

分类号\_\_\_\_\_ 密级\_\_\_\_\_

UDC\_\_\_\_\_

# 学 位 论 文

## 连续退火炉加热控制技术的研究与改造

作者姓名：郭健名

指导教师：高宪文 教授 信息科学与工程学院

吕 军 高工 北京首钢冷轧薄板有限公司

申请学位级别：硕 士 学 科 类 别：专业学位

学科专业名称：控制工程

论文提交日期：2012年6月6日 论文答辩日期：2012年6月8日

学位授予日期： 年 月 日 答辩委员会主席：井元伟

评 阅 人：王小刚 张振勇

东 北 大 学

2012年6月

**A Thesis in Control Engineering**

**The Research and Improving on Heating  
Control Technology of CAL**

By Guo Jianming  
Supervisor: Professor Gao Xianwen

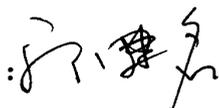
**Northeastern University  
June 2012**



J0124802

# 独创性声明

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

学位论文作者签名：

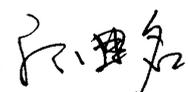
日期： 2012.6.8

# 学位论文版权使用授权书

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

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年     一年     一年半     两年

学位论文作者签名：  
签字日期： 2012.6.8

导师签名：  
签字日期： 2012年6月11日

# 连续退火炉加热控制技术的研究与改造

## 摘要

近年来,我国经济飞速发展,汽车、家电等行业对于冷轧板材的需求量迅猛增长,冷轧后处理工艺得到快速发展,连续退火机组,因其产能高、产品质量好、生产周期短、成材率高、生产成本相对低等特点,得到国内几大钢铁公司的关注。

连续退火炉作为连续退火机组的核心设备,因其体积庞大,设备种类多,控制工艺复杂,目前都还是引进国外的技术。连续退火工艺中,带钢的加热技术综合了加热相关设备的管理、燃烧控制、炉温控制等方面的应用,是最为重要,也是较难掌握的工艺部分。

本文从实际出发,以北京首钢冷轧薄板有限公司连续退火机组的立式退火炉为实例,在学习熟悉连续退火工艺的基础上,通过系统全面的阅读退火炉的控制程序,对连续退火炉的加热技术进行了深入研究。本文着重研究了加热系统的结构及控制方法,并结合生产实际中的遇到的问题进行分析并提出有效的解决方案。本文的主要研究内容有如下几个方面:

1. 连续退火机组及退火炉加热技术的发展及特点;
2. 退火炉主流的控制系統结构,包括自动化系统、HMI 系统、网络系统等;
3. 对现有退火炉加热控制系统、炉温控制进行梳理和研究。并提出控制问题;
4. 引入模糊 PID 控制改善炉温-流量控制特性;针对低温低负载下,燃烧状况不佳的问题进行了分析,并通过将点火控制方式改成 ON/OFF 控制,实现了低温低负载下,燃烧的可控性。

**关键词:** 连续退火炉; 加热控制; 模糊控制; 烧嘴燃烧; 时序脉冲控制

# The Research and Improving on Heating Control Technology of CAL

## Abstract

Recently, the economy had a fast develop in our country, the needing of mill coil is increasing in cars, household electrical appliances trade, so treat process after cold mill had a great develop. Because of its high production, good quality, short production cycle and low cost, Continuous Annealing line gets more and more attention by steel & iron companies.

As the core equipment of CAL, Continuous Annealing furnace has big size, many devices and complex control process, so most technology about furnace still need introduced from abroad. Strip heating technique integrates the heating devices management, combustion control, furnace temperature control, and is very important and hard to understand.

This thesis is mainly talking about the Annealing furnace of Beijing SHOUGANG cold mill Ltd., , base on study CAL's process, Through researching the control program and documents of the furnace heating detailed, we have learned the ropes of furnace heating system' structure and control methods , according to the problems appeared during the production ,we made a deep analysis and improvement.

The main research contents as following,

- 1 .development and feature about CAL and heating technique
- 2 .the control system of furnace, automation, HMI, network
- 3 .make research for heating control system and temperature control .
- 4 .through lead in fuzzy control to improve temperature and flow control characteristic .through lead in the ON/OFF control, made improvement for low load and low temperature control.

**Key words:** Continuous Annealing furnace; heating control; fuzzy control; burner combustion; ON/OFF control

# 目录

独创性声明.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 连续退火机组的发展及特点.....	1
1.2.1 连续退火机组的发展.....	2
1.2.2 连续退火技术的主要优点.....	3
1.2.3 连续退火技术存在的主要问题.....	3
1.3 退火炉加热控制技术的发展.....	4
1.3.1 加热控制技术的理论研究状况.....	4
1.3.2 退火炉控制技术的工程应用现状.....	5
1.4 论文主要工作.....	6
第二章 连续退火工艺与燃烧概述.....	7
2.1 首钢连续退火机组简介.....	7
2.2 连续退火工艺.....	9
2.3 热工的基本理论和计算.....	11
2.3.1 基本概念.....	11
2.3.2 燃烧.....	12
2.3.3 燃烧气体的计算.....	15
2.4 连续退火过程中的控制问题.....	18
第三章 控制系统.....	17
3.1 自动化系统.....	17
3.1.1 SIMATIC 管理器.....	18
3.1.2 顺序功能图 (SFC) 和连续功能图(CFC).....	18
3.2 HMI 系统.....	20
3.3.1 画面介绍.....	21
3.3.2 趋势图.....	22
3.3 分布式 I/O.....	22
3.4 通讯网络.....	23
3.4.1 以太网网络.....	23
3.4.2 现场总线网络.....	24
3.5 退火炉控制系统的功能.....	26
第四章 加热系统及控制方法的研究.....	29
4.1 加热系统的结构.....	29
4.1.1 主燃气控制系统.....	30
4.1.2 区燃气控制系统.....	31
4.1.3 助燃空气控制系统.....	32
4.1.4 烧嘴燃烧系统.....	32
4.1.5 废气系统.....	34
4.2 加热系统控制方法-区负载控制 (zone load control).....	35
4.2.1 温度控制管理.....	36

4.2.2 高温计修正.....	38
4.2.3 双比例交叉限幅控制.....	38
4.2.4 烧嘴管理.....	42
4.3 现有加热控制系统问题.....	44
4.3.1 根据炉温控制流量的稳定性.....	44
4.3.2 烧嘴点火的问题.....	44
第五章 加热控制系统的改造.....	49
5.1 应用模糊 PID 控制改善炉温控制.....	49
5.1.1 模糊 PID 控制器设计.....	49
5.2 燃烧控制方式的改造.....	60
5.2.1 低温低负载下燃烧控制的改造.....	60
5.2.2 改造后的效果.....	65
第六章 总结与展望.....	67
参考文献.....	69
致谢.....	71

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

近年来,我国经济飞速发展,汽车、家电等行业对于冷轧板材的需求量迅猛增长,冷轧后处理工艺得到快速发展,面对冷轧板材市场竞争日趋激烈的现状,各大钢铁公司将产能、质量、成本等的因素摆在企业运营的首要位置。在冷轧后处理工艺各种机组中,连续退火机组,因其产能高、产品质量好、生产周期短、成材率高、生产成本相对低等特点,得到国内几大钢铁公司的关注,并从 2005 开始,20 余条连续退火机组相继投产。

连续退火炉作为连续退火机组的核心设备,因其体积庞大,设备种类多,控制工艺复杂,目前都还是引进国外的技术。连续退火工艺中,带钢的加热、冷却及稳定通板技术是最重要也是最难掌握的 3 个方面。产能高决定了退火炉体积庞大,加热相关设备种类、数量多;炉温控制的快速、有效及均匀与否,直接影响了带钢的退火质量,因此带钢的加热技术是包含了对设备的管理及过程控制等学问。

面对已经投产的 20 余条连续退火机组,虽然引进技术来自于欧洲和日本的不同公司,但加热技术的基本原理大同小异,然而目前出版的有关连续退火机组退火炉的论文、期刊都没有针对加热技术中有关控制方法和硬件设备的深入和系统研究介绍,同时对于连续退火炉的实际应用效果及改进等方面的介绍,也需要整理出来。因此本文将对连续退火炉的控制系统及加热技术进行深入研究,以填补空白,同时消化吸收其中先进的技术,并将其应用于实践,为退火炉的生产维护提供技术指导,从而实现良好的退火工艺,保证产品质量,增加企业的产品竞争力。

## 1.2 连续退火机组的发展及特点

冷轧带钢的退火工艺可分为罩式退火和连续退火两大类,罩式退火分为紧卷罩式退火和松卷罩式退火两种,每种按堆垛方式分又有单垛式和多垛式两种;连续退火按退火炉方式的不同可分为立式炉退火、卧式炉退火和立卧混合炉三种。

应该说，连续带钢退火处理是现代冷轧带钢生产的主流，但罩退火工艺有它不可替代的特点，罩式退火产品在眼下乃至以后一段时间内仍然还占有很大的比例，应该说罩式退火和连续退火这两种方式都还在不断的改进和发展着。<sup>[1]</sup>

### 1.2.1 连续退火机组的发展

早在二十世纪 30 年代就出现了冷轧钢板的连续退火机组。这种机组用于处理镀锡原板及热镀锌钢板，产品板形好，性能均匀，但钢质较硬，不适于冲压。如果要生产冲压型冷轧板，需选择罩式退火炉处理。1972 年，日本新日铁公司成功的建成了第一条采用连续退火工艺生产冲压用冷轧带钢的生产线，使原来需要 10 天的生产周期缩短到了 10 分钟。1976 年 7 月日本钢管在福山厂建成了 2 号连续退火机组，这是继新日铁后再次开发了连续退火机组生产冷轧深冲碳素薄钢板的技术。70 年代后期，川崎钢铁公司与三菱公司合作研制世界上第一条多功能连退线，并于 1980 年 2 月投入运行，能生产高强度板、镀锡原板、电工板等。近些年，欧洲的 DREVER 和 STEIN 等大的退火炉提供厂商不断的改进设备和革新技术，使连续退火工艺有所进步，产品质量和性能进一步提高，更有利于开发新的钢种。到目前为止，世界上大约有 110 条左右的连退线

我国冷轧宽带连续退火机组的建设始于宝钢铁的 2030mm CAPL 机组，到 2008 年底，已有 12 条机组投产；据不完全统计，至 2010 年，我国还将有 10 条机组建成投产，其中的立式炉都采用欧洲或日本引进技术。

2005 年至今，我国已建成的大型冷轧连续退火机组呈现专业化分工和多功能双向发展趋势。在专业化生产上发挥高速高产的优势；在机组多功能上以其多样化的产品品种，多规格和高质量的特点满足了不同用户的需求。

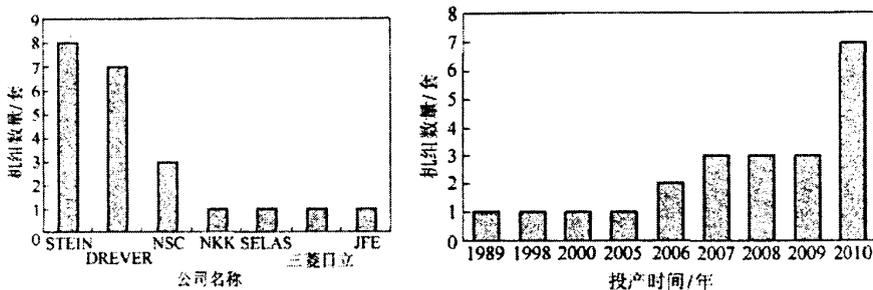


图 1.1 国内连续退火机组发展现状

Fig.1.1 CAL's state-of-the-art

从图 1.1 可以发现，在我国连退机组刚发展的阶段，技术引进都是来源于日

本。2005 年之后，我国连续退火机组大规模发展，各大钢铁公司纷纷建设连退线，国内绝大多数连退机组的退火炉技术引进都来自于欧洲的 STEIN 或者 DREVER。说明国内各大钢铁公司，对于欧洲退火炉技术更加青睐。

纵观世界上冷轧连续退火机组的发展，大体可以分为 3 个阶段：

20 世纪 70 年代至 80 年代中期为起步阶段，着力于连续退火机组各段工艺的匹配与改善，机组专业化分工不明显，多数机组既生产冷轧薄板又生产镀锡原板，产品包括 CQ、DQ、DDQ 等级别。

20 世纪 80 年代中期至 20 世纪末为第 2 阶段，机组向高速高产、专业化生产的方向发展，机组最大产能超过 90 万 t，工艺速度提高到 400m/min 以上，镀锡原板与冷轧板产品逐步分开不在同一机组上生产。同时，部分机组出现多功能发展趋向，处理镀锡原板的专业机组能生产 T1~ T6 级产品；处理冷轧板的机组既能生产软钢，又能生产高强度钢。

21 世纪开始为第三阶段，专业化生产更加明晰，冷轧板产品更加丰富，产品更宽、高强度钢的比例及强度等级逐步提高，机组更加适应高表面质量汽车板和 IF 钢 的生产。<sup>[2][3]</sup>

## 1.2.2 连续退火技术的主要优点

- (1) 产品质量高，板形平直，表面清洁，性能均匀；
- (2) 成材率高，减少钢卷多次搬运时产生的擦伤，不产生罩式退火易出现的粘结、折边等缺陷，成材率约提高 3%；
- (3) 品种多样化。不但可以生产软钢，还可生产高强度钢板、电工板等；
- (4) 简化生产过程，便于管理；
- (5) 布置紧凑，占地面积小；
- (6) 生产周期短，交货迅速，减少了生产过程中的贮备料；
- (7) 节能可达 20% 以上；节省劳动力，降低生产成本；

## 1.2.3 连续退火技术存在的主要问题

- (1) 技术复杂，难度大。要求生产人员素质高，在冷轧生产技术力量较弱的厂家建设连续退火机组，达产时间相对长些；
- (2) 生产厚规格产品有困难。尽管连续退火工艺在世界范围内发展十分迅

速,但目前还不能完全取代罩式退火炉,在连续退火机组上生产厚度大于 2.0mm 的带钢较困难,厚度大于 2.5mm 的带钢尚不能生产;

(3) 生产规格范围不宜太宽。连续退火机组可根据品种规格严格控制许多参数,如果在一条机组上规格范围太大,增加了控制难度,而罩式退火炉不受任何规格限制;

(4) 产量变化灵活性略差。

(5) 引进技术投资大。

(6) 炉温控制复杂且难度大。

## 1.3 退火炉加热控制技术的发展

### 1.3.1 加热控制技术的理论研究状况

#### (1) 最佳燃烧控制

温度燃料空气流量串级调节在仪表控制系统中,处理燃料与空气的关系通常采用配比调节,由于燃料与空气调节回路的响应速度不一致,流量测量孔板也有误差,燃料的热值又不稳定以及烧嘴特性等的变化这种配比关系难于保证。特别是在燃烧负荷发生变化的情况下,更无法保持最佳配比。为解决这些问题,产生了 3 种处理空燃比关系的交叉限幅法:(1)单交叉限幅法;(2)双交叉限幅法;(3)改进型双交叉限幅法。<sup>[4]</sup>

单双交叉限幅法有以下几个优点:

(1)使系统在燃烧负荷增加或要求升温时,实现空气先行,燃料跟随;燃烧负荷降低或降温时,燃料先行,空气跟随,以达到防止黑烟污染环境的目的。

(2)使系统在调节的动态过程中,保持空气燃料的相互跟随关系,控制空燃配比,特别是双交叉限幅的作用更好。

(3)使系统即便在供风设备一旦发生故障停风时,也能自动关闭燃料调节阀,具有自保护功能。

但这两种方法的缺点是响应速度较慢,且偏置量在各种运行范围为恒定值  $K$ (满刻度流量的百分率),与温度偏差大小及运行范围无关,温度设定值越低,需要的燃料越少,偏置值  $K$  所占实际比值越大。改进型双交叉限幅不但具有双交叉限幅的优点,实现双向限幅,空燃比范围精确,同时使偏置值与偏差大小成比例,提高系统的动态性能。据报导,这种方法可节能 4%—7%,其空燃比控

制精度不超过±0.02。缺点是系统较复杂，用的运算模块多，但在现代的集散控制系统中实现是容易的。

### (2) 修正空燃比

空燃比对于在退火炉各段内取得最佳的燃烧效率是重要的，正确地调整空燃比对于炉子安全及产品质量也是重要的。在常规的仪表控制系统中，空燃比往往由人工设定，但在频繁调节状态下，即使是最灵敏的传感器和调节阀也很难保证精确的空燃比。这是因为，流量测量孔板存在着误差，以及在燃料或空气的流速较低时，调节阀的位置及流速之间呈非线性关系。为了解决这个问题，多数退火炉计算机控制系统都建立了空燃比设定值曲线，通过修正这些曲线可以保证在每个燃料流速下退火炉各段都能取得最大燃烧效率。目前残氧量的闭环控制是修正空燃比的一种非常重要的方法。用氧化锆测定残氧量，用氧指示控制器调节输出修正空燃比，以达到降低过剩空气量的燃烧。由于退火炉各段互有影响，为此在各段都单设残氧量控制回路，并估算各段间的影响，采用多变量控制，通过计算求得退火炉各段残氧量调节回路的设定，修正各段的空燃比。<sup>[5]</sup>

### (3) 脉冲时序控制

国外自上世纪 80 年代初即开始对时序脉冲燃烧控制系统进行了研究和应用。这种控制系统是通过控制烧嘴的燃烧时序和燃烧时间来控制炉子的温度。由于它具有动态性能好、控制温度波动小、节约燃料等优点，因而得到了广泛的重视和应用。<sup>[6]</sup>

脉冲燃烧控制所采用的是间断燃烧的方式，采用脉宽调制技术，通过调节燃烧时间的通断比实现对退火炉的温度控制。燃料流量可通过控制器预先设定，烧嘴一旦工作，就处于满负荷状态，这个系统并不调节某个区域内燃料输入的大小，而是调节在给定区域内每个烧嘴被点燃的频率和持续时间。烧嘴的燃气输入量是事先给定的，每个烧嘴按照事先给定的开度和热量需求成正比的频率开闭。所有的烧嘴不是同时点燃，而是按照一定的时序依次点燃。

## 1.3.2 退火炉控制技术的工程应用现状

在 60 年代以前，一些设备齐全的大型工业炉，除了配置炉温、炉压、燃料和空气流量等监测仪表外，还设置有炉温、炉压、燃烧量、空气量等重要控制参数的 PID 调节器，以经典控制理论为依据，实现单个参量的自动调节，也可以进

行人工距离控制。

随着冶金生产技术和工艺设备的不断发展,随着微型电子计算机、可编程控制器的出现和迅速的改进更新,工业炉的计算机控制也获得了日益广泛的应用,借助于现代控制理论的指导,向着过程和系统的优化控制方向迅速发展。从发展顺序和控制水平两个方面进行归纳总结,退火炉的计算机控制大体上可以划分为如下三个层次:

(1)以提高燃料利用效率、维持合理空燃比为目的,实现燃烧过程的基础自动化控制(以炉温为控制对象);

(2)以优化带钢加热过程自身为目标,实现炉温或者燃耗量的过程自动化控制(以钢温为控制对象);

(3)在前后工序实现自动化的基础上,以协调优化整个生产系统为目标,实现加热工段的计算机自动化调度管理(以系统为控制对象)。

在每个层次中,存在着各种不同水平的工程实践,而且在以某一层次为主的控制系统中,也会具有另一层次的某些功能,因此层次划分并不是十分严格的,只是控制水平的相对反映。

国际上,在七十年代以前,关于退火炉自动控制的研究工作主要集中在燃烧控制上。如各主要过程变量的定值控制,炉温与燃料流量的串级控制,燃料与助燃空气的比值控制以及烟道废气的含氧量控制等,也就是处在控制过程基础自动化控制层次上。七十年代后,燃烧控制已经基本成熟,控制研究的重点转移到以追求某种性能指标的优化控制方面,炉内加热过程的数学模型被广泛的应用在计算机控制上。欧美、日本等国相继开发了带钢温度控制等功能的优化控制系统。近年来,一些带有整个生产物料跟踪的高度自动化的连续退火炉自动控制系统的研究和实践也逐渐深入和提高,标志着退火炉的控制已经进入自动控制的第三层次水平。<sup>[7]</sup>

我国在这方面起步较晚,从90年代初才开始这方面的研究工作。但近十多年来,随着计算机控制技术以及智能控制技术的快速发展,退火炉计算机控制的应用日趋广泛,控制水平有明显提高,并且取得了一些应用成果。

## 1.4 论文主要工作

本文的主要目的就是以北首钢冷轧薄板有限公司连续退火机组的退火炉

为实例,对其控制系统及加热控制策略进行研究,针对生产遇到的有关加热控制的问题进行深入分析并提出改造方案。

首钢连续退火机组由德国 SMS 公司设计,大部分设备从国外引进,技术水平在国内处于领先地位,产品定位主要在汽车板,年产能 90 万 t。机组的退火炉为立式退火炉,加热方式为双交叉比例限幅的辐射管加热,由比利时的 DERVER 公司设计。

本文是在作者在学习熟悉连续退火机组相关工艺之后,花费大量时间,系统全面的阅读退火炉的控制程序,并结合生产实际遇到的问题,进行分析,找出原因,并学习相关的控制理论,在此基础上提出解决办法的基础上完成的。因此本文的主要内容包括:

(1)退火炉控制系统的结构。控制系统的软硬件的功能研究,尤其与加热设备相关的各级网络的研究介绍,以及退火炉各段控制功能的总结;

(2)对现有退火炉加热控制系统的研究,并提出加热控制系统中的问题;

(3)通过引入模糊控制改善流量控制快速性和稳定性,通过引入 ON/OFF 控制方式,解决低温低功率下燃烧控制不稳定的问题。



## 第二章 连续退火工艺与燃烧概述

### 2.1 首钢连续退火机组简介

首钢连续退火机组机械设备采用德国西马克的机械设备，德国西门子为电气供应商，DREVER 为连续退火炉的供货商，焊机采用TMEIC 窄搭接焊机，涂油机供货商为杜马，机组年产能为90万吨。

用于生产冷轧产品的钢卷，由轧后库内的吊车直接将钢卷吊运到连续退火机组入口钢卷运输系统的钢卷鞍座上，并由人工拆除捆带。拆除捆带的钢卷由钢卷小车从固定鞍座送到没有钢卷的开卷机上。该机组采用双开卷方式，可以缩短在入口段的停机时间，同时减少生产线满负荷运行期间入口活套内存储的钢卷量。开卷后，带钢经五辊矫直机后进入双切剪，切除超差部分，然后进入窄搭接焊机，与已准备好的前一卷带钢的尾部焊接起来。焊接后的带钢，经月牙剪后送往清洗段。带钢在清洗段经碱洗、刷洗、电解清洗、再刷洗、热水漂洗及挤干烘干将表面清洗干净后进入入口活套，入口活套为立式双活套塔结构，有效容量为980 m 通常是充满带钢的，当入口段因为换卷和焊接而停车时它也允许全速运转通过中心部分送到退火工艺段。在退火炉中，带钢先后经过由预热段、辐射管加热段和均热段、慢速气体冷却段和快速气体喷射冷却段、过时效段，最后通过水淬系统冷却到常温42℃。接着带钢进入出口活套，出口活套是立式的，由两个活套塔组成，有效容量为1200 m，通常该活套为空套，并且允许当平整机换辊或者剪切废料以及取样或者改变卷取机时导致停机时，带钢可以全速运行通过炉子部分。出口活套出来的带钢经过张紧辊组后进入6 辊CVC 高精度表面平整机，实现统一的表面平整以获得均匀力学性能和良好板形。表面平整机能够在湿的（脱盐水或平整液）滚动方式下运行。然后带钢经过出口立式检查活套，到达切边剪切边、检测宽度并由人工检查带钢表面，再经静电涂油，最后按要求在出口的飞剪上将带钢切断及取样，在1 # 及2 # 卷取机上重新卷成钢卷。钢卷在卷取机上由钢卷小车将它送到步进梁运输机上称重，人工打捆，贴标签，然后转送到成品仓库或下游的半自动化包装机组。

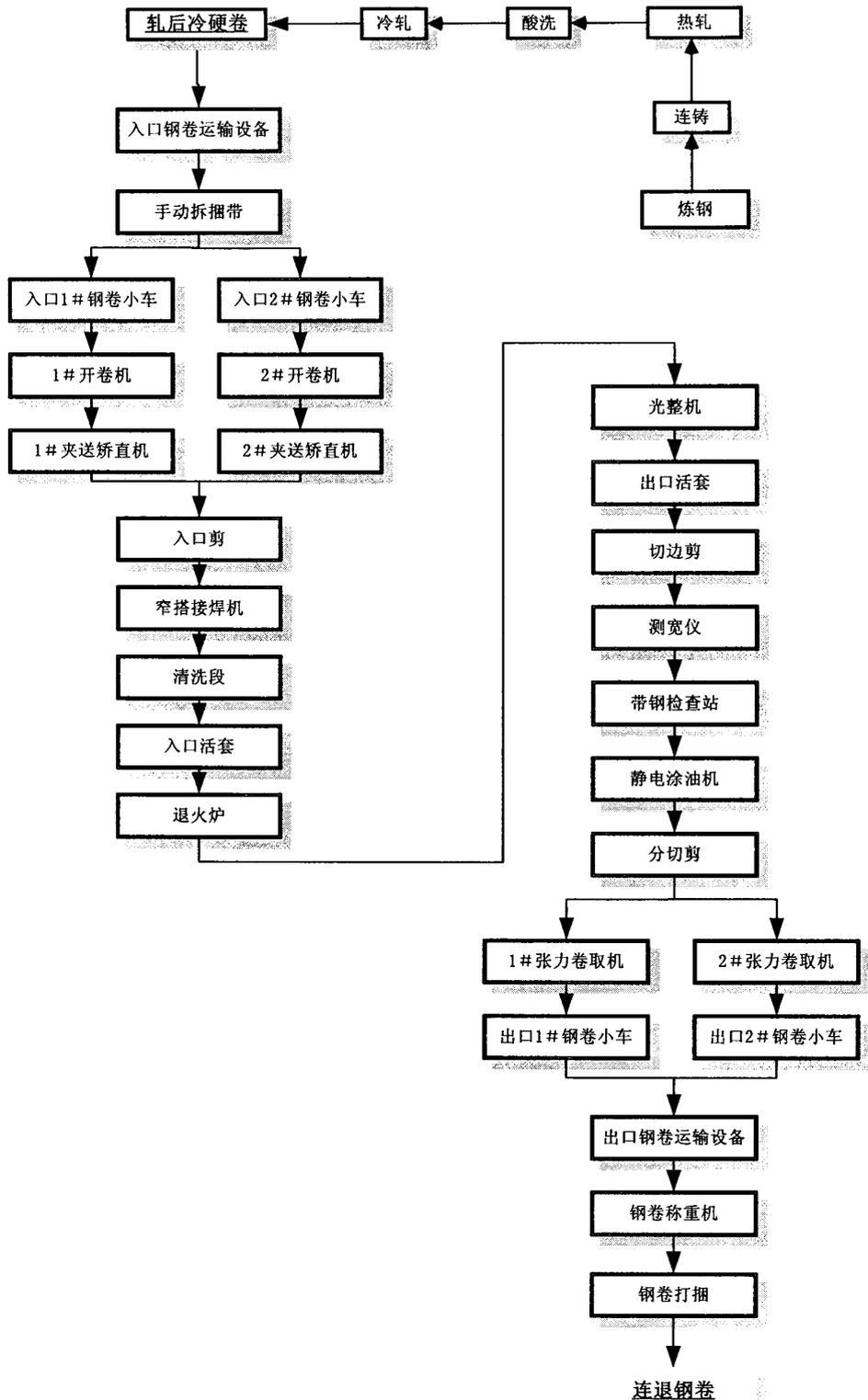


图2.1连续退火机组工艺流程

Fig.2.1 The process of CAL

## 2.2 连续退火工艺

退火就是把固态金属或合金加热到一定温度，然后以一定的速率冷却以获得需求的状态或性能的过程。其目的除消除加工硬化，改善力学性能和加工性能外，还可通过控制退火温度和冷却速度等得到需要的组织和性能。具体说来，它包括完全退火、等温退火、正火、球化退火、均匀化退火、去应力退火、奥氏体退火、双相退火等。

其中完全退火，指带钢被加热到 A3 线以上，全部转化成奥氏体成分，保温一定的时间，此时原子晶格完成重组，获得平衡组织的过程，带钢的各方面性能得到改善，可作为钢的成品或半成品的最终热处理。首钢退火炉为连续立式全辐射管退火炉，使用天然气作为燃料，用于 CQ、DQ(LC)、DQ(ULC)、DDQ、EDDQ、S-EDDQ、CQ-HSS、DQ-HSS、DDQ-HSS、BH-HSS、DP HSS 和 TRIP HSS 等钢种的退火。连续退火工艺生产率高，产品性能和表面质量好，生产连续化程度高，生产周期短，劳动定员少。连续退火加热周期的特点是快速加热、短时保温、急速冷却，定时时效，全程仅仅几分钟。冶金学的研究表明，用连续退火式生产成型性良好的薄钢板，必须采用过时效处理，将带钢加热到 750~860℃，保温一定的时间，然后快速冷却到 400℃左右，进行几分钟的过时效处理，使过饱和固溶碳能充分析出，克服固溶碳引起的材质硬化现象。因而在连续退火炉中，设置了比较长的过时效段。

此外，为了提高经连续退火后带卷的产品性能，还必须严格控制原料钢卷的化学成分，要求低碳、低锰、低硫磷等杂质含量。热轧时要进行高温卷取，尤其是对于铝镇静钢而言，较高的卷取温度，有利于固溶铝的析出。对原料钢卷进行严格控制，简单说，就是要控制碳化物的聚集析出，使铁素体基体净化。

首钢连退炉炉长约为 161730mm，由以下几部分组成：预热段、加热段、均热段、缓冷段、快冷段、过时效段、终冷段和水淬。各个炉室之间有通道连接。为防止氧化，炉内充以含氢 5% 的氮氢保护气 (HN<sub>x</sub>)，根据工艺和产能的需要，快冷段还有可能使用含氢 20% 的氮氢保护气。此外，它还有若干辅助设备以保证炉子处于最佳工作状态，例如：入口密封辊、出口密封辊、余热回收系统和氮氢混合站等。

退火炉的各段结构及工艺如下：



### (1) 预热段

位于退火炉的最前端，用来回收炉子排出废气中的余热，以预热带钢。废气中的余热用于退火炉内保护气体，经预热的保护气体喷吹到钢板表面以达到预热带钢的目的，带钢在预热段出口可达到 120-150℃。同时可实现可在燃气消耗方面节省能源大约 7-8%。

### (2) 加热段和均热段

将带钢加热到退火温度，并在此温度下保持必要的时间以达到带钢的再结晶。这部分具备多用途的能力：根据不同钢种，均热段的第一部分既可用于加热亦可用于均热。在生产 DQ(LC), DP-HSS 或 TRIP 等钢种时，需要的均热时间最小为 35 秒，此时这一部分就可以用作均热。

### (3) 冷却段

分为两部分：一个由 3 个道次组成的缓冷段可使得带钢冷却到 700℃ 以下；一个快冷段，尽管只有 1 个道次，但是通过 3 对大功率风机的强力对流换热，对于 1mm 厚度的带钢可以提供大约 100℃/s 的冷却速率并且可给过时效段输送横向温度均匀一致的带钢。

### (4) 过时效段

分 3 个炉室，12 个分区，通过炉膛内的加热电阻带控制炉温，进而保证在带钢通过的两分钟内，带温保持在 380-420℃ 之间。

### (5) 喷气式最终冷却段

分五个区，每个区设备配置一致，都是通过循环风机将冷却后的炉内保护气吹扫带钢表面，以强对流的方式，使带温从 380℃ 冷却到 160℃。

### (6) 水冷段

包括水淬槽、挤干辊和干燥器等设备。将带钢冷却到 45℃ 左右，保证出炉子经过出口活套的带钢，在进平整机前温度降到 42℃。

## 2.3 热工的基本理论和计算

### 2.3.1 基本概念

连续退火炉中热量传递有三种基本方式：导热、对流和热辐射。

#### (1) 导热

物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热（或称热传导）。

### （2）对流换热

对流是指由于流体的宏观运动，从而流体各部分之间发生相对位移、冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。

### （3）热辐射

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。其中因热的原因而发出的辐射称为热辐射。自然界中各个物体都不停地向空间发出热辐射，同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。辐射与吸收过程的综合结果就造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递—辐射换热。<sup>[8]</sup>

## 2.3.2 燃烧

### 2.3.2.1 基本概念

#### （1）低发热量 $Q_{\text{低}}$

指的是燃料完全燃烧候燃烧产物中的水蒸气冷却到 20℃时放出的热量。天然气：主要成分是甲烷，其次是乙烷等饱和碳氢化合物。天然气发热量很高，一般在 33440~41800kJ/m<sup>3</sup> 或更高。但天然气 CH<sub>4</sub> 含量大，气体燃烧速度慢，以及天然气密度小等原因，在燃烧时组织火焰和燃烧技术上必须采用相应的措施，以保证发挥天然气作用。

#### （2）空气消耗系数

实际空气消耗量与理论燃烧的空气消耗量的比值称为空气消耗系数。为了保证完全燃烧， $\lambda \geq 1.0$ ，但是  $\lambda$  越大， $t_{\text{理}}$  就越低。

### 2.3.2.2 理想的完全燃烧

要完全燃烧一定量的燃料，就必须提供一定量的燃耗空气。这个空气量即称作理论空气量。但是，实际供给的空气量总是和理论空气量有些偏差，因而常常用下式来表示实际的燃烧状态：

$$\lambda = \frac{V_i}{V_t} \quad (2-1)$$

式中  $\lambda$  ——过剩空气系数；

$V_i$ ——燃烧 $1\text{Nm}^3$ 天然气的实际空气量,  $\text{Nm}^3$  ;

$V_t$ ——燃烧 $1\text{Nm}^3$ 天然气的理论空气量,  $\text{Nm}^3$  。

当过剩空气系数 ( $\lambda$ 值) 等于1, 且氧气和燃烧气体的混合又达到理想的均匀状态时, 燃烧结果是氧气和燃烧都正好烧尽而没有剩余; 燃烧废气中除了不参加反应的氮气之外, 只有 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$  (蒸汽状态)。这样的燃烧, 称作为理想的完全燃烧。理想完全燃烧时, 炉内的气氛为中性。

### 2.3.2.3 氧气过剩的完全燃烧

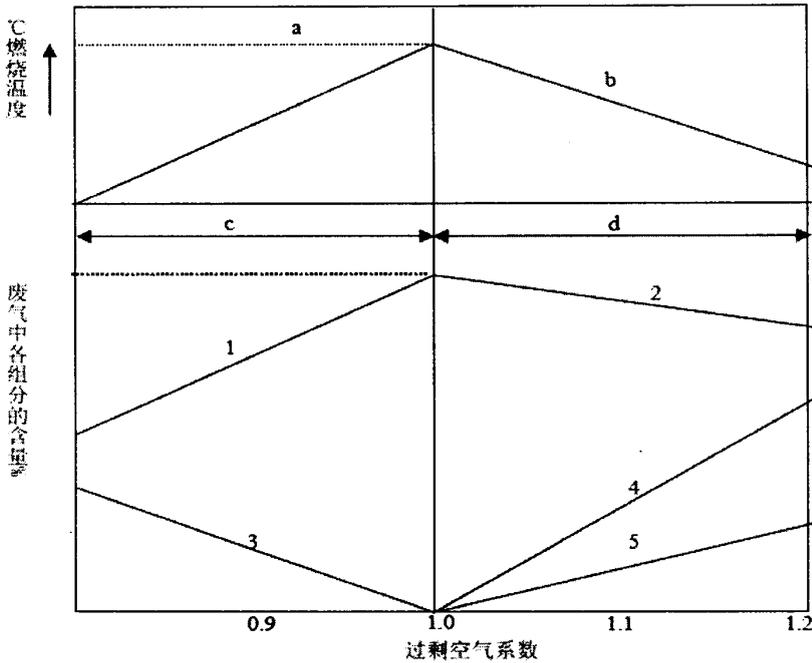
当实际供给的空气量大于空气量, 即过剩的空气系数 ( $\lambda$ 值) 大于1时, 使燃料烧尽而氧气过剩。废气中含有 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 等组分。为氧化气氛, 辐射管内的燃烧属于这种方式。

对于首钢CAL退火炉, 辐射管正常工作时, 管内的空气过剩系数在1.1左右, 处于氧气过剩的完全燃烧状态, 保持氧化气氛。以保证辐射管稳定的输出功率和使用寿命。

### 2.3.2.4 缺乏氧气的不完全燃烧

实际供给的空气量小于理论空气量时, 过剩的空气系数 ( $\lambda$ 值) 小于1时, 燃烧的结果是燃料剩余而氧气烧尽。称作为氧气烧尽的完全燃烧。废气中含有 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_m\text{H}_n$ 等组分, 为还原性气氛。

### 2.3.2.5 氧气过剩的不完全燃烧



a 过剩空气系数  $\lambda = 1$ , 然后温度达到最高值;  
 b 废气量增大温度下降; c 还原气氛; d 氧化气氛  
 1—CO<sub>2</sub>; 2—CO<sub>2</sub>; 3—CO; 4—O<sub>2</sub>; 5—燃烧失调造成的CO

图 2.3 废气中各组成变化曲线

Fig.2.3 the change curve of each part in waste gas

这种燃烧属于不正常燃烧。当任何燃烧设备出现故障，例如，烧嘴失调、燃烧工具本身不合理，都有可能造成这种现象。这种燃烧总的来说看来是氧气过剩，但是由于混合不均匀，很有可能在燃烧的局部形成了氧气供应不足的现象，这样便出现不完全燃烧不分。因此，在同一个燃烧剂中，就出现了氧气过剩部分的氧化气氛和氧气不足部分的还原性气氛。废气中同时含有CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>、O<sub>2</sub>等组分。

总而言之，任何状况下的燃烧，都不外乎以上四种燃烧方式，在燃烧过程中废气的各成分变化和温度变化，都直接取决于过剩空气系数 ( $\lambda$ 值)，图2-3表示出了天然气的燃烧情况，当 $\lambda < 1$ 时，随着比值的不断增大，CO<sub>2</sub>的含量也在增加，而CO的含量在逐渐的减少。当 $\lambda = 1$ 时，CO<sub>2</sub>增加到最大值，CO含量减少到零， $\lambda > 1$ 时，废气总量的增大使CO<sub>2</sub>的百分含量逐步下降，而废气中的O<sub>2</sub>含量又在迅速上升

本来 $\lambda > 1$ 时，废气中不应该含有CO，图2-3中曲线5的变化，隶属于燃烧失调

的第四种燃烧方式。

此外，还可以看出，废气的温度取决于 $\lambda$ 的变化。当 $\lambda=1$ 时，温度上升到最大值，当 $\lambda>1$ 时，因废气量增大反而引起温度的下降。<sup>[9][10]</sup>

### 2.3.3 燃烧气体的计算

#### 2.3.3.1 燃烧空气量的计算

当具备了燃烧条件时，燃烧气体中的可燃部分便开始燃烧，同时发生下列的化学反应：



由上述的三个反应式可知，燃烧一个标准体积的甲烷需要2个标准体积的氧气，燃烧一个标准体积的乙烷需要3.5个标准体积的氧气，燃烧一个标准体积的丙烷需要5个标准体积的氧气。

天然气组成： $CO_2$  3%； $CH_4$  95.95%； $C_2H_6$  0.91%； $C_3H_8$  0.14%

故而燃烧 $1Nm^3$ 的天然气的理论氧气量为

$$O_2 = 2CH_4 + 3.5C_2H_6 + 5C_3H_8 \quad (2-5)$$

$$O_2 = 2 \times 95.95\% + 3.5 \times 0.91\% + 5 \times 0.14\% = 1.95785 Nm^3 \quad (2-6)$$

因为空气中的氧含量为21%，所以理论的空气量为

$$V_{as} = 1.95785 / 0.21 = 9.323 Nm^3 \quad (2-7)$$

#### 2.3.3.2 废气量的计算

(1) 由气体燃料的化学成分和燃烧化学反应式，可以计算废气生成量。

根据上述的化学反应式可以计算得出二氧化碳总的生成量：

$$\sum CO_2 = 95.95\% + 2 \times 0.91\% + 3 \times 0.14\% = 3.205 Nm^3 \quad (2-8)$$

根据上述的化学反应式可以计算得出水蒸气总的生成量：

$$\sum H_2O = 2 \times 95.95\% + 3 \times 0.91\% + 4 \times 0.14\% = 1.9519 Nm^3 \quad (2-9)$$

根据理论的空气量可以计算总氮气体量:

$$\sum N_2 = 79\% \times 9.323 = 7.365 \text{ Nm}^3 \quad (2-10)$$

则理论的废气总量,

$$V_{\text{理}} = \sum \text{CO}_2 + \sum \text{H}_2\text{O} + \sum N_2 = 12.52 \text{ Nm}^3 \quad (2-11)$$

计算中的废气是指包括CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O(蒸汽)、N<sub>2</sub>在内的是废弃总量。但是,实际进行废弃测量时,要求把废气冷却到30℃,使水全部分离之后进入。这样实际测得的废气量,都不包括H<sub>2</sub>O水在内的干废气量。

则干废气量  $V_{\text{fs}} = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 3.205 + 7.365 = 10.57 \text{ Nm}^3 \quad (2-12)$

(2) 当空气过剩系数大于1时,可按下式计算废气量:

$$V_{\text{总}} = V_{\text{fs}} + (\lambda - 1) V_{\text{as}} \quad (2-13)$$

式中  $V_{\text{总}}$  ----- 燃烧1Nm<sup>3</sup>天然气的实际废气总量, Nm<sup>3</sup>;

$V_{\text{fs}}$  ----- 燃烧1Nm<sup>3</sup>天然气的理论废气总量, Nm<sup>3</sup>;

$\lambda$  ----- 空气过剩系数;

$V_{\text{as}}$  ----- 燃烧1Nm<sup>3</sup>天然气的理论空气总量, Nm<sup>3</sup>

(3) 根据废气中的氧含量就可以计算出实际需要的空燃比

1 Nm<sup>3</sup>燃气生成的废气中氧含量O<sub>2</sub>

$$O_2 = \frac{(\lambda - 1) V_{\text{as}} \cdot 21\%}{V_{\text{fs}} + (\lambda - 1) V_{\text{as}}} \quad (2-14)$$

带入1 Nm<sup>3</sup>天然气时,空燃比为  $\lambda \cdot V_{\text{as}}$

得实际需要空燃比:

$$V_{\text{ae}} = \left( \frac{O_2}{21 - O_2} \cdot \frac{V_{\text{fs}}}{V_{\text{as}}} + 1 \right) \quad (2-15)$$

(4) 为了掌握辐射管内的燃烧情况,必须建立系统的废气分析制度,从废气中CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO等成分的含量,便可以判断出燃烧状态。

采用近似算法,理论燃烧计算式可表示为

$$t_{\text{理}} = \frac{Q_{\text{低}} + Q_{\text{空}} + Q_{\text{燃}} - Q_{\text{分}}}{V_o C_{\text{产}} + (L_n - L_0) \cdot C_{\text{空}}} \quad (2-16)$$

式中： $Q_{低}$ 为燃料低发热值， $Q_{空}$ 为空气物理热， $Q_{燃}$ 为燃气物理热

$Q_{分}$ 为热分解消耗热量， $V_0$ 为当 $n=1$ 时理论燃烧产物生成量

$V_n$ 为实际燃烧产物生长量， $C_{产}$ 为燃烧产物平均比热， $C_{空}$ 为空气比热

$L_n$ 为实际空气消耗量， $L_0$ 为理论空气消耗量

已知燃料成分，空气过剩系数，空气和燃料的预热温度，按完全燃烧，不难确定 $Q_{低}$ 、 $Q_{空}$ 、 $Q_{燃}$ 、 $L_0$ 、 $V_0$ 及不估计热分解的燃烧产物成分。然后根据经验估计一个理论燃烧温度，在此温度下，查得 $700\sim 1000^\circ\text{C}$ 天然气比热是 $1.51\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$ ，空气比热为 $1.38\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$ ，而温度是 $1000\sim 1200^\circ\text{C}$ 天然气比热是 $1.55\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$ ，空气比热为 $1.42\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$ 。当温度低于 $1800^\circ\text{C}$ 时， $Q_{分}$ 可以忽略不计。

另一种计算近似理论燃烧温度的方法是利用 $i-t$ 图，如图2-4所示，图中 $i_{总}$ 为燃烧产物的总热含量，可按下式求出：

$$i_{总} = \frac{Q_{低}}{V_n} + \frac{Q_{空}}{V_n} + \frac{Q_{燃}}{V_n} \quad (2-17)$$

该图估计到空气过剩系数对燃烧产物比热的影响，划出了一组曲线，每条曲线表示不同的燃烧产物中空气量 $V_L$ ，该值按下式计算：

$$V_L = \frac{L_n - L_0}{V_n} \cdot 100\% \quad (2-18)$$

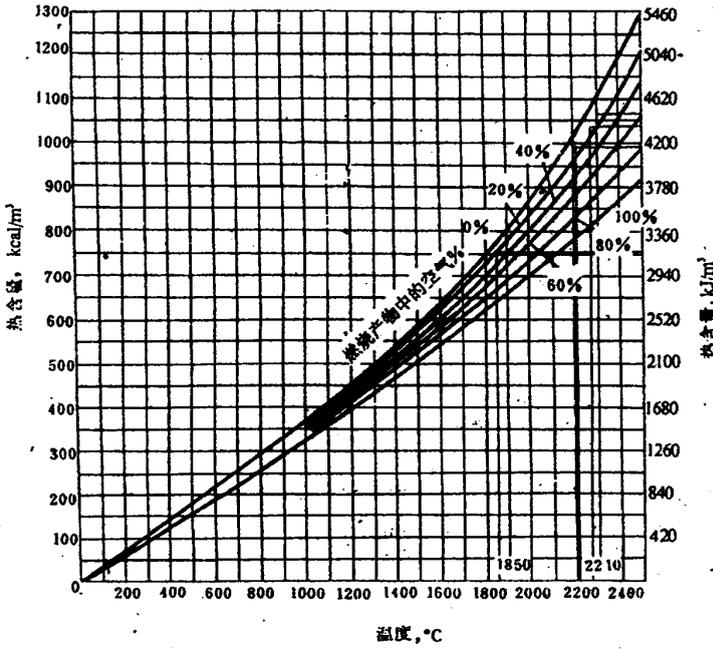


图 2.4 i-t 图

Fig.2.4 I - t chart

这样已知 $i_{总}$ 及 $V_L$ 便可由图中查处理论燃烧温度。这一方法十分简便，但只能粗略地近似估算理论燃烧温度。<sup>[11]</sup>

## 2.4 连续退火过程中的控制问题

燃烧过程是受随机因素干扰的、具有大惯性、纯滞后的非线性分布参量的随即过程。对于这种复杂的控制对象，即使是经验丰富的操作工人，也很全面的考虑各种因素的影响，准确地控制燃烧过程，使得炉温经常偏高或是偏低。这些都严重影响了退火炉的加热质量和燃耗，甚至影响正常的生产。炉温的控制中，如何能够准确快速的确定燃气流量和空气流量是最关键的要素。因此，必须提高退火炉的炉温-流量控制水平，建立炉温的自动控制系统。

目前加热控制系统都是计算出一个区的实际空燃比，也就是说系统只能控制调整整个区的燃气流量和空气流量，至于具体到该区的单个烧嘴的燃气流量和空气流量，控制系统是无能为力的，这就需要现场调节单个烧嘴保证彼此之间的空气流量和天然气流量一致，否则如果单个烧嘴空燃比过大和过小都将导致不良后果，前者使烟气体积增大，燃烧温度低，后者使燃料的化学热能不能充分发挥，不完全燃烧损失增大，使理论燃烧温度降低，同时不完全燃烧会生成大量的 CO，在烧嘴出口积碳，时间长了，甚至会烧坏辐射管。

## 第三章 控制系统

首钢连续退火炉控制系统基于西门子最新推出的PCS7开发平台，它将传统的各自独立的自动化系统、HMI 系统、分布式I/O、通讯网络以及工程工具和 SIMATIC 模块化系统整合在一起，方便开发和维护，功能强大。通过PCS7的通讯网络，控制系统将现场的传动电机、烧嘴控制器、PDA（过程数据记录系统）、MCC(马达控制中心)等设备管理起来，同时完成与主线控制系统的通讯，实现对复杂、数量庞大的炉区设备的管控。另外DREVER设计了两台用于控制炉内各种参数的数学模型站（一用一备）。

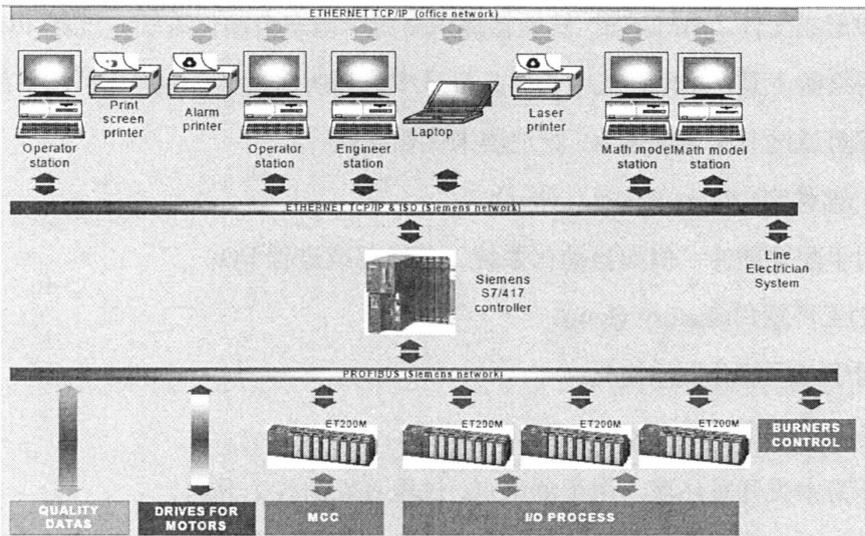


图 3.1 退火炉控制系统结构网络

Fig.3.1 network of furnace control system

### 3.1 自动化系统

作为冶金领域成熟的控制系统应用硬件设备，西门子的 PLC 以其响应速度快、可靠性高、兼容性好等特点得到设计人员的偏爱及广泛的应用。退火炉自动化系统选用西门子的 S7-400 系列控制器，CPU 选用 400 系列里面功能最强大、稳定性最好的 417-4，在 PLC 机架上另配了一块系统电源、一块以太网通讯模板 CP443-1、3 块 DP 网通讯模板 CP443-5，所有的现场设备及其他系统都是通过以太网和 DP 网通讯，因此机架上没有配置 I/O 模板。<sup>[12]</sup>

PS407	CPU417-4	CP443-1	CP443-5	CP443-5	CP443-5	预留
电源模块	控制模块	以太网通 讯模块	DP 通讯 模块-1	DP 通讯 模块-2	DP 通讯 模块-3	

图 3.2 机架配置示意图

Fig.3.2 configuration of hardware

### 3.1.1 SIMATIC 管理器

退火炉的程序开发环境使用的是 SIMATIC 管理器，它使用一个工程系统，实现整个系统的中央硬件和软件统一组态。

SIMATIC 管理器不仅是工程工具集的集成平台，而且还是 SIMATIC PCS 7 过程控制系统的整个工程的基础。在此可以对 SIMATIC PCS 7 项目进行管理、归档和形成文件。SIMATIC 管理器提供有用于组态自动化系统、过程 I/O 以及通讯网络的工具，并允许从电子产品目录中选择所需硬件。创建工厂项目的各种任务都可通过三层 SIMATIC 管理器来优化支持：

#### (1)部件窗口(component view)

用于配置硬件，例如自动化系统、总线部或过程 I/O；

#### (2)工厂窗口(factory view)

用于工厂的分层结构化；

#### (3)过程对象窗口(process object view)

作为中央开发环境，用于测量点/ 过程对象的各个方面。

其中工厂窗口( 工厂层级)用于根据工艺要求拆分和显示一个项目。它与传统的部件窗口的区别就是使用面向工艺的项目结构，炉子的所有工艺分段分区在此窗口下展示，一目了然，工艺人员可以快速实现定位，同时在对应的分段分区中已经将所有的控制程序包含进去，维护时可以直接在对应段查找编程的 CFC 功能块。OS 区和显示层级也可以从该工艺层级中派生出来。而且，这还可作为过程对象的工厂识别基础。单元的概览窗口还可自动生成，允许定位和互连所有操作员可访问和监控的 CFC 块。

### 3.1.2 顺序功能图（SFC）和连续功能图(CFC)

退火炉的控制程序的编程语言为 SFC 和 CFC。

SFC 可用于图形化组态批量生产的顺序控制。退火炉的所有设备、介质的

启停时序均使用 SFC 编程。每个 SFC 都具有用于控制和用于状态信息的输入及输出。如果需要的话, SFC 可直接在 CFC 中定位和互连。只需简单的操作, 即可选择所需的 CFC 块连接, 并连接到定序器的步或过渡点。

CFC 是一种用于图形化组态连续自动化功能的工具。退火炉的各种设备动作及过程 PID 控制的都是通过 CFC 实现。通过功能强大的自动布线和集成报文组态, 预定义的块可以在 CFC 中定位、进行参数化和互连。在生成一个新的 CFC 时, 可以根据图名生成一个顺序组。所有安装在顺序图中的块可以自动添加到该顺序组。在编译时可对顺序进行优化。根据算法先确定最佳的块顺序, 然后是组顺序。

针对炉子以过程控制为主的特性, DREVER 内部编写了一些 CFC 功能块, 加载到了程序标准库里面, 用于典型控制, 所有的标准块均包含画面显示的相关功能。主要的典型控制目标如下:

(1)数字量输入信号: 开关 (switch)。对现场采集来的数字量开关信号进行监视和噪音屏蔽, 判断出信号的有效与否, 用于画面显示和反馈命令控制。模拟量输入信号: 测量值 (measure)。对现场压力、流量、液位、温度等物理量的测量值进行分析, 针对模块中设定的上下报警极限, 直接输出相关报警信息, 同时将转化后的实数值传给控制器, 用于模拟量反馈。

(2)数字量输出信号: 切断阀。根据时序和其他命令对切断阀进行开关控制。同时对动力源、阀门位置反馈等信号进行监控。

(3)模拟量输出信号: 调节阀。通过接受控制器的输出负载或者操作工的手动命令, 对调节阀的开度进行控制, 同时对动力源、阀门位置反馈等信号进行监控。

(4)PID 控制器: 各种控制量, 通过比较实际值和设定值的偏差, 连续控制输出负载, 比例、积分、微分等参数既可以在模块管脚中更改, 也可以通过上位机调整。

(5)恒速电机模块: 水泵, 根据时序和安全需要, 控制恒速电机的启动、本地远程的控制、状态信号管理等。

(6)调速电机模块: 变频风机, 控制上与调节阀类似, 但其通讯为 PROFIBUS-DP, 故接口管脚有所区别。

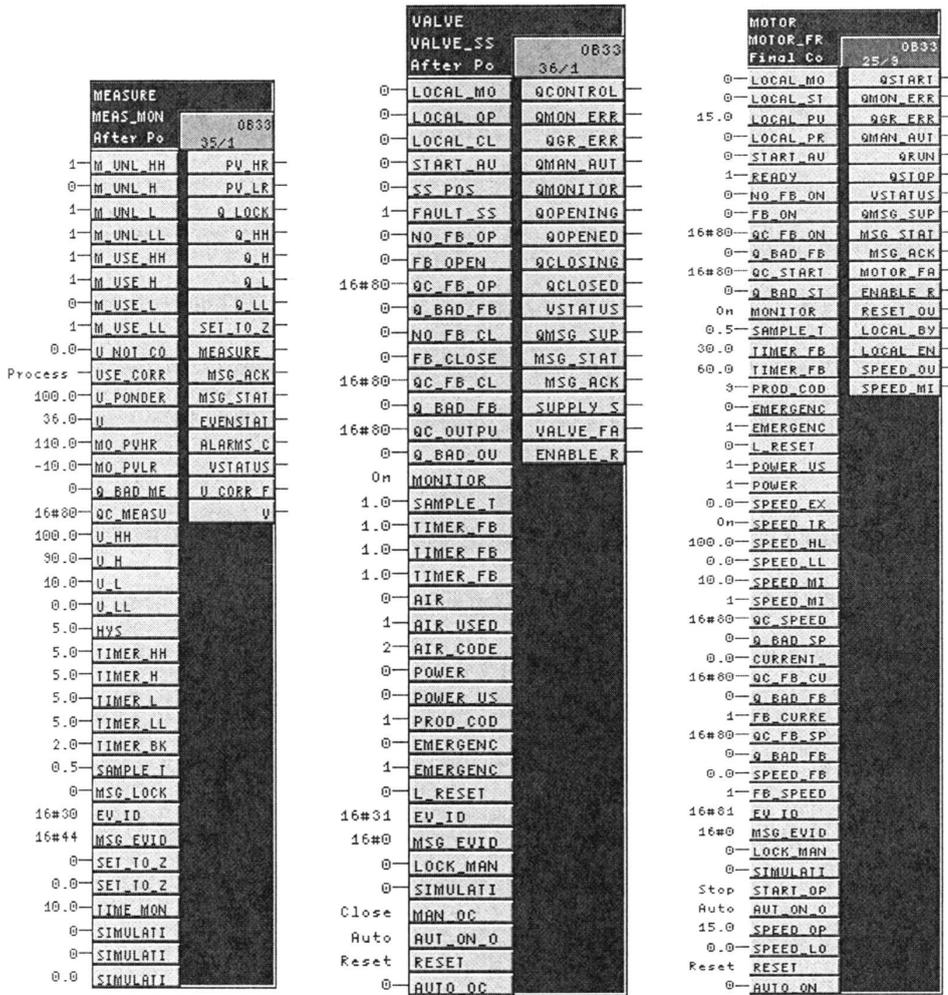


图 3.3 CFC 功能块

Fig.3.3 CFC function block

(7)烧嘴模块：烧嘴的控制，用于控制烧嘴的点火、火焰监控，同时接收现场反馈的状态，另外还对烧嘴的使用时间进行监控。

### 3.2 HMI 系统

HMI (Human Machine Interface) 系统是 SIMATIC PCS 7 过程控制系统的人机接口，是用户访问过程的窗口和门户，应用软件为 WinCC，安装在硬件计算机上，在 PCS7 中，它被集成在 SIMATIC 程序管理器中。退火炉的操作员系统使用客户机/服务器架构的多用户系统。多用户系统由通过一个 OS LAN (局域网) 的一个或多个 OS 服务器的操作员终端(OS 客户机) 组成(可以提供项目数据、过程值、档案、报警和消息等数据)。OS-LAN 可以与工厂总线共享传输

介质，或作为单独的总线设计(采用 TCP/IP 的以太网)。

退火炉配置了 2 台 OS 客户机和 1 台服务器，通过 CP 1613 通讯处理器实现各自乃至与整个控制系统的通讯。鉴于炉子复杂而繁多的过程和数据测量以及开闭环控制，3 台工控机均采用 19 英寸机箱的 SIMATIC 机架式工控机，该类型的工控机具有扩展性好、灵活方便的特点。

软件方面，操作系统为微软 windows XP 英文，尽管都安装了 PCS7 软件，但根据用途不同，3 台工控机的软件授权不同，对应的管理权限也有所不同，其中两台操作员终端仅用于操作和监控，只安装了 WinCC 的运行授权，操作工平时生产只可以监控生产画面，不能修改任何程序画面，服务器的工控机用于系统的开发，定于为工程师站，安装了所有需要的软件授权。

OS 服务器还具有其它客户机功能，允许访问多用户系统中的其它 OS 服务器的数据（档案、报文、功能标签以及变量）。这就意味着 OS 服务器上的过程图像还可以链接到其它 OS 服务器上的变量（显示与区域无关），即便工程师站进行在线修改程序和画面也不会对操作站造成影响，修改后的程序和画面只要在线下载到两台操作站即可。

### 3.3.1 画面介绍

退火炉的画面有基本的一些项目组成：

- (1)对象（object）：像电机、阀门、PID 控制等
- (2)面板（faceplate）：链接对象的窗口，用于细化画面中的对象
- (3)弹出窗口（Pop-up）：动态显示时序的运行条件状态

表 3.1 画面结构

Table 3.1 structure of picture

顶层	条目区	带有报警警告消息行
	生产线信息	工艺段分层主菜单按钮 (显示线速度、钢卷数据等生产信息)
中间	工艺区	(显示被选择的工艺段画面)
底层	键控制区	PCS7 标准按钮选项

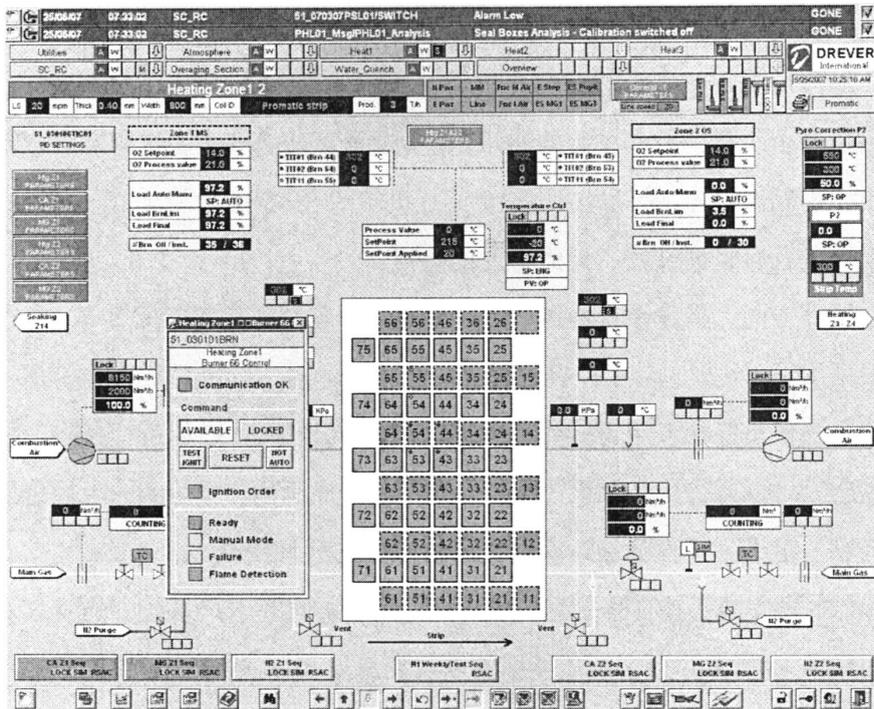


图 3.4 退火炉生产画面  
Fig.3.4 furnace production picture

### 3.3.2 趋势图

趋势系统能以取样时间为 1 秒的书牍存储工艺数据。控制系统能组态数据取样的时间：5 s、10 s、30 s、1 min、5 min 等。这个功能用语在安装调试阶段分析问题。它仅对于一些信号有效。趋势系统集成有历史记录功能、时间/范围缩放和光标功能。所有的模拟量都存储在趋势系统里，保持 60 天。

### 3.3 分布式 I/O

为了节约电缆，退火炉控制系统的远程 I/O 站分散在现场,通过现场总线 PROFIBUS 与 PLC 进行通讯，类型为西门子的 ET200M 系列。远程 I/O 柜和外围的分散设备安装在炉子的旁边。根据炉子数字、模拟输入输出点的数量，退火炉设计配置了 27 台机架槽，共计 183 块输入输出块，统一使用的是西门子 S7-300 系列的板卡：详见表 3.2

表 3.2 模块使用信息

Table 3.2 module used information

名称	型号	类型	数量	信号
SM321	6ES7321-1BH02-0AA0	数字量输入	51	0-24VDC
SM322	6ES7322-1HF10-0AA0	数字量输出	52	继电器输出
SM331	6ES7331-7KF02-0AB0	模拟量输入	55	4-20mA 或±10V
SM332	6ES7332-5HD01-0AB0	模拟量输出	25	4-20mA

### 3.4 通讯网络

退火炉自动化系统需要与 HMI 系统（上位机）、主线自动化系统进行通讯，而退火炉内部控制设备种类数量多，包括烧嘴控制器、变频器、各式仪表等，配套引入了较为先进的数学模型和 PDA，同时为了使维护管理能够清晰，控制网络也按照功能进行了划分，因此整个系统通讯网络的构成比较复杂。

根据通讯方式，分为以太网网络和现场总线网络。

#### 3.4.1 以太网网络

工业以太网是为工业应用专门设计的，它是遵循国际标准 IEEE802.3(Ethernet)的开放式、多供应商、高性能的区域和单元网络。工业以太网已经广泛地应用于控制网络的最高层，并且有向控制网络的中间层和底层(现场层)发展的趋势。

退火炉的以太网网络通过布置在操作室和电气室的两台 24 口交换机来实现。两个交换机之间由于距离较远，采用光纤连接。

在以太网通讯中工控机、数学模型分别有 2 条网线连入交换机，分别是西门子专用（ISO 协议）、常规通讯（TCP/IP 协议）；PLC 通过连到交换机实现与 HMI 系统（上位机）的通讯，所用网络协议也是 ISO 协议，从而。也就是说以太网网络系统里面还包括 2 个网络：

(1)ISO 工业网络：西门子专用通讯网络，能够使涉及西门子的信息交换速度更快，信号更稳定；

(2)TCP/IP 办公网络：用于常规的信息通讯。

另外，考虑为了在生产或者程序控制出现问题时能够及时处理，设计了将电气室的工程师站的工控机和数学模型连到一个独立的无线路由器用于技术支持，这样技术人员可以远程访问操作画面以提供必要的帮助。

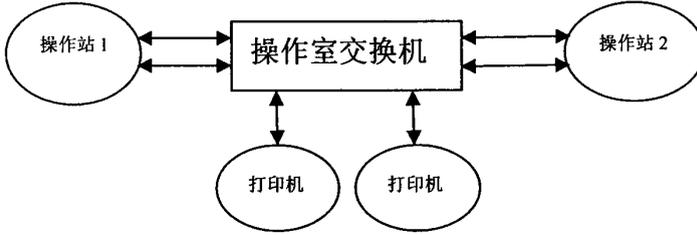


图 3.5 操作室交换机

Fig.3.5 switch in operating room

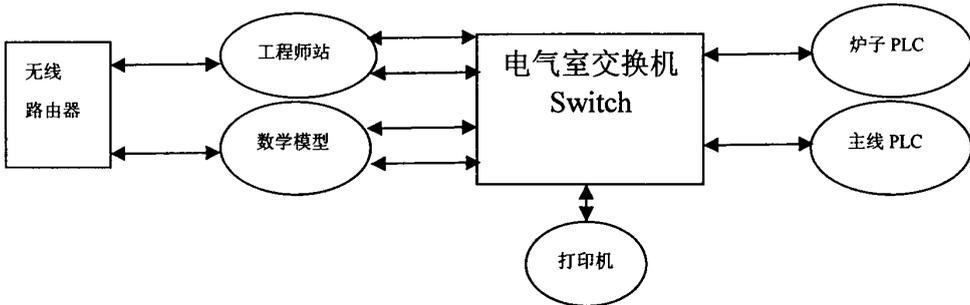


图 3.6 电气室交换机

Fig.3.6 switch in electric room

### 3.4.2 现场总线网络

现场总线是设计在生产车间级的现场设备/仪表与控制系统之间的一种串行、数字式、多点、双向通信的数据总线。现场总线是以独立分散的数字智能化的测量和控制设备作为网络节点，用总线相连接，实现相互交换信息，共同完成自动控制功能的网络系统与控制系统。<sup>[13][14]</sup>

现场总线的优势在于能够节省硬件成本，设计组态安装调试简便，系统的安全性可靠性好减少故障停机时间，系统维护设备更换和系统扩充方便，用户对系统配置设备选型有最大的自主权，完善了企业信息系统的实现企业综合自动化提供了基础。

退火炉的现场总线系统采用西门子 PROFIBUS-DP 技术，作为世界范围内应用最为广泛的总线系统，PROFIBUS 是一种国际化、开放式、不依赖于设备生产商的现场总线标准。广泛适用于制造业自动化、流程工业自动化和楼宇、交通电力等其他领域自动化。

西门子 PROFIBUS 协议的技术要求：每条网络可以直接最多接入 32 个站点，如果使用中继器，每条网络可扩展站点至 128 个。根据此原则及结合需要

PROFIBUS 通讯设备的种类和数量，退火炉的现场总线共设计 7 条网络：

PROFIBUS-DP1：PDA（工艺数据记录系统，地址:DP1#2）

该网络从 PLC 机架上的 CPU417-4 引出，考虑 PDA 与 CPU 的信息交换量非常大，所以整个网络只有 CPU 和 PDA 两个站点。

PROFIBUS-DP2：传动电机变频器

退火炉的传动调速电机共 36 台，所以该网络增加了一个中继器用于扩展。DP2 从 PLC 机架上的 CPU417-4 引出，CPU 直接联网 18 台，其余 18 台由中继器扩展

PROFIBUS-DP3：远程 I/O 站

退火炉远程 I/O 站共计 27 个，因此可以直接由 PLC 机架上 CPU417-4 引出的 DP3 联网。

PROFIBUS-DP4：1、3、5、7 区（传动侧）的烧嘴控制器(BCU)

1、3、5、7 区传动侧烧嘴控制器共计 114 个。DP4 仍然是从 PLC 机架上 CPU417-4 引出的，为完成该网络所有站点的覆盖，增设了 3 个中继器。

PROFIBUS-DP5：7、9、11、14 区（传动侧）的烧嘴控制器

该部分烧嘴共计 94 个，DP5 来源于 PLC 机架上的第一块扩展通讯模板 CP443-5，整个网路设中继器 3 个。

PROFIBUS-DP6：2、4、6、8 区（操作侧）的烧嘴控制器

该部分烧嘴共计 120 个，DP6 来源于 PLC 机架上的第二块扩展通讯模板 CP443-5，整个网路设中继器 3 个。

PROFIBUS-DP7：10、12、13 区（操作侧）的烧嘴控制器

该部分烧嘴共计 56 个，DP7 来源于 PLC 机架上的第三块扩展通讯模板 CP443-5，整个网路设中继器 1 个。

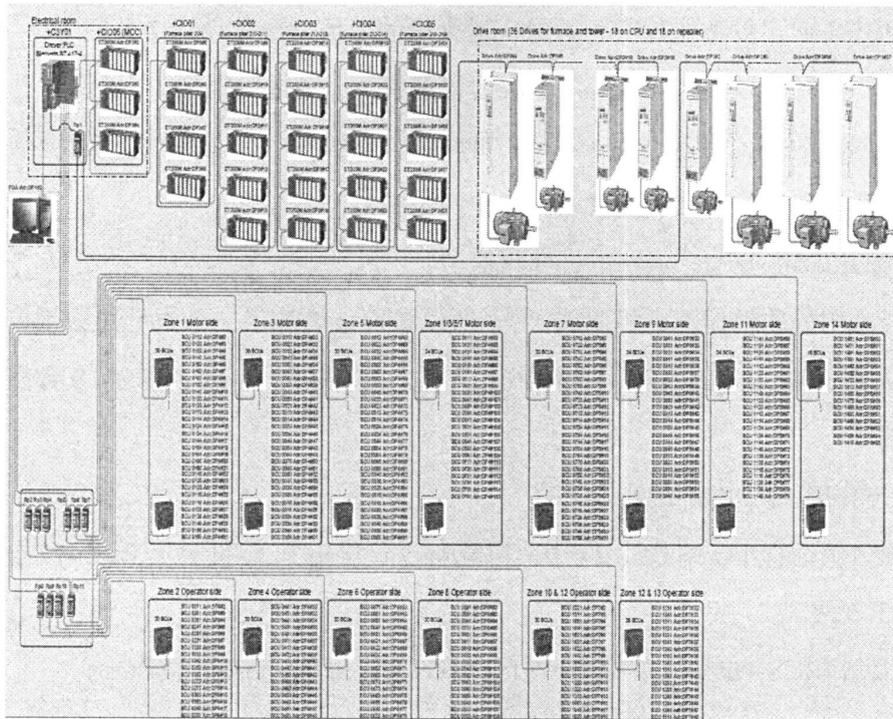


图 3.7 现场总线网络系统

Fig.3.7 network of process field bus

### 3.5 退火炉控制系统的功能

退火炉系统庞大、控制环节、检测点及干扰因素多，炉子热惯性大，炉内既有加热又有冷却，炉各部分区又有一定的耦合性和非线性，因此，为获得较好的控制效果，采用 PLC 控制技术配合工控机进行系统的检测及自动控制。<sup>[15]</sup>

退火炉内各段有不同的控制功能，具体罗列如下：

表 3.3 退火炉控制功能

Table 3.3 control function of furnace

炉段	设备	数量	功能
废气排放系统	排烟设备	6	主/从顺序
		3	压力闭环控制
	稀释设备	3	温度闭环控制
热量再利用系统		1	热量再利用控制闭环
		1	(温度或压力) 闭环控制
		1	水温 and 流量检测或控制闭环
		1	入口密封
入口密封		1	开关
		1	N2 通入
预加热段	风机	4	顺序

加热和均热段	烧嘴	384	顺序
	主管道天然气供	1 个系统	顺序
	区管道天然气供	14	顺序/控制闭环
	区助燃空气供应	14	顺序/控制闭环
	燃烧	14	空燃比控制
	区温	14 个区	控制闭环
	各种修正	14 套	控制闭环
	区冻结/释放	14	顺序
热凸度控制	区/换热器控制	3	顺序/控制闭环
缓冷段	区/换热器控制	2	顺序/控制闭环
	区/换热器	3	顺序/控制闭环
快冷段	边部挡板	6 套	顺序
	导向辊	4 套	顺序
	电加热	4 套	顺序/控制闭环
	H2 通入	1 套	顺序/控制闭环 模式 5%-20%选择
过时效段	电加热	12	顺序/控制闭环
终冷段	区/换热器	5	顺序/控制闭环
	边部挡板	6 套	顺序
	导向辊	4 套	顺序
带钢	温度	12	控制闭环
公用介质	冷却水	1 套	监测
	使用仪表	1 套	监测
	流体	1 套	数据交换
	线上数据	1 套	监测/顺序
冷却水系统	泵	1	顺序
	调节	1	控制闭环
保护气体	通入	7	控制闭环
	安全阀	8	控制闭环
分析仪	H2, O2, 露点	3 套	监测
混合站	N2 供应	1 套	监测
	H2 供应	1 套	顺序/控制闭环
	H2 含量	1 套	控制闭环
水淬段	泵/循环	2 套	顺序
	换热器	2 套	监测

---

挤干辊		2套	顺序
烘干	风机	2套	顺序
	蒸汽/水换热器	2套	控制闭环
纠偏系统（CPC）		8套	控制功能包括在纠偏单元里
张力		9套	与线上通讯

---

## 第四章 加热系统及控制方法的研究

### 4.1 加热系统的结构

带钢从一个安装在预热段出口的水平通道进入加热段。加热段共有三段，其中加热一段和加热二段分别是两个独立的炉室，加热三段及均热段同在一个炉室，底部的水平通道将他们之间相互连接。前两个炉室分别有 12 道次。第三个炉室分为 9 道次和 11 道次两段，前 9 个道次为加热三段，均热段 11 个道次中的前 4 个道次既可以用为加热也可用于均热，最后 7 个道次只能用于均热。

从设备属性和温度控制的角度，加热段和均热段共分 14 个区，加热段每段有 4 个区，共 12 个区。1 区和 2 区面向错层布置，其他区的布置与此相同。另外均热段由 13 区和 14 区组成。从带钢运行的方向看，传动侧和操作侧分别为 1、3、5、7、9、11、14 区和 2、4、6、8、10、12、13 区，传动侧共 6 层，操作侧共 5 层，每个区在每层布置 4 个或 6 个辐射管，14 个区一共有 384 套辐射管和烧嘴。各区烧嘴数量如表 4.1:

表 4.1 退火炉各区烧嘴数量  
Table 4.1 burner number of each zone

	加热一段				加热二段			
	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区	6 区	7 区	8 区
操作侧	36		36		36		36	
传动侧		30		30		30		30
	加热三段				均热段			
	9 区	10 区	11 区	12 区	13 区	14 区		
操作侧	24		24			16	合计烧嘴数量:	
传动侧		20		20	16		384 个	

加热系统的由如下几个系统构成:

- (1) 主燃气供应系统
- (2) 区燃气供应系统
- (3) 助燃空气供应系统
- (4) 烧嘴燃烧系统

(5) 废气系统

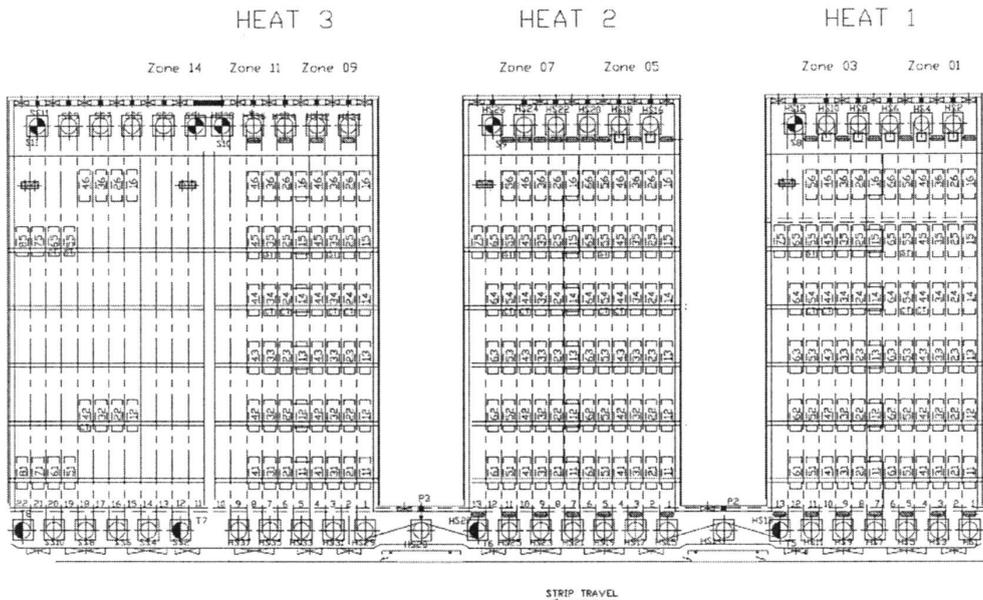


图 4.1 加热段分区及烧嘴布置剖视图（操作侧）

Fig.4.1 heating section divided principle (operate side)

4.1.1 主燃气控制系统

首钢冷轧连续退火机组使用燃气为天然气，天然气通过公辅的管网连接到厂房内，采用 3 个 T.O.P 点，分别连接到加热一段、二段、三段和均热段，实现对每一段的天然气供应。每一段的主燃气供应系统的设备组成为(以加热一段 031001 为例)：

- (1) 一个手阀和过滤器(031001-HV02,FL01)；
- (2) 一组高压开关/低压开关/本地压力表(031001-PSH01/PSL01/PI01)；
- (3) 一组带电磁阀控制关断的主切断阀和旁通阀(031001-SSV11/SSV13)；
- (4) 一个稳压阀(031001-PCV01)；
- (5) 一组稳压侧的压力变送器/温度变送器/流量测量/本地压力表  
(031001-PIT11/TT11/FIT11/PI02)；
- (6) 一组放散吹扫阀(031001-HV01/SSV12)；

以加热一段的主燃气供应系统为例，经过稳压为 1-4 区提供压力为 30KP,最大总流量为 2200Nm<sup>3</sup> 的天然气。启动主燃气供应时序时，旁通阀 SSV13 先打开，通过检测高压开关 PSH01 和低压开关 PSL01 的信号，系统能够判断主切断阀

SSV11 是否安全不漏气,进而开启主切断阀,稳压阀后面的对天然气的温度 TT11 和压力 PIT11 测量结果将作为流量测量 FIT11 的修正参数。<sup>[16]</sup>主燃气时序停止后,系统打开管道尾部的放散阀 SSV12 用氮气吹扫管道。

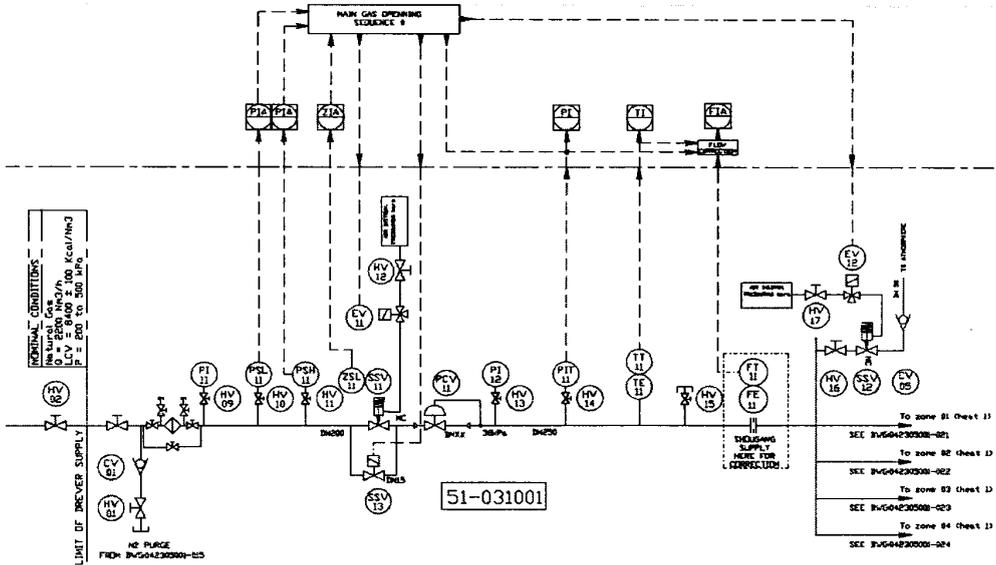


图 4.2 主燃气供应系统原理图

Fig.4.2 main gas supply principle

### 4.1.2 区燃气控制系统

主燃气供应到每个分区,由区燃气供应系统向该区的辐射管提供天然气。每个区燃气供应系统的设备组成为(以 1 区为例 030101):

- (1) 一个手阀(030101-HV01)
- (2) 两个带电磁阀控制关断的主切断阀(030101-SSV01/SSV02)
- (3) 一个气密控制器(030101-TC01)
- (4) 一个低压开关(030101-PSL01)
- (5) 一组流量控制阀和流量检测(030101-FCV01/FIT01)
- (6) 一组吹扫和放散阀(030107-SSV01, 030101-SSV03)

在为分区各个烧嘴提供天然气之前,为了保证管道和阀门的密封性足够好,首先利用 TC01 对两个主切断阀 SSV01 和 SSV02 进行气密性检测,然后利用 PSL01 和 SSV03 对 FCV01 进行气密测试,最后通过计算区燃气负载得出需要的

天然气流量，使用 FCV01 控制流量，使用 FIT01 进行流量检测形成对天然气供应的闭环控制。

特别的，由于对主切断阀的安全气密性要求非常高，因此 TC (tightness control) 的意义就十分重大，TC 的三根导压管分别接在 SSV01 的前、后及厂房外，在其内部有两个可以受控的小电动阀，通过开关小电动阀，测量导压管的压力就能检测出 SSV01 和 SSV02 是否安全。[17]

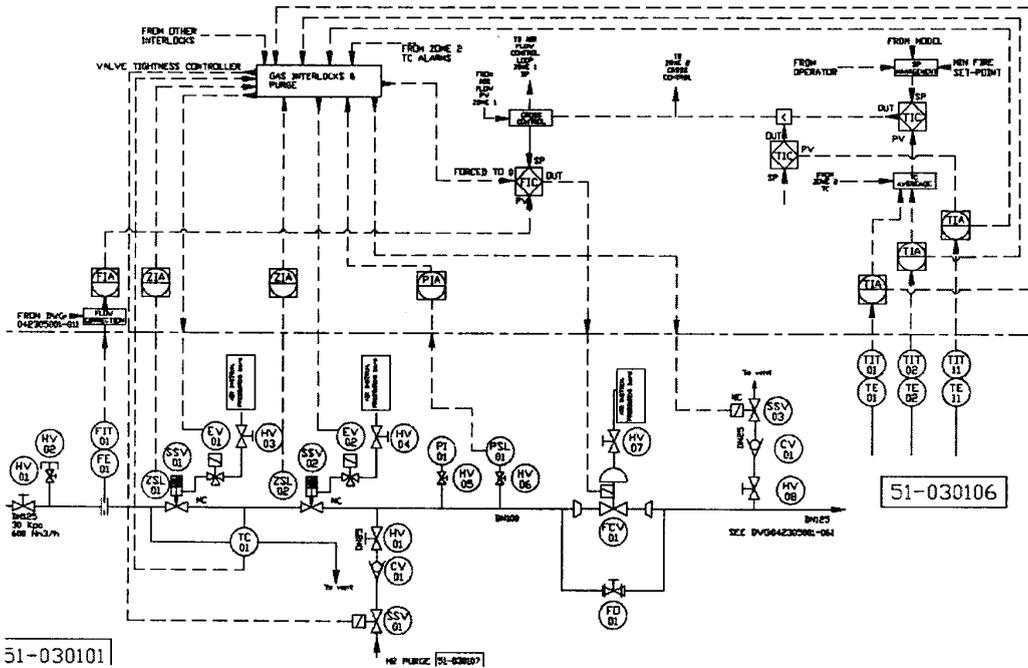


图 4.3 区燃气供应系统原理图  
Fig.4.3 zone gas supply principle

### 4.1.3 助燃空气控制系统

每个区都有一台助燃风机，它由变频电机驱动，根据控制系统的计算，风机提供该区所需助燃空气的流量，分配到每个烧嘴燃烧系统。空气的流量也有监控，形成闭环控制。

### 4.1.4 烧嘴燃烧系统

最终为退火炉的带钢提供热能的是每一个内部燃烧天然气而发热的辐射管，燃烧过程的实现由安装在辐射管内部的烧嘴来完成。每一个烧嘴的天然气支路接到该区的燃气管道。

烧嘴的两进气管路分别为助燃空气和燃烧气体（天然气），在助燃空气管路依次有限流孔板（FO）、流量计量孔板（FE），助燃空气进辐射管出口部分，通过换热器与废气交换热量之后温度升高后，与部分废气一起到达辐射管的入口部分（部分废气再次参与燃烧）。在燃气管路上依次有手动切断阀（HV）、流量计量孔板（FE）、限流孔板（FO）、安全切断阀（SSV）。烧嘴控制单元(BCU)控制辐射管入口燃气的安全切断阀的开/关。在主程序下达点火命令后，烧嘴控制单元将燃气管路的安全切断阀打开（助燃空气风机在准备启动区燃气时序前就已经打开提供空气），同时控制独立的点火变压器 HT 打火，将烧嘴点燃。UV 检测单元反馈火焰的情况给烧嘴控制器并通过 PROFIBUS-DP 与计算机控制系统通讯。

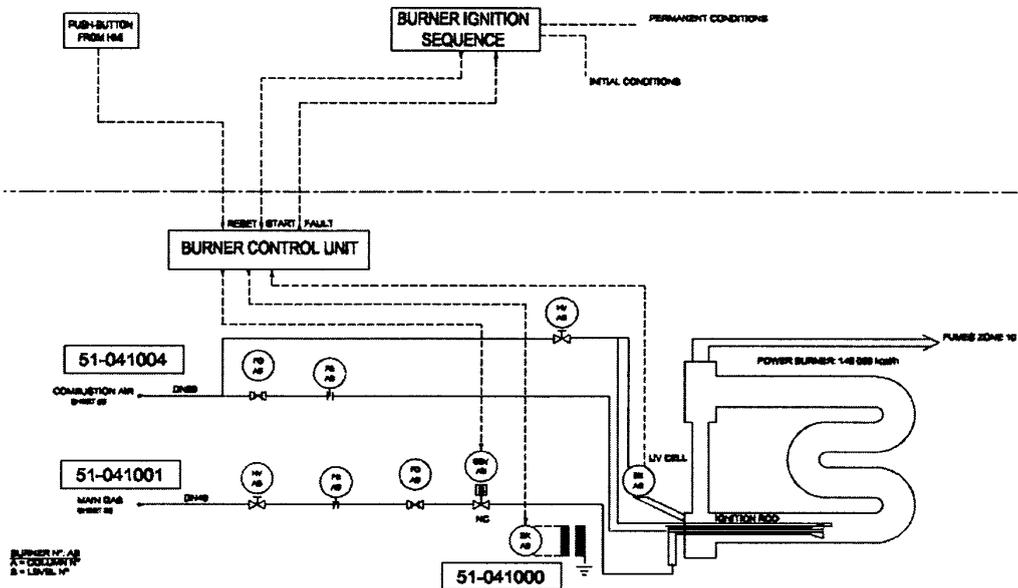


图 4.4 烧嘴燃烧系统

Fig.4.4 burner system

#### 4.1.4.1 烧嘴

首钢连续退火炉使用的烧嘴来自于 LBE，类型为带有内部空气预热器和电点火器的推拉式烧嘴。也就是助燃空气由助燃空气风机供给（推），同时燃烧废气由废气风机抽出（拉）到整个排烟系统。该类型的烧嘴的优点在于：容易控制的空/燃比；可在辐射管内保持持续的负压，以防止辐射管破裂时空气渗入炉内。此烧嘴的特点是空气预热温度高（可达 550℃），部分废气参与燃烧，NOx 排

放较低。

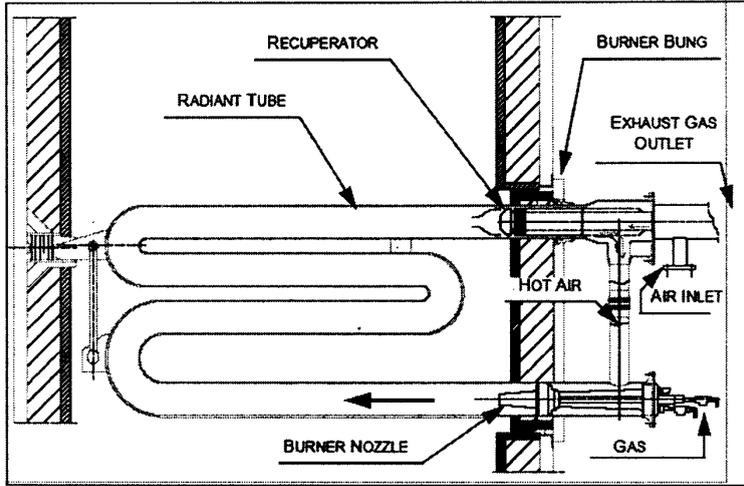


图 4.5 烧嘴示意图

Fig.4.5 burner

#### 4.1.4.2 辐射管

天然气在辐射管内燃烧,通过管壁进行热的辐射,达到间接加热带钢的目的。现在常用辐射管有 U 型管、W 型管、单 P 型管、双 P 型。

在首钢连续退火炉的设计上,DERVER 选用了 W 型管,辐射管在长度方向的温度偏差在 50℃ 以内。从每道次的辐射管数量来看,DREVER 在参与谈判的各家炉子商中为最少,为 11 个,其功率也较小(163kW),这符合工艺和设备安全提出的每道次的钢带加热量不应过大的原则。

#### 4.1.4.3 流量计量孔板

在调整烧嘴燃气流量时,可以直接显示孔板前后的差压值,如果需要可以根据差压值,通过计算表找出对应的流量。

#### 4.1.4.4 限流孔板

用于调整管道流量,使每个烧嘴流量一致。调整时,使用一字螺丝刀旋转孔板上方的螺母,改变流量。

#### 4.1.5 废气系统

各加热段每层辐射管的燃烧废气先集中在一个水平收集管内,每个加热段一

共 11 层收集管, 汇集到一个集气室, 通过终端的排烟风机将废气抽拉出厂外, 期间要经过热回收系统生成过热水实现热量回收利用, 另有稀释系统保证废气排出厂房的温度不超过  $260^{\circ}\text{C}$ 。

每个集气室内设有温度 (TE) 和压力 (PIT) 的检测与报警, 如果压力或者温度过高, 就会产生相应的压力或温度过高的报警信号并传送给相应加热区所在的加热段的关闭程序, 由其来进行处理。系统根据燃烧通入的天然气和助燃空气总流量, 计算各集气室的压力设定值, 并用于控制排烟风机的转速, 以形成闭环控制。

在每一个水平废气收集管上都有废气分析取样管。取样管与水平烟道通过手动阀连接。每个加热段的 11 个分析点的端口与一个废气分析柜连接, 对空燃比 ( $\text{O}_2$  含量) 和燃烧质量 ( $\text{CO}$  含量) 进行连续监测, 当  $\text{O}_2$  含量低于设定值时, 就对空燃比作微小的调节;  $\text{CO}$  含量监控用于评估燃烧质量, 当检测到  $\text{CO}$  含量被超出限制水平, 则产生报警。

## 4.2 加热系统控制方法-区负载控制 (zone load control)

首钢连续退火炉的燃烧控制方式为双交叉比例限幅控制。为保证混合物的氧化燃烧, 若热需求降低, 则先减少燃气量; 若热需求增加, 则先增加助燃空气量。基本控制思路就是: 控制系统根据带钢目标退火温度结合炉内带钢宽度、厚度、线速度等参数计算出每一段所需炉温设定值 ( $T_{\text{sp}}$ ), 比对目前实际炉温 ( $T_{\text{pv}}$ ), 生成各段的加热负载 ( $\text{Load}_{\text{final}}$ ), 从而控制燃气和助燃空气的流量。同时每段出口的高温辐射计连续测量带钢出口温度, 反馈给炉温控制作为修正。

退火炉所有烧嘴被分成 14 个控制区, 因为每两个区是面向布置, 交错在一起, 所以实际负载和温度控制的分区 (dual zone) 是 7 个区。

区负载控制共分 4 个部分:

- (1) 温度控制管理 (temperature control management)
- (2) 高温计修正 (pyro correction control)
- (3) 交叉控制 (Cross control)
- (4) 烧嘴使用管理 (Burner count)

## 4.2.1 温度控制管理

主要功能：一方面对热电偶的测量结果进行过滤修正，一方面管理不同模式下的炉温设定值，同时考虑设备过热问题，最终比较实际值和设定值，得出控制偏差，经过 PID 换算成区负载。

### 4.2.1.1 实际炉温的测量与修正

每个烧嘴分区有 2 个热电偶来监测炉温,这样每个温度控制分区就有 4 个测温热电偶来反馈实际的炉温状况。<sup>[18]</sup>

温度的变化具有滞后性，尤其连续退火炉容积大、在带钢通过期间，炉内气氛流通较快，局部会造成温度的不均匀性，因此，如何尽可能准确的反映炉温，进而更好的控制炉温，以达到带钢的退火温度，成为退火炉燃烧控制的重要前提。

这里对 4 个热电偶的测量结果进行了科学修正。最大程度的减少热电偶测量不准确带来的控制偏差（以 1&2 区为例）。

设 4 个热电偶的测量结果分别为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ ，我们引入参数  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$  和  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_4$ ，并规定当热电偶有读数 ( $T \neq 0$ ) 时，对应的  $m=1$ ，否则  $m=0$ 。 $n$  是热电偶读数的影响系数，实际炉温：

$$T_{PV} = \frac{m_1 * n_1 * T_1 + m_2 * n_2 * T_2 + m_3 * n_3 * T_3 + m_4 * n_4 * T_4}{m_1 * n_1 + m_2 * n_2 + m_3 * n_3 + m_4 * n_4} \quad (4-1)$$

$$T_{ave} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} \quad (4-2)$$

如果  $|T - T_{ave}| > \Delta HH$ , 则  $n=0$

$|T - T_{ave}| < \Delta H$ , 则  $n=1$

$\Delta H < |T - T_{ave}| < \Delta HH$ , 则  $n = 1 - \frac{|T - T_{ave}| - \Delta H}{\Delta HH - \Delta H}$

其中： $\Delta HH$  和  $\Delta H$  为经验值，考虑温度偏差，目前系统设定为

$\Delta HH=40^\circ\text{C}$ ， $\Delta H=20^\circ\text{C}$

经过修正得到  $T_{pv}$ ，克服热电偶本身的仪表故障和误差，所以结果是比较可靠的。

### 4.2.1.2 炉温设定模式

(1) 操作员模式 (OP)，操作工可以根据经验，手动输入目标炉温

(2) 数学模型模式 (MM)，由数学模型根据工况及来料等自动生成目标炉温<sup>[19]</sup>

(3) 操作员+高温计反馈(OP +PYRO)，在操作工的输入基础上，根据炉内带温的实际温度，反馈换算对炉温进行修正。

(4) 保温模式 (stand-by)，停车时，操作工手动切换到保温模式，防止带钢产生瓢曲，保温模式的温度可以根据钢种提前设定好，一般在 550℃。

另外考虑对设备的保护，专门设计设备过温控制，即辐射管温度、炉温和废气的实际温度都有报警上限，一旦超过报警值，温度控制器就会做出相应的调整，降低负载输出，以保证设备的安全。<sup>[20]</sup>

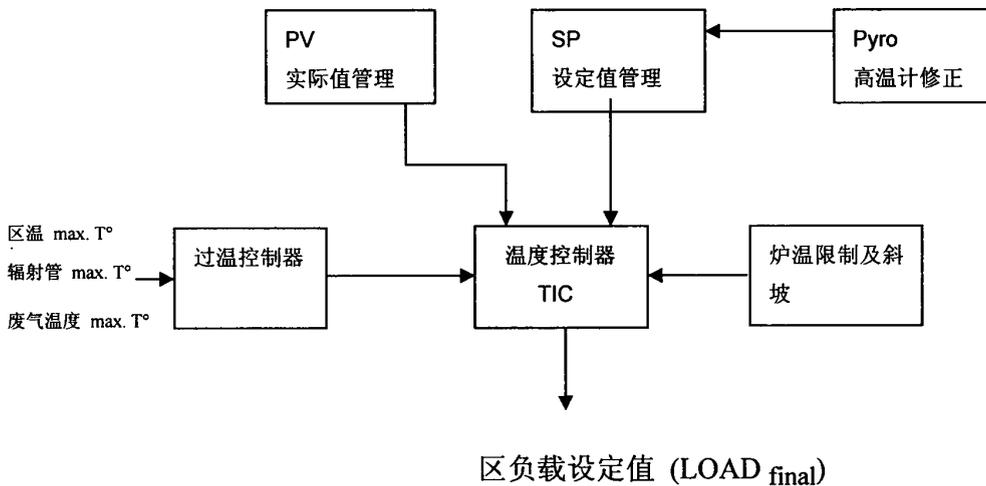


图 4.6 温度控制

Fig.4.6 temperature control

### 4.2.1.3 炉温设定限制及斜坡

1)考虑安全性及工艺要求，炉温的设定值受炉内气氛的限制：

当炉内 O<sub>2</sub> 含量不低于 4000ppm 时，炉温设定值不允许超过 260℃

当炉内 H<sub>2</sub> 含量不高于 1%时，炉温设定值不允许超过 600℃。

2)炉壳等设备在低温条件下，不允许骤然加热，因此 DERVER 对炉温设定值的温升进行了限制：

表 4.2 温度设定值限制

Table 4.2 limitation of temperature set point

控制区 (实际温度)	最大允许温升斜坡	最大偏差
< 550 °C (下降滞后 10 °C)	3 °C/min	20 °C
> 550 °C (下降滞后 10 °C)	6 °C/min	25 °C
> 680 °C	600 °C/min	40 °C

上表表明，在炉温低于 550 °C 时，无论目标炉温是多少，炉温设定值每分钟最大允许的温升是 3°C，这样，炉温控制器不会直接按照目标温度与实际温度的差值进行负载控制，否则，在点火烘炉阶段，控制器会一直保持 100% 的负载输出，这样会对炉壳冲击过大，导致设备过早老化。

### 4.2.2 高温计修正

控制系统中的高温计 PID 控制模块，通过高温计测量每个温度控制区域出口的带钢温度，与带钢的退火温度比对偏差，生成控制器输出 Out。如果此时操作工选择了操作员+高温计反馈(OP +Pyro)模式，控制系统会根据下面的公式，计算出高温计给温度控制器的修正温度

$$Pyro_{cor} = \frac{Out - 50}{50} \cdot T_{Lim} \tag{4-3}$$

其中  $T_{Lim} = 5^\circ\text{C}$ ，为高温计修正温度正系数。

### 4.2.3 双比例交叉限幅控制

退火炉的炉温控制采用了温度-流量的串级控制系统；为了满足燃烧要求，供气适宜，在此基础上将燃气流量作为主流量，空气流量作为从流量组成比值控制系统。为了使燃料用量最小和充分燃烧，还应在上述控制方案的基础上增加两个选择器组成逻辑选择功能的控制系统。



则其放大倍数为正，由于燃气对象和其测量变送器的放大倍数都为正，为了保证副环内所有放大倍数乘积为负，流量控制器 1 应选择反作用。同样的，在以空气为被控对象的回路当中，除控制器外所有放大倍数都为正，则流量控制器 2 应选择反作用。

主回路（温度）：主控制器的正、反作用要根据主环所包括的各个环节的情况来确定，主环内包括有主控制器、副回路、主对象和主变送器。而将副回路视为“正”环节来看待，实际上主变送器放大倍数符号一般情况下都是“正”的，因此主控制器的正反作用只取决于主对象放大倍数的符号。则由此主回路可知主对象放大倍数的符号为正，则温度控制器应选择反作用。

高选器（H）：在提高负荷时，温度产生负偏差。由于主控制器为反作用，则控制器输出正偏差。因为先提空气量，再提燃料量，则这时应该对空气先进行控制，逻辑选择器应选择高选器。

低选器（L）：在降负荷时，温度产生正偏差。由于主控制器为反作用，则控制器输出负偏差。因为先将燃料量，再降空气量，则这时应该对燃料先进行控制，逻辑选择器应选择低选器。

交叉控制的目的是根据负载要求，管理燃气流量和助燃空气流量的控制器的设定值，以达到目标空燃比，同时根据实际工况反馈的状态，保证燃烧始终处于微过氧状态。

### 4.2.3.1 助燃空气流量控制

根据最大选择原则，助燃空气控制器的输出设定值：

$$AirFlow_{SP} = MAX(GasFlow_{PV} \times Ratio, AirFlow_{Conv}) \quad (4-4)$$

$$AirFlow_{Conv} = Ratio \times GasFlow_{Conv} \quad (4-5)$$

$AirFlow_{Conv}$  = 根据燃气流量设定值和空燃比换算出的助燃空气流量

$GasFlow_{sp}$  = 根据负载计算出的燃气流量设定值

$$GasFlow_{PV} = Q_{Gas} \times \sqrt{\frac{101300 + P}{101300 + P_0} \times \frac{273 + T_0}{273 + T}} \quad (4-6)$$

其中补偿后的燃气实际流量

$Q_{Gas}$  = 现场测量值

$P$  =燃气管路压力测量值

$P_0$  =参考压力 (12750 Pa)

$T$  =燃气管路温度测量值

$T_0$  =参考温度 (30℃)

流量测量是比值控制系统的基础，对于气体流量采用差压法测量时，若实际工况的温度、压力参数与设计条件不一致，将会影响测量精度。退火炉气体的温度、压力变化较大，并且对控制要求较高，故系统中增加了温度压力的软件补偿。

本系统是采用孔板来检测气体的流量，工艺专业设计选型时都认为在标准状态下进行的。所谓标准状态就是：压力稳定在工作压力，温度保持在 30℃左右的工作环境。当退火炉工作时，预热空气压力和温度都会变化，从而影响到实际的空气流量；天然气也一样。所以必须把它们换算成标态下的流量，按设定的空燃比进行配置它们的流量，才能真正实现最优燃烧。因此要对预热空气和天然气进行温压补正，这是由孔板流量测量原理决定的。

### 1、空燃比

空燃比的获得，主要根据两方面：<sup>[23]</sup>

(1) 废气中过氧量（根据不同负载跟定不同的氧含量值）

(2) 烧嘴工作的数量

$$Ratio = V_{ae} * BrnCor \tag{4-7}$$

$Ratio$  =最终应用的空燃比

$V_{ae}$  =参考氧含量得到的空燃比

$BrnCor$  =根据烧嘴工作数量得到的修正系数

### 2、过氧量

为了有一个合适的燃烧质量并且尽可能少的 CO，实际空燃比必须略高于理想空燃比。过氧化量的计算是根据废气中的氧含量来计算的，而氧含量的设定值是根据烧嘴特性并伴随负载的变化而变化的参数，已经设定，不允许改变。

表 4.3 过氧量设定

Table 4.3 set point for excess O<sub>2</sub>

负载 (%)	0	10	13	23	33	50	100
O <sub>2</sub> SP (%)	16	16	14	10	6	4	2

注：当区温小于 580℃时，O2SP 被锁定在 14%，只有当区温高于 600℃之后，O2SP 才会按照上表继续生效

$$V_{ae} = \left( \frac{O_{2SP}}{21 - O_{2SP}} \cdot \frac{V_{fs}}{V_{as}} + 1 \right) V_{as} \quad (4-8)$$

$V_{fs} = 9.323$ ，干烟气与燃气的比值

$V_{as} = 10.57$ ，助燃空气与燃气的理论比值

（公式的推导详见第二章 热工理论计算）

$$Brn_{Cor} = 1 + Ra \square Brn_{Avail} \quad (4-9)$$

$Ra = 1.15$  修正系数，

$Brn_{Avail}$  = 可以工作，但没有投入使用的烧嘴数量

#### 4.2.3.1 燃气流量控制

$$GasFlow_{SP} = MIN(AirFlow_{PV} \square Ratio, GasFlow_{Conv}) \quad (4-10)$$

$$AirFlow_{PV} = Q_{Air} \square \sqrt{\frac{101300 + P}{101300 + P_0} \cdot \frac{273 + T_0}{273 + T}} \quad (4-11)$$

其中  $AirFlow_{PV}$  = 修正后的助燃空气实际流量

$Q_{Air}$  = 现场测量值

$P$  = 助燃空气管路压力测量值

$P_0$  = 参考压力（12750 Pa）

$T$  = 助燃空气管路温度测量值

$T_0$  = 参考温度（30℃）

$$GasFlow_{Nom} = \frac{Brn_{Power} \square Brn_{Tot}}{LCV_{Gas}} \quad (4-12)$$

$$GasFlow_{Conv} = Ratio \square AirFlow_{Conv} \quad (4-13)$$

$Brn_{Power} = 140000$  Kcal/h, 烧嘴功率

$Brn_{Tot}$  = 烧嘴总数量

$LCV_{Gas} = 8400$  Kcal/Nm<sup>3</sup>，燃气的低热值

#### 4.2.4 烧嘴管理

因为烧嘴的点火成功与否，受三种因素影响：燃气的流量、点火时的环境温

度、助燃空气的温度等，前面已经介绍过，W型辐射管已经将助燃空气预热，这样方便点火。同时，在不同温度下，烧嘴点火成功所需要的燃气流量是不同的。尤其是在低温、低负载下，烧嘴的点火往往比较困难。DERVER公司设计了烧嘴管理系统为低负载下的区温控制及烧嘴的工作提供解决方案。

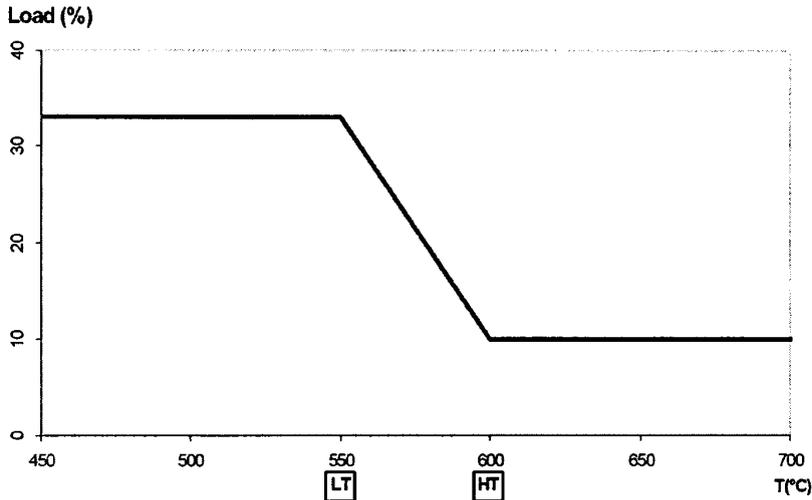


图 4.8 负载与温度关系

Fig.4.8 the relation between load and temperature

图 4.8 说明了在不同温度下（尤其低温 600°C 以下），启动一个烧嘴所需要的最低功率。在 LT（550°C）和 HT（600°C）是温度的参考点（由烧嘴供应商 LBE 提供），当炉温小于 550°C，若想启动一个烧嘴点火，必须得等到负载设定值超过 33% (MinLoadBurnLT)，当炉温超过 600°C，负载设定值只要达到 10% (MinLoadBurnHT)，就能满足点火需求。在 550°C 与 600°C 之间，所需最小负载值，呈线性关系变化。事实上，实际单个烧嘴点火所需最小负载由下面的公式确定：

$$MinLoad_b = MIN \{ MAX (MinLoad_{BurnHT}, Load_r), MinLoad_{BurnLT} \} \quad (4-14)$$

$$Load_r = \frac{MinLoad_{BurnHT} - MinLoad_{BurnLT}}{HT - LT} \times (T_{PV} - LT) + MinLoad_{Burn} \quad (4-15)$$

$T_{PV}$  = 实际炉温

$$NbBrn_{Calc} = \frac{Load_{final}}{MinLoad_b} \times Brn_{Tot} \quad (4-16)$$

$NbBrn_{Calc}$  = 为需要点火烧嘴的数量，

$Brn_{Tot}$  = 整个区烧嘴总数

这样就可以根据炉温和负载需要,计算出需要点火烧嘴的数量。每个区烧嘴启动的先后顺序,由工程师提前在控制画面上确定。

### 4.3 现有加热控制系统问题

#### 4.3.1 根据炉温控制流量的稳定性

燃烧过程是受随机因素干扰的、具有大惯性、纯滞后的非线性分布参数的随即过程。对于这种复杂的控制对象,即使是经验丰富的操作工人,也很全面的考虑各种因素的影响,准确地控制燃烧过程,使得炉温经常偏高或是偏低。这些都严重影响了退火炉的加热质量和能耗,甚至影响正常的生产。炉温的控制中,如何能够准确快速的确定燃气流量和空气流量是最关键的要素。因此,必须提高退火炉的炉温-流量控制水平,建立炉温的自动控制系统。

根据前面的研究,加热控制系统经过计算给出的只是一个区的实际空燃比,也就是说系统只能控制调整整个区的燃气流量和空气流量,至于具体到该区的单个烧嘴的燃气流量和空气流量,控制系统是无能为力的,这就需要现场调节单个烧嘴保证彼此之间的空气流量和天然气流量一致,否则如果单个烧嘴空燃比过大和过小都将导致不良后果,前者使烟气体积增大,燃烧温度低,后者使燃料的化学热能不能充分发挥,不完全燃烧损失增大,使理论燃烧温度降低,同时不完全燃烧会生成大量的 CO,在烧嘴出口积碳,时间长了,甚至会烧坏辐射管。

#### 4.3.2 烧嘴点火的问题

在传统的燃烧控制方式中,加热一般是通过调节燃料和空气的流量使之充分混合、燃烧来完成的,即在加热的过程中,燃料和空气的流量是连续变化的。但在燃料热值较高,或者炉子加热负荷需求较小时,使用少量的燃料就可以满足热处理工艺的要求,因此燃料和空气的流量都比较小,输送燃料的管路截面也比较小,如果采用连续燃烧的方式进行控制,控制燃气流量的碟阀就要做得很小,而控制系统的响应能力无法满足流量变化的需要,因此控制温度的误差是较大的。

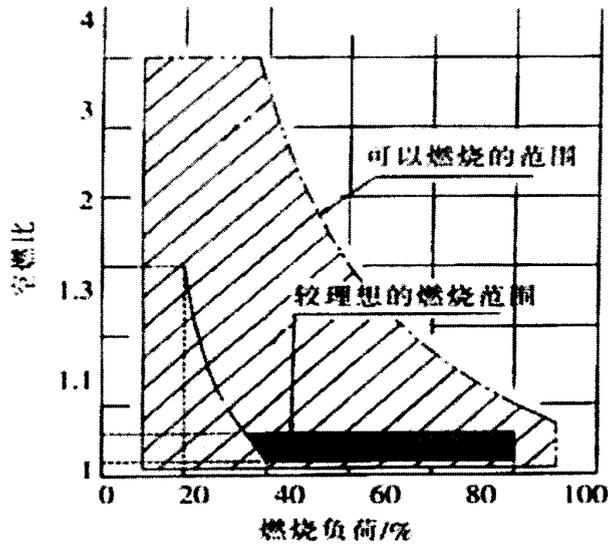


图 4.9 燃烧与负载

Fig.4.9 combustion-load curve

图 4.9 为比例燃烧控制的燃烧特性曲线，横轴为燃烧负荷，竖轴为空气比（空气过剩系数），从图中可以看出，当燃烧负荷低于 40% 时，为了满足稳定燃烧，空气过剩系数增大，这就意味着燃烧气体中空气量增多，这样过剩空气带走废气中的热量，降低了燃烧效率，浪费了能源。

根据第四章的研究，烧嘴点火的个数与负载的大小有关，只有超过某一负载（33%），每个区的烧嘴才会全部工作，在低温低负载下，每个区只有若干烧嘴点火，并且天然气流量比较小，在传统的交叉限幅串级燃烧控制技术中，燃料和空气的流量是连续配比变化的。这种燃烧控制方式虽然技术成熟、应用广泛，但对于“小流量”，控制阀受死区存在的影响，不能很好的去控制，控制系统的响应能力也无法满足这种流量变化的需要，因此控温精度偏差较大。另外低温状态下，局部烧嘴点火的状态会造成炉内温度场分布不均匀的问题，难以满足具有特殊要求的热处理工艺的需要。<sup>[24]</sup>



此页不缺内容

此页不缺内容

## 第五章 加热控制系统的改造

### 5.1 应用模糊 PID 控制改善炉温控制

连续退火炉作为连续退火机组的核心设备，因其体积庞大，设备种类多，控制工艺复杂，目前都还是引进国外的技术。连续退火工艺中，带钢的加热技术综合了加热相关设备的管理、燃烧控制、炉温控制等方面的应用，炉温控制的快速、有效及均匀与否，直接影响了带钢的退火质量。但是，退火炉炉燃烧过程是一个具有典型的多变量、慢时变、非线性、强耦合、大惯性和纯滞后等特点的复杂工业过程，同时，由于炉温分布难以测量，外界扰动因素较多，因此，很难对其进行准确的建模和控制。目前实际生产中，对于炉温的控制一般采用 PID 控制算法，但是，传统的 PID 控制是建立在被控对象具有精确的数学模型上，而实际中炉温的精确数学模型是很难建立的，因此，对于控制非线性、时变、耦合及参数和结构不确定的复杂过程时，PID 参数较难整定，控制效果不是很好。

模糊控制是一种近年来发展起来的新型控制方法，其优点是不要求掌握受控对象的精确数学模型，而根据专家经验形成控制规则表，然后由该表决定控制量的大小。因此，对于退火炉炉温这样的控制对象有着较好的适应性和鲁棒性。本文将 PID 控制方法与模糊控制策略相结合，构成模糊 PID 控制方法，利用模糊控制策略整定 PID 参数，使连续退火炉的炉温控制达到较高的稳态性能。<sup>[31]</sup>

#### 5.1.1 模糊 PID 控制器设计

本文采用二维模糊控制器，把退火炉温度变化  $e$  和温度的变化率  $ec$  作为模糊控制器的输入量，将 PID 的参数变化量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  作为模糊控制器的输出。模糊 PID 控制器以偏差  $e$  和  $ec$  作为输入，可以满足不同时刻的  $e$  和  $ec$  对 PID 参数自整定的要求。利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改，便构成了模糊 PID 控制器，其结构如图 5.1 所示。

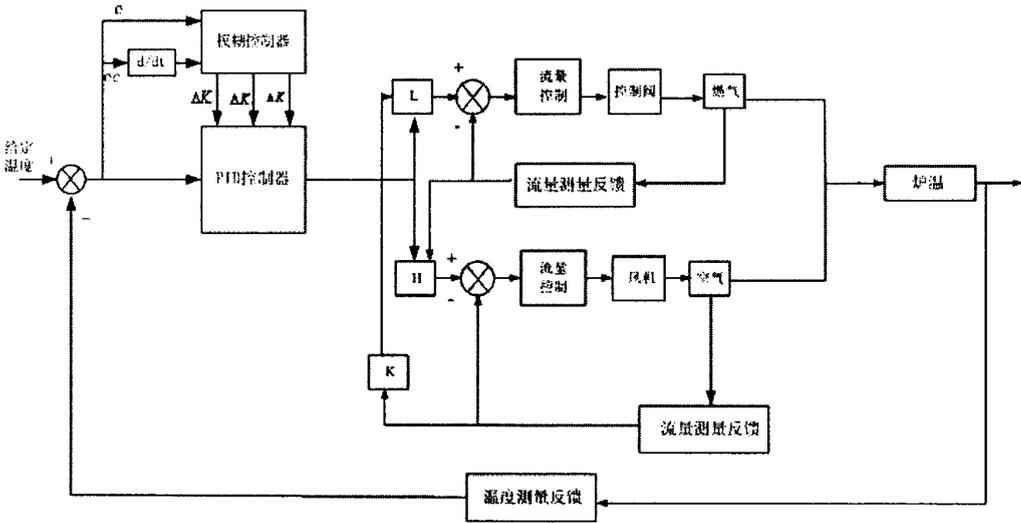


图 5.1 模糊 PID 控制器结构

Fig.5.1 Structure of fuzzy PID controller

### 5.1.1.1 精确量的模糊化

首先将系统的输入即退火炉的炉温以及炉温变化的精确量转化为模糊量，该过程称为模糊化，或称为模糊量化。模糊化的作用是把一个精确的输入变量通过定义在其论域上的隶属度函数计算出其属于各模糊集合的隶属度，从而将其转化为一个模糊变量。

设  $e$  的基本论域为  $[-x_e, +x_e]$ ， $ec$  的基本论域为  $[-x_{ec}, +x_{ec}]$ ，设  $e$  的模糊子集的论域为  $\{-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ ， $ec$  的模糊子集的论域为  $\{-m, -m+1, \dots, 0, \dots, m-1, m\}$ 。则温度变化  $e$  和变化率  $ec$  的量化因子  $K_e$  和  $K_{ec}$  可由下面两个公式来确定：

$$K_e = n/x_e \tag{5-1}$$

$$K_{ec} = m/x_{ec} \tag{5-2}$$

量化因子  $K_e$  和  $K_{ec}$  对控制系统的动态性能影响很大。从理论上讲， $K_e$  增大，相当于缩小了偏差的基本论域，增大了偏差变量的控制作用，虽然能使上升时间变短，但由于超调大，使得系统的过渡过程变长； $K_{ec}$  对超调的遏制作用十分明显，选择越大系统超调越小，但系统的响应速度会变慢。

本文根据连续退火炉的现场生产要求，选取误差  $e$  的基本论域为： $[-50^\circ\text{C}, +50^\circ\text{C}]$ ，设其量化论域为  $[-6, 6]$ ，则量化因子  $K_e = 6/50 = 0.12$ ；温度变化速率  $ec$  的基本论域为： $[-12^\circ\text{C}, 12^\circ\text{C}]$ ，其量化论域为  $[-6, 6]$ ，则其量化因子

$K_{ec} = 6/12 = 0.5$ ;  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  所取的模糊子集的论域确定为:  $[-0.06, 0.06]$ 。

### 5.1.1.2 控制规则设计

控制规则的设计是设计模糊控制器的关键, 一般包括: 选择描述输入输出变量的词集, 根据各模糊变量的模糊子集和现场的专家规则建立模糊控制器的控制规则。

#### (1) 描述输入输出变量的词集

根据系统的实际需要, 将温度的变化  $e$  和温度变化率  $ec$  以及 3 个输出  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  都采用七个词集描述, 其模糊子集为  $e, ec, \Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 子集中元素分别代表负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。

#### (2) 选择模糊变量的模糊隶属度函数

定义模糊子集, 就是要确定模糊子集的隶属度函数曲线的形状。常用的隶属函数有矩形分布、梯形分布、三角形分布、柯西分布和正态分布等。隶属函数曲线的形状会导致不同的控制特性, 隶属度函数曲线形状较尖的模糊子集分辨率较高, 控制灵敏度也较高; 相反, 隶属度函数曲线形状较缓, 控制特性也较平缓, 系统稳定性也较好。因此在选择模糊变量的模糊隶属度函数时, 在误差较大的区域采用低分辨率的模糊集, 在误差较小的区域采用高分辨率的模糊集。

$e, ec, K_p, K_I$  和  $K_D$  的隶属度函数表如表 5.1 和表 5.2 所示。表中值表示论域中的值对应每个模糊集的隶属度。

表 5.1 e, ec 的隶属度函数表

Table 5.1 Membership functions of e and ec

论域 模糊集	-6	-4	-2	0	2	4	6
NB	1.0	0.4	0	0	0	0	0
NM	0.4	1	0.4	0	0	0	0
NS	0	0.4	1	0.4	0	0	0
O	0	0	0.4	1	0.4	0	0
PS	0	0	0	0.4	1	0.4	0
PM	0	0	0	0	0.4	1	0.4
PB	0	0	0	0	0	0.4	1

表 5.2  $K_p$ 、 $K_I$  和  $K_D$  的隶属度函数表

Table 5.2 Membership functions of  $K_p$ 、 $K_I$  and  $K_D$

论域 模糊集	-0.06	-0.04	-0.02	0	0.02	0.04	0.06
NB	1.0	0.3	0	0	0	0	0
NM	0.3	1	0.3	0	0	0	0
NS	0	0.3	1	0.3	0	0	0
O	0	0	0.3	1	0.3	0	0
PS	0	0	0	0.3	1	0.3	0
PM	0	0	0	0	0.3	1	0.3
PB	0	0	0	0	0	0.3	1

(3) 建立模糊控制规则

模糊控制器的控制规则是基于现场经验形成的,其控制策略又是人们通过学习试验以及长期积累经验而逐渐形成的存贮在操作者头脑中的一种技术知识集合。利用模糊集合理论和语言变量的概念,可以把利用语言归纳的手动控制策略上升为数值运算,于是可以采用计算机完成任务以代替手动控制,实现所谓的模糊自动控制<sup>[25, 26, 27]</sup>。

PID 参数模糊自整定是找出 PID 三个参数与退火炉温度偏差和温度偏差变化之间的模糊关系,在运行中通过不断检测温度偏差和计算偏差的变化,根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线修改,以满足不同温度设定和温度偏差及偏差变化时对控制参数的不同要求,从而使被控对象有良好的动、静态性能。PID 参数

的整定必须考虑到在不同时刻三个参数的作用以及它们之间的耦合关系。针对不同的  $e$  和  $ec$ ， $K_p$ 、 $K_I$  和  $K_D$  的整定原则为：

(1) 当  $|e|$  较大时，为使系统具有较好的跟踪性能，应取较大的  $K_p$  与较小的  $K_D$ ，同时为避免系统响应出现较大的超调，应对积分作用加以限制，通常取  $K_I = 0$ 。

(2) 当  $|e|$  和  $|ec|$  中等大小时，为使系统具有较小的超调， $K_p$  应取小一些，在这种情况下， $K_D$  的取值对系统的影响较大，应取小一些， $K_I$  的取值要适当。

(3) 当  $|e|$  较小时，为使系统具有较好的稳定性能， $K_p$  和  $K_I$  均应取大些，同时为避免系统在设定值时出现震荡，并考虑系统抗干扰的性能，当  $|ec|$  较大时， $K_D$  可取小些； $|ec|$  较小时， $K_D$  可取得较大些。通常  $K_D$  为中等大小。

由现场技术人员调节连续退火炉温度的实际操作经验和以上 PID 参数的整定规则，另外结合本课题中实际退火炉温度对象的控制特点，分别建立了  $K_p$ ， $K_I$ ， $K_D$  三个参数整定的控制规则表，如表 5.3—5.5 所示。

表 5.3 模糊变量  $\Delta K_p$  的模糊规则表

Table 5.3 The fuzzy controlling rule of  $\Delta K_p$

e	ec						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	O	O
NM	PB	PB	PM	PS	PS	O	NS
NS	PM	PM	PM	PS	O	NS	NS
O	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	PS	PS	O	NS	NS	NM	NM
PM	PS	O	NS	NM	NM	NM	NB
PB	O	O	NM	NM	NM	NB	NB

表 5.4 模糊变量 $\Delta K_I$ 的模糊规则表

Table 5.4 The fuzzy controlling rule of  $\Delta K_I$

e	ec						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	O	O
NM	NB	NB	NM	NS	NS	O	O
NS	NB	NM	NS	NS	O	PS	PS
O	NM	NM	NS	O	PS	PM	PM
PS	NS	NS	O	PS	PS	PM	PB
PM	O	O	PS	PS	PM	PB	PB
PB	O	O	PS	PM	PM	PB	PB

表 5.5 模糊变量 $\Delta K_D$ 的模糊规则表

Table 5.5 The fuzzy controlling rule of  $\Delta K_D$

e	ec						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	O
NS	O	NS	NM	NM	NS	NS	O
O	O	NS	NS	NS	NS	NS	O
PS	O	O	O	O	O	O	O
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

根据所整定出的 49 条模糊控制规则进行  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  三个参数的校正。

49 条模糊控制规则如下：

(1) If (e is NB) and (ec is NB) then ( $\Delta K_p$  is PB)( $\Delta K_I$  is NB)( $\Delta K_D$  is PS)

(2) If (e is NB) and (ec is NM) then ( $\Delta K_p$  is PB)( $\Delta K_I$  is NB)( $\Delta K_D$  is NS)

.....

(49) If (e is PB) and (ec is PB) then ( $\Delta K_p$  is NB)( $\Delta K_I$  is PB)( $\Delta K_D$  is PB)

### 5.1.1.3 模糊推理和解模糊方法

模糊控制器的输入分别为  $e$  和  $ec$ ，输出分别为 PID 的三个调节参数  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$ ，在获得了三个参数的模糊控制规则后，接下来要根据模糊理论进行模糊推理，求得相应的  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  的三个控制表，具体过程详述如下：

(1) 合成推理算法

控制器的控制规则一般写成如下推理形式：

$$\text{if } E = E_i \text{ and } EC = EC_j \text{ then } K_x = K_{xij} \tag{5-3}$$

式中:  $i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n, x=P,I,D$ 。

式(5-3)一般可用一个  $E_i \times EC_j$  到  $K_{xij}$  的模糊关系 R 来描述, 即:

$$R = E_i \times EC_j \times K_{xij} \tag{5-4}$$

根据模糊数学理论, “ $\times$ ”运算的含义定义如下:

$$\mu_R(e, ec, k_x) = \vee [\mu_{E_i}(e) \wedge \mu_{EC_j}(ec) \wedge \mu_{K_{xij}}(k_x)] \tag{5-5}$$

如果偏差和偏差变化率分别取 E 和 EC, 则 Fuzzy 控制器给出的控制量的变化由模糊推理合成规则算出:

$$K_x = (E \times EC) \bullet R \tag{5-6}$$

$$\text{即: } \mu_{k_x}(K_x) = \vee [\mu_R(e, ec, k_x) \wedge \mu_E(e) \wedge \mu_{EC}(ec)] \tag{5-7}$$

根据已有的模糊控制规则, 可以按照式(5-4)和(5-5)把相应的模糊关系 R 求出来; 反之, 若系统的模糊关系 R 已知时, 就可根据输入 e 和 ec 利用公式(5-6)和(5-7)求出输出的调整表。

(2) 解模糊

由式(5-6)和(5-7), 设

$$D_k = E_i \times EC_j \tag{5-8}$$

式中:  $i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n, k=1,2,\dots,m \times n$ 。

$$\text{则: } \mu_{E_i \times EC_j}(e, ec) = \mu_{E_i} \times \mu_{EC_j} \tag{5-9}$$

由式(5-9)可以得到模糊集  $D_k$ , 将  $D_k$  改写成  $D_k^T$  形式, 即将  $D_k$  的第一行元素按列的次序写下后, 再将第二行的元素接着往下写, 其它行类推。

$$R_k = D_k^T \times K_{xk} \tag{5-10}$$

当  $R_k$  均求出后, 则:

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_k \tag{5-11}$$

求出模糊控制器输出  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  的模糊子集后, 接下来要进行模糊判决。解模糊的方法很多, 常用的有最大隶属度法, 中位数法, 加权平均法等<sup>[28, 29]</sup>。

本文采用加权平均的解模糊判决方法, 选取隶属度函数作为加权系数, 则判别结果可表述为:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_U(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_U(z_i)} \tag{5-12}$$

表 5.6—表 5.8 给出了  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$  和  $\Delta K_D$  的模糊调整控制表。

表 5.6  $\Delta K_p$  参数的模糊调整控制表

Table 5.6 Fuzzy tuning control table of  $\Delta K_p$

$e$	$ec$												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	6	6	6	5	4	4	4	3	2	2	2	1	0
-5	6	6	6	5	4	4	4	3	2	1	1	1	0
-4	6	6	6	5	4	4	4	3	2	1	0	0	0
-3	5	5	5	5	4	3	3	2	1	0	-1	-1	-1
-2	4	4	4	4	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-2
-1	4	3	3	3	3	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3
0	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4
1	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4
2	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4
3	1	1	1	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-5	-5
4	0	0	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-6
5	0	-1	-1	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-6
6	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-5	-6	-6	-6

表 5.7  $\Delta K_I$  参数的模糊调整控制表

Table 5.7 Fuzzy tuning control table of  $\Delta K_I$

$e$	$ec$												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-4	-2	0	0	0
-5	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-3	-3	-2	0	0	0
-4	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	0
-3	-5	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	1	1	1
-2	-4	-4	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	2	2	2
-1	-4	-3	-3	-3	-2	-1	-1	0	1	2	3	3	3
0	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	2	3	4	4	4
1	-3	-3	-2	-1	-1	0	1	1	2	3	4	4	4
2	-2	-2	-2	-1	0	1	2	2	2	3	4	4	4
3	-1	-1	-1	0	1	2	3	3	3	4	5	5	5
4	0	0	0	1	2	3	4	4	4	5	6	6	6
5	0	0	0	1	2	3	4	5	5	5	6	6	6
6	0	0	0	1	2	3	4	6	6	6	6	6	6

表 5.8  $\Delta K_D$  参数的模糊调整控制表

Table 5.8 Fuzzy tuning control table of  $\Delta K_D$

$e$	$ec$													
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
-6	2	2	2	1	0	0	0	0	0	2	6	6	6	
-5	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	1	1	2	5	
-4	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	0	-1	-2	1	4	
-3	-3	-3	-3	-4	-3	-3	-2	-1	0	-1	-2	1	4	
-2	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	-1	-2	1	4	
-1	-6	-5	-5	-5	-4	-3	-2	-1	0	0	0	1	4	
0	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	-6	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3	3	
2	-6	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	2	2	2	
3	-5	-4	-3	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	2	2	2	
4	-4	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-1	0	1	2	2	2	
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	2	3	3	3	
6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	6	6	6	

模糊 PID 的控制算法框图如图 5.2 所示。

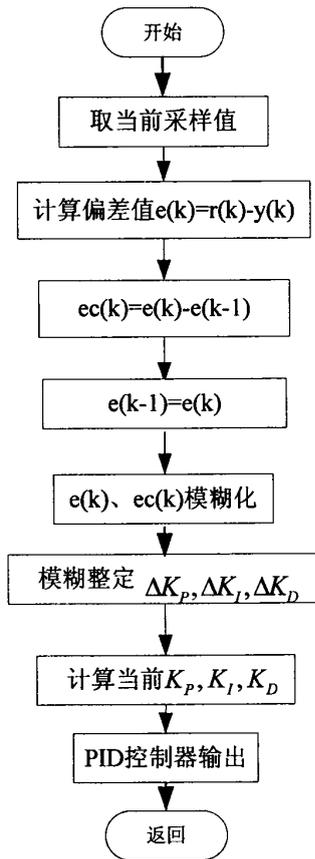


图 5.2 模糊 PID 控制算法框图

Fig.5.2 Flow chart of fuzzy PID control algorithm

### 5.1.1.4 仿真研究

连续退火炉温度控制十分复杂，目前还没有精确的数学模型，根据连续退火炉温度大滞后、大惯性的特点，把退火炉简化为一个有纯滞后的二阶惯性环节，进行所设计方法的仿真实验验证。传递函数为：

$$G(s) = K_0 e^{-\tau s} / (T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \quad (5-13)$$

根据现场实际操作经验，取  $K_0 = 1$ ， $T_1 = 1$ ， $T_2 = 2$ ， $\tau = 4s$ 。

仿真比较常规 PID 算法、模糊 PID 算法在同等情况下的控制效果。在常规 PID 控制器的设计中，关键的问题便是 PID 参数的整定。传统的 PID 控制器参数采用实验加试凑的方法由人工整定，而控制器整定的实质是通过设计调整控制器的某些参数使其特征与被控特性相匹配，以达到最佳控制效果。

本文仿真中，常规 PID 控制器的参数整定为  $K_p = 0.5$ ， $K_i = 0.03$ ， $K_d = 0.01$ ；模糊 PID 中，初始的 PID 参数为  $K_p = 0.5$ ， $K_i = 0.03$ ， $K_d = 0.01$ 。

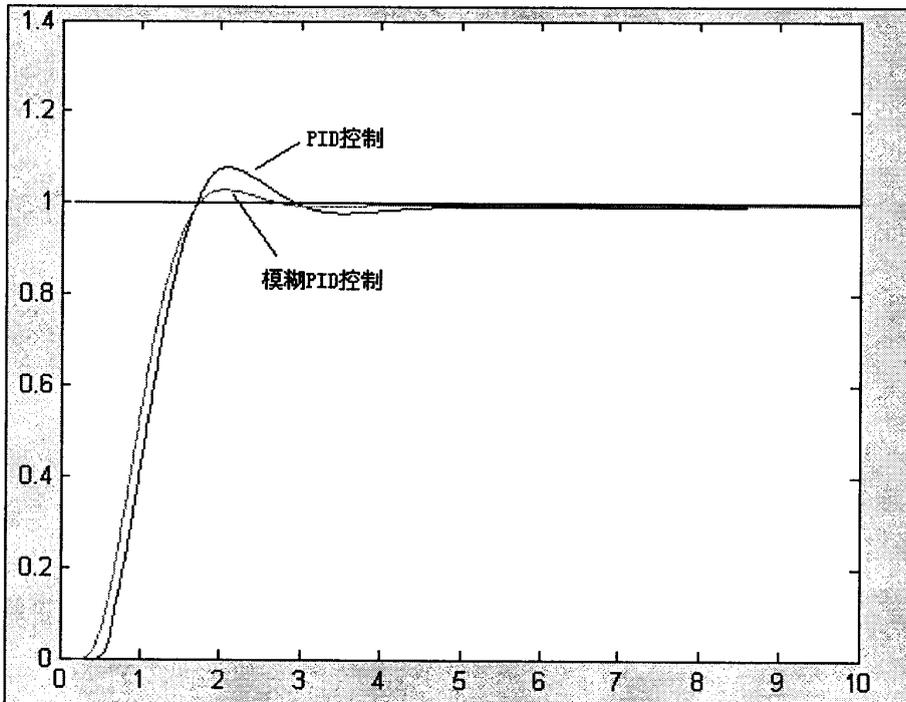


图 5.3 PID 控制和模糊 PID 控制下阶跃响应曲线

Fig 5.3 Step response curve of temperature of PID control and fuzzy PID control

可以看到，常规 PID 算法控制下的曲线响应速度慢，超调量比较大，到达稳定状态所需时间长；而模糊控制的一个优势就是它的稳定性，并且能与 PID 控制结合，得到良好的控制性能，因此模糊 PID 算法控制是在传统的 PID 控制

基础上增加了参数的适应能力,能很好地跟踪输入且超调量比较小,取得了较好的控制效果。[30]

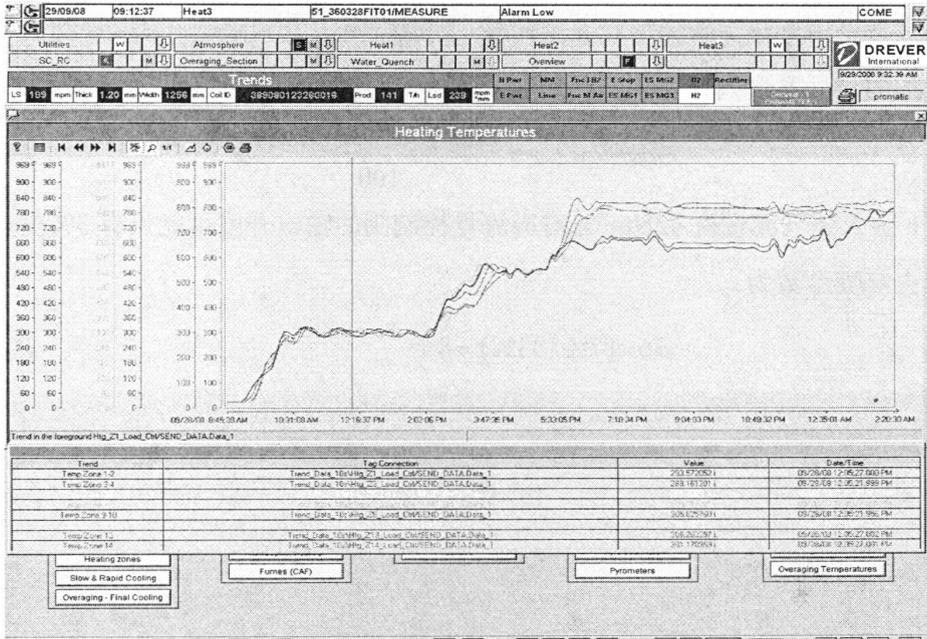


图 5.4 改造前升温曲线

Fig 5.4 temperature trend before improving

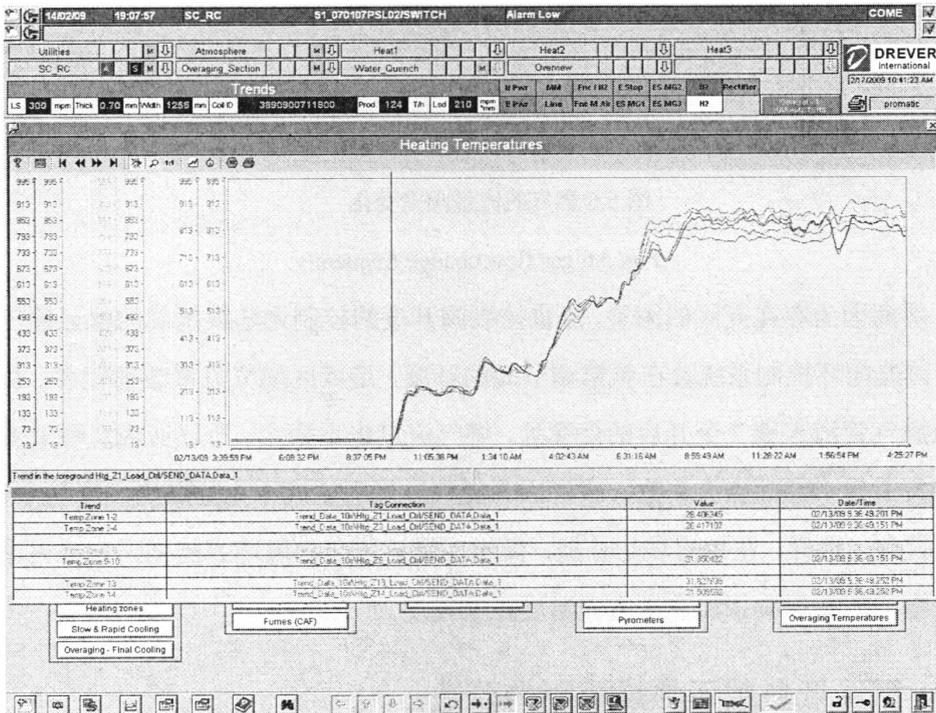


图 5.5 改造后升温曲线

Fig 5.5 temperature trend after improving

## 5.2 燃烧控制方式的改造

在首钢连续退火炉调试中，我们发现，在低温开始烘炉的情况下，为了保护炉体设备不因骤热导致变形等安全问题，炉温设定值受到限制，温度控制器每分钟增加的目标温度只有 3℃，导致控制器输出一般只有 7%左右，这样根据公式，

$$GasFlow_{Conc} = \frac{Load_{final} \square GasFlow_{Nom}}{100} \quad (5-14)$$

1 区天然气流量为 42Nm<sup>3</sup>/h,对应流量控制阀的输出开度可能只有 3%左右，需点火烧嘴个数为：

$$36 \times (7\% / 33\%) = 8 \text{ 个} \quad (5-15)$$

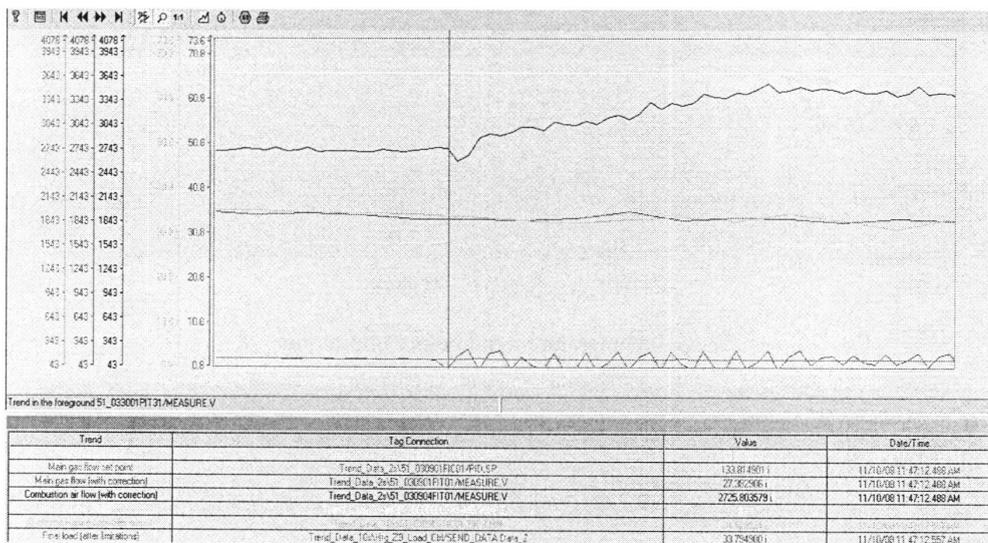


图 5.6 燃气的流量频繁变化

Fig. 5.6 gas flow change frequently

然而因为存在死区的因素，流量控制阀开度的控制无法很精确的保证输出流量，因此闭环控制系统总在频繁调节阀的开度，造成区燃气流量波动较大，从而导致燃气管道末端 7 个开启的烧嘴处，燃气流量也不稳定，所以造成烧嘴或者因为燃气流量不够而点火失败，或者因为燃气过量而造成不充分燃烧，废气中 CO 含量陡增。这样，在每次烘炉初期，操作工经常需要到现场去复位因为点火失败的烧嘴，严重影响了加热进度和温度控制精度。

### 5.2.1 低温低负载下燃烧控制的改造

面对上述设备问题，在生产期间，管道的设计无法更改的情况下，只能从控

制策略上寻找适合低温低负载的烧嘴燃烧的改造方案。基于此，我们引入类似于脉冲燃烧控制的：ON/OFF 控制策略。国外自上世纪 80 年代初即开始对时序脉冲燃烧控制系统进行了研究和应用。这种控制系统是通过控制烧嘴的燃烧时序和燃烧时间来控制炉子的温度。由于它具有动态性能好、控制温度波动小、节约燃料等优点，因而得到了广泛的重视和应用。

### 5.2.2.1 脉冲燃烧控制的原理

脉冲燃烧控制所采用的是间断燃烧的方式，采用脉宽调制技术，通过调节燃烧时间的通断比实现对退火炉的温度控制。燃料流量可通过控制器预先设定，烧嘴一旦工作，就处于满负荷状态，这个系统并不调节某个区域内燃料输入的大小，而是调节在给定区域内每个烧嘴被点燃的频率和持续时间。烧嘴的燃气输入量是事先给定的，每个烧嘴按照事先给定的开度和热量需求成正比的频率开闭。所有的烧嘴并不同时点燃，而是按照一定的时序依次点燃。

脉冲燃烧控制理论的总体结构如图 5.7 所示。主要由调节单元、非线性处理单元和输出控制单元 3 部分组成。

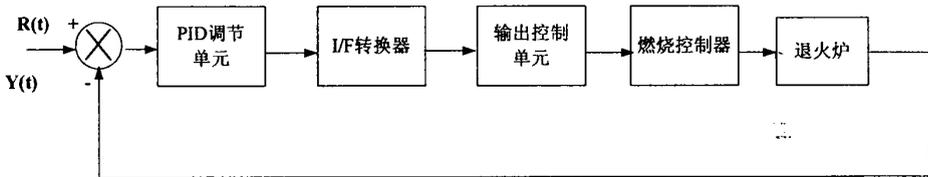


图 5.7 脉冲燃烧控制结构

Fig.5.7 sequence pulse ignition control structure

#### 1) 调节单元

主要完成对实测温度和设定信号进行处理。调节单元通常选择 PID 控制，其输入和输出关系如下：

$$P(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5-16)$$

#### 2) 非线性处理单元

其非线性变换关系为：

$$F_o(t) = \text{sgn}[P(t)] * f_{\max} \quad (5-17)$$

当  $P(t) > D_1$  时，说明系统输出偏差很大，应该将所有烧嘴打开；

当  $D_0 < P(t) < D_1$  时，采用脉冲时序控制，保证有较好的过渡过程和控温精度；  
 当  $P(t) < D_0$  时，即进入控制死区，系统在加热和冷却转换之间，这时控制输入视为零，不加热也不冷却。

### 3) 控制输出单元

$S(t)$ 为描述每一个烧嘴输出的函数，如下所示，其中  $T_0$  为烧嘴打开的持续时间。  
 $U_0$  表示每一个烧嘴打开时燃料的给进量， $U(t)$ 为任意时刻加到退火炉中总的燃料量， $U(t)$ 则为：

$$U(t) = \sum_{i=1}^n U_{0i} s(t - t_i) \tag{5-18}$$

$t_i$  由下式确定：

$$U_0 = \int_{-1}^1 f_0(t) dt \tag{5-19}$$

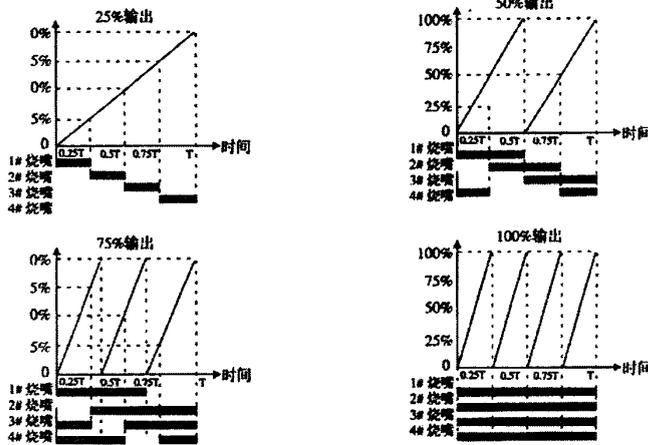


图 5.8 脉冲控制烧嘴工作原理时序

Fig.5.8 sequence pulse ignition control principle

### 5.2.2.2 控制程序改进

首钢连续退火炉的改造中，主要想达到的目的是克服小流量难控制的问题，所使用的 ON/OFF 控制采用间断燃烧的方式，使用脉宽调制技术，通过调节燃烧时间的占空比(通断比)来实现低温低负载控制。这个系统并不调节控制区域内燃料输入的大小，而是在低功率负载 33%下，如图 5.8 强制给流量控制器即调节阀一个稳定输出，一般在 12%左右，以控制实际流量稳定在输出功率=33%时的对应值：200 Nm<sup>3</sup>/h，如图 5.9 同时调节在给定区域内每个烧嘴被点燃的持续时间。

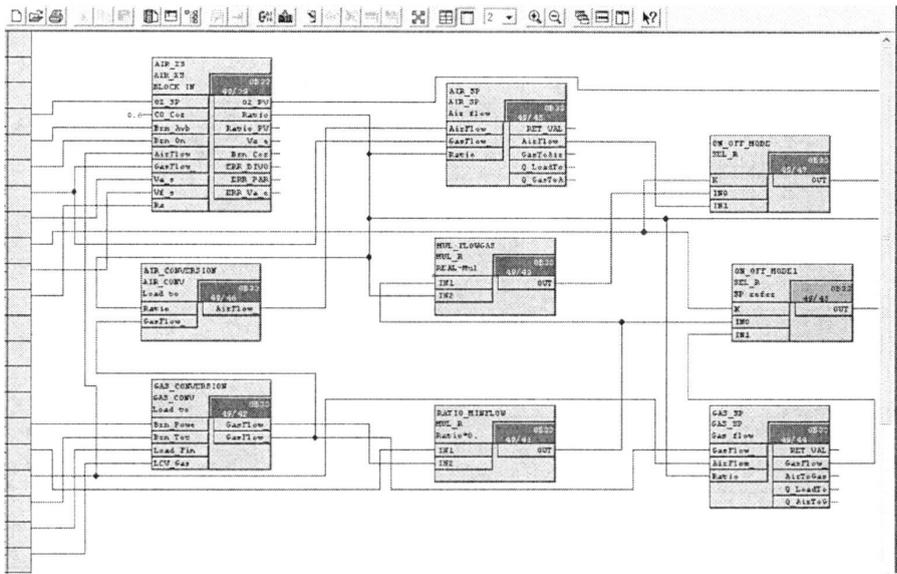


图 5.9 根据实际负载，判断是否启用 ON/OFF 模式

Fig.5.9 according to load to decide if switch to ON/OFF mode

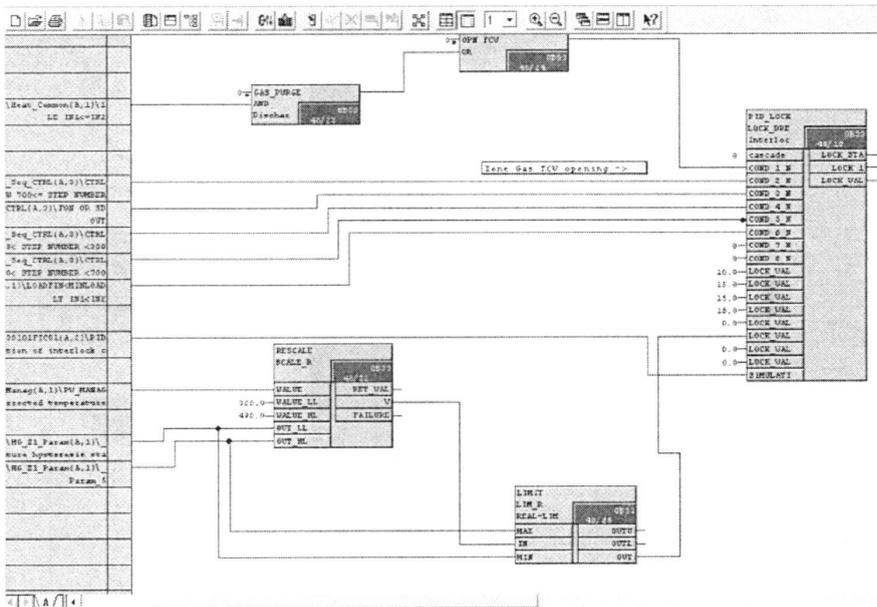


图 5.10 启用 ON/OFF 后，将控制阀开度锁定在能够达到 200 Nm<sup>3</sup>/h 的位置

Fig.5.10 lock flow control to 200 Nm<sup>3</sup>/h

与传统脉冲燃烧控制中所有烧嘴按照一定的时序依次点燃的方法不同，本次改造所定义的 ON/OFF 控制是一个区的全部烧嘴在低功率 33% 状态下间歇性同时点火工作，即同时控制每个烧嘴前的电磁关断阀得失电；当需要加热负载超过 33% 时，系统自动切换到常规的双比例交叉控制，流量控制器不再强制输出，而是根据负载调节。

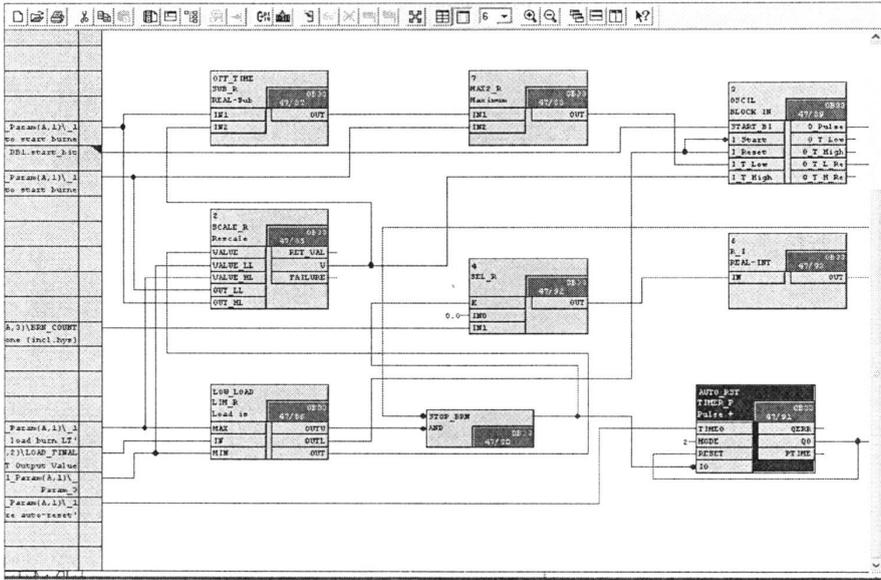


图 5.11 根据实际负载与 33%负载的比值，计算 200s 为周期内烧嘴点火的时间比。

Fig.5.11 calculate ignition time

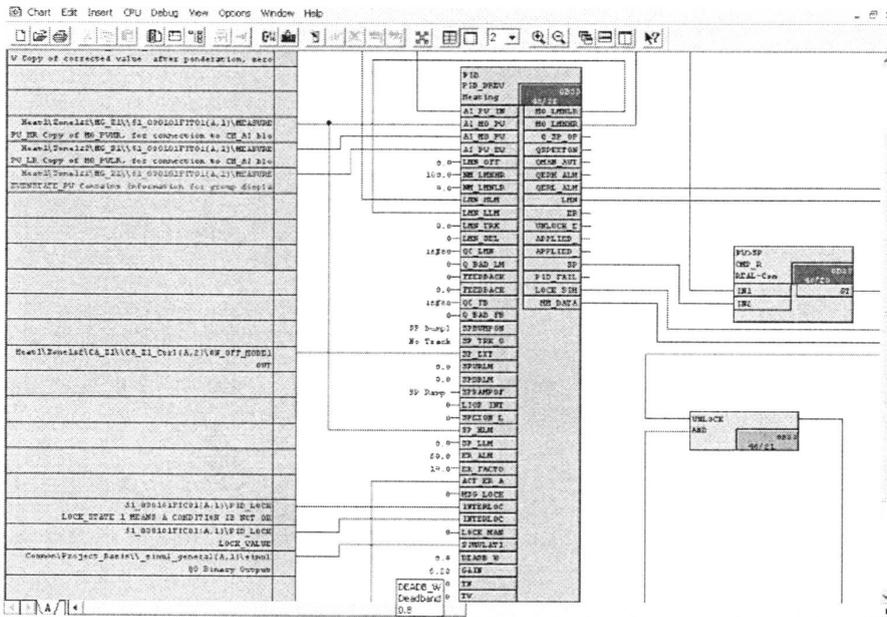


图 5.12 根据流量特性，调整 PI 参数

Fig.5.12 according to flow, adjust PI parameter

由于在 ON/OFF 控制系统中，烧嘴要被频繁地点燃和熄灭。这就要求燃烧控制器和烧嘴要有快速的响应能力。这是决定该控制系统是否可靠和实用的一个重要因素。首钢连续退火炉采用德国 KROM SCHRODER 公司生产的 BCU460 型烧嘴控制器和 TZI 7,5-20/33W 型点火变压器。每个烧嘴使用的天然气和空气由单独的天然气支管路和空气支管路提供，并在天然气的支管安装了电磁关断阀。

每个烧嘴由一个烧嘴控制器控制，空气的流量由助燃风机保证。控制系统同时给每个烧嘴控制器关断信号，由烧嘴控制器来触发电磁关断阀得失电。

### 5.2.2 改造后的效果

在首钢连续退火炉低温低负载的控制方式改造完成后，通过 3 个月的观察与分析，实现以下效果：

(1)控制系统在低负载下，流量控制阀能够稳定的控制 12%的开度，保证燃料输出的准确性，因此可以克服连续燃烧控制系统中蝶阀的非线性死区对控制温度的影响，充分提高了控制系统的动态性能。

(2)经过对低温低负载的控制方式改造之后，连续退火炉在每次重新烘炉升温的阶段，基本消除了 384 个烧嘴由于流量波动而造成点火频繁失败的问题，同时各区辐射管工作稳定，废气检测的分析表明，燃烧状况与预期控制效果吻合。2 年来加热系统运转状况良好。

(3) 提高炉内温度场的均匀性，平均温差<11℃，保证加热质量，减少高温燃气对被加热体的直接热冲击；

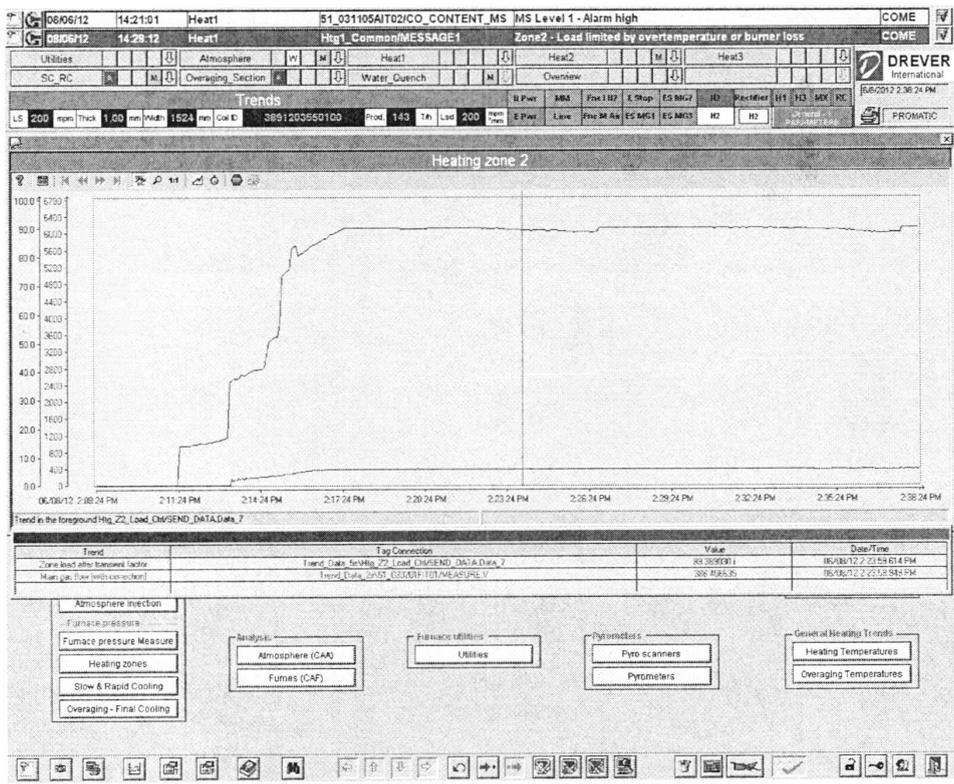


图 5.13 ON/OFF 控制改造后，燃气流量的改善

Fig.5.13 gas flow trend after improving



## 第六章 总结与展望

本文的主要目的是对退火炉加热控制系统进行技术消化、吸收和改进。在这个过程中，通过认真、系统的阅读退火炉的 PLC 程序，我对退火炉所包含的各种控制系统有了较深的认识，尤其是加热控制方面。并在此基础上大胆创新，通过引入模糊 PID 控制，取代传统 PID 控制，提高了燃气流量和空气流量的稳定性和快速性。同时，也对退火炉加热控制系统做了一定的改进，通过使用 ON/OFF 控制代替双交叉串级限幅比例控制的方法，解决了加热段低温低功率下温度控制误差大的问题，现场使用效果非常良好，设备控制精确度提高，提升了退火炉的温度控制水平和作业率。

在这个技术升级的过程中，通过亲自编写控制程序，并结合现场进行不断的调试完善，我的技术能力得到了大幅提高，解决问题的思路也有了很大的拓展。改造后的退火炉控制系统一直运行稳定，摒除了以前存在的问题，工人师傅使用过后非常满意，达到了预期效果。这次技术改进的成功，使我的自信心得到了加强，也为我以后更好的从事相关工作打下了基础。

但是，任何事情都不是完美的。虽然本文设计的模糊自适应 PID 伺服系统的控制效果比较理想，但是，在理论和实际上，还有改进的可能和必要。比如如何进一步提高系统辨识模型的精度。另外，对于 ON/OFF 控制，作为一项较先进的燃烧控制技术，需要结合先进的控制模型才能最大限度地发挥其作用，这都是我以后进一步要做的工作。

同时，还应该继续开阔自己的眼界，紧跟世界先进技术潮流。目前主流的加热控制技术主要是时序脉冲控制和双交叉限幅比例控制两方面，脉冲燃烧的优势在于降低氧化烧损率。维持更好的炉内温度均匀性，减少 NO<sub>x</sub> 的生成。<sup>[36]</sup>但是脉冲燃烧的热效率略低于比例燃烧，能耗略高于比例燃烧，如何能够找到二者兼而有之的控制方法将是退火炉加热控制的发展方向。



## 参 考 文 献

1. 何建锋. 冷轧板连续退火技术及其应用[J], 上海金属.2004.7
2. 张贵春, 张宁峰. 冷轧带钢连续退火机组的技术特点及应用[J], 2009.10
3. 刘安, 李俊. 冷轧带钢连续退火技术的发展[J], 1997.
4. Jukka Swanijung, Petri Palmu. Development of coke-oven battery process management system at Rautaruukki Steelworks[J], Iron and Steel Engineer, 1996, 73(2): 46-49.
5. Misaka J Takahashi R. Computer control of a reheat furnace at Kashima Steelwork's hot strip mill [J], Iron&Steel,1982, 59(5): 51-55.
6. 兰霄, 田小果. 脉冲燃烧控制技术, 自动化与仪器, 2005.5
7. 许昌, 吕剑虹, 程明. 连续式加热炉热工控制策略综述[J], 选煤技术, 2003, (5): 13-4.
8. 蒋汉文. 热工学[M], 北京: 高等教育出版社, 2001.5.
9. 刘人达. 冶金炉热工基础[M], 冶金工业出版社, 2006.
10. 郁岚. 热工基础及流体力学[M], 北京:中国电力出版社, 2007.3.
11. 同济大学. 燃气燃烧与应用[M], 中国建筑工业出版社, 2000.6
12. 孙平. 可编程控制器原理及应用[M], 高等教育出版社,2003.1.
13. 郭宗仁. 可编程控制器及其通信网络技术[M], 北京:人民邮电出版社,2003.10.
14. 张泰山. 计算机控制系统[M], 北京, 冶金工业出版社, 1986.2
15. 王建华, 孔庆虎. 退火炉自动控制系统设计[J], 山东冶金, 1999.2.
16. Furnace Control Detailed Functional Analysis, Shougang Documents , 2006.
17. Furnace Schematic Diagram, Shougang Documents , 2004.
18. 陈绿云.计算机在热电偶自动检定装置上的应用[J].扬子石油化工, 2003(1).
19. 范玉飞.连续退火炉加热段过程带温模型建立 [D], 上海交通大学, 2006.
20. Kazuhir Yalliro ,Hiroyasu Shigemori. Development of strip temperature control System for continuous annealing line. Japan: International Conference on Industrial Electronics ,Control ,and Instrumentation.1993, 181-186

21. 唐乐平. 步进式加热炉双交叉限幅燃烧控制[J], 钢铁, 1996, 31(9): 34-37
22. 汤秀琴. 双交叉燃烧控制系统的设计与实现[J], 鞍山钢铁学院学报, 2001, 24(6): 42-45
23. 王秉铨. 工业炉设计手册 (第二版) [M], 北京: 机械工业出版社, 1996.11.
24. 陈南岳. 现代加热炉过程控制技术及其数学模型[J], 冶金自动化, 1998(5)
25. Kangling Fang, Zhongjie Shen. A neural-fuzzy control in resistance furnace[C], IEEE international conference on intelligent processing systems, 1997, 51(6): 200-204.
26. 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[C], 北京: 清华大学出版社, 2002, 192-249.
27. 章卫国. 模糊控制理论与应用[M], 西安: 西北工业大学出版社, 1999.6.
28. 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M], 北京: 电子工业出版社, 2003, 1-82.
29. 韩金旭, 周宝昌, 于宝川等. 模糊控制在炼焦工艺自动控制系统上的应用[J], 制造业自动化, 2004.7
30. E. H. Mamdani. Application of fuzzy algorithm for the control a dynamic plant, in Proc. IEEE, Vol. 121, No. 12, 1974
31. 陈志旺, 朴春俊. 模糊控制在退火炉炉温控制中的应用[J], 信息技术, 2003.8
32. 肖劲松, 余林展. 时序脉冲燃烧控制技术在回火炉上的应用[J], 钢铁, 2006.6.
33. 朱桂平. 数字式燃烧控制技术在加热炉炉温控制上的应用[J], 硫磷设计与粉尘工程, 2004, (1).
34. Ashok D. Acharya, Sirshendu Chattopadhyay. Reheat furnace temperature control and performance at Essar Steel [J]. Iron & Steel Engineer (S0021-1559), 1998, 75(12): 31-36.
35. 王鲁. 数字化脉冲燃烧控制技术在冷轧带钢连续退火炉上的应用[J], 冶金丛刊, 2009, 34(6): 34-37
36. 张贵春, 张宁峰. 冷轧带钢连续退火机组的技术特点及应用[J], 江西冶金, 2009, 29(5): 39-42

## 致谢

本文是在高宪文教授的悉心指导和热情关怀下完成的。此论文的完成，是高老师精心培育的结果，凝结着导师的巨大心血。在此，对高老师给我的关怀、教诲和所付出的辛勤操劳表示最深切的谢意。高老师治学严谨，平易近人。他渊博的学识、踏实审慎的科学态度、一丝不苟的治学风格都给我留下了深刻的印象，将使我一生受益。谨以此论文向我的导师高宪文教授致以崇高的敬意！祝愿导师合家欢乐，一生平安。同时，也将祝福送给每一位帮助过我的师长。

感谢给我传授专业课的东北大学信息科学与工程学院的老师，是他们授予我知识，为我的研究思路铺垫了坚实的理论基础，没有他们谆谆的教导和深深的关爱，我的论文就无法完成。

本文的完成是以北京首钢冷轧薄板有限公司连续退火机组的技术消化、吸收与技术改进服务项目为支持的，针对退火炉的研究与攻关是其中的重要课题之一。因此要感谢冷轧公司领导、专责工程师和工人师傅们对此课题所给予的大力支持与帮助，为本课题的顺利开展提供了诸多便利条件。其中，尤其要感谢我的师父张振勇总工，从冷轧安装调试到现在完成课题、撰写论文，几年之间一直对我悉心指导，使我积累了很多宝贵的现场技术经验和人生经验。

感谢李琨博士，在撰写论文期间，他在算法方面给予了我很大帮助，并对论文成稿提出了许多宝贵建议，让我深受启发。

最后，要向所有数年来默默支持我艰辛求学的家人、朋友说一声谢谢，这些年来，你们辛苦了！