

## 摘 要

梭式窑是一种现代化的间歇式窑炉，梭式窑以其投资少、适应性强、烧成质量高、占地面积小等优点，受到广大陶瓷生产企业的欢迎。

本设计主要是设计烧成温度 1230℃ 的 10M<sup>3</sup> 气烧梭式窑，烧成产品陶瓷酒瓶。在设计中尽量采用轻质耐火砖和保温材料，以减轻窑体的重量和蓄热量，提高热效率，节省燃料的消耗量。该窑以液化石油气为燃料，可实现无焰明火烧成，热利用率大大提高。

由于采用了窑外装卸制品，采用了高速调温烧嘴，应用高温轻质耐火材料和保温材料，砌筑窑和烧成操作自动化等，从而克服了传统的间歇式倒焰窑的单位制品的燃烧消耗量大、劳动条件差等缺点，近年来得到了较快的发展。

**关键词：**梭式窑    倒焰窑    天然气

## Abstract

Spindle type kiln is a modern intermittent kiln, with its shuttle type kiln less investment, adaptable, burning into high quality, cover an area of an area small, by the advantages of ceramic production enterprise welcome.

This design mainly design sintering temperature of 1,550 °C 27M3 gas burn spindle type kiln. Burning into product honeycomb ceramics. In design make use of lightweight refractory bricks and thermal insulation material, in order to reduce the weight of kiln body heat storage efficiency, improve with and saving fuel consumption. The kiln LPG for fuel, which can realize no cartridge burn open-flame, and the heat efficiency is greatly increased.

As a result of the kiln, adopted the loading and unloading products high-speed tempering burner, application of high temperature lightweight refractory material and thermal insulation material, laying kiln and burning into automatic operation, etc, which can overcome the traditional intermittent pour flame burning units products furnace, poor working conditions consumption shortcomings, in recent years obtained the developed quickly.

## 前言

这次设计的是 10 立方米的燃煤气梭式窑炉，在设计前期阶段收集和查阅了相关资料和文献。中间进行了大量的计算，也学到了不少的东西。在设计过程中综合运用了自己大学四年来所学的知识，在运用知识的同时，才深深感到所学知识面的狭窄和不够深。第一部分主要是参照江西萍乡远洋出口陶瓷酒瓶厂的窑炉确定了我此次设计的窑体尺寸，第二部分再根据实习过程中收集到的相关数据和资料确定了烧成制度和烧成周期，根据指导老师的意见和建议，再加上自己的设计思路，确定了工作系统，燃烧系统和排烟系统等。

窑体结构采用了三层材料，多晶莫来石纤维，轻质莫来石砖和普通硅酸铝纤维，窑车结构主要是多晶莫来石纤维，轻质莫来石砖和轻质耐火粘土砖。采用窑车中部开烟道，窑车两侧墙各设两个烟道，窑顶集中排烟，设有风机抽风。燃烧器采用高速喷射式烧嘴。还用到了打入急冷风快速冷却制品的设计思路。

在设计过程中，得到了各位老师和同学的大力支持和帮助，特别是指导教师周露亮老师提出了许多很有建设性的意见和建议，在此谨致以诚挚的谢意。同时也感谢江西萍乡远洋出口瓷厂提供了我前后共三次的窑炉实体观摩机会。

限于设计者水平，书中难免有不妥之处，诚请各位专家、老师批评指正！

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
前言.....	III
1 设计任务及原始资料.....	3
1.1 设计任务书.....	3
1.2 原始资料.....	4
1.2.1 设计技术指标及参数.....	4
1.2.2 产品名称及规格.....	4
2 窑体主要尺寸的确定.....	5
2.1 入窑坯体尺寸.....	5
2.2 预选砌板尺寸及装窑方式.....	5
2.3 窑车主要尺寸计算.....	5
2.4 窑的有效尺寸计算.....	5
2.5 支柱规格.....	5
2.6 每窑所装层数.....	5
3 烧成制度的确定.....	6
3.1 烧成制度.....	6
4 工作系统的确定.....	7
4.1 排烟系统.....	7
4.2 燃烧系统.....	7
4.3 冷却系统.....	8
4.4 附属设备.....	8
5 窑体材料及其厚度的确定.....	9
5.1 窑体材料的选择.....	9
5.2 窑体材料厚度的确定原则.....	9
5.3 窑体材料及厚度的确定.....	9
6 燃料及燃烧计算.....	12
6.1 燃料组成.....	12
6.2 空气量的计算.....	12
6.3 烟气量及烟气组成计算.....	12
6.3.1 理论烟气量 $V_0$ 及理论烟气组成(气体燃料).....	12
6.3.2 实际烟气量及烟气组成.....	13
6.4 理论燃烧温度与实际燃烧温度的计算.....	13
7 物料平衡计算.....	15

7.1 每窑烧成制品质量  $G_{sp}$ ..... 15

7.2 每窑干坯质量  $G_{gp}$ ..... 15

7.3 每窑蒸发自由水质量  $G_{2S}$ ..... 15

7.4 硼板和支柱质量  $G_b$ ..... 15

8.1 窑体及窑车温度分布的确定..... 16

    8.1.1 异同种材料的温度关系表达式..... 16

    8.1.2 窑体温度分布计算..... 16

8.2 窑体各部分的表面积..... 19

8.3 净蓄热量的计算..... 19

# 1 设计任务及原始资料

## 1.1 设计任务书

### 景德镇陶瓷学院毕业设计（论文）任务书

院（系） 科技艺术学院

2014 年 5 月 12 日

专业	热能与动力工程	班级	热工 2010
学生姓名	骆永强	指导老师	周露亮
题目	10m <sup>3</sup> 梭式窑设计		
主要研究内容和设计技术参数：			
1、窑体有效容积：10 m <sup>3</sup> 2、产品名称：陶瓷酒瓶 产品规格：Φ100 mm ×160    0.45kg/件 3、燃料：天然气 4、加热时间：15 小时    烧成温度：1230℃    烧成气氛：全氧化 5、装烧方式：SIC 硼架 6、烧嘴方式：引射式烧嘴 7、烧成制度及其他设计技术参数自定 基本要求（含成果要求）： 1、窑炉结构和工作系统合理，设计计算正确、独立完成，大胆创新 2、图纸清晰干净，规范齐全 图纸包括：窑炉结构砌筑图，钢架结构图，管路布置安装图，窑车结构图，异型砖图等 3、设计说明书详细，含设计计算，材料概算等，说明书格式规范，A4 纸打印 4、符合计算机绘图，外文应用等毕业设计要求			
第 4 周：整理资料，确立设计方案			
第 5-6 周：设计计算，结构确定			
第 7 周：调整设计方案，构思设计草图			

第 8-15 周：绘图，描图

第 16-17 周：编写设计说明书，打印

第 18 周：答辩准备

## 1.2 原始资料

### 1.2.1 设计技术指标及参数

有效容积：40 立方米

燃料：天然气

低发热值：35960 KJ，湿天然气含水量 4%。

最高烧成温度：1230℃

烧成周期：15h

### 1.2.2 产品名称及规格

名称：陶瓷酒瓶

规格 高：160 mm 直径：100 mm

产品单位重量：0.45 kg

坯体总线收缩率：1.9%

入窑水分：2%

产品合格率：95%

## 2 窑体主要尺寸的确定

### 2.1 入窑坯体尺寸

外高：160 mm

最大外径：100 mm

### 2.2 预选砌板尺寸及装窑方式

预选砌板尺寸：920\*380\*10mm

装窑方法：

每个砌板上面放置 24 个陶瓷酒瓶。砌板之间紧密放置。

坯体间留有 20mm 的火道。

### 2.3 窑车主要尺寸计算

沿窑车宽度方向和长度方向上砌板外边缘与窑车边缘各留有 60mm 和 80mm 的空隙。

根据上面的装窑方法得出窑车的尺寸：

窑车长： $380*5+4*10+60*2=2560\text{mm}$

窑车宽： $920*2+80*2+10=2010\text{mm}$

### 2.4 窑的有效尺寸计算

由上面的计算得出

窑的有效长：2560mm

窑的有效宽：2010mm

窑的有效高：1750mm

### 2.5 支柱规格

支柱除需满足强度要求外，还要求平稳且有效体积尽量小。

支柱规格：165\*40\*40 (mm)

### 2.6 每窑所装层数

高/支柱高+砌板高=  $(2000-250)/165+10=10$ ，则每窑装 10 层。



3 烧成制度的确定

为了满足生产工艺的要求，使设计操作有章可循，必须制定一个合理的烧成制度。根据制品的化学组成和矿物组成的特性以及烧成工艺过程来确定烧成制度，气氛制度，压力制度。基本要求如下：

- ① 在各阶段有一定的升（降）温速率，不得超过。以免内外温差过大形成破坏应力。使制品变形或开裂，同时还要考虑在该阶段中所进行的物理—化学变化所需的时间。
- ② 在适当的温度下应有一定的保温时间，以使制品内外温度趋于一致，皆达烧成温度，保证整个制品内外烧结。
- ③ 在氧化和还原阶段应保持一定的气氛制度，以保证制品中的物理—化学过程的进行。
- ④ 全窑应有一个合理的压力制度。以确保温度制度和气氛制度实现。

3.1 烧成制度

3.1.1 各阶段的平均升温速率

各阶段的平均升温速率列表如下：

表 2-1 各阶段的平均升温速率

阶段	温度范围(℃)	烧成时间	升温速率（℃/h）
一	25—250	4.3 h	52.32 11.3
二	250—950	1.8 h	444.4 70.0
三	950—1000	1.4 h(氧化)	35.71 6.0
四	1000—1230	1.8 h (还原)	127.8 27.0
五	1230—200	5.7 h	605.88 50.0

3.2 气氛制度的确定

根据烧成工艺生产要求，全窑采用全氧化气氛，考虑到各阶段对气氛的要求不同，同时因氧化气氛过大，则应提高燃料需求量降低烧成温度。因而氧化气氛一般在a=1.05-1.15 之间，而不宜过大。

## 4 工作系统的确定

梭式窑的工作系统包括排烟系统，燃烧系统，冷却系统及窑体的附属设备。梭式窑工作系统的好坏与窑的工作性能有很大关系。只有确定一个好的工作系统，才能保证窑炉的正常工作与运行。

### 4.1 排烟系统

梭式窑的排烟系统是由火道，水平烟道，垂直烟道，排烟罩，烟囱等排烟装置组成。

该窑窑底的 10 块砌板之间及砌板与窑的前后墙之间都留有火道，火道均匀地分布在窑底上。可使窑内水平截面上的温度均匀分布，同时窑底水平烟道和后墙上的垂直烟道相通。烟气由火道从窑内水平烟道。经由垂直烟道及设置在窑顶上的排烟罩，最后由烟囱排出。

在窑顶与排烟罩底部设有烟道闸板，闸板材料为碳化硅质耐火板。

该窑采用抽风机抽热风，因此可以通过调节抽风机转速来控制烟气排放量。

### 4.2 燃烧系统

燃烧系统由供气管路，烧嘴等组成。供气管路上有减压阀、过滤器、调节阀、压力表、计量器等使气体燃料压力稳定，实现微调节。

该窑采用的烧嘴为自吸式煤气烧嘴，通过烧嘴的自然吸气来助烧。这种烧嘴能产生较大的喷出速度，气体喷出后会有一定的初速度，气体沿窑内的燃烧空间上升到窑顶，然后向下流动与制品发生充分的热交换后由排烟系统排出。

关于燃料系统，管路的检查是至关重要的，使用之前准备好毛刷，肥皂水。主管路接上空压机或氧气瓶（最好用氩气）。开启空压机，然后开启逐级阀门、稳压阀；一般稳压阀稳压前的压力测试到 0.5-0.6MPa，稳压后的测试压力在 0.25MPa，原因是压力表量程较小。然后对每一个焊点、丝接点进行抹肥皂水，观察有无气泡出现，哪里有漏气点就要检修哪里，不能用的部件要及时更换。

烧嘴性能的经验检查，检查烧嘴是否堵塞？可逐个逐渐开启烧嘴的控制阀门及风阀，由小至大，听其噪声的大、小。如果噪声较大，说明正常，如果噪声较小而且没有力量感。一、说明烧嘴出气口已经堵塞，应拆下烧嘴找出堵塞物。二、是烧嘴质量有问题需立刻更换。

### 4.3 冷却系统

由于梭式窑属于间歇式窑炉，因而采用自然冷却方式冷却。

### 4.4 附属设备

该窑的附属设备包括：测温装置、热电偶、测温孔、观火孔等。

5 窑体材料及其厚度的确定

5.1 窑体材料的选择

本次设计的高温梭式窑，其最高烧成温度为 1230℃，考虑到现代间歇窑向轻型化，灵活化发展。因此在选择窑体材料时要尽量满足以下几个要求：

- ① 窑体材料包括耐火材料和隔热材料。
- ② 由于窑在使用中要受到周期性的热冲击，因此窑体材料热稳定性要好。
- ③ 耐火材料必须能够耐高温，具有良好的耐热性能并具有一定的强度，以保证窑炉升到最高温而不倒塌，同时导热系数要低，以降低外表面温度。减少散热量，降低能耗。保证烧成的高温。
- ④ 隔热材料的蓄热小，散热也不大。要具有良好的保温性能以降低能耗。
- ⑤ 对某些安全使用温度限制的保温材料要校核安排的位置是否在材料的使用温度范围内。
- ⑥ 窑体材料要轻，以减轻窑体重量及窑体蓄热。
- ⑦ 为增加窑体的气密性和便于砌筑，梭式窑一般采用钢板外壳。

5.2 窑体材料厚度的确定原则

- ① 为方便砌筑和外观整齐，窑墙厚度变化不要太多。
- ② 与砌型尺寸一致，厚度方向不允许砍砖。

总之，确定材料种类和厚度，应在考虑满足生产基本要求以及安全，经济的基础上。使窑体蓄热和散热两者都尽可能少或者总和尽可能少。

5.3 窑体材料及厚度的确定

根据以上原则，结合所参观实习的一些窑炉特点，所选的材料和厚度如下：

窑体材料及厚度的确定

	材料	厚度 (mm)	$\lambda$ ( $W / m \cdot ^\circ C$ )	C ( $kJ / kg \cdot ^\circ C$ )	P ( $kg / m^3$ )
	多晶莫来石纤维	50	0.175	1.13	128

窑墙	轻质莫来 石砖	345	0.25	1.20	800
	普通硅酸 铝纤维	60	0.15	1.10	128
窑顶	多晶莫来 石纤维	50	0.175	1.13	128
	轻质莫来 石砖	300	0.25	1.20	800
	普通硅酸 铝纤维	80	0.15	1.10	128
窑门	多晶莫来 石纤维	50	0.175	1.13	128
	轻质莫来 石砖	345	0.25	1.20	800
	普通硅酸 铝纤维	60	0.15	1.10	128
窑车	多晶莫来 石纤维	50	0.175	1.13	128

	轻质莫来 石砖	300	0.25	1.20	800
	轻质耐火 粘土砖	130	0.84	1.10	2000
硼板	碳化硅质 量	22		0.963	2700
立柱	堇青石质	40		0.843	1890

## 6 燃料及燃烧计算

### 6.1 燃料组成

所用城市天然气成分

$H_2$	$CH_4$	CmHn	CO	$CO_2$	$N_2$	$O_2$
0.6	90	6.4	0.2	0.6	1.6	0.6

Q 热=35960 KJ/m<sup>3</sup>, 湿天然气含水量 4%.

### 6.2 空气量的计算

#### 6.2.1 换算成天然气组成

$$XV=X_d(100-H_2O)/100=0.96X_d$$

组分	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_4$	CO	$CO_2$	$N_2$	$O_2$	$H_2O$
体积(%)	0.576	86.4	6.144	0.192	0.576	1.536	0.576	4

#### 6.2.2 计算理论空气量 $V_{ao}$ 和实际空气量 $V_a$ :

$$\begin{aligned} V_{ao} &= (1/2 \times 0.576 + 2 \times 86.4 + 3 \times 6.144 + 1/2 \times 0.192 - 0.576) \times 100 / 21 \times 1/100 \\ &= 9.097 \text{ (Nm}^3 \text{ /Nm}^3 \text{)} \end{aligned}$$

取空气过剩系数  $a=1.1$  «硅酸盐工业热工基础»P243

气体燃料  $a=1.05 \sim 1.15$

$$V_a = aV_{ao} = 1.1 \times 9.097 = 10.01$$

### 6.3 烟气量及烟气组成计算

#### 6.3.1 理论烟气量 $V_o$ 及理论烟气组成(气体燃料)

基准: 1Nm<sup>3</sup> 气体燃料

理论烟气量中  $CO_2$  含量来自气体燃料中的 CO,  $CH_4$ , CmHn 中硫的氧化及气体燃料中原有的  $CO_2$ :

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= (CO_2 + CO + CH_4 + mCmHn) \times 1/100 \\ &= 0.99456 \text{ (Nm}^3 \text{ /Nm}^3 \text{)} \end{aligned}$$

理论烟气量中  $CO_2$  含量来自气体燃料中的 CO,  $CH_4$ , CmHn,  $H_2S$  中氢的氧化及气体燃烧中原有的  $H_2O$ :

$$V_{H_2O} = (H_2O + H_2 + 2CH_4 + 1/2 C_2H_4) \times 1/100 \text{ (Nm}^3 \text{ /Nm}^3 \text{)}$$

$$=(4+0.576+2\times 86.4+1/2\times 6.144)\times 1/100$$

$$=1.804 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

$$V N_2 = N_2 \times 1/100 + V O_2 \times 79/21 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

$$=1.536 \times 1/100 + 79/100 \times 9.097$$

$$=8.839 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

理论烟气量  $V_0$  为:

$$V_0 = V CO_2 + V H_2O + V N_2 = 0.99456 + 1.804 + 8.839 = 11.64 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

### 6.3.2 实际烟气量及烟气组成

$a=1.1>1$  时, 实际烟气量  $V \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$  燃料为:

$$V = V_0 + (a-1)V_{a0}$$

$$=11.64 + (1.1-1) \times 9.097$$

$$=12.55 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

烟气组成中  $V CO_2$ ,  $V H_2O$  与理论烟气量中  $V CO$ ,  $V H_2O$  相同.

$$\text{而 } V N_2 = N_2 \times 1/100 + a V O_2^\circ \times 79/21$$

$$=0.015 + 1.1 \times 79/21 \times 9.097$$

$$=3.77 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

### 6.4 理论燃烧温度与实际燃烧温度的计算

燃料燃烧时放出热量, 使燃烧产物的温度升高. 燃烧产物的温度叫做燃烧温度. 燃烧温度可以通过分析燃烧过程收入和热量支出的平衡来求出.

燃烧过程中的热平衡项目如下 (基准: 1Nm<sup>3</sup> 燃料, 0℃)

收入热量:

- ① 料的化学热  $Q_{\text{net}}$ ;
- ② 料带入的物理热  $Q_f = C_f \cdot t_f$ ;
- ③ 气带入的物理热  $Q_a = V_a C_a t_a$

支出热量:

- ① 燃烧产物所含的物理热  $Q = V C t_p$ ;
- ② 燃烧产物传给周围物体的热量  $Q_1$ ;
- ③ 机械不完全燃烧造成的热损失  $Q_{m1}$ ;



④ 化学不完全燃烧造成的热损失  $Q_{ch}$ ;

上述项目中的  $C_f, C_a, C$  分别表示燃烧. 空气和燃烧产物从 0℃ 至各自温度下的平均比热,  $KJ/Nm^3 \cdot ^\circ C$

$t_f, t_a$  分别表示燃料和空气进入燃烧室的温度.

$t_p$  表示燃烧产物的实际温度.

$V_a, V$  分别表示实际空气量和烟气量.

据热平衡方程式为:

$$Q_{net} + Q_f + Q_a = Q + Q_l + Q_{ml} + Q_{ch}$$

$$t_p = (Q_{net} + C_f \times t_f + V_a C_a) / V_c$$

取燃料室温  $t_f = 20^\circ C$  下进入燃烧室.

查《硅酸盐工业热工基础》表 4-13 和 4-18 可得:

$$C_f = 1.32 KJ/Nm^3 \cdot ^\circ C \quad C_a = 1.296 KJ/Nm^3 \cdot ^\circ C \quad C = 1.57 KJ/Nm^3 \cdot ^\circ C$$

$$\text{又有 } V_a = 10.01 Nm^3 / Nm^3 \quad V = 12.55 Nm^3 / Nm^3$$

$$\text{理论燃烧温度 } T_{th} = (Q_{net} + C_f \times t_f + V_a C_a) / V_c$$

$$= (35690 + 1.32 \times 20 + 10.01 \times 1.296 \times 20) / 12.55 \times 1.57$$

$$= 1825.86^\circ C$$

因为实际燃烧温度计算式中的各项热损失数据较难获得. 但实际燃烧温度本身却较易测定. 故人们一般均从不同窑炉的时间操作过程中. 总结出实际燃烧温度  $t_p$  与理论燃烧温度  $T_{th}$  的比值. 高温系数  $\eta$ , 于是查《硅酸盐工业热工基础》表 4-19, 可得高温系数  $\eta = 0.75$ . 该梭式窑  $t_p = \eta T_{th} = 0.75 \times 1825.86^\circ C = 1369.396^\circ C > 1230^\circ C$

该温度可满足该窑炉所需的最高温度.

## 7 物料平衡计算

根据装窑方法，在窑车上每层放 240 件制品，在高度方向上放层，故每窑可放制品 2400 件制品，每件制品的质量为 0.45 kg。

### 7.1 每窑烧成制品质量 $G_{sp}$

$$G_{sp}=2400 \times 0.45=1080 \text{ kg}$$

### 7.2 每窑干坯质量 $G_{gp}$

$$G_{gp}=G_{sp} \times (100-2)/100=1080 \times 98/100=1058.4 \text{ kg}$$

### 7.3 每窑蒸发自由水质量 $G_{2s}$

$$G_{2s}=G_{sp}-G_{gp}$$

$$=1080-1058.4=21.6 \text{ Kg}$$

### 7.4 硼板和支柱质量 $G_b$

$$C=0.96+0.146 \times 10^{-3}t=1.325 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

硼  $\rho=2500 \text{ Kg/m}^3$  板数目  $10 \times 10$  个, 支柱个数  $10 \times 4 \times 9=360$  个

$$G_b=G_p+G_z=(100 \times 0.58 \times 0.55 \times 0.022 \times 2500)+(360 \times 0.58 \times 0.55 \times 0.022 \times 2500)=8070 \text{ Kg}$$

## 8 热平衡计算

梭式窑的传热是非稳态的，计算比较复杂。首先，计算在加热各阶段时窑体和窑车的积散热，然后再计算热平衡。

### 8.1 窑体及窑车温度分布的确定

梭式窑属于间歇窑，其导热属于非稳态导热，非稳定导热的计算比较复杂，通常采用有限差分法来计算，有限差分法的基本原理是用函数在一些特定点的有限差商来代替微商，建立与原微分方程相对应的差分方程，用一组线性方程来代替该微分方程，以便于求解。

利用有限差分法求得窑体各阶段的温度分布，就是在空间上沿窑体各部分材料的厚度方向把材料分割成网络单元，把时间也分割成许多间隔  $\Delta \zeta$ ，时间间隔的顺序是用  $K$  来表示，从初始时间  $\zeta=0$  时开始，依次求得  $\Delta \zeta$ ， $2\Delta \zeta$ ，…… $K\Delta \zeta$  时刻材料中各节点的温度值。

在本次设计中取  $\Delta \zeta$  为 15 分钟即  $\Delta \zeta=900$  秒。

根据有限差分格式，对同一种材料的温度分布，有

$t_i^k = F_0(t_{i-1}^{k-1} + t_{i+1}^{k-1})t_{i-1}^{k-1}$ ，其中  $t_i^k$  表示  $K\Delta \zeta$  时刻，第  $i$  个节点的温度，其表示方法类同， $F_0$  傅立叶准数。

#### 8.1.1 异同种材料的温度关系表达式

同种材料：根据《传热学》上有

$$T(I, K+1) = F_0[T(I, K+1) + T(I-1, K)] + (1-F_0) \times T(I, K)$$

对于不同种材料： $q_A = q_B$

$$q_A = \Delta T_A / R_A = (t_1 - t_0) / R_A$$

$$q_B = \Delta T_B / R_B = (t_2 - t_1) / R_B$$

$$T_n = (R_A \times T_{(n+1)} + R_B \times T_{(n-1)}) / (R_A + R_B)$$

其中  $R_A$ ， $R_B$  表示各层材料的导热热阻， $R_{\text{空}}$  表示空气的导热热阻，查《传热学》可知 20℃ 时空气的导热热阻为  $R_{\text{空}}=0.05$

#### 8.1.2 窑体温度分布计算

根据一维非稳态导热显示差分格式的稳定性条件有  $F_0 \leq 1/2$  即  $a \Delta \zeta / X^2 \leq 1/2$

所以各层材料的温度节点的间隔  $\Delta X \geq (2a \Delta \zeta)^{1/2}$

**8.1.2. 1 最小厚度的划分:**

$F_0 = a \Delta \tau / \Delta x^2$ , 又有  $F \leq 1/2$

$$\Delta x \geq (2a\Delta\tau)^{0.5}, \text{取 } \Delta\tau = 20\text{min}, \Delta\tau = 1200\text{s};$$

**1. 多晶莫来石纤维**

$$\alpha = \lambda / \rho \cdot c = 0.1 / (100 \times 1.24 \times 10^3) = 0.806 \times 10^{-6} (m^2 / s)$$

$$\Delta x \geq (2\alpha\Delta\tau)^{0.5}, \Delta x \geq (2 \times 0.806 \times 10^{-6} \times 1200)^{0.5} = 43.98 \times 10^{-3} (m)$$

**2. 轻质高铝砖**

$$\alpha = \lambda / \rho \cdot c = 0.724 / 1500 \times 1 \times 10^3 = 0.48 \times 10^{-6} (m^2 / s)$$

$$\Delta x \geq (2\alpha\Delta\tau)^{0.5}, \Delta x \geq (2 \times 0.48 \times 10^{-6} \times 1200)^{0.5} = 33.94 \times 10^{-3} (m)$$

**8.1.2.2 整个部分层数的划分**

在  $\Delta x$  允许的范围内, 我选取可使层数成为整数的最大  $n$  值

(L=1) 窑墙:  $200/n_1 \geq 43.98$ ,  $n_1=4$

$$100/n_1 \geq 33.94, \quad n_1=2, \quad n_1=6$$

(L=2) 窑顶:  $300/n_2 \geq 43.98$ ,  $n_2=6$

$$200/n_2 \geq 33.94, \quad n_2=5, \quad n_2=11$$

(L=3) 窑门:  $n_3=9$

(L=4) 窑车:  $250/n_4 \geq 33.94$ ,  $n_4=7$ ,  $n_4=7$

各热阻:  $R_\alpha = \delta_\alpha / \lambda_\alpha = 200 \times 10^{-3} / 0.724 = 0.28 \text{ } ^\circ\text{C/W}$

$$R_b = \delta_b / \lambda_b = 100 \times 10^{-3} / 0.1 = 1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_c = \delta_c / \lambda_c = 200 \times 10^{-3} / 0.1 = 2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_d = \delta_d / \lambda_d = 250 \times 10^{-3} / 0.1 = 2.5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_g = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$L1 = L3: F_{o1} = 0.806 \times 10^{-6} \times 1200 / (200 \times 10^{-3})^2 = 0.024$$

$$F_{o2} = 0.48 \times 10^{-6} \times 1200 / (100 / 2 \times 10^{-3})^2 = 0.23$$

$$L2: F_{o1} = 0.806 \times 10^{-6} \times 1200 / (300 \times 10^{-3})^2 = 0.0107$$

$$Fo_2 = 0.48 \times 10^{-6} \times 1200 / (300 / 5 \times 10^{-3})^2 = 0.16$$

$$L4: \quad Fo_1 = 0.806 \times 10^{-6} \times 1200 / (200 \times 10^{-3})^2 = 0.024$$

$$Fo_2 = 0.48 \times 10^{-6} \times 1200 / (250 / 7 \times 10^{-3})^2 = 0.45$$

### 8.1.2.3 窑体各部位温度分布计算

同一种材料节点温度公式为:

$$t_i^k = F_0(t_{i-1}^{k-1} + t_{i+1}^{k-1}) + (1 - 2F_0) t_{i-1}^{k-1} \text{ 假使取 } F_0 = 1/2$$

$$t_{ik} = (t_{i-1}^{k-1} + t_{i+1}^{k-1}) / 2$$

交界层节点公式为:

$$t_{ik} = F_0 (RA t_{i-1}^{k-1} + RB t_{i+1}^{k-1}) / (RA + RB)$$

$$= [(\Delta XA / \lambda A) t_{i+1}^{k-1} + (\Delta XB / \lambda B) t_{i-1}^{k-1}] / (\Delta XA / \lambda A + \Delta XB / \lambda B)$$

$$t_{ik} = [(\Delta XB / \lambda B) t_{i+1}^{k-1} + (\Delta XC / \lambda C) t_{i-1}^{k-1}] / (\Delta XB / \lambda B + \Delta XC / \lambda C)$$

与空气相遇时节点温度公式

$$t_{ik} = (RB t_g + R_{\text{空}} t_{i-1}^{k-1}) / (RB t_g + R_{\text{空}})$$

$$= [(\Delta XB / \lambda B) t_g + 0.05 t_{i-1}^{k-1}] / [(\Delta XB / \lambda B) t_g + 0.05]$$

$$t_{ik} = (RC t_g + R_{\text{空}} t_{i-1}^{k-1}) / (RC t_g + R_{\text{空}})$$

$$= [(\Delta XC / \lambda C) t_g + R_{\text{空}} t_{i-1}^{k-1}] / [RC t_g + R_{\text{空}}]$$

根据以上原理编程，输出的温度分布结果如下

各阶段的平均温度与温度变化列表如下:

表 6-1 各阶段的平均温度与温度变化

(Various stages average temperature and temperature change)

		第一阶段 (°C)		第二阶段 (°C)		第三阶段 (°C)		第四阶段 (°C)		第五阶段 (°C)	
		T	ΔT	T	ΔT	T	ΔT	T	ΔT	T	ΔT
窑	1	94.3	74.7	515	418.7	1018	493	1179	169.7	1295.4	87.8
	2	28.9	8.7	146.3	117.8	356.7	207.5	473.1	116.9	564.9	90.4
	3	26.8	7.6	138.5	108.2	349.1	198.4	465.8	109.9	550.1	81.3
窑	1	98.2	79.4	538.5	439.2	1026.3	488.6	1210	178.6	1298.7	91.1
	2	27.2	7.6	125.7	97.8	310.6	175.7	418	109.7	514.7	97.8
顶											

	3	25.9	6.81	119.6	90.3	298.7	168.4	402.5	100.1	503.3	89.8
窑	1	93.7	75.8	523.8	427.8	1009.8	489	1186	180.8	1276.9	89.6
	2	28.7	9.2	147.7	115.8	354.7	203	471	115.9	563.6	90.8
门											
	3	26.4	8.3	138.2	110.3	341.2	194.8	461.7	109.2	548.6	82.5
窑	1	29.8	72.8	518.7	415.9	982.7	473.1	1154.8	176.9	1179.8	88.9
	2	26.8	10.4	166.4	132.2	381.7	216.9	492.7	117.3	569.2	76.4
车	3		9.7	150.6	123	376	210.8	481	116.9	564.8	87.9

外表温度：窑墙（窑门）34.6℃；窑顶 47.6℃；窑车 50.2℃

## 8.2 窑体各部分的表面积

### 1. 窑墙

$$\text{内表面积: } S_1 = 2 \times 2 \times 2.5 = 10 \text{ m}^2$$

$$\text{外表面积: } S_2 = 3.46 \times 2.9 \times 2.9 = 29.09 \text{ m}^2$$

$$S = (S_1 + S_2) / 2 = 20.34 \text{ m}^2$$

### 2. 窑顶

$$\text{内表面积: } S_1 = 2 \times 2.5 = 5 \text{ m}^2$$

$$\text{外表面积: } S_2 = 3.46 \times 2.91 = 10.06 \text{ m}^2$$

$$S = (S_1 + S_2) / 2 = 23.19 \text{ m}^2$$

### 3. 窑门

$$S = 2 \times 2 = 4 \text{ m}^2$$

### 4. 窑车

$$\text{纤维面积: } S_1 = 2.5 \times 1.75 \times 2.0 = 8.75 \text{ m}^2$$

## 8.3 净蓄热量的计算

据公式  $q = c \rho \delta \Delta T$   $q$  为热流通量

$Q = qS$   $Q$  为总热量

### 1. 第一阶段

对窑墙

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 84.7 = 9506.72 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 79.5 = 23477.94 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 10.5 = 228.23 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_q = (q_1 + q_2 + q_3) S = (9506.72 + 23477.94 + 228.23) \times 20.34 = 675550 \text{ kJ}$$

对窑顶

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 77.4 = 11331.36 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 73.1 = 21587.89 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 24.6 = 534.70 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_d = (q_1 + q_2 + q_3) S = (11331.36 + 21587.89 + 534.70) \times 23.19 = 3094751 \text{ kJ}$$

对窑门

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 83.5 = 9372.04 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 79.5 = 23477.94 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.05 \times 10.5 = 114.11 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_m = (q_1 + q_2 + q_3) S = (9372.04 + 23477.94 + 114.11) \times 5.17 = 170418 \text{ kJ}$$

对窑车

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 1000 \times 1 \times 0.13 \times 86 = 11180 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 650 \times (0.836 + 0.26 \times 10^{-3}) \times 0.25 \times 25.8 = 3504.93 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_c = (q_1 + q_2) S = (11180 + 3504.93) \times 17.45 = 80653 \text{ kJ}$$

此阶段总蓄热量  $Q_z$

$$Q_z = Q_q + Q_d + Q_m + Q_c = 4021372 \text{ kJ}$$

## 2. 第二阶段

对窑墙

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 529.5 = 59431.08 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 437.1 = 129084.372 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 125 = 2717 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_q = (q_1 + q_2 + q_3) S = (59431.08 + 129084.372 + 2717) \times 20.34 = 3889658 \text{ kJ}$$

对窑顶

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 514.9 = 57792.38 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 410.5 = 121228.86 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 115.5 = 2510.50 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_d = (q_1 + q_2 + q_3) S = (57792.38 + 121228.86 + 2510.50) \times 23.19 = 4209680 \text{ kJ}$$

对窑门

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 519.3 = 58286.23 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 437.1 = 129084.37 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.05 \times 125 = 1358.5 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_m = (q_1 + q_2 + q_3) S = (58286.23 + 129084.37 + 1358.5) \times 5.17 = 37812 \text{ kJ}$$

对窑车

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 1000 \times 1 \times 0.13 \times 454.2 = 45420 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 650 \times (0.836 + 0.26 \times 10^{-3}) \times 0.25 \times 12.6 = 1711.71 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_c = (q_1 + q_2) S = (45420 + 1711.71) \times 17.45 = 822435 \text{ kJ}$$

此阶段总蓄热量  $Q_z$

$$Q_z = Q_q + Q_d + Q_m + Q_c = 8959585 \text{ kJ}$$

### 3. 第三阶段

对窑墙

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 471.3 = 52898.71 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 485.8 = 143466.46 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 216.6 = 4708.02 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_q = (q_1 + q_2 + q_3) S = (52898.71 + 143466.46 + 4708.02) \times 20.34 = 4089804 \text{ kJ}$$

对窑顶

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 486.1 = 5463.76 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 476.9 = 140838.11 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 204.1 = 4436.31 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_d = (q_1 + q_2 + q_3) S = (5463.76 + 140838.11 + 4436.31) \times 23.19 = 3495591 \text{ kJ}$$

对窑门

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 479.8 = 53852.75 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 485.8 = 143466.46 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.05 \times 216.6 = 2347.50 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_m = (q_1 + q_2 + q_3) S = (53852.75 + 143466.46 + 2347.50) \times 5.17 = 1032268 \text{ kJ}$$

对窑车

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 1000 \times 1 \times 0.13 \times 499.6 = 64948 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 650 \times (0.836 + 0.26 \times 10^{-3}) \times 0.25 \times 175.4 = 23828.09 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_c = (q_1 + q_2) S = (64948 + 23828.09) \times 17.45 = 1549141 \text{ kJ}$$



此阶段总蓄热量  $Q_z$

$$Q_z = Q_q + Q_d + Q_m + Q_c = 10166804 \text{ kJ}$$

#### 4. 第四阶段

对窑墙

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 207.2 = 23256.13 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 97.8 = 28882.30 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 130.4 = 2834.37 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_q = (q_1 + q_2 + q_3) S = (23256.13 + 28882.30 + 2834.37) \times 20.34 = 1118130 \text{ kJ}$$

对窑顶

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 116.1 = 13031.06 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 107.5 = 31746.9 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 114.1 = 2480.07 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_d = (q_1 + q_2 + q_3) S = (13031.06 + 31746.9 + 2480.07) \times 23.19 = 1095889 \text{ kJ}$$

对窑门

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 183.9 = 20640.94 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 97.8 = 28882.30 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.05 \times 130.4 = 1417.19 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_m = (q_1 + q_2 + q_3) S = (20640.94 + 28882.30 + 1417.19) \times 5.17 = 263354 \text{ kJ}$$

对窑车

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 1000 \times 1 \times 0.13 \times 50.6 = 6578 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 650 \times (0.836 + 0.26 \times 10^{-3}) \times 0.25 \times 144.4 = 19616.74 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_c = (q_1 + q_2) S = (6578 + 19616.74) \times 17.45 = 457085$$

此阶段总蓄热量  $Q_z$

$$Q_z = Q_q + Q_d + Q_m + Q_c = 2934458 \text{ kJ}$$

#### 5. 第五阶段

对窑墙

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 121.8 = 13665.96 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 85.7 = 25308.92 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 101.9 = 2214.89 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_q = (q_1 + q_2 + q_3) S = (13665.96 + 25308.92 + 2214.89) \times 20.34 = 837743 \text{ kJ}$$

对窑顶

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 10.4 = 1167.29 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 112.3 = 33164.43 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.1 \times 111.7 = 2427.91 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_d = (q_1 + q_2 + q_3) S = (1167.29 + 33164.43 + 2427.91 \times 23.19) = 852418 \text{ kJ}$$

对窑门

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 800 \times 0.61 \times 0.23 \times 121.7 = 13659.60 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 1500 \times 0.856 \times 0.23 \times 85.7 = 25308.92 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_3 = c_3 \delta_3 \rho_3 \Delta T_3 = 260 \times 0.836 \times 0.05 \times 101.9 = 1328.93 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_m = (q_1 + q_2 + q_3) S = (13659.60 + 25308.92 + 1328.93) \times 5.17 = 208325 \text{ kJ}$$

对窑车

$$q_1 = c_1 \delta_1 \rho_1 \Delta T_1 = 1000 \times 1 \times 0.13 \times 74.7 = 9711 \text{ kJ/m}^2$$

$$q_2 = c_2 \delta_2 \rho_2 \Delta T_2 = 650 \times (0.836 + 0.26 \times 10^{-3}) \times 0.25 \times 70 = 9509.5 \text{ kJ/m}^2$$

$$Q_c = (q_1 + q_2) S = (9711 + 9509.5) \times 17.45 = 335389 \text{ kJ}$$

此阶段总蓄热量  $Q_z$

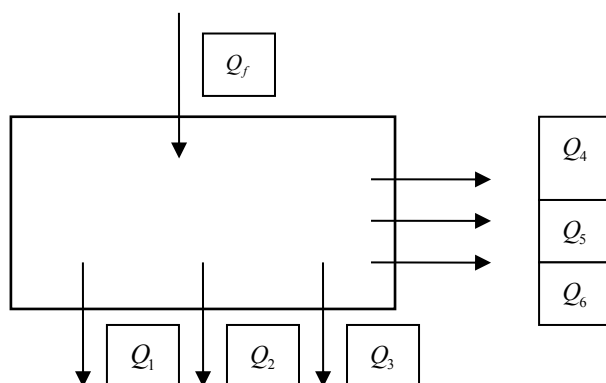
$$Q_z = Q_q + Q_d + Q_m + Q_c = 2233875 \text{ kJ}$$

## 8.4 热平衡

### 8.4.1 热平衡的计算范围

本设计热平衡的计算范围为窑体、窑车、制品及窑具。

### 8.4.2 热平衡示意图



$Q_f$ : 燃料带入化学热;       $Q_1$ : 烟气带走显热;       $Q_2$ : 窑体、窑车积散热;

$Q_3$ : 物化反应耗热;  $Q_4$ : 产品带出热;  $Q_5$ : 棚板与支柱带出热;  $Q_6$ : 其他热损失;

#### 8. 4. 3 第一阶段的热平衡计算

(1)、热收入项目

燃料带入化学热  $Q_f = 108440x \text{ KJ}$ , 其中  $x$  为燃料消耗量 ( $m^3$ )。

(2)、热支出项目

产品蓄热:  $Q_4 = G_4 * C_4 * T_3 = 326.6 \times (0.84 + 0.26 \times 10^{-3} \times 300) \times 280 = 83947.21 \text{ KJ}$

棚板和支柱蓄热:

$Q_5 = G_5 * C_5 * T_5 = 338.3 \times (0.96 + 0.146 \times 10^{-3} \times 300) \times 280 = 95083.96 \text{ KJ}$

查《燃料与燃烧》附表 7, 气体平均比热  $\text{KJ}/m^3 \cdot ^\circ\text{C}$  知:

210 $^\circ\text{C}$  时以下气体的平均比热为:

种类 温度	$CO_2$	$N_2$	$O_2$	$H_2O$
210 $^\circ\text{C}$	1.8152	1.3031	1.3391	1.5201

烟气带走显热:

$Q_1 = G_1 * C_1 * T_1 = (3.42 \times 1.8152 + 4.42 \times 1.5201 + 23.2 \times 1.303 + 0.56 \times 1.3391) x \times 190 = 8342.36x$

窑体、窑车积散热:  $Q_2 = 22043.42 \text{ KJ}$

物化反应热:  $Q_3 = G_w * (1990 + 1.93 t_g) = 5.986 \times (1990 + 1.93 \times 210) = 14338.27 \text{ KJ}$

其中: 1990KJ 为 20 $^\circ\text{C}$  时 1kg 自由水蒸发所需之热。

1.93 水蒸气平均比热  $\text{KJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$

其他热损失  $Q_6$ : 对比现有类型的窑加以确定, 根据经验数据, 现定为占总热收入的 3%。

(3)、列热平衡方程式

$$Q_f = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$
$$108440x = 8342.36x + 22043.42 + 14338.27 + 83947.21 + 95083.96 + 0.03 \times 108440x$$
$$96844.5x = 215412.86$$
$$x = 2.22m^3$$

8. 5 烧一窑制品需要液化气量

$$V = 2.22 + 8.53 + 4.38 + 4.94 + 7.89 + 6.17 = 34.13m^3$$

每公斤制品耗热量：
$$\frac{34.13 \times 108440}{326.6} = 11332.08KJ / kg$$

8. 6 各热支出占总热支出

各热支出占总热支出的比例列表如下：

总热收入（KJ）		比例	总热支出（KJ）		比例	说明
$Q_f$	3701057. 2	100%	$Q_{支}$	3699288. 9	100%	
			$Q_1$	1418069. 7	38. 3%	烟气带出显热
			$Q_2$	1226497. 7	33. 2%	窑体、窑车积散热
			$Q_3$	14338. 27	0. 4%	物化反应热
			$Q_4$	452845. 2	12. 2%	产品带出热
			$Q_5$	476507. 1	12. 9%	棚板与支架带出热
			$Q_6$		3%	其他热损失

## 9 管道尺寸、阻力计算及烧嘴、风机的选用

### 9.1 管路布置

管路布置须根据最优布置原则：管路要短；转弯、收缩、扩张、分流，节点等要尽可能的少，使整个过程的损失小；同时每个烧嘴前的压力要相等。为防止漏气，尽量采用焊接方式连接，管上安装有不同型号的减压阀、压力表，球阀等仪表。

### 9.2 管道尺寸、阻力计算

根据煤气供应站了解情况得知，燃气的流速  $w=12\text{m/s}$

$$V_{\max}' = 9119.18 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$V_{\max} = 9119.18 / 3600 = 25.33 \text{ Nm}^3 / \text{s}$$

$$d = \sqrt{4v / \omega\pi}$$

$$d_{\text{大}} = \sqrt{4 \times 25.33 / (12 \times 3.14)} = 0.2789 \text{ m}$$

考虑到实际情况需乘以安全系数 1.3

$$d_{\text{大}} = \sqrt{1.3 \times 0.278} = 60.5 \text{ mm}$$

取整数 60mm.

$$d_{\text{小}} = \sqrt{2v / \omega\pi} = \sqrt{2 \times 25.33 / (12 \times 3.14)} = 0.019 \text{ m}$$

$$d_{\text{小}} = \sqrt{(0.019 \times 1.3)} = 29.6 \text{ mm}$$

取整数 30mm。

### 9.3 烧嘴、风机的选用

#### 9.3.1 烧嘴的选用

选用自吸式烧嘴，通过烧嘴的自吸气来助燃，烧嘴安置在窑底部窑车侧面。

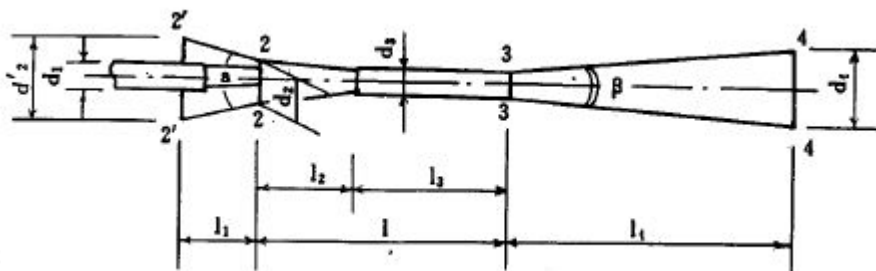


图 9—1 吸入式烧嘴主要尺寸示意图

2'-2' 为吸风口；2-2 至 3-3 为混合管；3-3 至 4-4 为扩张管。

$$d_4/d_3 = 1.5^2; \quad l_2 + l_3 = 5d_3; \quad l_2 = (0.3 \sim 0.2)d_3; \quad l_4 = (7 \sim 10)d_3; \quad \alpha \approx 25^\circ; \quad \beta = 6 \sim 8^\circ$$

根据天然气的流量和质量确定烧嘴最佳的尺寸。

① 喷枪出口尺寸确定：

$$d_1 = 1\text{mm}$$

② 混合管尺寸确定：

因为 1m<sup>3</sup> 天然气完全燃烧理论需要 35 Nm<sup>3</sup>，取空气过剩系数为 1.05

根据  $m_2 = \rho_2 \cdot v_2$ ， $\varepsilon_1 = 0.15$ ； $\varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0.25$ ，求出  $d_3$

又因为： $l_3 \geq 5d_3$

求得  $d_3 = 25\text{mm}$

$$l_3 \geq 5d_3 = 125\text{mm}$$

③ 吸风管尺寸确定：

$$d_2' = d_3 + 2tg \frac{\alpha}{2} \approx 80\text{mm}$$

④ 扩张管的确定：

因为  $d_4/d_3 = 1.5^2 \sim 2.0$

所以  $d_4 = 37.3 \sim 50\text{mm}$

混合管长度确定： $L_2 \geq 125\text{mm}$

吸风管尺寸确定： $L_1 = 80\text{mm}$

扩张管尺寸确定： $L_4 = 175 \sim 225\text{mm}$

该种方式采用烧嘴垂直布置，排烟口在梭式窑内后窑墙上。火焰喷出后，在上升的过程中逐渐翻到窑内下面，进入窑车上的吸火孔、支烟道、排烟口。这种方式在气烧梭式窑大量使用。

### 9.3.2 烟囱的设计

经过前面热平衡计算，可知本窑在第一阶段烟气生成的速度最大为：

$28.15 \times 9.26 / (100 \times 60) = 0.0434 \text{ Nm}^3 / \text{s}$ ，取烟气的流速  $W_0 = 2 \text{ Nm}^3 / \text{s}$ ，考虑到烧成过

程中的偶然情况，烟气生成量有时会更大，所以取存储系数为 1.05，

则烟道的截面积：

$$F = 1.05 \times 0.0434 / 2 = 0.023 m^2$$

因此烟道的直径可取 200MM，烟囱的截面直径可取 350MM。

### 9.3.3 烟囱的高度计算

烟囱主要用于将窑内的烟气排出窑外，小型的间歇式窑炉的烟囱高度可根据厂房的高度及环卫部门的要求确定。

10 工程材料概算

钢架结构的选材主要是根据窑炉施工的经验数据和施工要求确定的，由前面的设计计算部分和图纸上的标注可大概估算出所需材料多少及材料的种类。详情见表所列：

10.1 窑体工程材料概算

表 9-1 窑体材料清单 (Kiln body bill of materials)

序号	名称	材料	规格	单位	数量	备注
1	槽 钢	A3	[100×50	m	15	
2	槽 钢	A3	[80×40	m	12	
3	槽 钢	A3	[60×40	m	15	
4	法 兰			个	2	
5	钢 轨	A3		m	4	
6	压 板	A3		个	3	
7	方 钢	A3		块	7	
8	螺栓、螺母、垫片			个	50	
9	多晶默来石纤维			m	2500	
10	轻质高铝砖			块	1250	
11	轻质耐火粘土砖			块	750	
12	紧固件	ZrO <sub>2</sub>		套	70	
13	热电偶			只	5	

说明：本表中所列材料用量不包括施工损耗，在施工过程中可结合当地实际情况做一些修改。

10.2 窑车材料工程概算



表 9-2 窑车材料清单 (Kiln vehicle bill of materials)

序号	名称	材料	规格	单位	数量	备注
1	角铁钢架	A3		m	18	
2	支 撑	A3			15	
3	车 轴	45#钢			3	
4	车 轮	HT20-40			6	
5	轴 套	A3			6	
6	垫 片	A3			200	
7	轻质高铝砖		230*114*65	块	1250	
8	多晶默来石纤维			m	10	
9	轻质耐火砖	粘土	500*400*30 0	块	500	
10	棚 板	重结晶 炭化硅 石	560*550*22	块	100	
11	立 柱	堇青质	40*40*165	根	360	

说明：本表中所列材料用量不包括施工损耗，在施工过程中可结合当地实际情况做一些修改。

## 参考文献

- [1] 周露亮.《窑炉课程设计指导书》.景德镇;景德陶瓷学院自编 2007 年 5 月
- [2] 孙晋涛.《硅酸盐工业热工基础》.武汉;武汉工业大学出版社 1992 年
- [3] 刘振群.《陶瓷工业热工设备》.武汉;武汉工业大学出版社 1989
- [4] 彭广文, 顾勇.全纤维燃气梭式窑的设计和应用.山东陶瓷 1995 年 04 期
- [5] 胡国林.《建陶工业辊道窑》.北京;中国轻工业出版社 1998 年 6 月
- [6] 张慧. 3m<sup>3</sup> 高温燃气梭式窑的设计与建造.山东陶瓷 2004 年 6 月
- [7] 韩昭沧.《燃料及燃料》.冶金工业出版社 1984 年 6 月
- [8] 王维邦 《耐火材料工艺学》 冶金工业出版社 1984 年 6 月
- [9] 杨世铭, 陶文铨.《传热学》.北京;高等教育出版社 1980 年
- [10] 蒋方乐.《计算传热学》.景德镇陶瓷学院 2004 年 1 月
- [11] 陈维铸.烧嘴布置方式和排烟口位置对梭式窑容积的影响.佛山陶瓷 1997 年 02 期
- [12] 冯青, 汪和平.梭式窑吸入式烧嘴结构的规划和优化设计.陶瓷学院 1998 年 02 期
- [13] 胡国林, 陈功备.《窑炉砌筑与安装》.武汉;武汉理工大学出版社 2005 年 5 月

## 后记

临近毕业设计尾声，我的大学生活也将结束，回顾毕业设计的日子里，生活的每天都是忙碌且充实，感受颇多，为此我写了这篇后记。

该窑采用先进的全纤维梭式窑，减轻窑炉负重，减少蓄热，减少对钢架的使用，达到烧成质量高，燃料消耗少，占地面积小，投资节省的目的。

同时该窑以天然气为燃料，燃烧热值高，污染少，可实现无焰明火烧成，热利用率大大提高。

在设计计算过程中，我通过查阅资料、理论联系实践，对不温态导热、烧嘴选择等几个问题进行创新，收获颇多。

在画图的过程中，参考、设计、修改反复进行。整个设计将我学到的理论知识，实践融为一体，同时也得到了老师的悉心指导，最终使得我的毕业设计能顺利完成。

但由于经验不足，认识不深，缺乏对窑炉设计整体把握能力，顾此失彼，走了不少弯路。同时对细节问题认识不足，还有待于修正和改进，诚请各位老师和同学批评。

通过这次设计，进一步提升了我对窑炉的认识，从中体会出一些道理，为以后工作打好了基础，相信以后我会做得更好。

最后，借此机会感谢我的指导老师周露亮老师，感谢热工系所有师生，谢谢你们对我四年来的培养和关心，让我度过了一段难忘的大学生涯。