

炼钢中的 计算流体力学

李宝宽 赫冀成 编著



冶金工业出版社

炼钢中的计算流体力学

李宝宽 赫冀成 编著

冶金工业出版社

1998

内 容 简 介

本书着重阐述了炼钢过程中流体流动现象的数值计算方法。全书分三部分,即流动理论、数值方法和应用技术。前三章介绍了描述流体流动现象的基本方程和湍流模型。第四至第七章介绍了基本的计算流体力学方法,其中以压力修正法为主,阐述了流体流动方程的离散化方法、迭代算法和涉及的其他相关问题。第八至第十一章介绍了计算流体力学方法在模拟炼钢中传输现象的应用技术,包括复杂装置的处理、与电磁场的耦合及多相流动模拟等。

本书可作为冶金、化工和热能等专业的研究生、高年级本科生的教学用书,也可作为从事此方面研究的科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

炼钢中的计算流体力学/李宝宽,赫冀成著.-北京:

冶金工业出版社,1998.4

ISBN 7-5024-2184-X

I. 炼… II. ①李…②赫… III. 计算流体力学-应用

炼钢 IV. TF701.2

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第07661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:张卫 李梅 美术编辑:熊晓梅 责任校对:符燕蓉

北京昌平新兴胶印厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1998年4月 第1版,1998年4月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.875印张; 235千字; 270页; 1-1000册

18.00元

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

钢的冶炼是在熔融状态下进行的，故钢液的流动现象具有特别重要的意义。钢液是高温熔体，在其流动的同时也伴随着热量的传递，故可称钢液为“热流体”。普通流体力学的研究方法可以用于研究热流体流动现象，数值计算方法是可利用的最重要的方法之一。炼钢中的热流体流动现象又具有不同于普通流体力学的特点。因而，如何利用普通流体力学的计算方法模拟炼钢中的热流体流动现象是本书的特色。

冶金学在经历了热力学、动力学和反应工程学阶段后，现已发展到过程模拟阶段，即对冶炼的全过程进行直接模拟。过程模拟是目前世界范围内冶金学界最活跃的研究领域之一。建立数学模型是进行过程模拟的前提，因流体流动过程往往是制约钢的冶炼效率提高的“瓶颈”，故描述流动过程的模型是构成全过程模型的基础，而且全过程模型方程的求解方法也是以流动方程为核心而展开的。

要正确地模拟炼钢过程中的复杂现象，不但要深刻了解现象的物理本质，而且还要掌握数值计算方法，通晓计算机技术。

本书大量地引用了作者李宝宽在攻读博士及其以后工作期间的研究结果，给出的算例几乎都是作者亲自计算的。这些工作都是在国家自然科学基金的支持下完成的，在此对国家自然科学基金的支持表示感谢。

感谢自己的两位导师陆钟武院士和赫冀成教授，是他们把我引入冶金过程数值模拟这个富有挑战性而又引人入胜的研究领域。

由于作者水平有限，书中不妥之处，敬请各位读者提出宝贵意见。

李宝宽

1997年12月于沈阳

5400166

目 录

1 绪论	(1)
1.1 热流体流动过程的重要性	(1)
1.2 研究方法	(3)
1.2.1 实验研究	(3)
1.2.2 理论分析	(3)
1.2.3 数学模拟	(3)
1.2.4 数学模拟的本质	(4)
1.3 本书的目的	(5)
参考文献	(5)
2 描述热流体流动现象的基本方程	(6)
2.1 问题的分类及数学表达	(6)
2.1.1 变量 ρ	(8)
2.1.2 变量 Γq	(8)
2.1.3 源项 $S Q$	(8)
2.1.4 两相流问题	(9)
2.2 适定性问题和求解条件	(9)
2.3 正交曲线坐标系中的基本量	(10)
2.3.1 一般正交曲线坐标系	(10)
2.3.2 正交曲线坐标系中的运算子	(12)
2.4 正交曲线坐标系中的基本方程	(15)
2.4.1 连续性方程	(15)
2.4.2 运动方程	(15)
2.4.3 能量方程	(16)
2.5 正交曲线坐标系下规范型流动方程	(17)
2.5.1 规范型连续性方程	(17)

2.5.2	Naiver-Stokes 方程.....	(17)
2.5.3	$k-\epsilon$ 双方程湍流模型.....	(20)
2.5.4	温度场的数学描述.....	(21)
2.5.5	浓度场的数学描述.....	(21)
	参考文献.....	(22)
3	湍流模型理论.....	(23)
3.1	引言.....	(23)
3.2	模拟的原则.....	(24)
3.3	雷诺应力模型(微分模型, RSM).....	(25)
3.3.1	雷诺应力方程与 k 方程的模型.....	(25)
3.3.2	ϵ 方程的模型.....	(31)
3.3.3	$\overline{u_i\theta}$ 方程的模型.....	(35)
3.4	代数应力的模型($k-\epsilon-A$ 模型, ASM).....	(37)
3.5	二方程模型涡粘性模型, $k-\epsilon-E$	(39)
3.5.1	Jones &Launder (1972) 模型.....	(40)
3.5.2	RNG $k-\epsilon$ 湍流模型.....	(41)
3.6	一方程模型(k 方程模型).....	(42)
3.7	双尺度二阶湍流模型.....	(42)
3.8	湍流模型评价.....	(44)
	参考文献.....	(45)
4	区域离散化及建立离散方程的方法.....	(46)
4.1	热流体流动现象控制方程的守恒性质.....	(46)
4.2	空间区域的离散化方法.....	(48)
4.3	泰勒(Taylor)级数展开及多项式拟合法.....	(52)
4.4	控制容积积分法及平衡法.....	(59)
4.5	差分方程的相容性、收敛性及稳定性.....	(63)
4.6	离散方程的守恒特性.....	(68)
	参考文献.....	(69)
5	对流-扩散方程的差分格式.....	(70)
5.1	中心差分与迎风差分.....	(70)

5.2	混合格式与乘方格式	(76)
5.3	五种三点格式系数特性的分析	(81)
5.4	二阶迎风格式与 QUICK (奎克) 格式	(87)
5.5	正交曲线坐标系下三维对流-扩散差分方程的推导	(92)
5.5.1	控制方程的积分形式	(92)
5.5.2	控制方程的差分形式	(93)
	参考文献	(97)
6	求解热流体流动问题的压力修正法	(98)
6.1	流场控制方程及数值求解中的困难	(98)
6.2	交错网格及动量方程的离散	(103)
6.3	求解 Navier-Stokes 方程的压力修正算法	(107)
6.4	SIMPLE 算法的计算步骤	(111)
6.5	SIMPLE 算法的讨论	(112)
6.6	SIMPLE 算法的发展与改进	(118)
6.6.1	SIMPLER 算法	(118)
6.6.2	SIMPLEST 算法	(120)
6.6.3	SIMPLEC 算法	(121)
6.6.4	SIMPLE 的戴特 (Date) 修正方案	(122)
6.7	边界条件	(125)
6.7.1	壁面速度边界条件	(125)
6.7.2	壁面函数	(125)
6.7.3	其他标量的边界条件	(127)
6.7.4	流动边界	(128)
6.8	求解代数方程的迭代法	(129)
6.8.1	TDMA 算法	(129)
6.8.2	点迭代法	(131)
6.8.3	块迭代法	(133)
6.8.4	交替方向块迭代法	(134)

6.8.5	加速迭代解法收敛速度的块修正技术...	(135)
	参考文献.....	(138)
7	求解热流体流动问题的其他方法.....	(139)
7.1	强制对流的涡量-流函数法.....	(139)
7.2	涡量-流函数法边界条件的确定.....	(143)
7.2.1	入口边界.....	(143)
7.2.2	中心线上.....	(144)
7.2.3	固体边界.....	(144)
7.2.4	出口边界.....	(146)
7.2.5	尖角点上的 ω 值.....	(147)
7.3	自然对流换热过程的涡量-流函数法计算.....	(148)
7.3.1	数学模型	(148)
7.4	自由边界流体流动的处理方法.....	(152)
	参考文献.....	(161)
8	复杂几何装置的处理方法.....	(162)
8.1	阶梯网格法.....	(162)
8.2	利用阶梯网格法处理电弧炉熔池倾斜壁.....	(163)
8.2.1	数学模型	(164)
8.2.2	计算方法	(165)
8.2.3	物理模型	(165)
8.2.4	结果与讨论.....	(166)
8.3	保角变换法.....	(170)
8.3.1	保角变换的基本概念	(170)
8.3.2	单位圆中心点变换到任意圆的偏心点	(172)
8.4	适体坐标的网格生成.....	(174)
8.4.1	微分方程法生成适体坐标原理.....	(175)
8.4.2	控制方程向计算平面转换的基本关系式	(176)
8.4.3	控制方程的离散及求解.....	(178)
8.4.4	采用偏微分方程法进行网格坐标变换的实	

例	(180)
8.5 计算平面上的 SIMPLE 算法	(181)
8.5.1 控制方程的离散	(182)
8.5.2 计算平面的 SIMPLE 算法	(184)
8.6 利用适体坐标网格计算底吹钢包内钢液流场	(187)
8.7 空度技术在模拟复杂几何装置内流动现象的应 用	(192)
8.7.1 空度的概念	(192)
8.7.2 实施方法	(193)
8.7.3 算例	(194)
参考文献	(200)
9 电磁流体力学在连铸中的应用	(201)
9.1 电磁力的作用	(202)
9.2 连铸结晶器电磁制动过程的数学模型	(203)
9.2.1 磁场的计算	(204)
9.2.2 流场的计算	(206)
9.2.3 电磁力的计算	(206)
9.2.4 边界条件及算法	(207)
9.2.5 冲击强度的确定	(207)
9.3 区域制动时结晶器内流场模拟	(208)
9.4 电磁制动法缩短钢坯过渡段的数值模拟	(210)
9.5 双区制动对板坯连铸结晶器流场的影响	(214)
9.6 薄板坯连铸结晶器内钢液流场电磁制动的模拟研 究	(219)
9.6.1 数学模型	(219)
9.6.2 物理模型实验	(221)
9.6.3 数值模拟结果	(222)
参考文献	(226)
10 多相流动的数值模拟	(228)
10.1 多流体模型	(229)

10.2	底吹钢包内气液两相流的数值模拟.....	(232)
10.2.1	气液两相流数学模型.....	(232)
10.2.2	初始条件和边界条件.....	(236)
10.2.3	数值计算步骤.....	(239)
10.2.4	结果与讨论.....	(239)
10.3	均相流模型.....	(246)
10.4	粒子在流体中的运动.....	(250)
10.4.1	粒子运动轨迹方程.....	(250)
10.4.2	铁锰合金颗粒在底吹钢包内的运动分析	(251)
10.4.3	双区制动情况下板坯连铸结晶器内夹杂物 运动的轨迹.....	(254)
	参考文献.....	(256)
11	计算流体力学在炼钢中的应用和发展.....	(258)
11.1	引言.....	(258)
11.2	计算流体力学应用于炼钢中所面临的问题...	(259)
11.2.1	边界条件.....	(260)
11.2.2	模拟软件.....	(262)
11.2.3	材料的物性数据.....	(262)
11.3	计算流体力学在炼钢中的应用和发展概况...	(263)
11.3.1	钢包精炼过程数学模拟.....	(263)
11.3.2	连铸结晶器过程数学模拟.....	(265)
11.4	计算流体力学的作用.....	(266)
11.5	结束语.....	(267)
	参考文献.....	(268)

1 绪 论

1.1 热流体流动过程的重要性

大量的工业过程，特别是冶金及化工等过程是由装置内的流体流动、传热、传质、化学反应以及相变等相关现象耦合而形成的。一旦反应系确定后，大量的研究工作就是如何设定其中的流动和传热传质条件以促进化学反应或其他加工过程的完成。在众多的实际问题中，可以观察到热流体流动过程在起着重要的作用，例如，图1.1所示的转炉去碳过程，利用顶底复吹强化传输

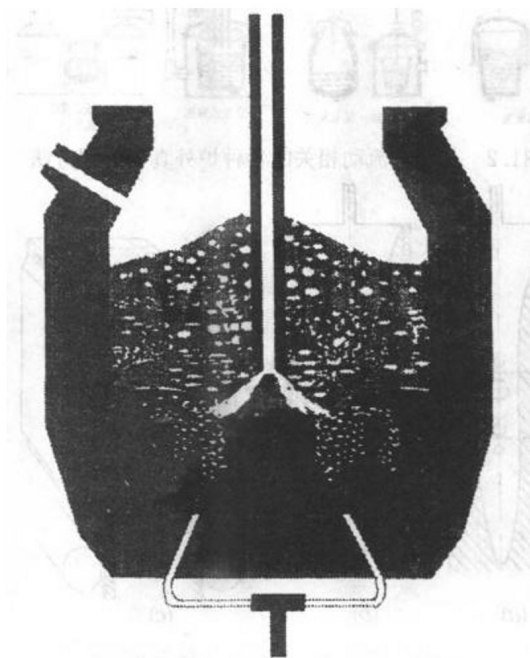


图1.1 气-金-渣多相流体共存的BOF转炉示意图

过程，造成快速反应的环境；图1.2所列举的炉外精炼装置内，利用喷气搅拌或电磁搅拌来混均温度和成分，去除夹杂物；在铸锭过程中，流动和传热过程决定产品质量，图1.3是利用电磁搅拌改变结晶器内钢液流场的例子。热流体流动现象几乎遍及工业过程的各个方面。

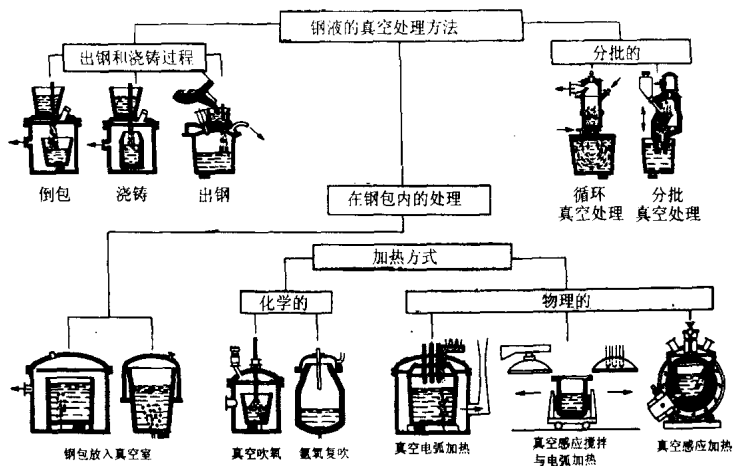


图1.2 与钢液流动相关的各种炉外真空处理方法

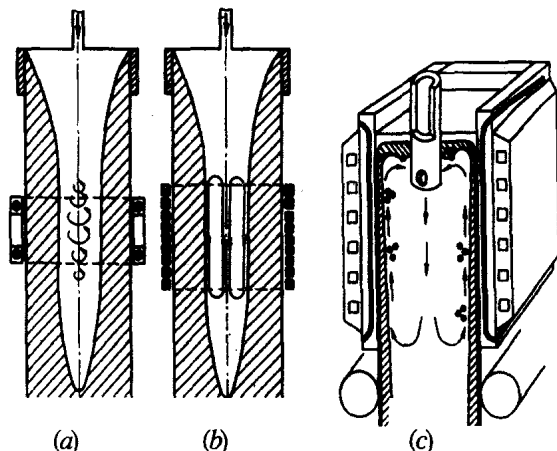


图1.3 结晶器内电磁力搅拌正在凝固的钢液例子

a—二冷区水平旋转搅拌 b—二冷区垂直移动搅拌；c—结晶器内的电磁搅拌

1.2 研究方法

就研究方法而言, 传统的手段是模型实验(物理的或化学的)、现场实测和理论分析。数学模拟是近年来发展起来的一种新的分析热流体流动现象的方法。

1.2.1 实验研究

一个物理过程的最可靠的数据资料往往要由实验测量得到, 采用全比例设备进行研究, 可以预测由它完全复制的同类设备在相同条件下运行的情况。但在大多数情况下, 这种全比例实验是极其昂贵的, 而且往往是不可能的。特别是冶金过程原料条件复杂、装置庞大, 过程是在高温条件下进行, 实验室条件下无法完整地再现实际过程, 只能进行冷态、局部或单元过程的模型实验。这不仅与实际过程差别很大, 而且装置放大后的一般规律往往是无法得到的, 效果自然也就很难掌握。这种缩小尺寸的模型并不总是能模拟全比例设备的各方面特征, 像燃烧和沸腾这样一类重要特征在模型中就被忽略了。这样就进一步降低了模型试验结果的效能。应该记住, 在许多情况下还存在着测量上的严重困难, 例如, 很难准确地测量高温条件下液态金属的流速, 何况测量仪表本身也有误差。

1.2.2 理论分析

虽然许多复杂的热流体流动问题难以得出分析解, 但不能因此忽视分析解的作用。这是因为分析解的结果具有普遍性, 各种影响因素清晰可见, 同时它为检验数学模拟的准确度提供了比较依据。每当提出新的数值方法时, 常常使用这种方法计算一个分析解的问题, 通过与分析解的比较再对该方法的准确性做出评价。此外, 有时简单情况下分析解的结果可以为发展新的数值计算方法提供基础。

1.2.3 数学模拟

数学模拟出自于一个数学模型的结果, 而不是出自于一个实际的物理模型的结果。对于我们这里所要研究的物理过程, 它的

数学模型主要由一组微分方程组成。

由于计算机的发展和数值计算技术的不断成熟,利用计算机对实际过程进行数值模拟——“数值实验”的计算流体力学方法迅速发展起来。这种研究方法可以对全过程直接模拟,并能得到装置内各种变量的连续分布信息。可以广泛地设定条件对任何情况进行模拟。例如:对危险的、超越正常条件的、待开发的过程进行模拟。数值模拟可以把握设备内过程机理,对现有过程进行诊断、优化装置设计及改善操作。特别是该方法迅速、廉价、灵活、直观并易于理解,这些都是物理实验所不能实现的。

数学模拟的前提是建立数学模型和构造模型方程的算法。不能建立恰当的数学模型就不能得到有价值的结果,没有可行的数值方法甚至得不到结果。计算机不能创造信息,发展规律,它只是把人们所送入的信息按计算者所选定的规律进行处理、加工而已。但另一方面,一旦建立了实际物理问题的合理的数学模型,数学模拟又将发挥很大的作用。

总之,由于理论分析、实验研究及数学模拟各有其适用范围,把这三者巧妙结合起来可以收到互相补充、相得益彰的作用。

1.2.4 数学模拟的本质

对处于一定物理条件下的状态的估计在于给出那些控制有关过程的变量值。现在让我们来讨论一个特殊的例子。对于一个具有一定条件的转炉,完整的计算应当为我们提供在整个感兴趣的炉内空间的速度、相分率、温度以及各有关的化学组元的浓度分布;同时也应当提供在炉壁面上的摩擦切应力,热流密度以及质量流量。模拟应当说明其中每一物理量究竟是如何随着几何条件,流量以及流体物性等的变化而改变的。

1.3 本书的目的

本书主要目的是介绍一些描述炼钢过程热流体流动现象的数学模型、模型方程的求解方法及典型的模拟结果。所提供的算例结果大多数是近年来作者亲自计算的, 本书主要面对刚刚进入研究阶段的研究生、高年级本科生和从事科研工作的研究人员, 通过阅读本书, 可使他们尽快地掌握热流体流动现象的计算机模拟方法。

参 考 文 献

- 1 S. V. 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算. 张政译. 北京: 科学出版社, 1989
- 2 李宝宽, 赫冀成, 王红. 计算流体力学在冶金中的应用和发展. 中国有色金属学报, 增刊 1, 1997; 7: 47
- 3 舍克里. 冶金中的流体流动现象. 彭一川, 徐匡迪, 樊养颐译. 北京: 冶金工业出版社, 1985
- 4 B. A. 库德林. 优质钢冶炼. 董学经, 李伟立译, 北京: 冶金工业出版社, 1987

2 描述热流体流动现象的基本方程

热流体流动过程所遵循的基本规律是由物理学三大守恒定律，即质量守恒定律，动量守恒定律和能量守恒定律。这三大定律的数学描写就是热流体流动过程的基本方程组。要使这方程组封闭，还需加上辅助的物性关系，如密度、热容、粘性系数和热导率随温度和压力的变化关系等。在目前的科学技术发展条件下一般说来求不出这个方程的解析解，而且在高雷诺数条件下，模拟湍流全部特征的数值解也是不可能的。尽管如此，研究这个方程组还是具有最基本的意义，因为热流体流动过程千变万化的现象毕竟是由这个方程组所规定，而且这种研究已获得了巨大的收益。本书的全部内容实质上就是在各种具体条件下用各种不同的方法求这个方程组的解，研究解的性质。

2.1 问题的分类及数学表达

热流体流动问题按复杂性的增加可分为如下十类：

- (1) 热传导；
- (2) 受迫对流(包括开域、闭域、层流和湍流)；
- (3) 自然对流；
- (4) 受迫对流和自然对流的同时存在；
- (5) 结合传热(即同时计算固体和流体中的传热)；
- (6) 带有电场、电流和磁场影响的流动和传热；
- (7) 带有化学反应的流动和传热，其中反应可以是扩散控制，也可以是动力控制，后者可能是单步、两步或多步的；
- (8) 带有化学反应和辐射的流动和传热；
- (9) 带有化学反应和相变的两相流和传热；
- (10) 气、固和液相同时考虑的多相流动的传输。

在上述各类情况中,许多理想化的问题已由理论分析和实验方法解决了。这些研究结果可从课本、手册和技术杂志中得到。这些丰富的成果已指导涉及热流体流动问题的工程师们几十年,并将继续如此。然而,随着工业上竞争的不断加剧和新科学技术领域的涌现,要求我们更深入和更准确地分析热流体流动问题。这就需要应用更好的分析方法使得我们在解决实际问题时最大限度地减少假定和简化。因而导致研究方法逐渐从相似模拟过渡到数值模拟,从分析解过渡到积分解,最后从积分方法过渡到离散方法,如有限差分法、有限元法、有限体积法等。

在离散化方法的发展过程中,首先是发展专门的方法解决上述十类问题中的一个或几个,然后随着经验和可靠程度的增加,再发展通用性的方法解决所有问题或其中的大部分。

热流体流动方程的通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\mathbf{V}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (2-1)$$

瞬态 对流 扩散 源项

式中 ϕ 是通用变量,它可表示速度分量(u, v, w), 焓(h)或化学成分的浓度($c_1, c_2, \dots, c_n$), 等等。 Γ_{ϕ} 是交换系数,例如,在层流动量方程中是分子粘度,在热传导方程中是热导率。 S_{ϕ} 是产生 ϕ 的源(或汇),例如,在动量方程中,它包括压力梯度、重力及其他体积力项。如果调整方程2-1的各项或系数,也可用它表示热传导、辐射及电场方程。

在散度算符内的密度(ρ)和交换系数(Γ_{ϕ})代表变量的物理性质。任何物性的空间变化在离散过程中是容易解释的。在热传导问题中, ρ 因金属成分的差别而变化,例如,由多层耐火材料组成的炉墙。另一方面,在流动问题中, ρ 不能被描述成位置的函数,但却能由其他流动变量,像温度、压力和浓度等导出。由于流动方程的非线性和耦合性,因而其解具有迭代属性。下面让我们分别讨论变量 ρ 和 Γ_{ϕ} 的隐含意义。