

东北大学

硕士学位论文

北京首钢中试基地多功能实验炉综合研发

姓名：李程

申请学位级别：硕士

专业：热能工程

指导教师：张卫军

20090701

北京首钢中试基地多功能实验炉综合研发

摘 要

首钢技术研究院为了更好地开展科研工作,为生产服务,适应市场的需要,提高首钢产品竞争力,拟在中试基地建多功能实验加热炉。目的是针对各种优质碳素钢、合金钢及不锈钢等新产品钢坯技术开发,对各种加热工艺及不同烧嘴等实验。本文以首钢中试基地多功能实验炉为背景,进行实验炉研发设计。本文主要内容有:

实验炉方案设计,采用台车炉结构,全纤维炉衬,设有多种燃烧器,包括单蓄热烧嘴、双蓄热烧嘴、低压涡流烧嘴、高速烧嘴,采用上下加热方式。

实验炉设计参数的确定是实验炉结构设计的基础,对不同烧嘴及组合燃烧状况的参数进行确定,并对实验炉进行结构设计。

实验炉实验方案开发,编制 9 项实验方案,①不同燃料条件下金属加热工艺实验。分析不同煤气加热对钢坯加热质量的影响;②蓄热体及蓄热室性能实验。对不同蓄热体的传热性能进行分析比较;③蓄热燃烧热工特性试验。分析蓄热燃烧换向时间对炉况的影响;④各种燃烧器实验。分析不同燃烧器燃烧的状况,对加热炉燃烧器的选择起到重要的参考价值;⑤高速烧嘴脉冲控制实验。了解脉冲燃烧最优占空比的调节方法,分析占空比对炉况的影响;⑥蓄热式燃烧条件下 NO_x 排放浓度实验。了解不同燃料成分、燃烧温度、蓄热式烧嘴结构、空燃比条件下的 NO_x 排放特性;⑦炉温控制与调节实验。掌握炉温控制方法,研究不同控制策略、控制算法的控制效果,选择合适的加热制度;⑧换热器性能实验。了解换热器性能测量与计算方法,对实践生产中换热器测量,评估提供方法和依据;⑨实验加热炉热平衡测试实验。了解热平衡中热量的收入项和支出项,掌握各项热量的测定方法和计算方法。

在实验设计、炉施工过程中,解决了许多关键性技术问题,如单蓄热实验烧嘴,双蓄热三通换向系统,实底段设计及全纤维炉墙结构等,本文对关键性问题进行了论述,并对解决方法进行说明。

关键词: 多功能实验炉; 单蓄热实验烧嘴; 双蓄热烧嘴

The Integrated Research and Design of Experimental Furnace for Shougang Pilot Experimental Base in Beijing

ABSTRACT

The Technology Research Institute of Shougang is going to build multi-purpose furnace at the experimental base in order to carry out scientific research work better for the production of services, improve competitiveness for its product to meet the needs of the market. Its purpose is the technology development for high-quality carbon steel, alloy steel and stainless steel. This paper takes the Shougang experiment furnace of pilot experimental base as the background. The main contents of this paper are:

The program design of experimental furnace. The transmission of experiment furnace by trolley, All-Fiber felt lining, It set up a wide range of burner, include Single regenerative Burner, Double regenerative Burner, Low-pressure vortex Burner, High-speed burner, It use of upper and lower heating.

The definition of Furnace design parameters is the basis for the structural design of furnaces, the parameters of burners and combination of different combustion and carry out the structural design of the experimental furnace.

Experimental program of experimental furnace. The preparation of nine experimental program on the basis of the experimental structure and different furnace combustion in this part. ① The experiment of metal heating under the conditions of different types of fuels, it analysis of the impact of Billet quality when use different heating gas. ② The experiment of regenerator capability, it analysis and comparison of heat transfer performance by different regenerator ③ The thermal characteristics experiment of regenerative combustion, it analysis of the impact of furnace condition by different time of change. ④ The experiment of variety of burner combustion, it analysis of furnace condition by different burner, it play an important reference value for burners choice. ⑤ The experimental of the pulse control for high-speed burner, Understanding of the optimal duty cycle

pulse combustion regulation methodology, analyzes the status of the duty cycle of the impact of furnace. ⑥ The experiment of Nox emission concentration under the conditions of Regenerative Combustion, it analysis of the impact of NOx emission by different fuel composition, combustion temperature, regenerative burner structure, air-fuel ratio. ⑦ The experimental of temperature control and regulation, it analysis of different control strategies, control of the control algorithm, choose a suitable heating system. ⑧ The experimental of heat exchanger performance, Understanding the methods of heat exchanger performance measurement and calculation, is the methods and basis of measuring. ⑨ The experimental of heat balance. Understand the income and expenditure in the heat balance, master the method of heat and calculation.

The description of the key technical issues, This section is the description of the key technical issues, for example Single regenerative experiment burner, the Change to the system of double regeneratibe The design of solid site.

Key word: Multi-function Experimental Furnace; Single regenerative experiment burner; Double regenerative burner

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：李魁

日期：2009.6.30

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：李魁

导师签名：张世军

签字日期：2009.6.30

签字日期：2009.6.30

第一章 绪论

1.1 课题背景

随着现代化生产过程越来越复杂，规模越来越庞大，以及原材料的短缺和能源危机的加剧，企业间的竞争日趋激烈。人们对提高生产效率，提高产品质量，降低生产成本，减少能源消耗，强化环境保护的要求也日益提高。

钢铁工业是能源消耗的大户，其中仅冶金加热炉的能耗就占钢铁工业总能耗的 25%，提高加热炉的加热效率，降低能耗，对整个钢铁工业的节能具有重要的意义。特别是随着现代化轧机向连续、大型、高速、高精度和多品种方向发展，对钢坯的加热质量也提出了越来越高的要求。然而，加热炉生产过程是及其复杂的，其间包括热力学的、化学的和物理的各种过程。加上燃烧技术的不断发展，燃烧方式多样，传统的燃烧方式已不能完全满足现代化发展要求，蓄热式燃烧开始普及，因此对加热炉进行进一步研究，包括燃烧器的研究；以及加热炉控制研究，必须从整体上分析和控制加热过程，进而实现炉温的优化设定，从真正意义上的降低能源消耗，实现产品绿色生产^[2]。

燃烧装置是炉子的核心部分，它工作的好坏直接影响到能源消耗量的多少。我国工业炉使用的燃烧装置与先进国家有一定的差距，可以这样认为，燃烧技术的差距除燃烧器本身外，还在于燃烧装置的各种检测控制阀件和自动调节系统，例如缺乏性能优良、质量可靠的专用风机，各种泵类、稳压阀、调压阀、自动点火、火焰监测装置等，使用预热送风的烧嘴当热风温度波动时尚无风量补偿措施，空燃比多数不能按比例自动调节。目前，国内成功地应用在工业炉的燃烧器有：调焰烧嘴、平焰烧嘴、高速喷嘴、自身预热烧嘴、蓄热式烧嘴等。如何根据钢坯质量要求，选择合适的燃烧器及加热制度，对提高产品质量具有特别重要的意义^[1]。

在企业结构合理的钢铁联合企业中有大量的高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气，可供加热炉使用，加热炉燃料的选择取决于工艺要求，炉型结构、地域资源及输送等诸多因素，而燃料种类、燃料热值直接影响到炉温。助燃空气温度的不同也会影响炉温和燃料消耗量。因此，研究燃料热值和空气温度与炉温和燃料消耗量之间的关系对节约燃料具有实际意义，本实验炉也设计了燃料热值调节装置，可模拟不同热值燃料，通过实验可以了解不同燃料下加热炉的燃烧状况。

蓄热式燃烧器由于其独特的优越性和技术的不断完善,已越来越被重视和推广应用。蓄热体是蓄热烧嘴重要的组成部分,目前我国常用的是小球式和蜂窝式蓄热体,而在工业炉设计中,根据不同炉型和工件加热要求选择合适的蓄热体成为关键性的问题。两种蓄热体单位体积的比表面积不同,蜂窝体好比小球蓄热体大,在单位时间内接受的热量;两种蓄热体的透热深度不同,蜂窝体的透热深度小,蓄热体容易达到饱和状态,有利于发挥蓄热体的蓄热作用,减少蓄热体的用量,预热温度的波动小,炉膛温度的均匀性好,但是,也同时存在着极其不利的令一方面,那就是因为蓄热体达到热饱和状态的时间越短,所要求的换向时间越短,蓄热式燃烧的关键设备——换向阀的动作频率也越高,相同条件下换向阀的使用寿命将大为缩短。而且,换向时间越短,频率越高,炉内气氛的氧含量变化幅度越大,坯料越有可能氧化、脱碳;两种蓄热体的蓄热室阻力损失不同^[3]。

本文以首钢技术研究院中试基地实验炉研发为背景,首钢技术研究院为了更好地开展科研工作,为生产服务,适应市场的需要,提高首钢产品竞争力,拟在中试基地建实验加热炉。目的是针对各种优质碳素钢、合金钢及不锈钢等新产品钢坯技术开发,对各种加热工艺及其烧嘴等实验。

1.2 多功能实验炉方案综述

首钢技术研究院为了更好地开展科研工作,为生产服务,适应市场的需要,提高首钢产品竞争力,拟在中试基地建实验加热炉。目的是针对各种优质碳素钢、合金钢及不锈钢等新产品钢坯技术开发,对各种加热工艺及其烧嘴等实验。根据中试基地现场条件及实验炉实验要求,本实验炉采用自行走台车炉方式,此种方式即克服了中试基地场地小的局限,并且现场操作灵活,便于操作,可以满足各种实验要求:

为了能够有效模拟连续加热炉双面加热效果,料坯加热可以实现多种加热方式:设有高速烧嘴,采用脉冲加热方式,采用炉子侧墙低压涡流烧嘴,用换热方式上下加热;采用蓄热方式上下加热,空气换向采用四通换向系统。为满足模拟多种加热方式的要求,实验炉增设双蓄热燃烧系统,空气换向采用四通换向阀,煤气换向采用一对三通换向阀代替传统四通换向阀,解决了四通换向阀严密性不好的缺点,保证了换向系统的安全(在小批量生产方式下,采用蓄热式上下加热方式),烧嘴布置采用上下交错布置,保证采用不同燃烧方式时炉内温度分布均匀,设计为组合式便于更换拆卸,单蓄热烧嘴设有一套实验烧嘴,蓄热体方便更换以试验不同蓄热体的性能和使用效果。烧嘴布置见图 1.1。

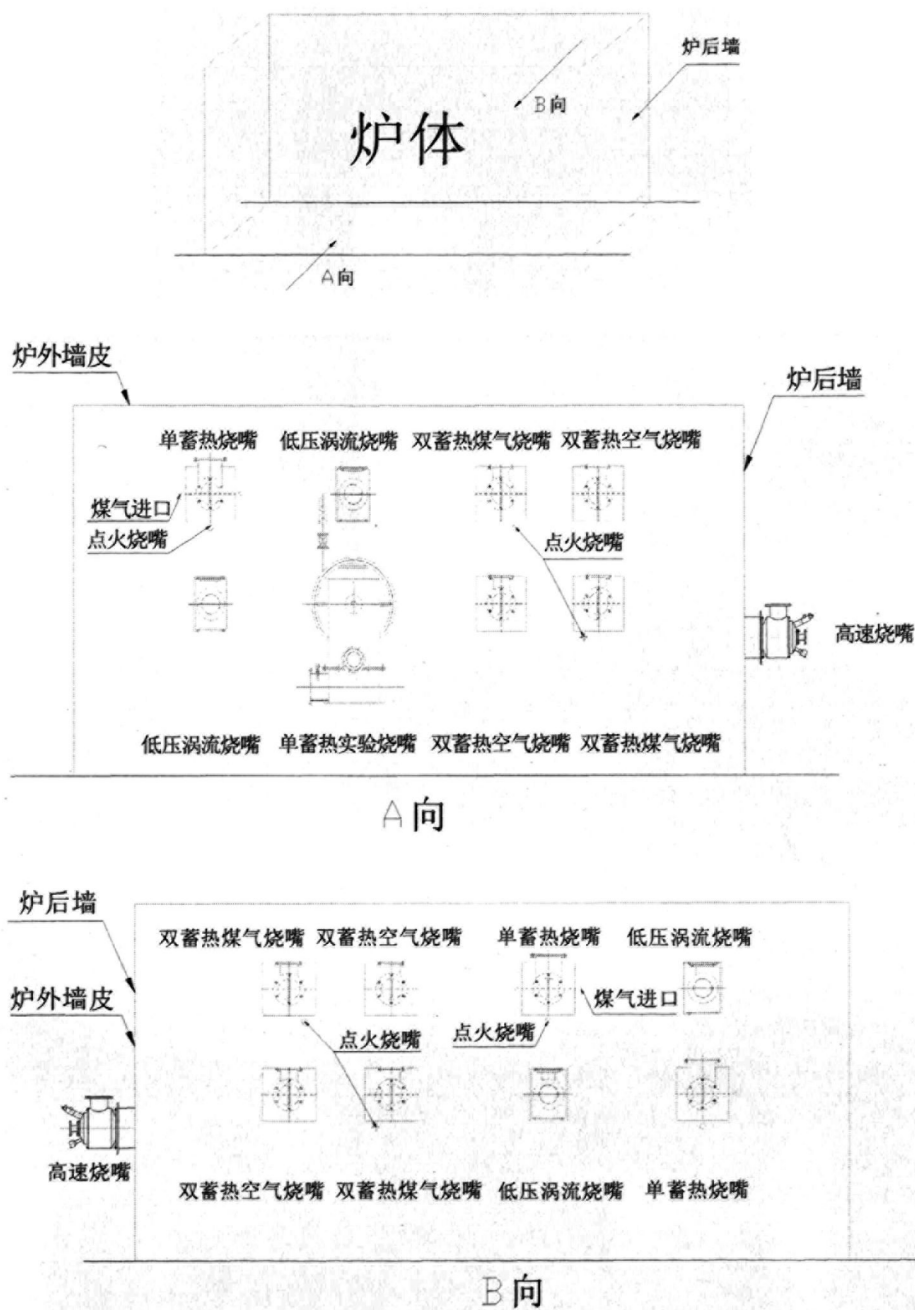


图 1.1 实验炉烧嘴布置

Figure 1.1 The Burner layout of experimental furnace

中试基地现场供应的燃料为天然气，而钢铁企业加热炉采用燃料多为混合煤气、高炉煤气或焦炉煤气，为有效模拟生产现场不同燃料下加热炉的燃烧状况，本实验炉设有煤气热值调整装置，采用烟气与天然气掺混的方式调整燃料热值，通过调整掺混的烟气量，有效的控制燃料热值在 800Kcal——8000Kcal

变化，模仿高炉煤气、发生炉煤气、混合煤气、焦炉煤气、天然气。

第二章 实验炉设计参数确定方法及运算

2.1 实验炉原始设计参数

- ①装载量： 普通加热区：2 块料坯 5t；
双蓄热加热区：1 块料坯 2.5t；
- ②燃料热值：本实验炉设有烟气掺混系统，煤气热值可调：
 - 1) 普通加热区（包括普通烧及单蓄热烧嘴）燃料热值调节范围为 8000—10000Kcal/m³；
 - 2) 双蓄热加热区燃料热值调节范围 800—10000Kcal/m³；
 - 3) 天然气压力 5Kpa。
- ③加热要求：钢坯厚度为 200—320mm；
钢坯最大尺寸 1000×1000mm，
最高加热温度 1250℃（中心）；

2.2 实验炉计算说明

该加热炉配有 5 种不同类型烧嘴，分别为常规天然气烧嘴、单蓄热天然气烧嘴、双蓄热低热值烧嘴、高速脉冲烧嘴、混合煤气长焰烧嘴（其中混合煤气长焰烧嘴为中试基地提供，不作为设计计算依据）。可以采用多种燃烧方式，各种烧嘴可以单独燃烧，单蓄热烧嘴可与普通烧嘴同时燃烧。

2.2.1 不同烧嘴燃料种类及热值

- 低压涡流烧嘴：燃料种类：天然气；
燃料热值：8000Kcal。
- 单蓄热烧嘴：燃料种类：天然气；
燃料热值：8000Kcal。
- 双蓄热烧嘴：燃料种类：天然气与烟气混合
（模拟不同热值气体燃料）；
燃料热值：800Kcal（可调）。
- 高速烧嘴：燃料种类：天然气；
燃料热值：8000Kcal。

2.2.2 不同烧嘴燃烧状态下煤气流量

低压涡流烧嘴煤气流量：228.95m³/h（4台合计）；

单蓄热烧嘴煤气流量：163.53m³/h（2对合计）；

双蓄热烧嘴煤气流量：698m³/h（4对合计）；

高速烧嘴煤气流量：87.5m³/h。

2.2.3 不同烧嘴燃烧状态下空煤气管道流速及管道规格

（1）煤气管道^[7]：

1）低压涡流烧嘴

①煤气总管路：管道规格：DN100；煤气流速：8m/s。

②炉体两侧分管路：管道规格：DN80；煤气流速：8m/s。

③炉侧分管至烧嘴前管路：管道规格：DN50；煤气流速：8m/s。

2）单蓄热烧嘴

①煤气总管路：管道规格：DN100；煤气流速：8m/s。

②炉体两侧分管路：管道规格：DN100；煤气流速：8m/s。

③炉侧分管至烧嘴前管路：管道规格：DN70；煤气流速：8m/s。

3）双蓄热烧嘴

①煤气总管路：管道规格：DN200；煤气流速：6m/s。

②三通换向阀出口炉体两侧管路：规格：DN200；煤气流速：6m/s。

③炉侧分管至煤气烧嘴前管路：管道规格：DN150；煤气流速：6m/s。

4）高速烧嘴

①烧嘴前管路：管道规格：DN70；煤气流速：8m/s。

（2）空气管道^[7]：

1）低压涡流烧嘴供风管路

①风机出口到换热器前管路：管道规格：DN300；空气流速：8m/s。

②换热器出口到炉前分岔处：管道规格：DN400；空气流速：5m/s。

③分岔处到炉体两侧分管路：管道规格：DN300；空气流速：5m/s。

④烧嘴前空气管路（变径前管路）：管道规格：DN200；空气流速：5m/s。

1）单蓄热烧嘴供风管路

①风机出口到四通换向阀（与双蓄热烧嘴空气管路共用，不同流速）：

管道规格：DN300；空气流速：6m/s。

②四通换向阀至炉体两侧管路（与双蓄热烧嘴空气管路共用，不同流速）：

管道规格：DN300；空气流速：6m/s。

③烧嘴前空气管路：管道规格：DN250；空气流速：5m/s。

3) 双蓄热空气烧嘴供风管路

①风机出口到四通换向阀（与单蓄热烧嘴空气管路共用，不通流速）：

管道规格：DN300；空气流速：3m/s。

②四通换向阀至炉体两侧管路（与单蓄热烧嘴空气管路共用，不同流速）：

管道规格：DN300；空气流速：3m/s。

③烧嘴前空气管路：管道规格：DN150；空气流速：6m/s。

4) 高速烧嘴

①烧嘴前管路：管道规格：DN250；煤气流速：5m/s。

2.2.4 不同烧嘴及组合燃烧状态下相关参数数据

1) 燃烧温度控制

在不同烧嘴及组合燃烧状态下，各种测点信号集中传送至主控制室，进行统一采集和控制，保证在不同烧嘴及组合燃烧状态下最高料坯温度 1250℃的要求。

2) 热负荷分配

在不同烧嘴组合燃烧情况下，热负荷分配根据实验要求与实验炉操作有关。

3) 加热时间

除高速烧嘴采用单面加热，加热时间为 4.26h 外，其它烧嘴均采用双面加热，加热时间为 2.13h。

4) 空气系数

不同烧嘴及组合燃烧空气系数均为 $n=1.1$ 。

5) 烟气含氧量及炉压控制

烟气含氧量不大于 5%；

炉压控制：通过改变排烟管道上调节阀的开度，实现试验炉炉膛内压力的控制，当改变调节阀的开度不能达到目的时，通过改变鼓风机和引风机的工作参数进行调节，保证实验炉工作在零压范围！

2.2.5 换热器设计参数

1) 燃烧生成烟气量：2373m³/h；

2) 燃烧产物温度：1200℃；

3) 掺入冷风量：1573 m³/h；

4) 冷风温度：20℃；

5) 换热器实际排烟量：3946 m³/h；

6) 换热器前烟气温度：805℃；

- 7) 预热空气量: 2239 m³/h;
- 8) 换热器入口空气温度: 20℃;
- 9) 出口温度: 320℃。
- 10) 换热器采用错、顺流双行程方案^{[4][27]}。

2.3 不同烧嘴及组合设计参数计算

2.3.1 普通加热区设计参数计算

(1) 采用普通烧嘴时热工计算

取热效率 η : $\eta=25\%$

1) 求料坯加热需要吸收的有效热量 $Q_{\text{效}}$:

$$\text{有效热 } Q_{\text{效}} = 1000 \times 1200 \times 0.165 - 1000 \times 20 \times 0.116 = 195680 \text{ Kcal/t} \quad (2.1)$$

其中: 1200 为料坯加热温度;

20 为料坯初始温度;

0.165 为 1200℃ 时钢坯比热容;

0.116 为 20℃ 时钢坯比热容。

2) 求每吨料坯加热需要供给热量: $b_{\text{热}}$

$$\text{每吨热耗 } b_{\text{热}} = \text{有效热 } Q_{\text{效}} / \text{热效率 } \eta \quad (2.2)$$

$$= 195680 / 0.25 = 782720 \text{ Kcal/t}$$

3) 装载量 = 5t

4) 料坯加热时间: h

按每 8 分钟加热 1cm 料坯计算加热时间 h:

$$h = (32/2) \times 8/60 = 2.13 \text{ h} \quad (2.3)$$

其中料坯厚 320mm; 采用双面加热;

5) 产量 P

$$P = \text{装载量} / \text{加热时间 } h = 5 / 2.13 = 2.34 \text{ t/h} \quad (2.4)$$

6) 小时需要供入热量 Q:

$$\text{供入热量 } Q = \text{产量 } P \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} \quad (2.5)$$

$$= 2.34 \times 782720 = 1831564.8 \text{ Kcal/h}$$

7) 燃料热值 $Q_{\text{低}}$

取 $Q_{\text{低}} = 8000 \text{ Kcal/m}^3$ (天然气热值取 10000 Kcal/m^3 ; 兑烟气调制 8000 Kcal/m^3)

8) 小时燃料消耗量 B

$$\text{小时燃料消耗量 } B = \text{小时供入热量 } Q / \text{燃料热值 } Q_{\text{低}} \quad (2.6)$$

$$=1831564.8/8000=228.95\text{m}^3/\text{h}$$

9) 炉底强度 H:

$$\begin{aligned}\text{炉底强度 } H &= \text{产量 } P / \text{炉底面积 } A \\ &= 2.34 \times 1000 / 7.5 = 313.24 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})\end{aligned}\quad (2.7)$$

其中炉底面积 A 取 7.5m^2 。

10) 炉底热强度 $H_{\text{热}}$:

$$\begin{aligned}H_{\text{热}} &= \text{炉底强度 } H \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} \\ &= 313.24 \times 782720 \times 4.186 / 1000 = 1026307.86 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})\end{aligned}\quad (2.8)$$

11) 空气需要量计算

① 10000Kcal 天然气的理论空气需要量 L_{01}

$$L_{01} = 2.65 \times 0.0001 \times 10000 \times 4.186 + 0.02 = 11.11 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{P8 火焰炉热工计算}) \quad (2.9)$$

② 8000Kcal 燃料的理论空气需要量 L_{02}

$$L_{02} = 11.11 \times 0.8 = 8.89 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.10)$$

③ 空气系数: $n=1.1$

④ 8000Kcal 燃料实际空气需要量 L_n

$$L_n = 1.1 \times 8.89 = 9.78 \text{m}^3/\text{m}^3$$

12) 燃烧产物生成量 V_0

$$\begin{aligned}V_0 &= [1.85 \times 10^{-4} Q_{\text{低}} + 3.85 + (n-1) L_0] \times 0.8 + 0.2 \\ &= [1.85 \times 10^{-4} \times 10000 + 3.85 + (1.1-1) \times 11.11] \times 0.8 + 0.2 \\ &= 10.36 \text{m}^3/\text{m}^3\end{aligned}\quad (2.11)$$

其中 0.2 为调整烟气热值兑入烟气量。

13) 小时空气需要量 $V_{\text{空}}$

$$\begin{aligned}\text{小时空气需要量 } V_{\text{空}} &= 8000 \text{Kcal 燃料实际空气需要量 } L_n \times \text{小时燃料消耗量 } B \\ &= 9.78 \times 228.95 = 2238.94 \text{m}^3/\text{h}\end{aligned}\quad (2.12)$$

14) 小时燃烧产物生成量

$$\begin{aligned}\text{小时燃烧产物生成量} &= \text{燃烧产物生成量 } V_0 \times \text{小时燃料消耗量 } B \\ &= 10.36 \times 228.95 = 2372.86 \text{m}^3/\text{h}\end{aligned}\quad (2.13)$$

(2) 采用蓄热烧嘴时热工计算

取热效率: $\eta=35\%$

1) 求料坯加热需要吸收的有效热量 $Q_{\text{效}}$:

$$\text{有效热 } Q_{\text{效}} = 1000 \times 1200 \times 0.165 - 1000 \times 20 \times 0.116 = 195680 \text{Kcal/t} \quad (2.14)$$

其中: 1200 为料坯加热温度;

20 为料坯初始温度；

0.165 为 1200℃时钢坯的比热容；

0.116 为 20℃时钢坯的比热容。

2) 求每吨料坯加热需要供给热量 $b_{\text{热}}$ ：

$$\begin{aligned} \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} &= \text{有效热 } Q_{\text{效}} / \text{热效率 } \eta \\ &= 195680 / 0.35 = 559085.71 \text{Kcal/t} \end{aligned} \quad (2.15)$$

3) 装载量=5t

4) 料坯加热时间 h：

按每 8 分钟加热 1cm 料坯计算加热时间 h：

$$\text{加热时间 } h = (32/2) \times 8/60 = 2.13 \text{h} \quad (2.16)$$

其中料坯厚 320mm；双面加热；

5) 产量 P

$$\text{产量 } P = \text{装载量} / \text{加热时间 } h = 5 / 2.13 = 2.34 \text{t/h} \quad (2.17)$$

6) 小时需要供入热量 Q：

$$\begin{aligned} \text{供入热量} &= \text{产量 } P \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} = 2.34 \times 559085.71 \\ &= 1308260.5 \text{Kcal/h} \end{aligned}$$

7) 燃料热值 $Q_{\text{低}}$

$$\text{取 } Q_{\text{低}} = 8000 \text{Kcal/m}^3 \text{ (天然气热值取 } 10000 \text{Kcal/m}^3 \text{；兑烟气调制 } 8000 \text{Kcal/m}^3 \text{)} \quad (2.18)$$

8) 小时燃料消耗量 B

$$\begin{aligned} \text{小时燃料消耗量 } B &= \text{小时供入热量 } Q / \text{燃料热值 } Q_{\text{低}} \\ &= 1308260.57 / 8000 = 163.53 \text{m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (2.19)$$

9) 炉底强度 H：

$$\begin{aligned} \text{炉底强度 } H &= \text{产量 } P / \text{炉底面积 } A \\ &= 2.34 \times 1000 / 7.5 = 313.24 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

其中炉底面积 A 取 7.5m²。

10) 炉底热强度 $H_{\text{热}}$ ：

$$\begin{aligned} H_{\text{热}} &= \text{炉底强度 } H \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} \\ &= 313.24 \times 559085.71 \times 4.186 / 1000 = 733077.04 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

11) 空气需要量计算

① 10000Kcal 天然气的理论空气需要量 L_{01}

$$L_{01} = 2.65 \times 0.0001 \times 10000 \times 4.186 + 0.02 = 11.11 \text{m}^3/\text{m}^3 \text{ (P8 火焰炉热工计算)} \quad (2.22)$$

② 8000Kcal 燃料的理论空气需要量 L_{02}

$$L_{02} = 11.11 \times 0.8 = 8.89 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.23)$$

③空气系数 n : $n=1.1$

④8000Kcal 燃料实际空气需要量 L_n

$$L_n = 1.1 \times 8.89 = 9.78 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.24)$$

12) 燃烧产物生成量 V_0

$$\begin{aligned} V_0 &= [1.85 \times 10^{-4} Q_{\text{低}} + 3.85 + (n-1) L_0] \times 0.8 + 0.2 \\ &= [1.85 \times 10^{-4} \times 10000 + 3.85 + (1.1-1) \times 11.11] \times 0.8 + 0.2 \\ &= 10.36 \text{m}^3/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (2.25)$$

其中 0.2 为调整烟气热值兑入烟气量。

13) 小时空气需要量 $V_{\text{空}}$

小时空气需要量 $V_{\text{空}} = 8000 \text{Kcal 燃料实际空气需要量 } L_n \times \text{小时燃料消耗量 } B$

耗量 B

$$= 9.78 \times 163.53 = 1599.24 \text{m}^3/\text{h} \quad (2.26)$$

14) 小时燃烧产物生成量

小时燃烧产物生成量 = 燃烧产物生成量 $V_0 \times \text{小时燃料消耗量 } B$

$$= 10.36 \times 163.53 = 1694.9 \text{m}^3/\text{h} \quad (2.27)$$

(3) 蓄热烧嘴与普通烧嘴同时燃烧时热工计算

取热效率: $\eta = 30\%$

1) 求料坯加热需要吸收的有效热量 $Q_{\text{效}}$:

$$\text{有效热 } Q_{\text{效}} = 1000 \times 1200 \times 0.165 - 1000 \times 20 \times 0.116 = 195680 \text{Kcal/t} \quad (2.28)$$

其中: 1200 为料坯加热温度。

20 为料坯初始温度。

0.165 为 1200℃ 时钢坯的比热容;

0.116 为 20℃ 时钢坯的比热容。

2) 求每吨料坯加热需要供给热量 $b_{\text{热}}$:

每吨热耗 $b_{\text{热}} = \text{有效热 } Q_{\text{效}} / \text{热效率 } \eta$

$$= 195680 / 0.30 = 652266.67 \text{Kcal/t} \quad (2.29)$$

3) 装载量 = 5t

4) 料坯加热时间 h :

按每 8 分钟加热 1cm 料坯计算:

$$\text{加热时间 } h = (32/2) \times 8/60 = 2.13 \text{h} \quad (2.30)$$

其中料坯厚 320mm; 双面加热;

5) 产量 P

$$\text{产量 } P = \text{装载量} / \text{加热时间 } h = 5 / 2.13 = 2.34 \text{t/h} \quad (2.31)$$

6) 小时需要供入热量 Q :

$$\begin{aligned} \text{供入热量 } Q &= \text{产量 } P \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} = 2.34 \times 652266.67 \\ &= 1526304 \text{Kcal/h} \end{aligned} \quad (2.32)$$

7) 燃料热值 $Q_{\text{低}}$

取 $Q_{\text{低}} = 8000 \text{Kcal/m}^3$ (天然气热值取 10000Kcal/m^3 ; 兑烟气调制 8000Kcal/m^3)

8) 小时燃料消耗量 B

$$\begin{aligned} \text{小时燃料消耗量 } B &= \text{小时供入热量 } Q / \text{燃料热值 } Q_{\text{低}} \\ &= 1526304 / 8000 = 190.79 \text{m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (2.33)$$

9) 炉底强度 H :

$$\begin{aligned} \text{炉底强度 } H &= \text{产量 } P / \text{炉底面积 } A \\ &= 2.34 \times 1000 / 7.5 = 313.24 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

其中炉底面积 A 取 7.5m^2 。

10) 炉底热强度 $H_{\text{热}}$:

$$\begin{aligned} H_{\text{热}} &= \text{炉底强度 } H \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} \\ &= 313.24 \times 652266.67 \times 4.186 / 1000 = 855256.55 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (2.35)$$

11) 空气需要量计算

① 10000Kcal 天然气的理论空气需要量 L_{01}

$$L_{01} = 2.65 \times 0.0001 \times 10000 \times 4.186 + 0.02 = 11.11 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{P8 火焰炉热工计算}) \quad (2.36)$$

② 8000Kcal 燃料的理论空气需要量 L_{02}

$$L_{02} = 11.11 \times 0.8 = 8.89 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.37)$$

③ 空气系数 n : $n = 1.1$

④ 8000Kcal 燃料实际空气需要量 L_n

$$L_n = 1.1 \times 8.89 = 9.78 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.38)$$

12) 燃烧产物生成量 V_0

$$\begin{aligned} V_0 &= [1.85 \times 10^{-4} Q_{\text{低}} + 3.85 + (n-1) L_0] \times 0.8 + 0.2 \\ &= [1.85 \times 10^{-4} \times 10000 + 3.85 + (1.1-1) \times 11.11] \times 0.8 + 0.2 \\ &= 10.36 \text{m}^3/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (2.39)$$

其中 0.2 为调整烟气热值兑入烟气量。

13) 小时空气需要量 V

$$\begin{aligned} \text{小时空气需要量 } V &= 8000 \text{Kcal 燃料实际空气需要量 } L_n \times \text{小时燃料消耗量 } B \\ &= 9.78 \times 190.79 = 1865.78 \text{m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (2.40)$$

14) 小时燃烧产物生成量

$$\text{小时燃烧产物生成量} = \text{燃烧产物生成量 } V_0 \times \text{小时燃料消耗量 } B$$

$$=10.36 \times 190.79 = 1977.39 \text{m}^3/\text{h} \quad (2.41)$$

2.3.2 双蓄热区设计参数计算

取热效率: $\eta = 41\%$ [4][22][23]

1) 求料坯加热需要吸收的有效热量 $Q_{\text{效}}$:

$$\text{有效热 } Q_{\text{效}} = 1000 \times 1200 \times 0.165 - 1000 \times 20 \times 0.116 = 195680 \text{Kcal/t} \quad (2.42)$$

其中: 1200 为料坯加热温度。

20 为料坯初始温度。

0.165 为 1200℃ 时钢坯的比热容;

0.116 为 20℃ 时钢坯的比热容。

2) 求每吨料坯加热需要供给热量 $b_{\text{热}}$:

$$\begin{aligned} \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} &= \text{有效热 } Q_{\text{效}} / \text{热效率 } \eta \\ &= 195680 / 0.41 = 477268.29 \text{Kcal/t} \end{aligned} \quad (2.43)$$

3) 装载量 = 2.5t

4) 料坯加热时间 h :

按每 8 分钟加热 1cm 料坯计算:

$$\text{加热时间 } h = (32/2) \times 8/60 = 2.13 \text{h} \quad (2.44)$$

其中料坯厚 320mm; 双面加热;

5) 产量 P

$$\text{产量 } P = \text{装载量} / \text{加热时间 } h = 2.5 / 2.13 = 1.17 \text{t/h} \quad (2.45)$$

6) 小时需要供入热量 Q :

$$\begin{aligned} \text{供入热量 } Q &= \text{产量 } P \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} \\ &= 1.17 \times 477268.29 = 558403.9 \text{Kcal/h} \end{aligned} \quad (2.46)$$

7) 燃料热值 $Q_{\text{低}}$

取 $Q_{\text{低}} = 800 \text{Kcal/m}^3$ (天然气热值取 10000Kcal/m^3 ; 兑烟气调制 800Kcal/m^3)

8) 小时燃料消耗量 B

$$\begin{aligned} \text{小时燃料消耗量} &= \text{小时供入热量 } Q / \text{燃料热值 } Q_{\text{低}} \\ &= 558403.9 / 800 = 698 \text{m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (2.47)$$

9) 炉底强度 H :

$$\begin{aligned} \text{炉底强度 } H &= \text{产量 } P / \text{炉底面积 } A \\ &= 1.17 \times 1000 / 6.68 = 175.11 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

其中炉底面积 A 取 6.68m^2 。

10) 炉底热强度 $H_{\text{热}}$:

$$\begin{aligned} H_{\text{热}} &= \text{炉底强度 } H \times \text{每吨热耗 } b_{\text{热}} \\ &= 175.11 \times 477268.29 \times 4.186 / 1000 = 349838.17 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (2.49)$$

11) 空气需要量计算

①10000Kcal 天然气的理论空气需要量 L_{01}

$$L_{01}=2.65 \times 0.0001 \times 10000 \times 4.186 + 0.02 \\ = 11.11 \text{m}^3/\text{m}^3 \text{ (P8 火焰炉热工计算)} \quad (2.50)$$

②800Kcal 燃料的理论空气需要量 L_{02}

$$L_{02}=11.11 \times 0.08 = 0.89 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.51)$$

③空气系数 n : $n=1.1$

④800Kcal 燃料实际空气需要量 L_n

$$L_n=1.1 \times 0.89 = 0.98 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.52)$$

12) 燃烧产物生成量 V_0

$$V_0=[1.85 \times 10^{-4} Q_{\text{低}} + 3.85 + (n-1) L_0] \times 0.08 + 0.92 \\ = [1.85 \times 10^{-4} \times 10000 + 3.85 + (1.1-1) \times 11.11] \times 0.08 + 0.92 \\ = 1.94 \text{m}^3/\text{m}^3 \quad (2.53)$$

其中 0.92 为调整烟气热值兑入烟气量。

13) 小时空气需要量 V

小时空气需要量 $V=800\text{Kcal}$ 燃料实际空气需要量 $L_n \times$ 小时燃料消耗量 B

$$= 0.98 \times 698 = 682.6 \text{m}^3/\text{h} \quad (2.54)$$

14) 小时燃烧产物生成量

小时燃烧产物生成量=燃烧产物生成量 $V_0 \times$ 小时燃料消耗量 B

$$= 1.94 \times 698 = 1351.64 \text{m}^3/\text{h} \quad (2.55)$$

2.3.3 高速烧嘴设计参数计算

该加热炉仅设有一台高速烧嘴；此加热炉选用燃烧能力为 70 万 Kcal/h 的高速烧嘴。

1) 装载量=2.5t

2) 料坯加热时间 h :

按每 8 分钟加热 1cm 料坯计算:

$$\text{加热时间 } h = 32 \times 8 / 60 = 4.26 \text{h} \quad (2.56)$$

其中料坯厚 320mm;

3) 小时供入热量 Q :

供入热量 $Q=700000\text{Kcal/h}$

4) 燃料热值 $Q_{\text{低}}$

取 $Q_{\text{低}}=8000\text{Kcal/m}^3$ (天然气热值取 10000Kcal/m^3 ; 兑烟气调制 8000Kcal/m^3)

5) 小时燃料消耗量 B

$$\begin{aligned} \text{小时燃料消耗量} &= \text{小时供入热量 } Q / \text{燃料热值 } Q_{\text{低}} \\ &= 700000 / 8000 = 87.5 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (2.57)$$

6) 空气需要量计算

① 10000Kcal 天然气的理论空气需要量 L_{01}

$$L_{01} = 2.65 \times 0.0001 \times 10000 \times 4.186 + 0.02 = 11.11 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (2.58)$$

(P8 火焰炉热工计算)

② 8000Kcal 燃料的理论空气需要量 L_{02}

$$L_{02} = 11.11 \times 0.8 = 8.89 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (2.59)$$

③ 空气系数 n: $n=1.1$

④ 8000Kcal 燃料实际空气需要量 L_n

$$L_n = 1.1 \times 8.89 = 9.78 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (2.60)$$

7) 燃烧产物生成量 V_0

$$\begin{aligned} V_0 &= [1.85 \times 10^{-4} \times 10000 + 3.85 + (1.1 - 1) \times 11.11] \times 0.8 + 0.2 \\ &= 10.36 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (2.61)$$

其中 0.2 为调整烟气热值兑入烟气量。

8) 小时空气需要量 V

$$\begin{aligned} \text{小时空气需要量 } V &= 8000 \text{Kcal 燃料实际空气需要量 } L_n \times \text{小时燃料消耗量 } B \\ &= 9.78 \times 87.5 = 855.69 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (2.62)$$

9) 小时燃烧产物生成量

$$\begin{aligned} \text{小时燃烧产物生成量} &= \text{燃烧产物生成量 } V_0 \times \text{小时燃料消耗量 } B \\ &= 10.36 \times 87.5 = 906.88 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (2.63)$$

2.4 本章小结

本章对实验炉关键参数进行确定，对不同燃料、烧嘴、烧嘴组合进行设计参数计算。本章解决了一台加热炉上布置多种燃烧器状况下的设计参数计算，包括燃料用量、配风用量及管路规格的确定，为实验炉的结构设计提供了理论依据，以下是对主要结果的总结：

表 2.1 实验炉主要设计参数汇总表

Table 2.1 The main design parameters of the experimental furnace

	燃料种类、热值 (Kcal)	小时消耗燃料 量、空气量 (m ³ /h)	热效率 η (选取)	炉底强度 H kg/(m ² .h)	炉底热强度 H 热 Kcal/(m ² .h)
普通烧嘴	天然气、8000	228.95/2239	25%	313.24	245176
单蓄热烧 嘴	天然气、8000	163.53/1599	35%	313.24	204314
双蓄热烧 嘴	低热值煤气、 800-800 可调	698/682.6	41%	175.11	83573
高速烧嘴	天然气、8000	87.5/855.7	-	-	-

第三章 实验炉结构设计

3.1 燃烧系统

本实验炉具备常规、脉冲和蓄热式（单蓄热、双蓄热）加热炉多项功能，在炉墙两侧上下交错布置单蓄热、双蓄热式燃烧器各两对，设有单蓄热实验烧嘴，蓄热体可以更换以试验不同蓄热体的性能和使用效果，蓄热室垂直安置，烟气自上而下流动，入口温度 1250℃，出口温度 150℃；空气自下而上流动，入口温度 20℃，出口温度 1000℃。蓄热体从蓄热室上部装入下部卸出，具体填充高度根据需要确定。炉端墙布置高速烧嘴，在高速烧嘴上部留有烧嘴安装孔，以满足对不同类型烧嘴试验的要求，并配有高压点火器，紫外火焰探测器等，能实现自动点火、火焰自动监测、各种安全接口等，燃烧系统控制具有手动、自动调节功能。

3.2 换向系统

本实验炉采用两套不同的换向系统，助燃空气采用旋转四通换向阀（单、双蓄热助燃空气），煤气换向系统采用一对三通换向阀代替旋转四通换向阀保证双蓄热区换向系统安全工作，旋转四通换向阀其结构如图 3.1。

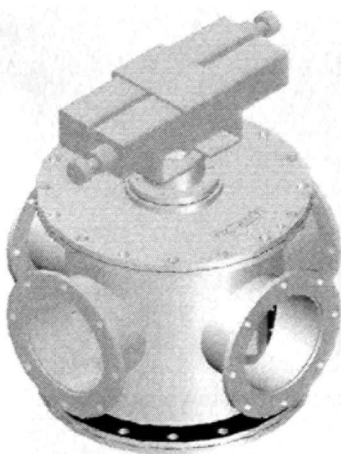


图 3.1 旋转四通换向阀

Figure 3.1 Rotary reversing valve

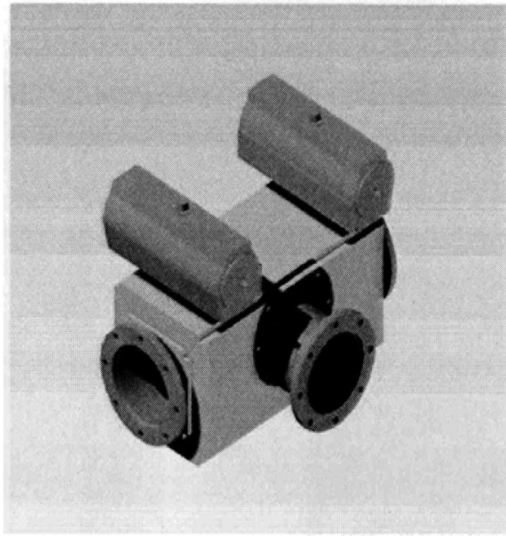


图 3.2 三通换向阀

Figure 3.2 Three direct links valve

换向阀的换向时间采用定时控制为主，但在出蓄热室的烟气温度过高时，控制系统会自动报警并根据温度信号控制换向阀强制进行换向。控制系统中设有换向自动保护装置。

3.3 炉衬结构

本台车加热炉炉衬采用全纤维炉衬结构。内层为多晶莫来石耐火纤维毡（250mm），外层为普铝纤维（50mm）。该炉具有可靠的密封性，当炉温为 1300℃ 左右时，炉侧外壁温升度不超过 60℃，炉顶外表面温升不超过 65℃，确保炉温的均匀性。见图 3.2。

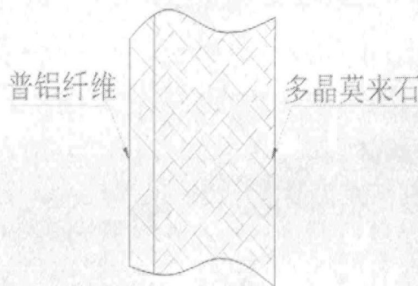
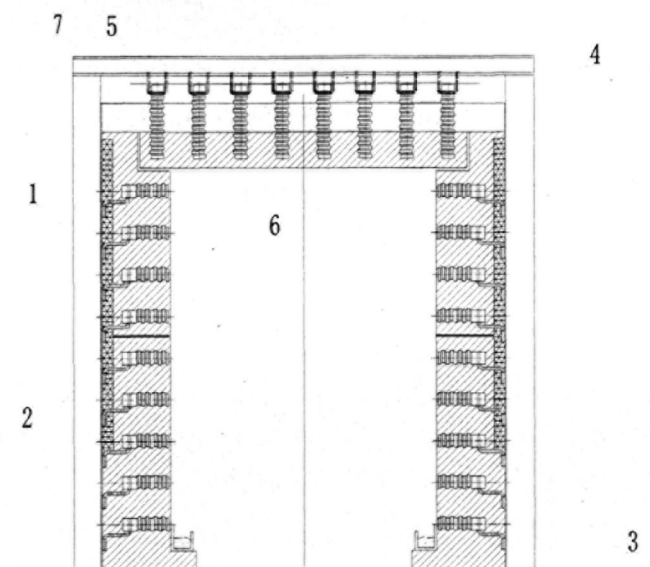


图 3.3 炉衬结构

Figure 3.3 Lining structure

3.4 炉口结构

炉口采用钢纤维耐火浇注料预制件, 取代原来铸铁板结构。炉口比炉子前墙突出 20mm, 使炉口与炉门能更好的接触, 实际使用表明这种结构既能保证密封性良好又能显著提高炉口寿命, 见图 3.3。



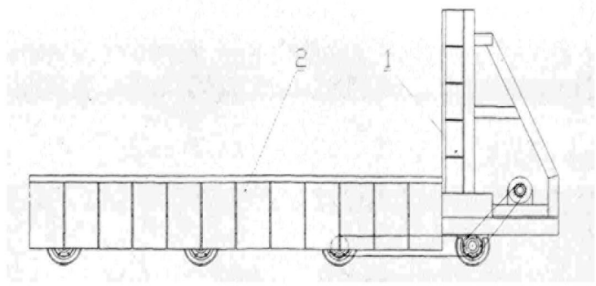
1—纤维毡 2—重质浇注料 3、4—炉墙锚固砖
5—炉顶锚固砖卡具 6—膨胀缝 7—轻质浇注料

图 3.4 炉口结构

Figure 3.4 The entrance structure of furnace

3.5 炉门、台车结构

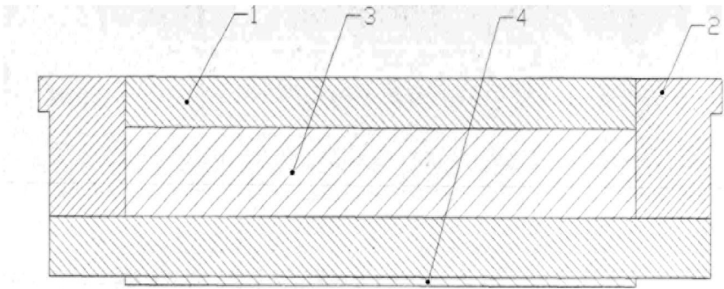
由于中试基地厂房高度的限制, 本实验炉炉门及台车采用车带门的方案, 即炉门固定在台车上, 采用槽钢支撑, 防止炉门变形, 炉门为金属焊接框架, 内衬全耐火纤维, 纤维结构与炉体相同。台车采用自行走机构。台车耐火材料由四层耐火砖铺砌, 第一层为高铝砖, 第二层为高强轻质砖, 第三层是高铝砖, 第四层是硅钙板, 台车周边设有 Cr25Ni20 铸铁边框, 并有低水泥浇注料预制块装填, 具有耐高温、高强度、耐急冷急热性能且不易变形等特点。炉门、台车机构见图 3.4、3.5。



1—炉门 2—台车

图 3.5 台车炉门结构

Figure 3.5 The structure of trolley and door



1—高铝砖 2—重质浇注料 3—轻质耐火砖 4—硅钙板

图 3.6 台车砌筑结构

Figure 3.6 The masonry structure of trolley

3.6 台车密封

3.6.1 台车侧面密封

台车侧面密封采用砂封结构，台车边缘设有砂封刀，如图 3.6。

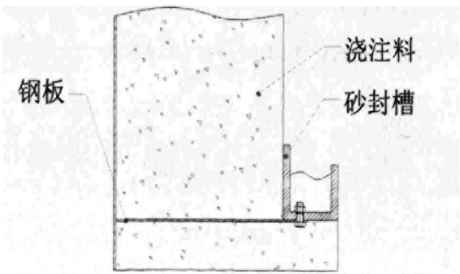


图 3.7 砂封机构

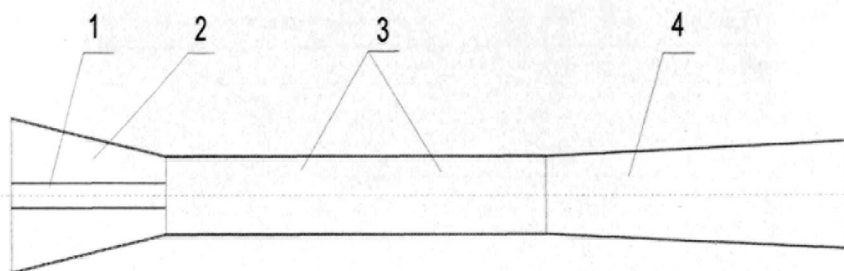
Figure 3.7 The structure of sand seal

3.6.2 炉后密封

台车与炉端墙之间设有 600mm 实底段，实现延长炉长，缩短台车长度的目的，台车与实底段采用软密封，密封面采用耐火纤维针刺毯。见图 5.4。

3.7 排烟系统

本炉采用两套排烟系统，当采用常规烧嘴时，采用上排烟方式，在炉顶设置排烟口，并在排烟口安装换热器。在烟囱和换热器之间掺冷风，降低烟气温度，保护换热器。炉子采用喷射器强制排烟，其结构如图 3.7，烟囱的抽力可根据炉压情况自动调节喷射气体阀位，进行控制，从而控制炉内温度、压力。



1—喷射管 2—收缩段 3—混合段 4—扩散段

图 3.8 喷射器结构

Figure 3.8 The structure of injector

当采用蓄热式燃烧系统时，烟气从蓄热式烧嘴出来，温度已降至 150℃ 左右，流经换向阀、烟气管道、排烟机从烟囱排出，在换向阀后的排烟管路上设有烟温检测和调节装置，并在排烟机入口处设有自动调节阀，其执行机构与炉压检测信号连锁，用来控制炉膛压力。此时炉顶排烟做为副烟道排烟，调整炉内温度、压力。

3.8 管道系统

本实验炉由于设有不同类型的燃烧器，且布置复杂，所以管路系统布置方案的制定尤为重要，既要满足各种燃烧器工作要求，也要考虑空间布置的合理性，同时还要考虑布置的美观，因此管路优化设计成为至关重要的问题。

3.8.1 煤气管道系统

炉子的总燃气管道从车间供气管道预留接口处引接，在燃气热值调整装置

前后留有燃气管路接口，总管及炉子两侧、炉顶和炉端支干管均为焊管。总管道及各支干管上均安装快速切断阀、流量计、压力表、调节器等以满足对试验炉不同燃烧器工作时的监测与控制要求。

3.8.2 燃气热值调整装置

本装置设计两套方案，分别采用氮气或蓄热室排出烟气与天然气混合调整燃气热值。

方案一：采用氮气与天然气混合调整燃气热值

采用氮气与天然气混合的方法实现对燃气热值的调整，以满足燃气热值在 $800 \sim 10000 \text{ kcal/m}^3$ 之间的变化，从而实现对不同燃料燃烧的模拟。燃气和氮气通过不同管路供入煤气混合装置，在燃气及氮气管路上均安装自动快速切断阀、流量计、压力表等，煤气管路上的煤气调节阀接受温度记录调节仪的指挥信号动作，氮气调节阀通过比率器与煤气调节阀成比例开启。通过计算机控制系统控制燃气热值，从而实现对燃气热值的有效控制。在煤气混合装置上设有取样孔，可以实现对混合煤气的取样分析。

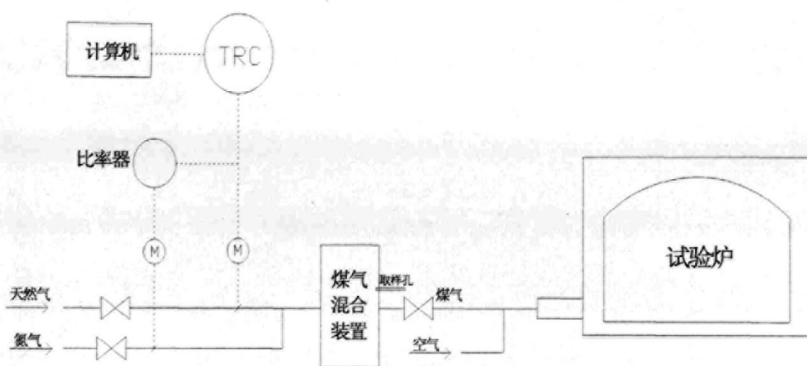


图 3.9 氮气与天然气混合调整燃气热值示意图

Figure 3.9 The Schematic diagram of adjust gas calorific value by mixing nitrogen and natural gas

方案二：采用烟气（可掺部分氮气）与天然气混合调整燃气热值

采用蓄热燃烧时换向阀后的烟气与天然气混合的方法实现对燃气热值的调整，当采用蓄热燃烧时，换向阀后的烟气部分通往烟囱排出厂房，另一部分通过换热器换热，使烟气温度由 150°C 降至 50°C 左右，通过调节阀调节供入烟气、天然气量，实现燃气热值的调整。

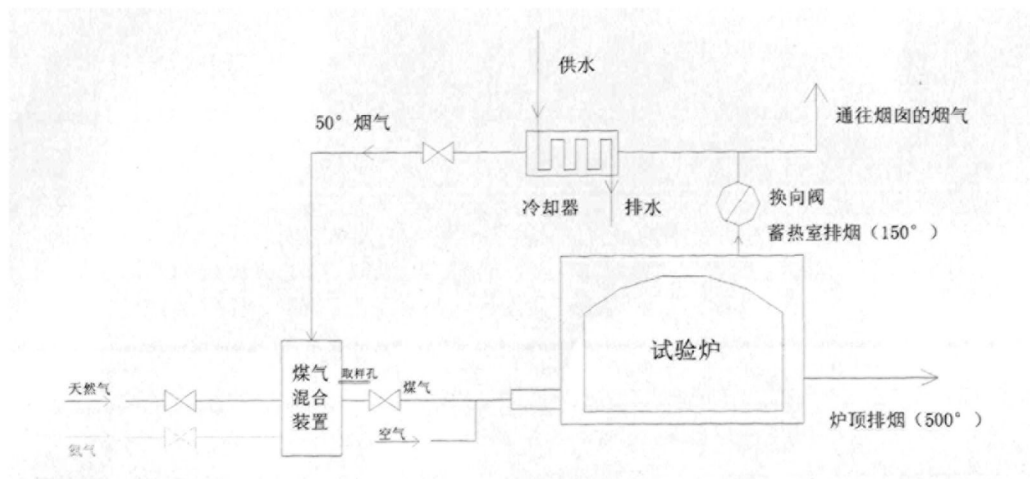


图 3.10 烟气与天然气混合调整燃气热值示意图

Figure 3.10 The Schematic diagram of adjust gas calorific value by mixing flue gas and natural gas

3.8.3 空气管道系统

空气管道系统包括风机到换热器及换热器（换向阀）到各烧嘴的全部管道。空气总管路安装有压力表、调节阀、流量孔板，以实现加热炉烧嘴工作时的空燃比自动调节，换向阀后空气管路设有温度检测和调整装置。烧嘴前各支管安装有气动蝶阀、手动阀等，以实现供风量自动及手动调节。

烧嘴前各管均安装有手动不锈钢球阀、自动调节装置等，能根据炉温调节要求手动或自动调节供气量，以满足工艺要求

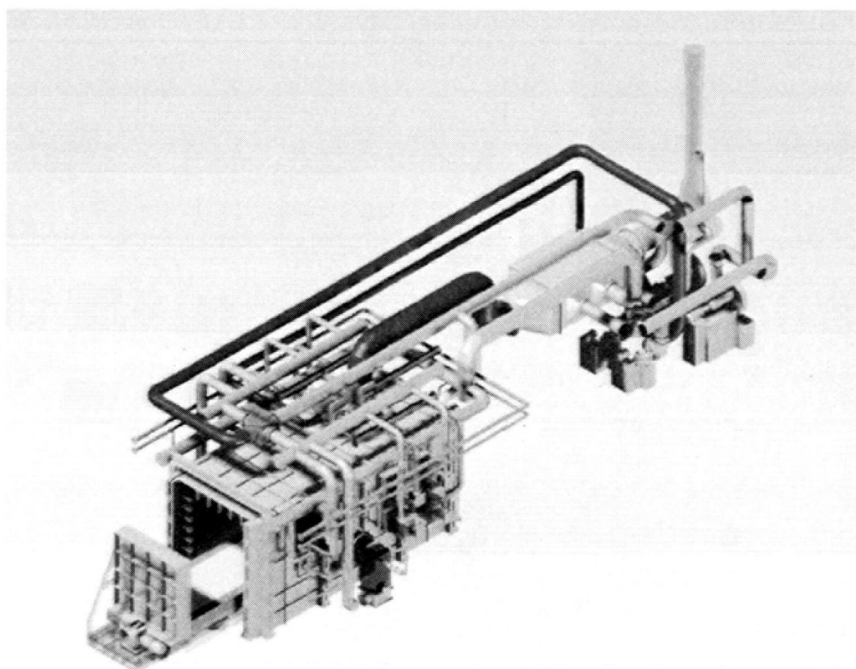


图 3.11 管路系统布置图

Figure 3.11 The layout of piping system

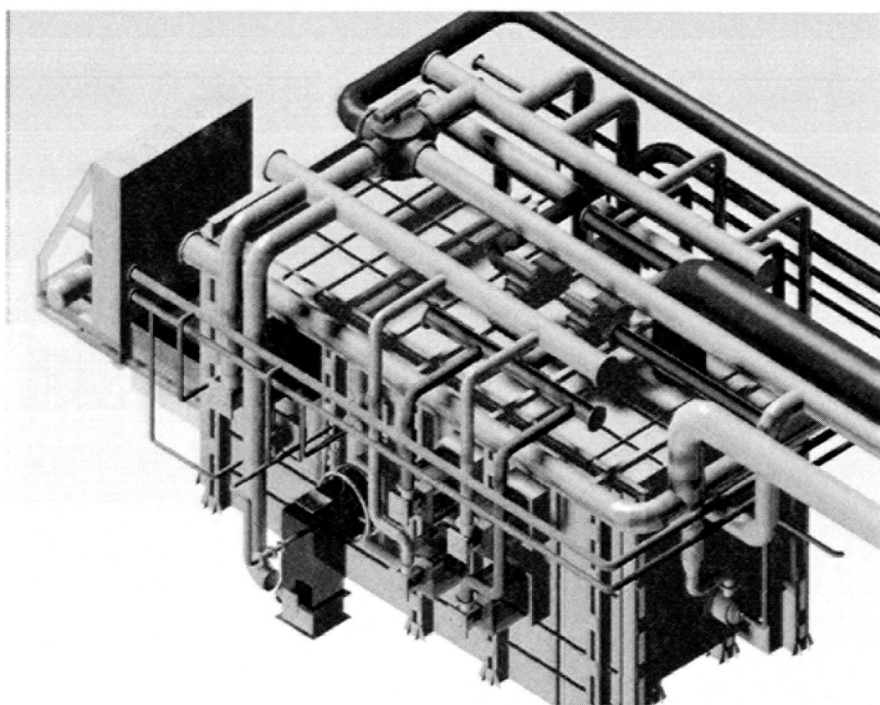


图 3.12 炉前管路布置图

Figure 3.12 The layout of piping system around furnace

3.9 台车实验炉监测系统

3.9.1 蓄热室温度检测：

在蓄热室顶部装一支抽气式热电偶，在蓄热体纵向安装 3 处普通热电偶，测量在供风和排烟状态时蓄热体内部温度分布，同时可通过测温孔测得进出蓄热体的空气及烟气流量，对蓄热体进行分析。

3.9.2 空气、煤气、烟气管路流量、温度、压力检测：

分别在空气、煤气、烟气管道上安装流量检测装置，压力检测装置，并在空气、烟气管路布置温度检测装置。

3.9.3 沿炉长分布的物理量检测：

沿炉长方向，炉顶安装三支热电偶，炉体两侧共布置 14 处测温孔，每侧 7 处测温孔，采用热电偶进行测量，测温孔公用一只热电偶，确保不破坏炉内温度场，用于进行沿炉长、炉宽和炉高方向的热工参数分布研究，炉顶设有压力检测装置用于炉压检测。同时可以通过测温孔进行取样和流速测量，用于炉膛内气体成分和浓度测试以及炉内气体流速测量，分析炉内浓度场与流场。

3.9.4 钢坯温度检测：

在被加热钢坯的表面及中心或其他代表位置处，埋设热电偶，以测量炉内钢坯温度的变化，检测不同燃烧方法或不同热值燃料燃烧状态下对钢坯加热的影响。

3.10 台车式实验加热炉自动控制系统

台车式试验加热炉自动控制系统硬件采用西门子 S7-300 系列 PLC，上位机采用研华天工工控计算机。编制电气连锁控制系统、空燃比自动控制系统、蓄热式燃烧换向控制系统、燃气热值计算系统及炉压自动控制系统。上位机操作站（兼容工程师站及数学模型控制系统）采用高可靠性的工业控制计算机，配置纯平高分辨率彩色 CRT 显示器，上位机和 PLC 之间的通讯采用 SIMENS MPI 多点接口方式。将一次仪表采集的各种过程变量送入 PLC 进行数据处理，由 PLC 根据设定控制方式和控制目标值分别驱动相应的执行机构，调节过程变量，实现对各点的温度、压力、流量、空燃比的调节和控制。并且 PLC 可实时的将采集到的各种数据传输到上位机显示、存储、打印。配置编程软件

STEP7 V5.3 及西门子上位机监控画面 WinCC6.0，具有友好的人机界面，操作员可以进行参数设定、修改加热温度曲线等的调用和设备操作。人机界面接口能显示全景画面、区域画面、报警画面、报警声响、操作者指导信息画面、图表画面、趋势记录、系统维护等各种画面。计算机软件采用先进的 WiCC6.0 多媒体动态技术，以动态图形模拟显示设备的运行状态，跟踪显示炉内各点温度曲线，进行工艺曲线的设定、显示和报警提示，实时记录和打印各区温度、各种压力参数、报警及各种故障情况并进行存档，可以保存长期的历史数据。

3.10.1 一级自动化系统的检测与控制项目

表 3.1 一级控制系统检测与控制项目

Table 3.1 The control system testing and control project of the first level

序号	热工参数	检测点	显示仪表安装	自动控制要求	调节量和调节机构
1	炉温	炉顶 3 个测温热电偶(一控二测)，侧墙留有 14 个测温孔	现场显示变送至 PLC 和上位机，并打印存储记录温度值	通过测温数据，调节煤气入炉量，实现控温目的	通过测温数据，调节煤气入炉量以及空燃比。调节机构为 PLC 控制电磁阀。
2	燃料流量	混合装置前、后煤气管路，炉体两侧分管路共安装 4 套流量孔板	现场显示变送至 PLC 及上位机，并记录存储打印瞬时及累积流量值	根据炉温设定曲线通过计算机程序自动调节燃料流量	调节机构为 PLC 控制电磁阀。
3	空气流量	在换热燃烧、蓄热燃烧空气总管路及炉体两侧分管路分别安装空气流量孔板	现场显示变送至 PLC 及上位机，并记录存储打印瞬时值	实现空燃比自动控制	调节机构为 PLC 控制电磁阀完成。空燃比调节量为阀门开度，调节机构为 PLC 和电动调节阀。
4	炉膛压力	炉内安装压力导管，并在炉外安装压力表及压力变送器	现场指示，并变送至 PLC 和上位机，并记录存储打印炉膛压力值	连续调节 PID 自动控制	调节量为排烟风机控制调节，调节机构为 PLC 和电动调节阀

5	燃料压力	在天然气总管路，混合煤气总管路安装压力表及压力变送器	现场指示，并变送至 PLC 和上位机，并记录存储打印燃料压力值	自动调节	依靠自力式的调节阀自动调整
6	空气压力	在助燃风机后空气总管路及压缩空气管路安装压力表及压力变送器	现场指示，并变送至 PLC 和上位机，并记录存储打印空气压力值	手动控制	助燃风机入口风栅
7	预热器和蓄热体入口烟气温	在预热器前安装温度计及热电阻；在蓄热体入口采用抽气热电偶测温	现场指示，并变送至 PLC 和上位机，并记录存储打印预热空气入口温度	不调节，依靠设计保证	
8	预热器和蓄热体出口烟气温	在预热器后安装温度计及热电阻；在蓄热体出口采用抽气热电偶测温	现场指示，并变送至 PLC 和上位机，记录存储打印预热空气入口温度	不调节，依靠设计保证	

3.10.2 温度控制系统：

炉顶布置 3 支固定热电偶（一控两测），实现加热炉热工过程程序控制。试验加热炉 PLC 控制系统采集到的数据均由 ProFibus 工业总线传送到上位机实现实时记录炉内各点的温度，它既符合现场操作者的传统习惯，又能满足数据实时记录的要求，并能节省 PLC 内有限的资源。

3.10.3 燃烧控制系统

在蓄热燃烧和高速烧嘴燃烧时，通过安装在煤气和空气管道上的流量孔板，调节系统空燃比配置。

每个控温热电偶采集到的温度信号与设定值进行比较，经 PLC 计算后，给各烧嘴控制器及助燃空气阀门执行机构发出指令，通过改变燃料的供给量，根据试验要求，使炉膛温度按照预设的炉膛温升曲线，炉温控制由对煤气回路和空气回路的控制实现，使煤气与空气的流量满足合理的燃烧空燃比，从而控制炉内的供热负荷。

3.10.4 炉压控制系统

通过改变鼓风机和引风机的工作参数进行调节，实现试验炉炉膛内压力的控制。

3.10.5 机械连锁控制系统

炉门升降、台车行走、风机启动、压力开关启闭等由 PLC 连锁控制。

3.10.6 台车炉上位机控制系统

采用 WinCC 编程的多媒体互动界面，操作人员可在 CRT 显示器上通过键盘或鼠标进行各种操作。若操作或设定参数超出有关规定，CRT 显示器上将直接提示错误，并提示正确的操作方法。系统的这种“人机对话”方式使操作直观、便捷、可靠。

上位机主要监控画面：

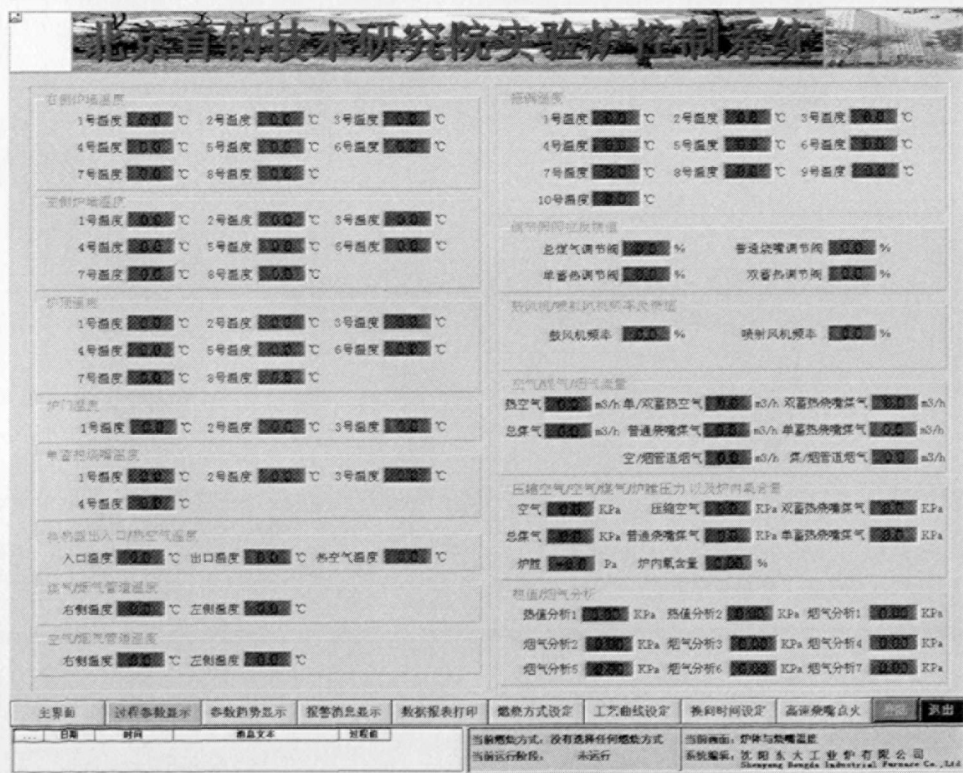
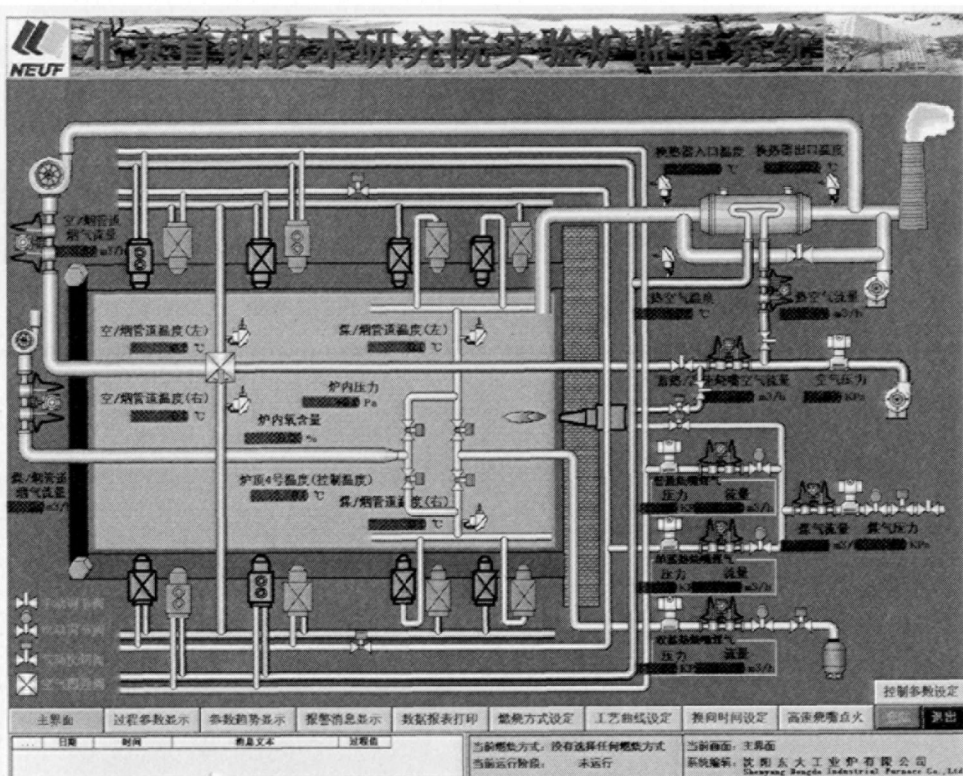
流程监控图：可以方便、直观的方式系统监视加热炉各区炉温、炉压、空气压力等热工参数，以及动态显示风机、执行机构的运行状态及调节阀门的开度。

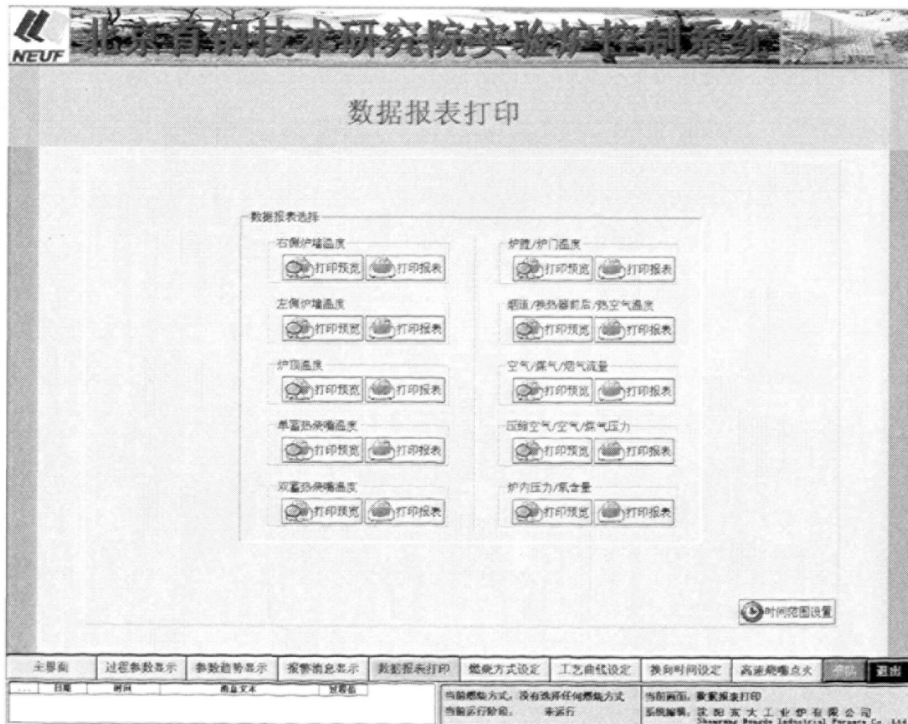
实时温度曲线图：可以实时绘出生产过程中过去 1 小时各点温度曲线，使操作人员直观了解各点温度趋势，以便作出及时的调整。

报警图：对炉温超温，炉压过高、过低，供煤气及空气总管压力过低等进行声光报警，报警信号包括闪烁、颜色变化及声响信号。当按下确认按键后闪烁成为常亮、颜色变为红色或黄色，声响停止，在报警框内标有变量名、位号、报警类型、时间、建议应急操作方法等信息，以便操作人员及时处理各种故障

人机交互窗口：通过该窗口可以对设备进行操作、控制、修改运行参数等。

操作提示窗口：针对操作员给定的要求判断其操作是否合理，当操作员违规操作时给出提示内容。避免人为事故的发生。





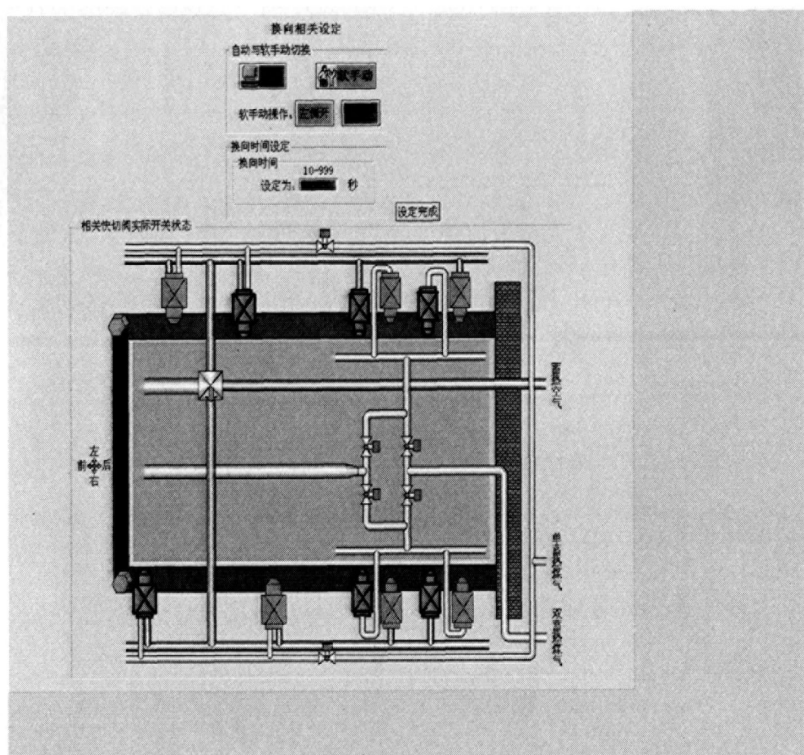


图 3.13 实验炉控制画面

Figure 3.13 The control menu of experimental furnace

3.11.安全保护措施

(1)、高速烧嘴具有自动监测保护及报警功能，能实现点火程序控制，确保点火安全。

(2)、蓄热式烧嘴配点火烧嘴，保证低温点火燃烧。

(3)、煤气管路设有自动测压及紧急切断阀等安全保护装置，在异常情况下能自动切断气源并报警。在煤气管道高点处设有放散阀，另设有静电接地装置。

(4)、空气预热温度和烟气排放温度自动测量并显示及报警。

(5)、全炉各部动作均安全连锁，炉门、台车运行设置电铃示警。

(6)、空气管路设有安全防爆装置及欠压报警装置。

(7)、所有电气设备均设有安全接地装置。

(8)、炉压自动控制具备数字显示、超压报警装置等。

第四章 实验炉实验方案开发

4.1 试验一 不同燃料条件下金属加热工艺实验

4.1.1 实验内容

使用不同发热值的燃料燃烧，在被加热钢坯的初始条件不变条件下，研究使用不同低发热值燃料燃烧条件下，钢坯在炉内加热过程中表面及内部的温度变化，钢坯升温速率、温度分布及温差的变化规律。

4.1.2 实验目的及意义

通过本试验，了解采用不同煤气加热对钢坯加热质量的影响，对在生产实践中针对不同钢种加热质量的要求，选择合适的煤气进行加热，以及在固定钢坯、燃料条件下选择合适的加热制度具有指导意义。

4.1.3 实验原理

炉子生产率可以间接的反应钢坯升温速率，而在工艺过程一定的情况下，钢坯在炉内所须获得的热量是一定的，因此炉子生产率就决定于单位时间传给钢坯的热量（单位时间传给钢坯热量并不等同与单位时间燃料供给热量），所以，改善炉内热交换，增加对钢坯的传热，就能提高了炉子升温速率。

在工业炉炉膛中，单位时间传给钢坯的热量 Q 为：

$$Q = C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A_2 + \alpha (T_1 - T_2) A_2 = \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_2 + q A_2 \quad (4.1)$$

式中 C ， $\sigma = C \times 10^{-8}$ ——炉气、炉壁对钢坯的导来辐射系数；

T_1, T_2 ——炉气和钢坯表面温度；

A_2 ——钢坯受热面积；

α ——炉气对钢坯的对流给热系数；

$q = \alpha (T_1 - T_2)$ ——炉气对钢坯的对流传热热流。

由上式可见，影响炉子生产率及升温速率的热工因素主要有列四点：

- 1) 炉气和钢坯间的辐射温压 $\nabla T^4 = (T_1^4 - T_2^4)$ ；
- 2) 炉气、炉壁对钢坯的导来辐射系数 σ ；
- 3) 钢坯的受热面积 A_2 ；

4) 炉气对钢坯的对流传热热流 q 。

由此可见其中，炉内换热主要为辐射传热，对流传热只占小部分，故 4) 项的变化对升温速率的影响可以忽略不计，因此影响炉子生产率及升温速率的热工因素主要为 1) 炉气和钢坯间的辐射温压。

燃料燃烧的过程中，受各种因素的影响，譬如：燃料的种类，低发热值，燃烧环境温度，燃料和助燃空气的预热温度等等。

由于不同燃气的理论燃烧温度不同，以及燃烧稳定性的差异，导致不同燃料燃烧条件下钢坯在炉内加热过程中表面及内部温度的变化规律、升温速率、温度分布及温差不同。

4.1.4 实验步骤

1、启炉。

2、待炉况稳定后，关闭普通区烧嘴前阀门（单蓄热烧嘴、低压涡流烧嘴），保持双蓄热区烧嘴单独燃烧。

3、通过热值调整装置调整燃料热值至 800Kcal（模仿高炉煤气）。

4、在台车中部用耐火砖砌隔热墙，砌墙位置应保证台车进入炉膛后位于普通燃烧区和双蓄热区中间位置，使普通燃烧区与双蓄热燃烧区隔离开。

5、待炉况稳定后，将内部及表面埋设热电偶的钢坯放在台车里侧，保证台车进入炉内时钢坯在双蓄热燃烧区域。

6、驱动台车进入炉膛，钢坯开始加热。

7、每间隔十分钟记录各点热电偶的温度，直到各点温度不发生变化后在继续记录两次温度后，本次实验结束。

8、驱动台车出炉，更换钢坯，调整燃料低发热值至 1450Kcal（模仿发生炉煤气），重复 4 到 7 步进行记录。

9、分别调整热值 2000Kcal（模仿混合煤气）、4000Kcal（模仿焦炉煤气）、8000Kcal（模仿天然气），重复 4 到 7 步。

4.1.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如表 4.1，记录不同燃料热值条件下钢坯温度变化，并根据记录数据自动绘制钢坯各测温点时间温度曲线，如图 4.1，分析不同燃料加热条件下，钢坯内部温度均匀性以及各测点随时间的温度变化规律，进而得出燃料热值对钢坯温度变化的影响。

表 4.1 实验一 Excle 数据记录表格举例

Table 4.1 The example of data record table of the first experiment

燃料热值为 1450Kcal（模仿发生炉煤气）								
时间	0	10	20	30	40	50	...	...
1#热 电 偶								
2#热 电 偶								
3#热 电 偶								
...								
...								

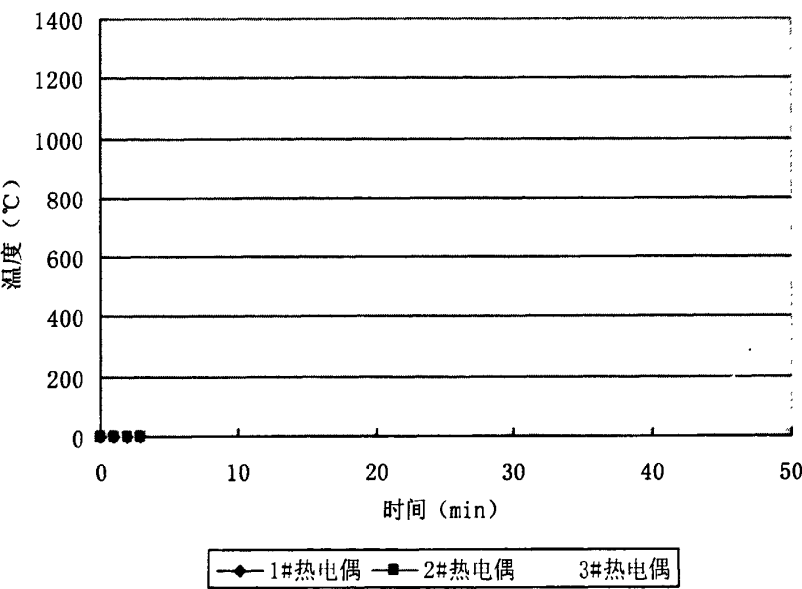


图 4.1 钢坯内测点温度变化曲线图格式

Figure 4.1 The figure format of the temperature change curve for measuring points in the billet

4.2 实验二 蓄热体及蓄热室性能实验

4.2.1 实验内容

用不同材质蓄热体，通过单蓄热实验烧嘴上的预留孔（共四处预留孔），测量通过蓄热体的空气和烟气的温度、流量、流速。对实验数据进行分析比较。

4.2.2 实验目的及意义

通过本实验了解在一个换向周期内，供风和排烟时蓄热体内的温度分布、流量、流速及温差变化；试验中通过更换不同材质和规格的蓄热体，了解不同蓄热体的传热性能，指导生产实践中不同条件下，加热炉蓄热体的选择。

4.2.3 实验原理

1、蓄热燃烧工作原理：

所谓蓄热式高温燃烧技术就是在加热炉两侧分别布置蓄热式烧嘴，当一侧的烧嘴燃烧的时候，另一侧的烧嘴在排烟机作为烟道用来排烟。经过一段时间后，通过换向阀的切换，作为烧嘴燃烧的一侧烧嘴变为烟道排烟，而原来用来排烟的喷口则作为烧嘴燃烧。周而复始。

其具体过程如下：

炉膛内的高温烟气在排烟机抽力的作用下，通过排烟侧烧嘴经高温气体通道进入蓄热室，在蓄热室内与蓄热体进行热量交换，加热蓄热体，其温度已降至 200°C 以下，然后出蓄热室，经过换向阀、排烟机，最后由烟囱排入大气。与此同时，空气经另一侧已经在上一个换向周期内被高温烟气预热的高温蓄热体，被预热到 $800^{\circ}\text{C}\sim 1050^{\circ}\text{C}$ ，出蓄热室后经高温气体通道，通过加热炉侧墙烧嘴喷出，从烧嘴喷出的高温空气和燃料在炉膛内边混合边燃烧，与被加热钢坯完成热交换后，经另一侧蓄热室排出。一个换向周期完成。

2、抽气热电偶工作原理^[4]

抽气热电偶测量的气体温度为气体真实温度。抽气式热电偶是利用喷射介质（压缩空气或高压蒸汽）的引射作用使被测高温气体以高速度流经铠装热电偶的测量端来测量被测气体温度。抽气热电偶带有屏蔽套，大大减小了周围物体对它的辐射。所以抽气热电偶能较准确地测出被测气体的真实温度。

3、气体流速对换热效果的影响原理

对于不同流速的气体，其温度曲线有较大差别。流速越高，烟气出口温度越高。这是因为，高的流速增加了气体的质量流量，单位时间内带入体系的热量相应增加，而蓄热体的蓄热能力是一定的，烟气的热量来不及被充分吸收即随高速气流排出体系外，使余热回收率降低。因此，在实际应用过程中，要充分考虑气体流速对换热效果的影响，组织合理的燃烧制度和换向制度，避免出现烟气温度出口温度过高和气体蓄热程度不够的现象。

4.2.4 实验步骤

1、启炉。

- 2、待炉况稳定后，通过炉墙热电偶，测量炉膛温度。
- 3、用抽气热电偶测量一个换向周期内进蓄热体前的热烟气温度，以及出蓄热体后的热空气温度。同时通过安装在实验烧嘴上的固定热电偶测量蓄热体内部的温度数。按照以上操作，测量 10 个换向周期的数据（根据具体情况可以对测量次数进行合理调整）。
- 4、取下实验烧嘴上的固定热电偶，关闭测温孔，用皮托管测量各点的烟气及空气流速。按照以上操作，测量 10 个换向周期的数据（根据具体情况可以对测量次数进行合理调整）。
- 5、停炉。
- 6、待烧嘴冷却后，取出实验烧嘴内的蓄热体，更换需要测试的蓄热体，重复 1 至 5 步骤的操作进行测量。

4.2.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如图 4.2，记录不同蓄热体状态下各测点的的温度及流速，绘制各点时间，温度、流速曲线图，如图 4.2，根据蓄热体内温度分布变化，分析不同蓄热体的蓄热性能。

表 4.2 实验二 Excle 数据记录表格举例

Table 4.2 The example of data record table of the second experiment

温度/流速记录表								
换向周期序号	1							
	1#		2#		3#		4#	
烧嘴状态	烟气	空气	烟气	空气	烟气	空气	烟气	空气
数值								
换向周期序号	2							
	1#		2#		3#		4#	
烧嘴状态	烟气	空气	烟气	空气	烟气	空气	烟气	空气
数值								
换向周期序号								

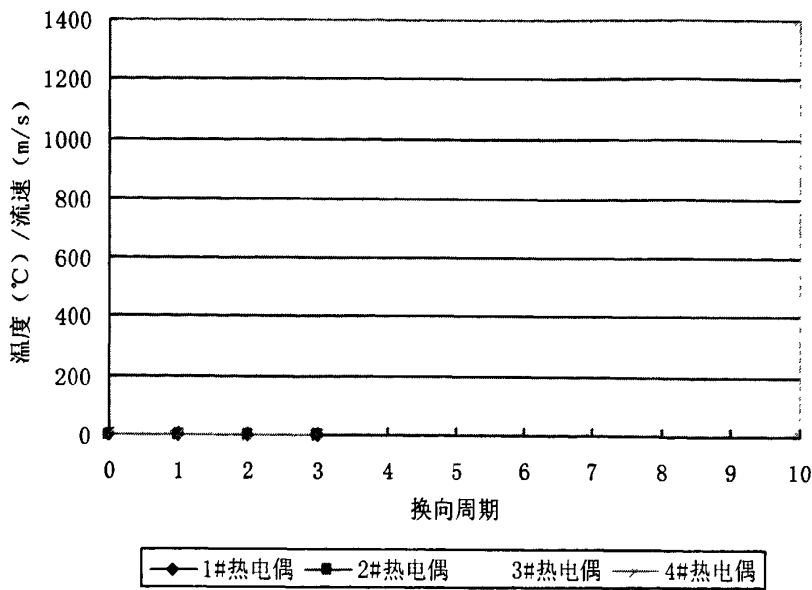


图 4.2 蓄热体测温点温度变化曲线图格式

Figure 4.2 The figure format of the temperature change curve for measuring points in the Regenerator

4.3 实验三 蓄热燃烧热工特性试验

4.3.1 实验内容

本实验研究以下内容^[21]:

①换向时间对炉温，压力波动性的影响

改变换向时间，记录不同换向时间下各测温点及蓄热式燃烧器内蓄热体的入口及出口处的瞬时温度及炉内压力变化，绘制温度变化曲线，分析换向时间对炉温波动性的影响。

②换向时间对炉温均匀性的影响

改变换向时间，记录炉内各热电偶所测平均温度，绘制炉温分布随换向时间变化曲线图，分析换向时间对炉温均匀性的影响。

③换向时间对蓄热体换热效果的影响

蓄热体进出口的空气、烟气温度的不同而发生改变，记录不同换向时间下的蓄热体进、出口处空气和烟气的平均温度值，绘制变化曲线，并根据数据绘制蓄热体的烟气余热回收率和温度效率随换向时间变化曲线。从而分析换向时间对蓄热体换热效果的影响。

4.3.2 实验目的及意义

对蓄热式燃烧的热工特性，如最佳换向时间，换向过程炉内压力波动，不同燃烧模式下炉宽方向温度均匀性、火焰温度场等进行专项研究，对蓄热燃烧换向时间的选择及炉子结构有重要的参考价值。

4.3.3 实验原理

通常用蓄热体的温度效率 E 和余热回收率 η 来评价蓄热体的换热性能：

$$E = (ta_1 - ta_0) / (tf_0 - ta_0) \quad (4.2)$$

$$\eta = Ga(Cpa \times ta_1 - Cpa \times ta_0) / (Gf \times tf_0 \times Cpf) \quad (4.3)$$

式中， ta_0 ， ta_1 分别为空气进口及出口温度；

tf_0 为高温烟气的进口温度；

Ga ， Gf 分别为空气及烟气的质量流量；

Cpa 为空气的比热；

Cpf 为烟气的比热。

以上定义表明，对于确定的供气条件，蓄热气体的出口温度 ta_1 越高，则温度效率和余热回收率越大，说明蓄热体的换热性能越好。由于蓄热体的蓄热能力是一定的，随着过程的不断进行，蓄热体热量将不断发生变化，使得气体的出口温度不断发生变化。随着时间的增加，在加热期，烟气排放温度逐渐上升，冷却期空气出口温度逐渐降低，蓄热体的温度效率下降，热回收率降低。因此为获得较高的热回收率，确定合适的换向时间是非常重要的，蓄热体在具体的条件下，存在一个最佳换向时间，若实际换向时间过长，烟气余热得不到充分回收，表现为排烟温度升高；若换向时间过短，蓄热体得不到充分加热，难以获得较好的余热效果，表现为气体预热温度降低。

在蓄热室尺寸确定后，换向时间由排烟温度来确定，在相同的蓄热空间内，蓄热体的蓄热量大，换向时间就长；蓄热体的蓄热量低，换向时间就短；同样，蓄热体的比表面积大，换向时间就短，比表面积小，换向时间就长。

蓄热式烧嘴集中换向时煤气残留量约 5%，分散煤气残留量约 1%，所以换向周期越短煤气浪费就越大，换向一个周期 30 秒钟，其煤气浪费量就是换向周期 120 秒钟的四倍，以集中换向煤气残留量约 5%，换向时间 60 秒钟和 120 秒钟为例，一天 20 小时就多换向 600 次，在 20 小时内，浪费掉煤气接近于每次供入量的 30 倍。

4.3.4 实验步骤

1、启炉；

- 2、在台车中部用耐火砖砌隔热墙，砌墙位置应保证台车进入炉膛后位于普通燃烧区和双蓄热区中间位置，使普通燃烧区与双蓄热燃烧区隔离开；
- 3、待炉况稳定后，关闭双蓄热区烧嘴及普通烧嘴，采用单蓄热烧嘴单独加热；
- 4、调整换向时间为 30s；
- 5、保持换向时间为 30s 进行加热，记录炉膛各测温点及测压点温度；采用抽气热电偶测量进出蓄热体的烟气及空气温度，用固定热电偶测量蓄热体内温度。连续测量 20 个周期，每个周期记录一次炉膛各测温点及测压点温度、一次进蓄热体烟气、空气温度；一次出蓄热体烟气、空气温度。
- 6、调整换向时间至 40s、50s、60s、70s、80s、90s、100s、110s、120s, 重复 4-5 步骤进行测量。

4.3.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如表 4.2、4.3，记录不同蓄热体状态下各测点的温度、流速，以及炉体各测温点温度，绘制各点周期，温度、流速曲线图，如图 4.3、4.4，根据炉体内温度分布变化，分析不同炉内温度波动性与均匀性。

表 4.3 实验三 Excle 数据记录表格举例

Table 4.3 The example of data record table of the third experiment

炉体温度记录表								
换向周期序号	1							
	炉体测温点							
测温点	1#	2#	3#	4#	16#	...	...	17#
数值（℃）								

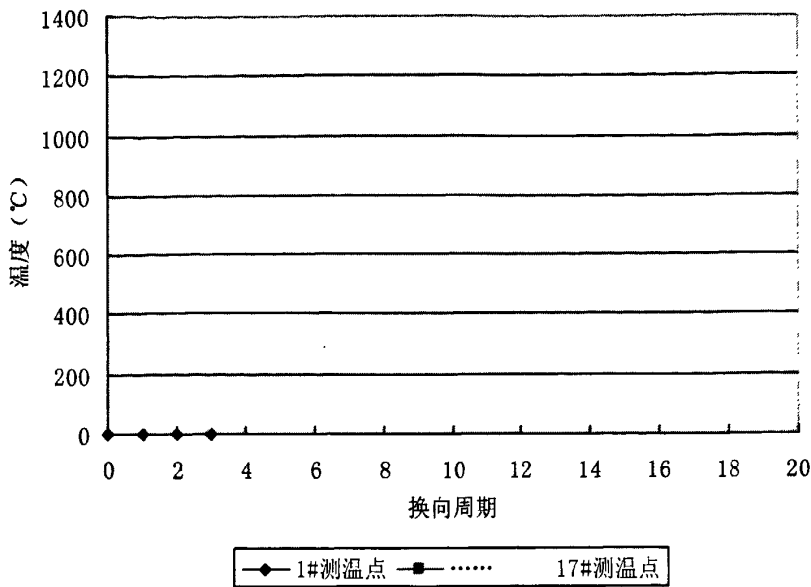


图 4.3 炉体测温点温度变化曲线图格式

Figure 4.3 The figure format of the temperature change curve for measuring point in the furnace

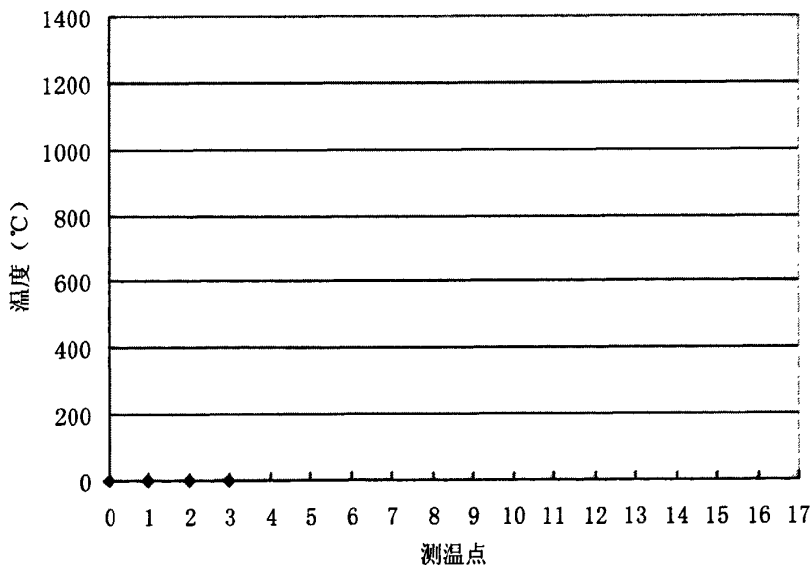


图 4.4 炉体温度均匀性曲线图格式

Figure 4.4 The figure format of the temperature uniformity curve for measuring points in the furnace

4.4 实验四 各种燃烧器实验

4.4.1 实验内容

采用不同类型燃烧器进行加热,通过炉顶及炉墙两侧布置的测温孔测量不同燃烧器下的炉内压力、温度分布及其均匀性。

4.4.2 实验目的及意义

通过对不同类型燃烧器燃烧时,炉内压力、温度分布的研究,了解采用不同类型燃烧器时,炉内的压力、温度场的分布规律,有助于实践生产中加热炉燃烧器的选择。

4.4.3 实验原理

在现代工业生产过程中,工业炉内的压力及温度是一个非常重要的参数。它不仅决定着加热过程的热效率,也影响着设备的使用寿命、人员以及设备的安全、废气的排放等等方面。因此,温度测量始终是生产过程中必须严密监控的参数。通过对炉膛温度场的测量与控制,不仅仅能够容易地掌握各个关键点的温度参数,而且能够实现炉膛内各个区域最大限度的平衡燃烧,真正做到热过程的精细化管理。

压力、温度场的分布状况主要对工业炉带来以下的影响:

1、单位产出/能耗比,也就是燃料消耗或热效率。

2、热冲击,局部过热/,热冲击是造成设备使用寿命下降的主要原因。

3、废气排放,局部过热容易造成 NO_x 的合成,从而增加有害气体排放并抵触环保法规。

4.4.4 实验步骤

1、启炉;

2、在台车中部用耐火砖砌隔热墙,砌墙位置应保证台车进入炉膛后位于普通燃烧区和双蓄热区中间位置,使普通燃烧区与双蓄热燃烧区隔离开;

3、炉况稳定后,关闭单蓄热及双蓄热烧嘴,采用普通烧嘴单独燃烧,分析普通烧嘴燃烧时炉内压力、温度分布;

4、炉况再次稳定后,通过炉顶及炉墙测温孔,测量炉内温度、压力。每 5 分钟测量一组数据,测量十组(根据实验情况可以进行调整);

5、点燃单蓄热烧嘴,关闭普通烧嘴,采用单蓄热烧嘴单独燃烧,分析单蓄热燃烧时炉内压力、温度场;

- 6、炉况稳定后，重复 4 步骤进行测量；
- 7、点燃双蓄热烧嘴，关闭单蓄热烧嘴，分析双蓄热烧嘴燃烧时炉内压力、温度分布；
- 8、燃烧稳定后，重复 4 步骤进行测量；
- 9、点燃高速烧嘴，关闭双蓄热烧嘴，分析脉冲燃烧高速烧嘴，炉内压力、温度分布；
- 10、炉况稳定后，重复 4 步骤进行测量；

4.4.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如表 4.4，记录不同烧嘴燃烧条件下各测点的温度、流速，绘制曲线图，如图 4.4、4.5。根据温度分布变化，分析不同烧嘴炉膛温度分布。

表 4.4 实验四 Excle 数据记录表格举例

Table 4.4 The example of data record table of the forth experiment

低压涡流烧嘴燃烧状态								
时间	0	5	10	15	20	25	...	50
1#测温点								
2#测温点								
3#测温点								
...								
17#测温点								

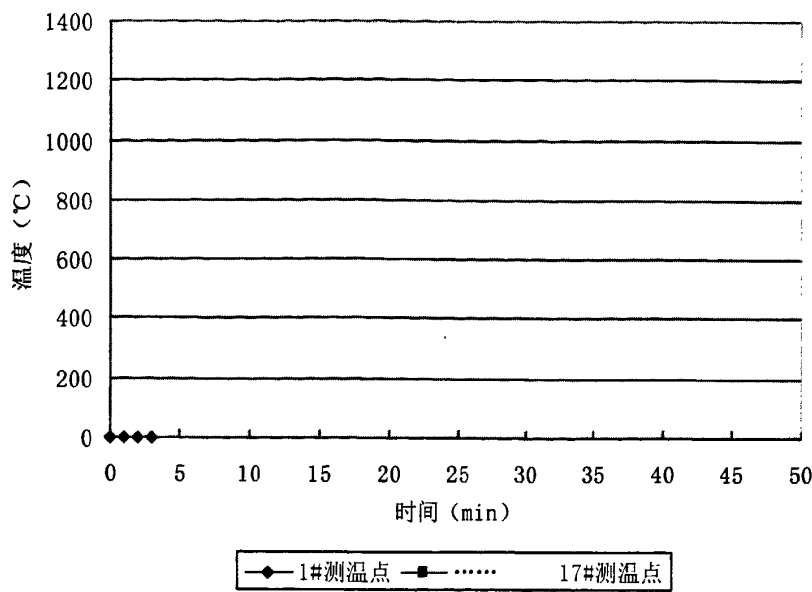


图 4.5 炉体测温点温度变化曲线图格式

Figure 4.5 The figure format of the temperature change curve for measuring points in the furnace

4.5 实验五 高速烧嘴脉冲控制实验

4.5.1 实验内容

采用高速烧嘴脉冲燃烧技术，通过计算机调整占空比，记录各测温点温度，并绘制炉内温度分布规律图，分析不同占空比对炉内温度分布的影响。并选取固定测温点，记录不同占空比时该点温度变化规律，并绘制变化规律图，分析不同占空比对炉温跟踪的影响。

4.5.2 实验目的及意义

脉冲燃烧控制技术作为一种国际新兴发展的控制方式，具有传统控制系统所不具备的优点，它克服了连续量调节方式中阀门调节效果滞后、重复性差、死区大的缺点，可以使烧嘴始终在最佳状态燃烧。本试验通过改变脉冲占空比，了解炉内温度均匀性及炉温跟踪效果随脉冲占空比的变化，从而确定最佳占空比，使脉冲燃烧最优控制。

4.5.3 实验原理

脉冲燃烧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)来实现加热炉的温度控制。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烧嘴被点燃的频率和持续时间。烧嘴的输入量是事先给定的,每个烧嘴按照事先给定的开度和与热量需求成正比的频率开闭。烧嘴是按照一定的时序依次点燃,时序脉冲的工作原理见下图:

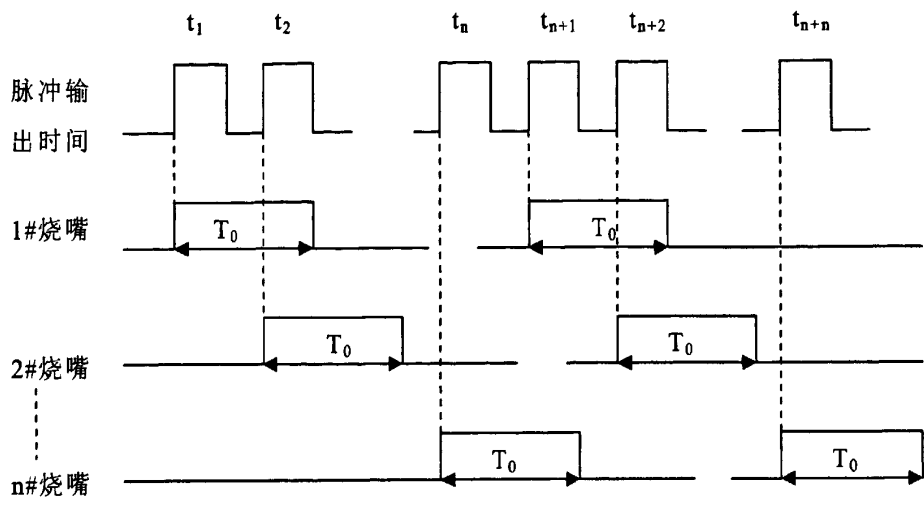


图 4.6 烧嘴时序脉冲工作原理图

Fig 4.6 The figure of timing pulse burner schematic work

脉冲燃烧方式的控制策略是这样的:

脉冲燃烧就是根据炉温的变化周期性地向炉内供入燃料,使烧嘴在工作时总是满负荷(要求选择合适的脉冲时序),以保证无论是在什么时候,烧嘴喷出烟气的速度都很高,保证炉内温度均匀性。为了保证在烧嘴工作时喷出烟气的速度要求,又要减小因供热量的周期性波动而造成炉温的波动幅度,采用自动控制和合理的控制策略(合理的脉冲时序)是关键。

在脉冲燃烧系统中,调节是通过调节烧嘴燃烧周期大小来实现工艺加热曲线要求的。脉冲燃烧是将传统的连续调节方式改变为通断式调节,即烧嘴工作状态只有两种:一是在预先选定的最佳燃烧状态——最大计算热负荷下工作(必须选择合适的占空比);二是烧嘴关闭——既不燃烧。脉冲燃烧技术基于调节占空比(燃烧时间与全周期的时间比值),使炉温在最大或最小单位燃料消耗时均能保证均匀^{[11][12]}。

由于采用了脉冲燃烧,高速调温烧嘴产生的高速气流带动了炉内气体的循环运动,强化了炉气和工件的对流传热,使炉膛温度均匀性得到了较好的改善。从应用效果上看,无论是升温还是保温,较强的炉气循环流动使炉内温差达到了控制温度精度。但不同的占空比对炉温的分布及均匀性仍有较大影响,因此脉冲燃烧时选择合适的占空比仍然是关键。

4.5.4 实验步骤

- 1、启炉；
- 2、在台车中部用耐火砖砌隔热墙，砌墙位置应保证台车进入炉膛后位于普通燃烧区和双蓄热区中间位置，使普通燃烧区与双蓄热燃烧区隔离开；
- 3、稳定后，切断其它烧嘴，保持高速烧嘴单独燃烧，调整烧嘴占空比（占空比根据具体情况确定）；
- 4、稳定后，每 1 分钟记录一次各测温点的温度，测量时间不少于 10 分钟（具体可根据实验要求而定）；
- 5、调整占空比，稳定后，重复 4 步骤进行测量。
- 6、根据实验情况具体调整占空比，按以上进行操作测量。

4.5.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如表 4.5，记录不同占空比，炉体温度，绘制曲线图，如图 4.4、4.7，根据温度分布，分析占空比对炉温的影响。

表 4.5 实验五 Excle 数据记录表格举例

Table 4.5 The example of data record table of the fifth experiment

炉体温度记录表								
占空比								
时间	lmin							
	炉体测温点							
测温点	1#	2#	3#	4#	16#	...	...	17#
数值（℃）								

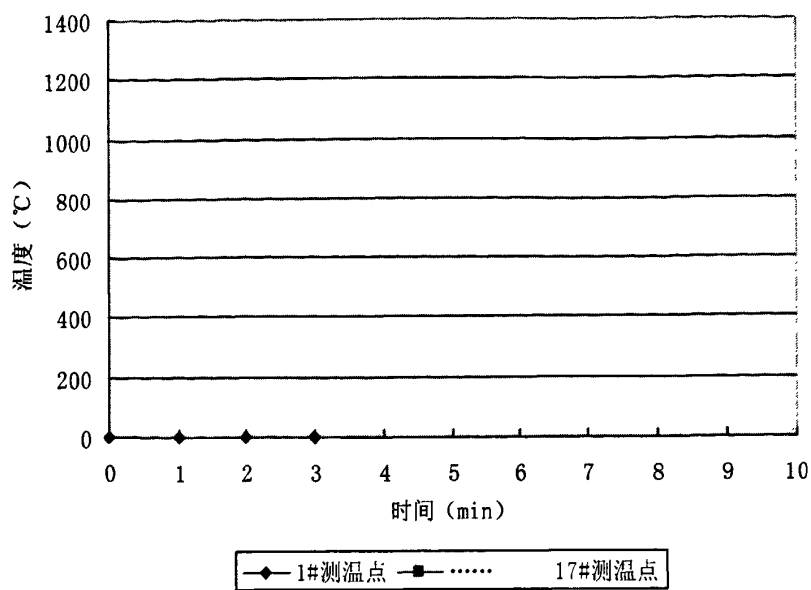


图 4.7 炉体测温点温度变化曲线图格式

Figure 4.7 The figure format of the temperature change curve for measuring points in the furnace

4.6 实验六 蓄热式燃烧条件下 NO_x 排放浓度实验

4.6.1 实验内容

分别改变燃料成分（只有在可以提供不同燃料条件下才能进行）、燃烧温度、空燃比以及蓄热式烧嘴煤气喷射角度等物理量，测量蓄热式烧嘴火烟温度分布规律以及烧嘴前 NO_x 排放浓度，分析各因素对 NO_x 排放的影响。利用烟气分析仪测试 NO_x 排放浓度。

测量方法：热电偶通过侧墙测温孔测量火焰温度，同时取炉气试样，利用烟气分析仪测试 NO_x 排放浓度^{[16][17][18][19]}。

4.6.2 实验目的及意义

通过本实验了解不同燃料成分、燃烧温度、蓄热式烧嘴结构、空燃比条件下的 NO_x 排放特性，为工业领域的低 NO_x 燃烧技术开发提供参考。

4.6.3 实验原理

NO_x 的生成及控制：
NO_x 在燃料的燃烧过程中产生的，其中 NO 约占 NO_x 总量的 90%-95%，

在大气中会迅速氧化成毒性更大的 NO_2

燃料燃烧中生成的 NO_x 有“热力型”和“燃料型”两种：

“热力型 NO_x ”----由空气中的氮气在高温下与氧化合而成（因此空气过剩系数对 NO_x 的产生有影响）。

“燃料型 NO_x ”——由燃料中的化学氮在挥发分析出中呈离子状态与高浓度氧化合而成（因此不同的燃料对 NO_x 的生成有影响）。

“热力型 NO_x ”产生的主要条件是高的燃烧温度使氮分子游离增加化学活性，其次是高的氧浓度，要减少“热力型 NO_x ”的生成，可采取以下措施：

- (1)减少燃烧最高温度区域范围。
- (2)降低燃烧的峰值温度。
- (3)降低燃烧的过量空气系数和局部氧浓度。

“燃料型 NO_x ”是燃料内含氮在燃烧过程中成离子析出与含氧物质反应形成 NO_x ，或与含氮物质反应又成氮分子。燃料中氮并非全部转变为 NO_x ，它存在一个转换率，可采取以下措施降低此转换率，控制 NO_x 排放总量^[20]。

- (1)减少燃烧的过量空气系数；
- (2)控制燃料与空气的前期混合；
- (3)提高入炉的局部燃料浓度。

4.6.4 实验步骤

1、启炉；

2、在台车中部用耐火砖砌隔热墙，砌墙位置应保证台车进入炉膛后位于普通燃烧区和双蓄热区中间位置，使普通燃烧区与双蓄热燃烧区隔离开；

3、稳定后，保留单蓄热区单独燃烧，其他烧嘴关闭，炉温稳定后，保留单蓄热实验烧嘴及其对面单蓄热烧嘴燃烧，另一对蓄热烧嘴关闭；

4、根据实验要求，调整空燃比，通过侧墙测温孔测量火焰温度，并通过测温孔取样，利用烟气分析仪测试 NO_x 排放浓度；

5、固定空燃比，稳定后，通过靠近实验烧嘴的测温孔取样，利用烟气分析仪测试 NO_x 排放浓度；

6、更换实验烧嘴上的喷口角度（实验烧嘴共有 3 个喷口角度），稳定后，按照 5 步骤进行测量；

7、更换不同燃料（如有多种燃料），重复 4 至 6 步骤进行测量；

4.6.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如表 4.6，记录不同占空比及不同喷口角度时 NO_x 排放浓度，分析不同占空比及喷口角度对 NO_x 排放浓度的影响。

表 4.6 实验六 Excle 数据记录表格举例

Table 4.6 The example of data record table of the sixth experiment

NOx 排放浓度记录表			
喷口角度	1	2	3
数值			

4.7 实验七 炉温控制与调节实验

4.7.1 实验内容

通过改变燃料的供给量，根据实验要求，实现炉膛温度跟踪变化，炉温控制由对煤气回路和空气回路的控制实现。调节空燃比，实验不同空燃比条见下的燃烧状况。

4.7.2 实验目的及意义

炉温控制与调节是稳定炉况、满足生产需求的重要的先进高效率手段，控制水平的高低对炉子效率和安全生产有重要影响，选择合适的炉膛温升曲线对提高产品质量具有非常重要的作用，通过掌握炉温控制方法，研究不同控制策略、控制算法的控制效果，选择合适的加热制度。

4.7.3 实验原理

加热炉控制系统主要由：炉温控制，炉压控制，煤气、空气流量控制，热空气压力、温度控制，废气压力、温度、流量控制等系统组成。

由于煤气、空气的流量控制是实现炉温控制的手段，因此它实际上从属于炉温控制回路，这一回路是保证加热炉正常燃烧和钢坯加热的最基本的回路，流量控制回路是一个串级控制回路，炉温控制器的输出作为其设定值，因而达到控制炉温的目的。

通过确定不通的炉温，煤气管路上的煤气调节阀接受温度记录调节仪的指挥信号动作，空气调节阀通过控制程序实现与煤气调节阀成比例开启，保证提高炉温，增加燃料消耗量的同时，空燃比不发生变化，实现对炉温的调节。

通过设置空气调节阀与煤气调节阀的开度比例，实现不同空然比的调节。

4.7.4 实验步骤

- 1、启炉；
- 2、确定炉膛升温曲线、空燃比；

3、跟踪炉膛温度，按照预先制定的升温曲线调整燃料流量，同时按照空燃比调整空气量；

4、时刻跟踪普通燃烧区与双蓄热燃烧区温度变化，保证两区温度一致；

5、绘制炉温跟踪曲线，将跟踪曲线和预定的升温曲线进行比较；

6、可根据实验要求制定不同的升温曲线及空然比进行炉温跟踪，操作按1-5步骤进行。

4.8 实验八 换热器性能实验

4.8.1 实验内容

采用普通烧嘴燃烧，测量进入换热器的废气量、废气进、出口温度、空气量、空气进、出口温度的数值，计算该换热器的温度效率、热效率和综合传热系数。

4.8.2 实验目的及意义

通过本实验了解换热器性能测量与计算方法，对实践生产中换热器测量，评估提供方法和依据。

4.8.3 实验原理

(1)冷空气吸收热量 Q_k :

$$Q_k = V_k(c_k''t_k'' - c_k't_k') \quad (4.4)$$

式中: V_k ——预热空气量 (Nm^3/h);

t_k' 、 t_k'' ——换热器空气入口及出口温度 ($^{\circ}\text{C}$);

c_k' 、 c_k'' ——空气入口及出口温度下空气的平均比热容 [$\text{KJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$].

(2)热烟气放热量 Q_y :

$$Q_y = V_y(c_y't_y' - c_y''t_y'') \quad (4.5)$$

式中: V_y ——烟气量 (Nm^3/h);

t_y' 、 t_y'' ——进出换热器烟气温度 ($^{\circ}\text{C}$);

c_y' 、 c_y'' ——烟气入口及出口温度下烟气的平均比热容 [$\text{KJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$].

(3)对数平均温差 Δt_d

$$\Delta t_d = \frac{\Delta t_s - \Delta t_z}{\ln \frac{\Delta t_s}{\Delta t_z}} \quad (4.6)$$

式中： Δt_s ——预热器入口处烟气与空气的温差（℃）：

$$\Delta t_s = t'_y - t'_k$$

Δt_z ——预热器出口处烟气与空气的温差（℃）：

$$\Delta t_z = t''_y - t''_k$$

(4) 以 Q_k 和 Q_y 的平均值作为换热器的换热量 Q ：

$$Q = (Q_k + Q_y) / 2 \quad (4.7)$$

(5) 综合传热系数 K ：

$$K = Q / A \Delta t_d \quad (4.8)$$

(6) 温度效率 $\eta_{\text{温}}$ ：

$$\eta_{\text{温}} = t''_k / t'_y \times 100\% \quad (4.9)$$

(7) 效率 η ：

$$\eta = Q_y / V_y c'_y t'_y \times 100\% \quad (4.10)$$

4.8.4 实验步骤

1、启炉；

2、关闭其他烧嘴，保持普通烧嘴单独燃烧，采用上排烟方式排烟；

3、炉况稳定后，测量换热器前烟气量、换热器前后烟气温度以及进换热器冷空气量、换热器前后空气温度，每 5 分钟测一次，测量次数不小于 5 次（根据实验要求而定）；

4、调整供入燃气量（供入量根据实际进行调整），稳定后，再次按照 3 步骤进行测量；

4.8.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如表 4.7，记录数据，按照 4.8.3 实验原理进行整理，分析换热器性能。

表 4.7 实验八 Excle 数据记录表格举例

Table 4.7 The example of data record table of the eighth experiment

炉体温度记录表				
时间	5min			
测温量	换热器前/后烟气量	换热器前/后烟气温度	换热器前/后冷空气量	换热器前/后冷空气温度
数值				
时间	10min			
测温量	换热器前/后烟气量	换热器前/后烟气温度	换热器前/后冷空气量	换热器前/后冷空气温度
数值				
... ..				

4.9 实验九 实验加热炉热平衡测试实验

4.9.1 实验内容

测量炉膛废气、进出换热器废气、烧嘴前空气、煤气和冷空气以及炉子内外壁等处温度，煤气与空气压力、炉膛压力，空煤气流量，检测煤气成分、煤气发热量和炉膛废气成分，根据测量时间区段内的热收入和热支出编制炉子热平衡表，绘制热流图。

4.9.2 实验目的及意义

火焰炉的热平衡测试是实现科学管理用能设备的一项基础工作。主要研究用能设备能耗状况、用能水平、节能潜力。寻求节能方向与途径。通过实验了解热平衡中热量的收入项和支出项，掌握各项热量的测定方法和计算方法；编制热平衡表，绘出热流图，并了解热量各收入与支出项在总热量中所占的比例；确定燃料消耗的各项指标：单位热耗、热量有效利用系数和热量利用系数。

4.9.3 实验原理

- 1、热收入项：
- 燃料燃烧的化学热 Q_c ：
- $$Q_c = BQ_{Dw} \text{ (KJ/h)} \tag{4.11}$$
- 式中： B ——燃料消耗量 m^3/h ； Q_{Dw} ——燃料低发热量 KJ/m^3 ；
- 燃料预热带入的物理热 Q_r ：

$$Q_f = Bc_f t_f = Bi_f \quad (\text{KJ/h}) \quad (4.12)$$

式中: c_f ——燃料的平均比热 $\text{KJ}/(\text{m}^3/^\circ\text{C})$;

t_f ——燃料的预热温度 $^\circ\text{C}$;

i_f ——燃料的热含量 KJ/m^3 ;

- 空气预热带入的物理热 Q_a :

$$Q_a = BnL_0 c_a t_a = BL_n i_a \quad (\text{KJ/h}) \quad (4.13)$$

式中: n ——空气消耗系数; L_0 ——理论空气消耗量, m^3/m^3 ;

L_n ——实际空气消耗量, m^3/m^3 ; t_a ——空气预热温度, $^\circ\text{C}$;

i_a ——空气热含量, KJ/m^3 。

- 钢坯在入炉时带入的物理热 Q_s :

注: 钢坯在热装时计入此项热收入, 常温入炉时则不计

$$Q_s = Gc_s t_s \quad (\text{KJ/h}) \quad (4.14)$$

式中: G ——炉子生产率, kg/h ; c_s ——钢坯的比热, $\text{KJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

t_s ——钢坯入炉温度, $^\circ\text{C}$ 。

- 金属氧化所放出热量 Q_o :

$$Q_o = 5652Ga \quad (\text{KJ/h}) \quad (4.15)$$

式中: a ——金属烧损率, 一般加热炉中 $a=0.01-0.03$, 若小于 0.01 则可不计;

5652 ——每千克铁氧化时所放出的热量, 单位是 KJ/kg 。

- 炉子热收入 Q_λ 为:

$$Q_\lambda = Q_c + Q_f + Q_a + Q_s + Q_o \quad (4.16)$$

2、热支出项:

- 钢坯加热所需的热——有效热 Q_s :

$$Q_s = Gc_m t_m \quad (\text{KJ/h}) \quad (4.17)$$

式中 t_m ——钢坯出炉时的平均温度。

若钢坯为热装, 则按下式计算:

$$Q_s = G(t_{m2}c_{m2} - t_{m1}c_{m1}) \quad (\text{KJ/h}) \quad (4.18)$$

式中: t_{m2} 、 t_{m1} ——钢坯出炉及入炉温度, $^\circ\text{C}$ 。

c_{m2} 、 c_{m1} ——相应温度的平均比热, $\text{KJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

- 烟气带走的热量 Q_{cp} :

$$Q_{cp} = BV_n c_{cp} t_{cp} \quad (\text{KJ/h}) \quad (4.19)$$

式中: V_n ——燃烧产物量, m^3/m^3 ; t_{cp} ——出炉烟气温度, $^\circ\text{C}$;

c_{cp} —— t_{cp} 下烟气的平均比热, $\text{KJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

- 炉体散热损失 Q_r :

$$Q_w = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + 0.014} A \text{ (KJ/h)} \quad (4.20)$$

式中：A——炉壁面积，m²；

t₁——炉壁内表面温度，℃；

t₂——周围大气温度的，℃；

δ₁、δ₂——炉墙普吕纤维，多晶莫来石厚度，分别 0.05m、0.25m；

λ₁、λ₂——各层材料的导热系数，

其中 0.014 为假设炉壁对空气的总换热系数等于 71KJ/(m²·h·℃)

时，炉壁外表面与空气间的热阻 ($\frac{1}{71}$)。

• 氧化铁皮带走的热损失 Q_{Fe}：

$$Q_{Fe} = \frac{G\delta_{Fe}(t_{Fe} - t_o) m}{100} \text{ (KJ/h)} \quad (4.21)$$

式中：δ——金属烧损率；c_{Fe}——氧化铁皮平均比热，取 1.05；

t_{Fe}——氧化铁皮温度，℃；t_o——钢坯入炉温度，℃；

m——氧化 1kg 铁生成的四氧化三铁的数量，且 $m = \frac{232}{168} = 1.38$ 。

• 其他热损失 Q_{其他}：

包括炉体观察孔散热、加热各种支架等所需的热量。这些热量有时可以计算，有时很难计算，它所占的比例一般来说不算太大，所以除非特殊情况，一般不计算。

• 炉子溢气热损失

当炉内压力大于大气压（炉子正压操作）时，炉气就要通过炉门或孔、缝等处向炉外逸出，造成热损失。炉压越大，逸出热气越多，热损失也就越大。在现场测定时，可根据所测得的逸出气体的量和温度，按下式计算：

$$Q_{溢} = V_t (t_g c''_{\gamma} - t_o c'_{\gamma}) \quad (4.22)$$

式中，V_t 为单位时间内通过炉门的溢气量，m³/h。c_γ''、c_γ' 分别为 t_g 和 t_o 温度下的烟气比热容，kJ/(m³·K)；

• 热支出 Q_出：

$$Q_{出} = Q_s + Q_{cp} + Q_w + Q_{Fe} + Q_{其他} \quad (4.23)$$

• 炉子工作指标：

$$\text{单位燃耗：} b' = \frac{1000B}{P}, \text{ Nm}^3/\text{t}; \quad (4.24)$$

式：P 为产量，t/h；

单位热耗： $b'' = \frac{1000BQ_{Dw}}{P}$ ，KJ/t；

(4.25)

炉子热效率： $\eta_1 = \frac{Q_s}{BQ_{Dw}} \times 100\%$ ；

(4.26)

炉膛热效率： $\eta_2 = \frac{Q_s}{BQ_{Dw} + Q_a + Q_f} \times 100\%$ 。

(4.27)

4.9.4 实验步骤

- 1、启炉；
- 2、在台车中部用耐火砖砌隔热墙，砌墙位置应保证台车进入炉膛后位于普通燃烧区和双蓄热区中间位置，使普通燃烧区与双蓄热燃烧区隔离开；
- 3、选择试验要求的燃烧方式，关闭其他烧嘴；
- 4、根据试验要求，调整燃料流量，调整空燃比； -
- 5、燃烧稳定后，放入钢坯，关闭炉门；
- 6、当炉温升到制定的加热温度（根据实验要求而定），稳定后，记录炉温并进行以下测量；
- 7、通过煤气总管路、空气总管路上流量孔板测量燃料、空气流量；
- 8、采用换热燃烧时，通过换热器后空气管路上测温孔测量预热空气温度；
- 9、通过钢坯上的预埋热电偶测量钢坯温度；
- 10、通过排烟管道上的测温孔及流量孔板，测量烟气温度及流量；
- 11、采用红外测温仪测量炉外墙温度；
- 12、整理数据、绘制图表

4.9.5 数据处理方法

通过 Excel 应用软件编制记录表格，如表 4.8，记录数据，按照 4.8.3 实验原理进行整理，分析换热器性能。

表4.8 加热炉热平衡表

Table 4.8 Table of the energy balance in heating furnace					
热收入项	kJ/h	%	热支出项	kJ/h	%
燃料燃烧的化学热	Q_c	70~100	钢坯加热所需的热	Q_a	10~50
燃料预热带入的物理热	Q_f	0~15	烟气带走的热量	Q_{cp}	30~80
空气预热带入的	Q_a	0~25	炉体散热损失	Q_r	0.5~3

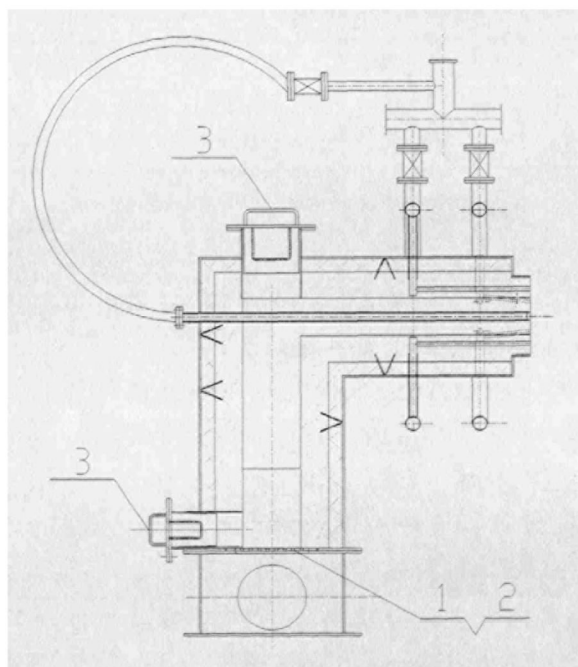
物理热					
钢坯在入炉时带 入的物理热	$Q_{\text{入}}$	1~5	氧化铁皮带走的热		
			损失 Q_{Fe} 2~10		
金属氧化所放出 热量	$Q_{\text{出}}$	1~5	其他热损失 $Q_{\text{其他}}$ 0~5		
			炉子溢气热损失 $Q_{\text{溢}}$ 0~5		
热收入总和	$\Sigma Q_{\text{收入}}$	100	热支出总和	$\Sigma Q_{\text{支出}}$	100

第五章 关键性技术问题说明

5.1 单蓄热实验烧嘴

5.1.1 单蓄热实验烧嘴简介

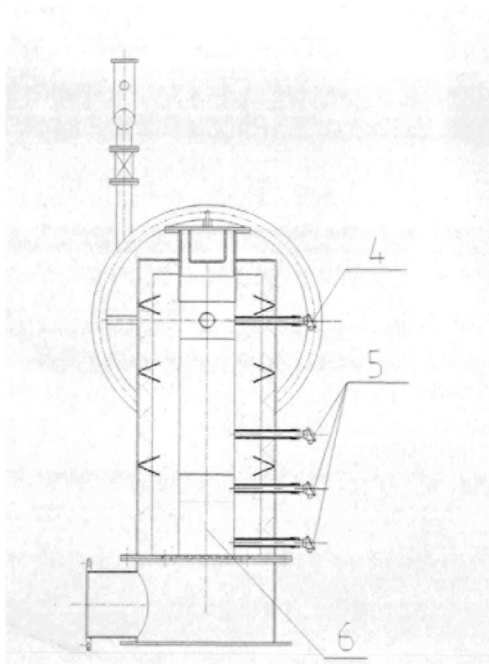
本炉设有单蓄热烧嘴两对, 为实现对蓄热室内部蓄热体温度分布研究以及不同烧嘴喷口角度对 No_x 产生的影响研究, 本炉在两对单蓄热烧嘴中设有一个单蓄热实验烧嘴, 实现对以上实验内容的研究。其结构如图 5.1。



1、钢格板；2、钢丝网；3、蓄热体装卸口；

图 5.1a 单蓄热实验烧嘴

Figure 5.1a Single regenerative experiment burner



4、抽气热电偶；5、套管式热电偶；6、蓄热体

图 5.1b 单蓄热实验烧嘴

Figure 5.1b Single regenerative experiment burner

根据图 5.1a 看出，实验烧嘴有 3 组不同角度的喷嘴，通过开关阀门控制，实现不同角度的喷嘴进行燃烧；烧嘴后端喷嘴与煤气管路连接采用金属软管连接方式，烧嘴内部喷嘴可以抽出，方便蓄热体的更换。

本烧嘴可以更换不同种类蓄热体，如蜂窝体、小球体。为实现不同蓄热体的固定，烧嘴底部设有钢格板及钢丝网，如图 1、2，即保证了蓄热体的固定，也保证空气及烟气的流通。

根据图 5.1b 看出，实验烧嘴共设有热电偶 4 个，沿蓄热体高度方向共设有套管式热电偶 3 支，实现蓄热体内部温度测量，了解蓄热体内部温度分布。烧嘴上部，蓄热体上方采用抽气式热电偶，实现对热烟气温度，以及热空气温度进行测量。抽气热电偶测量的气体温度为气体真实温度，测量准确度要高于套管式热电偶。

5.1.2 实验烧嘴操作说明

5.1.2.1 实验烧嘴点火

(a) 点火前首先对煤气管道进行充氮气，清除煤气管道内空气。打开放散阀，放散氮气，直至确认煤气已到前嘴阀门处；

(b) 启动风机，将烧嘴前的空气阀门打开 $1/4 \sim 1/5$ ；

(c)检查炉前空、煤气压力是否符合要求；

(d)点燃点火烧嘴；

(e)慢慢开启燃气阀，点燃烧嘴；

(f)缓慢调节燃气阀和空气阀，调至烧嘴所需工作状态；

(g)若一次点不着火，应立即关闭燃气阀门，开大助燃空气阀门，吹扫炉内可燃气，查找原因，按点火顺序再次点火。

5.1.2.2 实验烧嘴运行

(a)应随时观察烧嘴的燃烧状态，在燃气压力变化时，及时校正烧嘴的燃烧工况。

(b)熟悉加热工艺要求，随时调节烧嘴的燃烧能力，调整燃料压力与空气压力的匹配。

5.1.2.3 实验烧嘴熄火

(a)先关闭燃气阀门，待炉内温度降至较低时，关闭空气阀门；

(b)检查炉前燃气管道；

(c)短期停炉时，打开放散管阀门，利用管道内煤气本身浮力将管道内煤气排出；

(d)长期停炉时，接通吹扫管，利用 0.4~0.5MPa 饱和蒸汽或压缩空气将管内煤气或煤气、空气混合物排出。

5.2 双蓄热换向系统

为满足实验要求本炉设有双蓄热烧嘴，这就意味着需要增加一套煤气换向系统，目前蓄热燃烧换向系统主要采用旋转四通换向阀，其结构如图 3.1，其特点是换向灵活，易于控制，但其严密性差。由于实验炉采用燃料为 8000Kcal 的天然气，若采用传统的四通换向阀危险性很大，燃料会与高温烟气掺混，若烟气中留有残余空气，会产生爆炸，因此本实验炉煤气换向系统采用两个三通换向阀代替四通换向阀。

其工作原理见图 5.2，燃气进入三通阀 1#、4#阀处于打开状态，2#、3#阀处于关闭状态，如图 5.2a，此时燃气进入三通阀后通过 1#阀门，供给炉子一侧烧嘴燃烧，炉子另一侧排烟，烟气经过 4#阀门进入三通阀排出，而此时，2#、3#阀处于关闭状态，因此燃气与烟气完全隔离，这就克服了四通换向阀密封性不好的缺陷；换向后，1#、4#阀关闭，2#、3#阀打开，如图 5.2b，此时燃气进入三通阀后通过 2#阀门，供给炉子一侧烧嘴燃烧，炉子另一侧排烟，烟气经过 3#阀门进入三通阀排出。

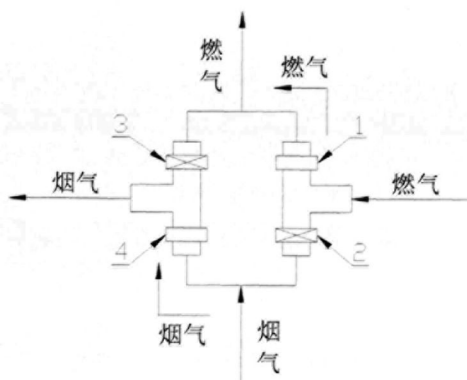


图 5.2a 燃气换向系统

Figure 5.2a The change system of gas

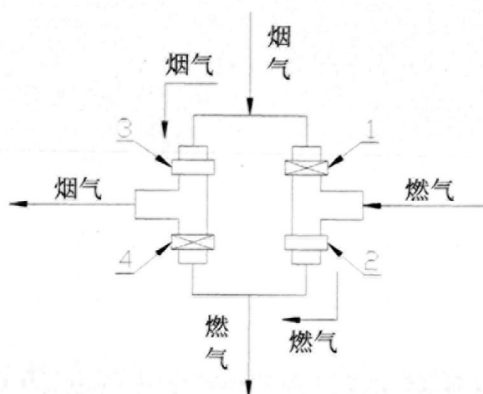


图 5.2b 燃气换向系统

Figure 5.2b The change system of gas

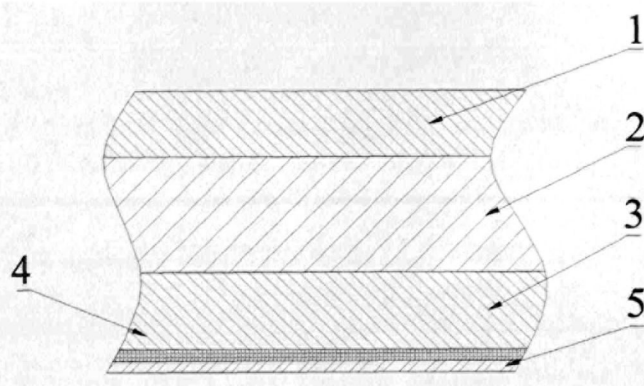
5.3 实底段设计

根据首钢技术研究院要求，本实验炉炉体长度不小于 6 米，而中试基地厂房条件，如要布置长 6 米的台车炉，就会出现台车不能完全拉出的问题，为克服这一困难，本实验炉采用在炉膛内增设 600mm 实底段，保证炉体长度不小于 6 米，同时缩短了台车长度，确保台车可以完全拉出。实底段耐材结构同台车机构相同，见图 5.3。

5.3.1 实底段密封

实底段砌筑与台车相同，台车与实底段的密封成为设计的主要问题。本实验炉采用软密封结构，在实底段及台车钢架增加纤维毡，防止台车与实底段直接碰撞，且台车尾部设计成凹凸结构，增加了密封效果，结构见图 5.4。

在实底段下部设计为软密封结构，其结构如图 5.5，当台车进入炉膛后台车尾部粘有纤维毡的钢架结构撞击软密封，使软密封弹簧压紧，实现了台车与实底段完全密封。



1、3—高铝砖 2—轻质耐火砖 4—硅钙板 5—钢板

图 5.3 实底段结构

Figure 5.3 The structure of reality bottom district

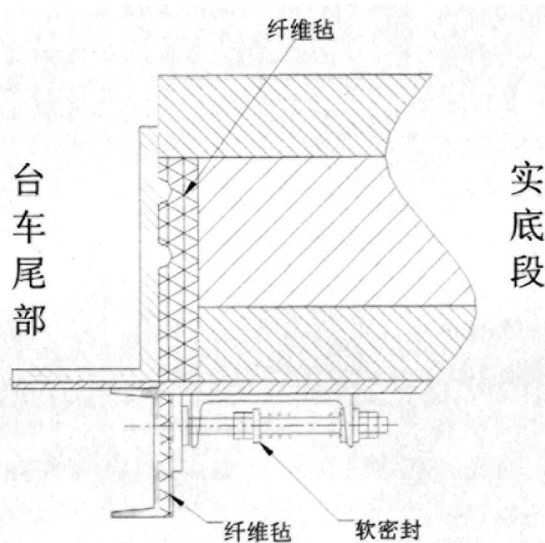


图 5.4 实底段密封结构

Figure 5.4 The structure of reality bottom district sealing

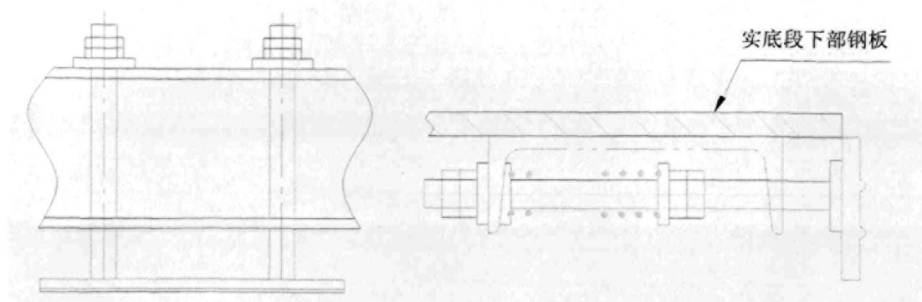


图 5.5 软密封结构

Figure 5.5 The structure of soft sealing

5.4 全纤维炉墙结构

工业炉炉衬材料分为砖砌炉衬, 浇注料炉衬和纤维炉衬, 目前国内的加热炉绝大多数采用传统的耐火砖砌筑形式, 炉衬的散热和蓄热占炉子总能耗的 20%-40%, 筑炉材料的发展趋向是“两高一轻”, 即高温、高强、轻质。合理悬着炉衬材料和优化复合炉衬结构、可以减少炉体散热、蓄热损失, 取得很好的节能效果^[2], 目前全纤维炉衬逐渐显示出了它的优越性, 其优点如下^{[8][10]}:

一、比重轻

传统耐火黏土砖的比重为 2100kg/m^3 , 而耐火纤维毯的比重为 128kg/m^3 , 仅为传统耐火黏土砖的 6.1%, 当组成炉墙时, 若按 1 平方米计算, 则全纤维炉墙的重量仅为传统炉墙重量的 5.71%。

二、蓄热损失小

1 平方米全纤维炉墙的蓄热损失为 17261.6KJ, 而 1 平方米传统耐火砖的蓄热损失为 453633KJ, 即全纤维炉墙的蓄热损失仅为传统炉墙的 3.8%。

三、散热损失小

1 平方米全纤维炉墙的散热损失为 955kJ/m^2 , 而 1 平方米传统耐火砖的散热损失为 1707.1kJ/m^2 , 则全纤维炉墙的散热损失为传统炉墙的 55.9%。

四、炉体结构轻

由于全纤维炉墙的比重很轻, 因此全纤维炉墙的炉衬和钢结构要比砖体结构轻巧的多。

五、加热冷却速度快

全纤维炉墙比重轻、蓄热损失小, 因此加热快, 热效率高。由于其冷却速度较快。全纤维炉墙从 $850-1000^\circ\text{C}$ 冷却至 $200-300^\circ\text{C}$ 只需 0.5-1 小时, 而砖体炉墙需 8-10 小时以上。

根据首钢中试基地实验炉要求实验炉结构轻巧, 散热损失小, 升温、冷却

速度快以实现更换不同实验的情况，本实验炉采用全纤维炉衬结构。

第六章 总结和展望

6.1 总结

本文根据首钢中试基地实验炉建设要求，对实验炉进行方案制定及实验炉进行设计，对实验炉进行实验开发，并对关键性技术问题进行论述及方案对比。

本实验炉完成了方案设计，并且此方案已运用到了实验炉建设实践当中，通过实验方案及工程实践证明：

1、实验炉采用车带门台车结构，克服了场地的限制，可遥控控制，符合实验炉操作方便灵活的要求。

2、实验炉管炉系统的优化设计，满足了不同烧嘴工作的要求，实现了实验炉的多功能性。

3、实验炉采用全纤维炉衬结构，具有比重轻、蓄热损失小、炉体结构轻、加热冷却快的优点，符合实验炉散热损失小，结构简单的要求；

4、实验炉设有多种燃烧器，实现了实验炉对不同燃烧器实验的要求；

5、本文编制了九项实验方案，对实验炉实验开发，对生产实践具有重要的参考价值；

6、实验炉设有单蓄热实验烧嘴，烧嘴设有热电偶，实现对蓄热体内部及预热空气温度的测量，且蓄热体可更换，满足实验炉对不同蓄热体性能实验的要求；

7、实验炉双蓄热煤气换向系统采用三通换向阀代替四通换向阀，克服了四通换向阀严密性差的缺点，保证了煤气换向系统的安全工作；

8、实验炉设有实底段，缩短了台车长度，克服了厂房限制，保证台车可以全部拉出炉门；

9、实验炉台车与实底段密封采用软密封结构，在实底段及台车钢架增加纤维毡，防止台车与实底段直接碰撞，且台车尾部设计成凹凸结构，增加了密封效果；

10、实验炉采用喷射排烟，设有喷射风机强制排烟，解决了烟囱过高的问题，满足中试基地要求。

11、实验炉采用燃气与烟气掺混的方法，实现了燃气热值的调整，满足了对不同燃料热值的模拟。

6.2 展望

本实验炉属于首钢中试基地建设项目的一部分，本文进行了实验炉的方案设计、热工计算，结构设计、实验方案描述，并对关键性技术问题进行了说明。但由于实验炉建设的进度问题，还有许多工作没有完成，今后还应该完成以下工作：

- 1、实验炉调试过程中查找问题，对实验炉结构进行调整优化；
- 2、实验炉的实验功能并不仅限于本文中的实验方案，实验功能有待进一步完善、开发；
- 3、对制定的实验方案进行实践验证；
- 4、完善实验数据处理方法，保证实验数据对现实生产具有指导意义。

参考文献

1. 孙斌,陈振东. 工业炉节能现状和发展趋势[J], 能源技术, 2007, 30-31.
2. 姜生远. 工业炉的现状与发展前景[J], 机械工人, 2005, 9-11.
3. 郭伯伟, 张者一. 蓄热式燃烧器的开发及在现代工业炉中的应用[J], 工业加热, 1998, 12-15.
4. 王秉铨. 工业炉设计手册[M], 北京: 机械工业出版社, 1996, 52-53.
5. 陆钟武. 火焰炉[M], 东北大学, 1994, 126-131.
6. 王秉铨. 热处理手册[M], 北京: 机械工业出版社, 1993, 354-367.
7. 杜涛, 赵渭国. 火焰炉热工计算[M], 沈阳: 经济科学出版社, 2002, 54-81.
8. 赵玉兰, 田桂梅. 全纤维炉衬在热处理炉上的应用[J], 冶金能源, 1996, 33-34.
9. 段光才, 赵飞松. 加热炉热平衡测试及分析[J], 冶金能源, 2005, 50-59.
10. 金德钢. 加热炉炉衬材料与施工技术的发展探索[J], 管理与技术 2006, 26-31.
11. 兰霄, 田小果. 脉冲燃烧控制技术[J], 自动化与仪器仪表 2005, 3-4.
12. 宁奎凤, 万道春等. 脉冲燃烧控制技术在热处理炉上的应用[J], 上冻冶金 2008, 24-25.
13. 武立云, 张继光. 脉冲控制燃烧器热工特性的实验研究[J], 工业炉, 2008.
14. 胡彦邦. 我国工业炉燃料及燃烧装置的现状与展望[J], 工业炉, 2009, 6-12.
15. 何曙, 李勇等. 喷射器理论研究进展[J], 制冷技术, 2002.
16. 庄永茂, 施惠邦, 燃烧与污染控制[M]. 上海, 同济大学出版社, 1998, 79~80
17. 岑可法, 姚强等. 燃烧理论与污染控制[M], 北京, 机械工业出版社, 2004, 410~411
18. 岑可法, 姚强等. 高等燃烧学[M], 杭州: 浙江大学出版社, 2000, 572~572.
19. 周力行. NO_x 生成湍流反应率数值模拟的进展[J], 力学进展, 2000.
20. 饶文涛. 蓄热燃烧中 NO_x 生成规律研究[J], 宝钢技术, 2004.61-64.
21. 宁棣槐, 赵宪如等. 蓄热换向式燃烧装置的试验研究[J], 冶金能源,

- 1994.37-41.
- 22.V. Agopyan, H. Savastano Jr., V.M. John, M.A. Cincotto. Heat transfer characteristics of HiTAC heating furnace using regenerative burners[J], *Cement and Concrete Composites*, 2006, Pages 2027-2034.
- 23.W. Blasiak, W. Yang, N. Rafidi, Physical properties of a LPG flame with high-temperature air on a regenerative burner, *Combust. Flame* 136 (2004) 567 - 569.
- 24.韩新生, 李银河等. 空煤气双蓄热技术在加热炉上的应用[J], 承钢技术, 2006, 22-24.
- 25.周善良, 黄卫国等. 高炉煤气、空气双蓄热燃烧技术在板坯加热炉上的应用[J], 工业炉, 2007, 24-27.
- 26.武立云, 张继光等. 脉冲控制燃烧器热工特性的实验研究(温度部分)[J], 工业炉, 2008, 1-7.
- 27.李博知. 小型工业炉管式换热器设计计算[J], 钢铁技术, 2002, 22-24.

致 谢

在本文完成之际，谨向我的导师、家人和所有帮助、关心过我的老师和同学们致以最诚挚的谢意！

首先要衷心感谢我的导师张卫军副教授，我的论文能够顺利完成，离不开张老师精心的指导、热心的讲解和不断的鼓励。作为东北大学热能工程的一名学生，在这两年的研究生求学期间，我对工业炉知识由初步了解到现在基本可以全面掌握工业炉结构，并可以对工业炉进行实际设计，这些都要感谢张老师给予的机会、指导和帮助，这段时间的学习工作使我在今后的学习生活中终身受益。在此谨向张老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。同时还要感谢吴建国老师，吴老师对本文提出了很多切实可行的建议，使论文得以顺利完成。

另外，在实验炉施工期间以及撰写论文期间，首钢技术研究院给予了大力帮助，在此一并感谢！