

分类号_____ 密级_____

UDC _____

学 位 论 文

中厚板控制冷却数学模型的研究与应用

作 者 姓 名 蔡晓辉

指导导师姓名 王国栋 教授

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（东北大学）

刘相华 教授

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（东北大学）

申请学位级别 博 士 学 科 类 别 工 学

学科专业名称 材料加工工程

论文提交日期 2004 年 5 月 论文答辩时间

学位授予日期 _____ 答辩委员会主席 _____

评阅人

东北大学
2004 年 5 月

中厚板控制冷却数学模型的研究及应用

摘 要

本文依托于国家经贸委“十五”国家重大技术装备研制项目“首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”，以首钢 3500mm 中厚板轧机的建设为背景，以中厚板厂的控制冷却过程系统为研究对象，在比较和分析国内外控制冷却模型的基础上，建立了以有限差分法为基础的控制冷却数学模型，分析了热物性系数的变化规律，提出钢板温度的均匀控制策略，并结合首钢中厚板厂控制冷却系统的现场实际情况，开发了控制冷却系统过程机程序。上述控制冷却理论、策略和控制系统已经成功应用于首钢 3500mm 中厚板轧机和南钢 2500 中板轧机上，投入运行后，产品质量明显提高。本文的主要研究内容和取得的主要成果如下：

(1) 以隐式有限差分法为基础构建了中厚板控制冷却过程的数学模型框架。该系统是国内中厚板控制冷却领域完全依靠自己力量建立的比较完整的控冷过程模型设定系统，可以在实时状态下完成模型设定计算、修正计算、自学习计算、过程跟踪等重要功能，为我国中厚板厂控制冷却系统的模型设计奠定了基础。

(2) 建立空冷和水冷换热系数模型。通过实测空冷温降数据反推出黑度系数在 0.7~0.85 之间，由差分方法和 Stefan-boltzman 定律计算得到的钢板平均空冷温降偏差小于 5℃，说明空冷换热系数模型的选取具有较高的精度。差分模拟结果表明空冷时钢板厚度方向上的温度梯度随厚度的增加而变大；返红时，钢板越薄，返红时间越短，表面温度上升的速率越大，中心和厚度上平均冷却速率越大。水冷换热系数对换热过程有重要的影响。水流量增加，水冷换热系数增大，但不成线形关系，而是有一极限值；钢板温度增加，水冷换热系数减小，但在不同的温度区间其值大小相差甚远；换热系数随水温升高而变小，但水温的变化对换热系数的影响很小。

(3) 针对模型中重要的热物性参数比热和热传导率随温度和含碳量变化而变化的规律和不同厚度规格钢板的热传导规律，以插值法建立了以温度和含碳量为自变量的权重系数模型，在此基础上分析了比热、热传导系数、换热系数、水量、轧件温度对厚度上温度分布的影响。有限差分法模拟结果显示，含碳量越高，热量越易于传递，厚度上温度梯度越大；导热系数越大，热量越容易传导，轧件内部的温度差别较小；比热系数越小，轧件内部热量传递得越容易；水量越大，厚度上温度梯度越大；换热系数越大，轧件表面和内部的温差越大。该分析结果为不同钢种轧件厚度上的温度均匀控制提供理论依据。

(4) 轧件温度的均匀性控制是保证产品质量的关键所在, 本文提出了针对中厚板冷却过程中宽度上温度分布不均, 建立边部遮蔽模型, 并于国内首次实现了边部凸度遮蔽的在线应用; 针对中厚板冷却过程中厚度上的温度分布特点, 于国内首次提出并实现了大集管—小集管—大集管的排列方式, 以此实现冷却过程对冷却速度的要求, 并降低厚度上的温度梯度; 针对中厚板冷却过程中长度方向上存在局部温度波动和头尾低温段, 在控制上实施分段微跟踪方法; 针对钢板纵向上的温度梯度, 建立加速度模型。

(5) 结合首钢中厚板厂的实际工况, 开发出完整的中厚板控制冷却过程程序, 实现了冷却过程的在线全自动控制。上述工作成功地完成了国家经贸委“十五”国家重大技术装备研制项目“首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”之“中厚板轧机过程控制模型与人工智能研究控制”课题规定的任务, 建立了具有我国自主知识产权的成套中厚板轧机控制冷却系统的模型和软件, 首次实现了中厚板控制冷却过程的全自动控制。所开发的中厚板控制冷却过程模型和软件已成功应用于首钢中厚板厂和南钢中厚板厂, 对我国中厚板控制冷却水平的提高和钢材质量的改善具有积极的促进作用。

关键词: 中厚板, 控制冷却, 数学模型, 控制策略, 温度场分布, 热物性系数, 冷却设备

Studying and Application of the Mathematical Models for the Plate Products During Cooling

ABSTRACT

Based on the studying of the project “process control model and artificial intelligence control” of the national important technology equipment development “the core technology and the key equipment development of Capital Steel Co. 3500mm plate roller”, on the ground of the building of Capital Steel Co. 3500mm plate roller, aiming at the control cooling process system of plate works, after analysis and comparison the cooling model at home and abroad, this paper builds the control cooling mathematical model with finite difference method under the heat transfer theory of cooling process, analyzes the variation rule of the thermal parameters, gives the corresponding control strategies to keep uniform temperature distribution for the plate, and based on the practical situation of the plate works of Capital Steel Co., composed the control cooling process model program. After the application of the program and control strategies in the works, the products quality is proved obviously. The main studied content and the conclusions are showed as the following:

(1) The control cooling process model was built after the cooling process studying with finite difference method. This system is integrated control cooling model setting system, which was at the first time built by ourselves at home in the field of the plate cooling. It concludes the function of preset calculation, correcting calculation, and on-line self-learning calculation, which establishes the model setting basis for the plate control cooling in the future.

(2) Heat transfer coefficient model of air cooling and water cooling are built. The radiation factor, which is about 0.7~0.85, was deduced with the measured data. The air cooling heat transfer model is precise for the deviation between the difference algorithm and the Stefan-boltzman law is less than 5°C, which proved the model is precise. The water cooling heat transfer coefficient effects the cooling process seriously. The temperature grads along the thickness is increased with the thickness when air cooling; the thinner the plate, the short the back-redding time, the more the surface temperature adding rate, the more the cooling rate at center and average thickness. The effect factors of the water cooling heat transfer coefficient are: the more water flow, the bigger the heat transfer coefficient, but it is not line relation, it

has a limit value; the higher the plate temperature, the smaller the heat transfer coefficient, but in different areas, the values are different; the smaller the water temperature, the bigger the heat transfer coefficient, but its effect is small.

(3) Aiming at the heat conduction rule and the variation rule of the specific heat and the thermal-conductivity with the temperature and carbon content, the weight model with the temperature and carbon content as the independent variable based on the interpolation method was built. The effect of the specific heat, thermal-conductivity, heat transfer coefficient, water temperature, plate temperature on the temperature distribution along the thickness was analyzed. The simulation results showed that ① if the carbon content is high, the temperature is easy to transfer, so the temperature falls rapid; ② if the thermal-conductivity is high, the heat quantity is easy to transfer, so the inner temperature difference is small; ③ if the specific heat is small, the inner temperature is easy to transfer; ④ if the water flow is big, the temperature grads along the thickness is big; ⑤ if the heat transfer coefficient big, the temperature difference between the inner and surface is big. The analysis result gave the theory guide for the uniform temperature control.

(4) The uniform temperature control of the plate is the key to guarantee the product quality. ① aiming at the temperature variation trend along the width when the plate is cooled, the strategies of convexity mask was given, and on-line application was realized at first at home; ② aiming at the temperature trend along the thickness, the jet was arranged as big-small-big jet at first at home, which can meet the requirement of cooling rate and reduce the temperature grads along the thickness; ③ aiming at the temperature trend along the length when cooled, based on the temperature of the head and tail and the temperature grads of the body of the plate, the subsection treatment of the plate, fine tracking and the acceleration control were brought out.

(5) Based on the actual working conditions of Capital Steel Co., the rounded control cooling mathematical models for the plate products process control system are developed und the on-line automatic control of the cooling process is realized. This working completed the studying “process control model and artificial intelligence control” of the national important technology equipment development project “the core technology and the key equipment development of Capital Steel Co. 3500mm plate roller”, the rounded plate control cooling model and the software are built, which has the autonomic knowledge property right, the full automatic control of the plate cooling process is first realized. This set of control models and software are now

applied on the plate works of Capital Steel Co. and Nangjing Steel Co., which owes the positive promoter action to improve the plate control cooling level and to improve the quality of the plate.

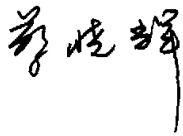
Key words: medium plate, control cooling, mathematical model, temperature field, thermal parameter, cooling equipment

主要符号表

符号	名称
a	导温系数 (热扩散率), $\alpha = \lambda / (\rho \cdot c)$, m^2/s
c_p	比热, $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
h	钢板厚度, mm
K	绝对温度
q	热流密度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Q	热量, J
T	热力学温度, K
T_a	空气温度, K
T_m	介质温度, K
w	钢板宽度, mm
α	换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ρ	密度, kg/m
ε	黑度系数
σ	Stefen-Boltzman 常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
τ	时间, sec
v	钢板通过速度, m/s

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，不包含其它人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其它学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所作的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本人签名: 

日 期: 2004 年 5 月 20 日

第1章 绪论

1.1 控制冷却的发展史

控制轧制和控制冷却工艺是现代钢铁工业取得的最重要技术成就之一, ASTM 和 JIS 已经把这一工艺列入标准中, 命名为形变热处理工艺 (TMCP, 即 Thermo-Mechanical Control Process) [1]。TMCP 从应用多年的控制轧制工艺演变而来, 是新一代控轧控冷工艺。TMCP 通过在钢中复合添加微合金元素以及从板坯加热至轧后冷却进行综合控制, 生产出具有期望组织的产品。因而, 利用 TMCP 技术, 在不改变钢材成分的情况下, 可以利用轧制工艺条件的改变和冷却工艺的改变, 提高钢材的质量, 降低成本, 是一项具有极大经济效益的技术 [2-4]。

早期的高强度低合金钢的化学成分是按强度设计的, 而对焊接性能、成型性及抗脆性断裂性能没有给予重视。自从第二次世界大战中全焊接结构船发生脆断事故以来, 战后对造船用钢及其他结构钢, 通常采取提高 Mn/C 比, 用铝脱氧及进行常化处理等措施来获得较高的断口韧性。但一些国家, 如比利时、瑞典等的钢铁厂当时没有热处理设备, 故在工业生产上首次采用控制轧制来代替常化处理, 来解决钢的脆断问题, 这就确立了控轧控冷技术的原始基础。以后随着高强度低合金钢的发展, 于 1958 年确立了添加微量铌对提高热轧状态钢的强度是有效的。20 世纪 60 年代采用控制轧制解决了含 Nb 钢脆性转变温度偏高的问题。1969 年美国在热带轧机上采用控轧控冷技术生产出 X65 管线板。20 世纪 70 年代以来, 控轧控冷技术越来越受到重视, 并在生产中得到了广泛应用 [1,5-9]。例如法国生产的中厚钢板控轧板约占 60%。近年来国外新建的中厚板轧机和热带轧机都按控轧要求设计, 并设有控冷装置和配置有完善的测量仪表及控制系统, 能精确地控制各工艺参数, 满足各种控轧控冷工艺要求, 生产出性能优良的各种钢板。

国内控轧控冷技术的研究与应用始于 20 世纪 70 年代初, 先后列入国家“六五”、“七五”、“八五”科技攻关项目, 我国武钢、鞍钢、太钢、重钢、上钢三厂等钢铁企业和钢铁研究总院、东北大学、北京科技大学等相关科研院所合作, 进行了 16Mn 钢、含 Nb 钢的控轧控冷工艺的研究和工业性生产, 并且于“七五”期间在重钢 2450mm 中板轧机上建成了我国第一条控轧控冷生产线。大批科研人员对控制轧制、控制冷却工艺及有关理论方面进行了系统研究并取得了许多成果, 在控制冷却装置和控制系统的应用方面也投入了很大力量, 但控制冷却系统投入运行的并不多, 并且仍处于手动控制或经验模型控制状态下, 控冷技术并未取得成功。

1.2 冷却设备的发展

最初人们采用普通喷嘴对钢材进行喷水冷却,但冷却不均匀,冷却效果不理想。1957年第一套“层流”冷却系统首先被英国钢铁研究协会开发,并应用于英国布林斯奥思 432mm 窄带钢热轧机^[10]上,采用层流冷却系统进行轧后控制冷却。此后,几乎每套热带钢轧机输出辊道上都装有冷却系统,但直到 20 世纪 80 年代以前,其应用仅限于 16mm 以下的板带^[10-12]。对厚度达到 25.4mm 的中板实行控制冷却是在美国匹兹堡市一架 2286mm 带钢轧机上试验的。15 年后,中板控制冷却的概念才首先被日本钢管公司实现,即 1980 年在福山厚板厂建成第一套中厚板加速冷却装置(OLAC)并投入使用。1983 年新日铁、住友金属、神户制钢和川崎制铁分别在有关钢铁厂建立控制冷却装置;同时,在欧洲和美国等轧钢厂也相继采用。

我国于 1985 年在鞍钢半连轧厂建成国内第一套水幕冷却装置。但由于此套装置的冷却区长度不足,冷却能力不够,冷却不均匀,达不到产品质量的要求。因此,该厂在 1995 年的改造过程中将水幕装置改成柱状层流^[13]。20 世纪 90 年代,重钢五厂的中厚板生产线采用了控制轧制+可控的水幕冷却装置^[14,15],邯钢、柳钢、新余钢厂等钢厂也装有控制冷却装置,但这些厂家的控冷系统还处于人工手动控制或依靠经验模型进行控制,二级过程机的计算机集成控制系统几乎没有。自 2002 年东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室承担国家经贸委“十五”国家重大装备研制项目暨首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制项目以来,国家重点实验室及相关单位的科技人员日夜奋战,以中厚板控制冷却设备的开发研制、冷却系统的自动控制、均匀冷却控制的实现为攻关目标,进行了大量科研实验和研究工作,成功研制开发出集计算机控制系统和控制冷却过程机模型系统为一体的中厚板控制冷却系统,并且真正实现了控制冷却过程的在线自动控制,填补了国内在线自动控制冷却技术的空白。目前,以该套控制冷却系统核心技术为主的南钢中厚板厂层流冷却系统正在调试中。河南安阳永兴中板厂、河北武安文丰中板厂等钢厂的控冷生产线正在兴建中。至此结束了引进中厚板控制冷却技术的历史,为国内控制冷却技术的发展开辟了道路。

日本典型的板材加速冷却设备见表 1.1,欧洲的列于表 1.2,我国的列于表 1.3。

冷却设备的布置也在从简单到复杂、从单一形式向多种形式发展,在一套设备上既可以采用连续冷却形式,又可以采用同时冷却形式,如日本川崎钢铁公司水岛厂在精轧机和热矫直机之间安装两种的多功能加速冷却系统,包括层流冷却装置和直接淬火冷却装置;既可以冷却带钢,也可以冷却中厚板,如日本的

Nakayama Steel Works^[16]。

表 1.1 日本典型的板材加速冷却设备^[17]

Table 1.1 Typical accelerated cooling installations of plates in Japan

公司	NSC 新日铁八幡厂	NSC 新日铁君津厂	NKK 钢管公 司福山厂	KSC 川崎钢铁 公司水岛厂	SMI 住友金属 公司鹿岛厂	KSL 神户钢铁 公司加古川厂
设备名称	连续在线冷却	连续在线冷却	在线加速冷却	万能加速冷却	动态加速冷却	控轧加速冷却
	CLC	CLC	OLAC	MACS	DAC	KCL
尺寸, m	4.8×15.5	4.7×19.8	4.5×44	5.35×40	4.7×27	4.7×44
上喷嘴	水幕	喷射	U 形管	直集管	水幕	U 形管
下喷嘴	喷射	喷射	喷射	喷射	喷射	喷射
边部遮板		上部和下部	上部	上部	上部	上部
与精轧机 的距离, m		79.8	26	19	25	53
位置	热平整机后	热平整机后	热平整机前	热平整机前后	热平整机前	热平整机前

表 1.2 欧洲典型板材加速冷却设备^[18]

Table 1.2 Typical accelerated cooling installations of plates in Europe

国家	德国	比利时	意大利	法国	韩国
地点	曼内斯曼	Clabecq	Italsider	Usinor	POSCO
厂名	MRW 米尔海姆	图比泽	塔兰托	敦克尔克	浦项
名称	加速冷却系 统 MACOS	万能间断冷 却 Mulpic	加速冷却工 艺 ACP	可调冷却工 艺 ADCO	PILAC
尺寸, m	5×12	2.8×12	4.7×26		4.6×28
上喷嘴	水幕	直集管	水幕	喷射	喷射
下喷嘴	水幕	直集管	水幕	喷射	喷射
边部遮板	下部				上与下
位置	热平整机前	热平整机前	热平整机前	热平整机前	热矫前

表 1.3 我国一些中厚板轧机的控制冷却设备

Table 1.3 Control cooling equipment of plate rolling mill in china

厂名	重钢五厂	武钢轧板厂	鞍钢厚板厂	上钢三厂	邯钢中板厂
上水冷器	水幕	喷淋	管层流	管层流	水幕
下水冷器	水幕	喷淋	管层流	低压喷嘴	低压喷嘴
安装地点	精轧后热矫前	精轧后热矫前	精轧后热矫前	精轧后热矫前	精轧后热矫前

1.3 控制冷却方式的发展

冷却方式也由 20 世纪 60 年代以前使用的高压水喷射冷却，发展为柱状层流冷却和水幕冷却。同时，压力喷射冷却、雾化冷却、喷淋冷却、板湍流冷却、水-气喷雾法加速冷却、直接淬火^[19-23]等各种冷却方式也得到了越来越多的应用。

Nakayama Steel Works^[16]。

表 1.1 日本典型的板材加速冷却设备^[17]

Table 1.1 Typical accelerated cooling installations of plates in Japan

公司	NSC 新日铁八幡厂	NSC 新日铁君津厂	NKK 钢管公 司福山厂	KSC 川崎钢铁 公司水岛厂	SMI 住友金属 公司鹿岛厂	KSL 神户钢铁 公司加古川厂
设备名称	连续在线冷却	连续在线冷却	在线加速冷却	万能加速冷却	动态加速冷却	控轧加速冷却
	CLC	CLC	OLAC	MACS	DAC	KCL
尺寸, m	4.8×15.5	4.7×19.8	4.5×44	5.35×40	4.7×27	4.7×44
上喷嘴	水幕	喷射	U 形管	直集管	水幕	U 形管
下喷嘴	喷射	喷射	喷射	喷射	喷射	喷射
边部遮板		上部和下部	上部	上部	上部	上部
与精轧机 的距离, m		79.8	26	19	25	53
位置	热平整机后	热平整机后	热平整机前	热平整机前后	热平整机前	热平整机前

表 1.2 欧洲典型板材加速冷却设备^[18]

Table 1.2 Typical accelerated cooling installations of plates in Europe

国家	德国	比利时	意大利	法国	韩国
地点	曼内斯曼	Clabecq	Italsider	Usinor	POSCO
厂名	MRW 米尔海姆	图比泽	塔兰托	敦克尔克	浦项
名称	加速冷却系 统 MACOS	万能间断冷 却 Mulpic	加速冷却工 艺 ACP	可调冷却工 艺 ADCO	PILAC
尺寸, m	5×12	2.8×12	4.7×26		4.6×28
上喷嘴	水幕	直集管	水幕	喷射	喷射
下喷嘴	水幕	直集管	水幕	喷射	喷射
边部遮板	下部				上与下
位置	热平整机前	热平整机前	热平整机前	热平整机前	热矫前

表 1.3 我国一些中厚板轧机的控制冷却设备

Table 1.3 Control cooling equipment of plate rolling mill in china

厂名	重钢五厂	武钢轧板厂	鞍钢厚板厂	上钢三厂	邯钢中板厂
上水冷器	水幕	喷淋	管层流	管层流	水幕
下水冷器	水幕	喷淋	管层流	低压喷嘴	低压喷嘴
安装地点	精轧后热矫前	精轧后热矫前	精轧后热矫前	精轧后热矫前	精轧后热矫前

1.3 控制冷却方式的发展

冷却方式也由 20 世纪 60 年代以前使用的高压水喷射冷却，发展为柱状层流冷却和水幕冷却。同时，压力喷射冷却、雾化冷却、喷淋冷却、板湍流冷却、水-气喷雾法加速冷却、直接淬火^[19-23]等各种冷却方式也得到了越来越多的应用。

国内外资料表明^[24-33],近些年来,热轧机轧后在线加速冷却方式大多数采用层流冷却方式和水幕冷却方式,同时国外也相继采用了喷雾冷却、高密度管层流冷却和直接淬火冷却方式。层流冷却方式和水幕冷却方式因其冷却速率快、冷后轧件性能好、节省成本、提高生产效益而受到更多钢铁企业的瞩目,是今后冷却方式的主要发展趋势。

表 1.4 几种冷却方式的特点^[34]
Table 1.4 Features of cooling mode

冷却方式	优点	缺点	适用范围
压力喷射冷却	水流为连续的,没有间断现象呈紊流状态喷到钢板表面;可喷射到需要冷却的部位;轧件上下表面冷却差别显著。	比冷却特性很低;冷却效率不高;水消耗量大,水的飞溅严重,冷却不均匀;对水质的要求较高,喷嘴容易堵塞,水的利用率较低。	适用于一般冷却使用或因其穿透性好而适用于水汽膜较厚的环境。
层流冷却	比冷却特性较高;水流保持层流状态,可获得很强的冷却能力;上下表面、纵向冷却均匀。	冷却区距离长;集管之间有一定的距离,达不到横向冷却均匀;对水质的要求较高,喷嘴容易堵塞;设备庞杂,维护量较大且难维护。	要求强冷时,如热轧板出口处。
水幕冷却	比冷却特性最高;水流保持层流状态,冷却速度快,冷却区距离短,对水质的要求不高,易维护。冷却速度通常为 12-30℃/s,有时高达 80℃/s。	轧件上下表面、整个冷却区冷却不均;可调节的冷却速度范围较小。	不仅应用于板带钢输出辊道上的冷却,也有用在连轧机机架间的冷却,有的正在研究应用在棒材及连铸坯的冷却上。
雾化冷却	用加压的空气使水流成雾状来冷却钢板,冷却均匀,冷却速度调节范围大,可实现单独风冷、弱水冷和强水冷。	需要供风和供水两套系统,设备的线路复杂,噪音较大;对空气和水要求严格;车间的雾汽较大,设备容易受腐蚀。	适用于从空水冷到强水冷极宽的冷却能力范围,尤其适用连铸的二次冷却带。
喷淋冷却	水为破断式,形成液滴群冲击被冷却的钢板,比高压冷却喷嘴冷却均匀,冷却能力较强。	需要较高的压力,调节冷却能力范围小,对水质的要求较高。	目前应用较少。
板湍流冷却	轧制后的钢板直接进入水中进行淬火或快速冷却,冷却速度可达到 30℃/s。	冷却速度的调节范围小,水量较大。	目前应用较少。
水-气喷雾法快速冷却	可严格控制冷却速率和温降;可对板材的较冷边部进行补偿,节省冷矫成本。	需要供风供水系统,设备庞杂。	适用于极厚板或低抗拉强度(低于 600MPa),含有铁素体及珠光体/贝氏体显微组织。
直接淬火	冷却速度快,冷却能力范围大;添加少量合金元素就可以达到同样的强度;降低碳当量,改善可焊性能;确保钢板低温韧性。	适用钢种有限;冷却不均,钢板变形量大部分在 10mm 以下,宽幅钢板也在 30mm 以下。	适用于高抗拉强度(高于 600MPa),含有贝氏体加马氏体显微组织。

各种冷却方式都有其各自的优点和缺点,具体参见表1.4。采用哪种冷却设备和冷却方式应根据具体工艺环境和限定条件确定。

1.3.1 喷射冷却

喷射冷却的优点是穿透性好,同时,通过改变喷嘴配置、喷嘴孔的尺寸、水压等能对喷射水量(冷却能力)进行控制。常采用的喷嘴有扇形喷嘴和带芯子的全圆锥喷嘴两种。当喷嘴孔小时,常发生堵塞。今年来,为防止堵塞,开发了无芯子全圆锥喷嘴及喷雾喷嘴^[35]。

喷射冷却因用同一喷嘴可控制的冷却能力范围不太宽,欲调整冷却能力,需通过调整水的压力来控制。

1.3.2 喷雾冷却

连铸的二次冷却带由于空间狭小,主要采用喷雾冷却,高速空气流使水滴和铸坯接触均匀,并能排除拉辊和铸坯间的滞留水,使铸坯的冷却不均得到改善^[36, 37]。

1.3.3 层流冷却

由于层流冷却设备的喷嘴数量很多,排列又很密,轧件表面上的水层时刻可以更新,并且沿输出辊道每隔一段距离设置一定数量的侧喷头,将滞留在轧件表面上的水冲掉,所以冷却效果很好^[38]。图 1.1 是层流冷却设备布置简图。两集管间距约为 300~500mm,因此轧件横向上冷却不均。从图中也可以看出设备庞大复杂,难于维护;并且冷却区较长,因而导致控制上滞后效果严重,约为秒级^[39]。

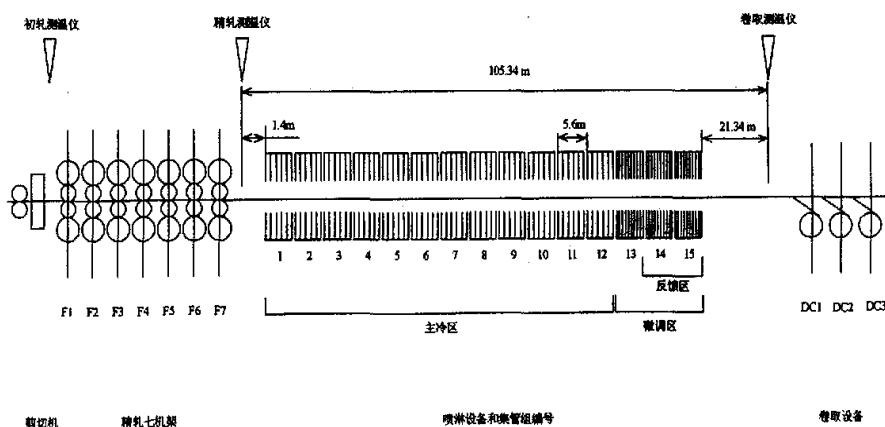


图 1.1 层流冷却系统设备布置图
Fig.1.1 Equipment of laminar cooling system

各种冷却方式都有其各自的优点和缺点,具体参见表1.4。采用哪种冷却设备和冷却方式应根据具体工艺环境和限定条件确定。

1.3.1 喷射冷却

喷射冷却的优点是穿透性好,同时,通过改变喷嘴配置、喷嘴孔的尺寸、水压等能对喷射水量(冷却能力)进行控制。常采用的喷嘴有扇形喷嘴和带芯子的全圆锥喷嘴两种。当喷嘴孔小时,常发生堵塞。今年来,为防止堵塞,开发了无芯子全圆锥喷嘴及喷雾喷嘴^[35]。

喷射冷却因用同一喷嘴可控制的冷却能力范围不太宽,欲调整冷却能力,需通过调整水的压力来控制。

1.3.2 喷雾冷却

连铸的二次冷却带由于空间狭小,主要采用喷雾冷却,高速空气流使水滴和铸坯接触均匀,并能排除拉辊和铸坯间的滞留水,使铸坯的冷却不均得到改善^[36, 37]。

1.3.3 层流冷却

由于层流冷却设备的喷嘴数量很多,排列又很密,轧件表面上的水层时刻可以更新,并且沿输出辊道每隔一段距离设置一定数量的侧喷头,将滞留在轧件表面上的水冲掉,所以冷却效果很好^[38]。图 1.1 是层流冷却设备布置简图。两集管间距约为 300~500mm,因此轧件横向上冷却不均。从图中也可以看出设备庞大复杂,难于维护;并且冷却区较长,因而导致控制上滞后效果严重,约为秒级^[39]。

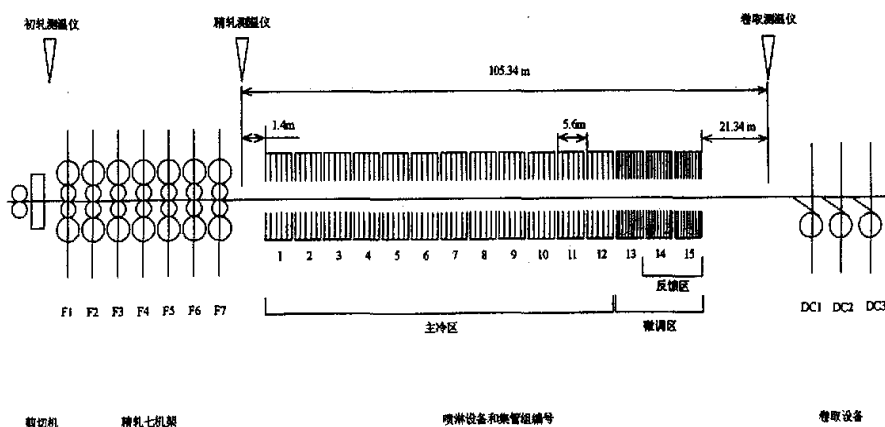


图 1.1 层流冷却系统设备布置图
Fig.1.1 Equipment of laminar cooling system

各种冷却方式都有其各自的优点和缺点,具体参见表1.4。采用哪种冷却设备和冷却方式应根据具体工艺环境和限定条件确定。

1.3.1 喷射冷却

喷射冷却的优点是穿透性好,同时,通过改变喷嘴配置、喷嘴孔的尺寸、水压等能对喷射水量(冷却能力)进行控制。常采用的喷嘴有扇形喷嘴和带芯子的全圆锥喷嘴两种。当喷嘴孔小时,常发生堵塞。今年来,为防止堵塞,开发了无芯子全圆锥喷嘴及喷雾喷嘴^[35]。

喷射冷却因用同一喷嘴可控制的冷却能力范围不太宽,欲调整冷却能力,需通过调整水的压力来控制。

1.3.2 喷雾冷却

连铸的二次冷却带由于空间狭小,主要采用喷雾冷却,高速空气流使水滴和铸坯接触均匀,并能排除拉辊和铸坯间的滞留水,使铸坯的冷却不均得到改善^[36, 37]。

1.3.3 层流冷却

由于层流冷却设备的喷嘴数量很多,排列又很密,轧件表面上的水层时刻可以更新,并且沿输出辊道每隔一段距离设置一定数量的侧喷头,将滞留在轧件表面上的水冲掉,所以冷却效果很好^[38]。图 1.1 是层流冷却设备布置简图。两集管间距约为 300~500mm,因此轧件横向上冷却不均。从图中也可以看出设备庞大复杂,难于维护;并且冷却区较长,因而导致控制上滞后效果严重,约为秒级^[39]。

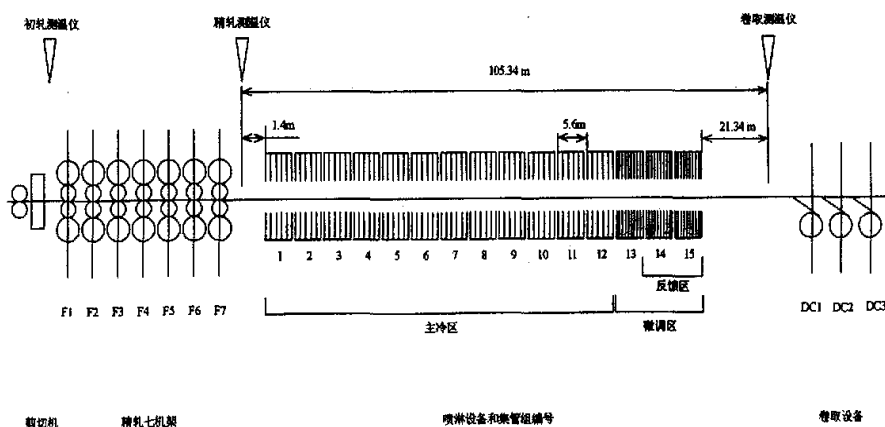


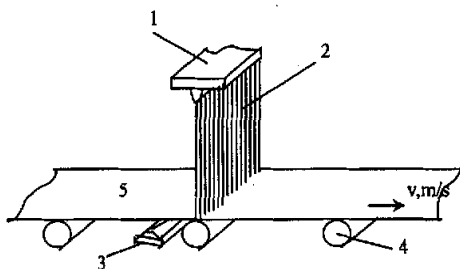
图 1.1 层流冷却系统设备布置图
Fig.1.1 Equipment of laminar cooling system

1984年日本专利报道了一种层流冷却装置,其喷嘴的流量可调,是一种缓急自由的冷却装置。该装置对提高轧件的组织性能级别产生了很好的效果。就是不添加或少添加合金元素就可达到提高钢板的强度和韧性的目的,从而节省了合金元素,可用普碳钢代替某些低合金钢,大幅度提高产品质量,得到优质、高韧性、低屈强比的钢板,产品质量波动很小。

高密度管层流冷却是在普通管层流冷却的基础上对其进行改造,利用其结构简单,易于形成稳定的层流状态等优点,增加喷嘴的密度,并结合生产特点,对其在宽度方向上的排列进行调整,使其对各种宽度的产品进行均匀冷却。由于其单根集管上喷嘴密度增加,使冷却能力提高;通过侧喷装置和集管的组数控制可以使钢板在各集管间形成自回火区,从而控制钢板的组织性能及表面质量;喷嘴采用10mm以上的圆管,不易堵塞,便于维修和管理。通过对普通管层流、高密度管层流和水幕冷却进行比较得知,高密度管层流的冷却能力同水幕冷却能力相当,而设备结构、设备维护及投资则是比较低的^[40]。

1.3.4 水幕冷却

由于热轧板带生产是连续的,因此要求水幕冷却设备能满足连续生产的要求,装置要坚固耐用,易维护,反应敏捷,水量可调,系统构成要适于计算机控制,其水幕设备如图1.2所示^[35]。



1—上部水槽 2—上部水幕 3—下部水槽 4—辊子 5—轧件

图 1.2 上下水幕安装示意图

Fig.1.2 Diagrammatic sketch of water curtain installation

目前水幕的主要控制形式有两种:一是出口缝隙保持不变,用改变水的压力使流量变化。从保持层流的观点看,这种调节是很有限的。另一种是保持水头不变,而改变出水口的开口度和缝隙宽度,有利于形成稳定的层流。还有一种如图1.3所示的可调水幕。该水幕利用分段斜楔控制出水的缝宽,提升或下降斜楔控制出水口开口度^[35]。在控制上主要采取同时冷却和通过冷却两种方式。但同时冷却又会造成局部积水,导致冷却不均,局部硬度增加。

如图 1.2 所示, 水流从一狭长条缝状流道流出, 由于表面张力、边端部的附流作用, 速度分布变化等, 水流易产生横向缩窄现象。解决的措施有: 出水口两端附加引流装置; 流水道截面按水流速度变化规律而变化; 流水道入口加分流隔板, 使水流流量分布和速度分布在出口处保持一致, 形成等宽幕状水流^[35]。

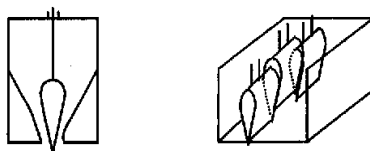
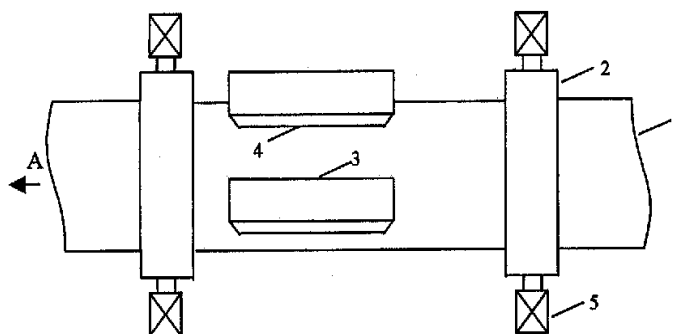


图 1.3 分段斜楔式可调水幕结构示意图

Fig.1.3 Diagrammatic sketch of segmented inclined wedge adjustable water curtain

1979 年日本专利报道了一种热钢板的水幕装置, 见图 1.4。该项发明把接近热钢板的冷却喷嘴配置在与轧制方向

平行的位置上, 使冷却水向热钢板的板宽方向流动, 不滞留在钢板上, 从而提高了冷却能力, 使钢板上下面冷却效果相同, 并且可以在冷却过程中控制冷却能力。



1-钢板 2-压紧辊 3-水槽 4-出水口 5-驱动装置 A-钢板运行方向

图 1.4 热钢板的水幕冷却装置

Fig.1.4 Cooling curtain installations for hot plate

1.3.5 水-气冷却

水-气冷却是气流把水分成液滴, 并带到整个钢板表面, 利用不断更新的气膜层均匀冷却钢板, 以达到没有带压设施而冷矫直率 $<1\sim5\%$ 的板形效果^[39, 40]。

目前有三套水-气冷却设备正在使用中, 一套在法国敦刻尔克厂, 一套在韩国的浦项钢铁公司, 这两套设备都是在 1989 年投产的; 还有一套在酒钢中板厂, 是 1998 年从法国引进的。法国敦刻尔克厂的那套冷却设备距精轧机座 69m, 热矫直机前 13m。设备实际长度为 18m, 有上下各五套组件, 每套组件有 4 个喷雾器,

可以处理宽度 5m 的板材。浦项钢铁公司有一套 7 组件的加速冷却设备，位于精轧机座后 54m，热矫直机仅前 5m，其冷却长度为 28m。这套设备的每套组件也有 4 个喷雾器，并能冷却最大宽度为 4.5m 的板材。前两套设备在八周内开始运转，其中还包括在线工艺调试。酒钢中板厂的冷却设备有上下各四个模块，每个模块包括 4 套气—水喷头及供气供水系统，上模块同时拥有湿气收集箱，气水分离器和排气扇等装置；每个模块可在生产线上快速安装和拆卸。每个喷头有 3 条连续的沿板宽方向的线性狭缝，中间一条为水缝，旁边两条为气缝；喷头使用低压水和低压气，水压恒定，由位于辊道线之上 12m 高的水塔（箱）提供。该设计可保证碎化了的水滴被均匀地喷射到钢板表面。

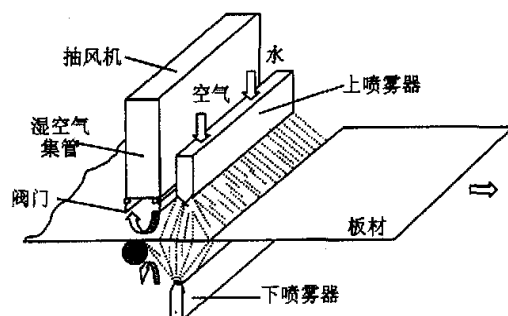


图 1.5 水-气喷雾器的上下喷射组件

Fig.1.5 Jetting unit of water-gas fog sprayer

水-气冷却喷射组件如图 1.5 所示。其上下喷雾器都有连续的狭缝，一个用于喷水，两个用于喷射空气。喷雾器喷出低压水和空气，空气将水雾化为许多小液滴，并在很大区域内将它们均匀地喷射到板材上，因此避免了原来用其他方法所产生的局部最大水流。水流速率在很大范围内可调节。喷水缝隙足够宽（6mm）可避免阻塞。下部喷雾器的工作原理同上部喷雾器原理相同。

1.3.6 直接淬火

所谓直接淬火是通过迅速冷却轧制之后的热钢板，在轧制线上使钢板生成淬火组织，是 600MPa 以上高强度钢板的新生产工艺。这种生产工艺的特点是，与离线淬火比较，（1）节省工序，（2）为了提高淬透性，可减少能够得到同一强度的合金元素含量，（3）由于采取这种措施可降低碳当量以提高焊接性能。因此直接淬火和加速冷却一样，在今后的高强度钢板生产中，作为必要的生产工序而占有主要位置^[41]。

由于冷却速度和冷却温度区域等冷却条件的不同，加速冷却设备和直接淬火设备一般是分开设置的。其次，为了在冷却过程中更好地控制板形，在淬火设备

上常常配置有与输送辊相对应的上部约束辊。

日本神戸钢铁公司继 1983 年 4 月成功地应用加速冷却工艺之后, 于 1985 年 12 月对原有设备进行改进, 实现了从加速冷却到直接淬火的广泛的冷却。其设备概况如图 1.6 所示。

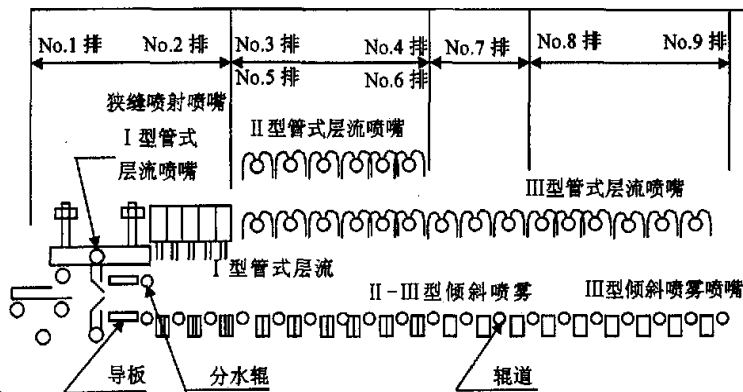


图 1.6 KCL 设备概况

Fig.1.6 General situation of equipment

本设备除在狭缝喷射喷嘴的前后设置分水辊之外, 没设确保钢板平直度的约束辊。关于冷却喷嘴, 在设备最前段的上下部位采用狭缝喷射喷嘴, 其次, 在狭缝喷射喷嘴的后面分别在上下部采用适用不同水量密度范围的 3 种管式层流喷嘴和倾斜喷雾喷嘴。

1.4 控制冷却数学模型

由于轧后控制冷却过程具有测温点少、模型非线性等特点, 因此采用精确描述冷却过程的温度控制模型是不可能的^[38,42-56]。水冷温降模型按维数划分有一维、二维和三维温降模型, 按建模形式分为理论温降模型、经验温降模型和理论—经验组合温降模型^[57-62]。

目前世界各国都在不断改进温度控制模型和控制策略以满足市场要求^[63-66]。下面介绍几种在生产中实际应用的温度控制数学模型, 通过这些模型的分析比较为后文中厚板控制冷却模型的建立提供理论指导。

1.4.1 指数形式层流冷却数学模型

1.4.1.1 层流冷却系统模型

考虑冷却水与轧件表面以对流换热形式的热量传递, 在不考虑其内部沿厚度

方向的热传导，并且忽略轧件热辐射的条件下，根据牛顿冷却公式（一维热交换方程）可推导出下面的冷却模型：

$$T_2 = T_w + (T_1 - T_w) \exp\left(\frac{-2\alpha\tau}{c_p \rho h}\right) \quad (1-1)$$

式中， T_1 、 T_2 分别为轧件在冷却区入口和出口的温度； T_w 为冷却水温度； τ 为冷却时间。

换热系数 α 是一个较难确定的参数，它与轧件温度、运行速度、厚度及水温等一系列因素有关，因此将模型简化成下列形式：

$$T_2 = T_w + (T_1 - T_w) \exp(-pt) \quad (1-2)$$

p 为反比时间常数（模型效率），由下式求得：

$$p = \frac{a}{h^2} q^2$$

q 为局部频率，由一超越方程确定：

$$q = \frac{q^2 - (h/\lambda) \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{q \cdot (h/\lambda) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

式中， α_1 、 α_2 分别为轧件的上下表面换热系数。

简化后得：

$$\begin{aligned} q &= \sqrt{6.56 \cdot EPS2 - 3.2913 \cdot EPS2^2} \\ EPS1 &= 1 + \frac{0.3263 \cdot h}{\lambda} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \\ EPS2 &= EPS1 - \sqrt{EPS1^2 - \frac{0.305 \cdot h}{\lambda} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \frac{h \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{\lambda})} \end{aligned}$$

轧件通过冷却区时，轧件上的各点由于受速度、温度和水量等因素的影响，冷却速率都不一样。为了保证轧件各点的终冷温度稳定，就必须按冷却区中的逻辑区和轧件分段长进行控制。对一维热交换方程按段进行离散化，得到如下的离散方程：

$$T(y) = T_m + (T'(y) - T_m) \exp\left(- \sum_{n=1}^i k(n, y) \cdot p(n, y) \cdot \bar{\tau}(n, y)\right) \quad (1-3)$$

式中, $T(y)$ —轧件第 y 段的终冷温度预测值;

$T'(y)$ —轧件第 y 段精轧出口温度测量值;

T_m —介质温度;

$p(n, y)$ [简记为 p]—模型系数;

$k(n, y)$ [简记为 k]— p 的修正系数(自适应系数);

$\bar{\tau}(n, y)$ [简记为 $\bar{\tau}$]—第 y 段轧件在第 n 逻辑区的平均停留时间。

模型系数 p 与现场工况密切相关, 为了使预测模型适用于较宽的范围(不同材质、不同温度、不同轧件厚度和速度、不同的水温和水压等), 常常由经验公式、经验曲线和内部表组成的经验模型来共同确定 p 值, 见下式。

$$p(n, y) = \frac{a(n, y)}{\left(\frac{1}{(\alpha_1(n, y) + \alpha_2(n, y)) \cdot k_f(n, y)} + \frac{h(y)}{c_1 \cdot \lambda(n, y)}\right) \cdot c_2 \cdot h(y) \cdot \lambda(n, y)} \quad (1-4)$$

式中, $k_f(n, y)$ —考虑轧件速度、水压、水温对 $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 影响的综合修正因子;

c_1, c_2 —可调常数。

同时, 对 a 和 λ 提供了经验曲线; 对 α_1, α_2 提供了内部表; 对 k_f 提供了经验公式。这些连同上式一起构成了计算 p 的经验模型。

1.4.1.2 模型评价

该模型方程是描述轧件平面冷却特点的通用方程, 适用于冷却反比时间常数已知的层冷段, 依前述的基础模型和经验模型进行计算。

但是该模型仅考虑了热交换, 没有考虑热传导, 由式(1-4)得到的轧件温度实际上是轧件厚度方向上的平均温度, 而测温仪测得的是轧件表面温度。薄板的中心和表面温度相差不大, 而厚板则内外温差很大。因此厚规格轧件终冷温度精度较低。

1.4.2 线性层流冷却数学模型

由于工程上要求模型结构简单易行, 在线控制计算方便, 又要有各种途径和方法发挥其功效, 并使模型功能不断完善等, 所以, 在运动轧件和介质热交换方程的基础上推出的描述轧件通过冷却区温度变化的线性模型, 对带钢和薄板来说简单可行, 精度较高。某热轧厂层流冷却系统的控冷数学模型采用理论空冷温降模型和侧喷温降模型、层流水冷温降模型、热流密度模型等, 应用效果颇佳^[67, 68]。

1.4.2.1 空冷温降模型

轧件通过精轧机组后在输出辊道上运行时, 它所含的热量将通过其高温表面以辐射的形式向外散失, 随着轧件在空气中逗留时间的增长, 而又不断地通过辐射形式散失热量造成一定的温降。根据stefen-boltzman定律, 轧件散热面积一定时, 其辐射的热能与轧件的绝对温度的四次方成正比。当轧件在长距离辊道上运送时, 由于运送时间长, 温降大, 在此种情况下的温降方程是根据stefen-boltzman定律通过积分来确定的。某热轧厂的空冷温降模型是采用上述的方法得到的。其模型为:

$$\varepsilon = a_{air} \times h + b_{air} \quad (1-5)$$

$$\Delta T_{air} = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{6 \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{c_p \cdot \rho \cdot h / 1000} \cdot \tau + \frac{1}{(T' + K)^3}}} - K \quad (1-6)$$

式中, a_{air} 、 b_{air} — 空冷回归系数;

ΔT_{air} — 空冷温降量, °C;

τ — 空冷时间, s;

T' — 精轧出口温度, °C。

该空冷温降模型物理意义明确、结构完整,充分反映了精轧出口温度、比热、厚度等各主要因素的影响,能够较精确地计算出轧件在输出辊道上由空冷引起的温降。

但由于轧件的热辐射系数很难通过测量得到其精确的数值,实际应用时往往通过其它的方法来计算。提高轧件热辐射系数计算精度,可以提高空冷温降计算精度。空冷温降模型通过建立其与轧件厚度的线性关系来计算。可是轧件的热辐射系数与许多物理因素有关如轧件表面上的氧化铁皮的程度,氧化铁皮较多时其值较大,反之较小,因此如果增加一些其它的影响因素如轧件温度,重新建立线性关系,该模型精度有可能进一步提高。

1.4.2.2 侧喷温降模型

为了保证轧件表面冷却水的运动状态,每隔一段冷却集管装有一对侧向喷水管。侧向喷射的冷却水与轧件的热交换属于对流传热。其温降模型可以通过对轧件的对流温降公式进行积分以及线性化方法得到,其形式为:

$$\Delta T_s = \frac{1000 \cdot l_{sd} \cdot n \cdot q_s}{3600 \cdot v \cdot c_p \cdot \rho \cdot h} \quad (1-7)$$

式中, ΔT_s — 侧喷温降量, °C;

l_{sd} — 侧喷喷射幅, m;

n — 侧喷个数;

q_s — 侧喷热流密度, kJ/(m²·h)。

该模型充分反映了轧件速度、厚度、比热等物理参数对温降的影响,有较好的计算精度。

1.4.2.3 层流水冷温降模型

由对流温降公式积分以及线性化方法得到的层流水冷温降模型为:

$$\Delta T = \frac{1000 \cdot l_{bnk} \cdot q}{3600 \cdot v \cdot c_p \cdot \rho \cdot h} \quad (1-8)$$

式中, l_{bnk} — 层流冷却区长度, m;

q — 上下集管对应的总热流密度, kJ/m²·h。

$$q_{up} = f_0 \cdot f_2 \cdot T_w \cdot a \cdot \frac{n}{n_0} \cdot (1 - 5.371E-7 \cdot v) \cdot f_3 \quad (1-9)$$

式中, q_{up} —层流冷却上部集管的热流密度, $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h}$;

f_0 —热流密度系数, $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h}$;

f_2 —上集管热流密度修正系数;

T_w —水温修正系数;

a —前部集管喷水状况修正值;

n —上部集管的计算对象的组数;

n_0 —上部集管的实际的组数;

f_3 —压力修正系数 (1: 通常压力, 0.5: 1/2 压力)。

$$q_d = f_0 \cdot f_2' \cdot T_w \cdot a' \cdot \frac{n'}{n_0'} \quad (1-10)$$

式中, q_d —层流冷却下部集管的热流密度, $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h}$;

f_2' —下部集管的热流密度修正系数;

a' —前部下集管的喷水状况修正值;

n' —下部集管的计算对象的组数;

n_0' —下部集管的实际组数。

$$f_0 = f_1 \cdot [C_0 + C_1 \cdot h + C_2 \cdot w + C_3 \cdot T' + C_4 \cdot T_{alm} + C_5 \cdot T_w + C_6 \cdot v + C_7 \cdot (T' - T_{alm}) + C_8 \cdot \frac{l_0}{v}] \quad (1-11)$$

式中, f_1 —基本热流密度系数(学习系数);

$C_0 \sim C_8$ —热流密度回归系数;

T_{alm} —终冷温度, $^{\circ}\text{C}$;

l_0 —FDT~CT 之间的距离, m。

该模型中热流密度系数 f_0 是非常重要的参数, 通过它可以计算出轧件的热流密度。它与轧件厚度、宽度、精轧出口温度、冷却水温度和冷却时间等物理参数有关^[69]。它们之间存在着复杂的非线性关系, 通过建立它们之间线性关系很难反映出它们之间的复杂关系。但在实际应用中通过对参数进行回归和应用自学习算法, 仍能达到很高的控制精度。

1.4.3 空冷水冷综合换算的控制冷却数学模型

1.4.3.1 基本数学模型

层流冷却数学模型包括空冷模型和水冷模型，它们都是由解Fourier微分方程而得到的，该方程为：

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{d\tau} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right) \quad (1-11)$$

式中， T —轧件温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

x —轧件截面温度分布的法线方向。

考虑到轧件截面温度分布的对称性和边界条件，并假设温度分布沿轧件厚度方向呈抛物线型，在温度变化不大的情况下，上述微分方程的解可转化为下列时间与温度的关系式^[70]：

$$\tau = \frac{1}{M} \ln \left(\frac{T_0 - T_a}{T - T_a} \right) \quad (1-12)$$

$$M = \frac{\beta}{1 + \beta} \cdot \frac{12\lambda}{\rho \cdot c_p \cdot h^2}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{6\lambda} \cdot \frac{h}{100}$$

$$\alpha_k = f \times 0.277 \times (1060 - T) \cdot W_{sp}^{0.35}$$

$$\alpha_{\pm} = \alpha_c + \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_K + T_{Ka}) \cdot (T_K^2 + T_{Ka}^2)$$

$$T_K = T_0 + 273.15$$

$$T_{Ka} = T_a + 273.15$$

$$\alpha_c = 2.15 \times (T - T_a)^{0.25}$$

得到冷却后终了温度为：

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{-K\tau} \quad (1-13)$$

式中， τ —冷却时间，s；

K —比例因子；

T_0 —轧件初始温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_a —介质（空气或水）温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T —轧件终冷温度, $^{\circ}\text{C}$;

α —综合换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

f —自学习因子;

W_{sp} —单位水流量, $\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$;

α_c —对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

T_k —轧件绝对温度, K ;

T_{ka} —介质绝对温度, K 。

本模型包括终冷温度设定功能、在线控制功能和自学习功能。

1.4.3.2 设定计算

层流冷却系统结构如图1.7所示。设定计算的目的,是确定打开的第一组集管的位置B和打开的集管组数 N 。由于 $N = (v \times \tau_{\text{水}}) / l$, 其中 v 为速度, m/s ; $\tau_{\text{水}}$ 为水冷时间, s ; l 为相邻两组集管的距离, m 。所以关键是计算水冷时间, 即确定图1.8中的B点和C点的位置^[71]。

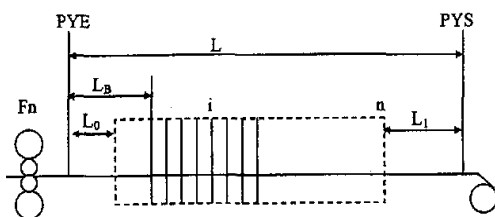


图 1.7 层流冷却系统示意图

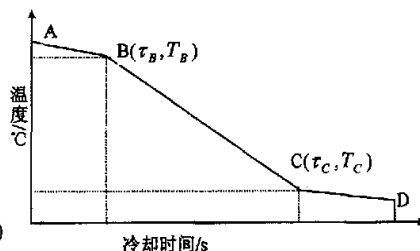


图 1.8 轧件降温示意图

Fig.1.7 Sketch of laminar cooling system Fig.1.8 Sketch of temperature drop of strip

(1) $B(\tau_B, T_B)$ 点的确定

B点的横坐标 τ_B 是根据程序运行时间和水阀开 / 关延时 (称为总延时 $\tau_{\text{延}}$) 来确定的。为了保证喷水及时准确地落到轧件上, 必须使轧件头部从冷却区前测温仪到达打开的第一组集管前所用时间不小于总延时, 否则, 水阀来不及打开, 喷水就会滞后。因此, 当 $L_0/v > \tau_{\text{延}}$ 时, $\tau_B = L_0/v$, 即喷水从层冷装置的第一组集管开始打开, 若 $\tau_B = \tau_{\text{延}}$, 则喷水从中间某一组集管开始打开, 当 τ_B 确定以后, 温度

$T_B = T_a + (T_A - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau_B)$ 也就确定了。其中, T_a 为空气温度, T_A 为终轧温度, T_B 为轧件到达打开的第一集管时的温度, τ_B 为轧件从冷却区前测温仪到达打开的第一组集管处所用时间。

(2) 空冷及水冷曲线的计算(确定 $C(\tau_c, T_c)$)

图1.8中的 $\overline{BC}$ 和 $\overline{CD}$ 分别为水冷温度曲线和空冷温度曲线。无论是水冷还是空冷, 温度 T 和时间 τ 都是非线性关系。因此, 公式(1-10)只适用于小的温度变化范围。这样, 水冷和空冷都不能一次性计算, 只能在较小的温度变化范围内循环计算。通过循环计算得出水冷曲线和空冷曲线交点 C 。整个计算过程是循环、判断、再循环、再判断逐渐逼近的过程, 计算量较大。为了满足公式 (1-10) 的适用条件, 对空冷曲线而言, 采用倒推法, 即以已知的目标卷取温度 T_D 为起始温度, 以 0.5s 为时间间隔, 用公式 $T_0 = T_a + (T - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau)$ 反向循环计算。将计算结果绘成图1.9所示的空气自然冷却曲线, 该曲线的含义是轧件自然冷却至目标卷取温度的空冷曲线。水冷曲线的制作方法是, 以 T_B 为起始温度, 以 50℃ 的温降为循环步长, 利用公式 (1-10) 计算每降 50℃ 所需时间。这样, 经若干次循环后就可求出与空冷曲线的交点 $C(\tau_c, T_c)$, 如图1.10所示。至此, B点和C点都已确定, 水冷时间 $\tau_w = \tau_c - \tau_B$, 喷水组数 $N = \frac{v \cdot \tau_w}{l}$ 也就确定了。

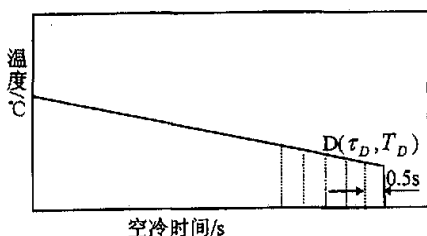


图 1.9 空冷曲线

Fig.1.9 Curve of aircooling

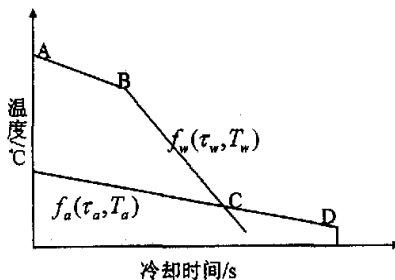


图 1.10 轧件冷却曲线

Fig.1.10 Cooling curve of the flat

1.4.3.3 在线控制计算

在线控制是以样本的实测终轧厚度、速度和温度为输入参数计算各个样本的组态, 与设定计算的区别仅是输入参数来源不同而已, 而计算组态的方法完全相

同。由于各样本的实测终轧厚度、温度和速度是变化的，为了保证终冷温度的均匀性，各样本的组态要实时调整。同时，为了保证各组态正好对应各自的样本，在线控制逻辑中必须精确计算各个样本的瞬时位置，以便实时准确地调整组态。

1.4.3.4 自学习计算

如果把冷却过程中的对流、辐射和传导分开来考虑，不仅计算复杂，而且各自的热交换系数也很难确定。因此，该套模型中采用了综合换热系数的概念，以综合换热系数来表示所有热交换系数。由于综合热交换系数是与喷水方式即组态密切相关的，自学习的目的是通过实际喷水方式反过来推算综合换热因子 f 以期得到实际的综合换热系数。所以，自学习计算时，将组态相同的连续样本合并为段，以段为单位计算各段经相应的组态冷却后的预报终冷温度。该计算是按物理顺序进行的，层冷装置中第一组开启集管前的轧件温度以 $T_{B0} = T_a + (T_A - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau_{B0})$ 一次性计算，式中 $\tau_{B0} = L_0 / v$ 。从第一组集管至最末一组集管之间以组为间隔，利用公式 $T_{Bi} = T_a + (T_{Bi-1} - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau_{Bi})$ 循环计算，式中 $\tau_{Bi} = L_i / v$ 。不过，当某组集管打开时，该次循环用 α_K 计算比例因子 K ，否则用 α_{Δ} 计算比例因子，直到计算出 T_{Bn} 为止。接着以

$$T_{D\text{预}} = T_a + (T_{Bn} - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau_D)$$

计算出该段的预报卷取温度 $T_{\text{预}}$ ，式中 $\tau_D = L_1 / v$ 。最后，将各段的预报终冷温度的均值 $\overline{T_{D\text{预}}}$ 与目标终冷温度 $T_{\text{目}}$ 进行比较，实时修正换热因子 f ，使理论水冷能力接近实际水冷能力，提高设定和在线控制精度。 f 的修正公式为

$$f_{\text{new}} = f_{\text{old}} + f_{\text{old}} \cdot g \cdot (T_{\text{目}} / T_{D\text{预}} - 1) \quad (1-14)$$

式中， f_{new} —下一块钢的综合换热因子；

f_{old} —本块钢的综合换热因子；

g —加权系数。

1.4.4 综合考虑传热形式的冷却数学模型

1.4.4.1 模型建立机理

层流冷却属于强制冷却，传热形式示于图 1.11。在水流的下方和几倍水流宽

同。由于各样本的实测终轧厚度、温度和速度是变化的,为了保证终冷温度的均匀性,各样本的组态要实时调整。同时,为了保证各组态正好对应各自的样本,在线控制逻辑中必须精确计算各个样本的瞬时位置,以便实时准确地调整组态。

1.4.3.4 自学习计算

如果把冷却过程中的对流、辐射和传导分开来考虑,不仅计算复杂,而且各自的热交换系数也很难确定。因此,该套模型中采用了综合换热系数的概念,以综合换热系数来表示所有热交换系数。由于综合热交换系数是与喷水方式即组态密切相关的,自学习的目的就是通过对实际喷水方式反过来推算综合换热因子 f 以期得到实际的综合换热系数。所以,自学习计算时,将组态相同的连续样本合并为段,以段为单位计算各段经相应的组态冷却后的预报终冷温度。该计算是按物理顺序进行的,层冷装置中第一组开启集管前的轧件温度以 $T_{B0} = T_a + (T_A - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau_{B0})$ 一次性计算,式中 $\tau_{B0} = L_0 / v$ 。从第一组集管至最末一组集管之间以组为间隔,利用公式 $T_{Bi} = T_a + (T_{Bi-1} - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau_{Bi})$ 循环计算,式中 $\tau_{Bi} = L_i / v$ 。不过,当某组集管打开时,该次循环用 α_K 计算比例因子 K ,否则用 α_{Δ} 计算比例因子,直到计算出 T_{Bn} 为止。接着以

$$T_{D\text{预}} = T_a + (T_{Bn} - T_a) \cdot \exp(-K \cdot \tau_D)$$

计算出该段的预报卷取温度 $T_{\text{预}}$,式中 $\tau_D = L_1 / v$ 。最后,将各段的预报终冷温度的均值 $\overline{T_{D\text{预}}}$ 与目标终冷温度 $T_{\text{目}}$ 进行比较,实时修正换热因子 f ,使理论水冷能力接近实际水冷能力,提高设定和在线控制精度。 f 的修正公式为

$$f_{\text{new}} = f_{\text{old}} + f_{\text{old}} \cdot g \cdot (T_{\text{目}} / T_{D\text{预}} - 1) \quad (1-14)$$

式中, f_{new} —下一块钢的综合换热因子;

f_{old} —本块钢的综合换热因子;

g —加权系数。

1.4.4 综合考虑传热形式的冷却数学模型

1.4.4.1 模型建立机理

层流冷却属于强制冷却,传热形式示于图 1.11。在水流的下方和几倍水流宽

度的扩展区域内, 传热方式为单相强制对流, 在这个区段 (区域 I), 水流的冷却效率很高, 表面温度较低, 不产生沸腾。在蒸汽滞止边沿线以外, 接近平板的水被加热, 水流区自身的冷却效应已不存在, 平板的表面温度增加, 开始出现沸腾, 接着可能会形成比较窄的核状沸腾和过渡期沸腾的区域 (区域 II), 接着区域 II 会出现薄膜沸腾强制对流区 (区域 III)。在核状沸腾区和过渡区, 气泡对传热具有较大的影响, 它加强了表面与冷却水之间的传热, 在膜状沸腾区, 由于蒸汽的导热性能很差, 因此, 表面与冷却水之间的换热系数很小, 在膜状沸腾区, 轧件除了以汽膜导热的形式被冷却之外, 还以辐射的方式穿透汽膜向液体传递热。在膜状沸腾区之外, 冷却水会在表面聚集形成不连续的小液态聚集区 (区域 IV)。在小液态聚集区的下面, 传热方式为对流和辐射, 在表面没有水的地方, 传热主要是向环境的辐射热。小液态聚集区的水最终或者被汽化, 或者从平板的边缘处流下。在区域 V, 传热方式为表面无水的平板与环境之间的辐射和对流。

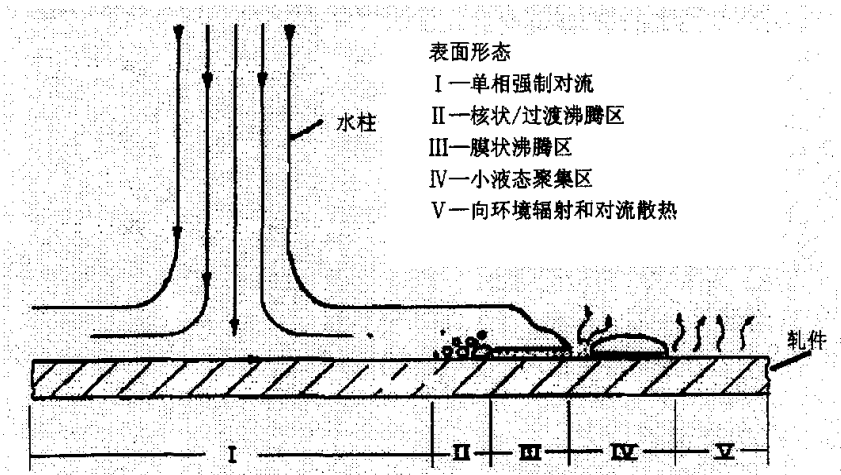


图 1.11 水流冲击静止平板时的传热形式

Fig. 1.11 Transfer form of heat when water strikes still flat plate

轧件离开精轧机后, 依次通过空冷段、加速冷却段和空冷段, 在冷却过程中的传热过程包括: 空气中的对流和辐射, 水流冲击区的强制对流沸腾, 平行流动区的强制对流薄膜沸腾以及由轧件至输送辊的热传导。

轧件和冷却水之间的换热强度与水流速度、表面温度、冷却水温度等因素相关, 图 1.12 示出了层流水流冲击轧件表面时不同沸腾区域内强制对流换热系数的变化情况。由图可见, 在核状沸腾区和过渡区的换热系数远大于膜状沸腾区, 但是在膜状沸腾区的换热系数变化较小, 而在核状沸腾区和过渡区的换热系数变化较大^[72], 这给模型的精确描述带来了难度。

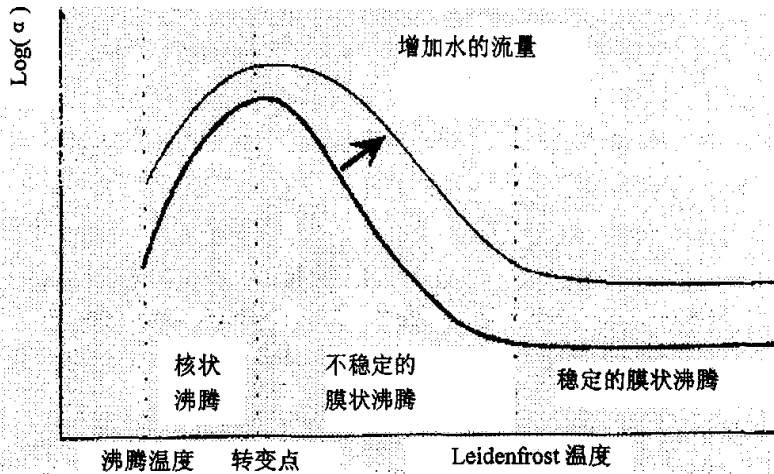


图 1.12 对流换热系数 α 与表面温度 T 之间的关系

Fig.1.12 Relation between coefficient of convection transfer heat and surface temperature

在理论上，轧件通过冷却区的温降随时间的变化描述为指数关系，而轧件厚度、对流换热系数、轧件速度、密度和比热对轧件温度指数降低的陡度产生影响[73,74]。

酒钢中板厂的水冷模型即考虑到强制对流、核沸腾、过渡沸腾、膜沸腾状态下所对应的换热系数不同、上下集管与钢板表面距离不同及钢板厚度方向热传导等因素而在程序上加以区别，钢板尺寸、终冷温度、冷却速度、冷却水温度及 ADCO 设备的运行状态等参数直接影响模型的运算结果。

1.4.4.2 空冷计算模型

在空冷过程中，轧件的热传递主要由辐射和对流的作用产生的。此时的热流密度可表示成式(1-13)、(1-14)、(1-15)。

辐射热流密度：

$$q_r = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot \left\{ (T_{plate} + K)^4 - (T_{air} + K)^4 \right\} \quad (1-15)$$

对流热流密度：

$$q_c = -\alpha \cdot (T_{plate} - T_{air}) \quad (1-16)$$

总和：

$$q = q_r + q_c \quad (1-17)$$

$$\text{钢板在冷却区入口处的平均温度为: } T_{ave} = T_s - \frac{q \cdot h}{6 \cdot \lambda}$$

式中, T_s —钢板表面温度。

$$\text{经过 } \tau \text{ 时间热焓减少量: } \Delta H = -\frac{2 \cdot q \cdot \tau}{\rho \cdot h}$$

$$\text{钢板在冷却区入口处的出口表面温度: } T'_s = T'_{ave} + \frac{q \cdot h}{6 \cdot \lambda}$$

钢板的热焓模型为:

$$\begin{aligned} H_a &= 1.272 \cdot 10^5 + 470.8 \times T + 0.07466 \times T^2 \\ H_F &= 0.3841 \cdot 10^5 - 482.7 \times T + 0.05781 \times T^2 - 0.01445 \times T^3 \\ &\quad + 0.1667 \cdot 10^{-4} \times T^4 - 0.6937 \cdot 10^{-8} \times T^5 \\ H &= g \times H_a + (1-g) \times H_F \end{aligned} \quad (1-18)$$

式中, g 为相变比率, $g < 1$ 。

空冷计算流程见图 1.13。

1.4.4.3 水冷计算模型

水冷计算模型是一个循环迭代计算过程, 将钢板第 I 段的平均温度和一假定初始水量代入水冷热流密度模型进行循环迭代计算, 直至热流密度模型计算出的热流密度和从热焓变化导出的热流密度差值小于某一定值时, 此时的水量即为所求的第 I 段钢板对应的上集管水量。下集管水量根据上集管水量按经验模型求得。

下面分别介绍各种换热形式下的水冷热流密度模型。

1.4.4.3.1 上部集管膜沸腾热流密度模型

$$PH_{film} = g_2 \cdot \left\{ FLS(I-1) + (FLS(I) - FLS(I-1)) \cdot \frac{QB - QBS(I-1)}{QBS(I) - QBS(I-1)} \right\} \quad (1-19)$$

式中, g_2 —水温修正系数;

FLS(I)—第 I 级别的膜沸腾热流密度;

QBS(I)—水流密度级别;

QB—水流密度, $1/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。

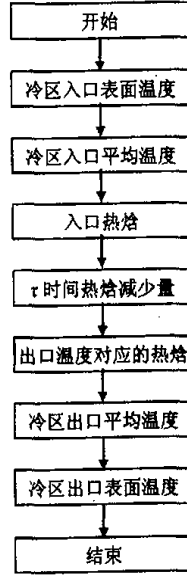


图 1.13 空冷温降计算示意图

Fig.1.13 Diagram of temperature drop calculation for air-cooling

1.4.4.3.2 上部集管核沸腾热流密度模型

根据水流密度大小，分三种情况进行计算：

[1] 水流密度>23；[2] 5<水流密度<23；[3] 水流密度<5。

[1] 水流密度>23：

$$PHMAX = \{1.77 \cdot 10^6 + (3.87 - 1.77) \cdot 10^6 \cdot \frac{QB - 20}{50 - 20}\} \cdot g$$

g 为模型修正系数。

[2] 5<水流密度<23：

$$PHMAX = (992.0605 \cdot QB^2 + 1.4552 \cdot 10^6) \times g$$

[3] 水流密度<5：

水流密度中间变量：

$$QB1 = w_0 \cdot l_0 \cdot \left\{ \frac{(992.0605 \times 25 + 1.4552 \times 10^6) \cdot g_1 - \frac{5.4186}{w_0 \cdot l_0} \cdot (100 - T_w)}{2.26 \times 10^6} \right\} \quad (1-20)$$

式中， w_0 —钢板宽度，m；

l_0 —钢板长度, m。

$QB < QB1$:

$$PHMAX = \frac{QB}{3.6 \cdot l_0} \cdot \{4186 \times (100 - T_w) + 2.26 \times 10^6\}$$

$QB1 < QB < 5$ 时:

$$PHMAX = \frac{QB}{3.6 \cdot l_0} \times 4186 \times (100 - T_w) + \frac{QB1}{3.6 \cdot l_0} \times 2.26 \times 10^6$$

1.4.4.3.3 上部集管过渡沸腾热流密度模型

上部集管过渡沸腾热流密度模型为:

$$PHENT = \left((1.3 \times 10^6 + 4.7 \times 10^6 \times \frac{QB-5}{50-5}) \times G1 \right) \times 2$$

1.4.4.3.4 上部集管热流密度模型

上部集管热流密度模型为:

$$PHSUB = (PHMAX - PHENT) \cdot A^n + (PHENT - PHFILM) \cdot A + PHFILM$$

式中, A —膜沸腾状态对应的温度系数, n —各种沸腾状态对应的热流密度的比值参数。

1.5 本论文主要目的意义和研究内容

国内中厚板轧机的控轧控冷技术正处于探索、研究、开发阶段, 我们应针对国内的资源特点, 立足于设备的国产化, 研究开发一系列具有自己特色的、与国产设备相对应的控制技术和控制系统, 迎头赶上国际先进水平。国内控制冷却技术的未来发展空间和应用前景会日新月异。

本文成功完成了国家经贸委“十五”国家重大技术装备研制项目“首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”之“中厚板轧机过程控制模型与人工智能研究控制”的课题, 开发了具有完全自主产权的控制冷却过程机二级模型设定系统, 提出了钢板在长度、宽度、厚度方向上的温度均匀性控制策略, 并将研究成果应用到实际生产中, 主要包括:

(1) 构建控制冷却过程的数学模型框架

针对中厚板轧线上多品种、小批量的复杂情况, 研究钢板的冷却过程, 建立中厚板控制冷却过程数学模型。将这些数学模型应用于冷却过程的预计算、再计算和自学习计算, 不断提高模型的预设定精度。通过理论分析、试算比较、实际

l_0 —钢板长度, m。

$QB < QB1$:

$$PHMAX = \frac{QB}{3.6 \cdot l_0} \cdot \{4186 \times (100 - T_w) + 2.26 \times 10^6\}$$

$QB1 < QB < 5$ 时:

$$PHMAX = \frac{QB}{3.6 \cdot l_0} \times 4186 \times (100 - T_w) + \frac{QB1}{3.6 \cdot l_0} \times 2.26 \times 10^6$$

1.4.4.3.3 上部集管过渡沸腾热流密度模型

上部集管过渡沸腾热流密度模型为:

$$PHENT = \left((1.3 \times 10^6 + 4.7 \times 10^6 \times \frac{QB-5}{50-5}) \times G1 \right) \times 2$$

1.4.4.3.4 上部集管热流密度模型

上部集管热流密度模型为:

$$PHSUB = (PHMAX - PHENT) \cdot A^n + (PHENT - PHFILM) \cdot A + PHFILM$$

式中, A —膜沸腾状态对应的温度系数, n —各种沸腾状态对应的热流密度的比值参数。

1.5 本论文主要目的意义和研究内容

国内中厚板轧机的控轧控冷技术正处于探索、研究、开发阶段, 我们应针对国内的资源特点, 立足于设备的国产化, 研究开发一系列具有自己特色的、与国产设备相对应的控制技术和控制系统, 迎头赶上国际先进水平。国内控制冷却技术的未来发展空间和应用前景会日新月异。

本文成功完成了国家经贸委“十五”国家重大技术装备研制项目“首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”之“中厚板轧机过程控制模型与人工智能研究控制”的课题, 开发了具有完全自主产权的控制冷却过程机二级模型设定系统, 提出了钢板在长度、宽度、厚度方向上的温度均匀性控制策略, 并将研究成果应用到实际生产中, 主要包括:

(1) 构建控制冷却过程的数学模型框架

针对中厚板轧线上多品种、小批量的复杂情况, 研究钢板的冷却过程, 建立中厚板控制冷却过程数学模型。将这些数学模型应用于冷却过程的预计算、再计算和自学习计算, 不断提高模型的预设定精度。通过理论分析、试算比较、实际

应用,确定了模型的结构、给出了模型参数的确定和优化的方法。该系统考虑不同钢种热物理参数和不同厚度规格的热传导规律,可以适应轧制品种、规格频繁变化的实际情况,通过纵向、横向、厚度方向温度分布规律及冷却规律的研究,给出了各个方向上温度均匀性控制的数学模型和实用控制方法,对温度均匀性的控制有重要的指导作用。

(2) 采用分析解法、数值解法以及电热模拟方法对冷却过程进行数学描述

采用分析解法推导钢板冷却过程的一维非稳态温度场的解,证明多维非稳态导热的乘积解法;构建导热问题的二维差分方程;用电热模拟方法推导一维非稳态导热方程。

(3) 空冷和水冷模型的研究

确立空冷换热系数模型,分析空冷和返红时的温度分布规律;建立适合该套冷却系统的水冷换热系数模型,并着重分析水流量、钢板温度、水温对水冷换热系数的影响。

(4) 热物性参数的选取

针对模型中重要的热物性参数比热和热传导率随温度和含碳量变化而变化的情况,建立以温度和含碳量为自变量的热物性参数模型,以提高温降计算模型的精度,使之适应更多品种和适用于更广泛的冷却温度区间。

(5) 厚度上的温度分布特点及影响因素

轧件厚度方向上的温度分布往往是冷却计算中的难点和重点,文中着重分析钢板厚度上温度分布的特点及相变热、热传导系数、比热系数、含碳量、冷却时间、钢板厚度、水流量等因素对温度场的影响。

(6) 均匀冷却的控制策略研究

针对中厚板冷却过程中宽度上温度分布不均,建立边部遮蔽模型,并于国内首次实现边部凸度遮蔽的在线应用;针对中厚板冷却过程中厚度上的温度分布特点,于国内首次提出并实现了大集管—小集管—大集管的排列方式;针对中厚板冷却过程中长度方向上存在局部温度波动和头尾低温段,在控制上实施分段微跟踪方法;针对钢板中部的温度梯度,建立加速度模型。

(7) 控制冷却模型和均匀冷却策略的在线应用

介绍首钢中厚板厂控制冷却系统的工艺参数和硬件配置情况,并将本文的研究成果在现场投入使用,使产品的各项性能达到规定的指标。

第2章 中厚板冷却过程的数学描述

在钢板导热求解问题上,分析求解、数值计算、图解方法等是人们常常用到的方法。通常分析解能给出各种因素(如边界条件等)对物体内部温度分布的影响,但计算量大并且对边界条件复杂等情况无能为力;数值计算方法对边界条件复杂、参数变物性等情况都能很好地解决,尤其是随着电子计算机的发展,数值计算方法的实用性越来越明显,特别是它的计算精度已经远远超过了人们的期望值。下面将采用分析解法和数值解法分别对冷却过程进行求解^[75]。

对钢板水冷过程进行导热分析,首先假定以下条件:[1] 周围环境——钢板表面以对流换热形式与外界进行热交换,满足第三类边界,钢板边界与冷却介质间的表面换热系数和冷却介质的温度为已知参数。[2] 物性条件——钢板的比热、热传导率、密度都是随温度变化的物性量。因为密度对温度的依赖性非常小,因此选用 7800kg/m^3 这一固定值。比热和热传导率不仅和温度有关,而且和钢种密切相关,因此根据一定温度、一定含碳量条件下的离散曲线拟合成适合计算机计算的连续曲线,拟合方法在第四章有具体描述。[3] 温度场——钢板冷却过程为非稳态导热,虽然由于冷却区间有相变发生,产生相变热,但其对温度场的影响可以通过比热和热传导系数随温度的变化来表现,因而假设为无内热源的冷却过程。

2.1 中厚板冷却过程的分析求解

以数学分析为基础,求解导热微分方程定解问题或其他形式耗热问题,得到用函数形式表示的解为分析解。分析解的优点是,整个求解过程中物理概念与逻辑推理都比较清晰;求解过程所依据的数学基础大都有严格的证明;求解的最后结果比较清楚地表示出各种因素(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。分析解的另一个优点是,可用它的结果作为其他各种方法,尤其是数值求解方法精确性的一种检验。

分析解法的缺点是,它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,分析求解几乎全部无能为力。针对这种情况,在实际采用分析解时,权衡它的利和弊两个方面,在一定条件下,对原有问题作一些理想化假设,可得到比较简单的数学模型,便于分析求解。

考虑到钢板冷却过程属于非稳态导热过程,下面将对一维和二维非稳态导热过程进行分析。

2.1.1 一维非稳态导热过程的分析求解

为方便对二维、三维温度场的分析，我们先来分析厚度方向上的一维温度场。

假设钢板两个表面与环境对流换热的情況是一样的，则钢板内部温度以 1/2 厚度为对称面分布。

根据传热学原理，钢板冷却的热传导方程可表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Aq'}{\rho \cdot c_p} \quad (2-1)$$

式中， q' —单位时间和单位体积内的发热量，kJ；

A —单位换算系数。

忽略内热源且只考虑一维温度场，则方程(2-1)可写为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\tau > 0, 0 < x < \frac{h}{2}) \quad (2-2)$$

初始条件为

$$t = 0, \quad T = f_1(x) \quad (2-3)$$

边界条件为

$$\begin{aligned} x = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} &= 0 \\ x = \frac{h}{2}, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha(T_\infty - T) \end{aligned} \quad (2-4)$$

为便于求解，引入新变量过余温度 $\theta = T - T_\infty$ ，则方程(2-2)、(2-3)、(2-4)为

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2-5)$$

$$t = 0, \quad \theta = f(x) \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} x = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} &= 0 \\ x = \frac{h}{2}, \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial t} &= -\alpha \theta \end{aligned} \quad (2-7)$$

在这里采用分离变量法来解方程，令方程(2-4)的解为

$$\theta(x) = X(x) \cdot V(t) \quad (2-8)$$

代入方程(2-5)得

$$X''(x) \cdot V(t) = \frac{1}{a} X(x) \cdot V'(t)$$

整理得

$$\frac{X''(x)}{X(x)} = \frac{1}{a} \frac{V'(t)}{V(t)} \quad (2-9)$$

方程(2-9)的等号两端分别为 x 和 t 的函数, 所以这个等式成立的条件只能是它们都恒等于一个常数, 假设为 η , 则方程(2-9)化为

$$\begin{aligned} X''(x) - \eta X(x) &= 0 \\ V'(t) - \eta V(t) &= 0 \end{aligned}$$

这两个方程的一般解为

$$\begin{aligned} X &= C \cos \eta x + D \sin \eta x \\ V &= A e^{a\eta} \end{aligned} \quad (2-10)$$

若 η 为正值, 则 $t \rightarrow \infty$ 时, $V(t)$ 即 $\theta(x, t)$ 趋于无穷大, 这在物理上是毫无意义的; 若 η 为负值, 则 $t \rightarrow \infty$ 时, $V(t)$ 即 $\theta(x, t)$ 趋于零, 即钢板温度与环境温度趋于一致, 所以 η 应为负数, 令 $\eta = -\xi^2$ 。把式(2-10)代入方程(2-8), 得

$$\theta(x) = (C \cos \eta x + D \sin \eta x) \cdot e^{-a\xi^2 t} \quad (2-11)$$

将式(2-11)代入边界条件(2-7)中, 可解得

$$-C\xi e^{-a\xi^2 t} \sin(\xi h/2) = -\frac{\alpha}{\lambda} C e^{-a\xi^2 t} \cos(\xi h/2) \quad (2-12)$$

该式中的 η 是下列超越方程的根:

$$\frac{1}{Bi} \mu = \operatorname{ctg} \mu$$

式中, $Bi = \frac{\alpha h}{2\lambda}$, $\mu = \frac{\xi h}{2}$ 。采用图解方法, 绘出 $y = \frac{1}{Bi} \mu$ 和 $y = \operatorname{ctg} \mu$ 的曲线, 即

可求特征根 μ_n 。将不同的特征值代入(2-11), 得

$$\theta_n = C_n \cos \mu_n \frac{x}{h/2} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{(h/2)^2}}, n=1,2,\dots \quad (2-13)$$

所以方程(2-5)解为

$$\theta(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \mu_n \frac{x}{h/2} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{(h/2)^2}} \quad (2-14)$$

该解满足初值条件(2-6), 即

$$\theta(x,0) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \mu_n \frac{x}{h/2} \quad (2-15)$$

解方程(2-15)得方程(2-5)的解为

$$\theta(x,t) = T(x,t) - T_{\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\mu_n}{h} \cdot \frac{\int_0^h f(x) \cos \mu_n \frac{x}{h/2} dx}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cdot \cos \mu_n \frac{x}{h/2} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{(h/2)^2}} \quad (2-16)$$

对初始温度是均匀分布的问题, 即

$$T(x,0) = f_1(x) = T_0$$

所以

$$\theta(x,0) = f(x) = f_1(x) - T_{\infty} = T_0 - T_{\infty} = \text{const}$$

式(2-16)中的积分

$$\int_0^h f(x) \cos \mu_n \frac{x}{h/2} dx = \frac{h}{2\mu_n} (T_0 - T_{\infty}) \sin \mu_n$$

代入式(2-16), 得

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \mu_n \frac{x}{h/2} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{(h/2)^2}} \quad (2-17)$$

$$\text{式中, } C_n = \frac{4 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}.$$

从以上的分析解可以得到以 $\frac{\alpha \tau}{h^2}$ 为自变量, 以 $\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$ 为因变量, 以 $Bi = \frac{\alpha h}{\lambda}$ 为参

变量的温度响应曲线。当 Bi 较大时, 钢板表面的温度迅速接近介质温度, 而后渐变, 钢板内部各点的温度响应是不同的; 当 Bi 较小时, 钢板内部各点的温度响应都是一个渐变过程, 而且过程彼此接近。

2.1.2 二维非稳态导热过程的分析求解

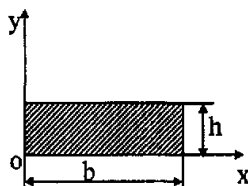


图 2.1 钢板横截面上的坐标选取

Fig.2.1 Coordinate of the plate cross-section

分析二维温度场的目的是要找出二维温度场与前述一维温度场之间的关系，鉴于温度场分布的对称性，取钢板截面上四分之一区域为研究对象，钢板的界面如图 2.1 所示，则导热方程(2-1)可写为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2-18)$$

引入无量纲过余温度 $\Theta = \frac{T(x, y, t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \frac{\theta}{\theta_0}$ 作为求解变量，于是导热方程及定

解条件可写成如下数学描述

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right) \quad (2-19)$$

$$\Theta(x, y, 0) = 1 \quad (2-20)$$

$$\Theta(b, y, t) + \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial \Theta(x, y, t)}{\partial x} \bigg|_{x=b} = 0 \quad (2-21)$$

$$\Theta(x, h, t) + \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial \Theta(x, y, t)}{\partial y} \bigg|_{y=h} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta(x, y, t)}{\partial x} \bigg|_{x=0} &= 0 \\ \frac{\partial \Theta(x, y, t)}{\partial y} \bigg|_{y=0} &= 0 \end{aligned} \quad (2-22)$$

若无量纲过余温度 $\Theta_x(x, t)$ 及 $\Theta_y(x, t)$ 分别是处于与冷却钢板同样定解条件下的厚度分别为 b 和 h 的无限大平板的分析解，那么它们必须满足各自的导热微分方程及定解条件，即

$$a \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \Theta_x}{\partial t} \quad (a)$$

$$\Theta_x(x, 0) = 1 \quad (b)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \Theta_x(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0 \\ \Theta_x(b, t) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \left. \frac{\partial \Theta_x(x, t)}{\partial x} \right|_{x=b} &= 0 \end{aligned} \quad (c)$$

及

$$a \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = \frac{\partial \Theta_y}{\partial t} \quad (e)$$

$$\Theta_y(y, 0) = 1 \quad (d)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \Theta_y(y, t)}{\partial y} \right|_{y=0} &= 0 \\ \Theta_y(h, t) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \left. \frac{\partial \Theta_y(y, t)}{\partial y} \right|_{y=h} &= 0 \end{aligned} \quad (f)$$

我们可以证明这两块无限大平板分析解的乘积就是前述二维温度场的解，即

$$\Theta(x, y, t) = \Theta_x(x, t) \cdot \Theta_y(y, t) \quad (2-23)$$

将式(2-23)代入式(2-19)，得

$$\text{方程左端} \quad \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial (\Theta_x \cdot \Theta_y)}{\partial t} = \Theta_x \frac{\partial \Theta_y}{\partial t} + \Theta_y \frac{\partial \Theta_x}{\partial t}$$

$$\text{方程右端} \quad a \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right) = a \left(\Theta_y \frac{\partial^2 \Theta_x}{\partial x^2} + \Theta_x \frac{\partial^2 \Theta_y}{\partial y^2} \right)$$

左端减去右端，得

$$\begin{aligned} & \Theta_x \frac{\partial \Theta_y}{\partial t} + \Theta_y \frac{\partial \Theta_x}{\partial t} - a \left(\Theta_y \frac{\partial^2 \Theta_x}{\partial x^2} + \Theta_x \frac{\partial^2 \Theta_y}{\partial y^2} \right) \\ &= \Theta_x \left(\frac{\partial \Theta_y}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Theta_y}{\partial y^2} \right) + \Theta_y \left(\frac{\partial \Theta_x}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Theta_x}{\partial x^2} \right) \\ &= \Theta_x \times 0 + \Theta_y \times 0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

这就证明了方程(2-23)满足方程(2-19)。

方程(2-23)也满足初始条件(2-20)，根据式(b)及(e)有

$$\Theta_x(x,0) \cdot \Theta_y(y,0) = 1 \times 1 = 1$$

同时方程(2-23)也满足边界条件(2-21)、(2-22)，将式(2-23)代入(2-21)中第一式的左端，并注意到(d)式的关系得

$$\begin{aligned} & \Theta_x(b,t) \cdot \Theta_y(h,t) + \Theta_y(y,t) \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial \Theta_x(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=b} \\ &= \Theta_y(y,t) \left[\Theta_x(b,t) + \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial \Theta_x(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=b} \right] \\ &= \Theta_y(y,t) \times 0 = 0 \end{aligned}$$

再将式(2-23)代入(2-22)中第一式的左端，并且根据(c)式，得

$$\frac{\partial \Theta_x(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=0} \Theta_y(y,t) = 0 \times \Theta_y(y,t) = 0$$

至此已证明 $\Theta_x(x,t) \cdot \Theta_y(y,t)$ 是二维温度场的解析解。

同理可证明，钢板三维非稳态导热问题可以应用三个一维问题的解的乘积来表示温度分布，这就是多维非稳态导热的乘积解法。

上述解法中假设边界条件为稳定的对流换热，对于复杂的边界条件问题或复杂几何形状的物体以及变物性参数，分析解法就无能为力了。在这种情况下，往往采用数值解法或试验模拟方法。

2.2 中厚板冷却过程的数值分析

数值求解方法是以离散数学为基础，以计算机为工具的一种求解方法。它的理论基础远不如分析解那样坚实、严密。但是，它在实际应用方面却显出很大的适应性。对钢板冷却过程中遇到的变物性参数、辐射边界条件非线性等问题，用数值求解方法都能较好地解决。尤其是计算机技术得到普遍应用后，数值计算的精度与速度都大大提高。到目前为止，一般稍微复杂的导热问题几乎都依靠数值法求解。

作为温度解析的数值解法主要有有限差分法和有限元素法。有限元素法的数学基础是变分原理和剖分插值，适合具有复杂几何形状的物体。有限差分法的物理基础是能量守恒定律，它的基本思想是把本来求解物体内部温度随空间、时间连续分布

这就证明了方程(2-23)满足方程(2-19)。

方程(2-23)也满足初始条件(2-20)，根据式(b)及(e)有

$$\Theta_x(x,0) \cdot \Theta_y(y,0) = 1 \times 1 = 1$$

同时方程(2-23)也满足边界条件(2-21)、(2-22)，将式(2-23)代入(2-21)中第一式的左端，并注意到(d)式的关系得

$$\begin{aligned} & \Theta_x(b,t) \cdot \Theta_y(h,t) + \Theta_y(y,t) \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial \Theta_x(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=b} \\ &= \Theta_y(y,t) \left[\Theta_x(b,t) + \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial \Theta_x(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=b} \right] \\ &= \Theta_y(y,t) \times 0 = 0 \end{aligned}$$

再将式(2-23)代入(2-22)中第一式的左端，并且根据(c)式，得

$$\frac{\partial \Theta_x(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=0} \Theta_y(y,t) = 0 \times \Theta_y(y,t) = 0$$

至此已证明 $\Theta_x(x,t) \cdot \Theta_y(y,t)$ 是二维温度场的解析解。

同理可证明，钢板三维非稳态导热问题可以应用三个一维问题的解的乘积来表示温度分布，这就是多维非稳态导热的乘积解法。

上述解法中假设边界条件为稳定的对流换热，对于复杂的边界条件问题或复杂几何形状的物体以及变物性参数，分析解法就无能为力了。在这种情况下，往往采用数值解法或试验模拟方法。

2.2 中厚板冷却过程的数值分析

数值求解方法是以离散数学为基础，以计算机为工具的一种求解方法。它的理论基础远不如分析解那样坚实、严密。但是，它在实际应用方面却显出很大的适应性。对钢板冷却过程中遇到的变物性参数、辐射边界条件非线性等问题，用数值求解方法都能较好地解决。尤其是计算机技术得到普遍应用后，数值计算的精度与速度都大大提高。到目前为止，一般稍微复杂的导热问题几乎都依靠数值法求解。

作为温度解析的数值解法主要有有限差分法和有限元素法。有限元素法的数学基础是变分原理和剖分插值，适合具有复杂几何形状的物体。有限差分法的物理基础是能量守恒定律，它的基本思想是把本来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与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。控制冷却系统中的研究对象为规则形状的钢板, 并且温度随时间变化, 因而作者选取有限差分法作为温度场计算的方法, 并采用中心差分形式, 以隐式格式进行求解。下面将对差分的选取及求解进行分析。

2.2.1 截断误差的分析

有限差分的数学基础是用差商代替微商, 一阶差商主要有以下三种表达方式:

向右(前)差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x}$$

向左(后)差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x}$$

中心差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} + \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x} \right] = \frac{T(x+\Delta x) - T(x-\Delta x)}{2\Delta x}$$

根据 Taylor 公式分析可知, 向右差商与向左差商的截断误差为与 Δx 同量级的小量 $O(\Delta x)$, 而中心差商的截断误差是与 $(\Delta x)^2$ 同量级的小量。显然, 中心差商的截断误差小于向右差商或向左差商, 这就是为什么作者选取中心差分的原因。

二阶差商常用向右差商的向左差商来近似二阶微商, 即

$$\frac{d^2T}{dx^2} \approx \frac{\frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} - \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T(x+\Delta x) - 2T(x) + T(x-\Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

根据 Taylor 公式分析可知二阶差商的截断误差也为与 $(\Delta x)^2$ 同阶的小量。

用差分方程代替微分方程必然带来截断误差, 这是有限差分法固有的。但在工程计算上, 只要选择合理的差分格式和算法, 其误差可以满足控制精度要求。

2.2.2 差分格式的选取

为讨论问题的方便, 我们先以一维导热方程为例来确定差分格式及分析差分方程的稳定性。

将一维导热方程(2-2)应用到节点 i , 写成如下形式:

的问题, 转化为求在时间领域与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。控制冷却系统中的研究对象为规则形状的钢板, 并且温度随时间变化, 因而作者选取有限差分法作为温度场计算的方法, 并采用中心差分形式, 以隐式格式进行求解。下面将对差分的选取及求解进行分析。

2.2.1 截断误差的分析

有限差分的数学基础是用差商代替微商, 一阶差商主要有以下三种表达方式:

向右(前)差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x}$$

向左(后)差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x}$$

中心差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} + \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x} \right] = \frac{T(x+\Delta x) - T(x-\Delta x)}{2\Delta x}$$

根据 Taylor 公式分析可知, 向右差商与向左差商的截断误差为与 Δx 同量级的小量 $O(\Delta x)$, 而中心差商的截断误差是与 $(\Delta x)^2$ 同量级的小量。显然, 中心差商的截断误差小于向右差商或向左差商, 这就是为什么作者选取中心差分的原因。

二阶差商常用向右差商的向左差商来近似二阶微商, 即

$$\frac{d^2T}{dx^2} \approx \frac{\frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} - \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T(x+\Delta x) - 2T(x) + T(x-\Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

根据 Taylor 公式分析可知二阶差商的截断误差也为与 $(\Delta x)^2$ 同阶的小量。

用差分方程代替微分方程必然带来截断误差, 这是有限差分法固有的。但在工程计算上, 只要选择合理的差分格式和算法, 其误差可以满足控制精度要求。

2.2.2 差分格式的选取

为讨论问题的方便, 我们先以一维导热方程为例来确定差分格式及分析差分方程的稳定性。

将一维导热方程(2-2)应用到节点 i , 写成如下形式:

的问题, 转化为求在时间领域与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。控制冷却系统中的研究对象为规则形状的钢板, 并且温度随时间变化, 因而作者选取有限差分法作为温度场计算的方法, 并采用中心差分形式, 以隐式格式进行求解。下面将对差分的选取及求解进行分析。

2.2.1 截断误差的分析

有限差分的数学基础是用差商代替微商, 一阶差商主要有以下三种表达方式:

向右(前)差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x}$$

向左(后)差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x}$$

中心差商

$$\frac{dT}{dx} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} + \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x} \right] = \frac{T(x+\Delta x) - T(x-\Delta x)}{2\Delta x}$$

根据 Taylor 公式分析可知, 向右差商与向左差商的截断误差为与 Δx 同量级的小量 $O(\Delta x)$, 而中心差商的截断误差是与 $(\Delta x)^2$ 同量级的小量。显然, 中心差商的截断误差小于向右差商或向左差商, 这就是为什么作者选取中心差分的原因。

二阶差商常用向右差商的向左差商来近似二阶微商, 即

$$\frac{d^2T}{dx^2} \approx \frac{\frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} - \frac{T(x) - T(x-\Delta x)}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T(x+\Delta x) - 2T(x) + T(x-\Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

根据 Taylor 公式分析可知二阶差商的截断误差也为与 $(\Delta x)^2$ 同阶的小量。

用差分方程代替微分方程必然带来截断误差, 这是有限差分法固有的。但在工程计算上, 只要选择合理的差分格式和算法, 其误差可以满足控制精度要求。

2.2.2 差分格式的选取

为讨论问题的方便, 我们先以一维导热方程为例来确定差分格式及分析差分方程的稳定性。

将一维导热方程(2-2)应用到节点 i , 写成如下形式:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i^{n+1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i^n = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^{n+\frac{1}{2}} \quad (2-24)$$

该式的物理意义为：节点 i 在时刻 n 到时刻 $n+1$ 的时间间隔内的温度增长所需的热量，一半是由于节点 i 在时刻 n 由其邻近节点导入能量的结果，另一半是由于节点 i 在时刻 $n+1$ 由其邻近节点导入能量的结果。对方程(2-24)右端温度对时间的偏微商用 $\tau_n - \frac{1}{2} \Delta \tau$ 时刻的中心差商来近似。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^{n+\frac{1}{2}} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta \tau} + O((\Delta \tau)^2) \quad (2-25)$$

将式(2-25)与二阶差商代入式(2-24)，整理得到一维导热方程的差分方程为

$$\frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{2} \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{a} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta \tau}$$

整理，得到

$$\begin{aligned} -f \cdot T_{i+1}^{n+1} + 2(1+f)T_i^{n+1} - f \cdot T_{i-1}^{n+1} &= fT_{i+1}^n + 2(1-f)T_i^n + fT_{i-1}^n \\ n=0,1,2,\dots, i=2,3,\dots \end{aligned} \quad (2-26)$$

式中， $f = \frac{a\tau}{(\Delta x)^2}$ 。

该式表示第 $n+1$ 排上相邻三个节点的值与第 n 排上三个对应节点的值之间的关系，如图 2.2 所示。该格式又称“六点差分格式”或“Crank-Nicolson 差分式”。

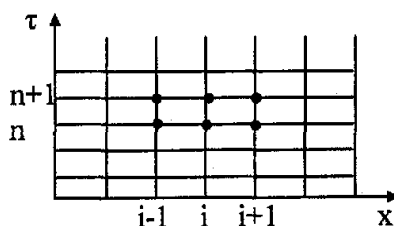


图 2.2 六点差分格式

Fig.2.2 Difference scheme of six point

式(2-25)的误差传播方程为

$$-f \cdot \varepsilon_{i+1}^{n+1} + 2(1+f)\varepsilon_i^{n+1} - f \cdot \varepsilon_{i-1}^{n+1} = f\varepsilon_{i+1}^n + 2(1-f)\varepsilon_i^n + f\varepsilon_{i-1}^n \quad (2-27)$$

相应的增长因子为

$$\omega = \frac{1 - 2f \sin^2 \frac{k\Delta x}{2}}{1 + 2f \sin^2 \frac{k\Delta x}{2}}$$

对于一切大于零的 f 值均有

$$\omega < 1$$

所以，六点差分格式是无条件稳定的。

六点差分格式的优点是截断误差小，而且是一种隐式差分，因此本论文中的温度迭代计算均采用六点差分格式。

2.2.3 中厚板冷却过程差分方程的建立

钢板的长度远远大于宽度和厚度，认为只有宽度和厚度方向存在温差，因此在本论文中主要对二维温度场进行求解分析。

与一维导热方程(2-3)、(2-4)、(2-5)相对应的二维导热方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2-28)$$

初始条件为

$$T(x, y, 0) = \Phi(T), (t = 0, 0 \leq x \leq h/2, 0 \leq y \leq B/2) \quad (2-29)$$

边界条件为

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= h(T - T_\infty), (x = h/2, t \geq 0) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= h(T - T_\infty), (y = B/2, t \geq 0) \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial T}{\partial y} = 0, (t \geq 0, x = 0, y = 0) \end{aligned} \quad (2-30)$$

式中， $\Phi(T)$ —钢板断面初始温度分布。

把导热微分方程(2-27)应用于节点 (i, j) ，可写成如下形式：

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j}^{k+1} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j}^k = \frac{C_p \rho}{\lambda} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,j}^k$$

$$-f \cdot \varepsilon_{i+1}^{n+1} + 2(1+f)\varepsilon_i^{n+1} - f \cdot \varepsilon_{i-1}^{n+1} = f\varepsilon_{i+1}^n + 2(1-f)\varepsilon_i^n + f\varepsilon_{i-1}^n \quad (2-27)$$

相应的增长因子为

$$\omega = \frac{1 - 2f \sin^2 \frac{k\Delta x}{2}}{1 + 2f \sin^2 \frac{k\Delta x}{2}}$$

对于一切大于零的 f 值均有

$$\omega < 1$$

所以，六点差分格式是无条件稳定的。

六点差分格式的优点是截断误差小，而且是一种隐式差分，因此本论文中的温度迭代计算均采用六点差分格式。

2.2.3 中厚板冷却过程差分方程的建立

钢板的长度远远大于宽度和厚度，认为只有宽度和厚度方向存在温差，因此在本论文中主要对二维温度场进行求解分析。

与一维导热方程(2-3)、(2-4)、(2-5)相对应的二维导热方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2-28)$$

初始条件为

$$T(x, y, 0) = \Phi(T), (t = 0, 0 \leq x \leq h/2, 0 \leq y \leq B/2) \quad (2-29)$$

边界条件为

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= h(T - T_\infty), (x = h/2, t \geq 0) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= h(T - T_\infty), (y = B/2, t \geq 0) \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial T}{\partial y} = 0, (t \geq 0, x = 0, y = 0) \end{aligned} \quad (2-30)$$

式中， $\Phi(T)$ —钢板断面初始温度分布。

把导热微分方程(2-27)应用于节点 (i, j) ，可写成如下形式：

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j}^{k+1} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j}^k = \frac{C_p \rho}{\lambda} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,j}^k$$

对上述方程采用可取得稳定数值解的 Crank-Nicolson 差分法，得

$$\frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{a} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t}$$

钢板表面对流边界条件的差分式（边界为虚拟节点）为

$$\begin{aligned} -\lambda(T_{L+1,j}^{K+1} - T_{L,j}^{K+1})/2\Delta x &= h(T_{L,j}^{K+1} - T_a) \\ -\lambda(T_{i,M+1}^{K+1} - T_{i,M}^{K+1})/2\Delta y &= h(T_{i,M}^{K+1} - T_a) \end{aligned} \quad (2-31)$$

即

$$\begin{aligned} T_{L+1,j}^{K+1} + \frac{2h\Delta x}{\lambda} T_{L,j}^{K+1} - T_{L-1,j}^{K+1} &= \frac{2h\Delta x}{\lambda} T_a \\ T_{i,M+1}^{K+1} + \frac{2h\Delta y}{\lambda} T_{i,M}^{K+1} - T_{i,M-1}^{K+1} &= \frac{2h\Delta y}{\lambda} T_a \end{aligned}$$

为了既能保证格式的绝对稳定性，又使计算工作量不增加，采用交替方向法进行求解，即在使用隐式格式时交换改变方向，先对一次 $\Delta \tau$ 增量取 x ，方向为隐式格式，再对下一次 $\Delta \tau$ ，取 y 方向为隐式格式。这样方程中只包含三个未知量，它所对应的方程组的系数矩阵具有三对角线的特点，可用追赶法求解。这样，每增加一次 $\Delta \tau$ 它的计算工作量与单一方向使用隐式格式是相同的，这种格式的具体形式为

$$\begin{aligned} \frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} &= \frac{C_p \rho}{\lambda} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} \\ \frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+2} - 2T_{i,j}^{k+2} + T_{i,j-1}^{k+2}}{(\Delta y)^2} &= \frac{C_p \rho}{\lambda} \frac{T_{i,j}^{k+2} - T_{i,j}^{k+1}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2-32)$$

对上式整理，得

$$\begin{aligned} fx(T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}) + fy(T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k) &= T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k \\ fx(T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}) + fy(T_{i,j+1}^{k+2} - 2T_{i,j}^{k+2} + T_{i,j-1}^{k+2}) &= T_{i,j}^{k+2} - T_{i,j}^{k+1} \end{aligned}$$

整理成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} (2+fx) & -2fx & & & \\ -fx & (2+fx) & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \dots & \\ & -2fx & (1+2fx+2fx\frac{h\Delta x}{\lambda}) & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1,j} \\ T_{2,j} \\ \vdots \\ T_{L,j} \end{bmatrix}^{n+1}$$

$$= \begin{bmatrix} (1-2fy) & -2fy & & & \\ fy & (1-2fy) & fy & & \\ & \dots & \dots & & \\ & & fy & (1-2fy) & fy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i,1} \\ T_{i,2} \\ \vdots \\ T_{i,L} \end{bmatrix}^n + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 2f \frac{h\Delta x}{\lambda} T_w \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

$$\text{式中, } fx = \frac{\alpha\Delta\tau}{(\Delta x)^2}, fy = \frac{\alpha\Delta\tau}{(\Delta y)^2}, \alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}。$$

在给定对流换热边界条件时, 如果知道钢板某一时刻各节点的温度, 其后任一时刻钢板的温度分布变化情况即可由上述差分方程联立求得。

假定终轧时钢板断面温度分布是均匀的, 钢板从轧机出来到冷却区的过程中, 钢板处于空冷状态下, 散热方式主要是辐射和对流。给出此时的综合换热系数, 仍可以把这种边界条件当作对流边界条件去处理, 即上述方程依然适用。这就是说求出开冷时的温度分布, 以此作为水冷时的初始条件, 并利用给定的边界条件, 即可继续求得钢板水冷过程中温度分布随时间的变化情况。

以后各章的温降模拟计算都是根据不同的初始条件和边界条件、以差分方法为基础进行的。

2.3 本章小节

(1) 采用分析求解方法推导了钢板冷却过程一维非稳态导热的解, 从分析结果上得到钢板厚度上温度分布的特点是: 当 Bi 较大时, 钢板表面的温度迅速接近介质温度, 而后渐变, 钢板内部各点的温度响应是不同的; 当 Bi 较小时, 钢板内部各点的温度响应都是一个渐变过程, 而且过程彼此接近。

通过推导证明了两块无限大平板分析解的乘积就是二维温度场的解, 三维温度场可以应用三个一维问题解析解的乘积来表示, 即证明了多维非稳态导热的乘积解法。

(2) 分析了钢板冷却过程中辐射和对流情况下的边界条件和初始条件, 采用六点差分格式建立了中厚板控制冷却的二维差分方程, 该方程截断误差小且无条件稳定, 为隐式差分法。

$$= \begin{bmatrix} (1-2fy) & -2fy & & & \\ fy & (1-2fy) & fy & & \\ & \dots & \dots & & \\ & & fy & (1-2fy) & fy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i,1} \\ T_{i,2} \\ \vdots \\ T_{i,L} \end{bmatrix}^n + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 2f \frac{h\Delta x}{\lambda} T_w \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

$$\text{式中, } fx = \frac{\alpha\Delta\tau}{(\Delta x)^2}, fy = \frac{\alpha\Delta\tau}{(\Delta y)^2}, \alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}。$$

在给定对流换热边界条件时, 如果知道钢板某一时刻各节点的温度, 其后任一时刻钢板的温度分布变化情况即可由上述差分方程联立求得。

假定终轧时钢板断面温度分布是均匀的, 钢板从轧机出来到冷却区的过程中, 钢板处于空冷状态下, 散热方式主要是辐射和对流。给出此时的综合换热系数, 仍可以把这种边界条件当作对流边界条件去处理, 即上述方程依然适用。这就是说求出开冷时的温度分布, 以此作为水冷时的初始条件, 并利用给定的边界条件, 即可继续求得钢板水冷过程中温度分布随时间的变化情况。

以后各章的温降模拟计算都是根据不同的初始条件和边界条件、以差分方法为基础进行的。

2.3 本章小节

(1) 采用分析求解方法推导了钢板冷却过程一维非稳态导热的解, 从分析结果上得到钢板厚度上温度分布的特点是: 当 Bi 较大时, 钢板表面的温度迅速接近介质温度, 而后渐变, 钢板内部各点的温度响应是不同的; 当 Bi 较小时, 钢板内部各点的温度响应都是一个渐变过程, 而且过程彼此接近。

通过推导证明了两块无限大平板分析解的乘积就是二维温度场的解, 三维温度场可以应用三个一维问题解析解的乘积来表示, 即证明了多维非稳态导热的乘积解法。

(2) 分析了钢板冷却过程中辐射和对流情况下的边界条件和初始条件, 采用六点差分格式建立了中厚板控制冷却的二维差分方程, 该方程截断误差小且无条件稳定, 为隐式差分法。

第3章 中厚板控制冷却模型的研究

中厚板控制冷却过程是难以用精确的数学模型描述与控制的复杂过程^[48], 终冷温度控制与轧件材质、速度、厚度上的温度分布等众多因素密切相关, 也与复杂的边界条件有关。和在绪论中提到的诸多数学模型一样, 应以理论为指导, 结合现场实际和操作经验, 因地制宜, 因厂而异地建立具有自己特色的数学模型。

下面以传热方程为基础, 介绍钢板冷却过程中的空冷模型、水冷模型及自学习模型。

3.1 冷却过程中的传热方程

物体热量的传递有三种基本方式, 即导热、对流和辐射。轧件在水冷之前的轧制、运输过程中, 轧件的温度变化是由于轧件与介质间的辐射、对流传导的热量损失以及金属的部分变形能转化成热能引起的^[75]。轧件水冷时, 轧件与冷却水之间以对流换热形式进行热量交换, 随着轧件温度降低, 轧件内部发生相变而产生相变热, 此阶段这两个因素共同作用影响着轧件温度变化。水冷后轧件又主要处在与空气的对流换热条件下。下面将介绍轧件冷却过程中所涉及的辐射、对流、热传导的传热方程和温降方程以及在此基础上建立的中厚板控制冷却数学模型。

3.1.1 冷却过程中的辐射传热

钢板在输送过程中通过轧件的高温表面以辐射的形式向外散失热量。根据 Stefan-Boltzman 定律, 轧件辐射的热能 E 与轧件的绝对温度的四次方成正比:

$$E = \varepsilon \sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 2F \quad (3-1)$$

式中, E —轧件辐射的热能,

F —轧件的散热面积, m^2 ;

ε —辐射系数, $\varepsilon < 1$, 视表面的情况而定, 当氧化铁皮较多时取 0.8, 刚轧出的平滑表面取 0.55~0.65, 具体值需根据试验确定。

轧件在输送过程中, 温度为 t_0 的周围介质也在辐射热能。假定轧件的吸收系数与辐射系数相等, 则轧件从周围介质中吸收的热能为 E' , 因此轧件实际散失的热量是 E 与 E' 之差, 则在时间 τ 内轧件散失的热量 Q 为:

第3章 中厚板控制冷却模型的研究

中厚板控制冷却过程是难以用精确的数学模型描述与控制的复杂过程^[48], 终冷温度控制与轧件材质、速度、厚度上的温度分布等众多因素密切相关, 也与复杂的边界条件有关。和在绪论中提到的诸多数学模型一样, 应以理论为指导, 结合现场实际和操作经验, 因地制宜, 因厂而异地建立具有自己特色的数学模型。

下面以传热方程为基础, 介绍钢板冷却过程中的空冷模型、水冷模型及自学习模型。

3.1 冷却过程中的传热方程

物体热量的传递有三种基本方式, 即导热、对流和辐射。轧件在水冷之前的轧制、运输过程中, 轧件的温度变化是由于轧件与介质间的辐射、对流传导的热量损失以及金属的部分变形能转化成热能引起的^[75]。轧件水冷时, 轧件与冷却水之间以对流换热形式进行热量交换, 随着轧件温度降低, 轧件内部发生相变而产生相变热, 此阶段这两个因素共同作用影响着轧件温度变化。水冷后轧件又主要处在与空气的对流换热条件下。下面将介绍轧件冷却过程中所涉及的辐射、对流、热传导的传热方程和温降方程以及在此基础上建立的中厚板控制冷却数学模型。

3.1.1 冷却过程中的辐射传热

钢板在输送过程中通过轧件的高温表面以辐射的形式向外散失热量。根据 Stefan-Boltzman 定律, 轧件辐射的热能 E 与轧件的绝对温度的四次方成正比:

$$E = \varepsilon \sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 2F \quad (3-1)$$

式中, E —轧件辐射的热能,

F —轧件的散热面积, m^2 ;

ε —辐射系数, $\varepsilon < 1$, 视表面的情况而定, 当氧化铁皮较多时取 0.8, 刚轧出的平滑表面取 0.55~0.65, 具体值需根据试验确定。

轧件在输送过程中, 温度为 t_0 的周围介质也在辐射热能。假定轧件的吸收系数与辐射系数相等, 则轧件从周围介质中吸收的热能为 E' , 因此轧件实际散失的热量是 E 与 E' 之差, 则在时间 τ 内轧件散失的热量 Q 为:

$$\begin{aligned} Q &= -(E - E')\tau \\ &= -\varepsilon\sigma A' \left(\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right) 2F\tau \end{aligned}$$

式中, Q —轧件辐射散失的热量, kJ;

E —轧件散失到周围介质中的热能, kJ/h;

E' —轧件从周围介质吸收的热能, kJ/h;

τ —时间, h;

T_0 —周围介质的温度, K;

A' —当量系数。

由于 $t_0 \ll t$, 其四次方的差别就更小, 因此可忽略介质的温度不计。采用微分形式, 上式可写成:

$$dQ = -\varepsilon\sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 2Fd\tau$$

随着热量的散失, 轧件的温度会下降, 当它的温降为 dt 时, 则轧件热含量的变化为:

$$dQ = m \cdot c_p \cdot dt = c_p \rho h F dt$$

式中, m —质量, kg;

h —轧件厚度, m。

轧件散失的热量应等于热含量的变化, 故:

$$c_p \rho h F dt = -\varepsilon\sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 2Fd\tau$$

因此轧件辐射温降公式为

$$dt = -\frac{2\varepsilon\sigma}{c_p \rho h} \left(\frac{T}{100} \right)^4 d\tau$$

假设轧件的初始温度、最终温度分别为 T_1 、 T_2 , 而 τ_1 、 τ_2 表示初始时刻和最终时刻, 并假设热容量、比重、辐射系数物理参数取平均值后与温度无关, 则对上式两边进行积分, 得

$$T_2 = 100 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^{-3} + \frac{6\varepsilon\sigma\tau}{100c_p\rho h} \right)^{-1/3}$$

轧件在运送过程中得温降时间可用轧件运行位移和速度来表示, 因此上式又可写成

$$T_2 = 100 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^{-3} + \frac{6\varepsilon\sigma}{100c_p\rho h} \cdot \frac{L}{v} \right)^{-1/3} - 273$$

3.1.2 水冷过程中的对流传热

对流传热的强度不但与物体的传热特性有关,而且更主要的是取决于流体介质的物理性质和运动特性,所以对流传热是一个及其复杂的过程,要从理论上精确计算它是很困难的。为了便于分析问题和进行计算,一般采用如下的牛顿公式来计算对流传热时散失的热量:

$$dQ = -\alpha(t - t_0)2F d\tau$$

式中, t —轧件的温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_0 —冷却介质的温度, $^{\circ}\text{C}$;

$2F$ —轧件与冷却介质相接触的面积(忽略轧件的侧面积), m^2 ;

τ —热交换的时间, h ;

α —对流换热系数,它表征对流换热的强度,即轧件与介质温度为 1°C 的条件下,单位面积在单位时间内所散失的热量, $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。

当轧件的温降为 dt 时,则轧件的热含量变化为

$$dQ = c_p\rho F h dt$$

由前两式可得轧件的温降公式为

$$dt = \frac{-2\alpha}{c_p\rho h} (t - t_0) d\tau$$

用 t_1 、 t_2 表示轧件的初始温度和最终温度, τ_1 、 τ_2 为冷却的初始时刻和最终时刻,对上式进行积分,得

$$\ln \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} = -\frac{2\alpha}{c_p\rho h} (\tau_2 - \tau_1)$$

$$\text{令 } \tau = \tau_2 - \tau_1 = L/v$$

则

$$t_2 = t_0 + (t_1 - t_0) \exp\left(1 - \frac{2\alpha}{c_p\rho h} \cdot \frac{L}{v}\right)$$

温降方程为

$$T_2 = 100 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^{-3} + \frac{6\varepsilon\sigma}{100c_p\rho h} \cdot \frac{L}{v} \right)^{-1/3} - 273$$

3.1.2 水冷过程中的对流传热

对流传热的强度不但与物体的传热特性有关,而且更主要的是取决于流体介质的物理性质和运动特性,所以对流传热是一个及其复杂的过程,要从理论上精确计算它是很困难的。为了便于分析问题和进行计算,一般采用如下的牛顿公式来计算对流传热时散失的热量:

$$dQ = -\alpha(t - t_0)2F d\tau$$

式中, t —轧件的温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_0 —冷却介质的温度, $^{\circ}\text{C}$;

$2F$ —轧件与冷却介质相接触的面积(忽略轧件的侧面积), m^2 ;

τ —热交换的时间, h ;

α —对流换热系数,它表征对流换热的强度,即轧件与介质温度为 1°C 的条件下,单位面积在单位时间内所散失的热量, $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。

当轧件的温降为 dt 时,则轧件的热含量变化为

$$dQ = c_p\rho Fh dt$$

由前两式可得轧件的温降公式为

$$dt = \frac{-2\alpha}{c_p\rho h} (t - t_0) d\tau$$

用 t_1 、 t_2 表示轧件的初始温度和最终温度, τ_1 、 τ_2 为冷却的初始时刻和最终时刻,对上式进行积分,得

$$\ln \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} = -\frac{2\alpha}{c_p\rho h} (\tau_2 - \tau_1)$$

$$\text{令 } \tau = \tau_2 - \tau_1 = L/v$$

则

$$t_2 = t_0 + (t_1 - t_0) \exp\left(1 - \frac{2\alpha}{c_p\rho h} \cdot \frac{L}{v}\right)$$

温降方程为

$$\Delta t = t_1 - (t_0 + (t_1 - t_0) \exp(1 - \frac{-2\alpha}{c_p \rho h} \cdot \frac{L}{v}))$$

3.1.3 冷却过程中的传导传热

冷却过程中的传导传热主要包括有^[38]：轧件以热传导方式将热量通过接触表面传给低温的输送辊道和轧件内部的热传导。

由于与输送辊道的接触散热相对水冷温降很小，因此在计算冷却过程中的温降时往往忽略与轧辊的传导散热。

对较薄的轧件可以忽略内部的热传导，但对厚轧件必须考虑热量在轧件内部的热传导所导致的轧件各点温度随时间的变化。

3.2 实验室条件下的控冷试验

为了掌握空冷和水冷过程中温降参数及厚度上温度分布的定性规律，作者在实验室的小型冷却喷管下完成了被加热至 1100℃ 的小型试样的空冷、水冷试验。

所选试样几何尺寸为 80h×140L×70w，材质为 16Mn，在垂直钢板厚度方向上转一 Φ5×60mm 深的孔，为放置热电偶而用。冷却前将试样加热到 1100℃，在 17℃ 室温条件下空冷 140s，然后喷水冷却 10s，再空冷，钢板发生返红现象。试验过程中每隔 5s 测量一次温度数据。

热电偶位置及喷水时试样放置如图 3.1 和图 3.2 所示。

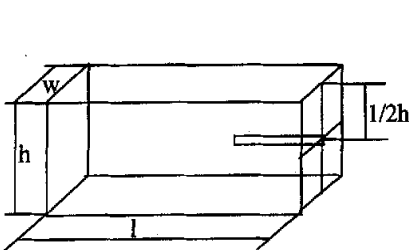


图 3.1 试样
Fig.3.1 Plate sample

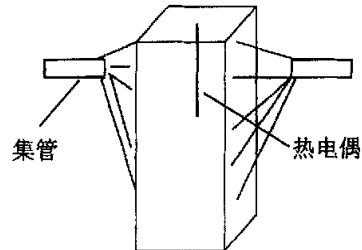


图 3.2 喷水时试样放置示意图
Fig.3.2 Plate sample position when cooling

试验过程中的温度变化曲线如图 3.3 所示。

从试验结果上我们可以看出：

[1] 在 900-1000℃ 的高温状态下，试样心部空冷温降为 1.2-1.6℃/s；600℃ 以下时，空冷温降为 0.4℃/s；

$$\Delta t = t_1 - (t_0 + (t_1 - t_0) \exp(1 - \frac{-2\alpha}{c_p \rho h} \cdot \frac{L}{v}))$$

3.1.3 冷却过程中的传导传热

冷却过程中的传导传热主要包括有^[38]：轧件以热传导方式将热量通过接触表面传给低温的输送辊道和轧件内部的热传导。

由于与输送辊道的接触散热相对水冷温降很小，因此在计算冷却过程中的温降时往往忽略与轧辊的传导散热。

对较薄的轧件可以忽略内部的热传导，但对厚轧件必须考虑热量在轧件内部的热传导所导致的轧件各点温度随时间的变化。

3.2 实验室条件下的控冷试验

为了掌握空冷和水冷过程中温降参数及厚度上温度分布的定性规律，作者在实验室的小型冷却喷管下完成了被加热至 1100℃ 的小型试样的空冷、水冷试验。

所选试样几何尺寸为 80h×140L×70w，材质为 16Mn，在垂直钢板厚度方向上转一 Φ5×60mm 深的孔，为放置热电偶而用。冷却前将试样加热到 1100℃，在 17℃ 室温条件下空冷 140s，然后喷水冷却 10s，再空冷，钢板发生返红现象。试验过程中每隔 5s 测量一次温度数据。

热电偶位置及喷水时试样放置如图 3.1 和图 3.2 所示。

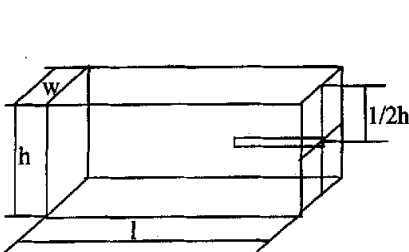


图 3.1 试样
Fig.3.1 Plate sample

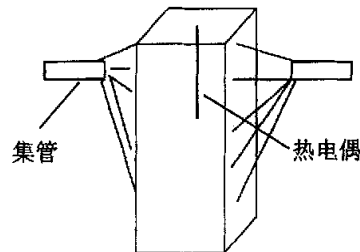


图 3.2 喷水时试样放置示意图
Fig.3.2 Plate sample position when cooling

试验过程中的温度变化曲线如图 3.3 所示。

从试验结果上我们可以看出：

[1] 在 900-1000℃ 的高温状态下，试样心部空冷温降为 1.2-1.6℃/s；600℃ 以下时，空冷温降为 0.4℃/s；

$$\Delta t = t_1 - (t_0 + (t_1 - t_0) \exp(1 - \frac{-2\alpha}{c_p \rho h} \cdot \frac{L}{v}))$$

3.1.3 冷却过程中的传导传热

冷却过程中的传导传热主要包括有^[38]：轧件以热传导方式将热量通过接触表面传给低温的输送辊道和轧件内部的热传导。

由于与输送辊道的接触散热相对水冷温降很小，因此在计算冷却过程中的温降时往往忽略与轧辊的传导散热。

对较薄的轧件可以忽略内部的热传导，但对厚轧件必须考虑热量在轧件内部的热传导所导致的轧件各点温度随时间的变化。

3.2 实验室条件下的控冷试验

为了掌握空冷和水冷过程中温降参数及厚度上温度分布的定性规律，作者在实验室的小型冷却喷管下完成了被加热至 1100℃ 的小型试样的空冷、水冷试验。

所选试样几何尺寸为 80h×140L×70w，材质为 16Mn，在垂直钢板厚度方向上转一 Φ5×60mm 深的孔，为放置热电偶而用。冷却前将试样加热到 1100℃，在 17℃ 室温条件下空冷 140s，然后喷水冷却 10s，再空冷，钢板发生返红现象。试验过程中每隔 5s 测量一次温度数据。

热电偶位置及喷水时试样放置如图 3.1 和图 3.2 所示。

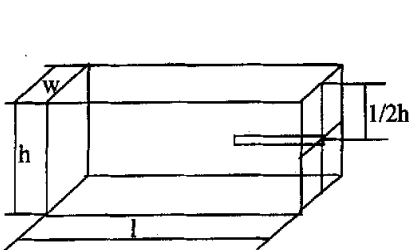


图 3.1 试样
Fig.3.1 Plate sample

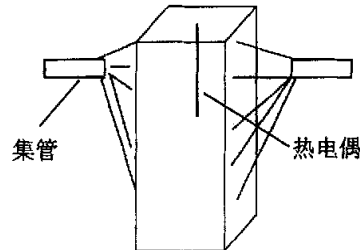


图 3.2 喷水时试样放置示意图
Fig.3.2 Plate sample position when cooling

试验过程中的温度变化曲线如图 3.3 所示。

从试验结果上我们可以看出：

[1] 在 900-1000℃ 的高温状态下，试样心部空冷温降为 1.2-1.6℃/s；600℃ 以下时，空冷温降为 0.4℃/s；

[2] 试样心部水冷温降为 2.6-3.4℃/s;

[3] 水冷后测量中心与表面温度分别对应 823 和 672℃, 差值为 151℃;

[4] 返红后中心与表面温度分别 770 和 640℃, 温差为 130℃。

试验过程中, 由于钢板周围存在较多的水蒸汽, 严重影响了红外测温仪的测量精度, 如图 3.3 中表面温度曲线时断时续, 即是无法准确测得表面温度; 并且试验时的水冷时间也与现场实际情况相差较远, 所以得到的试验数据仅作为分析温度变化趋势的参考, 而不作为仿真计算或模型调试的依据。

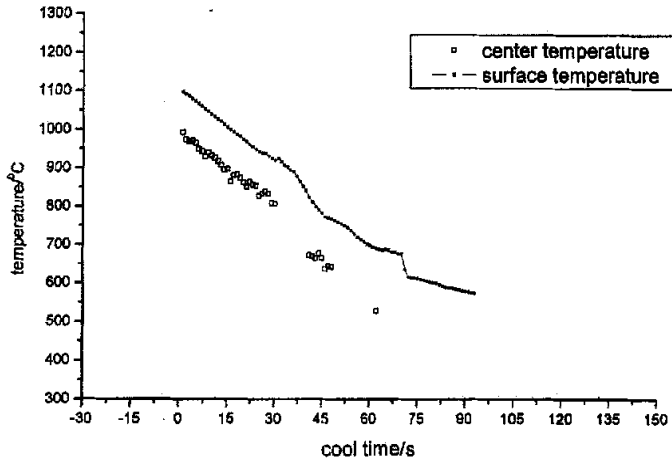


图 3.3 试验测得的钢板表面温度和中心温度曲线

Fig.3.3 Surface and center temperature curves of plate

3.3 空冷模型的研究

3.3.1 空冷换热系数模型

空冷时的热量移动是由于辐射传热和对流换热的作用而产生的, 此时的换热系数如式(3-2)所示。

$$h_a = h_r + h_c \quad (3-2)$$

$$h_r = \left[\frac{q_r}{(T_s - T_a)} \right] \times A \quad (3-3)$$

$$q_r = \sigma \varepsilon \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \times A \quad (3-4)$$

$$h_c = a \cdot (T_s - T_a)^{\frac{1}{4}} \times A \quad (3-5)$$

[2] 试样心部水冷温降为 2.6-3.4℃/s;

[3] 水冷后测量中心与表面温度分别对应 823 和 672℃, 差值为 151℃;

[4] 返红后中心与表面温度分别 770 和 640℃, 温差为 130℃。

试验过程中, 由于钢板周围存在较多的水蒸汽, 严重影响了红外测温仪的测量精度, 如图 3.3 中表面温度曲线时断时续, 即是无法准确测得表面温度; 并且试验时的水冷时间也与现场实际情况相差较远, 所以得到的试验数据仅作为分析温度变化趋势的参考, 而不作为仿真计算或模型调试的依据。

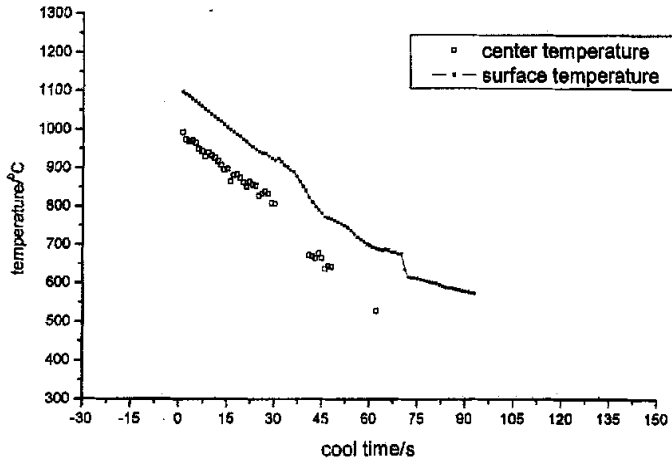


图 3.3 试验测得的钢板表面温度和中心温度曲线
Fig.3.3 Surface and center temperature curves of plate

3.3 空冷模型的研究

3.3.1 空冷换热系数模型

空冷时的热量移动是由于辐射传热和对流换热的作用而产生的, 此时的换热系数如式(3-2)所示。

$$h_a = h_r + h_c \quad (3-2)$$

$$h_r = \left[\frac{q_r}{(T_s - T_a)} \right] \times A \quad (3-3)$$

$$q_r = \sigma \varepsilon \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \times A \quad (3-4)$$

$$h_c = a \cdot (T_s - T_a)^{\frac{1}{4}} \times A \quad (3-5)$$

[2] 试样心部水冷温降为 2.6-3.4℃/s;

[3] 水冷后测量中心与表面温度分别对应 823 和 672℃, 差值为 151℃;

[4] 返红后中心与表面温度分别 770 和 640℃, 温差为 130℃。

试验过程中, 由于钢板周围存在较多的水蒸汽, 严重影响了红外测温仪的测量精度, 如图 3.3 中表面温度曲线时断时续, 即是无法准确测得表面温度; 并且试验时的水冷时间也与现场实际情况相差较远, 所以得到的试验数据仅作为分析温度变化趋势的参考, 而不作为仿真计算或模型调试的依据。

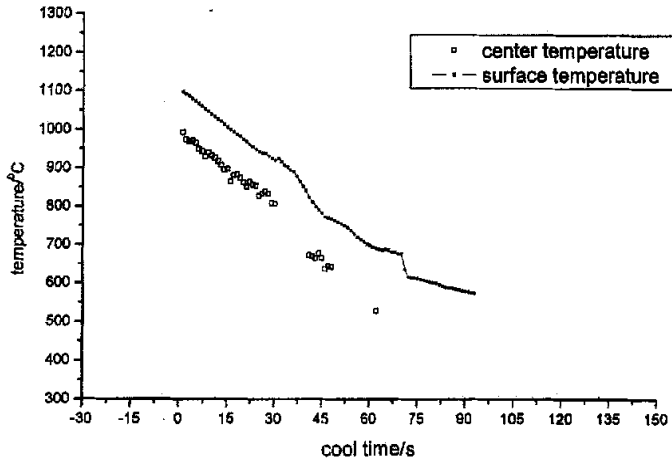


图 3.3 试验测得的钢板表面温度和中心温度曲线

Fig.3.3 Surface and center temperature curves of plate

3.3 空冷模型的研究

3.3.1 空冷换热系数模型

空冷时的热量移动是由于辐射传热和对流换热的作用而产生的, 此时的换热系数如式(3-2)所示。

$$h_a = h_r + h_c \quad (3-2)$$

$$h_r = \left[\frac{q_r}{(T_s - T_a)} \right] \times A \quad (3-3)$$

$$q_r = \sigma \varepsilon \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \times A \quad (3-4)$$

$$h_c = a \cdot (T_s - T_a)^{\frac{1}{4}} \times A \quad (3-5)$$

式中, h_a 、 h_r 、 h_c 分别为空冷、辐射和对流换热系数; q_r 为辐射传热热流量; T_s 、 T_a 分别为钢板表面温度和环境温度; A 是当量换算系数; a 为系数, 其值通常在 1.1~2.4 之间。

从式(3-4)可看出, 空冷换热系数仅与黑度系数、钢板表面温度、环境温度有关, 假设除钢板温度外均为常量, 则空冷换热系数模型为钢板温度的三次函数。

高温时钢板辐射损失远远超过了对流损失, 一般在 1000℃ 左右温度下对流热量损失只占总热量损失的 5~7%, 因此可以只考虑辐射损失, 而把其他影响都包含在根据实测数据确定的辐射率 ε 中。则空冷换热系数模型可简化为

$$h = a_1 * 4.88 * \varepsilon * \left\{ \left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{介质}} + 273}{100} \right)^4 \right\} / (T_s - T_{\text{介质}}) \quad (3-6)$$

式中, T_s —钢板表面温度;

a_1 —速度修正系数;

ε —轧件的热辐射系数(或称为黑度), $\varepsilon < 1$ 。

辐射传热理论已经比较成熟, 因此在模型形式上没有做更多的改动, 但其中黑度系数的选取往往决定了辐射温降的计算精度。根据经验, 钢板表面上的氧化铁皮多少不同其取值也不同, 当表面氧化铁皮较多时一般取为 0.8, 而刚轧出的平滑表面一般取为 0.55~0.65。作者是通过实测空冷温降数据反推黑度系数, 得出黑度系数在 0.7~0.85 之间。采用该系数进行在线空冷温降计算, 其计算值与实测值偏差小于 5℃。

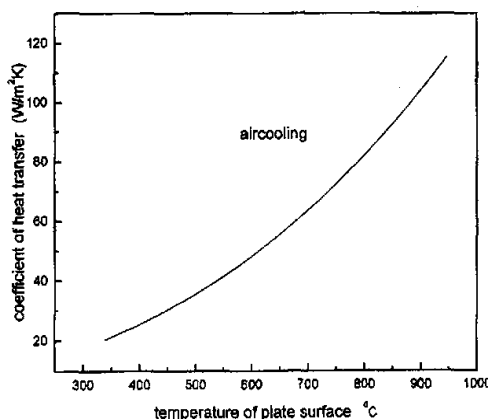


图 3.4 空冷换热系数随钢板温度的变化

Fig.3.4 Relation between air cooling heat transfer coefficient and temperature

根据式(3-6)得到空冷换热系数与钢板温度的关系曲线,如图3.4所示。该曲线近似为三次函数,这与式(3-4)和(3-6)的结果是一致的。

在3.1.1小节中已介绍了空冷辐射散热的理论计算公式,该公式把钢板作为一个整体,而不考虑钢板厚度方向上的温度分布;为了冷却过程计算的一致性和使钢板厚度方向上温度分布的模拟计算更接近实际情况,本论文的空冷温降均以差分方法为基础,进行迭代计算。空冷温降计算是方程(3-6)作为边界条件,根据导热方程进行差分计算求得的。

以12mm、20mm、50mm厚的钢板为例,以方程(3-1)和采用上述空冷换热系数以差分方法进行空冷计算,开冷温度为680℃,冷却时间为240s,得到如图3.5所示的空冷温降曲线。

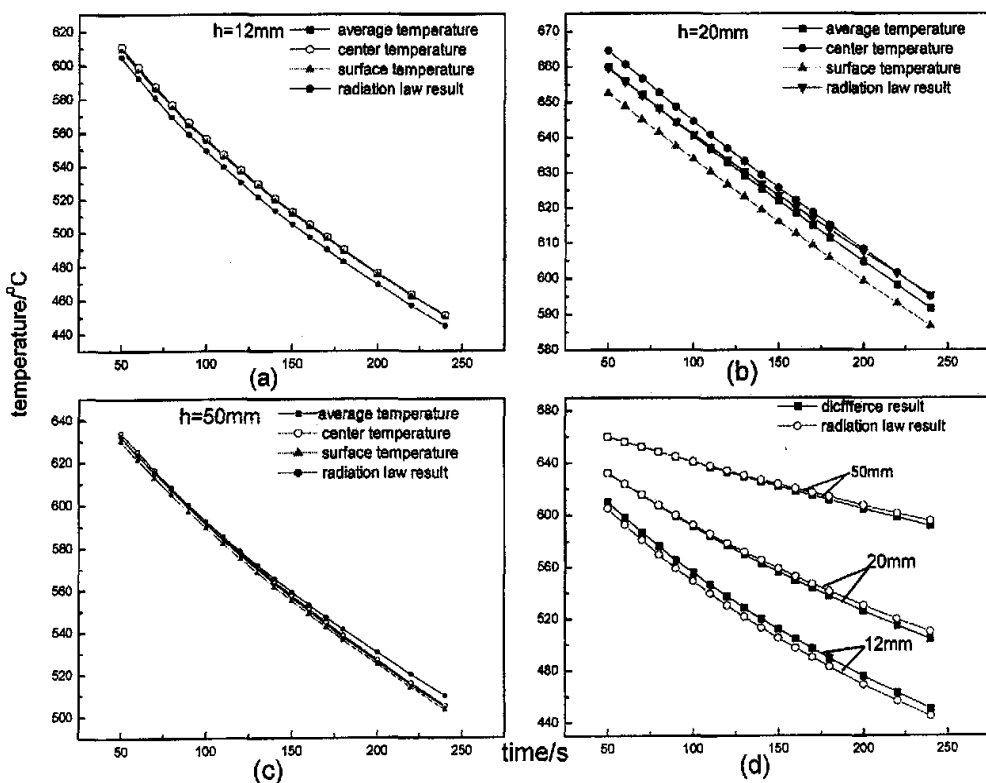


图 3.5 空冷温降曲线

Fig.3.5 Air cooling temperature drop curves

图3.5(a)、(b)、(c)是由差分计算钢板横断面上的空冷温降曲线和根据Stefen-Boltzman定律计算得到的钢板平均空冷温降曲线,图3.5(d)是平均温降曲线比较。从图中可以看出,对20mm和50mm厚钢板,两种方法计算得到的空冷温

降曲线基本是重合的, 对 12mm 厚钢板, 两条温降曲线稍有一些偏差, 说明空冷换热系数模型的选取是合理的, 该差分模型的计算精度也足以满足在线控制模型的需要。

3.3.2 空冷过程温度分布特点

以有限差分方法对 Q345B 钢板进行空冷模拟, 钢板厚度为 10mm, 15mm, ……., 65mm, 开冷温度为 880℃, 空冷时间为 30s, 冷却温降数据和曲线如表 3.1 和图 3.6、3.7 所示。

表 3.1 钢板空冷时厚度方向上的温降比较

Table3.1 Air cooling temperature drop comparison with different thickness

序号	厚度 mm	表面温降 ℃	中心温降 ℃	平均温降 ℃
1	10	124.54	121.08	122.18
2	15	102.41	95.73	97.84
3	20	87.36	77.89	80.83
4	25	76.10	62.94	67.12
5	30	68.28	51.19	56.60
6	35	62.49	41.89	48.42
7	40	58.46	34.28	41.96
8	45	55.66	27.92	36.76
9	50	53.66	22.87	32.63
10	55	52.18	18.66	29.22
11	60	51.05	15.16	26.34
12	65	50.12	12.26	23.93

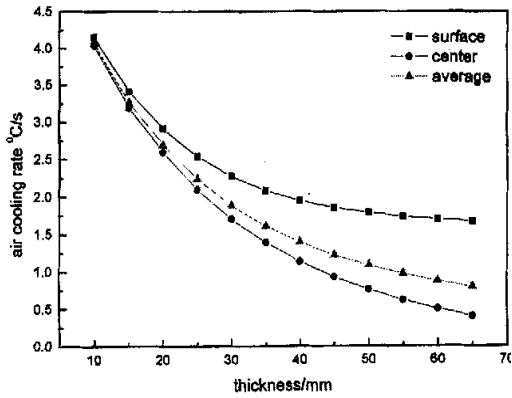


图 3.6 空冷速率与厚度的关系

Fig.3.6 Relation between thickness and air-cooling rate

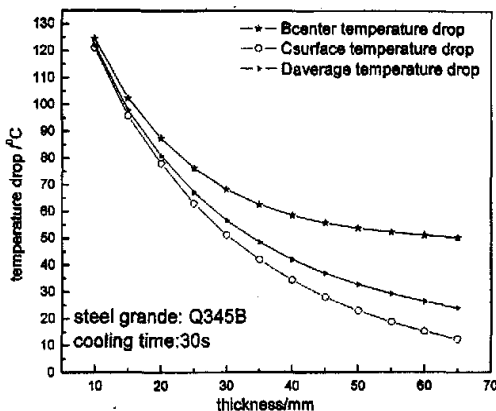


图 3.7 空冷温降与厚度的关系
Fig.3.7 Relation between thickness and temperature drop

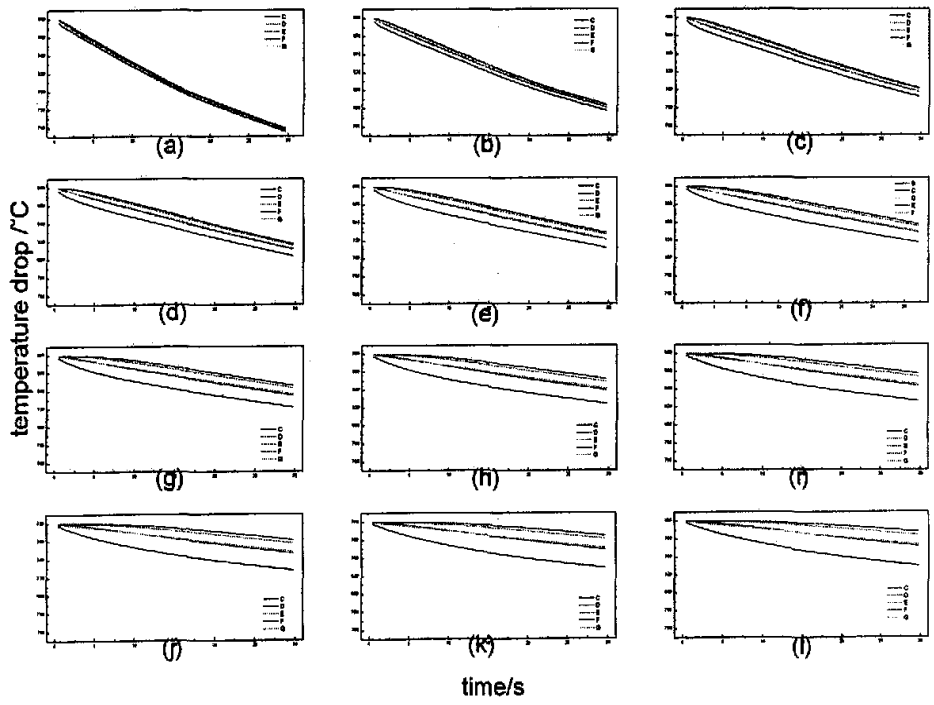


图 3.8 厚度上的温度分布
Fig.3.8 Temperature distribution along thickness

假设钢板出轧机后温度均匀分布，对厚度为 10mm，15mm，……，65mm 厚度的 Q345B 钢板从 880℃开始分别空冷 30s，其厚度方向上的温度梯度随厚度的增加而变大，如图 3.8 所示，图(a)……(l)分别对应于 10mm，15mm，……，65mm 厚度钢板的冷却曲线，图上的五条曲线分别表示钢板厚度上平均温度和钢

板表面、中心、距厚度中心 1/3、2/3 处的温度。空冷后的温度梯度必然影响水冷过程中的温度场分布，因而在进行水冷温度计算时，必须考虑空冷后钢板厚度上的温度分布，尤其是对较厚钢板。

3.3.3 返红过程温度分布特点

钢板水冷后表面温度和中心温度相差高达几百度，所以在水冷结束后钢板表面温度迅速上升，然后再缓慢下降。从现象上看就是出冷却区的钢板由黑变红，再慢慢变黑，即发生返红现象。

表 3.2 钢板返红时的温降
Table.3.2 Temperature drop when back-redding

厚度 mm	水冷 时间 s	返红 时间 s	表面返红温升 ℃	中心温降 ℃	平均温降 ℃	表面 冷却 速率 ℃/s (升温)	中心 冷却 速率 ℃/s (降温)	平均 冷却 速率 ℃/s (降温)
10	7	2.25	22.1 (676.5~698.6)	20.01 (723.4~703.4)	6.55 (693.7~700.2)	9.831	8.893	2.911
15	10	4.50	38.5 (658.6~697.2)	26.4 (731.1~704.6)	11.6 (688.4~700.0)	8.566	5.884	2.582
20	10	6.35	38.3 (682.2~720.5)	34.78 (760.0~725.3)	15.6 (708.2~723.9)	6.034	5.477	2.462
25	10	8.10	35.0 (700.0~735.0)	42.57 (791.2~748.6)	16.5 (760.2~743.7)	4.300	5.255	2.043
30	10	9.45	33.1 (716.6~749.8)	48.10 (815.6~767.5)	18.89 (778.4~759.5)	3.510	5.089	1.998
35	10	11.25	29.97 (730.9~760.8)	50.69 (835.1~784.4)	21.8 (795.6~774.7)	2.664	4.505	1.939
40	10	14.4	22.7 (742.7~765.4)	57.01 (849.6~792.6)	27.0 (808.4~781.4)	1.577	3.959	1.877
45	10	16.65	22.4 (747.1~769.5)	58.56 (859.3~800.7)	28.7 (816.8~788.1)	1.345	3.517	1.724
50	10	19.35	21.79 (750.7~772.5)	58.06 (865.9~807.8)	29.7 (823.1~793.4)	1.126	3.000	1.535
55	10	22.05	20.73 (754.0~774.7)	60.80 (870.4~809.6)	30.1 (828.2~798.1)	0.940	2.757	1.366
60	10	24.3	19.52 (756.7~776.3)	53.06 (873.4~814.2)	29.9 (832.2~802.3)	0.803	2.183	1.231
65	10	27	18.29 (759.1~777.4)	50.20 (875.5~825.3)	29.8 (835.5~805.6)	0.677	1.859	1.106

表 3.2 给出了钢板水冷后到返红过程的温降模拟结果。模拟条件为：钢板厚度

板表面、中心、距厚度中心 1/3、2/3 处的温度。空冷后的温度梯度必然影响水冷过程中的温度场分布，因而在进行水冷温度计算时，必须考虑空冷后钢板厚度上的温度分布，尤其是对较厚钢板。

3.3.3 返红过程温度分布特点

钢板水冷后表面温度和中心温度相差高达几百度，所以在水冷结束后钢板表面温度迅速上升，然后再缓慢下降。从现象上看就是出冷却区的钢板由黑变红，再慢慢变黑，即发生返红现象。

表 3.2 钢板返红时的温降
Table.3.2 Temperature drop when back-redding

厚度 mm	水冷 时间 s	返红 时间 s	表面返红温升 ℃	中心温降 ℃	平均温降 ℃	表面 冷却 速率 ℃/s (升温)	中心 冷却 速率 ℃/s (降温)	平均 冷却 速率 ℃/s (降温)
10	7	2.25	22.1 (676.5~698.6)	20.01 (723.4~703.4)	6.55 (693.7~700.2)	9.831	8.893	2.911
15	10	4.50	38.5 (658.6~697.2)	26.4 (731.1~704.6)	11.6 (688.4~700.0)	8.566	5.884	2.582
20	10	6.35	38.3 (682.2~720.5)	34.78 (760.0~725.3)	15.6 (708.2~723.9)	6.034	5.477	2.462
25	10	8.10	35.0 (700.0~735.0)	42.57 (791.2~748.6)	16.5 (760.2~743.7)	4.300	5.255	2.043
30	10	9.45	33.1 (716.6~749.8)	48.10 (815.6~767.5)	18.89 (778.4~759.5)	3.510	5.089	1.998
35	10	11.25	29.97 (730.9~760.8)	50.69 (835.1~784.4)	21.8 (795.6~774.7)	2.664	4.505	1.939
40	10	14.4	22.7 (742.7~765.4)	57.01 (849.6~792.6)	27.0 (808.4~781.4)	1.577	3.959	1.877
45	10	16.65	22.4 (747.1~769.5)	58.56 (859.3~800.7)	28.7 (816.8~788.1)	1.345	3.517	1.724
50	10	19.35	21.79 (750.7~772.5)	58.06 (865.9~807.8)	29.7 (823.1~793.4)	1.126	3.000	1.535
55	10	22.05	20.73 (754.0~774.7)	60.80 (870.4~809.6)	30.1 (828.2~798.1)	0.940	2.757	1.366
60	10	24.3	19.52 (756.7~776.3)	53.06 (873.4~814.2)	29.9 (832.2~802.3)	0.803	2.183	1.231
65	10	27	18.29 (759.1~777.4)	50.20 (875.5~825.3)	29.8 (835.5~805.6)	0.677	1.859	1.106

表 3.2 给出了钢板水冷后到返红过程的温降模拟结果。模拟条件为：钢板厚度

从 10mm~65mm, 钢种为 Q345B, 开冷温度为 880℃, 集管水量为 90m³/hr。从模拟结果上看, 钢板越薄, 返红时间越短, 表面温度上升的速率越大, 中心和厚度上平均冷却速率越大。

图 3.9 给出了厚度从 15mm~60mm 的 Q345B 钢板从 880℃起水冷 10s 后空冷过程中厚度上的温度分布, 图(a)……(i)分别为对应于 15mm, 20mm……, 60mm 厚度钢板的冷却曲线, 图上的五条曲线分别表示钢板厚度上平均温度和钢板表面、中心、距厚度中心 1/3、2/3 处的温度。

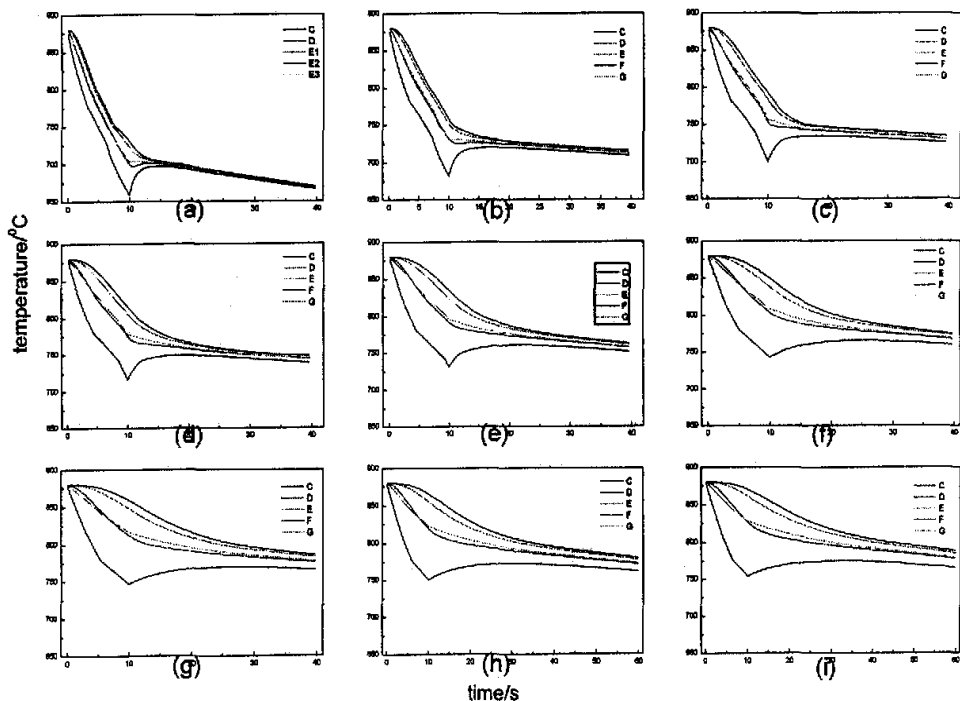


图 3.9 不同厚度钢板返红时厚度上的温度分布曲线

Fig.3.9 Temperature distribution when the plate is back-redding

空冷时, 钢板表面温降、中心温降和平均温降均随厚度增加而减小; 返红时, 钢板表面温度上升, 中心温度和平均温度下降; 空冷和返红时不同厚度的钢板对应的冷却速度见图 3.10。从图上可以看出, 冷却速率的绝对值随厚度增加而减小; 空冷时, 厚度上的温度梯度较小; 返红时厚度上的温度梯度较大。

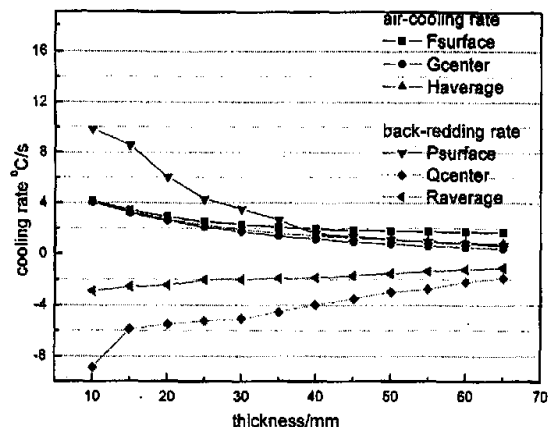


图 3.10 空冷和返红时冷却速率比较

Fig.3.10 Cooling rate comparison between air-cooling and back-redding

3.4 水冷模型的研究

在第二章中我们已经构建了二维导热问题的有限差分方程，其边界条件和初始条件的准确给定是水冷温降计算的关键。模型中涉及到水冷换热系数模型、比热模型、热传导系数模型、密度模型等，其核心是水冷换热系数的选取，它直接影响水冷温降的计算精度，其他参数模型将在第四章中详细介绍。

3.4.1 水冷换热系数模型

水冷换热系数的物理意义是当固体边界温度 T_1 与介质温度相差一个单位时，在单位时间内通过单位边界面的热量，也称放热系数，其定义式是 $\alpha = \frac{q}{T_1 - T_2}$ ，单位为 $W/(m^2 \cdot K)$ 。式中 q 为热流密度，是单位时间单位面积上传递的热量，单位为 W/m^2 。

该系数是表示冷却能力的重要指标，但它不是一个物性量，不能由物体的固有性能或介质的性能确定，还和很多其它因素有关，如物体本身的温度、边界条件、冷却介质温度、流量等。对流换热系数的准确确定直接决定着边界条件的准确性，进而影响着整个内部的温度场分布。

3.4.1.1 常见的水冷换热系数模型

冷却水的热交换能力与膜状沸腾、临界沸腾和核沸腾的冷却能力有关，同时受喷射和层流等冷却方式、水量、水温、轧件表面温度、表面状态和形状等诸多因素

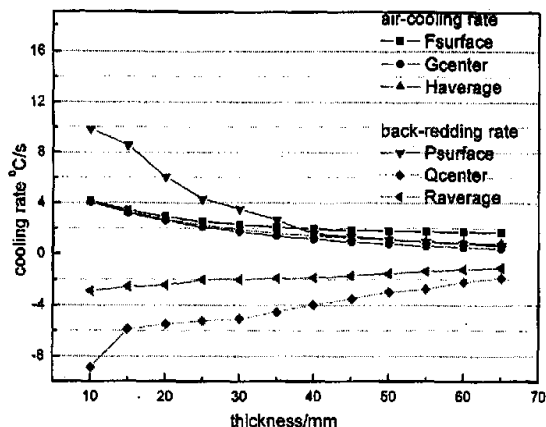


图 3.10 空冷和返红时冷却速率比较

Fig.3.10 Cooling rate comparison between air-cooling and back-redding

3.4 水冷模型的研究

在第二章中我们已经构建了二维导热问题的有限差分方程，其边界条件和初始条件的准确给定是水冷温降计算的关键。模型中涉及到水冷换热系数模型、比热模型、热传导系数模型、密度模型等，其核心是水冷换热系数的选取，它直接影响水冷温降的计算精度，其他参数模型将在第四章中详细介绍。

3.4.1 水冷换热系数模型

水冷换热系数的物理意义是当固体边界温度 T_1 与介质温度相差一个单位时，在单位时间内通过单位边界面的热量，也称放热系数，其定义式是 $\alpha = \frac{q}{T_1 - T_2}$ ，单位为 $W/(m^2 \cdot K)$ 。式中 q 为热流密度，是单位时间单位面积上传递的热量，单位为 W/m^2 。

该系数是表示冷却能力的重要指标，但它不是一个物性量，不能由物体的固有性能或介质的性能确定，还和很多其它因素有关，如物体本身的温度、边界条件、冷却介质温度、流量等。对流换热系数的准确确定直接决定着边界条件的准确性，进而影响着整个内部的温度场分布。

3.4.1.1 常见的水冷换热系数模型

冷却水的热交换能力与膜状沸腾、临界沸腾和核沸腾的冷却能力有关，同时受喷射和层流等冷却方式、水量、水温、轧件表面温度、表面状态和形状等诸多因素

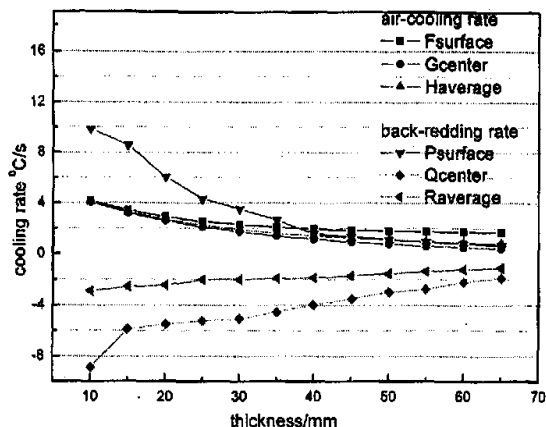


图 3.10 空冷和返红时冷却速率比较

Fig.3.10 Cooling rate comparison between air-cooling and back-redding

3.4 水冷模型的研究

在第二章中我们已经构建了二维导热问题的有限差分方程，其边界条件和初始条件的准确给定是水冷温降计算的关键。模型中涉及到水冷换热系数模型、比热模型、热传导系数模型、密度模型等，其核心是水冷换热系数的选取，它直接影响水冷温降的计算精度，其他参数模型将在第四章中详细介绍。

3.4.1 水冷换热系数模型

水冷换热系数的物理意义是当固体边界温度 T_1 与介质温度相差一个单位时，在单位时间内通过单位边界面的热量，也称放热系数，其定义式是 $\alpha = \frac{q}{T_1 - T_2}$ ，单位为 $W/(m^2 \cdot K)$ 。式中 q 为热流密度，是单位时间单位面积上传递的热量，单位为 W/m^2 。

该系数是表示冷却能力的重要指标，但它不是一个物性量，不能由物体的固有性能或介质的性能确定，还和很多其它因素有关，如物体本身的温度、边界条件、冷却介质温度、流量等。对流换热系数的准确确定直接决定着边界条件的准确性，进而影响着整个内部的温度场分布。

3.4.1.1 常见的水冷换热系数模型

冷却水的热交换能力与膜状沸腾、临界沸腾和核沸腾的冷却能力有关，同时受喷射和层流等冷却方式、水量、水温、轧件表面温度、表面状态和形状等诸多因素

影响,如不同的冷却方式在同样的水流密度下有不同的热交换能力,一般喷雾冷却时换热系数在 $60 \sim 1100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,喷射冷却时换热系数范围较大,为 $110 \sim 11000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,通常使用范围在 $330 \sim 7700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,而自然冷却时的换热系数只有 $44 \sim 120 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 左右^[2]。

钢板表面温度、水流密度对水冷时水冷换热系数影响较大。根据水与高温钢板接触时在钢板表面形成不同的热交换现象,大致可分为 100°C 以下的强制对流, $100 \sim 300^\circ\text{C}$ 范围内的核沸腾, $300 \sim 800^\circ\text{C}$ 范围内的临界沸腾, 800°C 以上的膜沸腾。随钢板表面温度变化,水冷换热系数也发生了较大变化,文献[76]中给出了喷水冷却时各个温度区间的水冷换热系数的回归公式:

$$T_0 = 50^\circ\text{C}, 280 < w < 12600 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$$

$$\alpha = 225.9 \cdot w^{0.646} \times 1.163$$

$$200 \leq T_0 \leq 500^\circ\text{C}, 5 < w < 2000 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$$

$$\alpha = 494.3 \cdot w^{0.595} \times 10^{-0.00179T_0} \times 1.163$$

$$500^\circ\text{C} \leq T_0, 100 < w < 2000 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$$

$$\alpha = 107.2 \cdot w^{0.663} \times 10^{-0.00147T_0} \times 1.163$$

对钢板上下表面采用相同水量时,由于上下表面上冷却水的流动形式不同,其热交换能力也不同,因而钢板上下表面应分别对应两套水冷换热系数模型,但在实际生产中,往往根据上表面的水流的换热能力来选择合适的水量配比以达到钢板上下表面冷却均匀。

层流冷却时,水流撞击面处的换热能力比整体的换热能力大很多^[77-80],但考虑到实际的设备状态,常常选用平均的换热系数模型^[81]:

$$\alpha = \frac{9.72 \times 10^5 \cdot w^{0.355}}{T_s - T_w} \times \left[\frac{(2.50 - 1.5 \times \log T_w) \cdot D}{p_1 \cdot p_c} \right]^{0.645} \times 1.163$$

式中, w 、 T_w 、 p_1 、 p_c 以及 D 分别为水流密度 ($\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$)、水温 ($^\circ\text{C}$)、轧制线方向喷嘴间距 (m) 与轧制线方向垂直的喷嘴间距 (m) 及喷嘴直径 (m)。

3.4.1.2 水冷换热系数模型

水冷换热系数主要与水流密度、钢板表面温度、钢板运行速度、冷却水温度等因素有关,结合首钢中厚板厂的冷却设备和冷却工艺,作者采用如下的水冷换热系

数模型:

$$\alpha = A \times a \times qw^b \times \exp(c \times T_s) \times v_x \quad (3-7)$$

式中, A 、 qw 、 T_s 、 v_x 分别是自学习系数、水流密度、钢板表面温度、速度修正系数; 系数 a 是和厚度规格、钢种成份有关的参量, b 、 c 是模型常数系数。其中, b 、 c 分别为正值和负值, 这表明: 水量增加, 水冷换热系数变大; 钢板表面温度降低, 水冷换热系数变大。水冷换热系数随厚度增加而变大。

钢板表面温度的变化对换热系数的影响相当大, 有实验表明, 在水流冲击点, 当表面温度在 $950 \sim 150^\circ\text{C}$ 之间变化时, 换热系数随表面温度的下降呈上升趋势, 当表面温度高于 700°C 时, 换热系数下降较快; 当表面温度在 $220 \sim 700^\circ\text{C}$ 之间时, 换热系数极缓慢下降。

3.4.1.3 水冷换热系数的影响因素

水冷换热系数的影响因素不外是影响流动的因素以及影响流体中热量传递的因素。这些因素归纳起来可分为以下五个方面:

[1] 流体流动的起因

由于流动起因的不同, 对流换热可分为强制对流换热与自然对流换热, 二者成因不同, 流体中的速度场不同, 因而换热规律不同。

在钢板冷却过程中, 换热形式包括钢板与空气间的自然对流和钢板与冷却水之间的强制对流。

[2] 流体有无相变

流体没有对流相变时, 对流换热中的热量交换是由于流体显热的变化而实现的, 而有相变的换热过程中, 相变热导致换热规律有所不同。

钢板冷却过程中, 冷却水在高温钢板表面形成一层沸腾膜, 并且有一部分水变成水蒸气散失掉, 但该部分水仅占 2% 左右, 因而控冷计算中不考虑流体的相变。

[3] 流体的流动状态

流体力学的研究已查明, 粘性流体存在着两种不同的流态: 层流和湍流。层流时流体微团沿着主流方向作有规则的分层流动, 而湍流时流体各部分之间发生剧烈的混合, 这两种情况下换热能力有较大的差别。

[4] 换热表面的几何因素

这里的几何因素指换热表面形状、大小、换热表面的运动状态及其状态（粗糙度、温度）等。

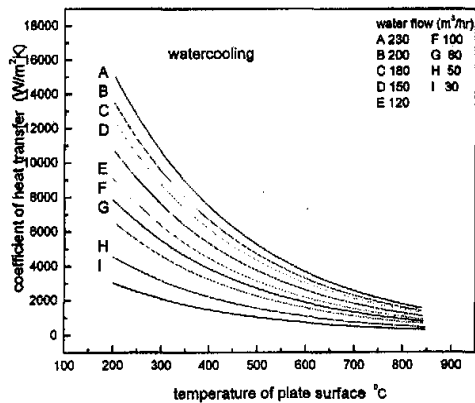
[5] 流体的物理性质

流体的密度、动力粘度等参数对换热系数有很大的影响，在本文所涉及的计算中，冷却媒质为工业冷却用水，假设冷却水物性为常数、无内热源，冷却过程中对换热系数的影响为一常量，因此不作更多考虑。

综上，冷却过程中的钢板与冷却媒质间的换热系数大小跟钢板自身温度、通板速度、水流密度、水流速度、水温、水压、冷却形式等等因素有关^[82-86]，各种参数的变化直接表现在对换热系数的影响上，间接表现在对温降的影响上。下面介绍换热系数的几个主要影响参数。

3.4.1.3.1 水流量对换热系数的影响

以 3.4.1.2 小节介绍的水冷换热系数模型为例，计算水流量对换热系数的影响，如图 3.11 所示，水流量增加，换热系数增大，但不成线形关系，而是有一极限值，故根据冷却条件选择多大流量才能充分发挥其冷却效果是很重要的^[87]。



水温：25℃，厚度：30mm

图 3.11 水流量对换热系数的影响

Fig.3.11 Effect of water flow on heat transfer coefficient

水流密度、水流速度增加，换热系数增大，其对换热系数的影响与水流量类似。

3.4.1.3.2 钢板温度对水冷换热系数的影响

钢板温度对换热系数的影响比较大，钢板温度越高，换热系数越小，但在不同

的温度区间其值大小相差甚远，这与各个温度区间的發生的热交换现象有关。以 3.4.1.2 小节给出的水冷换热系数模型进行模拟计算，计算条件为普碳钢，30mm 厚，水温 20℃，集管流量分别在 70、90、110、130m³/hr，对应的水流密度分别为 365、469、573、677L/min·m²，钢板从 800℃冷到 200℃，得到如图 3.12 所示的钢板表面温度与换热系数的关系曲线。模拟结果与参考文献[76]给出的结果相近。

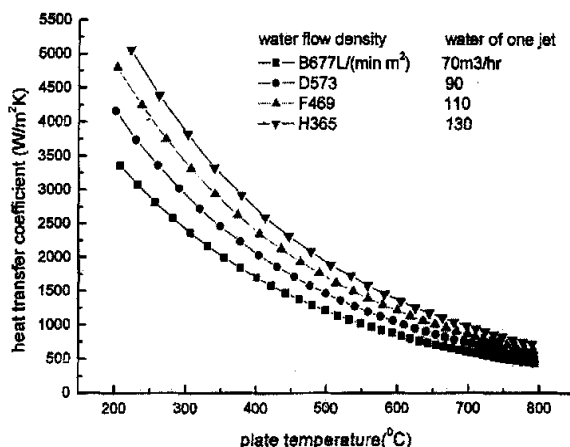


图 3.12 钢板表面温度与水冷换热系数的关系曲线

Fig.3.12 Curves for plate surface temperature and heat transfer coefficient

3.4.1.3.3 水温对换热系数的影响

换热系数随水温升高而变小，但水温的变化对换热系数的影响很小。我们以式从图 3.13 上可以看出来，水温分别为 20℃和 40℃时，对应的两条换热系数曲线几乎是重合的。表 3.3 给出了不同水温下对应的换热系数值，从表中可以清楚地看出，当钢板温度在 200~800℃之间时，水温从 10℃变到 40，换热系数值变化很小，这与参考文献^[1]给出的结论是一致的。

3.4.2 比热系数模型

钢板在输出辊道上的冷却过程中，由于相变而发热，使钢板温度上升。高碳钢的相变发热量比低碳钢略大，这种发热量对温度控制精度有一定的影响。因而在温降计算模型中，把比热作为温度的函数加以考虑。为了使模型简单有效，采用数据表格的形式按钢种分类，将比热在温度区间内进行线性插值。各个钢种的比热值可查阅热力学手册。有关比热系数的选取将在第四章中进一步阐述。

的温度区间其值大小相差甚远，这与各个温度区间的发生的热交换现象有关。以 3.4.1.2 小节给出的水冷换热系数模型进行模拟计算，计算条件为普碳钢，30mm 厚，水温 20℃，集管流量分别在 70、90、110、130m³/hr，对应的水流密度分别为 365、469、573、677L/min·m²，钢板从 800℃冷到 200℃，得到如图 3.12 所示的钢板表面温度与换热系数的关系曲线。模拟结果与参考文献[76]给出的结果相近。

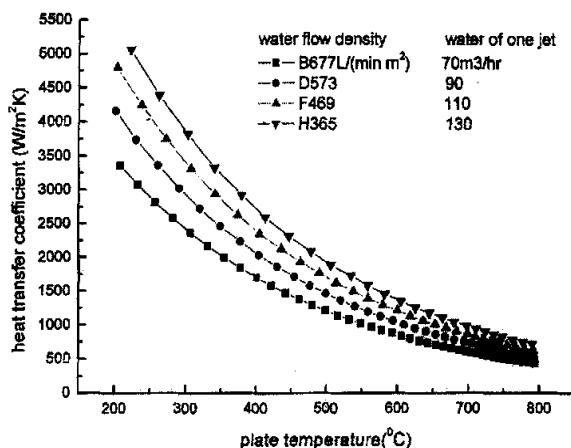


图 3.12 钢板表面温度与水冷换热系数的关系曲线

Fig.3.12 Curves for plate surface temperature and heat transfer coefficient

3.4.1.3.3 水温对换热系数的影响

换热系数随水温升高而变小，但水温的变化对换热系数的影响很小。我们以式从图 3.13 上可以看出来，水温分别为 20℃和 40℃时，对应的两条换热系数曲线几乎是重合的。表 3.3 给出了不同水温下对应的换热系数值，从表中可以清楚地看出，当钢板温度在 200~800℃之间时，水温从 10℃变到 40，换热系数值变化很小，这与参考文献^[1]给出的结论是一致的。

3.4.2 比热系数模型

钢板在输出辊道上的冷却过程中，由于相变而发热，使钢板温度上升。高碳钢的相变发热量比低碳钢略大，这种发热量对温度控制精度有一定的影响。因而在温降计算模型中，把比热作为温度的函数加以考虑。为了使模型简单有效，采用数据表格的形式按钢种分类，将比热在温度区间内进行线性插值。各个钢种的比热值可查阅热力学手册。有关比热系数的选取将在第四章中进一步阐述。

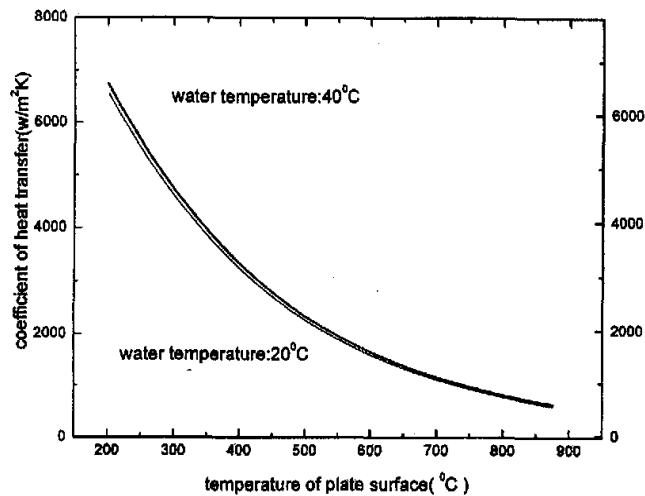


图 3.13 水温对换热系数的影响

Fig.3.13 Effect of water temperature on heat transfer coefficient

表 3.3 不同水温下的换热系数

Table3.3 Heat transfer coefficient with different water temperature

水温 10℃		水温 20℃		水温 25℃		水温 30℃		水温 35℃		温度 40℃		温度 45℃	
钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)
875.34	598.82	875.39	598.71	875.42	598.65	875.45	598.59	875.47	598.54	875.50	598.48	875.53	598.43
870.83	608.49	870.93	608.26	870.99	608.14	871.04	608.03	871.09	607.92	871.15	607.80	871.20	607.69
866.44	618.04	866.60	617.69	866.68	617.52	866.76	617.35	866.84	617.17	866.91	617.00	866.99	616.83
862.16	627.49	862.37	627.03	862.48	626.79	862.58	626.56	862.69	626.33	862.79	626.10	862.90	625.86
857.98	636.88	858.24	636.29	858.37	636.00	858.50	635.70	858.63	635.41	858.76	635.11	858.89	634.82
853.87	646.22	854.19	645.50	854.35	645.14	854.50	644.78	854.66	644.43	854.82	644.07	854.97	643.71
849.84	655.53	850.21	654.68	850.39	654.26	850.58	653.83	850.76	653.41	850.94	652.99	851.13	652.56
845.63	665.40	846.06	664.39	846.27	663.90	846.48	663.40	846.69	662.91	846.90	662.42	847.11	661.92
841.48	675.26	841.97	674.10	842.21	673.53	842.44	672.96	842.68	672.40	842.92	671.83	843.16	671.27
837.40	685.11	837.94	683.81	838.21	683.16	838.47	682.52	838.74	681.88	839.00	681.23	839.27	680.60
833.37	694.99	833.96	693.52	834.26	692.80	834.55	692.08	834.85	691.36	835.14	690.64	835.43	689.92

3.4.3 热传导系数模型

热传导系数表征在钢材内部热传导能力的强弱，板材厚度增加，热传导逐渐上升为控制传热过程的重要因素，热传导系数的作用增强。热传导系数与钢种有关，是温度的函数。在冷却过程中采用插值法选取热传导系数。各个钢种的热传导系数值可查阅热力学手册。有关热传导系数的选取将在第四章中进一步阐述。

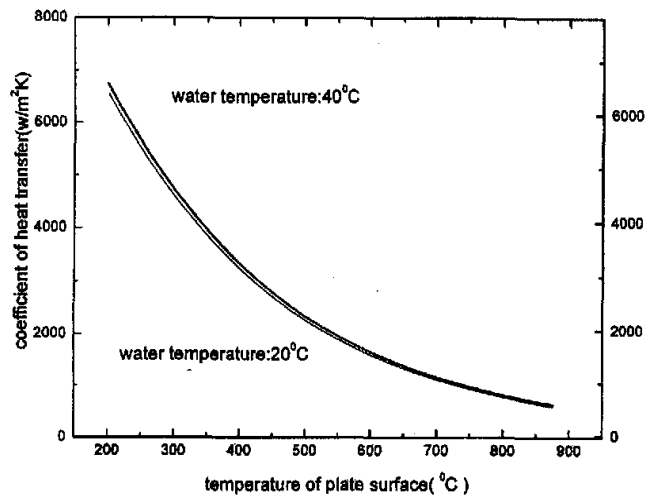


图 3.13 水温对换热系数的影响

Fig.3.13 Effect of water temperature on heat transfer coefficient

表 3.3 不同水温下的换热系数

Table3.3 Heat transfer coefficient with different water temperature

水温 10℃		水温 20℃		水温 25℃		水温 30℃		水温 35℃		温度 40℃		温度 45℃	
钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)	钢温℃	换热系数 W/(m²·K)
875.34	598.82	875.39	598.71	875.42	598.65	875.45	598.59	875.47	598.54	875.50	598.48	875.53	598.43
870.83	608.49	870.93	608.26	870.99	608.14	871.04	608.03	871.09	607.92	871.15	607.80	871.20	607.69
866.44	618.04	866.60	617.69	866.68	617.52	866.76	617.35	866.84	617.17	866.91	617.00	866.99	616.83
862.16	627.49	862.37	627.03	862.48	626.79	862.58	626.56	862.69	626.33	862.79	626.10	862.90	625.86
857.98	636.88	858.24	636.29	858.37	636.00	858.50	635.70	858.63	635.41	858.76	635.11	858.89	634.82
853.87	646.22	854.19	645.50	854.35	645.14	854.50	644.78	854.66	644.43	854.82	644.07	854.97	643.71
849.84	655.53	850.21	654.68	850.39	654.26	850.58	653.83	850.76	653.41	850.94	652.99	851.13	652.56
845.63	665.40	846.06	664.39	846.27	663.90	846.48	663.40	846.69	662.91	846.90	662.42	847.11	661.92
841.48	675.26	841.97	674.10	842.21	673.53	842.44	672.96	842.68	672.40	842.92	671.83	843.16	671.27
837.40	685.11	837.94	683.81	838.21	683.16	838.47	682.52	838.74	681.88	839.00	681.23	839.27	680.60
833.37	694.99	833.96	693.52	834.26	692.80	834.55	692.08	834.85	691.36	835.14	690.64	835.43	689.92

3.4.3 热传导系数模型

热传导系数表征在钢材内部热传导能力的强弱，板材厚度增加，热传导逐渐上升为控制传热过程的重要因素，热传导系数的作用增强。热传导系数与钢种有关，是温度的函数。在冷却过程中采用插值法选取热传导系数。各个钢种的热传导系数值可查阅热力学手册。有关热传导系数的选取将在第四章中进一步阐述。

3.5 自学习模型的研究

设定模型的计算偏差主要来自于温度的预报偏差、模型系数的精度及模型本身结构的偏差。通过自学习的方法,可以使控制模型的设定值计算精度满足过程控制的要求。模型参数自学习分为短期自学习和长期自学习。短期自学习考虑前一块钢的参数,用于轧件到轧件的参数修正,学习后的参数值自动替代原先的参数值,用于下一块同种轧件。长期自学习考虑 n 块(一般取 50 块以上)同一厚度层别的钢板,用于大量同种轧件长期参数修正,学习后的参数值可以选择性地替代原先的参数值。

自学习模块主要包括空冷自学习、水冷自学习、边部遮蔽量自学习、头尾遮蔽量自学习、水量比自学习、加速度自学习。其中空冷自学习和水冷自学习主要是根据钢板实际温降量与计算温降量的偏差,对换热系数进行修正。上下水量比的自学习主要是为了保证钢板上下冷却的均匀性,其方法是根据钢板上下表面的温差,对上下水量比进行修正。边部遮蔽自学习是根据钢板横向上的温度梯度,对水冷时边部遮蔽量进行自学习修正。为了保证钢板在长度方向上的温度均匀性,将钢板从头到尾分为三个区域,分别对每个区域进行自学习。

3.5.1 水冷自学习

水冷自学习的基本原理是根据当前钢板水冷温降的实测值和计算值的偏差,对模型中的水冷换热系数模型进行修正。学习原理如下:

$$\alpha^* = \alpha \times \frac{\Delta T_{mea}}{\Delta T_{cal}} \quad (3-8)$$

其中: $\Delta T_{mea} = T7_{mea} - SCT_{mea}$, $\Delta T_{cal} = T7_{cal} - SCT_{cal}$ 。

进行模型短期自学习时,取最近十块钢的自学习系数,并根据它们冷却的时间先后顺序对自学习系数取权重。将这十块钢取权后的平均值作为当前钢板的短期自学习系数。

首先计算钢板所在部位(头部、中部或者尾部)的学习瞬时值,其计算方法如下:

$$\begin{aligned} T7_{mea} &= (T7[0] + T7[1] + T7[2] + \dots + T7[n-2] + T7[n-1]) / n \\ SCT_{mea} &= (T6[0] + T6[1] + T6[2] + \dots + T6[n-2] + T6[n-1]) / n \\ \Delta T_{mea} &= SCT_{mea} - T7_{mea} \\ \Delta T_{cal} &= SCT_{cal} - T7_{cal} \end{aligned}$$

$$APHST0 = \Delta T_{mea} / \Delta T_{cal}$$

然后建立钢板头部、定长部、尾部的自学习队列，三个部分对应的实测系数分别为 WPHST0、WPHST1、WPHST2。当一个新的轧件通过温度计 T7 时，将测到的三个部分的系数存放到所在队列的第十个位置。当队列的元素个数（轧件块数）小于十个时，往队列里面填充元素。当队列被填满时，最先进入的轧件被清除掉。

在本算法中，最后进入队列的元素（轧件）序列号为 10，最先进入的元素（轧件）序列号为 1，并遵循以下规则进行计算：

- ①算法对队列中的数据进行过滤，取过滤后的数据进行自学习计算。
- ②根据轧件在队列中的时间分配权重，权重按时间下降。
- ③超过一个小时的轧件数据不用，其权重取为零。
- ④自学习系数等于队列中按时间取权重的平均值。

本块钢的长期自学习系数等于上一块钢的长期自学习系数和本块钢的短期自学习系数作指数平滑处理。增益系数的选择原则必须是能反映长期学习系数缓慢变化的趋势，长期学习系数接近于短期自学习系数。

3.5.2 空冷自学习

空冷自学习的基本原理是根据当前钢板空冷温降的实测值和计算值的偏差，对模型中的黑度系数进行修正。学习原理如下：

$$\alpha^* = \alpha \times \frac{\Delta T_{mea}}{\Delta T_{cal}} \quad (3-9)$$

其中： $\Delta T_{mea} = FRT_{mea}^{-3} - SCT_{mea}^{-3}$

$$\Delta T_{cal} = FRT_{cal}^{-3} - SCT_{cal}^{-3}$$

进行短期自学习时，取最近十块钢的自学习系数，并根据它们冷却的时间先后顺序对自学习系数取权重。将这十块钢取权后的平均值作为当前钢板的短期自学习系数。

通过对上一块钢板的长期自学习系数和本块钢板的短期自学习系数作指数平滑处理，即得到本块钢板的长期自学习系数。

$$APHST0 = \Delta T_{mea} / \Delta T_{cal}$$

然后建立钢板头部、定长部、尾部的自学习队列，三个部分对应的实测系数分别为 WPHST0、WPHST1、WPHST2。当一个新的轧件通过温度计 T7 时，将测到的三个部分的系数存放到所在队列的第十个位置。当队列的元素个数（轧件块数）小于十个时，往队列里面填充元素。当队列被填满时，最先进入的轧件被清除掉。

在本算法中，最后进入队列的元素（轧件）序列号为 10，最先进入的元素（轧件）序列号为 1，并遵循以下规则进行计算：

- ①算法对队列中的数据进行过滤，取过滤后的数据进行自学习计算。
- ②根据轧件在队列中的时间分配权重，权重按时间下降。
- ③超过一个小时的轧件数据不用，其权重取为零。
- ④自学习系数等于队列中按时间取权重的平均值。

本块钢的长期自学习系数等于上一块钢的长期自学习系数和本块钢的短期自学习系数作指数平滑处理。增益系数的选择原则必须是能反映长期学习系数缓慢变化的趋势，长期学习系数接近于短期自学习系数。

3.5.2 空冷自学习

空冷自学习的基本原理是根据当前钢板空冷温降的实测值和计算值的偏差，对模型中的黑度系数进行修正。学习原理如下：

$$\alpha^* = \alpha \times \frac{\Delta T_{mea}}{\Delta T_{cal}} \quad (3-9)$$

其中： $\Delta T_{mea} = FRT_{mea}^{-3} - SCT_{mea}^{-3}$

$$\Delta T_{cal} = FRT_{cal}^{-3} - SCT_{cal}^{-3}$$

进行短期自学习时，取最近十块钢的自学习系数，并根据它们冷却的时间先后顺序对自学习系数取权重。将这十块钢取权后的平均值作为当前钢板的短期自学习系数。

通过对上一块钢板的长期自学习系数和本块钢板的短期自学习系数作指数平滑处理，即得到本块钢板的长期自学习系数。

3.6 本章小节

(1) 实验室控冷试验

从实验室条件下的控冷试验中,得到高温钢板冷却时的空冷温降为 $1.2\sim 1.6^{\circ}\text{C}/\text{s}$;试样心部水冷温降为 $2.6\sim 3.4^{\circ}\text{C}/\text{s}$;水冷后中心与表面温度温差为 151°C ;返红后中心与表面温差为 130°C 。

(2) 空冷模型的研究

建立空冷换热系数模型,并通过实测空冷温降数据反推出黑度系数在 $0.7\sim 0.85$ 之间。空冷时钢板厚度方向上的温度梯度随厚度的增加而变大;返红时,钢板越薄,返红时间越短,表面温度上升的速率越大,中心和厚度上平均冷却速率越大。

(3) 水冷换热系数的研究

水流量增加,换热系数增大,但不成线形关系,而是有一极限值;钢板温度增加,水冷换热系数减小,但在不同的温度区间其值大小相差甚远;换热系数随水温升高而变小,但水温的变化对换热系数的影响很小。

(4) 自学习模型的研究

自学习模型包括空冷自学习、水冷自学习、边部遮蔽量自学习、头尾遮蔽量自学习、水量比自学习、加速度自学习。根据实测温度和计算温度的偏差,以指数加权法进行参数的自学习。

第4章 热物性参数选取及温度场的分布

在第二章中我们曾经介绍了导热微分方程, 这个方程的基本含义是把温度场在时间和空间领域内的各点的值内在地联系起来。然而它并不能给出各个具体的, 存在于导热物体内的温度场。只有具备足够的条件才能使物体内的温度场唯一地确定下来。这种单值条件一般指的是几何条件、物性条件、时间条件和边界条件^[75]。本章将对温度场计算中涉及到的物性参数及温度场分布的影响因素加以分析。

4.1 热物性参数的选取

热物性参数指的是材料的热物理性能的参数。热物性参数可分为两类, 一类是常物性参数, 即参数不是温度等状态参数的函数, 也不随材料取向不同而不同(各向同性)。另一类是变物性参数, 通常指物性随温度不同而变化, 也可包括物性随材料取向不同而变化(各向异性)。

控制冷却温度计算的过程中要用到比热、热传导率、密度等物性参数, 这些参数依存于温度而变化, 是变物性参数^[89], 因此模型计算时必须对应于该时刻温度的值。其中, 比热和热传导率随温度变化的影响较大, 而密度对温度的依赖性非常小, 多数使用 7800kg/m^3 这一固定值^[90]。

4.1.1 变物性参数的处理

以简单的一维导热方程为例, 式(2-2)可写为

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4-1)$$

这是一个非线性方程, 它在求解上是困难的, 为此将因变量 T 用新因变量 V 来代替, 即按下式进行变换

$$dV = \frac{k}{k_0} dT \quad (4-2)$$

k_0 是对应某特定温度 T_0 的导热系数, 由式(4-2)得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial V}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{k_0} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

第4章 热物性参数选取及温度场的分布

在第二章中我们曾经介绍了导热微分方程, 这个方程的基本含义是把温度场在时间和空间领域内的各点的值内在地联系起来。然而它并不能给出各个具体的, 存在于导热物体内的温度场。只有具备足够的条件才能使物体内的温度场唯一地确定下来。这种单值条件一般指的是几何条件、物性条件、时间条件和边界条件^[75]。本章将对温度场计算中涉及到的物性参数及温度场分布的影响因素加以分析。

4.1 热物性参数的选取

热物性参数指的是材料的热物理性能的参数。热物性参数可分为两类, 一类是常物性参数, 即参数不是温度等状态参数的函数, 也不随材料取向不同而不同(各向同性)。另一类是变物性参数, 通常指物性随温度不同而变化, 也可包括物性随材料取向不同而变化(各向异性)。

控制冷却温度计算的过程中要用到比热、热传导率、密度等物性参数, 这些参数依存于温度而变化, 是变物性参数^[89], 因此模型计算时必须对应于该时刻温度的值。其中, 比热和热传导率随温度变化的影响较大, 而密度对温度的依赖性非常小, 多数使用 7800kg/m^3 这一固定值^[90]。

4.1.1 变物性参数的处理

以简单的一维导热方程为例, 式(2-2)可写为

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4-1)$$

这是一个非线性方程, 它在求解上是困难的, 为此将因变量 T 用新因变量 V 来代替, 即按下式进行变换

$$dV = \frac{k}{k_0} dT \quad (4-2)$$

k_0 是对应某特定温度 T_0 的导热系数, 由式(4-2)得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial V}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{k_0} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

将上式代入(4-1)，得

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial V}{\partial \tau} \quad (4-3)$$

式(4-3)对稳定导热问题，则直接转化为线性方程，对一般情况，仍是非线性方程，但它比(4-1)处理起来简单多了。

这里只作简要说明，在后述的分析计算中对变物性参数的选取有具体的应用。

4.1.2 比热系数的选取及对温度响应的影响

4.1.2.1 比热系数的选择

表 4.1 列出了具有代表性钢种的比热值，根据表 4.1 我们得到温度与比热的离散关系曲线，如图 4.1 中的给定曲线所示。

表 4.1 比热表 (kJ/kg·K)

Table 4.1 Specific heat

温度℃	沸腾钢 0.06%C	镇静钢 0.08%C	低碳钢 0.23%C	中碳钢 0.4%C	S _i -M _n 钢
400-450	0.627	0.627	0.627	0.61028	0.627
450-500	0.66044	0.66044	0.66044	0.65208	0.6688
500-550	0.70224	0.69388	0.70224	0.68552	0.70224
550-600	0.7524	0.74404	0.74404	0.7106	0.7524
600-650	0.80256	0.78584	0.78584	0.72732	0.70224
650-700	0.86108	0.85272	0.84436	0.76912	0.82764
700-750	1.10352	1.13696	1.42956	1.58004	0.90288
750-800	0.86108	0.9614	0.95304	0.61864	1.36268
800-850	0.80256	0.86108	0.74404	0.50996	0.61028
850-900	0.836	0.81092	0.64372	0.5434	0.627
900-950	0.66044	0.65208	0.65208	0.627	0.627
950-1000	0.6688	0.65208	0.64372	0.61864	0.63536
1000-1050	0.6688	0.66044	0.65208	0.63536	0.64372

将上式代入(4-1)，得

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial V}{\partial \tau} \quad (4-3)$$

式(4-3)对稳定导热问题，则直接转化为线性方程，对一般情况，仍是非线性方程，但它比(4-1)处理起来简单多了。

这里只作简要说明，在后述的分析计算中对变物性参数的选取有具体的应用。

4.1.2 比热系数的选取及对温度响应的影响

4.1.2.1 比热系数的选择

表 4.1 列出了具有代表性钢种的比热值，根据表 4.1 我们得到温度与比热的离散关系曲线，如图 4.1 中的给定曲线所示。

表 4.1 比热表 (kJ/kg·K)

Table 4.1 Specific heat

温度℃	沸腾钢 0.06%C	镇静钢 0.08%C	低碳钢 0.23%C	中碳钢 0.4%C	S _i -M _n 钢
400-450	0.627	0.627	0.627	0.61028	0.627
450-500	0.66044	0.66044	0.66044	0.65208	0.6688
500-550	0.70224	0.69388	0.70224	0.68552	0.70224
550-600	0.7524	0.74404	0.74404	0.7106	0.7524
600-650	0.80256	0.78584	0.78584	0.72732	0.70224
650-700	0.86108	0.85272	0.84436	0.76912	0.82764
700-750	1.10352	1.13696	1.42956	1.58004	0.90288
750-800	0.86108	0.9614	0.95304	0.61864	1.36268
800-850	0.80256	0.86108	0.74404	0.50996	0.61028
850-900	0.836	0.81092	0.64372	0.5434	0.627
900-950	0.66044	0.65208	0.65208	0.627	0.627
950-1000	0.6688	0.65208	0.64372	0.61864	0.63536
1000-1050	0.6688	0.66044	0.65208	0.63536	0.64372

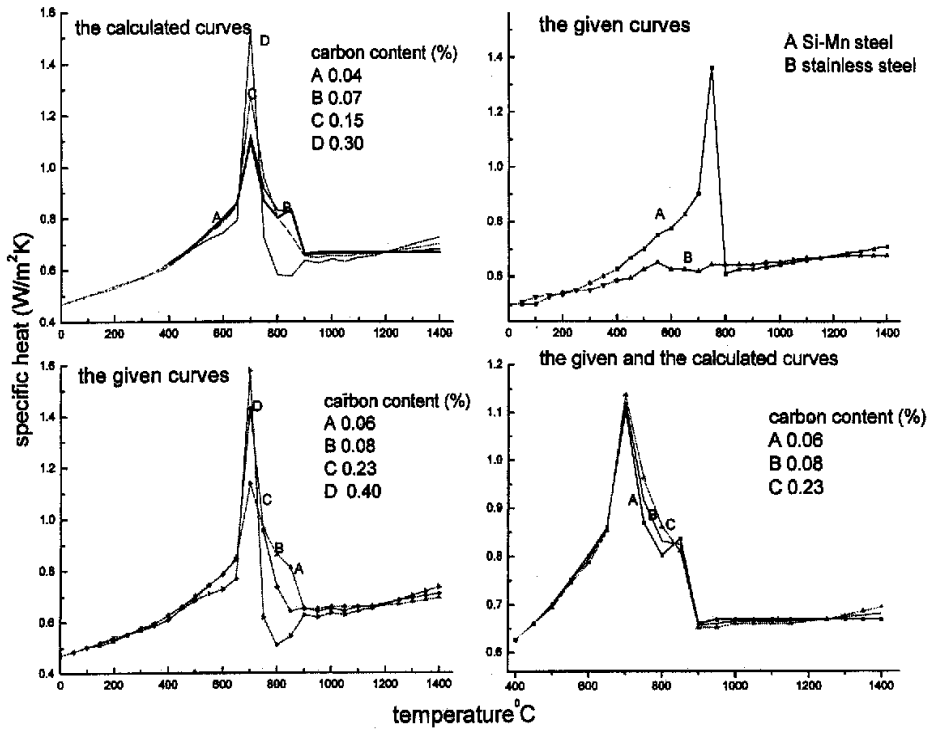


图 4.1 不同钢种对应的比热曲线

Fig.4.1 Specific heat curves of different steel grade

有关传热学参考书上给出的比热多是与温度和含碳量有关的离散值，而在应用导热微分方程求解温度场时，可能用到几乎连续的温度和含碳量值。为了满足模型计算的需要，我们以表格 4.1 给定的比热值为基础建立比热系数模型。建模的过程为：根据钢板的含碳量值，判断给定钢种的比热值介于哪两条已知曲线之间，设为 m 、 n ，再根据含碳量用插值法确定对 m 、 n 的权重系数；然后根据给定温度在给定的温度区间进行线性插值，求出某钢种在某点温度下的比热值。

以含碳量值为界限，可得到如下各个区间的含碳量权重模型：

[1] 对含碳量低于 0.06% 的钢种，认为其比热与含碳量为 0.06% 的钢种相同，即视其比热参数对含碳量为 0.06% 的钢种的权重为 1。

[2] 含碳量介于 0.06 ~ 0.08% 的钢种对应的比热在含碳量为 0.06 和 0.08% 的钢种之间进行线性插值，权重系数为：

$$\text{weight} = -50 \times c\% + 4。$$

[3] 含碳量介于 0.08 ~ 0.23% 的钢种对应的比热在含碳量为 0.08 和 0.23% 的钢种

之间进行线性插值, 权重系数为:

$$\text{weight} = -(20.0/3) * c\% + 23.0/15。$$

[4] 含碳量介于 0.23 ~ 0.4% 的钢种对应的比热在含碳量为 0.23 和 0.40% 的钢种之间进行线性插值, 权重系数为:

$$\text{weight} = -(100/32.0) * c\% + 1.25。$$

[5] 含碳量大于 0.4% 的钢种处理方法同[1]。

[6] Si-Mn 钢和不锈钢按照给定的参数执行计算, 对特殊钢种结合现场实际进行修正。

4.1.2.2 比热对温度响应的影响

单位质量的物质温度升高一度所吸收的热量称为比热。比热不仅与材料本身有关, 而且随温度变化而变化。中厚板冷却过程要严格控制其厚度上的温度分布, 因而不能忽略比热随温度的变化。我们暂且假定钢板的密度和热传导系数是常数, 且不考虑厚度上的温度分布, 来分析比热对温度响应的影响。

设在一定区间内比热随温度的变化是线性的, 即

$$c = c_0 + k(T - T_0)$$

由此得

$$T = T_0 + \frac{c - c_0}{k} \quad (4-4)$$

根据牛顿定律 $Q = \alpha \cdot S \cdot (T_\infty - T_w)$ 得

$$\begin{cases} \rho \cdot c \cdot h \cdot \frac{dT}{d\tau} = \alpha \cdot (T_\infty - T_w) \\ \tau = 0, T = T_0 \end{cases} \quad (4-5)$$

把(4-4)代入(4-5), 得

$$\begin{cases} \rho \cdot c \cdot h \cdot \frac{d}{d\tau} \left(\frac{c}{k} \right) = \alpha \cdot (T_\infty - T_0 - \frac{c - c_0}{k}) \\ \tau = 0, \quad c = c_0 \end{cases} \quad (4-6)$$

对式(4-6)分离变量后

$$\frac{cdc}{k \cdot (T_\infty - T) - (c - c_0)} = \frac{\alpha}{\rho \cdot h} \cdot d\tau \quad (4-7)$$

对式(4-7)等号两边取积分, 积分的上下限可根据(4-6)提供的初始条件确定, 整理后得

$$-\int_{c_0}^c \left(1 + \frac{c_0 + k(T_\infty - T_0)}{(c - c_0) - k \cdot (T_\infty - T_0)}\right) dc = \int_0^\tau \frac{\alpha}{\rho \cdot h} \cdot d\tau$$

等式两边分别积分并代入积分限得

$$-\left\{(c - c_0) + [c_0 + k(T_\infty - T_0)] \ln \frac{(c - c_0) - k \cdot (T_\infty - T_0)}{-k(T_\infty - T_0)}\right\} = \frac{\alpha}{\rho \cdot h} \cdot \tau$$

整理得

$$\left(\frac{c}{c_0} - 1\right) + \frac{c_\infty}{c_0} \ln \left[1 - \frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}\right] = -\frac{\alpha}{\rho \cdot c \cdot h} \cdot \tau$$

式中, c_∞ 是物体温度为 T_∞ 时的比热, 上式进一步整理得

$$\left(\frac{c_\infty}{c_0} - 1\right) \left(\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}\right) + \frac{c_\infty}{c_0} \ln \left[1 - \frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}\right] = -\frac{\alpha}{\rho \cdot c \cdot h} \cdot \tau$$

令 $\theta = \frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}$, 则

$$-\frac{\alpha}{\rho \cdot c \cdot h} \cdot \tau = \frac{c_\infty}{c_0} \ln(1 - \theta) + \left(\frac{c_\infty}{c_0} - 1\right)\theta \quad (4-8)$$

式(4-8)是温度响应 $(T - T_0)$ 的隐式函数形式。令 $\frac{c_\infty}{c_0}$ 分别等于 0.5、1 和 2 来表示比热随时间增加而减小、不变和增大的情况, 得到如图 4.2 所示的温度响应曲线 a、b 和 c。

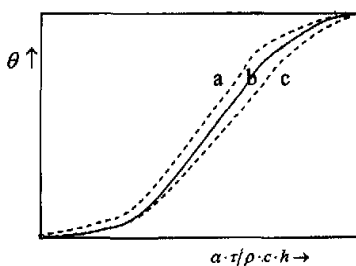


图 4.2 比热变化对温度响应曲线的影响

Fig.4.2 Effect of specific heat on temperature response curve

若比热随温度线性增加, 则钢板在冷却过程中, 动态过程随时间的增加而变得缓慢起来; 相反, 若比热随温度增加线性下降, 则钢板在冷却过程中, 随时间增加而动态过程变快。从图 4.2 上可以看出, a 曲线所表示的过程比 b 曲线要快, 而 c

曲线表示的过程比 b 曲线要慢。

在上述推导中，对被积函数做了变换，由温度 $T(\tau)$ 变成比热 $c(\tau)$ ，这样，求解变比热温度响应问题变换成求解比热随时间变化问题；在求得比热随时间变化规律后，再反变换成物体随时间的变化规律。这种函数变换的方法，在后续计算中仍有应用。

4.1.3 热传导系数的选取

导热系数 λ 又称热导率，指一定温度梯度下单位时间单位面积上传导的热量，单位为 $W/(m \cdot K)$ 。它是由该点的材料性质决定的，是表征固体材料各处热传导能力强弱的物理量，即导热系数是物体的固有属性，也是一种物性量。

由 Fourier 定律得 $\lambda = |q|/gradT$ ，其物理意义是过温度场内 P 点有一任一平面 A，在垂直于 A 平面方向上，当每单位长度温度差别为一个单位时，单位时间内通过每单位面积的热量。随板材厚度增加，热传导逐渐上升为控制传热过程的重要因素，热传导系数的作用增强。表 4.2 给出了典型钢种的热传导系数值，根据表 4.2 得到热传导系数的离散曲线，如图 4.3 中给定曲线所示。

表 4.2 热传导系数表 ($W/m \cdot K$)
Table 4.2 Thermal-conductivity coefficient

温度 $^{\circ}C$	沸腾钢 0.06%C	镇静钢 0.08%C	低碳钢 0.23%C	中碳钢 0.4%C	Si-Mn 钢
400	46.52	44.7755	42.6821	41.868	30.9358
450	43.4962	42.3332	41.0539	40.2398	30.9358
500	41.0539	40.2398	39.3094	38.1464	30.9358
550	39.3094	38.1464	37.6812	36.053	30.5869
600	37.6812	36.053	35.5878	33.9596	30.1217
650	36.053	33.9596	33.9596	32.2151	29.3076
700	33.9596	31.8662	31.8662	30.1217	28.0283
750	31.8662	29.7728	28.4935	27.2142	26.4001
800	30.1217	28.4935	25.9349	24.6556	25.1208
850	27.6794	27.2142	25.9349	24.6556	25.1208
900	27.2142	26.749	26.4001	25.586	25.586
950	27.2142	27.2142	26.749	25.9349	25.9349
1000	27.6794	27.6794	27.2142	26.749	26.4001

曲线表示的过程比 b 曲线要慢。

在上述推导中，对被积函数做了变换，由温度 $T(\tau)$ 变成比热 $c(\tau)$ ，这样，求解变比热温度响应问题变换成求解比热随时间变化问题；在求得比热随时间变化规律后，再反变换成物体随时间的变化规律。这种函数变换的方法，在后续计算中仍有应用。

4.1.3 热传导系数的选取

导热系数 λ 又称热导率，指一定温度梯度下单位时间单位面积上传导的热量，单位为 $W/(m \cdot K)$ 。它是由该点的材料性质决定的，是表征固体材料各处热传导能力强弱的物理量，即导热系数是物体的固有属性，也是一种物性量。

由 Fourier 定律得 $\lambda = |q|/gradT$ ，其物理意义是过温度场内 P 点有一任一平面 A，在垂直于 A 平面方向上，当每单位长度温度差别为一个单位时，单位时间内通过每单位面积的热量。随板材厚度增加，热传导逐渐上升为控制传热过程的重要因素，热传导系数的作用增强。表 4.2 给出了典型钢种的热传导系数值，根据表 4.2 得到热传导系数的离散曲线，如图 4.3 中给定曲线所示。

表 4.2 热传导系数表 ($W/m \cdot K$)
Table 4.2 Thermal-conductivity coefficient

温度 $^{\circ}C$	沸腾钢 0.06%C	镇静钢 0.08%C	低碳钢 0.23%C	中碳钢 0.4%C	Si-Mn 钢
400	46.52	44.7755	42.6821	41.868	30.9358
450	43.4962	42.3332	41.0539	40.2398	30.9358
500	41.0539	40.2398	39.3094	38.1464	30.9358
550	39.3094	38.1464	37.6812	36.053	30.5869
600	37.6812	36.053	35.5878	33.9596	30.1217
650	36.053	33.9596	33.9596	32.2151	29.3076
700	33.9596	31.8662	31.8662	30.1217	28.0283
750	31.8662	29.7728	28.4935	27.2142	26.4001
800	30.1217	28.4935	25.9349	24.6556	25.1208
850	27.6794	27.2142	25.9349	24.6556	25.1208
900	27.2142	26.749	26.4001	25.586	25.586
950	27.2142	27.2142	26.749	25.9349	25.9349
1000	27.6794	27.6794	27.2142	26.749	26.4001

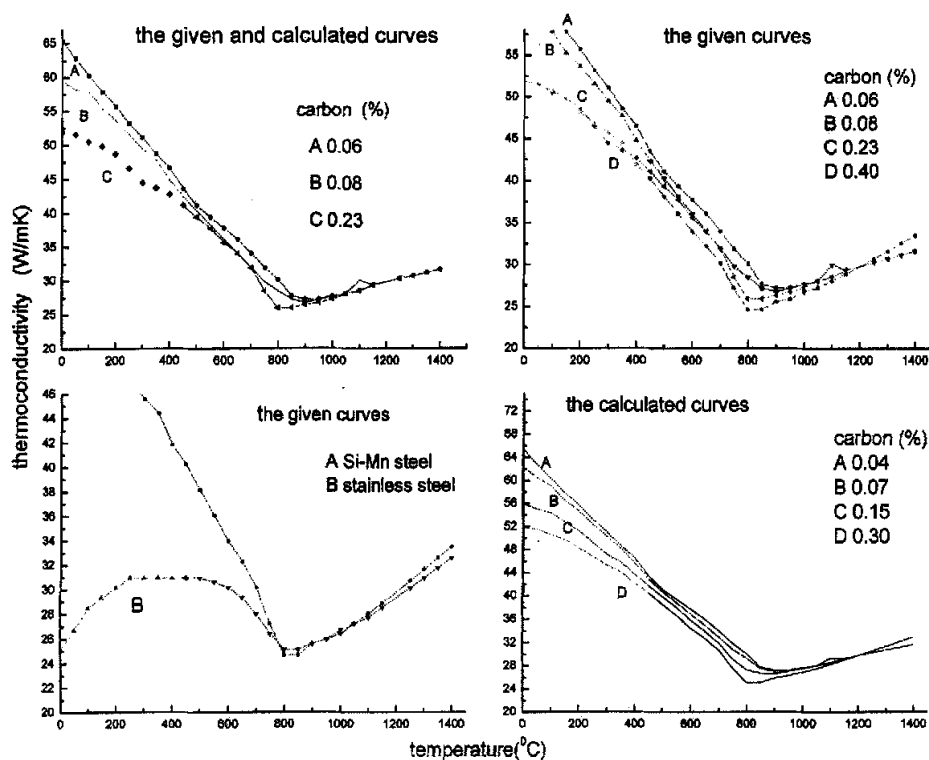


图 4.3 热传导系数曲线

Fig.4.3 Thermal conductivity coefficient Curves

当研究区域内存在内热源，并且该区域内温度相差较大时，导热系数对温度场的影响非常明显，此时必须考虑到导热系数随温度的变化。热传导系数模型的建立方法同比热模型，参见 4.1.2.1 小节。

4.2 厚度方向上温度分布的影响参数

冷却过程中，轧件表面温度急剧下降，内部温度变得严重不均，水冷后轧件温度又逐渐趋于一致。轧件断面上的温度差会造成轧件内的温度应力，如果应力差过大就会造成裂纹，影响成品的组织性能。因此在厚度值很小的情况下可以认为轧件内外处于同一温度下。但随着厚度的增加，钢板内部的热传导已不能忽略，而表面和冷却水进行对流换热，两者的换热速率不同，表面温降明显偏大，从而使表面和心部产生温差，厚度越大，内外温差越大，整体平均温度和表面温度的差别就越大。所以对于厚板而言，是不能忽视内部的热传导的^[75,88-90]。

由于生产现场只能实测到轧件的表面温度，为了制定合理的冷却工艺、防止断面上产生过大的温度应力，必须了解轧件厚度上温度场分布的特点和影响因素，以

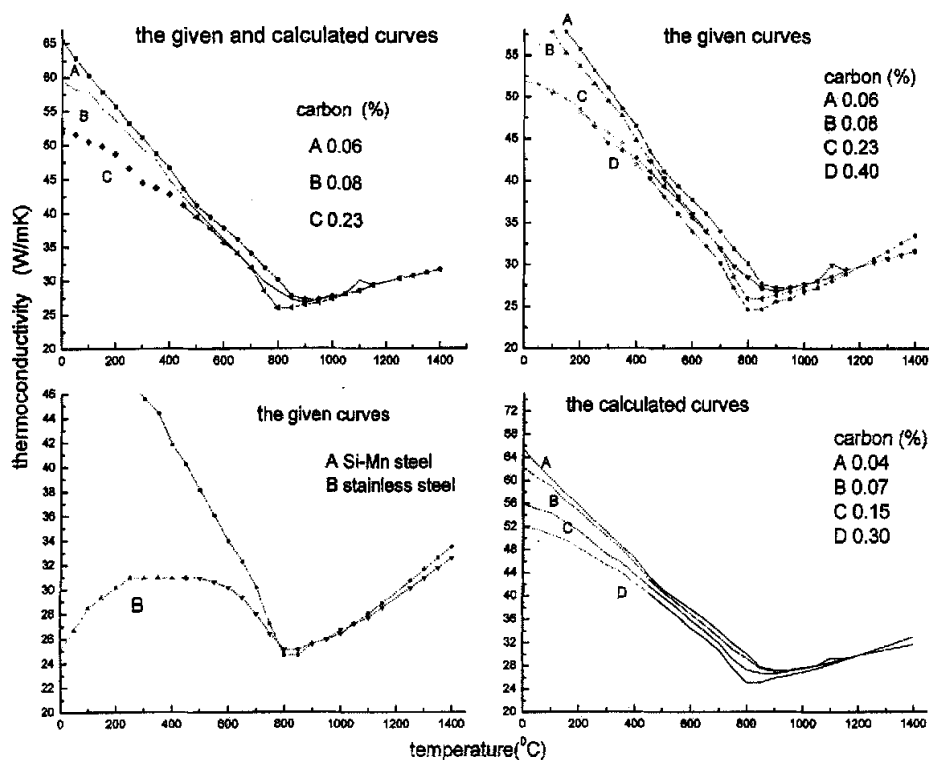


图 4.3 热传导系数曲线

Fig.4.3 Thermal conductivity coefficient Curves

当研究区域内存在内热源，并且该区域内温度相差较大时，导热系数对温度场的影响非常明显，此时必须考虑到导热系数随温度的变化。热传导系数模型的建立方法同比热模型，参见 4.1.2.1 小节。

4.2 厚度方向上温度分布的影响参数

冷却过程中，轧件表面温度急剧下降，内部温度变得严重不均，水冷后轧件温度又逐渐趋于一致。轧件断面上的温度差会造成轧件内的温度应力，如果应力差过大就会造成裂纹，影响成品的组织性能。因此在厚度值很小的情况下可以认为轧件内外处于同一温度下。但随着厚度的增加，钢板内部的热传导已不能忽略，而表面和冷却水进行对流换热，两者的换热速率不同，表面温降明显偏大，从而使表面和心部产生温差，厚度越大，内外温差越大，整体平均温度和表面温度的差别就越大。所以对于厚板而言，是不能忽视内部的热传导的^[75,88-90]。

由于生产现场只能实测到轧件的表面温度，为了制定合理的冷却工艺、防止断面上产生过大的温度应力，必须了解轧件厚度上温度场分布的特点和影响因素，以

使模型更加准确地计算温度场的分布,从而严格控制厚度上的温度分布梯度,满足性能需要^[93]。

4.2.1 厚度上的温度分布特点

根据前述的冷却过程模型和热物性系数,以有限差分法模拟钢板厚度方向上的温度分布,计算条件是 30mm 厚、含碳量为 0.07% 的普碳钢,集管水量为 100m³/hr,冷却时间分别为 5s、10s、15s、20s、25s、30s,模拟结果如图 4.4 所示。曲线在厚度方向上近似抛物线分布,随冷却时间的增加,钢板表面和内部的温度梯度也逐渐加大。

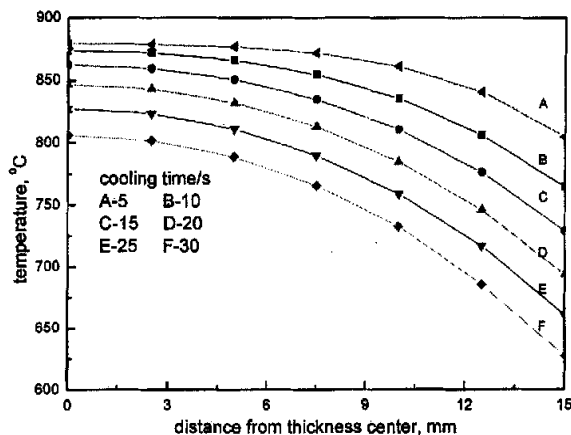


图 4.4 不同冷却时间下钢板厚度方向上的温度分布曲线

Fig.4.4 Temperature distribution curves with different cooling time

4.2.2 相变热对温度场分布的影响

钢在高温奥氏体区进行轧制,随后在冷却过程中由面心立方结构的奥氏体组织状态向体心立方结构的铁素体转变,钢发生体积膨胀,同时释放相变热。下面来分析相变热对温度场分布的影响。

暂且假定冷却过程为稳态导热,其它热物性参数为常数,则钢板的传热方程可写成

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q'}{\lambda} = 0 \quad (4-9)$$

边界条件为对流换热形式,即

使模型更加准确地计算温度场的分布,从而严格控制厚度上的温度分布梯度,满足性能需要^[93]。

4.2.1 厚度上的温度分布特点

根据前述的冷却过程模型和热物性系数,以有限差分法模拟钢板厚度方向上的温度分布,计算条件是 30mm 厚、含碳量为 0.07% 的普碳钢,集管水量为 100m³/hr,冷却时间分别为 5s、10s、15s、20s、25s、30s,模拟结果如图 4.4 所示。曲线在厚度方向上近似抛物线分布,随冷却时间的增加,钢板表面和内部的温度梯度也逐渐加大。

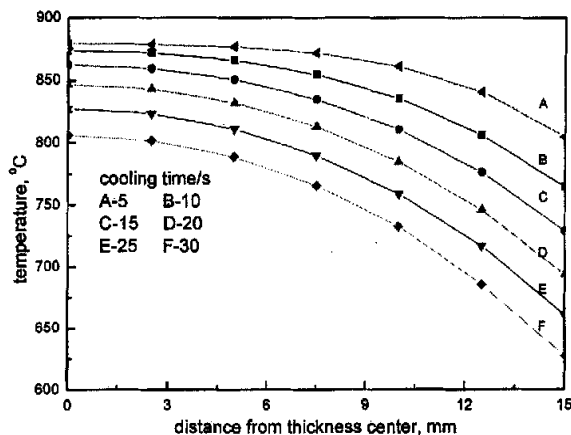


图 4.4 不同冷却时间下钢板厚度方向上的温度分布曲线

Fig.4.4 Temperature distribution curves with different cooling time

4.2.2 相变热对温度场分布的影响

钢在高温奥氏体区进行轧制,随后在冷却过程中由面心立方结构的奥氏体组织状态向体心立方结构的铁素体转变,钢发生体积膨胀,同时释放相变热。下面来分析相变热对温度场分布的影响。

暂且假定冷却过程为稳态导热,其它热物性参数为常数,则钢板的传热方程可写成

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q'}{\lambda} = 0 \quad (4-9)$$

边界条件为对流换热形式,即

使模型更加准确地计算温度场的分布,从而严格控制厚度上的温度分布梯度,满足性能需要^[93]。

4.2.1 厚度上的温度分布特点

根据前述的冷却过程模型和热物性系数,以有限差分法模拟钢板厚度方向上的温度分布,计算条件是 30mm 厚、含碳量为 0.07% 的普碳钢,集管水量为 100m³/hr,冷却时间分别为 5s、10s、15s、20s、25s、30s,模拟结果如图 4.4 所示。曲线在厚度方向上近似抛物线分布,随冷却时间的增加,钢板表面和内部的温度梯度也逐渐加大。

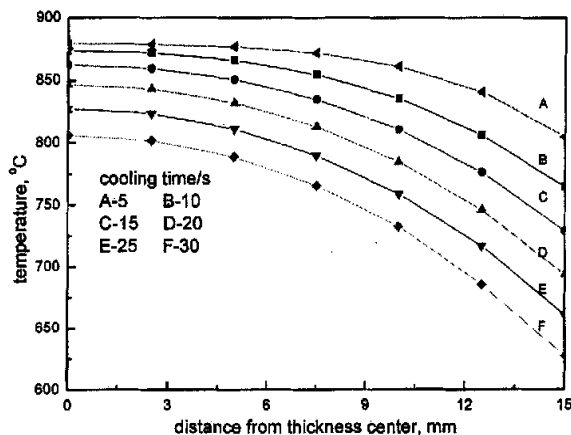


图 4.4 不同冷却时间下钢板厚度方向上的温度分布曲线

Fig.4.4 Temperature distribution curves with different cooling time

4.2.2 相变热对温度场分布的影响

钢在高温奥氏体区进行轧制,随后在冷却过程中由面心立方结构的奥氏体组织状态向体心立方结构的铁素体转变,钢发生体积膨胀,同时释放相变热。下面来分析相变热对温度场分布的影响。

暂且假定冷却过程为稳态导热,其它热物性参数为常数,则钢板的传热方程可写成

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q'}{\lambda} = 0 \quad (4-9)$$

边界条件为对流换热形式,即

$$\begin{aligned} x=0, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha(T_{\infty} - T) \\ x=h, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha(T_{\infty} - T) \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中, q' —热源强度 (单位长度单位时间产生的热量)。

方程(4-9)的一般解为

$$T = -\frac{q'}{2\lambda}x^2 + C_1x + C_2 \quad (4-11)$$

将式(4-11)代入(4-10), 得

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{h}{2\lambda} \cdot q' \\ C_2 &= \frac{h}{2\alpha} \cdot q' + T_{\infty} \end{aligned} \quad (4-12)$$

将式(4-12)代入式(4-11), 得

$$T = -\frac{q'}{2\lambda}x^2 + \frac{h \cdot q'}{2\lambda}x + \frac{h \cdot q'}{2\alpha} + T_{\infty} \quad (4-13)$$

从式(4-13)可以看出, 钢板内部温度分布是厚度的二次抛物线, 并以中心厚度为对称面, 如图 4.5 所示。

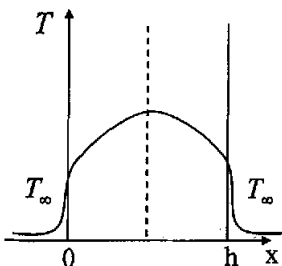


图 4.5 相变热对温度场分布的影响

Fig. 4.5 Affect of heat of transformation on temperature distribution

4.2.3 热传导系数对温度场影响的分析解

冷却过程中, 钢板内部温差较大, 并且热传导系数随温度的变化明显, 所以要考虑热传导系数对温度分布的影响。

考虑到分析求解的可能性, 把热传导系数随温度的变化规律假定为如下线形关系

$$\lambda = \lambda_0[1 + k(T - T_0)] \quad (4-14)$$

$$\begin{aligned} x=0, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha(T_{\infty} - T) \\ x=h, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha(T_{\infty} - T) \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中, q' —热源强度 (单位长度单位时间产生的热量)。

方程(4-9)的一般解为

$$T = -\frac{q'}{2\lambda}x^2 + C_1x + C_2 \quad (4-11)$$

将式(4-11)代入(4-10), 得

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{h}{2\lambda} \cdot q' \\ C_2 &= \frac{h}{2\alpha} \cdot q' + T_{\infty} \end{aligned} \quad (4-12)$$

将式(4-12)代入式(4-11), 得

$$T = -\frac{q'}{2\lambda}x^2 + \frac{h \cdot q'}{2\lambda}x + \frac{h \cdot q'}{2\alpha} + T_{\infty} \quad (4-13)$$

从式(4-13)可以看出, 钢板内部温度分布是厚度的二次抛物线, 并以中心厚度为对称面, 如图 4.5 所示。

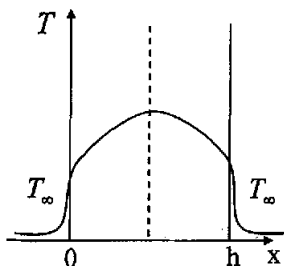


图 4.5 相变热对温度场分布的影响

Fig. 4.5 Affect of heat of transformation on temperature distribution

4.2.3 热传导系数对温度场影响的分析解

冷却过程中, 钢板内部温差较大, 并且热传导系数随温度的变化明显, 所以要考虑热传导系数对温度分布的影响。

考虑到分析求解的可能性, 把热传导系数随温度的变化规律假定为如下线形关系

$$\lambda = \lambda_0[1 + k(T - T_0)] \quad (4-14)$$

式中, T_0 —假定的一参考温度;

λ_0 —温度为 T_0 时的热传导系数;

k —热传导系数随温度的变化率, 若 λ 是温度的递增函数, 则 k 为正值, 若 λ 为温度的递减函数, 则 k 为负值。

仅考虑钢板的热传导系数为温度的函数和厚度方向上的温度分布, 则钢板内部导热微分方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + q' = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

在这里可以写成

$$\frac{d}{dx}(\lambda \frac{dT}{dx}) = 0 \quad (4-15)$$

钢板处于对流换热状态下, 则边界条件为

$$\begin{aligned} x=0, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha(T_\infty - T) \\ x=h, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha(T_\infty - T) \end{aligned} \quad (4-16)$$

在这里, 仍然采用比热求解温度响应时用到的变换变量法, 对因变量 T 进行变换, 即把求解温度场的问题变换为求解物性场的问题。所以, 将式(4-14)改写成以下形式

$$T = \frac{\lambda - \lambda_0}{k \cdot \lambda_0} + T_0 \quad (4-17)$$

得到

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= \frac{1}{k \cdot \lambda_0} \frac{d\lambda}{dx} \\ \frac{d}{dx}(\lambda \cdot \frac{dT}{dx}) &= \frac{d}{dx}(\frac{\lambda}{k \cdot \lambda_0} \frac{d\lambda}{dx}) = \frac{1}{2k\lambda_0} \cdot \frac{d^2\lambda^2}{dx^2} \end{aligned}$$

所以, 方程(4-15)可写成

$$\frac{d^2\lambda^2}{dx^2} = 0 \quad (4-18)$$

该方程的一般解为

$$\lambda^2 = C_1 x + C_2 \quad (4-19)$$

式中 C_1 和 C_2 这两个参数由边界条件来确定。根据函数变换关系, 它们也变成如下形式

$$\begin{aligned} x=0, \quad -\frac{1}{2k_0\lambda} \cdot \frac{d\lambda^2}{dx} &= \alpha_1 \left[T_{\infty 1} - \frac{1}{k} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 \right) - T_0 \right] \\ x=h, \quad -\frac{1}{2k_0\lambda} \cdot \frac{d\lambda^2}{dx} &= \alpha_2 \left[T_{\infty 2} - \frac{1}{k} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 \right) - T_0 \right] \end{aligned} \quad (4-20)$$

将式(4-19)代入上式, 得

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2k_0\lambda} C_1 &= \alpha \left[T_{\infty 1} - \frac{1}{k} \left(\frac{\sqrt{C_2}}{\lambda_0} - 1 \right) - T_0 \right] \\ -\frac{1}{2k_0\lambda} \cdot \frac{d\lambda^2}{dx} &= \alpha \left[T_{\infty 2} - \frac{1}{k} \left(\frac{\sqrt{C_1 h + C_2}}{\lambda_0} - 1 \right) - T_0 \right] \end{aligned} \quad (4-21)$$

这是一个关于 C_1 和 C_2 的方程组, 由此求解 C_1 和 C_2 后, 代入式(4-19)即可得到 λ 在钢板内的分布, 再代入式(4-17)即可得到钢板内部的温度分布。但由于(4-21)是一个非线性方程组, 不易直接求解, 所以只对适用钢板冷却过程的情况进行分析。

由前述分析可知, 钢板冷却过程符合毕渥数 $Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$ 远远大于 1 时的情况, 即钢板内部的导热热阻远远大于边界上的对流换热热阻, 对流换热系数趋于无限大时可符合此条件。此情况下, 式(4-21)仍然成立, 且等号右边不趋于无限大, 即

$$\begin{aligned} T_{\infty 1} &= \frac{1}{k} \left(\frac{\sqrt{C_2}}{\lambda_0} - 1 \right) + T_0 \\ T_{\infty 2} &= \frac{1}{k} \left(\frac{\sqrt{C_1 h + C_2}}{\lambda_0} - 1 \right) + T_0 \end{aligned} \quad (4-22)$$

由式(4-22)求得

$$\begin{aligned} C_1 &= \lambda_0^2 [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2 \\ C_2 &= \frac{1}{h} \lambda_0^2 \{ [1 + k(T_{\infty 2} - T_0)]^2 - [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2 \} \end{aligned}$$

将 C_1 和 C_2 代入(4-19)得,

$$\lambda^2 = \lambda_0^2 \{ [1 + k(T_{\infty 2} - T_0)]^2 - [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2 \} \cdot \frac{x}{h} + \lambda_0^2 [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2$$

由式(4-14)得

$$aT = \left\{ [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2 - [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2 \cdot \frac{x}{h} + [1 + k(T_{\infty 2} - T_0)]^2 \cdot \frac{x}{h} \right\}^{\frac{1}{2}} - 1 + aT_0 \quad (4-23)$$

令 $\lambda_1 = \lambda_0 [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]$, $\lambda_2 = \lambda_0 [1 + k(T_{\infty 2} - T_0)]$, 代入式(4-23), 得

$$aT = \frac{1}{k_0} [k_1^2 - (k_1^2 - k_2^2) \frac{x}{h}]^{\frac{1}{2}} - 1 + aT_0 \quad (4-24)$$

由式(4-24)可知, 导热系数随温度变化时, 钢板内部的温度分布是一条抛物线。导热系数随温度的变化率不同时其抛物线形状不同, 导热系数随温度递增时, 温度分布是一条凸抛物线; 导热系数随温度递减时, 温度分布是一条凹抛物线, 导热系数是常数时, 温度分布是一条直线, 如图 4.6 (a) 所示, 当钢板两边换热系数系统时, 曲线即退化成 (b)。

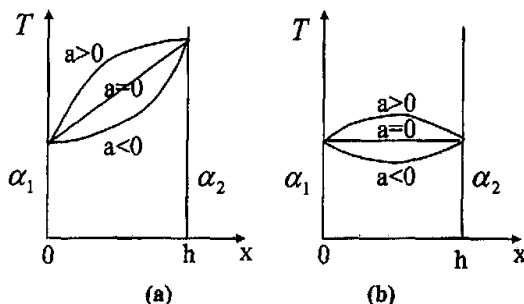


图 4.6 热传导系数变化时钢板内部温度分布

Fig.4.6 Temperature distribution along the thickness with different heat conductivity

4.2.4 比热和热传导系数对温度场的影响

导热系数小, 热量传导较困难, 在过程开始阶段, 表面温度很快接近于环境温度, 而平板内部的温度几乎没有变化, 但在随后的较长时间内, 表面温度变化甚微, 而中心温度随时间不断增长。也就是说, 在相当长的时间过程中, 板内的温度分布是显著的, 不能忽视断面上的温度分布。图 4.7 中给出了导热系数不同时轧件内部的温度场分布情况, 模拟参数为含碳量 0.4%, 厚度 30mm, 水流量 $70\text{m}^3/\text{h}$, 水温 20°C , 开冷温度 880°C , 终冷温度 680°C , 图(a)取表 4.2 中中碳钢的热传导系数进行模拟, 为便于分析, 图(b)中的热传导系数取中碳钢热传导系数的一半。从模拟结果上可以看出导热系数较大时, 在整个传热过程中, 内部的温度差别较小^[75,93,94]。

$$aT = \left\{ [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2 - [1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]^2 \cdot \frac{x}{h} + [1 + k(T_{\infty 2} - T_0)]^2 \cdot \frac{x}{h} \right\}^{\frac{1}{2}} - 1 + aT_0 \quad (4-23)$$

令 $\lambda_1 = \lambda_0[1 + k(T_{\infty 1} - T_0)]$, $\lambda_2 = \lambda_0[1 + k(T_{\infty 2} - T_0)]$, 代入式(4-23), 得

$$aT = \frac{1}{k_0} [k_1^2 - (k_1^2 - k_2^2) \frac{x}{h}]^{\frac{1}{2}} - 1 + aT_0 \quad (4-24)$$

由式(4-24)可知, 导热系数随温度变化时, 钢板内部的温度分布是一条抛物线。导热系数随温度的变化率不同时其抛物线形状不同, 导热系数随温度递增时, 温度分布是一条凸抛物线; 导热系数随温度递减时, 温度分布是一条凹抛物线, 导热系数是常数时, 温度分布是一条直线, 如图 4.6 (a) 所示, 当钢板两边换热系数系统时, 曲线即退化成 (b)。

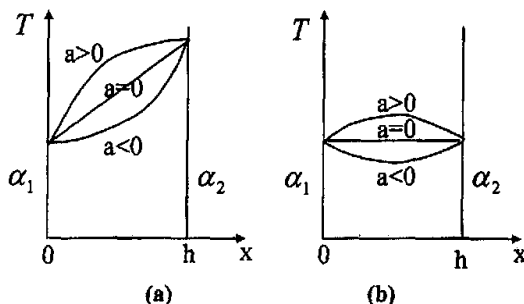


图 4.6 热传导系数变化时钢板内部温度分布

Fig.4.6 Temperature distribution along the thickness with different heat conductivity

4.2.4 比热和热传导系数对温度场的影响

导热系数小, 热量传导较困难, 在过程开始阶段, 表面温度很快接近于环境温度, 而平板内部的温度几乎没有变化, 但在随后的较长时间内, 表面温度变化甚微, 而中心温度随时间不断增长。也就是说, 在相当长的时间过程中, 板内的温度分布是显著的, 不能忽视断面上的温度分布。图 4.7 中给出了导热系数不同时轧件内部的温度场分布情况, 模拟参数为含碳量 0.4%, 厚度 30mm, 水流量 $70\text{m}^3/\text{h}$, 水温 20°C , 开冷温度 880°C , 终冷温度 680°C , 图(a)取表 4.2 中中碳钢的热传导系数进行模拟, 为便于分析, 图(b)中的热传导系数取中碳钢热传导系数的一半。从模拟结果上可以看出导热系数较大时, 在整个传热过程中, 内部的温度差别较小^[75,93,94]。

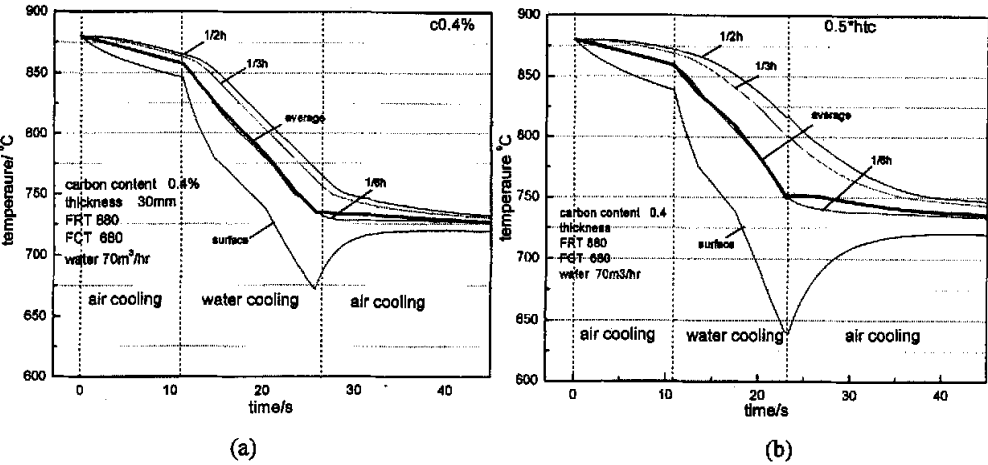


图 4.7 导热系数对温度场分布的影响

Fig. 4.7 Effect of thermal-conductivity coefficient on temperature field distribution

为了更明确地看出比热和热传导系数对温度场的影响，人们引入了导温系数 a 这个概念。导温系数也叫热扩散率，其表达式为 $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ ，单位为 m^2/s ，是一个物性量。式中，导热系数 λ 表示一定温度梯度下单位时间单位面积上传导的热量， λ 越大，在相同的温度梯度下可以传导更多的热量；热容 $\rho \cdot c_p$ 表示单位体积物质温度升高一度所吸收的热量， $\rho \cdot c_p$ 越小，温度上升 1°C 所吸收的热量越少，可以剩下更多的热量继续向物体内部传递，能使物体内部各点的温度更快地随界面温度的升高而升高；导温系数把物体的热量传导过程和温度的变化过程联系起来，若 a 值大，则热量传导的因素大于温度变化的因素，也就是热量中较多贡献于传导而较少贡献于温度的变化，物体内部温度扯平的能力越大。当其它因素都不变，而材料的 a 发生变化时，则 a 加大，表面温度的影响更快地传播到内部； a 减小，表面温度的影响将较慢地传到内部^[75]。可见， a 是衡量材料传播温度变化能力大小的一个主要参数。

图 4.8 给出了不同比热系数不同时的厚度上的温度分布曲线，模拟参数为含碳量 0.4%，厚度 30mm，水流量 $70\text{m}^3/\text{h}$ ，水温 20°C ，开冷温度 880°C ，图(a)取表 4.1 中碳钢的比热系数进行模拟，为便于分析，图(b)中的比热系数取中碳钢比热系数的一半。从模拟结果上可以看出比热系数由大到小变化时温度场分布的变化情况，比热变小后内部温度传递变得更容易。

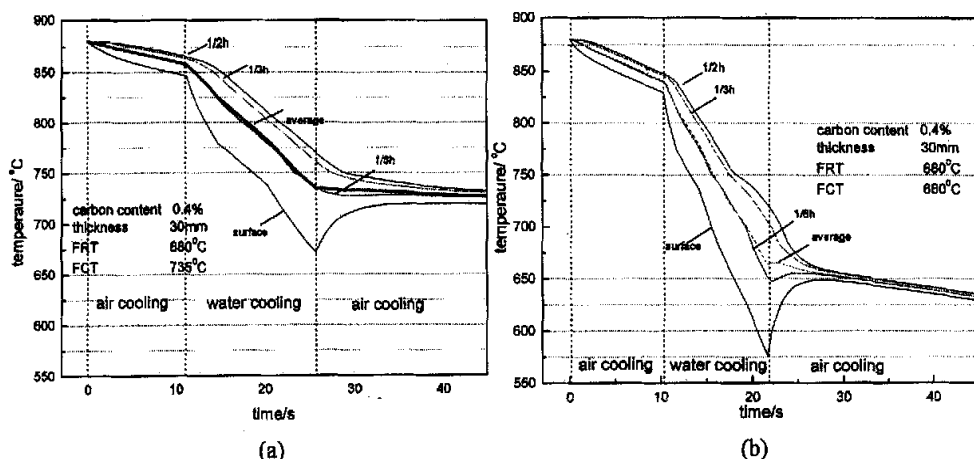


图 4.8 比热系数对温度场分布的影响

Fig. 4.8 Effect of specific heat on temperature distribution

对于导热系数相同、厚度相同的两块平板，换热系数很大和很小的情况下，板内温度也会出现如图 4.7 所示的情形。

在对流换热边界条件下，人们常采用无量纲常数——毕渥数 $Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{1}{\alpha}$ 来分析钢板内部与边界上的温度分布，式中 $\frac{h}{\lambda}$ 是内部导热热阻， $\frac{1}{\alpha}$ 是表面对流换热热阻， Bi 的物理意义即为对流换热边界上物体内部导热热阻与边界处对流换热热阻之比。我们采用 4.2.2 小节考虑相变热对温度场分布影响的计算方法，只是将边界条件取为

$$\begin{aligned} x=0, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha_1(T_{\infty 1} - T) \\ x=h, \quad -\lambda \frac{dT}{dx} &= \alpha_2(T_{\infty 2} - T) \end{aligned} \quad (4-25)$$

求解方法同 4.2.2，可以得到 C_1 和 C_2 的表达式为

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\frac{1}{h}(T_{\infty 2} - T_{\infty 1}) + \frac{q'h}{2\lambda} + \frac{q'h}{\alpha_2}}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} \\ C_2 &= \frac{\frac{T_{\infty 1}}{Bi_2} + T_{\infty 1} + \frac{T_{\infty 2}}{Bi_1} + \frac{q'h}{2\alpha_1} + \frac{q'\lambda}{\alpha_1\alpha_2}}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} \end{aligned}$$

式中, $Bi_1 = \frac{\alpha_1 h}{\alpha \lambda}$, $Bi_2 = \frac{\alpha_2 h}{\alpha \lambda}$, 将 C_1 和 C_2 代入温度的表达式中, 得到

$$\frac{T - T_{\infty 1}}{T_{\infty 2} - T_{\infty 1}} = \frac{\left[\left(\frac{2}{Bi_2} + 1 \right) s + 1 \right]}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + 1} \left[\frac{x}{h} + \frac{1}{Bi_1} \right] - s \left(\frac{x}{h} \right)^2$$

式中, $s = \frac{q' h^2}{2\lambda(T_{\infty 2} - T_{\infty 1})}$ 。

为更方便地研究温度场分布的特点, 我们假定钢板两侧的对流换热系数和温度相同, 来分析以下三种特殊情形。

(1) $Bi \rightarrow \infty$, 此时钢板内部温度分布为

$$T = -\frac{q'}{2\lambda} x^2 + \frac{q' h}{2\lambda} x + T_{\infty}$$

此时, 表面的对流换热系数小到几乎可以忽略, 因而一开始钢板的表面温度就被冷却到 T_{∞} 。随着时间的推移, 钢板内部各点的温度逐渐下降而趋于 T_{∞} 。如图 4.9(a) 所示。

(2) $Bi \rightarrow 0$, 此时钢板内部温度分布缩为一个值

$$T = \frac{q' h}{2\lambda} + T_{\infty}$$

此时, 钢板内部导热热阻可以忽略不计, 因而任一时刻钢板中各点的温度接近均匀, 并随着时间的推移, 整体地下降, 逐渐趋于 T_{∞} 。如图 4.9(b) 所示。

(3) Bi 介于上述两种情况之间, 此时钢板内的温度分布为

$$T = -\frac{q'}{2\lambda} x^2 + \frac{h \cdot q'}{2\lambda} x + \frac{h \cdot q'}{2\alpha} + T_{\infty}$$

如图 4.9(c) 所示。

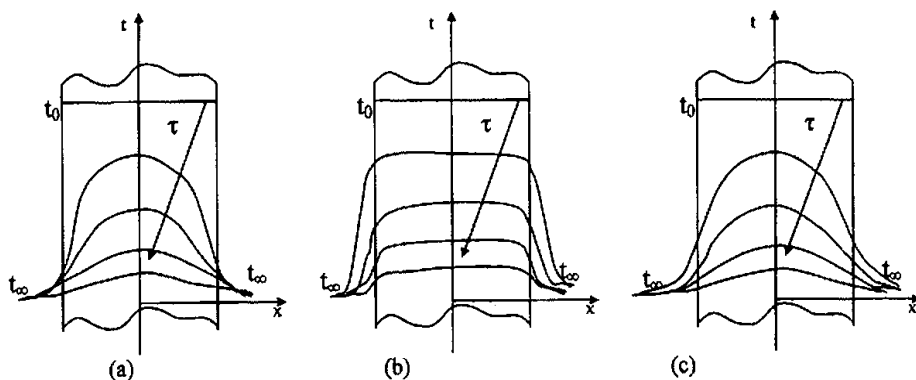


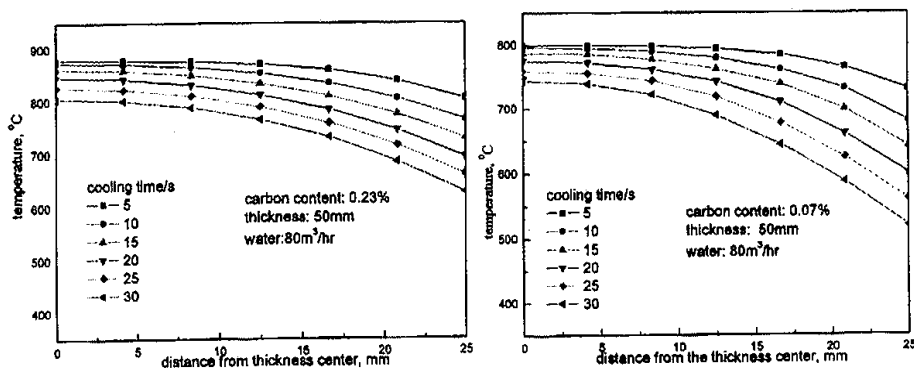
图 4.9 毕渥数对温度场分布的影响

Fig.4.9 Affect of Biot on temperature distribution

当满足 $Bi < 0.1$ 时, 可把物体视为薄板, 即可不考虑物体厚度方向上的温度分布。当 Bi 数很小时, 内部导热热阻远比表面对流换热热阻小, 温度降落主要表现在表面流体一侧; 当 Bi 数很大时, 温度差主要表现在平板内部。当物体内部的导热热阻远比物体与环境间的换热热阻小时, 可把物体视为薄板而忽略厚度方向上的温差。

4.2.5 含碳量对温度场的影响

含碳量高, 淬透性好, 冷却过程中轧件的表面温度和中心温度相差小。



(a) 含碳量为 0.23%

(b) 含碳量为 0.07%

图 4.10 不同含碳量条件下钢板厚度方向上的温度分布曲线

Fig.4.10 Temperature distribution along thickness with different carbon content

图 4.10 给出了含碳量分别为 0.23% 和 0.07% 的 50mm 厚钢板冷却 30s 的过程中沿厚度方向上的温度分布曲线, 可以看出含碳量高的钢板, 温度从表面到中心呈抛物线分布, 含碳量低的钢板中心部温度分布近似呈直线, 而冷却时间短时二者温度分布趋势看不出区别, 这说明含碳量高, 淬透性好, 温度易于传递, 厚度上温度梯度小。

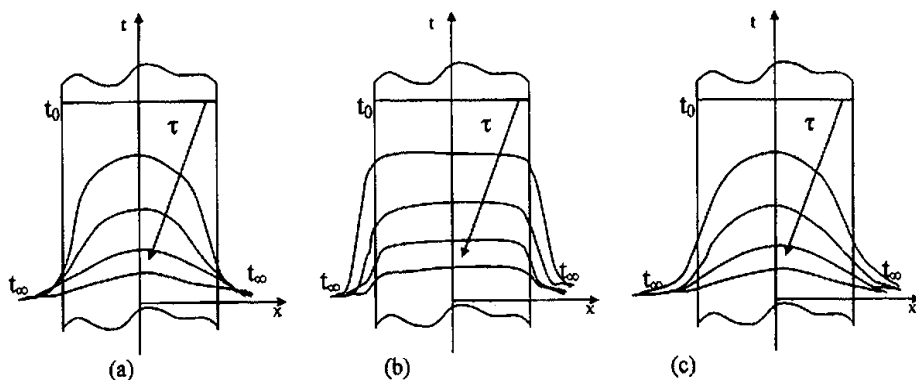


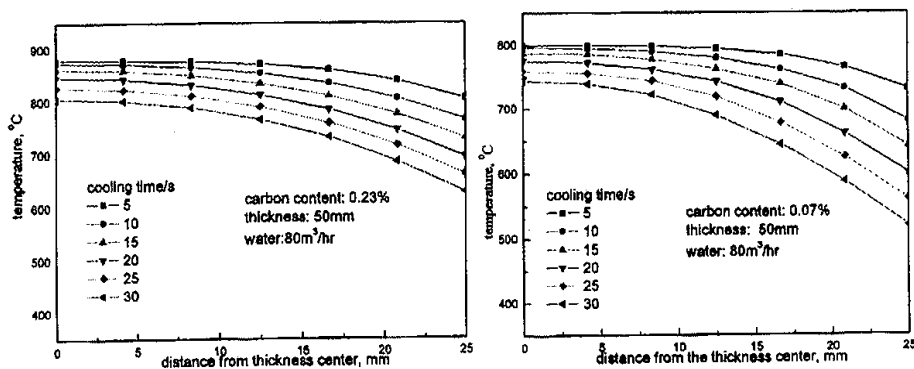
图 4.9 毕渥数对温度场分布的影响

Fig.4.9 Affect of Biot on temperature distribution

当满足 $Bi < 0.1$ 时, 可把物体视为薄板, 即可不考虑物体厚度方向上的温度分布。当 Bi 数很小时, 内部导热热阻远比表面对流换热热阻小, 温度降落主要表现在表面流体一侧; 当 Bi 数很大时, 温度差主要表现在平板内部。当物体内部的导热热阻远比物体与环境间的换热热阻小时, 可把物体视为薄板而忽略厚度方向上的温差。

4.2.5 含碳量对温度场的影响

含碳量高, 淬透性好, 冷却过程中轧件的表面温度和中心温度相差小。



(a) 含碳量为 0.23%

(b) 含碳量为 0.07%

图 4.10 不同含碳量条件下钢板厚度方向上的温度分布曲线

Fig.4.10 Temperature distribution along thickness with different carbon content

图 4.10 给出了含碳量分别为 0.23% 和 0.07% 的 50mm 厚钢板冷却 30s 的过程中沿厚度方向上的温度分布曲线, 可以看出含碳量高的钢板, 温度从表面到中心呈抛物线分布, 含碳量低的钢板中心部温度分布近似呈直线, 而冷却时间短时二者温度分布趋势看不出区别, 这说明含碳量高, 淬透性好, 温度易于传递, 厚度上温度梯度小。

4.2.6 冷却时间对温度场的影响

冷却开始时，表面温度呈抛物线分布，内部温度差很小；随着冷却时间增加，这种温度梯度迅速向内部扩散，由钢板心部到表面温度呈现下降趋势，但表面的温度梯度大于内部温度梯度。

以有限差分法模拟 20mm、30mm、40mm、50mm 厚的轧件经过 5s、10s、15s、20s、25s、30s 冷却后沿厚度方向上的温度分布，如图 4.11 所示。冷却瞬间，钢板表面温度急剧下降，表面温度和中心温度相差很大；随着冷却的进行，温差逐渐减小；轧件越厚，温度差越明显。

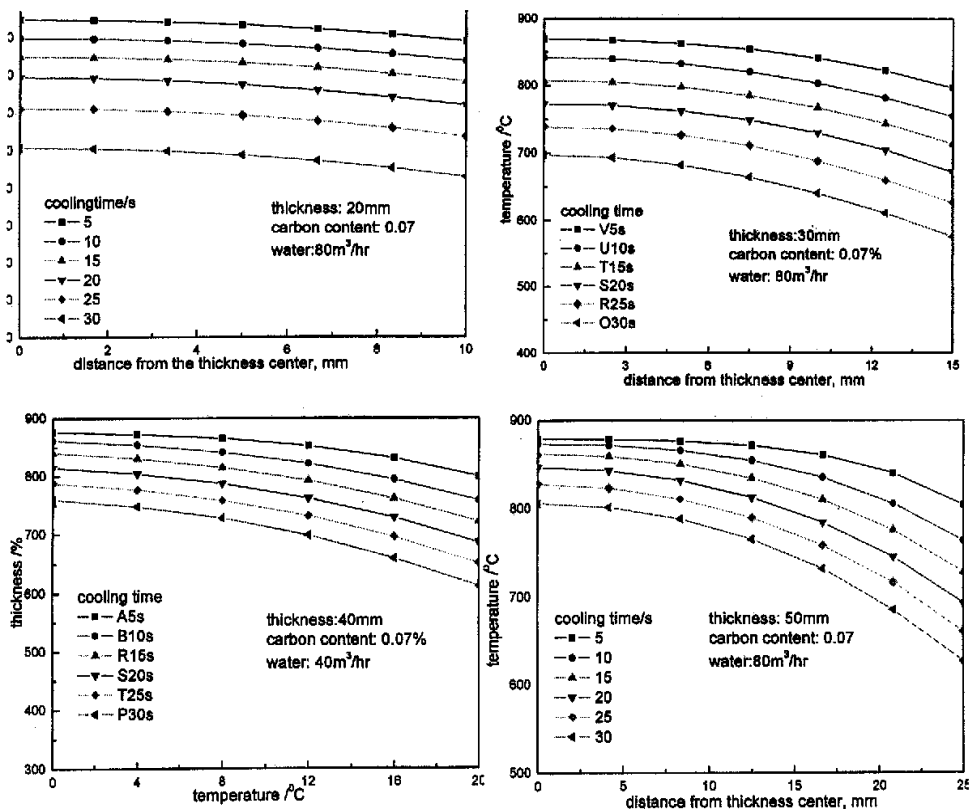


图 4.11 钢板厚度方向上的温度分布与冷却时间的关系

Fig.4.11 Effect of cooling time on temperature distribution

4.2.7 钢板厚度对温度场的影响

单位厚度上的温降，薄板大于厚板，厚度方向总的温差，厚板大于薄板。因此对带钢来讲常常不考虑厚度上的温度分布影响，而对较厚的轧件则必须保证厚度上的温差满足性能要求。图 4.12 给出了 20~60mm 的轧件水冷 30s 后厚度上的温度分

布情况，随厚度增加，温度梯度加大。

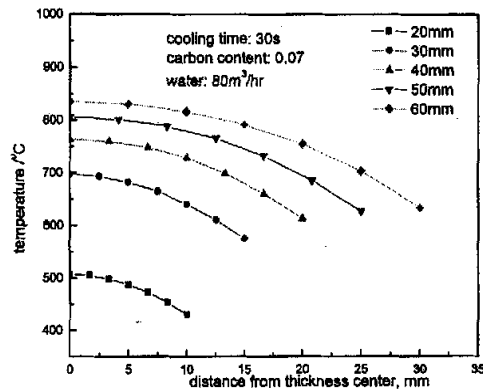
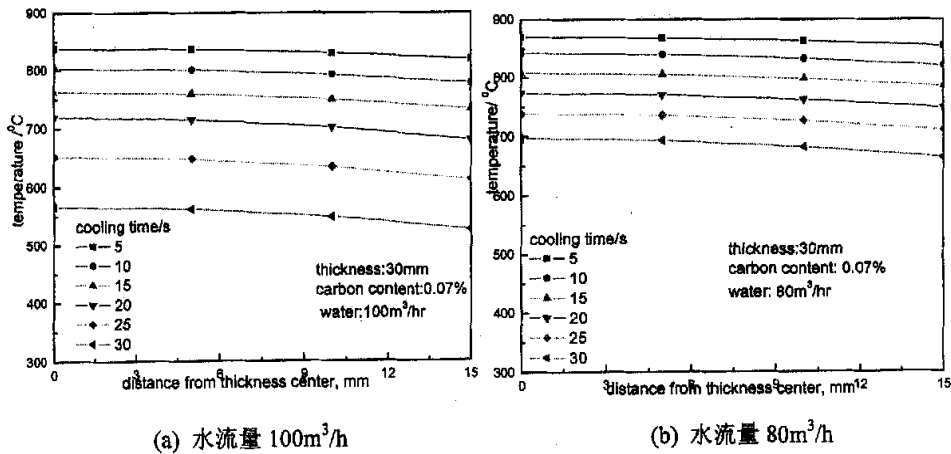


图 4.12 不同厚度钢板厚度方向上的温度分布

Fig.4.12 Temperature distribution with different thickness

4.2.8 水流量对温度场的影响

冷却水流量的大小直接影响对流换热系数的大小，而换热系数对温度场分布的影响类似于前述的热传导系数对温度场的影响，水流量大时，表面温降大，厚度方向上的温度梯度加大。以 30mm 厚钢板为例，分别以 $100\text{m}^3/\text{hr}$ 和 $80\text{m}^3/\text{hr}$ 的水量进行模拟计算，得到如图 4.13 所示的温度场分布，显然水流量大时温度梯度大。



(a) 水流量 $100\text{m}^3/\text{h}$

(b) 水流量 $80\text{m}^3/\text{h}$

图 4.13 水流量对温度场的影响

Fig.4.13 Effect of water flow on temperature distribution

布情况，随厚度增加，温度梯度加大。

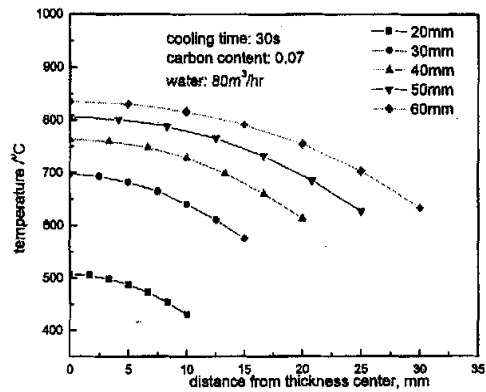
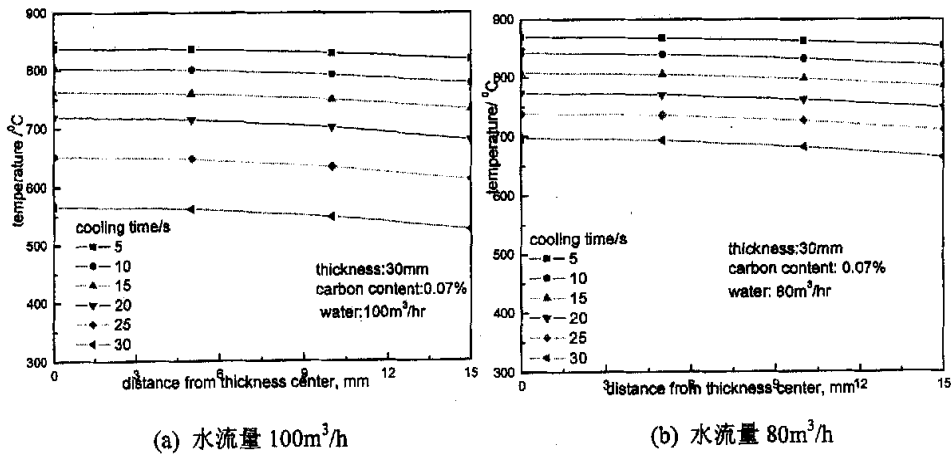


图 4.12 不同厚度钢板厚度方向上的温度分布

Fig.4.12 Temperature distribution with different thickness

4.2.8 水流量对温度场的影响

冷却水流量的大小直接影响对流换热系数的大小，而换热系数对温度场分布的影响类似于前述的热传导系数对温度场的影响，水流量大时，表面温降大，厚度方向上的温度梯度加大。以 30mm 厚钢板为例，分别以 $100\text{m}^3/\text{hr}$ 和 $80\text{m}^3/\text{hr}$ 的水量进行模拟计算，得到如图 4.13 所示的温度场分布，显然水流量大时温度梯度大。



(a) 水流量 $100\text{m}^3/\text{h}$ (b) 水流量 $80\text{m}^3/\text{h}$

图 4.13 水流量对温度场的影响

Fig.4.13 Effect of water flow on temperature distribution

4.3 本章小节

(1) 考虑钢种、含碳量、温度等因素,介绍了比热系数和热传导系数这两个重要的热物性系数的选取,并给出了它们的权重模型,该模型适于计算机进行温度的模拟计算。

(2) 以分析法解析了比热对温度响应的影响。若比热随温度线性增加,则钢板在冷却过程中,动态过程随时间的增加而变得缓慢起来;相反,若比热随温度增加线性下降,则钢板在冷却过程中,随时间增加而动态过程变快。

(3) 轧件厚度方向上的温度分布往往是冷却计算中的难点和重点,它直接影响轧件、尤其是厚轧件的Z向组织性能,结合模型热物性参数的选择,分析了含碳量、比热、热传导系数、钢板厚度、水流量对厚度方向上温度分布的影响。

第5章 钢板均匀冷却的控制策略

控制冷却是通过控制轧后钢材的冷却速度来改善钢材的组织结构使之获得良好力学性能和焊接性能的过程。钢板在冷却过程中,若冷却不均匀,不仅会造成钢板的性能不均匀,而且钢板易翘曲,板形不良。因此实现钢板的均匀冷却也是控制冷却的重要目标之一。对钢板均匀冷却的控制能力,既决定着所处理钢板性能的一致性,也决定着每批钢板性能的再现性水平,因此人们总是从各个方面入手来实现钢板的均匀冷却。

钢板的自身条件,如来钢的温度分布、板形、表面质量等,以及冷却形式(通过式、摆动式)、喷流形式和横向上的水流分布等都对钢板的冷却均匀程度有着重要影响^[95]。

下面将就作者在中厚板控制冷却过程中为确保其在长度、宽度和厚度方向上温度均匀分布而采取的控制策略加以介绍。

5.1 宽度方向的温度均匀控制

5.1.1 宽度方向温度不均的产生原因

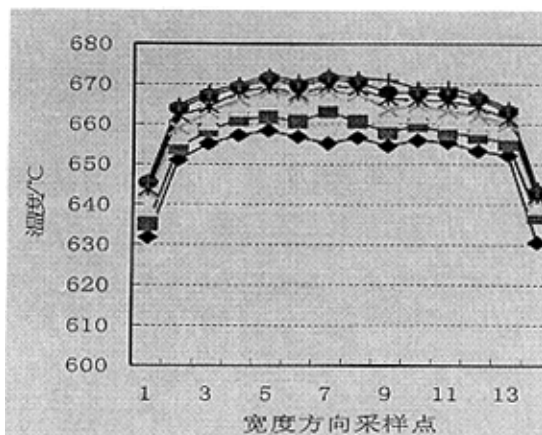


图 5.1 钢板宽向实测温度分布曲线(未使用遮蔽挡板)

Fig.5.1 Curves of temperature distribution along the width direction (no mask)

上部冷却水在钢板上面形成停滞水层,向横向流出。停滞水产生的冷却与停滞水相对钢板的移动速度有着密切关系。从钢板中心到边部附近的停滞水的流速很小,不会成为横向上产生温度偏差的主要原因。但是,在钢板横向端部水流速度急剧增大,产生不能忽视的冷却效果。此外,下部冷却水回落到钢板的两边,加重了

钢板宽度方向温度的不均匀。在控冷的上道工序——控轧中，钢板横向端部比中心部分易冷却。无论是在轧制过程中还是在加速冷却过程中，横向端部都相对地被强冷。

图 5.1 是在某中板厂实测 32mm 厚、2400mm 宽钢板冷却后的横向温度分布曲线，其边部较中心温度低 20~30℃。边部过冷或冷却组织不均匀造成切边量加大，损耗增加，降低经济效益，因而要严格控制钢板宽度方向上的温度分布。

5.1.2 宽度方向温度分布的离线模拟

假设上集管的冷却水落到钢板表面上后全部从边部流出，若沿集管横向上单位宽度水流量为 q_x ，不考虑集管流量的凸度分布，则钢板上表面上距中心 x 处的水流量为

$$Q = \int_0^x q_x dx = q_x \cdot x, \quad x \leq B/2。$$

根据换热系数公式(2-17)，得钢板上表面上距中心 x 处的对流换热系数为

$$\begin{aligned} h_x &= A \times a \times (q_x \cdot x)^b \times \exp(c \times T_s) \times v_x \\ &= K \times x^b \end{aligned} \quad (5-1)$$

式中， $K = A \times a \times q_x^b \times \exp(c \times T_s) \times v_x$ 。

钢板上表面的对流换热系数与距中心的距离成单调递增的指数关系，若不考虑水流量沿宽度上的不均匀分布，只考虑边部与中部的冷却边界条件不同，对宽度为 2.9m, 3.2m 和 3.5m，厚度为 30mm 的钢板采用差分模拟得到的横向温度分布曲线，边部比中部温度低约 90℃，如图 5.2 (a) 所示；若考虑钢板横向上水流量由中心向边部逐渐增加，根据方程(5-1)进行钢板横向温度分布的模拟，设集管水流量为 70m³/h，钢板宽度为 3m，厚度为 30mm，模拟结果如图 5.2(b)所示。图 5.1 上给出的实测数据是扫描式测温仪在钢板发生返红后测得的结果，所以钢板此时的边部与中心温差是在比图 5.2 (a) 给出的模拟结果要低；图 5.1 上显示，除钢板边部区域外，沿宽度方向上温度梯度小于图 5.2(b)，这是因为在模拟冷却时没有考虑钢板中部的冷却水与钢板接触后温度发生变化且其停滞水的流速很小造成的。

从图 5.2(b)可以看出由于水流量不同引起的边部温差约为几十度，以低碳钢为例进行钢板横向温度分布的模拟，模拟曲线如图 5.3、5.4、5.5 所示，图上的 A、B 两曲线分别表示钢板水冷后和返红后厚度上的平均温度。

图 5.3 是模拟钢板边部与宽度中心温差与宽度的关系，模拟条件为含碳量 0.4

钢板宽度方向温度的不均匀。在控冷的上道工序——控轧中，钢板横向端部比中心部分易冷却。无论是在轧制过程中还是在加速冷却过程中，横向端部都相对地被强冷。

图 5.1 是在某中板厂实测 32mm 厚、2400mm 宽钢板冷却后的横向温度分布曲线，其边部较中心温度低 20~30℃。边部过冷或冷却组织不均匀造成切边量加大，损耗增加，降低经济效益，因而要严格控制钢板宽度方向上的温度分布。

5.1.2 宽度方向温度分布的离线模拟

假设上集管的冷却水落到钢板表面上后全部从边部流出，若沿集管横向上单位宽度水流量为 q_x ，不考虑集管流量的凸度分布，则钢板上表面上距中心 x 处的水流量为

$$Q = \int_0^x q_x dx = q_x \cdot x, \quad x \leq B/2。$$

根据换热系数公式(2-17)，得钢板上表面上距中心 x 处的对流换热系数为

$$\begin{aligned} h_x &= A \times a \times (q_x \cdot x)^b \times \exp(c \times T_s) \times v_x \\ &= K \times x^b \end{aligned} \quad (5-1)$$

式中， $K = A \times a \times q_x^b \times \exp(c \times T_s) \times v_x$ 。

钢板上表面的对流换热系数与距中心的距离成单调递增的指数关系，若不考虑水流量沿宽度上的不均匀分布，只考虑边部与中部的冷却边界条件不同，对宽度为 2.9m, 3.2m 和 3.5m，厚度为 30mm 的钢板采用差分模拟得到的横向温度分布曲线，边部比中部温度低约 90℃，如图 5.2 (a) 所示；若考虑钢板横向上水流量由中心向边部逐渐增加，根据方程(5-1)进行钢板横向温度分布的模拟，设集管水流量为 70m³/h，钢板宽度为 3m，厚度为 30mm，模拟结果如图 5.2(b)所示。图 5.1 上给出的实测数据是扫描式测温仪在钢板发生返红后测得的结果，所以钢板此时的边部与中心温差是在比图 5.2 (a) 给出的模拟结果要低；图 5.1 上显示，除钢板边部区域外，沿宽度方向上温度梯度小于图 5.2(b)，这是因为在模拟冷却时没有考虑钢板中部的冷却水与钢板接触后温度发生变化且其停滞水的流速很小造成的。

从图 5.2(b)可以看出由于水流量不同引起的边部温差约为几十度，以低碳钢为例进行钢板横向温度分布的模拟，模拟曲线如图 5.3、5.4、5.5 所示，图上的 A、B 两曲线分别表示钢板水冷后和返红后厚度上的平均温度。

图 5.3 是模拟钢板边部与宽度中心温差与宽度的关系，模拟条件为含碳量 0.4

%, 水温为 20°C , 厚度为 30mm , 开冷温度为 880°C , 终冷温度为 620°C , 水流量为 $70\text{m}^3/\text{h}$ 。

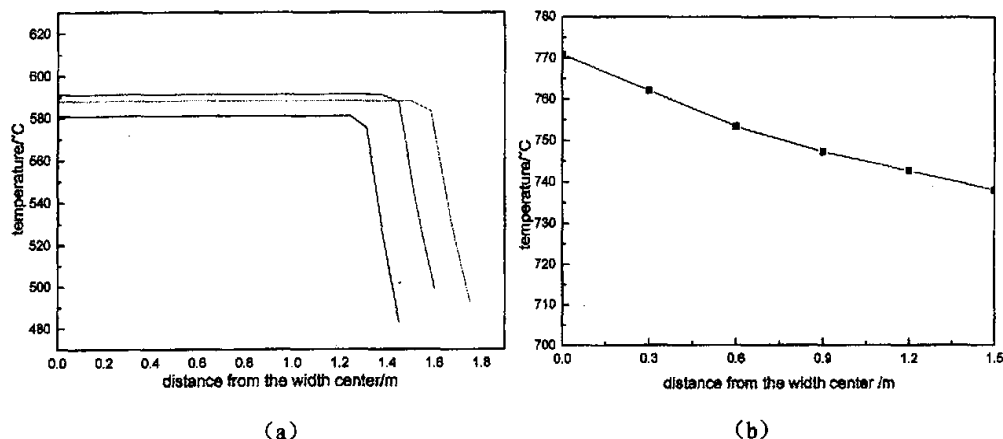


图 5.2 横向温度分布曲线
Fig.5.2 Temperature curves along width

图 5.4 是模拟钢板边部与宽度中心温差与厚度的关系, 模拟条件为钢板 2200mm 宽, 含碳量为 0.4% , 水温为 20°C , 开冷温度为 880°C , 终冷温度为 620°C , 水流量为 $70\text{m}^3/\text{h}$ 。

图 5.5 是模拟钢板边部与宽度中心温差与冷却水流量的关系, 模拟条件为钢板 2200mm 宽, 30mm 厚, 含碳量为 0.4% , 水温为 20°C , 开冷温度为 880°C , 终冷温度为 620°C 。

从模拟结果可以看出钢板边部与中部的温差随着钢板厚度、宽度和冷却水量的增加而增加。

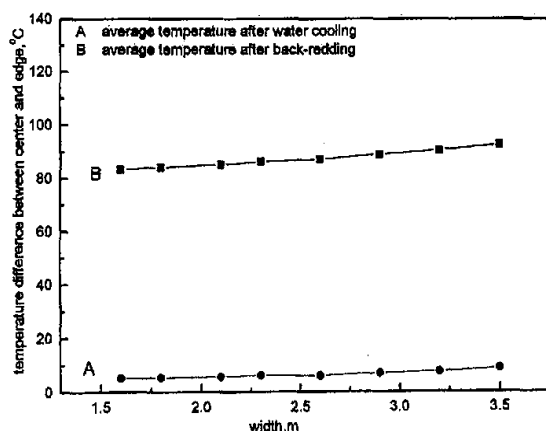


图 5.3 不同宽度钢板对应的边部与中部温差
Fig.5.3 Temperature difference between edge and center of different wide plate

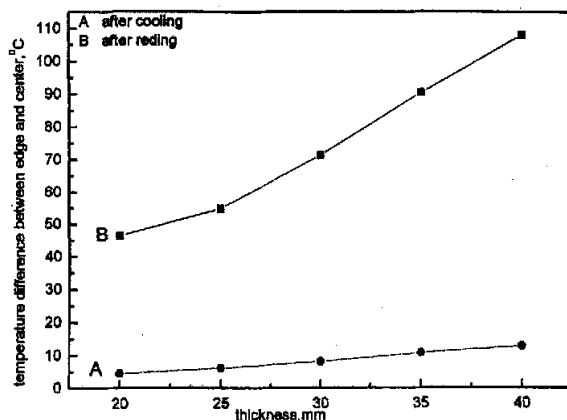


图 5.4 不同厚度钢板对应的边部与中部温差

Fig.5.4 Temperature difference between edge and center of different thick plate

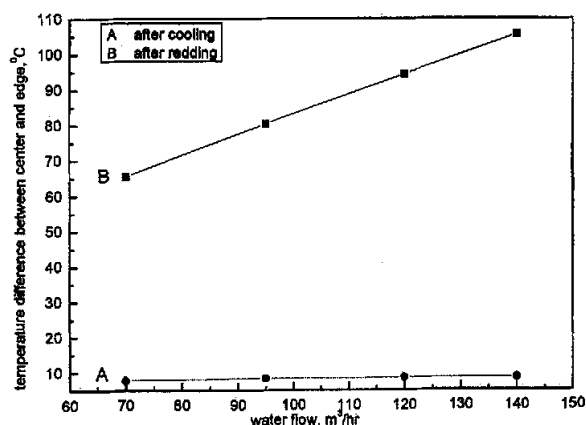


图 5.5 冷却水量不同时钢板边部与中部的温差

Fig.5.5 Temperature difference between edge and center with different water

5.1.3 凸度遮蔽模型的建立

根据上述分析, 为保证钢板宽向上温度均匀分布, 就要从控冷工艺和设备上加以考虑。设备上主要是靠上部集管采用横向不均匀的水量分布, 如采用集管直径变化或间距变化, 形成中凸形的水量分布; 或者采用边部遮蔽挡板, 这样既满足钢板边部的冷却水量减小, 又保证了边部受到一定的冷却。通常可采用凸度遮蔽、直线遮蔽、间歇遮蔽、锥形遮蔽与间歇遮蔽组合等遮蔽方式, 我们在首钢中厚板厂采用了凸度遮蔽模式, 这在国内控制冷却系统中属首次应用。凸度遮蔽即以边部温度的陡降位置为基准, 各个遮蔽挡板以一定的凸度参差排列, 如图 5.6 所示。

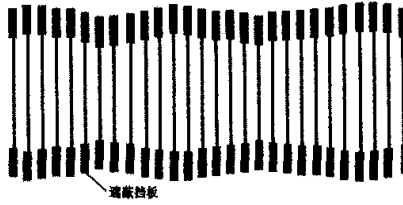


图 5.6 凸度遮蔽方式示意图

Fig.5.6 Diagram of crown mask pattern

根据 5.1.2 小节宽度上温度分布的模拟结果，考虑宽度、厚度、水量对钢板横向温度分布的影响，设定遮蔽量模型的形式应为

$$\Delta B = f(B, Q, h)$$

为了方便模型的在线设定和自学习计算，建立如下的边部遮蔽量模型：

$$\Delta B = f \cdot b_0 \cdot \text{int}\left(\frac{B}{B_0}\right) \cdot (B - B_0)^a \cdot (Q - Q_0)^b \cdot (h - h_0)^c \quad (5-2)$$

式中， f —修正系数；

b_0 —基本遮蔽量，mm；

B_0 、 Q_0 —钢板基本宽度（mm）和基本冷却水量（m³/h）；

B —钢板宽度，mm；

Q —冷却水量，m³/h；

h_0 —钢板基本厚度，mm；

h —钢板厚度，mm。

该模型的含义是：钢板宽度小于一定值时，即可以忽略边部的温度陡降区间，认为钢板横向上温度近似均匀分布，不使用边部遮蔽；随着厚度的增加，钢板横向上温度分布更加不一致，遮蔽量增加；随着冷却水量的增加，钢板边部温差增大，遮蔽量增加。

5.1.4 实际应用效果

边部凸度遮蔽模型在首钢中厚板厂应用后，横向温度波动量都小于 $\pm 20^\circ\text{C}$ ，测试数据见表 5.1。

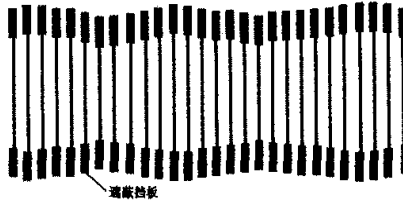


图 5.6 凸度遮蔽方式示意图

Fig.5.6 Diagram of crown mask pattern

根据 5.1.2 小节宽度上温度分布的模拟结果，考虑宽度、厚度、水量对钢板横向温度分布的影响，设定遮蔽量模型的形式应为

$$\Delta B = f(B, Q, h)$$

为了方便模型的在线设定和自学习计算，建立如下的边部遮蔽量模型：

$$\Delta B = f \cdot b_0 \cdot \text{int}\left(\frac{B}{B_0}\right) \cdot (B - B_0)^a \cdot (Q - Q_0)^b \cdot (h - h_0)^c \quad (5-2)$$

式中， f —修正系数；

b_0 —基本遮蔽量，mm；

B_0 、 Q_0 —钢板基本宽度（mm）和基本冷却水量（m³/h）；

B —钢板宽度，mm；

Q —冷却水量，m³/h；

h_0 —钢板基本厚度，mm；

h —钢板厚度，mm。

该模型的含义是：钢板宽度小于一定值时，即可以忽略边部的温度陡降区间，认为钢板横向上温度近似均匀分布，不使用边部遮蔽；随着厚度的增加，钢板横向上温度分布更加不一致，遮蔽量增加；随着冷却水量的增加，钢板边部温差增大，遮蔽量增加。

5.1.4 实际应用效果

边部凸度遮蔽模型在首钢中厚板厂应用后，横向温度波动量都小于 $\pm 20^\circ\text{C}$ ，测试数据见表 5.1。

表 5.1 控冷模型应用前后的横向温度比较

Table 5.1 Cross temperature comparison before and after used model

厚度 mm	控冷模型应用前横向温差℃	控冷模型应用后横向温差℃
12	120	40
16	130	20
20	100	40
25	130	40
28	110	40
40	100	40

以冷却 20mm 厚钢板为例，大集管水量为 $100\text{m}^3/\text{h}$ ，小集管水量为 $80\text{m}^3/\text{h}$ ，钢板宽度为 2400mm，启动的边部遮蔽量为 50mm，冷后宽向温度分布曲线见图 5.7。可以看出，采用边部遮蔽后，钢板边部和中部的温差大约为 10°C ，大大提高了横向温度的均匀程度。

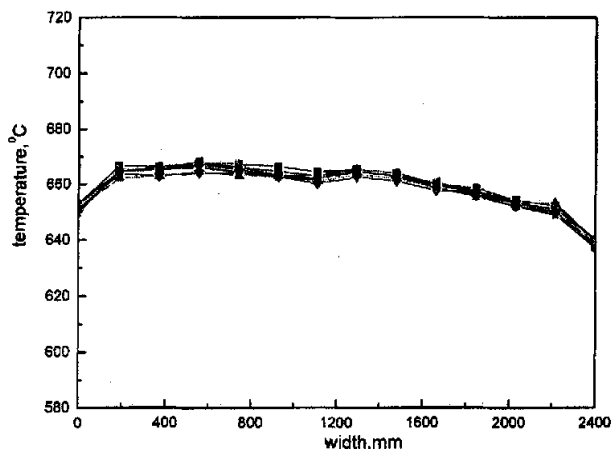


图 5.7 实测控制冷却曲线

Fig.5.7 Measured cooling curves

5.2 厚度方向上的温度均匀控制

钢板厚度方向均匀冷却包括两层含义：一是指表面与心部的冷却均匀程度，二是指上下表面冷却均匀程度。前者用温度梯度来衡量，后者用温度对称程度来衡量。

冷却后，钢板温度梯度是由冷却速度和板厚决定的，而冷却速度又取决于喷水强度、钢板温度、通板速度和冷却水温度等因素。因此，对于一定厚度的钢板，要将其温度梯度控制在一定的范围，必须控制好冷却速度。

上下表面温度的均匀控制是通过控制上下水量比实现的。

5.2.1 厚度上温度梯度控制

5.2.2 冷却速度的控制

5.2.2.1 冷却速度控制的意义

控制轧制过程中, 由于热变形因素的影响, 使得钢的相变温度 (Ar_3) 提高, 致使铁素体在较高温度下析出。若轧后没有控制冷却, 则在空冷过程中铁素体晶粒长大, 从而使控制轧制效果受到限制。因此, 控制轧制必须配合加速冷却以降低相变温度, 进一步细化铁素体及珠光体组织, 同时使 Nb, Ti, V 微合金元素的碳氮化合物更加弥散析出, 进一步提高析出强化效应。当冷却速度达到一定值时, 轧后加速冷却得到的相变组织从铁素体和珠光体组织变成更细小的铁素体和贝氏体组织, 贝氏体量随着冷却速度加快而增加, 且生成的贝氏体组织极细, 从而使钢板强度进一步提高。

冷却速度过高会造成钢板厚度方向内部组织差异, 造成板厚方向性能不均, 也有可能造成脆性转变温度升高, 这是由于相变产物如贝氏体数量增多引起的。

通常, 冷却速度在 $5\sim 15^{\circ}\text{C/s}$ 范围内, 在强度提高的同时, 脆性转变温度基本保持不变。随着冷却速度的进一步加快, 强度提高的同时, 脆性转变温度急剧上升, 韧性恶化。常见的钢板厚度和冷却速率的对应关系参见表 5.2。

表 5.2 冷却速率的选择

Table 5.2 Cooling rate

厚度 mm	<15	20	25	30	40	50	80	100
冷却速率 $^{\circ}\text{C/s}$	20	15~20	10~15	7~12	7~8	7~6	7~3	7~2

5.2.2.2 大小集管分段排布

钢板出轧机后进行的冷却过程包括两个阶段: 第一个阶段是指终轧开始到变形奥氏体向铁素体或渗碳体开始转变的温度范围内, 该过程主要控制其开始冷却温度和快冷速度。采用快冷的目的是控制变形奥氏体的组织状态, 阻止晶粒长大或碳化物过早析出形成网状碳化物, 固定由于变形引起的位错, 增加相变的过冷度, 为变形奥氏体向铁素体或渗碳体和珠光体的转变做组织上的准备。相变前的组织状态直接影响相变机制、相变产物的形态、粗细大小和钢材性能。经验表明, 一次冷却的开始快冷温度越接近终轧温度, 细化变形奥氏体的效果越好。因此钢板出冷却区后即以最快速度被输送到控冷区前。

钢板进行第一阶段快冷之后, 立即进入冷却的第二阶段。该阶段的主要任务是控制钢材相变时的冷却温度、冷却速度和终冷温度, 以保证获得要求的相变组织和

5.2.1 厚度上温度梯度控制

5.2.2 冷却速度的控制

5.2.2.1 冷却速度控制的意义

控制轧制过程中, 由于热变形因素的影响, 使得钢的相变温度 (Ar_3) 提高, 致使铁素体在较高温度下析出。若轧后没有控制冷却, 则在空冷过程中铁素体晶粒长大, 从而使控制轧制效果受到限制。因此, 控制轧制必须配合加速冷却以降低相变温度, 进一步细化铁素体及珠光体组织, 同时使 Nb, Ti, V 微合金元素的碳氮化合物更加弥散析出, 进一步提高析出强化效应。当冷却速度达到一定值时, 轧后加速冷却得到的相变组织从铁素体和珠光体组织变成更细小的铁素体和贝氏体组织, 贝氏体量随着冷却速度加快而增加, 且生成的贝氏体组织极细, 从而使钢板强度进一步提高。

冷却速度过高会造成钢板厚度方向内部组织差异, 造成板厚方向性能不均, 也有可能造成脆性转变温度升高, 这是由于相变产物如贝氏体数量增多引起的。

通常, 冷却速度在 $5\sim 15^{\circ}\text{C/s}$ 范围内, 在强度提高的同时, 脆性转变温度基本保持不变。随着冷却速度的进一步加快, 强度提高的同时, 脆性转变温度急剧上升, 韧性恶化。常见的钢板厚度和冷却速率的对应关系参见表 5.2。

表 5.2 冷却速率的选择

Table 5.2 Cooling rate

厚度 mm	<15	20	25	30	40	50	80	100
冷却速率 $^{\circ}\text{C/s}$	20	15~20	10~15	7~12	7~8	7~6	7~3	7~2

5.2.2.2 大小集管分段排布

钢板出轧机后进行的冷却过程包括两个阶段: 第一个阶段是指终轧开始到变形奥氏体向铁素体或渗碳体开始转变的温度范围内, 该过程主要控制其开始冷却温度和快冷速度。采用快冷的目的是控制变形奥氏体的组织状态, 阻止晶粒长大或碳化物过早析出形成网状碳化物, 固定由于变形引起的位错, 增加相变的过冷度, 为变形奥氏体向铁素体或渗碳体和珠光体的转变做组织上的准备。相变前的组织状态直接影响相变机制、相变产物的形态、粗细大小和钢材性能。经验表明, 一次冷却的开始快冷温度越接近终轧温度, 细化变形奥氏体的效果越好。因此钢板出冷却区后即以最快速度被输送到控冷区前。

钢板进行第一阶段快冷之后, 立即进入冷却的第二阶段。该阶段的主要任务是控制钢材相变时的冷却温度、冷却速度和终冷温度, 以保证获得要求的相变组织和

性能。终冷温度一般是控制到相变结束。Si-Mn 钢和含铌低合金钢二次冷却终冷温度一般控制在 600℃左右。对低碳钢、低合金钢、微合金化低合金钢轧后快速冷却，终冷温度可以达到珠光体相变结束。

比较合理的控制冷却工艺，应是在接近终轧温度时就开始加速冷却，一般冷却速度为 3~15℃，终冷温度为 500~600℃，以保证在韧性不受影响的前提下，提高钢板的强度。对于具体的某一产品（钢种和规格）而言，应在考虑到冷却轧制能力和冷却对钢板平直度产生不利影响基础上，通过工厂试验，优化确定最佳的工艺参数，充分发挥加速冷却工艺的强韧性作用，达到所要求的强度和韧性指标。

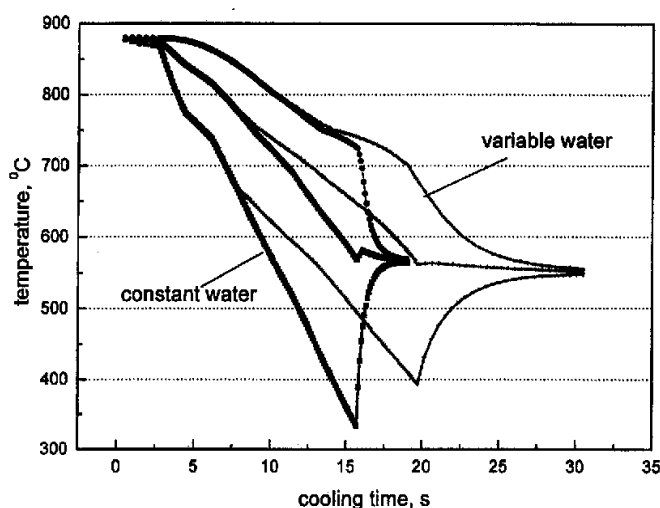


图 5.8 变水量冷却时钢板厚度上的温度分布

Fig.5.8 Temperature distribution when with variable water flow

为满足加速度的要求，我们对 30mm 厚的钢板进行变水量的冷却过程模拟，开冷温度为 880℃，空冷 3s，大集管水量为 120 m³/h，小集管水量为 80 m³/h，图 5.8 给出了钢板的表面温度、中心温度和厚度上平均温度的模拟结果。图中实线表示使用大集管冷却 12s 的情况，虚线表示使用大集管冷却 5s 后再用小集管冷却 12s 的情况。前者表面和中心的温差最大达 350℃，后者达 250℃。由此可见，对钢板实施变水量冷却不仅能满足冷却速度的要求，而且能降低厚度上的温度梯度，因而在首钢中厚板厂提出了大集管—小集管—大集管的集管排列方式，这是国内首次提出并实施的控制冷却设备布置形式。

大集管流量范围大，冷却能力强，但控制精度低，有利于对钢板实现大冷速控制；小集管流量范围小，冷却能力弱，但控制的精度高，可以对终冷温度进行精调，也有利于对冷却速度小的钢板进行缓冷控制。这样，可通过不同流量的集管的组合，来控制钢板的冷却过程，控制方式灵活，可以满足不同钢种的控制需要。集管的布

置见图 5.9，集管参数见表 5.3。

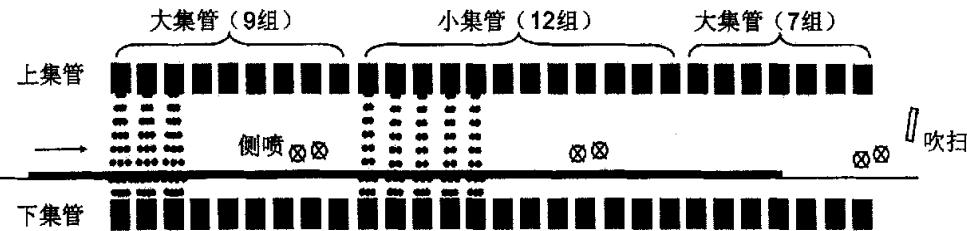


图 5.9 冷却区大小集管布置示意图
Fig.5.9 Layout of small headers in cooling area

表 5.3 集管喷嘴参数
Table.5.3 Nozzle parameter

	上喷嘴直径 mm	下喷嘴直径 mm	流量范围 m³/h	流量范围 m³/h
大集管	13	16	90~160	220~400
小集管	8	12	60~110	120~210

5.2.3 间歇冷却控制

钢板愈厚，愈要降低冷却速率才能使钢板断面温度梯度变小，增大钢板的淬透性，减小钢板表面和心部间的硬度差。对不同厚度、不同材质的钢板来说，要使钢板厚度上温度差尽量小，就必须选择合适的冷却速率。

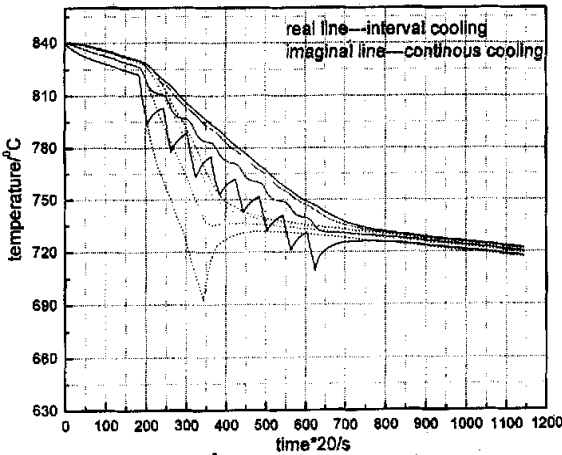


图 5.10 间歇冷却曲线与连续冷却曲线
Fig.5.10 Curve of interval cooling and continuous cooling

根据控制的需要，对较厚钢板采用间歇冷却策略。间歇冷却时，钢板在冷却过程中不断地进行冷却—返红—冷却，形成锯齿形冷却，从而缩小厚度上的温度梯度。图 5.10 是钢板冷却过程中在钢板表面、1/6 厚度、中心处及厚度方向上平均温度分布的模拟曲线，模拟条件：钢板厚为 20mm，含碳量为 0.23%，通过速度为 1m/s，

置见图 5.9，集管参数见表 5.3。

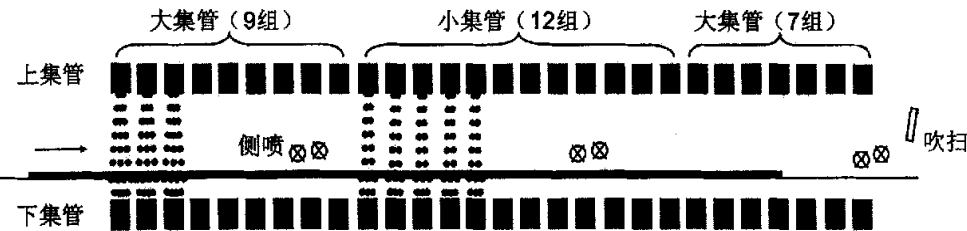


图 5.9 冷却区大小集管布置示意图
Fig.5.9 Layout of small headers in cooling area

表 5.3 集管喷嘴参数
Table.5.3 Nozzle parameter

	上喷嘴直径 mm	下喷嘴直径 mm	流量范围 m³/h	流量范围 m³/h
大集管	13	16	90~160	220~400
小集管	8	12	60~110	120~210

5.2.3 间歇冷却控制

钢板愈厚，愈要降低冷却速率才能使钢板断面温度梯度变小，增大钢板的淬透性，减小钢板表面和心部间的硬度差。对不同厚度、不同材质的钢板来说，要使钢板厚度上温度差尽量小，就必须选择合适的冷却速率。

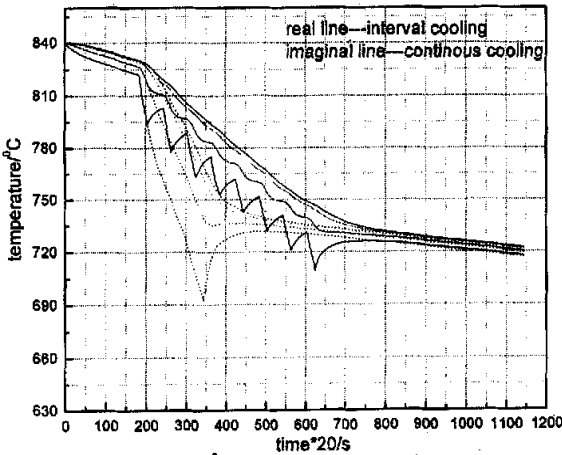


图 5.10 间歇冷却曲线与连续冷却曲线
Fig.5.10 Curve of interval cooling and continuous cooling

根据控制的需要，对较厚钢板采用间歇冷却策略。间歇冷却时，钢板在冷却过程中不断地进行冷却—返红—冷却，形成锯齿形冷却，从而缩小厚度上的温度梯度。图 5.10 是钢板冷却过程中在钢板表面、1/6 厚度、中心处及厚度方向上平均温度分布的模拟曲线，模拟条件：钢板厚为 20mm，含碳量为 0.23%，通过速度为 1m/s，

水流量为 $80\text{m}^3/\text{h}$ ，开启 8 组集管，间歇冷却时隔两组集管开启一组集管，实线表示间歇冷却曲线，虚线表示连续冷却。从模拟结果看，间歇冷却时钢板厚度上的温度梯度远远小于连续冷却时的温度梯度。

5.2.4 上下表面的温度一致控制

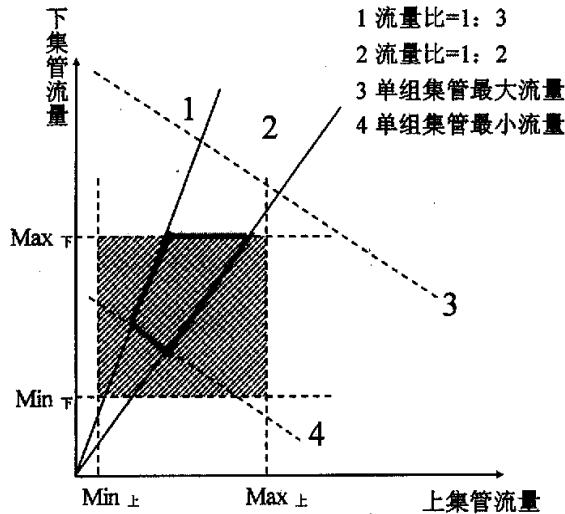


图 5.11 上下集管流量比的选择范围示意图

Fig.5.11 Diagram of choosing range for water ratio of up and down jet

水量比设置不合理会导致钢板向上或向下翘曲。水量比将视总水量而定，总水量越大，下水量/上水量的比值越小。确定水量比时，应综合考虑系统的供水能力和工艺要求，如上、下集管所能达到的最大、最小流量和允许的上、下流量比等，从而在一合理的范围内确定出水量比值，如图 5.11 所示。

水量比值随喷流形态不同而不同，喷射冷却的水量比较小，而层流冷却较大，可达 1:2~3。上下表面的冷却能力是复杂的过程函数^[96]，考虑集管水量、钢板厚度、冷却方式（间歇冷却或连续冷却）等诸多因素，结合现场实际冷却效果，按照下述水量比模型回归模型参数。

$$\text{ratio} = A \times \text{basic_ratio} \times \left(\frac{x}{x_0}\right)^a \times \left(\frac{y}{y_0}\right)^b \times \left(\frac{1}{z}\right)^c \quad (5-3)$$

式中， x —冷却水量， m^3/h ；

y —钢板厚度， mm ；

z —为开启集管密度，连续开启时密度为 1；开一组关一组时密度为 1/2；开两组关一组时密度为 2/3；

A —自学习系数；

水流量为 $80\text{m}^3/\text{h}$ ，开启 8 组集管，间歇冷却时隔两组集管开启一组集管，实线表示间歇冷却曲线，虚线表示连续冷却。从模拟结果看，间歇冷却时钢板厚度上的温度梯度远远小于连续冷却时的温度梯度。

5.2.4 上下表面的温度一致控制

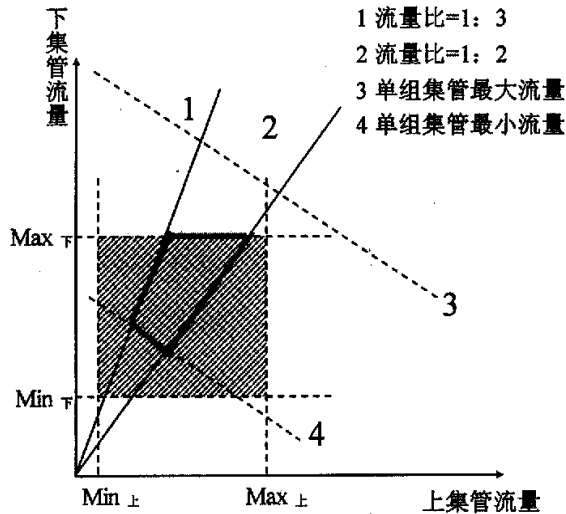


图 5.11 上下集管流量比的选择范围示意图

Fig.5.11 Diagram of choosing range for water ratio of up and down jet

水量比设置不合理会导致钢板向上或向下翘曲。水量比将视总水量而定，总水量越大，下水量/上水量的比值越小。确定水量比时，应综合考虑系统的供水能力和工艺要求，如上、下集管所能达到的最大、最小流量和允许的上、下流量比等，从而在一合理的范围内确定出水量比值，如图 5.11 所示。

水量比值随喷流形态不同而不同，喷射冷却的水量比较小，而层流冷却较大，可达 1:2~3。上下表面的冷却能力是复杂的过程函数^[96]，考虑集管水量、钢板厚度、冷却方式（间歇冷却或连续冷却）等诸多因素，结合现场实际冷却效果，按照下述水量比模型回归模型参数。

$$\text{ratio} = A \times \text{basic_ratio} \times \left(\frac{x}{x_0}\right)^a \times \left(\frac{y}{y_0}\right)^b \times \left(\frac{1}{z}\right)^c \quad (5-3)$$

式中， x —冷却水量， m^3/h ；

y —钢板厚度， mm ；

z —为开启集管密度，连续开启时密度为 1；开一组关一组时密度为 1/2；开两组关一组时密度为 2/3；

A —自学习系数；

basic_ratio—基本水量比系数, 小管对应 2.2, 大管对应 2.5;

a—水量系数, 小管对应 0.22, 大管对应 0.15;

x_0 —基本水量, 大小管分别对应 60、90m³/h;

b—厚度系数, 取值为 0.01;

y_0 —基本厚度, 取值为 10mm;

c—集管排布方式系数, 取值为 0.035。

该模型设定的原则是:

[1] 在某一范围内, 水量比随水量增加而增加; 超出该范围, 水量比不变;

[2] 在某一范围内, 水量比随厚度增加而增加; 超出该范围, 水量比不变;

[3] 水量比随间歇方式不同而不同, 越稀疏水量比越大。

水量比规律是大集管水量比比小集管大, 间歇冷却比连续冷却大, 水量增加水量比增加, 钢板厚度增加水量比增加。一般说来, 大集管的水量比在 2.4~2.7 之间, 小集管的水量比在 2.0~2.3 之间。表 5.4 和表 5.5 列出了连续冷却和间歇冷却方式下的水量比值。

表 5.4 连续冷却方式下集管上下水量比

Table5.4 Water ratio for continuous cooling

序号	厚度 mm	速度 m/s	大集管水 量 m ³ /h	小集管水 量 m ³ /h	大集管下 上水量比	小集管下 上水量比
1	12	1.5	90	75	2.50	2.31
2	20	1	100	80	2.56	2.36
3	30	1	100	85	2.56	2.40
4	40	0.8	120	90	2.64	2.44
5	50	0.8	140	90	2.71	2.44

表 5.5 间歇冷却方式下集管上下水量比

Table5.5 Water ratio for interval cooling

序号	厚度 mm	速度 m/s	大集管水 量 m ³ /h	小集管水 量 m ³ /h	大集管下 上水量比	小集管下 上水量比
1	12	1.5	90	75	2.56	2.37
2	20	1	100	80	2.62	2.42
3	30	1	100	85	2.63	2.46
4	40	0.8	120	90	2.71	2.50
5	50	0.8	140	90	2.78	2.50

5.2.5 实际应用效果

目前首钢大部分产品为双高产品，这些产品都需要进行轧后快速冷却。通过在线应用，目前加速冷却后的钢板上下表面温度波动量都小于 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。现场实测数据如表 5.6 所示。

表 5.6 控冷模型应用前后的钢板表面温度比较

Table 5.6 Surface temperature comparison before and after used model

厚度 mm	控冷模型应用前钢板	控冷模型应用后钢板
	上下表面温差 $^{\circ}\text{C}$	上下表面温差 $^{\circ}\text{C}$
16	25	10
25	30	10
40	50~60	15~20

图 5.12 给出了现场实测的钢板上下表面温度曲线，其冷却条件为：

- ◆ 钢板厚度：25mm
- ◆ 终冷目标温度：675 $^{\circ}\text{C}$
- ◆ 钢种：Q345B
- ◆ 大集管水量：104m³/h，开启 1、3 组
- ◆ 小集管水量：84m³/h，开启 10、11、13、14 组
- ◆ 大集管水量比：2.7
- ◆ 小集管水量比：2.2

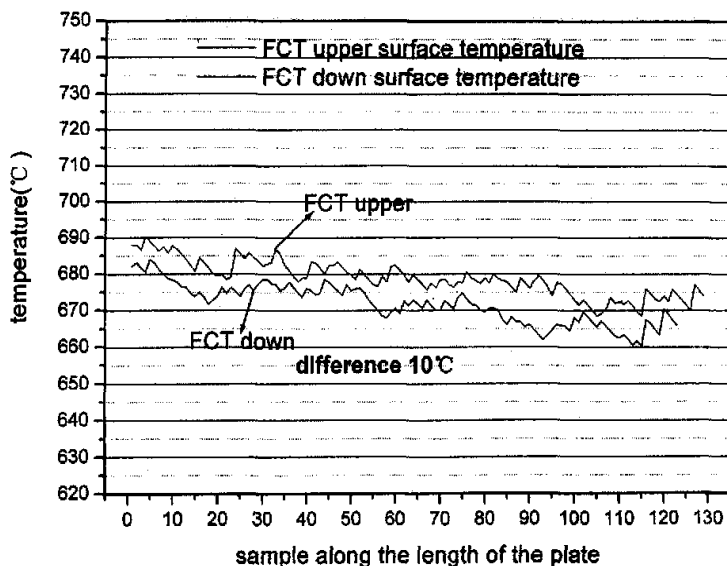


图 5.12 实测控制冷却曲线

Fig.5.12 Measured cooling curves

在控冷系统调试后期,我们针对前期出现的钢板到冷床上呈凹状的问题,不断优化水量比,并根据间歇方式、钢板厚度、通板速度、集管水量的不同而调整水量比。目前,通过水量比的调节基本上实现了上下表面温度的一致,冷却后的钢板不再鼓凸,板形良好。

5.3 长度方向上的温度均匀控制

5.3.1 长度方向温度不均的产生原因

钢板长度方向上温度不均的主要原因,一是因板坯加热不均,特别是推钢式加热炉滑道造成的黑印;二是轧制过程中轧辊冷却水不均匀地滴到钢板表面形成的温度波动;三是钢板在冷却过程中,下部的冷却水会回落到钢板头部的上表面上,加剧了钢板头部的温度不均匀分布;四是钢板纵向上各部分进入冷却区的时间有先有后,根据钢板的长度和速度不同可能相差 10~20s,因而进入冷却区时钢板纵向上即由于空冷时间不同而存在一定的温度梯度。为保证钢板纵向温度均匀,主要是对钢板的头尾部低温区、中部温度梯度区和异常温度波动区实施特殊控制。

5.3.2 长度上温度分布特点

假设钢板出轧机后温度均匀分布,对 20mm 厚、20m 长的钢板以 1m/s 的速度进入冷却区时的纵向温度分布进行模拟,模拟结果和现场采集到的实测数据如图 5.13 所示。模拟结果与实测的纵向温度分布曲线趋势一致,但实测数据尾部温度呈现下降又上升趋势,原因是:钢板尾部有一段微微上翘,所以尾部积存有一定的轧机冷却水,因此实测温度偏低,待温度计检测到钢板尾部上翘部分时,温度又明显上升了。

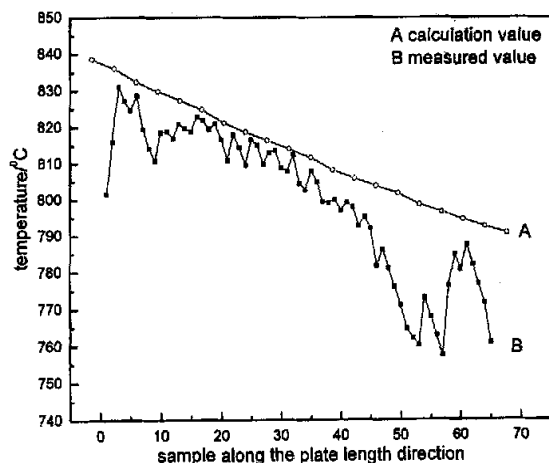


图 5.13 钢板进冷却区时纵向温度分布模拟曲线和实测曲线

Fig.5.13 Simulated and measured curve of longitudinal temperature

加之 5.3.1 小节分析的原因, 钢板纵向上的温度分布通常是如图 5.14 所示的情况, 即头尾端温度偏低, 中部温度呈递减趋势变化。



图 5.14 钢板纵向温度分布

Fig.5.14 Diagram of longitudinal temperature distribution

5.3.3 长度方向上温度均匀控制策略

5.3.3.1 微跟踪控制

为了及时纠正水印造成的钢板低温或由于现场其他因素造成的钢板温度波动, 实现钢板长度方向上的温度控制目标, 从控冷区入口开始对钢板实施分段微跟踪控制。即把钢板从头部到尾部进行物理分段, 各段依据测温仪测定的温度分布信号和跟踪信号进行单独控制, 根据目标温度偏差进行模型计算, 控制变量为冷却水的水量或集管开启数目, 然后对各段实施前馈控制。

若调节集管开启组数, 则冷却能力有阶梯性的变化, 若调节辊速和集管流量则冷却能力连续变化, 但辊速变化会对冷却区内的钢板温度产生影响。因此对无规律状态下的温度偏差常常采用微调末端集管水量的方法来加以调整。

对头尾部的低温情况, 通常对头部采取延迟开启喷水集管和对尾部提前关闭喷水集管的策略。头尾特殊控制时开闭集管顺序为: 对前几组集管, 采取与冷却辊道速度方向逆向开, 顺向关的顺序。

5.3.3.2 微加速度控制

钢板纵向温度呈梯度下降, 为保证纵向温度均匀, 我们采取对控冷辊道施加一相应的加速度来纠正纵向温度梯度。该加速度的大小与温度梯度、辊道初始速度、辊道速度允许范围、冷却区前后辊道速度允许范围等因素有关, 因此在加速度模型中充分考虑了辊道速度、设备允许能力等影响因素。

如 4.15 图所示, 冷却区长度为 L_0 , 在钢板头部取一点设为 A, 在距 A 点 x 距离取一点设为 B, 钢板进入控冷区时的初速度设为 v_0 , 加速度为 a , A 点到达冷却区出口时速度 v_{At} , B 点到达冷却区入口时速度为 v_{B0} , B 点到达冷却区出口时速度为 v_{Bt} 。

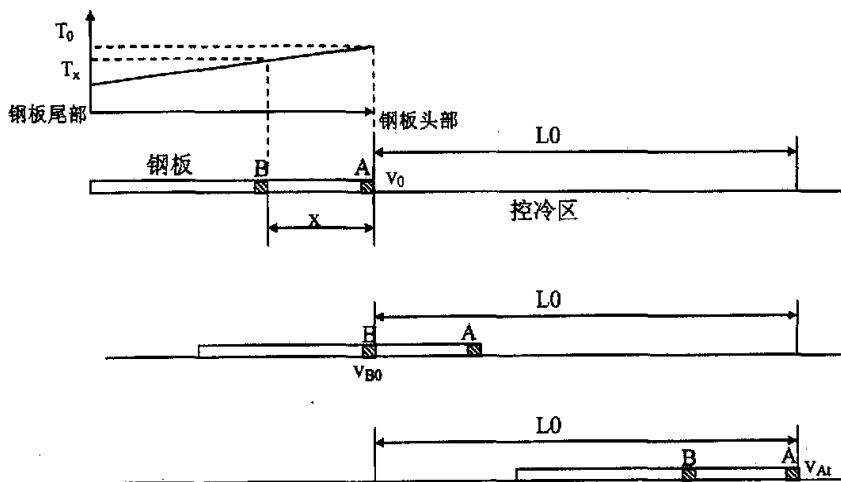


图 5.15 钢板在控冷区中的加速度计算示意图

Fig.5.15 Diagram of plate acceleration calculation in cooling zone

设温度梯度为 b ，钢板沿长度方向上的温度分布为

$$T(x) = T_0 + bx \quad (5-4)$$

式中， b 可通过实测的开冷温度沿钢板纵向上的分布计算求得。

设钢板头部通过控冷区的速度模型为

$$v_t = v_0 + at \quad (5-5)$$

钢板距头部 x 距离位置的温度与头部温差为

$$\Delta T = b\Delta x \quad (5-6)$$

设钢板的冷却速度为 CR ，则该温差对应的冷却时间为

$$\Delta t = \Delta T / CR = b\Delta x / CR \quad (5-7)$$

B 点到达冷却区入口时的速度为

$$v_{B0} = \sqrt{2ax + v_0^2} \quad (5-8)$$

A、B 到达冷却区出口时的速度分别为

$$\begin{aligned} v_{At} &= \sqrt{2aL_0 + v_0^2} \\ v_{Bt} &= \sqrt{2aL_0 + 2ax + v_0^2} \end{aligned} \quad (5-9)$$

设 A、B 点通过冷却区的时间分别为 t_1 ， t_2 ，则

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{\sqrt{2aL_0 + v_0^2} - v_0}{a} \\ t_2 &= \frac{\sqrt{2aL_0 + 2ax + v_0^2} - \sqrt{2ax + v_0^2}}{a} \end{aligned} \quad (5-10)$$

A、B 两点通过冷却区的时间差为

$$dt=t_1-t_2$$

若要消除钢板纵向上的温差，则

$$dt=\Delta t$$

$$b\Delta x/CR = \frac{\sqrt{2aL_0+v_0^2}-v_0}{a} - \frac{\sqrt{2aL_0+2ax+v_0^2}-\sqrt{2ax+v_0^2}}{a} \quad (5-11)$$

考虑到钢板在水流下的纯水冷时间与通过水冷区的时间不同，因此增加一水冷时间有效系数 t_{cor} （通常取 0.2~0.4），得

$$b\Delta x/CR * t_{cor} = \frac{\sqrt{2aL_0+v_0^2}-v_0}{a} - \frac{\sqrt{2aL_0+2ax+v_0^2}-\sqrt{2ax+v_0^2}}{a} \quad (5-12)$$

该方程是 a 的高次方程，从该式中解出 a （可正可负），即为钢板通过控冷区时的加速度。加速度是温度梯度的增函数，因此在程序中采用二分法进行求解。

为满足控冷辊道、冷却区前后辊道的速度要求，要确保速度最大值、最小值在设备允许范围内，因此加以下约束条件

$$v_{min} < v_t < v_{max} \quad (5-13)$$

式中 v_{min} 、 v_{max} 是设备允许的最大、最小速度。

5.3.4 实际应用效果

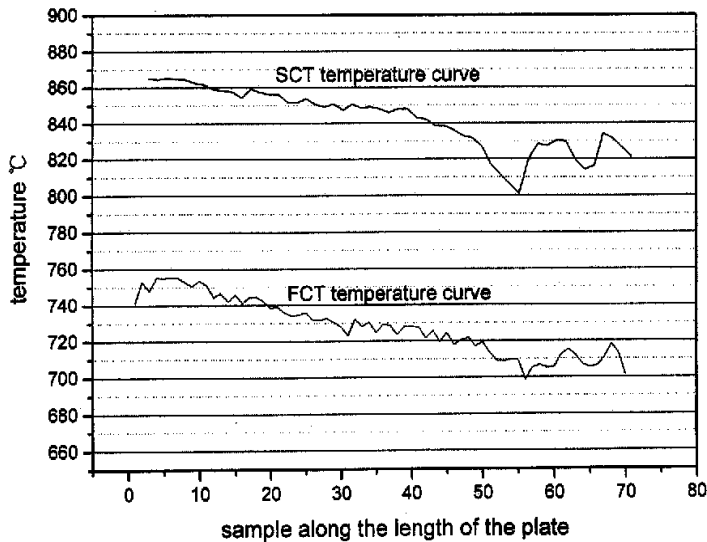


图 5.16 实测控制冷却曲线

Fig.5.16 Measured cooling curves

采用控制策略之前,钢板的开冷温度和终冷温度沿纵向上往往有一较大的温度梯度,如图 5.16 所示,其冷却参数为 25mm 厚钢板,终冷温度为 700℃,集管流量为 100m³/h,水量比为 2.5,通板速度为 1.0m/s。可以看出,终冷后钢板纵向温差有 60℃,并且钢板尾部温度较中部偏低。图 5.17 是采用温度均匀控制策略之后的冷却曲线,冷却参数为 25mm 厚钢板,终冷温度为 675℃,大集管水量为 104m³/h,开启 1、3 组两组,水量比为 2.7,小集管水量为 84m³/h,开启 10、11、13、14 组共四组,水量比为 2.2,通板速度为 1.0m/s,加速度为 0.005m/s²。

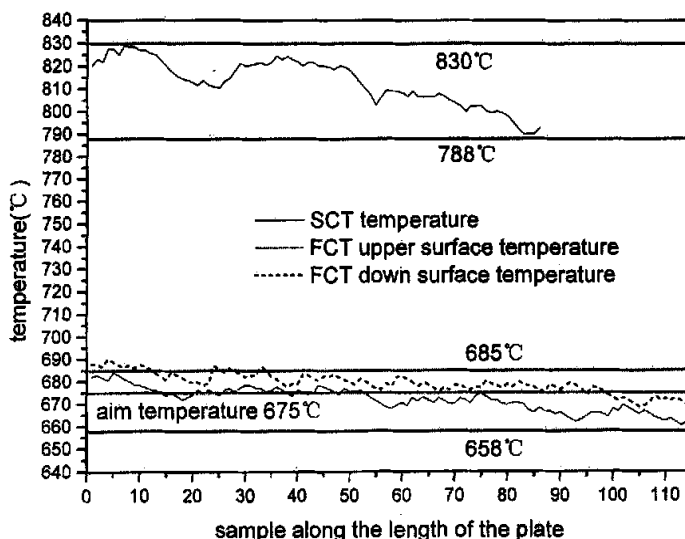


图 5.17 实测控制冷却曲线

Fig. 5.17 Measured cooling curves

根据来钢的温度梯度,采用相应的加速度控制后,钢板纵向温度梯度明显减小,见图 5.18。

从实测数据上可以看出,在前述的各项控制策略均未投入之前,终冷温度和开冷温度有着相同的变化趋势,纵向递降温差、头尾温差和“黑印”都比较明显,同板温差达到 60~80℃。采用分段跟踪、头尾特殊控制和微加速度等相应的控制策略之后,明显地改善了温差大的区段,纵向温度更加均匀,同板温差满足±20℃精度,有的达到了±10℃精度。

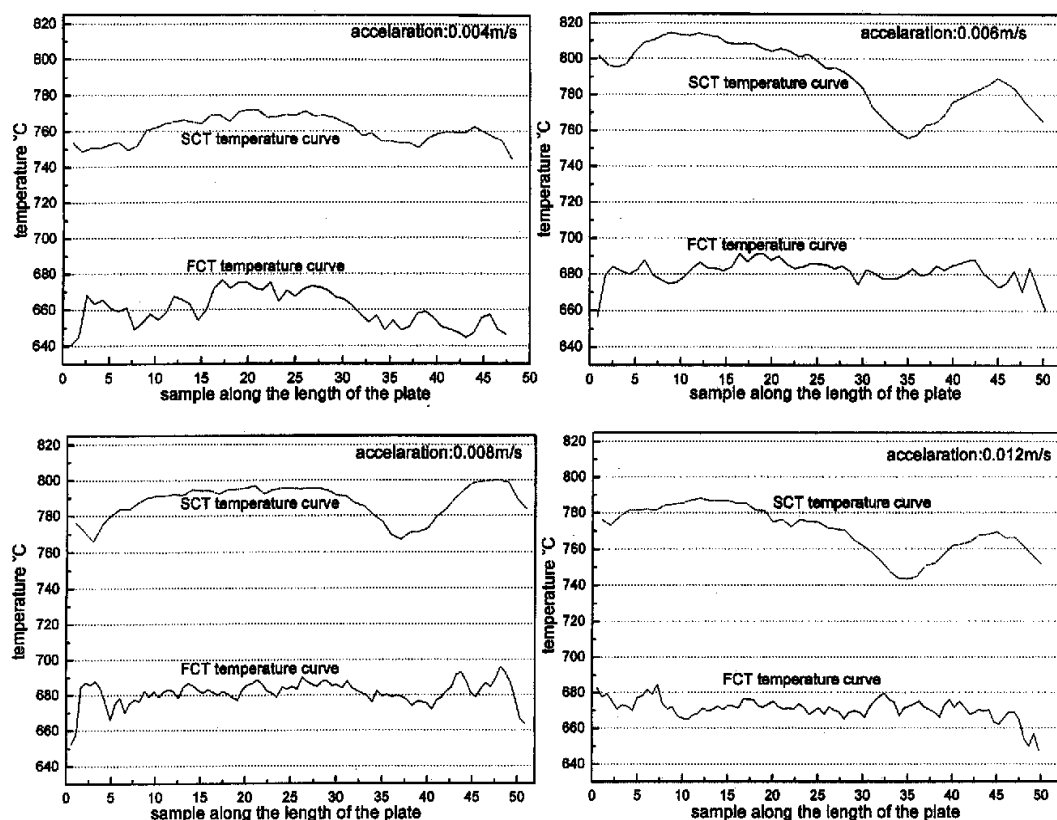


图 5.18 不同加速度控制下的钢板纵向温度分布

Fig. 5.18 Temperature distribution along length with different acceleration

5.3 本章小结

(1) 分析了中厚板冷却过程中宽度上温度分布不均的原因，根据宽度、厚度、水量对温度分布影响的离线模拟结果，建立了凸度遮蔽模型，并于国内首次实现了边部凸度遮蔽的应用。

(2) 分析了中厚板冷却过程中厚度上的温度分布特点，针对冷却工艺对冷却速度的要求，于国内首次提出并实现了大集管—小集管—大集管的排列方式，同时采用间歇冷却方式，大大降低了厚度上的温度梯度。

(3) 分析了中厚板冷却过程中长度方向上温度不均匀分布的原因，模拟了钢板进入冷却区时的温度分布情况，建立了调整温度梯度的加速度模型，阐述了调整局部温度波动和头尾低温段的分段微跟踪方法。

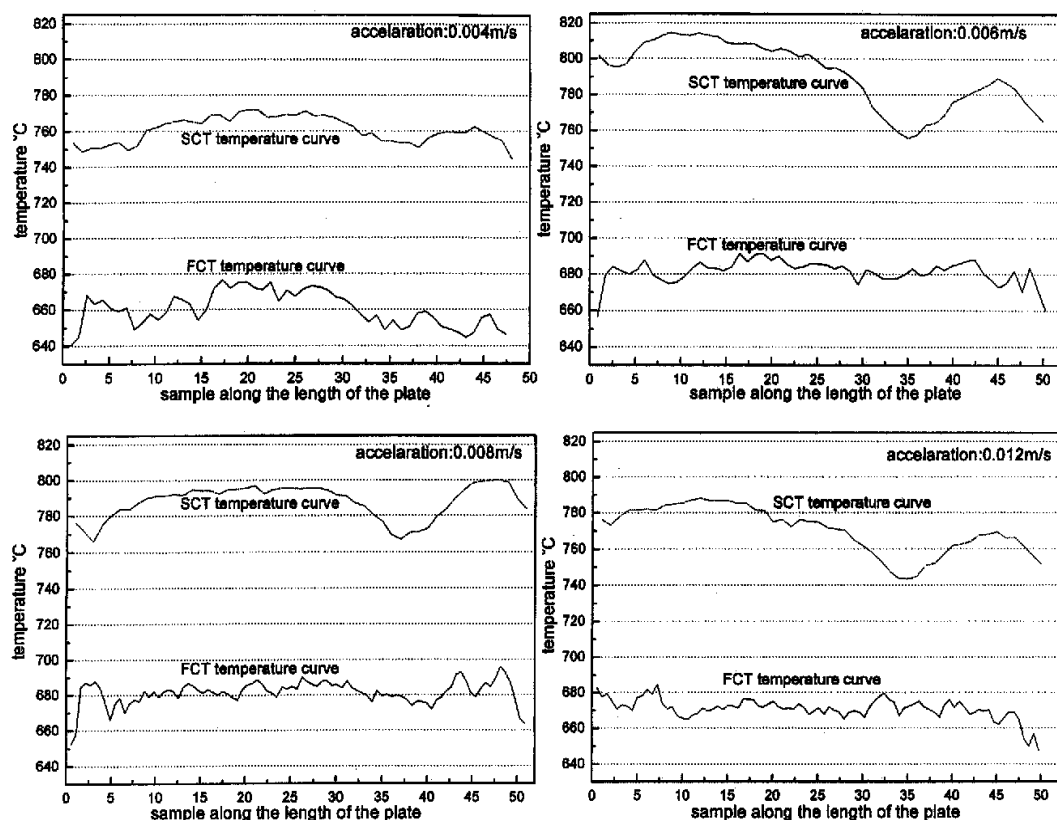


图 5.18 不同加速度控制下的钢板纵向温度分布

Fig. 5.18 Temperature distribution along length with different acceleration

5.3 本章小结

(1) 分析了中厚板冷却过程中宽度上温度分布不均的原因, 根据宽度、厚度、水量对温度分布影响的离线模拟结果, 建立了凸度遮蔽模型, 并于国内首次实现了边部凸度遮蔽的应用。

(2) 分析了中厚板冷却过程中厚度上的温度分布特点, 针对冷却工艺对冷却速度的要求, 于国内首次提出并实现了大集管—小集管—大集管的排列方式, 同时采用间歇冷却方式, 大大降低了厚度上的温度梯度。

(3) 分析了中厚板冷却过程中长度方向上温度不均匀分布的原因, 模拟了钢板进入冷却区时的温度分布情况, 建立了调整温度梯度的加速度模型, 阐述了调整局部温度波动和头尾低温段的分段微跟踪方法。

第6章 层流冷却控制系统程序设计

国内控轧控冷技术的研究始于 70 年代,直到 90 年代建成国内第一套实用的水幕冷却装置,多数中厚板厂都没有配备控冷装置。目前各个热轧厂纷纷新建或改造控制冷却设备,因此开发设计具有自己特色的控制冷却系统数学模型是刻不容缓的,对提高产品质量和产量也具有重要意义。

我们以首钢中厚板厂为依托,结合现场生产需要和控制目标,设计了控制冷却系统过程控制模型,并进行了程序开发。

6.1 控制冷却系统概述

6.1.1 控制冷却装置的布置

整个控冷过程包括轧件从轧机后测温仪到冷却区后测温仪的全部历程,主要包括空冷和水冷两种冷却方式,根据产品大纲和生产现场的设备配置情况,从轧机后到矫直机前约 89m 长的控冷生产线上,进行了如图 6.1 所示的控冷设备和检测仪表的配置。

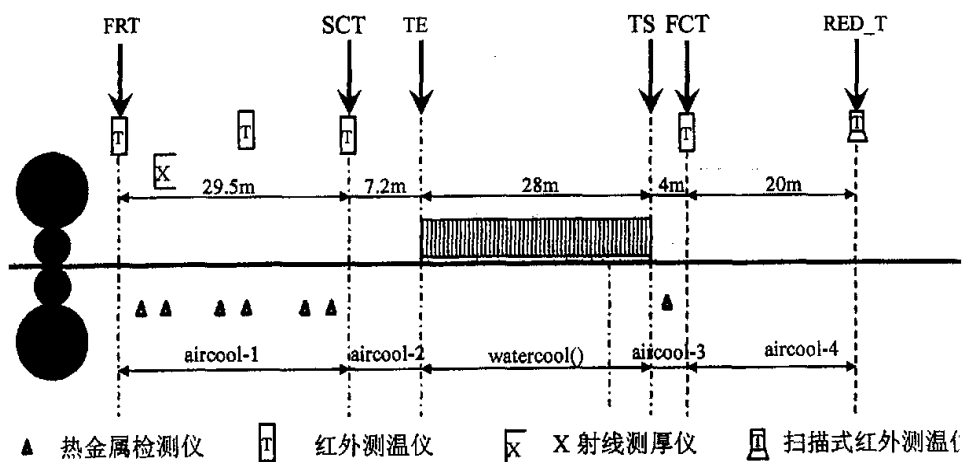


图 6.1 冷却区设备布置示意图

Fig.6.1 Display of cooling equipment

从图 6.1 上可以看出在冷却区前后布置的检测设备主要有:轧机与冷却区之间有三个测温仪、6 个热检,一个测厚仪;冷却区后一个热检,一个扫描式测温仪和一对上下布置的红外测温仪。

6.1.2 计算机控制设备

冷却控制系统为单独的控制系统，分基础自动化级（一级计算机）和过程控制级（二级计算机），通过工业以太网使一级和二级计算机系统进行通讯，同时冷却区连接有控制冷却操作和过程参数显示两台终端，用于过程监视和控制。

控制冷却区的一级计算机主要负责水流量控制和辊道速度控制以及数据显示等，采用西门子的 S7-400PLC 及 PROFIBUS-DP 远程 I/O ET200 系统。

控制冷却计算机采用 1 台工业控制机（IPC）。

控制冷却过程机系统的主要功能是进行终冷温度模型运算、确定冷却方式、阀门开闭的数量和分布以及控制冷却模型的优化和自适应、建立知识库和通讯等。

二级计算机将模型设定值向一级计算机下达，冷却设备的执行设由一级计算机判断执行。

首钢中厚板四辊精轧机改造计算机控制系统配置如图 6.2 所示。

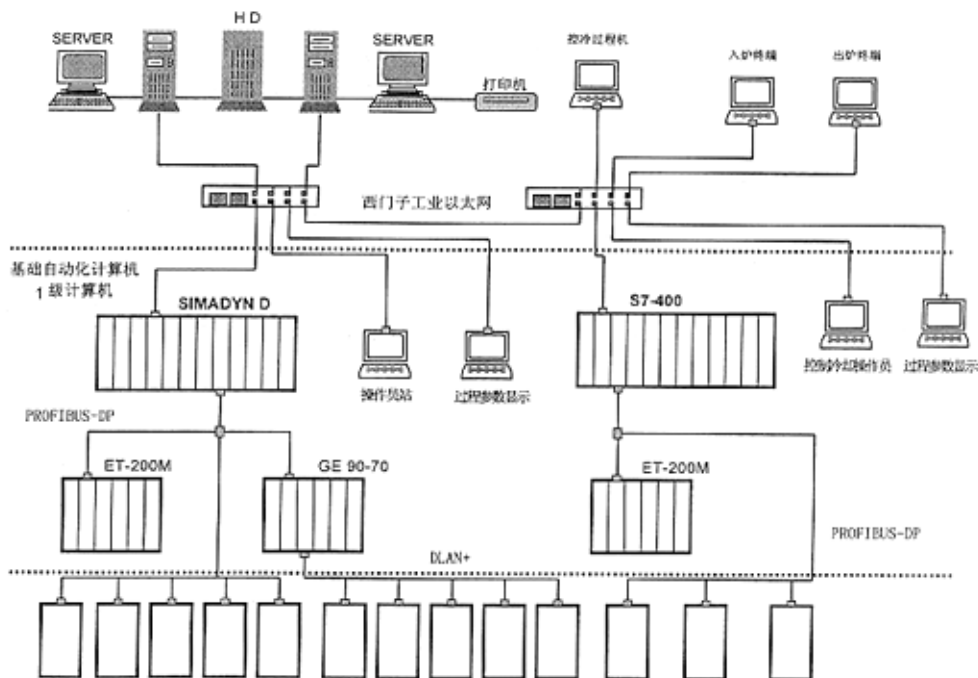


图 6.2 控制冷却计算机控制系统配置图

Fig.6.2 Computer configuration for control rolling and cooling

6.2 控冷系统设计的基本思想

控制系统要确保的控制目标为：

- [1] 冷却速度
- [2] 终冷温度
- [3] 横向温度均匀性
- [4] 纵向温度均匀性
- [5] 上下表面温度均匀性

而冷却过程中可控量主要为：

- [1] 辊道速度
- [2] 集管水流量
- [3] 集管数目和工作位置
- [4] 边部遮蔽宽度和遮蔽位置
- [5] 上下水量比

控冷过程机的任务就是根据冷却系统的已知条件完成目标控制量的实现，保证钢板性能、板形合格，并生产出高附加值的产品。全部的控冷程序都是围绕如何提高钢板性能、保证板形、达到控冷目标而设计的。

6.3 控制冷却系统功能及流程图

6.3.1 功能说明

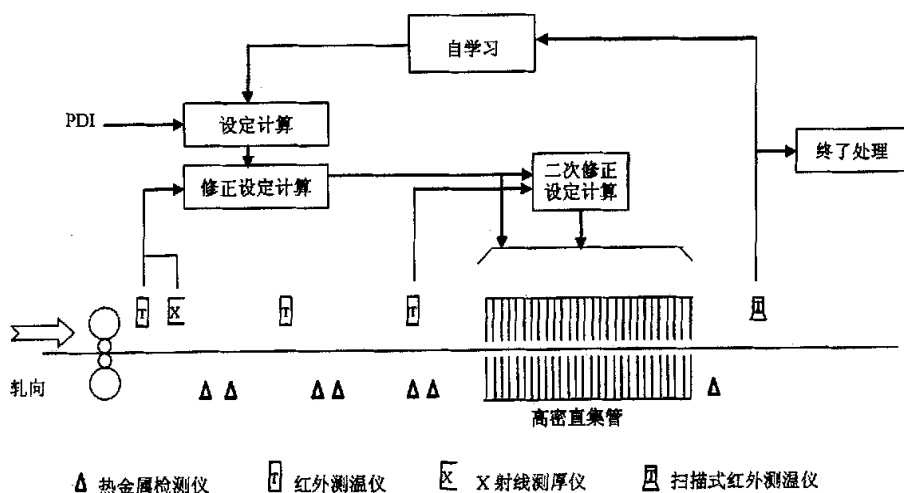


图 6.3 控冷模块关联图

Fig.6.3 Association diagram of cooling module

6.2 控冷系统设计的基本思想

控制系统要确保的控制目标为：

- [1] 冷却速度
- [2] 终冷温度
- [3] 横向温度均匀性
- [4] 纵向温度均匀性
- [5] 上下表面温度均匀性

而冷却过程中可控量主要为：

- [1] 辊道速度
- [2] 集管水流量
- [3] 集管数目和工作位置
- [4] 边部遮蔽宽度和遮蔽位置
- [5] 上下水量比

控冷过程机的任务就是根据冷却系统的已知条件完成目标控制量的实现，保证钢板性能、板形合格，并生产出高附加值的产品。全部的控冷程序都是围绕如何提高钢板性能、保证板形、达到控冷目标而设计的。

6.3 控制冷却系统功能及流程图

6.3.1 功能说明

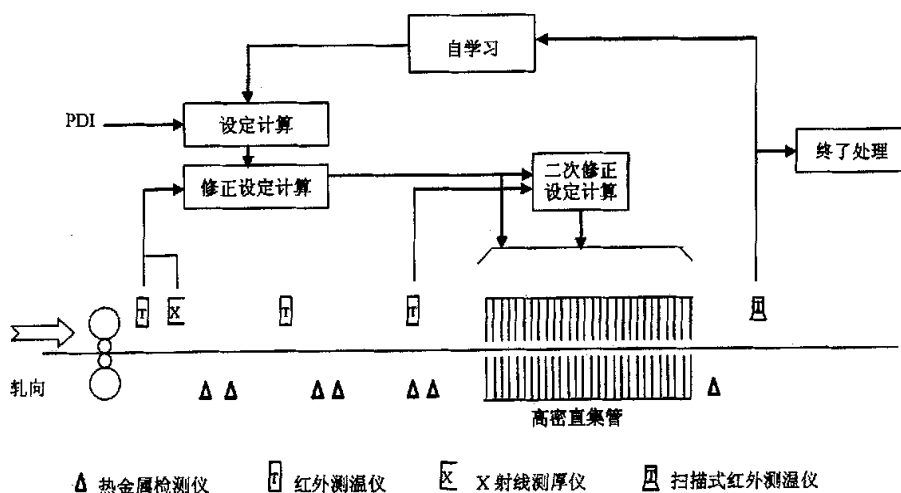


图 6.3 控冷模块关联图

Fig.6.3 Association diagram of cooling module

控制冷却系统具有基础自动化和冷却过程自动化功能。基础自动化功能包括钢板的位置跟踪以及冷却过程中在线数据采集和执行二级机指令。冷却过程自动化指冷却规程自动计算,包括校核计算、一次修正设定计算、二次修正设定计算、自学习计算,同时控冷过程机具有友好的人机界面,可进行操作显示、人工干预,事故自动诊断和自动打印、记录、报警功能。冷却过程模型之间的调用关系如图 6.3 所示。

6.3.2 校核计算

6.3.2.1 功能说明

校核计算即预设设定计算,是轧机过程机传来 PDI 数据校核(钢种、含碳量、终轧温度、终冷温度、冷却速率、钢板几何尺寸等)正确之后,控冷过程机根据 PDI 数据查表格选择辊道速度、集管排布方式(包括大小管选择、间歇方式)、大小集管初始水量、边部遮蔽量、头尾特殊控制量,确定控冷模式(空冷或水冷),同时程序计算出开启集管数目、集管排布形式、水流量、上下水量比、加速度、各组集管遮蔽量以及可能存在的报警信号(如冷却不足)等。轧机传来 PDI 正确信号后启动该程序。处理流程图如图 6.4 所示。

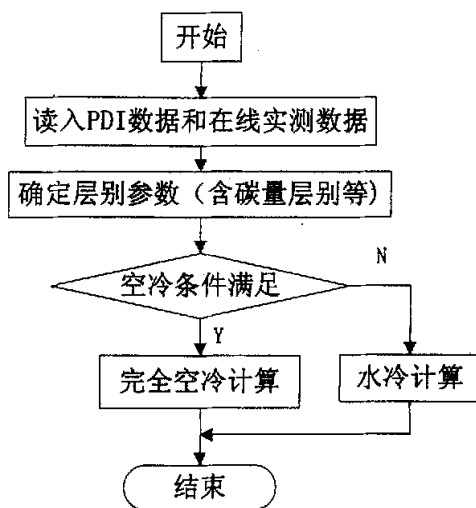


图 6.4 PDI 校核计算框图

Fig.6.4 Flow chart of PDI checking calculation

6.3.2.2 水冷计算说明

在校核计算中,主要确定空冷和水冷方式的使用,同时在确定采用水冷方式

控制冷却系统具有基础自动化和冷却过程自动化功能。基础自动化功能包括钢板的位置跟踪以及冷却过程中在线数据采集和执行二级机指令。冷却过程自动化指冷却规程自动计算,包括校核计算、一次修正设定计算、二次修正设定计算、自学习计算,同时控冷过程机具有友好的人机界面,可进行操作显示、人工干预,事故自动诊断和自动打印、记录、报警功能。冷却过程模型之间的调用关系如图 6.3 所示。

6.3.2 校核计算

6.3.2.1 功能说明

校核计算即预设设定计算,是轧机过程机传来 PDI 数据校核(钢种、含碳量、终轧温度、终冷温度、冷却速率、钢板几何尺寸等)正确之后,控冷过程机根据 PDI 数据查表格选择辊道速度、集管排布方式(包括大小管选择、间歇方式)、大小集管初始水量、边部遮蔽量、头尾特殊控制量,确定控冷模式(空冷或水冷),同时程序计算出开启集管数目、集管排布形式、水流量、上下水量比、加速度、各组集管遮蔽量以及可能存在的报警信号(如冷却不足)等。轧机传来 PDI 正确信号后启动该程序。处理流程图如图 6.4 所示。

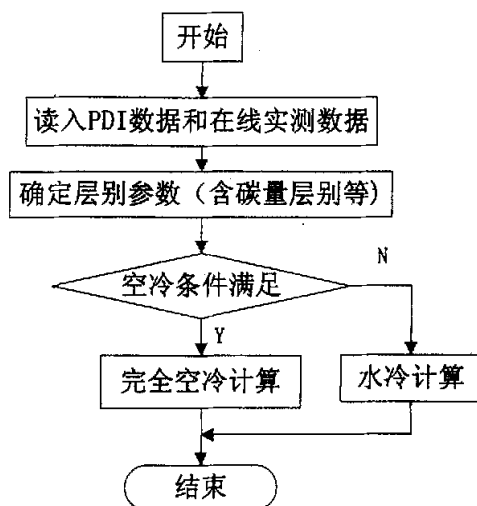


图 6.4 PDI 校核计算框图

Fig.6.4 Flow chart of PDI checking calculation

6.3.2.2 水冷计算说明

在校核计算中,主要确定空冷和水冷方式的使用,同时在确定采用水冷方式

的条件下,根据PDI数据确定辊道速度、加速度、集管排布方式、初始水量、水量比、边部遮蔽量、头尾特殊控制量,计算要实现终冷目标温度所需的集管开启状态、水量分布及通板速度等控制参数,并分别计算钢板在经过空冷、水冷、空冷过程中的温度变化。

6.3.3 轧机后修正设定计算

6.3.3.1 功能说明

当轧机后传来的钢板实测厚度、速度、表面温度以及设备状态参数等信息,根据终轧温度计算值和实测值之间的偏差以及厚度、速度的实测值和预测值之间的偏差对预设定计算结果进行修正计算或重新进行冷却计算。钢板尾部通过轧机后测温仪时触发该程序。处理流程图见图 6.5。

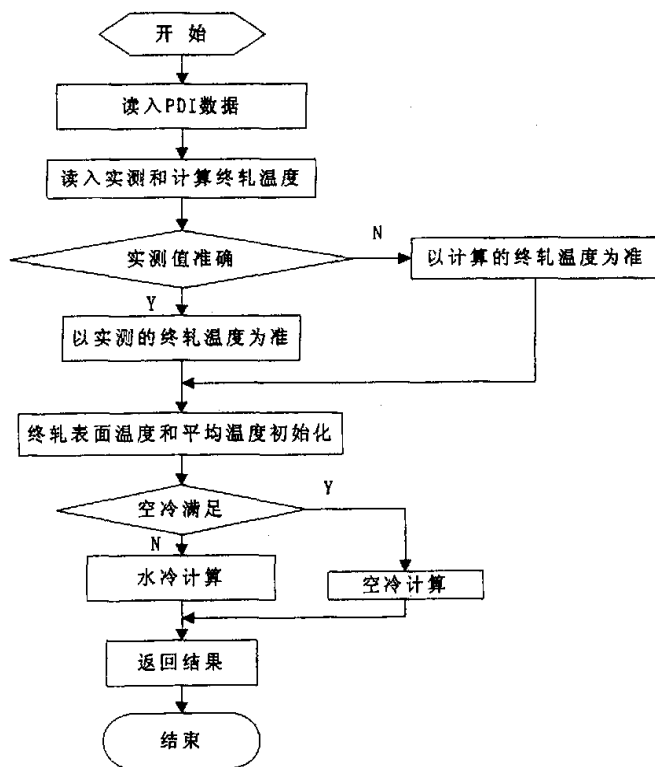


图 6.5 轧机后修正设定计算框图

Fig.6. 5 Flow chart of correction setting calculation

6.3.3.2 计算步骤说明

水冷计算部分主要包括两种水量调整计算或重新计算。

6.3.3.2.1 水量调整

根据实测终轧温度和计算值之间的偏差大小，分为以下两种情况进行计算：

[1] 当终轧温度差值绝对值小于 10°C 时，对后面的 n 根集管水量进行微调。调整顺序是从后到前，直到终冷温度计算值和目标值的偏差小于 7°C 。当调整 n 根集管后仍不满足终冷要求，则退出。

[2] 当终轧温度差值绝对值不小于 10°C 时，按照从后到前的顺序增加（或减少）预设定的集管数目，直到集管全部打开（或全部关闭）或计算的终冷温度和目标终冷温度差值小于一定值（初定 5°C ）；当终冷温度计算值和目标值的偏差小于 10°C 时，则进行水量的调整。

水量调整框图参见下图 6.6。

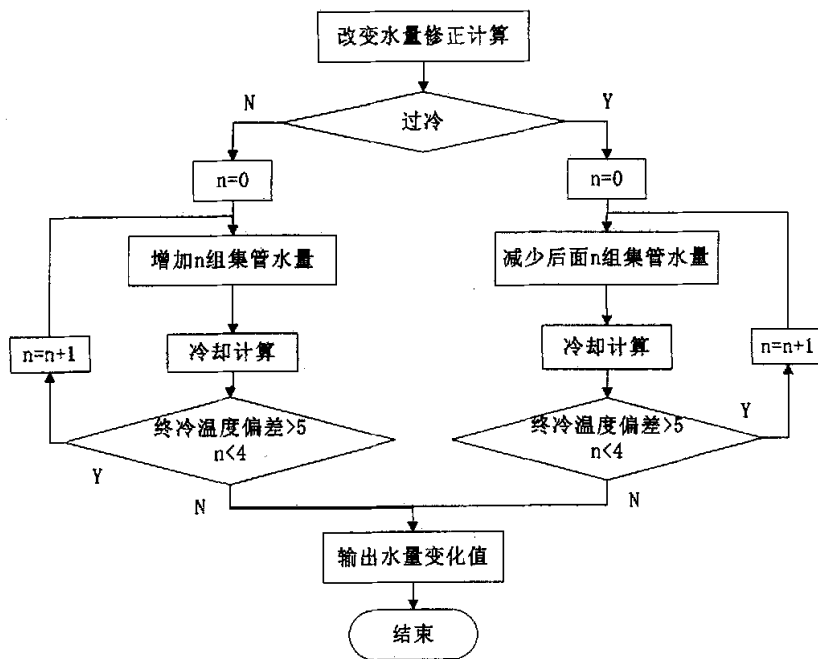


图 6.6 改变水量修正计算

Fig.6.6 Flow chart of water flow correction

6.3.3.2.2 重新计算

在轧机后作为计算标准的终轧温度与 PDI 给定的终轧温度偏差大于一定值时，根据 PDI 参数和计算标准的终轧温度，对集管组态、水量、通板速度等控制参数重新进行计算。流程图见图 6.7。

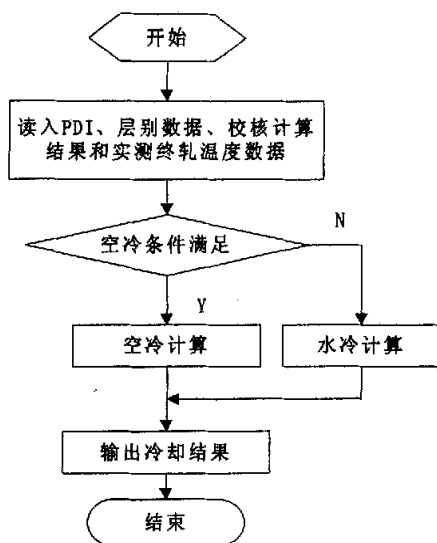


图 6.7 轧机后重新计算框图
Fig.6.7 Diagram of resetting after rolling

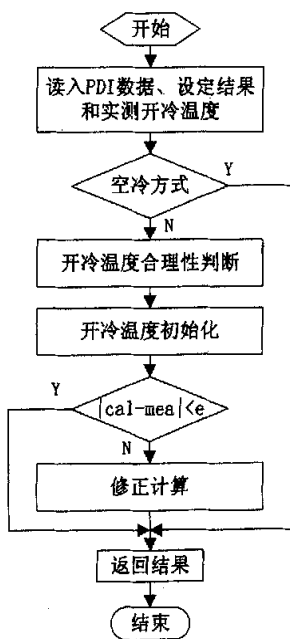


图 6.8 冷却区前二次修正设定计算
Fig.6.8 Correction setting calculation before cooling area

6.3.4 冷却区前二次修正设定计算

6.3.4.1 功能说明

钢板定长通过水冷区前的测温仪时，根据实测开冷温度和计算的开冷温度差值，进行修正设定计算，考虑到模型计算时间和设备调整时间的可能性，仅对开启集管的数目进行微调。若在终轧测温仪处已确定为空冷方式，则不调用该程序。钢板定长通过水冷区前的测温仪时触发该程序。处理流程图见图 6.8。

6.3.4.2 计算步骤

6.3.4.2.1 修正计算

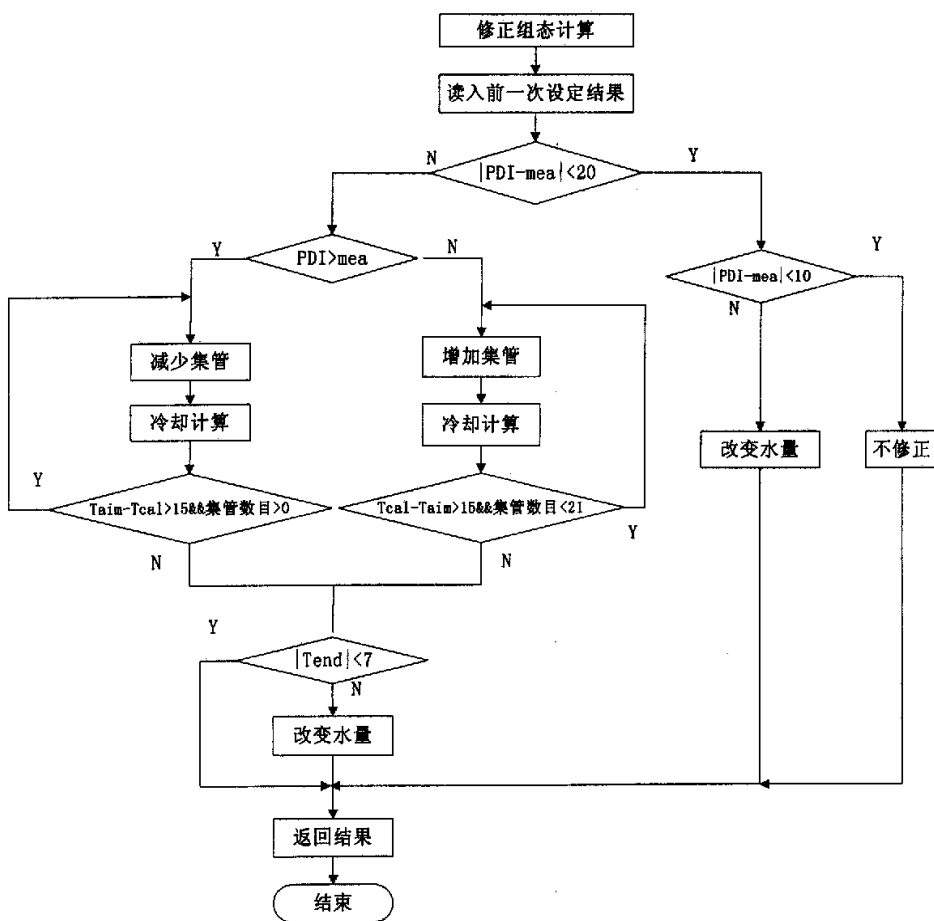


图 6.9 二次修正设定中的修正计算框图

Fig.6.9 Correction calculation during the section setting

空冷条件下，不进行二次修正设定计算，直接返回轧机后修正设定结果；若

是水冷方式且开冷温度偏差较小,则不进行修正计算,执行轧机后修正设定计算的结果;若是水冷方式,且开冷温度偏差大于一定值,则对后部集管的水量进行修正计算。修正计算流程见图 6.9。

该框图与轧机后修正设定计算中的修正计算框图类似,不同的是,前者的冷却计算是从控冷区开始,而后者的冷却计算是从轧机后开始。

6.3.5 自学习

由于本系统中使用的控制模型都是一些简化的理论模型或经验模型,因而在实际使用中很难精确地描述钢板冷却过程。设定模型的计算偏差主要来自于温度的预报偏差、模型系数的精度及模型本身结构的偏差。通过自学习的方法,可以使控制模型的设定值计算精度满足过程控制的要求。

钢板尾部离开控冷区后测温仪时,由跟踪逻辑触发模型管理器,模型管理器启动自学习模块,主要包括空冷自学习、水冷自学习、边部遮蔽量自学习、水量比自学习等,自学习模型参见第二章,自学习流程参见图 6.10。

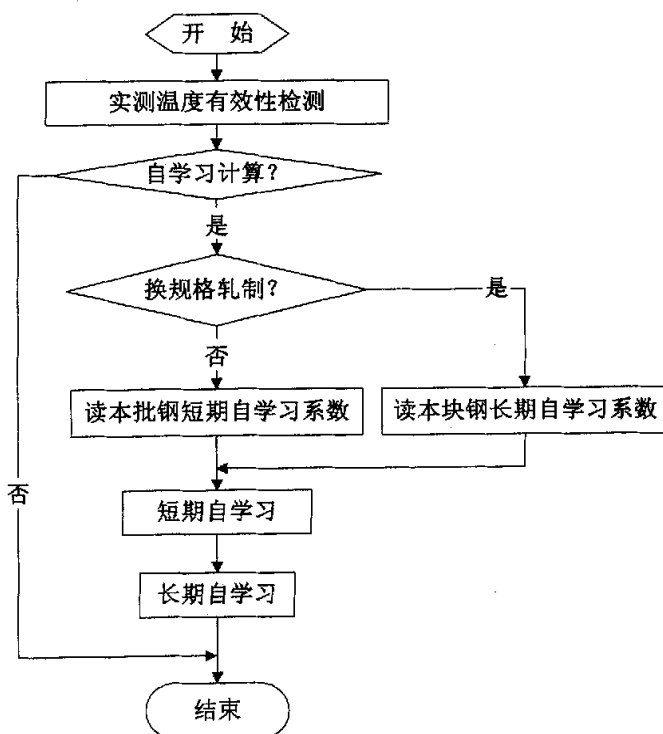


图 6.10 空冷自学习流程图

Fig.6.10 Flow chart of air cooling self-learning

6.3.6 控冷过程跟踪

6.3.6.1 过程跟踪概述

控制冷却系统是多门学科的综合应用，除了要求有精确的数学模型外，还必须准确地进行过程跟踪，以保证基础自动化与过程机之间的实时通讯。控冷过程跟踪要求能及时地将基础自动化信息传递给过程机，同时能将模型的计算结果实时地传送给一级机执行。如果过程跟踪失败，就会严重影响到控冷过程自动化的实现。

控制冷却的过程跟踪主要有如下功能：对控冷辊道上的钢板位置及其状态进行跟踪；对控冷设备状态进行跟踪；对一级机所传递的轧件实测数据进行管理；根据钢板在控冷辊道上的位置，触发控冷模型的校核计算、一次修正计算、二次修正计算和自学习计算；将模型计算的结果传递给基础自动化执行；对人机界面的指令和一级机传递的消息做出相应的响应；协调轧机过程机的轧制节奏；生成冷却报告。

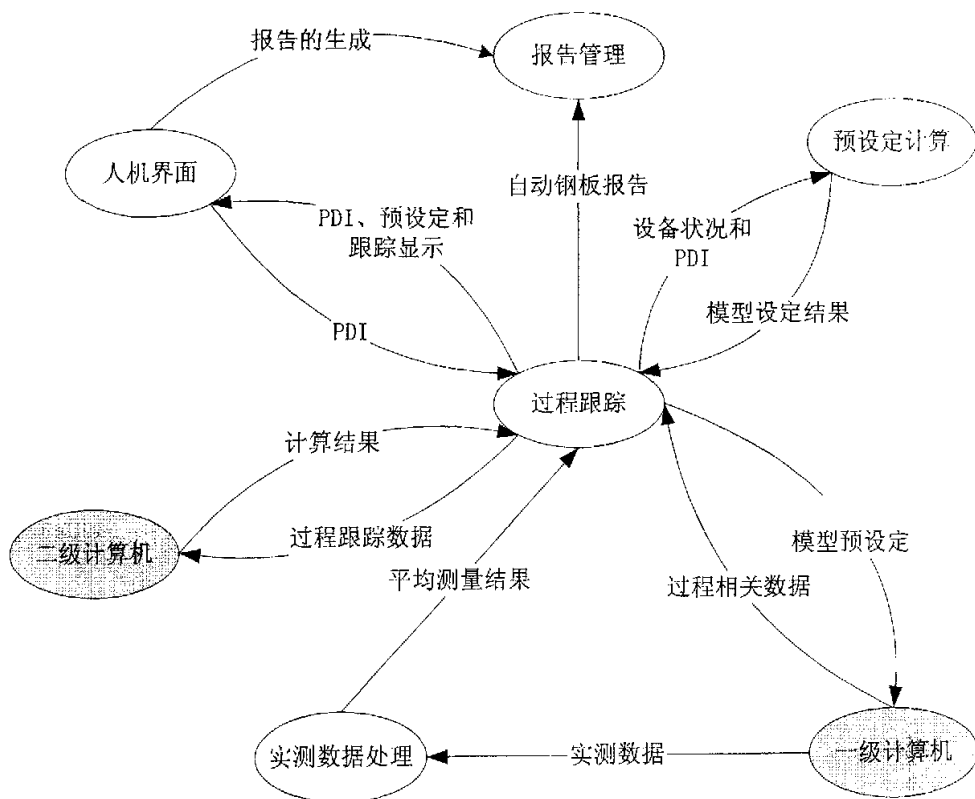


图 6.11 跟踪功能示意图

Fig.6. 11 Diagrammatic sketch of tracking

过程跟踪起着二级系统管理者的作用，它对一级机的检测消息作出响应，同时根据模型计算结果向一级机发出操作指令。模型计算依赖于跟踪逻辑的触发。过程跟踪还必须对模型计算结果进行保存和打印。

跟踪功能见图 6.11。

6.3.6.2 控冷过程跟踪主模块

控冷跟踪主模块负责对控冷辊道上的轧件位置进行跟踪，处理实测数据，触发相应的计算，计算结果的存储和下传，对操作员的指令作出相应的响应。轧线上有钢板即启动过程跟踪程序。流程图见图 6.12。

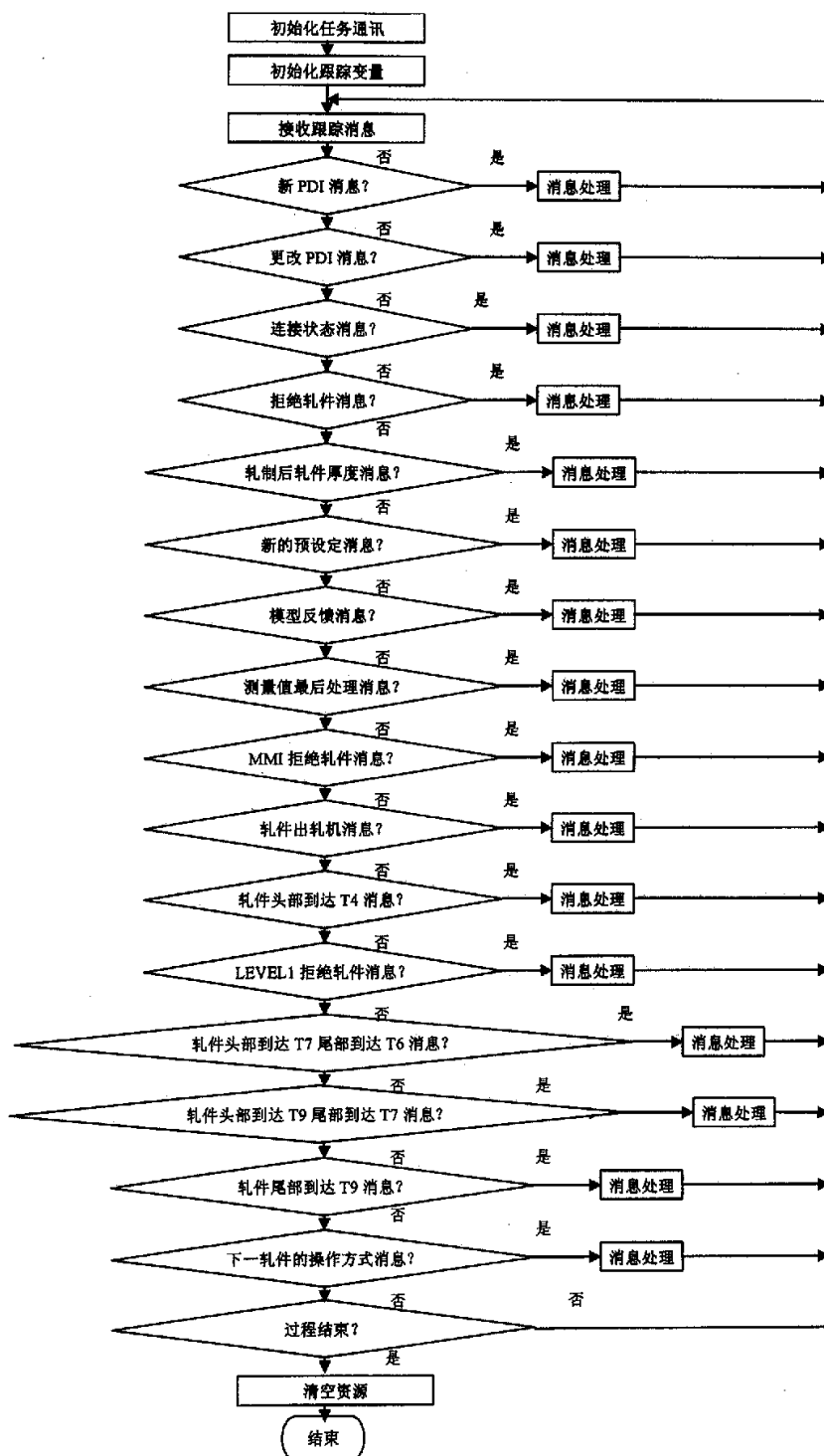


图 6.12 控冷跟踪流程图

Fig.6. 12 Flow chart of cooling traking

6.4 本章小结

本章以首钢中厚板厂为背景，介绍了中厚板厂的控制冷却工艺布置及相应的计算机系统配置，建立了控制冷却的过程机数学模型框架。该系统是国内中厚板控制冷却领域完全依靠自己力量建立的比较完整的控冷过程机模型设定系统，具备实时状态下完成模型设定计算、修正计算、自学习计算、过程跟踪等重要功能，为今后中厚板控制冷却系统的模型设计奠定了基础。

第7章 控制冷却模型的在线应用

目前,国内的中厚板控制冷却模型的开发和应用方面还处于摸索阶段。我们依托首钢中厚板厂改造项目所开发的控制冷却系统过程机模型、均匀冷却控制策略经实践证明,该系统具有良好的稳定性和很高的控制精度,能够满足在线过程控制的要求。

本章将介绍控制冷却过程模型的现场应用情况,并以在生产现场实测的冷却数据分析该套系统的实际控制效果。

7.1 控制冷却系统介绍

7.1.1 控制冷却方式和设备

利用高密直集管层流调节范围宽的特点,并根据现场实际工况,在首钢中厚板厂选择高密直集管冷却设备以通过方式冷却。冷却设备包括上下各 28 组集管,集管间距为 1.0m,每组集管可单独控制。为了满足钢板对冷却速度的要求并尽可能降低厚度上的温度梯度,我们在首钢中厚板厂设计了大集管一小集管一大集管的集管排列方式,这是国内首次提出并实施的控制冷却设备布置形式,有关集管的参数和流量范围在 5.2.1.1.2 小节已有叙述,这里不再重复。这样,可通过各不同流量的高密直集管之间相互组合,来控制钢板的冷却过程,控制方式灵活,冷却范围宽,可以适应不同钢种的冷却需要。

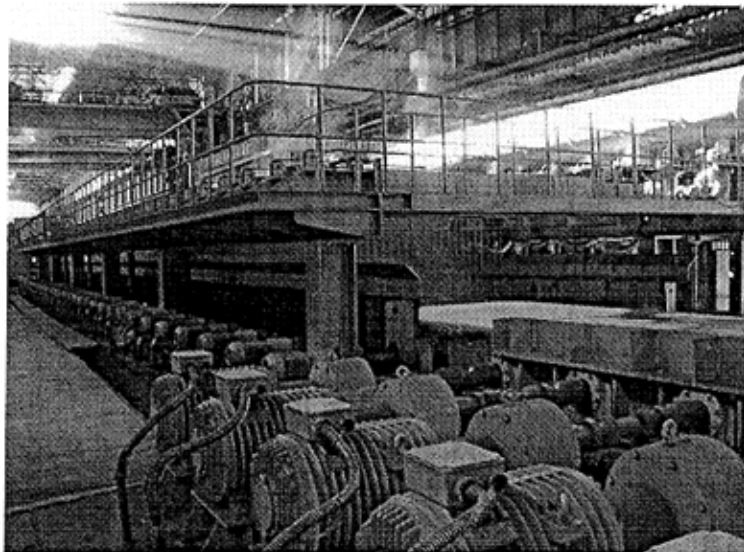


图 7.1 运行中的冷却控制系统

Fig.7.1 Running control cooling system

第7章 控制冷却模型的在线应用

目前,国内的中厚板控制冷却模型的开发和应用方面还处于摸索阶段。我们依托首钢中厚板厂改造项目所开发的控制冷却系统过程机模型、均匀冷却控制策略经实践证明,该系统具有良好的稳定性和很高的控制精度,能够满足在线过程控制的要求。

本章将介绍控制冷却过程模型的现场应用情况,并以在生产现场实测的冷却数据分析该套系统的实际控制效果。

7.1 控制冷却系统介绍

7.1.1 控制冷却方式和设备

利用高密直集管层流调节范围宽的特点,并根据现场实际工况,在首钢中厚板厂选择高密直集管冷却设备以通过方式冷却。冷却设备包括上下各 28 组集管,集管间距为 1.0m,每组集管可单独控制。为了满足钢板对冷却速度的要求并尽可能降低厚度上的温度梯度,我们在首钢中厚板厂设计了大集管一小集管一大集管的集管排列方式,这是国内首次提出并实施的控制冷却设备布置形式,有关集管的参数和流量范围在 5.2.1.1.2 小节已有叙述,这里不再重复。这样,可通过各不同流量的高密直集管之间相互组合,来控制钢板的冷却过程,控制方式灵活,冷却范围宽,可以适应不同钢种的冷却需要。

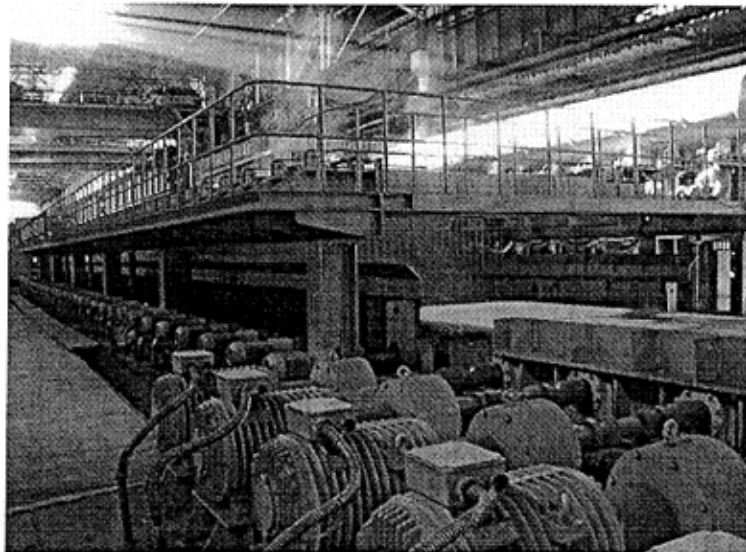


图 7.1 运行中的冷却控制系统

Fig.7.1 Running control cooling system

图 7.1 是首钢中厚板厂正在运行中的控制冷却系统。

7.1.2 控制冷却系统的基本参数

控制冷却系统的重要参数如下：

冷却装置尺寸：3200 mm × 28000 mm

冷却钢板尺寸：(6~50) mm × (1500~3200) mm × max36000mm

冷却速度范围：1.5—50℃/s；对于>20mm 厚钢板，冷却速度最大为 20℃/s

控制冷却开始温度：930℃~750℃

控制冷却终冷温度：650℃~500℃

控制阀组：上下各 28 组（每个集管配有单独的控制阀组）

辊道间距：1.0 m

冷却水最大瞬时水量：8000m³/h

系统供水能力：4000 m³/h

上下水量比：1：1.5~3

冷却水温度：≤38℃

辊道速度范围：0.2~2.5m/s

阀门响应时间：≤2s，响应时间差小于 0.2s

高位水箱容积：150m³

高位水箱高度：12m

水量调节范围：最大水量的 40~100%

另外，控冷线上配红外有测温仪、热金属检测器、扫描式测温仪等检测仪表，用以实时检测钢板的温度、位置，提供给基础自动化和过程机使用。

7.2 产品尺寸规格与钢种

产品规格为：

- 钢板厚度：6~50mm
- 钢板宽度：1500~3200mm
- 钢板长度：Max 36000mm
- 成品板单重：Max 10.6 吨

产品大纲见表 7.1。

图 7.1 是首钢中厚板厂正在运行中的控制冷却系统。

7.1.2 控制冷却系统的基本参数

控制冷却系统的重要参数如下：

冷却装置尺寸：3200 mm × 28000 mm

冷却钢板尺寸：(6~50) mm × (1500~3200) mm × max36000mm

冷却速度范围：1.5—50℃/s；对于>20mm 厚钢板，冷却速度最大为 20℃/s

控制冷却开始温度：930℃~750℃

控制冷却终冷温度：650℃~500℃

控制阀组：上下各 28 组（每个集管配有单独的控制阀组）

辊道间距：1.0 m

冷却水最大瞬时水量：8000m³/h

系统供水能力：4000 m³/h

上下水量比：1：1.5~3

冷却水温度：≤38℃

辊道速度范围：0.2~2.5m/s

阀门响应时间：≤2s，响应时间差小于 0.2s

高位水箱容积：150m³

高位水箱高度：12m

水量调节范围：最大水量的 40~100%

另外，控冷线上配红外有测温仪、热金属检测器、扫描式测温仪等检测仪表，用以实时检测钢板的温度、位置，提供给基础自动化和过程机使用。

7.2 产品尺寸规格与钢种

产品规格为：

- 钢板厚度：6~50mm
- 钢板宽度：1500~3200mm
- 钢板长度：Max 36000mm
- 成品板单重：Max 10.6 吨

产品大纲见表 7.1。

图 7.1 是首钢中厚板厂正在运行中的控制冷却系统。

7.1.2 控制冷却系统的基本参数

控制冷却系统的重要参数如下：

冷却装置尺寸：3200 mm × 28000 mm

冷却钢板尺寸：(6~50) mm × (1500~3200) mm × max36000mm

冷却速度范围：1.5—50℃/s；对于>20mm 厚钢板，冷却速度最大为 20℃/s

控制冷却开始温度：930℃~750℃

控制冷却终冷温度：650℃~500℃

控制阀组：上下各 28 组（每个集管配有单独的控制阀组）

辊道间距：1.0 m

冷却水最大瞬时水量：8000m³/h

系统供水能力：4000 m³/h

上下水量比：1：1.5~3

冷却水温度：≤38℃

辊道速度范围：0.2~2.5m/s

阀门响应时间：≤2s，响应时间差小于 0.2s

高位水箱容积：150m³

高位水箱高度：12m

水量调节范围：最大水量的 40~100%

另外，控冷线上配红外有测温仪、热金属检测器、扫描式测温仪等检测仪表，用以实时检测钢板的温度、位置，提供给基础自动化和过程机使用。

7.2 产品尺寸规格与钢种

产品规格为：

- 钢板厚度：6~50mm
- 钢板宽度：1500~3200mm
- 钢板长度：Max 36000mm
- 成品板单重：Max 10.6 吨

产品大纲见表 7.1。

表 7.1 产品大纲
Table.7.1 Product scheme

序号	产品品种	代表钢种	产品规格
1	造船用钢板	A,B,D,AH32,AH36,DH32,DH36	8~40×1500~3200×25000~36000
2	管线用钢板	X60,X65,X70	8~25×1500~3200×25000~36000
3	汽车大梁板	09SiVL,16MnL,16MnREL	8~12×1500~3200×25000~36000
4	桥梁板	16q,Q235q,16Mnq,15MnVq	8~40×1500~3200×25000~36000
5	锅炉板	16Mng,22g,20g,15MnVg	8~40×1500~3200×25000~36000
6	压力容器板	16MnR,15MnVR,20R	8~40×1500~3200×25000~36000
7	机械工程用板	KQ450,HJ58	8~40×1500~3200×25000~36000
8	Z 向板	Z15,Z25	8~40×1500~3200×25000~36000
9	普碳钢板	Q235A,Q235B,Q235C,Q235D	6~50×1500~3200×25000~36000
10	低合金钢板	Q345A,Q345B,Q345C,Q345D,Q345E, Q390A,Q390B,Q390C,Q390D,Q390E	6~50×1500~3200×25000~36000

7.3 典型钢种的控冷规程

控冷过程机能够根据设备的健康状态、轧件的 PDI 参数、在线实测数据以及控制冷却目标，由过程控制模型自动计算给定控冷规程，并对冷却规程进行修正和自学习，典型的控冷规程参见表 7.2。

表 7.2 典型控冷规程
Table.7.2 The typical cooling schedule

序号	钢种	成品尺寸 mm	开冷 温度 ℃	终冷 温度 ℃	冷却 速度 ℃/s	水 位 m	水温 ℃	集管开闭状态 (1—开, 0—关)	通板 速度 m/s	加速 度 m/s ²	水量比 (大/小集 管)	上集管 流量 (m ³ /h) (大/小)	下级管 流量 (m ³ /h) (大/小)
1	Q345D	10×2660	930	500	30	2.2	22.3	10101010111111 10000000000000	1.5	0.0100	2.45/2.20	95.00/ 70.00	232.75/ 154.00
2	Q345D	10×2660	750	650	30	2.2	22.3	00000000010101 00000000000000	1.5	0.0100	2.45/2.20	102.68/ 77.68	251.57/ 170.90
3	Q345D	20×2660	930	500	20	2.2	22.3	10101010111111 11111100000000	1.0	0.0080	2.50/2.25	101.92/ 81.92	254.80/ 184.32
4	Q345D	20×2660	750	650	20	2.2	22.3	10100000011000 00000000000000	1.0	0.0080	2.50/2.25	100.00/ 80.00	250.00/ 180.00
5	Q345D	40×2660	930	500	10	2.2	22.3	11111111111111 11111111000000	0.8	0.0040	2.65/2.30	111.92/ 81.92	296.59/ 188.42
6	Q345D	40×2660	750	650	20	2.2	22.3	10000000011011 01000000000000	0.8	0.0040	2.65/2.30	110.00/ 80.00	291.50/ 184.00

控冷过程机根据轧件的钢种、厚度、终轧温度及终冷目标温度、冷却速度和水温等参数计算实现冷却目标所需的冷却水流量、冷却时间、钢板通过速度、集管开启组数，并给出保证钢板在各个方向上均匀冷却的控制策略，如边部遮蔽量、水量比、头尾遮蔽量、加速度、间歇方式等，传给一级机执行完成。

表 7.1 产品大纲
Table.7.1 Product scheme

序号	产品品种	代表钢种	产品规格
1	造船用钢板	A,B,D,AH32,AH36,DH32,DH36	8~40×1500~3200×25000~36000
2	管线用钢板	X60,X65,X70	8~25×1500~3200×25000~36000
3	汽车大梁板	09SiVL,16MnL,16MnREL	8~12×1500~3200×25000~36000
4	桥梁板	16q,Q235q,16Mnq,15MnVq	8~40×1500~3200×25000~36000
5	锅炉板	16Mng,22g,20g,15MnVg	8~40×1500~3200×25000~36000
6	压力容器板	16MnR,15MnVR,20R	8~40×1500~3200×25000~36000
7	机械工程用板	KQ450,HJ58	8~40×1500~3200×25000~36000
8	Z 向板	Z15,Z25	8~40×1500~3200×25000~36000
9	普碳钢板	Q235A,Q235B,Q235C,Q235D	6~50×1500~3200×25000~36000
10	低合金钢板	Q345A,Q345B,Q345C,Q345D,Q345E, Q390A,Q390B,Q390C,Q390D,Q390E	6~50×1500~3200×25000~36000

7.3 典型钢种的控冷规程

控冷过程机能够根据设备的健康状态、轧件的 PDI 参数、在线实测数据以及控制冷却目标，由过程控制模型自动计算给定控冷规程，并对冷却规程进行修正和自学习，典型的控冷规程参见表 7.2。

表 7.2 典型控冷规程
Table.7.2 The typical cooling schedule

序号	钢种	成品尺寸 mm	开冷 温度 ℃	终冷 温度 ℃	冷却 速度 ℃/s	水 位 m	水温 ℃	集管开闭状态 (1—开, 0—关)	通板 速度 m/s	加速 度 m/s ²	水量比 (大/小集 管)	上集管 流量 (m ³ /h) (大/小)	下级管 流量 (m ³ /h) (大/小)
1	Q345D	10×2660	930	500	30	2.2	22.3	10101010111111 10000000000000	1.5	0.0100	2.45/2.20	95.00/ 70.00	232.75/ 154.00
2	Q345D	10×2660	750	650	30	2.2	22.3	00000000010101 00000000000000	1.5	0.0100	2.45/2.20	102.68/ 77.68	251.57/ 170.90
3	Q345D	20×2660	930	500	20	2.2	22.3	10101010111111 11111100000000	1.0	0.0080	2.50/2.25	101.92/ 81.92	254.80/ 184.32
4	Q345D	20×2660	750	650	20	2.2	22.3	10100000011000 00000000000000	1.0	0.0080	2.50/2.25	100.00/ 80.00	250.00/ 180.00
5	Q345D	40×2660	930	500	10	2.2	22.3	11111111111111 11111111000000	0.8	0.0040	2.65/2.30	111.92/ 81.92	296.59/ 188.42
6	Q345D	40×2660	750	650	20	2.2	22.3	10000000011011 01000000000000	0.8	0.0040	2.65/2.30	110.00/ 80.00	291.50/ 184.00

控冷过程机根据轧件的钢种、厚度、终轧温度及终冷目标温度、冷却速度和水温等参数计算实现冷却目标所需的冷却水流量、冷却时间、钢板通过速度、集管开启组数，并给出保证钢板在各个方向上均匀冷却的控制策略，如边部遮蔽量、水量比、头尾遮蔽量、加速度、间歇方式等，传给一级机执行完成。

7.4 控制冷却过程模型的在线应用效果

7.4.1 控冷性能指标

系统的性能指标和终冷温度偏差、同板温差、异板温差均达到或超过了设计指标，具体见表 7.3 和表 7.4。

表 7.3 设计性能指标和实测的性能指标对比
Table 7.3 Comparison of design and measure

序号	项目	设计性能指标	实测性能指标
1	同板温差 σ , $^{\circ}\text{C}$	≤ 20	≤ 20
2	同板差命中率, %	≤ 20	≤ 20
3	异板温差 σ , $^{\circ}\text{C}$	$\leq 25^{\circ}\text{C}$	$\leq 25^{\circ}\text{C}$
4	冷却装置噪声	≤ 60 分贝	≤ 60 分贝
5	阀门响应时间	$\leq 2\text{s}$	$\leq 2\text{s}$
6	响应时间差	$< 0.2\text{s}$	$< 0.2\text{s}$
7	过程机执行周期, ms	30-100	30-100
8	终冷温度控制精度	$\pm 20^{\circ}\text{C}$ 占 95%	$\pm 20^{\circ}\text{C}$ 占 98%
9	一次性能合格率	$> 99.5\%$	$> 99.5\%$
10	系统的计算机、PLC 投入运行率	$\geq 99.9\%$	$\geq 99.9\%$

表 7.4 终冷温度数据
Fig. 7.4 Data for finishing cooling temperature

序号	钢种	厚度 mm	开冷温度 $^{\circ}\text{C}$	设定终冷 温度 $^{\circ}\text{C}$	平均终冷 温度 $^{\circ}\text{C}$	终冷温度 偏差 $^{\circ}\text{C}$	同板温差 合格率%	异板温差 合格率%
1	Q235B	20	790.67	672.00	679.31	+7.32	1.000	1.00
2			833.57	672.00	670.23	-1.77	1.000	1.00
3			817.62	672.00	676.16	+4.16	1.000	1.00
4		40	837.63	650.00	652.60	+2.60	1.000	1.00
5			840.23	650.00	658.82	+8.82	0.960	1.00
6			820.23	650.00	642.06	-7.94	0.980	1.00
7	Q345B	20	865.45	666.00	662.07	-3.93	1.000	1.00
8			911.25	666.00	659.22	-6.78	0.970	1.00
9			814.09	666.00	676.60	+10.60	0.988	1.00
10		40	834.44	655.00	655.53	+0.53	1.000	1.00
11			845.74	655.00	664.83	+9.83	0.976	1.00
12			840.23	655.00	646.78	-8.22	0.986	1.00

7.4.2 终冷温度目标的控制精度

前述几章详细论述了控制冷却模型的建立和程序设计，这些模型和控制冷却策略在现场投入运行后，控制冷却系统的三大目标：终冷温度、冷却速度和钢板的冷却均匀性都达到的期望的结果，如表 7.4 所示，终冷温度偏差在 10°C 以内，

7.4 控制冷却过程模型的在线应用效果

7.4.1 控冷性能指标

系统的性能指标和终冷温度偏差、同板温差、异板温差均达到或超过了设计指标, 具体见表 7.3 和表 7.4。

表 7.3 设计性能指标和实测的性能指标对比
Table 7.3 Comparison of design and measure

序号	项目	设计性能指标	实测性能指标
1	同板温差 σ , $^{\circ}\text{C}$	≤ 20	≤ 20
2	同板差命中率, %	≤ 20	≤ 20
3	异板温差 σ , $^{\circ}\text{C}$	$\leq 25^{\circ}\text{C}$	$\leq 25^{\circ}\text{C}$
4	冷却装置噪声	≤ 60 分贝	≤ 60 分贝
5	阀门响应时间	$\leq 2\text{s}$	$\leq 2\text{s}$
6	响应时间差	$< 0.2\text{s}$	$< 0.2\text{s}$
7	过程机执行周期, ms	30-100	30-100
8	终冷温度控制精度	$\pm 20^{\circ}\text{C}$ 占 95%	$\pm 20^{\circ}\text{C}$ 占 98%
9	一次性能合格率	$> 99.5\%$	$> 99.5\%$
10	系统的计算机、PLC 投入运行率	$\geq 99.9\%$	$\geq 99.9\%$

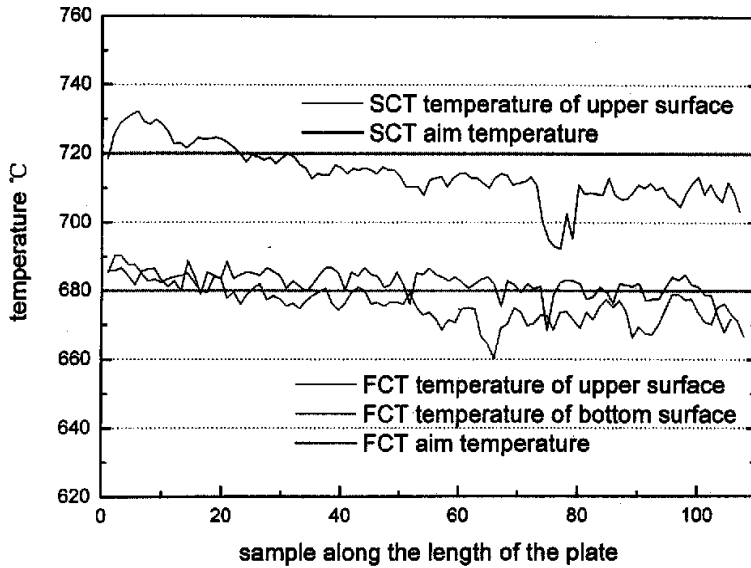
表 7.4 终冷温度数据
Fig. 7.4 Data for finishing cooling temperature

序号	钢种	厚度 mm	开冷温度 $^{\circ}\text{C}$	设定终冷 温度 $^{\circ}\text{C}$	平均终冷 温度 $^{\circ}\text{C}$	终冷温度 偏差 $^{\circ}\text{C}$	同板温差 合格率%	异板温差 合格率%
1	Q235B	20	790.67	672.00	679.31	+7.32	1.000	1.00
2			833.57	672.00	670.23	-1.77	1.000	1.00
3			817.62	672.00	676.16	+4.16	1.000	1.00
4			837.63	650.00	652.60	+2.60	1.000	1.00
5		40	840.23	650.00	658.82	+8.82	0.960	1.00
6			820.23	650.00	642.06	-7.94	0.980	1.00
7	Q345B	20	865.45	666.00	662.07	-3.93	1.000	1.00
8			911.25	666.00	659.22	-6.78	0.970	1.00
9			814.09	666.00	676.60	+10.60	0.988	1.00
10			834.44	655.00	655.53	+0.53	1.000	1.00
11		40	845.74	655.00	664.83	+9.83	0.976	1.00
12			840.23	655.00	646.78	-8.22	0.986	1.00

7.4.2 终冷温度目标的控制精度

前述几章详细论述了控制冷却模型的建立和程序设计, 这些模型和控制冷却策略在现场投入运行后, 控制冷却系统的三大目标: 终冷温度、冷却速度和钢板的冷却均匀性都达到的期望的结果, 如表 7.4 所示, 终冷温度偏差在 10°C 以内,

组织性能均匀, 各项性能指标都超出了规定要求。图 7.2、7.3、7.4 和 7.5 给出了厚度分别为 10mm、20mm、30mm 和 40mm 的钢板的终冷温度实测值, 可以看出实测值紧紧围绕目标值波动, 偏差小于 20℃。

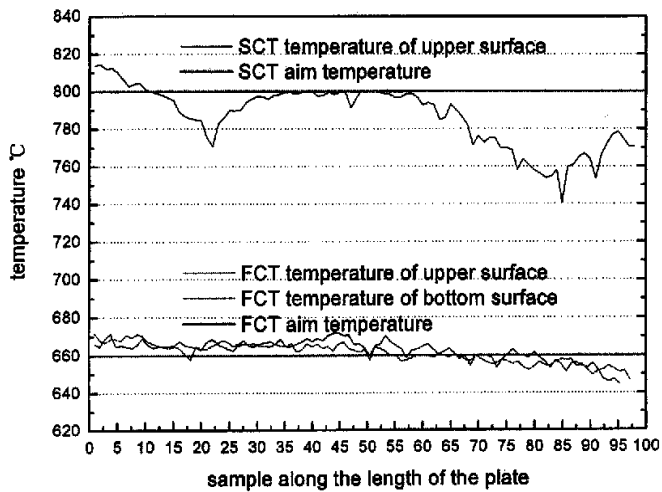


钢种 Q345B, 厚度 10mm, 速度 1.5m/s, 加速度 0.005m/s²

水量 70m³/h (1 组), 水量比 2.1

图 7.2 开冷温度和终冷温度实测值

Fig7.2 Measured start and finishing temperature

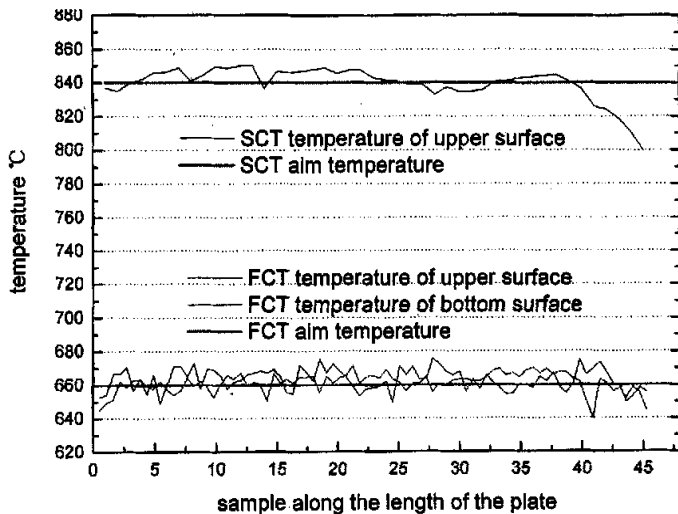


钢种 Q345B, 厚度 20mm, 速度 1.0m/s, 加速度 0.005m/s²

水量 95/75m³/h (1/5 组), 水量比 2.5/2.1

图 7.3 开冷温度和终冷温度实测值

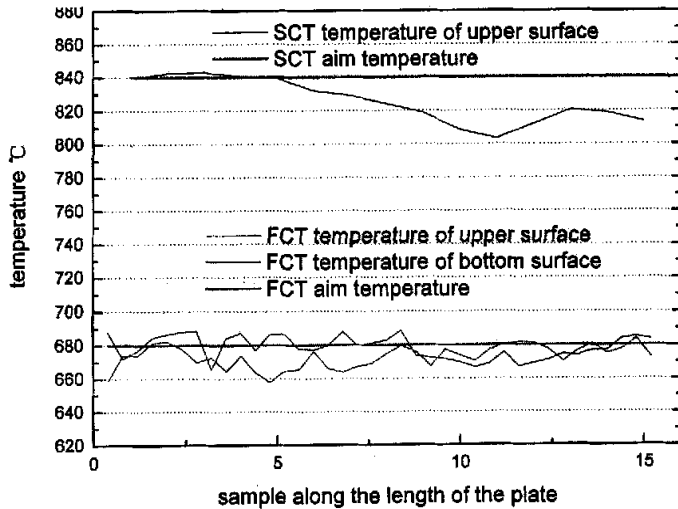
Fig7.3 Measured start and finishing temperature



钢种 Q345B, 厚度 30mm, 速度 1.0m/s, 加速度 0.005m/s^2
水量 95/75m³/h (3/7 组), 水量比 2.5/2.2

图 7.4 开冷温度和终冷温度实测值

Fig7.4 Measured start and finishing temperature



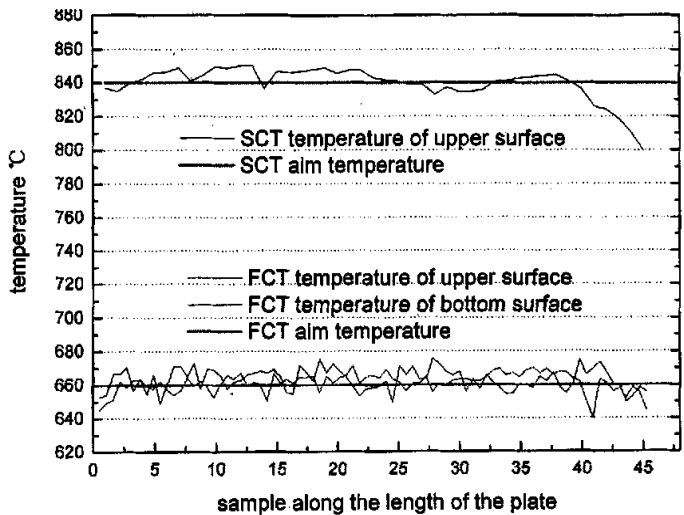
钢种 Q345B, 厚度 50mm, 速度 1.0m/s, 加速度 0.005m/s^2
水量 120/90m³/h (6/4 组), 水量比 2.6/2.0

图 7.5 开冷温度和终冷温度实测值

Fig7.5 Measured start and finishing temperature

7.4.3 产品质量分析

表 7.5、7.6、和 7.7 列出了 Q345、Q460、船板的测试统计结果, 其性能指标

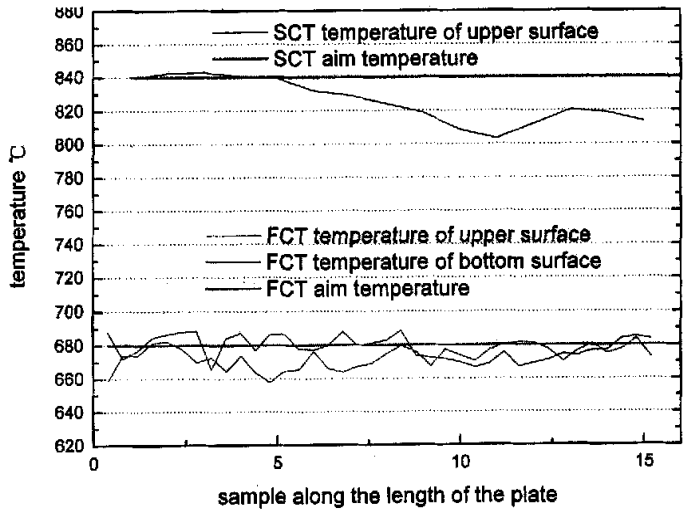


钢种 Q345B, 厚度 30mm, 速度 1.0m/s, 加速度 0.005m/s^2

水量 95/75m³/h (3/7 组), 水量比 2.5/2.2

图 7.4 开冷温度和终冷温度实测值

Fig7.4 Measured start and finishing temperature



钢种 Q345B, 厚度 50mm, 速度 1.0m/s, 加速度 0.005m/s^2

水量 120/90m³/h (6/4 组), 水量比 2.6/2.0

图 7.5 开冷温度和终冷温度实测值

Fig7.5 Measured start and finishing temperature

7.4.3 产品质量分析

表 7.5、7.6、和 7.7 列出了 Q345、Q460、船板的测试统计结果, 其性能指标

均达到或超过规定要求。

表 7.5 Q345 的测试统计结果
Table7.5 Performance data for Q345

钢种	钢板厚度		屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	伸长率%	冲击 (0 度, J)	
Q345C	≤16	国标	345	470~630	22	34	
		平均值	381	532	28	144	
		富余量	36	62	6	110	
	>16~≤35	国标	325	470~630	22	34	
		平均值	379	526	26	147	
		富余量	54	56	4	113	
	>35~≤50	国标	295	470~630	22	34	
		平均值	370	530	29	150	
		富余量	75	60	7	116	
	>50~≤100	国标	275	470~630	22	34	
		平均值	365	525	27	138	
		富余量	90	55	5	104	
Q345D	≤16	国标	345	470~630	22	34	
		平均值	380	534	28	119	
		富余量	35	64	6	85	
	>16~≤35	国标	325	470~630	22	34	
		平均值	383	537	26	123	
		富余量	58	67	4	89	
	>35~≤50	国标	295	470~630	22	34	
		平均值	365	532	29	114	
		富余量	70	62	7	80	
	Q345E	≤16	国标	345	470~630	22	27
			平均值	379	538	28	71
			富余量	34	68	6	44
>16~≤35		国标	325	470~630	22	27	
		平均值	374	525	27	89	
		富余量	49	55	5	62	

表 7.6 Q460 的测试统计结果
Table7.6 Performance data for Q460

钢种	钢板厚度 mm	屈服强度 MPa		抗拉强度 MPa	伸长率%	冲击 (0 度, J)
Q460C	≤16	国标	460	550~720	17	34
		平均值	501	630	21	96
		富余量	41	80	4	62
	>16~≤35	国标	440	550~720	17	34
		平均值	475.7	620	20.1	93.7
		富余量	35.7	70	3.1	59.7

表 7.7 船板的测试统计结果
Table7.7 Performance data for ship plat

钢种	钢板厚度 mm		屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	伸长率%	冲击 (0 度, J)
A	6~50	国标	235	400~520	22	--
		平均值	316	464	32	
		富余量	82	64	9.7	
B	6~50	国标	235	400~520	22	27
		平均值	324	467	32	156
		富余量	89	67	10	129
D	6~50	国标	235	400~520	22	27
		平均值	343	478	30	148
		富余量	108	78	8	121
A32	6~50	国标	315	440~570	22	31
		平均值	378	520	28	176
		富余量	63	80	6	145
D32	6~50	国标	315	440~570	22	31
		平均值	377	513	29	185
		富余量	62	73	7	154
A36	6~50	国标	355	490~630	21	34
		平均值	422	553	27	200
		富余量	67	63	6	166

注：A、B、D、A32、A36 的冲击试验温度为 0℃；D32、D36 的冲击试验温度为-20℃。

7.5 本章小结

(1) 我们开发的中厚板控制冷却系统模型在首钢中厚板轧钢厂应用以来，设备运行良好，模型精度较高，实测钢板的平均终冷温度控制在±20℃的点数达 95%以上，水冷后的钢板，板形良好，成品钢板每米不平度均小于 4mm，钢板平直度良好。

(2) 通过冷却工艺的合理制定和采用均匀冷却控制策略，钢板的屈服强度较原有的工艺提高了 30%以上，强韧性提高了 20%以上，钢材的质量有了大幅度提高，均达到或超过了合同中规定的要求。

表 7.7 船板的测试统计结果
Table7.7 Performance data for ship plat

钢种	钢板厚度 mm		屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	伸长率%	冲击 (0 度, J)
A	6~50	国标	235	400~520	22	--
		平均值	316	464	32	
		富余量	82	64	9.7	
B	6~50	国标	235	400~520	22	27
		平均值	324	467	32	156
		富余量	89	67	10	129
D	6~50	国标	235	400~520	22	27
		平均值	343	478	30	148
		富余量	108	78	8	121
A32	6~50	国标	315	440~570	22	31
		平均值	378	520	28	176
		富余量	63	80	6	145
D32	6~50	国标	315	440~570	22	31
		平均值	377	513	29	185
		富余量	62	73	7	154
A36	6~50	国标	355	490~630	21	34
		平均值	422	553	27	200
		富余量	67	63	6	166

注：A、B、D、A32、A36 的冲击试验温度为 0℃；D32、D36 的冲击试验温度为-20℃。

7.5 本章小结

(1) 我们开发的中厚板控制冷却系统模型在首钢中厚板轧钢厂应用以来，设备运行良好，模型精度较高，实测钢板的平均终冷温度控制在±20℃的点数达 95%以上，水冷后的钢板，板形良好，成品钢板每米不平度均小于 4mm，钢板平直度良好。

(2) 通过冷却工艺的合理制定和采用均匀冷却控制策略，钢板的屈服强度较原有的工艺提高了 30%以上，强韧性提高了 20%以上，钢材的质量有了大幅度提高，均达到或超过了合同中规定的要求。

第8章 结 论

本文依托于国家经贸委“十五”国家重大技术装备研制项目“首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”，以首钢 3500mm 中厚板轧机的建设为背景，以中厚板厂的控制冷却过程系统为研究对象，在比较和分析国内外控制冷却模型的基础上，根据控制冷却过程的传热理论建立了以有限差分法为基础的控制冷却数学模型，分析了热物性系数的变化规律，为保证温度均匀控制提出相应的控制策略，并把研究成果应用到实际生产中。自投产以来，该系统运行稳定、可靠，控制精度高，产品性能有了显著提高。主要结论如下：

(1) 以首钢中厚板厂为背景，通过研究钢板的冷却过程，构建了中厚板控制冷却过程的数学模型框架。该系统是国内中厚板控制冷却领域完全依靠自己力量建立的比较完整的控冷过程机模型设定系统，具备实时状态下完成模型设定计算、修正计算、自学习计算、过程跟踪等重要功能，为今后中厚板控制冷却系统的模型设计奠定了基础。

(2) 采用分析解法推导出钢板冷却过程的一维非稳态温度场的精确解，从分析结果上得到钢板厚度上温度分布的特点是：当 Bi 较大时，钢板表面的温度迅速接近介质温度，而后渐变，钢板内部各点的温度响应是不同的；当 Bi 较小时，钢板内部各点的温度响应都是一个渐变过程，而且过程彼此接近；采用六点差分格式建立了中厚板控制冷却的二维差分方程，该方程截断误差小且无条件稳定。

(3) 在试验数据的基础上，建立了空冷和水冷换热系数模型。通过实测空冷温降数据反推出黑度系数在 0.7~0.85 之间时，空冷温降计算值与实测值偏差甚小。由差分方法和根据 Stefan-boltzman 定律计算得到的钢板平均空冷温降偏差小于 5℃。从差分模拟结果中得到空冷时钢板厚度方向上的温度梯度随厚度的增加而变大；返红时，钢板越薄，返红时间越短，表面温度上升的速率越大，中心和厚度上平均冷却速率越大。由差分模拟计算方法得到：水流量增加，换热系数增大，但不成线性关系，而是有一极限值；钢板温度增加，水冷换热系数减小，但在不同的温度区间其值大小相差甚远；换热系数随水温升高而变小，但水温的变化对换热系数的影响很小。

(4) 考虑温度和钢种对冷却过程温度变化的影响，以插值法建立比热和热传导率的权重系数模型，该模型以温度和含碳量作为自变量。在此基础上，用有限差分法模拟钢板厚度上的温度分布，得到厚度上温度分布的抛物线曲线，其规律

是含碳量越高, 温度越易于传递, 由表及里温度下降越快; 导热系数越大, 热量越容易传导, 内部的温度差别较小; 比热系数越小, 内部温度传递得越容易; 水量越大, 厚度上温度梯度越大; 换热系数越大, 表面和内部的温差越大。该分析结果为轧件厚度上的温度均匀控制提供理论依据。

(5) 针对中厚板冷却过程中宽度上温度分布不均, 建立了边部遮蔽模型, 并于国内首次实现了边部凸度遮蔽的在线应用; 针对中厚板冷却过程中厚度上的温度分布特点, 于国内首次提出并实现了大集管—小集管—大集管的排列方式, 该方式不仅可以满足冷却速度的要求, 而且能够降低钢板厚度上的温度梯度; 针对中厚板冷却过程中长度方向上存在局部温度波动和头尾低温段, 在控制上实施了分段微跟踪方法; 针对钢板中部的温度梯度, 建立了加速度模型。

(6) 成功地完成了国家经贸委“十五”国家重大技术装备研制项目“首钢3500mm中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制”之“中厚板轧机过程控制模型与人工智能研究控制”课题规定的任务, 建立了具有我国自主知识产权的成套中厚板轧机控制冷却系统的模型和软件, 首次实现了中厚板控制冷却过程的全自动控制。所开发的中厚板控制冷却过程模型和软件已成功应用于首钢中厚板厂和南钢中厚板厂, 自投入在线应用以来, 程序控制稳定, 设备运行良好, 同板温差合格率在98%以上, 异板温差合格率在100%, 产品的各项性能指标均达到或超过规定的指标。

参考文献

- [1] 小指军夫. 制御压延制御冷却[M]. 北京: 地人书馆, 1997:30.
- [2] 王有铭, 李曼云, 韦光编. 钢材的控制轧制和控制冷却[M], 冶金工业出版社, 北京, 1995.
- [3] 刘玉珍, 王秋林, 冯旻. 应用控轧控冷技术通过产品性能合格率[C], 中厚板年后论文集, 2000:256-158.
- [4] 汪祥能, 丁修坤. 现代带钢连轧机控制[M], 东北大学出版社, 1996.
- [5] 冯光存. 控轧控冷技术的发展与现状[J], 四川冶金, 1996, (1): 73-75.
- [6] 陈健就, 贺达伦. 现代化宽厚板厂控制轧制和控制冷却技术[J], 宝钢技术, 1992, (2):10-16.
- [7] 日本钢铁协会共同研究会, わが国における厚板製造技術の進歩[M], 第二版, 东京:日本钢铁协会, 1984:209.
- [8] 孙本荣, 王有铭, 陈瑛. 中厚板生产[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993.
- [9] Baender Bleche Rohre. Andreas Lederer. Therm on mechanical rolling of plates[J], 1982, 23(6): 49.
- [10] 桥木宝, 等. 制御压延技術の展開[J], 鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会, 1980: 51-56.
- [11] 山塚正志, 福田敬尔. 高温鋼材水冷時の冷却能力にばす及水温の影響[J], 鉄と鋼, 1989, 75(7): 86-93.
- [12] 齐藤良行. 川崎制鉄技報[J]. 1989, 21(3): 195-201.
- [13] 钱振声, 姜成木. 鞍钢新建厚板生产线设置加速冷却装置的探讨[J], 钢铁, 1991, 26(1): 28-33.
- [14] 高丽霞, 冯玉平, 赵杰封. 板带材生产中的控制冷却技术[J], 安阳师范学院学报, 2000, (4):26-27.
- [15] 马占华等. 酒钢中厚板厂的控制轧制和控制冷却[J], 钢铁, 1999, 31(7): 35-37.
- [16] Construction and start-up of the Nakayama hot strip and plate mill[J], copying from 1998 Association of Iron and Steel Engineers.
- [17] 中国金属学会热轧板带学术委员会. 中国热轧宽带钢轧机及生产技术[M], 2002, 北京, 冶金工业出版社.

- [18] 于世果, 李宏图, 国外厚板轧机及轧制技术的发展(一)[J], 轧钢, 1999, 5: 43-46.
- [19] Wandrei C L. Review of hot rolling Lubricant technology for Steel[J]. Inland Steel Company.
- [20] Barzan D. The use and performance of high speed steel rolling at Inland's 80 inch strip mill[J]. Inland Steel Company.
- [21] Petre L T. Hot strip mill roll bite lubrication[J]. New Zealand Steel.
- [22] Han Shizhong, Bu Chunxia, Zhao Yu. Existence of solution to transpiration cooling control problem[J], System science and systems engineering, 1996, 5(2): 250-256.
- [23] 常崇民. 气雾式在线冷却装置在厚板轧机上的应用[J], 轧钢, 1997 (6): 45-47.
- [24] 神户钢铁技报[J], 1988, 1: 71-74.
- [25] 张广纯等编著. 金属材料的超声波探伤[M]. 北京: 北京气象学院印刷厂, 1998.
- [26] Kazuhiro Yahiro, et al. Development of cooling temperature control system on hot strip mill[J]. In: Kawasaki Steel Technical Report. 1991, (24)187-192.
- [27] 秦国庆, 李兆铨, 王勇. 钢板水冷条件下的温度场分布, 河北冶金, 1999, (1): 18-20.
- [28] 卢仁军, 缪重庆. 层流冷却控制系统在热连轧线上的应用[J], 鞍钢技术, 1998, (6): 22-25.
- [29] 赵其德. 带钢层流冷却装置[A], 一重技术(宝钢热连轧机专辑 II)[C], 1995, (3): 95-100.
- [30] Kohring, F.C.. Waterwall water-cooling system[J], Iron and steel engineer, 1985, 11(5): 30-36.
- [31] Moffat, R.W., Moore, M.J., Ashton, J.D.. Computer control of hot strip coiling temperature with variable flow laminar sprays[J], Iron and steel engineer, 1985, 11: 21-28.
- [32] 日本鐵鋼協會. 鋼材の強制冷卻, 熱經濟技術部会鋼材強制冷卻小委員會編, 1978, (16): 93.
- [33] 吴孝娟. 热轧带钢控制冷却技术概况[J], 鞍钢技术, 1992, (9): 1-6.
- [34] 范晓明, 热轧带钢卷取温度的智能控制[D], 博士论文, 沈阳东北大学, 2000.
- [35] 王占学. 控轧控冷与控制冷却[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [36] 刘峰. 钢材的冷却技术(一)[J]. 轧钢, 1995, 6: 49-53.

- [37] 刘峰. 钢材的冷却技术(二)[J], 轧钢, 1996, (1): 39-41.
- [38] 丁修坤. 轧制过程自动化[M], 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [39] 神户制钢技报[J]. 135(4).
- [40] 法国 Bertin & Cie 公司提供, Accelerated cooling of plate by water-air spraying[J]. Steel Times, 1991, 11: 617-623.
- [41] B.W.Maxfield and C.M.Fortunko. The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs)[J], Materials Evaluation, 1983, 14,(11): 1399-1408.
- [42] D.Auzinger. Recent development in process optimization for laminar cooling in hot strip mills, Ironmaking and Steelmaking[J],1996, 23(1): 84-87.
- [43] 杨卫东, 刘杰. 带钢热连轧卷取温度控制与改进算法[J], 钢铁, 1997, 32(2), 38-42.
- [44] D.Filev, P.Angelow. Fuzzy optimal control[J]. Fuzzy Sets and Systems. Holland, 1992, 56(47): 151-156.
- [45] J.Y.Jung, Y.Taek-Im, L.Kwang. Development of fuzzy control algorithm for shape control in cold rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, (48): 187-195.
- [46] L.Henrich, R.Holz and G.Kneppe. Physically based cooling line model to meet growing demands in temperature and flexibility[J], Ironmaking and Steelmaking, 1996, 23(1): 79-81.
- [47] D.Auzinger, F.Parzer and G.Posch. Process optimization for laminar cooling.[J] MPT International 1996, (5), 68-70.
- [48] Luinenburg A W, Onink M, Ritman V A. New physical on-line model for coiling temperature control[A]. Proceedings of The 7th International Conference on Steel Rolling(STEEL ROLLING'98)[C], Chiba, Japan, The Iron and Steel Institute of Japan, 1998,87-92.
- [49] Lawrence W J, MacAlister A F, Reeve P J. On line modeling and control of strip cooling[J]. Ironmaking and Steelmaking,1996,23(2):74-78.
- [50] Auman P M, Griffiths D K, Hill D R. Hot strip mill runout table temperature control[J]. Iron and Steel Engineer, 1967, (9):174-179.
- [51] K.Yahiro, J.Yamasaki, M.Furukawa, et al.. Development of coiling temperature control system on hot strip mill[J], Kawasaki Steel Technical Report, 1991, 24(4): 32.
- [52] M. R. Pais, L. C. Chow, E. T. Mahefkey. Surface roughness and its effects on the heat transfer mechanism in spray cooling[J], ASME International of Heat Transfer, 1992, 114(4): 211.

- [53] 吴毅平. 宝钢热轧层流冷却卷取温度控制的改进[J], 冶金自动化, 1997, (1): 15-17.
- [54] 李兴田, 许武景. 一种新型带钢层流冷却控制系统[J], 轧钢, 1996, (5): 28-30.
- [55] J.F.Evans, L.D.Roebuck, H.R.Watkins. Numerical modeling of hot strip mill runout table cooling[J], Iron and Steel Engineer, 1993, (1): 50.
- [56] N.Hatta, Y.Yanaka, H.yakuda, et al.. Numerical study on cooling process of hot steel plates by a water curtain[J], ISIJ Int, 1989, 29(8): 673.
- [57] 杨节. 轧制过程数学模型[M], 冶金工业出版社, 1993.
- [58] 韩尧坤, 王春明, 现代热轧板带生产技术[M], 沈阳, 东北大学出版社, 1993, 3.
- [59] Sepe.Rep.Cooling of Steel products[J], ISIJ,1978, (29): 897-579.
- [60] Chen, S.J., Biswas, S.K., Han, L.F., Satyanarayana, A.. Modeling and analysis of controlled cooling for hot moving metal plates[J], Monitoring and control for manufacturing processes, American society of mechanical engineers, New York, 1990, 44(6): 465-473.
- [61] Guo, R.M.. Heat transfer of acceleration steel strip using laminar flow cooling[C], proceedings of 10th process technology division conferences, Toronto, Ontario, Canada, 1992: 435-445.
- [62] Guo, R.M.. Development, identification and application of a nonlinear model for non-symmetric runout table cooling[C], American institute of steel engineers annual conference record, Pittsburgh, PA, 1991.
- [63] Aatyanarayana, A.. Dynamic modeling and control of accelerated cooling processes[M], Masters thesis, Department of mechanical engineering, temple University, Philadelphia, 1994.
- [64] Yousuff, A., Chang, B.C., Kwantny, H., Patel, N., Fasolo, P., and Dias, I.. Run-out table cooling control, presented at the application of modern control in metal industry seminar[C], April 24-25, Dearborn, MI, American institute of steel engineers, 1991.
- [65] J.Horsky, M.Raudensky, P.Kotrbackek. Experimental study of long product coolig in hot rolling[J], Journal of materials processing technology, 1998(80-81): 337-340.
- [66] Yong-Zai Lu. Meeting the challenge of intelligent system technologies in the iron and steel industry, Iron and Steel Engineer, 1996, (9): 139-149.
- [67] 蔡晓辉, 热轧带钢卷取温度控制的优化[D], 东北大学硕士学位论文, 2001.
- [68] 蔡正, 王国栋, 刘相华等. 层流冷却带钢温度分布模型的开发[J], 钢铁,

- 1998, (8): 31-35.
- [69] 吴彬, 陈海梗. 黄金学报, 2001, 3(4): 259-62.
- [70] 张中平. 攀钢热轧板厂层流冷却数学模型简介[J], 钢铁钒钛, 1996, 17(4): 71-74.
- [71] 左军. 攀钢热轧厂层流冷却系统改造设想[J], 四川冶金, 2001(5):23-28.
- [72] 刘玠, 孙一康. 带钢热连轧计算机控制[M], 机械工业出版社, 1997.
- [73] J. Fillpovic, Raymond Viskanta, F.P. Incropera and T.A. Veslocki, Thermal Behaviour of a Moving Steel Strip Cooled by an Array of Planar Water Jets[J], Steel Research, 1992, 63(10): 438-446.
- [74] Andrzej G. Groch, Robert Gubermat, Emmanuel R. Birstein, Automatic Control of Laminar Flow Cooling in Continuous and Reversing Hot Strip Mills[J], Iron and Steel Engineer, September 1990, (12): 16-20.
- [75] 俞昌明. 热传导及其数值分析[M], 清华大学出版社, 1981, 北京.
- [76] W.TRINKS. Cold rolling of sheets and tinplates[J], Blast furnace & Steel plant, 1993(21): 315.
- [77] H.FORD. Researches into the deformation of metals by cold rolling[J], Proc. Inst. Mech. Eng., 1948(159): 115.
- [78] R.HILL. The mathematical theory of plasticity[M], Oxford Univ.Press,1950.
- [79] 志田茂. 炭素鋼の熱間變形抵抗[J], 第 1 報, 塑性と加工, 1968, (9): 127, 第 2 報, 1969(10): 610, 第 3 報, 1971(12):41.
- [80] S.EKELUND. Analysis of factors influencing rolling of steel[J], Steel, 1993, Aug. (93): 27.
- [81] W.TRINKS. Roll pressures in hot rolling, Blast F'ce & Steel Plant[J], 1937 (25):1005.
- [82] 韦光, 董希满, 王进民. 水幕冷却高温钢板对流换热系数的研究[J], 钢铁, 1994, 29(1):22-26.
- [83] 董希满, 水幕冷却下中厚板温度场的研究与应用[D], 北京科技大学硕士论文, 1992.
- [84] A.W.Luinenburg, M.Onink, V.A.Ritman, New physical on-line model for coiling temperature control[C], Proceedings of The 7th International Conference on Steel Rolling(STEEL ROLLING'98) , 1998, Chiba, Japan, The Iron and Steel Institute of Japan, 87-92.
- [85] 秦国庆, 雄晓明. 钢板水幕冷却的分析[J], 钢铁研究学报, 2000, 12(1): 63-66.
- [86] 余驰斌, 梁伟刚. 热连轧带钢水幕冷却控制设计的研究[J], 钢铁, 1993,

- 28(1):37-40.
- [87] 秦国庆, 韩静涛. 水幕冷却系统浅析[J], 钢铁研究, 1995, (3): 20-23.
- [88] 铃木桂一, 钢と铁, 1976, 49-52.
- [89] 钱振声, 鞍钢半连轧厂层流冷却系统浅析[J], 鞍钢技术, 1996, (12):24-30.
- [90] 日本钢铁协会编, 王国栋、吴国良等译. 板带轧制理论与实践[M], 中国铁道出版社, 1990, 北京.
- [91] 雄野正晴ほか, 神戸制钢技报, 1986, 36(3):47-49.
- [92] 刘峰. 轧后冷却制度对钢板厚度方向组织的影响[J]. 钢铁, 1990, 25(6): 42.
- [93] 孙未华, 王国栋, 吴国良. 带钢热轧过程中轧件横断面上温度场的解析[J], 山东冶金, 1994, 16(4):30-34.
- [94] 吉原直武, 藤挂政久. 控制冷却过程中钢板翘曲分析[J], 鞍钢技术, 1998(10): 49-53.
- [95] 吴立章. 现代宽厚板厂的工艺装备[J], 宝钢技术, 1999(1):22-27.

攻读博士学位期间的工作

撰写的论文

- (1) 蔡晓辉, 张殿华, 王国栋. 热流密度系数的优化, *中国钢铁年会论文集*, 中国, 2001: 591-593.
- (2) 蔡晓辉, 时旭, 张殿华. 控制冷却方式和设备的发展, *钢铁研究学报*, 2001, 13(6): 56-60.
- (3) 蔡晓辉, 张殿华, 王国栋. 层流冷却中卷取温度精度的优化, *东北大学学报(自然科学版)*, 2002, 23(4): 367-370.
- (4) 蔡晓辉, 龚彩军, 魏士政. 中厚板加速冷却的控制策略, *轧钢会议*, 2002, 678-679.
- (5) 蔡晓辉, 张殿华, 张中平等. 热轧带钢层流冷却系统的数学模型, *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(2): 155-158.
- (6) Cai Xiao-hui, Zhan Dian-hua, Wang Duo-dong etc. Soft-Sensing Method of Water Temperature Measuring for Control Cooling System, *钢铁研究学报英文版*, 2003, 10(4): 71-74.
- (7) 蔡晓辉, 张殿华, 龚彩军等. 中厚板加速冷却过程的控制, *轧钢*, 2003, 20(5): 1-3.
- (8) 蔡晓辉, 龚彩军, 谢海波等. 层流冷却系统中动态修正设定计算, *钢铁*, 2004, 39(1): 8-12.
- (9) 蔡晓辉, 张殿华, 王国栋等. 中厚板控制冷却数学模型, *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(10): 923-926.
- (10) 蔡晓辉, 张利. 基于移动互联网的材料加工工程搜索系统, *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(12): 1184-1187.
- (11) Cai Xiao-hui, Luo Zong-an, Wang Guo-dong etc. Optimization of Heat Flux Coefficient on Laminar Cooling Control, *钢铁研究学报英文版*, 2004, 11(1): 26-28.
- (12) Cai Xiao-hui, Zhan Dian-hua, Wang Guo-dong etc. Velocity Control of Strip in Laminar Cool System, *钢铁研究学报英文版*, 2004, 11(2): 34-37.
- (13) 刘太中, 蔡晓辉, 王国栋等. 热连轧带钢精轧自然宽展智能预测, *轧钢*, 2002, 19(2): 6-8.

- (14) 彭良贵, 蔡晓辉, 于明等. 热轧带钢轧机机架间冷却离线模拟计算, *轧钢*, 2004, 21(2): 27-29.
- (15) 刘细芬, 蔡晓辉, 赵德文. 中厚板轧后控制冷却技术的发展概况, *钢铁研究*, 2002, (1):54-57.

参加的科研项目

1. 宝钢 1580 层流冷却系统, 模型参数优化设计。
2. 国家重大技术装备研制项目(科技攻关)计划—首钢 3500 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研究, 中厚板控冷过程机模型设计。
3. 攀钢热连轧控制冷却系统模型设计, 初期参与。
4. 南钢中板厂 2500mm 精轧机液压 AGC 和控轧控冷改造项目, 控冷过程机模型设计。

致 谢

本文的全部研究工作是在导师王国栋教授、刘相华教授的精心指导下完成的。两位导师严谨的治学态度、渊博的专业知识和高尚的人格品质使作者受益非浅。两位导师在学习、工作和生活方面，给予了作者无微不至的关怀、爱护和帮助。在此论文完成之际，首先向导师王国栋教授和刘相华教授致以衷心的感谢。

在学习生活中，张殿华教授给予我热情的指导和关怀；在科研项目完成过程中，王君副教授在理论研究和科研实践方面给予我热情的指导和帮助；王昭东副教授提供了许多宝贵的意见，在此向他们表示诚挚的感谢。

作者十分感谢给予我指导和帮助的李建平高级工程师、牛文勇高级工程师、杨红工程师、胡贤磊老师、李艳梅老师、刘恒利老师；感谢朱伏先教授、吴迪教授、赵德文教授、邸洪双教授、杜林秀副教授在理论研究和科研实践方面给予的指导和帮助；感谢博士研究生矫志杰、于明、龚彩军在科研工作上的密切配合；感谢在现场调研、调试中给予积极配合的首钢首钢中板厂刘树生工程师、李光工程师、陈波工程师、营口流体集团公司张志福工程师、攀钢公司张中平工程师。感谢杨子琴、张颖、李钊、沈馨等老师在日常工作上提供的各种帮助，在此一并表示感谢。

最后谨以此论文献给多年来支持、鼓励我学习和工作的父母、朋友！

作者简介



蔡晓辉，女，1975 生于辽宁省鞍山市，满族。1998 年 7 月毕业于沈阳东北大学金属压力加工专业，获得工学学士学位。同年考入东北大学研究生院塑性成型与自动控制专业，2000 年起在王国栋教授、刘相华教授的指导下攻读材料加工工程专业博士学位。

博士研究生期间主要从事带钢和中厚板控制冷却过程的数学模型研究。2001 年 6 月起作为主要执行人之一参加了首钢中厚板轧钢厂四辊精轧机液压 AGC 及控轧、控冷自动化控制系统工程项目和南钢中板厂四辊轧机 HAGC、控轧控冷工程项目。

博士研究生学习工作期间，2001 年获得东北大学蔡冠深奖学金，2001、2002 年获得东北大学 RAL 一等奖学金。在国内外核心刊物、国际和国内会议上发表论文 10 余篇。