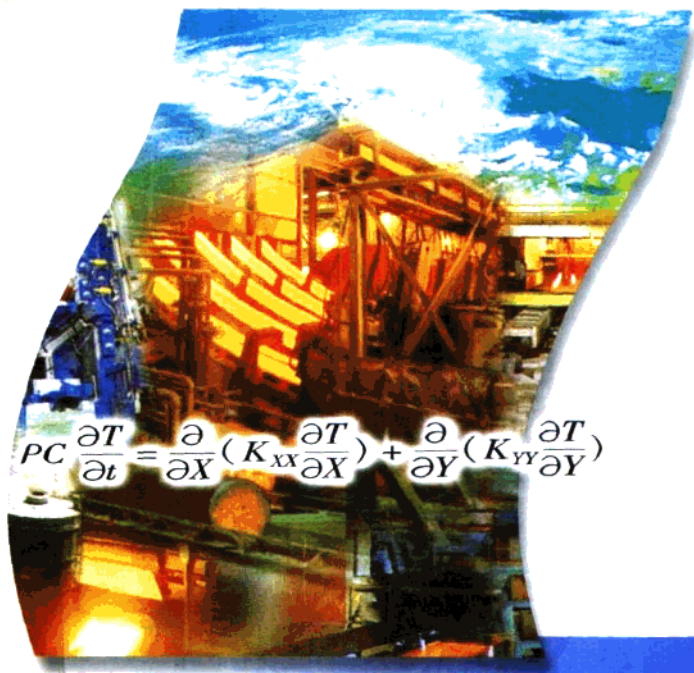


LIANZHU GUOCHENG YUANLI LI SHUZHIMO

连铸过程原理 及数值模拟

主编 闫小林



河北科学技术出版社

连铸过程原理及数值模拟

主编 闫小林

河北科学技术出版社

主 编 闫小林

副主编 韩敬远 李明东 陈 伟 曾 屹

图书在版编目 (CIP) 数据

连铸过程原理及数值模拟/闫小林著. —石家庄: 河北科学技术出版社, 2001
ISBN 7-5375-2475-0

I. 连… I. 闫… III. ①连续铸造 - 理论 ②连续铸造 - 过程 - 数值模拟 N. TG249.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 057287 号

连铸过程原理及数值模拟

主 编 闫小林

河北科学技术出版社出版发行(石家庄市和平西路新文里 8 号)
唐山新华彩印厂印刷 新华书店经销

850×1168 1/32 8.5 印张 213000 字 2001 年 8 月第 1 版
2001 年 8 月第 1 次印刷 印数:1—3000 定价:15.00 元

前 言

连续铸钢（简称连铸），经过半个世纪的发展，已成为现代化钢铁企业炼钢生产的主要方式。现在世界上不少产钢国家连铸比已达到饱和，连铸机型也基本定型化。目前人们比较关注的是连铸的改进，如全连铸、高效连铸、连铸坯热装热送、近终形连铸紧凑流程、炼钢—炉外处理—连铸组合优化的系统控制技术等，目的是全面提高连铸生产率和铸坯质量。

依据物理和化学的基本规律，利用数学的方法，在掌握连铸过程原理的基础上，建立合理的数学模型，从而对连铸全过程进行数值模拟，是实现上述改进连铸技术的一条重要途径。本书即是从这个目的出发，通过对作者多年来教学、科研成果的归纳和总结整理而形成的。

本书分四章，前三章分别讨论了连铸系统数值模拟原理及三大数学模型：热交换模型、流动模型和应力—应变模型。通过对连铸过程中热交换的分析与模拟，可以得到连铸坯凝固传热的定量计算方法；通过对连铸过程中钢液流动的分析与模拟，可以获得连铸坯液芯流场的空间分布；通过对连铸过程中铸坯应力—应变的分析与模拟，可以确定连铸坯壳及相应连铸设备的受力状态。对钢水在连铸机内凝固成型所受的传热、流动和应力等各种物理过程综合作用的分析和研究都离不开以上量化数值模拟结果来提供指导。

在连铸过程数值模拟计算方法上，传统简便的是采用有限差分法。近些年来，有限元方法得到应用。有限元单元在形状和尺

寸上分类，便于模拟任意边界并且可用于函数急剧变化的区域，使计算的准确性大大提高。随着当前各种功能强大的数值仿真软件（如 ANSYS 和 MARC 软件等）的不断问世，在软件基础上进行模拟、研究的工作正悄然起步，这不仅能节省大量编程时间，还能保证计算精度的要求。本书最后一章即以计算实例的方式，提供了利用 ANSYS 软件对连铸传热过程进行有限元模拟计算的实用方法。

本书的特点是，各章既相对独立，有利于初学者从不同角度直接切入待研究的某个单一过程；同时又互相有机联系，有利于专业人员综合分析研究各种过程的互动规律。

本书可作为有关研究人员和工程技术人员的参考书，也可作为高年级本科生选修课或研究生的教材。

在本书的形成过程中，得到了北京科技大学田乃媛教授和东北大学刘祥教授的悉心帮助，在此谨致衷心感谢。

作 者

2001 年 2 月

目 录

第一章 连铸过程中的热交换	(1)
第一节 连铸凝固传热特点	(1)
一、大传热量	(1)
二、复杂的传热机构	(4)
三、在运动中传热	(5)
第二节 连铸工艺中的热交换过程	(6)
一、钢包与中间包的热损失	(6)
(一) 热损失的分类	(6)
(二) 浇注过程中钢液的温度降	(7)
(三) 减少热损失的措施	(13)
二、结晶器热交换	(15)
(一) 结晶器传热机理	(15)
(二) 影响结晶器传热的因素	(23)
三、二冷区热交换	(31)
(一) 二冷区传热机理	(32)
(二) 影响二冷区传热的因素	(35)
(三) 二冷配水的优化	(45)
第三节 连铸热过程数学模型	(49)
一、连铸坯凝固传热数学模型的建立	(50)
(一) 导热方程	(50)
(二) 初始条件	(61)
(三) 边界条件	(62)

二、连铸坯凝固传热计算方法	(67)
(一) 解析解法	(67)
(二) 数值解法	(71)
第二章 连铸过程中钢液的流动	(86)
第一节 连铸过程中钢液的流动特性	(86)
一、不能直接观测	(86)
二、气液两相并存	(86)
三、限制射流	(87)
四、受力状态复杂	(88)
五、流动过程的模型研究方法	(88)
第二节 连铸工艺中的钢液流动过程	(93)
一、中间包内的钢液流动	(93)
(一) 中间包注流的特征	(93)
(二) 注流特征的影响因素	(94)
二、结晶器内的钢液流动	(110)
(一) 结晶器内钢液流动的特征	(110)
(二) 结晶器内钢液流动的影响因素	(112)
三、铸坯液芯的流动	(120)
(一) 过热热对流区钢液的流动特征	(120)
(二) 液芯热对流的成因	(122)
(三) 液芯热对流的速度分布	(122)
第三节 连铸钢液流动的数学模型	(128)
一、连铸坯凝固流动数学模型的建立	(128)
(一) 流动状况的简化	(129)

(二) 数学模型的控制方程	(129)
(三) 边界条件	(132)
二、数学模型的数值求解	(134)
(一) 迎风差分	(135)
(二) 交错网格	(137)
(三) 松弛迭代	(137)
(四) 压力修正	(139)
(五) 计算流程图	(142)
 第三章 连铸坯壳的应力—应变	(145)
第一节 连铸坯壳的受力特征	(145)
一、钢在高温下的力学特性	(145)
(一) 第一脆性区 (1340℃ 到固相温度)	(146)
(二) 第二脆性区 (1000℃ ~ 1200℃)	(148)
(三) 第三脆性区 (700℃ ~ 900℃)	(151)
(四) 弹性模量	(152)
(五) 收缩系数	(153)
(六) 泊松比	(154)
(七) 坯壳在高温下的非弹性状态	(154)
二、坯壳的受力分析	(158)
(一) 钢水静压力	(158)
(二) 拉坯力	(159)
(三) 矫直力 (弯曲力)	(167)
(四) 热应力	(167)
 第二节 坯壳的应力—应变状态	(168)
一、坯壳的应力状态	(169)

(一) 结晶器内坯壳的应力状态	(169)
(二) 结晶器内坯壳应力的影响因素	(173)
(三) 二冷区内坯壳的应力状态	(175)
(四) 二冷区内坯壳应力的影响因素	(177)
二、坯壳的应变状态及简易计算	(186)
(一) 弯曲矫直应变	(186)
(二) 鼓肚应变	(187)
(三) 拉坯应变	(189)
(四) 辊不对弧应变	(190)
(五) 热应变	(191)
(六) 辊夹持应变	(192)
(七) 辊弯曲应变	(192)
(八) 其他应变	(193)
(九) 总应变的合成	(193)
三、铸坯裂纹生成的判据	(194)
(一) 临界应变假说	(194)
(二) 临界应力假说	(194)
(三) 临界时间假说	(196)
 第三节 坯壳应力——应变数学模型	(198)
一、弹塑性模型	(198)
(一) 模型的建立	(199)
(二) 基本模型解的确定	(202)
(三) 实际模型解的确定	(204)
(四) 计算过程的说明	(208)
二、粘弹性模型	(209)
(一) 模型的建立	(210)
(二) 模型的求解	(212)

三、蠕变模型·····	(216)
(一) 模型的建立 ·····	(217)
(二) 模型的求解 ·····	(219)
第四章 连铸热过程仿真系统·····	(225)
第一节 仿真概述·····	(225)
一、系统仿真及其优点·····	(225)
二、系统仿真研究步骤·····	(226)
三、冶金工业中仿真技术的应用·····	(227)
四、仿真在连铸技术中的研究现状·····	(229)
第二节 ANSYS 有限元软件简介 ·····	(229)
一、ANSYS 程序概述 ·····	(230)
二、ANSYS 分析问题的步骤 ·····	(233)
三、ANSYS 热分析理论 ·····	(234)
第三节 仿真模型的构造·····	(235)
一、二维方坯连铸传热数学模型·····	(235)
(一) 导热方程 ·····	(235)
(二) 初始条件 ·····	(236)
(三) 边界条件 ·····	(236)
(四) 几个物性参数的处理 ·····	(237)
二、铸坯传热过程的计算假设·····	(238)
三、传热有限元方程的推导·····	(239)
第四节 连铸热过程仿真步骤·····	(241)

第五节 仿真结果	(243)
一、连铸热过程全程仿真实例.....	(243)
二、铸坯圆角及角部气隙的模拟.....	(248)
三、结晶器内横向气隙的模拟.....	(252)
参考文献	(257)

第一章 连铸过程中的热交换

第一节 连铸凝固传热的特点

凝固传热在整个连铸过程中贯穿始终。由钢液转变为连铸坯要通过钢包、中间包、结晶器和二冷装置等设备放出大量的热，其中包括铸坯液相区内的过热、两相区内的结晶潜热和固相区内的显热。据测算， $(180 \times 1000) \text{ mm}^2$ 的板坯以 1.2 m/min 的拉速连铸时，大约要向外放出 $7.1 \times 10^7 \text{ kJ/h}$ 的热量，相当于一座 20 t 转炉的平均热负荷。由于这种放热是伴随着凝固进行的，所以凝固传热比一般传热问题要复杂一些。

凝固过程中的传热强度，直接决定了凝固速度，制约着铸坯的形成过程和物理化学性质的均匀程度，同时还影响着连铸设备的使用寿命。认识和掌握连铸凝固传热的规律性，对于连铸机的设计，连铸工艺的制定和铸坯质量的控制都有很重要的意义。连铸凝固传热的特点主要表现在以下三个方面。

一、大传热量

根据连铸过程的热平衡，钢液凝固和冷却所放出的热量是很大的。单位质量钢液放出的热量包括：

(1) 过热量，即钢液由浇注温度冷却到液相线温度时放出的热量：

$$Q_L = C_L (T_C - T_L) \quad (1-1)$$

式中: Q_L ——过热量, kJ/kg ;

C_L ——液态钢比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

T_C ——浇注温度, $^\circ\text{C}$;

T_L ——液相线温度, $^\circ\text{C}$ 。

(2) 结晶潜热量, 即钢液结晶时放出的热量, 以 L 表示, 单位为 kJ/kg 。

(3) 显热量, 即铸坯从液相线温度冷却到室温时放出的热量:

$$Q_S = C_{LS}(T_L - T_S) + C_S(T_S - T_0) \quad (1-2)$$

式中: Q_S ——显热量, kJ/kg ;

C_{LS} ——两相区钢比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

T_S ——固相线温度, $^\circ\text{C}$;

C_S ——固态钢比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

T_0 ——室温, $^\circ\text{C}$ 。

所以, 铸坯在凝固期间, 每千克钢液放出的总热量为:

$$Q = Q_L + L + Q_S \quad (1-3)$$

式中: Q ——总热量, kJ/kg 。

温度确定以后, 上述各部分热量占总热量的比例要受到钢比热值和潜热值的制约, 而比热和潜热的大小将受到钢化学成分的影响, 其中影响较大的是钢的含碳量。

一般来说, 比热随钢含碳量增加而增加, 而潜热则随钢含碳量增加而减少, 但也不尽然。表 1-1 和表 1-2 给出了这方面的一些数据。

表 1-1 Fe-C 合金的比热值

[%C]	0.00	0.20	0.55	1.25	2.44	3.18	3.90	4.08
C_L ($\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$)	0.84	0.88	1.88	1.47	1.72	1.72	1.67	2.09
C_S ($\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$)	0.42	0.71	1.21	1.17	1.51	1.38	1.38	1.38

表 1-2 某些钢种的结晶潜热值

钢 种	化学成分 (%)								L (kJ/kg)
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	Mo	
Fe-C 合金	2.00	-	-	-	-	-	-	-	138.2
T10A	1.00	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	-	-	213.5
T8	0.80	0.22	0.20	0.10	0.10	0.10	-	-	230.3
40Cr	0.40	0.27	0.60	0.85	0.20	0.10	-	-	259.2
40	0.40	0.25	0.60	0.20	0.10	-	-	-	267.1
30CrMnTi	0.28	0.27	0.95	1.15	0.10	0.10	0.09	-	271.2
20CrNiMo	0.10	0.27	0.40	1.50	4.30	-	-	0.35	272.1
1Cr18Ni9Ti	0.10	0.50	1.00	19.00	10.0	-	0.50	-	251.2
35CrMoSi	0.35	1.25	0.95	1.25	0.10	0.10	-	-	239.1

以浇注 20 钢为例, 取 $T_C = 1560^\circ\text{C}$; $T_L = 1530^\circ\text{C}$; $T_S = 1500^\circ\text{C}$; $T_0 = 25^\circ\text{C}$; $L = 138.20\text{kJ/kg}$; $C_L = 0.88\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; $C_S = 0.71\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$, 则每千克钢在连铸终了冷却到室温时一共要放出热量为:

$$\begin{aligned}
 Q &= C_L(T_C - T_L) + L + C_{LS}(T_L - T_S) + C_S(T_S - T_0) \\
 &= 0.88 \times (1560 - 1530) + 138.20 + \frac{(0.88 + 0.71)}{2} \times \\
 &\quad (1530 - 1500) + 0.71 \times (1500 - 25) \\
 &= 1235.70(\text{kJ/kg})
 \end{aligned}$$

连铸热平衡试验表明: 由结晶器→二冷区→空冷辐射区→切割放出的热量占铸坯总放热量的 50% 以下, 这部分热量的放出过程将影响铸坯的组织结构、质量和连铸机的生产率。因此, 了解和控制该过程热量的放出规律是非常重要的。铸坯切割后冷却到室温放出的热量占铸坯总放热量的一半以上, 并且这部分热量的比例随拉坯速度的提高而增加, 如图 1-1 所示。从能量利用的角

度来说，应充分重视这部分热量的回收，所以应在提高操作水平、保证铸坯质量的前提下，尽量采取铸坯热送工艺节约能源。

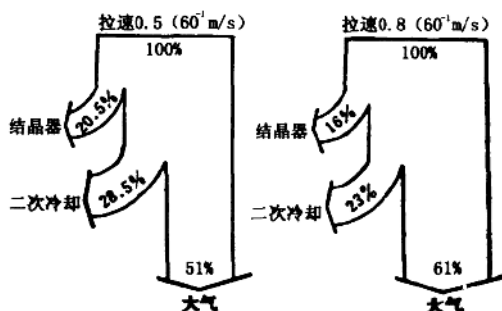


图 1—1 连铸坯的热平衡

二、复杂的传热机构

连铸凝固传热的机构比较复杂。其中传导、对流和辐射三种基本传热方式并存，属于综合传热。图 1—2 给出了铸坯在结晶器内的传热机构及温度分布示意图。

在铸坯的凝固过程中，由于钢液不断地散热降温，当温度降低到凝固温度后，开始在散热面处形成薄的凝固层。继续散热冷却，凝固层将不断地加厚，直到全部凝固为止。所以，铸坯内部的传热是由在不断加厚的凝固层中的传导传热和在不断减薄的液相中的传导与对流传热所组成的，并且在固、液交错的两相区内不断地释放出结晶潜热。

在凝固过程的初期，由于浇注时钢液的强制流动，钢液本身温度还比较高，流动性也比较好，因而内部对流传热就比较强；随着钢液本身温度的不断下降，流动性逐渐变差，其中对流传热方式就会逐渐减弱。

连铸凝固传热属于冶金熔体中凝固前沿推移动力学研究范畴。由于传热结构和钢液流动的复杂性，目前对铸坯内部封闭体系中存在的钢液紊流和层流运动以及两相区中两相流的重力迁移等所产生的传热、传质过程研究得还不够充分，很多问题只是达到定性研究的地步，进行定量计算时，往往需要对实际凝固情况做一定的简化处理。

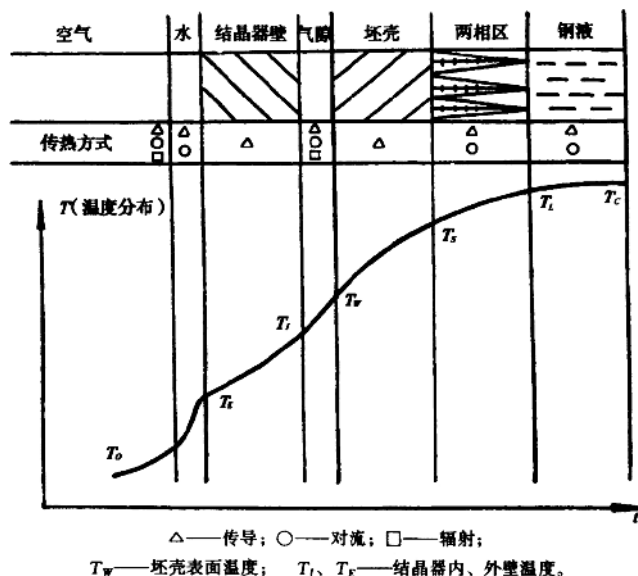


图 1—2 连铸凝固传热方式及温度分布

三、在运动中传热

由于连铸坯总要以一定的拉速运动，所以其向外传热的边界条件总是变化的，总要经历诸如结晶器壁冷、二冷区水冷和辊冷

以及空冷区气冷等不同的冷却区域。由于冷却方式、冷却介质的不同，铸坯表面散热热流的变化相当剧烈，从而使铸坯各部位，特别是外层坯壳区域的温度变化也很剧烈。据测定，小方坯连铸机中铸坯在结晶器入口处表面热流密度可达 4000kW/m^2 ，而经过 15s 运动后，表面热流密度就可降为 1000kW/m^2 左右。同时，坯壳表面温度降落可达 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ ，如此大的变化幅度和变化速度都是其他传热问题中所少见的。

第二节 连铸工艺中的热交换过程

由连铸工艺所决定，自钢包至切割机范围之内，由钢液到铸成坯所经历的热交换过程一般可划分为三个阶段（见图 1—3）：即钢包与中间包热损失阶段，结晶器热交换阶段，还有二冷区热交换阶段。各阶段的传热机构都比较复杂，而每个阶段的传热机构又有自己的特殊性，下面分别进行讨论。

一、钢包与中间包的热损失

（一）热损失的分类

一般地说，铸钢时要求钢液有一定的过热度，而连铸钢液过热度要比模铸高一些，以便补偿出钢后从钢包到中间包以及由于中间包水口直径小和浇注时间较长造成的热损失所导致的温度降落。设法减少这部分热损失，一直是连铸工艺及设备改进的重要课题。



图 1—3 连铸工艺中的热交换过程