

分类号_____ 密级 _____

UDC_____

学 位 论 文

高线吐丝温度控制模型的研究 及轧后水冷控制系统设计

作者姓名： 蔡阿云

指导教师： 余强 副教授 东北大学信息科学与工程学院

王丽华 高 工 首钢自动化信息技术有限公司

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： 2011 年 5 月 论文答辩日期： 2011 年 6 月

学位授予日期： 2011 年 7 月 答辩委员会主席： 高宪文

评阅人： 徐林 郭立伟

东 北 大 学

2011 年 6 月

A Thesis in Control Engineering

**Research on Control Model of Laying Temperature
and Design of Latter Water Cooling System for
High Speed Rolling Wire**

by Cai Ayun

Supervisor : Associate Professor Yu Qiang

Senior Engineer Wang Lihua

Northeastern University

June 2011

独创性声明

本人声明，所呈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谢意。

学位论文作者签名：蔡少云

日期：2011年6月15日

学位论文版权使用授权书

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：蔡少云

导师签名：

签字日期：2011年6月23日

签字日期：

4-23
2011.6.23

高线吐丝温度控制模型的研究及轧后水冷控制系统设计

摘 要

高速线材的轧后控制冷却工艺，与轧后自然冷却相比，不仅可以提高冷却速度，减少氧化损耗，而且可以保证产品质量，因此得到广泛应用。在控制冷却过程中，吐丝温度是关键的工艺参数，对产品性能有重要影响。国内外学者对吐丝温度控制模型进行了大量的研究。从最初的半解析半经验公式，到现在的有限差分计算应用到在线控制模型中去，吐丝温度控制精度不断提高。

首钢高线建于 1987 年，其水冷段的控制方式较落后，吐丝温度控制精度较差，造成产品性能不稳定等一系列问题，已经不能满足实际生产需要。本论文来源于首钢高线厂“轧后水冷系统改造”项目，目标是通过此次升级改造，提高轧后水冷段的自动控制水平，改善吐丝温度控制精度，实现全长平均温度与目标温度偏差 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 达到 2σ 水平。

本文在对国内外高线控制冷却系统研究的基础上，使用有限差分法建立了高速线材精轧后水冷段传热数学模型，针对不同钢种确定了不同的换热系数。根据首钢高线生产线情况设计了轧后冷却控制系统，设计与开发了水冷二级系统功能模块。对轧后冷却系统进行了现场调试，通过现场实测数据对模型参数进行自适应计算，提高模型预报精度。

本文开发的高线轧后水冷控制系统目前运行稳定，精度达到了设计目标。

关键词： 高速线材，吐丝温度，有限差分，数学模型

Research on Control Model of Laying Temperature and Design of Latter Water Cooling System for High Speed Rolling Wire

Abstract

Controlled cooling after rolling is widely used in high speed wire production line. Compared with natural cooling, it can not only improve cooling rate and reduce oxidation loss, but also guarantee the product quality. In the controlled cooling process, laying temperature is the key parameter which influences the product properties. The laying temperature control model is studied widely by researchers. The finite difference method is used in on-line control model, replacing the semi-analytic and semi-empirical formulae. The control precision of laying temperature is improved continually.

The high speed wire plant of Shougang steel company was built in 1987. The control method of water cooling segment is backward and control precision of laying temperature is poor, which can not meet the production requirement because the product properties are not stable. As a part of “water cooling system modification after rolling” project from Shougang high speed wire plant, the main aim of this study is to reach the target that the difference between average temperature of whole length and aim temperature is below $\pm 15^{\circ}\text{C}$ at 2σ level by enhancing the automatic control level of water cooling system, and improving the control precision of laying temperature.

On the basis of study controlled cooling system of worldwide high speed wire production line, the heat transfer model of water cooling is built by using finite difference method. The heat transfer coefficients of different steel grade are evaluated. According to the situation of high speed wire production line of Shougang, the control system of cooling is designed and the level-two system function module of water cooling is developed. The cooling system after rolling is debugged. The precision of model is improved by self-adaptive calculation through measured datas.

The control system of water cooling after high speed wire rolling runs steadily. The precision reaches the design target.

Key words : high speed wire, laying temperature, finite difference method, mathematical model

目 录

独创性声明	I
摘 要	II
Abstract.....	III
目 录	IV
第 1 章 绪 论	1
1.1 高速线材的现状与发展趋势	1
1.2 高速线材控制冷却技术	5
1.2.1 高速线材控制冷却目的	5
1.2.2 斯太尔摩冷却线吐丝温度的设定与控制	6
1.2.3 吐丝温度控制模型研究现状	7
1.3 项目意义与研究内容	13
1.3.1 选题背景与意义	13
1.3.2 研究内容	14
1.3.3 本文组织结构	14
第 2 章 首钢高线生产设备与工艺.....	15
2.1 工艺流程与设备	15
2.2 水冷设备	18
2.3 本章小结	19
第 3 章 高线吐丝温度控制模型的研究.....	21
3.1 温度场求解的理论基础	21
3.1.1 传热的基本方式	21
3.1.2 傅里叶定律	23
3.1.3 导热微分方程	24
3.1.4 定解条件	26
3.2 高线水冷段温度场模型与求解方法	28
3.3 温度模型的差分求解	29
3.3.1 差分格式的选择	30
3.3.2 区域离散化	31
3.3.3 温度场差分方程的建立	31
3.4 换热系数的确定	34
3.4.1 进入水冷器前的换热系数	35

3.4.2 喷水冷却阶段换热系数	35
3.4.3 水箱间的换热系数	41
3.4.4 喷水结束后空冷换热系数	42
3.5 本章小结	42
第 4 章 高线轧后水冷自动控制系统	43
4.1 水冷段自动控制系统设计	43
4.2 冷却过程控制方案设计	46
4.3 系统调试与控制精度	50
4.4 本章小结	51
第 5 章 结论与展望	53
参考文献	55
致 谢	57

第 1 章 绪 论

1.1 高速线材的现状与发展趋势

线材一般是指直径为 5~16mm 的热轧圆钢或相当该断面的异型钢,因以盘卷状态交货,统称为线材或盘条。线材品种按化学成分分类,一般分为低碳线材(称软线)、中高碳线材(硬线),还有低合金与合金钢线材、不锈钢线材及特殊钢线材(轴承、工具、精密等)几大类,其中碳素钢线材是用处最广的品种,占线材总量的 80~90%。

线材在国民经济中的作用与地位较重要,是不可或缺的重要品种。首先,线材产量占钢材总产量的比例很大,一般线材产量占钢材总产量的 8~10%,而我国占 20%以上;其次,线材用途遍布国民经济各个部门,除直接用作建筑钢材外,线材的深加工产品用途更为广泛和重要,例如各类商品钢丝及专用弹簧钢丝、焊丝、冷激钢丝、镀锌钢丝、通讯线、轮胎钢丝及钢帘线、高强度钢丝及钢绞线、轴承钢丝、工具钢丝、不锈钢丝、各种钢丝绳、钢钉、标准件等等。发达国家线材加工比在 80%以上,我国为 30%左右^[1]。

一般将轧制速度大于 40m/s 的线材轧机称为高速线材轧机。轧制速度是高速线材轧机发展水平的标志。1962 年美国摩根公司开始研制无扭精轧机,1966 年第一台全新结构的摩根高速线材 45° 无扭精轧机问世,于同年 8 月在加拿大钢铁公司投产,线材轧制速度突破了以往的极限,达到 43m/s。经过几十年不断的改进和更新换代,特别是 80 年代以来由于各项制造技术、自动化控制技术的发展,检测技术的进步,使轧制速度突破 100m/s 大关,最大达到 120m/s。

目前,我国正在生产的高速线材生产线的装备水平大致可分为 4 个等级^[2]。

(1) 落后的生产线

这类生产线主要是对原有的复二重轧机改造而成,或是 20 世纪 80 年代末至 90 年代初建成,轧制速度一般在 50~70 m/s 左右,只能生产一般水平的建筑用钢。随着产品结构调整步伐的加快和市场竞争压力的增大,以及装备精良的新生产线不断地投入使用,这类落后的生产线已经逐渐被淘汰。

(2) 一般水平的生产线

这种生产线大多为经过改造的二手设备或 20 世纪 80 年代末到 90 年代初所

建成的生产线，如首钢，其主要特点是：轧制速度一般在 $70\sim 90\text{ m/s}$ 左右，采用热装热送工艺的少，采用了延迟型或标准型风冷段，能生产一般等级的品种钢。这类生产线由于已投产 15 年以上，在设备使用和工艺调整方面积累了丰富的经验，生产线运行成本低，生产效率较高。在对应等级的产品市场中，这类生产线的产品销路仍然很好，具有一定的生命力。

(3) 具有世界二流水平的生产线

这类生产线大多建在 20 世纪 90 年代后期，如沙钢、湘钢、包钢、昆钢、武钢、天钢等，其主要特点是：部分生产线实现了热送，采用了先进的蓄热式加热炉，轧制保证速度一般在 $90\sim 105\text{ m/s}$ ，精轧机前及机间设有冷却水箱并选用延迟型风冷线，能实现控温轧制，能满足高级品种钢的工艺要求。

(4) 具有世界领先水平的生产线

这类生产线主要以宝钢、马钢、新疆八一、安钢、酒钢、杭钢、青钢等为代表，其主要特点是：主要装备从德国西马克或意大利达涅利或美国摩根或奥钢联引进。采用连铸坯短流程热装热送工艺，热装温度能达到 $500\sim 750^\circ\text{C}$ ，加热炉采用蓄热式燃烧技术。轧制速度能保证在 $110\sim 120\text{ m/s}$ ；采用温度闭环控制系统，能完善地实现控温轧制及控制冷却；采用超重型精轧机组及减定径机组或双模块轧机，能实现精密轧制及单一孔型轧制，盘重也都在 2 吨以上；设有在线测径及探伤装置，具备生产高级品种钢的能力和条件。

线材生产发展的总趋势是提高轧速、增加盘重、提高精度及扩大规格范围。目前在高线生产中采用的先进技术有以下几个方面^{[3][4]}：

(1) 轧前工序

为了获得优质的钢水从而最终保证线材的质量，不少生产厂尽量扩大转炉容量，增加精炼。一些采用超高功率电炉的企业增加了 300m^3 级别的高炉，将热铁水兑入废钢中冶炼，不仅改善了钢质的纯净度，而且减少了电耗。高线生产线大部分采用连铸坯，采用连铸坯为原料与采用初轧坯相比，炼钢到成材，能耗可降低 80kg/t 标煤，金属收得率提高 10%。钢坯在进加热炉前设置或预留“抛丸-超声波探伤”或“磁粉探伤-修磨”工序。由于节能的需要，有条件自供坯料的生产线均力求采用热送钢坯。采用短行程热装热送工艺，热装温度可达 $500\sim 750^\circ\text{C}$ ，采用热装工艺可以大大降低燃料消耗，提高加热炉产量，减少金属消耗，降低成本。

(2) 蓄热式燃烧技术

我国 20 世纪 90 年代初期以前建的用于高线生产线的加热炉，大都采用步进底式加热炉，为了使钢坯加热温度更均匀，90 年代中期以后建设的加热炉大都采用侧进侧出的全梁式步进炉。它的主要特点是步距可调，采用新型的低 NO_x 型烧嘴，侧烧嘴则采用带中心风的调焰烧嘴，调节比可达 1:10。20 世纪 90 年代中期，日本工业炉公司在开发新技术时使蓄热体在单位体上的蓄热能力取得突破性进展，研发的蓄热式燃烧技术在高线生产线钢坯加热过程中得到广泛的应用。目前，我国大部分全梁式步进炉均运用了蓄热式燃烧技术。蓄热式燃烧系统由蓄热室和换向装置组成，可将空、煤气同时预热至 1000℃ 左右，可使用高炉煤气等低热值燃料。采用此项技术的加热炉，不仅平均节能约 35%，且缩短了加热时间，降低了烧损。

(3) 减定径轧机

为了提高线材的轧制精度，满足用户对产品尺寸精度、表面质量、机械性能等的需求，20 世纪 90 年代初，美国摩根公司和意大利达涅利公司相继开发了减定径机组。它由 2 台减径、2 台定径机架与 1 套组合变速箱传动系统组成成组更换机架。用减定径机进行精轧的主要优点在于：1) 采用小压下量轧制，保证了产品尺寸的高精度，可达到±0.1mm 的精度偏差；2) 可以进行 750℃~800℃ 的低温轧制，改善了产品性能，达到细化晶粒的效果；3) 采用了快速换辊装置，减小了换辊时间，可提高轧机利用率 10%~15%；4) 只需 1 套精轧机组孔型，即可生产 <5.0 ~ <20mm 范围内的所有规格的产品；5) 减定径机组轧制后，头尾可不切除，提高了收得率。

目前，我国引进的具备世界领先水平的生产线如宝钢、马钢、酒钢、安钢、杭钢等都采用了此项装备。

(4) 双模块轧机

该轧机是达涅利公司 20 世纪 90 年代中期开发的，它的主要特点是 4 个精轧机架分成独立的 2 组，每组由单独的电机变速齿轮箱传动，2 台电机实现电气联锁，设于无扭精轧机后的水冷装置与吐丝机之间，通常将原有的 10 架无扭精轧机改为 8 架。双模块轧机与减定径轧机采用的结构不同，但两者的优越性基本相同。目前，我国约有 5 条生产线在精密轧制中采用的是双模块轧机技术，如具有世界领先水平的新疆八一钢厂的高速线材生产线等。

(5) 低温轧制技术

低温轧制技术主要是指轧件在轧制时，将温度控制在常化温度或热机轧制温度范围内。低温轧制技术一方面可降低燃料消耗，减少脱碳，减少烧损；另一方面轧件在低温条件下轧制、变形、延伸使晶粒产生细化，可获得更均匀、更细的微观组织，使产品的屈服强度，抗疲劳强度大大提高。低温轧制通常在最后 2 道次或 4 道次进行，采用 2 道次时，最后 2 道次累积压下率为 24 %~31 %；采用 4 道次时，最后 4 道次累积压下率为 46 %~57 %。由于低温轧制时对轧机的轧制速度、强度、电机功率等要求高，轧制负荷增大，所以低温轧制技术需在 20 世纪 90 年代中期开发的重型或超重型精轧机上进行。我国近几年引进美国摩根公司的几套 100m/s 级精轧机均为重负荷型，适应了低温轧制技术对轧机的要求。

(6) 无头轧制技术

应用于高线生产的无头轧制技术是 20 世纪 90 年代中期分别由当时日本的 NKK 公司和意大利的达涅利公司开发的。该技术的主要优点在于可提高成材率，降低消耗并使轧制过程中各项参数处于稳定状态。其要点是将刚出加热炉的钢坯头部与前一根在粗轧机第一架的钢坯的尾部焊接起来进行无头轧制，提高了轧机生产效率，减少了切头和轧废，即使在盘条打捆时也不需要切去头尾，提高了成材率。

(7) 其他：1) 大部分生产线配置了辊道式大风量延迟型控冷线，辊道分段有加速与落差，使线圈冷却更均匀。2) 在精轧机后或定径机后设置了热态在线测径仪及涡流探伤装置，对线材产品从头到尾的尺寸精度和表面情况进行检测，可及时发现轧制配件的缺陷和不合格品。3) 采用性能更好的夹送辊和吐丝机。夹送辊可进行自动调整夹送压力并提供全长、头部、尾部的加减速夹送。吐丝机的吐丝管结构与形状较 20 世纪 90 年代末有了新的改进，主要表现为振动减小，吐丝管寿命延长并能快速更换；在吐丝管入口设置了用压缩空气吹扫氧化铁皮装置，可及时对吐丝管进行清理，在吐丝机前设置了可监视温度和振动状况的仪器，确保了吐丝机处于正常良好的工作状态。4) 集卷装置增加了密实收集线圈系统。生产 <14mm 以下产品时，集卷筒设置线圈分配器可密实收集线圈；生产 <14mm 以上产品时，采用吐丝机驱动的 WOB 系统功能来密实集卷。5) 近几年投产的不少生产线，采用了全交流传动，电机测速装置为无联轴器型，由全数字控制系统对电机速度进行闭环控制。

1.2 高速线材控制冷却技术

1.2.1 高速线材控制冷却目的

控制冷却是指对热轧产品的冷却过程进行有目的地人为控制, 采用一定的控制手段控制钢材冷却速度, 以获得所需要的组织和性能的冷却方法。

线材控制冷却的研究工作开始于 20 世纪 50 年代末至 60 年代初。当时由于连续式线材轧机的不断完善和发展, 轧制速度越来越快, 终轧温度越来越高, 盘重越来越大。在这种情况下, 再采用一般的堆积和自然冷却的方法不仅使线材的冷却时间加长, 厂房设备增大, 而且会加剧盘卷内外温差, 导致冷却极不均匀, 并将造成以下不良后果^[5]:

(1) 金相组织不理想。晶粒粗大而不均匀, 由于大量的先共析组织出现, 亚共析钢中的自由铁素体和过共析钢中的网状碳化物增多, 再加上终轧温度高, 冷却速度慢, 使得晶粒十分粗大, 这就导致了线材在以后的使用过程中和再加工过程中力学性能降低。

(2) 性能不均匀。盘卷的冷却不均匀使得线材断面和全长上的性能波动较大, 有的抗拉强度波动达 240 MPa, 断面收缩率波动达 12%。

(3) 氧化铁皮过厚, 且多为难以去除的 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 , 这是因为在自然冷却条件下, 盘卷越重盘卷厚度越大, 冷却速度越慢, 线材在高温下长时间停留而导致严重氧化。自然冷却的盘条氧化损失高达 2%~3%, 降低了金属收得率。此外, 严重的氧化铁皮造成线材表面极不光滑, 给后道拉拔工序带来很大困难。

(4) 引起二次脱碳。由于线材成卷堆冷, 冷却缓慢, 对于含碳量较高的线材来说, 容易引起二次脱碳。

既然自然冷却中出现的线材质量问题主要是由于冷却速度太慢所致, 所以工艺上对线材控制冷却提出的基本要求是能够严格控制轧件的冷却速度, 使其既能保证产品质量符合要求, 又能尽量地减少氧化损耗。

高速线材轧后控制冷却工艺不仅影响相转变温度, 并能减小晶粒尺寸。线材轧后的温度和冷却速度决定了线材内在组织、力学性能及表面氧化铁皮数量, 因而对产品质量有着极其重要的影响^[6]。冷却速度可以决定轧后线材冷却后的组织和性能, 所以根据钢的化学成分, 奥氏体冷却转变曲线位置和所要求的组织及力学性

能合理控制轧后冷却工艺条件一直是钢材生产的关键。

当然，在具体进行控制冷却设计和制定控制冷却工艺时，还应根据各生产厂的具体情况，从简化工艺、减少附加设备、降低生产成本、提高经济效益以及改善后部工序的劳动条件等几方面来加以综合考虑。

随着高速线材轧机的发展，控制冷却技术得到不断地改进和完善，并且在实际应用中越来越显示出它的优越性。

1.2.2 斯太尔摩冷却线吐丝温度的设定与控制

斯太尔摩控制冷却工艺是由加拿大斯太尔柯钢铁公司和美国摩根公司于 1964 年联合提出的。据统计，该冷却线在世界上已投产的约 208 条。该工艺是将热轧后的线材经两种不同冷却介质进行不同冷却速度的两次冷却，即一次水冷，一次风冷。线材控制冷却需要控制的工艺参数主要是终轧温度、吐丝温度、相变区冷却速度以及集卷温度。这些参数是决定线材产品最终质量的关键，它们的改变会使产品性能产生很大的变化。因此，正确设定和控制冷却工艺参数，是整个线材生产工艺控制中一项极其重要的工作。

在控制冷却中，吐丝温度是控制相变开始温度的关键参数。对于常见的各种线材，不可能存在合乎人们要求的、使产品具有最佳力学性能和冶金性能的唯一吐丝温度。最佳吐丝温度的选择应结合钢种成分、过冷奥氏体分解温度（CCT 曲线中“C”曲线的位置）及产品最终用途等几方面的因素加以综合考虑。采用水冷段不供水的措施，吐丝温度可达 950℃，通过调水冷段的供水阀可获得低于 950℃的吐丝温度，对于不同尺寸的线材为了得到同样的吐丝温度，阀门调节量就不尽相同，一般把吐丝温度控制在 760℃以上。

在斯太尔摩控冷工艺中，一般根据钢种和用途的不同将吐丝温度控制在 760~900℃。部分典型钢种选用如表 1.1 所示的吐丝温度^[7]：

吐丝温度的高低，直接影响过冷奥氏体的稳定性，因而对性能产生重要的影响。斯太尔摩控制冷却的生产经验表明：碳钢（≤0.15%C 和 0.16%~0.23%C），在保持其他条件不变的前提下，吐丝温度越高，线材的抗拉强度越低，而对于高碳钢（>0.44%C）和中碳钢（0.24%~0.44%C）.在其他条件不变的情况下（轧制条件及强制风冷和运输机速度不变），吐丝温度越高，线材的抗拉强度越高，这种关系对所有规格都成立。从理论上讲，高碳钢的线材直径越大吐丝温度应越高，但现

场实践表明，线材尺寸的作用与吐丝温度的作用相比，可忽略不计。因此，生产中在其他参数不变的前提下，碳钢可以通过改变吐丝温度得到不同的抗拉强度。

表 1.1 典型钢种的吐丝温度

Table 1.1 Laying temperature of typical steel grade

钢种	吐丝温度
拉拔用钢（中碳）	870℃
冷墩钢（中碳）	780℃
碳素结构钢线材	840℃
硬线（高碳）	785℃
软线（一般用途低碳钢丝线材）	900℃
建筑用钢筋	780℃
低合金钢	830℃
高淬硬性钢	900℃

为了保证线材性能均匀一致，冷却条件必须保持相对的稳定，吐丝温度必须严格地控制在规定的范围内，一般允许波动 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ^[8]。尽管有时稍微超出该波动范围，但不致于引起线材性能的有害变化，而且对随后进行的拉拔不会产生有害的影响。然而，要想提高拉拔极限，就必须保证线材性能尽可能的均匀。对此除了要求钢质本身均匀之外，吐丝温度稳定是线材性能均匀的重要保证之一。

1.2.3 吐丝温度控制模型研究现状

为了精确控制线材的吐丝温度，必须对线材在水冷段的冷却过程进行分析，掌握线材水冷后的温度与水流量等工艺参数的关系，建立温度计算模型。从上个世纪八十年代起，随着线材终轧速度的提高，轧后水冷段投入使用，各研究机构与现场的技术人员纷纷致力于吐丝温度控制模型的研究，从模型的难易程度及控制的精确性来区分，大体可以分为三个阶段：

第一个阶段时，线材温度计算使用的是半解析半经验公式，吐丝温度控制精度为 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 。

北京科技大学的蔡庆伍等^[9]为了确定冷却水量，首先分析了钢材表面温度从水冷器出口至测温仪处的升温过程，可以根据测温仪测得的温度来确定钢材出水冷器时的终冷温度。钢出水冷器时，表面与中心的温度是不一致的，表面温度最低，心部温度最高。经过一段时间，钢材到达测温仪处时，表面与心部温度趋于一致。这一过程可以通过“Fourien”导热微分方程解决，但直接求解此方程十分复杂，且不能获得唯一函数解。但通过试验方法，实测了钢材中心与表面温度随时间的

变化曲线, 如图 1.1^[9]所示, 从图中可以看出, 钢材出水冷器时的表面温度为 120℃ 作用, 若干秒后达到 500℃ 左右, 在这个过程中, 表面温度随时间变化的曲线可以近似看成是直线, 可以用一个线性公式描述:

$$t_{fc} = g + ht_{s3} \quad (1.1)$$

式中, t_{fc} —终冷温度/℃; t_{s3} —测温仪测得的温度/℃; g, h —常数项。

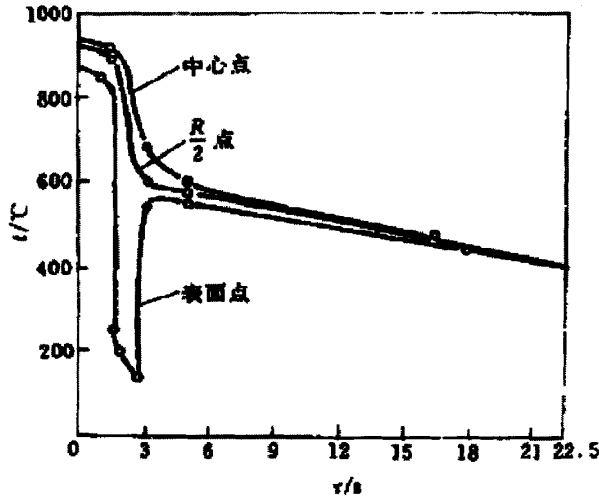


图 1.1 钢材表面与中心温度随时间变化关系

Fig. 1.1 Relationship of surface and central temperature with time

根据测温仪测得的温度得到终冷温度后, 还需要由开冷温度、终冷温度推导得到冷却所需的水量。可以把钢在水冷器中的冷却过程近似看成是牛顿冷却过程, 即钢温仅是时间的函数, 水与钢材间的对流换热系数 λ 只和水量及水冷器形式有关, 采用“McAdame”关系式来描述钢材水冷过程 (1.2)。

$$Nu_u Pr_r^{-0.3} = 0.26 Re_e^{0.6} \quad (1.2)$$

式中 Nu —努塞尔准数, $Nu = \frac{\lambda D}{K}$; Pr —普朗特准数, $Pr = \frac{c_p \eta}{K}$; Re —雷诺准

数, $Re = \frac{v_w D \rho}{\eta}$; D —钢材直径; η —水的粘度; v_w —水流速度

根据实验测定的雷诺准数 Re , 经过泰勒级数展开并整理, 并通过对现场实测数据进行回归, 最终得到冷却水量与开冷温度、终冷温度的关系式 (1.3):

$$\hat{Q} = c_1 + d_1 \hat{t}_{s2} + e_1 \hat{t}_{s3} + f_1 \tilde{t}_w \quad (1.3)$$

式中, $\hat{Q}$ —水量设定值/ $^{\circ}\text{C}$; $\hat{t}_{s2}$ —开冷温度预报值/ $^{\circ}\text{C}$; $\hat{t}_{s3}$ —测温仪测量的回火温度/ $^{\circ}\text{C}$; $\tilde{t}_w$ —水温/ $^{\circ}\text{C}$; $c1, d1, e1, f1$ —常数项。

通过理论推导的方法, 并用数学方法对公式加以简化, 对现场实测数据回归后得到公式中的系数, 还可以在生产过程中用自学习的方法对模型参数进行修正。采用这种半理论半经验的公式模型, 可以控制水冷后的温度精度在 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 满足了生产的需求。

上海钢铁工艺技术研究所的杨文娟等^[10], 分析上钢三厂的生产数据, 考虑了钢材规格、化学成分、冷却水温度等影响因素, 建立了参数给定、基本水量设定和水量调整的数学模型, 其自动控制冷却系统组成如图 1.2^[10]所示, 图中①为过程控制系统, ②为检测仪表; ③为数据处理系统; ④为水量调节执行机构等。过程控制系统主要有可编程控制器 A3H CPU 及 A 系列的通讯接口, 数据转换、高速计数、中断等特殊功能模块组成, 其中有关钢种、规格, 冷却目标温度的信息从通讯接口模块传入到 CPU, 钢材冷却前测量的开冷温度、冷却后测量的回火温度信息从模数转换模块传入到 CPU, 然后 CPU 根据参数给定、基本水量设定和水量调整这三个数学模型, 给出水量设定值, 并通过输出模块控制水冷管路上的电动喷头和电磁阀旁路系统进行水量的调整, 从而达到控制钢材水冷后温度的目标。

该系统在上钢三厂投入使用后, 显著提高了温度控制精度, 达到 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 范围内, 且降低了因轧制温度过低而报废的钢材数量, 提高了生产作业率。

第二阶段时, 有限元法用于线材水冷过程离线分析, 有限差分法用于线材在线温度控制模型, 吐丝温度控制精度为 $\pm 10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。

到了 20 世纪 90 年代后期, 一方面随着市场竞争的加剧, 对产品质量的要求逐渐提高, 进而对吐丝温度控制精度提出了更高的要求; 另一方面是自控系统硬软件的发展, 提高了 CPU 的运算速度, 数据传输、处理的速度与阀门相应速度都提高很快, 且成本不断下降, 为完善高线冷却的自控系统提供了可能。与半解析半经验公式相比, 采用有限元法或有限差分法这种数值计算的方法计算线材水冷的温度场, 可以提高计算精度, 而且计算后得到的不只是表面温度值, 而是整个横断面的温度场, 可以为判断线材冷却后内外温度均匀性提供依据。因为有限差分计算被用于线材温度在线控制, 需要更高速的计算能力与数据存储空间, 原有的在 PLC 控制系统中进行模型计算的方案已不再可行, 取而代之的是将冷却的

自动控制系统分为过程控制级和基础自动化级。其中过程控制级又称为冷却二级系统，线材原始数据的读入，温度控制模型计算、自学习等都由该系统完成，基础自动化级又称为冷却一级系统，二级计算的结果传送到一级，由一级根据位置检测信号，进行冷却的顺序控制，执行阀门开闭与水量调节等功能。

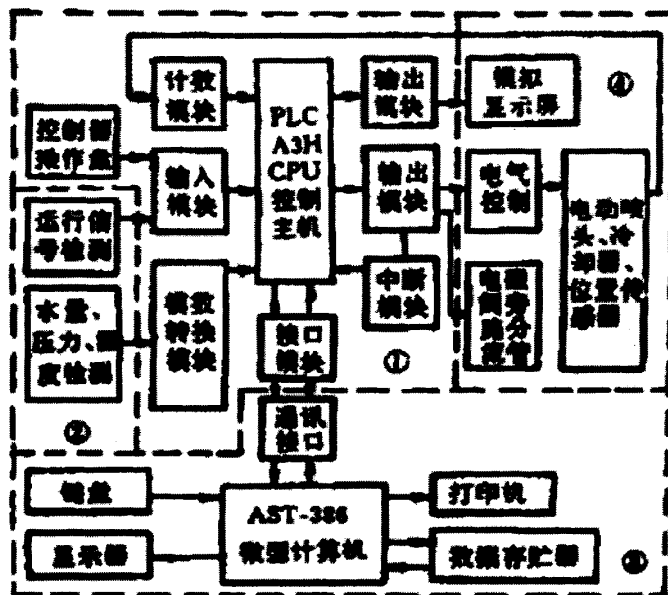


图 1.2 自动控制冷却系统结构框图

Fig. 1.2 Structure diagram of controlled cooling system

燕山大学王海儒^[11]以高线斯太尔摩控冷线的水冷段为研究对象，使用有限元软件 ANSYS5.7 建立了 $\Phi 6.5\text{mm}$ 的 Q235 高速线材冷却的二维计算模型，轧制速度为 90m/s ，分析了冷却水流量、压力、冷却时间等因素的影响。北京科技大学徐进桥^[12]使用 Marc 有限元软件，建立了成品规格为 $\Phi 12.5\text{mm}$ 的 82B 高速线材在控制冷却线的水冷段和风冷段的温度计算模型，其中将水冷段划分为 7 个不同的传热段，第 1 段考虑线材与空气的辐射换热，第 2、4、6 段为水箱段，考虑线材与冷却水之间的对流换热和辐射换热，第 3、5、7 段为恢复段，考虑线材与水和水蒸气的混合物之间的对流换热及通过蒸汽膜的辐射换热。计算出的线材表面温度与实测值进行比较，误差小于 25°C 。

武汉科技大学的曾庆波^[13]运用有限差分法，对高线轧后穿水冷却过程的传热行为进行数值分析。以某高线生产线的 $\Phi 5.5\text{mm}$ 的高碳钢为例，对比了模拟计算值与实测值，误差在 10°C 以内，分析了线材速度、线材尺寸、喷头开启数目、流量变化对轧件温度的影响。

宝钢高线用控制水箱内水流量的方法控制吐丝温度^[14,15]，水流量的控制模式有人工控制、流量控制和温度控制三种，其中温度控制模式可以根据水箱出口处的吐丝目标温度和实测温度之间的差来反馈调整水流量，但由于线材速度快，单纯采用反馈控制具有一定滞后性。北京科技大学朱宏祥等采用前馈与反馈相结合的方式，优化了吐丝温度控制模型。前馈控制模型控制过程流程图如图 1.3^[14]所示。

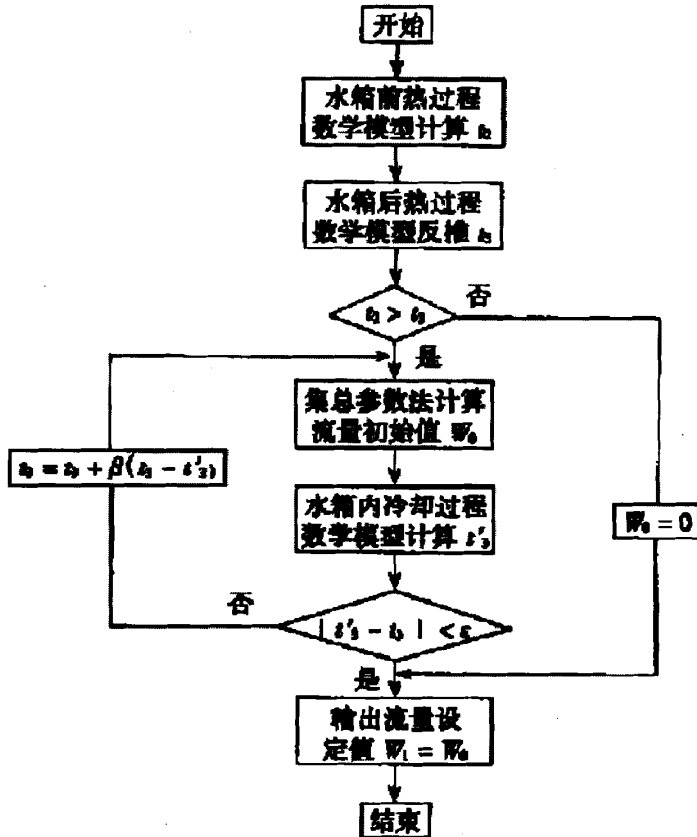


图 1.3 前馈控制模型在线控制过程流程图

β —调节因子； ε —迭代计算的精度

Fig. 1.3 Flowchart of feed-forward control model in on-line control process

β —regulatory factor; ε —accuracy of iterative calculation

根据水箱内的水热量平衡，最终得到水量输出公式：

$$W_0 = \left\{ \frac{\rho_s C_{ps} V D}{F \tau 0.26 \lambda_s} \left(\frac{C_{pw} \mu_w}{\lambda_w} \right)^{0.3} \left[\ln(t_2 - t_w) - \ln(t_3 - t_w) \right]^{1/0.6} \frac{\mu_w}{D \rho_w} \right\} \cdot S \quad (1.4)$$

式中， τ 为总冷却时间，s； ρ_s 为线材密度， kg/m^3 ； C_{ps} 为线材的比热， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； α_c 为综合对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ； F 为线材与冷却水接触面积，

m^2 ; V 为线材体积, m^3 ; t_w 为冷却水温度, $^{\circ}C$; S 为喷管的总面积, m^2 ; D 为线材直径, m ; ρ_w 为冷却水密度, kg/m^3 ; C_{pw} 为冷却水的比热, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$; λ_s 为线材的导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$; μ_w 为冷却水的动力粘度, $kg/(m \cdot s)$ 。

对比了直径为 8.0mm 的硬线钢, 吐丝目标温度为 $880^{\circ}C$, 只使用反馈控制, 温度偏差最大为 $17.5^{\circ}C$, 采用前馈和反馈相结合的控制模式, 温度偏差最大为 $9.5^{\circ}C$, 控制精度提高效果明显。

采用前馈与反馈相结合的控制策略, 可以解决高线冷却系统滞后的问题, 但无法解决由于坯料加热过程中与低温的步进梁接触造成的水印, 从而带来的整个轧件长度方向上温度分布波动, 使温度控制的精度受到限制。东北大学的于政军采用神经网络方法对轧件温度进行预测^[16], 并通过分析预测温度, 得到每根钢坯的温度分布特征 (包括平均温度、水印深度和位置等), 并结合冷却系统的反应特性, 设定冷却时序。同时为了补偿轧件目标温度与实测结果间的温差, 采用了反馈控制。该线材轧制冷却系统在鞍钢新轧线材厂投入使用, 提高了精轧出口温度的控制精度。

第三阶段时, 线材温度在线计算使用的是有限差分法, 且水冷过程与斯太尔摩风冷线的风冷过程结合, 考虑了相变的影响, 最终的控制目标不是线材温度, 而是线材的组织与性能。神经网络等技术应用于线材性能预测。

北京科技大学的余万华在重钢开发了高速线材控冷段温度及性能预报系统^[17]^[18], 使用隐式有限差分方法, 考虑了冷却过程中相变的影响, 可以计算线材冷却过程的温度场, 并预报最终产品的性能, 对于新钢种开发以及优化现有生产工艺有利。该系统的总体功能为: 根据精轧机出口线材温度的检测值、速度、线径等数据和其它工艺设备参数, 经模型运算 (包括预设定计算、修正设定计算、自学习计算) 求得达到目标力学性能的水冷段喷嘴和风冷段风机的开启组态, 其中水冷段的目标是控制吐丝温度。重钢水冷段设备与检测仪表示意图如图 1.4 所示, 水冷段由 3 组水箱组成, 每组水箱各由 3 个阀门分别控制三段喷头。水冷段设置 4 个测温仪, 其中精轧后的测温仪 SL0P 主要功能是检测线材精轧出口的表面温度, 这个温度是模型计算的初试条件之一。每组水箱之间设置 1 个测温仪 SL1P, SL2P 的主要功能是在自学习模块中修正该段模型的热交换系数, 并对失效的喷嘴报警, 还可以根据测温仪信号来开闭喷嘴, 避免对头尾进行过度冷却。设置在吐丝机处的测温仪 SL3P 的功能是测量吐丝温度, 当实测吐丝温度和目标吐丝温度相差较大

时，对水箱喷水状态提出调整方案，以供操作人员进行修改。

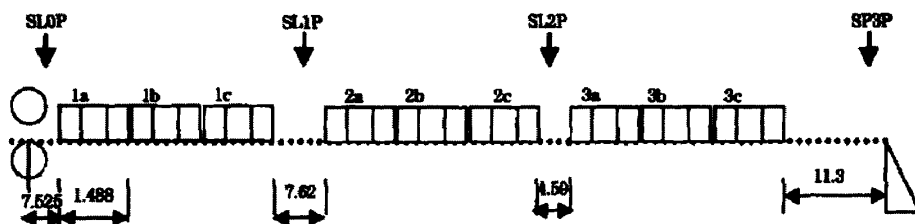


图 1.4 重钢水冷段设备与检测仪表示意图

Fig. 1.4 Schematic diagram of equipment and instrumentation in Chonggang water cooling segment

钢铁研究总院的姚俊等于 2009 年开发了一套棒线材热连轧过程综合数值模拟系统^[19]，使用 Fortran 语言编写核心计算模块，进行线材轧制过程中温度场、变形和组织演变的计算，使用 SQL Server 2000 开发数据库及数据库管理模块，使用 Visual Basic 6.0 语言编写人机交互界面。将该系统的计算结果与宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司条钢厂棒材生产线生产 GC r15 轴承钢棒材的实际生产数据进行了验证，结果表明计算结果与现场测量值吻合较好，系统具有较高的精度。

华中科技大学的张云祥通过热模拟试验，建立了高碳钢再结晶模型与相变模型^[20]，并以有限差分法为温度计算方法，采用 VB 语言编写了高碳钢高速线材热加工组织-性能预报软件。通过武钢高线 $\Phi 12.5\text{mm}$ 的 82B 生产数据进行检验，证明该模型适用于线材生产实际，开发的模型具有较高的精度。

1.3 项目意义与研究内容

1.3.1 选题背景与意义

首钢高线建设于 1987 年，其精轧后的水冷段控制系统构成与控制模型处于上文所述的第一阶段水平，水量设定模型是采用的查表，水冷自控系统主要由 PLC 完成，吐丝温度控制精度较差，全长平均温度与目标温度偏差在 $\pm 20^\circ\text{C}$ ，对其后的斯太尔摩风冷线造成入口温度波动大，产品性能不稳定等一系列问题，已经不能满足实际生产需要。

本论文来源于首钢高线厂“轧后水冷系统改造”项目，该项目属于首钢内部技术改造项目，主要是对精轧机组后的水冷系统进行升级改造，包括更换快速截止阀，安装测温仪表，更新 PLC 模块，配置新的水冷过程控制计算机，并搭建相应的控制系统等。该项目的目标是通过此次升级改造，提高轧后水冷段的自动控

制水平,改善吐丝温度控制精度,实现全长平均温度与目标温度偏差 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 达到 2σ 水平。

1.3.2 研究内容

本文主要研究内容包括:

(1) 建立高速线材精轧后水冷段传热数学模型,使用有限差分算法进行数值求解,确定适用于现场的换热系数。

(2) 根据首钢高线水冷系统设备布置情况与控制要求,在包括检测仪表和阀门(0级)、基础自动化(1级)、过程控制(二级)在内的水冷自动控制系统中,进行水冷二级系统功能模块设计与开发。

(3) 进行现场调试,通过现场实测数据对模型参数进行自适应计算,提高模型预报精度。

1.3.3 本文组织结构

本文一共分为五章。

第一章是绪论,主要介绍了课题的研究背景和现实意义;第二章是首钢高线生产设备与工艺,简单介绍了首钢高速线材厂设备布置与工艺流程,特别是轧后水冷段的设备参数等;第三章是高线吐丝温度控制模型的研究,主要推导出传热微分方程,使用有限差分法进行高线水冷段温度场求解,并确定各段对流换热系数的边界条件;第四章是高线轧后水冷自动控制系统,针对首钢现场条件进行水冷自动控制系统设计,介绍系统和主要模块的功能、系统调试情况;第五章是结论,总结全文工作,提出不足和未来的工作方向。

第2章 首钢高线生产设备与工艺

首钢高速线材厂是首钢股份有限公司下属的直属生产厂，是主流程中的重要厂矿。该厂于1987年2月正式投产，是我国最早引进的现代化高速线材生产线之一，其设计能力为45万吨，目前年产量已稳定在76万吨以上，达到国内外同类轧机的先进生产技术水平。其主体设备是从比利时引进的联邦德国施洛曼—西马克公司设计制造的摩根45°高速无扭精轧机组，轧制速度可达75米/秒，生产线采用AEG、BBC等公司的计算机、可编程机控制，实现了轧制过程的自动化。

2.1 工艺流程与设备

首钢高线的工艺流程如图2.1所示，其工艺大致分如下几个部分：

(1) 钢坯准备

钢坯进入加热炉前，需要进行质量检查、称重等工序。

(2) 钢坯加热

一般的碳素钢和合金钢依据钢种不同，开轧温度一般在900~1050℃。采用较低的开轧温度和出炉温度是因为高速线材轧机的粗轧和中轧机组的轧件温降小，而且轧件在精轧机组还会升温。降低加热温度可以明显减少金属氧化损失和降低能耗。

(3) 粗轧

粗轧的主要功能是使坯料得到初步压缩和延伸，得到温度合适、断面形状正确、尺寸合格、表面良好的轧件。首钢高线粗轧安排了7个轧制道次，采用箱形-椭圆-圆孔型，平均道次延伸系数为1.30~1.36。

(4) 切头尾与分段

粗轧后的轧件因为头尾两端散热大于中间部位，造成头尾温度较低，塑性较差，同时因为轧制变形时轧件端部宽展较大，造成轧件头部形状不规则，如果继续轧制会导致堵塞入口导卫或不能咬入。

(5) 中轧与预精轧

中轧与预精轧的作用是继续缩减粗轧机组轧出的轧件断面，为精轧机组提供轧制成品线材所需要的断面形状正确、尺寸精确并且沿全长断面尺寸均匀、无内在和表面缺陷的中间料。

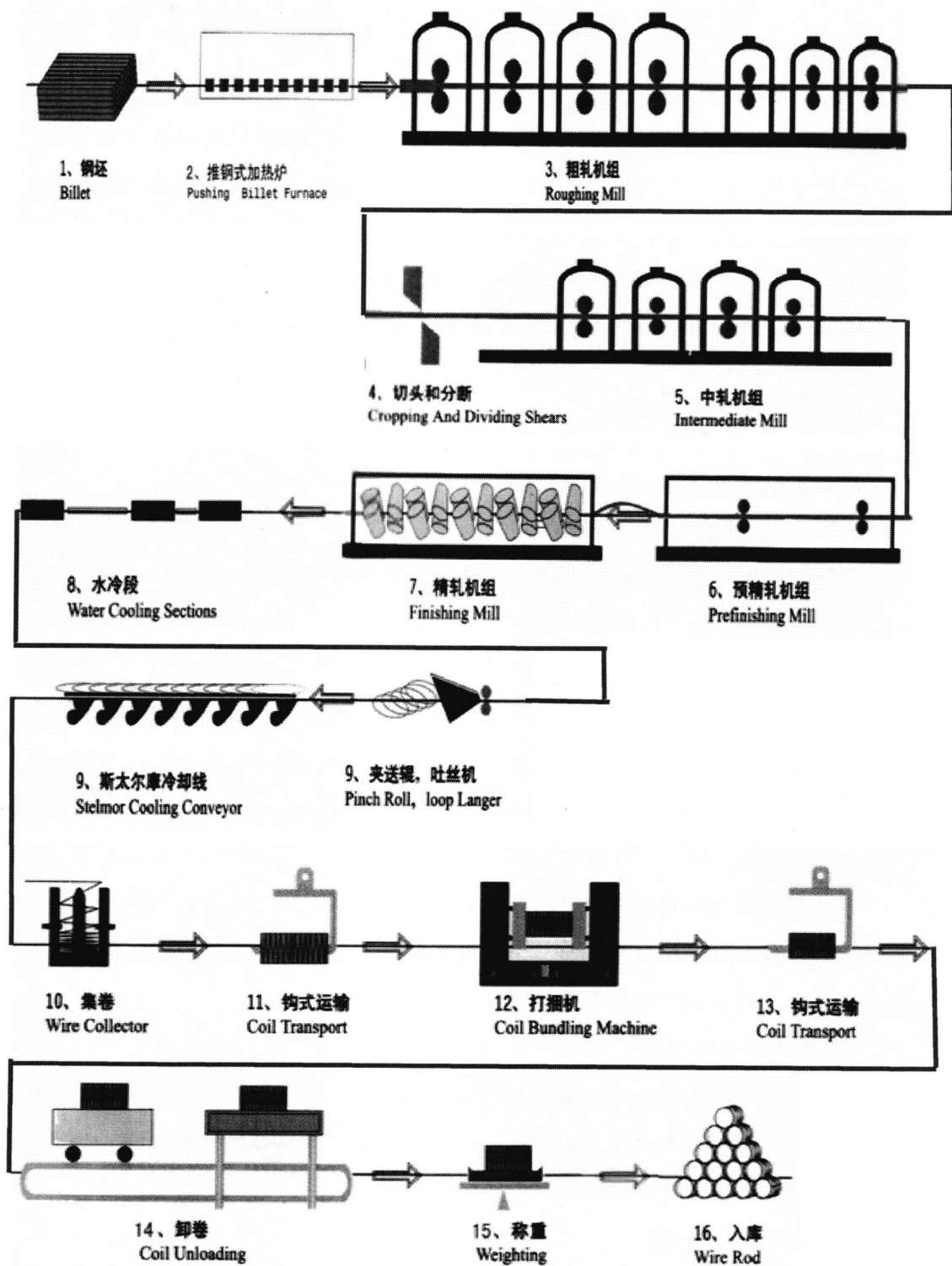


图 2.1 首钢高线生产工艺流程

Fig. 2.1 Production process in Shougang high speed wire plant

中轧及预精轧为6个道次,平均道次延伸系数一般在1.28~1.34之间。中轧的4个道次,微张力对轧件断面尺寸影响较小,同时轧制速度较低,张力控制较易实现,因此采用微张力轧制。预精轧的2个道次,轧件断面较小,对张力较敏感,轧制速度也较高,张力控制所必须的响应时间要求很短,很难采用微张力轧制的方法来保证轧件断面尺寸精度和稳定性,因此采用在预精轧前后设置活套的方式实现无张力轧制。

(6) 精轧

精轧是以固定道次间轧辊转速比,以单线微张力无扭转高速连续轧制的方式,通过椭圆孔型系统中的2~3个轧槽,将预精轧轧出的3~4个规格的轧件,轧出10多个甚至20多个规格的成品。精轧的平均道次延伸系数为1.25左右。

(7) 夹送辊与吐丝机

夹送辊是为了保证水冷后高速运行的线材能够顺利地进入吐丝机进行吐丝,同时也是为了保证线材尾部脱离轧机后能够顺利进入吐丝机进行吐丝,其线速度应大于轧机速度的5%左右。夹送辊由一对悬臂轧辊组成,上辊主动,下辊被动,下辊装有气动的压紧装置,其夹紧力为5000Kg,夹送辊为碳化钨辊环,辊径为 $\phi 184/174\text{mm}$ 。

吐丝机是将高速运行的线材吐成均匀的线圈,这些线圈直接落在运行的链式运输带上,自然形成散圈,吐丝机的吐丝头是由电机、螺旋伞齿轮传动的。该卧式吐丝机选择倾角为10度,吐丝头前有压缩空气冲刷氧化铁皮等杂物的管路。工作时吐丝机密封在一个罩内,此罩由液压缸启闭。

(8) 斯太尔摩冷却线

线材冷却至吐丝温度后,经过吐丝机,将直条线材形成散圈状分布在斯太尔摩冷却线上,进行风冷。

首钢斯太尔摩输送线是标准型的,用于控冷和输送散圈,全长约75m,在吐丝机前装有测温仪,用来检测吐丝的温度。

每条运输线由5个强制冷却段和两个备用空冷段组成,每段均可单独调整和控制,散圈冷却速度为 $3\sim 12^{\circ}\text{C}/\text{sec}$,75m长运输链分为两段,第1段输送散圈速度为 $0.1\sim 1.5\text{m}/\text{sec}$,第2段散圈速度为 $0.1\sim 0.9\text{m}/\text{sec}$ 。第1段运输与第2段运输链之间,由一组呈半圆型的过渡辊联接。

(9) 集卷机

集卷机位于斯太尔摩线链式运输线之后，将斯太尔摩线输送过来的散圈在集卷筒内收集起来。其工作方式是速度落差，自重成圈。散圈在集圈筒内被收集完毕后，由运输小车将线圈从集卷筒内支出，送至翻卷机，再由翻卷机将线圈翻转 90 度，使线圈成水平放置，最后翻卷机将线圈运到钩式运输机的钩子上，由钩式运输机将线圈运走。

(10) 线材盘卷的压紧捆扎

由于生产的线材为大盘重产品，且在低温（一般低于 400℃）集卷，盘卷较为蓬松。成品盘卷要保证捆扎密实，必须实行压紧捆扎。捆扎材料为冷轧包装带钢或 $\Phi 5.5\sim 6.5\text{mm}$ 的线材。

(11) 称重与挂牌

高速线材轧机产品盘重较大，都采用单盘称重。首钢生产线采用的是电子秤称重，并自动记录、自动打出标牌。标牌由人工拴挂在盘卷上，作为出厂标记和供生产统计用。

2.2 水冷设备

在高线生产中，钢材轧制后的冷却过程对钢材室温下的组织与性能产生显著影响。高线控制冷却工艺主要分两部分，一部分是水冷，将线材从终轧温度快速冷却至吐丝温度，主要生产设备为水冷箱。另一部分是空冷，将线材从吐丝温度缓慢冷却至相变结束，主要生产设备为斯太尔摩冷却线。

首钢高线水冷设备示意图如图 2.2 所示，水冷线全长 42.313m，有 3 个水箱组成，每个水箱内装有三线冷却管，冷却管形式为湍流管。每线最大用水量为 $325\text{m}^3/\text{h}$ ，其中 0.6Mpa 的低压水 $300\text{m}^3/\text{h}$ ，主要用于对线材进行冷却；高压水 1.2Mpa，用量为 $25\text{m}^3/\text{h}$ ，主要用于水封，水流方向与轧制方向相反，起到阻止线材将冷却水带出水箱的作用。

水冷线采用 PLC 自动控制系统。由于线材头尾温度低，可以对线材的头、尾自动断水不进行冷却。水箱开启的信号取自位于精轧机组后的光头信号，即头部断水不冷却；水箱的关闭信号取自于精轧机组前的光头信号，即尾部断水不冷却。供水管路上安装了气动快速截门控制，可以根据系统指令快速开闭。供水管路上安装了调节阀，可以根据系统指令调节水流量及压力的大小。

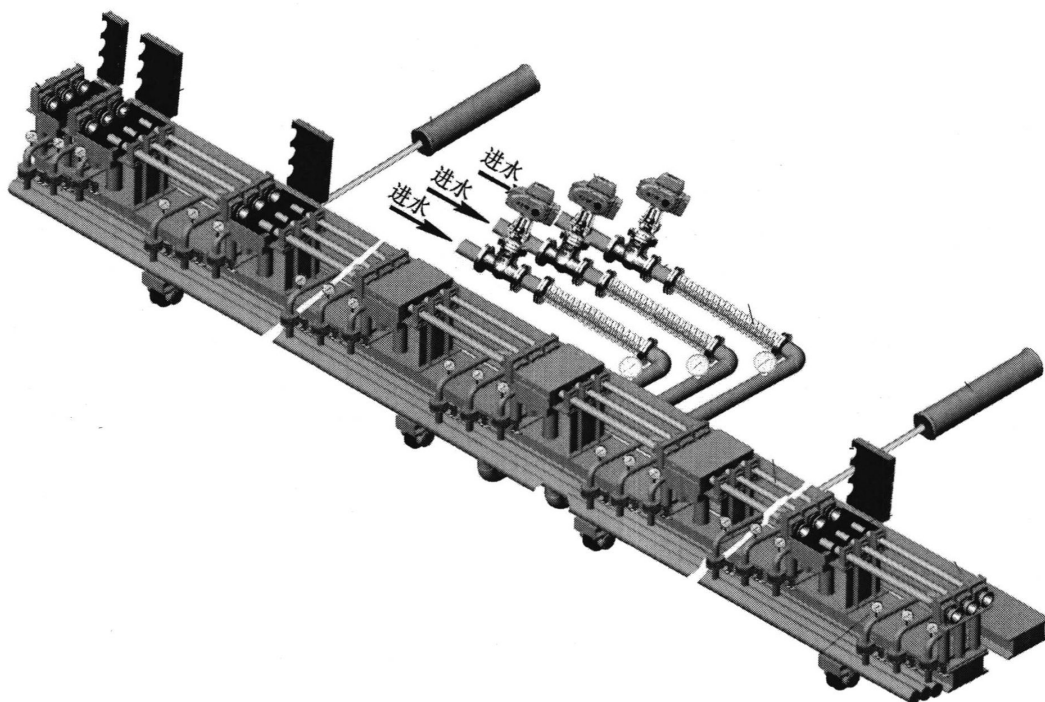


图 2.2 高线水冷设备示意图

Fig. 2.2 Schematic diagram of water cooling equipment in high speed wire production line

2.3 本章小结

本章主要介绍了首钢高线生产工艺流程、设备布置情况，重点对现有的轧后水冷设备及参数、PLC 控制系统进行了介绍。

第3章 高线吐丝温度控制模型的研究

3.1 温度场求解的理论基础

3.1.1 传热的基本方式

传热学是研究热量传递规律的一门学科。固体的传热包括两种：一是固体内部的导热——主要是热传导过程；二是固体和周围介质的热交换（外部过程）——主要是辐射、对流和传导（对流和传导在表面热交换过程中是不可避免地同时存在的）。任何传热过程同时存在这两个部分，在加热时热量首先以周围介质按照某种规律传到钢坯表面然后再由表面向中心传递。因此，加热过程是由外部传热和内部导热相互影响相互联系共同组成的。冷却时过程与此相反。归纳起来传热过程共有三种基本方式，即辐射、对流和传导^[21-23]。

（1）辐射换热

辐射是由于物体本身温度导致产生的电磁波，以电磁波为载体传输热能的现象称为辐射能。在辐射换热过程中，不仅有热量的转移，而且还伴有能量形式的转化，即在辐射体内热能转化为辐射能，而在受热体辐射能又转化为热能，因此辐射换热过程是一种能量互变（热能—辐射能—热能）的过程。

任何物体在任何温度下都在不停的发射辐射能，因此辐射换热是一种双向热流同时存在的换热过程。导热、对流这两种热量传递方式只在有物质存在的条件下才能实现，而热辐射可以在真空中传递，而且实际上在真空中辐射能的传递最有效。这是热辐射区别于导热、对流换热的基本特点。

辐射中传输的热流称为辐射力，物体的辐射能力与温度有关，同一温度下不同物体的辐射与吸收能力也大不一样。在探索热辐射规律的过程中，一种叫做黑体的理想物体的概念具有重大意义。黑体的吸收能力和辐射能力在同温度的物体中是最大的。

黑体的辐射力 Q 由斯蒂芬—波尔茨曼定律给出：

$$Q = \sigma_0 F T^4 \quad (3.1)$$

式中 F ——辐射表面积 (m^2)；

T ——辐射表面的绝对温度 (K)；

σ_0 ——黑体的辐射常数， $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

实际物体的辐射力都小于同温度下的黑体，实际物体辐射热流量的计算总可以采用斯蒂芬—波尔茨曼定律的修正形式：

$$Q = \varepsilon \sigma_0 F T^4 \quad (3.2)$$

ε 的值总是小于 1, 它与物体种类及表面状态有关。斯蒂芬—波尔茨曼定律又称四次方定律, 是辐射换热计算的基础。应当指出式 (3.1)、(3.2) 中的 Q 是物体自身向外辐射的热流量, 而不是辐射换热量, 要计算辐射换热量, 还必须考虑物体上的辐射热量的吸收过程, 即要算各物体收、支辐射能之差。因此, 净辐射热交换式为:

$$Q = \varepsilon \sigma_0 F (T^4 - T_c^4) \quad (3.3)$$

(2) 对流换热

热对流现象发生在流体之中, 流体中有温差时, 各处的密度也不同, 于是轻浮重沉, 诱导流体质团的相对移动。依赖流体质团整体宏观移动和相互混合传输热能的物理现象, 称为热对流。工程上流体总是和固体壁面之间交换热量, 特称之为对流换热。对流换热是物体表面热交换的另一种形式。此种热交换的强度不但和物体传热特性有关, 而且更主要是决定于介质流体的物理性质和运动特性。在此种热交换过程中, 一般常伴有流体集态的改变 (产生气泡、气膜)。因此, 热交换过程是极其复杂的。

1901 年 Newton 首先提出对流换热的基本公式即牛顿公式:

$$Q = \alpha F (T_f - T_w) \quad (3.4)$$

或

$$Q = \alpha F \Delta T \quad (3.5)$$

式中 Q ——对流热流量 (W);

F ——与流体相接触的壁面面积 (m^2);

T_f ——壁面温度 (K);

T_w ——流体温度 (K);

ΔT ——温度差;

α ——对流换热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$)。

对流传热的方向就是与其所邻近流体实行热交换的表面的法线方向。式 (3.4) 本身计算很简单, 困难在于确定对流换热系数 α 的数值。对流换热系数 α 的大小与换热过程中的许多因素有关。它不仅仅取决于流体的物性以及换热表面的形状与布置, 而且还与流速有密切的关系^[24]。因此, α 的理论计算较为复杂目前只对一些特例有比较满意的理论公式, 通常 α 值主要由实验确定。

(3) 导热

导热是在直接接触的两物体之间或在同一物体各部分之间存在温度梯度情况

下所发生的能量传递过程。

对于导热过程，物体所传导的热量与这物体材料的导热特性（导热系数）以及所处温度梯度之间的数量有关系，可由导热基本定律，即傅里叶定律给出。一维稳态导热时傅立叶定律的数学表达式为：

$$q_x = \frac{Q_x}{F} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (3.6)$$

或

$$Q_x = -\lambda F \frac{dT}{dx} \quad (3.7)$$

式中 Q_x ——在 x 方向的热流量 (W)；

q_x ——在 x 方向的热流密度 (W/m^2)

F ——垂直于热流方向的导热面积 (m^2)；

$\frac{dT}{dx}$ ——在 x 方向的温度梯度 (K/m)；

λ ——导热系数 ($W/(m \cdot K)$)。

导热系数 λ 是表征材料导热性能优劣的参数，是判断传热工程材料是否适用于某一用途的十分重要的物性参数，不同材料的导热系数值不同，即使是同一种材料导热系数值还与温度等因素有关。

导热系数的定义，由傅里叶定律的数学表达式给出。数值上它等于在单位温度梯度作用下，物体内部所产生的热流密度矢量的模。工程计算采用的各种物质的导热系数的数值都是用专门实验测定出来的。

3.1.2 傅里叶定律

固体热传导方式的传热过程完全取决于温度的分布，研究固体内部热传导即是研究温度在物体的空间中随时间的变化：

$$T = f(x, y, z, \tau) \quad (3.8)$$

式中 x, y, z ——空间坐标；

τ ——时间。

在某一瞬时物体各点的温度数值综合称为温度场。温度场可分为两大类^[25]：一类是稳态工作条件下的温度场，这时物体各点的温度不随时间变动，这种温度场称为稳态温度场；另一类是变动工作条件下的温度场，例如热机的部件在启动停机或变动工况时就出现这类温度场，这时温度分布随时间改变这种温度场称为非稳态温度场。在特殊情况下物体的温度仅在一个坐标方向上有变化这种情况下

的温度场称为一维温度场。

连接温度场中具有同一温度的各点就得出“等温面”或“等温线”，不同温度的等温面不会相交，等温面不会中断。所有等温面或者自身封闭，或者终止于物体的边缘。沿着等温面移动不会有温度变化，从一个等温面移动到另一等温面时，就会发现有温度变化，沿等温面法线方向移动时，温度变化速度最大。

温度在空间沿方向 n 的变化速度用 $\frac{\Delta T}{\Delta n}$ 表示。 ΔT 为移动极小一段距离 Δn 的温度变化。而“温度梯度”是指这样一个向量，其数量上等于 ΔT 与 Δn 之比，当 Δn 趋于 0 时的极限值，此向量的方向同指向温度增加方向的法线重合：

$$|\text{grad}T| = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta T}{\Delta n} \right| = \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.9)$$

在归纳大量的试验数据结果的基础上，傅立叶 (J.B.Fouria) 在 1882 年提出了导热的基本定律^[26]：

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.10)$$

式中， q 是单位时间、单位面积上传过的热量，称比热流量；比例系数 λ 称为导热系数，是表征物体导热能力的一个物理量。式中负号表示导热的方向永远沿着温度降低的方向。

3.1.3 导热微分方程

傅里叶定律确定了导热量和温度梯度之间的关系。对许多一维导热问题，可以直接写出其温度梯度，计算出热流量。而对于多维导热问题，则必须建立更为完整的数学模型才能进行分析求解。导热问题的一般数学模型由导热微分方程和相应的单值条件构成。

为了求得导热微分方程，我们在物体内取一个微元正六面体 $dV = dxdydz$ 作为控制体，如图 3.1 所示。假定被研究物体各向同性，其导热系数 λ 、比热 c 和密度 ρ 均为已知，物体中各点的内热源强度 q_v 均相等。

由傅里叶定律，在 dt 时间内，沿 x , y , z 轴传入微元体的热流量为：

$$dQ_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydzdt \quad (3.11)$$

$$dQ_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} dxdzdt \quad (3.12)$$

$$dQ_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} dx dy dt \quad (3.13)$$

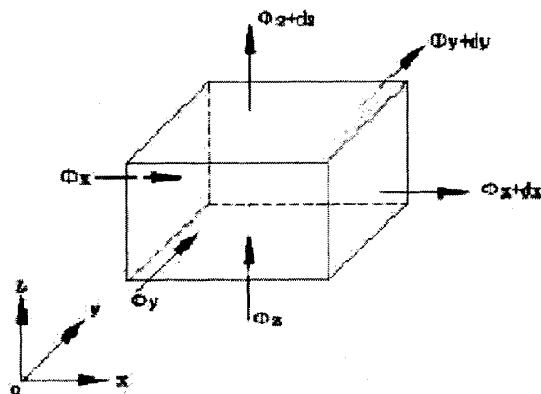


图 3.1 微元体示意图

Fig. 3.1 Schematic diagram of micro-unit

在 dt 时间内, 沿 x , y , z 轴流出微元体的热流量为:

$$dQ_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) dy dz dt \quad (3.14)$$

$$dQ_{y+dy} = -\lambda \frac{\partial}{\partial y} \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) dx dz dt \quad (3.15)$$

$$dQ_{z+dz} = -\lambda \frac{\partial}{\partial z} \left(T + \frac{\partial T}{\partial z} dz \right) dx dy dt \quad (3.16)$$

在 dt 时间内, 周围介质由于导热沿 x , y , z 方向导入微元体的总热量 dQ_1 为:

$$\begin{aligned} dQ_1 &= (Q_x - Q_{x+dx}) + (Q_y - Q_{y+dy}) + (Q_z - Q_{z+dz}) \\ &= \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dx dy dz dt \end{aligned} \quad (3.17)$$

在 dt 时间内, 微元体内热源的发热量 dQ_2 为:

$$dQ_2 = q_v dx dy dz dt \quad (3.18)$$

在 dt 时间内, 微元体内能的增量 dQ 为:

$$dQ = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz dt \quad (3.19)$$

对于微元体, 利用能量守恒定律, 在任一时间间隔内有热平衡关系: 导入微元体的总热流量 dQ_1 , 加上微元体内热源的发热量 dQ_2 , 等于微元体内能的增量 dQ , 即:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (3.20)$$

将以上所得到的 dQ_1 、 dQ_2 、 dQ 代入式 (3.20)，整理得到式 (3.22)：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (3.22)$$

式 (3.22) 既为导热微分方程式，又称为傅里叶微分方程^[26]，它表达了物体的温度随空间和时间的变化关系。

当所分析的对象为轴对称物体，如圆柱体、筒壁等，采用圆柱坐标系 (r, θ, z) 更为方便。圆柱坐标系的导热微分方程可由式 (3.22) 通过坐标转换得出或应用前述直角坐标系导热微分方程的推导方法，运用傅里叶定律导出。

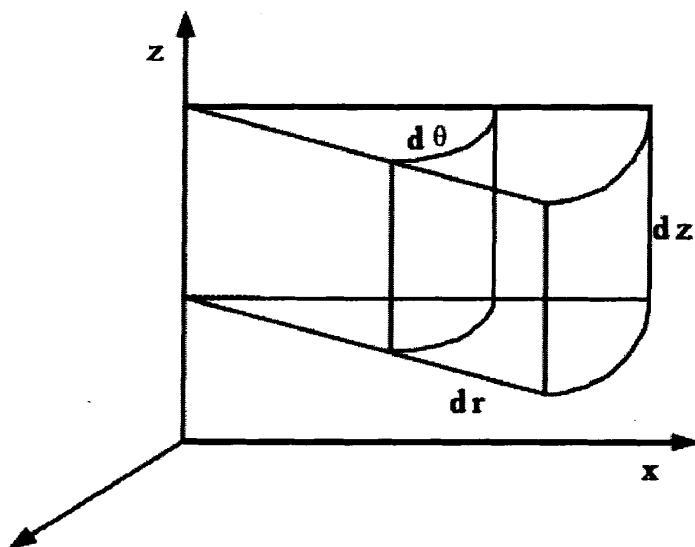


图 3.2 圆柱坐标系示意图

Fig. 3.2 Schematic diagram of cylindrical coordinate system

参照图 3.2 推导出圆柱坐标系的导热微分方程式的一般形式为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (3.23)$$

3.1.4 定解条件

导热微分方程是根据能量守恒定律和傅里叶定律所建立起来的描述物体的温度随空间和时间变化的通用表达式，它反映了所有导热过程的共性。对导热方程的求解所得到的只是方程式的通解，要想确定某一具体条件下的温度场，还必须给出表明该具体过程特征的补充条件，即定解条件或单值性条件。定解条件一般包括初始条件、几何条件、物性条件和边界条件^[27]。在求解导热问题时，导热微分方程连同定解条件才能够完整地描述一个具体的导热微分方程。

(1) 初始条件

初始条件给出整个系统的初始状态, 即 $t=0$ 时整个温度场内部温度分布:

$$T|_{t=0} = f(x, y, z) \quad (3.24)$$

求解非稳定温度场时, 除了给定边界条件, 还必须给定初始条件。而稳定温度场的温度分布与初始条件无关, 它是只有边界条件而没有初始条件的导热问题。

(2) 几何条件

几何条件给出导热体几何形状和尺寸的函数表达式或数据。例如, 平壁或圆筒壁的厚度或直径等几何尺寸。

(3) 物性条件

物性条件给出导热体的物性参数, 如导热系数 λ 、比热 c 和密度 ρ 的数值或给出它们随温度和坐标而改变的函数关系; 有内热源时, 应说明内热源发热率 q_v 的大小及分布情况。

(4) 边界条件

边界条件给出导热体边界上的温度分布或热流密度分布的函数关系。

导热问题常见的边界条件可以分为三类^[28]:

1) 第一类边界条件 (也称狄利克莱 Dirichlet 条件)

给出物体表面上各点的温度值, 其数学表达式为:

$$T_w = f(x, y, z, t); 0 < t < \infty \quad (3.25)$$

当 $T_w = \text{const}$ 时, 物体的边界温度均匀并保持不变。

2) 第二类边界条件 (也称纽曼 Neumann 条件)

给出物体表面上各点的热流密度值, 其数学表达式为:

$$q_w = f(x, y, z, t); 0 < t < \infty \quad (3.26)$$

特殊的, 当 $q_w = \text{const}$ 时, 边界表面的热流密度不随时间及位置而变化。更特殊的, 当 $q_w = 0$ 时, 即为绝热边界条件。

3) 第三类边界条件 (也称罗宾 Robin 条件)

给定边界表面上各点与周围流体间的对流换热系数 h 及周围介质的温度 T_f 。其数学表达式为:

$$q_w = h(T_w - T_f) \quad (3.27)$$

$$\text{或 } -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h(T_w - T_f) \quad (3.28)$$

上述关于边界条件分为三类的作法, 主要是从数学方面便于求解考虑的。如果从导热现象的物理方面去分析, 不难发现, 物体内部的导热现象总是与该物体

边界上的各种传热现象, 如对流换热、辐射换热等现象联系在一起。因此, 也可把边界条件分为如下四种情况: 给定物体边界上对流换热条件; 给定物体边界上辐射换热条件; 给定物体边界上温度条件; 给定物体边界上热流条件。

3.2 高线水冷段温度场模型与求解方法

本文所研究的线材几何形状可以抽象为一个无限长的圆柱体, 冷却时湍流管内的水流沿周向分布均匀, 因此从传热角度来说, 在喷水冷却过程中, 圆柱体的周向导热和轴向导热不明显, 对数学模型的影响不大, 在实际计算中可以忽略。同时, 在喷水冷却过程中, 线材可视为一个无内热源的物体。综上所述, 线材水冷过程中的传热问题可简化为温度仅沿径向变化的一维瞬态问题。

根据圆柱坐标系下物体导热微分方程式的一般形式 (3.23), 进行模型简化, 内热源 $q_v = 0$, 且周向温度梯度 $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$, 轴向温度梯度 $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, 得到柱坐标系下的导热微分方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.29)$$

式 (3.29) 即为线材内部单元导热微分方程。

实际存在的各种传热问题, 在经过一系列的理想化假设后, 都能得到一个恰当的数学问题, 一般是一个偏微分方程的定解问题。目前, 传热问题的数学处理方法一般分为两大类^[29]。一类是精确解法, 通常指用分析方法求解, 所求得解为精确解; 另一类是近似解法, 如模拟求解法、图解法及数值求解法等, 所求得解为近似解。

(1) 分析求解法

以数学分析为基础, 求解导热微分方程定解问题或其它形式导热问题, 得到用函数形式表示的解为分析解, 也称精确解。

分析求解的优点在于: 整个求解过程中物理概念和逻辑推理都比较清晰; 求解过程所依据的数学基础大都已有严格的证明; 求解的最后结果比较清楚的表示出各种因素 (如边界条件、物性条件、时间条件) 对物体内部温度分布的影响; 分析解的结果还可作为其它各种解法, 尤其是数值求解方法精确性的一种检验。

分析求解的缺点在于: 分析求解法只能用于求解比较简单的问题, 对于稍微复杂的情况, 例如几何形状不规则的物体, 材料的热物性参数随温度等因素变化, 辐射换热的边界条件等问题, 分析求解几乎都不适用。因此在实际采用分析解法时, 都要在一定条件下, 对原有问题作一些理想化假设, 以获得比较简单的数学

模型，便于分析求解。

(2) 模拟求解法

如果两个不同物理领域的现象能用同一数学形式来描写，则称这两个现象彼此是可模拟的。模拟的方法就是把一个领域内要求解的问题过渡到另一个领域中去解决。通过模拟可将导热问题用其它物理现象的实验来模拟求解。具体的方法有：电模拟、水模拟、气动模拟、薄膜模拟及光模拟等。模拟求解法是一种近似解法，所求得解为近似解。

(3) 图解法

不稳定导热问题的作图求解法，简称图解法，最早由 Binder-Schmit 提出的，因此也称为 Binder-Schmit 法。图解法是在有限差分的基础上建立起来的，其实质是用作图的方法求解有限差分方程。

用图解法求解温度场，其最后的精确程度取决于作图人员的手工技巧，其解的精确性很差。随着计算机的发展，这种手工作图法已逐渐被淘汰，但有时可用图解法所求得解作为数值解法的一种粗略预测。

(4) 数值求解法

数值求解法是以离散数学为基础，以计算机为工具的一种求解方法。它的理论基础不如分析解那样严密，但在实际问题求解上却有很大的适应性。一些比较复杂的情况，如复杂几何形状、变化的热物性、辐射边界条件等问题，都能用数值求解的方法较好的解决。目前，随着计算机的发展，数值解法的计算精度和计算速度得到大大的提高，这种求解方法也得到了广泛的应用。导热问题的数值解法主要有两种：有限差分法和有限单元法。

有限差分法是导热偏微分方程及定解条件推导出节点温度的线性代数方程，其计算相对简单。有限单元法是由导热定解问题的泛函变分或从微分方程出发，用加权余量法推导节点温度的线性方程，有限单元法对求解几何形状复杂的导热问题有优势，但计算较复杂，要求计算机的贮存量较大，计算时间也较长^[29-30]。

3.3 温度模型的差分求解

钢材在精轧后的水冷器中进行冷却时，其温度场分布受多项因素影响，如钢材材质、规格、冷却水的水量、水压、水温及水流运动形态，钢材的初始温度，热传导、对流、辐射的条件，湍流管冷却装置的设备状况等等。这些因素的影响机理比较复杂，而且有的影响因素还随时间与温度变化而变化，因此若采用分析求解法，要准确地计算出冷却后的钢材温度场存在较大困难。因此本文采用有限差分法对线材水冷过程温度场进行求解。有限差分法是将导热微分方程（即式

(3.29)) 进行差分近似求解的方法,其基本思想是将实际上是连续的物理过程在时间和空间上离散化,近似地替换成一连串的阶跃过程,用函数在一些特定点的有限差商代替微商,建立与原微分方程相应的差分方程,以便求解。差分方法计算温度场的基本原理就是根据所求点的几个相邻点的温度值来求得该点的温度值。

3.3.1 差分格式的选择

建立温度场差分方程首先要选择一种合适的差分格式,从导热微分方程推导差分方程^[31-32]的基本格式主要有两种,即显式差分方法和隐式差分方法。显式差分方法求解温度场的基本原理是根据所求点及其相邻各点在上一时刻的温度来计算该点在当前时刻的温度,由于上一时刻各点的温度是已知的,因此物体在任何时刻的温度场都可用上一时刻各点的温度计算得到。隐式差分方法基本原理是根据所求点及其相邻各点在当前时刻的温度和该点前一时刻的温度来计算该点在当前时刻的温度,因此从已知的上一时刻各点温度无法简单的计算出当前时刻该点的温度,所以对每个时间步长都要解一组联立方程才能求出新的温度,这组方程的数目等于待求温度的节点的总数。

对于差分格式的选择主要从以下几方面进行考虑:

(1) 计算速度

本文对温度场研究的一个主要目的是为了建立一个能用于在线控制的数学计算模型,因此计算的速度是必须考虑的一个重要问题,与隐式差分相比,显式差分具有较小的计算量和较高的计算速度。

(2) 计算误差

有限差分计算中不可避免的都存在着计算误差,有限差分计算中的误差主要有两类,即舍入误差和截断误差。

截断误差是用差商项近似微商项时带来的误差,主要取决于初始给定的温度分布、边界条件及有限差分格式的选择等。一般情况下,时间步长 Δt 和空间步长 Δx 越小,截断误差就越小,但是同时计算量也就要越大。因此在实际计算中,要综合考虑精度和计算工作量的要求。

舍入误差是在反复计算中舍入误差的积累,这类误差是在任何一种计算中对有效数字的限制引起的。这种误差的积累对显式差分方程的稳定性影响很大,如果显式差分方程不能满足其稳定性的要求,则舍入误差会随着时间而趋于增长,从而导致一个完全错误的结果。

(3) 稳定性

隐式差分方程的特点是方程恒稳定，即时间步长可以不受限制，而显式差分方程的稳定性是有条件的，即时间步长的选取则受空间步长的制约，因此显式差分方程必须满足一定的稳定性判据，这种稳定性判据可用分析的方法建立起来。事实证明显式有限差分方程稳定性的充分条件是根据给定的空间步长应当选择合适的时间步长，以使得 $T_{i,j}^n$ 项的系数不为负数。

综合考虑以上各方面，显式差分方程在满足稳定性的条件下，具有较快的计算速度，并且精确度能够满足实际应用要求，因此本文选用显式差分方程计算线材水冷温度场。

3.3.2 区域离散化

建立有限差分方程的第一步是空间区域的离散化，其实质是把整个介质等分成细小的间隔，以离散的节点来代替原来的连续空间。对于本文所讨论的线材，由于只考虑径向传热，其空间离散示意图如图 3.3 所示，其中坐标 r 表示的是径向，下标以 i 表示，其间隔为 Δr ，也称为空间步长。

第二步是时间区域的离散化，对连续的时间等分成小的间隔 Δt ，也称为时间步长，时间的下标以 k 表示。

对于空间步长 Δr 和时间步长 Δt 的大小要根据具体情况，兼顾到计算的精确度与计算的工作量等因素而定。

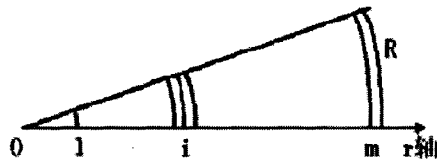


图 3.3 空间离散示意图

Fig. 3.3 Schematic diagram of space discretization

3.3.3 温度场差分方程的建立

建立温度场的有限差分方程首先要离散化导热微分方程，离散化的基本思想^[30]是把求解物体内部温度随空间、时间连续分布的问题，转化为求在时间领域和空间领域有限个离散点上温度值的问题，用这些离散点上的温度值去逼近连续的温度分布。

建立有限差分离散方程的常用方法有四种，即 Taylor（泰勒）级数展开法，多项式拟合法，控制容积积分法及元体平衡法。本文所采用的离散方法即为 Taylor

(泰勒)级数展开法。

所谓建立离散方程的泰勒级数展开法,是指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离散方程的方法。将连续函数 $T(x)$ 作泰勒级数展开:

$$T(x+\Delta x) = T(x) + \Delta x \frac{dT}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2T}{dx^2} + \cdots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{d^n T}{dx^n} + \cdots \quad (3.30)$$

整理后可写成:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} = \frac{dT}{dx} + \frac{\Delta x}{2!} \frac{d^2T}{dx^2} + \cdots + \frac{(\Delta x)^{n-1}}{n!} \frac{d^n T}{dx^n} + \cdots \quad (3.31)$$

对上式略去截断误差 $O(\Delta x)$ 后,可得到向前差分式:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} \quad (3.32)$$

同样的方法,可以得到向后差分 and 中心差分:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x} \quad (3.33)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T(x+\Delta x) - T(x-\Delta x)}{2\Delta x} \quad (3.34)$$

上述各式均为一阶差分公式,以同样的方法也可获得二阶差分公式。

以上述各阶差分代替微分,即可获得物体内部各个节点处的一维有限差分方程。

在本文中,将导热微分方程中温度对时间的导数用对时间的前差商表示:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^k = \frac{(T_i^{k+1} - T_i^k)}{\Delta t} \quad (3.35)$$

温度对半径的一阶导数用对半径的中心差分表示:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_i^k = \frac{(T_{i+1}^k - T_{i-1}^k)}{2\Delta r} \quad (3.36)$$

温度对半径的二阶导数用中心差分表示:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)_i^k = \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{(\Delta r)^2} \quad (3.37)$$

将式 (3.35)、(3.36)、(3.37) 代入式 (3.29), 即可获得各节点的差分方程:

$$\frac{C_p \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} = \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{(T_{i+1}^k - T_{i-1}^k)}{2\Delta r} \quad (3.38)$$

令 $f = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2}$, $r = i\Delta r$, 对 (3.38) 式进行整理, 得到中间节点的差分方程为:

$$T_i^{k+1} = (1-2f)T_i^k + \left(1 + \frac{1}{2i}\right)f \cdot T_{i+1}^k + \left(1 - \frac{1}{2i}\right)T_{i-1}^k \quad (3.39)$$

从(3-39)式可知, 已知 k 时刻的各点温度值, 可以得到 $k+1$ 时刻的各点温度值。

下面推导中心节点与表面节点的差分方程。

对于线材来说, 其几何形状和冷却边界条件都是对称的, 可以只取直径方向的一半进行计算, 对称面上的边界条件为绝热边界, 在中心点处取一个扇形单元

体, 其体积为: $\pi \cdot \frac{\left(\frac{\Delta r}{2}\right)^2}{m} \cdot l$

在非稳态导热条件下, 其中心节点热平衡方程为:

$$\frac{C_p \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{T_0^{k+1} - T_0^k}{\Delta t} \cdot \pi \cdot \frac{\left(\frac{\Delta r}{2}\right)^2}{m} \cdot l = \frac{(T_1^k - T_0^k)}{\Delta r} \cdot 2\pi \cdot \frac{\left(\frac{\Delta r}{2}\right)^2}{m} \cdot l \quad (3.40)$$

通过整理得到中心节点差分方程:

$$T_0^{k+1} = 4fT_1^k + (1-4f)T_0^k \quad (3.41)$$

在边界处取一个扇形单元体, 其体积为:

$$\frac{\pi}{m} \cdot \left[r^2 - \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right] \cdot l$$

将上式代入热平衡方程:

$$\begin{aligned} & \frac{C_p \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{T_m^{k+1} - T_m^k}{\Delta t} \cdot \left[r^2 - \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right] \cdot \frac{\pi}{m} \cdot l \\ &= \frac{2\pi}{m} \cdot r \cdot l \cdot \alpha (T_f - T_m^k) + \left(\frac{T_{m-1}^k - T_m^k}{\Delta r} \right) \cdot \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot l \end{aligned} \quad (3.42)$$

经整理得到边界节点的差分方程为:

$$T_m^{k+1} = \frac{4f}{4m-1} [(2m-1)T_{m-1}^k + b_i T_f] + \left[1 - \frac{4(2m-1)}{4m-1} f + \left(\frac{4fb_i}{4m-1} \right) \right] T_m^k \quad (3.43)$$

其中: $b_i = \frac{2m\alpha\Delta r}{\lambda}$, $f = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2}$

以上式(3.39)、(3.41)和式(3.43)分别为线材各点的有限差分方程, 其中 T_i^k 表示节点 (i) 在 k 时刻的温度, α 表示表面的换热系数。根据以上各式, 在已知任一时刻线材上各点的温度分布情况下, 就能求解出经过几个时间步长之后的温度分布情况。

温度场有限差分计算流程如图 3.4 所示。

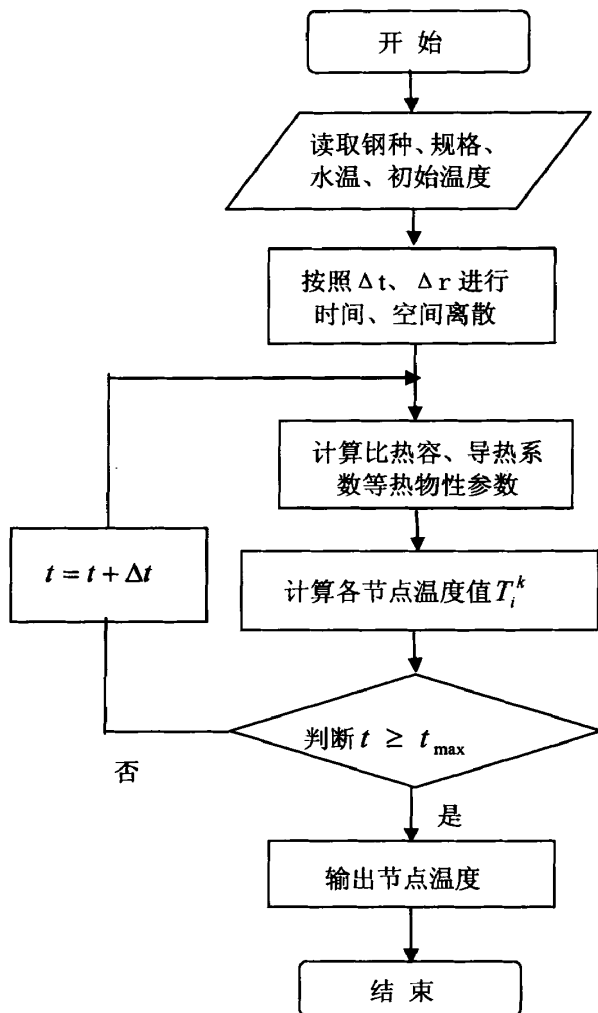


图 3.4 温度场有限差分计算流程图

Fig. 3.4 Flowchart of finite difference method used in temperature calculation

3.4 换热系数的确定

要应用以上所建立的有限差分方程对温度场进行计算，首先必须确定线材水冷过程各个阶段对应的换热系数。线材在精轧后水冷过程中主要经历四个阶段，即：

- (1) 线材出精轧机后至进入水冷器之前的空冷阶段；
- (2) 在水冷器在进行喷水冷却的阶段；
- (3) 两个水箱之间的冷却阶段；
- (4) 喷水结束后温度均匀化过程的空冷阶段。

3.4.1 进入水冷器前的换热系数

线材出精轧机后到进入水冷器之前这一段时间，与空气直接接触，冷却的主要方式为辐射换热和空气自然对流换热。因此此时的换热系数为综合对流换热系数 h_0 ，即：

$$h_0 = h_c + h_r \quad (3.44)$$

其中，辐射换热系数 h_r 可表示为：

$$h_r = \frac{T_B^4 - T_\infty^4}{T_B - T_\infty} \varepsilon \sigma \quad (3.45)$$

式中 ε ——黑度，取值为 0.8^[33]；

σ ——辐射系数，取值为 $5.67 \times 10^{-8} (W / (m^2 \cdot K^4))$ ；

T_B ——线材表面温度，℃；

T_∞ ——环境温度，℃。

空气自然对流换热系数 h_c ，根据文献^[34]所述，属于大空间自然对流换热。 h_c 的值可用下式计算得出：

$$h_c = \frac{\lambda}{d} N_u \quad (3.46)$$

式中 N_u ——努谢尔特准数；

d ——特征尺寸，m；

λ ——空气的导热系数， $W / (m \cdot ^\circ C)$ 。

根据查表计算可得，由于在空冷过程中，坯料温度变化的范围比较小，因此空气自然对流换热系数 h_c 可取为定值 $30 W / m^2 \cdot ^\circ C$ 。

由此，可算得空冷时的综合对流换热系数 h_0 ：

$$h_0 = \frac{T_B^4 - T_\infty^4}{T_B - T_\infty} 0.5 \sigma + 30 \quad (3.47)$$

3.4.2 喷水冷却阶段换热系数

坯料在喷水冷却过程中同时受到冷却水的强制对流冷却和辐射冷却，两者同时考虑在内，由于此阶段的热交换程度非常大，而且热交换情况和形式相对比较复杂，而此阶段的传热变化又是影响整个冷却过程效果的重要因素，因此需要对水冷对流换热系数进行研究。

对流换热是流动着的流体与固体壁面间的热量交换。因此，影响流动的因素以及影响流体导热的因素都是影响对流换热的因素^[35]。具体的说，它们是：流动的动力；被流体冲刷的换热面的几何形状和布置；流体有无相变；流体的流动状态以及流体的物理性质，即动力粘度 μ 、比热容 c ，密度 ρ ，及导热系数 λ 等。同时对流换热系数的求解有赖于流体和壁面温度场的求解^[36]。

对于线材水冷过程来说，高温的线材和冷却水接触时，将发生沸腾现象，液体的水将生成气态的水蒸汽，以气泡的形式释放到空气中。当水温达到饱和温度 T_s （指水与汽的临界温度），冷却物表面温度 T_w 高于饱和温度所发生的沸腾称为饱和沸腾。在饱和沸腾时，随着冷却物表面温度的过热度的增高，会出现自然对流、核状沸腾、膜状沸腾、稳定膜状沸腾四个换热规律完全不同的区域^[37-38]。如图 3.5^[37]所示。

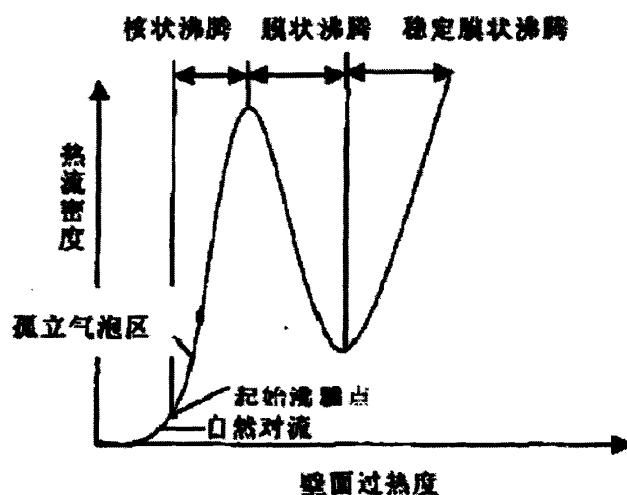


图 3.5 饱和沸腾曲线图

Fig. 3.5 Curve of saturated boiling

经过短暂的自然对流区，随着过热度的提高，开始进入沸腾区域。从起始沸腾点开始，在金属表面的某些特定点上（称为汽化核心）产生气泡。开始阶段，气泡核心产生的气泡彼此互补干扰，称为孤立气泡区。随着 ΔT 的升高，对流换热系数反而越来越低。这是因为气泡汇聚覆盖在热表面上，而水蒸汽暂时无法及时排放到空气中，这种情况持续到到达最低热流密度 $Q_{\min}$ 。这段沸腾称为过渡沸腾，热交换状态非常不稳定的。从 $Q_{\min}$ 起再次发生转折，此时热表面已经形成稳定的蒸汽膜层， Q 随 ΔT 的增大而增大。此段称为稳定膜状沸腾。

在膜沸腾阶段，热传导效率低，对流换热系数较小，钢材不能很好的冷却。在核沸腾阶段，热传导效果好，钢材能很好很快冷却，对流换热系数较大。而当表面温度降至介质汽化温度以下，核沸腾停止，即进入对流换热阶段。

介质温度高时,有利于膜沸腾的形成,延迟核沸腾的到来,对换热不利。流动速度大有利于对流换热,而表面部位的影响是介质温度核流动状态的综合反映。两种因素的作用随表面位置和冷却时间而异,因此工件表面的换热系数随时间和位置而变化。

对流换热的求法,由于影响因子多,出发点不同,一直没有一个统一的公式。对流换热系数的求法主要有三种,即数学分析法、实验法和反算法。这三种方法各有其优缺点和适用范围。

第一种方法是数学分析法。

应用质量守恒、能量守恒、动量守恒等基本物理规律,描述一般的对流换热现象,再加上某一对流换热现象所具有的单值性条件,便可建立起某一个对流换热过程的物理模型。再应用数学方法建立起数学模型,就可以求得换热系数 α 的解。

从对流换热过程的数学模型,直接求得 α 的精确解是非常困难的,甚至是不可能的。因而,只能通过各种途径求到其近似的解。在文献[39]利用数学分析法给出计算对流换热系数如下方法:

$$\alpha = \frac{\frac{\lambda \Delta T_x}{\Delta x} - \frac{\Delta T_x \Delta x \rho C_p}{2 \Delta t}}{T_w - T} \quad (3.48)$$

该模型是作了大量简化之后才建立起来的,计算相对简单,对于一些精度要求不高,或强制受迫对流换热不明显的例子可以适用。但由于本文冷却过程对流换热现象十分复杂,其影响因素不断变化,故无法用上述简单的模型进行对流换热系数的计算。

文献[40]中,给出计算对流换热系数的方法:

$$\alpha = 11.734 \frac{T_d - T_w}{(D - d)(T - T_w)} \lambda_w \left(\frac{D}{d} \right)^{1.5} \text{Re}^{0.333} \quad (3.49)$$

该模型最大的特点是考虑了冷却器直径大小与轧材本身直径大小之间的关系因素。大量事实说明,二者直径大小对对流换热系数的计算,会产生一定影响。但该式不足之处在于没有考虑水量、水流速度的影响。而实际水冷过程中,由于冷却水量的变化,会导致冷却器内部冷却水冲击轧件的压力不同,冷却效果会产生很大的差异。

由热力学第一定律,在水冷过程中,钢损失热量的速率等于热量传递到流体的速率。

$$-V\rho C_p \frac{dT}{dt} = \alpha F(T - T_w) \quad (3.50)$$

重新整理得：

$$-V\rho C_P \frac{dT}{(T-T_w)} = \alpha F dt \quad (3.51)$$

对式(3.51)的两边进行积分，得到：

$$-V\rho C_P \int_{T_{sc}}^{T_{fc}} \frac{dT}{(T-T_w)} = \alpha F \int_0^{\tau} dt \quad (3.52)$$

对积分式进行整理，得到：

$$\alpha = -\frac{V\rho C_P}{F\tau} [\ln(T_{fc} - T_w) - \ln(T_{sc} - T_w)] \quad (3.53)$$

从式(3.53)中可以看出，对流换热系数与钢温 T (即 T_{sc} 和 T_{fc})、水温 T_w 有关。当钢材表面温降 $(T_{sc} - T_{fc})$ 越大时，对流换热系数越大。但该式得到的是冷却过程的平均对流换热系数，而无法反映出对流换热系数在水冷过程的复杂变化，且该式未反映出现场冷却工艺参数，如冷却水量，钢材运行速度和水压等的影响，很难投入实际应用。

第二种是实验法。

实验法是根据描述对流换热现象的物理模型，用相似理论找到判别一组相似的对流换热现象所具有的必要和充分条件，应用大量实验数据整理出适用于某一实验范围内，求 α 的无因次方程也称准则形式的经验公式或准则方程。

文献[41] [42]中，采用相似理论指导下的实验法，即 α 的值可以借助于相似理论为基础的实验来确定。各相似准数常见关系一般为以下形式：

$$N_u = K(R_e)^M (P_r)^N \quad (3.54)$$

式中： N_u ：努塞尔准数 $N_u = \frac{\alpha D}{\lambda}$

R_e ：雷诺准数： $R_e = \frac{V_w D \rho}{\eta_w}$

P_r ：普兰特准数： $P_r = \frac{C_{pw} \eta_w}{\lambda_w}$

式(3.54)的使用条件为： $10^3 < R_e < 5 \times 10^6$ 。

将 N_u 、 R_e 和 P_r 的表达式代入到(3.55)中，得到：

$$\alpha = K \frac{\lambda}{D} (R_e)^M (P_r)^N \quad (3.56)$$

实验时，以某一流体作实验，先测定几组 R_e 和 N_u 的值，表示在双对数坐标系内，将成为一条直线，很容易测定 M 和 N 。大多对流换热系数的计算都以这种准

则方程式的形式进行,适用于实验所确认的相似现象和各变数的一定变化范围内。

本文实验条件所限,无法测出确定 R_e 和 N_u 值所需的数据,从而有难得到 α 的可靠值。

文献[43]中按照能量守恒原理给出下列对流换热系数模型。

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F\tau\Delta T_{\text{平}}} \quad (3.57)$$

$$\text{式中, } \Delta T_{\text{平}} = \frac{\Delta T_{\text{始}} - \Delta T_{\text{终}}}{\frac{\ln \Delta T_{\text{始}}}{\ln \Delta T_{\text{终}}}}。$$

在该模型中,主要是利用换热过程能量守恒原理来计算对流换热系数,在理论上是可行的。但是由于线材在水冷器中水冷时,很难测定冷却开始和终了时刻的冷却水水温,交换的热量 ΔQ 也是无法确定的。

第三种是温度场反算法。

温度场反算是相当于一般温度场计算的逆运算。一般计算温度场的方法是,给定初始温度分布、相应的边界条件后计算出钢材上各点任一时刻的温度。而温度场反算法,则是一般温度场计算过程的反运算,即在已知各时刻的温度分布和初始条件后,来反向计算相应的边界条件。在其他边界条件都已知的情况下,所需计算的边界条件就是对流换热系数。

温度场反算法的具体计算过程是:在已知条件下,给定一个对流换热系数 α_T ,计算出相应的温度变化曲线,与相应的实测温降曲线相对比,根据其差别,对 α_T 做相应的调整,再重新计算 α_T ,这样反复计算,直到计算出的冷却曲线与实测值在误差范围内吻合为止。

这时的 α_T 的值,就是根据实际连续冷却曲线得到的 α_T 值。

反算法相对于其他方法来说,计算比较准确,能够反映真实的换热情况,故本文在确定线材轧后水冷过程对流换热系数时,采用反算法。

反算法采用牛顿-拉斐森迭代公式,即

$$\alpha_3 = \alpha_2 + \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{T_{ff2} - T_{ff1}} \right) \cdot (T_{ff}^* - T_{ff2}) \quad (3.58)$$

式中, α_1 , α_2 为设定的对流换热系数;

T_{ff1} 、 T_{ff2} 为给定后 α_1 , α_2 计算的温度;

T_{ff}^* 为实测温度。

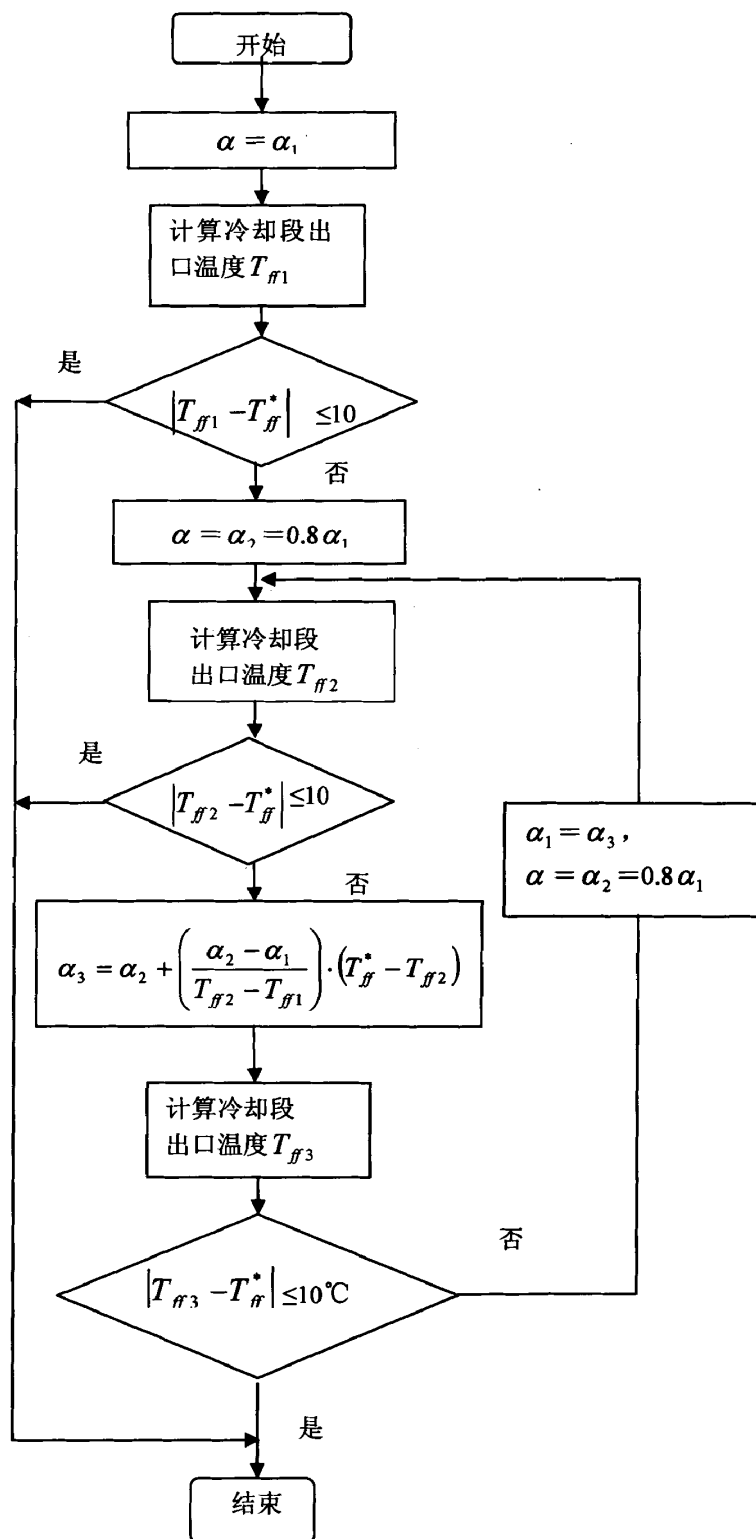


图 3.6 反算对流换热系数流程图

Fig. 3.6 Flowchart of convective heat transfer coefficient calculated by test-error method

具体算法流程如图 3.6 所示, 先给定 $\alpha = \alpha_1$, 计算冷却段出口温度 T_{ff1} ; 如果计算结果与实测温度相比, 在误差范围内, 即 $|T_{ff1} - T_{ff}^*| \leq 10^\circ\text{C}$ 则结束计算, 反之则进入下一步; 设定 $\alpha = \alpha_2 = 0.8\alpha_1$, 计算 T_{ff2} ; 如果 $|T_{ff2} - T_{ff}^*| \leq 10^\circ\text{C}$ 则结束计算, 反之则进入下一步; 用 (3.58) 式计算出 α_3 , 设定 $\alpha = \alpha_3$, 计算出 T_{ff3} ; 如果 $|T_{ff3} - T_{ff}^*| \leq 10^\circ\text{C}$ 则结束计算, 反之则令 $\alpha_1 = \alpha_3$, $\alpha = \alpha_2 = 0.8\alpha_1$, 进入下一轮计算, 直至计算出的冷却段出口温度与实测温度之差的绝对值不大于 10°C , 则此时的 α 就是反算出的对流换热系数。

采用反算法, 对现场共 12 个钢种, 10 个规格的线材水冷换热系数进行了计算, 表 3.1 为部分钢种与规格的对流换热系数。

表 3.1 水冷段对流换热系数

Table 3.1 convective heat transfer coefficient of water cooling segment

编号	钢种	规格 (mm)	对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
1	SWRH82B	$\Phi 12.5$	36700
2	Q345	$\Phi 12.5$	35460
3	Q345	$\Phi 8.5$	39650
4	40Mn	$\Phi 10.5$	37210
5	70	$\Phi 6.5$	42780
6	70	$\Phi 8.5$	38730

3.4.3 水箱间的换热系数

当线材在两个水箱之间运行时, 由于表面会有部分附着的冷却水, 其边界条件应该是以钢材与冷却水的对流换热和钢材表面的辐射换热为主。

对流换热系数为:

$$h_c = 0.62 \left| \frac{H_v \rho_v g (\rho_1 - \rho_v) k^3}{(T_s - T_{sat}) \mu D} \right|^{1/4} \quad (3.58)$$

式中, g —重力加速度;

ρ_1 —冷却水的密度;

ρ_v —蒸汽密度;

μ —粘度系数;

k —线材的导热系数;

D—线材直径；

H'_v —与水蒸汽的热量 H_v 有关，其表达式为：

$$H'_v = H_v \left\{ 1 + \left[0.84 C_p (T_s - T_{sat}) \right] / H_v \right\} \quad (3.59)$$

$$H_v = -2576.57T + 32.11 \times 10^5 \quad (3.60)$$

式中， C_p —材料定压比热容；

T_{sat} —水蒸汽饱和温度。

辐射换热系数为：

$$h_r = 4.536 \left\| \left| \frac{T_v + 273}{100} \right|^4 - \left| \frac{T_a + 273}{100} \right|^4 \right\| / (T_v - T_a) \quad (3.61)$$

3.4.4 喷水结束后空冷换热系数

线材在进行喷水结束后，要在空气中静置一段时间，以使坯料径向温度均匀化。在此过程中坯料的冷却方式主要还是辐射换热和空气自然对流换热。因此这个阶段的换热系数同样可以按照上文所述的式（3.47）进行计算。

3.5 本章小结

本章根据传热学基本原理与傅里叶定律推导了导热微分方程，给出了定解条件，并根据线材几何特征与边界条件特点，将线材水冷过程中的传热问题简化为温度仅沿径向变化的一维瞬态问题，建立了圆柱坐标系下内部单元导热微分方程。采用有限差分方法对其进行数值求解，推导出中心节点与边界节点的差分方程，根据有限差分温度场计算流程图编制的计算模块，可以进行线材冷却过程温度场计算。为了获得更准确的边界条件，采用反算法获得了不同钢种水冷段的对流换热系数，提高了模型计算精度。

第 4 章 高线轧后水冷自动控制系统

4.1 水冷段自动控制系统设计

首钢高线厂原来的精轧机组后的水冷系统，阀门开闭由 PLC 根据热检信号控制，水量设定采用查表方式，由人工手动设定，没有动态调整功能，吐丝温度控制精度差，难以满足用户需要。经过“轧后水冷系统改造”项目，对整个水冷自动控制系统进行了升级改造，改造后的自动控制系统由检测仪表与电动阀门、基础自动化和冷却过程控制计算机构成，如图 4.1 所示。

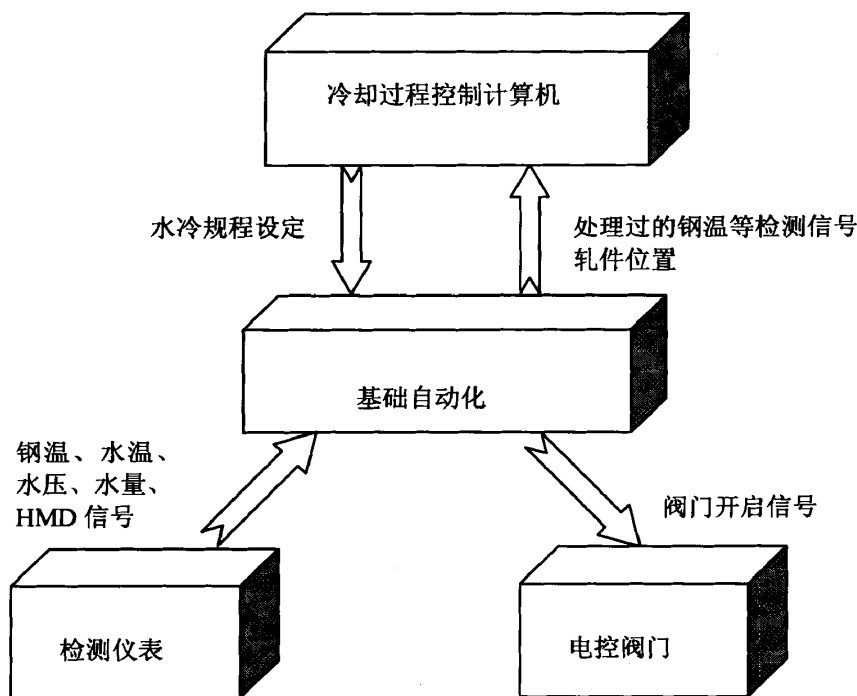


图 4.1 水冷自动控制系统组成

Fig. 4.1 Structure of water cooling control system

检测仪表负责对水冷过程的冷却水和轧件的温度等进行检测、并完成轧件的过程跟踪信号的检测。本系统需要检测的项目为：钢温、钢的位置、轧件速度的检测，控制冷却水的水量、水压、水温的检测等。轧线的检测仪表主要为测温仪和 HMD。

其中钢的温度检测采用红外辐射温度检测仪，共 2 台。放置的位置及数量分别为：

- 精轧机组的出口处，检测钢的终轧温度，数量 1 套；
- 吐丝机的入口处，用于对水冷后轧件温度的检测，数量 1 套；

冷却水流量检测采用电磁流量计，分别安装在支水管上，数量为 3 套。

冷却水压力采用压力传感器检测，安装在总进水管上，数量为 1 套。

水温的检测采用电阻式测温计，安装在总进水管上，共 1 套。

为了实现轧件的位置跟踪，还需安装 3 套热金属检测器，其安装位置分别为：

- 精轧机组的出口处，1 套
- 水冷器的入口处，1 套
- 吐丝机的入口处，1 套

电动阀门分为电动调节法和气动截止阀，其中电动调节阀安装在支水管上，数量为 3 套，可以调节水量大小；气动截止阀安装在冷却器供水管上，数量为 9 套，可以实现阀门的快速开关。

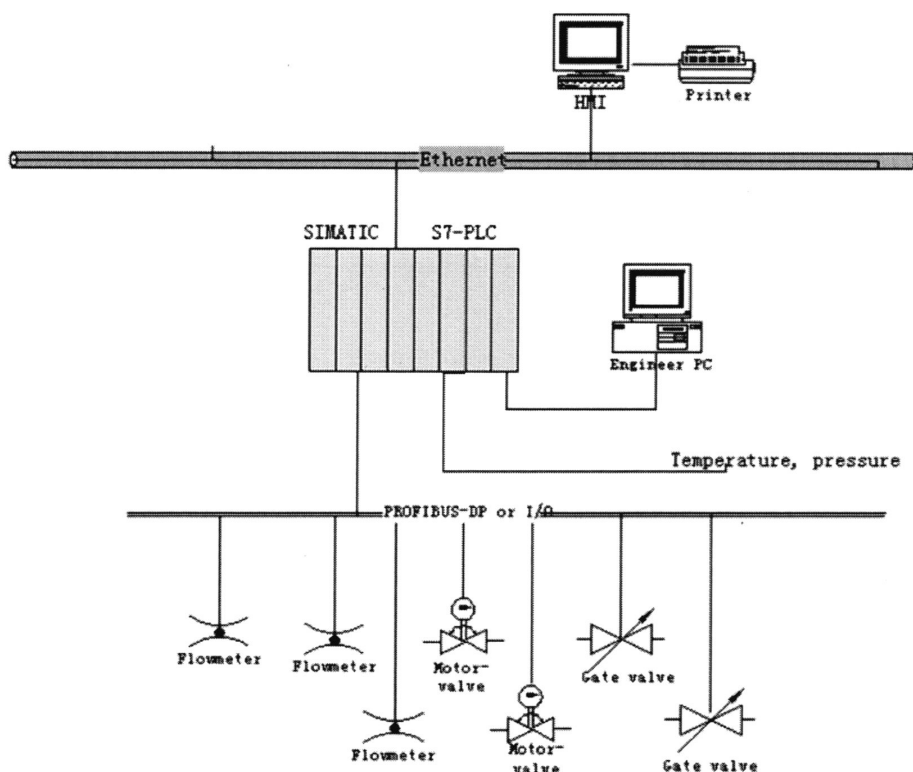


图 4.2 基础自动化组成示意图

Fig. 4.2 Schematic diagram of basic automation structure

基础自动化(PLC)主要任务是接收和执行工艺过程计算机的设定冷却规程(包括冷却水量、冷却组数)，采集检测仪表的信号并进行处理，上传检测仪表的输出

信号，进行水冷过程跟踪。

基础自动化采用 SIEMENS SIMATIC S7-400 PLC 和用于冷却过程流程显示与人工干预的 HMI 构成。PLC 编程使用的工程师计算机（Engineer PC）为便携式笔记本微机。系统的构成图如图 4.2 所示。

S7-400 PLC 的 CPU 选用 416-2DP/315-2DP，每条二进制指令的执行时间为 0.08 μ s/0.3 μ s，并内置 PROFIBUS-DP 接口可与 HMI 方便连接，速率最快达 12Mb/s。PLC 系统可通过 I/O 口与人机接口画面（HMI）相连接，以获取有关的生产数据、轧件数据、模型数据和控制命令，并对阀门进行相应控制，如阀门的开闭、对水冷器的流量进行 PID 调节等，并将实时检测轧件的温度及水路上的各个工艺参数传送给监控级。

系统的工作信号及输入、输出量控制模块组成如下：

（1） 开关量输入信号（DI）：系统开关量输入信号与模块如表 4.1 所示。

表 4.1 开关量输入信号与模块

Table 4.1 Input switch signal and modules

开关量输入信号名称	数量
钢的位置检测信号	3
32 点 24VDC 数字量输入模块	1 块

（2） 开关量输出信号（DO）：系统开关量输出信号与模块如表 4.2 所示。

表 4.2 开关量输出信号与模块

Table 4.2 Output switch signal and modules

开关量输出信号名称	数量
水路截止阀	23
气封的控制	5
32 点 24VDC 数字量输出模块	1 块

（3） 模拟量输出信号（AO）：系统模拟量输出信号与模块如表 4.3 所示。

表 4.3 模拟量输出信号与模块

Table 4.3 Output analog signal and modules

模拟量输出信号名称	数量
水量控制阀	3
4 通道模拟量输出模块	1 块

（4） 模拟量输入信号（AI）：系统模拟量输入信号与模块如表 4.4 所示。

表 4.4 模拟量输入信号与模块

Table 4.4 Input analog signal and modules

模拟量输入信号名称	数量
水量检测	3
水压检测	1
水温检测	1
钢温检测	2
4 通道模拟量输入模块	3 块

冷却过程控制计算机是整个水冷自动控制系统的核心，其主要功能是根据线材规格和钢种的需要，进行水冷过程的模型计算，给基础自动化下达水冷规程，以达到控制吐丝温度的目的。冷却过程控制计算机具体的功能、控制流程、模块设计等内容将在下一节中具体介绍。

HMI 工作站均选用 Intel (R) Core™ Duo CPU 的标准配置，主要完成流程显示、报警、过程数据记录等工作，并与 S7-400PLC 通讯。采用人机对话的界面，以方便人工干预及修改。

因为高线水冷自动控制系统的数据量和数据通讯量不大，冷却过程控制计算机和 HMI 工作站合并为一台计算机。

控制操作室设置控冷操作台，用于监控精轧后水冷系统工作状况，操作台的设施主要有：流量控制的手动操作钮，气动截止阀的手动按钮，急停按钮，手动与自动切换开关等。

4.2 冷却过程控制方案设计

冷却过程控制的主要任务是根据水冷过程的数学模型对冷却过程进行计算分析后，给出控制的优化设定值，其主要功能为：

- 依据钢种、规格，通过数学模型完成水冷规程的设定计算；
- 根据实测吐丝温度，对水冷数学模型进行修正（自学习）；
- 在半自动状态工作时，可由表格参数进行设定。

冷却过程控制计算机有三种工作模式：自动、半自动、手动，下面将分别加以介绍。

(1) 自动模式：检测仪表、PLC、HMI 与冷却过程控制计算机模型工作正常，

通讯正常情况下使用的模式。冷却规程的设定由计算机自动根据轧材钢种、规格、水温以及目标控制温度来确定，并能根据实测吐丝温度，在冷却结束后进行模型自学习，主程序将调用水冷规程预设设定模块和自学习模块。

(2) 半自动模式：检测仪表工作不正常，如测温仪或水温计工作不正常，测量数据不准确，或调试时使用的模式。冷却规程的设定由计算机根据轧材钢种、规格查表来确定，不进行自学习，主程序将调用水冷规程预设设定模块，但只查表，不进行规程计算，不调用自学习模块。

(3) 手动模式：一般在设备检修时使用的模式。冷却水量和冷却器开启组数都在操作台上通过 HMI 或手动按钮来实现，主程序不调用水冷规程预设设定模块和自学习模块。

冷却过程控制内部程序采用模块化设计，主要由主程序、数据输入输出模块、水冷规程预设设定模块和自学习模块组成，编程语言为 C 语言。

冷却过程的预设设定计算流程如图 4.3 所示，操作工通过 HMI 输入本班次即将生产的轧材信息，包括生产编号、钢种和规格等，冷却过程控制计算机的数据输入输出模块将此信息存入数据库，当 PLC 检测到线材头部进入精轧机时，传送水温、钢温与轧材位置信号至数据输入输出模块，此时主程序调用水冷规程预计算模块进行规程计算，根据数据库中该轧材的钢种、规格，查找到相应的目标温度、基本水量、对流换热系数、自适应系数等数据，应用到水冷过程温度场计算中去，经过几次迭代计算，给出能达到目标温度的水冷规程，并通过数据输入输出模块传送到 PLC，完成规程预设设定。

当 PLC 检测到吐丝温度后，需要调用自学习模块，对吐丝温度预报模型进行自学习。模型自学习采用的基本公式是指数平滑法，其形式为：

$$\beta_{new} = \beta_{old} + \alpha(\beta' - \beta_{old}) \quad (4.1)$$

式中： β_{new} ——自学习系数的新数值；

β_{old} ——自学习系数的老数值；

β' ——利用实测数据计算出来的自学习系数；

α ——自学习速度。

在应用指数平滑式时有两个问题需要考虑：

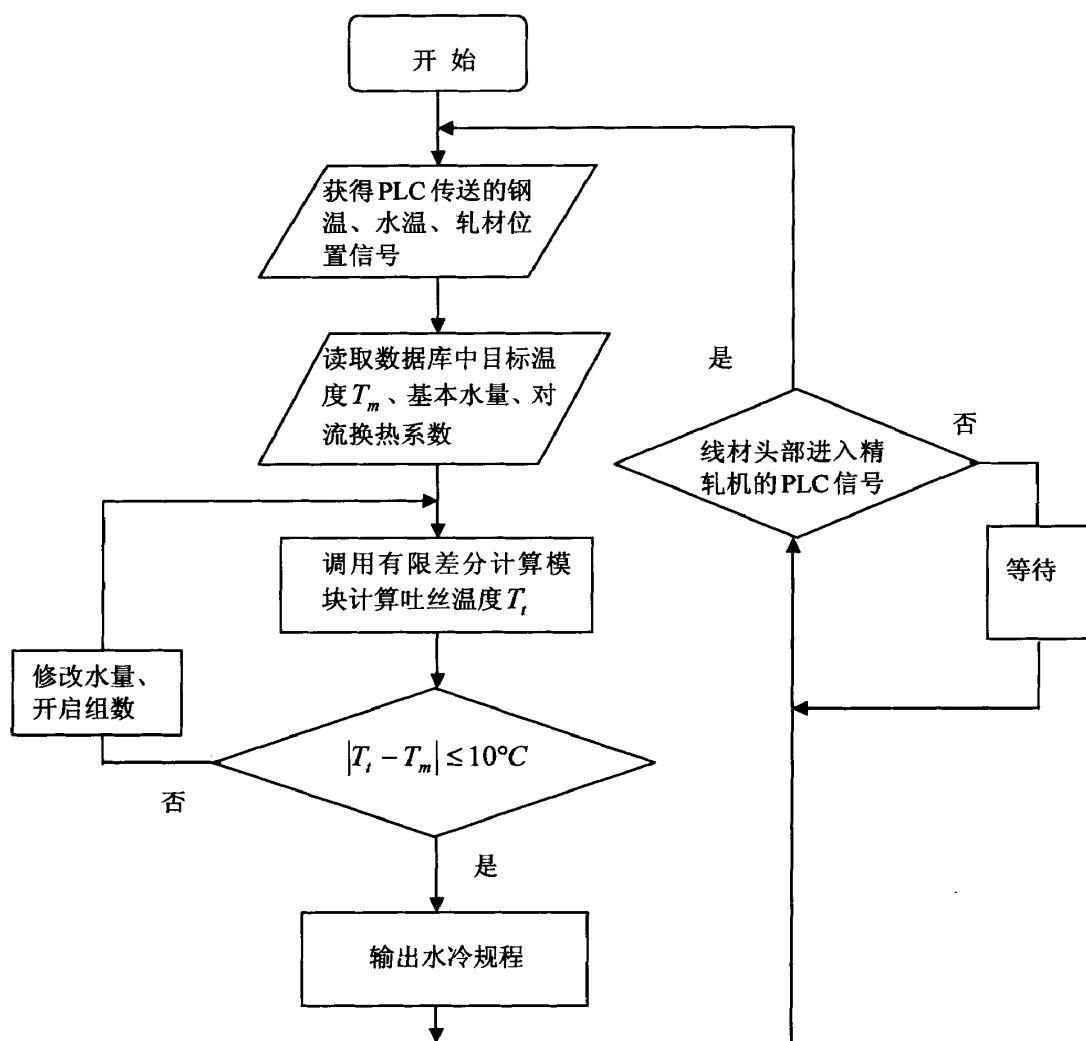


图 4.3 预设定计算流程

Fig. 4.3 Flowchart of presetting calculation

(1) 当下一根钢与本根钢属于同一钢种规格时，模型系数自学习主要目的是为了具有“平均性质”的模型能适应“环境”，提高精度，此时 β 将采用上一根钢的学习结果。

(2) 当下一根钢与本根钢不属于同一钢种规格时，为了纠正模型在这种钢种规格下的误差，对 β 往往采用上一次轧制此钢种规格所学习后的结果。

冷却过程的自学习模块计算流程如图 4.4 所示：

对 α 的取值需考虑两种情况：

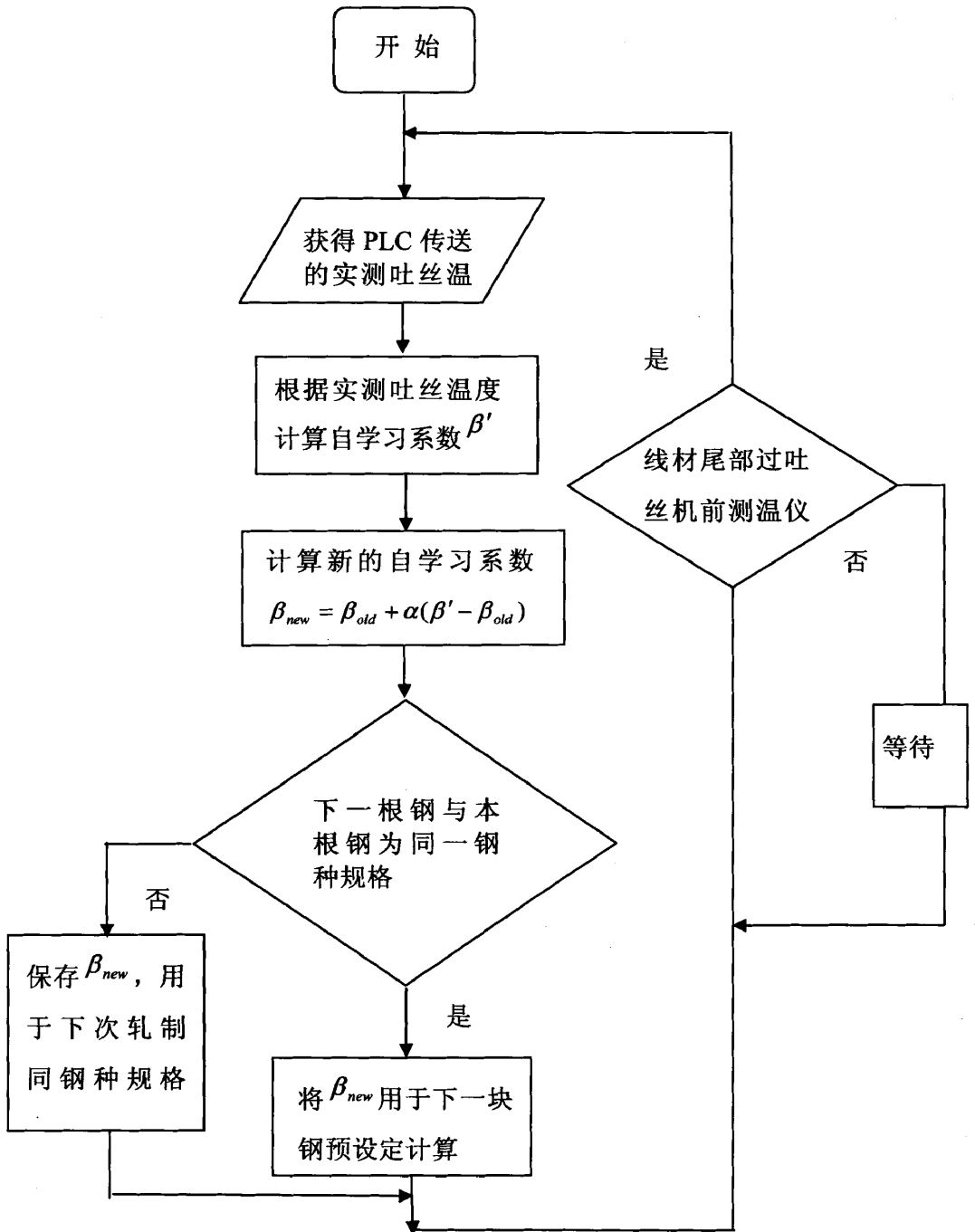


图 4.4 自学习模块计算流程图

Fig. 4.4 Flowchart of self-studying module

(一)、是测量数据的可信度，当实测数据精度不高时， α 应取小值甚至取零（这一根钢不学习），为此应对实测数据进行处理，引入可信度，由可信度来决定

α 的大小。

(二)、是当换钢种规格后希望快速学习,为此 α 要取大值,而当学习两三次后当模型误差已不大时 α 应取小值以求稳定,为此对 α 的计算可用下式。

根据可信度决定 α 。

$$\alpha = \alpha_0(1 - \alpha G) \quad (4.2)$$

其中 α_0 ——权重系数

G ——可信度的平方。

$$G = \frac{t^2}{n-1} \left[n \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} - 1 \right] \quad (4.3)$$

式中 t —— t 分布的双侧分位数;

n ——测量数据的自由度。

根据换规格后的学习次数决定 α 。

$$\alpha = \alpha_{\min} + \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{K_z Z + 1} \quad (4.4)$$

$$\alpha_{\max} = a + b\Delta \quad (4.5)$$

$$\alpha_{\min} = c + d\Delta \quad (4.6)$$

式中 K_z ——调整 α 趋向 $\alpha_{\min}$ 所需的学习次数;

Z ——学习次数;

Δ ——设定误差;

a, b, c, d ——系数。

4.3 系统调试与控制精度

首钢高线厂“轧后水冷系统改造”项目设计完成后,于2008年1月22日利

用年初检修，开始进行设备安装，2 月 7 日检测仪表与 PLC、HMI 与冷却过程计算机安装完毕，2 月 15 日至 5 月 17 日进行数据收集，并根据收集的数据，完成了不同钢种、规格的对流换热系数反算计算，并建立了冷却规程数据库，6 月 1 日至 7 月 30 日进行了水冷控制系统的全自动模式调试，主要调试钢种为 Q345、40Mn、70 和 SWRH82B，规格从 $\Phi 6.5$ 至 $\Phi 12.5\text{mm}$ 。经过两个月的调试，达到了调试钢种的全长平均温度与目标温度偏差 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ (2σ) 的水平，系统运行平稳。

2008 年 8 月至 9 月的统计数据如表 4.5 所示：

表 4.5 首钢高线材厂统计数据

Table 4.5 Statistical data of Shougang high speed wire plant

钢种	Q235	45	70	SWRH82B
N (统计数量)	1572	3628	2941	21536
Mean (平均数)	11.9	9.7	10.8	12.6
Median (中位数)	11.4	9.2	10.4	12.7
Mode (众数)	11.3	9.5	10.5	12.4
Std. Deviation (标准差)	7.8	2.5	9.4	2.3
Variance (方差)	0.71	0.66	1.83	0.54
Skewness (偏斜系数)	-0.342	-0.340	-1.197	-1.756
Std. Error of Skewness (偏斜系数的标准差)	0.086	0.087	0.086	0.125
Kurtosis (峰度系数)	1.736	1.673	2.679	7.740
Std. Error of Kurtosis (峰度系数的标准差)	0.172	0.173	0.171	0.250
Range (极差)	27.8	23.3	21.6	25.4
Minimum (最小值)	0.1	0.2	1.1	0.7
Maximum (最大值)	41.1	30.6	32.8	45.9

在其它冷却工艺不变的情况下，生产并统计了 2008 年 12 月生产的 ML15Al， $\Phi 6.5$ 、 $\Phi 8$ 、 $\Phi 10$ 的力学性能，线材的性能统计结果显示，线材的抗拉强度 σ_b 平均值为 428.2Mpa，面缩率 ψ 平均为 63.5%，线材组织为均匀粒状铁素体+少量珠光体，晶粒度 8.5~10 级。同改造前的同钢种、同规格线材比较，抗拉强度有一定的降低（约 5Mpa），塑性相应有所改善（面缩率提高 3~5%）。

轧后冷却控制系统的应用，提高了吐丝温度的准确性和稳定性，使产品性能指标也得到了一定的改善。

4.4 本章小结

本章根据首钢高线实际情况，设计了线材轧后水冷自动化控制系统，配置了

检测仪表与电动阀门，确定了开关量与模拟量输入输出信号与模块，冷却过程控制计算机是本系统的重点，有自动、半自动和手动三种工作模式，其中的预设计算模块可以根据输入的轧材的钢种、规格，查找到相应的目标温度、基本水量、对流换热系数、自适应系数等数据，并经过迭代计算，给出能达到目标温度的水冷规程，完成规程预设。在 PLC 检测到吐丝温度后，需要调用自学习模块，对吐丝温度预报模型进行自学习，提高模型预报精度。模型自学习采用的是指数平滑法。经过现场调试，生产统计数据表明该系统控制精度已达到设计目标。

第5章 结论与展望

本文主要对首钢高线厂精轧后水冷段的自动控制系统进行了设计，对水冷控制模型进行了改进，得到如下结论。

(1) 采用有线差分法建立了高速线材精轧后水冷段传热数学模型，使用反算法确定了不同钢种和规格的对流换热系数，节省了计算时间，提高了计算精度。

(2) 设计了包括检测仪表和阀门(0级)、基础自动化(1级)、过程控制(二级)在内的精轧后水冷自动控制系统，开发了二级控制系统的预设定模块、自学习模块，具备了根据钢种、规格、水温等工艺条件动态调整水量和阀门开启模式的功能。

(3) 对开发的精轧后水冷自动控制系统进行现场调试，提高了首钢高线吐丝温度控制精度，达到了全长平均温度与目标温度偏差 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 达到 2σ 水平的目标。

首钢高线轧后水冷段自动控制系统经过一年多的运行，基本情况良好，但也存在如下的一些问题：

(1) 精轧后水冷自动控制系统中的自学习模块经过在生产中的不断应用，存在精准性和及时性的问题，需要对此模块中的计算方式进行优化。

(2) 水冷自动控制系统中设计中没考虑水流压力调整对工艺生产造成的影响。

(3) 控制系统中对流换热系数计算过程中只考虑了钢种的影响，但通过实际使用，规格对换热系数也是有一定的影响。

对今后工作的展望：

针对首钢高线轧后水冷自动控制系统的研究与分析，计划下一步开展优化自学习模块以及轧后水冷与风冷控制系统的综合开发与研究，提高产品最终性能控制精度。

参考文献

1. 戴宝昌. 世界线材生产现状与发展[J], 河南冶金, 2005, 13 (2): 3-6.
2. 张云鹏. 我国高速线材生产的现状及新技术的应用[J], 包钢科技, 2008, 34 (2): 4-6.
3. 乔万德. 高速线材轧制[M], 北京: 冶金工业出版社, 1989, 37-41.
4. 孙决定. 我国高速线材生产、装备、技术述评[J], 冶金信息导刊, 2005, 23 (2): 5-13.
5. 安顺达. 棒、线材生产新工艺、新技术与产品质量控制实用手册[M], 北京: 冶金工业出版社, 2006, 810-813.
6. 陈瑞飞. 线材生产中的控制轧制和控制冷却技术[J], 现代机械, 2011, 21 (2): 87-90.
7. 《高速轧机线材生产》编写组. 高速轧机线材生产[M], 北京: 冶金工业出版社, 1994, 326-348.
8. 张守龙. 浅谈高碳钢线材轧后冷却工艺的优化[J], 山东冶金, 2010, 32 (5): 25-26.
9. 蔡庆伍. 螺纹钢钢筋轧后控冷过程中的数学模型[J], 钢铁, 1996 年, 31 (1): 44-48.
10. 杨文娟. 钢筋自动控制冷却系统和工艺效果[J], 钢铁, 1996 年, 31 (5): 25-29.
11. 王海儒. 高线穿水冷却过程温度场的数值模拟[J], 燕山大学学报, 2005 年, 29 (6): 476-479.
12. 徐进桥. 高速线材 82B 控制冷却线的数学模型和应用[J], 特殊钢, 2006 年, 27 (5): 12-14.
13. 曾庆波. 高速线材轧后水冷过程中温度模拟的研究[J], 武汉科技大学学报, 2008 年, 31 (4): 349-352.
14. 朱宏祥. 前馈和反馈相结合的控制策略在宝钢线材控冷轧线上的应用实践[J], 冶金自动化, 2003 年, 12 (2): 14-17.
15. 陈虎秋. 前馈与反馈相结合的控制策略在宝钢线材厂的应用[J], 冶金能源, 2010 年, 29 (4): 57-60.
16. 于政军. 线材轧制冷却过程智能混合控制[J], 系统仿真学报, 2006 年, 18 (6): 1626-1629.
17. 余万华. 高速线材控冷段温度及性能预报系统[J], 轧钢, 2006 年, 23 (5): 51-54.
18. 余万华. 高线控冷段在线性能预报系统控制方法[J], 中国冶金, 2008 年, 18 (1): 43-46.
19. 姚俊. 棒线材热连轧过程综合数值模拟系统的开发及应用[J], 冶金自动化, 2010 年, 34 (5): 24-29.

20. 张云祥. 高强度线材热加工的组织演变和性能预报系统研究[D], 华中科技大学, 2010.
21. 杨世铭. 传热学[M], 北京: 高等教育出版社, 1987: 3-8.
22. Cai Z, Wang Y. A multi-objective optimization based evolutionary algorithm for constrained optimization [J], IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(6): 658-675.
23. 陈维汉. 传热学[M], 武汉: 武汉理工大学出版社, 2004: 7-9.
24. 卓宁. 工程对流换热[M], 北京: 机械工业出版社, 1982: 184-185.
25. Jaskiewicz A. Genetic Local Search for Multiple Objective Combinatorial Optimization[J], European Journal of Operational Research, 2002, 137(8): 50~71.
26. Coello C.AC. Twenty Years of Evolutionary Multi-objective Optimization: A Historical View of the Field [J], IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(1): 28~36.
27. 郭宽良. 计算传热学[M], 合肥: 中国科学技术出版社, 1988: 9-10.
28. 刘高瑛. 温度场的数值模拟[M], 重庆: 重庆大学出版社, 1990: 4-12.
29. D.R.克罗夫特. 传热的有限差分方程计算[M], 北京: 冶金工业出版社, 1982: 9-10.
30. 俞昌铭. 热传导及其数值分析[M], 北京: 清华大学出版社, 1982: 5-44.
31. 刘钦圣. 数值计算方法教程[M], 北京: 冶金工业出版社, 1998: 21-53.
32. 胡健伟. 微分方程数值方法[M], 北京: 科学出版社, 2000: 77-126.
33. 王补宣. 工程传热传质学[M], 北京: 科学出版社, 1998: 244.
34. John Platt. A resource allocation network for function interpolation[J]. Neural Computation, 1991, 3 (2) :213-225.
35. 杨世铭. 传热学基础[M], 北京: 高等教育出版社, 2003: 25
36. 戴锅生. 传热学[M], 北京: 高等教育出版社, 1999: 5-23
37. 王有铭. 钢材的控制轧制与控制冷却[M], 北京: 冶金工业出版社, 1995: 83-86.
38. 张国滨. 螺纹钢穿水冷却时的对流换热系数模型[J], 河北理工学院学报, 2002 年, 24 (4): 32-37.
39. Morales R D, Lopez A G, Olivares I M. Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods[J], ISIJ Int., 1990,30 (1) :49-57.
40. Tanigawa Y, Akai T, Kamamura R. Transient heat conduction and Thermal stress problems of a non-homogeneous plate with temperature-dependent material properties[J], J Thermal stress, 1996, 34 (19) :77-102.
41. 刘庄. 热处理过程的数值模拟[J], 北京: 科学出版社, 1995: 36-39.

致 谢

本文的研究工作是在导师余强副教授的悉心指导和关怀下完成的。在此，对导师表示衷心的感谢。余强老师的严谨的治学态度、深厚宽广的专业理论和理论联系实际的学术风范，给我树立了学习的榜样，使我受益匪浅。

在研究过程中，首钢自动化信息技术有限公司郭立伟高工、首钢技术研究院性能控制项目组的苏岚老师、首钢高线厂刘秀丽工程师给予了很大的帮助，在此，表示衷心的感谢。

在这里，向所有给予关心、帮助和支持的同学、朋友和家人表示感谢。