

景德镇陶瓷学院科技 艺术学院

专业毕业设计说明书

题目：日产 21000 m²仿古砖天然气辊道窑设计

学 号：201030453117

姓 名：朱亚华

院（系）：景德镇陶瓷学院科技艺术学院

专 业：10 热工

指导教师：汪和平

日 期：2014.5

Foreword

Roller kiln is a new type of fast development in recent decades of continuous industrial furnaces burning , also known as roller hearth kiln . Mainly used in the production of ceramic tiles and other ceramic materials . Roller kiln firing the kiln is continuous to the rotation of the roller body as a vehicle tunnel kiln . Ceramic products placed on many of the closely spaced horizontal fire-resistant roller by rotating the roller is transferred from the ceramic kiln to kiln , hence called roller kiln .

Roller kiln is generally smaller cross-section , the kiln temperature uniformity , suitable for rapid firing , but the higher rollers materials and installation techniques required . Mainly used for building and sanitary ceramics rapid firing .

The ceramic body can be placed directly on the rollers or pads on the first body , and then the heat plate on the roller , the roller rotates continuously , sequentially body can move forward. The ends of each roller has a small sprocket , chain driven by the rotation for smooth transmission, security , and often the chain of transmission of certain groups . Roller with a heat-resistant nickel-chromium alloy steel at low temperature , high temperature refractory ceramic rollers places (such as alumina or silicon carbide ceramic rollers rollers) as a roller . Roller kiln combustion chamber at the bottom of the roller with compressed air atomizing heavy oil, diesel oil , kerosene and other fuel combustion temperatures. Between the combustion chamber and the roller, refractory isolation , without direct contact with the flame being fired products. Roller kiln for the production of ceramic capacitors , also known as electric kiln , smaller , with electric wire rods, silicon carbide or silicon molybdenum rods fired electric heating elements .

前言

辊道窑是近几十年发展起来的新型快烧连续式工业窑炉，又称辊底窑。主要用于瓷砖等陶瓷建材的生产。辊道窑是连续烧成的窑，以转动的辊子作为坯体运载工具的隧道窑。陶瓷产品放置在许多条间隔很密的水平耐火辊上，靠辊子的转动使陶瓷从窑头传送到窑尾，故而称为辊道窑。

辊道窑一般截面较小，窑内温度均匀，适合快速烧成，但辊子材质和安装技术要求较高。主要用于建筑卫生陶瓷制品的快速烧成。

陶瓷坯体可直接置于辊子上或将坯体先放在垫板上，再将热板放在辊子上，由于辊子不断转动，可使坯体依序前进。每根辊子的端部都有小链轮，由链条带动自转，为传动平稳、安全、常将链条分若干组传动。低温处的辊子用耐热的镍铬合金钢制成，高温处则以耐高温的陶瓷辊棒（如刚玉瓷辊棒或碳化硅辊棒）作为辊子。辊道窑的燃烧室在辊子的下方，用压缩空气雾化重油、柴油、煤油等燃料进行燃烧产生高温。燃烧室与辊道之间，有耐火材料隔离，火焰不直接接触被烧制的产品。用于生产陶瓷电容器的辊道窑，又叫电窑，体积更小，用电热丝棒、硅碳棒、或硅钼棒等电热元件加热烧制。

目 录

一 设计任务书及原始资料..... 1

二 窑体主要尺寸的确定..... 2

三 烧成制度的确定..... 3

四 工作系统的确定..... 4

五 窑体材料的确定..... 11

六 燃料及燃烧计算..... 12

七 热平衡计算..... 13

八 管道尺寸、阻力计算及风机选型..... 33

九 工程材料概算..... 42

十 后记..... 45

十一 参考文献..... 45

一、设计任务及原始资料

1、设计任务

日产 21000 m²仿古砖天然气辊道窑设计；

2、原始数据

(一) 仿古砖

(1). 坯料组成 (%)：

表 1—1：坯料组成 (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	I.L
67.52	16.34	2.26	2.74	0.81	2.06	2.45	5.82

(2). 产品规格：600×450×8mm

(3). 产品单重：4.97kg

(4). 产品合格率：97%

(5). 烧成周期：42 分钟（全氧化气氛）

(6). 最高烧成温度：1190℃（温度曲线自定）

(二) 燃料

表 1—2：燃料组成

天然气	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	H ₂ S	CO ₂	N ₂	O ₂	Q_{net} (MJ/Nm ³)
	0.2	0.2	95.6	3.5	0.3	0.1	0.1	0	35.96

二. 窑体主要尺寸的确定

2.1 窑内宽的确定

产品的尺寸为 $600 \times 450 \times 8\text{mm}$ ，设制品的收缩率为10%。由坯体尺寸=产品尺寸/（1-烧成收缩），得坯体尺寸为： $667 \times 500\text{mm}$

两侧坯体与窑墙之间的距离取150mm，设内宽 $B=3\text{m}$ ，计算宽度方向坯体排列的块数为： $n = (3000 - 150 \times 2) / 500 = 5.4$ ，确定并排5块。

最后，确定窑内宽 $B = 500 \times 5 + 150 \times 2 = 2800\text{mm}$ ，取2800mm。

2.2 窑长及各带长度的确定

2.2.1 窑体长度的确定

窑容量=（日产量 \times 烧成周期） \div [24 \times 产品合格率 \times （1-收缩率）]

$$= (21000 \times 42 / 60) \div [24 \times 97\% \times (1 - 0.1)]$$

$$= 701.6 (\text{m}^3 / \text{窑})$$

装窑密度=每米排数 \times 每排片数 \times 每片砖面积

$$= (1000 \div 667) \times 5 \times (0.6 \times 0.45)$$

$$= 2.02 (\text{m}^2 / \text{m})$$

窑长=窑炉每小时进入生坯 \div 装窑密度

$$= 701.6 \div 2.02$$

$$= 347.3 (\text{m})$$

利用装配式，由若干节联接而成，设计每节长度为2100mm，窑的节数 $= 347.3 \div 2.1 = 165.4$ 节，取整为166节。所以算出窑长为 $L = 166 \times 2100 = 348600\text{mm} = 348.6\text{m}$

2.2.2 窑体各带长度的确定

预热带占全窑总长的 33%，节数 $= 166 \times 40\% = 66.4$ ，取 66 节，长度 $= 66 \times 2100 = 138600\text{mm}$ ；

烧成带占全窑总长的 26%，节数=166×18.1%=30.046，取 30 节， 长度=30×2100=63000mm；

冷却带占全窑总长的 41%，节数=166×41.9%=69.554，取 70 节，长度=70×2100=147000mm。

2.3 窑内高的确定

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（辊道中心线至窑底或隔烟板的距离）之和。

表 2-1 窑内高度表

	1-66 节	67-96 节	97-166 节
辊上高(mm)	321	388	321
辊下高(mm)	388	455	388
内总高(mm)	709	843	709

三. 烧成制度的确定

(1) 温度制度

①烧成周期：42min

②各带划分

表 3-1 各段温度的划分、升温速率与窑节数分布

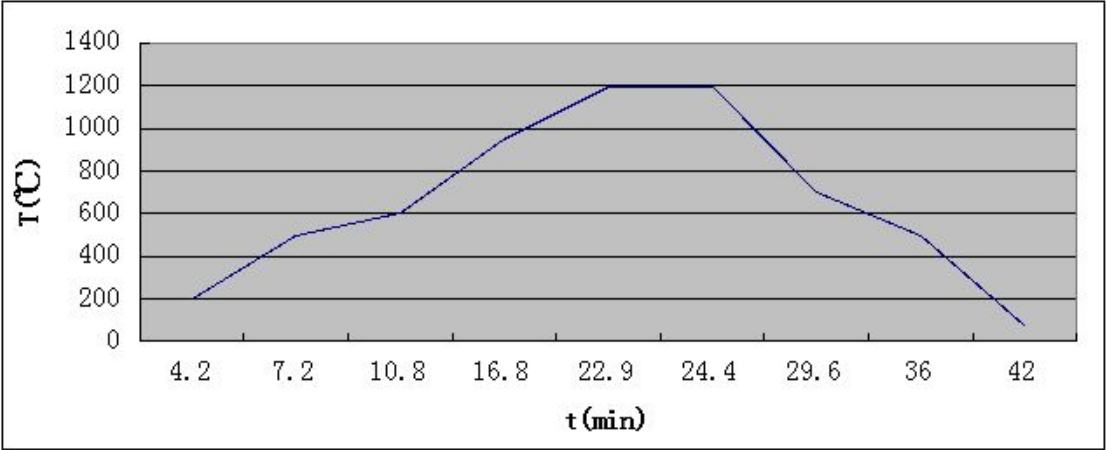
	温度/℃	时间/min		升温速率/℃·min	长度比例/%		长度/节	
预热带	20~200	4.2	16.8	42.86	10	40	17	66
	200~500	3		100	7.14		12	
	500~600	3.6		27.8	8.56		13	
	600~950	6.0		58.3	14.3		24	
烧成带	950~119	6.1	7.6	39.6	14.5	18.1	24	30

		0						
		1190	1.5		0	3.6	6	
冷却带	急冷带	1190~700	5.2	17.6	94.2	12.4	21	70
	缓冷带	700~500	6.4		31.25	15.2	25	
	快冷带	500~80	6.0		69.53	14.3	24	
累计			42			100	166	

(2) 气氛制度：全窑氧化气氛

(3) 烧成温度曲线大致如下：

图 3—2：烧成温度曲线



四. 工作系统的确定

辊道窑的工作系统确定包括排烟系统、燃烧系统、冷却系统等

4.1 排烟系统

在窑前段第 1、2、3、5、7、9、11、13、15、17 节设置排烟口，采用四段分散排烟的方式。在每段排烟口的窑顶、窑底各设 5 个排烟口直通窑体外，在排烟口出口处设置一条垂直烟管，每垂直支烟管设置排烟闸，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 2、3 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 5、6 节之间设置一个工作平台，上面布置两台排烟风机，一台为正常云作风机，另一台备用。

4.2 燃烧系统

在辊子上下各设一层烧嘴，同一层烧嘴两侧交错布置，同一侧烧嘴上下交错布置。烧嘴的对侧是观察孔，以便更好的观察火焰的燃烧情况，便于操作控制。

为均匀窑温，强化窑内对流换热，在选择烧嘴时，选用小流量高速烧嘴，本设计采用的是北京神雾公支司 WDH—TCC2 型烧嘴。

4.2.1 烧嘴的设置

由于本窑烧成周期较长，升温速率较慢，故本设计在只在烧成带开始设置烧嘴，因此，在预热带的 24—42 每节辊下设置 1 对烧嘴，在预热带 43—66 每节辊下设置 2 对烧嘴，在烧成带的 67—96 节每节辊下设置 4 对烧嘴，交错布置；辊上下烧嘴及对侧烧嘴均互相错开排列，并在每烧嘴的对侧设置一观察孔。

4.2.2 烧嘴布置

表 4—1 烧嘴布置

位置	预热带（24—42）	预热带（43—66）	烧成带（67—96）
烧嘴布置	每节 1 对烧嘴	每节 2 对烧嘴	每节 4 对烧嘴
烧嘴总数	38 个	96 个	240 个

4.3 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。

4.3.1 急冷通风系统

从烧成最高温度至少 700℃ 以前，制品中由于液相的存在而且具有塑性，此时可以

进行急冷，最好的办法是直接吹风冷却。辊道窑急冷段应用最广的是直接风冷是在辊上下设置横窑断面的冷风喷管。每根喷管上均匀地开有圆形或狭缝式出风口，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。

本设计也采用此种结构，在第 97 节~117 节，每节辊上 4 根、辊下 4 根，内径 $\phi 90\text{mm}$ 急冷风管，风管采用相对排列布置。共 168 根急冷风管。

4.3.2 缓冷通风系统

制品冷却到 $700\sim 500^{\circ}\text{C}$ 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。

本设计采用抽热风冷却方法，在 118-142 节设置抽热风口，抽热风管每节辊上 4 根、辊下 4 根，在每根支管上设置一个控制阀，支管经汇总后与分管连接。

4.3.3 快冷通风系统

本设计从第 143 节~166 节在辊上辊下布置快冷管，交错布置，每节 16 支，具体安装位置见图纸，为了更好的提倡节能减排，故此，本次设计在快冷阶段将其热气抽出用于其他用处。

4.4 窑体附属结构

4.4.1 事故处理孔

为了方便处理断辊、卡砖、起摞等事故，在窑侧每隔一定距离设置事故处理孔，一般设置在辊下，两事故处理孔之间距离应不大于事故孔对角线与对侧内壁交点的连线。

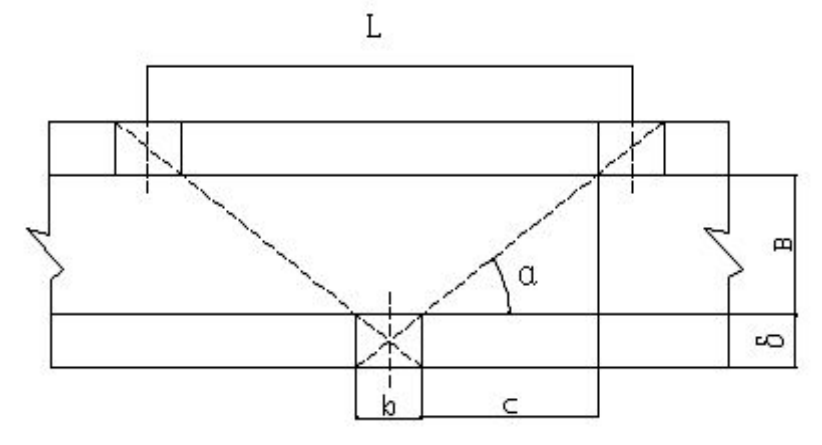


图 4—2 事故处理孔

由上图知: $\cot \alpha = \frac{b}{\delta} = \frac{c}{B}$

$$\therefore c = B \cdot \cot \alpha = B \frac{b}{\delta}$$

$$\text{则: } L = 2(b + c) = 2b \frac{1+B}{\delta} = 2 \times 0.4 \times \frac{1+2.8}{0.35} = 8.69\text{m}$$

\therefore 两事故处理孔中心距 L 应小于或等于 8.69m

在事故处理口上设置一个 $480 \times 350 \times 65$ 的过桥砖。

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。

4.4.2 检查孔

在第 54 节和第 106 节的后半段处设置检查孔, 大小为 400×400 , 过桥砖是 $480 \times 350 \times 65$ 和 $480 \times 350 \times 65$, 全窑只设置两处。

4.4.3 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、釉始熔点、成瓷段、急冷结束等都应设测温孔。

本设计如下: 第 1 到 66 节和第 97 到 166 节每节窑顶布置一个, 67 节到 96 节的

窑顶和辊下侧墙各设置一个测温孔。窑顶测温孔设计安装在距离每节窑前方向 1600mm 处，侧墙安装位置距离窑底 160mm, 距窑前 1600mm。

4.4.4 测压孔

零压应设在预热带与烧成带界面附近。所以零压面设在第 66 节处的窑顶设一测压孔。

4.4.5 观火孔

在每个烧嘴的对侧窑墙设置直径 60mm 的观火孔，以便及时观察对面烧嘴火焰情况。

4.4.6 膨胀缝

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

4.4.7 挡墙、挡板

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。

为了更好的调节窑炉内温度制度的调节，本设计将在每个换带之间设计上挡板，在烧成带和冷却带设置挡墙、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。再一个就是防止高温烟气的辐射对急冷管的损害。预热带设置挡墙、挡板可以增加烟气在高温区的滞留时间，提高烟气利用率比可控制低温区的温度。

本设计在第 1、67、109 节各设置挡墙、挡板。挡墙、挡板位置及尺寸见图。

4.4.8 钢架结构

钢架结构以每节制造，窑底由两根“工”字刚来支撑整个窑重，窑底和窑墙都盖有钢板，每节都有以角钢为主体钢架，上面的吊顶砖直接吊在空心圆钢管上。

4.5 传动系统

4.5.1 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, 一般是每三节窑长为一传动组, 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。

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, 事故前的棍棒可以调成往返摆动, 事故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。

4.5.2 传动过程:

电机→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。

4.5.3 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得冲击; 要求辊子直径一致和平直, 确保产品得平直移动; 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—17节)采用的是 $\Phi 60 \times 3260$ 的金属质棍棒; 在中温段(18—29节, 30—42节和43—66节)采用的是 $\Phi 60 \times 3260$ 的莫来石棍棒; 在高温段(67—96节)采用的是 $\Phi 60 \times 3600$ 的莫来石—刚玉质陶瓷棍棒。

4.5.4 辊距的确定

辊距 $H = (1/3 \sim 1/5) \times L$, 因制品长度 $L = 450$, 每节窑长2100mm, 则最后确定辊距, $1/4L = 112.5\text{mm}$, 但现实辊距取80mm, 快冷段辊距取108mm, 为了更好的散热, 每节窑为 $2100/80 = 26$ 根, 快冷段每节窑为 $2100/90 = 23$ 根。

即棍棒数总共 $142 \times 26 + 24 \times 23 = 4244$ 根。

4.5.5 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。

4.5.6 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： $n = (1.05 \times 348600) / (3.14 \times 60 \times 42) = 46.26 \text{ r/min}$

五. 窑体材料的确定

表 5-1 窑体材料和厚度表 (1)

1-66、118-166 节					
名称		材质	使用温度(℃)	导热系数[W/(m·℃)]	厚度(mm)
窑顶	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅酸盐耐火纤维毯	1150	0.1~0.3	100
窑墙	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅酸盐耐火纤维毯	1350	0.1~0.3	100
窑底	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3}t$	130

	隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14 \times 10^{-3}t$	130
--	-----	------	-----	------------------------------	-----

表 5-1 窑体材料和厚度表 (2)

67-117					
名称		材质	使用温度(°C)	导热系数[W/(m·°C)]	厚度(mm)
窑顶	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600°C	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅酸盐耐火纤维毯	1150	0.1~0.3	150
窑墙	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600°C	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	混合纤维	1350	0.12	120
窑底	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600°C	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	201
	隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14 \times 10^{-3}t$	130

六. 燃料及燃烧计算

6.1 空气量的计算

6.1.1 理论空气量的计算

根据原始数据 $Q_d=35960\text{kJ}/\text{Nm}^3$

根据经验公式计算理论空气量:

$$L_o=0.264 Q_d /1000+0.02=0.264 \times 35960 /1000+0.02=9.513 (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

6.1.2 实际空气量的计算

由于辊道窑烧瓷砖在氧化气氛下烧成,取空气过量系数为 $a=1.3$,则实际空气需要量为:

$$L_a = L_o \times 1.3 = 12.367 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

6.2 烟气量的计算

根据经验公式计算实际烟气量为：

$$V_g = a L_d + 0.38 + 0.018 Q_d / 1000 = 1.3 \times 9.513 + 0.38 + 0.018 \times 35960 / 1000 = 13.394 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$$

6.3 燃烧温度的计算

设空气温度 $t_a = 20^\circ\text{C}$ ，空气比热为 $c_a = 1.3 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

天然气比热为 $c_r = 1.58 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ， $t_a = t_r = 20^\circ\text{C}$

现设 $t_{th} = 1700^\circ\text{C}$ ，

燃烧产物温度

$c_g = 1.424 + 0.000105t = 1.424 + 0.000105 \times 1700 = 1.6025 \text{ kJ}/\text{Nm}^3$ 。则理论燃烧温度为：

$$\text{根据理论燃烧温度： } t_{th} = \frac{Q_d + c_r t_r + c_a t_a L_a}{V_g c_g}$$

$$t_{th} = \frac{35960 + 1.58 \times 20 + 1.3 \times 20 \times 12.367}{13.394 \times 1.603} = 1691^\circ\text{C}$$

$(1700 - 1691) / 1700 < 5\%$ ，所设温度合理。

取高温系数为0.8，则实际温度为：

$t = 0.8 \times 1700 = 1360^\circ\text{C}$ ，比最高烧成温度1190高出170℃，可不预热，直接烧成。

七. 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，哪项热耗最大，能否采取改进措施。

7.1 预热带及烧成带热平衡计算

7.1.1 热平衡计算基准及范围

热平衡计算必须选定计算基准，这里时间以1h 为计算基准，0℃作为基准温度。

7.1.2 热平衡框图

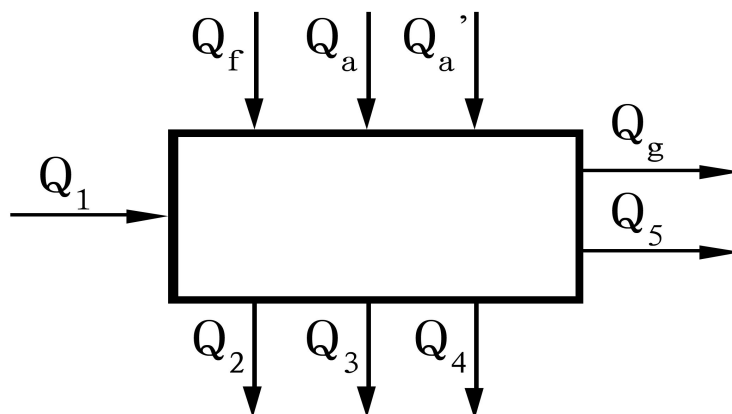


图7-1预热带和烧成带热平衡示意图

Q_1 ——坯体带入显热:	Q_a ——助燃空气带入显热
Q_a' ——漏入空气带入显热:	Q_f ——燃料带入化学热及显热
Q_2 ——产品带出显热	Q_3 ——墙、顶、底散热
Q_4 ——物化反应耗热	Q_5 ——其它热损失
Q_g ——废气带走显热	

7.1.3 热收入项目

7.1.3.1 坯体带入显热 Q_1

1. 制品带入显热 Q_1

$$Q_1 = G_1 c_1 t_1$$

其中： G_1 ——入窑制品质量 (kg/h)

c_1 ——入窑制品平均比热, kJ/(kg·°C)

t_1 ——制品的温度, °C。

瓷砖单重 4.97 公斤

$$\text{入窑干制品质量 } G_r = \frac{6300000}{300 \times 24 \times 97\%} \times \frac{4.97}{0.6 \times 0.45} = 16604.62 \text{ (kg/h)}$$

取烧成灼减量 4%，入窑制品含自由水 1.6%

$$\text{入窑坯体质量 } G_1 = \frac{16604.62}{0.96 \times 0.984} = 17577.72 \text{ (kg/h)}$$

制品入窑时的温度为 20°C，取入窑制品比热为：1.05 kJ/(kg·°C)

则坯体带入显热为： $Q_1 = G_1 c_1 t_1 = 17577.72 \times 1.05 \times 20 = 369132.12 \text{ (kJ/h)}$

7.1.3.2 燃料带入化学热及显热 Q_f

天然气低热值 $Q_{net} = 35960 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)}$

入窑天然气温度 $t_f = 20^\circ\text{C}$ ，20°C 时天然气 $c_f = 1.58 \text{ KJ/(Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

设天然气消耗量为 $X \text{ m}^3/\text{h}$

$$Q_f = X(Q_{net} + c_f t_f) = X(35960 + 1.58 \times 20) = 35991.6X \text{ (KJ/h)}$$

7.1.3.3 助燃空气带入显热 Q_a

助燃空气温度 $t_a = 20^\circ\text{C}$ ，20°C 时空气比热容 $c_a = 1.30 \text{ [kJ/(Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)]}$

助燃空气实际总量 $V_a = 12.367X \text{ (Nm}^3/\text{h)}$

所以 $Q_a = V_a t_a c_a X = 12.367 \times 1.30 \times 20X = 321.5X \text{ (KJ/h)}$

7.1.3.4 漏入空气带入显热 Q'_a

取预热带漏入空气过剩系数 $\alpha_g=2.0$ ，漏入空气温度 $t_a=20^\circ\text{C}$ ，空气比热容 $c_a=1.30$ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ $\alpha=1.3$

漏入空气总量： $V_a=X(\alpha_g-\alpha)L_0=X(2.0-1.3)\times 9.513=6.6591X(\text{m}^3/\text{h})$

所以 $Q'_a=V_a c_a t_a=6.6591X\times 1.3\times 20=173.137X(\text{KJ}/\text{h})$

7.1.4 热支出项目

7.1.4.1 产品带出显热 $Q_2(\text{KJ}/\text{h})$

烧成产品质量 $G_3=16604.62(\text{Kg}/\text{h})$

出烧成带产品温度 $t_2=1190^\circ\text{C}$ ，由表可知：此时产品平均比热为： $1.14\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})$

所以 $Q_2=G_3 c_2 t_2=16604.62\times 1190\times 1.14=22525827.5(\text{KJ}/\text{h})$

7.1.4.2通过窑体散热损失 Q_3

将计算分为2部分，即第32～68节：500-950 $^\circ\text{C}$ ，取平均值725 $^\circ\text{C}$ ；第69～121节：950-1190 $^\circ\text{C}$ 取平均值为1070 $^\circ\text{C}$ 。

i 第27～55节：窑外壁表面平均温度40 $^\circ\text{C}$ ，窑内壁平均温度725 $^\circ\text{C}$

a. 窑顶

表7-2 窑顶

耐	莫来石轻质高	1600	0.310+0.176	\times	230
火层	铝砖	$^\circ\text{C}$	10^{-3}t		
隔	硅酸盐耐火纤	1150	0.1~0.3		100
热层	维毯				

所用材料的导热系数：

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1 \sim 0.3$

硅藻土砖: $0.063+0.14 \times 10^{-3}t$

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{500+950}{2} = 725^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31+0.176 \times 10^{-3} \times 725 = 0.4376\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_2 = 0.2\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.23\text{m}$; $\delta_2 = 0.1\text{m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 40^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{725 - 40}{\frac{0.23}{0.4376} + \frac{0.1}{0.2}} = 667.906 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = [2.8 + 2 \times (0.23 + 0.1)] \times 2.1 \times 8 = 58.128\text{m}^2$$

则 $Q_{\text{顶}} = qA_{\text{顶}} = 667.906 \times 58.128 \times 3.6 = 139766.544\text{kJ/h}$

b. 窑墙表7-3 窑墙

耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600 °C	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1350	$0.1 \sim 0.3$	100

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1 \sim 0.3$

硅藻土砖: $0.063+0.14 \times 10^{-3}t$

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{500+950}{2} = 725^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31+0.176 \times 10^{-3} \times 725 = 0.4376\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维束 $\lambda_2=0.2\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$

$\delta_1=0.23\text{m}$; $\delta_2=0.1\text{m}$;

平均热流密度:

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}}=\frac{725-40}{\frac{0.23}{0.4376}+\frac{0.1}{0.2}}=667.906\text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑墙散热面积:

$$A_{\text{墙}}=0.709\times 2.1\times 8=11.9112\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}}=2qA_{\text{墙}}=2\times 667.906\times 11.9112\times 3.6=57280.046\text{ (kJ/h)}$$

C. 窑底

表7-4 窑底

耐火层	莫来石轻质高铝砖	160 0℃	0.310+0.176 × 10 ⁻³ t	130
隔热层	硅藻土砖	900	0.063+0.14 × 10 ⁻³ t	130
膨胀层	硅酸盐耐火纤维毯	135 0	0.1~0.3	100

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176\times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1\sim 0.3$

硅藻土砖: $0.063+0.14\times 10^{-3}t$

$$\text{窑内壁平均壁温 } t_1=\frac{500+950}{2}=725^\circ\text{C}$$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \times 725 = 0.4376 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维束 $\lambda_2 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_3 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times 725 = 0.1645 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.13 \text{ m}$; $\delta_2 = 0.1 \text{ m}$; $\delta_3 = 0.13 \text{ m}$;

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{725 - 40}{\frac{0.13}{0.4376} + \frac{0.1}{0.2} + \frac{0.13}{0.1645}} = 433.394 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑底散热面积: $A_{\text{底}} = 58.128 \text{ m}^2$

则 $Q_{\text{底}} = qA_{\text{底}} = 433.394 \times 58.128 \times 3.6 = 90692.375 \text{ (kJ/h)}$

ii 第 56-86 节窑体散热计算如下:

取窑外壁温度 80°C , 窑内壁平均温度为 1070°C

d. 窑顶

表7-5 窑顶

耐火层	莫来石轻质高铝砖	160 0°C	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$	230
隔热层	硅酸盐耐火纤维毯	115 0	0.1~0.3	150

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1 \sim 0.3$

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{950 + 1190}{2} = 1070^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \times 1070 = 0.498 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_2 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$; $\delta_2 = 0.15 \text{ m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 80^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{1070 - 80}{\frac{0.23}{0.497} + \frac{0.15}{0.2}} = 812.186 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = [2.8 + 2 \times (0.23 + 0.15)] \times 2.1 \times 14 = 104.664 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{顶}} = qA_{\text{顶}} = 812.186 \times 104.664 \times 3.6 = 306023.888 \text{ kJ/h}$$

e. 窑墙

表7-6 窑墙

耐	莫来石轻质高	1600	0.310+0.176 ×	230
火层	铝砖	℃	$10^{-3}t$	
隔	混合纤维	1350	0.12	120
热层				

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310 + 0.176 \times 10^{-3}t$

混合纤维: 0.12

$$\text{窑内壁平均壁温 } t_1 = \frac{950 + 1190}{2} = 1070^\circ\text{C}$$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \times 1065 = 0.497 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

混合纤维 $\lambda_2 = 0.12 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$; $\delta_2 = 0.12 \text{ m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 80^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{1070 - 80}{\frac{0.23}{0.497} + \frac{0.12}{0.12}} = 673.377 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{墙}} = 0.82 \times 2.1 \times 14 = 24.108 \text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}} = 2qA_{\text{墙}} = 2 \times 673.377 \times 24.108 \times 3.6 = 116883.164 \text{kJ/h}$$

f. 窑底

表7-7 窑底

耐 火层	莫来石轻质高 铝砖	1600 ℃	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$	×	201
隔 热层	硅藻土砖	900	$0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t$	×	130
膨 胀层	硅酸盐耐火纤 维毯	1350	$0.1 \sim 0.3$		100

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$

硅藻土砖: $0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1 \sim 0.3$

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{950 + 1190}{2} = 1070 \text{ } ^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \times 1070 = 0.497 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times 1070 = 0.212 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_3 = 0.2 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.201 \text{m}$; $\delta_2 = 0.13 \text{m}$; $\delta_3 = 0.10 \text{m}$;

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1070 - 80}{\frac{0.201}{0.497} + \frac{0.13}{0.212} + \frac{0.1}{0.2}} = 573.443 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑底散热面积: $A_{\text{底}} = 104.664 \text{m}^2$

$$\text{则 } Q_{\text{底}} = qA_{\text{底}} = 573.443 \times 104.664 \times 3.6 = 216067.817 \text{ (kJ/h)}$$

所以窑体总散热量为:

$$Q_3 = 139766.544 + 57280.046 + 90692.375 + 306023.888 + 116883.164 + 216067.817 \\ = 926713.834 \text{ (kJ/h)}$$

7.1.4.3 物化反应耗热 Q_4 (kJ/h)

i 自由水蒸发吸热 Q_w

$$\text{自由水质量 } G_w = G_1 - G_r = 17577.72 - 16604.62 = 973.1 \text{ (kg/h)}$$

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

$$\text{所以 } Q_w = G_w (2490 + 1.93 t_g) = 973.1 \times (2490 + 1.93 \times 200) = 2798635.6 \text{ (kJ/h)}$$

ii 其余物化反应耗热 Q_r

用 Al_2O_3 反应热近似代替物化反应热

$$\text{入窑干制品质量 } G_r = 16604.62 \text{ (kg/h)}, \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ 含量} = 16.34\%$$

$$Q_r = G_r \times 2100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \% = 16604.62 \times 2100 \times 16.34\% = 5697709.31 \text{ (kJ/h)}$$

总的物化反应耗热:

$$Q_4 = Q_w + Q_r = 2798635.6 + 5697709.31 = 8496344.91 \text{ (kJ/h)}$$

7.1.4.4 离窑废气带走显热 Q_g (kJ/h)

取离窑烟气中空气过剩系数 $\alpha_g = 2.0$, 其体积流量为:

$$V_g = [V_g + (\alpha_g - \alpha) L_o] X = [13.394 + (2.0 - 1.3) \times 9.513] X = 20.05X$$

取烟气离窑温度 $t_g = 200^\circ\text{C}$, 烟气比热 $c_g = 1.445 \text{ KJ/(Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$ 则有:

$$Q_g = V_g t_g c_g = 20.05X \times 200 \times 1.445 = 5794.45X$$

7.1.4.5 其它热损失 Q_5 (kJ/h)

根据经验占热收入的5%

$$Q_5 = (Q_1 + Q_f + Q_a + Q'_a) \times 0.05$$

$$= (369132.12 + 35991.6X + 321.5X + 173.137X) \times 0.05 = 18456.606 + 1824.31X$$

7.1.5 列出热平衡方程式

由热收入=热支出得:

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

$$\text{左边} = 369132.12 + 35991.6X + 321.5X + 173.137X$$

$$\text{右边} = 22525827.5 + 926713.834 + 8496344.91 + 18456.606 + 1824.31X + 5794.45X$$

$$\text{计算得出 } x = 1094.59551 \text{ (Nm}^3/\text{h)}$$

即每小时需天然气 $B = 1094.596 \text{ (Nm}^3/\text{h)}$, 每小时烧成产品质量 $G = 16604.62 \text{ (Kg/h)}$

$Q_{DW} = 35960 \text{ KJ/Kg}$ 所以, 单位质量得产品热耗为:

$$B \cdot Q_{DW} / G = \frac{1094.596 \times 35960}{16604.62} = 2370.525 \text{ (kJ/kg)}, \text{ 合 } 567.111 \text{ Kcal/Kg}$$

7.1.6 预热带与烧成带的热平衡表

表7—8预热带与烧成带热平衡表

热收入			热支出		
项目	KJ/h	%	项目	KJ/h	%
坯体带入显热	369132	0.9	产品带走显热	22525828	55
燃料化学显热	39396261	97.7	窑体散热	926714	3.0
助燃空气显热	351913	0.9	物化反应耗热	8496345	21.0
漏入空气显热	189515	0.5	其它热损失	2015339	5.0
			烟气带走显热	6342582	16
总热量	40306821	100	总散热	40306808	100

7.2 冷却带风量的计算

7.2.1 热平衡计算基准及范围

时间基准：1h； 温度基准：0℃

7.2.2 热平衡框图

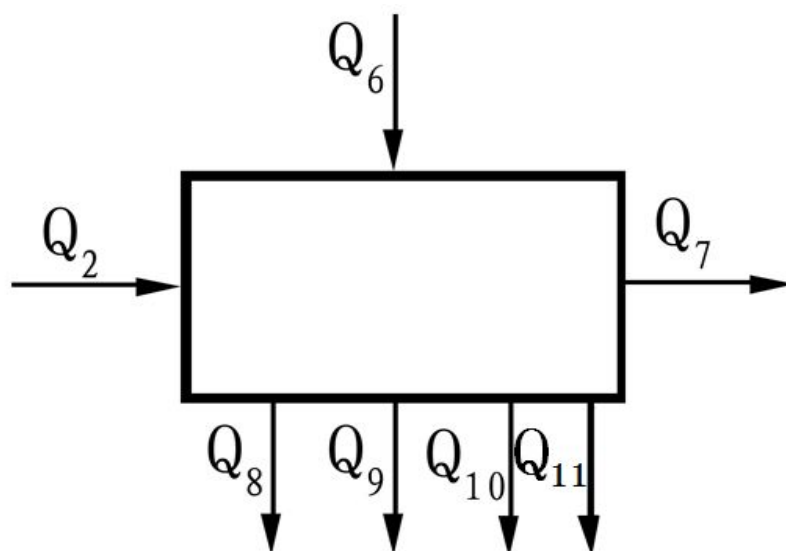


图8-9 冷却带热平衡示意图

Q_2 ——产品带入显热

Q_6 ——冷却风带入显热

Q_7 ——产品带出显热

Q_8 ——热风抽出带走显热

Q_9 ——窑体散热

Q_{10} ——从间壁冷却风管抽出热风带走显

热

Q_{11} ——其它热损失

7.2.3 热收入项目

7.2.3.1 产品带入显热 Q_2

此项热量即为预热带、烧成带产品带出显热：

$$Q_2 = 22525827.5 \text{ (KJ/h)}$$

7.2.3.2 冷却风带入显热 Q_6

鼓入冷风为自然风, $t_a = 20^\circ\text{C}$, 查表知此时冷风的比热为: $c_a = 1.30 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

设直接鼓入冷却风流量为 $V_x \text{ m}^3/\text{h}$,

则: $Q_6 = V_a c_a t_a = 1.3 \times 20 \times V_x = 26 V_x \text{ (KJ/h)}$

7.2.4 热支出项目

7.2.4.1 制品带走显热 Q_7

出窑时产品的质量 $G_3 = 16604.62 \text{ (Kg/h)}$, 出窑口温度 $t_7 = 80^\circ\text{C}$, 查表知此时温度下制品的平均比热为:

$$c_7 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times t_7 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 80 = 0.8608 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

则 $Q_7 = G_3 c_7 t_7 = 16604.62 \times 80 \times 0.8608 = 1143460.55 \text{ kJ/h}$

7.2.4.2 从窑道内抽出热空气带走显热 Q_8

从窑道内抽出热空气量等于鼓入冷却风量 $V_x \text{ m}^3/\text{h}$. 取抽出热空气的平均温度为: $t_8 = 350^\circ\text{C}$, 此温度下的空气平均比热为: $c_8 = 1.32 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$,

则: $Q_8 = V_x c_8 t_8 = 350 \times 1.32 \times V_x = 462 V_x$

7.2.4.3 窑体的散热 Q_9

i 在急冷带的窑体散热(99~120 节)

此段温度范围为 $1190 \sim 700^\circ\text{C}$, 则窑内壁平均温度为 945°C , 取窑外壁温度取 80°C ,

a. 窑顶

表7-10 窑顶

耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600 $^\circ\text{C}$	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$	230
隔热层	硅酸盐耐火纤维毯	1150	$0.1 \sim 0.3$	150

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1 \sim 0.3$

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{1190+700}{2} = 945^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31+0.176 \times 10^{-3} \times 945 = 0.475\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_2 = 0.25\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.23\text{m}$; $\delta_2 = 0.15\text{m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 80^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{945 - 80}{\frac{0.23}{0.475} + \frac{0.15}{0.25}} = 793.2 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = [2.8 + 2 \times (0.23 + 0.15)] \times 2.1 \times 7 = 52.332\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{顶}} = qA_{\text{顶}} = 793.2 \times 52.332 \times 3.6 = 149435.073\text{kJ/h}$$

b. 窑墙

7-11 窑墙

耐	莫来石轻质高	160	$0.310+0.176 \times$	230
火层	铝砖	0°C	$10^{-3}t$	
隔	混合纤维	135	0.12	120
热层		0		

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

混合纤维: 0.12

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{1190+700}{2} = 945^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31+0.176 \times 10^{-3} \times 945 = 0.475\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

混合纤维 $\lambda_2 = 0.12 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$; $\delta_2 = 0.12 \text{ m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 80^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{945 - 80}{\frac{0.23}{0.475} + \frac{0.12}{0.12}} = 579.43 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{墙}} = 0.709 \times 2.1 \times 7 = 10.42 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}} = 2qA_{\text{墙}} = 2 \times 579.43 \times 10.42 \times 3.6 = 43471.16 \text{ kJ/h}$$

c. 窑底

表7-12 窑底

耐火层	莫来石轻质高铝砖	160 0°C	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$	201
隔热层	硅藻土砖	900	$0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t$	130
膨胀层	硅酸盐耐火纤维毯	135 0	0.1~0.3	100

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$

硅藻土砖: $0.063 + 0.14 \times 10^{-3} t$

硅酸盐耐火纤维毯: 0.1~0.3

$$\text{窑内壁平均壁温 } t_1 = \frac{1190 + 700}{2} = 945^\circ\text{C}$$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \times 945 = 0.475 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times 945 = 0.195 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_3 = 0.25 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1=0.201\text{m}; \delta_2=0.13\text{m}; \delta_3=0.10\text{m};$

窑外壁表面平均温度 $t_a=80^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}}=\frac{945-80}{\frac{0.201}{0.475}+\frac{0.13}{0.195}+\frac{0.1}{0.25}}=580.61 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑底散热面积: $A_{\text{底}}=52.332 \text{ m}^2$

则 $Q_{\text{底}}=qA_{\text{底}}=641.62\times 44.982\times 3.6=109384.137 \text{ (kJ/h)}$

ii 在缓冷带的窑体散热(121~144 节)

此段温度范围为 700~500℃, 窑内壁平均温度 600℃, 窑外壁温度为 40℃

d. 窑顶

表7-13 窑顶

耐	莫来石轻质高	1600	0.310+0.176 ×	230
火层	铝砖	℃	10 ⁻³ t	
隔	硅酸盐耐火纤	1150	0.1~0.3	150
热层	维毯			

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176\times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1\sim 0.3$

窑内壁平均壁温 $t_1=\frac{700+500}{2}=600^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1=0.31+0.176\times 10^{-3}\times 600=0.416\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_2=0.2\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$

$\delta_1=0.23\text{m}; \delta_2=0.15\text{m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a=40^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{600 - 40}{\frac{0.23}{0.416} + \frac{0.15}{0.2}} = 429.82 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = [2.8 + 2 \times (0.23 + 0.15)] \times 2.1 \times 8 = 59.808 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{顶}} = qA_{\text{顶}} = 429.82 \times 59.808 \times 3.6 = 92544.03 \text{ kJ/h}$$

e. 窑墙

表7-14 窑墙

耐 火层	莫来石轻质高 铝砖	1600 ℃	0.310+0.176 × 10 ⁻³ t	230
隔 热层	硅酸盐耐火纤 维毯	1350	0.1~0.3	190

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310 + 0.176 \times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1 \sim 0.3$

$$\text{窑内壁平均壁温 } t_1 = \frac{700 + 500}{2} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{莫来石轻质高铝砖 } \lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \times 600 = 0.416 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{硅酸盐耐火纤维毯 } \lambda_2 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23 \text{ m}; \delta_2 = 0.19 \text{ m}$$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 40^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{600 - 40}{\frac{0.23}{0.416} + \frac{0.19}{0.2}} = 372.62 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{墙}} = 0.709 \times 2.1 \times 8 = 11.91 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}} = 2qA_{\text{墙}} = 2 \times 372.62 \times 11.91 \times 3.6 = 31952.91 \text{ kJ/h}$$

f. 窑底

表7-15 窑底

耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600 ℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	201
隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14 \times 10^{-3}t$	130
膨胀层	硅酸盐耐火纤维毯	1350	0.1~0.3	100

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

硅藻土砖: $0.063+0.14 \times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: 0.1~0.3

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{700+500}{2} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31+0.176 \times 10^{-3} \times 600 = 0.416 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.063+0.14 \times 10^{-3} \times 600 = 0.147 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_3 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.201\text{m}$; $\delta_2 = 0.13\text{m}$; $\delta_3 = 0.10\text{m}$;

窑外壁表面平均温度 $t_a = 40^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{600 - 40}{\frac{0.201}{0.416} + \frac{0.13}{0.147} + \frac{0.1}{0.2}} = 299.86 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑底散热面积: $A_{\text{底}} = 59.808 \text{ m}^2$

则 $Q_{\text{底}} = qA_{\text{底}} = 299.86 \times 59.808 \times 3.6 = 64562.5 \text{ (kJ/h)}$

iii 快冷段窑体的散热量(145~166 节)

此段温度范围为 500~80℃, 所以窑内壁平均温度为 290℃, 窑外壁温度取为 40℃.

g. 窑顶

表7-16 窑顶

耐火层	莫来石轻质高铝砖	160 0℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
隔热层	硅酸盐耐火纤维毯	115 0	0.1~0.3	150

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: 0.1~0.3

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{500+80}{2} = 290^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31+0.176 \times 10^{-3} \times 290 = 0.361 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_2 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.23\text{m}$; $\delta_2 = 0.15\text{m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 40^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{290 - 40}{\frac{0.23}{0.361} + \frac{0.15}{0.2}} = 180.23 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = [2.8 + 2 \times (0.23 + 0.15)] \times 2.1 \times 6 = 44.856 \text{ m}^2$$

则 $Q_{\text{顶}} = qA_{\text{顶}} = 180.23 \times 44.856 \times 3.6 = 29103.83 \text{ kJ/h}$

h. 窑墙

表7-17 窑墙

耐火层	莫来石轻质高铝砖	160 0℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
隔热层	硅酸盐耐火纤维毯	135	0.1~0.3	190

	热层	维毯	0		
--	----	----	---	--	--

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

硅酸盐耐火纤维毯: $0.1 \sim 0.3$

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{500+80}{2} = 290^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31+0.176 \times 10^{-3} \times 290 = 0.361 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

混合纤维 $\lambda_2 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.23\text{m}; \delta_2 = 0.19\text{m}$

窑外壁表面平均温度 $t_a = 40^\circ\text{C}$

平均热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{290 - 40}{\frac{0.23}{0.361} + \frac{0.19}{0.2}} = 157.52 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{墙}} = 0.709 \times 2.1 \times 6 = 8.93 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}} = 2qA_{\text{墙}} = 2 \times 157.52 \times 8.93 \times 3.6 = 10127.91 \text{ kJ/h}$$

i. 窑底

表7-18 窑底

耐	莫来石轻质高	160	$0.310+0.176 \times$	230
火层	铝砖	0°C	$10^{-3}t$	
隔	硅藻土砖	900	$0.063+0.14 \times$	130
热层			$10^{-3}t$	
膨	硅酸盐耐火纤	135	$0.1 \sim 0.3$	100
胀层	维毯	0		

所用材料的导热系数:

莫来石轻质高铝砖: $0.310+0.176 \times 10^{-3}t$

硅藻土砖： $0.063+0.14 \times 10^{-3} t$

硅酸盐耐火纤维毯： $0.1 \sim 0.3$

窑内壁平均壁温 $t_1 = \frac{500+80}{2} = 290^\circ\text{C}$

莫来石轻质高铝砖 $\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \times 290 = 0.361 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \times 290 = 0.1036 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅酸盐耐火纤维毯 $\lambda_3 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\delta_1 = 0.201 \text{ m}$; $\delta_2 = 0.13 \text{ m}$; $\delta_3 = 0.10 \text{ m}$;

窑外壁表面平均温度 $t_a = 40^\circ\text{C}$

平均热流密度：

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{290 - 40}{\frac{0.201}{0.361} + \frac{0.13}{0.1036} + \frac{0.1}{0.2}} = 108.15 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

窑底散热面积： $A_{\text{底}} = 44.856 \text{ m}^2$

则 $Q_{\text{底}} = q A_{\text{底}} = 108.15 \times 44.856 \times 3.6 = 17464.24 \text{ (kJ/h)}$

则冷却带窑体总散热量为：

$$\begin{aligned} Q_9 &= 149435.073 + 43471.16 + 109384.137 + 92544.03 + 31952.91 \\ &\quad + 64562.5 + 29103.83 + 10127.91 + 17464.24 \\ &= 548045.79 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

7.2.4.4 从间壁冷却风管抽出热风带走显热 Q_{10}

该窑第40~43节的每节辊上设置了12根 $\phi 60$ 的间冷风管，共48根。为简化计算，取该段平均温度作换热管内壁温度 $t_w = 700^\circ\text{C}$ ；取进入间壁的冷却风温 $t_{a1} = 20^\circ\text{C}$ ，初定抽出热风温度 $t_{a2} = 300^\circ\text{C}$ ，则管内空气平均温度为 $t_a = (20+300)/2 = 160^\circ\text{C}$ ；以一根间冷管计，其换热面积 $F = \pi dL = 3.14 \times 0.06 \times 2.1 = 0.39564 \text{ m}^2$ ；取间壁管道通内空气流速 $w = 4 \text{ Nm/s} = 4.63 \text{ m/s}$ ；则间壁通道内对流换热系数：

$$\alpha = 12.6w^{0.8} / d^{0.25} = 12.6 \times 4.63^{0.8} / 0.06^{0.25} = 86.76 [KJ / (m^2 \cdot h \cdot k)]$$

间冷管为耐热钢管，其导热系数可忽略，故可取间冷管内壁的平均温度为 $t_w = 700^\circ\text{C}$ ，取换热效率 $\eta = 0.9$ ，计算间冷管冷却风得热：

$$Q = \eta K \Delta t_{av} F = 0.9 \times 78.58 \times (700 - 160) \times 0.39564 = 15109.44 \text{ (kJ/h)}$$

每根间冷管内空气流量

$$V = 3600wF_n = 3600 \times 4 \times 3.14 \times 0.06^2 / 4 = 40.69 \text{ (Nm}^3 / \text{h)}$$

验算间壁抽出热风温度：

$$t'_{a2} = \frac{Q + Vc_1t_{a1}}{Vc_2} = \frac{15109.44 + 40.69 \times 1.3 \times 20}{40.69 \times 1.32} = 301.01$$

$(301.01 - 300) / 300 = 0.3\% \leq 5\%$ ；故所设抽出空气温度为 $t_{a2} = 300^\circ\text{C}$ 合理，该段共有 64 根间冷管，故从间冷管中抽出总热量为：

$$Q_{10} = 15109.44 \times 48 = 725253.12 \text{ (kJ/h)}$$

7.2.4.5 其它热损失 Q_{11}

其它热损失可取经验数据，按占冷却带热收入总量的 5% 计算，则：

$$Q_{11} = 0.05 \times (Q_2 + Q_6) = 0.05 \times (22525827.5 + 26V_x) = 1126291.38 + 1.3V_x$$

7.2.5 列出热平衡方程

热收入 = 热支出

所以 $Q_2 + Q_6 = Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}$

$$22525827.5 + 26V_x = 1143460.55 + 462V_x + 548045.79 + 725253.12 + 1126291.38 + 1.3V_x$$

解得 $V_x = 43409.048 \text{ m}^3 / \text{h}$

即从窑道内直接抽出热风量为： $V_x = 43409.048 \text{ (Nm}^3 / \text{h)}$

从间冷管中抽出热风量为: $V'_x = 40.69 \times 48 = 1953.12 \text{ (Nm}^3/\text{h)}$

故抽出热风总量为: $V_{\text{总}} = 43409.048 + 1953.12 = 45362.168 \text{ (Nm}^3/\text{h)}$

抽出热风平均温度为: $t_a = (43409.048 \times 200 + 1953.12 \times 300) / 45362.168 = 204.3^\circ\text{C}$

8.2.6 冷却带热平衡表

表 8-19 冷却带热平衡表

热收入			热支出		
项目	KJ/h	%	项目	KJ/h	%
产品带入显热	22525826	95.0	产品带出显热	1143461	4.8
冷却风带入显热	1128635	5.0	抽热风带走显热	20054980	84.8
			窑体散热	548045	2.4
			间冷管热风带走显热	725253	3.0
			其它散热	1182723	5.0
总计	23654461	100.0	总计	23654462	100.0

八. 管道尺寸、阻力计算及风机选型

8.1.1 排烟管道尺寸

排烟系统需排烟气量已由热平衡计算求出，为 $V_g = 20.05 \times 1094.596 = 21946.65 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

烟气抽出时实际体积为：

烟气在金属管道中流速 ω ，根据经验数据取 10 m/s

$$V = V_g \cdot (273 + 350) / 273 = 50083.381 \text{ (m}^3 / \text{h)} = 13.912 \text{ (m}^3 / \text{s)}$$

8.1.1.1 总烟管尺寸

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

$$\begin{aligned} \text{内径 } d_{\text{总}} &= (4V / \pi\omega)^{0.5} \\ &= [4 \times 13.912 / (3.1416 \times 10)]^{0.5} \\ &= 1.331 \text{ m} \end{aligned}$$

所以，总管内径取：1400mm，长度取 6m。

8.1.1.2 分烟管尺寸

$$\text{分管流量 } V' = V / 2 = 13.912 / 2 = 6.956 \text{ (m}^3 / \text{s)}$$

$$\begin{aligned} \text{内径 } d_{\text{分}} &= (4V' / \pi\omega)^{0.5} \\ &= 0.941 \text{ m} \end{aligned}$$

考虑到调节的方便性分管内径取值为：1000mm，长度取 4m。

8.1.1.3 支烟管尺寸

烟气在支管的流速为: $\omega=10\text{m/s}$, 流量 $V^{\wedge}=13.912/4=3.478\text{ (m}^3/\text{s)}$

$$\begin{aligned}\text{内径 } d_{\text{支}} &= \left(4V^{\wedge} / \pi\omega\right)^{0.5} \\ &= 0.665\text{m}\end{aligned}$$

所以, 支管内径应该不小于 273mm, 考虑到调节方便取值为: 700mm, 长度取 0.5m。

8.2 阻力计算

8.2.1.1 料垛阻力 h_i

根据经验每米窑长料垛阻力为 0.5Pa

8.2.1.2 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:

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

8.2.1.3 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。

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

8.2.1.4 摩擦阻力 h_f

摩擦阻力系数：金属管道取 $\zeta = 0.03$,

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

8.2.1.5 风机应克服总阻力 $h_{总}$

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

8.3 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 350℃，所以：

$$Q = 1.5 \times V_g \times (273 + 350) / 273 = 20.87 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

8.4 其他系统管路尺寸确定、风机的选型

液化石油气输送管径的计算

8.4.1.1 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：

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

所以，总管内径取值：50mm

8.4.1.2 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

8.4.1.3 通往烧嘴的液化石油气支管内径计算

窑体共安装了 374 个烧嘴，液化石油气支管总共有 374 根，而流速取 $\omega=6\text{m/s}$

$$\begin{aligned} \text{内径 } d_{\text{支}} &= 2 \times (v/3600 \pi \omega)^{0.5} \\ &= 2 \times [55 / (3600 \times 3.14 \times 6 \times 374)]^{0.5} \\ &= 0.0094\text{m} \end{aligned}$$

所以，分管内径取值：10mm

8.5 助燃风管计算

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

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

8.5.1.1 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

8.5.1.2 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

8.5.1.3 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

8.5.1.3 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

8.6 冷却带风管计算

冷却带鼓入冷风总量为 $40322\text{m}^3 / \text{h}$

项目	所占比例	鼓入冷风量
急冷带	60%	24193
缓冷带	—100%	—40322
快冷带	40%	16129

8.6.1.1 缓冷总管（抽风管）

缓冷风量 $V=24193\text{m}^3 / \text{h}$ ，取 $\omega=8\text{m/s}$

$$\text{缓冷总管：} d_{\text{总}} = 2\sqrt{\frac{24193}{3600 \times 3.14 \times 8}} = 1.041$$

取缓冷总管内径：600mm

缓冷分管：n=96

$$d_{\text{分}} = 2\sqrt{\frac{24193}{3600 \times 3.14 \times 96}} = 0.299$$

取缓冷分管内径：300mm

缓冷支管：共设置了（96 个抽风口，96 根抽风支管）

$$d_{\text{支}} = 2\sqrt{\frac{24193}{3600 \times 3.14 \times 96}} = 0.299$$

取缓冷分管内径：300mm

8.6.1.2 急冷风管内径的确定

8.6.1.2.1 急冷总管内径

急冷风量 $V=24193 \text{ m}^3 / \text{h}$ ，取 $\omega=10\text{m/s}$

$$d_{\text{总}} = 2\sqrt{\frac{24193}{3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.925$$

8.6.1.2.2 急冷分管内径

取 $\omega=9\text{m/s}$ ，上下共 2 根方管，n=2

$$L = \sqrt{\frac{24193}{3600 \times 9 \times 2}} = 0.611 \text{ mm}$$

急冷风方管尺寸：650mm

8.6.1.2.3 急冷支管内径

取 $\omega=8\text{m/s}$ ，共 30 根，n=168

$$d_{\text{支}} = 2\sqrt{\frac{24193}{3600 \times 3.14 \times 8 \times 168}} = 0.925$$

急冷支管内径：90mm

8.6.1.3 快冷管径确定

8.6.1.4 快冷总管内径确定

$V=16129\text{ m}^3/h$ ，取 $\omega=10\text{m/s}$

$$d_{\text{总}} = 2\sqrt{\frac{16129}{3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.755$$

总管内径：800mm

8.6.1.4.1 快冷分管内径确定

取 $\omega=9\text{m/s}$ ， $n=2$

$$d_{\text{分}} = 2\sqrt{\frac{16129}{3600 \times 3.14 \times 10 \times 2}} = 0.275$$

分管内径：280mm

8.6.1.4.2 快冷支管内径确定

取 $\omega=8\text{m/s}$ ， $n=384$

$$d_{\text{支}} = 2\sqrt{\frac{16129}{3600 \times 3.14 \times 10}} = 0.086$$

支管内径：90mm

8.7 风机选型

8.7.1.1 助燃风机选型

助燃风机的风量： $V=1816\text{ m}^3/h$

8.7.1.2 急冷风机选型

急冷风机的风量： $V=24193\text{ m}^3/h$

8.7.1.3 抽热风机选型

抽热风机的风量: $V=40322\text{ m}^3/\text{h}$

8.7.1.4 快冷风机选型

快冷风机的风量: $V=16129\text{ m}^3/\text{h}$

各系统管道尺寸、风机型号规格见表 8-1

表 8-1 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/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	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 $/r \cdot \text{min}^{-1}$	730		2900	1450	730	1450

九.工程材料概算

9.1 窑体材料概算

9.1.1 轻质粘土砖的概算

每块轻质粘土砖的体积 $V = 0.23 \times 0.113 \times 0.065 = 0.00169m^3$

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%

本窑共需轻质粘土砖的数量为:

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

9.1.2 轻质高铝砖

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

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:

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

9.1.3 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:

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

9.1.4 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:

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

9.2 钢材的概算

钢材的概算以窑的一节用钢材量为基准

9.2.1 方钢的概算

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

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

9.2.2 钢板的概算

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

9.2.3 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 $L_1 = 2.76 \times 4 = 11.04m$

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

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

合计 $8.4 + 10.5 = 18.9m$

9.3 全窑所用钢材量

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

钢板: $5.30 \times 27 = 143.1 m^2$

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

十. 后 记

紧张和忙碌中,本次毕业设计已临近结束。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。

十一. 参考文献

- [1] 胡国林、周露亮、陈功备,《陶瓷工业窑炉》,武汉理工大学出版社,2010
- [2] 刘振群,《陶瓷工业热工设备》,武汉理工大学出版社,1989。
- [5] 蒋鉴华 张振刚,《热工测量及过程自动控制》,景德镇陶瓷学院,2007
- [3] 孙晋涛,《硅酸盐工业热工基础》,武汉理工大学出版社,1992
- [4] 胡国林,《建筑工业辊道窑》,中国轻工业出版社,1998
- [5] 胡国林、陈功备,《窑炉砌筑与安装》,武汉理工大学出版社,2005

