

景德镇陶瓷学院

科院本科生毕业设计说明书

题目：96M 日用瓷隧道窑设计

学 号：201030453140

姓 名：林婵

院（系）：科技艺术学院工程系

专 业：热能与动力工程

日 期：2014 年 6 月 2 号

目录

一. 设计任务书及原始资料

二. 摘要

1、前言.....	1
2、烧成制度的确定.....	2
2.1 温度制度的确定.....	2
2.2 烧成曲线图.....	3
3、窑体尺寸的计算.....	3
3.1 窑车棚板和支柱的选用.....	3
3.2 窑长和窑宽及窑车尺寸的确定.....	3
4、工作系统的确定.....	5
4.1 预热带工作系统的确定.....	5
4.2 烧成带工作系统布置.....	5
4.3 冷却带工作系统布置.....	5
5、窑体的确定.....	6
5.1 窑体.....	6
5.2 钢架.....	6
5.3 窑墙.....	6
5.4 窑顶.....	6
5.5 测温、测压孔.....	7
5.6 曲封、砂封和车封.....	7
6、窑体材料及厚度的选择.....	7
7、燃烧系统计算.....	9
7.1 助燃空气量计算.....	9
7.2 燃烧温度计算.....	9
8、物料平衡计算.....	10
8.1 每小时烧成制品的质量.....	10
8.2 每小时入窑干坯质量.....	10
8.3 每小时入窑湿坯质量.....	10
8.4 每小时蒸发自由水质量.....	10
8.5 每小时从精坯中产生 CO_2 的质量.....	10
8.6 每小时从精坯中排除的结构水质量.....	10
8.7 每小时入窑窑具质量.....	10
9、预热带及烧成带热平衡计算.....	12
9.1 热平衡计算基准及范围.....	12
9.2 热平衡框图.....	12
9.3 热收入项目.....	13
9.4 热支出项目.....	15

9.5 列出热平衡方程式.....	20
9.6 列出预热带和烧成带热平衡表.....	20
10、冷却带的平衡计算.....	21
10.1 确定热平衡计算的基准、范围.....	21
10.2 平衡框图.....	21
10.3 热收入项目.....	22
10.4 热支出项目.....	22
10.5 热平衡方程式.....	25
10.6 热平衡表.....	26
11、排烟系统的设计.....	27
12、烧嘴的选型.....	28
13 工程材料概算.....	28
14、后记.....	28
15、参考文献.....	29

设计任务书及原始资料

景德镇陶瓷学院科技艺术学院毕业设计（论文）任务书

系 工程系

2013 年 12 月 17 日

专业	能源与动力	班级	2010 级			
学生姓名	林 婵	指导教师	陈功备			
题目	96M 日用瓷隧道窑炉设计					
<p>主要研究内容和设计技术参数：</p> <p>1、产品：日用瓷（品种、规格自定）；</p> <p>2、产量：自定；</p> <p>3、年工作日：335 天；</p> <p>4、燃料：焦炉煤气；</p> <p>5、烧成合格率：96%；</p> <p>6、坯体入窑水分：根据产品结构自定；</p> <p>7、烧成周期：19 小时；</p> <p>8、烧成温度：1320℃。</p>						
<p>基本要求（含成果要求）：</p> <p>1、认真思考，独立完成；</p> <p>2、编写详细设计说明书，含设计计算、材料概算等并要求应用计算机计算、处理和分析；</p> <p>3、绘制窑炉设计图纸，包括刚架结构、窑炉砌体、排烟通风系统、异型砖等；</p> <p>4、要求视图关系正确、尺寸标注完整，图纸中阿拉伯数字和汉字的书写等必须符合相关国标；</p> <p>5、设计说明书严格按照规范编写，必须有英文摘要。采用学院规定的统一格式，一律用 A4 纸打印。</p>						
<p>工作进度计划：</p> <p>1、第 1~4 周：毕业实习，收集相关资料；</p> <p>2、第 5~6 周：查找资料，确定方案；</p> <p>3、第 7~8 周：进行初步设计计算；</p> <p>4、第 9~10 周：详细计算并设计草图；</p> <p>5、第 11~15 周：完成全部图纸；</p> <p>6、第 16 周起：整理全部材料，准备答辩。</p>						

原始数据：**设计题目：96M 日用瓷隧道窑窑炉设计****1.2 设计技术指标、参数：**

坯料的化学组成（%）

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	IL
70.10	19.65	0.25	0.45	1.05	1.0	1.75	5.72

产品的规格：罗汉汤碗 高 95mm、口径 150mm、底径 55mm

坯体线收缩率 10%

入窑水分：2.1%

产品合格率：96%

工作日：330 天

夏季最高气温：38℃

烧成制度：周期 18 小时

最高烧成温度：1310℃

气氛制度：还原气氛

燃料：焦炉煤气 $Q_{\text{net}}=17.4\text{MJ}/\text{Nm}^3$

CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	H ₂ S	CO ₂	N ₂	O ₂	Q (MJ/Nm ³)
6.0	56.2	23.7	3.0	0.3	3.0	7.0	0.8	17.4

窑具：SiC 棚板、SiC 支柱

摘要

本设计说明书对所设计的 96M 日用瓷隧道窑加以说明。说明书中具体论述了设计时应考虑的因素,诸如窑体结构、排烟系统、烧成系统和冷却系统等等.同时详细的进行了对窑体材料的选用、热平衡、管路、烧嘴、风机等的计算。

1. 能满足被烧成制品的热工制度要求,能够焙烧出符合质量要求的陶瓷制品。
2. 烧窑操作要灵活,方便,适应性强,能够满足市场多变的要求。
3. 经济性要高。包括热效率要高,单位产品的综合能源消耗要少,炉龄要长。
4. 容易实现机械化,自动化操作,劳动生产率高。
5. 劳动条件好,劳动强度小,环境污染小。

本文设计以高 95mm、口径 150mm、底径 55mm 的罗汉汤碗为产品的隧道窑,全窑长 96m,最高烧成温度是 1320℃,采用焦炉煤气。

本说明书内容包括:窑体主要尺寸的确定、工作系统的确定、窑体材料的选择、燃料燃烧计算、热平衡计算、管道尺寸阻力计算、风机的选型及工程材料概算等。

关键词: 隧道窑、系统、计算

Abstract

This instruction elaborated the clean tunnel kiln. The annual production of this clean tunnel kiln is 96 m of household china of tunnel kiln. This instruction specifically elaborated the factor should be considered when we designed, such as the structure of the kiln body, discharged system, burning system and the cooling system and so on. At the same time it detailed how to choose the material, the calculation of heat balance, the pipeline design, the selection of burner, the calculation of fan and so on.

1. To meet the requirement of burned products of the thermal system, and can roast the conform to the requirements of the quality of ceramic products.
2. The kiln operation to be flexible, convenient, strong adaptability, can satisfy the requirements of the changing market.
3. The efficiency is higher. Including higher thermal efficiency, less comprehensive energy consumption per unit product, the furnace life.
4. Easy to implement mechanization, automation, high labor productivity.
5. Good labor conditions, labor intensity is small, little environmental pollution.

Designed with height of 95 mm, 150 mm diameter, bottom diameter of 55 mm lohan soup bowl for product of tunnel kiln, the kiln is 96 m long, sintering temperature is 1320 °C, the highest using coke oven gas.

This instruction content includes: the determination of kiln body dimension, work system, the choice of material, the calculation of fuel burning, the calculation of heat balance, the calculation of transmission, the calculation of pipeline size and resistance, how to choose air blower shaping and the estimation of engineering material and so on.

Keywords: tunnel kiln 、 system、 calculated

1、前言

陶瓷工业窑炉是陶瓷工业生产中最重要工艺设备之一，对陶瓷产品的产量、质量以及成本起着关键性的作用。它把原料的化学能转变成热能或直接把电能转变成热能，以满足制品焙烧时所需要的温度，在期间完成一系列的物理化学变化，赋予制品各种宝贵的特性。因此，在选择窑炉时，为了满足陶瓷制品的工艺要求，应充分了解窑炉类型及其优缺点，考察一些与已投入生产的陶瓷厂，然后结合本厂实际情况和必要的技术论证，方可定之。判断一个窑炉好坏的标准，通常由以下几个方面来评价：

1. 能满足被烧成制品的热工制度要求，能够焙烧出符合质量要求的陶瓷制品。
2. 烧窑操作要灵活，方便，适应性强，能够满足市场多变的要求。
3. 经济性要高。包括热效率要高，单位产品的综合能源消耗要少，炉龄要长。
4. 容易实现机械化，自动化操作，劳动生产率高。
5. 劳动条件好，劳动强度小，环境污染小。

以上几点，其中能否满足所烧制品的热工制度要求，是衡量陶瓷窑炉性能好坏的重要技术指标。实际生产中，往往是力求使制品被烧使窑内温差尽量减少，它是提高产品合格率的关键所在。

隧道窑是耐火材料、陶瓷和建筑材料工业中最常见的连续式烧成设备。其主体为一条类似铁路隧道的长通道。通道两侧用耐火材料和保温材料砌成窑墙，上面为由耐火材料和保温材料砌筑的窑顶，下部为由沿窑内轨道移动的窑车构成的窑底。

隧道窑的最大特点是产量高，正常运转时烧成条件稳定，并且在窑外装车，劳动条件好，操作易于实现自动化，机械化。隧道窑的另一特点是它逆流传热，能利用烟气来预热坯体，使废气排出的温度只在 200°C 左右，又能利用产品冷却放热来加热空气使出炉产品的温度仅在 80°C 左右，且为连续性窑，窑墙、窑顶温度不变，不积热，所以它的耗热很低，特别适合大批量生产陶瓷，耐火材料制品，具有广阔的应用前景。

本文设计以高 95mm、口径 150mm、底径 55mm 的罗汉汤碗为产品的隧道窑，全窑长 96m，最高烧成温度是 1320°C ，采用焦炉煤气。

2、烧成制度的确定

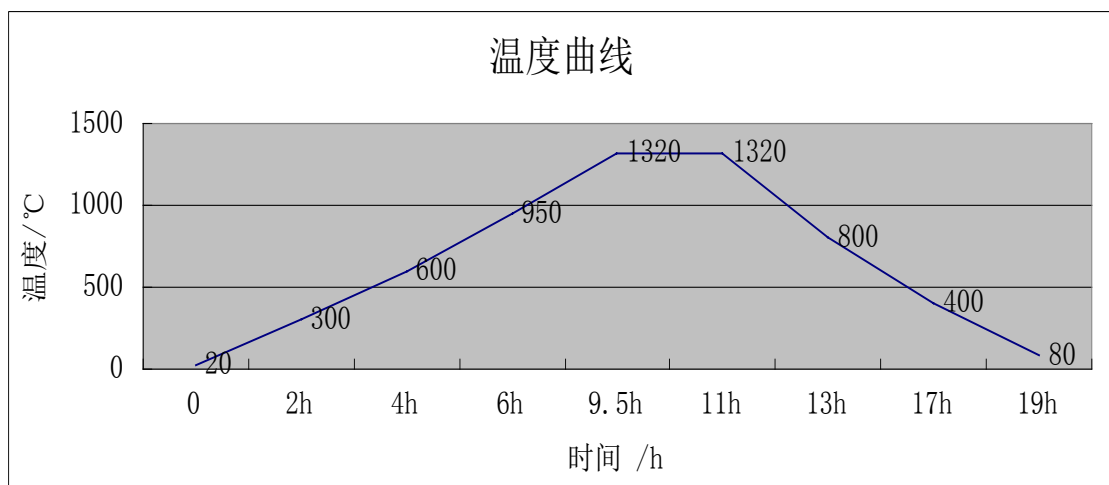
2.1 温度制度的确定

根据制品的化学组成、形状、尺寸、线收缩率及其他一些性能要求，制订温度制度如下：（烧成周期19小时）

表2-1 温度制度

温度 (°C)	时间 (h)	烧成阶段	升(降)温速率(°C/h)
20---300	2	预热带	150
300---600	2	预热带	150
600---950	2	预热带	175
950---1320	3.5	烧成带	121.3
1320---1320	1.5	烧成带（高火保温）	0
1320---800	2.0	冷却带(急冷带)	260
800---400	4	冷却带(缓冷带)	100
400---80	2.0	冷却带(快冷带)	160

2.2 烧成曲线图



3、窑体尺寸的计算

3.1 窑车棚板和支柱的选用

为减少窑内热量损失，提高热利用率，根据原始数据所给的焦炉煤气，直接用明焰裸烧，并结合装载制品罗汉汤碗的重量大小，选定全耐火纤维不承重型结构窑车：棚板、支柱均为碳化硅材料，以降低蓄散热损失，考虑到全窑最高烧成温度为 1320°C ，选用碳化硅材料选用 SiC 50%，体积密度 $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ ，最高使用温度 1400°C ，导热系数计算式 $5.23+1.28\times 10^{-3}t$ 。

棚板规格：长×宽×高： $210\times 210\times 10(\text{mm})$

棚板质量= $210\times 210\times 10\times 10^{-6}\times 2.2=0.9702\text{kg}$

支柱规格：长×宽×高： $50\times 50\times 150(\text{mm})$

支柱质量= $50\times 50\times 100\times 10^{-6}\times 2.2=0.825\text{kg}$

3.2 窑长和窑宽及窑车尺寸的确定

3.2.1 罗汉汤碗的规格： $\Phi_{\text{底}}=55\text{mm}$ ， $\Phi_{\text{口}}=150\text{mm}$ ，高= 95mm 。

3.2.2 制品码装方法

装4层，棚板间距 10mm ，距窑车边缘 15mm ，每层中，横9竖7摆放，每层用63块棚板，80个支柱。

3.2.3 窑车尺寸

棚板间距 10mm ，棚板边缘与窑车台面间距 15mm ，故窑车的尺寸： $1730\times 1350(\text{mm})$

宽 = $9\times 210 + 10\times 8 + 2\times 15 = 2000\text{mm}$

长 = $7\times 210 + 10\times 6 + 2\times 15 = 1560\text{mm}$

3.2.4 窑内宽、内高、全高、全宽的确定

1) 窑内宽：

隧道窑内宽是指窑内两侧墙间的距离,包括制品有效装载宽度与制品和两边窑墙的间距。窑车与窑墙的间隙尺寸一般为 25~30mm,本设计中取用 30mm,则预热带与冷却带窑内宽:

$$B_1 = 2000 + 30 \times 2 = 2060 \text{ mm}$$

2) 窑全宽

预热带和冷却带窑全宽=窑内宽 2060+两侧墙宽 $430 \times 2 = 2920 \text{ mm}$ 。

烧成带全宽=窑内宽 2060+两侧墙宽 $530 \times 2 = 3120 \text{ mm}$ 。

由于采用明焰裸烧,烧成带不设燃烧室,而只在窑墙上砌筑烧嘴砖构成燃烧通道,为使喷入的燃料有足够的燃烧空间,增大气体辐射层厚度,利于烟气对制品的辐射传热。

3) 内高

为避免烧嘴喷出的高速火焰直接冲刷到局部制品上,影响火焰流动,造成较大温差,窑车台面与垫板间、上部制品与窑顶内表面之间都设有火焰通道,其高度(大于或等于烧嘴砖尺寸):棚板下部通道取 230mm,上部火焰通道取 239mm。

窑内高=上部火焰通道 239 mm+ 制品码装高度 $(150+10) \times 4 \text{ mm}$ + 窑车台面距棚板 230mm
=1109 mm。

通用砖厚取 65, 需要 $1109/65 = 17.1$ 块, 取 18 块,

故砖高 $= 18 \times 65 = 1170 \text{ mm}$, 灰缝 $= 20 \times 2 = 40 \text{ mm}$,

内高 $= 1170 + 40 \text{ mm} = 1210 \text{ mm}$

4) 窑车架高 225mm,窑车衬面边缘用三层的轻质砖共 260mm,在窑车的中部铺 4 层硅酸铝纤维棉和 1 层硅纤维毯。窑车总高为: $225 + 260 = 485 \text{ mm}$

全窑高(轨面至窑顶外表面)

预热带和冷却带的窑总高:

车架高度 $= 485 + \text{内高 } 1210 + \text{窑顶高 } 380 = 2075 \text{ mm}$;

烧成带的窑总高:

车架高度 $= 485 + \text{内高 } 1310 + \text{窑顶高 } 530 = 2325 \text{ mm}$

3.2.5 窑长尺寸

每辆窑车 $4 \times 7 \times 9 = 252$ 件,装窑密度 $g = 252 / 1.56 = 161.54$ (件/每米窑长)。

由

$$L = \frac{G \cdot \tau}{24 D_y \cdot K \cdot g}$$

已知 $G = 6200000$ 件/年,烧成时间 19 时,335 天工作日,96%合格率。代入数值可求的 $L = 94.48 \text{ m}$ 。

窑内容车数 $n = L / 1.56 = 60.56$ 辆 取 61 辆,则窑长 $61 \times 1.56 = 95.16 \text{ m}$,全窑总长取 96m,分为个 48 标准节,每节长 2m。

3.2.6 全窑各带长的确定

有烧成时间可知,各个段时间为 6、5、8 小时,据此预热带 15 节,烧成带 12 节,冷却带 21 节

各段长度及所占比例

预热带 15 节 $15 \times 2 = 30 \text{ m}$, 占总长 $30/96 = 31.25\%$

烧成带 12 节 $12 \times 2 = 24 \text{ m}$, 占总长 $24/96 = 25.0\%$

冷却带 21 节 $21 \times 2 = 42 \text{ m}$, 占总长 $42/96 = 43.75\%$

各个温度段对应长度下表

温度 (°C)	烧成阶段	长度 (m)	节数
20~300	预热带	10	1~5
300~600	预热带	10	6~10
600~950	预热带	10	11~15
950~1320	烧成带	16	16~23
1320~1320	烧成带 (高火保温)	8	24~27
1320~800	冷却带 (急冷带)	8	28~31
800~400	冷却带 (缓冷带)	22	32~42
400~80	冷却带 (快冷带)	12	43~48

4、工作系统的确定

4.1 预热带工作系统的确定

预热带 15 节, 1~6 节为排烟, 第 1 节前半节两侧墙及窑顶设置一道封闭气幕, 气幕风由冷却带抽来的热空气提供。后半节上部和下部各设 1 对排烟口。目的是使窑头气流压力自平衡, 以减少窑外冷空气进入窑体。第 2, 3, 4, 5, 6 节每节在窑车台面棚板通道处各设 2 对排烟口, 尺寸: 260*230mm 位置正对。

另外, 为方便调节预热带温度, 尽量减少上下温差, 在第 7~15 节上部设置喷风管, 下部设置高速调温烧嘴 (即上风下嘴结构), 同时烧嘴的正对面是观火孔 (尺寸 $\Phi 67$), 每节设 1 根喷风管 (尺寸 $\Phi 65$), 1 只高速调温烧嘴, 每节交替排列, 高速调温烧嘴喷出的热烟气与喷风管喷出风在窑内断面上形成气流循环, 使窑内气流实现激烈的搅动, 促进上下温度场的均匀, 而且加快了窑内的对流传热, 缩短烧成时间。

4.2 烧成带工作系统布置

第 16 节到第 27 节为烧成带, 第 16, 17, 18 节, 每节设置 2 支烧嘴, 上下部分别是 1 烧嘴和 1 观火孔, 19, 20 节上下分别 2 观火孔和 2 烧嘴。21~27 节上下部均有高速调温烧嘴, 上部设置 2 只烧嘴和 2 只观火孔, 下部设置 4 只烧嘴和 4 只观火孔, 上下部设置与窑墙均呈现交错布置, 共 56 支。烧嘴和观火孔一一正对。

4.3 冷却带工作系统布置

冷却带按照烧成工艺分成三段:

第 28~33 节为急冷段。该段采用喷入急冷风直接冷却方式, 除急冷首节只在后半节设

冷风喷管（尺寸 $\Phi 67$ ）（上设 3 个，下设 3 个）外，其余每节上部设 6 个冷风喷管，下部 6 个冷风喷管，上下喷管交错设置，前后正对，每侧共 15 个。

第 34~42 节为缓冷段。本设计中采用直接间壁冷却的方法，。

第 43~48 节为快冷段。第 26~28 节上下部各设 1 对冷风喷管，交错排列，尺寸 $\Phi 67$ ，共 24 支，通过喷管鼓入冷风直接对窑内的制品进行冷却，以保证制品的出窑温度低于 80℃。

5、窑体的确定

5.1 窑体

窑体由窑墙主体、窑顶和钢架组成窑体材料由外部钢架结构（包括窑体加固系统和外观装饰墙板）和内部耐火隔热材料衬体组成。砌筑部分，均采用轻质耐火隔热材料。窑墙、窑顶和窑车衬体围成的空间形成窑炉隧道，制品在其中完成烧成过程。

5.2 钢架

每一钢架长度为 2 米，含钢架膨胀缝。全窑共 48 个钢架结构，其高度、宽度随窑长方向会有所改变。钢架主要由轻质方钢管、等边角钢等构成，采用焊接工艺，并在焊接处除去焊渣、焊珠，并打磨光滑。窑墙直接砌筑在钢板上，钢架承担着窑墙和窑顶及附属设备的全部重量。

5.3 窑墙

窑墙采用轻质耐火隔热材料。常用材质如下：石棉板、轻质粘土砖、硅藻土砖、普通硅酸耐火纤维板、含铬耐火纤维毡、轻质高铝砖、矿渣棉等耐火材料。窑墙砌筑在钢架结构上。每隔 2 米留设 20mm 左右的热膨胀缝，用含铅散棉填实。窑墙最外面用 10mm 厚的石棉板（为方便画图，画图时没有考虑灰缝的长度）。

5.4 窑顶

窑顶是由吊顶板或吊顶砖和角钢或细钢筋等组成的平顶结构。角钢直接焊接

在窑顶钢架上,细钢筋则是做成钩状挂在窑顶钢架上。吊顶板或吊顶砖与角钢或细钢筋紧固。这样,窑顶的重量也由钢架承担。

在窑顶上,铺厚度适宜的保温棉和耐火棉,窑体材料的轻质化,可大大减少窑体蓄热。

5.5 测温、测压孔

温度控制:为了严密监视及控制窑内温度和压力制度,及时调节烧嘴的开度,一般在窑道顶及侧墙留设测温孔安装热电偶。本设计中分别布置于

1, 5, 10, 15, 20, 24, 27, 31, 41, 47 标准节窑顶中部各设置一处测温孔,共 10 支。因此在烧成曲线的关键点,如窑头、氧化末段、晶型转化点、成瓷段、急冷结束等都有留设。

压力控制主要靠调节烟气、空气等流量来实现。布置压力计于
3, 10, 15, 24, 27, 31, 41, 47 车位中部,共 7 支。为方便画图,图纸中没有表示出。

,窑墙与窑车之间、窑车与窑车之间做成曲折封闭。曲封面贴一层高温耐火棉。窑车之间要承受推力,所以在窑车接头的槽钢内填充散棉,以防止上下漏气。砂封是利用窑车两侧的厚度约 6~8mm 的钢制裙板,窑车在窑内运动时,裙板插入窑两侧的内装有直径为 1~3mm 砂子的砂封槽内,隔断窑车上下空间。砂封槽用厚度 3mm 左右的钢板制作而成,且留有膨胀缝。在预热带头部缓冷段头部的窑墙上各设置一对加砂斗。

6、窑体材料及厚度的选择

窑体材料及厚度的确定原则:一是要考虑该处窑内温度对窑体的要求,即所选用的材料长期使用温度必须大于其所处位置的最高温度;二是尽可能使窑体散热损失要小;三是要考虑到砖型及外形整齐。下表是各段材料的选择

位置 (温度段)	窑墙			窑顶		
	材质	厚度 (mm)	该段厚度 (mm)	材质	厚度 (mm)	该段厚度 (mm)
排 烟 段 (1-6) (20-300℃)	轻质高铝砖	230	430	轻质粘土吊顶砖	230	380
	高纯型耐火纤维刺毯	200		高纯型耐火纤维刺毯	150	
预热升温段 (7-15) (300-950℃)	轻质高铝砖	230	430	轻质粘土吊顶砖	230	380
	高纯型耐火纤维刺毯	200		高纯型耐火纤维刺毯	150	
烧 成 段 (16-27) (950-1310℃) 急冷段 (28-31) (1310-800℃)	莫来石轻质高铝砖	230	530	莫来石轻质高铝砖	230	530
	含锆型硅酸纤维板	100		含锆型硅酸纤维板	100	
	高纯型耐火纤维刺毯	200		高纯型耐火纤维刺毯	200	
缓 冷 段 (32-42) (800-400℃)	轻质高铝砖	230	430	轻质粘土吊顶砖	230	380
	高纯型耐火纤维刺毯	200		高纯型耐火纤维刺毯	150	
快冷段 (43-48) (400-80℃)	轻质高铝砖	230	430	轻质粘土吊顶砖	230	380
	高纯型耐火纤维刺毯	200		高纯型耐火纤维刺毯	150	

7、燃烧系统计算

7.1 助燃空气量计算

燃料是焦炉煤气，低位发热量 $Q_{\text{net}} = 17400 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$

当煤气的低热值 Q_d 大于 $14650 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ 时，根据《理论空气量和燃烧生成烟气经验计算公式》，

理论空气量：

$$V_{a0} = 0.26Q_{\text{net}}/1000 - 0.25$$

$$= 0.26 \times 17400/1000 - 0.25 = 4.274 \text{ (Nm}^3\text{/Nm}^3\text{)},$$

由于是还原烧成，取空气过剩系数 $\alpha = 1.2$ 则实际需要空气量：

$$V_a = \alpha \times V_{a0} = 1.2 \times 4.274 = 5.13 \text{ (Nm}^3\text{/Nm}^3\text{)}$$

7.2 燃烧产生的烟气量

$$\text{理论烟气量: } V^0 = 0.272 Q_{\text{net}}/1000 + 0.25 = 4.98 \text{ (Nm}^3\text{/Nm}^3\text{)}$$

$$\text{实际烟气量: } V = V^0 + (\alpha - 1) V_{a0} = 4.98 + (1.2 - 1) \times 4.274 = 5.84 \text{ (Nm}^3\text{/Nm}^3\text{)}$$

7.3 燃烧温度计算

燃料的理论燃烧温度，公式如下：

$$T_{\text{th}} = (Q_d + V_a C_{aT} + C_f T_f) / (V C_c)$$

假定空气不预热 $t_a = 20^\circ\text{C}$ 此时 $C_a = 1.30 \text{ kJ/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

焦炉煤气 $t_f = 20 \text{ kJ/Nm}^3$ $C_f = 1.41 \text{ kJ/Nm}^3$

烟气 $t_c = 1210^\circ\text{C}$ $C_c = 1.58 \text{ kJ/Nm}^3$

$$\text{则 } T_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{net}} + C_f \cdot t_f + V_a \cdot C_a \cdot t_a}{V_c}$$

$$= (17400 + 5.13 \times 1.30 \times 20 + 1.41 \times 20) / (5.84 \times 1.58)$$

$$= 1903^\circ\text{C}$$

相对误差 $\varepsilon = (1903 - 1210) / 1903 = 36\% \gg 5\%$

应当再进行计算：

取烟气 $t_c = 1700^\circ\text{C}$ $C_c = 1.65 \text{ kJ/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

$$\text{则 } T_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{net}} + C_f \cdot t_f + V_a \cdot C_a \cdot t_a}{V_c}$$

$$= (17400 + 5.13 \times 1.30 \times 20 + 1.41 \times 20) / 5.84 \times 1.651822.5$$

$$= 1822.5^\circ\text{C}$$

相对误差 $\varepsilon = (1822.5 - 1700) / 1822.5 = 4\% < 5\%$

符合计算要求，即 $T_{th} = 1753.26^\circ\text{C}$ 。

7.4 实际燃烧温度 T_p

隧道窑的高温系数取： $\eta = 0.8$

则 $T_p = T_{th} \times 0.8 = 1402.6^\circ\text{C}$

比制品烧成温度高了 192.6°C 。

所以，空气和燃料可不用事先预热亦可达到烧成温度的要求，即先前的假设是正确可取的。

8、物料平衡计算

由已知得罗汉汤碗的坯料组成 (%)：

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	I. L
70.10	19.65	0.25	0.45	1.05	1.0	1.75	5.72

8.1 每小时烧成制品的质量 G_m

制品质量为 350g，每车装 252 个，每车制品的质量为 $0.35\text{kg} \times 252 = 88.2\text{kg}$ ，推车速度 = 48 车/19 时 = 2.53 车/时。

$$G_m = \text{推车速度} \times \text{每车装载重量} = 2.53 \times 88.2 = 223.15\text{kg/h}$$

8.2 每小时入窑干坯质量 G_g

$$G_g = G_m \cdot \frac{100}{100 - \text{I.L}} = 223.15 \times \frac{100}{100 - 5.72} = 236.69(\text{kg/h})$$

8.3 每小时入窑湿坯质量 $G_s = G_g \cdot \frac{100}{100 - \omega} = 236.69 \times \frac{100}{100 - 2.1} = 241.77\text{kg/h}$

8.4 每小时蒸发自由水质量 $G_z = G_s - G_g = (241.77 - 236.69)\text{kg/h} = 5.08(\text{kg/h})$

8.5 每小时从精坯中产生 CO_2 的质量

$$G_{CaO} = G_g \times Ca\% = 236.69 \times 0.25\% = 0.592 \text{ kg/h}$$

$$G_{MgO} = G_g \times MgO\% = 236.69 \times 0.45\% = 1.065 \text{ kg/h}$$

$$G_{CO_2} = G_{CaO} \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} + G_{MgO} \times \frac{M_{CO_2}}{M_{MgO}} = 0.592 \times \frac{44}{56} + 1.068 \times \frac{44}{40} = 1.64 \text{ kg/h}$$

8.6 每小时从精坯中排除的结构水质量

$$G_i = G_g \times I.L\% - G_{CO_2} = 236.69 \times 5.72\% - 1.64 = 11.9 \text{ kg/h}$$

8.7 每小时入窑窑具质量 G_b

棚板每层 63，共 252 个，支柱 80 个，共 $80 \times 3 = 240$ 个

$$\text{单个棚板质量} = 210 \times 210 \times 10 \times 10^{-6} \times 2.2 = 0.9702 \text{ kg}$$

$$\text{单个支柱的质量} = 50 \times 50 \times 150 \times 10^{-6} \times 2.2 = 0.825 \text{ kg}$$

$$\text{棚板重量} = 0.9702 \times 252 = 244.49 \text{ kg}$$

$$\text{支柱质量} = 240 \times 0.825 = 198 \text{ kg}$$

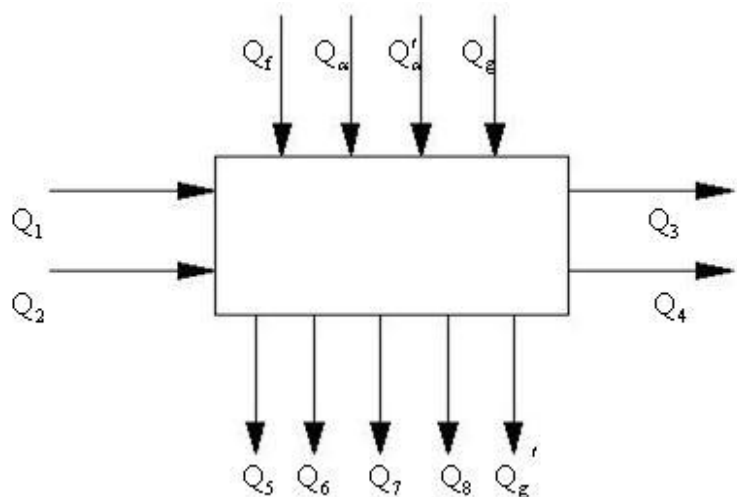
$$\text{窑具质量 } G_b = (244.49 + 198) \times 2.53 = 1119.50 \text{ kg/h}$$

9、预热带及烧成带热平衡计算

9.1 热平衡计算基准及范围

热平衡计算以 1h 为基准，0℃为基准温度。

9.2 热平衡框图



其中：

Q_1 ——制品带入的显热；

Q_2 ——窑具带入的显热；

Q_f ——燃料带入的化学热和显热；

Q_α ——助燃空气带入的显热；

Q'_α ——预热带漏入空气带入的显热；

Q_g ——气幕、搅拌风带入的显热；

Q_3 ——产品带走的显热；

Q_4 ——窑具带走的显热；

Q_5 ——窑墙、窑顶带走的显热；

Q_6 ——窑车蓄热和散失热量；

Q_7 ——物化反应耗热；

Q_8 ——其他热损失；

Q'_g ——烟气带走的显热；

Q_f ——燃料带入的化学显热

9.3 热收入项目

9.3.1 胚体带入的显热

$$Q_1 = G_s \times c_1 \times t_1 (\text{kJ/h})$$

其中： G_s ——入窑湿制品的质量 241.77 (kg/h)；

t_1 ——入窑制品的温度 20℃；

c_1 ——入窑制品的平均比热 (kJ/(kg·℃))。一般取 0.84-1.26, 此处取

0.90 kJ/(Nm³·℃)，则胚体带入的显热：

$$Q_1 = 241.77 \times 20 \times 0.9 = 4351.86 \text{ kJ/h}$$

9.3.2 棚板及支柱带入的显热 Q_2

$$Q_2 = G_b t_2 c_2$$

其中:

G_b ——入窑棚板及支柱的质量 1119.50kg/h;

t_2 ——入窑棚板及支柱的温度 20℃;

c_2 ——入窑棚板及支柱的平均比热, 取 0.75kJ/kg. °C

$$Q_2 = 1119.5 \times 0.75 \times 20 = 16792.5 (\text{kJ/h})$$

9.3.3 燃料带入的化学显热

$$Q_f = (Q_d + t_f t_f) x (\text{kJ/h})$$

其中:

Q_d ——焦炉煤气的低位发热量 17400 kJ/Nm³;

t_f ——入窑燃温度 20℃;

c_f ——入窑燃料的平均比热 1.41 kJ/(kg • °C)

X 为每小时柴油的消耗量, 单位 Nm³/h

$$Q_f = (17400 + 20 \times 1.41) x = 17428.2x (\text{kJ/h})$$

9.3.4 助燃空气带入的显热 Q_a

焦炉煤气燃烧的空气量 $V_a = x L_a = 5.13x$

$$Q_a = V_a c_a t_a$$

t_a ——助燃空气的温度 20℃;

c_a ——助燃空气的比热 1.29 kJ/(Nm³ • °C);

$$Q_a = 5.13 \times 20 \times 1.29x = 132.4x (\text{kJ/h})$$

9.3.5 从预热带不严密漏入的空气带入的显热 Q'_a 和

$$Q'_a = V'_a * c'_a * t'_a$$

其中:

t'_a 、 c'_a ——漏入空气 的温度与比热,

分别为 20℃ 和 1.29 kJ/(Nm³ • °C);

α_g ——离窑烟气中的空气过剩系数，此值与窑厂的长度‘阻力、空气、气密性以及预热带喷入的风量有关，实际可在 2-5 范围取，此处取 2.5，

$$\alpha_f = 1.2 \quad V_{a0} = 4.274 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3$$

$$\text{每小时漏入空气量 } V'_a = X * (\alpha_g - \alpha_f) * V_a^0 = X * 5.56 \text{ Nm}^3 / \text{h};$$

$$Q'_a = V'_a * c'_a * t'_a = X * 143.45 \text{ kJ/h}$$

9.3.6 气幕空气带入显热 Q_m

气幕包括封闭气幕和搅拌气幕，封闭气幕设在窑头，不及入，搅拌风源为空气，风量一般为理论助燃空气的 0.5-1 倍
本设计封闭气幕，气氛幕风源为窑冷却带抽出的热空气。取气氛气幕为理论助燃空气量的 0.6 倍

$$\text{所以: } V_m = 0.6 \times 4.27 = 2.56 \text{ Nm}^3$$

$$\text{设 } t_m = 200^\circ\text{C} \quad \text{查得 } C_m = 1.308 \text{ kJ} / \text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C};$$

$$Q_m = V_m \times c_m \times t_m \quad X = 669.7 \text{ kJ/h.}$$

9.4 热支出 9.4 热支出

9.4.1 制品带出显热 Q_3

离开烧成带制品的热数据:

温度 $t_3 = 1320^\circ\text{C}$;

比热 $c_3 = 1.2 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$;

烧成制品质量 $G_3 = 223.15 \text{ kg/h}$;

$$\text{则 } Q_3 = G_3 * c_3 * t_3 = 353469.6 \text{ kJ/h.}$$

棚板和立柱带走的显热

$$Q_4 = G_b c_4 t_4 \quad (\text{kg/h})$$

其中:

棚板和立柱的质量 $G_b = 1119.50 \text{ kg/h}$

c_4 、 t_4 ——分别是棚板和立柱带走时的平均比热和温度， $t_4 = 1320^\circ\text{C}$

$$Q_4 = 1119.5 \times 1320 \times 1.188 = 1755555.12 \text{ (kg/h)}$$

9.4.3 烟气带走显热 Q_g

烟气包括燃料燃烧产生的烟气、预热带从不严密处漏出烟气，还有用于气幕的空气，其中气幕空气体积有冷却带热平衡计算：

$$V_m = 2.56 \text{ Nm}^3/\text{h}.$$

离窑烟气热数据：

$$\text{温度 } t_g = 250^\circ\text{C};$$

$$\text{比热 } c_g = 1.32 \text{ kJ/ Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C};$$

$$\text{体积 } V_g = [V_g^o + (\alpha_g - 1) * V_a^o] * X + V_m = \text{Nm}^3/\text{h};$$

$$\text{则 } Q_g = V_g * c_g * t_g = 2004.75 * X + 330 * V_m.$$

9.4.4 窑车积散热 Q_6

采用经验计算方法：窑车积散热占总热收入的 25%。

9.4.5 通过窑墙窑顶散失的热 Q_5

因各段窑墙窑顶的筑炉材料不尽相同，因此各段散热应加以分别计算。

9.4.6 物化反应耗热 Q_7

$$G_w = G_s - G_g = 241.77 \text{ kg/h} - 236.69 \text{ kg/h} = 5.08 \text{ kg/h}$$

自由水的质量 $G_w = 5.08 \text{ kg/h}$ ，离窑烟气温度 $t_g = 200^\circ\text{C}$ ，则自由水蒸发吸热

$$Q_w = G_w (2490 + 1.93 t_g) = 5.08 \times (2490 + 1.93 \times 200) = 14610.08 \text{ (kg/h)}$$

结构水脱水吸热

$$Q'_w = 6700 G'_w$$

其中： G'_w ——入窑制品所含结构水 7.9 (kg/h) ；

6700 ——1kg 结构水脱水所需要的热 kJ/kg ；

$$Q'_w = 6700 \times 7.9 = 52930 \text{ (kg/h)}$$

其它物化反应吸热

此项热支出要根据原材料的组成情况查阅有关资料，由于陶瓷烧成反应极为复杂，通常可用 Al_2O_3 反应热近似地代替，即

$$Q_r = G_r \times 2100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \%$$

其中：

G_r 入窑干制品质量, 236.69 kg/h;

2100——1kg Al_2O_3 的反应热, kg/h;

Al_2O_3 ——制品中 Al_2O_3 的含量百分数。

可算的 $Q_r = 236.69 \times 2100 \times 0.1965 = 97670.13$ (kg/h)

总物化反应热

$$Q_7 = Q_w + Q_w' + Q_r = 14610.08 + 52930 + 97670.13 = 165210.21 \text{ (kg/h)}$$

9.4.6 其它热损失 Q_8

其它热损失主要包括窑各处开孔的辐射热损失、窑不严密处逸出气体的热损失、不完全燃烧造成的热损失等, 这些热损失量很难用公式计算, 可对比现有同类型的窑加以确定, 一般占总热收入的 5%-10%。取 5%

9.4.7 窑墙和窑顶的散热

根据所处温度不同将预热带和烧成带分成三段 20~300℃, 300~600℃, 600~950℃, 950~1320℃

所用材料的导热系数:

高纯型耐火纤维针刺毯 0.02+0.000175t

轻质高铝砖 0.212+0.000329t

莫来石轻质高铝砖 0.310+0.000176t

含锆型硅酸铝纤维板 0.18

轻质粘土吊顶砖 0.0815+0.000221t

20~300℃, 共 5 节, 10m

$$\text{窑内壁平均壁温 } t_1 = \frac{20+300}{2} = 160^\circ\text{C}$$

$$\text{轻质高铝砖 } \lambda_1 = 0.212 + 0.000329 \times 160 = 0.2642 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{高纯型耐火纤维针刺毯 } \lambda_2 = 0.02 + 0.000175 \times 160 = 0.048 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{160 - 40}{\frac{0.23}{0.2642} + \frac{0.2}{0.048}} = 25.15 \text{ w/m}^2$$

$$\text{散热面积: } A = 10 \times 1.34 = 13.4 \text{ m}^2$$

$$\text{散热量: } Q = 25.15 \times 13.4 \times 2 \times 3.6 = 2426.472 \text{ (kJ/h)}$$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.0815 + 0.000221 \times 160 = 0.1169 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维针刺毡 $\lambda_2 = 0.02 + 0.000175 \times 160 = 0.048 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{160 - 40}{\frac{0.23}{0.1169} + \frac{0.15}{0.048}} = 23.56 \text{ w/m}^2$$

散热面积: $A = 10 \times 2.92 = 29.2 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 29.2 \times 23.56 \times 3.6 = 2476.63 \text{ (kJ/h)}$

300~600℃, 共 5 节, 10m

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{300 + 600}{2} = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$,

轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.212 + 0.000329 \times 450 = 0.36 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维针刺毡 $\lambda_2 = 0.02 + 0.000175 \times 450 = 0.099 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{450 - 40}{\frac{0.23}{0.36} + \frac{0.2}{0.099}} = 154.2 \text{ w/m}^2$$

散热面积: $A = 10 \times 1.34 = 13.4 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 154.2 \times 13.4 \times 2 \times 3.6 = 14877.216 \text{ (kJ/h)}$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.0815 + 0.000221 \times 450 = 0.18 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维针刺毡 $\lambda_2 = 0.02 + 0.000175 \times 450 = 0.099 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{450 - 40}{\frac{0.23}{0.18} + \frac{0.15}{0.099}} = 146.8 \text{ w/m}^2$$

散热面积: $A = 10 \times 2.92 = 29.2 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 29.2 \times 146.8 \times 3.6 = 15431.616 \text{ (kJ/h)}$

600~950℃, 共 5 节, 10m

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{600 + 950}{2} = 775 \text{ }^\circ\text{C}$,

轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.212 + 0.000329 \times 775 = 0.467 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维针刺毡 $\lambda_2 = 0.02 + 0.000175 \times 775 = 0.156 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{775 - 40}{\frac{0.23}{0.47} + \frac{0.2}{0.156}} = 414.9 \text{ W/m}^2$$

散热面积: $A = 10 \times 1.34 = 13.4 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 414.9 \times 13.4 \times 2 \times 3.6 = 40029.552 \text{ (kJ/h)}$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.0815 + 0.000221 \times 775 = 0.253 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维针刺毡 $\lambda_2 = 0.02 + 0.000175 \times 775 = 0.156 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{775 - 40}{\frac{0.23}{0.253} + \frac{0.15}{0.156}} = 392.9 \text{ W/m}^2$$

散热面积: $A = 10 \times 2.92 = 29.2 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 29.2 \times 392.9 \times 3.6 = 34679.088 \text{ (kJ/h)}$

950~1320℃, 共 8 节, 16m

窑内平均壁温 $t_1 = \frac{950 + 1320}{2} = 1135 \text{ }^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖的 $\lambda_1 = 0.5098 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

含锆型硅酸纤维板的 $\lambda_2 = 0.19 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维刺毯的 $\lambda_3 = 0.2186 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

取窑外壁平均温度 $t_a = 80^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1135 - 80}{\frac{0.23}{0.5098} + \frac{0.1}{0.19} + \frac{0.2}{0.2186}} = 557.52 \text{ W/m}^2$$

散热面积: $A = 16 \times 1.34 = 21.44 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 557.52 \times 21.44 \times 2 \times 3.6 = 86063.25 \text{ (kJ/h)}$

窑顶:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1135 - 80}{\frac{0.23}{0.5098} + \frac{0.1}{0.19} + \frac{0.2}{0.2186}} = 557.52 \text{ W/m}^2$$

散热面积: $A = 16 \times 3.12 = 49.92 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 49.92 \times 557.52 \times 3.6 = 100193.03 \text{ (kJ/h)}$

$$Q_5 = 2426.472 + 2476.63 + 14877.216 + 15431.616 +$$

$$\begin{aligned} \text{窑墙窑顶总散热量} &= 400029.552 + 34679.088 + 86063.25 + 100193.03 \\ &= 296176.85 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

9.5 列出热平衡方程式

列出平衡方程式

$$\begin{aligned} Q_{\text{收}} &= 4351.86 + 16792.5 + 17428.2x + 132.4x + 142.45x + 669.7x \\ &= 21144.36 + 18372.7x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{损}} &= 2004.75x + 330 + 35346.96 + 175555.12 + 165210.21 + 0.25Q_{\text{收}} + 296176.85 + 0.05Q_{\text{收}} \\ &= 7315.65x + 2258962.45 \end{aligned}$$

式有 $Q_{\text{收}} = Q_{\text{损}}$, 解得 $x = 202.39$, 即单位时间焦炉煤气消耗量: $B = 202.39 \text{ m}^3/\text{h}$

9.6 列出预热带和烧成带热平衡表

热收入			热支出		
项目		百分比 (%)	项目	kJ/h	百分比 (%)
胚体带入的	4351.86	0.12	制品带出的	353469.6	8.9

显热			显热		
入窑棚板及支柱带入到的显热	16792.5	0.62	棚板和支柱	1755555.12	49.8
燃料带入的化学显热	3527293.4	97.20	其他热损失	186990.381	18.00
助燃空气带入的显热	26796.436	0.81	窑车蓄热和热散失量	934851.9	10.00
漏入的风和搅拌风	29032.85	0.75	物化反应热	165210.21	4.96
气幕和搅风	135540.58	0.50	窑墙和窑顶	296176	8.3
总收入量			总散热量		
0	3739807.626	100	0	3692253.211	99.96

分析:

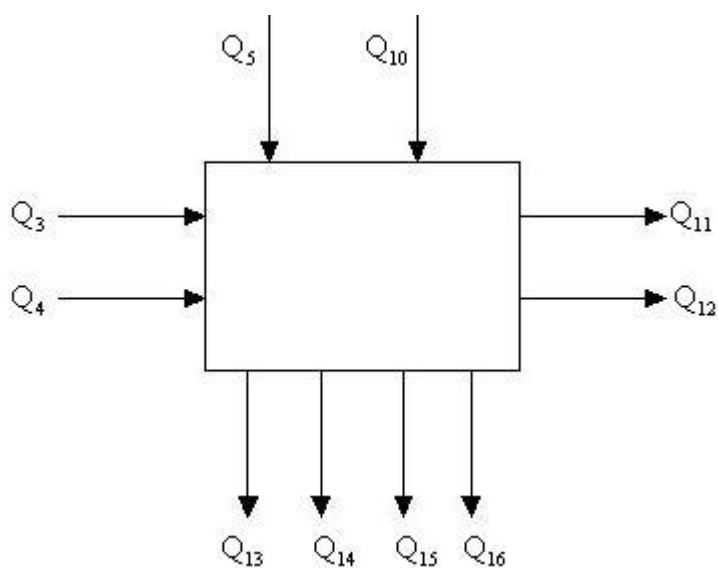
两者之间存在差值,是因为预热带窑内负压在该次计算中忽略了窑底漏入窑内风带来的热量,实际上虽然窑车上下压力控制手段非常完善,但仍有误差,由于误差不大所以整个预热带、烧成带热量可认为是收支平衡的。

10、冷却带的平衡计算

10.1 确定热平衡计算的基准、范围

0℃作为基准温度, 1h 为质量与热量的时间基准。

10.2 平衡框图



其中：

Q_3 ——制品带入的显热；

Q_4 ——棚板、支柱带入显热；

Q_5 ——窑车带入的显热；

Q_{10} ——急冷风带入的显热和冷却带末端送入冷却带带入显热；

Q_{11} ——制品带出显热；

Q_{12} ——棚板、支柱带出的显热；

Q_{13} ——窑车、窑顶散热；

Q_{14} ——窑墙、窑顶总散热；

Q_{15} ——抽走余热风带走的热量；

Q_{16} ——其他热损失。

10.3 热收入项目

10.3.1 制品带入的显热

此项热量即为制品从烧成带带出的显热 $Q_3 = 353469.6 \text{ (kJ/h)}$

10.3.2 棚板和支柱带入的显热，同上， $Q_4 = 1755555.12 \text{ (kJ/h)}$

10.3.3 窑车带入的显热

此项热量可取烧成带和预热带窑车总散热的95%（其余的已经在预热带烧成带向车下散失）

$$Q_9 = 95\% Q_6 = 0.95 \times 276982 = 281366 \text{ (kJ/h)}$$

10.3.4 急冷风和窑尾风带入的显热

窑尾的风量设为 V_x ，一般急冷风量为窑尾风量的0.25~0.5，此处取0.5，总风量为 $1.5 V_x$ 。

空气的温度 $t_a = 20^\circ\text{C}$ ，此时空气的比热： $c_a = 1.3 \text{ kJ/m}^3\text{C}$ ，

$$Q_{10} = V_a c_a t_a = 1.5 \times 1.3 \times 20 V_x = 39 V_x \text{ (kJ/h)}$$

10.4 热支出项目

10.4.1 制品带出的显热

出窑制品质量 $G_m = 223.15 \text{ kg/h}$ ，窑制品的温度 $t_{11} = 80^\circ\text{C}$ ，比热 $c_{11} = 0.905 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

$$Q_{11} = G_m t_{11} c_{11} = 223.15 \times 80 \times 0.905 = 16156.06 \text{ (kJ/h)}$$

10.4.2 和支柱带出的显热

棚板和支柱质量 $G_b = 1119.5 \text{ kg/h}$ ，温度 $t_{11} = 80^\circ\text{C}$ ，比热 $c_{12} = 0.75 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

$$Q_{12} = G_b c_{12} t_{12} = 1119.50 \times 80 \times 0.75 = 67170 \text{ (kJ/h)}$$

10.4.3 车带走的和想车下散失的热

此项热量一般可按窑车带入的显热55%计算，

$$Q_{13} = 55\% Q_9 = 0.55 \times 263133 = 144723 \text{ (kJ/h)}$$

10.4.4 其他热损失 Q_{16}

取经验数据，占冷却带热收入的5%—10%，本次计算取5%

10.4.5 抽走余热风带走热量 Q_{15}

$$Q_{15} = q_{15} \times c_{15} \times t_{15}$$

其中： q_{15} —抽走余热风流量 (m^3/h)，该窑不用冷却带热空气做二次空气，冷却带鼓入风量全部用于气幕，体积为 $q_{15} = 1.5 V_x \text{ Nm}^3$ 。漏出空气忽略不记，抽走余热风的平均温度，

取 $t_{15}=250^{\circ}\text{C}$ ， c_{15} 热空气的平均比热为， $c_{15}=1.038\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$

$$Q_{15}=1.5V_x \times 250 \times 1.038 = 389.25V_x$$

10.4.6 窑墙和窑顶的散热

分三段 17~19，20~25，26~28

1310~850 $^{\circ}\text{C}$ ，长 6m

$$\text{窑内平均温度 } t_1 = \frac{1310 + 850}{2} = 1080^{\circ}\text{C}$$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1=0.569\text{w/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

含锆型硅酸铝纤维板 $\lambda_2=0.19\text{w/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

高纯型耐火纤维刺毯 $\lambda_3=0.2099\text{w/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

取窑外平均温度 $t_a = 80^{\circ}\text{C}$

窑墙：

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1080 - 80}{\frac{0.23}{0.569} + \frac{0.1}{0.19} + \frac{0.2}{0.2099}} = 533.6\text{ w/m}^2$$

$$\text{散热面积 } A = 6 \times 1.34 = 8.04\text{m}^2$$

$$\text{散热量： } Q = 533.6 \times 8.016 \times 2 \times 3.6 = 30796.8\text{ (kJ/h)}$$

窑顶：

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1080 - 80}{\frac{0.23}{0.569} + \frac{0.1}{0.19} + \frac{0.2}{0.2099}} = 533.6\text{ w/m}^2$$

$$\text{散热面积 } A = 6 \times 1.34 = 8.04\text{m}^2$$

$$\text{散热量： } Q = 533.6 \times 18.72 \times 3.6 = 35960.4\text{ w/m}^2$$

20~25，800~400 $^{\circ}\text{C}$ ，12m

$$\text{窑内平均壁温 } t_1 = \frac{800 + 400}{2} = 600^{\circ}\text{C}$$

轻质高铝砖的 $\lambda_1=0.4176\text{w/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

高纯型耐火纤维刺毯的 $\lambda_2=0.1294\text{w/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

窑外壁平均取 $t_a = 80^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{600 - 80}{\frac{0.23}{0.4176} + \frac{0.2}{0.1294}} = 259.96 \text{ w/m}^2$$

散热面积: $A = 12 \times 1.34 = 16.08 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 259.97 \times 16.08 \times 2 \times 3.6 = 30008.4 \text{ (kJ/h)}$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.0815 + 0.000221 \times 625 = 0.2196 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维刺毯的 $\lambda_2 = 0.1294 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{600 - 80}{\frac{0.23}{0.2196} + \frac{0.15}{0.1294}} = 247 \text{ w/m}^2$$

散热面积: $A = 12 \times 2.92 = 35.04 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 247 \times 35.04 \times 3.6 = 31157.568 \text{ (kJ/h)}$

26~28, $400 \sim 80^\circ\text{C}$, 6m

窑内平均壁温 $t_1 = \frac{400 + 80}{2} = 240^\circ\text{C}$

轻质高铝砖的 $\lambda_1 = 0.4008 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维刺毯的 $\lambda_2 = 0.062 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均取 $t_a = 80^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{240 - 80}{\frac{0.23}{0.291} + \frac{0.2}{0.062}} = 39.84 \text{ w/m}^2$$

散热面积: $A = 6 \times 1.34 = 8.04 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 39.84 \times 8.04 \times 2 \times 3.6 = 2299 \text{ (kJ/h)}$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.0815 + 0.000221 \times 240 = 0.13454 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

高纯型耐火纤维刺毯的 $\lambda_2 = 0.062 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{240 - 80}{\frac{0.23}{0.1345} + \frac{0.15}{0.062}} = 38.75 \text{ W/m}^2$$

散热面积: $A = 6 \times 2.92 = 12.52 \text{ m}^2$

散热量: $Q = 38.75 \times 12.52 \times 3.6 = 2444 \text{ (kJ/h)}$

总 散 热 量

$$Q_{14} = 30796.8 + 35960.4 + 31157.568 + 30008.4 + 2299 + 2444 = 132666.168 \text{ (kJ/h)}$$

10.5 热平衡方程式

列出平衡方程式 $Q_3 + Q_4 + Q_9 + Q_{10} = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15} + Q_{16}$

$$Q_{\text{收}} = 247852 + 1380396 + 263133 + 39V_x$$

$$Q_{\text{支}} = 13072 + 61206.8 + 132666.168 + 144723 + 389.25V_x + 5\%Q_{\text{收}}$$

由 $Q_{\text{收}} = Q_{\text{支}}$, 解得 $V_x = 4103.2 \text{ (m}^3/\text{h)}$

因此窑尾的风量为 $4103.2 \text{ m}^3/\text{h}$, 急冷风量 $2051.6 \text{ m}^3/\text{h}$, 每小时应抽出热风 6154.8 m^3 。

10.6 热平衡表

热 收 入			热 支 出		
项 目	(kJ/h)	(%)	项 目	(kJ/h)	(%)
制品带入显热	247852	12.08	产品带出显热	13072	0.64
棚板立柱带入显	1380396	67.2	棚板立柱带出显热	61206.8	2.98

热		9			
窑车带入显热	263133	12.8	窑体散热	132666.16	6.47
		3		8	
急冷窑尾风带入显热	39V _x 160024.8	7.86	窑车带走和向下散失显热	144723	7.05
			抽热风带走显热	389.25V _x 1597170.6	77.8
			其它散热	102570.4	5
合 计	2051405.8	100	合 计	2051409	100

分析：
热
平衡分
析：从
上面热

平衡列表可以看出，热收入与热支出基本保持平衡，而热支出大于热收入是因为窑底冷风带入显热要大于现在的计算值。主要的热支出是抽出的热空气带走的显热，为了节能，提高热效率往往要充分利用，冷却带余热可以用它去干燥坯体。

11、排烟系统的设计

11.1 排烟系统的设计

11.1.1 排烟量的计算

取离窑烟气中空气过剩系数 $\alpha_g = 2.5$ ，则其体积流量为：

$$V_g = (V_{g0} + (\alpha_g - \alpha) L_0) \times x = (14.39 + (2.5 - 1.3) \times 10.36) \times 64.43 = 1728.14 \text{ m}^3/\text{h} = 0.48 \text{ m}^3/\text{s}。$$

11.1.2 排烟口及烟道的尺寸

共有 6 对排烟口，则每支排烟口的烟气流量：

$$q_v = 0.48/12 = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$$

标准状态下烟气在砖砌管道中的流速为 1~2.5m/s，流速太大则阻力大，流速太小则管道直径过大，造成浪费。现在取流速 $v = 1.5 \text{ m/s}$ ，烟道截面积为：

$$A = 0.04/1.5 = 0.027 \text{ m}^2$$

排烟口尺寸设计为 高×宽为 180×150mm，为以后可便于烧成其他制品时控制烟气量及砌筑方便，此处设计为 210×180mm。

11.1.3 垂直支烟道

烟气有排烟口至垂直支烟道流量不变，流速相同，截面积也相同，故为 $180 \times 160\text{mm}$ ，垂直高度和窑车台面至窑顶距离高度相等 1.947m 。

11.1.4 总烟管尺寸

烟气在管内的流速取 5m/s

$$\text{内径: } d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.48}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.48}{3.14 \times 5}} = 0.35\text{m}, \text{ 取直径为 } 450\text{mm}, 6\text{m 长}。$$

11.1.5 支烟管尺寸

$$\text{支烟道的流量 } 0.0292\text{m}^3/\text{s}, \text{ 流速为 } 1.5\text{m/s}, \text{ 内径: } d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.026}{3.14 \times 1.5}} = 0.157\text{m}, \text{ 取直}$$

径为 200mm ，每个垂直排烟道对应一个金属支烟管道，其高度为 30mm ，具体高度以实际为准， 90° 取长 100mm 直接进入横跨在窑体上部中间的总烟管道。

12、烧嘴的选型

全窑共有 38 个烧嘴，且每小时燃料的消耗量为 64.43m^3 ，考虑每个烧嘴的燃烧能力和烧嘴燃烧的稳定性，取安全系数 1.5，所以每个烧嘴的燃料消耗为：

$$\frac{64.43}{38} \times 1.5 = 2.54\text{m}^3/\text{h}$$

烧嘴的热负荷： $2.54 \times 41800 = 106309.5\text{kJ/h}$

烧嘴的选用能适应和满足生产需要即可，应尽量避免不必要的浪费。其次，选用烧嘴必须和烧嘴的使用结合起来，在规定的负荷内保证火焰的稳定性，即不要脱火也不要回火，并要保证在规定的条件下燃料完全燃烧

由于本设计的烧成带窑内宽达到 2060mm ，为了保证断面温度的均匀与稳定，通过资料查询选用广东施能燃烧设备有限公司生产的型号为 SI0-200 烧嘴，其主要参数为：火焰长度 $1100\text{mm}-2400\text{mm}$ ，出口速度为 80m/s ，燃气压力 2000Pa ，助燃空气压力 4200Pa 。

此烧嘴不需要专门的燃烧室，烧嘴砖直接砌筑在窑墙上即可。

13、工程材料概算

13.1 窑体材料概算

13.1.1 窑墙材料

13.1.1.1 密度为 1.0 的轻质粘土砖用量为

$$(\text{该段窑长} \times \text{墙高} \times \text{该材料厚}) \times 2 = 30 \times 1.072 \times 0.115 \times 2 = 7.39\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 7.39 \times 1.0 = 7.39\text{t}$$

13.1.1.2 密度为 1.5 的轻质高铝砖用量为:

$$(\text{该段窑长} \times \text{墙高} \times \text{该材料厚}) \times 2$$

$$= 30 \times 1.072 \times 0.23 \times 2 + 44 \times 1.172 \times 0.15 \times 2 = 21.24\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 21.24 \times 1.5 = 31.86\text{t}$$

13.1.1.3 密度为 0.13 的硅酸铝纤维毯用量为:

$$(\text{该段窑长} \times \text{墙高} \times \text{该材料厚}) \times 2$$

$$= 30 \times 1.072 \times 0.05 \times 2 + 44 \times 1.172 \times 0.15 \times 2 = 9.66\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 9.66 \times 0.13 = 1.25\text{t}$$

13.1.1.4 密度为 0.25 的硅钙板用量为:

$$(\text{该段窑长} \times \text{墙高} \times \text{该材料厚}) \times 2 = 36 \times 1.072 \times 0.02 = 0.77\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 0.77 \times 0.25 = 0.19\text{t}$$

13.1.1.5 密度为 1.0 的 JM26 莫来石砖用量为:

$$(\text{该段窑长} \times \text{墙高} \times \text{该材料厚}) \times 2 = 44 \times 1.172 \times 0.23 = 11.86\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 11.86 \times 1.0 = 11.86\text{t}$$

13.1.2 窑顶材料

13.1.2.1 密度为 1.0 的 JM26 莫来石吊顶砖用量为:

$$\text{该段窑长} \times \text{顶宽} \times \text{该材料厚} = 36 \times 3.17 \times 0.23 = 26.24\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 26.24 \times 1.0 = 26.24\text{t}$$

13.1.2.2 密度为 0.13 的硅酸铝纤维毯用量为:

$$\text{该段窑长} \times \text{顶宽} \times \text{该材料厚} = 36 \times 3.17 \times 0.1 = 11.38\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 11.38 \times 0.13 = 1.48\text{t}$$

13.1.2.3 密度为 0.11 的岩棉毯用量为:

$$\text{该段窑长} \times \text{顶宽} \times \text{该材料厚} = 72 \times 3.17 \times 0.1 = 22.82\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 11.38 \times 0.11 = 1.48\text{t}$$

13.1.2.4 密度为 0.15 含锆纤维毯用量为:

$$\text{该段窑长} \times \text{顶宽} \times \text{该材料厚} = 44 \times 3.17 \times 0.1 = 13.95\text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 13.95 \times 0.15 = 2.1\text{t}$$

13.1.2.5 含锆散棉

用于填塞膨胀缝等其他缝、孔，窑墙的平均厚度为 0.35m，膨胀缝宽为 0.02m，

$$\text{高度为 } 1.072\text{m}, \text{ 所以 } V = 0.35 \times 0.02 \times 1.072 \times 48 = 0.36\text{m}^3$$

以上材料概算为实际用量，均未考虑余量。由于施工时会浪费一部分，因此在购置时要比以上概算量多出约 5% 左右的余量，对用量少的还应多备。

13.1.3 其他材料

热电偶（含瓷管）：20 套。

烧嘴 110 只。

烧嘴砖 110 块。

看火孔（含瓷管和看火孔盖）：110 套。

执行器 8 个。

电磁阀 1 个。

流量计 1 个。

补偿导线 500 米。

自动控制柜（显示仪表、电路已组装完成）1 套。

顶车机 1 套，含备用快（慢）进（退）。

柴油发电机 1 套。

本概算未包括窑炉、回车线、拖车到道基础。

13.2 钢材材料概算

由图纸中的详细计算，得出下列材料图表：

序号	材料名称	规格/尺寸 (mm)	单位	数量
1	钢管	140	m	78
2	钢管	159	m	78
3	钢板	$\sigma=3$	m^2	98
4	方钢管	$100 \times 50 \times 4$	支	480
5	方钢管	$120 \times 60 \times 4$	支	210
6	方钢管	$50 \times 50 \times 3.5$	支	70
7	方钢管	$120 \times 120 \times 4$	支	240
8	角钢	$L63 \times 63 \times 6$	支	190
9	角钢	$L40 \times 40 \times 4$	支	180
10	角钢	$L30 \times 30 \times 4$	支	140
11	钢板	$\delta=1.2\text{mm}$	m^2	250
12	吊顶钩	$\phi 10$	个	3950
13	轨道	15kg/m	m	450
14	轨道垫板	$\sigma=10\text{mm}$	m^2	6
15	窑车底板	$580 \times 630 \times 3$	件	320
16	窑车底板	$980 \times 630 \times 3$	件	320
17	槽钢	10 号	m	930

14、后记

通过本次毕业设计，把大学的课程综合到一起，是一项计算复杂，综合应用课本理论和实践知识，结合以往的参考材料完成的，对专业课程窑炉有了更切实际、具体的深刻认识。

设计中遇到很多需要考虑的因素，由于经验不足，完成过程尤为艰难，借助老师同学以及网络，把真个过程做好，

感谢老师和同学们的知道和帮助。“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行，”没有真正投入的设计中，是不会发现自己的不足，每一步都是一次理论的检验，只有将理论知识应用与实践，才能体现理论价值。以后的实践课程中，要可能多的留心观察，多思考，熟知窑炉各个部件的工作原理，现场检验所学知识。

15、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