

1934303

分类号\_\_\_\_\_ 密级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

## 学 位 论 文

### 首钢板坯连铸二冷水动态控制的模型建立与实现

作者姓名：张琳

指导教师：高宪文 教授 信息科学与工程学院

蒋学军 高工 首钢自动化信息技术有限公司研究所

申请学位级别：硕士 学科类别：专业学位

学科专业名称：控制工程

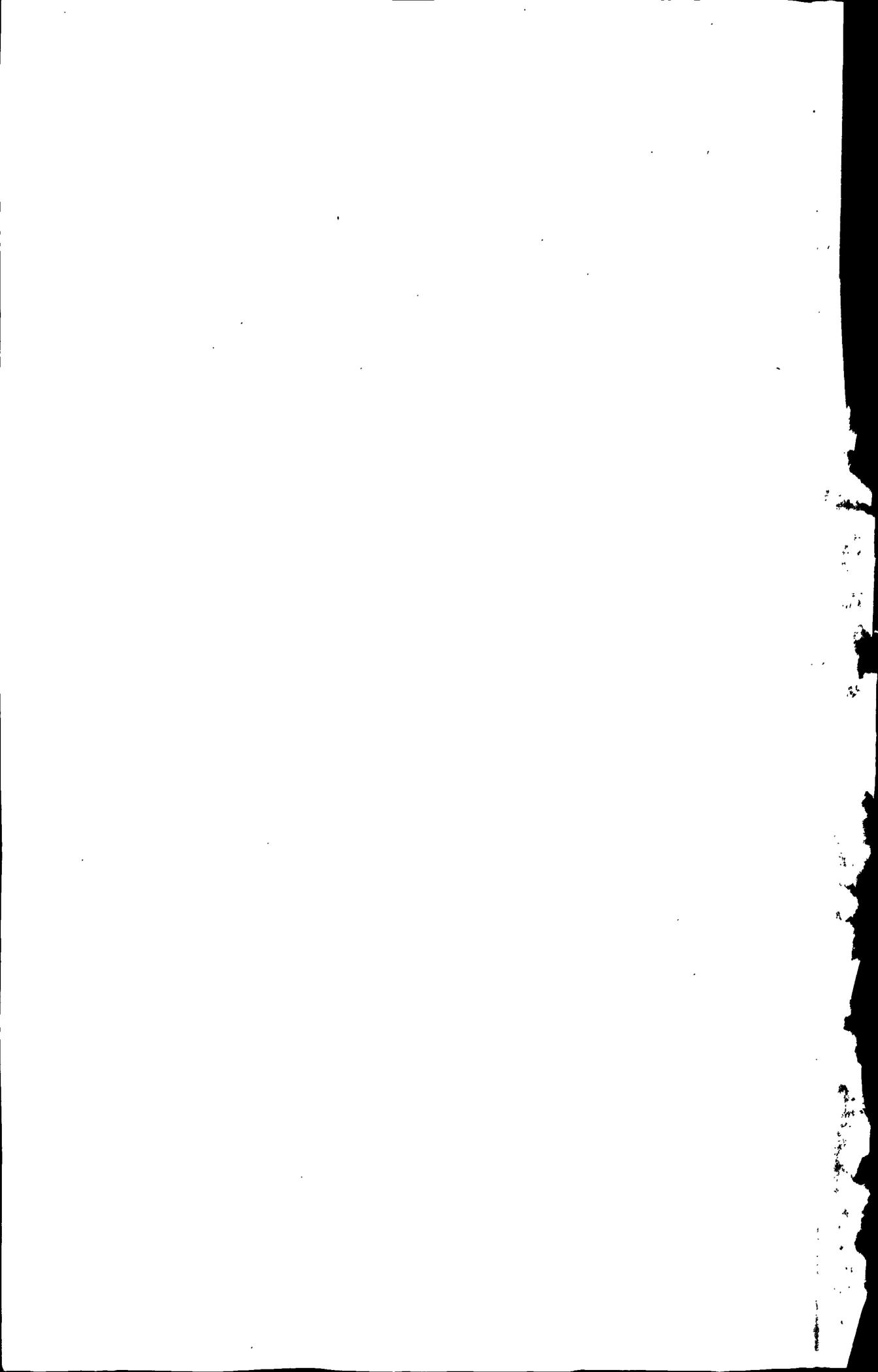
论文提交日期：2008年5月16日 论文答辩日期：2008年7月6日

学位授予日期： 答辩委员会主席：王福利

评阅人：蒋学军、胡丕俊

东北大学

2008年6月



**A Thesis in Control Engineering**



**Shougang slab continuous casting cold water on the  
dynamic control of the establishment and  
implantation of model**

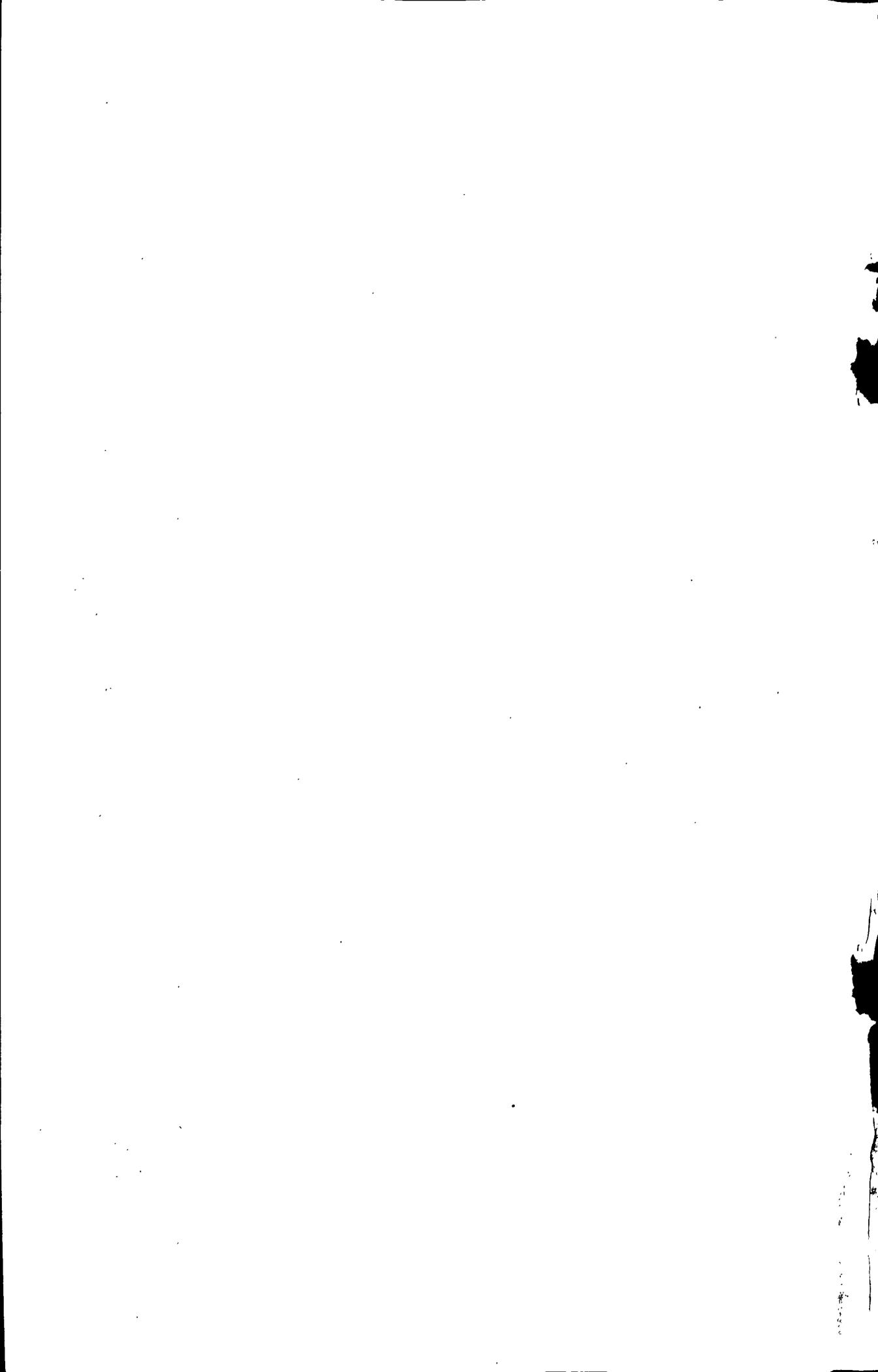
**by ZhangLin**

**Supervisor: Professor Gao Xian Wen**

**Senior Engineer: Jiang Xue Jun**

**Northeastern University**

**June 2008**



## 独创性声明

本人声明所提交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示诚挚的谢意。

学位论文作者签名：张琳

签字日期：2008.7.8

## 学位论文授权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

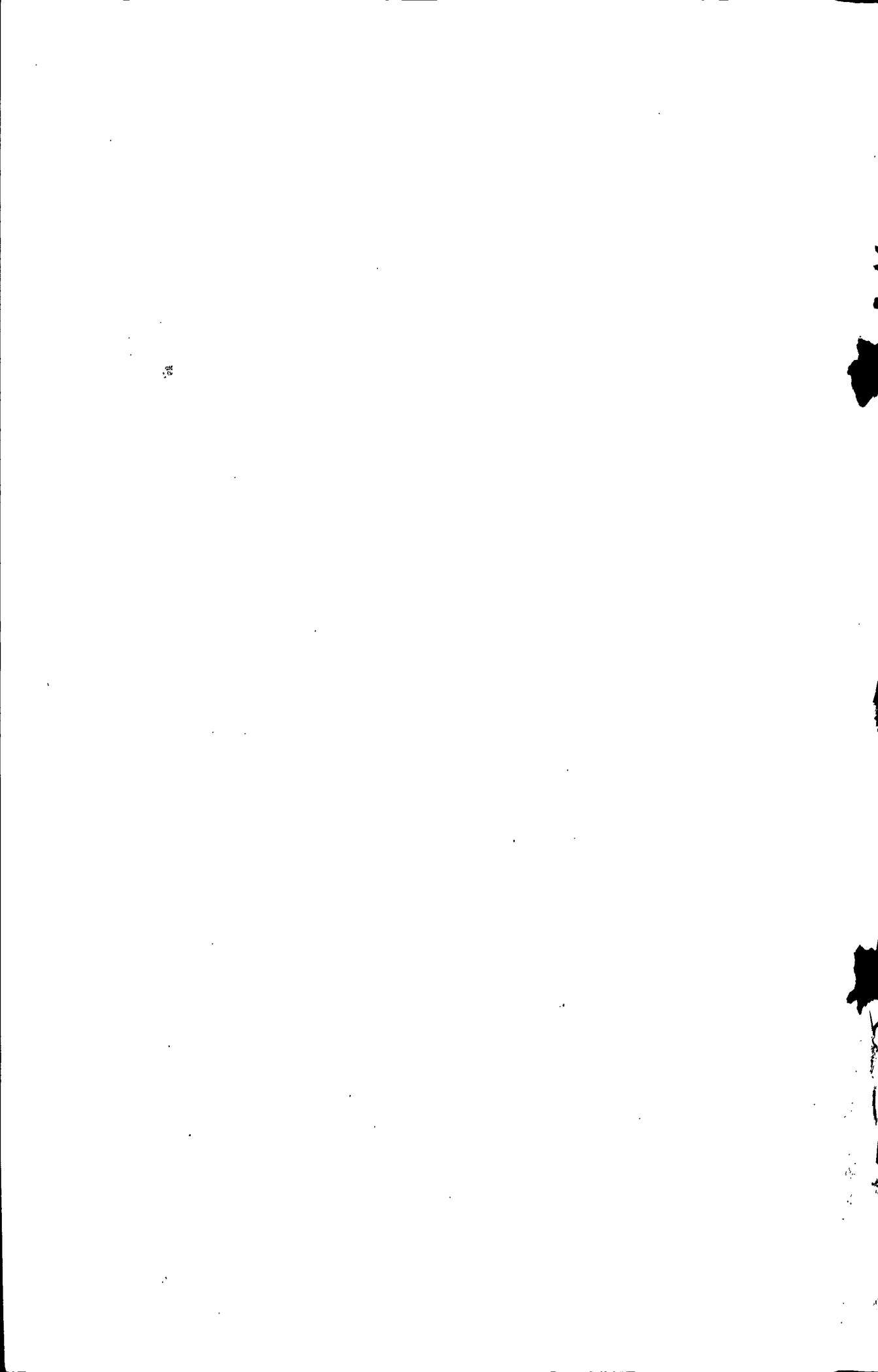
半年  一年  一年半  两年

学位论文作者签名：张琳

导师签名：张琳

签字日期：2008.7.8

签字日期：2008.7.8



# 首钢板坯连铸二冷水动态控制的模型建立与实现

## 摘要

连铸机的二次冷却对铸坯质量至关重要。其他工艺条件不变时，二冷强度增加及拉坯速度的提高，都可以提高铸机的生产率；但同时，二冷参数配置不当是导致铸坯产生各种质量缺陷的主要原因之一。二次冷却方法有静态控制和动态控制，其中动态控制能很好的适应变拉速的情况，将铸坯温度控制在合理范围内。随着计算机性能和自动化水平的日益提高，动态二冷配水已经广泛应用于连铸生产线，对于提高铸坯质量起到了巨大作用。

本课题以首钢二炼钢板坯连铸机为研发基础，通过对板坯连铸凝固传热数学模型的理论研究，先对其静态配水进行分析，并在此基础上设计了二冷水表和二冷动态配水软件，对其生产工艺参数进行优化。

在传热数学模型上，采用数值法对方程进行求解。模型根据数据库中存储的钢种的热物性参数、拉速、冷却水量、中间包温度计算铸坯温度与凝固状态。

动态配水模型以坯龄法为基础，坯龄法是将连铸坯分为众多单元切片，分别对各个切片进行跟踪，根据切片的生成时间进行配水的方法。根据模拟和现场实验证明，坯龄模型能较好地在变拉速条件下控制铸坯表面温度的波动。此外动态配水中还采用目标温度控制法对水量进行校正，进一步减小了铸坯表面温度波动。

在传热数学模型与坯龄模型的基础上，开发了动态配水软件。此软件包含离线模式与在线模式，利用离线模式设计了水表，并用于现场生产。在线模式将动态配水应用于生产。该软件不仅提供良好的用户界面和方便的数据库管理，还能详细记录生产过程中各类参数，有利于对铸机的生产运行状态进行分析和工艺优化。

结果表明离线模型所设计的水表能满足铸坯质量的要求，动态配水能较好适应变拉速的情况，使温度控制在合理范围内。这对于提高铸坯质量和新钢种的配水设计与评价都有其现实意义。

关键词：板坯连铸；动态二冷配水；建模；凝固传热；数值法；铸坯坯龄



# Shougang slab continuous casting cold water on the dynamic control of the establishment and implantation of model

## Abstract

The control of secondary cooling holds very important status during continuous casting. When other technical condition remain unchanged, the intensity of cold and increase the speed of casting are all can improve the productivity of casting machine. However, at the same time the cold parameters are not improper is one of the main reason of various defects. Secondary cooling control includes steady cooling control and dynamic cooling control, dynamic cooling control can adaptive the change of the situation very well. the slab temperature control within reasonable limits. With the increasing of computer performance and automation level, dynamic secondary cooling water distribution has been widely used in continuous casting production lines, It plays a tremendous role in raising the slab quality.

This subject take the Shougang steel slab continuous casting machine as research and development base, through studying the theory of the slab continuous casting and solidification heat transfer mathematical model, the analysis of its static allocation of water is done firstly. The two cold-water table and the dynamic cold water distribution software, which can optimize the process parameters, is designed based on this.

In the heat transfer model, numerical methods is used to solve the equation. According to the database model stored in steel thermal physical parameters, casting speed, cooling water, tundish temperature and the temperature calculated solidification state.

The dynamic cooling system is based on the residence time method in which the slab is divided into many slices which are tracked. The water flow rate is determined mainly by the residence time of the slices. The residence time method can soundly control the fluctuation of slab surface temperature, which is verified by both simulation and plant trial. In addition, the method of aim temperature control is applied to reduce the fluctuation of slab surface temperature further.

Water distribution software is developed based on the heat transfer model and the old model of billet. This software includes online and offline mode model, using a meter off-line mode design and produce for the scene. Dynamic online distribution model will be applied to production. The software not only provide a good user interface and ease of database management, but also save a detailed of the various parameters of the production process, this

is conducive to the production of casting machine running for analyzing and process optimization.

The results adapting that the water meter designed by the offline model can meet the slab quality requirements. The hydro-dynamic can better adapt the variable speed ,it also make the temperature in a reasonable limits. This method has practical significance to improve quality and new steel slab of the water distribution design and evaluation.

**Keywords: Slab Casting; Dynamic secondary cooling; Modeling; Solidification heat; Numerical methods ;Residence time model**

## 目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
ABSTRACT.....	IV
第一章 绪 论.....	1
1.1 连铸及其控制技术的发展概述.....	1
1.2 连铸二次冷却控制技术的历史与发展趋势.....	3
1.3 课题的背景和意义.....	5
1.4 本文主要工作.....	5
第二章 连铸二冷工艺与建模问题.....	7
2.1 连铸工艺简介.....	7
2.2 二次冷却的基本概念.....	8
2.3 二冷水动态控制建模问题.....	9
第三章 连铸二冷动态控制模型研究.....	11
3.1 连铸坯的凝固传热的研究.....	11
3.1.1 结晶器的凝固传热.....	12
3.1.2 二冷区的凝固传热.....	12
3.1.3 空冷区的凝固传热.....	15
3.2 二次冷却的控制方法.....	15
3.2.1 冷却制度的选择.....	15
3.2.2 二冷配水方式.....	15
3.3 假设条件.....	17
3.4 连铸坯凝固传热方程.....	18
3.5 连铸坯凝固传热方程的求解.....	19
3.5.1 求解方法的选择.....	19
3.5.2 有限差分法介绍.....	20
3.5.3 模型的离散化.....	22
3.5.4 差分方程.....	22
3.5.5 差分方程的稳定性和收敛性.....	25
3.6 计算中的物性参数选择及处理.....	26

6

3.6.1 钢的液、固相温度.....	26
3.6.2 比热容与凝固潜热.....	27
3.6.3 密度 $\rho$ .....	27
3.6.4 传热系数.....	27
3.6.5 二冷区综合传热系数.....	28
3.6.6 结晶器的热流密度.....	29
3.7 二冷水量控制方法介绍.....	29
3.7.1 拉速相关控制.....	29
3.7.2 “坏龄”模型.....	30
3.7.3 静态配水表的设计.....	31
3.7.4 静态水表的检验.....	32
第四章 连铸二冷动态控制模型的开发.....	33
4.1 概述.....	33
4.2 相关技术介绍.....	34
4.2.1 OPC 接口技术介绍.....	34
4.2.2 ControlLogix 控制器介绍.....	35
4.2.3 ControlNet 简介.....	36
4.3 软件功能设计.....	36
4.4 二冷动态模型程序设计.....	38
4.4.1 通讯程序设计.....	38
4.4.2 离线二维凝固传热模型程序设计.....	39
4.4.3 在线一维凝固传热模型的程序设计.....	42
4.4.4 坏龄模型计算程序设计.....	43
4.4.5 二冷水量计算程序设计.....	44
4.4.6 动态配水控制模型程序设计.....	46
4.4.7 起停浇 PLC 控制程序.....	46
4.4.8 数据库的设计.....	48
4.4.9 历史数据的存取.....	48
4.4.10 人机界面的设计.....	49
第五章 连铸二冷控制模型的实现.....	53
5.1 模型的现场运行分析.....	53
5.1.1 计算模型温度与现场实测温度的比较.....	53
5.1.2 配水对铸坯质量的影响比较.....	54
5.2 影响铸坯凝固的主要因素分析.....	55
5.2.1 拉速的影响.....	55

5.2.2 二冷水量的影响.....	57
5.2.3 钢水过热度的影响.....	58
第六章 结束语.....	59
6.1 二冷动态控制配水模型主要功能总结.....	59
6.2 系统有待改进之处.....	59
参考文献.....	61
致 谢.....	65
攻读硕士期间发表的论文.....	67

7



# 第一章 绪论

## 1.1 连铸及其控制技术的发展概述

连铸是将液体金属经过一组特殊的冷却和支撑装置连续地浇铸成一定断面形状的铸坯的过程。连铸的最初设想是由英国转炉发明者Henry Bessemer<sup>[1]</sup>于1856年提出来的,1930年连铸技术开始用于铜、铝等有色金属的生产之中。由于钢的熔点高而导热性能较差,所以钢的连铸比有色金属更加困难。直到1993年S.Junghans<sup>[2,3]</sup>的结晶器振动技术才取得突破,1943年连续铸钢实验装置开发成功,使得在钢铁工业生产中采用连铸技术成为可能。

连铸真正在钢铁工业中的应用开始于20世纪60年代,此后连铸技术不断改进,连铸工艺更是迅速完善。我国是较早开始研究连铸技术的国家之一,1957年在上海建成一台高架立式方坯连铸试验机,次年在重钢三厂建成我国第一台用于工业生产的立式连铸机,1964年又在该厂建成我国第一台也是世界最早的R6m弧形连铸机。另外,在电磁搅拌技术、二次冷却水自动控制技术等研究也取得了较大进展,许多连铸机都配备有二级或三级自动化控制技术。

从20世纪50年代开始,经过几十年的发展,连铸技术已经发展成为一项很重要的冶金生产技术。与传统的模铸相比,连铸不但简化了生产工艺流程、提高了生产率和产品质量,而且金属收得率较高,能耗和生产成本也大大低于模铸,所以连铸在冶金工业中占有十分重要的位置。随着计算机技术和自动化技术的迅速发展及在连铸生产中的广泛应用,以及诸如铸坯轻压下技术、二冷动态控制技术、电磁搅拌技术等不断涌现,使连铸开始向近终型连铸、多炉连浇、热送、热轧以及炼钢-连铸-连轧短流程的方向发展。由于连铸在钢铁工业生产中有着十分重要的作用,因此连铸过程的建模与控制已成为目前国内外自动控制领域的研究热点之一,连铸和炼钢、连轧一起构成了带动钢铁工业革新和进步的三驾马车<sup>[4]</sup>。

连铸的目的是把钢水浇铸成铸坯,只靠人工控制是很难实现并保证高产和优质的,特别是浇铸速度快的连铸机。结晶器液位波动、二冷水控制不良都会影响铸坯质量,板坯连铸没有漏钢预报就很难防止拉漏,而拉漏一次,造成的经济损失超过百万元。据奥钢联报道,实施连铸自动化的效率为:收得率增加超过1.5%,改善铸坯质量,连铸机利

用率大于98%，节能大于10%，可靠和灵活的浇铸操作，增加连铸机可用性和寿命，维护费用减少超过1/3以及改进生产诀窍。故连铸自动化不仅是现代连铸生产的主要特征而且是关键和必不可少的。

纵观连铸技术的发展经历了由手动控制，到单体设备自动化再到整个工厂自动化的发展过程。随着科技的进步、新材料和电子设备的性能日益改进，冶金工业的连铸生产的自动化水平也经历了从无到有从弱到强的发展历程，其功能也日益完善。二十世纪五十年代连铸设备问世之初，连铸振动、冷却等均采用手工作坊式的操作。从二十世纪七十年代，自动化技术首先被运用到了连铸机上，随着可编程技术和集散控制技术的发展，八十年代开始运用到炼钢厂和轧钢厂等生产过程，在九十年代被迅速的运用到整个工厂的生产线。从2000年开始，国内冶金企业出现更多的技术改造，连铸系统又增加了各个功能相对完备的过程控制以及整个流程整体监控和优化控制。同时在信息技术和控制技术的迅猛发展和广泛应用的推动下，钢铁工业向高精度、连续化、自动化、高效化方向快速发展，使钢铁生产工艺、产品和技术装备呈现出流程短、投资少、能耗低、效益高、适应性强、环境污染少、内部质量不断条等特点。

为了实现板坯连铸机计算机控制系统的功能，现代连铸自动化系统一般分为三个部分：生产过程控制系统、制造执行系统和企业信息控制系统

### (1) 生产过程控制系统PCS

生产过程控制系统大致包括：

#### (a) 基础自动化系统

基础自动化部分主要实现两方面功能：数据检测和驱动部分和设备控制部分。数据检测和驱动部分主要是由现场各种智能化仪表，全数字化的交直流传动装置所组成，还包括执行机构、电磁阀、传感器、操作接口等，由于迅猛发展的网络技术，现在这些设备同控制部分已经可以通过现场总线进行通讯了；设备控制部分主要实现对设备的顺序控制、逻辑控制及简单的数学模型计算，并按照过程控制级的控制命令对设备进行相关参数的闭环控制。

#### (b) 生产过程控制系统

生产过程控制一般用以控制整个一台铸机生产过程，其中包括生产数据采集、各种数学模型的计算、整个生产时序的控制、铸坯跟踪、铸坯质量的判断、生产过程历史数据的存储、打印报表、事故报警、显示等。由于现代网络的拓展灵活性，服务器客户机系统（Client/Server）也被用在了生产过程中。

现代冶金生产过程绝大多数都采用了计算机控制为主的自动控制系统,从而大大提高了生产效率和产量,产品的质量也得到了很大的改善。在这一变化过程中,数学模型起到了及其重要的作用:数学模型是连铸计算机自动控制系统设定计算的基础;从本质上讲数学模型决定了连铸机将来生产过程的状态特征,其合理与否铸坯的产量质量及能否安全生产均有重要的影响;随着通讯、电子、自动化等高新技术的不断发展,以及计算机技术的支持,数学建模、数值计算等相结合形成的计算机软件,已经被固化于产品中。

## (2) 制造执行系统MES

MES是企业面向车间的生产管理技术,用以提供生产活动中从下载订单到生产成品间的最优化信息,它利用实时准确的数据指导、响应,报告车间发生的各项活动,并对现场变化条件做出快速反应,努力减少非增值活动,以达到高效的车间生产。MES在计划管理层与底层控制之间架起了一座桥梁<sup>[5]</sup>。

## (3) 企业信息控制系统

企业资源控制系统就是将企业内部各个部门,通过信息技术连接在一起,让企业的所有信息在网上共享。不同的管理人员在一定的权限范围内,可以从网上获得与自身管理职责相关的其他部门的数据,这样可以避免资源和人事上的不必要的浪费,高层管理者也可以根据这些及时准确的信息,做出做好的决策。

## 1.2 连铸二次冷却控制技术的历史与发展趋势

为了使铸坯表面温度的变化符合上述冶金准则的冷却图形,二冷区各段的冷却水量都是要根据钢种、铸坯断面、拉速等因素来确定的。早期的二冷水控制多为人工手动控制,即开浇前根据钢种设定二冷水总水量,生产过程中,操作人员根据铸机仪表盘上显示的当前拉速,按照已设定的水表来确定当前的喷水量。后来用计算机取代人工,将二冷水控制由传统的人工操作变为计算机控制,提高了连铸机的自动化程度。这些控制过程都是按拉速来调节水量,一般称之为静态水表控制,是应用最广、且比较成熟的方法。目前,多数二冷控制系统都是在静态水表控制的基础上进行改进而实现的,其中应用较广的有参数控制<sup>[6,7]</sup>,表面温度反馈控制<sup>[8]</sup>,计算机动态控制<sup>[9,10]</sup>。参数控制,仍然是静态控制,它建立了水量与拉速之间预定的函数关系,多数情况下按公式 $Q=Av^2+Bv+C$ 一元二次方程进行配水,二冷不同区域可以有不同的参数。

无论是水表控制还是参数控制,它们主要适用于恒拉速浇注的情况,这种控制方法

称之为静态控制法,即以拉速大小为依据来控制水量,不论拉速如何变化,只要拉速改变就调节水量。实践证明:按静态控制方法调节水量,水量随拉速的升降而升降,这难免会造成铸坯表面温度剧烈波动,或是过冷或是过热,从而导致缺陷坯的产生。

动态模型控制是指在一定程度上适应拉速变化情况的二冷配水方法。水量除了与拉速有关外,还受拉速变化过程的影响,整个生产过程寄希望于拉坯过程发生变化时,铸坯表面温度仍能够充分接近目标温度,从而获得良好的铸坯质量。

二冷水动态控制的方法有两大类:一类是基于实测铸坯表面温度的动态控制;一类是基于模型的动态控制。

表面温度反馈控制的方法是在二冷区各段装上温度传感器来测量实际铸坯表面温度,二冷喷水量则根据各冷却段目标温度与实测温度的偏差来进行控制。由于水蒸气及氧化铁皮等因素的影响,铸坯在冷却过程中的表面温度难以准确的监测,因此,根据实测铸坯表面温度来控制二冷水量是不可靠的,这是该方法目前很难推广的原因。很多研究者利用模糊动态控制方法是避开直接测量铸坯的表而温度,而改用数学模型来计算,再根据计算出的铸坯表面温度来调节冷却水量,显然这种控制方法的成功与否取决于模型计算结果能真实的反映实际表而温度及其变化规律。

另一类连铸二冷控制方法是各冷却区域配水以冶金准则和传热学为基础,通过建立传热数学模型,计算出各段铸坯表面温度的分布,并给出各冷却回路的最佳配水参数,作为自动控制系统实现水量动态控制的依据。目前,这种利用凝固传热数学模型对二冷进行动态配水的控制方式得到广泛应用;主要原因是这个模型是从铸坯凝固传热过程中的物理性质和特征出发,研究其某些特性随时间和空间来进行演变的过程,并分析了凝固传热的变化规律,进而找到了它的控制手段。

国外对连铸坯二次冷却数学模型的研究已有 40 多年的历史,早期, JELait 等就建立了比较完整的铸坯凝固传热数学模型,数值解析法是求解凝固传热数学模型的主要方法; AWDHills 应用线上求积法对方程的一维形式求解;而 EAMizika 和 BLally 等则用有限差分法求解该方程;南条敏夫和松野淳一等也建立了凝固传热数学模型,并着重分析了板坯连铸中凝固速度和铸坯表面温度对凝固组织和内、外质量的影响; JELait 等通过模型分别探讨了不锈钢板坯连铸和低碳钢方坯连铸的凝固特点; IVSamarasekera 等利用数学模型研究了各工艺参数对铸坯质量的影响,目的是通过改变工艺参数来提高铸坯的质量<sup>[38]</sup>。

我国从 20 世纪 80 年代开始对连铸数学模型进行研究,利用数学模型模拟了铸坯内

部温度场、凝固壳厚度和液相穴的长度，并研究了各工艺参数间的相互关系以及它们对铸坯凝固过程的影响。

### 1.3 课题的背景和意义

首钢二炼钢板坯为单流铸机，铸坯宽度为1600/1800mm，厚度为220/250mm，目前二冷配水还采用静态配水法，即“水表法”。在这种控制方式下，水量的变化与拉速同步，拉速降低，水量马上降低；拉速提高，水量马上跟着提高，这种控制方法不适应拉速波动时浇注，铸坯表面温度波动较大。由于换包、更换水口、事故等原因，经常须变更拉速，拉速的变化常导致铸坯温度发生上下波动，这不但对连铸正常生产造成困难，温度上下波动引发的热应力也会显著助长表面纵裂纹的扩展和延伸。

过去由于首钢浇铸工人浇铸水平很高，加上首钢板坯产品大都是低碳钢及低合金钢，因此对板坯的浇铸质量要求不高。随着首钢结构调整步伐的加快，浇铸高附加产品、提高浇铸质量及提高铸机作业率已经成为迫在眉睫的问题了，而连铸二冷制度是连铸核心技术，二冷参数是否合理关系到新产品的开发能否成功，因此非常有必要做二冷配水制度的研究。

本研究拟通过建立不稳定的板坯连铸机铸坯凝固数学模型，应用建立的数学模型模拟铸坯凝固过程，确定连铸二冷区配水合理工艺参数，实现二冷区智能配水，以提高铸机的铸坯的质量和生产能力。本研究将对连铸生产提高产品质量、对开发的新钢种二冷配水方案设计提供较大的理论指导意义和实用价值。

### 1.4 本文主要工作

钢液在连铸机中的凝固是一个热量释放和传递过程，也是把液体转变为固体钢的加工过程。在连铸机内，液体钢水转变为固体钢坯传输的热量包括钢水过热、凝固潜热和物理显热。本文以首钢二炼钢板坯铸机为研究对象，从铸坯凝固传热的数学模型着手进行研究，主要进行了以下几个方面的工作：

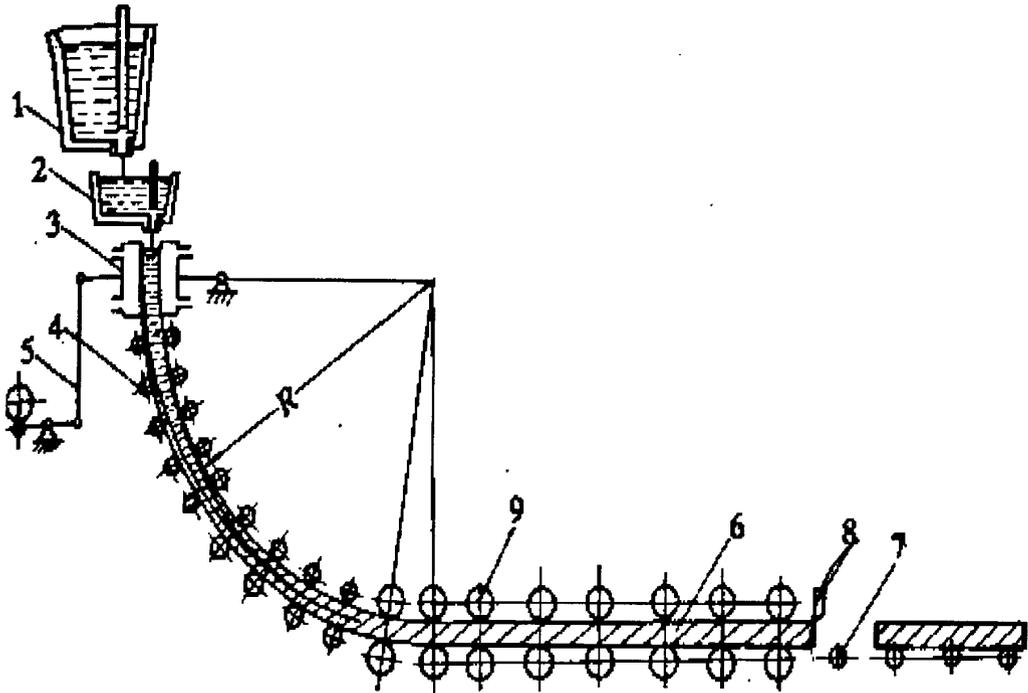
- (1) 开发一套用于动态跟踪铸坯冷却情况的计算软件，可实时监测各时段铸坯的状态，主要包括铸坯在结晶器及二冷段的铸坯表面温度及各点温度，以及铸坯液心的凝固及位置状态；
- (2) 建立板坯凝固传热模型，编制计算程序，该程序可以对因拉速发生变化的连铸过程进行温度场的模拟计算；

- (3) 通过改变影响凝固过程的外部条件（浇注温度、拉坯速度、各冷却段的长度及水量），来研究外部条件对铸坯凝固过程的影响；
- (4) 利用铸机已有的静态水表对连铸坯温度场及凝固计算结果进行比较，对恒定拉速下的水表进行分析；
- (5) 在数学模型的基础上设计了二冷水表和二冷动态配水软件，对其生产工艺参数进行优化；
- (6) 整个二冷系统通讯方式的确定及硬件的改造；
- (7) 通讯程序的编制；
- (8) PLC程序的修改及完善；
- (9) 人机界面的开发。

## 第二章 连铸二冷工艺与建模问题

### 2.1 连铸工艺简介

连续铸钢简称连铸，是把液态钢用连铸机浇铸、冷凝、切割而直接得到铸坯的工艺。一台连铸机主要是由钢水大包、中间包、中间包车、结晶器、结晶器振动装置、液位控制装置、二次冷却装置、拉坯(矫直)装置、切割装置和铸坯运出装置等部分组成。连铸的一般生产工艺流程，如图 2.1 所示。



1-钢包；2-中间包；3-结晶器；4-二次冷却区；5-结晶器振动装置  
6-铸坯；7-运输辊道；8-切割装置；9-拉坯矫直机

图2.1 连铸工艺流程图

1 - ladle; 2 - tundish; 3 - mold; 4 - secondary cooling zone ;5 - mold vibration device ;  
6 - slab ;7 - Transport roller; 8 - cutting devices; 9 - casting straightening machine

Fig. 2.1 Technological process of continuous casting

浇铸时钢水包（或称盛钢桶或大包）用起重机吊到回转台，回转到浇铸位置（即中间包的上方），用长水口把持装置将长水口与钢水包滑动水口连接在一起，打开钢水包滑动水口，使钢水注入中间包，待中间包钢水达到要求时，打开中间包塞棒，同时用中间包滑动水口控制注流，使中间包内钢水以一定速度注入结晶器中。注入结晶器的钢水被密封在结晶器下口的引锭头挡住，经结晶器内的冷却水冷却，待钢水凝固成一定厚度

的坯壳后,启动拉辊,通过引锭杆将铸坯徐徐拉出。此时铸机内的铸坯内部仍然是熔融的钢水,在整个诱导装置内,用装在夹送辊间的喷嘴向铸坯表面喷水,以使铸坯在出连铸机前完全凝固。当铸坯尾部出连铸机时,用脱引锭装置使引锭杆与铸坯分离,引锭杆被引锭杆卷扬装置送到操作平台上的引锭小车上以备下次浇铸时再用。铸坯将继续有辊道向前输送。在切割辊道上按尺寸切割,切割后的板坯在去毛刺辊道用去毛刺装置去除其两端的切割毛刺,在喷印辊道上用喷印机在铸坯前端喷印上各种标记。然后,把铸坯送到等待辊道,再用移送台车把铸坯送冷却精整场,根据质量判断,将无缺陷的铸坯码放整齐待装车,最后送到热轧厂。

## 2.2 二次冷却的基本概念

二次冷却就是对出结晶器的铸坯继续进行强化冷却。在连铸过程中由钢水浇铸成铸坯并冷却至室温的过程中,需要放出大量热量,其中约40%是在结晶器及二冷区钢水凝固时放出来的<sup>[11]</sup>。二冷区分成许多个冷却段,每段单独控制喷水;各冷却段控制的目的是使该段铸坯均匀冷却,且使表面温度稳定在设定值附近。通过改善二次冷却制度,优化二次冷却配水,可实现铸坯的冷却均匀,直接影响到铸坯的表面和内部质量以及铸机的生产率。因此,优化二次冷却是高效连铸技术的一项重要措施,而连铸高效化已经成为推动我国钢铁工业结构优化的重要技术。

由于要保证铸坯质量和符合连铸生产要求,二次冷却要使铸坯表面温度的演变并符合工艺要求的冶金准则。这些冶金原则是:

- (1) 要避开低温脆性范围。
- (2) 在二冷区内,铸坯的表面温度应平滑下降,不能过高过低,如果喷水太强,会使已形成的裂纹扩展或因表面温度处于低延性区而会产生新的裂纹,故温度下降速度应低于 $200^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。
- (3) 表面温度回升应小于 $100^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,以防止表面再加热导致凝固前沿产生张应力而形成裂纹。
- (4) 液相穴长度有规定,对弧形连铸机,铸坯通过矫直辊时,液芯应完全凝固,避免凝固前沿在应力作用下产生裂纹。
- (5) 应使带液芯的铸坯表面温度低于某一限度,以使两支承辊之间产生鼓肚最小。

因此,连铸冷却区应按一定的冷却图形来喷水冷却,以保证铸坯表面温度的变化符合上述冶金准则。这个冷却图形是由工艺按铸坯不同尺寸和钢种等因素决定的<sup>[40]</sup>。

## 2.3 二冷水动态控制建模问题

连铸作为高温钢水的连续浇注和凝固操作工艺过程,具有多元合金凝固传热过程的非线性相变潜热释放过程,具有很强的非线性和不可微特征,因此传统的解析方法难以求解。目前,利用凝固传热数学模型对二冷进行动态配水的控制方式得到广泛应用,主要原因是这个模型是从铸坯凝固传热过程中的物理性质和特征出发,研究其某些特性随时间和空间来进行演变的过程,并且分析了凝固传热的变化规律,进而找到了它的控制手段。

连铸二冷动态控制模型的研究主要是通过数学方法,建立合理的数学模型,应用数学模型模拟连铸坯的实际冷却过程,可对连铸二冷区的冷却、传热进行研究。但是描述钢液凝固传热的数学方程相当复杂,而且由于连铸过程中复杂的边界条件,要精确计算非常困难,因此必须结合具体条件做出一些合理的假设,然后用数值方法求解,并借助于计算机手段,对所建立的数学方程进行模拟优化计算,制定出合理的二冷水表及配水控制方法。

应用所建立的连铸凝固传热模型在计算机上对操作参数进行模拟和优化,可建立合理的二冷制度控制模型。控制模型的建立可为连铸工艺过程的过程控制打下基础,可为连铸一热送一轧制提供铸坯工艺和质量上的保证,可使铸机充分发挥其潜力,达到较高的生产率,得到质量比较好的铸坯。因此建立连铸二冷过程动态控制模型具有重要的实际意义。

用于计算连铸坯凝固传热过程的数值方法主要有:有限差分法、有限元法、边界元法和线上积分法。有限元法、边界元法和线上积分法在最近几年中有了很大的发展,并已成功解决了些传热实际问题。但是,就方法发展的成熟程度、实施的难易以及应用的广泛性而言,有限差分法仍占相当的优势,在连铸坯传热过程中应用最为普遍。有限差分法可分为显示差分法和隐式差分法,显示差分法具有计算简便、计算时间短、计算精确性可根据实际要求确定等特点,绝大部分文献中都采用此方法。

根据冶金原则,我们可以从铸坯的冷却特性出发,采用运动坐标系的二维切片法,即用传热边界条件的时间函数法来模拟拉坯过程的冷却条件;并认为与拉速相比,可以忽略拉坯方向的传热;同时根据几何对称性,计算时通常取铸坯取1/4截面进行差分离散研究,首先通过离线二维模型对凝固传热场进行模拟与分析,初步找到铸坯凝固传热

与二冷各段水量关系的基本规律；然后在线对一维模型进行分析和研究，通过与二维模型的对比，找到二冷水量、拉速及钢水过热度对凝固传热的影响，进而找到合适的配水量。

## 第三章 连铸二冷动态控制模型研究

### 3.1 连铸坯的凝固传热的研究

钢液在连铸机中的凝固是一个热量释放和传递过程,也是把液体钢转变为固体钢的加工过程。在连铸机内,液体钢水转变为固体钢坯传输的热量包括钢水过热、凝固潜热和物理显热。

- (1) 钢水过热: 有进入结晶器时钢水的温度冷却到钢的液相温度放出的热量;
- (2) 凝固潜热: 钢水从液相线温度冷却到固相线温度放出的热量;
- (3) 物理显热: 凝固的高温铸坯冷却至送出连铸机时所放出的热量。

在连铸机内,钢热量传输分别在一次冷却区、二次冷却区和三次冷却区进行。

在一次冷却区,具有一定过热度的钢液与水冷结晶器接触,冷却水将钢水热量带走,紧靠结晶器壁的钢水迅速凝固,在向下运动的过程中形成有一定厚度的坯壳。为防止裂纹和拉漏,应保证铸坯在出结晶器时具有均匀而足够的坯壳厚度。在二次冷却区,铸坯表面继续受到喷嘴的喷淋水的冷却作用,使铸坯内的热量迅速传递,坯壳逐渐增厚,直至中心完全凝固。从结晶器液面到完全凝固点的长度称为液相穴深度,即液芯长度。从二冷喷淋区出来的铸坯通过空冷区。铸坯向周围的空气辐射传热和对流传热,在这个过程中,铸坯的表面温度会出现回升并趋于均匀<sup>[12]</sup>。

从结晶器到最后一个支撑辊之间,液心的铸坯边运行、边放热、边凝固,直到完全凝固为止。铸坯中心热量向外传输包括了三种传热机制<sup>[13]</sup>:

- (1) 对流: 中间包注流进入结晶器,在液相穴内的强制对流运行而传递热量;
- (2) 传导: 凝固前沿与铸坯外表面形成的温度梯度,把液相穴内热量传导到表面;
- (3) 对流+辐射: 铸坯表面的辐射传热以及铸坯表面与喷雾水滴的热交换,把热量传给外界。

在液相穴内,特别是在钢液由中间包流入结晶器的区域内,传热主要取决于钢液的流动状态以及凝固前沿与铸坯表面之间的温度梯度,且铸坯在铸机内的传热过程、拉坯速度、钢水过热度直接影响到液相穴的长短、铸机生产率、铸机尺寸及铸坯质量。

与其他如钢锭凝固相比,连铸坯凝固的复杂性在于:

- (1) 连铸坯凝固是在铸坯运行过程中,沿液相穴在凝固区间逐渐将液体变成固体。固-液交界面的糊状区,晶体强度和塑性都很小,当凝固壳受到应力作用时,容易产生裂纹。
- (2) 铸坯从上向下运行中,坯壳不断收缩,如果冷却不均匀,会造成坯壳中温度分布不均匀,从而形成较大的热应力。
- (3) 液相穴中液体处于不断流动中,这对铸坯凝固结构、夹杂物分布、溶质元素的偏

析和坯壳的均匀生长都有着重要的影响。

(4) 从冶金方面看,坯壳在冷却过程中,随着温度的下降,坯壳发生相变,特别是在二冷区,坯壳温度的反复下降和回升,使铸坯组织发生变化,就相当于“热处理”过程。这影响到溶质偏析和硫化物、氮化物在晶界沉淀。从而影响到钢的高温性能,影响铸坯质量。

因此,铸坯的凝固传热控制,不仅影响铸机生产率和设备寿命,而且对铸坯表面质量和内部质量都有重要影响。可见研究连铸坯的凝固传热规律,对有效地控制连铸生产过程,具有十分重要的意义。

### 3.1.1 结晶器的凝固传热

#### (1) 结晶器内坯壳的形成

钢水浇到结晶器,在钢水表面张力的作用下,钢水与铜壁接触形成一个半径很小的弯月面,在弯月面的根部附近,冷却速度很快,初生坯壳很快形成。随着冷却不断进行,坯壳逐步加厚。已凝固的坯壳开始收缩,企图离开结晶器的内壁,但这时坯壳尚薄,在钢水的静压力作用下任然紧贴于内壁。由于冷却不断地进行,坯壳进一步加厚,刚度增大,到其强度、刚度能承受钢水静压力时,坯壳开始脱离结晶器内壁,钢壁与坯壳之间形成气隙。随着坯壳下降,形成气隙区的坯壳在热流作用下温度回升,强度和刚度减小,钢水静压力使坯壳变形,形成皱纹或凹陷。同时由于存在气隙,传热减慢,凝固速度减小,坯壳减薄,局部组织粗化,此处裂纹敏感性较大。上述过程反复进行,直到坯壳出结晶器<sup>[14]</sup>。

#### (2) 结晶器的传热热流

经水口流入结晶器的钢流,会引起钢液在结晶器内做对流运动,这种对流运动把液体钢的过热传给已凝固的钢壳,有研究学者对平行板型板坯连铸结晶器的热流进行过研究,并且指出,坯壳和结晶器之间的传热系数是结晶器内的钢液位置、拉速、保护渣类型、钢的高温性能、钢的线收缩性、结晶器的锥度、长度和坯壳的表面温度的函数,并提出了一个适应性较强的计算结晶器热流模型:

$$q_s = A - B\sqrt{t} \quad (3.1)$$

式中:  $q_s$ ——热流密度,  $W/m^2$ ;

$A, B$ ——常数;

$t$ ——铸坯单元的冷却时间;

### 3.1.2 二冷区的凝固传热

#### (1) 二冷区的冷却特点

从结晶器拉出来的铸坯凝固成一个薄的外壳，而中心仍为高温钢水。由于铸坯凝固速度比拉坯速度慢很多，随着浇铸的进行，铸坯内形成一个很长的液相穴。铸坯带着液心进入二冷区接受喷水冷却，目的是使铸坯完全凝固，表面温度分布均匀，内外温度梯度小，然后进行拉矫机。铸坯在二冷区要全部凝固还需放出 210-298kJ/kg 热量<sup>[14]</sup>。所以，从结晶器出口到拉矫机前的一定范围内设置一个喷水冷却区，称为二冷区，向铸坯表面喷射雾化水滴，铸坯表面温度突然降低，铸坯表面和中心之间形成了较大的温度梯度，这是铸坯向外传热的动力。

二冷区冷却的好坏对铸机产量和质量都有很大的影响。当其他工艺条件一定时，二冷强度增加，可提高拉速；而二冷强度有与铸坯缺陷密切相关。因此，对二冷区的冷却要求是：(a) 冷却效率要高，以加速热量的传递；(b) 喷水量合适，使铸坯表面温度分布均匀；(c) 铸坯在矫直前尽可能完全凝固；(d) 矫直时铸坯表面温度应大于 900℃；(e) 有良好的铸坯表面和内部质量。

(2) 二次冷却区的传热及影响因素

二冷区的传热包括冷却水蒸发带走的热量（约占 33%），铸坯表面的辐射传热（约

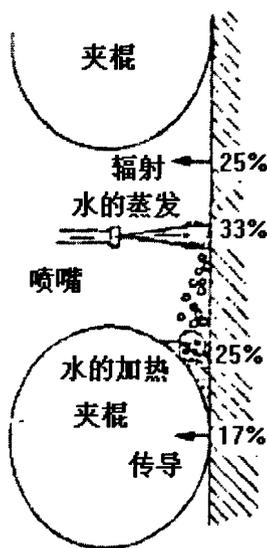


图 3.1 二冷区传热机制

Fig. 3.1 The heat transfer mechanism of secondary cooling Regional

占 25%)，铸坯表面与支承辊的传导传热（约占 17%），聚集在辊子与铸坯表面咬合处和流淌在铸坯表面的冷却水的加热（约占 25%）。

影响二冷区传热的因素如下：

(a) 铸坯的表面温度

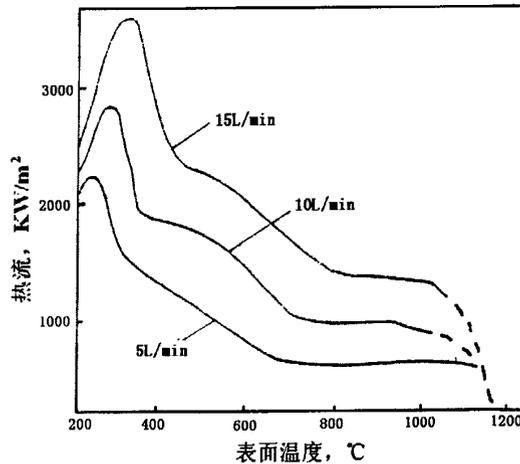


图 3.2: 表面温度与热流关系

Fig.3.2 Relations between surface temperature and heat flux

从图 3.2 中可以看出, 热流与铸坯表面温度不是线性关系, 可分为三种情况: ① $T_s < 300^\circ\text{C}$ , 热流随温度铸坯表面温度增加而增加, 此时水滴润湿高温表面为对流传热; ② $300^\circ\text{C} < T_s < 800^\circ\text{C}$ , 随温度提高热流下降, 在高温表面有蒸汽膜, 成核态沸腾状态; ③ $T_s > 800^\circ\text{C}$ , 热流几乎与铸坯表面温度无关, 甚至呈下降趋势, 这是因为高温铸坯表面形成稳定蒸汽膜阻止水滴与铸坯接触。但是, 二冷区铸坯表面温度在  $800^\circ\text{C}$  以上, 因此应改善喷雾水滴状态来提高传热效率。

(b) 水流密度与传热系数

二冷区传热总的传热效果可归结到传热系数  $h$  上。水流密度是指单位时间面积上所接受的冷却水量。水流密度增加, 传热系数增大。它们之间的经验关系式为式 (3.2) 所示:

$$h = Aw^n \tag{3.2}$$

式中:  $n$ ——常数,  $0.5 \sim 0.7$ ;

$A$ ——常数;

$w$ ——水流密度,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。

不同研究者所得的公式, 由于试验条件不同而有所差异, 也有表示为:

$$h = Aw^n(1 - bT_w) \tag{3.3}$$

式中:  $A, b, n$ ——常数;

$T_w$ ——冷却水温度,  $^\circ\text{C}$ 。

(c) 冷却介质与喷嘴冷却方式

气水雾化冷却法因具有冷却均匀, 冷却强度可调范围大以及喷嘴不易堵塞等优点, 在连铸二次冷却中得到广泛应用。不同的气水比对传热效率有一定的影响。水滴的形成、蒸发、水滴的聚合和脱离, 水滴的速度, 雾化程度, 喷嘴使用状况都会影响二冷区传热。

换热系数的大小不取决于拉速，而是由铸坯表面温度、水量、水压、水滴尺寸、水流密度、喷射角度和喷射距离等决定。当其它条件一定时，铸坯冷却的好坏主要取决于二冷喷嘴结构和喷水条件(如流量、压力、距离)。要得到良好的铸坯质量，就要得到二冷区合理的换热系数分布。

### 3.1.3 空冷区的凝固传热

铸坯在空气冷却段主要靠对流和辐射传热方式散热，故空冷段导出的热流密度可以由式(3.4)计算<sup>[14]</sup>。

$$q_s = \varepsilon\sigma \left[ (T_b + 273)^4 - (T_0 + 273)^4 \right] \quad (3.4)$$

式中： $q_s$ ——热流密度， $W/m^2$ ；  
 $T_s, T_w, T_0$ ——铸坯表面、冷却水和环境温度， $^{\circ}C$ ；  
 $\sigma$ ——斯忒潘-玻耳兹曼常数， $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ；  
 $\varepsilon$ ——辐射系数(黑度)，本模型取 0.8。

## 3.2 二次冷却的控制方法

### 3.2.1 冷却制度的选择

根据钢的高温力学性能和冶金标准，可选择的冷却制度有：

- (1)“热行”：在二冷区铸坯表面维持较高的温度，致使在矫直点前达到较高温度避开脆性区。此时宜采用弱冷，冷却水量一般为 0.5~1.0 l/kg。这种方案冷却强度减小，出拉矫机后表面温度较高，便于热送。
- (2)“冷行”：二冷区铸坯表面维持较低的温度，在 700~650 $^{\circ}C$ 进行矫直，从而避开脆性区。此时宜采用强冷。冷却水量一般为 2~2.5 l/kg。
- (3)“混行”：二冷区铸坯表面温度维持在一定水平，出二冷区后坯壳温度回升，使铸坯矫直温度在“口袋区”以外。

### 3.2.2 二冷配水方式

二冷水有静态和动态两种控制方式。静态控制是根据拉速控制冷却水量。动态控制是拉速不再直接决定水量，通过传热模型或其它智能控制的方法调整水量。

二次冷却水量控制方法可分为人工配水及自动配水，自动配水技术当前已经得到广泛应用。人工配水受人为因素影响，特别是拉速变化时水量控制的滞后现象，难以保证铸坯的质量，已被淘汰。理想的二冷自动控制应该是能适时检测跟踪铸坯有关控制点的表面温度，将其与目标表面温度作比较的闭环动态控制。但由于实际浇注过程中二冷区

环境恶劣,对铸坯表面很难准确而又可靠地测温,加之测温仪表在线维护困难,这种理想的二冷闭环控制系统至今未见应用报道。

### (1) 静态控制配水

静态配水有以下几种方式:

#### (a) 人工配水

开浇前根据钢种设定二冷总水量和各冷却段的水量。浇注过程中水量不变,或眼睛观察铸坯表面温度后做适当调整。由于人工配水受人为因素影响较大,拉速变化时,水量控制滞后,控制精度差,难以保证铸坯质量。

#### (b) 比例控制

即二冷水量与拉速成一定比例的控制,即由  $Q=Kv$  ( $v$  为拉速,  $K$  为系数) 来确定各冷却段的水量,当水量小于所能提供的最小水量时,取最小水量。实际上与人工控制相同,仅是用 PLC 或计算机的指令来控制水阀门的开度,使水流量接近设定值,此时流量计会将流量信号反馈到 PLC,经过 PLC 对信号的处理与比较,然后再调整阀门开度,使水量精确地控制在设定值上。

#### (c) 参数控制法

这种控制方法的思路是制定出适合于所需浇铸钢种的目标表面温度曲线,由此找出要使铸坯(若干控制点)表面实际温度符合目标温度时各冷却段水量的控制参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ,建立符合  $Q = AV^2 + BV + C$  的一元二次方程式的数学模型。同时将  $A$ 、 $B$ 、 $C$  这些参数储存于智能仪表(PLC)或计算机内,浇铸时选取对应钢种的控制参数,然后根据拉速自动配置各回路冷却水量。另外有研究者<sup>[14]</sup>对此一元二次方程进行了改进,其中的自变量除通常的拉坯速度以外,还包含了浇铸过热度和冷却水温度两个因素。

### (2) 动态控制配水方法

#### (a) 目标表面温度控制法

考虑钢种、拉速以及浇铸状态,由二冷配水控制数学模型每隔一段时间计算一次铸坯的表面温度,并与考虑了二冷配水原则所预先设定的目标表面温度进行比较,根据比较的差值结果给出各段冷却水量,以使得铸坯的表面温度与目标表面温度相吻合。这种计算和比较工作是由计算机完成的。

目标表面温度确定是建立在最佳二冷配水制度基础之上。所谓最佳二冷配水制度是指二冷区各冷却段的合理水量分配导致合理的温度分布,从而实现最佳板坯质量。通常可采用两种方法来确定目标表面温度。一是从冶金学的角度考虑钢种的高温延性特性以及考虑冶金准则而定出,然后通过生产实践进一步修正和完善;二是从稳定的工艺条件的二冷水量的分布,通过二维传热数学模型,计算出板坯表面温度变化,以此作为对应钢种的目标表面温度。制定目标表面温度曲线只需确定沿拉坯方向上若干个控制点的目

标表面温度。

#### (b) 坯龄控制法

坯壳在结晶器生成, 随后进入二冷区。不同的时间需要不同的水量。一般情况下, 刚生成的铸坯由于坯壳薄, 表面温度高, 需要较大的冷却量, 随着冷却时间的延长, 坯壳厚度增加, 铸坯表面温度降低, 所需的水量逐渐减少。在连铸与凝固过程中, 从铸坯表面释放出的热量基本上只是一个时间的函数<sup>[15]</sup>。非稳态控制方法以坯壳生成后所经历的时间作为参数进行冷却控制, 建立起生成时间和水量的对应关系。在实际控制中, 也可以引入有效拉速来进行配水, 有效拉速是综合实际拉速与平均拉速的值, 本质上也是考虑了坯壳的生成时间, 也可以看作是坯龄控制法。

#### (c) 智能优化控制法

连铸坯二冷配水智能优化是基于传热模型计算的结果的定量优化问题, 连铸传热模型是一个非线性偏微分方程的初边值问题, 无法解析求解, 并且涉及的计算量非常巨大。从优化目标的角度来看二冷优化本质上是一个多目标优化的问题, 各个优化目标之间的关系由它们对工艺要求的重要性来决定。二冷水的智能优化大致采用两种方法: 基于函数梯度的优化算法<sup>[16, 17]</sup>; 基于智能的启发式算法<sup>[18-20]</sup>。

#### (3) 两种配水方式的比较

稳态(拉速稳定)时上述两种冷却方法的冷却效果大同小异; 非稳态(拉速变化)时, 尤其是拉速降低到零时, 采用拉速相关控制方法会导致供水量的剧烈变化, 造成铸坯表面温度明显波动<sup>[15]</sup>。因为决定冷却水量大小的不是拉速, 也不是铸坯所处位置而是冷却时间, 采用非稳态控制考虑了铸坯生成时间这一本质因素, 在非稳态条件下应用会有好的冷却效果。

### 3.3 假设条件

由于连铸坯凝固传热过程是采用有内热源的三维非稳态微分方程进行描述, 为方便数值计算求解, 通常要针对具体的连铸过程进行合理的假设, 模型的基本假设条件为:

- (1) 传热条件不随拉速变化。
- (2) 沿浇铸方向(即垂直方向)和结晶器钢液弯月面处的传热仅占3~6%, 故忽略拉坯方向传热和结晶器弯月面处的传热, 仅考虑铸坯横断面上的传热, 铸坯的传热简化为二维非稳态传导传热。
- (3) 由于液相穴中钢液对流运动, 液相穴的导热系数大于固相区的导热系数, 且随温度而变。
- (4) 各相的密度视为常数。
- (5) 假设结晶器弯月面钢水温度与浇铸温度相同。

- (6) 连铸机二冷各区段的冷却和结晶器内的冷却同为铸坯表面均匀冷却。
- (7) 铸坯在冷却过程中的内外弧的凝固传热条件可以近似作为对称处理，以内弧部分为研究对象。
- (8) 忽略辊子的接触传导传热和铸坯在二次冷却段的辐射传热。

### 3.4 连铸坯凝固传热方程

铸坯从结晶器内钢水弯月面向下以一定速度移动，热量从铸坯中心向表面传递，所传递热量的多少，决定于铸坯表面边界条件和金属的热物理性能。为了导出铸坯温度分布的数学模型，假想从结晶器的钢水弯月面处，沿铸坯中心，取一个与铸坯一起向下运动的微元体，该微元体高度、厚度、宽度分别为  $dz$ 、 $dx$ 、 $dy$ （参见下图）。

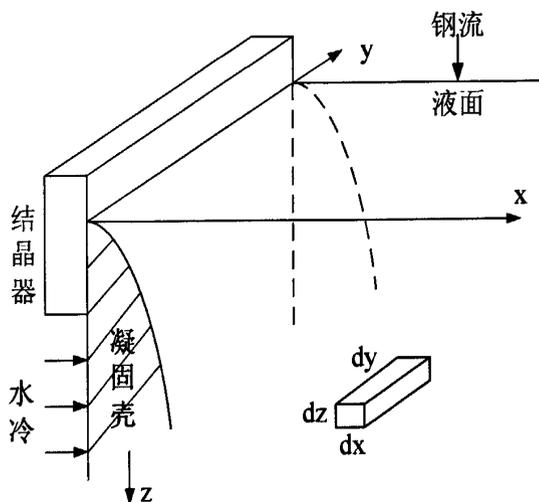


图 3.3 坯壳凝固模型示意图

Fig 3.3 Blank shell solidification model diagram

根据假设条件，通过微元体的热平衡（微元体热量=接受热量+支出热量），建立能量平衡方程式，推导此数学模型<sup>[21]</sup>：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.5)$$

- 式中： T——铸坯温度，℃；  
 t ——时间，s；  
 λ ——热导率，W/(m·℃)；  
 ρ ——密度，kg/m<sup>3</sup>；  
 C——比热容，J/(kg·℃)。

(1) 初始条件：

以结晶器入口截面钢液温度分布作为时间  $t=0$  时的初始条件，即  $T=T_0$ (浇铸温度)。

(2) 边界条件：如图 3.4

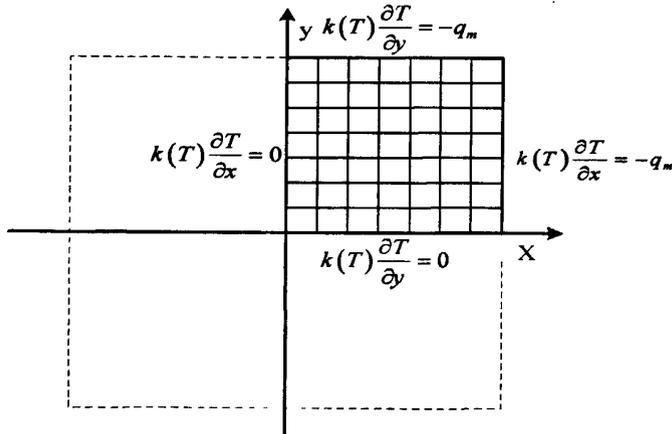


图 3.4 板坯铸坯微分方程边界条件示意图

Fig.3.4 slab differential equations boundary conditions diagram

(a) 铸坯中心： $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$  (3.6)

(b) 铸坯表面： $-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w = q_s; -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_w = q_s;$  (3.7)

其中：结晶器  $q_s = A - B\sqrt{t}$

二冷区  $q_s = h(T_b - T_w)$

空冷区  $q_s = \varepsilon\sigma[(T_b + 273)^4 - (T_0 + 273)^4]$

式中：  $q$ ——热流密度，  $W/m^2$ ；

$h$ ——传热系数，  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

$T_s, T_w, T_0$ ——铸坯表面、冷却水和环境温度，  $^\circ C$ ；

$\sigma$ ——斯忒潘-玻耳兹曼常数，  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ；

$A, B$ ——常数；

$\tau$ ——铸坯单元的冷却时间；

$\varepsilon$ ——辐射系数（黑度），本模型取 0.8。

上述偏微分方程加上边界条件，就构成了连铸坯传热数学模型。

### 3.5 连铸坯凝固传热方程的求解

#### 3.5.1 求解方法的选择

铸坯凝固过程是一个不稳定的导热过程，用解析法求解凝固传热方程是很困难的，只能采用数值解。数值计算法的实质在于使一个连续体离散化，用一系列代数方程或常

微分方程代替偏微分方程式，通过计算来得到温度场的近似解。

目前，在流动与传热计算中应用最广泛的是有限差分法 (finite difference method, FDM)，有限元法 (finite element method, FEM)，有限分析法 (finite analytic method, FAM) 及有限容积法 (finite volume method, FVM) [22]。我们现研究采用的是有限差分法对连铸坯凝固传热方程进行求解，有限差分法中，通过把控制方程中的各阶导数用相应的差分表达式来代替而形成的离散方程就叫差分方程。

### 3.5.2 有限差分法介绍

用有限差分方法求解偏微分方程问题必须把连续问题进行离散化，为此首先要对求解区域给出网格剖分，由于求解的问题各不相同，因此求解区域也不尽相同。下面用一个简单的例子来说明不同区域的剖分，并引入一些常用术语。

看一下双曲型方程的初值问题，其求解区域是

$$D = \{(x, t) \mid -\infty < x < +\infty, t \geq 0\} \quad (3.8)$$

我们在  $x-t$  的上半平面画出两组平行于坐标轴的直线，把上半平面分成矩形网格 (如图 3.5)。这样的直线称作网格线，其交点称为网格点或节点。一般来说，平行于  $t$  轴的直线可以是等距的。可设距离为  $\Delta x > 0$ ，有时也记为  $h$ ，称其为空间步长。而平行于  $x$  轴的直线则大多是不等距离的，往往要按具体问题而定。

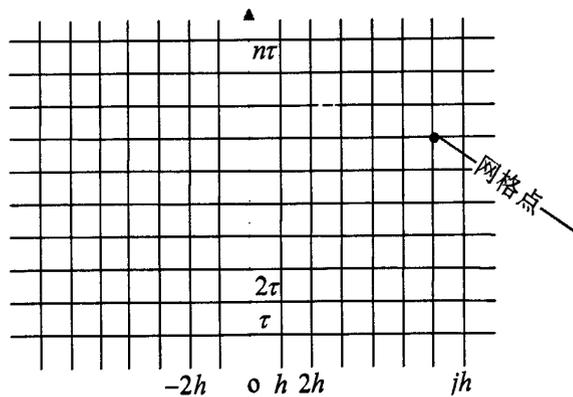


图 3.5 网格剖分图

Fig.3.5 Grid map

在此为简单起见也假定是等距的，设距离为  $\Delta t > 0$ ，有时也记为  $\tau$ ，称其为时间步长，这样两组网格线可以写作：

$$x = x_j = j\Delta x = jh, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.9)$$

$$t = t_n = n\Delta t = n\tau, n = 0, 1, 2, \dots$$

用有限差分方法近似求解偏微分方程问题有多种多样的方法，并且也可以用不同的构造方法来建立这些有限差分方法。其中泰勒级数展开是最常用的方法。为了说明这

个方法，我们从对流方程和扩散方程的初值问题着手，同时引入一些概念：

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0, x \in R, t \geq 0, \\ u(x, 0) = g(x), x \in R \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, x \in R, t \geq 0, \\ u(x, 0) = g(x), x \in R \end{cases} \quad (3.11)$$

其中  $a > 0$ ，假定偏微分方程初值问题的解  $u(x, t)$  是充分光滑的，有泰勒级数展开有：

$$\begin{aligned} \frac{u(x_j, t_{n+1}) - u(x_j, t_n)}{\tau} &= \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_j^n + o(\tau) \\ \frac{u(x_j, t_{n+1}) - u(x_j, t_{n-1})}{2\tau} &= \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_j^n + o(\tau^2) \\ \frac{u(x_{j+1}, t_n) - u(x_j, t_n)}{h} &= \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^n + o(h) \\ \frac{u(x_j, t_n) - u(x_{j-1}, t_n)}{h} &= \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^n + o(h) \\ \frac{u(x_{j+1}, t_n) - u(x_{j-1}, t_n)}{2h} &= \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^n + o(h^2) \end{aligned} \quad (3.12)$$

利用式 (3.12) 中的第 1 和 3 式有

$$\frac{u(x_j, t_{n+1}) - u(x_j, t_n)}{\tau} + a \frac{u(x_{j+1}, t_n) - u(x_j, t_n)}{h} = \left( \frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^n + o(\tau+h) \quad (3.13)$$

如果  $u(x, t)$  是满足偏微分方程式 (3.10) 的光滑解，则

$$\left( \frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^n = 0$$

由此可以看出，偏微分方程 (3.10) 在  $(x_j, t_n)$  处可以近似地用下面方程来代替

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau} + a \frac{u_{j+1}^n - u_j^n}{h} = 0 \quad (3.14)$$

其中  $u_j^n$  为  $u(x_j, t_n)$  的近似值。式 (3.14) 称作逼近微分方程式 (3.10) 的有限差分方程或简称差分方程。

我们可以看到，有限差分法是对偏微分方程的求解是近似求解，当时间步长  $\tau$  和空间步长  $h$  无限缩小时，差分格式是解是否逼近到微分方程问题的解是我们首要关注的问题，这也就是差分方程的收敛性问题。设  $u(x, t)$  是偏微分方程的解， $u_j^n$  是逼近这个偏微分方程的格式的“真解”。这里所指的“真解”是值在求解差分格式过程中，忽略了各种类型的误差，比如舍入误差等。也是说求解差分格式的过程是严格精确的，那么称

差分格式是收敛的，也就是说当时间步长和空间步长趋向于 0 是，差分格式的解逼近于微分方程的解。

利用有限差分格式进行计算时是按时间层逐层推进的，在计算每一层值时，都会有舍入误差，这些舍入误差的绝对值其符号会正负交替，这样随着层数的增加，我们希望误差项不会因为越来越大而出现上下震荡，这就是所谓的稳定性问题。

### 3.5.3 模型的离散化

因为板坯断面为中心对称，相互平行的冷却条件也基本相同，故认为铸坯断面温度也呈中心对称。板坯横断面的离散节点网格划分如图3.6所示。

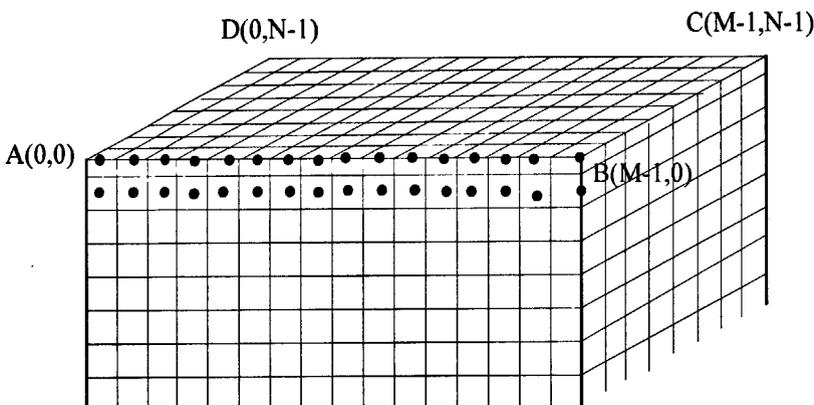


图 3.6 物理模型离散化（网格划分图）

Fig.3.6 Physical model of discrete (Grid map)

图中：A点是铸坯角部，B点是铸坯宽面中心点，C点是铸坯中心点，D点是铸坯窄面中心点。由于铸坯的对称性，取断面上的四分之一进行模拟计算即可满足研究要求用有限差分法求解。设铸坯的宽度、厚度分别为D和H，将边长取半等分成n-1和m-1个控制单元格，取空间步长分别为dx, dy，则：

$$dx = \Delta x = \frac{D}{2(n-1)} \tag{3.15}$$

$$dy = \Delta y = \frac{H}{2(m-1)}$$

另外，在时间轴上取时间步长的 dt ( $\Delta t$ )，则：

$$dt = T^{n+1} - T^n \tag{3.16}$$

### 3.5.4 差分方程

利用偏微分方程的中心差分格式，将凝固传热偏微分方程进行差分变换：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{i,j}^n = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \quad ; \quad (\text{对时间一阶差分}) \tag{3.17}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{i,j}^n = \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta x} ; \text{ (一阶中心差分)} \quad (3.18)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{i,j}^n = \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n}{2\Delta y} ; \quad (3.19)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_{i,j}^n = \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} ; \text{ (二阶中心差分)} \quad (3.20)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)_{i,j}^n = \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \quad (3.21)$$

因此将各个边界条件的微分方程转化成差分方程为:

$$\text{(a) 铸坯表面: } \lambda \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta x} = \lambda \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n}{2\Delta y} = q_s \quad (3.22)$$

$$\text{(b) 铸坯中心: } \lambda \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2\Delta x} = \lambda \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j-1}^n}{2\Delta y} = 0 \quad (3.23)$$

按照图 5 及式(3.15)、(3.16), 由以上各式对各节点差分方程的推导为:

(1) 角部节点 A (0, 0)

$$\lambda \cdot \frac{T_{1,0}^n - T_{-1,0}^n}{2\Delta x} = q_s = -h(T_w - T_{0,0}^n); \quad (3.24)$$

$$\lambda \cdot \frac{T_{0,1}^n - T_{0,-1}^n}{2\Delta y} = q_s = -h(T_w - T_{0,0}^n); \quad (3.25)$$

因为不同区域有不同的边界条件, 因此在离散方程中直接带入热流密度, 在变程时, 根据不同位置带不同热流密度计算公式。不同热流密度已经在前面列出。求解格式可以带  $\Delta x$  与  $\Delta y$ , 编程时为了简化, 可以设置成  $\Delta x = \Delta y$

$$\begin{aligned} T_{0,0}^{n+1} &= T_{0,0}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{1,0}^n - 2T_{0,0}^n + T_{-1,0}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{0,0+1}^n - 2T_{0,0}^n + T_{0,0-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\ &= T_{0,0}^n + \frac{2\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \left( \frac{T_{1,0}^n - T_{0,0}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{0,1}^n - T_{0,0}^n}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{h(T_w - T_{0,0}^n)}{\Delta x} + \frac{h(T_w - T_{0,0}^n)}{\Delta y} \right] \\ &= T_{0,0}^n + \frac{2\Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \cdot \left[ \lambda (T_{1,0}^n + T_{0,1}^n - 2T_{0,0}^n) + 2h(T_w - T_{0,0}^n) \Delta x \right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

(2) AB 线上的点 (1, 0) —— (M-2, 0)

$$\lambda \cdot \frac{T_{i,1}^n - T_{i,-1}^n}{2\Delta y} = q_s = -h(T_w - T_{0,0}^n);$$

$$T_{i,0}^{n+1} = T_{i,0}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{i+1,0}^n - 2T_{i,0}^n + T_{i-1,0}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{i,0+1}^n - 2T_{i,0}^n + T_{i,0-1}^n}{(\Delta y)^2} \right]$$

$$\begin{aligned}
 &= T_{i,0}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{i+1,0}^n - 2T_{i,0}^n + T_{i-1,0}^n)}{(\Delta x)^2} + 2\lambda \frac{T_{i,1}^n - T_{i,0}^n}{(\Delta y)^2} + \frac{2h(T_w - T_{i,0}^n)}{\Delta y} \right] \\
 &= T_{i,0}^n + \frac{\Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ \lambda (T_{i+1,0}^n + T_{i-1,0}^n + 2T_{i,1}^n - 4T_{i,0}^n) + 2h(T_w - T_{i,0}^n) \Delta y \right] \quad (3.27)
 \end{aligned}$$

(3) B 点上 (M-1, 0) 主要是根据铸坯对称性  $T_{i+1}^n = T_{i-1}^n$ ，及边界条件处理带入基本方程修改。以下类似。

$$\begin{aligned}
 T_{M-1,0}^{n+1} &= T_{M-1,0}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{M,0}^n - 2T_{M-1,0}^n + T_{M-2,0}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{M-1,0+1}^n - 2T_{M-1,0}^n + T_{M-1,0-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{M-1,0}^n + \frac{2\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \left( \frac{T_{M-2,0}^n - T_{M-1,0}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{M-1,1}^n - T_{M-1,0}^n}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{h(T_w - T_{M-1,0}^n)}{\Delta x} \right] \\
 &= T_{M-1,0}^n + \frac{2\Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ \lambda (T_{M-2,0}^n + T_{M-1,1}^n - 2T_{M-1,0}^n) + h(T_w - T_{M-1,0}^n) \Delta x \right] \quad (3.28)
 \end{aligned}$$

(4) BC 线上的点 (M-1, 0) -- (M-1, N-1)

$$\begin{aligned}
 \lambda \frac{T_{M,j}^n - T_{M-2,j}^n}{2\Delta x} &= 0 \\
 T_{M-1,j}^{n+1} &= T_{M-1,j}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{M,j}^n - 2T_{M-1,j}^n + T_{M-2,j}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{M-1,j+1}^n - 2T_{M-1,j}^n + T_{M-1,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{M-1,j}^n + \frac{\lambda \Delta t}{\rho c} \left[ \frac{2(T_{M-2,j}^n - T_{M-1,j}^n)}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{M-1,j+1}^n - 2T_{M-1,j}^n + T_{M-1,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{M-1,j}^n + \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ (2T_{M-2,j}^n + T_{M-1,j+1}^n + T_{M-1,j-1}^n - 4T_{M-1,j}^n) \right] \quad (3.29)
 \end{aligned}$$

(5) C 点 (M-1, N-1) 根据铸坯断面对称性  $T_{i+1,j}^n = T_{i-1,j}^n$  及  $T_{i,j+1}^n = T_{i,j-1}^n$  带入基本方程整理

$$\begin{aligned}
 \lambda \frac{T_{M,N-1}^n - T_{M-2,N-1}^n}{2\Delta x} &= \lambda \frac{T_{M-1,N}^n - T_{M-1,N-2}^n}{2\Delta y} = 0 \\
 T_{M-1,N-1}^{n+1} &= T_{M-1,N-1}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{M,N-1}^n - 2T_{M-1,N-1}^n + T_{M-2,N-1}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{M-1,N}^n - 2T_{M-1,N-1}^n + T_{M-1,N-2}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{M-1,N-1}^n + \frac{2\lambda \Delta t}{\rho c} \left[ \frac{(T_{M-2,N-1}^n - T_{M-1,N-1}^n)}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{M-1,N-2}^n - T_{M-1,N-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{M-1,N-1}^n + \frac{2\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ (T_{M-2,N-1}^n + T_{M-1,N-2}^n - 2T_{M-1,N-1}^n) \right] \quad (3.30)
 \end{aligned}$$

(6) CD 线上的点 (M-1,N-1) -- (0,N-1)

$$\lambda \frac{T_{i,N}^n - T_{i,N-2}^n}{2\Delta y} = 0$$

$$\begin{aligned}
 T_{i,N-1}^{n+1} &= T_{i,N-1}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{i+1,N-1}^n - 2T_{i,N-1}^n + T_{i-1,N-1}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{i,N}^n - 2T_{i,N-1}^n + T_{i,N-2}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{i,N-1}^n + \frac{\lambda \Delta t}{\rho c} \left[ \frac{(T_{i+1,N-1}^n - 2T_{i,N-1}^n + T_{i-1,N-1}^n)}{(\Delta x)^2} + \frac{2(T_{i,N-2}^n - T_{i,N-1}^n)}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{i,N-1}^n + \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ (T_{i+1,N-1}^n + T_{i-1,N-1}^n + 2T_{i,N-2}^n - 4T_{i,N-1}^n) \right]
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

(7) D 点 (0, N-1)

$$\begin{aligned}
 \lambda \frac{T_{1,N-1}^n - T_{-1,N-1}^n}{2\Delta x} &= q_s, \lambda \frac{T_{0,N}^n - T_{0,N-2}^n}{2\Delta y} = 0 \\
 T_{0,N-1}^{n+1} &= T_{0,N-1}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{0+1,N-1}^n - 2T_{0,N-1}^n + T_{0-1,N-1}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{0,N}^n - 2T_{0,N-1}^n + T_{0,N-2}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{0,N-1}^n + \frac{2\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \left( \frac{T_{1,N-1}^n - T_{0,N-1}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{0,N-2}^n - T_{0,N-1}^n}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{h(T_w - T_{0,N-1}^n)}{\Delta x} \right] \\
 &= T_{0,N-1}^n + \frac{2\Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ \lambda (T_{1,N-1}^n + T_{0,N-2}^n - 2T_{0,N-1}^n) + h(T_w - T_{0,N-1}^n) \Delta x \right]
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

(8) AD 线上 (0, 0) — (0, N-1)

$$\begin{aligned}
 \lambda \frac{T_{1,j}^n - T_{-1,j}^n}{2\Delta x} &= q_s \\
 T_{0,j}^{n+1} &= T_{0,j}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{0+1,j}^n - 2T_{0,j}^n + T_{0-1,j}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{0,j+1}^n - 2T_{0,j}^n + T_{0,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{0,j}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \frac{2\lambda(T_{1,j}^n - T_{0,j}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{0,j+1}^n - 2T_{0,j}^n + T_{0,j-1}^n}{(\Delta y)^2} + \frac{2h(T_w - T_{0,j}^n)}{\Delta x} \right] \\
 &= T_{0,j}^n + \frac{\Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ \lambda (2T_{1,j}^n + T_{0,j+1}^n + T_{0,j-1}^n - 4T_{0,j}^n + 2h(T_w - T_{0,j}^n) \Delta x) \right]
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

(9) 内部节点:

$$\begin{aligned}
 T_{i,j}^{n+1} &= T_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[ \lambda \frac{(T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n)}{(\Delta x)^2} + \lambda \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \\
 &= T_{i,j}^n + \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \left[ (T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n + T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 4T_{i,j}^n) \right]
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

### 3.5.5 差分方程的稳定性和收敛性

以上差分方程组的推导是以显式的形式出现的, 其优点是每个节点方程都可以独立求解, 整个计算过程十分简便, 但用差分方程代替微分方程要舍去泰勒级数展开项中高阶导数项, 这样将会产生误差。不过只要空间步长  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  和时间步长  $\Delta t$  取得足够小, 近似代替是可行的, 也就是说它们必须满足差分方程的收敛稳定性条件。

方程收敛和稳定条件:

$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho c} \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right] \leq \frac{1}{2} \quad (3.35)$$

而对以一维凝固传热方程，其收敛和稳定条件是：

$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (3.36)$$

对于给定的  $\Delta x$ ，内部节点和外部节点的稳定性是不一样的。对于绝热节点和内部节点，要求：

$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \leq \frac{1}{4} \quad (3.37)$$

对于对流边界节点，要求：
$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2(2 + \frac{h \Delta t}{\lambda})} \quad (3.38)$$

对于角部节点，要求：
$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \leq \frac{1}{4(1 + \frac{h \Delta t}{\lambda})} \quad (3.39)$$

由以上分析可知，当且仅当  $\Delta t$  满足下式 (3.36) 时，整个差分方程的收敛稳定性条件才能够满足，并相应确定了  $\Delta t$  和  $\Delta x$  的关系。

$$t \leq \min \left[ \frac{\rho c (\Delta x)^2}{4\lambda}, \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2(2\lambda + h \Delta t)}, \frac{\rho c (\Delta x)^2}{4(\lambda + h \Delta t)} \right] \quad (3.40)$$

本模型计算中： $\Delta x = \Delta y = 0.005$ ， $\Delta t = 0.1$ 秒。

### 3.6 计算中的物性参数选择及处理

#### 3.6.1 钢的液、固相温度

钢的液、固相温度取决于化学成分，根据钢种中元素含量，用经验公式计算。液相线温度计算公式为：

$$T_l = T_f - \sum \Delta T \cdot i \quad (3.41)$$

式中  $T_l$ ——液相线温度；

$T_f$ ——纯铁熔点；

$\Delta T$ ——铁液中每加入 1% 元素 I 使熔点降低值；

$i$ ——元素 I 质量百分数。

一般常用的计算液固相温度公式为<sup>[14]</sup>：

$$T_l = 1536 - (90 \cdot \%C + 6.2 \cdot \%Si + 1.7 \cdot \%Mn + 28 \cdot \%P + 40 \cdot \%S + 2.6 \cdot \%Cu + 2.9 \cdot \%Ni + 1.8 \cdot \%Cr + 5.1 \cdot \%Al) \quad (3.42)$$

$$T_s = 1536 - (415.3 \cdot \%C + 12.3 \cdot \%Si + 6.8 \cdot \%Mn + 124.8 \cdot \%P + 183.9 \cdot \%S)$$

$$+4.3\cdot\%Ni+1.4\cdot\%Cr+4.1\cdot\%Al \tag{3.43}$$

### 3.6.2 比热容与凝固潜热

钢的比热容  $C_p$  与钢种和温度等因素有关。一般来说，比热容随温度升高而增大，但在高温下比热容变化不大，故可把比热容作为常数进行处理。液态钢中比热为  $756\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ，固相区的比热为  $662\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

凝固潜热是指从液相线温度冷却到固相线温度所放出的热量。对于凝固潜热  $L_f$  的处理有焓方法，显热熔法<sup>[25]</sup>和温度回升法<sup>[24]</sup>。焓方法是将把潜热和显热并入焓的处理方法，但这必须知道焓与温度的关系；显热熔法是将凝固潜热考虑在材料的比热中；温度回升法是将潜热释放量折算成合金材质热容量所对应温度变化量。本模型采用显热熔法处理凝固潜热，即将凝固潜热平均分配到固、液两相区内。两相区的比热为：

$$C_{sl} = \frac{(C_s + C_l)}{2} + \frac{L_f}{T_l - T_s} \tag{3.44}$$

式中： $C_s, C_l$ ——钢的固态，液态比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ；

$L_f$ ——凝固潜热， $\text{J}/\text{kg}$ ；

$T_l, T_s$ ——钢液的液相线，固相线温度， $^\circ\text{C}$ 。

### 3.6.3 密度 $\rho$

铸坯在凝固冷却过程中体积会发生变化，其密度与钢种、温度和相变有关，对低碳钢来说，固相区密度为  $7400\text{kg}/\text{m}^3$ ；液相区密度采用值为  $7000\text{kg}/\text{m}^3$ ；两相区密度取值为  $7200\text{kg}/\text{m}^3$ 。在一定温度下，钢中碳增加时，密度仅有轻微的变化，因此可采用常数来减少计算量，加快计算速度。

### 3.6.4 传热系数

导热系数与钢种和温度有关，对固相区的导热系数一般视为常数，或为温度的线性关系。本研究中固相导热系数用下式计算：

$$\lambda(T) = a + bT, T \leq T_s \tag{3.45}$$

式中： $a, b$ ——常数，本研究中取  $a=15.8847, b=0.011495$ <sup>[26]</sup>；

$T_s$ ——固相线温度， $^\circ\text{C}$ 。

对于液相区由于注流动能或电磁搅拌引起钢水的强制对流，会加速液相中的热量传递，一般用相当于静止钢液导热系数整数倍来综合考虑对流传热的作用，即用放大导热系数的方法综合考虑液相对对流传热的影响。对于板坯而言，一般取液相区的等效导热系数为固相区的  $4\sim 7$  倍来综合考虑。液相区的等效导热系数为：

$$\lambda(T) = m(a + bT), \quad T \geq T_l \quad (3.46)$$

式中:  $m$ ——常数, 一般为 4~7;

$T_l$ ——液相线温度, °C。

根据查阅的文献<sup>[27, 28]</sup>, 两相区的导热系数与树枝晶的多少密切相关, 若简单的使其与温度呈线性关系, 则导热系数将比实际值偏高。这是因为在树枝晶的根部, 钢液的流动非常小, 而在有少量固相生成的区域, 少量的固相阻止钢液的流动的效果非常明显。因此本研究中采用下面的公式计算两相区的导热系数:

$$\lambda_{eff} = \lambda(T) * \left[ 1 + (m-1) * \left( \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right)^2 \right] \quad (3.47)$$

式中:  $\lambda_{eff}$ ,  $\lambda(T)$ ——两相有效导热系数, 固相导热系数;

$m$ ——确定需要根据现场校正, 最终确定的  $m$  取 5。

### 3.6.5 二冷区综合传热系数

二冷区综合传热系数是描述二冷区传热效果, 进行连铸计算的重要参数, 它与喷嘴类型、喷嘴布置、水流密度、水温及铸坯表面状态有关, 由于传热系数的重要性, 国内外学者进行了大量的测定和研究, 得到了不同条件下的经验公式。从理论上讲, 应测定二冷区使用不同类型喷雾水滴与高温铸坯的传热系数作为数学模型计算的边界条件, 实际上进行这种测定耗资巨大, 且是十分困难的, 再就是影响因素复杂, 不同作者测定结果也往往差异很大。而二冷区不同冷却段的传热系数  $h$  值又是传热计算所必须的, 为此采用的方法是:

- (1) 借鉴相关文献<sup>[29-31]</sup>, 选择经验公式;
- (2) 现场实测数据 (水流量, 表面温度);
- (3) 计算机程序处理得到换热系数公式<sup>[32]</sup>。

本研究通过以上的处理步骤得到以下换热计算公式:

$$11O、1N \text{ 回路: } h = 0.356w^{0.418} \quad (3.48)$$

气水喷嘴:

$$21O \text{ 回路: } h = 0.391w^{0.451} \quad (3.49)$$

$$31O \text{ 回路: } h = 0.391w^{0.451} \quad (3.50)$$

$$4I、4O \text{ 回路: } h = 0.391w^{0.451} + 0.005 \quad (3.51)$$

$$5I、5O \text{ 回路: } h = 0.391w^{0.451} + 0.010 \quad (3.52)$$

$$6I、6O \text{ 回路: } h = 0.391w^{0.451} + 0.020 \quad (3.53)$$

$$7I、7O \text{ 回路: } h = 0.391w^{0.451} + 0.030 \quad (3.54)$$

$$8I、8O \text{ 回路: } h = 0.391w^{0.451} + .0040 \quad (3.55)$$

式中:

$W$ ——水流密度,  $L/(m^2 \cdot s)$ ;

$h$ ——换热系数,  $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

### 3.6.6 结晶器的热流密度

利用现场测定的结晶器冷却水量和进出口处的温差, 求出结晶器平均热流密度:

$$\bar{q} = C_w \cdot q_w \cdot (\Delta T)_w / S_{eff} \quad (3.56)$$

式中:  $\bar{q}$ ——结晶器平均热流密度,  $kJ/(m^2 \cdot \text{min})$ ;

$C_w$ ——水的比热,  $4.180 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ C)$ ;

$q_w$ ——结晶器冷却水量,  $L/\text{min}$ ;

$(\Delta T)_w$ ——为结晶器冷却水进出口处的温差,  $^\circ C$ ;

$S_{eff}$ ——为有效受热面积,  $m^2$ 。

瞬时热流密度沿结晶器浇铸方向的分布用下式计算:

$$q = 2680000 - b\sqrt{L/v} \quad (3.57)$$

$$b = 1.5 \times \left( 2680000 - \bar{q} \right) / \sqrt{L_m / v}$$

式中:  $\bar{q}$ ——结晶器瞬时热流密度,  $kJ/(m^2 \cdot \text{min})$ ;

$L_m$ ——结晶器长度,  $m$ ;

$L$ ——所求瞬时热流位置距离弯月面距离,  $m$ ;

$v$ ——拉速,  $m/\text{min}$ ;

## 3.7 二冷水量控制方法介绍

### 3.7.1 拉速相关控制

目前各钢厂运用最普遍的配水方法是与拉速相关的控制方法, 它以拉速的大小决定水量的多少, 通常采用如下的计算公式进行计算:

$$Q_i = A_i V_c + B_i V_c + C_i \quad (3.58)$$

式中:  $Q_i$ ——第  $i$  区的喷水量;

$A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ ——设定的基本参数;

$V_c$ ——拉速。

这种控制方式简单可行, 可以满足二次冷却的基本要求, 并且应用较广。但是由于

它根据瞬时拉速计算水量，当拉速发生变化时，尤其是拉速降低到很小值时，水量也随之发生很大变化，造成铸坯表面温度剧烈波动。

### 3.7.2 “坯龄”模型

本研究中在线动态配水的核心是使用坯龄模型。“坯龄”就是坯壳生成后所经历的时间。如图 3.7 所示，在此模型中，铸坯每隔一定距离产生一个切片，当切片出铸机或冷却区时，切片不再被跟踪，它在计算机内存中将被销毁。每个切片以拉速前进，模型跟踪每个切片直至其离开冷却区。每隔一定时间，每个切片的数据将被更新，这些数据主要是切片距离弯月面的距离和切片的运行时间，即“坯龄”。

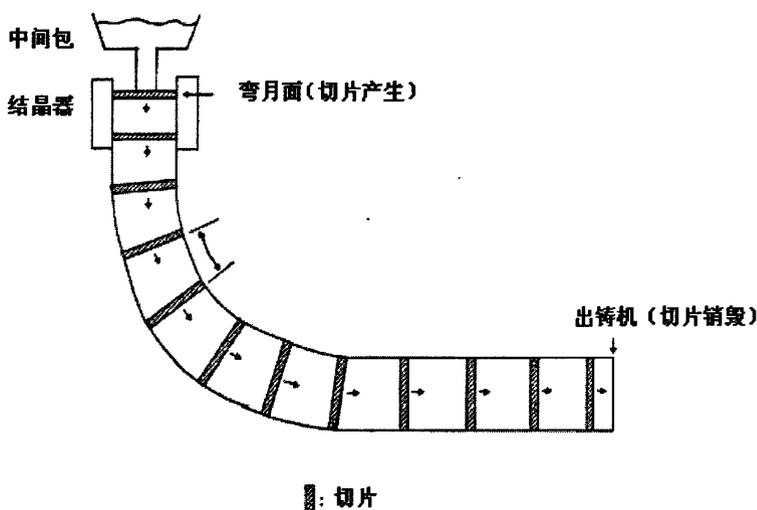


图 3.7 坯龄模型示意图

Fig.3.7 The diagram of the residence time model

连铸运行时，根据等效速度  $V_{mei}$  与水流量的关系，从而确定水量分布。等效拉速是切片平均速度与瞬时速度的加权平均：

$$V_{mei} = (1 - k_i)V_i + k_i V_c \tag{3.59}$$

式中：  $k_i$ ——权重；

$V_i$ ——平均速度，m/min；

$V_c$ ——瞬时速度，m/min。

通过平均拉速的处理，将该区上所有小单元的平均寿命和该区水量相结合，保证水量变化的渐进过程，即使拉速波动较大也不会引起水量的剧烈变化，这也符合传热过程的滞后特性。

稳态（拉速稳定）时上述两种冷却方法的冷却效果大同小异；非稳态（拉速变化）时，尤其是拉速降低到零时，采用拉速相关控制方法会导致供水量的剧烈变化，但是对

于经历了一段冷却历程的铸坯理应按照既定的水量配水，却由于拉速的改变而改变了冷却水量，这就会造成铸坯表面温度剧烈波动。因为决定冷却水量大小的不是拉速，也不是铸坯所处位置，而是冷却时间，采用坯龄模型考虑了铸坯生成时间这一本质因素，在非稳态条件下应用会有好的冷却效果。

当  $k_i=0$  时，模型采用平均速度配水<sup>[37]</sup>，瞬时拉速波动时，虽然有效拉速波动程度减小，但是在靠近结晶器的冷却段由于铸坯温度主要受结晶器冷却的影响，瞬时拉速应占较大比重，因此对于靠近弯月面的冷却段的铸坯表面温度控制的不是很好。

当  $k_i=1$  时，模型相当于静态配水，瞬时拉速的波动会引起铸坯表面温度的剧烈波动。

$k_i$  的一般取值见表 3.1。

表 3.1 有效拉速中权重的一般取值

Table 3.1 Effective speed of the weighting of the general value

冷却条件	靠近弯月面 ←		→ 远离弯月面	
弱冷	0.7	0.5	0.25	0
强冷	0.3		0.2	0

### 3.7.3 静态配水表的设计

为了提供板坯连铸机提供配水水表，保证铸坯质量，通过离线程序的计算，编制离线配水表。该表以连铸坯凝固传热数学模型为基础，并结合生产实际，确定适合的配水参数。首钢板坯铸机有 13 个扇形段，将二冷段分为 8 个区，15 个二冷水量控制回路，它们是：

- (1) 1N: 结晶器足辊窄面；
- (2) 1I+O: 结晶器足辊宽面内外弧；
- (3) 2I+O: 弯曲段的上部内外弧；
- (4) 3I+O: 弯曲段的下部内外弧；
- (5) 4I+O: 1 号扇形段内外弧；
- (6) 5I: 2、3 号扇形段内弧；
- (7) 5O: 2、3 号扇形段外弧；
- (8) 6I: 4、5 号扇形段内弧；
- (9) 6O: 4、5 号扇形段外弧；
- (10) 7I: 6~7 号扇形段内弧；
- (11) 7O: 6~7 号扇形段外弧；
- (12) 8I: 8~10 号扇形段内弧；
- (13) 8O: 8~10 号扇形段外弧。
- (14) 9I: 11~13 号扇形段内弧；

(15) 90: 11~13 号扇形段外弧。

其中扇形段 1~6 为弧形区域, 扇形段 7~8 为矫直区, 距离弯月面 24.1m~31.27m。根据 Q235 热塑性曲线以及连铸机参数, 设定了各区目标温度。

将确定的出口目标温度代入离线配水程序中, 设定断面宽度为 1800mm, 断面厚度为 220mm, 中间包温度为 1545℃, 拉速设定为 1.2m/min。运算结束时应使各区出口的计算温度与设定的目标温度相同。得到的温度分布如图 3.8 所示。

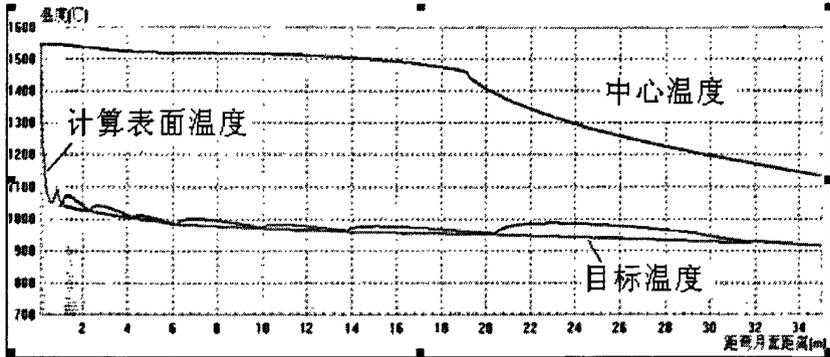


图 3.8 拉速 1.2m/min 下铸坯表面温度

Fig. 3.8 The slab surface temperature when the speed of 1.2 m / min

### 3.7.4 静态水表的检验

为了对制定的水表进行校核, 对铸坯表面温度进行了测量。测温仪选用了红外测温仪, 将其安放在整个二冷区的末端, 并将其与计算机相连, 通讯方式为串口方式, 测温仪每 0.5s 发送一组温度数据信号, 经过 485 转 232 转换器, 由 RS232 进入计算机。测温系统的范围为: 600℃~2000℃, 最大误差<1%, 响应时间为 67ms, 测温距离为 0.6~∞ 米。

在选用了某一个时间段对静态水表进行了检验, 检验当时铸机的工艺参数如下:

浇铸钢种: Q235B

铸坯断面: 1800\*220

拉速: 1.0m/min

中包钢水温度: 1563℃

根据静态水表水量, 在二冷区末端冷却获得了几组数据, 对其取平均值, 得到测量温度与计算温度对照表如下表:

表 3.2 测量与模型计算温度对照表

Table 3.2 The survey temperature and the model calculate temperature comparative table

测量位置	出口表面温度		绝对误差 (°C)	相对误差%
	实测温度 (°C)	模型计算温度 (°C)		
二冷末端	910	908.65	1.35	0.15

上述验证表明模型计算的温度与在这个基础上的配水量是相吻合的, 所建的模型与配水量基本符合实际情况, 可以用来计算二冷区各回路的静态水量分配, 为生产提供依据。

# 第四章 连铸二冷动态控制模型的软件开发

## 4.1 概述

前面对板坯铸机的凝固传热模型的建立及其解法进行了理论上的分析及设计，本章将介绍如何实现这个模型的核心计算及应用。实现整个系统包括两个方面的内容，一是模型的物理结构的搭建，再有就是离线及在线动态模型计算的程序编制。

首钢板坯铸机的计算机控制系统为以 PLC 为主的集散控制系统，生产部分的联网方式为专用工业局域网，使用的协议为 ControlNET 工业局域网协议。数据处理及管理部分为局域以太网，使用 TCP/IP 协议，做为首钢炼钢厂生产信息管理系统的一个子网。用专用工业以太网的数据处理机为管理信息系统提供生产过程数据<sup>[39]</sup>。整个生产部分包括了 5 套 PLC，分别是板坯铸机大包 PLC、板坯铸机主体 PLC(1)、板坯铸机主体 PLC(2)、板坯铸机水系统 PLC 和板坯铸机电磁搅拌 PLC，每一套 PLC 都有对应的 HMI 系统，为了实现在生产过程的统一管理，在网络中加入了生产管理过程机，整个铸机系统的数据也是通过这台过程机将数据传送到二炼钢工厂网。主要功能及分布情况如图 4.1:

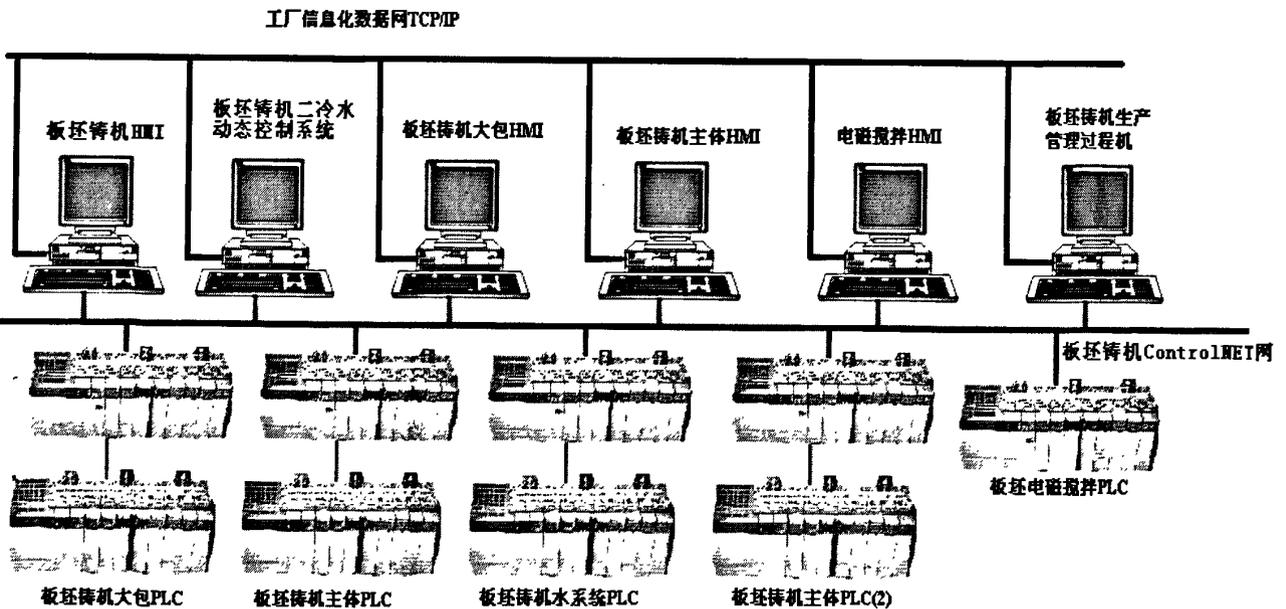


图 4.1 系统硬件配置图

Fig. 4.1 System hardware disposition chart

动态水量控制系统是整个板坯铸机生产 ControlNET 网的一个节点，包括上位监控系统二套，PLC 一套。

整个硬件系统配置中，PLC 选用的是 Rockwell 公司的 ControlLogix 系列产品，为

了在改造的同时不影响原来正常的生产要求，想要在系统中加入二冷水动态控制模型，只要在已有的 ControlNET 网络中加入一个节点，然后在工控机上安装一块 ControlNET 的专用网卡，通讯的连接工作就完成了。

系统的通讯是通过 Rockwell 公司的 RsLinx 软件中的 OPC 来完成的，在 RsLinx 中配置一个数据包，然后由 VB 将从 OPC 采集上来的数据包送到 VC 中就可以了。另外，原有系统中因为有静态水表的原因，因此每个回路的流量设定值来自于静态水表，现在选用动态控制，流量的设定值地址发生了变化，这些可以通过修改 PLC 程序来实现；其次是二冷动态模型需要一些工艺数据，这些工艺数据可以通过 PLC 中的数据包传送给模型，因此需要在 PLC 中做一个数据通讯包。

在动态模型系统中主要有两部分程序，一部分是由 VB6.0 编制的通讯及 HMI 程序，主要作用是到现场 PLC 通讯及人机接口的实现；另一部分就是用 VC6.0 编制的模型部分，包括静态离线模型及动态在线控制模型，这是整个系统的核心部分。详细的动态控制系统功能结构图如图 4.2。

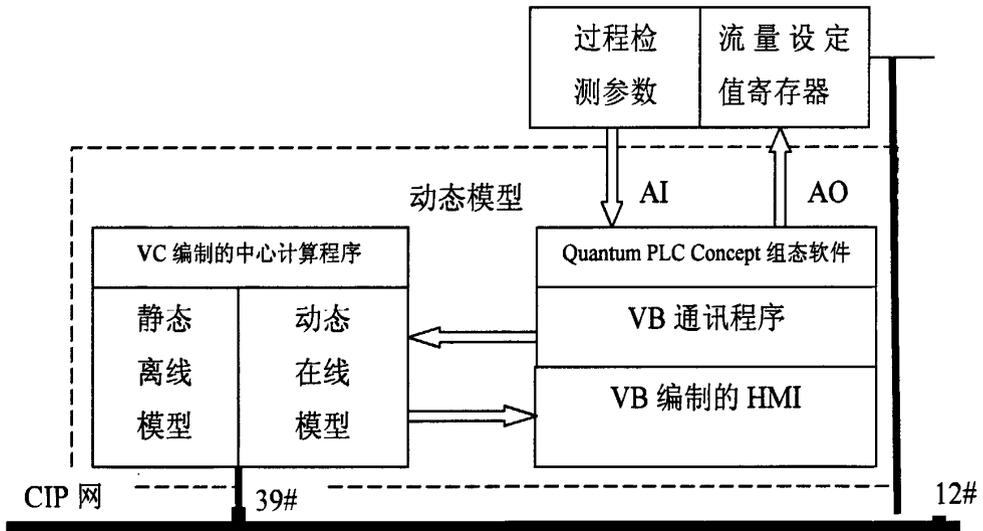


图 4.2 动态控制系统功能结构图

Fig.4.2 Dynamic control structure of the system

## 4.2 相关技术介绍

### 4.2.1 OPC 接口技术介绍

现代工业自动化控制系统中，硬件设备和软件产品逐渐向着开放性、互操作性、高效性、实时性、网络化和集成化方向发展。OPC 标准的出现，为现场设备之间的互联以及企业信息系统对现场设备进行访问提供了一个合适的解决方案。

OPC 即 OLE for Process Control 的缩写，是用于工业控制领域的 OLE(Object Linking

and Embedding)。按照 OPC 基金会的定义, OPC 是世界上领先的跨国自动化公司和硬件供应商合作开发的一套技术规范和工业标准, 为基于 Windows 操作平台的工业应用程序提供高效的信息集成和交互功能的组件对象模型接口标准, 以微软的分布式组件对象模型 COM/DCOM/COM+技术为基础, 采用 C/S 模式, 提供自动化控制、设备管理和设备之间的软件应用互操作性和设备的互换性<sup>[39]</sup>。

OPC 采用典型的客户/服务器结构, 由 OPC 服务器 (Server) 和 OPC 客户端程序 (Client) 两部分组成。OPC 规范为软、硬件生产商提供了一个公用的数据交换标准和接口, 硬件厂商只需为其生产的硬件设备提供一个符合 OPC 接口的规范的 OPC 服务器, 其他应用程序即可通过 OPC 接口对 OPC 服务器进行访问, 从而实现了对硬件设备的访问。下图是 OPC 服务器、OPC 客户端、工业现场控制设备关系图。

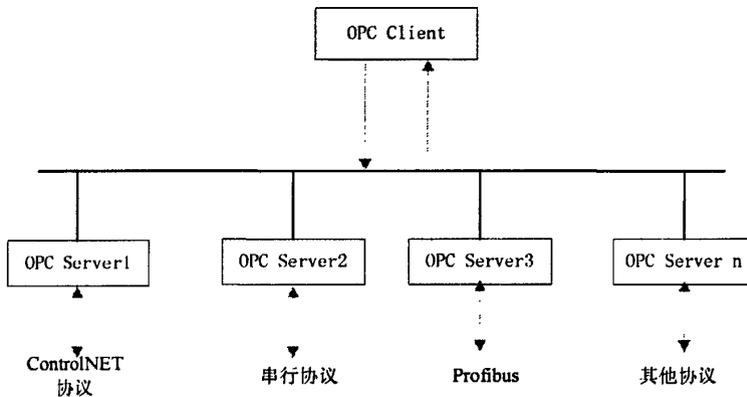


图 4.3 OPC 系统连接图

Fig.4.3 OPC system connection diagram

### 4.2.2 ControlLogix 控制器介绍

Rockwell(Allen-Bradley)公司的 PLC-5 是其早期产品, 它在包括冶金、石化、水处理、矿山等几乎所有的行业都有广泛的应用。PLC-5 技术成熟, 在大中型应用领域是一种比较好的选择。最近几年, PLC-5 又增加了多种通讯功能, 增加了它的分布式控制的能力。

而 ControlLogix 控制器是 Rockwell(Allen-Bradley)公司的下一代控制器, 它将顺序控制、过程控制、传动控制、运动控制、通讯技术、最新 I/O 技术等集成在一个小型的具有竞争力的平台里。由于 ControlLogix 控制器采用了模块化的结构, 因此用户就有可能设计、建立和更改控制平台。该控制器采用了 RSLogix5000 系列编程环境, 提供了易于使用的符合 IEC-1131-3 标准的接口, 采用结构和数组的符号化编程效率。其 Netlinx 开放式网络结构提供了通用的通讯工具用于各种不同类型的网络, 例如: Ethernet、ControlNet、DeviceNet 等。

### 4.2.3 ControlNet 简介

ControlNet 网络是新一代自动化控制网络,采用 IEC61158 国际工业现场总线标准,它提供了一种在 PLC 与 PLC 之间实现高速 (5Mb/s) 的、可冗余的通信方式,同时有将控制系统分成彼此独立而又相互联系的子系统。

首钢二炼钢板坯连铸现场采用的控制总线可以支持 99 各节点,最大网络距离 20km,它可以连接总线型、树型、星型及混合型等不同的网络拓扑结构。通过 ControlNet 可以在网络上完成数据传送、I/O 更新、对等通信等功能、ControlNet 主干用标准电缆,所有挂到网上主干的设备都通过分支器挂到网上,现场分支器采用 T 形接法。PLC 通过 ControlNet 组成控制站,完成生产过程的控制和数据采集。ControlNet 通讯协议支持信息报文、生产者/消费者标签以及分布式 I/O。与 EtherNet/IP 采用相同的应用层协议;支持同轴和光纤中继器,从而实现隔离,增加传输距离。

### 4.3 软件功能设计

本系统的模型计算部分是采用 VisualC ++6 .0 在 WIN2000 系统平台上进行开发的,以下为主要功能框图(图4.5)

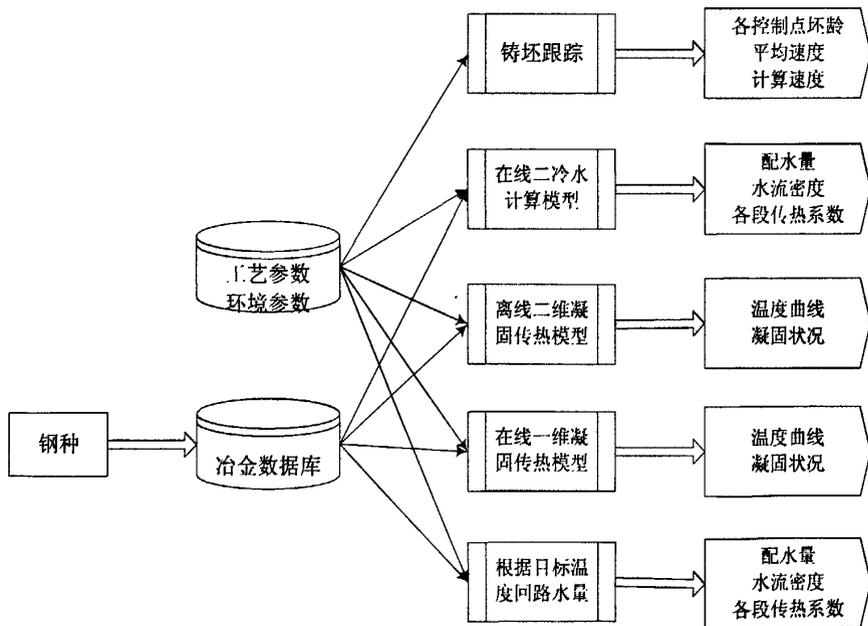


图 4.5 模型的功能框图

Fig. 4.5 Model function diagram

本软件所实现的功能之一:对于具体的板坯连铸生产,当输入相应的工艺及介质参数、各钢种的热物性参数以及计算条件、铸坯和设备参数后,通过程序运算就可以得到铸坯表面温度分布、铸坯在各冷却段出口坯壳厚度、液相穴长度和凝固系数等参数,实现连铸板坯传热凝固状态的模拟。这是凝固传热模型的基本功能。



面就是将这些数据存储起来，以便今后的数据及系统分析。

在不同的阶段调用不同的运算模块，这些模块在计算二冷各段表面温度的同时，也根据各段目标温度计算出传热系数、水流密度及配水量。温度曲线可以描述铸坯的凝固状态，模拟出液、固相及液固两相的位置。

## 4.4 二冷动态模型程序设计

### 4.4.1 通讯程序设计

#### (1) RSLinx 配置

RSLinx 是 AB 可编程控制器在 Windows 环境下建立工厂所用通信方案的工具，它不仅提供了多种网络驱动程序，而且提供了最快速的 OPC、DDE 和 Custom C/C++ 接口。本设计中二冷控制模型工控机与 ControlLogix 控制器之间的通讯采用 ControlNet 方式进行连接，在 RSLinx 中只要找到网络上的所有节点，然后设置 OPC 通讯包，通讯包与要

进行通讯的 PLC 进行连接就行了。具体步骤如下：单击 ，可以看到，我们不需要 CPU 就可以进行通讯。这样可以减少 CPU 负荷，提高通讯效率，保证实时性及可重复性。然后单击 Configure New DDE/OPC Topic，出现下面的窗体：

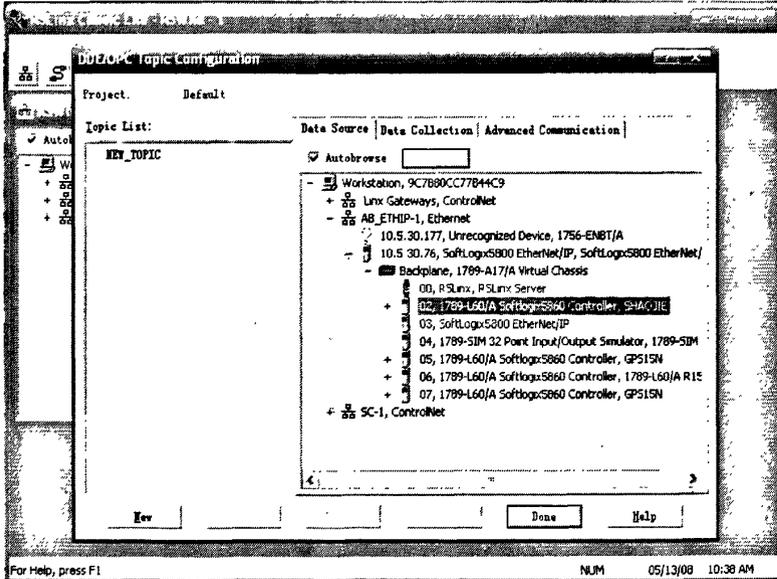


图 4.7 RSLinx 中 OPC 的数据包配置窗口

Fig. 4.7 OPC data packet disposition window in RSLinx

给新定义的数据包起个名字“2cool\_water”后点击要通讯的 PLC 主机的名称，所要的通讯就建立起来了。在建好的 TOPIC 里面，选择需要的 PLC 标签，到此 TOPIC 数据包的建立就完成了。

#### (2) OPC 程序设计

若要用 VB 开发 OPC 应用程序, 必须安装 OPC 自动化接口服务, 保证计算机系统目录下有 OPCDAAuto.dll。OPC 基金会提供了一个叫做“自动化包装器”的动态连接库, 在 VB 环境中, 按“工程”的子菜单“引用…”后, 弹出对话框, 选择其中的“RSLinx OPC Automation 2.0”项, 这样才能使用自动化接口。用 VB 编写了 OPC 客户端应用程序, 实现了模型与 ControlLogix 控制器之间的通信。主要程序代码如下:

```
Public Sub Connect(ByVal valSvrName As String)
    Dim WithEvents MyOPCServer As OPCServer '定义服务器对象变量 MyOPCServer
    Dim WithEvents MyOPCGroup As OPCGroup '定义 OPC 组对象变量 MyOPCGroup
    Set MyOPCServer = New OPCServer
    MyOPCServer.Connect "RSLinx OPC Server" '连接 RSLinx 的 OPC 服务器
    opc.Connect valSvrName
    Dim gs As OPCGroups
    Set gs = opc.OPCGroups
    gs.DefaultGroupsIsActive = True '设置该组数据为后台刷新
    Set group = gs.Add("2cool_water") '添加 OPC 组对象
    group.UpdateRate = 1000 '设置数据刷新时间为 1000
    group.IsSubscribed = True '设置该组为激活状态
    Exit Sub
handler:
    Err.Raise Err.Number
End Sub
Private Sub Command1_Click() '列出所有 OPCSERVER
    Dim allservers As Variant
    Dim i As Integer
    allservers = opc.GetOPCServers("10.5.30.61")
    For i = LBound(allservers) To UBound(allservers)
        List1.AddItem allservers(i)
    Next
End Sub
Private Sub Command2_Click() '连接选中的 OPC
    opc.Connect List1.Text, "10.5.30.61"
    Label1.Caption = opc.VendorInfo & opc.MajorVersion & opc.MinorVersion &
    opc.BuildNumber
End Sub
```

#### 4.4.2 离线二维凝固传热模型程序设计

离线二维凝固传热模型主要研究的是铸坯在凝固传热过程中, 铸坯各点温度的变化情况。在铸坯从浇铸开始到出二冷区的在各个冷却段, 将铸坯“逐片”来进行研究, 从

而形成静态配水表，并且为一位在线模型研究提供基础。下图是模型软件设计流程图

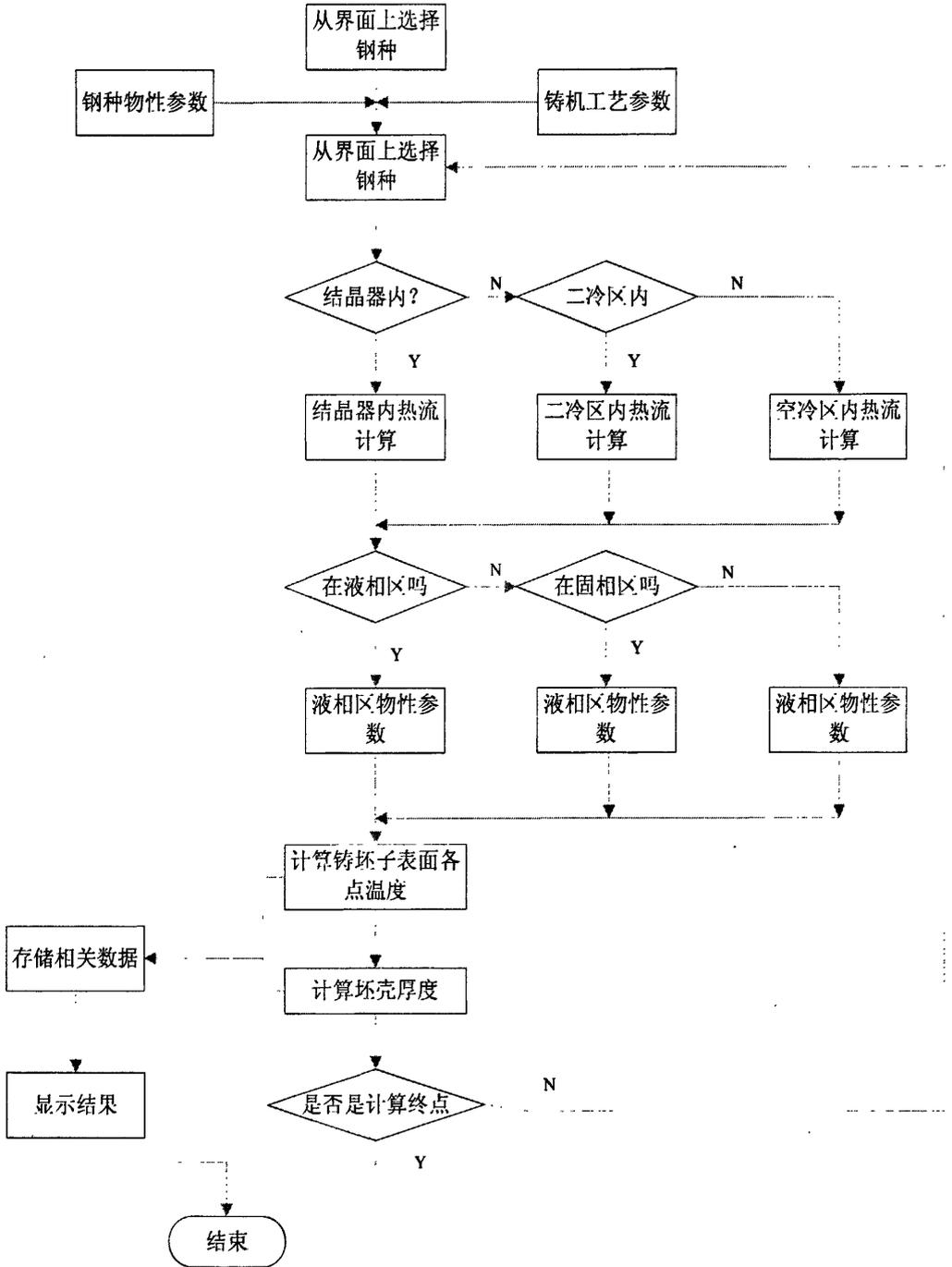


图 4.8 离线二维凝固传热模型温度计算流程图

Fig. 4.8 Off-line two-dimensional coagulation heat transfer model temperature computation flow chart

这个软件的主要功能是求解，通过凝固传热模型的偏微分方程及其初始条件、边界条件所演化成的差分方程组的解，来得知铸坯各点的温度分布、坯壳厚度及液相穴深度。

根据差分方程的稳定性及收敛性，差分方程的时间步长定为 0.1 秒，空间步长为 5 毫米。

关于这个软件的详细程序流程图如图 4.9

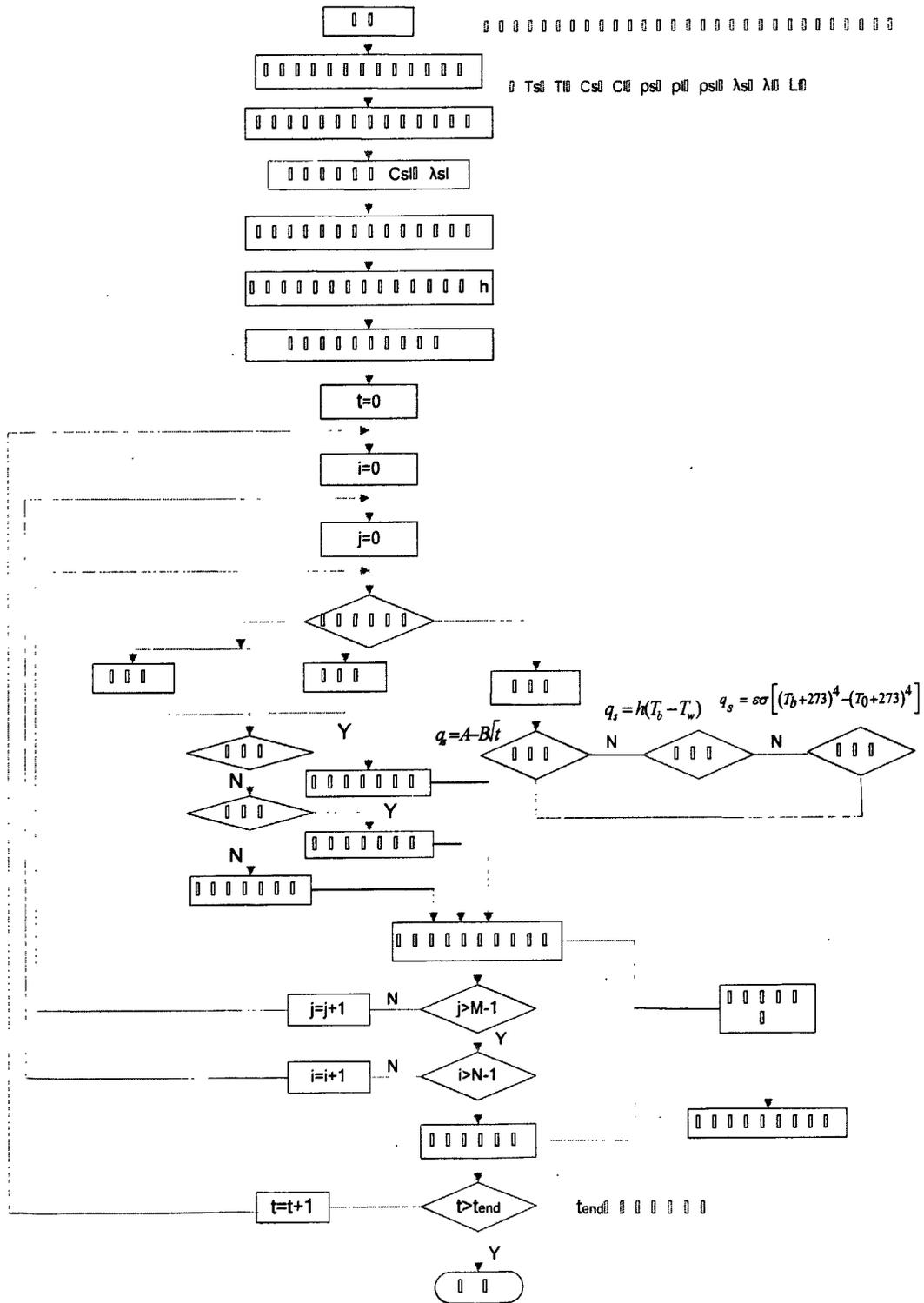


图4.9 离线程序详细设计流程图

Fig. 4.9 Off-line procedure detailed design flow chart

从浇铸开始，将铸坯切成很薄的“薄片”，厚度就是时间步长；然后再根据空间步

长将这个“薄片”分成等面积的正方形，每一个正方形就代表了在这个形状范围内的平均温度，从浇铸开始，对每一个正方形都要进行计算，然后延伸到“薄片”，这样就可以得到铸坯表面温度及液固两相区的位置了。

在温度的计算中，铸坯的位置是一个相当关键的因素。根据铸坯所处的位置，用不同方法计算不同位置的表面温度。因此结晶器长度，二冷段各个段的长度都是计算中必不可少的参数，而这些参数是可以从工艺数据库中提取的，数据的存取在程序运行中也是非常方便可靠的。

铸坯在液相、固相及液固两相区的各种物性参数是不一样的，在液固两相区还有潜热要释放出来，因此在计算过程中要随时判断所计算的点的状态。物性参数是放在物性参数库的，当钢种及过热度等参数有变化时，物性参数都有相应的变化，因此要建立物性参数数据库。

#### 4.4.3 在线一维凝固传热模型的程序设计

前面，我们通过差分方程组可以看到，二维凝固传热模型计算量是非常大的，如果在线运行也采用二维计算，那么计算机会因为负荷重而导致计算速度下降，而且随着切片的增多，计算机的计算量会越来越大，大量占用 CPU 及内存的结果是导致整个系统瘫痪，因此在在线系统中会采用一维计算来增加系统的安全性。因为有二维计算结果做的基础，所以可以将一维计算和二维计算的结果进行比较，然后在一维计算的方程中增加误差项来补偿计算中的较大误差。

从图 3.1 我们可以看到，沿浇铸方向传热因素最小，因此在二维传热中，忽略了 Z 方向上的热传导。仔细分析 X 轴及 Y 轴方向的传热效率，我们不难发现，Y 轴上的传热要比 X 轴上的传热因素小得多，另外在二冷区，喷（雾）水区域除结晶器足辊段外都是分布在铸坯的内外弧上，因此在一维计算中忽略了 Y 轴上的传热，只考虑 X 轴上的热传导。在线一维凝固传热模型流程图如图 4.10

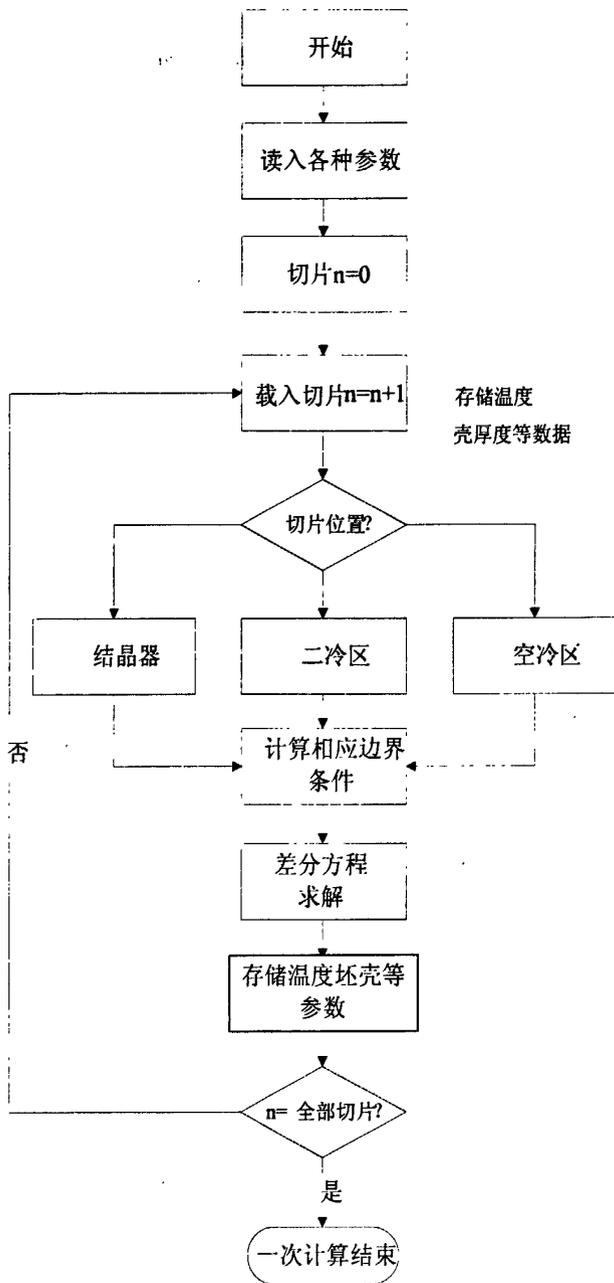


图 4.10 在线一维凝固传热模型温度计算程序流程图

Fig. 4.10 Online unidimensional coagulation heat transfer model temperature computational procedure flow chart

运用坯龄模型将铸坯划分为一个个切片，每个切片被动态跟踪，对铸坯温度的计算转变为对一个个切片温度场的计算，每个切片上都对应着一个一维非稳态传热方程，可运用前文中提到的数值方法进行求解。

#### 4.4.4 坯龄模型计算程序设计

距离弯月面的距离越大，动态配水对铸坯表面温度波动抑制的效果越明显。距离弯月面越近，结晶器冷却对铸坯表面温度的影响就越大，因此配水对铸坯表面温度的控制

效果就不明显,所以在靠近结晶器的冷却段,有效拉速中实际拉速所占的比重应该较大,因为这样才能增强冷却水对铸坯表面温度的控制。因此随着距离弯月面距离的增加,有效拉速计算式(3.59)中的权重减小。

对铸坯温度与水量的控制都建立在坯龄模型提供的数据基础上,坯龄模型的功能实现如图 4.11 所示。

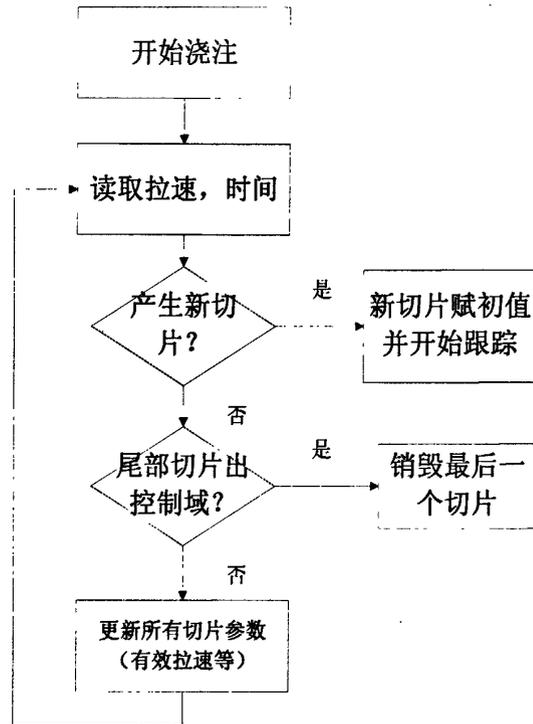


图 4.11 坯龄模型程序流程图

Fig. 4.11 Residence time model program flow diagram

运行时,用计算机控制程序,每 1 秒钟(可根据计算机的功能和具体情况确定时间间隔)进行一次运算。通过拉速计算此时间间隔内铸坯运行的长度。如果这一长度大于或等于一个单元的长度,那么其他已生成的铸坯移动相应数目的单元,对应的单元记录下铸坯的坯龄;否则,只需将各个单元铸坯的坯龄加上时间间隔,运行长度则以余量的形式记入下次运算。计算的目的是确定二次冷却区每个单元中铸坯的坯龄,再根据坯龄计算每个小单元的冷却水量。

#### 4.4.5 二冷水量计算程序设计

在配水计算中,每个二冷区的拉速用该区中间切片的有效拉速表示,再根据此拉速从数据库查找相应水量,必要时用插值法获得水量。

通过对铸坯的动态跟踪和定周期用数模进行各二冷段表面温度计算<sup>[34, 35]</sup>,与目标温度进行比较,当两者有偏差时,及时调整该二冷区的冷却强度,使铸坯表面温度与目标

温度尽量靠近。

假设计算值( $T_{Cal}$ )与目标值( $T_{Aim}$ )的差值为:

$$\Delta T = T_{Cal} - T_{Aim} \tag{4.2}$$

由热平衡关系可推导出温度差 $\Delta T_i$ 与消除该温度差所需的二冷传热系数改变量 $\Delta h_i$ 之间

的关系式:

$$\Delta h_i = \frac{c \cdot \rho \cdot \Delta d_i}{(T_{Cal} - T_{Water})} \cdot \Delta T_i \tag{4.3}$$

式中  $c$ ——比热容, J/(kg·°C);

$\rho$ ——钢的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\Delta d_i$ ——等效吸热厚度, m;

$T_{Water}$ ——冷却水温度, °C。

水量计算程序流程图如图 4.12。

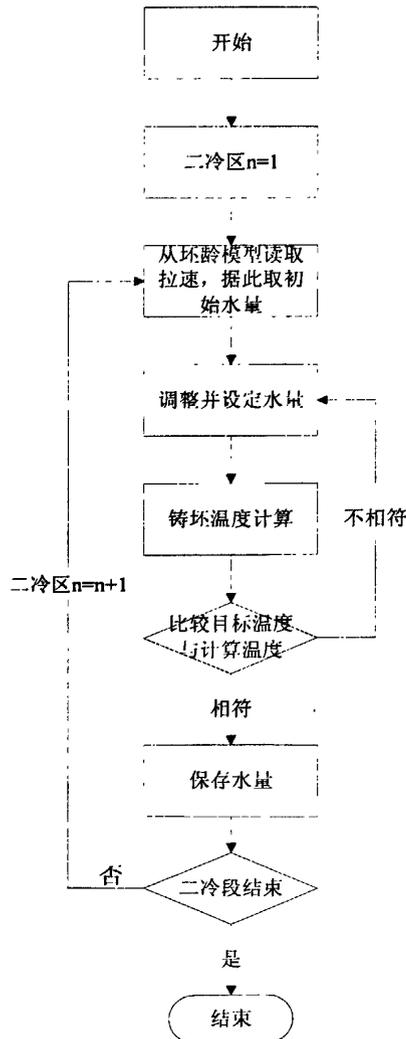


图 4.12 二冷水量计算程序流程图

Fig. 4.12 The flow chat of secondary cooling discharge of water computational procedure

在本研究中采用简化为如下公式计算修正水量：

$$\Delta Q_i = k_i \cdot \Delta T_i \tag{4.4}$$

式中：  $\Delta Q_i$ ——各回路修正水量；

$k_i$ ——各回路水量修正系数；

$\Delta T_i$ ——表面计算温度与目标温度温差。

各回路二冷配水为：

$$Q'_i = Q_i + \Delta Q_i \tag{4.5}$$

式中：  $Q_i$ ,  $Q'_i$ ——修正前水量，修正后水量。

$\Delta Q_i$ 是各回路缩小与目标温度偏差的修正水量，一般不超过 $Q_i$ 的 10%，如超过 $Q_i$ 的 10%，取 $\Delta Q_i = 10\%Q_i$ 。

#### 4.4.6 动态配水控制模型程序设计

动态配水过程中，坯龄模型不断通过铸坯跟踪获取铸坯坯龄、拉速等信息，最后得到有效拉速，据此从数据库中查找各区水量。同时每隔 3s 铸坯凝固传热模型计算一次铸坯温度，并将铸坯表面温度与模型计算温度比较，进一步修正水量。

非稳态控制配水的控制流程如图 4.13 所示。

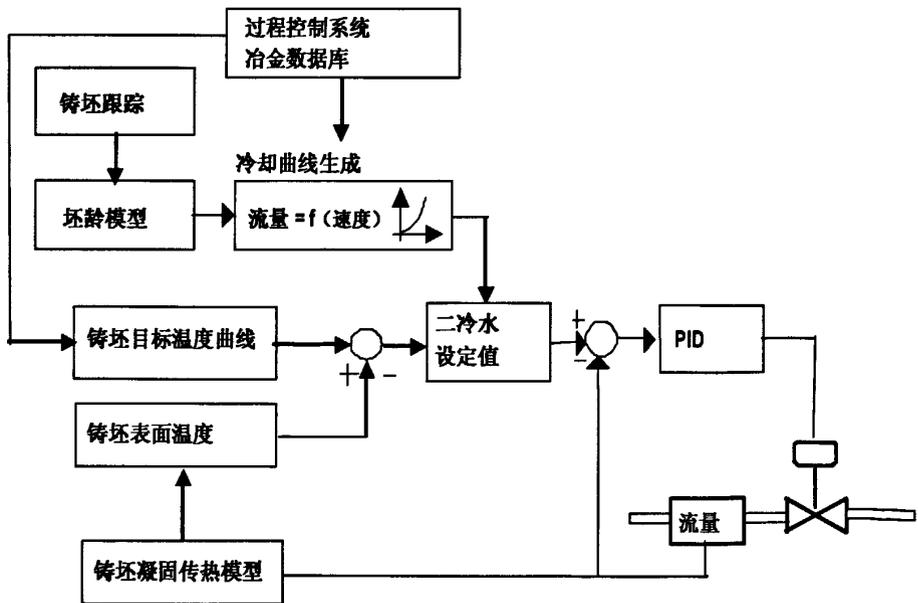


图 4.13 非稳态控制配水的控制流程图

Fig. 4.13 The non-steady state control of water distribution control flow chart

#### 4.4.7 起停浇 PLC 控制程序

为防止铸坯头(尾)部过冷并兼顾节约用水，在拉头(尾)坯阶段，当头(尾)坯进入某冷却区一段距离后，该冷却区的喷水回路则投入调节状态(退出调节状态并关闭调节

阀), 距离由拉坯速度和表面温度计算获得。在拉尾坯阶段, 为延长铸机辊道设备使用寿命, 尾坯所处二冷区的前1区喷水回路(或前2区喷水回路, 以不影响尾坯冷却为准)将被打开一段时间, 用来冷却铸机辊道设备的蓄热。

(1) 开浇方式下的配水设计

在铸坯开浇方式下, 铸坯前进到什么位置, 配水就跟踪到什么地方, 当铸坯出了二冷区时, 所有配水回路即全部开启。配水跟踪程序框图见图4.14

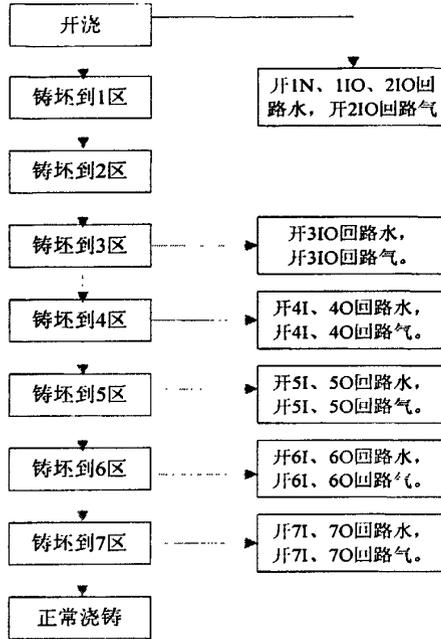


图 4.14 开浇方式下的配水框图

Fig. 4.14 Began casting method of water distribution diagram

(2) 出尾坯方式下的配水设计尾坯方式下配水跟踪程序框图见图 4.15

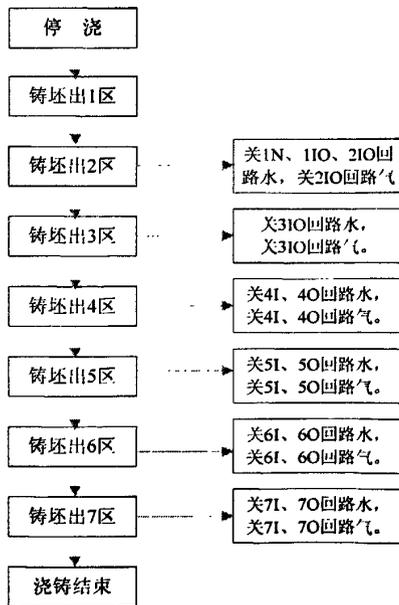


图 4.15 停浇方式下的配水框图

Fig. 4.15 End casting method of water distribution diagram

在尾坯方式下,铸坯出到什么位置,该位置的配水就停止。当铸坯出了二冷区时,所有的配水回路即全部关闭。

#### 4.4.8 数据库的设计

在系统计算过程中,各种物性参数及板坯铸机的工艺参数都是从数据库中提取出来的,数据库的设计非常重要。为了减少由于数据存取占用内存及 CPU,系统采用比较简单的数据库,即 Access,关于历史数据,可采用文本文件的格式来进行保存。

数据库中包含了控制系统进行模拟、计算和控制所需要的物性参数、热力学数据等。它包括以下一些数据:

(1) 各钢种的热物性参数。包括导热系数、热容、铸坯密度、潜热和固相率等。除固相率外的物性参数都可查阅相关手册获得。

固相率是一个与温度直接相关的参数。通过实验,并对数据进行线性或非线性计算便可得到固相率<sup>[36]</sup>。

(2) 各段出口控制目标表面温度。

(3) 各断面不同冷却强度的水表。水表中保存了最佳水量与有效速率之间的对应关系,控制系统可随时调用,或通过插入法得到所需要的水量。这已经通过离线配水模型获得。

(4) 计算速度中的权重 k 值。k 值对于每个区都不相同,根据凝固传热数学模型获得<sup>[42]</sup>。

(5) 温度补偿水量参数。用于目标温度校正水量。

(6) 各个冷却区的换热系数。

#### 4.4.9 历史数据的存取

为了节省计算机内存,加快计算速度,本系统的数据库采用了 ACCESS 数据库,历史数据的存取采用了文本文件的格式。系统中历史数据的存取是用 VB 来编写的,为了配合程序的运算,必须将现场的数据如:各段水量实时值,各段表面温度计算值,浇铸时的工艺参数及各种物性参数等数值存入一个 TXT 文件中。

设计每隔 3 秒存一条记录。考虑到文件的容量问题,我们将每 3 个小时产生的记录生成为一个文本文件,文件名跟时间相关,当对文件进行访问时,可以同时打开几个文本文件,将所需的所有数据调用出来。VB 程序如下:

```
On Error Resume Next
```

```
myint5 = CInt(Mid(Format(Now, "HH:mm:ss"), 7, 2)) '读取当前时间秒值
```

```
If myint5 Mod 5 = 0 Then
```

```
time_now = Format(Now, "yyyy-mm-dd hh:mm:ss")
```

```
If Now() >= TimeValue("00:00:00") And Now() < TimeValue("03:00:00") Then
```

```
FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "A"
ElseIf Now() >= TimeValue("03:00:00") And Now() < TimeValue("06:00:00") Then
    FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "B"
ElseIf Now() >= TimeValue("06:00:00") And Now() < TimeValue("09:00:00") Then
    FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "C"
ElseIf Now() >= TimeValue("09:00:00") And Now() < TimeValue("12:00:00") Then
    FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "D"
ElseIf Now() >= TimeValue("12:00:00") And Now() < TimeValue("15:00:00") Then
    FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "E"
ElseIf Now() >= TimeValue("15:00:00") And Now() < TimeValue("18:00:00") Then
    FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "F"
ElseIf Now() >= TimeValue("18:00:00") And Now() < TimeValue("21:00:00") Then
    FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "G"
ElseIf Now() >= TimeValue("21:00:00") And Now() <= TimeValue("23:59:59")
Then
    FileName = "\data\" & Format(Date, "yyyy-mm-dd") & "H"
End If
Open App.Path & FileName & "1.QX" For Append As #1           '追加输出文件 1.
    For l = 1 To 30
        Write #1, time_now, Format(myitemval(l), "#0")
    Next l
    Close #1
```

#### 4.4.10 人机界面的设计

二冷水人机界面用了两台工控机：一台是用 RSView 做的水系统总画面(如图 4.16)，这个画面不但包括了二冷区冷却水的总量及各段水量分布情况，还显示了结晶器冷却水供水情况；另外还有二冷段各回路的模拟控制控制面板图，在控制面板上不但各个回路水量设定值和水量实际值一目了然，调节效果也显示得很清楚(如图 4.17)。

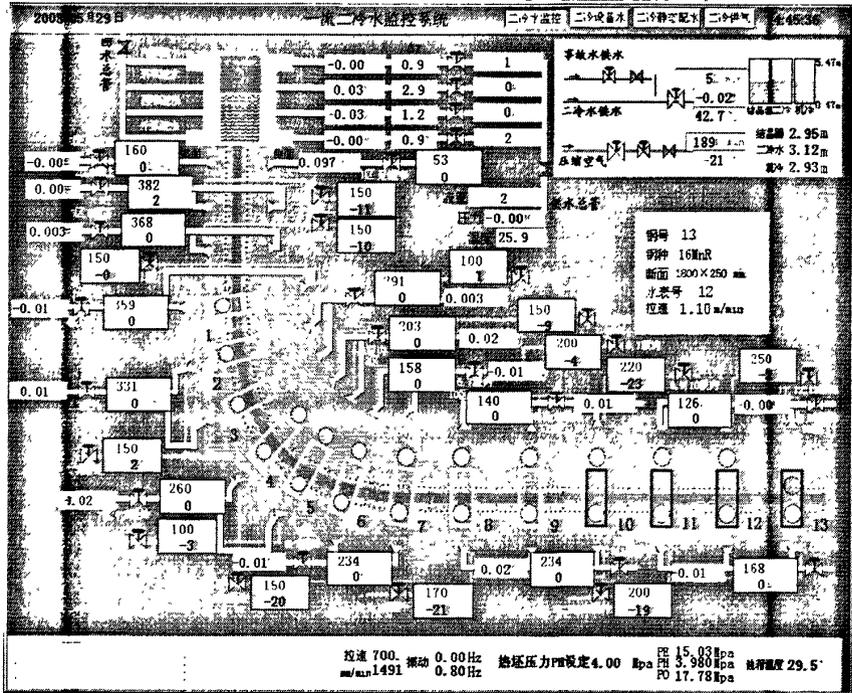


图 4.16 二冷水监视系统 HMI 画面

Fig. 4.16 Secondary cooling water monitoring system HMI screen

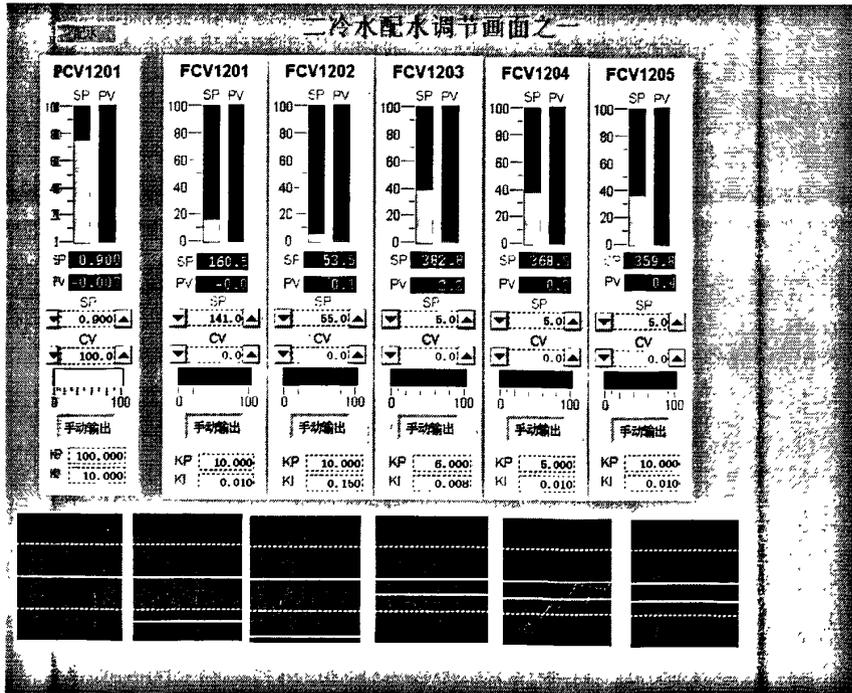


图 4.17 二冷配水调节模拟控制器模拟画面

Fig. 4.17 Secondary cooling water distribution analog controller regulate Images

另外一套 HMI 是为动态配水专门设计的。为了方便设计，这套人机界面主要是用 VB6.0 来进行设计的。与 VC 相比，VB 在设计界面方面有得天独厚的条件，不但画面可以非常漂亮，且调用各种控件也非常方便。

人机界面主要分为四个部分，主界面，温度及坯壳厚度显示界面，水流量显示界面和浇注工艺参数设定对话框。图 4.18 显示的是程序主界面。主界面显示的是与生产工艺相关的数据及二冷动态控制的主要数据，如拉速，中间包温度，结晶器传热及浇铸工艺相关参数，以及各二冷区的设定目标温度与实际目标温度，各二冷区模型计算水量和实际水流量。

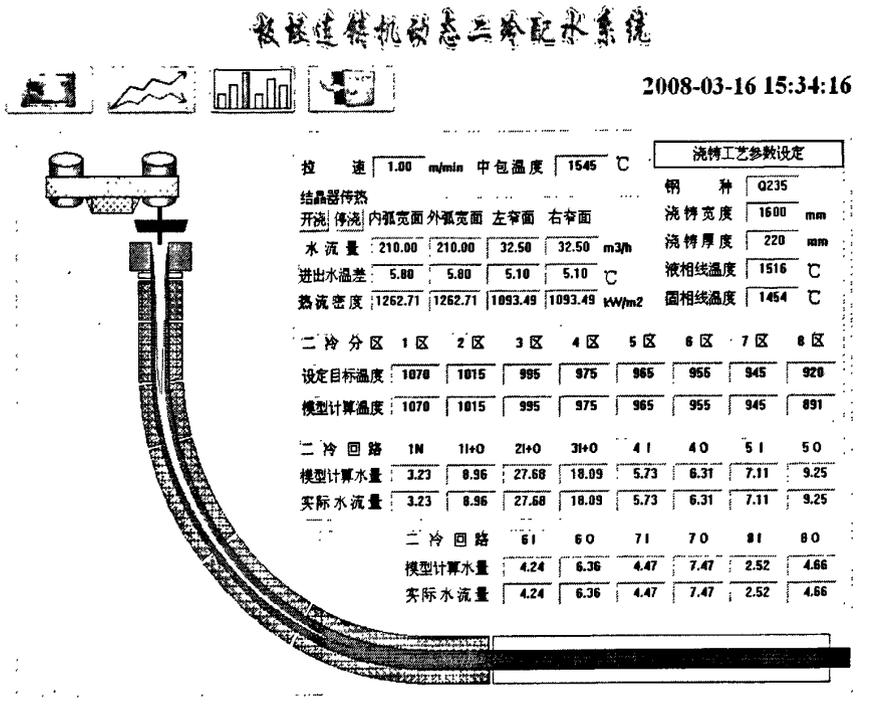


图 4.18 板坯二冷动态控制主画面

Fig. 4.18 Slab secondary cooling dynamic control the main screen

图 4.19 显示的是浇注参数设定对话框。在该对话框中可以设定钢种、断面尺寸、中间包温度、拉速、结晶器宽面水流量和进出水温差。

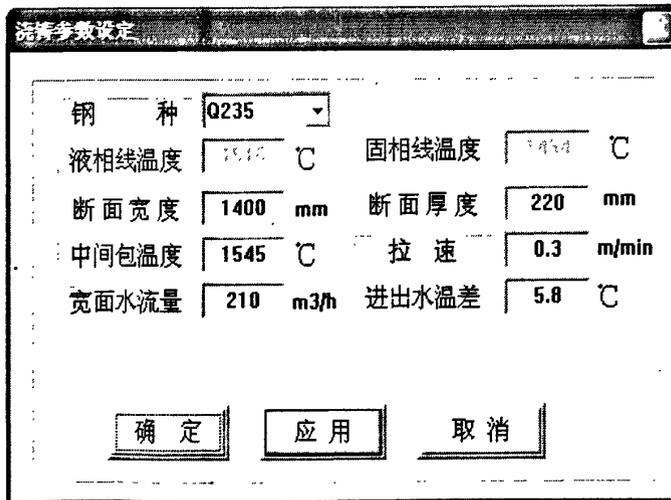


图 4.19 浇铸参数设定画面

Fig. 4.19 Casting parameters Dashboard

图 4.20 显示的是温度及坯壳厚度显示界面。厚度曲线有两条，分别表示的是液相等值曲线和固相等值曲线。温度曲线有三条，分别表示铸坯中心的温度，铸坯表面的温度和目标温度曲线。

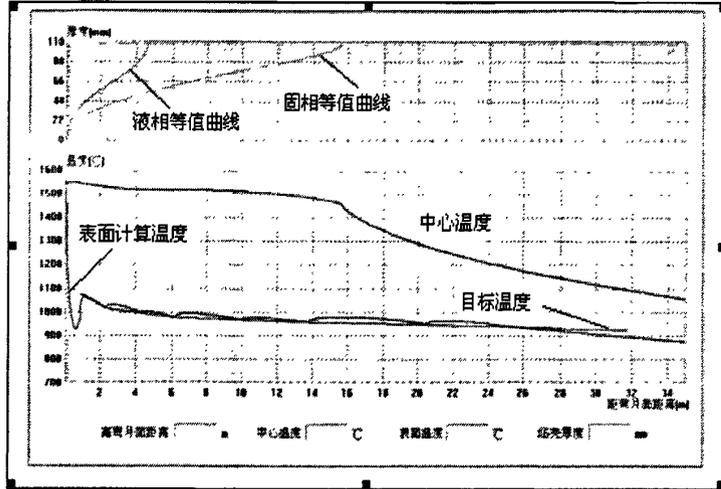


图 4.20 温度及凝固曲线显示画面

Fig. 4.20 Solidification and temperature curve display

图 4.21 显示的是计算各回路水流量的棒图。棒图能够非常有效的显示各个水量的分布情况，通过棒图，我们可以了解到二冷各个区域热量传导的主要分布。

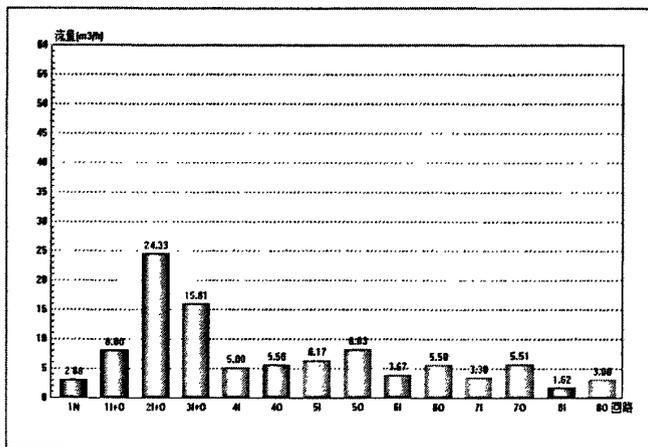


图 4.21 各回路控制水量棒图

Fig. 4.21 The water loop control rods plans

## 第五章 连铸二冷控制模型的实现

### 5.1 模型的现场运行分析

在完成设计和具体编程的工作之后，就进入了更为关键的现场运行调试阶段。现场的调试工作主要完成两个方面的内容，一是调整二冷区各个段传热系数公式中的各个系数是否与工艺条件相匹配；二是检验模型的实际应用效果，及铸坯的质量是否得到提高。

#### 5.1.1 计算模型温度与现场实测温度的比较

这个模型最核心的地方就是表面温度计算是否准确，如果温度计算不准确，那么后面的配水模型就失去了应用的价值，二冷配水量的值不准确，不但极大影响铸坯质量，而且很可能不能保证生产的顺利进行，因此要在二冷区某个区域加装测温探头，以验证计算的准确性。在二冷末端，因为水汽因素影响最小，在这个地方加装探头最为合适。下表是验证过程中某一个时段测量与计算值之间的对照比较：

表 5.1 二冷出口实测表面温度与计算温度对照表

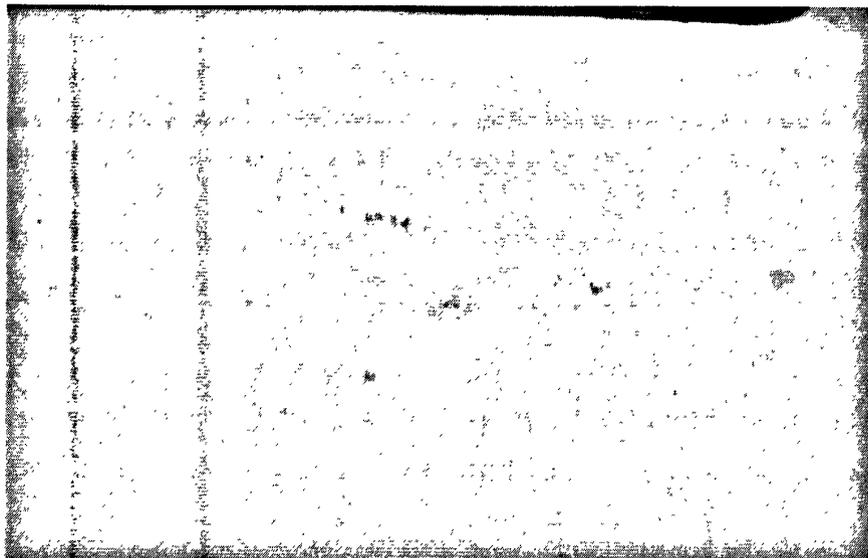
Table 5.1 Secondary cooling exports measured and calculated the surface temperature tables

序号	出口表面温度		绝对误差 (°C)	相对误差%
	实测温度 (°C)	模型计算温度 (°C)		
1	910	908.65	1.35	0.15
2	918	917.35	0.65	0.07
3	907	910.22	2.78	0.31
4	908	907.35	0.65	0.07
5	910	913.42	3.42	0.37
6	915	910.69	4.31	0.47
7	920	905.68	14.32	1.57
8	916	903.37	12.63	1.31
9	913	900.26	12.74	1.40
10	909	913.41	4.41	0.49
平均	912.6	909.4	3.2	0.35

从上表可以看出，实测温度与计算温度相差不多，相对误差最大为 1.57%，这说明计算模型的计算是可靠的，模型的应用比较成功，这对下一步的动态配水至关重要。

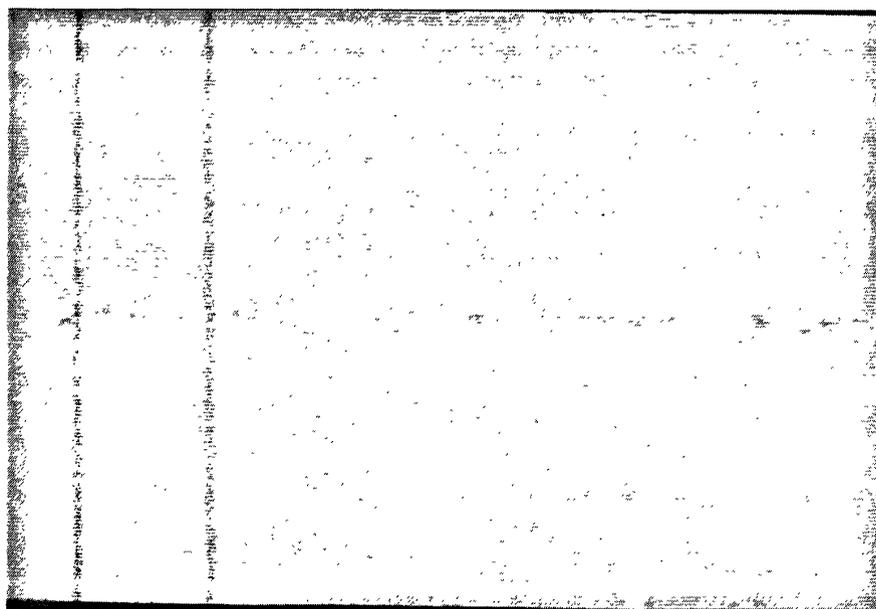
### 5.1.2 配水对铸坯质量的影响比较

通过观察动态配水的铸坯低倍，并与静态配水下的铸坯低倍相比较，对动态配水的效果进行评价。如图 5.1 所示。从图中可以看出，动态配水下铸坯的缩孔，疏松明显较少，中间裂纹较少，组织较为致密。



a. 静态配水铸坯低倍图

a.Static water distribution slab of low-fold map



b. 动态配水铸坯低倍图

b.Dynamic water distribution slab of low-fold map

图 5.1 静态、动态配水铸坯质量比较图

Fig.5.1 Static /Dynamic water distribution slab of low-fold map

## 5.2 影响铸坯凝固的主要因素分析

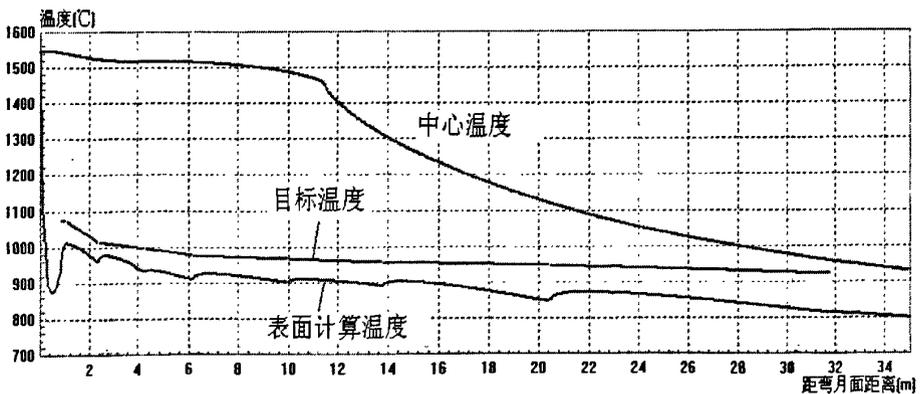
运用建立的数学模型和离线程序,可以分析对铸坯传热有主要影响的因素,如拉速,二冷水量和过热度<sup>[32]</sup>。一方面可以验证模型的可靠性,另一方面可以对浇注生产起参考作用。

### 5.2.1 拉速的影响

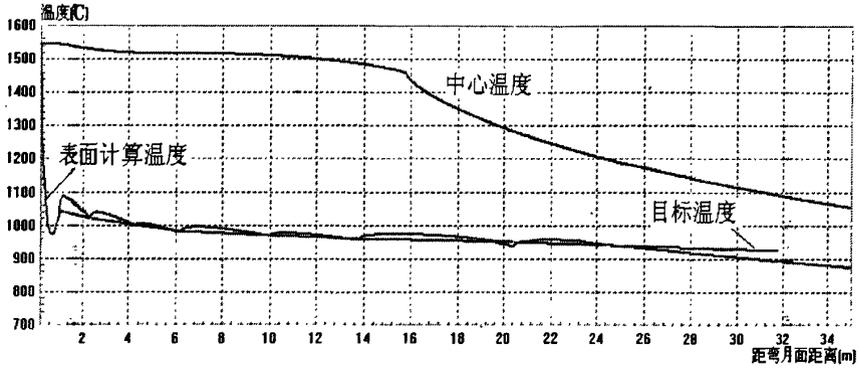
#### (1) 水量不变下拉速的影响

拉速与铸坯在铸机中的停留时间密切相关,从而影响铸坯的凝固状态和温度等。本模型研究了拉速为 0.8m/min, 1.0m/min, 1.2m/min 而其它工艺参数不变的情况下拉速对铸坯表面温度及中心温度的影响。三种工况同时采用 1.0m/min 时的水量。如图 5.2 所示为不同拉速下铸坯表面温度和中心温度的曲线,其中上方的曲线为铸坯中心温度曲线,下方曲线一条为目标温度曲线,另一条为铸坯表面温度曲线。在坯壳厚度的显示图中,上方曲线为液相等值曲线,下方的曲线为固相等值曲线。

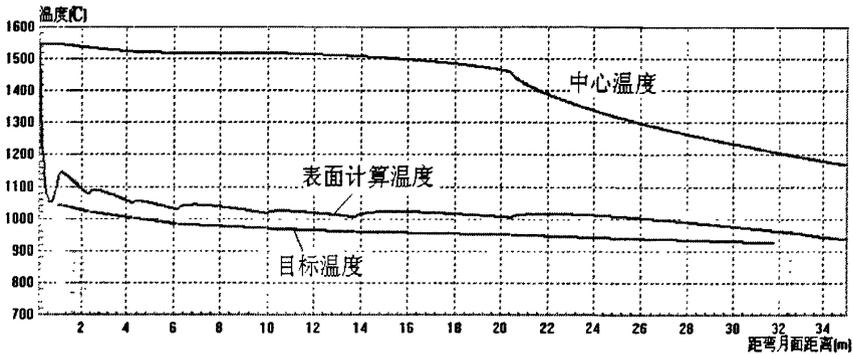
由铸坯中心温度曲线可以看出,随着拉速的增加,液芯长度逐渐变大;铸坯表面温度随拉速的增大而增大。由于 1.0m/min 拉速时采用正常水表,其表面温度曲线能较好的接近目标温度曲线,而拉速 0.8m/min 和 1.2m/min 时铸坯表面温度分别高于和低于目标表面温度,这将对铸坯质量产生不利影响。因此在静态配水下,要使铸坯表面温度与目标温度相接近,必然要根据拉速的变化配水。一般随着拉速的增加,各二冷区水量随之增大。



a. 拉速 0.8m/min



b. 拉速 1.0m/min



c. 拉速 1.2m/min

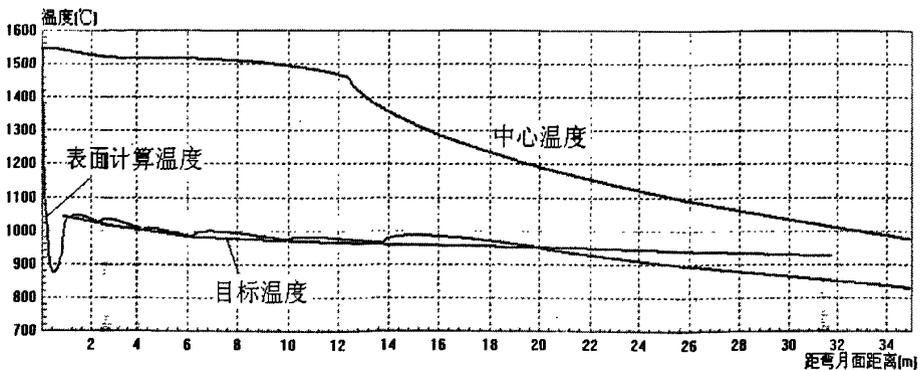
图 5.2 不同拉速下铸坯温度比较 (水量不变)

Fig.5.2 Under different speed compared slab temperature (water unchanged)

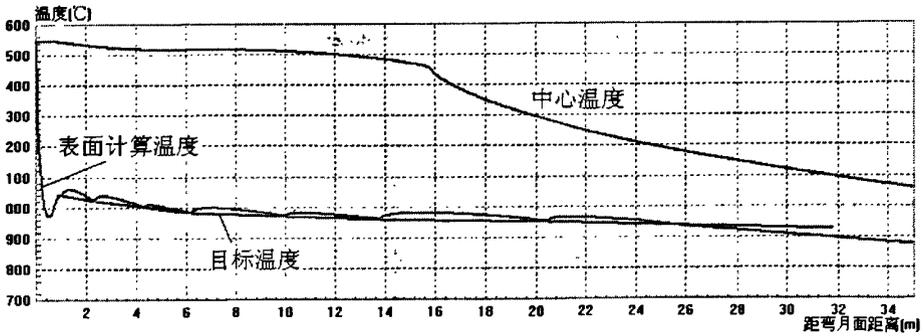
(2)控制配水下拉速的影响

在静态配水或动态配水控制下，研究拉速对铸坯温度与凝固状态的影响。

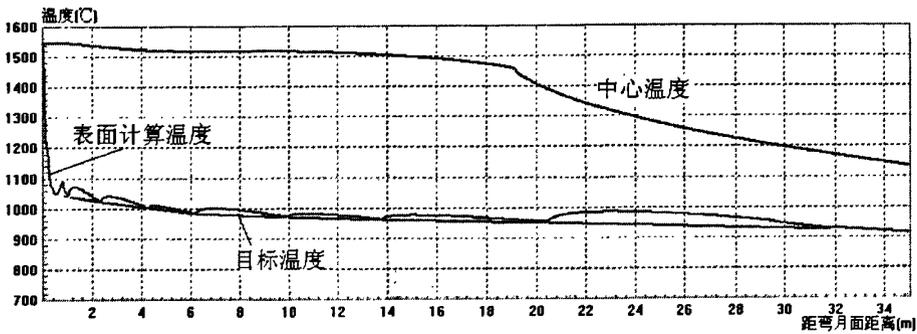
图 5.3 显示的是在静态配水或动态配水下，铸坯的表面和中心温度的变化，可以看出通过动态或静态配水，铸坯的表面温度都能够较好的符合目标温度，但是配水对铸坯中心的温度的影响不如表面温度大，这导致凝固末端或液芯长度在不同拉速下有所不同。



a. 拉速 0.8m/min



b. 拉速 1.0m/min



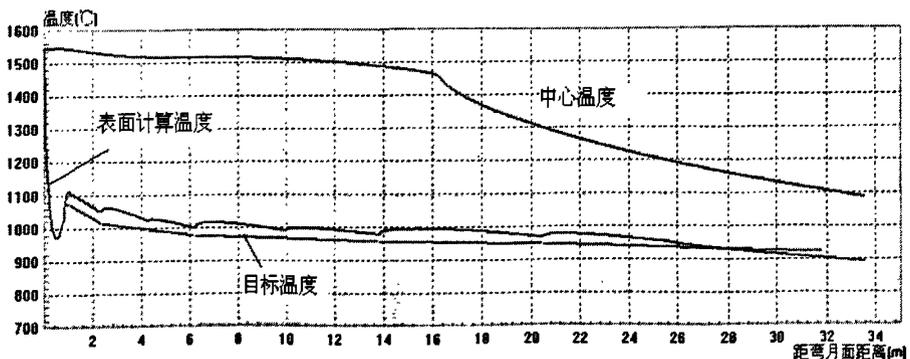
c. 拉速 1.2m/min

图 5.3 不同拉速下铸坯温度比较 (控制配水)

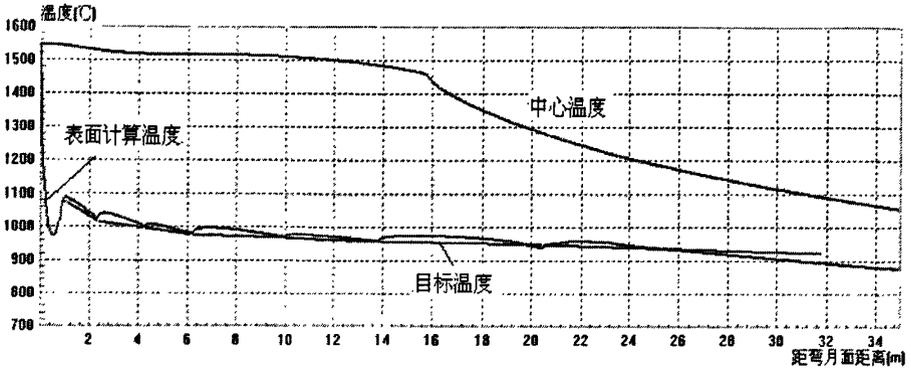
Fig.5.3 Under different speed slab temperature comparison (control of water distribution)

### 5.2.2 二冷水量的影响

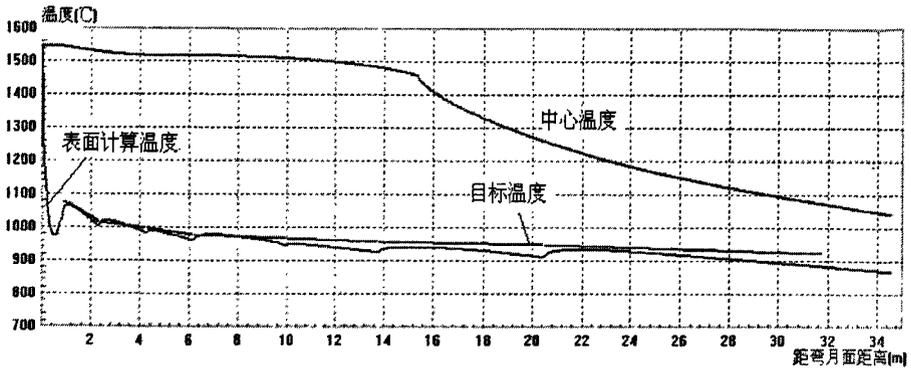
通过在相同工艺条件下仅仅修改水量来研究二冷水量对铸坯凝固状态的影响。采用的工况为拉速 1.0m/min, 比较二冷水量分别减少 10%、不变和增加 10%对铸坯温度的影响。图 5.4 表示的是不同水量下铸坯的温度变化。可以看出, 随着水量的增加, 铸坯表面温度逐渐减小。因此拉速的增加必然要增加水量以使铸坯表面温度接近目标温度, 拉速的调整必然同时要调整水量。



a. 水量减少 10%



b. 水量不变



c. 水量增加 10%

图 5.4 不同二冷水量下铸坯温度比较

Fig.5.4 The cold water of different temperatures under the slab comparison

### 5.2.3 钢水过热度的影响

据测试，结晶器热流与钢水过热度几乎无关。过热度对同伴温度影响很小。但过热度增加，注流使初生坯壳冲击点处减薄，增加了坯壳厚度的不均匀性，且出结晶器坯壳温度有所增加，降低了高温坯壳强度，增加了断裂的概率。

过热度对铸坯低倍结构有重要影响，低过热度浇注铸坯中心等晶轴区宽，过热度高，推迟了钢水在铸坯中的局部凝固进程，出结晶器坯壳局部较薄，增加了拉漏的危险。

## 第六章 结束语

### 6.1 全文内容总结

二冷动态配水控制模型主要能够完成以下功能:

(1) 应用凝固传热基础知识, 建立凝固传热数学模型。在对铸坯各点温度进行分析计算的同时, 对铸坯凝固传热情况进行了全面了解, 对二冷后续工艺动态轻压下提供了理论基础。

(2) 用 Visual C++6.0 编制的二冷配水程序, 可以计算铸坯表面和中心温度以及坯壳厚度, 为现场的工艺参数设置提供参考, 通过测温验证了模型计算的可靠性。

(3) 二冷配水程序通过目标温度法确定各区配水水量, 为静态配水提供水表, 同时也给动态配水提供配水依据, 并且可以为开发新品种钢提供配水依据。

(4) 动态配水通过坯龄模型得到的有效拉速进行配水, 并结合目标温度控制, 能将铸坯表面温度控制在目标温度附近, 有效地减少了拉速变化时铸坯表面的温度波动。

(5) 通过模拟表明拉速, 水量与过热度对铸坯凝固状态的影响。其中拉速对铸坯凝固状态有着较大的影响, 水量不变条件下, 平均拉速每增加 0.1m/min, 液芯长度增加 2.25m, 静态或动态配水下为 1.70m。因此动态配水虽然能控制表面温度, 但对于液芯长度的影响远不如拉速, 依然要避免拉速过高使液芯长度过大而影响铸坯质量。过热度对铸坯的凝固状态影响不大。

(6) 开发了基于 OPC 的通用数据采集和过程跟踪系统, 对于降低开发成本、提高软件开发效率、增强应用系统的灵活性和伸缩性具有重要意义。

(7) 工艺参数数据库及计算物性参数数据库的有效建立, 给系统建立了很好的数据入口, 对系统更有效的适应现场提供了方便。

### 6.2 系统有待改进之处

根据本系统在现场的实际应用情况, 发现以下几个问题还有待于今后不断的优化。

(1) 因为采用的有限差分法对方程进行求解, 在方程收敛性和稳定性方面有要求, 因此计算上有时间步长和空间步长的限制, 这就在很大程度上增加了计算量, 对计算机的计算速度也产生了很大的影响。在今后的系统设计中, 如果采用其他数值方法, 会在

计算速度上有很大的提高。

(2) 实践证明喷嘴（即执行机构）的性能对二冷配水的效果影响非常大，今后可以在这个方面进行全面细致的研究。

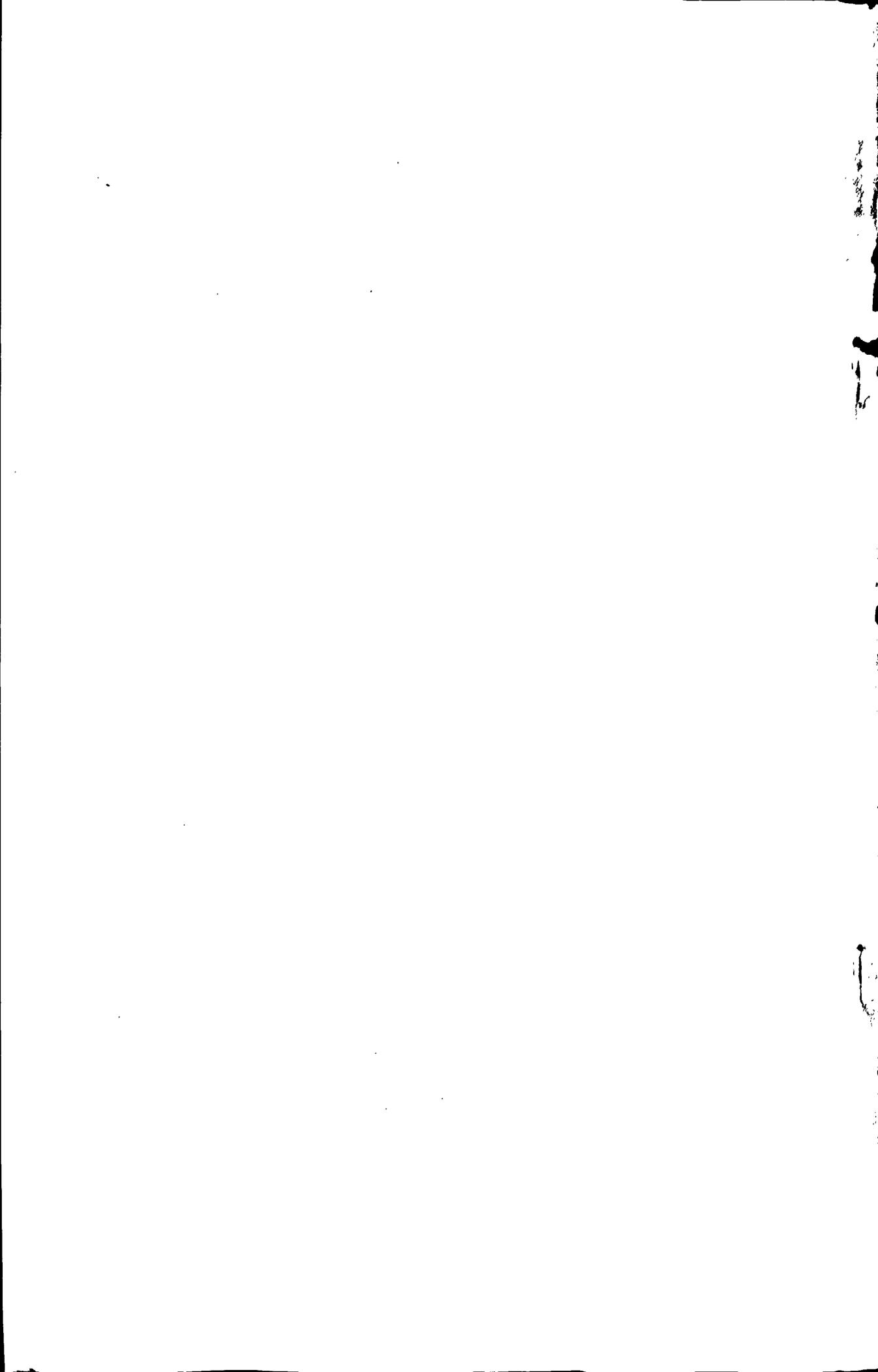
(3) 在二冷配水的基础上开发动态轻压下系统，这样会有效减少铸坯中心偏析，对提高铸坯质量有实际意义。

## 参考文献

1. 姜永林. 连铸生产概论[M], 沈阳: 东北工学院出版社, 1992, 45-107
2. 郑沛然. 连续铸钢工艺及设备[M], 北京: 冶金工业出版社, 1991, 206-227
3. 熊毅刚. 板坯连铸[M], 北京: 冶金工业出版社, 1994
4. 郭戈, 乔俊飞. 连铸过程控制理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社. 2003:1-2
5. 孙一康, 王京. 冶金过程自动化基础[M], 北京: 冶金工业出版社, 2006, 2-4
6. 陈登福, 孙海峰等. 威钢 ROKOP 小方坯连铸机的二冷制度分析与优化[J]. 特殊钢, 2002, Vol. 23, No. 2:8-10.
7. 赵家贵, 曲秀黎, 蔡开科, 韩传基等. 板坯连铸机二冷水控制模型与应用[J]. 冶金自动化, 2000, No. 3:34-36.
8. 毛汉平, 潘红等. 莱钢莱钢 4#矩形板坯板坯连铸机二冷水动态控制模型[J]. 冶金自动化 2001, No. 2:35-36.
9. Stetano Barozzi, Piergiorgio Fontana, Pasquallino. Computer Control and Optimization of Secondary Cooling During Continuous Casting[J]. Iron and Steel Engineer, November, 1986.pp.21-26.
10. Keigo Okuno, Hideyuki Naruwa, Takashi, Tustomu Takamoto. Dynamic Spray. Cooling Control System for Continuous Casting[J]. Iron and Steel Engineer, April 1987.pp.34-38.
11. 马竹梧, 邹立功, 孙彦广, 邱建平. 钢铁工业自动化(炼钢卷)[M]. 北京: 冶金工业出版社. 2003: 491
12. 蔡开科, 陈士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994
13. 贺道中. 连续铸钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 72
14. 陈雷. 连续铸钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 70.
15. 韩朋, 张兴中. 连铸坯二次冷却的非稳态控制[J]. 钢铁研究学报, 2002,14(4): 73~76.
16. B.Lally, L.T.Biegler, H.Henein. Optimization and continuous casting:Part 1.Problem formation and solution strategy[J]. Metallurgical transactions B, 1991, 22B(5): 641~648.
17. B.Lally, L.T.Biegler, H.Henein. Optimization and continuous casting:Part 2: Application to Industrial Casters[J]. Metallurgical transactions B, 1991, 22B(5): 649~659.
18. 陈志凌, 张国贤, 韩传基. 连铸二次冷却智能优化控制的研究[J]. 钢铁, 2006, 41(9): 40~43.
19. Carlos A.Santos, Jaime A.Spim Jr, Maria C.F.Ierardi. The use of artificial intelligence

- technique for the optimization of process parameters used in the continuous of steel[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2002, 26(10): 102~115.
20. N.Chakraborti, R.S.P.Gupta, T.K.Tiwari. Optimization of continuous casting process using genetic algorithms: studies of spray and radiation cooling regions[J]. *Ironmaking and steelmaking*, 2003, 30(4): 46~54.
  21. 郝安民,曹天明,刘颖. 板坯连铸二次冷却控制模型[J]. *重型机械*, 2000, No.1: 28~29.
  22. 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社[M]. 2001: 16
  23. 马竹梧. 信息化、自动化的进展与钢铁工业自动化[J]. *冶金自动化*, 2003, 5-16
  24. 白云峰, 徐达鸣, 郭景杰. 采用温度回升法对任意结晶区间的铸件凝固结晶潜热的数值计算[J]. *金属学报*, 2003, 39(6): 623~629.
  25. 干勇, 仇圣桃, 萧泽强. 连续铸钢过程数学物理模拟[J]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
  26. Okuno Keigo, Naruwa Hideyuki, Kurlibayashi Takashi, et al.. Dynamic spray cooling control system for continuous casting[J]. *Iron and Steel Engineer*, 1987, 64(4): 34~38.
  27. H.Jacobi, G.Kaestle, K.Wuennenberg. Heat transfer in cyclic secondary cooling during solidification of steel[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1984, 11(3): 132~145.
  28. Lait J.E, Brimacombe J. K., Weinberg F.. Mathematical modelling of heat flow in the continuous casting of steel[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1974, 1(2): 90~97.
  29. S.Louhenkilpi, E.Laitinen, R.Nieminen. Real-Time Simulation of Heat Transfer in Continuous Casting [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1993, 24(4): 685~693.
  30. J.P Gabathuler, F.Weinberg. Fluid flow into a dendritic array under forced convection[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1983, 14(4): 733~741.
  31. B.Lally, L.Biegler, H.Henein. Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1990, 21(4): 761~770.
  32. A.Etienne, J.-M.Ots. Automatic control of secondary cooling in a slab caster[M]. *Solidification Technology in the Foundry and Cast House Conf.Proc.*, England: The Metals Society, 1980: 532~535.
  33. 宫叔家. 冶金仪表与自动调节[M]. 北京:冶金工业出版社. 1990:55-60
  34. Stefano Barozzi, Piergiorgio Fontana, Pasqualino Pragliola. Computer control and optimization of secondary cooling during continuous casting[J]. *Iron and Steel Engineer*, 1986, 63(11): 21~26.
  34. J.Yamasaki, S.Miyahara, M.Kodama. The control of the surface temperature in the continuous slab casting machine by the on-line digital computer. 8th Triennial World

- Congress[M]. Kyoto: IFAC Control Science and Technology, 1981: 2639~2644.
36. 姚利丽, 张炯明, 王新华. 连铸板坯二冷模型及配水制度的优化. 连铸, 2003(3): 10~13.
37. M.J.Mundim, J.L.R.Pimenta, C.A.G.Valadares. Mathematical analysis of solidification in continuous casting of steel[M]. Continuous casting '85, London: the Institute of Metals 1985: 50.1~50.6.
38. 刘青, 王良周, 曹立国. 连铸二次冷却研究的进展[J]. 钢铁研究学报, 2005, Vol(17): No: 6~7.
39. 吴宗雄. OPC 技术在 EMS 系统中的应用[J]. 冶金自动化, 2007, Vol(31): 395.
40. 王雅贞, 张岩, 刘术国. 连续铸钢工艺及设备[M]. 北京:冶金工业出版社. 2003.



## 致 谢

在本论文完成之际，首先要感谢我的指导老师高宪文教授，对我撰写论文所给予的悉心的指导，热情的帮助和鼓励，使我受益匪浅，并能够顺利地完成工程硕士课题的研究工作和最终论文的撰写。高老师那渊博深广的学术知识和严谨求实的治学态度，给我留下了极为深刻的印象，还有高老师那孜孜不倦的工作作风和平易近人的师者风范，为我今后工作树立了典范。在此，特别向高老师致以最诚挚的敬意和最衷心的感谢！

我衷心地感谢东北大学信息科学与工程学院的各位教授、老师。他们在专业课上的悉心教导使我获得丰富的基础理论知识，为写好论文打下了坚实的基础。感谢首钢工学院的宋书华老师对我在学业和生活上的关心和帮助。

我们的班级是一个团结协作、积极进取和充满学术氛围的集体，也是一个有着深厚研究基础和实际工作经验的团队。能够在这样的环境下学习和工作，我感到非常荣幸和自豪。在我的课题研究和论文写作过程中，班级的同学为我提供了许多的帮助，从中学到了很多颇有价值的东西，使我有有了很大的进步和提高，我要向他们表示衷心感谢，其中包括李刚同学、孟凡祝同学、唐和林同学等。

感谢首自信公司蒋学军，胡丕俊两位高工，他们在繁忙的工作之余对我完成论文的鼎力相助。还要感谢首钢二炼钢王国连，江海军工程师以及有关人员对我们完成项目试验给予的大力支持。感谢在我编写论文期间给予我支持与帮助同事们。

最后，感谢所有关心、支持和帮助我的朋友们！



## 攻读硕士期间发表的论文

1. 张琳. 基于模糊聚类算法的 RBF 网络在漏钢预报中的应用[J]. 冶金自动化, 2007 增刊 2, Vol(31): 541.

