

热轧带钢轧后层流 冷却控制系统

REZHA DAIGANG ZHAHOUCENGLIU LENGQUE KONGZHI XITONG

彭力 李擎 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

热轧带钢轧后层流 冷却控制系统

彭 力 李 擎 编著

北 京
冶金工业出版社
2009

内 容 提 要

本书对连铸连轧后层流冷却控制及带钢卷取温度的控制进行了分析和研究,并就层流冷却系统的工艺背景、带钢卷取温度预测模型、层流冷却控制系统、层流冷却控制算法的设计与实现、控制系统的改进与优化和仿真系统设计及实例分析等内容进行了阐述。

该书可供高等院校金属压力加工、控制理论与控制工程及其相关专业教学使用,也可作为现场工程技术人员在生产实践和技术改造的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热轧带钢轧后层流冷却控制系统/彭力,李擎编著.

—北京:冶金工业出版社,2009.10

ISBN 978-7-5024-5041-0

I. 热… II. ①彭… ②李… III. 热轧—带钢
—冷却系统—系统控制 IV. TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 166926 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 钱文涛 程志宏 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5041-0

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 10 月第 1 版,2009 年 10 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 3.5 印张; 106 千字; 101 页; 1-1000 册

18.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本书在对连铸连轧轧后层流冷却控制及带钢卷取温度控制进行详细分析和研究的基础上,较详细阐述了连铸连轧层流冷却工艺过程、复杂过程建模、控制器设计与实现、计算机仿真、控制效果分析与优化改进等。本书不仅可供高等院校金属压力加工、控制理论与控制工程及其相关专业教学使用,也可作为现场工程技术人员控制实践的参考书。

层流冷却作为控制轧制和控制冷却技术的一个组成部分,直接影响带钢的组织性能,决定产品的最终质量和成材率。所以,对带钢层流冷却过程(包括卷取温度)的控制,已经被视为热轧带钢厂生产过程中非常重要的环节,对它进行全面了解、深入研究和分析具有重大的实际意义。

层流冷却控制的目标是通过建立系统温度模型,不断调整其中的参数及控制算法,最终使控制精度(实测卷取温度与目标卷取温度的差)及命中率(一条带钢中满足精度要求的被控制点数占总点数的百分比)有很大幅度的提高。

本书首先以实际热轧带钢卷取温度控制系统(层流冷却系统)为背景,介绍过程控制所依赖的基础设备,并详细分析基本模型及控制算法,从不同角度作出评价,分析控制理论应用于实际工程中的难点问题,提出一系列的解决对策和方法,并最终得到仿真系统。

计算机仿真技术的飞速发展,为离线研究复杂问题提供了

可靠的、有效的和灵活的工具,同时,也节省了大量在线试验开支,起到事半功倍的效果。本书前几章的内容是对真实现场的分析 and 讨论,故在此基础上设计和编制的仿真系统,能比较真实地模拟实际情况。将仿真结果再返回到现场进行调试时,对原过程控制系统存在的不足做了改进,明显提高了卷取温度的控制精度,取得了很大的经济效益。

本书是作者多年的研究成果,部分工作是作者带学生在现场实践中完成的。本书得到了东北大学徐心和教授、上海宝山钢铁公司袁建光高工和吴毅平高工等高校和企业专家的指导和帮助,在此作者向他们表示感谢。北京科技大学信息工程学院的李擎教授、潘月斗副教授参加了第4章和第5章的编写,其余各章由江南大学彭力教授编写并担任全书的统稿工作。此外,本书还得到了国家自然科学基金(No. 60973095)、江南大学出版基金和“钢铁流程先进控制”教育部重点实验室的支持和资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2009年7月 无锡

目 录

1 层流冷却系统的工艺背景	1
1.1 层流冷却系统的功能	1
1.2 层流冷却系统的工艺要求	2
1.3 层流冷却系统设备配置	3
2 带钢卷取温度预测模型	8
2.1 一阶温度预测模型的导出	8
2.2 由热传导方程导出的二阶基础模型	12
2.2.1 基础模型	12
2.2.2 基于二维热传导方程的温度预测计算模型	13
2.3 关于数学模型问题的讨论	15
2.3.1 对数学模型的基本要求	15
2.3.2 机理模型	16
2.3.3 经验模型	17
2.3.4 混合模型	19
2.3.5 模型中的未知参数问题	21
3 层流冷却控制系统	24
3.1 层流冷却控制系统的目标	24
3.2 过程控制结构框图及主要模块介绍	25
3.2.1 层流冷却控制系统结构框图及总体概述	25
3.2.2 预测模型	26
3.2.3 控制器	26

3.2.4 预测模型的自适应校正	31
3.3 层流冷却计算机控制系统的硬件配置及软件结构 ...	31
3.3.1 硬件配置	31
3.3.2 PCC 主要承担的任务	32
3.3.3 BAC 主要承担的控制任务	33
3.3.4 软件结构	33
4 层流冷却控制算法的设计与实现	45
4.1 前馈控制器的设计	45
4.1.1 前馈控制计算的基本过程	45
4.1.2 前馈控制计算的分析及评价	47
4.2 反馈控制计算的设计及分析	48
4.2.1 反馈控制计算的基本过程	48
4.2.2 反馈控制计算的分析与评价	49
4.3 自适应控制算法设计与分析	50
4.3.1 自适应控制器的设计	50
4.3.2 自校正调节的效果分析	53
4.4 热轧带钢卷取温度模型参数快速神经网络辨识	59
4.4.1 引言	59
4.4.2 快速神经网络模型结构	60
4.4.3 快速神经网络算法	62
4.5 连轧带钢卷取温度神经网络最优预估控制器	63
4.5.1 引言	63
4.5.2 神经网络及控制器结构	63
4.6 神经自适应预估控制算法	64
4.7 神经网络自适应极点配置控制	65
4.7.1 模型推导	65
4.7.2 自适应控制律	65

4.7.3 极点配置算法	66
4.8 模糊预估控制	66
4.8.1 系统设计	67
4.8.2 模糊控制器参数自调整原则	67
4.8.3 参数自调整模糊控制器的设计	68
4.8.4 Smith 补偿器	69
4.8.5 系统仿真及结果分析	70
4.8.6 应用分析	72
4.8.7 结论	73
5 控制系统的改进与优化	74
5.1 现场参数对实测卷取温度的影响	74
5.2 卷取温度控制精度主要影响原因分析	75
5.3 系统优化改进	77
5.4 参数优化	79
5.4.1 粒子群算法	79
5.4.2 层流冷却控制系统优化	81
5.5 在线改进优化效果	84
6 仿真系统设计及实例分析	86
6.1 层流冷却仿真功能及框架	86
6.1.1 仿真系统概述	86
6.1.2 总体框架	89
6.1.3 功能描述	89
6.2 仿真后的结果	91
6.2.1 带钢实测值与带钢仿真计算值比较	91
6.2.2 跟踪点在冷却区任意位置沿厚度方向 的温度曲线	94

6.2.3	跟踪点在冷却区长度方向温降曲线	95
6.2.4	卷取温度计算值与实测值偏差分析曲线	95
6.2.5	小结	96
参考文献		98

1 层流冷却系统的工艺背景

1.1 层流冷却系统的功能

热轧带钢卷取温度是影响成品带钢性能的重要工艺参数之一。不同规格品种的热轧带钢终轧温度一般为 $800 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ，为了使带钢获得良好的组织性能，带钢的卷取温度一般须控制在 $550 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 。图 1-1 给出了层流冷却在连铸连轧中的工作位置。

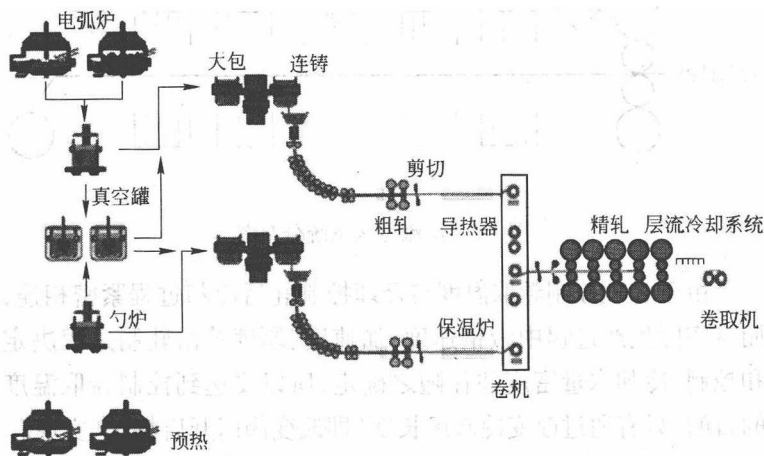


图 1-1 连铸连轧系统的基本配置图

层流冷却的目的，就是通过冷却过程控制带钢的温度，从而使带钢温度从精轧出口的终轧温度冷却到所要求的卷取机卷取温度，以期获得优异组织性能的成品钢卷。通俗地讲，轧钢就如和面，控制温度过高容易粘连，控制温度过低卷取机卷钢就很费力气，即耗电量大。

现场采用层流冷却，即在冷却辊道上下布置两排喷水架，每个

喷水架又有四组阀门控制的喷水管,以均衡的压力和流量分层喷向带钢,如图 1-2 所示。这是近年来广泛采用的热轧带钢冷却装置。

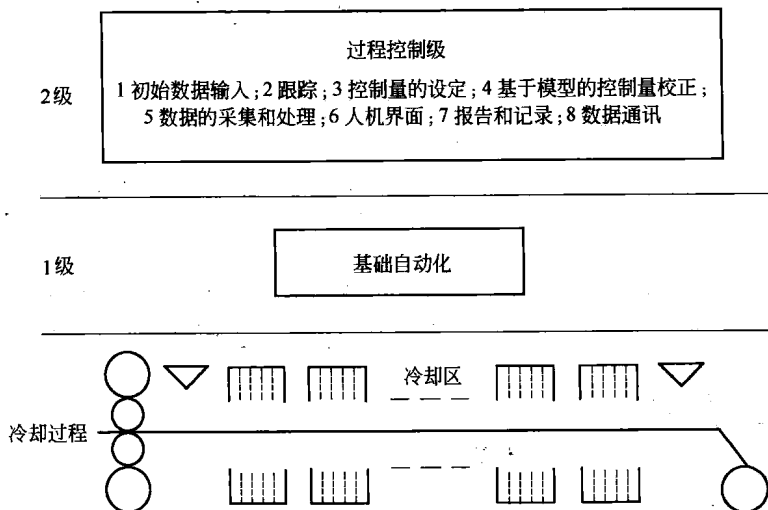


图 1-2 层流冷区系统分布图

由于合理控制卷取温度与合理控制轧后冷却过程紧密相连,而且实际生产过程中带钢速度、加速度、厚度等由轧制过程决定和控制,冷却水量密度往往随之确定,所以要达到控制卷取温度的目的,只有通过改变冷却区长度(即改变阀门开启数)来实现。

国内现场层流冷却系统大多采用国外引进的设备和技术,整个冷却过程采用计算机控制,达到国外 20 世纪 80 年代中期水平。

1.2 层流冷却系统的工艺要求

生产中遇到的大部分冷却对象都属于普碳钢,由于层流冷却对板坯的组织性能有重大影响,所以在带钢卷取温度的控制过程中,需要考虑许多的工艺要求:

(1) 带钢厚度范围为 1.82 ~ 22.88mm,几乎每相隔 1mm,就有

一个规格;

(2)带钢材质品种繁多(500种);

(3)对厚带钢或某些钢种,为便于卷取机卷入,需要把头部目标温度抬高,所以,目标卷取温度设定时,目前采用以下四种方式(T 表示目标卷取温度):

$$T(\text{带头}) = T(\text{中间}) = T(\text{尾部})$$

$$T(\text{带头}) > T(\text{中间}) = T(\text{尾部})$$

$$T(\text{带头}) > T(\text{中间}) < T(\text{尾部})$$

$$T(\text{带头}) = T(\text{中间}) < T(\text{尾部})$$

(4)有些材质的带钢在冷却过程中有相变,要考虑相变温度(临界温度);

(5)供水压力要求恒定;

(6)喷水长度要求可调;

(7)终轧温度要求平稳。

计算机把生产的带钢厚度分为15个级别(厚度级),按目标卷取温度分为6个级别(卷取温度级),把带钢材质分为500个级别(材质级),进行分档控制,对不同的级别采用不同的控制策略和自适应参数。

1.3 层流冷却系统设备配置

在层流冷却区内,上下对称各有19个喷水架,每个喷水架上有4个喷水管,其中前7个和最后一个喷水架上的喷水管各由一个气动薄膜阀控制,其余11个喷水架上每两个喷水管由一个阀门控制。因此,上下各用了54个阀门。其中前28个阀和最后4个阀为精调阀,其余为粗调阀。一个粗调阀控制的喷水区域是精调阀的两倍。

在层流冷却区入口(EMP处),使用终轧温度计、测厚仪和测速仪测量带钢进入层流冷却区的温度、厚度和速度;在层流冷却

图中,1 表示阀门打开,0 表示阀门关闭。阀门阵列按某种规律分类,先介绍几个概念:

(1)空冷区(LU)是指带钢与空气进行热交换的区域。

(2)水冷区是指带钢与冷却水进行热交换的区域。

(3)密集喷水(WA)是指一个喷水架上的四个喷水管全部打开。

(4)稀疏喷水(SP)是指一个喷水架上的四个喷水管没有全部打开,但至少打开一个,所以有三种情况:

1)四个喷水管打开三个,3/4 型;

2)四个喷水管打开两个,2/4 型;

3)四个喷水管打开一个,1/4 型。

(5)六个特征阀门:

V_o ——第一个开启的上控制阀的阀门号,称为上起始阀门号(图 1-4 中为 15 号阀位)。

V_u ——第一个开启的下控制阀的阀门号,称为下起始阀门号(图 1-4 中为 19 号阀位)。

V_{AO} —— V_u 以后,下主冷区最后一个开启的阀门号(图 1-4 中为 35 号阀位)。

V_{OE} ——下主冷区第一个关闭的阀门号(图 1-4 中为 36 号阀位)。

V_{AOE} —— V_o 以后,上主冷区最末一个关闭的阀门号(图 1-4 中为 38 号阀位)。

V_{OF} ——精冷区第一个打开的阀门(图 1-4 中为 53 号阀位)。

这时,主冷区分为 6 个区:EMP 处温度计到第一个喷水管这段距离 L_{HL} 称为无阀空冷区,第一个喷水管到 V_o 部分称为有阀空冷区,二者合起来称为第一区,是上下空冷区; V_o 与 V_u 之间为第二区,是上水冷区和下空冷区;第三区、第四区和第五区要根据带钢特性要求确定是稀疏喷水还是密集喷水,后面有详细介绍;接下来到主冷区的部分一定存在一个上下空冷区,称为第六区。第七区为密集喷水区。精冷区只有一个喷

水架和喷水架到卷取温度计之间的部分,喷水架区域又分为有阀空冷区(第一个喷水管到 V_{of} ,称为第八区)和上下密集喷水区(V_{of} 到最后一个喷水管,称为第九区),最后是上下无阀空冷区(称为第十区),所以总共需要 10 个区才能完全表达带钢与介质热交换的情况。图 1-5 所示为计算机对冷却区划分的逻辑区及喷水方式映射图。

终轧温度计	前馈控制区 2~6					反馈控制区 7~9				卷取温度计
测量点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 测量点
上喷水	LU	WA	SP	WA	SP	LU	WA	LU	WA	LU
下喷水	LU	LU	LU	WA	SP	LU	WA	LU	WA	LU

图 1-5 计算机对冷却区划分的逻辑区及喷水方式映射图

在整个层流冷却的喷水区域内,在设计上把上下 1~50 号阀门定义为前馈控制区,把上下 51~54 号阀门定义为反馈控制区。计算机把在整个生产范围内的带钢按厚度分为 8 个级别,按目标卷取温度分为 6 个级别,按带钢材质的冷却特性又分为 10 个级别,进行分档分级控制,对不同的级别使用不同的策略数据和模型数据,如逻辑区可根据分档选取以下几种:

- (1) 1、4、6、9、10 区;
- (2) 1、5、6、9、10 区;
- (3) 1、2、6、9、10 区;
- (4) 1、2、4、6、9、10 区;
- (5) 1、3、5、6、9、10 区。

由于各区长度需计算得出,随带钢不同而改变,所以称它们为逻辑区。为确定带钢位置及进入冷却区时间,需要有一个固定的参考点,所以根据冷却区工况冷床又分为 9 个物理分区。如果用 $Z(n)$ 表示第 n 个物理区最后一个阀位号(n 表示区号),则物理分区的具体情况如表 1-1 所示。

表 1-1 物理分区情况

物理区	Z(1)	Z(2)	Z(3)	Z(4)	Z(5)	Z(6)	Z(7)	Z(8)
阀位号	0	14	28	40	52	60	72	76

相邻两阀位的距离是固定的(用 V_{PG} 表示, 为 1.26m), 可以计算出某阀位到入口测量点 EMP 处的距离和各个设备区的长度, 这为确定带钢上某点位置和计算该点通过某阀位的时间作准备。

2 带钢卷取温度预测模型

2.1 一阶温度预测模型的导出

根据带钢实测入口条件(如终轧温度、速度和厚度),对带钢经过冷却区后的卷取温度进行预测,并通过它与目标温度的差值对水冷区的长度进行控制,这就是引入预测模型的基本思路。

一般来说,要获得一个准确的对象模型是很难的,而且层流冷却控制计算用的数学模型又十分重要,它直接影响到卷取温度的控制精度。由于控制工程上还要求模型结构形式简单易行,既要在线实时控制计算方便,又要有各种发挥其功效的途径和方法,并使模型功能不断完善等,所以现场层流冷却控制采用的是描述带钢通过冷却区温度变化的一维模型,它是在运动带钢和介质热交换方程的基础上推出的。

从机理上讲,冷却模型是一个关于运动物体和周围介质热交换的方程,它描述了带钢在冷却区温度的下降过程,这是一个机理模型。另外,在确定模型参数时要用到包括经验公式、经验曲线及经验表在内的经验模型。所以对象的模型组成是一个混合型模型。下面介绍基础模型的导出过程。如图 2-1 所示,取带钢运动方向为正方向(x 轴),带钢运动速度为 $v(t)$ 。

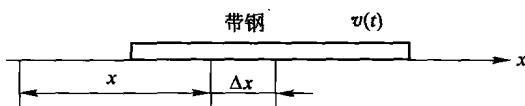


图 2-1 带钢运动示意图