194        |
| 6.3      | 其他钢包冶金操作 .....            | 200        |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 6.3.1 真空除气系统的混合 .....                      | 201        |
| 6.3.2 AOD炉作为钢包冶金的工具 .....                  | 202        |
| 6.4 讨论 .....                               | 203        |
| 6.4.1 加入合金的弥散 .....                        | 204        |
| 6.4.2 反应动力学 .....                          | 204        |
| 6.4.3 夹杂物的聚合 .....                         | 205        |
| 6.4.4 钢包炉的加热 .....                         | 205        |
| 6.4.5 容器壁耐火材料的浸蚀 .....                     | 206        |
| 6.5 结论 .....                               | 206        |
| 参考文献 .....                                 | 207        |
| <b>7 连续铸钢模型 .....</b>                      | <b>210</b> |
| 7.1 中间包和结晶器的物理模型 .....                     | 211        |
| 7.2 凝固过程铸坯传热数学模型 .....                     | 216        |
| 7.2.1 数学方程的描述 .....                        | 218        |
| 7.2.2 数学解 .....                            | 221        |
| 7.2.3 模型的输入和输出量 .....                      | 222        |
| 7.2.4 计算与测量结果比较 .....                      | 223        |
| 7.2.5 数学模型计算 .....                         | 224        |
| 7.3 结晶器数学模型 .....                          | 230        |
| 7.3.1 数学方程式 .....                          | 230        |
| 7.3.2 模型验证 .....                           | 233        |
| 7.3.3 模型应用 .....                           | 235        |
| 7.4 结论 .....                               | 239        |
| 参考文献 .....                                 | 240        |
| <b>8 霍尔—赫劳尔特 (Hall—Heroult) 铝电解槽 .....</b> | <b>243</b> |
| 8.1 铝电解槽 .....                             | 244        |
| 8.2 铝电解槽数学模型评述 .....                       | 247        |
| 8.3 铝电解槽热模型 .....                          | 250        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 8.4 铝电解槽的流体流动与界面形状模型..... | 257 |
| 8.5 铝电解槽物理模型 .....        | 265 |
| 8.6 结论 .....              | 275 |
| 参考文献 .....                | 275 |

# 1 引 言

本书目的是介绍为金属初级加工操作所研制的数学和物理模型技术。实践证明，数学和物理模型技术不仅对过程的诊断（如发现故障、改善工艺和过程优化），而且对新工艺的开发都是有效的。应用模拟技术解决冶金过程的特定问题已有许多文献报道。但目前还没有一本系统的书清楚地论述在冶金过程中使用数学和物理模型的基本原理。我们的方法是先阐述一般原理，然后举例说明原理的应用。

本书分为五个主要部分：数学和物理模型概述；数学模型原理；物理模型原理；测量技术的评述；工业应用实例，包括连续铸钢、铝电解槽和流—固反应器。

## 1.1 数学和物理模型概述

1980年，在金属和材料领域曾被预言将发生深刻的工艺变革，这主要是由于两个方面激烈的竞争压力：发达国家、发展中国家和第三世界各国之间的商品（如钢、铝、铜）供应间的竞争；在国民经济内部不同材料之间的竞争，如铝对钢，塑料或复合材料对铝。在这两种情况下，为保持冶金产品的竞争力，首先要不断促进现有冶金工艺过程现代化和最佳化；其次，也许这一点更为重要，即继续开发新产品和新工艺。

在大多数发达国家中，金属初级加工工业面临着特殊的困难，这归因于它本身的特性，即投资能源和劳动力的消耗巨大，而得到的价值增殖较小。如表1-1所指出的：某些金

属材料的投资成本、操作成本、期望的销售价格和实际销售价格的典型数值。

**表 1-1 金属生产装备投资成本、操作成本、要求  
销售价格和实际销售价格比较<sup>(1)</sup>**

| 金 属   | 投资成本<br>美元/(年·t) | 操作成本<br>美元/t (不包<br>含折旧) | 期望销售价<br>美元/t (含收<br>回投资和税) | 实际销售价<br>美元/t |
|-------|------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|
| 铝     | 3500             | 1170                     | 1872                        | 1760          |
| 铜     | 10500            | 1690                     | 3790                        | 1870          |
| 钢(板材) | 1500             | 400                      | 720                         | 450           |
| 镍     | 18000            | 3750                     | 7350                        | 6160          |
| 铅     | 2100             | 343                      | 763                         | 840           |
| 锌     | 2300             | 600                      | 1060                        | 840           |

因为金属市场价格在不断波动,表1-1仅是一个粗略的概念。然而此表还是很有指导意义的,它指出所有的实际销售价都低于所期望的销售价格(此价格包括必需的投资折旧费和合理的利润)。这就意味着在大多数发展中国家,使用现行的生产工艺建设新的工厂是不值得的,这点是不需要争论的。

因此,我们必须根本改变生产和加工金属材料的方法,进行大量的研究和开发探索,以便改善现有操作技术,更重要的在于开发新产品和新工艺。这对于工业企业继续创造财富和更好地为社会服务是至关重要的。高的单位劳动生产率、自动化和机器人化是这种新的探索中的关键内容。

显然,人们进行这种技术开发的时间是很紧迫的。因此,传统的技术不得不让位给快速、成本更低的新技术。在

本书中将要讨论的数学和物理模型，在帮助完成所需要的技术变革方面具有巨大的潜力。

此外，除了工艺变革的需要促进数学和物理模型的发展外（包括硬件和各种软件包），作为低成本的计算工具，模型也具有强大的吸引力，如图1-1所示。



图 1-1 工艺进步和工业需要推进数学模型发展

如图1-2所示，使用数字计算机完成一次计算的 成本在过去十年内有明显的下降，这种趋势还会继续下去。随着时间的推移，数学模型将会逐渐成为任何工艺开发研究所必不可少的低成本工具。

本书所阐述的冶金过程的基本原理，同样的概念也可应用于材料加工系统。

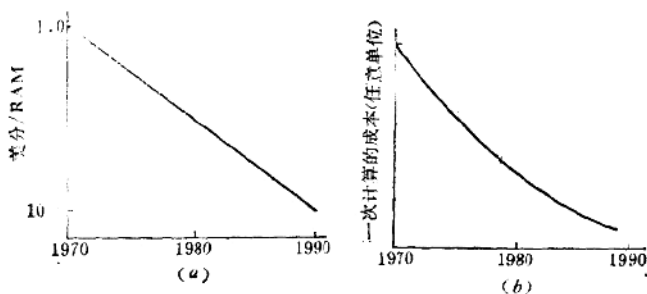


图 1-2

a—每一单位RAM（随机存取器的存储单元）的成本（美分）的变化； b—计算一次成本的演变（任意单位）

## 1.2 数学模型

一般来说, 数学模型是由一组代数或微分方程构成, 它定量代表一个过程或一个过程的某些特点。数学模型可以表示钢包内钢水浇注完所需时间或钢锭凝固所需时间的关系式。此外, 数学模型可以估算碱性氧气转炉吹炼一炉钢所需吹入的总氧气量, 或高炉中置换一定数量的焦炭所需要的喷油率。

### 1.2.1 数学模型的类型

数学模型可分为三个主要类型: 理论模型也可叫机理模型; 半经验模型; 收入—支出型“黑箱”模型。

理论模型由基本的物理定律导出, 含有少量的经验值或推断值。对于某些简单的物理状态, 可以建立完全基础性的数学模型, 它们大多由偏微分方程和合适边界条件组成, 可以用数值法求解。

半经验模型是根据物理定律但加入了一定量的经验关系, 这是因为缺乏某些基础数据, 或者模型方程很复杂使其求解困难。

收入—支出型“黑箱”模型不是根据物理定律, 而是反映过程的关键变量之间总的经验关系。这种相对简单的黑箱模型对过程控制是有益的。

这三种模型之间的差别可举以下例子说明, 假定一个半径为  $R$  的球形金属体, 通过辐射向空气中传热, 从开始 ( $t=0$ ) 的温度  $T_i$  降到  $T_f$  (图1-3), 球体的温度与时间关系可由以下偏微分方程表示:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

$$t=0, \quad T=T_i \quad (2)$$

$$r=0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$r=R, \quad -k \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_c^4) \quad (4)$$

式中  $T$ ——绝对温度；

$t$ ——时间；

$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  热扩散率；

$k$ ——热导率；

$\sigma$ ——斯梯芬-玻耳兹曼常数；

$\varepsilon$ ——表面的黑度。

这个方程组可用数值法求解〔2〕。

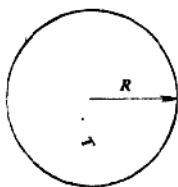


图 1-3 球体辐射传热

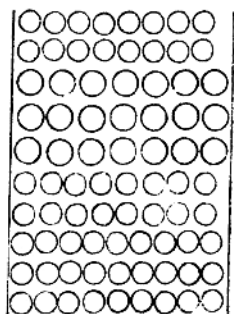


图 1-4 流化床系统简图

现在看一下如图 1-4 的情况。流化床中的球体与器壁进行辐射热交换。为了讨论方便，我们设定墙壁温度为  $T_c$ ，球体开始温度为  $T_i$ ，最终可得偏微分方程：