



本科生毕业设计

42M³电瓷天然气梭式窑设计

42 M³liquefied petroleum gas electrotechnical porcelain type design

学 号： 201030453109

姓 名： 周 旋

专业班级： 热能与动力工程

指导教师： 汪 和 平

完成日期： 2014. 5. 30

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	10 热工
学生姓名	周旋	指导教师	汪和平
题目	42M ³ 电瓷天然气梭式窑设计		
主要研究内容和设计技术参数： 1， 有效容积：42m ³ ；2， 产品规格：110KV 绝缘子 Φ 260*1020mm 2， 烧成周期：升温 38 小时； 3， 最高烧成温度：1280℃； 4， 燃料：天然气； 5， 气氛要求：无要求； 6， 其它条件定。 ，			
基本要求（含成果要求）： 1、 通过设计计算确定窑体材料及厚度、主要结构尺寸、管路系统尺寸等； 2、 确定工作系统安排，编写设计说明书，并打印输出； 3、 绘出设计图纸一套，应包括：主体结构图、窑车结构图、管路系统图、钢架结构、轨道平面图、异型砖及其它必需的附件图。 4、 设计说明书中应有英文摘要，图纸中至少应有一张 CAD 绘图； 5、 相关文献综述翻译。			
工作进度计划： 第一～二周：查阅、收集与设计有关的文献资料； 第三～第四周：进行设计计算，编写说明书初稿； 第五～七周：绘制窑体结构图，砌筑图等； 第八～十一周：绘制管路系统图、异型砖图及附件图； 第十二周～十四周：图纸上墨，说明书整理； 第十五周：准备答辩。			

42M³电瓷天然气梭式窑设计

班级：10 热工

姓名：周旋

指导教师：汪和平

设计总说明

梭式窑又称抽屉窑，是近代改进的一种间歇式窑炉，其特点是投资小、周转快、劳动条件好，热工制度灵活，适合多品种、小批量生产。随着国内陶瓷工业燃料结构由煤、油向煤气、液化石油气的过渡，已被广泛地用于陶瓷、耐火材料以及建筑材料等行业。在满足产品质量和生产能力的同时，应尽可能的通过温度、气氛容易调节，提高烧成质量，缩小窑内的温差，实现快速烧成，提高生产效率，节约燃料，降低成本；本文中梭式窑选用重油燃料，主要叙述了梭式窑梭式窑主体的设计、窑体的主要尺寸计算、燃料燃烧的计算等。

关键词：梭式窑，天然气，绝缘子

Design description

Shuttle kiln and kiln says, is a modern improved intermittent kiln, its characteristic is small investment, quick, labor conditions, thermal system flexible, suitable for variety of and small batch production. With domestic ceramic industry fuel structure by coal, oil to gas, liquefied petroleum gas (LPG) transition, has been widely used in ceramic, refractory materials and building materials, and other industries. To meet product quality and production capacity at the same time, should as far as possible through temperature and atmosphere is easy to adjust and improve the quality of burn, reduce the temperature difference between the stove, realizing fast firing, improve the production efficiency, save fuel and reduce the cost; This paper spindle type kiln choose heavy oil fuel, mainly describes the spindle type kiln spindle type of the main body of the kiln, kiln body design of the main size calculation, fuel burning calculations, etc

Keywords: shuttle kiln , Heavy oil, siliceous products

目录

1. 设计要求（任务书）	1
前言	7
2. 2. 窑炉主要尺寸设计	6
3. 窑炉砌筑体	7
3.1 砌筑体材质的选择	7
3.1.1 窑墙	7
3.1.2 窑顶	8
3.1.3 窑车	8
3.2 砌筑体尺寸的确定	9
3.3 膨胀缝	11
4. 燃烧计算及燃烧设备的选择	11
4.1 燃料燃烧计算	11
4.2 实际燃烧烟气组成及实际燃烧温度	12
4.3 烧嘴的数量、选型以及布置	14
5. 物料平衡计算	15
5.1 每窑烧成制品质量 G_m	15
5.2 每窑入窑干坯质量 G_{gp}	15
5.3 每窑入窑湿坯的质量 G_{sp}	17
5.4 每窑蒸发的自由水 G_{sp}	18
5.5 砌板和支柱质量 G_p	18

6. 热 平 衡 计 算	18
6.1 计 算 基 准	18
6.2 确 定 热 平 衡 计 算 范 围	18
6.3 热平衡方框	19
6. 4 . 1 坯体带入显热 Q_1	19
6. 4 . 2 砌板、支架带入的显热 Q_p	19
6. 4 . 3 燃料带入显热 Q_f	20
6. 4 . 4 助燃空气带入显热及化学热	20
6. 4 . 5 露入空气带入显热	21
6. 5 热支出计算	21
6. 5 . 1 烟气带走显热 Q_2	21
6. 5 . 2 制品积热 Q_3	21
6. 5 . 3 砌板反应耗热 Q_4	21
6. 5 . 4 物化反应耗热 Q_5	22
6.5.5 窑侧、窑车、窑顶的散热损失	22
6.5.5.1 窑体及窑车温度分布的确定	22
6.5.5.2 窑净蓄热量的计算	22
6. 5 . 6 其它热损失	22
6. 6 第一阶段燃料消耗量计算	23
6. 7 烧一窑制品需液化石油气消耗量	23

说明-----26

后记-----30

参考文献..... 31

致谢： 32

前言

梭式窑（Shuttle kiln, 也称：往复窑，或称：台车式窑）是从传统的倒焰窑演变而来，故而属于“间歇式”或“半连续式”窑型梭式窑是一种现代化的间歇式窑炉，对烧成产品的品种适应性强、能烧制不同尺寸、不同形状的系列产品，在日用陶瓷、卫生洁具、艺术陶瓷、微晶玻璃和电瓷等领域可作为工厂生产的主要烧成设备使用。特别适合小批量、多品种的厂家，满足市场多样化的需求；又可以作为辅助烧成设备，用于产品的重烧和新产品的试生产；是陶瓷厂家，耐材厂家、化工厂家和其它行业经常使用的烧成热工设备。小型燃气梭式窑又以其投资少、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。梭式窑的窑顶、窑墙固定，窑底可做成活动的窑车形式，也就是说，窑底由窑车或无窑车组成，窑车的砖砌体上砌有吸火孔，支烟道和主烟道。在窑外把制品码放在窑车上，装好后推入窑进行焙烧，窑车上的主烟道与窑墙上通往烟囱的排烟口接通。焙烧时，窑内火焰的流动仍和传统的倒焰窑一样，是倒焰式的，这就保证了制品的加热均匀，制品烧成后通过冷却，连同窑车一起推出窑外，然后将另一辆装完待烧坯的窑车推进窑内，进行烧成，这样一出一进，循环往复，象织布的梭子、桌子的抽屉一样，所以这种窑称为梭式窑，又称为抽屉窑、往复窑。梭式窑窑内上下温度分布比较均匀，快速烧成，可以烧出优质产品。可是适用周末或节假日停窑休息，同时，其建投资费用少等。

现代新型间歇式梭式窑采用了高速调温烧嘴，燃烧产物以很高的速度喷射入窑，这样在整个烧成过程中，燃烧产物的对流传热速率就大大地提高，即使在高温阶段，对流传热的作用也大，并且，整窑制品比旧式倒焰窑烧成更易达到均匀加热的目的，这就意味缩短窑的烧成周期，提高了窑的生产能力，提高了产品的质量，节省燃料的消耗量。使用液化气做燃料火焰易于控制，且烧嘴不像油烧的易堵塞。

自 80 年代来，我国引进不少梭式窑，也在借鉴的基础上，自行研制开发不少梭式窑，梭式窑在我国投入使用以来，因其具有升、降温速度快、操作灵活方便，便于维修等特点，近年来在冶金、化工、陶瓷、无机材料等领域得到广泛使用。为了掌握梭式窑的特点和结构点，增强工程设计能力，提高设计计算和理论分析能力而设计一个 10m^3 刚玉制品高温梭式窑。

1.设计要求

- 1.窑炉种类：梭式窑
- 2.窑内有效容积： 42m^3
- 3.最高烧成温度： 1280°C
- 4.燃料种：天然气
- 5.空气过系数 $\alpha=1.1\sim 1.15$
- 6.燃料消耗量： 160kg/h
- 7.当地气象条件：夏季平均温度 27°C ，年平均大气压力 96000Pa

2.窑炉主要尺寸设计

窑体的主要尺寸主要依据被煅烧制品码放要求，产品性能、烧嘴喷射能力、温度分布均匀性等各方面因素综合确定。

(1) 梭式窑内高为窑车台面至窑顶的空间高度。根据材料所能允许的堆垛高度来确定窑的内高。由于烧成的绝缘子尺寸为 $\Phi 260 \times 1020$. 设坯体收缩率 8% 则坯体尺寸为 $\Phi 260 \div (1-8\%) = \Phi 283$ $1020 \div (1-8\%) = 1109$ 所以窑车台面到顶部高度至少 1109mm 可取 1500mm

(2) 本梭式窑的内高设计为 1500mm。

(2) 梭式窑的内宽为窑内两侧窑墙之间的距离。窑的内宽与窑内制品码放有关， $\Phi 283$ 坯体可以码放 10 个。切每组坯体间隔可取 57mm 窑车与边缘位置可取 150mm 所以内宽= $10 \times (283 + 57) + 150 \times 2 = 3700\text{mm}$

(3) 本梭式窑的内宽根据内高和拱顶设计为 3700mm。

(4) 本梭式窑的长度 $L = 42 \div (3.7 \times 1.5) = 7.56\text{m}$ 取 8 米

(5) 设每辆窑车长度 2m 总计需要 4 辆窑车。当然可以多做几辆备用。

3.窑炉砌筑体

3.1 砌筑体材质的选择

3.1.1 窑墙

窑墙要有一定强度才能承受荷重、支持窑顶；要耐高温；要能保温，以维持窑内煅烧温度，减少散热损失，降低环境温度。本梭式窑的窑墙由内向外分别采用了莫来石砖、聚轻球砖砌筑。

3.1.2 窑顶

窑顶除要有一定强度、耐热、保温性能好坏，还要不漏气、重量轻，推力小等要求。

可用莫来石、聚轻球砖吊顶。顶上在铺棉毯多层。

3.1.3 窑车

窑车衬砖是梭式窑的活动窑底，它是用来保护金属窑车和装载制品烧成的，它每经过窑内一次，既被加热又被冷却，经受周期性的温度变化，同时还要在

窑车衬砖面上进行经常性的装卸工作，因此窑车衬砖较易松动和损坏，严重时阻碍窑车在窑内正常运行。

硅砖、轻质粘土砖、红砖、高炉矿渣的最高使用温度、体积密度及相应的导热系数如表 2:

表 2. 耐火材料、建筑材料及绝热材料的导热系数

	莫来石	聚轻球砖	粘土砖	棉毯
最高使用温度 (℃)	1300	1200	900	
体积密度 (kg /m³)	1200	800	800	
导热系数[W/(m· ℃)]	0.815+0.756×10 ⁻³ t	0.262+0.232×10 ⁻³ t	0.7~1.2	

材料明细表

窑顶	窑墙
高铝纤维毯3*20mm	高铝纤维毡50mm
含锆纤维毯4*20mm	高铝聚轻球230mm
TJM26莫来石吊顶230mm	含锆纤维毯20mm
	TJM26莫来石230mm

3.3 膨胀缝

窑体受热会膨胀，产生很大的热应力，为避免砌体开裂、挤坏，必须重视窑体膨胀的留设，窑墙、窑顶等砌体都要留设，一般每隔 2m 左右留设 20mm 膨胀缝，内填陶瓷棉或石棉。

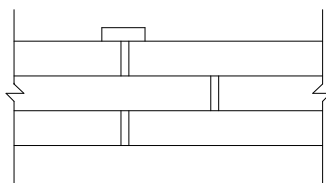


图 1

4.燃烧计算及燃烧设备的选择

4.1 燃料所需空气量

理论空气量 V_a^0

天然气	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S	CO ₂	N ₂	其他
成分组成(%)	86.8	0.11	0.879	4.437	8.1	0.343

所用燃料为天然气，低位发热量： $Q_{\text{net, ar}}=36000\text{KJ}/\text{m}^3$

查工具书，得理论燃烧计算式，

$$V_a^0=0.264 \times Q_{\text{net, ar}}/1000+0.02=9.524\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

则实际空气量 V_a

对于气体燃料，空气过剩系数 $a=0.8155 \sim 1.25$ ，取 $a=1.2$ ，则： $V_a=aV_a^0=1.2 \times 9.524=11.4288\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$

4.2 燃料产生烟气量

理论烟气量

查工具书，得理论完全燃烧计算式，

$$V^0=0.264 \times Q_{\text{net, ar}}/1000+1.02=10.524\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

实际烟气量

取 $\alpha = 1.2$

$$V = V^{\circ} + (\alpha - 1)V_a^0 = 10.524 + (1.2 - 1) \times 9.524 = 12.4288 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

4.3 燃烧温度

理论燃烧温度

$$t = (Q_{Dw} + V_a C_{aT_a} + C_f T_f) / (VC)$$

查表在 $t=1730^{\circ}\text{C}$ 时的烟气比热为 $C=1.64 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ ，在室温 20°C 时空气比热为 $C_a=1.30 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ ，天然气的比热为 $C_f=1.56 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ ，代入公式得 $t=(36000+11.428\times1.30\times20+1.56\times20)/(12.4288\times1.67)=1782^{\circ}\text{C}$
相对误差为： $(1782-1280)/1782=2.9\%<5\%$ ，认为合理。

实际燃烧温度 t_p

取高温系数 $n=0.8$ ，则实际燃烧温度为 $t_p=\eta t_{th}=0.8\times1782=1425.6^{\circ}\text{C}$ 。
 $1425.6-1280=175.6^{\circ}\text{C}$ ，比烧成温度高出 175.6°C ，认为合理。

4.3 烧嘴的数量、选型以及布置

本窑采用2对北京神雾公司的WDH-TCC2型烧嘴

该烧嘴技术性能如下：

热负 荷	燃气		助燃空气			流量调 节比例	火焰 长度	炉膛 温度
	流量	压力	流量	温度	压力			
2×10^4 Kcal/h	2.4 Bm ³ /h	1000Pa~ 0.2MPa	24 Bm ³ /h	常温 ~550℃	1500~ 3500Pa	1: 6	200~ 3000	1800 ℃

布置在窑墙两侧，在同一水平面上交错布置，每只还配置了自力式燃气—

空气比例调节器以及分散单元式小型换热器。高速调温烧嘴选择重油和预热空气预混无焰完全燃烧后再混入调温风的技术路线，并采用阻力小、稳定范围大的燃烧器凹槽火焰稳定装置。由于高速焰气带动窑内气体在窑内循环流动，起着强烈的搅拌作用，使窑内温度和气氛均匀，可实现快速、均匀的升温；喷出焰气的温度可在600~1800℃内自由调节，容易实现窑内温度的精细调节，满足苛刻的工艺要求；克服了一般预混式烧嘴易回火爆燃的缺点；提高了燃烧装置的安全性，并能够使用高达600℃的预热空气助燃。

5、物料平衡计算

根据前面所述装窑方法，在窑车长度、宽度方向每层放8×8个制品，共10层。故每窑制品量有8×8×10=640个。

5.1 每窑烧成制品质量 G_m

单件制品质量为0.35Kg

$$G_m = 640 \times 0.35 = 224 \text{Kg}$$

5.2 每窑入窑干坯质量 G_{gp}

$$G_{gp} = G_m \times 100 / (100 - \text{酌减量})$$

$$= 224 \times 100 / (100 - 1.91)$$

$$= 228 \text{Kg}$$

5.3 每窑入窑湿坯的质量 G_{sp}

$$G_{sp} = G_{gp} \times 100 / (100 - w)$$

$$= 228 \times 100 / (100 - 0.5)$$

$$= 229 \text{Kg}$$

5.4 每窑蒸发的自由水 $G_{sp} - G_{gp} = 229 - 228 = 1 \text{ Kg}$

5.5 砌板和支柱质量 G_p

$$\rho = 2500 \text{Kg} / \text{m}^3; \quad C = 0.96 + 0.146 \times 10^{-3} t = 1.325 \text{KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

砌板数目 $8 \times 10 = 80$ 个, 支柱个数 $8 \times 4 \times 9 = 288$ 个

$$G_p = 80 \times 0.85 \times 0.62 \times 0.01 \times 2500 = 1054 \text{Kg}$$

$$G_2 = 288 \times 3.14 \times 0.06^2 \times 0.14 \times 2500 = 1140 \text{Kg}$$

$$\text{所以: } G_p = gG_p + G_2 = 1054 + 1140 = 2194 \text{Kg}$$

6、热平衡计算

梭式窑的传热是不稳态的, 计算比较复杂。首先要确定热平衡计算基准, 再计算在加热各阶段时, 窑体, 窑车以及制品等的积散热损失。

6.1 计算基准

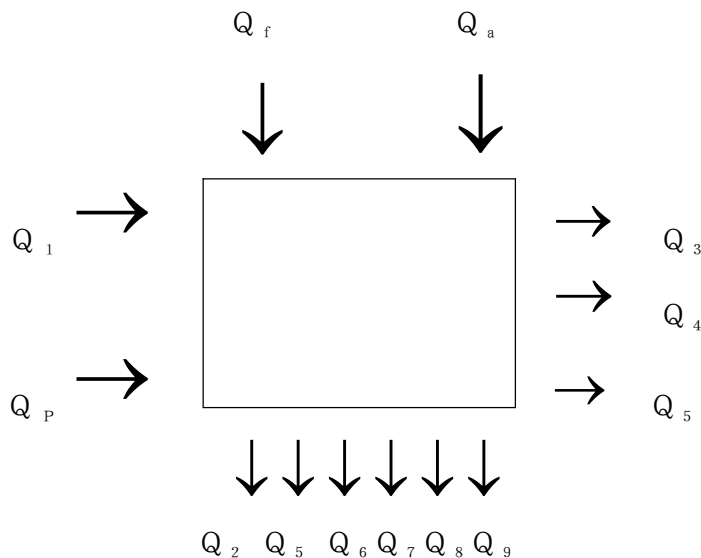
基准温度: 0°C

基准质量: 每窑烧成产品质量 224Kg

6.2 确定热平衡计算范围

计算燃料消耗时, 热平衡的计算范围为窑体、窑车、制品及窑具。

6.3 热平衡方框



热收入

Q_1 : 坯体带入显热

Q_p : 硼板、支架带入显热

Q_f : 燃料带入显热及化学热

Q_a : 助燃空气带入显热

热支出

Q_2 : 烟气带走显热

Q_3 : 制品积热

Q_4 : 硼板、支架积热

Q_5 : 物化反应耗热

Q_6 : 窑车积蓄与散失热

Q_7 : 窑侧积蓄与散失热

Q_8 : 窑顶积蓄与散失热

Q_9 : 其他热损失

根据烧成工艺要求，分别对烧成各阶段进行热平衡计算，计算出每阶段每小时的燃料消耗量 X ，其中最大者即为每小时的燃料消耗量 X

以下的热收入及热支出均以第一阶段（20℃—300℃）来计算，其中 $\alpha = 1.0$ ， X 表示单位小时内的燃料燃烧量。

6. 4. 1 坯体带入显热 Q_1

常温下坯体显热 $C_1 = 1.1 \text{ KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ，坯体温度 t_1 以室温 20℃ 计算

$$Q_1 = G_{sp} \cdot C_1 \cdot t_1$$

$$= 229 \cdot 1.1 \cdot 20$$

$$= 5038 \text{ KJ}$$

6. 4. 2 硼板、支架带入的显热 Q_p

常温下碳化硅的显热 C_p

常温下碳化硅质硼板的显热 $C_p = 0.8 \text{ KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ， $t_p = 20^\circ\text{C}$

$$Q_p = G_p \cdot C_p \cdot t_p$$

$$= 2194 \cdot 0.8 \cdot 20$$

$$= 35104 \text{ KJ}$$

6. 4. 3 燃料带入显热 Q_f

20—300℃阶段热平衡计算, $C_f = 2.08 \text{ KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} Q_f &= (Q_d + C_f \cdot t_f) \cdot X \\ &= (91000 + 2.2 \cdot 20) \cdot X \\ &= 91004X \text{ KJ} \end{aligned}$$

6. 4. 4 助燃空气带入显热及化学热

$$\begin{aligned} V_a &= V_a \cdot X = 23.13X \\ Q_a &= V_a \cdot C_a \cdot t_a \\ &= 23.13X \cdot 1.3 \cdot 20 \\ &= 601X \text{ KJ} \end{aligned}$$

6. 4. 5 露入空气带入显热

由于该梭式窑体积只有 3.5 m^3 , 严密性好, 故而漏入空气忽略不计。

6. 5 热支出计算

6. 5. 1 烟气带走显热 Q_2

该阶段制品平均温度为 $(20 + 300) / 2 = 160^\circ\text{C}$

考虑到实际传热过程中, 烟气温度一般略高于制品温度, 设烟气温度比制品高 30°C , 该窑烧成时间 (除冷却时间外) 为 7 小时, 换热时间长, 高出 40°C 较合理, 则 $t_2 = 160 + 30 = 200^\circ\text{C}$, 查《硅酸盐工业热工基础》附录四,

得 $C_2 = 1.0 \text{ KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} V_2 &= [V_{n1} + (a_2 - 1) L_a] X \\ &= [25.86 + (1.1 - 1) 23.13] X \\ &= 28.15X \end{aligned}$$

$$Q_2 = 28.15X \times 200 = 5630X \text{ KJ}$$

6. 5. 2 制品积热 Q_3

在 $t_p = 300^\circ\text{C}$ 时, $C_p = 1.01 \text{ KJ} / \text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$$Q_3 = G_{gp} \times C_b \times t_b = 228 \cdot 1.01 \cdot 300 = 69085 \text{ KJ}$$

6. 5. 3 硼板反应耗热 Q_4

$$C_b = 0.91 \text{ K J / K g} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Q_4 = G_b \times C_b \times t_b = 179 \cdot 0.91 \cdot 300 = 48867 \text{ K J}$$

6. 5. 4 物化反应耗热 Q_5

第一阶段为坯体排出自由水阶段，物化反应耗热只包括自由水蒸发吸热及结构水脱水吸热、焙烧坯体物理化学反应耗热。自由水蒸发温度以 250°C 时：

$$C_{zs} = 1.53 \text{ K J / N m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Q_5 = G_s \cdot (2490 + 1.53 t_{zs})$$

$$= 2.53 \times (2490 + 1.53 \times 250)$$

$$= 6750.375 \text{ K J}$$

C_{zs} ——入窑制品所含自由水质量

$2490 \text{ K J / K g} \cdot ^\circ\text{C}$ —— 0°C 时， 1 K J 自由水蒸发所需之热

$1.53 \text{ K J / K g} \cdot ^\circ\text{C}$ ——水蒸汽平均比热

t_{zs} ——烟气水蒸汽温度

6.5.5 窑侧、窑车、窑顶的散热损失

6.5.5.1 窑体及窑车温度分布的确定

梭式窑属于间歇窑，其导热过程属于不稳态导热，不稳态导热的计算比较复杂，通常才用有限差分法。有限差分法的基本原理是用函数在一些特定点的有限差别商来代替微商，建立与原微分方程相对应的差分方程，用一组线形方程来代替该微分方程，以便于求解。

(1) 不稳态导热的基本理论

利用有限差分法来的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，把窑体分成同样厚度的各层 ΔX ，把时间也分割成许多间隔 $\Delta \tau$ ，把时间分成彼此相等间隔 $\Delta \tau$ ，用角码 1、2、3……、K、K+1 表示，依次求得 $\Delta \tau$ ， $2\Delta \tau$ …… $k\Delta \tau$ 时刻材料中各节点的温度值。

$$\text{当选择 } \Delta \tau \text{ 和 } \Delta X, \text{使 } 2\alpha \frac{\Delta \tau}{(\Delta X)^2} = 1 \quad (1)$$

(α 为导温系数 $\alpha = \lambda / c_p \rho$, λ —导热系数 $\text{W/m}^2\text{C}$, c_p —比热 $\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$, ρ —密度 kg/m^3)

则某一层壁的温度就是相邻二层壁在上一个时间间隔时的算术平均数。即

$$t_{n,k+1} = \frac{t_{n+1,k} + t_{n-1,k}}{2} \quad (2)$$

已知壁外介质温度 t_f 和介质与壁面之间的换热系数 α ，表面温度为 t_w ，可由下式求得：

$$t_w = \frac{\frac{\Delta X}{\lambda_w} t_f + \frac{1}{\alpha} t_{1\Delta X}}{\frac{\Delta X}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

ΔX —与介质接触的固体材料所选用的有限距离单位m；

λ_w —固体材料的导热系数 $\text{W/m}^2\text{C}$ ；

t_f —介质温度 $^\circ\text{C}$ ；

$t_{1\Delta X}$ —固体壁内距离表面 $1\Delta X$ 处的温度 $^\circ\text{C}$ 。

当一种材料的 ΔX_A 取定后，第二种材料的 t_A 就不能任意选定：

$$\Delta X_B = \sqrt{\frac{\alpha_B}{\alpha_A}} \Delta X_A \quad (4)$$

(式中的 $\alpha_A \alpha_B$ 分别为两种材料的导温系数 m^2/h)

窑体外层，内层材料不同，交界面的温度求法也不一样，如图（3）所示，设交界面前 ΔX_A 处温度为 t_A ，交界面后 ΔX_B 温度为 t_B ，则再经过一个 $\Delta\tau$ 时间后交界处温度。

$$t' = \frac{\left(\frac{\Delta X_B}{\lambda_B} t_A + \left(\frac{\Delta X_A}{\lambda_A} + \frac{\Delta X_B}{\lambda_B} \right) t_B \right)}{\frac{\Delta X_A}{\lambda_A} + \frac{\Delta X_B}{\lambda_B}} \quad (5)$$

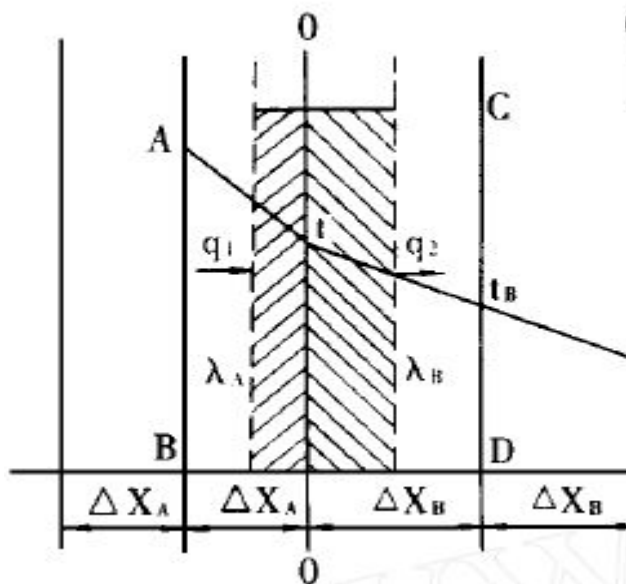


图 8—1 窑体及窑车温度分布的确定

(2) 全纤维窑体材料的蓄热计算

全纤维窑体内层为 $\delta_1=80\text{mm}$ 厚的多晶莫来石纤维，外层为 $\delta_2=120\text{mm}$ 厚的普通陶瓷纤维毡。已知多晶莫来石纤维 $\rho_1=100\text{Kg}/\text{m}^3$ ， $C_1=1.06\text{KJ}/\text{Kg}^\circ\text{C}$ ， $\lambda_1=0.2\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ 。普通陶瓷纤维毡 $\rho_2=240\text{Kg}/\text{m}^3$ ， $C_2=1.04\text{KJ}/\text{Kg}^\circ\text{C}$ ， $\lambda_2=0.13\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ 。

多晶莫来石纤维的导温系数

$$\alpha_1=\lambda_1/C_1\rho_1=(0.2/1.06\times10^3\times100)\times3600=6.8\times10^{-3}m^2/h$$

普通陶瓷纤维毡的导温系数

$$\alpha_2=\lambda_2/C_2\rho_2=(0.13/1.04\times10^3\times240)\times3600=1.88\times10^{-3}m^2/h$$

如果把多晶莫来石纤维看成一层，则 $\Delta X_1=0.08m$

$$\text{根据公式 (1)} \quad \Delta \tau=(\Delta X_1)^2/2\alpha_1=0.08^2/2\times6.8\times10^{-3}=0.47(h)$$

$$\text{根据公式 (4)} \quad \Delta X_2=\sqrt{a_2/a_1}\Delta X_1=\sqrt{1.88\times10^{-3}/6.8\times10^{-3}}\times0.08=0.042(m)$$

则普通陶瓷纤维毡的层数=0.12/0.042=3 层

内壁表面⁰ ΔX_1 处温度上升速度为 $1300-20/10=128(^{\circ}C/h)$

根据公式 (2)、(3)、(5) 分别计算不同 $\Delta \tau$ 时各层温度。

不同 $\Delta \tau$ 时各层温度 (℃)

时间		多晶莫来石纤维		普通陶瓷纤维毡			空气
$\Delta \tau$	小时	$0\Delta X_1$ $0m$	$1\Delta X_1$ $0.08m$	$1\Delta X_2$ $0.042m$	$2\Delta X_2$ $0.084m$	$3\Delta X_2$ $0.12m$	
1	0	20	20	20	20	20	20
2	0.47	80.16	20	20	20	20	20
3	0.94	140.32	46.8	20	20	20	20
4	1.41	200.48	88.57	33.4	20	20	20
5	1.88	260.64	138.56	54.3	26.7	20.90	20
6	2.35	320.8	193.11	82.63	37.6	22.36	20
7	2.82	380.96	250.13	115.6	52.5	24.36	20
8	3.29	441.12	308.5	151	69.98	26.7	20
9	3.76	501.28	367.74	189	88.85	29.2	20

10	4.23	561.44	427.51	228.3	109.1	31.9	20
11	4.7	621.6	486.86	268.3	130.12	34.76	20
12	5.17	681.76	547.05	308	151.53	37.63	20
13	5.64	741.92	606.95	349.3	172.81	40.48	20
14	6.11	802.08	667.2	389.8	195	43.46	20
15	6.58	862.24	727.5	431	216.6	46.36	20
16	7.05	922.4	787.69	472.5	238.6	49.3	20
17	7.52	982.56	845	513.1	260.7	52.3	20
18	7.99	1042.72	905.9	552.83	282.7	55.2	20
19	8.46	1102.88	967.02	594	304	58.07	20
20	8.93	1163.04	1027.38	635.5	326.03	61	20
21	9.4	1223.2	1087	676.7	348.3	64	20
22	9.87	1265.36	1147.71	717.6	370.3	67	20
23	10	1300	1200.66	759	392.3	70	20

从上表可以看出，当温度达到最高温度 1300℃时，窑外表面温度为 70℃，这个温度对操作环境来说，是较低的，也满足了本课程设计的要求，因此选材及材料厚度是合理的。

其中各阶段的温度用内插法求出：

得：窑体各阶段的平均温度（℃）

窑 的 部 位	温 度 段℃	20~300	300~500	500~800	800~1050	1050~1300	1300
	时 间 段 h	0~2.2	2.2~3.7	3.7~6.2	6.2~8	8~9.9	9.9~10
窑体	多 晶 莫 来	63.5	66.7	67	68.4	59	50

	石 纤 维						
	普 通 陶 瓷 纤 维 毡	76	158.7	313	344	465	595

根据公式

$$Q/F = \delta_1 \rho_1 C_1 (t_1 - 20) + \delta_2 \rho_2 C_2 (t_2 - 20)$$

分别求出各阶段窑体单位面积蓄热量：

表 6—1 各阶段窑体单位面积蓄热量：

窑 体	阶段℃	20~300	300~500	500~800	800~1050	1050~1300	1300
		0~2.2h	2.2~3.7	3.7~6.2	6.2~8	8~9.9	9.9~10
	单位蓄 热	2050	9187	9190	10131	13681	17581

计算窑车各阶段单位面积蓄热量的方法与计算窑体单位面积蓄热量完全相同，将其省略，将计算结果如下表。

表 6—2 各阶段窑车单位面积蓄热：

窑 车	阶段	20~300	300~500	500~800	800~1050	1050~1300	1300
	℃	0~2.2h	2.2~3.7	3.7~6.2	6.2~8	8~9.9	9.9~10
	单位 面积 蓄热	11462	13977	11765	9627	9872	6504

表 6—3 各阶段窑后墙单位面积蓄热：

	阶段	20~300	300~500	500~800	800~1050	1050~1300	1300
--	----	--------	---------	---------	----------	-----------	------

窑后 墙	℃	0~2.2h	2.2~3.7	3.7~6.2	6.2~8	8~9.9	9.9~10
	单位 面积 蓄热	6917	8777	15941	17291	11625	5177

6.5.5.2 窑净蓄热量的计算

窑体在各阶段的蓄热可以采用 $Q = qs$ 来计算，其中

两侧窑墙内表面积： $s_1 = 2 \times 1.5 \times 1.8 = 5.4m^2$

窑顶内表面积： $s_2 = 1.7 \times 1.8 = 3.06m^2$

窑门内表面积： $s_3 = 1.7 \times 1.5 = 2.55m^2$

窑尾墙内表面积： $s_4 = 1.7 \times 1.5 = 2.55m^2$

窑车平均面积： $s_5 = 1.8 \times 1.3 = 2.34m^2$

窑体内面积： $s_6 = s_1 + s_2 + s_3 = 11m^2$

第一阶段 20~300℃ 窑体净蓄热量为 $172 \times 91000 \div 224 = 21048(KJ / 千克瓷$

依据以上方法，分别计算出窑炉各部位，各阶段蓄热量

表 6—4 窑炉各部位，各阶段蓄热量

阶段 部位	20~300 0~2.2h	300~500 2.2~3.7	500~800 3.7~6.2	800~1050 6.2~8	1050~1300 8~9.9	1300 9.9~10
窑体	27798	101057	101090	111441	150491	193391
窑车	26821	32706	27530	22527	23100	15219

窑后墙	17638	22381	40649	44092	29643	13201
总计	72257	156144	169269	178060	180365	281811

6. 5. 6 其它热损失

该项热损失要根据具体情况，对比现有类型的梭式窑加以确定，根据经验数据，现定位占总热收入的 3 %。

6. 6 第一阶段燃料消耗量计算

列热平衡方程式并求解如下：

$Q_1 + Q_P + Q_f + Q_a = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$ 带入数据如下：

$$(1-3\%) (5038+35104+91042 X+601 X) = 5630 X+69085+48867+6750+72257$$

$$X=2.1 Bm^3$$

以上五个阶段的计算过程与第一阶段完全相同，所以省略计算过程，现列计算结果如下，以便更直观地看到在一个烧成周期中，燃料在各个阶段的消耗量。

表 6— 4

阶段	20 [^] 30	300 [^] 500 2.2 [^] 3.7	500 [^] 800 3.7 [^] 6.2	800 [^] 1050 6.2 [^] 8	1050 [^] 1300 8 [^] 9.9	1300 9.9 [^] 10
Q_1	5038	82440	155043	212744	251593	277140
Q_P	35104	274250	143200	201106	321012	357162
Q_f	91042 X	51375 X	130660 X	138330 X	145315 X	356699 X
Q_a	601 X	320 X	683 X	436 X	359 X	287 X
Q_2	5630 X	10785 X	14503 X	23673 X	28940 X	34485 X

Q_3	69085	212529	226425	257942	280955	356643
Q_5	6750	0	26737	0	25365	0
$Q_6 + Q_7 + Q_8$	72257	156144	169269	178060	180365	281811
Q_9	3%Q	3%Q	3%Q	3%Q	3%Q	3%Q
X	2.1	6.2	4.7	5.5	8.5	0.9
t/h	2.2	1.5	2.5	1.8	1.9	0.1

6. 7 烧一窑制品需天然气消耗量

从上面的热平衡计算结果可看出：

$$\begin{aligned}
 Bs &= 2.1 \times 2.2 + 6.5 \times 1.5 + 5 \times 2.5 + 8 \times 1.8 + 10 \times 1.9 + 0.9 \times 0.1 \\
 &= 4.62 + 9.75 + 12.5 + 14.4 + 19 + 0.09 \\
 &= 60.36 Bm^3
 \end{aligned}$$

每公斤瓷耗热量： $60.36 \times 91000 \div 224 = 24521 (KJ / \text{千克瓷})$

从上面的热平衡表中可以看出：

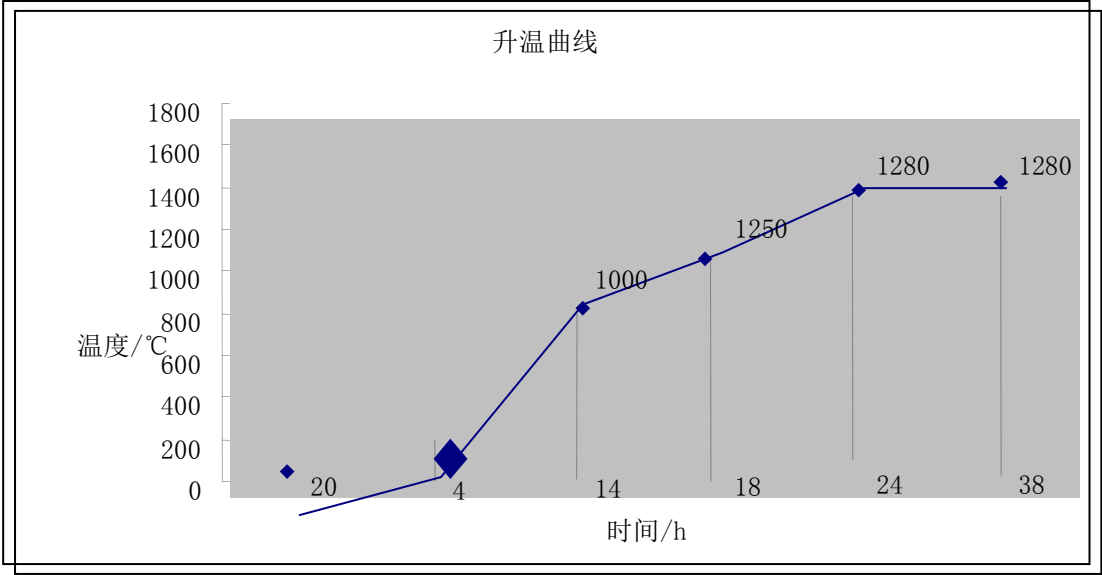
①燃烧过程一二阶段中，窑具积散热占较大部分，在高温阶段，热损失中烟气带走的显热也占很

大比例。但总的来说，在整个燃烧过程中，各种热所占比例还是合理的。

②从上表可知，由于采用了轻型耐火材料，窑体和窑车的蓄热量比传统梭式窑进一步降低。窑体和窑车的散热在间歇式窑炉中所占的比重很小，而烟气和窑具带走的显热占较大比重，所以今后在窑炉的设计中，应该加强对烟气余热的利用。

阶段	温度范围 (°C)	空气过 剩系数	升温时 间/h	速度/°C /min
一	20-200	1.1	4	1
二	200-1000	1.1	10	1.39
三	1000-1250	0.9	4	0.95

四	1250-1280	1	6	0.62
五	1280	1	14	0



说明：1. 窑车材料清单

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	

2. 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	$d \leq 15$
	65Mn	981	785	8	$d \leq 80$
铸钢	ZG270-500	500	270	18	$d \leq 100$
	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	

3 烧嘴、风机的选用

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 (m³ /min)	进口压 力(Pa)	进口温 度(℃)	进口 工况 的介 质密 度 (kg /m³)	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

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。

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 理工大学, 2008

致谢

非常感谢汪和平老师及其他各位老师们的帮助, 通过这次的课程设计使我在设计方面有了一个更加深刻的了解, 提高了我的操作能力和思维方式。在此次的课程设计中, 各位老师的学识与专业素养让我自惭形秽, 老师们诲人不倦

的为人师表风范更加让我们学生们尊敬。谨此，向老师们致以衷心的感谢和崇高的敬意！