

景德镇陶瓷学院

科技艺术学院

本科生毕业设计（论文）

题 目 90M 燃气辊道窑设计

学 号： 201030453118

姓 名： 梁慧汉

院 系： 工程系

专 业： 热能与动力工程

完成时间： 2014 年 5 月

指导教师： 陈功备

摘 要

本设计说明书对所设计的是 90M 长液化石油气辊道窑加以说明。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、传动设计等的计算。

本次设计窑炉的燃料为液化石油气, 在烧成方式上采用明焰裸烧的方法, 既提高了产品的质量和档次, 又节约了能源, 辊子运输可减少窑内装卸制品, 和窑外工序连在一起, 操作方便, 同时具有很高的自动化控制水平, 在燃烧及温度控制上采用 PID 智能仪表, 可以很方便的调节和稳定烧成曲线。

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、传动计算、管道尺寸阻力计算、风机的选型及工程材料概算。

Abstract

This instruction elaborated the roller kiln. The annual production of this roller kiln is 700 thousand square meter porcelain brick. This instruction specifically elaborated the factor should 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 meter, the calculation of heat balance , the pipeline design, the transmission design to the kiln and so on.

This fuel of the kiln is liquefied petroleum gas, it fires product directly. This firing way can improved the quality and scale of the product, saved the energy, and the transportation by roller may reduce loading the product. With the working procedure outside the kiln, It eased the operation. Simultaneously it has the high automation control level. It uses the PID intelligence measuring appliance in firing and the temperature control. It can adjust the firing curve and make the temperature stably conveniently.

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 engineer material

目 录

前 言	8
1 原始资料收集	8
2 窑体主要尺寸的确定	9
2.1 进窑砖坯尺寸	9
2.2 内宽的确定与排砖方法	9
2.3 内高的确定	10
2.4 烧成制度的确定	10
2.5 年产量的确定	10
2.6 各带长度的确定	10
2.7 辊道窑窑头、窑尾工作台长度	12
3 工作系统的确定	12
3.1 排烟系统	12
3.2 燃烧系统	12
3.2.1 烧嘴的设置	13
3.2.2 助燃系统	13
3.2.3 液化石油气输送系统	13
3.3 冷却系统	13
3.3.1 急冷通风系统	14
3.3.2 缓冷通风系统	14
3.3.3 快冷通风系统	14
3.4 温度控制系统	15
3.4.1 热电偶的设置	15
3.4.2 温度仪表选型	15
3.4.3 传动系统	15
3.4.4 辊棒的选择	15
3.4.5 传动装置	16
3.4.6 辊距的确定	16
3.4.7 辊棒的联接形式	17
3.4.8 传动过程	17
4 窑体附属结构	17
4.1 事故处理孔	17
4.2 观察孔与测温口	18
4.3 膨胀缝	18
4.4 下挡墙和上档板	18
4.5 钢架结构	19
4.6 测压孔	19
5 窑体材料确定	19
5.1 窑体材料确定原则	19
5.2 整个窑炉的材料表	19
6 燃料及燃烧计算	20
6.1 理论空气量计算:	21
6.2 烟气量计算	21

6.3	燃烧温度计算.....	21
7	物料平衡计算.....	22
8	热平衡计算.....	23
8.1	热平衡示意图.....	23
8.2	热收入项目.....	24
8.2.1	坯体带入显热 Q_1	24
8.2.2	燃料带入化学热及显热 Q_f	24
8.2.3	助燃空气带入显热 Q_a	24
8.2.4	预热带漏入空气带入显热 Q'_a	24
8.3	热支出项目.....	25
8.3.1	热制品带出显热 Q_2	25
8.3.2	窑体散失热 Q_3	25
8.4	物化反应耗热 Q_4	28
8.5	烟气带走显热 Q_g	28
8.6	其他热损失 Q_5	29
8.7	列热平衡方程并求解.....	29
8.8	列热平衡表.....	29
9	冷却带热平衡计算.....	30
9.1	热平衡示意图.....	30
9.2	热收入.....	31
9.2.1	制品带入的显热 Q_2	31
9.2.2	冷却风带入显热 Q_6	31
9.3	热支出.....	31
9.3.1	制品带出显热 Q_7	31
9.3.2	热风抽出时带走的显热 Q_8	31
9.3.3	窑体散失热量 Q_9	32
9.3.4	由窑体不严密处漏出空气带走显热 Q_{10}	34
9.4	列热平衡方程.....	34
9.5	列热平衡表.....	35

10 管道尺寸以及阻力计算.....	36
10.1 抽烟风机的管道尺寸、阻力计算.....	36
10.1.1 管道尺寸.....	36
10.1.2 阻力计算.....	37
10.1.3 风机的选型.....	38
10.2 其他系统管路尺寸确定、风机的选型.....	38
10.2.1 液化石油气输送管径的计算.....	39
10.2.2 助燃风管计算.....	39
10.2.3 冷却带风管计算.....	41
10.2.4 风机选型.....	43
11 工程材料概算.....	47
11.1 窑体材料概算.....	47

前 言

随着经济不断发展,人民生活水平的不断提高,陶瓷工业在人民生产、生活中都占有重要的地位。陶瓷的发展与窑炉的改革密切相关,一定结构特点的窑炉烧出一定品质的陶瓷。因此正确选择烧成窑炉是获得性能良好制品的关键。

陶瓷窑炉可分为两种:一种是间歇式窑炉,比如梭式窑;另一种是连续式窑炉,比如辊道窑。辊道窑由于窑内温度场均匀,从而保证了产品质量,也为快烧提供了条件;而辊道窑中空、裸烧的方式使窑内传热速率与传热效率大,又保证了快烧的实现;而快烧又保证了产量,降低了能耗。产品单位能耗一般在 $2000\sim 3500\text{ KJ/Kg}$,而传统隧道窑则高达 $5500\sim 9000\text{ KJ/Kg}$ 。所以,辊道窑是当前陶瓷工业中优质、高产、低消耗的先进窑型,在我国已得到越来越广泛的应用。

烧成在陶瓷生产中是非常重要的一道工序。烧成过程严重影响着产品的质量,与此同时,烧成也由窑炉决定。

在烧成过程中,温度控制是最重要的关键。没有合理的烧成控制,产品质量和产量都会很低。要想得到稳定的产品质量和提高产量,首先要有符合产品的烧成制度。然后必须维持一定的窑内压力。最后,必须要维持适当的气氛。这些要求都应该遵循。

我设计的辊道窑是连续式窑。窑炉总长 90 米,内宽 1.92 米,烧成温度是 1190 摄氏度。燃料采用液化石油气。我设计的辊道窑,窑体趋向轻型化,燃料清洁化,烧成质量好,产量高,年产量达 69 万平方米。全窑采用新型耐火材料,改善了窑炉的保温性。

1. 原始资料收集

设计前必须根据设计任务收集所需的原始资料。设计原始资料如下：

1. 窑长：90M
2. 产品规格： $500 \times 500 \times 12$ (mm)，密度： $2.3 \text{ kg} \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$
3. 年工作日：330 天
4. 燃料：液化石油气（热值 $100 \text{ MJ}/\text{m}^3$ ，主要成分丙烷，丁烷，气液共存压力 $0.88 \sim 1.47 \text{ Mpa}$ ，出自《热工手册》）
5. 坯入窑含水量：1.8%
6. 原料组成：

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	灼减
70	19.5	0.4	0.2	0.1	0.8	4.0	4.2

7. 最高烧成温度：1190℃
8. 烧成合格率：96%
9. 烧成制度：
 - (1) 温度制度：烧成周期—77 分钟
 - (2) 气氛制度：全窑氧化气氛
 - (3) 压力制度：预热带负压操作 $-40 \sim -25 \text{ Pa}$ ，烧成带微正压 $< 8 \text{ Pa}$ ，冷却带正压

2. 窑体主要尺寸的确定

2.1 进窑砖坯尺寸

产品规格： $500 \times 500 \times 12 \text{ mm}$

产品宽度 500mm，考虑烧成收缩为 5%，四周预留抛光尺寸为 7mm，则：

坯体尺寸=产品尺寸÷（1-烧成收缩）= $500 \div (1-5\%) + 2 \times 7 \approx 540 \text{ mm}$

2.2 内宽的确定与排砖方法

由于现在的辊棒等材料性能的提高，且辊道窑大多采用吊顶结构，所以此次设计成宽体辊道窑。再根据产量，所用的燃料（液化石油气）等因素，所以暂定窑内

宽 $B = 2000\text{mm}$ 。而坯体离窑墙内壁一般有 $100 \sim 200\text{ mm}$ 间隙，取 150 mm 。根据了解，横向的坯体是紧贴在一起，并没有留间隙。所以内宽等于砖坯尺寸 \times 每排片数 + 砖坯离窑内壁的间距。

则可排砖数为： $n = (2000 - 2 \times 150) \div 540 \approx 3.15$ 片

故确定并排 3 片，则窑内宽 $B = 540 \times 3 + 150 \times 2 = 1920\text{ mm}$

最后定窑内宽为 1920 mm 。

2.3 内高的确定

辊道窑的内高被辊子分隔成辊上高和辊下高两部分。对于辊上高的设置，要考虑以下四个方面：损坏的坯体能否顺利从辊棒之间掉下去，烧嘴的设置也要有一定的高度，气体与坯体之间的换热强度，气流通畅与燃烧空间。而对于辊下高的设置而言，主要是损坏的坯体能否顺利从辊棒之间掉下去即保证处理事故的方便。从传热角度来讲，烧成带以辐射为主，所以气体厚度要大点，内高稍高些。而预热带以对流换热为主，所以内高比烧成带低，使得横截面减小，流速加快，提高对流换热强度。

位置	预热带	烧成带	冷却带
辊上高	350	450	350
辊下高	350	350	350
内总高	700	800	700
(单位 mm)			

2.4 烧成制度的确定

(1) 温度制度：

考虑到入窑水分比较低，可以快速升温而不会使坯体炸裂。

烧成周期: 77 min

各温度段的划分与升温速率

名称	温度/℃	时间/min	升温速率/℃·min ⁻¹	长度比例/%
窑前段	40~250	8.1	30.9	10.5
预热带	250~1050	26.6	30	34.5
烧成带	1050~1190	15	9.3	19.5
冷却带	1190~80	27.3	40.7	31.4
累计		77		100

(2) 气氛制度：全窑氧化气氛

(3) 压力制度：预热带-15~-10 Pa，烧成带 < 8 Pa

2.5 年产量的确定

装窑密度 = 每米排数 × 每排片数 × 每片砖面积 (m²/每窑)

同一列砖距取 20 mm，则

$$\text{装窑密度} = \frac{1000}{540 + 20} \times 3 \times 0.54^2 = 1.46 \text{ (m}^2\text{/每窑)}$$

窑容量：X = L × P (m² / 每窑)

已知窑长 L = 90m

所以窑容量：X = L × P = 90 × 1.46 = 131.4 (m² / 每窑)

年产量 = 窑容 × 年工作日 × 24 × 产品合格率 / 烧成周期 = 778488.67 (m² / 每年)

2.6 各带长的确定

L = 90m

取 2m 为一节，则共有 45 节。

据烧成曲线中温度的划分，各段长度：

窑前段：90000 × 10.5% ÷ 2000 = 4.725 ≈ 5 节

长度 = 5 × 2000 = 10000mm

预热带：

90000 × 34.5% ÷ 2000 = 15.5 ≈ 16 节

长度 = 16 × 2000 = 32000mm

烧成带:

$$90000 \times 19.5\% \div 2000 = 8.78 \approx 9 \text{ 节}$$

$$\text{长度} = 9 \times 2000 = 18000 \text{ mm}$$

冷却带: $90000 \times 31.4\% \div 2000 = 14.13 \approx 15 \text{ 节}$

$$\text{长度} = 15 \times 2000 = 30000 \text{ mm}$$

急冷段: $90000 \times 10.5\% \div 2000 \approx 5 \text{ 节}$

$$\text{长度} = 5 \times 2000 = 10000 \text{ mm}$$

缓冷段: $90000 \times 15.1\% \div 2000 \approx 7 \text{ 节}$

$$\text{长度} = 7 \times 2000 = 14000 \text{ mm}$$

快冷段: 3 节

2.7 辊道窑窑头、窑尾工作台长度

窑头工作台是制品进窑烧成的必经之路,也是使制品整齐有序进窑的停留之处。窑头工作台不宜太长,只要能满足要求即可,根据经验取值为 3.3 米。窑尾工作台是烧成后的产品从窑内出来,再经人工检验产品的部位。由于出窑产品温度一般高达 80℃,所以窑尾的工作台不宜太短,目的是使制品有足够的时间冷却,根据经验取值为 5.4 米。

3. 工作系统的确定

辊道窑的工作系统包括排烟系统、燃烧系统、冷却系统、温度控制系统、传动系统等,下面是各系统的初步安排。

3.1 排烟系统

排烟风机及其管路主要作用是将预热带、烧成带中产品排放的废气及燃烧产生的废气排出窑外。为提高热效率,此次设计采用窑头集中排烟方式排烟,在窑前段第 2 节以及预热带第 6 节设置抽烟口,其中第 6 节为主抽烟口。每节在窑顶、窑底分别设置两个排烟口进行排烟,在各出烟口分别用圆管引出,汇总到上下排烟分管,最后汇总到窑顶的排烟总管中。

3.2 燃烧系统

为了利于烧成带温度的调节,同时由于所用燃料为高热值轻污染的液化石油气燃料,因此本设计采用北京神雾热能技术有限公司设计生产的 L Y S₂ 系列液化气烧嘴,周围材质采用重质高铝砖耐火材料。

3.2.1 烧嘴的设置

本设计在 600℃ 就开始设置高速调温烧嘴,即预热带第 10 节开始布置。由于本窑所用燃料为高热值气体燃料,考虑在低温段烧嘴不宜太多。因此在预热带中前段(10—17 节)辊下设置 2 对烧嘴,在(18—30 节)每节的辊上、辊下共设置 4 对烧嘴,辊上下烧嘴及对侧烧嘴对称排列。并在每个烧嘴对侧窑墙分别设置一个火焰观察孔。如遇事故处理口则取消该处观察口。

3.2.2 助燃系统

助燃系统包括助燃风机和助燃管道。助燃管道要求用不锈钢制作,防止落脏,并且底部助燃分管分布在窑墙内以提高助燃风温度,助燃主管设有排风口,防止停电时煤气进入助燃风管道有危险。其中助燃分管的长度根据烧嘴布置位置来定。所以底下的助燃分管从第 10 节到第 21 节,上部的助燃分管从第 11 节到第 21 节。为了平衡两端助燃空气的压力,在两端助燃分管之间设置横管。

3.2.3 液化石油气输送系统

从储气罐送过来的液化石油气,由总管路送到车间,然后经过过滤器、压力表、自动调节蝶阀和气动安全阀,由自动调压器把总管液化石油气压力降到窑炉适用的压力并稳压后送到窑炉上方的液化石油气总管道。

燃烧系统分为若干个主调节单元,每个单元又分别为辊上通道温度调节单元和辊下温度调节单元。各单元所用燃气分别从窑上液化气总管道中引出,经单元手动球阀和由电动执行器带动的蝶阀后送至本调节单元的各烧嘴。在每个控制单元设置一电磁阀,有断电保护功能,防止断电后煤气泄入窑内。

3.3 冷却系统

制品在冷却带有晶体成长、转化的过程，并且冷却出窑，是整个烧成过程最后的一个环节。从热交换的角度看，冷却带实质上是一个余热回收设备，它利用制品在冷却过程中所放出的热量来加热空气，余热风可供干燥或者作助燃风用，达到节能的目的。

3.3.1 急冷通风系统

急冷风机及其管路主要作用是直接打入冷风入窑冷却产品，从 1000 多度冷却到 600~700 度（对产品而言），并形成一道急冷气幕，防止烧成带烟气倒流。刚刚进入急冷阶段时，坯体仍处于熔融的塑性状态，不容易产生应力，可以急冷而不开裂。该阶段要设置好急冷的控制温度。过低，产生风裂；过高，给缓冷造成压力，甚至也会产生风裂。急冷风分管要求用不锈钢制作，入窑喷管也要求用不锈钢制作并且是耐热钢制作，辊棒上下都设置有急冷喷管，以保证产品均匀冷却。每根喷管上均匀地开有圆形式出风口，对着制品上下均匀地喷冷风，达到急冷的效果。由于急冷段温度高，横穿入窑的冷风管须用耐热钢制成，管径为 40~100mm。

本设计就是采用这种结构，急冷段采用 5 节窑长进行急冷（31—35 节），每节辊上下分别设置 6 对 $\Phi 90$ 急冷风管（急冷前半节不设置急冷风管），共 54 根急冷风管，交错排列横穿窑内，管置于窑内部分开圆孔若干。

3.3.2 缓冷通风系统

该阶段主要是提供石英晶型转变的场所，故缓冷区要足够长，使降温过程平稳缓慢，安全度过石英晶型转换期。为了使降温过程平稳缓慢，一般采用热风冷却制品的办法。大多数辊道窑在该段设有多处抽热风，使从急冷段与窑尾快冷段过来的热风流经制品，让制品慢慢均匀冷却下来。

本设计采用抽热风的方法，在 36—42 节，每节窑顶设置 2 处抽热风，每处抽热风开 2 个抽热风孔，共 14 个抽热风 28 抽热风孔，抽走来自急冷带和窑尾快冷带的热风。另一方面，由缓冷风机从窑外抽空气通过缓冷风管，来缓和降温速率。

3.3.3 快冷通风系统

制品冷却到 400℃ 以后可以进行快速冷却。但由于制品温度较低，使传热动力温差小，即使允许快冷也不易达到。而此段冷却也是很重要的，如达不到快冷目的出窑产品温度大于 80℃ 时，制品即使在窑内没有开裂，也会因出窑温度过高而出窑炸裂，故要加强该段的冷却。

本设计采用冷风管进行快冷，在 43，44，45 节每节辊上下设置 6 对 $\Phi 90$ 的快冷风管。

3.4 温度控制系统

3.4.1 热电偶的设置

热电偶的设置应当适合。在关键点一定要设置热电偶，还有像在高温区要注意上下温差，所以上下应当都要设置。

本设计在：

40~750℃ 之间，即第 1~14 节，每节窑顶中部插入一根 K 型热电偶。

750~1050℃ 之间，即第 15~21 节，每节窑顶和窑底中部插入一根 K 型热电偶。

1050~1250℃ 之间，即第 22~30 节，每节窑顶和窑底中部插入一根 S 型热电偶。

急冷段第 31~35 节，每节窑顶中部插入一根 S 型热电偶。

缓冷段第 36~42 节，每节窑顶和窑底中部插入一根 K 型热电偶。

快冷段第 43~45 节，每节窑顶中部插入一根 K 型热电偶。

3.4.2 温度仪表选型

低温区：K 型热电偶

高温区：S 型热电偶

热电偶通过补偿导线与微机相连。

3.4.3 传动系统

传动系统包括辊棒及传动装置。辊道窑的传动系统由电机、减速设备和传动机构所组成。

3.4.4 辊棒的选择

辊棒的材质有两种：一是金属质，也就是我们所说的钢棒；一是陶瓷质，也就是我们所说的瓷棒，瓷棒又分为高温棒、中温棒和低温棒。根据使用温度选用不同的辊棒，钢棒一般用在窑头、窑尾。对辊棒一般有以下要求：好的抗热震性能、好的高温抗氧化性能、高的荷重软化温度、小的蠕变性(高温体积稳定性)和好的去污性。国产瓷棒中比较好的有金刚、海登皇格、三英等。

本设计对于辊棒的选择如下：在低温段（40~400℃）第1—8节与第44—45节采用 $\Phi 40 \times 2320\text{mm}$ 无缝钢管棍子；在中温段（400~700℃）第9—14节与第31—35节采用 $\Phi 40 \times 2320\text{mm}$ 莫来石辊棒；而高温段（700~1250℃）第15—30节采用 $\Phi 40 \times 2320\text{mm}$ 莫来石—刚玉质陶瓷辊棒。

3.4.5 传动装置

目前窑炉的传动方式有链传动、摩擦传动、螺旋齿轮传动、圆锥齿轮传动和直齿轮传动。链传动结构简单，造价低，早期的辊道窑大多采用链传动，但链传动不够平稳，链条较长时易发生爬行现象。摩擦传动比较平稳，但可靠性稍差。齿轮传动具有明显的可靠性和平稳性，不过，由于齿与齿之间为点接触，容易磨损，对安装和润滑要求较高。用的较多的是螺旋齿轮传动。

电机带动传动装置也有两种形式：一是长轴传动，其特点是一台电机带动一根与窑长差不多的长轴，通过二级减速将动力分配若干组，长轴上装有离合器。一是多电机传动，特点是将窑分成若干组，几个模数段为一组，每组由一台电机传动，采用变频调速，所有电机可同时运行，每台亦可单独运行，我们现在使用的就是多电机传动。

本设计采用螺旋齿轮传动与多电机传动，并且使用差速传动（对裸烧产品还对调整变形有好处）。差速传动就是相邻辊棒速度有微小差异，通过配置不同尺数的

齿轮比来实现，一般使用 15: 22 和 17: 25。除了第 1—5 节采用一个电机，其余都是两节使用一个电机。其中电机为 0.75KW，速比为 1: 59。

3.4.6 辊距的确定

辊距即相邻两根辊子的中心距，确定辊距主要依据是制品长度、辊子直径以及制品在辊道上移动的平稳性。

考虑到制品长度较大，因此根据经验公式计算得：

$$H = \frac{1}{5} \times L = \frac{1}{5} \times 540 = 108 \text{ mm}$$

同时考虑到每节窑长 2000mm，确定最后的辊距为 100 mm，每节装 20 跟辊棒。

辊子总数为 $N=20 \times 45=900$ 根

3.4.7 辊棒的联接形式

主动端采用弹簧夹紧式，而从动端使用的是托轮摩擦式连接，这种联接方式对更换辊子非常方便。托轮摩擦式连接是将辊棒自由的放在间距相等的托轮上，利用辊子的摩擦力带动辊子转动。

3.4.8 传动过程

电机→减速器→主动链轮→滚子链→从动链轮→主动螺旋齿轮→从动螺旋齿轮→辊棒传动轴→辊子。

4. 窑体附属结构

4.1 事故处理孔

本设计将事故处理设在辊下，且事故处理孔下面与窑底面平齐，以便于清除出落在窑底上的砖坯碎片。为加强窑体密封，应尽量少设置事故处理口，而为了便于处理事故，两侧墙事故处理一般采用交错布置形式，为了能清除窑内任何位置上的事故而不造成“死角”，两相邻事故处理孔间距不应大于事故处理孔对角线延长线与对侧内壁交点连线。经过计算，取事故处理孔尺寸为：辊下处理孔 $360 \times$

115mm, 辊上处理孔 $360 \times 115 \text{ mm}$ 。根据同侧事故处理孔距离 $L \geq 2(b+c) = 2b(1+B)/\delta = 2 \times 360(1+2008)/360 = 4018 \text{ mm}$, 其中各个符号如下图, 经过计算, 取 $L=4016 \text{ mm}$ 。同时考虑到实际情况, 结合一些先进窑炉的经验, 具体布置如下: 在低温段: $40 \sim 600^\circ\text{C}$ 之前, 以及缓冷带, 快冷带第 36~45 节每 3 节设一辊上事故处理口, 辊上事故处理口一共设 4 个。全窑每 2 节之间设置一辊下事故处理口, 从进窑的第 3 节开始布置。

为了避免热气体外溢, 必须对事故处理口进行密封。在里面用耐火材料制作的塞砖, 再用棉塞紧。

4.2 观察孔与测温口

每个烧嘴的对侧窑墙设置直径 80mm 的观察孔, 上窑墙观察孔的里面要向下打个斜角, 以便可以观察窑内砖的走势情况及其它燃烧情况, 当遇到了事故处理口时就不设置观察口。

测温口根据上面热电偶的设置而设置。

4.3 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 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 膨胀缝, 内填陶瓷棉或石棉。

本设计为了砌窑的方便, 除了高温区外每隔一节留设 30 mm 的膨胀缝, 高温区则应多留一道膨胀缝。而宽度方向上也要留膨胀缝, 这没有具体的规定, 留多少道膨胀缝则根据砌筑的方便与厂家的要求来定。还有膨胀缝也应该错缝设置。

4.4 下挡墙和上档板

由于辊道窑属中空窑, 工作通道空间大, 气流阻力小, 难以调节窑内压力制度及温度制度。因此, 通常在辊道窑工作通道的某些部位, 辊下筑挡墙, 辊上插挡板, 缩小该外工作通道面积, 以增加气流阻力, 便于压力与温度制度的调节。

一般来说, 下挡墙与上档板的设置应该根据各个段的要求来定。如在烧成带与

冷却带之间设置挡墙、挡板是为避免烧成带的烟气倒流，又避免了压力波动时急冷风窜流向烧成带而降低高温区温度。预热带设置挡墙、挡板可以增加烟气在高温区的滞留时间，提高烟气利用率，从而提高热利用率。还用为了更好的控制温度，还在中高温设置几个上挡板与下挡墙。

故本设计在烧成带两端即 22 节和 30 节设上下挡板挡墙结构，有利于该段温度的控制和调节，同时起到阻挡急冷空气进入的作用。同时在预热带第 8 节以及窑前第 4 节同样也设置上下挡板挡墙的结构，起到阻挡气流，减小上下温差的作用。

4.5 钢架结构

钢架结构每一节都设有 17 根 $60 \times 60 \times 4\text{mm}$ 的方钢，吊顶选用 $60 \times 5\text{mm}$ 的等边角钢，下横梁焊有 $60 \times 5\text{mm}$ 的等边角钢，而烧嘴的固定用 50×5 的等边钢。窑体外壳采用 2—4mm 钢板冲压而成。

4.6 测压孔

本设计不设置测压口。

5. 窑体材料确定

整个窑体由金属支架支撑。窑体材料要用耐火材料和隔热材料。

5.1 窑体材料确定原则

耐火材料必须具有一定的强度和耐火性能以便保证烧到高温窑体不会出现故障。隔热材料的积散热要小，材质要轻，隔热性能要好，节约燃料。而且还要考虑到廉价的材料问题，在达到要求之内尽量选用价廉的材料以减少投资。窑体材料厚度的确定原则：

- ◆ 为了砌筑方便的外形整齐，窑墙厚度变化不要太多。
- ◆ 材料的厚度应为砖长或砖宽的整数倍；墙高则为砖厚的整数倍，尽量少砍砖。
- ◆ 厚度应保证强度和耐火度。

总之，窑体材料及厚度的确定在遵循以上原则得计出上，还要考虑散热少，投资少，

使用寿命长等因素。

5.2 整个窑炉的材料表

窑体材料的选择

名称	材质		使用温度	导热系数	厚度
低温段 1—6 节, 22—27 节					
窑顶	耐火层	轻质高铝砖	1150	0.35	230
	隔热层	硅酸铝耐火纤维束	1000	0.13	90
窑墙	耐火层	轻质高铝砖	1150	0.35	230
	隔热层	硅酸铝耐火纤维束	1000	0.13	130
窑底	耐火层	轻质高铝砖	1150	0.35	130
	隔热层	硅藻土砖	1000 以下	0.1+0.000228t	195
中温段 7—10 节					
窑顶	耐火层	轻质高铝砖	1150	0.80+0.00026t	230
	隔热层	硅酸铝耐火纤维束	1000	0.13	130
窑墙	耐火层	轻质高铝砖	1150	0.80+0.00026t	230
	隔热层	硅酸铝耐火纤维束	1000	0.13	130
窑底	耐火层	轻质高铝砖	1150	0.80+0.00026t	130
	隔热层	硅藻土砖	1000 以下	0.1+0.000228t	195
高温段 11—21 节					
窑顶	耐火层	重质高铝砖	1400	0.45	230
	隔热层	硅酸铝耐火纤维束	1000	0.13	130
窑墙	耐火层	重质高铝砖	1400	0.45	230
	隔热层	硅酸铝耐火纤维束	1000	0.13	130
窑底	耐火层	重质高铝砖	1400	0.45	230
	隔热层	硅藻土砖	1000 以下	0.1+0.000228t	195

6. 燃料及燃烧计算

A、根据《热工手册》相关资料差得，液化石油气低发热量 $Q_{\text{低}} = 90 \sim 110 \text{ MJ} / \text{m}^3$ ，在本设计中取平均热值 $100 \text{ MJ} / \text{m}^3$ ，主要成分丙烷，丁烷，气液共存压力 $0.88 \sim 1.47 \text{ Mpa}$ 。

B、液化石油气作为燃料有如下几个特点：

(1) 热值很高，是气体燃料中最高的。

(2) 理论空气量高达 $24 \sim 30 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$ ，因此，助燃空气与之混合完全比天然气更为困难。可以用空气或烟气先冲稀液化石油气，然后使用。但用空气稀释时，不得在着火浓度范围内以防爆炸。通常规定液化石油气体积浓度必须高于着火浓度范围上限的 1.5 倍。

(3) 火焰传播速度低，燃烧缓慢，但较天然气快一些。

(4) 纯净。一般含硫少，是烧制高档陶瓷产品的优质燃料。

(5) 密度较大，约为同温度及压力下的空气的 $1.5 \sim 2.0$ 倍，泄漏时往下沉，易与空气混合达到着火浓度范围内，遇火发生爆炸。

(6) 一般液化石油气蒸气压较高。在 37.8°C 时约为 $0.9 \sim 1.5 \text{ Mpa}$ 。这作为气体燃料是有利的。但在使用中必须要求气化站减压阀良好，以保证安全。

6.1 理论空气量计算：

根据《热工手册》计算液化石油气经验公式可得，

$$\text{理论空气量 } V_a^o = \frac{1.12}{4186.8} \times Q_{\text{低}} = \frac{1.12}{4186.8} \times 100 \times 10^3 = 26.75 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

取空气过剩系数 1.15：

$$\text{实际空气量：} V_a = \alpha V_a^o = 1.15 \times 26.75 = 30.76 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

6.2 烟气量计算

根据《热工手册》计算液化石油气烟气的经验公式可得，

$$\text{理论烟气量 } V_g^o = \frac{Q_{\text{低}}}{4186.8} + \alpha = \frac{100 \times 10^3}{4186.8} + 4.5 = 28.4 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{对液化石油气}$$

$\alpha = 4.5$)

$$\text{实际烟气量：} V_g = 28.4 + (1.15 - 1.0) \times 26.75 = 32.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

6.3 燃烧温度计算

$$\text{理论燃烧温度：} t_m = \frac{Q_{dw} + V_a \cdot C_a \cdot t_a + c_f \cdot t_f}{V_g \cdot C_g}$$

$$\text{已知 } t_a = t_f = 20^\circ\text{C} \Rightarrow C_a = 1.30 \text{ KJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}), \quad c_f = 3.0 \text{ KJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$C_g = 1.424 + 0.000105$ ，假设 $t_{th} = 2000^\circ\text{C}$ ，

则 $C_g = 1.424 + 0.000105 \times 2000 = 1.634 \text{ KJ} / (\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

所以 $t_{th} = \frac{100 \times 10^3 + 30.76 \times 1.3 \times 20 + 3.0 \times 20}{32.4 \cdot 1.634} = 1905^\circ\text{C}$

求得温度与假设温度相对误差 $\frac{2000 - 1905}{1905} \times 100\% = 4.9\% < 5\%$

所设合理，取高温系数 $\eta = 0.8$ ，实际温度 $t_p = 0.8 \times 1905 = 1524^\circ\text{C}$

比要求温度 1190°C 高出 334°C ，基本合理。

燃料温度完全能达到燃烧要求，符合快速烧成条件，无需再通过预热助燃风即可满足要求，因此本窑不用热风助燃。

7. 物料平衡计算

原料组成：

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	灼减
70	19.5	0.4	0.2	0.1	0.8	4.0	4.2

玻化砖密度为 $2.3 \times 10^3 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ，产品尺寸为 $500 \times 500 \times 12\text{mm}$ ，

每小时烧成制品质量 G_m ：

$$G_m = \frac{778489}{330 \times 24 \times 96\%} \times 2.3 \approx 2355 \text{ (kg/h)}$$

每小时烧成干坯的质量

$$G_g = \frac{G_m}{1 - 4.2\%} = \frac{2355}{1 - 4.2\%} \approx 2365 \text{ (Kg/h)}$$

每小时欲烧成湿坯的质量（含水量为 2 %）

$$G_s = \frac{G_g}{1 - 2\%} = 2413 \text{ (Kg/h)}$$

每小时蒸发自由水的质量

$$G_z = G_s - G_g = 2413 - 2365 = 48 \quad (\text{Kg} / \text{h})$$

每小时从精坯中产生的 CO_2

$$G_{\text{cao}} = G_g \times \text{Cao}\% = 2365 \times 0.1\% = 2.365 \quad (\text{Kg} / \text{h})$$

$$G_{\text{mgo}} = G_g \times \text{Mgo}\% = 2365 \times 0.8\% = 18.92 \quad (\text{Kg} / \text{h})$$

$$G_{\text{co2}} = \left(G_{\text{cao}} \times \frac{44}{41} \right) + \left(G_{\text{mgo}} \times \frac{44}{41} \right) = 22 \quad (\text{Kg} / \text{h})$$

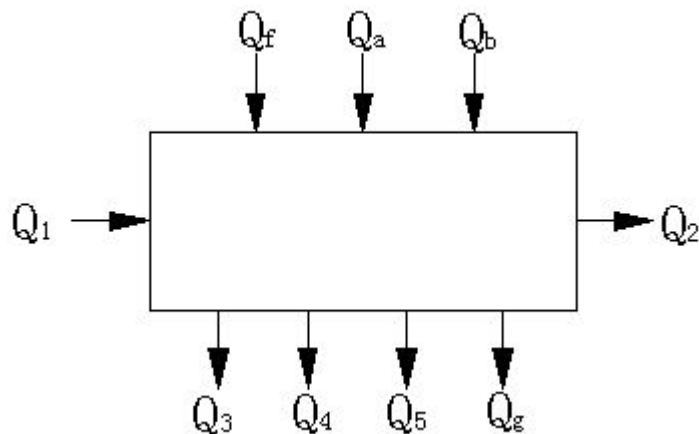
每小时从精坯中分解出来的结构水

$$G_j = G_g \times 4.2\% - G_{\text{co2}} = 2365 \times 4.2\% - 22 = 77 \quad (\text{Kg} / \text{h})$$

8. 热平衡计算

热平衡计算包括预热带、烧成带热平衡计算和冷却带热平衡计算。预热带热平衡计算的目的在于求出燃料消耗热量，冷却带热平衡计算目的在于计算出冷空气鼓入量和热风抽出量。另外，通过热平衡计算可以看出窑炉的工作系统结构等各方面是否合理，哪项消耗最大，能否采取改进措施。

8.1 热平衡示意图



坯体带入显热: Q_1

窑体散失热: Q_3

燃料带入化学热及显热: Q_f

物化反应耗热: Q_4

助燃空气带入显热: Q_a

其他热损失: Q_5

预热带漏入空气带入显热: Q'_a (Q_b)

烟气带走显热: Q_g

热制品带出显热: Q_2

8.2 热收入项目

8.2.1 坯体带入显热 Q_1

$$Q_1 = G_s c_1 t_1$$

其中: G_s ——湿制品质量 (Kg/h), 据物料平衡计算中可知 $G_s = 2413 (Kg/h)$

制品入窑第三节时的温度 $t_1 = 250^\circ C$

$$\text{入窑制品比热 } c_1 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 250 = 0.905 \quad (KJ / Kg \cdot ^\circ C)$$

$$\therefore Q_1 = G_s c_1 t_1 = 2413 \times 0.905 \times 250 = 545941.25 \quad (KJ / h)$$

8.2.2 燃料带入化学热及显热 Q_f

液化石油气低热值为 $100000 KJ / Bm^3$

入窑液化石油气温度 $t_f = 20^\circ C$, $20^\circ C$ 时液化石油气比热容 $c_f = 3.0 KJ / Bm^3 \cdot ^\circ C$

设液化石油气消耗量为 $x Bm^3 / h$

$$\text{则 } Q_f = x(Q_{dw} + c_f t_f) = x(100000 + 3.0 \times 20) = 100060x \quad (KJ / h)$$

8.2.3 助燃空气带入显热 Q_a

助燃空气温度 $t_a = 20^\circ C$

20 °C 时，取空气比热容 $c_a = 1.30 \text{ (KJ / m}^3 \cdot \text{°C)}$

$$V_{a\text{总}} = V_a x = 30.76x \quad \text{Bm}^3 / \text{h}$$

$$\text{则 } Q_a = V_{a\text{总}} c_a t_a = (30.76x) \times 1.30 \times 20 = 799.76x \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

8.2.4 预热带漏入空气带入显热 Q'_a

取预热带空气过剩系数 $\alpha_g = 2.0$

漏入空气温度 $t_f = 20 \text{ °C}$ ，空气比热容 $c_a = 1.30 \text{ (KJ / m}^3 \cdot \text{°C)}$

漏入空气总量为

$$V_a = x(\alpha_g - \alpha) V_a^o = x(2.0 - 1.15) \times 26.75 = 22.74x \quad (\text{Bm}^3 / \text{h})$$

$$\text{则 } Q'_a = V_a c_a t_a = (22.74x) \times 1.30 \times 20 = 591.24x \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

8.3 热支出项目

8.3.1 热制品带出显热 Q_2

烧成产品质量：

$$G_m = 2355 \quad (\text{Kg} / \text{h})$$

制品烧成温度 $t_2 = 1190 \text{ °C}$

制品平均比热容，查手册 $C_2 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 1250 = 1.165 \text{ (KJ / Kg} \cdot \text{°C)}$

$$Q_2 = G_m C_2 t_2 = 2355 \times 1.15 \times 1190 = 3221136 \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

8.3.2 窑体散失热 Q_3

将计算窑段分为两部分，即第 6-21 节：250°C-1050°C，取平均值：650°C。

第二 22-30 节：1050°C-1190°C，取平均值 1120°C。

第一部分

① 窑墙散热：内壁平均温度 $t_1=650^{\circ}\text{C}$ ，设 $t_2=600^{\circ}\text{C}$ ， $t_3=52^{\circ}\text{C}$

$$\lambda_1 = 0.66 + 0.00008 \times \frac{650 + 600}{2} = 0.66 + 0.05 = 0.71 \quad (\text{w/m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda_2 = 0.13 \quad (\text{w/m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$\partial = 6.08 + 5.4 = 11.48 \quad (\text{w/m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

热流密度：

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\partial}} = \frac{650 - 52}{\frac{0.113}{0.71} + \frac{0.197}{0.13} + \frac{1}{11.48}} = 383 \quad (\text{w/m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$\text{窑墙散热面积 } A = \frac{0.8 + 1.576}{2} \times 2 \times 16 = 38 \quad \text{m}^2$$

二侧窑墙共散热：

$$Q'_1 = 38 \times 2 \times 383 \times 3.6 = 104788.8 \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

② 窑顶散热：

单位热流密度：

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\partial}} = \frac{650 - 60}{\frac{0.3}{0.704} + \frac{0.15}{0.2} + \frac{1}{13.82}} = 469.7 \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

$$\text{窑顶散热面积：} A = \frac{1.73 + 2.35}{2} \times 2 \times 16 = 65.28 \quad \text{m}^2$$

窑顶散热量：

$$Q''_1 = 469.7 \times 65.28 \div 3.6 = 110383.26 \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

③ 窑底散热

热流密度：

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\partial}} = 365.55 \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

$$\text{窑底散热面积 } A = \frac{1.73+2.35}{2} \times 2 \times 16 = 65.28 \text{ m}^2$$

窑底散热量:

$$Q_1''' = 65.28 \times 365.55 \times 3.6 = 85907.17 \text{ (KJ/h)}$$

所以低温段窑体总散热量:

$$Q_{\text{低}} = 104788.8 + 110383.26 + 85907.17 = 301079.23 \text{ (KJ/h)}$$

中温段 22—30 节: $1050 \sim 1190^\circ\text{C}$ 。窑外壁平均温度取 60°C , 环境温度 20°C , 窑内平均温度取 1120°C 。

① 窑墙散热

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\partial}} = \frac{1120 - 95}{\frac{0.114}{0.754} + \frac{0.197}{0.25} + \frac{1}{14.2}} = 1015 \text{ (w/m}^2\text{)}$$

$$\text{窑墙散热面积 } A = \frac{0.9+1.576}{2} \times 2 \times 9 = 22.28 \text{ m}^2$$

二侧窑墙共散热:

$$Q_2' = 2 \times 22.28 \times 1015 \times 3.6 = 162822.24 \text{ (KJ/h)}$$

② 窑顶散热

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\partial}} = 964.8 \text{ (w/m}^2\text{)}$$

$$\text{窑顶散热面积 } A = \frac{1.73+2.384}{2} \times 2 \times 9 = 37.02 \text{ m}^2$$

窑顶散热量:

$$Q_2'' = 964.8 \times 37.02 \times 3.6 = 128580.8 \text{ (KJ/h)}$$

③ 窑底散热

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha}} = 950.8 (\text{W/m}^2)$$

$$\text{窑底散热面积 } A = \frac{1.73 + 2.384}{2} \times 2 \times 9 = 37.02 \text{ m}^2$$

窑底散热量:

$$Q_2'' = 950.8 \times 37.02 \times 3.6 = 126715 \text{ (KJ/h)}$$

高温段总散热量:

$$Q_{\text{高}} = 162822.24 + 128580.8 + 126715 = 418118 \text{ (KJ/h)}$$

预热带、烧成带窑体总散热量

$$Q = Q_{\text{低}} + Q_{\text{高}} = 301079.23 + 418118 = 719197.27 \text{ (KJ/h)}$$

8.4 物化反应耗热 Q_4

① 自由水蒸发吸热 Q_w

$$\text{自由水质量 } G_w = G_s - G_g = 2413 - 2365 = 48 \text{ (Kg/h)}$$

$$\text{烟气离窑温度 } t_g = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\therefore Q_w = G_w = (2490 + 1.93t_g) = 48 \times (2490 + 1.93 \times 400) = 156576 \text{ (KJ/h)}$$

② 烧成坯体物化反应耗热

用 Al_2O_3 反应热近似代替坯体物化反应热

$$\text{入窑干制品质量 } G_g = 2365 \text{ kg/h} \quad Al_2O_3 \text{ 含量} = 19.5\%$$

$$Q_p = G_g \times 2100 \times 19.5\% = 2365 \times 2100 \times 19.5\% = 968467.5 \text{ (KJ/h)}$$

$$\text{所以 } Q_4 = Q_w + Q_p = 156576 + 968467.5 = 1125043.5 \text{ (KJ/h)}$$

8.5 烟气带走显热 Q_g

$$\text{离窑烟气总量 } V_g = [V_g^0 + (\alpha_g - \alpha)V_a^0]x = [28.4 + (2 - 1.15) \times 26.75]x = 5.7x$$

$$\text{离窑烟气过剩系数 } \alpha_g = 2 \sim 4, \text{ 取 } \alpha_g = 2$$

$$\text{离窑烟气温度 } t_g = 400^\circ\text{C}$$

$$\text{查手册, 此时烟气的平均比热为 } C_g = 1.45 \text{ (KJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\therefore Q_g = V_g C_g t_g = 5.7x \times 1.45 \times 400 = 3306x \text{ (KJ/h)}$$

8.6 其它热损失 Q_5

根据经验占热收入的 5%

$$\begin{aligned} Q_5 &= (Q_1 + Q_f + Q_a + Q_a') \times 5\% = (545941.25 + 100060x + 799.76x + 591.24x) \times 5\% \\ &= 27297 + 5072.55x \end{aligned}$$

8.7 列热平衡方程并求解

$$Q_1 + Q_f + Q_a + Q_a' = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_g + Q_5$$

$$545941.25 + 100060x + 799.76x + 591.24x = 3221136 + 719197.27 + 1125043.5 + 3306x + 27297 + 5072.55x$$

$$\text{解得 } x = 49 \text{ (Bm}^3/\text{h)}$$

$$\text{每小时烧成制品质量为: } G_m = 2355 \text{ (Kg/h)}$$

$$\text{每公斤产品热耗: } \frac{49 \times 100000}{2355} = 2080.7 \text{ (KJ/Kg)}$$

目前玻化砖的产品热耗在 2000 ~ 3500 (KJ/Kg) 之间, 所以设计该窑炉热耗合理!

8.8 列热平衡表

预热带烧成带热平衡表

Figure 1 the tack and lead thermal balance form to cook to preheat

热收入			热支出		
项目	KJ/h	%	项目	KJ/h	%
坯体带入显热	545941.25	9.89	产品带出显热	3221136	58.53
燃料化学热及显热	4902940	88.87	窑体散失热	719197.27	13.1
助燃空气显热	39188.24	0.71	物化反应热	1125043.5	20.43
漏入空气显热	28970.76	0.53	烟气带走显热	161994	2.94
			其他热损失	275851.95	5.0
总计	5517040.25	100.0	总计	5517040.25	100.0

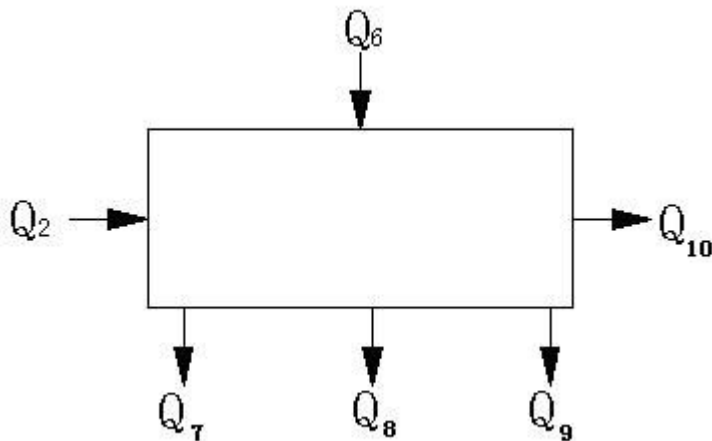
热平衡分析:由表可以看出热支出项中,产品带走显热,物化反应耗热两项不可能减少。而其他三项则可采用适当措施节省能耗。对于烟气出窑温度适当控制在较低温度下。在资金允许的情况下,要减少窑体散热则可采用新型耐火材料,隔热材料,以达到节能减排的目的。

9. 冷却带热平衡计算

9.1 热平衡示意图

图 7-6 冷却带热平衡示意图

Fig7-6 the sketch map of thermal balance of the colling belt



制品带入的显热 Q_2 冷却风带入显热 Q_6

制品带出显热 Q_7 热风抽出带走显热 Q_8

窑体散热 Q_9 其他热损失 Q_{10}

9.2 热收入

9.2.1 制品带入的显热 Q_2

制品烧成温度 $t=1190^{\circ}\text{C}$

查表可知该温度下制品的平均比热为 $C=1.29\text{KJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$

每小时烧成制品质量 $G_m = 2355 \text{ kg/h}$

所以 $Q_2 = G_m \cdot t \cdot c = 2355 \times 1190 \times 1.29 = 3615160.5 \text{ (KJ/h)}$

9.2.2 冷却风带入显热 Q_6

设定鼓入冷风量为 $V_x \text{ m}^3/\text{h}$ 。鼓入冷风的温度： $t_a = 20^{\circ}\text{C}$

查表得： 20°C 时空气的比热为 $c_a = 1.30 \text{ KJ}/\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

$\therefore Q_6 = V_x c_a t_a = V_x \times 1.30 \times 20 = 26V_x \text{ (KJ/h)}$

9.3 热支出

9.3.1 制品带出显热 Q_7

出窑时制品的质量： $G_m = 2355 \text{ kg/h}$

计算时以窑尾快冷结束为出窑口，此时的温度为 $t_7 = 80^{\circ}\text{C}$

此时陶瓷制品的比热为 $c_7 = 0.896 \text{ (KJ/Kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$

$\therefore Q_7 = G_m c_7 t_7 = 2355 \times 0.896 \times 80 = 168806.4 \text{ (KJ/h)}$

9.3.2 热风抽出时带走的显热 Q_8

由热风抽出量应等于冷风鼓入量，遵循平衡原则。故抽出热风量为 V_x

m^3/h

取热风抽出的温度为: $t_8 = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 查表此时的比热为: $c_8 = 1.32\text{ KJ}/\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C}$

$$\text{则 } Q_8 = V_x \cdot c_8 \cdot t_8 = 300 \times 1.32 \times V_x = 396V_x$$

9.3.3 窑体散失热量 Q_9

1. 急冷带 (31—35 节) $1190\sim 700^{\circ}\text{C}$ 段散热

① 窑墙散热

$$\text{内壁平均温度 } t_2 = \frac{1190 + 700}{2} = 945\text{ }^{\circ}\text{C}$$

设窑墙外壁平均温度 $t_3 = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\partial}} = \frac{945 - 65}{\frac{0.113}{0.71} + \frac{0.197}{0.13} + \frac{1}{12.39}} = 501.35 (\text{W}/\text{m}^2)$$

$$\text{窑墙散热面积 } A = \frac{0.8 + 1.585}{2} \times 2 \times 3 = 7.155\text{ m}^2$$

二侧窑墙共散热:

$$Q'_1 = 501.35 \times 2 \times 7.155 \times 3.6 = 25827.7 (\text{KJ}/\text{h})$$

② 窑顶散热:

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\partial}} = \frac{945 - 70}{\frac{0.3}{0.74} + \frac{0.15}{0.2} + \frac{1}{14.56}} = 714.82 (\text{W}/\text{m}^2)$$

$$\text{窑顶散热面积: } A = \frac{1.92 + 2.64}{2} \times 2 \times 3 = 15.2\text{ m}^2$$

窑顶散热量:

$$Q''_1 = 714.82 \times 15.2 \times 3.6 = 39114.9 (\text{KJ}/\text{h})$$

③ 窑底散热

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\delta}} = 547.55 (W/m^2)$$

$$\text{窑底散热面积 } A = \frac{1.92 + 2.64}{2} \times 2 \times 3 = 15.2 \text{ m}^2$$

窑底散热量:

$$Q_1'' = 547.55 \times 15.2 \times 3.6 = 29962.1 (KJ/h)$$

$$\text{急冷带散热总量: } Q_{\text{急}} = 25827.7 + 39114.9 + 29962.1 = 94904.68 (KJ/h)$$

2. 缓冷带、快冷带 (36—45 节): $700 \sim 80^\circ\text{C}$, 要内壁平均温度 390°C 。窑外壁平均温度取 50°C ,

① 窑墙散热

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{390 - 50}{\frac{0.23}{0.35} + \frac{0.13}{0.13}} = 205.19 (W/m^2)$$

$$\text{窑墙散热面积 } A = \frac{0.7 + 1.345}{2} \times 2 \times 6 = 12.27 \text{ m}^2$$

二侧窑墙共散热:

$$Q_2' = 12.27 \times 2 \times 205.19 \times 3.6 = 18127.4 (KJ/h)$$

② 窑顶散热:

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{390 - 20}{\frac{0.23}{0.35} + \frac{0.09}{0.13}} = 252.038 (W/m^2)$$

$$\text{窑顶散热面积 } A = \frac{1.92 + 2.64}{2} \times 2 \times 6 = 27.36 \text{ m}^2$$

窑顶散热量:

$$Q_2'' = 252.038 \times 27.36 \times 3.6 = 24821 \text{ (KJ/h)}$$

③ 窑底散热

单位热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{390 - 50}{\frac{0.13}{0.335} + \frac{0.195}{0.13}} = 285.71 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{窑底散热面积 } A = \frac{1.92 + 2.64}{2} \times 2 \times 6 = 27.36 \text{ m}^2$$

$$Q_2''' = 27.36 \times 285.71 \times 3.6 = 28141 \text{ (KJ/h)}$$

$$\text{此段总散热量 } Q_{\text{缓}} = 18127 + 24821 + 28141 = 71089 \text{ (KJ/h)}$$

$$\text{冷却带窑体总散热 } Q_9 = Q_{\text{急}} + Q_{\text{缓}} = 94904.68 + 71089 = 165993.68 \text{ (KJ/h)}$$

9.3.4 由窑体不严密处漏出空气带走显热 Q_{10}

冷却带从窑体不严密处漏出空气量通常为窑尾鼓入风量的 5%。即 $0.05V_x$ 。

设定漏出空气的平均温度 $t_{10} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$

此时空气的比热容为 $c_{10} = 1.33 \text{ KJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

$$\therefore Q_{10} = V_{10} c_{10} t_{10} = 0.05V_x \times 1.33 \times 400 = 26.6V_x \text{ (KJ/h)}$$

9.4 列热平衡方程

$$Q_3 + Q_6 = Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10}$$

$$3615160.5 + 26V_x = 168806.4 + 396V_x + 165820 + 26.6V_x$$

$$\text{解得 } V_x = 8271.6 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

即每小时鼓入冷风量为 $8271.6 \text{ (m}^3/\text{h)}$

9.5 列热平衡表

冷却带热平衡表

Figure 7-4 Cool and tack the thermal balance form

热收入				热支出			
序号	项目	热量 (KJ/h)	比例%	序号	项目	热量 (KJ/h)	比例%
1	制品带入热	3615160.5	94.4	1	制品带出热	168806.4	4.39
2	空气带入热	215062.75	5.6	2	窑体散热	165820	4.33
				3	抽热风带走热	3275553.6	85.53
				4	其他热损失	220024.6	5.75
总计		3830223.25	100	总计		3830204.56	100

由表可看出，热风抽出带走的热量占很大的比例，因此应充分利用此热量，一般用来干燥坯体和作助燃风以及雾化风作用。本窑设计抽热风用于坯体的干燥以及送去造粒塔进行吹热风造粒。同时本人正在积极研究一项新的课题项目，利用窑炉热风进行热发电，如果能研究成功此发明将有很广阔的应用前景，同时为我国节约大量能源，对我国正在大力建设节约型社会起到巨大的推动作用。

10. 管道尺寸以及阻力计算和风机选型

10.1 抽烟风机的管道尺寸、阻力计算

10.1.1 管道尺寸

排烟系统需排烟气量:

$$V_g = [V_g^o + (\alpha - 1)V_a] \cdot X = [28.4 + (1.15 - 1) \times 30.76] \times 55 = 1815.77 \text{ Bm}^3 / \text{m}^3$$

烟气抽出时实际体积为:

烟气在金属管中流速 ω ，根据经验数据取 10m/s

$$V = V_g \cdot (273 + 400) / 273 = 1.24 \quad (\text{m}^3 / \text{s})$$

10.1.2 总烟管尺寸

烟气在金属管中流速，根据经验数据取 $\omega = 10\text{m/s}$,

$$\begin{aligned} \text{内径 } d_{\text{总}} &= (4V / \pi \omega)^{0.5} \\ &= [4 \times 1.24 / (3.1415 \times 10)]^{0.5} \\ &= 0.40\text{m} \end{aligned}$$

所以，总管内径取值：400mm, 长度取 5m.

10.1.3 分烟管尺寸

分管流量 $V' = V / 2 = 1.24 / 2 = 0.62 \quad (\text{m}^3 / \text{s})$

$$\begin{aligned} \text{内径 } d_{\text{分}} &= (4V' / \pi \omega)^{0.5} \\ &= [4 \times 0.62 / (3.1415 \times 10)]^{0.5} \\ &= 0.281\text{m} \end{aligned}$$

考虑到调节的方便性分管内径取值为：280mm，长度取 4m.

10.1.4 支烟管尺寸

烟气在支管的流速为： $\omega = 10\text{m/s}$ ，流量 $V'' = 1.24 / 4 = 0.31 \quad (\text{m}^3 / \text{s})$

$$\text{内径 } d_{\text{支}} = (4V'' / \pi \omega)^{0.5}$$

$$= [4 \times 0.31 / (3.14 \times 10)]^{0.5}$$

$$= 0.199\text{m}$$

所以，支管内径应该不小于 119mm，考虑到调节的方便取值为：200mm，长度取 0.5m。

10.2 阻力计算

10.2.1 料垛阻力 h_i

根据经验每米窑长料垛阻力为 0.5Pa，因为该窑第 4 节为主抽烟口，零压面位于窑的 13~14 节交界处，所以：

$$h_i = (9 + 0.5) \times 2.08 \times 0.5 = 9.5 \text{ Pa}$$

10.2.2 位压阻力 h_g

烟气从窑炉至风机，高度升高 $H=1.8\text{m}$ ，此时几何压头为烟气流动的动力，即负压阻力，烟气温度 400°C ，所以：

$$h_g = -H(\rho_a - \rho_g) \cdot g = -1.8 \times [1.29 \times 273 / (273 + 400) - 1.30 \times 273 / (273 + 400)] \times 9.8 = -11.9 \text{ Pa}$$

10.2.3 局部阻力 h_e

局部阻力 ζ 可由查表得：

烟气从窑炉进入支管： $\zeta = 1$ ；

支烟管进入分烟管： $\zeta = 1.5$ ；

并 90° 转弯： $\zeta = 1.5$ ；

分管 90° 急转弯： $\zeta = 1.5$ ；

分管进入 90° 圆弧转弯： $\zeta = 0.35$ ；

分管进入总管: $\zeta = 1.5$;

并 90° 急转弯: $\zeta = 1.5$

为简化计算, 烟气流速均按 10m/s 计, 烟气温度按 400°C 计, 虽在流动过程中烟气会有温降, 但此时流速会略小, 且取定的截面积均比理论计算的偏大, 故按此值算出局部阻力只会偏大, 能满足实际操作需求。

$$\begin{aligned} h_e &= (1 + 1.5 + 1.5 + 1.5 + 0.35 + 1.5 + 1.5) \times 100/2 \times 1.3 \times 273 / (273 + 400) \\ &= 233.3\text{Pa} \end{aligned}$$

10.2.4 摩擦阻力 h_f

摩擦阻力系数: 金属管道取 $\zeta = 0.03$,

$$\begin{aligned} h_f &= \zeta (L_{支}/D_{支} + L_{分}/D_{分} + L_{总}/D_{总}) \times \omega^2 \rho / 2 \\ &= 0.03 \times (0.5/0.2 + 4/0.28 + 5.0/0.4) \times 100/2 \times 273 / (273 + 400) \\ &= 10\text{ Pa} \end{aligned}$$

10.2.5 风机应克服总阻力 $h_{总}$

$$h_{总} = h_i + h_g + h_e + h_f = 240.9\text{ Pa}$$

10.3 风机的选型

为保证正常工作, 取风机抽力余量 0.5, 所以选型应具备风压:
 $H = (1 + 0.5) \times 240.9 = 361.35\text{ Pa}$

流量取储备系数为 1.5, 风机排出烟气平均温度 250°C , 所以:

$$Q = 1.5 \times V_g \times (273 + 250) / 273 = 5218\text{ (m}^3/\text{s)}$$

10.4 液化石油气输送管径的计算

10.4.1 液化石油气总管内径的计算

液化石油气的流量为：55m³/h，取液化石油气在总管中的流速为：8m/s，总管选用一根管子，那么总管的内径为：

$$\begin{aligned} d_{\text{总}} &= 2 \times (v/3600 \pi \omega)^{0.5} \\ &= 2 \times [55 / (3600 \times 3.14 \times 8)]^{0.5} \\ &= 0.005\text{m} \end{aligned}$$

所以，总管内径取值：50mm

10.4.2 窑顶 窑底 窑侧的分管尺寸

液化石油气分管分组控制，共分 5 组 10 根，烟气在金属分管中流速，根据经验数据取 $\omega=8\text{m/s}$ ，

$$\begin{aligned} \text{内径 } d_{\text{分}} &= 2 \times (v/3600 \pi \omega)^{0.5} \\ &= 2 \times [55 / (3600 \times 3.14 \times 8 \times 10)]^{0.5} \\ &= 0.0156\text{m} \end{aligned}$$

所以，分管内径取值：16mm

10.4.3 通往烧嘴的液化石油气支管内径计算

窑体共安装了 84 个烧嘴，液化石油气支管总共有 84 根，而流速取 $\omega=6\text{m/s}$

$$\begin{aligned} \text{内径 } d_{\text{支}} &= 2 \times (v/3600 \pi \omega)^{0.5} \\ &= 2 \times [55 / (3600 \times 3.14 \times 84 \times 6)]^{0.5} \\ &= 0.0062\text{m} \end{aligned}$$

所以，分管内径取值：8mm

10.5 助燃风管计算

$$\text{助燃风量 } V_a = 55 \times 30.76 = 1691.8 \text{ m}^3/\text{h}$$

实际助燃风量 $V=1691.8 \times (273+20) / 273=1816 \text{ m}^3/\text{h}$

10.5.1 助燃风总管内径的确定

助燃气在总管中的流速为: $\omega=10\text{m/s}$,

助燃风管总管选用一根管子, 那么总管的内径为:

$$\begin{aligned} d_{\text{总}} &= 2 \times (V / 3600 \pi \omega)^{0.5} \\ &= 2 \times [1816 / (3600 \times 3.14 \times 10)]^{0.5} \\ &= 0.253\text{m} \end{aligned}$$

所以, 总管内径取值: 260mm

10.5.2 助燃风分管内径的确定

窑顶、窑底各 1 根分管, $n=2$, 流速均取: $\omega=10\text{m/s}$,

$$d_{\text{分}} = 2 \sqrt{1816 / (3600 \times 2 \times 3.14 \times 10)} = 0.179\text{mm}$$

所以分管内径取 180mm

10.5.3 窑顶窑底内的方管内径的确定

取 $\omega=9\text{m/s}$, 此分管采用方管, 埋入窑墙内部, 共四根。

则: 方形管截面积 $F=V / (4 \times 3600 \omega) = 1816 / (4 \times 3600 \times 9) = 0.014\text{m}^2$

所以方管边长: $L = \sqrt{0.014} = 0.118\text{m}$

取方管边长为 120mm

10.5.4 助燃风管通往烧嘴的管路管径

共 84 根烧嘴, 取流速为 $\omega=6\text{m/s}$,

$$d_{\text{支}} = 2 \sqrt{\frac{1816}{3600 \times 84 \times 3.14 \times 6}} = 0.036\text{mm}$$

取支管直径: 40mm

10.6 冷却带风管计算

冷却带鼓入冷风总量为 $9955 \text{ m}^3 / \text{h}$

项目	所占比例	鼓入冷风量
急冷带	60%	5973
缓冷带	—100%	—9955
快冷带	40%	3982

10.6.1 缓冷总管（抽风管）

缓冷风量 $V=9955 \text{ m}^3 / \text{h}$ ，取 $\omega=8\text{m/s}$

$$\text{缓冷总管: } d_{\text{总}} = 2\sqrt{\frac{9955}{3600 \times 3.14 \times 8}} = 0.594\text{m}$$

取缓冷总管内径：600mm

缓冷分管：n=8

$$d_{\text{分}} = 2\sqrt{\frac{9955}{3600 \times 3.14 \times 8 \times 8}} = 0.235\text{m}$$

取缓冷分管内径：240mm

缓冷支管：共设置了（16 个抽风口，16 根抽风支管）

$$d_{\text{支}} = 2\sqrt{\frac{9955}{3600 \times 3.14 \times 8 \times 16}} = 0.166\text{m}$$

取缓冷分管内径：200mm

10.6.2 急冷风管内径的确定

急冷总管内径

急冷风量 $V=5973 \text{ m}^3 / \text{h}$ ，取 $\omega=10\text{m/s}$

$$d_{\text{总}} = 2\sqrt{\frac{5973}{3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.460m$$

急冷分管内径

取 $\omega = 9m/s$ ，上下共 2 根方管， $n=2$

$$L = \sqrt{\frac{5973}{3600 \times 9 \times 2}} = 0.303 \text{ mm}$$

急冷风方管尺寸：300mm

急冷支管内径

取 $\omega = 8m/s$ ，共 30 根， $n=30$

$$d_{\text{支}} = 2\sqrt{\frac{5973}{3600 \times 3.14 \times 8 \times 30}} = 0.094m$$

急冷支管内径：90mm

快冷总管内径确定

$V=3982 m^3 / h$ ，取 $\omega = 10m/s$

$$d_{\text{总}} = 2\sqrt{\frac{3982}{3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.375m$$

总管内径：380mm

快冷分管内径确定

取 $\omega = 9m/s$ ， $n=2$

$$d_{\text{分}} = 2\sqrt{\frac{3982}{3600 \times 3.14 \times 9 \times 2}} = 0.280m$$

分管内径：280mm

快冷支管内径确定

取 $\omega=8\text{m/s}$, $n=24$

$$d_{\text{分}} = 2\sqrt{\frac{3982}{3600 \times 3.14 \times 8 \times 24}} = 0.086\text{m}$$

支管内径: 90mm

风机选型

助燃风机选型

助燃风机的风量: $V=1816\text{ m}^3 / h$

急冷风机选型

急冷风机的风量: $V=5973\text{ m}^3 / h$

抽热风机选型

抽热风机的风量: $V=9955\text{ m}^3 / h$

快冷风机选型

快冷风机的风量: $V=3982\text{ m}^3 / h$

各系统管道尺寸、风机型号规格见表 8-2

表 8-2 窑主体系统管道尺寸、风机型号规格

项目	抽烟		助燃	急冷	抽热风	快冷
管道尺寸/mm	总管	400	260	460	600	380
	分管	280	180	300	240	280
	支管	200	120(方管)	90	200	90
风机代号	抽烟风机 A		助燃风机 B	急冷风机 C	抽热风机 E	快冷风机 F
风机名称	高温离心风机		高压离心风机	高压离心风机	高温离心风机	高压离心风机
风机型号	Y9-35 型		9-19 型	4-72-11 型	Y9-35 型	4-72-11 型
全风压	361.35		8050	3930	1405	3240
风量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	5218		1816	5973	9955	1991
电机型号	Y132M-8		Y112M-2	Y90S-4	Y160M2-8	Y90S-2
功率/kw	3		4	1.1	5.5	1.1
转速 $/r \cdot \min^{-1}$	730		2900	1450	730	1450

11. 工程材料概算

11.1 窑体材料概算

11.1.1 轻质高铝砖的概算

每块轻质高铝砖的体积 $V = 0.23 \times 0.113 \times 0.065 = 0.00169m^3$

第 1 节~第 10 节，第 22 节~第 27 节：

$$V_n = 2 \times 0.78 \times 2.008 \times 0.23(10 + 6) + 0.13 \times 2.008 \times 2.640 \times (10 + 6) + 0.23 \times 2.008 \times 2.030 \times (10 + 6) = 38.061m^3$$

取多余的砖的数量占总量的 3.5%

本窑共需轻质高铝砖的数量为：

$$N_1 = V_n(1 + 0.035) / V = 23310 \text{ 块}$$

11.1.2 重质高铝砖

每块重质高铝砖的体积 $V = 0.23 \times 0.113 \times 0.065 = 0.00169m^3$

第 11 节~21 节轻质高铝砖的体积:

$$V_g = 2 \times 0.88 \times 2.008 \times 0.23 \times 11 + 0.23 \times 2.008 \times 2.640 \times 11 \\ + 0.23 \times 2.008 \times 2.030 \times 11 = 32.665m^3$$

取多余的砖的数量占总量的 3.5%

本窑共需轻质高铝砖的块数为:

$$N_2 = V_g (1 + 0.035) / V = 20005 \text{ 块}$$

11.1.3 硅藻土砖

每块硅藻土砖的体积 $V = 0.23 \times 0.113 \times 0.065 = 0.00169m^3$

第 1 节~27 节硅藻土砖的体积:

$$V_{gz} = 0.195 \times 2.640 \times 2.008 \times 27 = 27.910m^3$$

取多余的砖的数量占总量的 3.5%

本窑共需硅藻土砖的块数为:

$$N_3 = V_{gz} (1 + 0.035) / V = 17093 \text{ 块}$$

11.1.4 硅酸铝棉板的概算

第 1 节~第 6 节, 第 22~27 节共 12 节, 每节的硅酸铝棉板的面积为:

$$S_1 = 2.640 \times 2.008 + 0.78 \times 2.008 \times 2 = 8.4336m^2$$

第 7 节~第 21 节共 15 节, 每节的硅酸铝棉板的面积为:

$$S_2 = 2.640 \times 2.008 + 0.88 \times 2.008 \times 2 = 8.8352m^2$$

本窑共需硅酸铝棉板的面积为:

$$S_{\text{总}} = 12S_1 + 15S_2 = 233.7312m^2$$

11.2 钢材的概算

钢材的概算以窑的一节用钢材量为基准

11.2.1 方钢的概算

方钢使用 $60 \times 4\text{mm}$ 的钢材，侧横梁用钢长度 $L_1 = 2.008 \times 10 = 20.08\text{m}$

上下横梁用钢长度 $L_2 = 2.76 \times 5 = 13.8\text{m}$

11.2.2 钢板的概算

在窑的底部铺设 3mm 的钢板，其用量 $S = 2.64 \times 2.008 = 5.30\text{m}^2$

11.2.3 角钢的概算

角钢都使用 $56 \times 56 \times 5$ 等边角钢。底部角钢用量 $L_1 = 2.76 \times 4 = 11.04\text{m}$

吊顶所用角钢为两根并排 $L_2 = 2.76 \times 21 = 57.96\text{m}$

在烧成带用角钢固定烧嘴，其用量 $L_3 = 2.1 \times 4 = 8.4\text{m}$

合计 $8.4 \times 10.5 = 88.2\text{m}$

11.2.4 全窑所用钢材量

方钢: $(20.08 + 13.8) \times 27 = 914.76\text{m}$

钢板: $5.30 \times 27 = 143.1\text{m}^2$

角钢: $(11.04 + 57.96) \times 27 = 1863\text{m}$

后 记

紧张和忙碌中，本次毕业设计已临近结束。从毕业实习至今短短的两个多月的时间，我把大学四年所学知识，特别是专业方面的知识系统地应用于本次设计里，这次毕业设计一方面检验了我所学的基础及专业课程的熟练程度；也给了我机会把我所学知识融会贯通、加深理解、寻求创新。整个设计过程大大加深了我对窑炉结构工作系统的认识，为日后设计、控制窑炉打下坚实理论基础。

就目前硅酸盐工业窑炉的发展趋势来说，现代的陶瓷窑炉已远非是昔日的土木砖石“构筑物”，而早已变成了机电一体化、有较高技术含量的综合技术产物——“烧成机器”。窑炉上安装使用了大量的新材料和机电产品，使得整个生产工序变得流畅、简单。最后对我的毕业设计总结如下：

①采用明焰裸烧工艺。燃烧产物与制品直接接触，热交换充分，制品受热均匀，可以实现低温快烧，降低单位能耗，提高产量。②窑墙及窑顶砌体大量使用耐火纤维，因而使窑炉升、降温快，保温好，窑体外表面温度低，散热及蓄热均少，从而大大降低了能耗。③窑膛空间结构、断面构造设计等设置合理。④采用水煤气作为燃料，选用高速调温烧嘴，并采用合理布置、分组控制的燃烧系统。高速调温烧嘴喷出气体速度可大于 100m/s，质量流量大，搅动剧烈，温度又可调，从而大大强化了窑内尤其是低中温段的对流换热，使窑内制品加热极为均匀，烧成周期大为缩短。⑤配置了合理的通风工作系统。不仅全面地满足了窑炉的工作要求，而且还做到了通风机与管网的良好匹配，从而减少了电能的消耗。⑥窑炉装配化程度高。可全部在工厂制造，再在现场组装，因而施工周期短，且适合于模数化生产。

参考文献

- [1] 胡国林《建陶工业辊道窑》. 北京. 中国轻工业出版社. 1998 年
- [2] 刘振群《陶瓷工业热工设备》. 武汉. 武汉工业大学出版社. 1998 年
- [3] 王淮邦《耐火材料工艺学》第二版. 北京. 冶金工业出版社. 1993 年
- [4] 宋瑞《现代陶瓷窑炉》. 武汉. 武汉工业大学出版社. 1996 年
- [5] 郭海珠《建材工业信息》. 中国期刊网. 1994 年 06 期
- [6] 蔡悦民《硅酸盐工业热工技术》. 武汉. 武汉工业大学出版社. 1995 年
- [7] 李家驹《日用陶瓷工艺学》. 武汉. 武汉工业大学出版社. 1998 年
- [8] 胡国林《窑炉砌筑与安装》. 景德镇陶瓷学院教材. 1992 年

- [9] 胡国林《意大利唯高公司 FRW2000 型辊道窑结构性能分析》. 陶瓷 1990
- [10] 景德镇陶瓷学院科技信息开发部《辊道窑技术资料汇编》
- [12] 陈帆《现代陶瓷工业技术装备》. 北京. 中国建材工业出版社. 1999 年
- [11] 中国硅酸盐学会陶瓷分会建筑卫生陶瓷专业委员会《现代建筑卫生陶瓷工程师手册》. 北京. 中国建材工业出版社. 1998 年

- [12] 《热工手册》

关于中国硅酸盐工业窑炉发展现状与展望调研报告

随着燃料结构的改变,国外陶瓷工业的窑炉热工技术从 20 世纪 50 年代末开始至 70 年代初,即由燃煤、重油等转向使用天然气、液化石油气和轻油等,实现了窑炉热工技术的三大突破:①高速调温烧嘴的发明和使用;②新型、高级耐火材料和隔热材料的广泛使用;③精密完善的自动控制系统的采用。在这三大技术突破的基础上,产生并发展了以推板窑、辊道窑为连续式作业窑炉代表,以梭式窑、钟罩窑为间歇式作业窑炉代表的全新一代窑炉。

我国自上世纪 80 年代开始从国外引进了一批先进的窑炉设备的同时也引进了相应的热工技术。随着设备及技术的引进、改革的深入、开放的扩大以及经济体制的转型,对于陶瓷工业及窑炉的要求,也由过去奉行的“高产、优质、低消耗”逐渐转向追求“优质、低耗、高产、灵活、绿色”等更能适应新的经济体制的目标。

我国的陶瓷窑炉热工理论工作者也为我国窑炉热工技术的进步做出了自己的贡献。自上世纪 80 年代初就积极投身于引进设备和技术的消化、吸收、仿制、创新工作。他们很快就学会并掌握了计算机技术,接着在原有工作的基础上,同时开展了数学分析研究、物理模型的试验研究和数学模型的数值模拟研究,在多方面取得了一大批有价值、水平较高的成果。通过这些研究,使人们对窑炉中的热工过程有了更深入的了解,对于其中的若干重要问题有了一些新的认识。这些具体成果和认识的提高,对于热工技术的发展和窑炉结构、生产作业的进步有较大的指导意义,并产生深远的影响。在热工理论研究、技术引进与自主开发的基础上,各窑炉公司先后研制、开发出许多优秀的陶瓷工业窑炉,对一些技术问题有了更新、更深入的了解,并在窑炉产业界基本达成了共识。

改革开放以来,经过一代人的不懈努力,我国已经形成了初具规模、技术水平较高、配套基本齐全的陶瓷窑炉产业,主要窑型一辊道窑、窑车式隧道窑和梭

式窑均已达到或接近 20 世纪 90 年代国际先进水平。现在,我国的陶瓷窑炉产业不仅已经可以为国内的陶瓷建筑卫生陶瓷、日用陶瓷、电工陶瓷、电子陶瓷等行业提供成套的优质窑炉装备,而且还可为化工、冶金、环保等行业提供部分工业炉装备,并已具有出口这些窑炉装备的能力。近二十年来,我国陶瓷窑炉的技术进步和陶瓷窑炉产业的形成与发展是有目共睹,并为世人所称道的。

随着我国国民经济的迅速发展、人民生活水平的大幅度提高以及人们的一些陈旧观念的改变,厨房、卫生间在住宅中的地位发生了根本性的变化。作为住宅及其厨房、卫生间的主要装修材料及设备——日用陶瓷和建筑卫生陶瓷,尤其是高中档的产品的需求大增。另外,电工陶瓷等的需求也大幅增长。由此带动了传统陶瓷行业的迅猛发展,烧成陶瓷制品的关键设备——窑炉也因此而有了巨大的市场和长足的进步。现在,在这一行业中,窑型多种多样,已广泛采用洁净燃料,一些窑炉的主要技术经济指标也已达到或接近国际先进水平,从而可为陶瓷行业提供强大而坚实的技术支持,使该行业走上可持续发展的健康之路,并为用户提供足够数量的优质窑炉,逐步取代进口产品并可望出口部分产品。另外,窑炉作为“产品”也将走向国际市场,参加全球性竞争。

长期以来,我国传统陶瓷烧成用窑炉一直不够先进,多数只能生产中低档产品。经过近二十年来的引进、仿造、研究与开发,我国的窑炉的技术水平得到迅速的大幅度的提升。传统陶瓷烧成用窑炉的三种主要窑型——辊道窑、窑车式隧道窑和梭式窑均有了飞跃的进步。它们的主要的技术进步和特点可以归纳如下:

1、多采用明焰裸烧工艺。燃烧产物与制品直接接触,热交换充分,制品受热均匀,可以实现低温快烧。

2、采用低导热率、低蓄热的轻质耐火或隔热材料。窑墙及窑顶砌体大量使用耐火纤维,窑车衬砌采用轻质、低蓄热材料及合理的结构,因而使窑炉升、降温快,保温好,窑体外表面及车三温度低,散热及蓄热均少,从而大大降低了能耗。

3、窑膛空间结构、断面构造设计及气幕等设置合理。

4、采用天然气、液化石油气或轻柴油等洁净燃料，选用高速调温烧(喷)嘴，并采用合理布置、分组控制的力一式设置燃烧系统。高速调温烧嘴喷出气体速度可大于 100m/s，质量流量大，搅动剧烈，温度又可调，从而大大强化了窑内尤其是低中温段的对流换热，使窑内制品加热极为均匀，烧成周期大为缩短。

5、窑炉的温度、压力、气氛及流量等参数的自动控制一般已用计算机控制，并多采用先进的控制算法，例如多变量模糊控制(FC, Fuzzy Control)结合 PID 的控制算法，通过计算机、模糊控制器、可编程序控制器(PLC)和智能仪表，实现高精度的自动调节、控制和管理。

控制系统的关键部位尚多选用进口设备，以充分保障窑炉运转和使用的可靠性，且使维护修理费用大幅度三降，从而降低窑炉运行成本。

6、配置了合理的通风工作系统。不仅全面地满足了窑炉的工作要求，而且还做到了通风机与管网的良好匹配，从而减少了电能的消耗。

窑炉进出风管多采用不锈钢材质。既可防止污染制品，又增加了管道的使用寿命。

7、自动进出窑系统、窑车运转系统、步进回车系统等均采用 PLC 实现全自动程序控制，从而大大降低了操作人员的劳动强度。现代化的安全和报警系统设施、科学化的连锁程序编排，还大大提高了窑炉操作的安全性和可靠性。

8、采用先进的计算机控制和管理软件使操作变得简单直观和人性化，且更利于数据的积累与分析，进而实现对窑炉的科学化管理。

9、窑炉装配化程度高。可全部在工场制造，再在现场组装，因而施工周期短，且适合于模数化生产。

从以上的介绍和对照中可以石到我国传统陶瓷烧成用的窑炉经过近年来的迅速发展和提升，已经达到国际先进水平，进入了成熟期，并将会在较高水平的“平台”上稳定一个时期。这些窑炉相对于进日窑炉已有较强的竞争力。日前应该增加这些窑炉的产量，迅速推广，以产生更大的经济效益和社会效益。在此，也希望中外窑炉用户了解这一动向，并予以选用。

然而,科学技术的进步是没有止境的。况且我国日前的窑炉及其产业也都还存在一些明显的不足之处,例如,对于高速烧嘴及相关的燃烧、控制、窑内过程的理论研究和技术开发均较薄弱。烧嘴和自动控制仪表、调节器等主要还依赖进口,有待加强这方面的基础性研究开发工作。应组织一些窑用关键部件(烧嘴,自动化仪表、元器件等)的攻关,并实现产业化生产,争取早日国产化,以取代进口。以我国目前窑炉产业的技术水平和实力,已可组织窑炉成套出口。应尽可能多地占领中档以至三窑炉的国际市场,并争取向高端窑炉的国际市场进军。

陶瓷窑炉产业在自身的迅速发展和走向全球化的进程中,除了科学研究和技术开发之外,还有一个问题是不容忽视的,那就是标准化。在标准化这一基础性建设中,首先要做好窑炉结构的定型与规格系列化工作。这项工作需要陶瓷窑炉产业所有公司全体同仁的共同参与和努力才能做好。

目前,我国的陶瓷窑炉产业虽然已经形成,并已有了较大的发展,但公司总数偏多,规模普遍偏小,且一般没有独立的科研力量,技术开发能力也有待加强。今后应进一步完善陶瓷窑炉产业的内部结构,通过正当竞争发展优势企业,逐步形成大而强的龙头企业,并增强企业内部的研发能力。对于技术的开发,一方面要加强自主开发,另一方面也要注意技术引进;既要追求先进,与国际接轨,也要讲求实效,以实用、简单为原则。还应加强与高校、研究设计单位的协作与联合,走产学研三结合的道路。

另外,现代的陶瓷窑炉已远非是昔日的土木砖石“构筑物”,而早已变成了机电一体化、有较高技术含量的综合技术产物——“烧成机器”。窑炉上安装使用了大量的新材料和机电产品,因此仅仅依靠窑炉公司自身的力量是不可能研发和生产所有这些材料和产品的。窑炉公司只有通过与众多的相关产业的协作,才能完成建设窑炉项目的任务。与陶瓷窑炉产业密切相关产业有燃料化工,燃烧设备、耐火材料、通风机、自动化仪表设备制造产业等。今后应进一步加强与这些相关产业的协作,以获得双赢的结果。

The study of chines silicate industry kiln development situation and surveyed

The kiln thermal technology of the foreign ceramic industry had been to the beginning of the seventies since the end of the fifties of the 20th century, with the change of the fuel structure , namely turn from firing coal , heavy oil ,etc. to natural gas , liquefied petroleum gas and light oil ,etc., having realized three of the thermal technology technology of the kiln is broken through greatly: (1)The invention and use of the mouth in adjust the temperature and at a high speed; (2)Mass use of new-type , advanced refractory material and thermal insulator; (3)Adoption of the accurate and perfect automatic control system. On the basis of these three major technological break-through , produce and develop regard pushing a kiln of board kiln , roller as continuous kiln of type homework representative, regard the shuttles loom type kiln (drawer kiln) , high cap kiln (clock covers the kiln) as the kilns all of new generation of kiln representatives of intermittence type homework.

With the reform and opening-up of China , began to introduce a batch of advanced kiln equipment from foreign countries since the eighties of last century, introduced corresponding thermal technology at the same time . With the introduction , deepening of the reform and open enlargement of the equipment and technology, the fundamental transition has taken place too in people's idea. Because of the transition of the economic system, the demand to ceramic industry and kiln, " high yield " followed in the past too, high-quality " is it pursue " high-quality , low

consumption , high yield , , flexible , green " more adaptive to mark new a day in economic system to change direction gradually by low cong.

Ceramic kiln thermal technology theory workers of our country have made one's own contribution for the progress of the thermal technology technology of kiln of our country too. Threw oneself into and introduced the digestion of the equipment and technology, sucking industry actively since the beginning of the eighties of last century, and later on modeling , innovations. They have learn and mastered the technology of the computer soon, then on the basis of original work, experimental study and numerical simulation of the mathematics model of launching mathematics anal and researching , physical model at the same time are studied, have made large quantities of valuable achievements with higher level in the many aspects

Through the research , make people have a deeper knowledge of thermal technology course in the kiln, have some new understanding to several important problems among them. The improvement of these concrete achievements and understanding, have greater directive significance to development of thermal technology and progress of structure of the kiln , homework, exert a far-reaching influence. On theoretical research of thermal technology , technology import and foundation that is developed independently, every kiln company successively developed, developed a lot of outstanding industrial kilns of pottery, having had newer , deeper understanding to some technological questions, and industrial circle has reached common understanding basically in the kiln.

Since the reform and opening-up, through untiring efforts of a generation, own to is it begin to take shape to form our country have,

engineering level high forming a complete set complete ceramic kiln industry basically, a roller and one dish of kilns, the kiln car type tunnel kiln and shuttles loom type kiln reaches or close to the international most advanced level of 1990s only in the main kiln type. Now, it can be the domestic ceramic building hygiene pottery that the industry of ceramic kiln of our country not merely passes only, daily pottery , electromechanical ceramics , electronic pottery ,etc.) the trade offers the high-quality kiln forming a complete set to equip, and can also offer some industry stoves for such trades as chemical industry , metallurgy , environmental protection ,etc. to equip , and export the ability equipped in these kilns only. In the past 20 years, the ceramic kiln technological progress and forming and development of the industry of ceramic kiln of our country have had day to see altogether, and the one that praise for common people.

Motive force that the industry of ceramic kiln forms and develops is state basic policies of reform and opening-up, building hygiene ceramic great development of trade, foreign advanced person equip and introduction of technology. Through the efforts of entrepreneurs , engineers and technicians and the whole trade staff, just form the situation of today. It is hard-won. So, we should treasure it , and make joint efforts to safeguard it, in order to impel it to get greater development

Take this opportunity , want to talk to prospect ,etc. on some views and suggestions on ceramic kiln thermal technology theoretical research and the development levels of technological development , ceramic kiln of China, in order to exchange and learn from each other with the ceramic

academia of China and foreign countries and industrial circle. A ceramic kiln of thermal technology theoretical researches and progress of technological development we review to these theory research work and technological development, sum up 14 question it now, then every comment and look into the distance. In last 20 years of last century, the ceramic kiln thermal technology theoretical research and technological development of our country roughly concentrate on some following respects:

1 adopt more bright naked to boil the craft flame. Burn result with keep in touch directly by products , hot to exchange abundant , it is even for products to heat, can realize the low temperature is burnt quickly .

2 it is fire-resistant to adopt the low heat conduction rate , low and regenerative light quality or thermal insulator. Kiln wall and kiln carry step body use fire-resistant fibber in a large amount, kiln car is it is it adopt light quality , low regenerative material and reasonable structure to build to line with, therefore make kiln rise , is it fast , keep warm kind to lower the temperature, kiln body surface and car three temperature low, dispel the heat and regenerative and lack , thus reduced energy consumption greatly .

3 kiln thorax space structure , section counts

4 clean fuel of adopting natural gas , liquefied petroleum gas or light diesel oil etc., select for use at a high speed is it cook mouth to adjust the tempera , is it assign , divide into groups control strength first type set up the system of burning rationally to adopt. Is it cook mouth is it give vent to anger body speed can greater than 100m/s , flow heavy quality have , it is violent to stir to gush out to adjust the temperature

at a high speed, being adjustable, temperature strengthen kiln, especially low middle temperature convection of piece change hotly greatly, make kiln products heat extremely even, boil cycle is very sned.

5 the automatic control in such parameters as the temperature of the kiln, pressure, atmosphere and flow, etc. is generally controlled it the computer, and adopt more advanced control algorithms, for example many variables are controlled fuzzily (FC, Fuzzy Control), combine P control algorithm, worker of D, through computer, fuzzy controller, can programme the controller (PLC) and intelligence instrument, realize high-accuracy automatic regulation, control and management. Key position of control system select for use enter day equipment more still, in order to ensure kiln turn round and dependability that use fully, make it repair expenses 3 lower by a large margin, thus reduce the operating cost of the kiln not to maintain.

6 dispose the reasonable ventilation work system. Meet job requirements of kiln, make sure ventilator and pipe network good to match in an all-round way, thus reduced the consumption of the electric energy. The kiln passes in and out the tuber pipe and adopts more stainless steel materials. Have not only can prevent the pollution products increased the service life of the pipeline but also.

7 pass in and out kiln system, kiln car turn round system, walk into carriage return system, etc. adopt PLC realize full-automatic procedure control automatically, thus reduced the as lab intensity greatly. Modernized security, facility of warning system, scientific chain procedure grade, have also improved the security and dependability operated in kiln greatly.

8 adopt advanced computer control with management software making it become simply and ocularly and humanizing not to operate, and benefit the accumulation and analysis of the data even more , and then realize that manages to the scientific process of the kiln.

9 the kiln assembles the degree of melting high. Can all make in the workshop , assemble at the scene again, therefore the cycle of constructing is short, and is suited to the modulus producing.

And can stone get of our country traditional kiln that pottery is it spend to boil through the rapid development in recent years and promote in contrasting from introduction of the above, unless it is the own reach into international most advanced level, it enter on the mature period, and can steady one period of period in high-level " platform ". There is stronger competitiveness own in entering the kiln on day in these kilns. Should increase the output of these kilns a few days ago, popularized rapidly, in order to produce greater economic benefits and social benefit. Here , hope Chinese and foreign kiln user find out about this tendency , and select for use too.

However, the progress of science and technology is endless. Moreover the kiln and producing and all but also having some obvious weak points to charge too a few days ago of our country, for example is it dispute mouth and relevant burning , control , theoretical research and relatively weak technological development of course in the kiln to cook as to high speed. Is it dispute mouth and automatically controlled instrument , regulator ,etc. also rely on import mainly to cook, remain to strengthen the basic research and development in this respect. Should organize some kilns with tackling key problems of key part (burn the mouth , automatic

instrument , components and parts ,etc.) , realize production for industrialization, try to domesticize as soon as possible , in order to replace into. Israel our country kiln produce engineering level and strength that charge a few days ago, own to can organize kiln export in a complete set. Should capture middle-grade to with three international market of kiln , is it march to advanced international market of kiln to strive for as many as possible.

Ceramic kiln industry is it charge in one's own rapid development and move towards among the process that globalize to produce, besides scientific research and technological development , a question can't be ignored, that is standardization. In standardizing basic construction this , should first do finalize the design and workday of seriation such as specification , kiln of structure well. The need of work ceramic kiln is it charge all company all common participation of colleague and do well hard to produce. At present, though the industry of ceramic kiln of our country is own through taking shape, and get greater development ownly, but the total amount of companies leans towards much, the scale is generally small, and does not generally have independent scientific research strength, technological development ability remains to add too. Should perfect ceramic kiln inside structure of industry further in the future , develop advantage enterprise through proper competition, form great and strong leading enterprises progressively, strengthen the research and development ability inside enterprises. To the development of technology , should strengthen independent development , should pay attention to the technology import too; Should court the advanced person , is in line with international standards , should stress practical results

too, on the principle that practical , simple. Should also strengthen the cooperation with the university , research designing unit and unite , take the road to 3-in-1 combination involving production, teaching, research.

In addition, it is the building brick stone " structures " in the past that the modern ceramic kiln is far from own, and for a long time own to turn electromechanics into integrate , have high-tech comprehensive technological result of content " cook into a machine " one by one. Install and use a large number of new materials and electronic products on the kiln, rely on oneself , Company of kiln , it is impossible for strength to research and develop and produce material and product all these only. Kiln Company through cooperate with numerous relevant industries, could is it build task , kiln of project to finish only. The industry closely related to industry of ceramic kiln has fuel chemical industries, burn equipment , refractory material , ventilator , automatic instrument device fabrication industry ,etc.. Should strengthen and cooperate with these relevant industries further in the future, in order to obtain the win-win result.

致 谢

本次设计及说明书的撰写是在指导老师陈功备老师的细心关怀,指导下完成的。二个月来,他时刻关心我们设计研究的进展和论文进度,在设计及说明书撰写上倾注了大量的心血,对期间遇到的问题仔细分析,并与我们共同探讨,研究解决方法。指导老师的关怀和对学术的严谨态度令我终生难忘,在此由衷地感谢他细心的教诲。

四年的大学生活即将结束,对于经过了紧张忙碌而即将获得成功和喜悦的毕业生来说,毕业设计的成果和每一个日日夜夜将永远留在我的记忆深处。

最后,我们所取得的所有成绩都与关心我们的各位老师有着密切的关系,在此我衷心感谢指导老师陈老师及给予我帮助的各位老师!是他们给予我们一切。

在即将毕业走向社会之际,感谢景陶母校四年的培养,感谢热能工程系四年的关怀,感谢所有老师四年的教诲。

梁慧汉

2014-05-21