

景德镇陶瓷学院科技艺术学院

本 科 生 毕 业 论 文（设 计）

题目：40m³ 天然气台车窑设计

学 号：201030453116

姓 名：刘进

院（系）：科技艺术学院

专 业：热能与动力工程

指导教师：周露亮

完成日期：2014 年 5 月 28 日

目录

摘要	3
Abstract.....	4
Keywords: shuttle kiln natgas bottle.....	4
1 设计任务及原始资料.....	5
2 窑体主要尺寸的确定.....	7
3 烧成制度的确定	8
4 工作系统的确定	9
5 窑体材料及其厚度的确定.....	10
6 燃料及燃烧计算	12
7 物料平衡计算	15
8 热平衡计算	16
9 钢架结构计算	28
10 管道尺寸、阻力计算及烧嘴、风机的选用.....	30
11 工程材料概算	32
12 后记	34
13、参考文献	35

摘要

这次设计的是 40 立方米的燃天然气台车窑，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！

关键字： 台车窑 天然气 酒瓶

Abstract

This design is the fuel gas shuttle kiln 40 cubic meters, in the design stage of collection and access to relevant information and documents. The middle of a large amount of calculation, but also learned a lot of things. In the design process the integrated use of the University for four years to learn knowledge, use knowledge at the same time, to deeply feel the knowledge the narrow and not deep enough. The first part is mainly refers to the JiangxiPingxiang kiln ocean export ceramic bottle factory to determine the kiln body size I of this design, the second part according to the related data collected in practice process and data to determine the firing system and the firing cycle, under the guidance of teachers and suggestions, coupled with their own design ideas, determine the working system, combustion system and exhaust system.

The kiln structure adopts three layers of material, polycrystalline mullite fiber, light Mo to brick and aluminum silicate fiber, kiln car structure is mainly polycrystalline mullite fiber, light Mo to brick and light fire clay brick. The kiln car is arranged in the middle part of the flue, the kiln car walls on both sides are respectively provided with two flue, the kiln top is provided with a central exhaust, exhaust fan. A high speed jet burner burner. Also used to design fast cooling products rapid cooling.

In the design process, has been the strong support and help to the teachers and students, especially the guidance teacher Zhou Luliang teacher put forward many constructive opinions and suggestions, we would like to extend my sincere thanks. Also thanks to Jiangxi Pingxiang ocean export porcelain offered me three times before and after the kiln entity and opportunities.

Limited to the level designers, the book is inappropriate, please experts, teacher criticism!

Keywords: shuttle kiln natgas bottle

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

14 年 5 月 12 日

专业	热能与动力工程	班级	热工 2010			
学生姓名	刘进	指导老师	周露亮			
题目	40m ³ 天然气台车窑设计					
主要研究内容和设计技术参数： 1. 产品名称：陶瓷酒瓶 规格：Φ 100*160mm 2. 加热时间：13 小时 烧成温度：1230℃ 3. 产品合格率：95% 4. 燃料：天然气 5. 其他设计技术指标，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：窑炉砌筑结构图，刚架结构和安装图，管路布置安装图，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. 符合计算绘图，外文应用等毕业设计要求						
工作进度计划： 第 4 周：整理资料，确定设计方案 第 5-6 周：设计计算，结构确定 第 7 周：整理设计方案，构思设计草图 第 8-17 周：绘图和编写设计说明书，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℃

加热时间：13h

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: 556*500*22 mm

装窑方法:

每个砌板上面放置 14 个陶瓷酒瓶。砌板之间紧密放置。

坯体间留有 10-15mm 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: $556*3+2*15+60*2=1818\text{mm}$

窑车宽: $500*6+5*15+80*2=3235\text{mm}$

2.4 窑的有效尺寸计算

由上面的计算得出

窑的有效长: 5455mm

窑的有效宽: 3235mm

窑的有效高: 2500mm

体积=长*宽*高=44.11 立方米

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=2500/165+20=13.5, 则每窑装 13 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(℃)	加热时间	升温速率(℃/h)
一	25—250	4.3 h	52.32
二	250—950	1.8 h	444.4
三	950—1000	1.4 h	35.71
四	1000—1230	1.8 h	127.8
五	1230	3.7 h	0
总	25—1230	13h	92.26

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

台车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。台车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

台车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，6 个烧嘴等组成。供气管路上有调节阀，压力表等使气体燃料的压力稳定，实现微调节。

该窑采用的烧嘴为动力式高速烧嘴。这种烧嘴具有在窑内实现强烈的搅拌湍流气流，达到温度均匀。喷出热气温度可调，由于调温风的引入，使得烧嘴喷出的热气温度可调，使升温段在 200℃ 是就可以实现自动控温。安全切断保护装置：当停电造成熄火时自动关闭燃气，避免因煤气泄露而发生爆炸。针对以上特点及生产过程中的实际情况和要求，我特选用了湖南一公司生产的燃烧器。

4.3 冷却系统

由于台车窑属于间歇式窑炉，因而余热可在窑内温度在 1230℃ 时开启鼓风机直到窑内温度下降到 200℃ 关闭鼓风机。当窑内温度下降到 100℃ 时关闭抽风机。

4.4 附属设备

该窑的附属设备包括：测温装置，测温孔，观火孔等。

在窑体窑墙设有六个测温孔，内插入热电偶。在窑门有 3 个观火孔，窑墙两侧各为 3 个观火孔。可观察窑内的燃烧及制品的烧成情况。

5 窑体材料及其厚度的确定

5.1 窑体材料的选择

本次设计的高温台车窑，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)	λ ($W/m \cdot ^\circ C$)	C (kJ/kg \cdot $^\circ C$)	P (kg/m ³)
窑墙	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/m³, 湿天然气含水量 4%.

6.2 空气量的计算

6.2.1 换算成湿天然气组成

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

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: 1Nm³ 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: 1Nm³ 燃料, 0℃)

收入热量:

- ① 料的化学热 Q_{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 $Q = V C_{tp}$;
- 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, $\text{KJ}/\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

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:

$$Q_{\text{net}} + Q_f + Q_a = Q + Q_1 + Q_{m1} + Q_{ch}$$

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

取燃料室温 $t_f = 20^\circ\text{C}$ 下进入燃烧室.

查《硅酸盐工业热工基础》表 4-13 和 4-18 可得:

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

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

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

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

$$= 1825.86^\circ\text{C}$$

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 η , 于是查《硅酸盐工业热工基础》表 4-19, 可得高温系数 $\eta = 0.75$. 该台车窑 $t_p = \eta T_{th} = 0.75 \times 1825.86^\circ\text{C} = 1369.396^\circ\text{C} > 1230^\circ\text{C}$

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 840 件制品，在高度方向上放层，故每窑可放制品 10920 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}

$$G_{sp}=10920\times 0.45=4914 \text{ kg}$$

7.2 每窑干坯质量 G_{gp}

$$G_{gp}=G_{sp}\times (100-2)/100=4914\times 98/100=4815.72 \text{ kg}$$

7.3 每窑蒸发自由水质量 G_{2s}

$$\begin{aligned} G_{2s} &= G_{sp} - G_{gp} \\ &= 4914 - 4815.72 = 98.28 \text{ Kg} \end{aligned}$$

7.4 砌板和支柱质量 G_b

砌板，支柱均采用重结晶碳化硅质，一般重结晶碳化硅质的密度 $p > 2500 \text{ Kg/m}^3$ ，这里所选用的砌板的密度 $p = 2800 \text{ kg/m}^3$, $C = 0.96 + 0.146 \times 10^3 \text{ t}$ 。再根据装窑方法有

$$G_b = 60 \times 13 \times 0.58 \times 0.55 \times 0.022 \times 2800 = 15327.31$$

8 热平衡计算

台车窑属于间歇窑炉，热平衡计算属于不稳态导热，因此必须采用有限差分法。

8.1 窑体温度分布计算

8.1.1 最小厚度的划分：

$F_0 = a \Delta \tau / \Delta x$ ；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

$$\alpha = \lambda / \rho = 0.1 / (1000 \times 3.24 \times 10^3) = 0.000031 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\Delta x \geq (2\alpha\Delta\tau)^{0.5}, \Delta x \geq (2 \times 0.000031 \times 1200)^{0.5} = 0.027 \text{ m}$$

2. 轻质高铝砖

$$\alpha = \lambda / \rho = 0.724 / (1500 \times 3.1 \times 10^3) = 0.0000155 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\Delta x \geq (2\alpha\Delta\tau)^{0.5}, \Delta x \geq (2 \times 0.0000155 \times 1200)^{0.5} = 0.027 \text{ m}$$

8.1.2 整个部分层数的划分

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

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

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

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

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

$$L_1 = L_3: F_{ol} = 0.806 \times 10^{-6} \times 1200 / (200 \times 10^{-3})^2 = 0.024$$

$$Fo2 = 0.48 \times 10^{-6} \times 1200 / (300 \times 10^{-3})^2 = 0.0107$$

L2: $Fo1 = 0.806 \times 10^{-6} \times 1200 / (300 \times 10^{-3})^2 = 0.0107$

$$Fo2 = 0.48 \times 10^{-6} \times 1200 / (250 \times 10^{-3})^2 = 0.024$$

L4: $Fo1 = 0.806 \times 10^{-6} \times 1200 / (200 \times 10^{-3})^2 = 0.024$

$$Fo2 = 0.48 \times 10^{-6} \times 1200 / (250/7 \times 10^{-3})^2 = 0.45$$

8.1.3 异同种材料接点温度关系表达式

同种材料：根据《传热学》有：

$$T(I, K-1) = Fo [T(H-1, K) - T(I-1, K)] + (1-Fo) T(I, K)$$

异种材料：对异种材料 M, N, 因为当 $Q_m = Q_n$ 时, 有 $Q_m = \Delta T_m / R_m = Q_n = \Delta T_n / R_n$ (R_m, R_n 分别为两种材料的热阻, $R_i = \Delta X_i / \lambda_i$)

$$\Delta T_m = T_{a-1} - T_a \quad \Delta T_n = T_a - T_{a+1}, \text{ 所以 } T_n = (R_m \times T_{a+1} + R_n \times T_{a-1}) / (R_m + R_n) \text{ 当边界}$$

与大气接触时, 可近似的认为 $R_g = 0.05^\circ\text{C}/\text{W}$

根据以上原理编程, 输出的温度分布结果如下

8.2 各阶段的平均温度与温度变化

8.2.1 各阶段的平均温度与温度变化列表如下: (6-1)

外表温度: 窑墙 (窑门) 34.6°C ; 窑顶 47.6°C ; 窑车 50.2°C

8.3 窑体各部分的表面积

1. 窑墙

$$\text{内表面积: } S_1 = 2.55 \times 6 \times 2 = 30.6 \text{ m}^2$$

$$\text{外表面积: } S_2 = 2.98 \times 6 \times 2 = 35.76 \text{ m}^2$$

$$S = (S_1 + S_2) / 2 = 32.88 \text{ m}^2$$

2. 窑顶

$$\text{内表面积: } S_1 = 6 \times 3.6 = 21.8 \text{ m}^2$$

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 (℃)		第二阶段 (℃)		第三阶段(℃)		第四阶段 (℃)		第五阶段 (℃)	
		T	ΔT	T	ΔT	T	ΔT	T	ΔT	T	ΔT
窑	1	94.3	74.7	515	418.7	1018	493	1179	169.7	1230	87.8
	2	28.9	8.7	146.3	117.8	356.7	207	473.1	116.9	564.9	90.4
顶	1	98.2	79.4	538.5	439.2	1026.3	488	1210	178.6	1230	91.1
	2	27.2	7.6	125.7	97.8	310.6	175	418	109.7	514.7	97.8
窑	1	93.7	75.8	523.8	427.8	1009.8	489	1186	180.8	1230	89.6
	2	28.7	9.2	147.7	115.8	354.7	203	471	115.9	563.6	90.8
车	1	95.2	72.8	518.7	415.9	982.7	473	1154.8	176.9	1230	88.9
	2	29.8	10.4	166.4	132.2	381.7	216	492.7	117.3	569.2	76.4
	3	26.8	9.7	150.6	123	376	210	481	116.9	564.8	87.9

$$\text{外表面积: } S_2 = 6 \times 4.41 = 26.46 m^2$$

$$S = (S_1 + S_2) / 2 = 24.13 m^2$$

3. 窑门

$$S = 4.2 \times 3.0 = 12.6 m^2$$

4. 窑车

$$\text{纤维面积: } S_1 = 3 \times 3.5 \times 2.0 = 21 m^2$$

8.4 各阶段净蓄热量

据公式: $q_i = \rho_i C_i \Delta T_i$

Q-----热流量

$Q_i = q_i \times S_i$

可分为不同的五个阶段的平均热流用及净蓄热量

1. 第一阶段

窑墙

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	79.4	89.89	150214.17	218530.57
2	1000	1	100	7.6	89.89	68316.4	

窑顶

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	300	74.7	44.79	109065.87	187000.47
2	1000	1	200	8.7	44.79	77934.6	

窑门

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	75.8	9.76	16686.29	25665.49
2	1000	1	100	9.2	9.76	8979.2	

窑车

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	2000	0.84	200	72.8	32	78745.6	84678.59
2	1500	0.724	120	10.4	32	4370.49	
3	1000	1	250	9.7	6.5	1562.5	

$$Q_1 = 515875.12 \text{ KJ}$$

2. 第二阶段

窑墙

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	418.7	89.89	923648.21	1982552.41
2	1000	1	100	117.8	89.89	158904.2	

窑顶

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	300	439.2	44.79	143091.36	5285109.62
2	1000	1	200	97.8	44.79	19560	

窑门

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	427.8	9.76	92918.16	1019902.04
2	1000	1	100	115.8	9.76	11579	

窑车

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	2000	0.84	200	415.9	32	139742.4	6007062.4
2	1500	0.724	120	132.2	32	17228.3	
3	1000	1	250	123	6.5	30750	

$$Q_2 = 14294626.47 \text{ KJ}$$

3. 第三阶段

窑墙

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	493	89.89	107079.2	2827867.48
2	1000	1	100	207.5	89.89	20750	

窑顶

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	300	488.6	44.79	159188.6	8703977.99
2	1000	1	200	175.7	44.79	35140	

窑门

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	489	9.76	106210.8	1234754.4
2	1000	1	100	203	9.76	198128	

窑车

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	2000	0.84	200	473.1	32	158961.6	7677696
2	1500	0.724	120	216.9	32	28266.4	
3	1000	1	250	210.8	6.5	52700	

Q3=20444286.87KJ

4. 第四阶段

窑墙

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	169.7	89.89	36858.83	4364054.3
2	1000	1	100	116.9	89.89	11690	

窑顶

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	300	178.6	44.79	58187.8	3588924.2
2	1000	1	200	109.7	44.79	21940	

窑门

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	180.8	9.76	39269.76	496391.26
2	1000	1	100	115.9	9.76	11590	

窑车

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	2000	0.84	200	176.9	32	59438.8	3326406.4
2	1500	0.724	120	117.3	32	15286.4	
3	1000	1	250	116.9	6.5	29225	

Q4=51052264.86 KJ

4. 第五阶段

窑墙

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	87.8	89.89	19070.16	2526822.28
2	1000	1	100	90.4	89.89	9040	

窑顶

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	300	91.1	44.79	29680.38	2205476.62
2	1000	1	200	97.8	44.79	19560	

窑门

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	1500	0.724	200	89.6	9.76	19461.12	278561.33
2	1000	1	100	90.8	9.76	9080	

窑车

	ρ Kg/m^3	C $KJ/m^3 \cdot ^\circ C$	δ mm	ΔT $^\circ C$	S m^2	q KJ/m^2	Q KJ
1	2000	0.84	200	88.9	32	29870.4	1977658.88
2	1500	0.724	120	76.4	32	9956.44	
3	1000	1	250	87.9	6.5	21975	

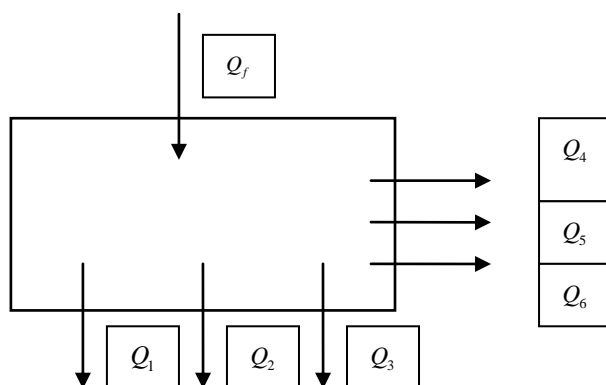
$$Q_5 = 6988519.11 \text{ KJ}$$

8.5 热平衡

8.5.1 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。

8.5.2 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;

8.5.3 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

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

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 KJ/m³·°C 知:

210°C 时以下气体的平均比热为:

种类 温度	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O
210°C	1.8152	1.3031	1.3391	1.5201

烟气带走显热:

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

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

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

其中: 1990KJ 为 20°C 时 1kg 自由水蒸发所需之热。

1.93 水蒸气平均比热 KJ/kg·°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

$$Q_f = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

$$108440x = 8342.36x + 22043.42 + 14338.27 + 83947.21 + 95083.96 + 0.03 \times 108440x$$

$$96844.5x = 215412.86$$

$$x = 2.22 \text{ m}^3$$

8.6 烧一窑制品需要天然气量

$$V = 2.22 + 8.53 + 4.38 + 4.94 + 7.89 + 6.17 = 34.13 \text{ m}^3$$

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

8.7 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 钢架结构计算

表 7-1 钢材材料一览 (The steel products material as soon as looks at)

材 料		力学性能			试件尺寸 mm
类别	牌号	强 度 极 限 MPa	屈服极限 MPa	延伸率 %	
碳 素 结 构 钢	Q215	335-410	215	31	d≤16
	Q235	375-460	235	26	
	Q275	490-610	275	20	
优 质 碳 素 结构钢	20	410	245	25	d≤25
	35	530	315	20	
	45	600	355	16	
合 金 结 构 钢	355SiMn	883	735	15	d≤25
	40Cr	981	785	9	d≤25
	20CrMnTi	1079	834	10	d≤15
	65Mn	981	785	8	d≤80
铸钢	ZG270-500	500	270	18	d≤100
	ZG310-570	570	310	15	
	ZG42SiMn	600	380	12	
灰铸钢	HT150	145			壁厚 10-20
	HT200	195			
	HT250	240			
球墨铸铁	QT400-15	400	250	15	壁厚 30-200
	QT500-7	500	320	7	
	QT600-3	600	370	3	

碳素结构钢，这类钢的含碳量一般不超过 0.7%。含碳量低于 0.25%的低碳钢它的强度极限和屈服极限较低，塑性很高，且具有良好的焊接性，适于冲压，焊接，常用来制作螺钉，螺母，垫圈，轴，气门导杆和焊接构件等。

组合厂家生产实际情况，再综合上表考虑，我这次设计中所选钢材为碳素结构钢。由于顶部采取吊顶结构，设计图纸上有一部分钢结构不能表示出。钢架侧体采用 8#槽钢，作立柱共计 36 根，每根长 5000mm，具体情况见设计图纸上标注。每 2 根立柱之间有横筋，为了加强窑体钢架结构承载荷重，采用 5#槽钢共计 16 根，为了固定燃烧器等，每个燃烧器上下布置 5#角钢，共计 20 根。

钢架顶部为了便于吊顶，顶部采用 A3 材质的 6#槽钢，共计 13 根，角钢共计 11 根，有部分不能显示出，故需按实际施工中标准进行。窑体钢架后侧 5 根槽钢，每两根之间用角钢连接，增加稳固性。具体钢材用量详情另见工程材料概算和实际情况中进行调整。

10 管道尺寸、阻力计算及烧嘴、风机的选用

10.1 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。

10.2 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。

10.3 烧嘴、风机的选用

10.3.1 烧嘴的选用

- ① 高速调温烧嘴，特点体现在：喷出热气流速度 7100m/s. 在窑内实现强烈的搅拌湍流气流，达到温度均匀。
- ② 喷出热气流温度可调，由于调温风的引入，使得烧嘴喷出的热气流温度可调，使升温段在 200℃时可以实现自动控温。
- ③ 安全切断保护装置：当停电造成熄火时，自动关闭燃气，避免因天然气泄露而发生爆炉。

根据以上特点及实际，我选用湖南维达热能有限公司生产的型号为：TP-ZZT.

该产品的特点是：

- ① 可以保证窑内温度在 50℃～1800℃ 范围内任意调节，充分满足间歇窑的热工艺要求。
- ② 在低温状态下，依然可以保证燃烧烟气喷出速度在 100m/s 以上。
- ③ 沿火焰方向 5m 内温差小于±5℃。
- ④ 低温状态下不回火、不熄火。
- ⑤ 天然气平均节气率在 5%以上。

10.3.2 风机的选用

1. 离心式引风机

表 8-1 风机性能参数 (Air blower performance parameter)

机号	转 速 (r/min)	全风压 (Pa)	风量	出风 口方 向	电动机型号、功 率		传动 方式	外型尺寸 /mm	质量 kg
5.6	2900	6400	4900	90	Y160L-2	15	A	638*821*962	90

2. 离心式鼓风机（助燃风机、急冷风机）

表 8-2 风机性能参数 (Air blower performance parameter)

型号	输 送 介 质	进口流量 (m ³ /min)	进口压 力(Pa)	进口温 度(℃)	进口 工况 的介 质密 度 (kg /m ³)	出口压 (KW)	轴功率 (KW)	主轴转速 (r/min)
9-19-56A	空气	53	10650	25	1.16	5325	11	2900

11 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：

11.1 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	60	
2	槽 钢	A3	[80×40	m	50	
3	槽 钢	A3	[60×40	m	60	
4	法 兰			个	5	
5	钢 轨	A3		m	15	
6	压 板	A3		个	10	
7	方 钢	A3		块	26	
8	螺栓、螺母、垫片			个	200	
9	多晶默来石纤维			m	10000	
10	轻质高铝砖			块	5000	
11	轻质耐火粘土砖			块	3000	
12	紧固件	ZrO ₂		套	280	
13	热电偶			只	20	

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。

11.2 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	69	
2	支 撑	A3			60	
3	车 轴	45#钢			10	
4	车 轮	HT20-40			24	
5	轴 套	A3			24	
6	垫 片	A3			800	
7	轻质高铝砖		230*114*65	块	5000	
8	多晶默来石纤维			m	10	
9	轻质耐火砖	粘土	500*400*30 0	块	2000	
10	棚 板	重结晶 炭化硅 石	560*550*22	块	624	
11	立 柱	堇青质	40*40*165	根	1456	

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。

12 后记

历时两个多月的毕业设计终于接近尾声了，在这次设计中我克服了查资料难因素，在指导教师周露亮老师的细心指导下完成了此次设计。设计中综合运用了四年来自己所学的专业知识和非专业知识，“书到用时方恨少”的确是这样的，通过此次设计我发现了自己知识的贫乏和不足，从而更加坚定了自己学好本专业知识的信心。

当然由于缺乏实际经验和设计的基本思路，此次设计中一定有不符合实际的想法，加入了自己的一些想法和设计思路。我觉得此次设计中最大的收获是学会了如何去设计；怎样合理地去解决实际生产中所出现的问题；锻炼了自己的思维；丰富了自己各方面的知识，提高了自己分析问题、解决问题的能力。遗憾的是没有解决好烟气余热的问题，如果以后有机会的话，我将在这方面下一定的功夫去研究如何提高余热利用效率。还有由于时间紧迫，没有进行多几种材料的蓄热、散热问题论证，以致窑体热损失较为严重，不过还是能满足设计任务要求的。

不过我觉得在以后的设计中可以多改进设计思路。比如说：我们可以尝试设计全纤维窑炉，这样可以使窑体实现轻型化，而且更加节能。在此次设计中，感谢系里各位老师不辞辛劳给予我们指导，还要感谢实习单位给我们提供了许多学习的机会。

刘进
2014 5 28

13、参考文献

- [1]、周露亮 《窑炉课程设计指导书》. 景德镇陶瓷学院. 2010. 5.
- [2]、胡国林 陈功备 《窑炉砌筑与安装》. 武汉理工大学出版社. 2005. 5.
- [3]、韩昭沧 《燃料与燃烧》. 冶金工业出版社. 2007. 10.
- [4]、刘振群 《陶瓷工业热工设备》. 武汉理工大学出版社. 2008. 1.
- [5]、徐维忠 《耐火材料》. 冶金工业出版社. 2008. 2.
- [6]、马建隆 宋之平 《实用热工手册》. 水利电力出版社. 1988. 8
- [7]、王秉铨 《工业炉设计手册》. 北京机械工业出版社. 2004. 7.
- [8]、陈景雨 《陶瓷工业热工过程及设备》. 中国轻工业出版社. 1992. 4.
- [9]、胡国林 陈功备 周露亮 《陶瓷工业窑炉》. 武汉理工大学出版社. 2010. 8.
- [10]、杨世铭 陶文铨 《传热学》第三版. 高等教育出版社. 1998. 8