



本科生毕业设计

年产 90 万 M^2 内墙砖燃油辊道窑炉设计

院 系	工程系
学 号：	201030453107
姓 名：	康浩东
专 业：	热能与动力工程
指导老师：	陈功备老师
完成日期：	2014-5-1

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	康浩东	指导教师	陈功备
题目	年产 90 万 M ² 内墙砖燃油辊道窑炉设计		
<p>主要研究内容和设计技术参数：</p> <p>1、产品名称及规格：600×600×10mm 内墙砖；</p> <p>2、产量：90 万 M²/年；</p> <p>3、年工作日：330 天；</p> <p>4、燃料：0#柴油；</p> <p>5、烧成合格率：97%；</p> <p>6、坯体入窑水分：1.5%；</p> <p>7、烧成周期：69 分钟；</p> <p>8、氧化气氛烧成；</p> <p>9、烧成温度：1180℃。</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>			

景德镇陶瓷学院科技艺术学院毕业设计（论文）任务书.....	2
1 前言.....	4
2 窑体尺寸的确定.....	5
2.1 进窑砖坯尺寸.....	5
2.2 排砖方法、内宽，内高的确定.....	6
2.3 烧成制度的确定.....	6
2.4 窑长及各带长.....	7
3 工作系统的确定.....	9
3.1 排烟系统.....	9
3.2 燃烧系统.....	10
3.3 冷却系统.....	10
3.4 窑体附属结构.....	11
3.5 传动系统.....	12
3.6 测温孔及观察孔.....	13
4 窑体材料确定.....	14
4.1 窑体材料确定原则.....	14
4.2 窑体材料厚度的确定原则.....	14
4.3 表 5：全窑体所用材料及厚度列表.....	15
5 燃料燃烧计算.....	16
5.1 空气量计算：.....	16
5.2 烟气量计算.....	17
5.3 理论燃烧温度的计算.....	17
6 物料平衡计算.....	18
6.1 每小时烧成制品质量.....	18
6.2 每小时生成干坯的质量.....	18
6.3 每小时生成湿坯体的质量.....	18
6.4 每小时蒸发自由水质量.....	18
6.5 每小时从精坯中产生的 CO ₂	19
7 预热带烧成带热平衡计算.....	19
7.1 热平衡计算准则.....	19
7.2 热平衡示意图.....	19
7.3 热收入项目.....	20
7.4 热支出项目.....	21
7.5 热平衡方程.....	28
8 冷却带热平衡计算.....	29
8.1 计算基准：.....	30

8.2 热收入项目.....	30
8.3 热支出项目.....	30
8.4 热平衡方程.....	34
9 烧嘴选型.....	36
10 传动计算.....	37
10.1 传动系统的选择.....	37
10.2 传动过程：.....	37
10.3 辊子材质的选择.....	37
10.4 辊距的确定.....	37
10.5 辊子传动过程中的联接方式.....	38
10.6 辊子转速的选择.....	38
11 管道尺寸、阻力计算及风机的选用.....	39
11.1 排烟风机的管道尺寸、阻力计算.....	39
11.2 其他管道及风机.....	41
12 材料概算.....	45
12.1 窑体材料概算.....	45
12.2 钢材的概算.....	46
后 记.....	47
参考文献.....	48

1 前言

关键词：辊道窑 0#柴油 节能

本设计说明书对所设计的年产 90 万 M² 内墙砖燃油辊道窑炉加以说明

窑顶采用耐热钢穿轻型吊顶砖的吊顶结构，为了降低全窑的热损失较少单位产品的热耗，全窑均采用轻质耐火材料。燃料用 0#柴油，采用高速调温烧嘴对制品进行裸烧来强化窑炉内部传热，同时对高速烧嘴可进一步调节试窑内温度均匀，提高成品率，从而达到节能的目的。

为有效利用烟气热，在窑炉前段采用集中排烟的方式，另外在缓冷段采用抽热空气的方式来冷却制品，对热烟气也可加以利用。对全窑的控制采用计算机自动控制来实现，既提高了产品的成品率又降低了工作人员的工作强度，减少了生产成本。

2 窑体尺寸的确定

2.1 进窑砖坯尺寸

产品规格：600×600×10 mm

产品宽度 600mm，考虑烧成收缩为 5%，则：

$$\text{坯体尺寸} = \frac{\text{产品尺寸}}{1 - \text{烧成收缩率}} = \frac{600}{1 - 5\%} = 632\text{mm}$$

2.2 排砖方法、内宽，内高的确定

2.2.1 排砖方法及内宽 内宽

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，所用的燃料等因素，所以暂定窑内宽 B=2100mm。而窑体离窑墙内壁一般有 100~200mm 间隙，取 102mm。根据了解。横向的胚体是紧贴在一起，并没有留间隙。所以内宽等于砖坯尺寸×每排片数 + 砖坯离窑内壁的间距。

则可排砖数为： $n = (2100 - 2 \times 102) \div 632 \approx 3$ 片

故确定并排 3 片，则窑内宽 $B = 632 \times 3 + 102 \times 2 = 2100\text{mm}$

最后定窑内宽为 2100mm。

内高

内高为窑道内整个空间的高度，等于辊上高（辊道中心线至窑顶的距离）与辊下高（辊道中心线至窑底的距离）之和。内高必须合理，既能有利于产品换热满足烟气有足够的流动空间，又必须满足一定的烧成空间和冷却空间，所以，内高的确定有一定的原则，为了有利于热量的传递，三带的内高不应一样，烧成带和急冷、缓冷带由于温度较高，为了保证有足够的烧成空间和冷却空间。所以，内高可较其他两带稍高一些。

内高设置如下 单位（mm）：

温度较低处：预热升温段 25~900℃

冷却降温段：700~80℃

温度较高处：烧成升温段：900~1180℃

急冷降温段：1180~700℃

表 1 内高各带划分

位置	预热升温段、冷却降温段	烧成升温段	急冷降温段
辊上高	350	450	350

辊下高	350	350	350
内总高	700	800	800

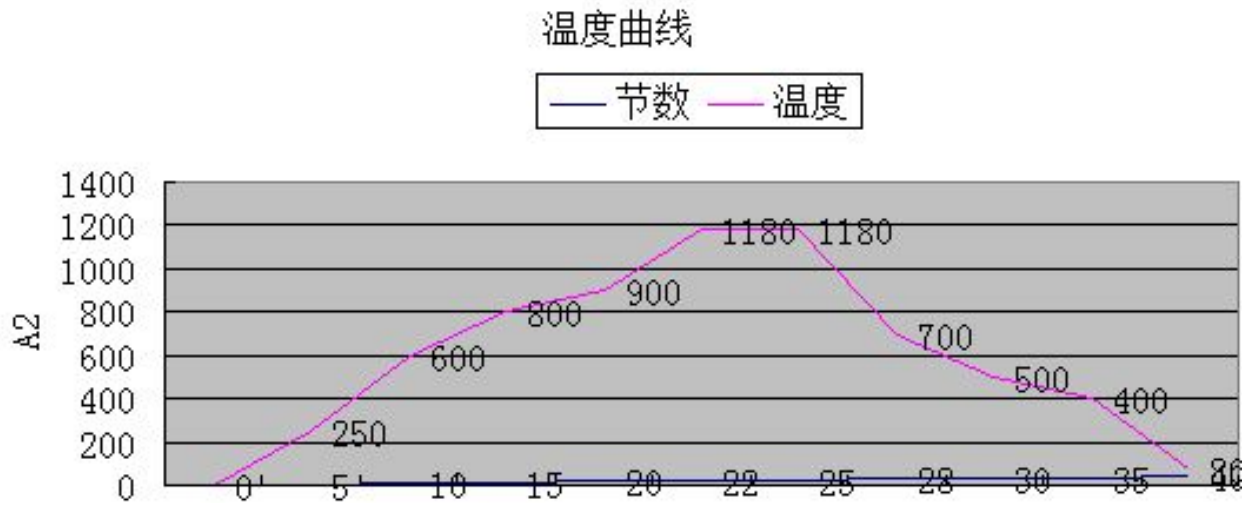
2.3 烧成制度的确定

(1) 温度制度:

- ① 烧成周期:69min
- ② 表 2、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	20~250	8	28.76	11.6
预热带	250~900	24	27	34.8
烧成带	900~1180	11	25.45	16
冷却带	1180~80	26	-42.3	37.7
累计		69		100

③ 温度曲线图



- (2) 气氛制度: 全窑氧化气氛
- (3) 压力制度: 预热带-8~-4 Pa , 烧成带 < 8 Pa

2.4 窑长及各带长

2.4.1 窑长

$$\begin{aligned}\text{窑容量} &= \frac{\text{年产量 (m}^2/\text{年)} \times \text{烧成周期 (h/窑)}}{\text{年工作时间 (h/年)} \times \text{产品合格率 (\%)}} (\text{m}^2/\text{窑}) \\ &= \frac{900000 \times (69 \div 60)}{330 \times 24 \times 97\%} = 134.72 (\text{m}^2/\text{窑})\end{aligned}$$

同一列砖距取 30 mm，则装窑密度=每米排数×每排片数×每片砖面积

$$= \frac{1000}{632 + 30} \times 3 \times 0.6 \times 0.6 = 1.631 \quad (\text{m}/\text{窑})$$

$$\text{所以，窑长} = \frac{\text{窑容量}}{\text{装窑密度}} = \frac{134.72}{1.631} = 82.6 \text{ m}。$$

利用装配式，由若干节联结而成，由于制品的尺寸是 600×600×10mm，且棍棒在高温的时候会有一些变形。考虑这些因素。设计棍棒中心间距为 99.5mm。设计每节 20 根棍棒，即每节长 2100mm 设计每节长度为 2100 mm，节间联结长度 10.5mm，总长度 2100 mm

$$\text{节数} = \frac{82.6}{2.1} = 39.33 (\text{节}) \text{取节数为 } 40 \text{ 节}。$$

所以，窑长度为：L=2100×40=84000 mm

2.4.2 各带长的确定

对于冷却带各段的设置：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，因为高温下的应力大部分被液相的弹性和流动性所补偿。该阶段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。而缓冷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。所以三段的时间分配分别为 5.0, 11.2, 10.8 分钟。

根据烧成曲线中温度的划分，各段长度：

$$\text{抽烟段：} \quad \frac{84000 \times 11.6\%}{2100} = 5 \quad (\text{节}) \quad \text{取 } 5 \text{ 节}$$

$$\text{预热带：} \quad \frac{84000 \times 34.8\%}{2100} = 14 \quad (\text{节}) \quad \text{取 } 14 \text{ 节}$$

$$\text{烧成带：} \quad \frac{84000 \times 16\%}{2100} = 6 \quad (\text{节}) \quad \text{取 } 6 \text{ 节}$$

$$\text{保温带：} \quad \frac{84000 \times 37.7\%}{2100} = 15 \quad (\text{节}) \quad \text{取 } 15 \text{ 节}$$

急冷段：取 3 节

$$\text{长度} = 3 \times 2100 = 6300 \text{ mm}$$

缓冷段：取 6 节

$$\text{长度} = 6 \times 2100 = 12600 \text{ mm}$$

快冷段：取 6 节

$$\text{长度}=6 \times 2100=12600\text{mm}$$

表 3 窑炉各带划分

	温度段（℃）	时间（min）	升温速率（℃ / min）	节数
窑前段	25-250	8	28.75	5
预热带	250-900	24	27	14
烧成带	900-1180	6	25.45	3
	1180-1180	5	—	3
急冷段	1180-700	5	-100	3
缓冷段	700-400	11	-27	6
快冷段	400-80	10	-30	6

2.4.3 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 3.3m。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 5.4m

2.4.4 窑体总长度的确定

$$\text{长度}=84000+3300+5400=92700\text{mm}$$

3 工作系统的确定

3.1 排烟系统

在窑前段第 1、3、5 节设置排烟口，采用 3 段分散排烟的方式，且上下交错分布，使内部气流扰动剧烈，排水效果较好。在每段排烟处设 3 个排烟口直通窑体外，在排烟口出口处设置一条支烟管，每条支烟管设置排烟闸，以调节烟气支流量。然后经水平分管进入总烟管，水平管道第 3、4 节之间设置排烟闸，控制水平管道的烟气量。总烟管设于窑顶，上有总闸。利用烟气抽力，引导窑内气体流运动。

在第 3 节处设置一个工作平台，上面布置两台排烟风机，一台为正常运作风机，另一台备用。

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 0#柴油燃料，因此本设计采用北京神雾热能技术有限公司设计生产的 WDH-TACT2 型柴油高速燃烧器。

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 13 节开始布置。由于本窑所用燃料为高热值气体燃料，考虑低温段烧嘴不宜太多。因此在预热带后段（16—19 节）辊下设置 2 对烧嘴，在（20 - 25 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，并且底部助燃分管的长度根据烧嘴布置位置来定。所以底下的助燃分管从第 13 节到第 25 节，上部的助燃分管从第 20 节到第 25 节。

3.2.3 0#柴油输送装置

本设计属于烧柴油的明焰辊道窑，其燃料由工作油罐供油，工作油罐的设置考虑到检修时连续供油的需要，所以设置了两个油罐。柴油由 KCB-18.3-2 型齿轮油泵，通过管径为 200mm 的镀锌无缝钢管，阀门，油压表于流量计接向输油总管，然后再送至各个烧嘴。

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。从热交换的角度来看，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，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。这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，棍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。

本设计就是采用这种结构，急冷段采用 3 节窑长进行冷却（27-29 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 36 根急冷风管，交错排列横穿窑内，管置于窑内部分开园孔若干。

3.3.2 缓冷通风系统

制品冷却到 700~400℃ 范围时，是产生冷裂的危险区，应严格控制该冷却降温速率。为达到缓冷目的，一般采用热风冷却制品的办法。大多数辊道窑在该处设有 3~6 处抽风口，使从急冷段与窑尾段过来的热风流经制品，让制品慢速均匀得冷却。

本设计采用抽热风方法，缓冷覆盖区域达 6 节之多，可较好的解决冷裂问题。在第 29、30、31、32、33、34 六节窑顶设置抽热风口，每处设置 4 个小抽热风口。在每根支管上设置一个控制阀，支管经汇总后与分管连接。

3.3.3 快冷通风系统

本设计从第 35 节~40 节在辊上下均布置冷风管，此时砖已经基本定形但常出现裂砖掉落到窑下的情况。设置风管的好处是：一、对生产环境较有利，噪音小；二、在窑炉上所占位置较小，有利于设置测温孔和事故处理孔。三、价格相低廉且维修频率低。

3.4 窑体附属结构

3.4.1 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。考虑到砌

应该比求出值稍大一点，故取事故处理孔长度为：232mm，所以我们取事故处理孔尺寸为：233×76。

对于事故处理孔在不处理事故时，要进行密封，内部堵塞耐火材料做成的大盖板，间隙填入陶瓷棉，最外部的钢板密封前端仍需一段耐火材料。密封是为了防止热气体外溢，冷风漏入等引起的热损失对烧成制度产生影响。

3.4.2 热电偶的设置

热电偶的设置应当合适。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：

- 20-250℃之间，即第 1-5 节，每节窑顶中部插入一根 K 型热电偶；
- 250-900℃之间，即第 6-19 节，每节窑顶中部插入一根 K 型热电偶；
- 900-1180℃之间，即第 20-25 节，每节窑顶和窑底中部插入一根 S 型热电偶；
- 急冷段第 26-28 节，每节窑顶中部插入一根 S 型热电偶；
- 缓冷段第 29-34 节，每节窑顶和窑底中部插入一根 K 型热电偶；
- 快冷段第 35-40 节，每节窑顶中部插入一根 K 型热电偶；

3.4.3 温度仪表选型

低温区：K 型热点偶 高温区：s 型热电偶
热电偶通过补偿线与微机相连。

3.5 传动系统

3.5.1 辊子材质的选择

辊道窑对辊子材料要求十分严格，它要求制辊子材料热胀系数小而均匀，高温抗氧化性能好，荷重软化温度高，蠕变性小，热稳定性和高温耐久性好，硬度大，抗污能力强。

常用辊子有金属辊和陶瓷辊两种。为节约费用，不同的温度区段一般选用不同材质的辊子。本设计在选用如下：

表 4：辊子的选材

低温段（250～20）	无缝钢管辊棒
中温段（200～500℃和 500℃～80℃）	瓷棒
高温段（500～1180℃和 1180～500℃）	碳化硅辊棒

3.5.2 辊子的直径与长度的确定

辊子的直径要大，则强度也大；但直径太大，会影响窑内辐射换热和对流换热。因中试窑比较短，辐射换热和对流换热空间有限，本设计辊子的直径要小些，故选用直径为 30mm 的辊棒，而长度则取 2700mm。

3.5.3 辊距的确定

为了保证无论何时制品在转动过程中都有 3 根辊棒，所以应取问产品的 $1/4$ 以下，即辊距不大于 $800/4=200\text{mm}$ ，因此，本设计确定辊距为 50mm，每节窑为 $2100/50=42$ 根。

棍子总数 $=40 \times 51 \div 2040$ 根

3.5.4 传动系统的选择

考虑到产品的质量问題， 辊道窑的传动系统由电机、链传动和齿轮传动结构所组成。

为避免停电对正常运行的辊道窑造成的危害，辊道窑一般都设在滞后装置，通常是设一台以电瓶为动力的直流电机。停电时，立即驱动直流电机，使棍子停电后仍能正常运行一段时间，避免被压弯或压断，以便在这段时间内，启动备用电源。

本设计选用多电机分段传动分段带动的传动方案。将窑分成 10 段，每段由一台电机托动，采用变频调速。所有电机可以同时运行，每台亦可单独运行，当处理打结、堵窑等事故时，将电机打到摆动状态，使砖坯前后摇摆运行，可保证这些区段的制品不粘棍，棍子不弯曲，砖坯亦不会进入下一区段。

3.5.5 传动过程

电机→主动链轮→滚子链→从动链轮→主动斜齿轮→从动螺旋齿轮→主轴→主轴上的斜齿轮→被动斜齿轮→棍棒传动装置→棍子

3.5.6 传动过程联接方式

依据以上原则，联接方式主要采用弹簧夹紧式，从动采用托轮磨擦式。

3.6 测温孔及观察孔

3.6.1 测温孔

为严密监视及控制窑内温度制度，及时调整烧嘴开度，一般在窑道顶及火道侧墙留设若干处测温孔以安装热电偶。测温孔间距一般为 3~5 米，高温段布密些，低温段布稀些，在烧成曲线的关键点，如氧化末段、晶体转化点、釉始溶点、成瓷段、急冷结束等都应设测温孔。

3.6.2 观察孔

在每个烧嘴的对侧窑墙设置 $\Phi 80\text{mm}$ 的观察孔,以便烧嘴的燃烧状况。未用时,用与观察孔配套的孔塞塞住,以免热风逸出或冷风漏入。

3.6.3 膨胀缝

窑体受热会膨胀,产生很大的热应力,因此在窑墙、窑顶及窑底砌体间要留设膨胀缝以避免砌体的开裂或挤坏。本设计窑体采用装配式,在每节窑体中部留设 1 处宽度为 10mm 的膨胀缝,内填矿渣棉,各层砖的膨胀缝要错缝留设。

3.6.4 窑道档板和挡火墙

窑道上的档板和挡火墙可以起到窑内气体的上下和水平导流、调整升温曲线、蓄热辐射及截流作用。档板负责对窑内上半窑道的控制,采用耐高温硬质陶瓷纤维板制成,可以通过在窑顶外部调整位置的高低。挡火墙负责对窑内下半窑道的控制,采用耐火砖砌筑,高低位置相对固定。窑道档板和挡火墙设置在同一横截面上。全窑共设置 2 对闸板和挡火墙结构,分别在 19—20 节、25—26 节之间设置。

3.6.5 窑体加固钢架结构形式

辊道窑钢架结构起着加固窑体作用,而钢架本身又是传动系统的机身。本设计采用金属框架装配式钢架结构,立柱用 $2.5\text{t} \times 75 \times 50\text{mm}$ 方钢、上横梁用 $2.3\text{t} \times 50 \times 50\text{mm}$ 方钢、下梁用 $2.5\text{t} \times 100 \times 50\text{mm}$ 方钢。在一节窑体钢架中,每侧共有立柱 3 根,两头每个立柱上开有攻 M12 螺栓节间联接的 6 个孔。下横梁每节共 3 根,焊在底侧梁上,下横梁上焊有 $50 \times 50\text{mm}$ 的等边角钢作底架,以便在其上搁置底板。上下侧板可用 $2 \sim 3\text{mm}$ 钢板冲压制成,吊顶梁采用 $50 \times 50 \times 5\text{mm}$ 的等边角钢。

4 窑体材料确定

4.1 窑体材料确定原则

窑体材料要用耐火材料和隔热材料。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。

4.2 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。

4.3 表 5：全窑体所用材料及厚度列表

分段	节数	窑体位置	材料名称	使用温度	导热率 W/ (m. °C)	厚度 m
窑前段 快冷段 1-5 29-40		窑墙	轻质高铝砖	1150°C	0.35	0.23
			硅酸铝耐火纤维	1000	0.13	0.13
		窑顶	轻质高铝砖	1150°C	0.35	0.23
			硅酸铝耐火纤维	1000	0.13	0.09
		窑底	硅藻土砖	1000°C 以下	0.11+0.000228t	0.195
			轻质高铝砖	1150	1150	0.13
预热带	6-19	窑墙	轻质高铝砖	1150°C	0.08+0.00026t	0.23
			硅酸铝耐火纤维	1000°C	0.13	0.13
		窑顶	轻质高铝砖	1150°C	0.08+0.026×10 ⁻³ t	0.23
			硅酸铝耐火纤维	1000°C	0.13	0.13

烧成带、 急冷带	20-28	窑底	维			
			超轻质高铝砖	1150℃	$0.08+0.026 \times 10^{-3}t$	0.13
		窑墙	硅藻土砖	700℃	$0.11+0.000228t$	0.195
			高温莫来石轻质高铝 砖	1400℃	0.45	0.23
		窑顶	硅酸铝耐火纤维 素	1000℃	0.13	0.13
			高温莫来石轻质高铝 砖	1400℃	$0.66+0.08 \times 10^{-3}t$	0.23
		窑底	硅酸铝耐火纤维 素	1360℃	0.11	0.13
			高温莫来石轻质高铝 砖	1400℃	0.45	0.23
			硅藻土砖	700℃	$0.11+0.000228t$	0.195

5 燃料燃烧计算

A、根据《热工手册》相关资料得，0#柴油低发热量 $Q_{\text{低}}=40176\text{KJ} / \text{kg}$ 各元素质量分数 $C\%=87.5\%$, $H\%=1.1\%$, $O\%=0.5\%$, $N\%=0.5\%$, $S\%=0.5\%$.

5.1 空气量计算：

根据《热工手册》计算液体燃料理论空气量经验公式可得，

理论空气量 $V^{\circ}a=0.01 \times [8.89C+26.7 \times (H-0.8) + 3.33S] \text{m}^3 / \text{kg} \approx 10.0 \text{m}^3 / \text{kg}$

取空气过剩系数 1.1，

实际空气量： $V^{\circ}a = aV^{\circ}a = 1.1 \times 10.0 = 11.0 \text{m}^3 / \text{kg}$

5.2 烟气量计算

根据《热工手册》计算公式可得，

理论烟气量 $V^{\circ}g=(C/12+S/32+H/2+W/18+N/28) \times 22.4/100+0.79V^{\circ}a=10.9 \text{m}^3 / \text{kg}$

实际烟气量： $V_g=V^{\circ}g+V^{\circ}a(a-1)=10.9+10.0 \times (1.1-1)=11.9 (\text{m}^3 / \text{kg})$

燃烧产物各成分含量计算：

$$V_{\text{CO}_2}=0.224C/12=0.224 \frac{87.5}{12} \text{m}^3 / \text{kg}=1.63 \quad V_{\text{CO}_2}\%=\frac{1.63}{11.9}=15.33\%$$

$$V_{\text{SO}_2}=0.224S/32=0.0035 \text{m}^3 / \text{kg} \quad V_{\text{SO}_2}\%=\frac{0.0035}{11.9}=0.033\%$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}=1.28 \text{m}^3 / \text{kg} \quad V_{\text{H}_2\text{O}}\%=\frac{1.28}{11.9}=12.04\%$$

$$V_{\text{N}_2}=7.42 \text{m}^3 / \text{kg} \quad V_{\text{N}_2}\%=\frac{7.42}{11.9}=69.8\%$$

$$VO_2=0.2965 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$VO_2\%=2.797\%$$

5.3 理论燃烧温度的计算

设空气温度 $t_a=20^\circ\text{C}$, 空气比热为 $C_a=1.30\text{KJ}/\text{M}^3\text{C}$

发生 0#柴油比热为; $C_r=1.38 \text{ KJ}/\text{M}^3\text{C}$

现设 $t=2000^\circ\text{C}$ 查表得 $C=1.67 \text{ KJ}/\text{M}^3\text{C}$

$$t=(40176+11.0\times 1.3\times 20+1.38\times 20)/(11.9\times 1.67)=2037^\circ\text{C}$$

$(2037-2000)/2000=1.85\%<5\%$, 所以所设基本合理。

取高温系数 $\eta=0.75$

则实际燃烧温度 $T_p=0.75\times 2037=1527^\circ\text{C}$, 比需要的温度高出 347°C , 这符合要求利于快速烧成, 保证产品达到烧熟的目的。

6 物料平衡计算

6.1 每小时烧成制品质量

$$G_m = (90 \times 10^4) / (330 \times 24 \times 97\%) \times 23 = 2694.47 \text{ (Kg/h)}$$

6.2 每小时生成干坯的质量

$$G_g = G_m / 1 - 5\% = 2836.28 \text{ (Kg/h)}$$

6.3 每小时生成湿坯体的质量（含水量 1.5%）

$$G_s = G_g / 1 - 1.5\% = 2879.47 \text{ (Kg/h)}$$

6.4 每小时蒸发自由水质量

$$G_z = G_s - G_g = 43.2 \text{ (Kg/h)}$$

6.5 每小时从精坯中产生的 CO₂

$$G_{cao} = G_g \times C_{ao}\% = 2836.28 \times 2.30\% = 65.23 \text{ (Kg/h)}$$

$$G_{mgo} = G_g \times M_{go}\% = 2836.28 \times 2.65\% = 75.16142 \text{ (Kg/h)}$$

$$G_{co2} = (G_{cao} \times 44 / 56) + (G_{mgo} \times 44 / 40) = 133.876 \text{ (Kg/h)} \quad [M_{co2} = 44$$

$$M_{cao} = 56 \quad M_{mgo} = 40]$$

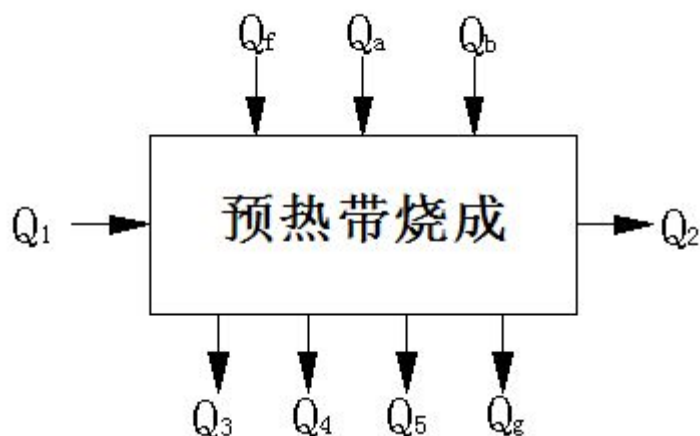
$$G_j = G_g \times 5\% - G_{co2} = 7.94 \text{ (Kg/h)}$$

7 预热带烧成带热平衡计算

7.1 热平衡计算准则

计算准则： 基准温度 0°C
 基准质量 1 小时进入系统的物料

7.2 热平衡示意图



坯体带入显热： Q_1

热制品带出显热： Q_2

燃料带入化学热及显热： Q_f

窑体散失热： Q_3

助燃空气带入显热： Q_a

物化反应耗热： Q_4

预热带漏入空气带入显热： Q_b

其他热损失： Q_5

烟气带走显热： Q_g

7.3 热收入项目

第 1、2 节热源为烟气余热，即利用烟气带走显热，所以 1、2 节不列入热平衡计算中，但计算时应以第 2 节末坯体温度计算坯体带入显热，以第 2 节末烟气温度计算烟气带走显热。

7.3.1 坯体带入显热 Q_1

①入窑干制品质量 G_g

日产量=90000/330=2727.27

烧成灼减 5% ，取每平方米产品质量为 23 Kg

$$G_g = (2727.37 \times 23) / [24 \times 97\% \times (1 - 1.5\%)] = 2836.28 \text{ Kg/h}$$

②入窑制品含自由水 1.5%

$$\text{湿基制品质量 } G_s = 2879.47 \text{ Kg/h}$$

制品入窑第 2 节末时温度 $t_1 = 250^\circ\text{C}$ ，入窑制品比热

$$c_1 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 250 = 0.905 \text{ (Kj / Kg}^\circ\text{C)}$$

$$Q_1 = G_s c_1 t_1 = 2836.28 \times 0.905 \times 250 = 641708.35 \text{ (KJ/h)}$$

7.3.2 燃料带入化学热及显热 Q_f

0#柴油低热值 $40176 \text{ (kj/m}^3\text{)}$

入窑燃油温度 $t_f = 20^\circ\text{C}$ ， 20°C 时 0#柴油比热容 $C_f = 1.38 \text{ (kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

设燃油消耗量为 $x \text{ Bm}^3/\text{h}$

$$Q_f = x (Q_{ar.net} + C_f t_f) = x (40176 + 1.38 \times 20) = 40203.6x \text{ (KJ/h)}$$

7.3.3 助燃空气带入显热 Q_a

助燃空气温度 80°C

$t_a = 80^\circ\text{C}$ 时，空气比热容 $c_a = 1.32 \text{ (kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

$$V_{a\text{总}} = V_a x = 12.06x \text{ Bm}^3/\text{h}$$

$$Q_a = V_{a\text{总}} C_a t_a = (12.06x) \times 1.32 \times 80 = 1273.5x \text{ (KJ/h)}$$

7.3.4 预热带漏入空气带入显热 Q_b

取预热带空气过剩系数 $\alpha_b = 1.8$

漏入空气温度 $t_b = 20^\circ\text{C}$ ，空气比热容 $C_b = 1.30 \text{ (kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

漏入空气总量为

$$V_b = x(\alpha_b - \alpha)V_0 = x(1.8 - 1.2) \times 10 = 6x$$

$$V_b = x(\alpha_g - \alpha)V_0 = x(2.0 - 1.2) \times 13.488 = 12.139x$$

$$Q_b = V_b c_b t_b = 6x \times 1.30 \times 20 = 156x \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

7.4 热支出项目

7.4.1 热制品带出显热 Q_2

$$Gg = \frac{Gm}{1 - \text{灼减}} = \frac{2836.28}{1 - 5\%} = 2694.466 \quad (\text{Kg} / \text{h})$$

制品烧成温度 $t_g = 1180 \quad ^\circ\text{C}$

制品平均比热容, 查手册

$$c_2 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 1210 = 1.1546 \quad (\text{kJ} / \text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$Q_2 = Gg t_g c_2 = 2694.466 \times 1180 \times 1.15 = 3656390.36 \quad (\text{KJ} / \text{h})$$

7.4.2 窑体散热 Q_3

将窑体分为三部分

第1-5节: $20-250^\circ\text{C}$, 取平均值 135°C ;

第6-19节: $250-900^\circ\text{C}$, 取平均值 575°C ;

第20-25节: $900-1180^\circ\text{C}$ 取平均值 1040°C

7.4.2.1 第一部分

第1~5节, 窑内平均温度 135°C , 窑外平均温度 40°C

7.4.2.1.1 窑顶散热:

材料及厚度: 轻质高铝砖 230mm

$$\lambda_{\text{高铝砖}} = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} t = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{400 + 40}{2} = 0.6776 \quad (\text{w} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{单位热流 } q = t_1 - t_a / \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) = 589.2 \quad (\text{w} / \text{m}^2)$$

$$\text{窑顶散热面积 } A_{\text{顶}} = \frac{2.3 + 2.76}{2} \times 2.01 \times 3 = 15.26 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{顶}} = 3.6 q A = 589.2 \times 15.2 \times 3.6 = 32241 \quad (\text{kJ} / \text{h})$$

7.4.2.1.2 窑墙散热:

材料及厚度: 硅藻土砖厚度 230mm

$$\lambda_{\text{硅藻土}} = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times \frac{400 + 40}{2} = 0.0938 \quad (\text{w} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{240 - 40}{\frac{0.23}{0.0938}} = 81.57 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{一侧墙散热面积 } A_{\text{墙}} = \frac{0.934 + 1.239}{2} \times 2.01 \times 3 = 6.55 \text{ m}^2$$

$$\therefore \text{二侧墙散热量 } Q_{\text{墙}} = 2 \times 81.57 \times 6.55 \times 3.6 = 3846.84 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.2.1.3 窑底散热:

材料及厚度: 硅藻土砖 75mm

$$\lambda_{\text{硅藻土}} = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \frac{400 + 40}{2} = 0.0938 \text{ (W/m} \cdot \text{°C)}$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{240 - 40}{\frac{0.075}{0.0938}} = 250.13 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{窑底散热面积 } A_{\text{底}} = A_{\text{顶}} = 15.26 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{底}} = q \times A \times 3.6 = 250.13 \times 15.26 \times 3.6 = 13741.14 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.2.2 第二部分

第6~12节, 窑内平均温度 700°C, 窑外平均温度 80°C

7.4.2.2.1 窑顶散热:

材料及厚度: 粘土质隔热砖 230mm

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ\text{C}$, 环境温度取 $t_a = 20^\circ\text{C}$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有:

$$\alpha = 2.56(t_3 - t_a)^{0.25} + \frac{4.56 \left[\left(\frac{t_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_a}{100} \right)^4 \right]}{t_3 - t_a} = 14 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

$$\therefore \text{最大热流量为: } q = \alpha (t_3 - t_a) = 14 \times (80 - 20) = 840 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{据导热公式有: } q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$$

$$\text{已知 } \delta_1 = 0.23, \lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2},$$

但 t_2 未知, 须采用试差法计算: 先假定 $t_2 = 600^\circ\text{C}$, 则

$$\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 600}{2} = 0.498 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 612^\circ\text{C} ,$$

$$\text{重设 } t_2 = 612^\circ\text{C}, \lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 612}{2} = 0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 613.6^\circ\text{C}$$

相对误差 $(613.6 - 612) \div 613.6 = 0.26\% < 5\%$, 认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.5 \text{ (W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{硅酸铝耐火纤维 } 130\text{mm}, \lambda_{\text{纤维}} = 0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{700 - 80}{\frac{0.23}{0.5} + \frac{0.13}{0.15}} = 466.17 \text{ (W}/\text{m}^2)$$

$$\text{窑顶散热面积 } A_{\text{顶}} = \frac{2.3 + 2.814}{2} \times 2.01 \times 7 = 36\text{m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{顶}} = q \times A \times 3.6 = 466.17 \times 36 \times 3.6 = 60415.6 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.2.2 窑墙散热:

材料及厚度: 粘土质隔热砖 114mm 硅酸铝耐火纤维 143mm, $\lambda_{\text{纤维}} = 0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ\text{C}$, 环境温度取 $t_a = 20^\circ\text{C}$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有:

已知 $\delta_1 = 0.114$, $\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2}$, 但 t_2 未知, 须采用试差法计算:

先假定 $t_2 = 800^\circ\text{C}$, 则

$$\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 800}{2} = 0.524 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 817.25^\circ\text{C}, \text{ 重设 } t_2 = 817^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 817}{2} = 0.526 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 818^\circ\text{C}$$

相对误差 $(818 - 817) \div 818 = 0.12\% < 5\%$, 认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.526 \text{ (W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{700 - 80}{\frac{0.114}{0.526} + \frac{0.143}{0.15}} = 529.9 \text{ (W}/\text{m}^2)$$

$$\text{一侧墙散热面积 } A_{\text{墙}} = \frac{0.934 + 1.523}{2} \times 2.01 \times 7 = 17.29\text{m}^2$$

$$\therefore \text{二侧墙散热量 } Q_{\text{墙}} = 2 \times 529.9 \times 17.29 \times 3.6 = 65966.2 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.2.2.3 窑底散热:

材料及厚度: 超轻质耐火粘土砖 75mm $\lambda = 0.058 + 0.170 \times 10^{-3} t$

硅藻土砖 154mm $\lambda = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t$ $W/(m \cdot ^\circ C)$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ C$, 环境温度取 $t_a = 20^\circ C$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有:

已知 $\delta_1 = 0.075$, $\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2}$, 但 t_2 未知, 须采用试差法计算:

先假定 $t_2 = 680^\circ C$, 则

$$\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 680}{2} = 0.2 W/(m \cdot ^\circ C)$$

$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 685^\circ C$, 重设 $t_2 = 685^\circ C$, 则

$$\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 685}{2} = 0.201 W/(m \cdot ^\circ C)$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 686^\circ C$$

相对误差 $(686 - 685) \div 686 < 5\%$, 认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.2 \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ C)$$

$$\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times \frac{686 + 80}{2} = 0.117$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{700 - 80}{\frac{0.075}{0.2} + \frac{0.154}{0.117}} = 364.7 \text{ (W/m}^2)$$

$$\text{窑底散热面积 } A_{\text{底}} = A_{\text{顶}} = 36 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{底}} = q \times A \times 3.6 = 364.7 \times 36 \times 3.6 = 47659 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.2.3 第三部分

第20~25节, $900 \sim 1180^\circ C$, 窑内平均温度 $1105^\circ C$, 窑外平均温度 $80^\circ C$

7.4.2.3.1 窑顶散热:

材料及厚度: 轻质高铝砖 230mm

国产混合纤维 LG-46 130mm, $\lambda_{\text{纤维}} = 0.11 W/(m \cdot ^\circ C)$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ C$, 环境温度取 $t_a = 20^\circ C$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有:

已知 $\delta_1 = 0.23$, δ_2 即为要求的, $\lambda_2 = 0.15$

$$\lambda_1 = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2}, \text{ 但 } t_2 \text{ 未知, 须采用试差法计算:}$$

先假定 $t_2 = 1100^\circ\text{C}$ ，则

$$\lambda_1 = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{1300 + 1100}{2} = 0.756 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 1044^\circ\text{C} \quad , \quad \text{重设 } t_2 = 1044^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{1300 + 1044}{2} = 0.754 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 1043.76^\circ\text{C}$$

相对误差很小，认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.754 \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{1105 - 80}{\frac{0.23}{0.754} + \frac{0.13}{0.11}} = 687.9 \text{ (W/m}^2)$$

$$\text{窑顶散热面积 } A_{\text{顶}} = \frac{2.3 + 2.814}{2} \times 2.01 \times 6 = 30.84 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{顶}} = q \times A \times 3.6 = 687.9 \times 30.84 \times 3.6 = 76373.4 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.2.3.2 窑墙散热：

材料及厚度：轻质高铝砖 114mm 国产混合纤维 LG-46 143mm, $\lambda_{\text{纤维}} = 0.11 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ\text{C}$ ，环境温度取 $t_a = 20^\circ\text{C}$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有：

已知 $\delta_1 = 0.114$ ， δ_2 即为要求的， $\lambda_2 = 0.11$

$$\lambda_1 = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2} \quad , \quad \text{但 } t_2 \text{ 未知，须采用试差法计算：}$$

先假定 $t_2 = 1100^\circ\text{C}$ ，则

$$\lambda_1 = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{1300 + 1100}{2} = 0.756 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 1173^\circ\text{C} \quad , \quad \text{重设 } t_2 = 1173^\circ\text{C}, \text{ 则}$$

$$\lambda_1 = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{1300 + 1173}{2} = 0.759 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 1174^\circ\text{C}$$

相对误差很小，认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.759 \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{1105 - 80}{\frac{0.114}{0.759} + \frac{0.143}{0.11}} = 706.9 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{一侧墙散热面积 } A_{\text{墙}} = \frac{1.088 + 1.677}{2} \times 2.01 \times 6 = 16.67 \text{ m}^2$$

∴ 两侧墙散热量

$$Q_{\text{墙}} = q \times A \times 3.6 \times 2 = 2 \times 706.9 \times 16.67 \times 3.6 = 84845 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.2.3 窑底散热:

材料及厚度: 超轻质耐火粘土砖 75mm $\lambda = 0.058 + 0.170 \times 10^{-3} t$

硅藻土砖 154mm $\lambda = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ\text{C}$, 环境温度取 20°C 。根据对流辐射换热系数计算公式有:

已知 $\delta_1 = 0.154$, $\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2}$, 但 t_2 未知, 须采用试差法计算:

先假定 $t_2 = 680^\circ\text{C}$, 则

$$\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 680}{2} = 0.2 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 653^\circ\text{C}, \text{ 重设 } t_2 = 653^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 653}{2} = 0.2 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 653^\circ\text{C}$$

相对误差 $(686 - 685) \div 686 < 5\%$, 认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.2 \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times \frac{686 + 80}{2} = 0.117$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{1105 - 80}{\frac{0.154}{0.2} + \frac{0.075}{0.117}} = 727 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{窑底散热面积 } A_{\text{底}} = A_{\text{顶}} = 30.84 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{底}} = q \times A \times 3.6 = 30.84 \times 727 \times 3.6 = 80714.5 \text{ (kJ/h)}$$

窑体总散热量:

$$Q_3 = 465802.3 \text{ (kJ/h)}$$

7.4.3 物化反应耗热 Q_4

$$\text{自由水质量 } G_w = G_s - G_g = 2775.8 - 2742.5 = 33.3 \text{ (Kg/h)}$$

$$\text{烟气离窑温度 } t_{\text{烟}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\therefore Q_w = G_w (2490 + 1.93 t_g) = 33.3 \times (2490 + 1.93 \times 200) = 9577.8 \text{ (KJ/h)}$$

其余物化反应热 Q_f 用 Al_2O_3 反应热近似代替。

$$\text{入窑干制品质量 } G_g = 2742.5 \text{ (Kg/h)}, \text{ } Al_2O_3 \text{ 含量为 } 25\%$$

$$Q_R = G_g \times 2100 \times 25\% = 1439812.5 \text{ (KJ/h)}$$

$$Q_4 = Q_w + Q_R = 9577.8 + 1439812.5 = 1449390.3 \text{ (KJ/h)}$$

7.4.4 烟气带走显热 Q_g

$$\text{离窑烟气过剩系数取 } \alpha_g = 2$$

$$\text{离窑烟气总量 } V_g = [V_g^0 + (\alpha_g - \alpha) \bullet V_a^0] \bullet x = 13.124 + (2 - 1.2)10.052 = 21.156$$

$$\text{离窑烟气温度一般为 } 200 \sim 300^{\circ}\text{C}, \text{ 现取 } t_{\text{烟}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{查手册, 此时烟气的平均比热为 } c_g = 1.46 \text{ (KJ/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C)}$$

$$\therefore Q_g = V_g c_g t_g = 21.156x \times 1.46 \times 200 = 6177.55x \text{ (KJ/h)}$$

7.4.5 其他热损失 Q_5

根据经验占热收入的 5%

$$Q_5 = (Q_1 + Q_f + Q_a + Q_b) \times 0.05 = 3831453.3 + 465802.3 + 1449390.3 + 6177.55x$$

$$= 287332.3 + 308.9x \text{ (KJ/h)}$$

7.5 热平衡方程

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

$$240384.3 + 39461.5x = 6033978.2 + 6486.45x$$

$$\text{解得 } x = 175.7 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

表6 预热带烧成冷却带热平衡表

热吸收			热支出		
项目	kJ/h	%	项目	kJ/h	%
坯体带入显热： Q_1	240384.3	3.35	热制品带出显热： Q_2	3831453.5	53.41
燃料带入化学热及显热： Q_f	6682222.4	93.15	窑体散失热： Q_3	465802.3	6.5
助燃空气带入显热： Q_a	223754	3.12	物化反应耗热： Q_4	1449390.3	20.2
预热带漏入空气带入显热： Q_b	27409.2	0.38	烟气带走显热： Q_{g_0}	1085395.5	15.13
			其他热损失： Q_5	341605.73	5
总计	7173769.9	100	总计	7173647.33	100

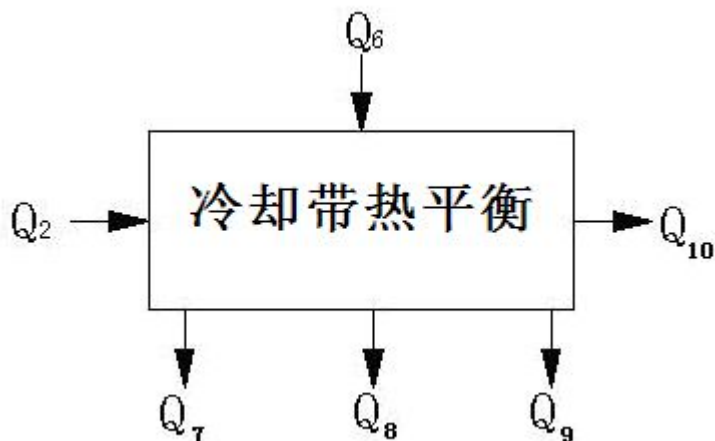
由表格可以看出，预热带和烧成带窑体散热 6.5%，散热小，窑墙材料设计合理，物化反应耗热比较多，占了 20.2%。

8 冷却带热平衡计算

8.1 计算基准:

小时；温度 0°C ；计算范围：冷却带

热平衡框图以及相关说明



Q_2 ：产品带入显热

Q_7 ：产品带出显热

Q_6 ：冷风带入显热

Q_8 ：热风抽出带走显热

Q_9 ：窑体散热

Q_{10} ：其他热损失

8.2 热收入项目

8.2.1 产品带入显热 Q_2

此项热量为预热带和烧成带产品带走的显热

$$Q_2 = GmTC = 3656395.79 \text{ (kJ/h)}$$

8.2.1 冷风带入显热 Q_6

鼓入冷风的温度为： $t_a = 20^{\circ}\text{C}$ 查表知此时冷风的比热为： $c_a = 1.29 \text{ kJ/(m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$

设窑尾风量为 $V_x \text{ m}^3/\text{h}$

$$Q_6 = V_x c_a t_a = 1.3 \times 20 \times V_x = 26 V_x \text{ (kJ/h)}$$

8.3 热支出项目

8.3.1 产品最终带出的显热 Q_7

产品离窑温度为 80°C 。

制品的平均比热容 $c_m = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 80 = 0.86 \text{ (kJ/m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$

出窑制品质量 $G_i = 2605.4 \text{ (kg/h)}$

$$Q_7 = 0.86 \times 2605.4 \times 80 = 179251.5 \text{ (kJ/h)}$$

8.3.2 热风抽出时带走的显热 Q_8

热风抽出的温度为 200°C ，查表得比热为 $1.32 \text{ KJ/(m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$

$$Q_8 = 1.32 \times 200V = 264V_x$$

8.3.3 窑体散热 Q_9

将窑体分为两部分

第26~34节： $1190 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ，取平均值 700°C ；

第35~40节： $400^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 取平均值 240°C

第一部分

第21~29节，窑内平均温度 700°C ，窑外平均温度 80°C

a. 窑顶散热：

材料及厚度：轻质粘土砖 230mm ，

国产混合纤维LG-46 130mm ， $\lambda_{\text{纤维}} = 0.15 \text{ W/(m} \cdot ^{\circ}\text{C)}$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^{\circ}\text{C}$ ，环境温度取 $t_a = 20^{\circ}\text{C}$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有：

已知 $\delta_1 = 0.23$ ， $\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2}$ ，但 t_2 未知，须采用试差法计算：

先假定 $t_2 = 600^{\circ}\text{C}$ ，则

$$\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 600}{2} = 0.498 \text{ W/(m} \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 612^{\circ}\text{C} \quad , \quad \text{重设 } t_2 = 612^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 612}{2} = 0.5 \text{ W/(m} \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 613.6^{\circ}\text{C}$$

相对误差 $(613.6 - 612) \div 613.6 = 0.26\% < 5\%$ ，认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.5 \text{ (W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{700 - 80}{\frac{0.23}{0.5} + \frac{0.13}{0.15}} = 466.17 \text{ (w/m}^2\text{)}$$

$$\text{窑顶散热面积 } A_{\text{顶}} = \frac{2.3 + 2.814}{2} \times 2.01 \times 9 = 46.26 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{顶}} = q \times A \times 3.6 = 466.17 \times 46.26 \times 3.6 = 77634.1 \text{ (kJ/h)}$$

b. 窑墙散热:

材料及厚度: 粘土质隔热砖 114mm

硅酸铝耐火纤维 143mm, $\lambda_{\text{纤维}} = 0.15 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ\text{C}$, 环境温度取 $t_a = 20^\circ\text{C}$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有:

已知 $\delta_1 = 0.114$, $\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2}$, 但 t_2 未知, 须采用试差法计算:

先假定 $t_2 = 800^\circ\text{C}$, 则

$$\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 800}{2} = 0.524 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 817.25^\circ\text{C}, \text{ 重设 } t_2 = 817^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.29 + 0.26 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 817}{2} = 0.526 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 818^\circ\text{C}$$

相对误差 $(818 - 817) \div 818 = 0.12\% < 5\%$, 认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.526 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{700 - 80}{\frac{0.114}{0.526} + \frac{0.143}{0.15}} = 529.9 \text{ (w/m}^2\text{)}$$

$$\text{一侧墙散热面积 } A_{\text{墙}} = \frac{0.934 + 1.523}{2} \times 2.01 \times 9 = 22.22 \text{ m}^2$$

$$\therefore \text{二侧墙散热量 } Q_{\text{墙}} = 2 \times 529.9 \times 22.22 \times 3.6 = 84775.5 \text{ (kJ/h)}$$

c. 窑底散热:

材料及厚度: 超轻质耐火粘土砖 75mm $\lambda = 0.058 + 0.170 \times 10^{-3} t$

硅藻土砖 154mm $\lambda = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$

外壁最高温度为 $t_3 = 80^\circ\text{C}$, 环境温度取 $t_a = 20^\circ\text{C}$ 。根据对流辐射换热系数计算公式有:

已知 $\delta_1 = 0.075$, $\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{t_1 + t_2}{2}$, 但 t_2 未知, 须采用试差法计算:

先假定 $t_2 = 680^\circ\text{C}$, 则

$$\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 680}{2} = 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 685^\circ\text{C} \text{ , 重设 } t_2 = 685^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.058 + 0.17 \times 10^{-3} \times \frac{1000 + 685}{2} = 0.201 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$t_2 = t_1 - q \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 686^\circ\text{C}$$

相对误差 $(686 - 685) \div 686 < 5\%$, 认为第二次假设合理。

$$\therefore \lambda_1 = 0.2 \text{ (W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times \frac{686 + 80}{2} = 0.117$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{700 - 80}{\frac{0.075}{0.2} + \frac{0.154}{0.117}} = 364.7 \text{ (W}/\text{m}^2)$$

$$\text{窑底散热面积 } A_{\text{底}} = A_{\text{顶}} = 46.26 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{底}} = q \times A \times 3.6 = 364.7 \times 46.26 \times 3.6 = 60735.7 \text{ (kJ/h)}$$

第二部分

第35~40节, $400 \sim 80^\circ\text{C}$, 窑内平均温度 240°C , 窑外平均温度 40°C

a. 窑顶散热:

材料及厚度: 轻质高铝砖230mm, $\lambda_{\text{硅藻砖}} = 0.0966 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

$$\lambda_{\text{高铝砖}} = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} t = 0.66 + 0.08 \times 10^{-3} \times \frac{400 + 40}{2} = 0.6776 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{240 - 40}{\frac{0.23}{0.6776}} = 589.2 \text{ (W}/\text{m}^2)$$

$$\text{窑顶散热面积 } A_{\text{顶}} = \frac{2.3 + 2.76}{2} \times 2.01 \times 3 = 15.26 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{顶}} = q \times A \times 3.6 = 589.2 \times 15.26 \times 3.6 = 32241 \text{ (kJ/h)}$$

b. 窑墙散热:

材料及厚度: 硅藻土砖厚度230mm

$$\lambda_{\text{硅藻砖}} = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times \frac{400 + 40}{2} = 0.0938 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{240 - 40}{\frac{0.23}{0.0938}} = 81.57 \text{ (w/m}^2\text{)}$$

$$\text{一侧墙散热面积 } A_{\text{墙}} = \frac{0.934 + 1.239}{2} \times 2.01 \times 3 = 6.55 \text{ m}^2$$

$$\therefore \text{二侧墙散热量 } Q_{\text{墙}} = 2 \times 81.57 \times 6.55 \times 3.6 = 3846.84 \text{ (kJ/h)}$$

c. 窑底散热:

材料及厚度: 硅藻土砖 75mm

$$\lambda_{\text{硅藻土}} = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \frac{400 + 40}{2} = 0.0938 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\text{单位热流 } q = \frac{240 - 40}{\frac{0.075}{0.0938}} = 250.13 \text{ (w/m}^2\text{)}$$

$$\text{窑底散热面积 } A_{\text{底}} = A_{\text{顶}} = 15.26 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{\text{底}} = q \times A \times 3.6 = 250.13 \times 15.26 \times 3.6 = 13741.14 \text{ (kJ/h)}$$

$$\text{窑体总散热量: } Q_9 = 358163.12 \text{ (kJ/h)}$$

8.3.4 其它热损失 Q_{10}

根据经验值为热收入的5%

$$Q_{10} = 0.05 (Q_2 + Q_6) = 0.05 \times (3831453.5 + 25.8V) = 191572.7 + 1.29V \text{ (kJ/h)}$$

8.4 热平衡方程

$$Q_2 + Q_6 = Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10}$$

$$3831453.5 + 25.8V = 179251.5 + 264V + 358163.12 + 191572.7 + 1.29V$$

$$3102466.18 = 239.49V$$

$$\text{解得 } V_x = 12954.5 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

表7 冷却带热平衡表

热吸收			热支出		
项目	kJ/h	%	项目	kJ/h	%
制品带入显热 Q_2	3831453.5	91.98	产品带出显热 Q_7	179251.5	4.3

冷却风带入 显热 Q_6	334226.1	8.002	抽热风带出 显热 Q_8	3419988	82.1
			窑体散热 Q_9	358163.12	8.6
			其它热损失 Q_{10}	208284	5
总计	4165679.6	100	总计	4165686.62	100

窑体散热占总散热 8.6%，热损失量并不大。热损失中热风带出显热最多，占据了 82.1%。将抽出热风用于干燥及生活用水加热可以有效提高热利用率。制品带入显热占比重较大，至制品出窑时带出显热仅占 4.3%，可见冷却效果甚好。

9 烧嘴选型

每小时燃料消耗量为 $x=175.7\text{ (Bm}^3/h\text{)}$

考虑到烧嘴的燃烧能力和烧嘴燃烧的稳定性取储备系数 1.5

本设计一共设置了 56 个烧嘴。

每个烧嘴的燃料消耗量为： $\frac{175.7}{68}\times1.5=3.88\text{ (Bm}^3/h\text{)}$

烧嘴的热负荷： $3.88\times38000=147440\text{ (KJ/h)}$

所以本设计采佛山市克罗姆热能技术有限公司的 KIC K10 型燃油烧嘴

该烧嘴技术性能如下：

热负荷	燃油		助燃空气			流量 调节 比例	火焰 长度	功率范 围	炉膛 温度
	流量	压力	流量	温 度	压力				
200MJ/h	5 Bm ³ /h	1000Pa~ 0.2MPa	20 Bm ³ /h	常 温 ~ 450 ℃	1500~ 3500 Pa	1: 12	200~ 3000	1.5~ 3000KW	~ 1800 ℃

所以该烧嘴符合本设计要求。

10 传动计算

10.1 传动系统的选择

辊道窑的传动系统由电动机, 减速设备和传动机构所构成。常见的传动机构由链传动和齿轮传动两种, 本设计采用齿轮传动。

传动系统采用螺旋斜齿轮传动方式, 采用分段传动, 1—30 节每三节窑长为一传动组, 31—58 节每三个窑段为一传动组, 每组由一台摆线针轮减速机带动, 高温区每台摆线针轮减速机由一个变频器调节速度, 低温区每两台摆线针轮减速机由一个变频器调节速度。全窑累计减速机 20 台, 变频器 10 台, 一个电磁离合器。

操作人员可以将全窑调成一个速度。当发生堵窑事故需要处理时, 事故区前的棍棒可以调成往返摆动, 事故区后的棍棒可以继续将砖坯送至窑出口。这种传动方式运行平稳可靠, 调整简单, 维修量小。螺旋斜齿轮传动都采用油浴润滑, 润滑效果好, 磨损少, 使用寿命长。

10.2 传动过程:

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

10.3 辊子材质的选择

辊子的材质要求十分严格, 它要求辊子具有很好的抗热震性能, 使辊子经受得起急冷急热的冲击; 要求辊子直径一致和平直, 确保产品的平直移动; 要有强的高温抗氧化性能, 使辊子能承受高温; 要有高的荷重软化温度和小的蠕变性, 使辊子在高温下具有最小的弯曲变形; 要有好的高温耐久性, 使辊子能在高温下长久的工作。另外, 还要有好的去污性能, 使粘在辊子上的釉滴或其它污物容易去掉。

本设计在低温段 (1~5 和 35~40 节) 和前台、后台均采用的是 $\Phi 40 \times 3230$ 的金属质棍棒; 在中温段 (6~19 和 29~34 节) 采用的是 $\Phi 40 \times 3230$ 的莫来石棍棒; 在高温段 (20—28 节) 采用的是 $\Phi 40 \times 3230$ 的莫来石—刚玉质陶瓷棍棒。

10.4 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，一般用下面经验公式计算： $H = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5} \right) l$ ， l 为制品长度。所以，本设计辊距不大于 $666.67/3=222\text{mm}$ ，取辊距为 67mm ，每节窑长 2010mm ，每节窑辊子数 $2010/67=30$ ，取 30 根。

则窑内辊子总数为 $N = 40 \times 30 = 1200$ 根。

10.5 辊子传动过程中的联接方式

依据以上原则，联接方式辊子主动端采用弹簧夹紧式，从动端采用托轮摩擦式，双支点混合支撑，便于更换辊子。

10.6 辊子转速的选择

根据辊子转速的公式：
$$n = \frac{K \times L}{\pi \times d \times t}$$

L ----窑长, mm

t ----烧成周期, min

d ----辊子直径, mm

K ----考虑到制品的滑动系数, 一般取 $K = 1.05$

则： $n = 8.47\text{r/min}$

11 管道尺寸、阻力计算及风机的选用

11.1 排烟风机的管道尺寸、阻力计算

11.1.1 抽烟管道及风机

11.1.2.1 管道尺寸

排烟系统需排除烟气体量:

$$V_g = \{ V_g^0 + (\alpha_g - 1) \times V_a^0 \} \times = \{ 15.14 + (1.8 - 1) \times 10.025 \} \times 175.7 = 4069.2 \text{ m}^3/\text{h}$$

烟气抽出时实际体积:

$$V = V_g \times (273 + 200) / 273 = 7050.3 \text{ m}^3/\text{h} = 1.96 \text{ m}^3/\text{s}$$

① 总烟管尺寸

烟气在金属管中流速根据经验资料取 $\omega = 10 \text{ m/s}$

$$\text{内径 } d_{\text{总}} = \sqrt{4V / \pi \omega} = \sqrt{4 \times 1.96 / (3.14 \times 10)} = 0.5 \text{ m}$$

所以, 总管内径取值为 500mm。总管长 4.75m

② 分烟管尺寸

烟气在分烟管中的流速 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=2$, 分管流量 $V' = V/2 = 0.98 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$\text{内径 } d_{\text{分}} = \sqrt{4 \times 0.98 / (3.14 \times 10)} = 0.353 \text{ m}$$

所以, 分管内径取 360mm。分管长度为 4m

③ 支烟管尺寸

烟气在支烟管中的流速 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=4$, 分管流量 $V' = V/4 = 0.49 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$\text{内径 } d_{\text{支}} = \sqrt{4 \times 0.49 / (3.14 \times 10)} = 0.25 \text{ m}, \text{ 所以内径为 } 250 \text{ mm}。 \text{ 长度取 } 0.4 \text{ m}。$$

④ 抽烟口风管尺寸

烟气在支烟管中的流速 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=16$, 分管流量 $V' = V/16 = 0.1225 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$\text{内径 } d_{\square} = \sqrt{4 \times 0.1225 / (3.14 \times 10)} = 0.125 \text{ m}、$$

所以, 支管内径取值为 130mm, 支管长度为 0.2m.

11.1.2.2 阻力计算

① 料垛阻力 h_i

根据经验每米窑长料垛阻力为 0.5Pa.

设 0 压在 12-13 节交接处。

$$\text{则 } h_i = (12 + 0.5) \times 2 \times 0.5 = 12.5 \text{ Pa}.$$

② 位压阻力 h_g

烟气从窑炉至风机, 高度升高 $H=2.45 \text{ m}$, 此时几何压头位烟气流动的动力即负位压阻力, 取烟气温度的 200°C ,

$$\therefore h_g = -H(\rho_a - \rho_g)g$$

$$=-2.45 \times (1.29 \times \frac{273}{273+20} - 1.30 \times \frac{273}{273+200}) \times 9.8 = -10.8 \text{Pa}$$

③ 局部阻力 h_g

局部阻力 ζ 由表查得：

烟气从窑炉进入支管： $\zeta_1=1$

支烟管进入分烟管： $\zeta_2=1.5$

并 45° 圆弧转弯： $\zeta_3=0.5 \times 2=1$

并 90° 圆弧转弯： $\zeta_4=1.5 \times 2=0.7$

分管 90° 圆弧转弯： $\zeta_5=1.5 \times 2=3$

分管进入总管： $\zeta_6=1.5$

为简化计算，烟管中烟气流速均按 10m/s 计，烟气温度均按 200°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，故按此值算出的局部阻力只会略偏大，能满足实际操作需要。

$$h_g = \zeta \frac{\omega \bullet \omega}{2} \bullet \rho = (1+1.5+1+0.7+3+1.5) \times \frac{10 \times 10}{2} \times 1.3 \times \frac{273}{273+200} = 326.4 \text{ (Pa)}$$

④ 摩擦阻力 h_f

摩擦阻力系数：金属管取 $\zeta=0.03$ 。

$$h_f = \zeta (L_{\square}/d_{\square} + L_{\text{支}}/d_{\text{支}} + L_{\text{分}}/d_{\text{分}} + L_{\text{总}}/d_{\text{总}}) \times \omega^2 \times \rho / 2$$

$$= 0.03 \times (0.2/0.13 + 0.4/0.25 + 4/0.36 + 4.75/0.5) \times 10 \times 10 \times 273/2 (273+200)$$

$$= 0.03 \times (1.54 + 1.6 + 11 + 9.5) \times 10 \times 10 \times 273/2 (273+200)$$

$$= 20.5 \text{Pa}$$

$$\therefore \text{风机应克服总阻力 } h_{\text{总}} = h_i + h_g + h_e + h_f = 348.6 \text{Pa}$$

11.1.3 风机的选型

为保证正常工作，取风机抽力余量 0.5，风机排出烟气平均温度 200°C ，所以选型应具备风压：

$$H = (1+0.5) \times 348.6 \times \frac{273+200}{273} = 906 \text{Pa}。$$

$$\text{实际烟气排量 } V_g = xVg = 175.7 \times 15.14 = 2660 \text{Bm}^3/\text{h}$$

$$\therefore Q = 1.5 \times 2660 \times (273+200) / 273 = 6913 \text{Bm}^3/\text{h}。$$

选用风机应考虑窑炉有空气、其它气体比例失调，大量增加烟气量，增大抽风阻力，造成较大阻力，故选型时全风压应留有较大余地。

所以排烟风机选用 Y9-35No8D 锅炉引风机。

型号	转速 (r/min)	风量(m^3/h)	全压(Pa)	电动机	
				型号	功率(kW)

Y9-35-4N _Q 8D	960	16000~5810	1040~1940	Y132M1-6	4
--------------------------	-----	------------	-----------	----------	---

11.2 其他管道及风机

11.2.1 0#柴油输送管径的计算

窑体共安装了 56 个烧嘴，柴油支管总共 56 根，根据烧嘴的安装尺寸，油支管的内径取值为 20mm，并且此时能够满足柴油的流量为 515.4Kg/h 的要求。

11.2.1.1 窑底 窑侧的分管尺寸

柴油分管分组控制，共分 7 组 14 根。

内径 $d_{分}=2\times (56\times \pi \times 100 / 14\times \pi)^{0.5}=35\text{mm}$

所以分管内径取值：40mm

11.2.1.2 油总管内径的计算

总管选用一根管子，考虑到日后油改天然气转产的需要，那么总管的内径为 $d=2\times (56\times \pi \times 100 / \pi)^{0.5}=233\text{mm}$

所以总管内径取值：250mm

11.2.2 助燃风管的计算

助燃风量： $V_a=12.06\times 175.7=2119\text{Bm}^3/\text{h}$.

实际助燃风量 $V=2119\times (273+80)/273=2740\text{Bm}^3/\text{h}$

①助燃风总管内径的确定

取风在总管中的流速为： $\omega=10\text{m/s}$ ，则：

$d_{总}=\sqrt{4\times 2740/(3600\pi\omega)}=0.311\text{m}$ ，取助燃风总管的内径为 320mm.

②窑顶、窑底分管内径

取 $\omega=10\text{m/s}$ ， $n=4$ ，分管流量为： $2740/4=685\text{Bm}^3/\text{h}$

$d_{分}=\sqrt{4\times 685/(3600\pi\omega)}=0.156$ ，取分管内径为 160mm.

③助燃风支管

取 $\omega=10\text{m/s}$ ， $n=9$ ，分管流量为： $2740/9=305\text{Bm}^3/\text{h}$

$d_{分}=\sqrt{4\times 305/(3600\pi\omega)}=0.104$ ，取分管内径为 110mm.

④助燃风出口管内径

全窑总共有烧嘴 68 个，因此通往烧嘴的支管 68 根，取流速 $\omega=10\text{m/s}$ ， $n=68$ ，每个分管流量为： $2740/68=40.294\text{Bm}^3/\text{h}$ ，则：

$d_{支}=\sqrt{4\times 40.294/(3600\pi\omega)}=0.038\text{m}$ ，取支管内径为 40mm.

11.2.3 冷却带风管计算

表 8 冷却带鼓入冷风比例

	所占比例 (%)	风量
急冷段	40	4942.2
快冷段	60	7413.3

缓冷段	0	-12355.5
-----	---	----------

11.2.4 缓冷抽热风管

① 缓冷抽热总管内径

换冷抽出风量 $V_x = 12355.5 \text{ Bm}^3/\text{h}$, 故鼓入热风 $V = V_x / 0.95 = 13006 \text{ Bm}^3/\text{h}$.

取 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=1$, 则:

$$d_{\text{总}} = \sqrt{4 \times 13006 / (3600 \pi \omega)} = 0.678 \text{ m}, \text{ 取 } 680 \text{ mm}.$$

② 缓冷抽热分管内径

取 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=2$, 则:

$$d_{\text{总}} = \sqrt{4 \times 6503 / (3600 \pi \omega)} = 0.408 \text{ m}, \text{ 取 } 410 \text{ mm}.$$

③ 抽热支管的内径

取 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=7$, 每个分管的流量为: $13006/7 = 1858 \text{ Bm}^3/\text{h}$, 则:

$$d_{\text{分}} = \sqrt{4 \times 1858 / (3600 \pi \omega)} = 0.256 \text{ m}, \text{ 取 } 260 \text{ mm}.$$

④ 抽热风孔管的内径

取 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=4$, 每个分管的流量为: $1858/4 = 464.5 \text{ Bm}^3/\text{h}$, 则:

$$d_{\text{分}} = \sqrt{4 \times 464.5 / (3600 \pi \omega)} = 0.1282 \text{ m}, \text{ 取 } 130 \text{ mm}.$$

11.2.5 急冷风管

急冷风量为: $V = V_x / 0.95 = 5202 \text{ m}^3/\text{h}$.

① 急冷风总管内径的确定

取风在总管中的流速 $\omega = 10 \text{ m/s}$, 则:

$$d_{\text{总}} = \sqrt{4 \times 5202 / (3600 \pi \omega)} = 0.418, \text{ 取 } 420 \text{ mm}.$$

② 窑顶的分管

取 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=4$, 每个分管的流量为: $5202/4 = 1300 \text{ Bm}^3/\text{h}$, 则:

$$d_{\text{分}} = \sqrt{4 \times 1300 / (3600 \pi \omega)} = 0.21 \text{ m}, \text{ 取 } 210 \text{ mm}.$$

③ 急冷支管

急冷支管上下交错排列, 共 24 根, 取 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=24$, 通过每个支管的流量为: $5202/24 = 216.75 \text{ m}^3/\text{h}$, 则:

$$d_{\text{支}} = \sqrt{4 \times 216.75 / (3600 \pi \omega)} = 0.085 \text{ m}, \text{ 取 } 90 \text{ mm}.$$

每根管上开 100 个孔, 取 $\omega = 10 \text{ m/s}$, $n=24 \times 100 = 2400$, 流过每个孔的流量为: $Q = 5202/2400 = 2.17 \text{ m}^3/\text{h}$ 则:

$$\text{孔径 } d_{\text{孔}} = \sqrt{4 \times 2.17 / (3600 \pi \omega)} = 0.0085 \text{ m}, \text{ 孔径取 } 9 \text{ mm}.$$

11.2.6 快冷风管

快冷带鼓入冷风量 $V = V_x / 0.95 = 7803.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

①. 快冷风管总管内径

快冷风在总管中的流速为： $\omega=10\text{m/s}$ ，

$$d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4V}{3600\pi\omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 7803.5}{3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.512 \text{ m}, \text{ 实际总管内径取 } 520\text{mm}$$

②. 快冷风管分管内径

快冷风在分管中的流速为： $\omega=10\text{m/s}$ ，

$$d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4V}{2 \times 3600\pi\omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 7803.5}{2 \times 3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.362 \text{ m}, \text{ 实际分管内径取 } 370\text{mm}$$

③. 快冷风管支管内径

快冷风在支管中的流速为： $\omega=10\text{m/s}$ ，

快冷风管支管共有 36 支，那么支管的内径为：

$$d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4V}{36 \times 3600\pi\omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 7803.5}{36 \times 3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.085 \text{ m}, \text{ 实际支管内径取 } 90\text{mm}$$

11.2.7 其他风机选型

11.2.7.1 助燃风机的选型

助燃风机的风量为 $V = 12.06x = 2118.9 \text{ Bm}^3/\text{h}$ ，依据风量选用风机的型号为：9-26-N₀4A5.5kw 高压离心通风机。

型号	转速 (r/min)	风量 m^3/h	全压 (Pa)	电动机	
				型号	功率
9-26-N ₀ 4A5.5kw	2900	3847~2198	3000~3930	Y132S1-2	5.5

11.2.7.2 急冷风机的选型

急冷风机的风量为： $V_x = 5202\text{m}^3/\text{h}$ ，依据风量选用风机的型号为：

4-72-11N₀4A5.5kw 离心通风机。

型号	转速 r/min	风量 m^3/h	全压 (Pa)	电动机	
				型号	功率
4-72-11N ₀ 4A5.5kw	2900	7420~4020	1340~2040	Y355M1-6	5.5

11.2.7.3 缓冷抽热风机的选型

缓冷段抽出热风总量 $13006\text{m}^3/\text{h}$,

所以排烟风机选用 Y9—35No10D22kw 锅炉引风机。

型号	转速 (r/min)	流量 (m^3/h)	全压 (Pa)	电动机	
				型号	功率
Y9—35No10D22kw	960	31250~11350	1530~1630	Y200L2-6	22

11.2.7.4 快冷风机的选型

急冷风机的风量为: $V_x = 7413.3\text{m}^3/\text{h}$, 依据风量选用风机的型号为:

4-72-11No4A5.5kw 离心通风机.

型号	转速 r/min	风量 m^3/h	全压 (Pa)	电动机	
				型号	功率
4-72-11No6A4kw	1450	12720~6840	800~1160	Y112M4-4	5.5

12 材料概算

12.1 窑体材料概算

12.1.1 轻质高铝砖的概算

每块轻质高铝砖的体积. $23 \times 0.113 \times 0.065 = 0.00169\text{m}^3$

第 1 节~第 5 节 第 6 节~第 19 节 第 29 节~第 40 节

$$V_n = 2 \times 0.7 \times 2.1 \times 0.23 \times 31 + 0.13 \times 2.1 \times 3.72 \times 31 + 0.23 \times 2.1 \times 3 \times 31 = 97.36\text{m}^3$$

取多余的砖的数量占总量的 35%

本窑共需要轻质高铝砖的数量为:

$$N_1 = V_n (1 + 3.5\%) \approx 59626 \text{ 块}$$

12.1.2 高温轻质莫来石高铝砖

每块高温轻质莫来石高铝砖的体积

$$V_g = 2 \times 0.8 \times 2.1 \times 0.23 \times 10 + 0.23 \times 2.1 \times 3.72 \times 10 + 0.23 \times 2.1 \times 3 \times 10 = 40$$

取多余砖的数量占总量的 3.5%

本窑共需轻质莫来石高铝砖的块数为:

$$N_2 = V_g (1 + 3.5\%) / V \approx 24497 \text{ 块}$$

12.1.3 硅藻土砖

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

第 1~40 节硅藻土砖的体积为 $V_{gz} = 0.195 \times 3.72 \times 2.1 \times 41 = 62.46\text{m}^3$

取多余转的数量占总量的 3.5%

本窑共需硅藻土砖块数为 $N_3 = V_{gz} (1 + 3.5\%) / V = 38253 \text{ 块}$

12.1.4 硅酸铝棉板的概算

第 1 节~第 5 节 第 30~第 40 节共 16 节, 每节的硅酸铝棉板的面积为:

$$S_1 = 3.72 \times 2.008 + 1.02 \times 2.008 \times 2 = 11.714\text{m}^2$$

第 6 节~第 19 节, 每节的硅酸铝棉板的面积为

$$S_2 = 3.72 \times 2.008 + 1.06 \times 2.008 \times 2 = 11.727\text{m}^2$$

第 20 节~第 29 节, 每节的硅酸铝棉板的面积为

$$S_2 = 3.72 \times 2.008 + 1.16 \times 2.008 \times 2 = 12.295\text{m}^2$$

本窑共需硅酸铝棉板的面积为:

$$S_{\text{总}} = 16 S_1 + 4S_2 + 10S_3 \approx 475.453 \text{ m}^3$$

12.2 钢材的概算

钢材的概算以窑的一节用钢材量为基准。

12.2.1 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 $L_2 = 3.72 \times 5 = 18.6 \text{ m}$

12.2.2 钢板的概算

钢板的概算

在窑的底部铺设长度 $S_2 = 3.72 \times 2.008 = 7.47 \text{ m}^2$

12.2.3 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 $L_1 = 3.72 \times 4 = 14.88 \text{ m}$

吊顶所用角钢为两根并排 $L_2 = 3.12 \times 21 = 65.52 \text{ m}$

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 $8.4 \times 10.5 = 88.2 \text{ m}$

12.2.4 全窑所用钢材量

方钢： $(20.8 + 18.6) \times 40 = 1576 \text{ m}$

钢板： $7.47 \times 40 = 298.8 \text{ m}$

角钢： $(14.88 + 65.52 + 88.2) \times 40 = 6744 \text{ m}$

后 记

毕业设计环节是我在大学中最后一份答卷，也是检查我们大学四年来所学成果的考验，通过这次毕业设计，我把以前学过的所有知识作了个全面的检阅，并强化了专业知识链和其他技能，使我更加深化了对知识的理解和掌握。

此次毕业设计是我毕业前的最后一份答卷。为使能够获得一个圆满的结果，我在景德镇爱和陶乐华有限公司实习了两个月，并从实习实践中了解到生产实际中存在的问题以及设备的不足之处，回校后花了大量时间去阅览有关的资料，进行了综合性思考。在确定整个设计的安排步骤后，就按部就班的进行下来。在设计过程中，遇到诸多问题，就是在遇到问题解决问题这循环过程中，将专业相关知识串联起来，可以说是理论与实践的结晶。以下是我这次毕业设计的感受。

- 一、设计不是凭空构想。没有实物基础的设计很难达到完善，没有真正的在窑炉公司或陶瓷公司实践过很难将理论和实际相结合。设计靠空想是不现实的。
- 二、实践公司的窑炉也是有不合理的。虽然说符合生产需要的就是合理的，但我们的设计是对于未来窑炉的发展方向的一些构想，所以，不能完全照抄实物，而应该针对实际窑炉的不足之处进行深入挖掘并寻求改进方法。
- 三、设计过程需要坚持不懈。设计可以做的细也可以做的粗，而我认为设计的过程不仅仅是对知识的重复使用和提高，也是对工作性格的培养。设计需要耗费大量的时间和精力，需要不断的思考和推翻自己的想法，那么这个时候坚持不懈的工作态度尤为重要。

在我整个设计的过程里得到了各位老师的大力帮助，我在这里特别感谢我的指导老师陈功备老师以及全体热工系老师给予我的耐心指导，感谢同学们在设计过程中给予我的帮助！

参考文献

- [1] 胡国林 《建陶工业辊道窑》. 中国建材工业出版社. 1998. 6
- [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] 蒋鉴华 张振刚 《热工测量及过程自动控制》. 江西高校出版社. 2009. 2
- [4] 孙晋淘 《陶瓷工业热工设备》. 武汉理工大学出版社. 1989. 10
- [5] 蔡增基 龙天渝 《流体力学泵与风机》. 中国建筑工业出版社. 1999. 12
- [6] 陈 帆 《现代陶瓷工业技术设备》. 中国建材工业出版社. 1995. 5
- [7] 续魁昌 《风机手册》. 北京机械工业出版社. 1995. 5
- [8] 王秉铨 《工业炉设计手册》. 北京机械工业出版社. 1996. 8
- [9] 姜正侯 《燃气工程技术手册》. 同济大学出版社. 1993. 5
- [10] 刘麟瑞 林彬荫 《工业窑炉用耐火材料手册》 冶金工业出版社. 2001. 6
- [11] 杨世铭 陶文铨 《传热学》第三版 . 高等教育出版社. 1998