

# 景德镇陶瓷学院 科技艺术学院

## 毕业设计说明书

题 目： 年产 80 万件洁具燃气隧道窑设计

学 号： 201030453143

姓 名： 龚 敏

院（系）： 科技艺术学院工程系

专 业： 热能与动力工程

日 期： 2014 年 5 月 25 日

# 目录

1、前言.....	1
2、设计任务书及原始资料.....	2
3、烧成制度的确定.....	4
4、窑体主要尺寸的计算.....	5
5、工作系统的确定.....	8
6、窑体的确定.....	10
7、窑体材料及厚度的选择.....	12
8、燃烧燃烧计算.....	13
9、物料平衡计算.....	15
10、预热带及烧成带热平衡计算.....	16
11、冷却带的热平衡计算.....	26
12、管道尺寸、阻力计算及烧嘴、风机的选择.....	33
13、工程材料概算.....	39
14、参考文献.....	43

# 摘 要

本设计说明书对所设计的年产 80 万件洁具隧道窑加以说明。说明书中具体论述了设计时应考虑的因素, 诸如窑体结构、排烟系统、烧成系统和冷却系统等等. 同时详细的进行了对窑体材料的选用、热平衡、管路、烧嘴、风机等的计算。

本次设计生产的产品规格是  $L550 \times W365 \times H185(\text{mm})$  的台下式面盆, 全窑长 116m, 最高烧成温度是  $1270^{\circ}\text{C}$ , 采用天然气。

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

**关键词: 隧道窑、系统、计算**

# Abstract

This instruction elaborated the clean tunnel kiln. The annual production of this clean tunnel kiln is 800 thousand pieces of cleces of tunnel kiln. 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 meterial, the calculation of heat balance , the pipeline design,the selection of burner ,the calculation of fan and so on.

To desidn and manufacture the product specification is L550H185W365 ( mm) below face basin,the whole kiln is 116 m long,siterning temperatuer is 1270℃,the highest use of natural gas.

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

Keywords: tunnel kiln 、 system、 calculated

# 1、前言

陶瓷工业窑炉是陶瓷工业生产中最重要工艺设备之一，对陶瓷产品的产量、质量以及成本起着关键性的作用。卫生洁具在生厂过程中，烧成是非常重要的一道工序，烧成过程严重影响产品的质量。

隧道窑是现代化的连续式烧成的热工设备。其主体为一条类似铁路隧道的长通道，通道两侧用耐火材料和保温材料砌成窑墙，上面为由耐火材料和保温材料砌筑的窑顶，下部为由沿窑内轨道移动的窑车构成的窑底。

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

本文设计的是年产 80 万件洁具天然气隧道窑，生产的产品规格是  $L550\times W365\times H185(\text{mm})$  的台下式面盆，全窑长 116m，最高烧成温度是  $1270^{\circ}\text{C}$ ，采用天然气。

## 2、设计任务书及原始资料

### 2.1 景德镇陶瓷学院毕业设计任务书

专    业	热能与动力工程	班    级	2014 级
学生姓名	龚敏	指导教师	陈功备
题    目	年产 80 万件洁具然气隧道窑炉设计		
<p>主要研究内容和设计技术参数：</p> <p>1、产品：卫生洁具（品种、规格自定）；</p> <p>2、产量：80 万件/年；</p> <p>3、年工作日：330 天；</p> <p>4、燃料：天然气；</p> <p>5、烧成合格率：95%；</p> <p>6、坯体入窑水分：2.1%；</p> <p>7、烧成周期：17 小时；</p> <p>8、烧成温度：1270℃。</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打纸印。</p>			
<p>工作进度计划：</p> <p>1、第1~4周：  毕业实习，收集相关资料；</p> <p>2、第5~6周：  查找资料，确定方案；</p> <p>3、第7~8周：  进行初步设计计算；</p> <p>4、第9~10周：详细计算并设计草图；</p> <p>5、第11~15周：完成全部图纸；</p> <p>6、第16 周起：整理全部材料，准备答辩。</p>			

## 2.2 原始资料

### 2.2.1 产品种类及规格

产品种类为台下式面盆，其成品外观尺寸为  $L550 \times W365 \times H185(\text{mm})$ ，坯件烧成收缩率为 11%，坯体重量 20kg。

由此计算入窑坯件尺寸如下：

L:  $550\text{mm} / (1-0.11) = 618\text{mm}$

W:  $365\text{mm} / (1-0.11) = 410\text{mm}$

H:  $185\text{mm} / (1-0.11) = 208\text{mm}$

即入窑坯件外观尺寸为  $L618 \times W410 \times H208\text{mm}$

### 2.2.2 坯料组成:

坯体成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	灼失
百分含量 (%)	65.7	20.04	0.32	0.23	0.34	3.12	0.20	4.9	4.8

### 2.2.3 燃料组成:

天然气成分	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	其它
百分含量 (%)	86.8	0.11	0.879	4.437	8.1	0.343

### 3、烧成制度的确定

#### 3.1 烧成工艺确定 (见图(3-1)烧成温度曲线)

温度 (°C)	时间 (h)	烧成阶段	升温速率 (°C · h)
20---450	2.2	预热带	195.45
450---600	1.3	预热带	115.38
600---900	1.8	预热带	166.67
900---1270	2.4	烧成带	154.17
1270---1270	2.0	烧成带	0
1270---800	1.8	急冷带	261.11
800---500	2.3	缓冷带	130.43
500---350	1.2	快冷带	125
350---80	2.0	快冷带	135

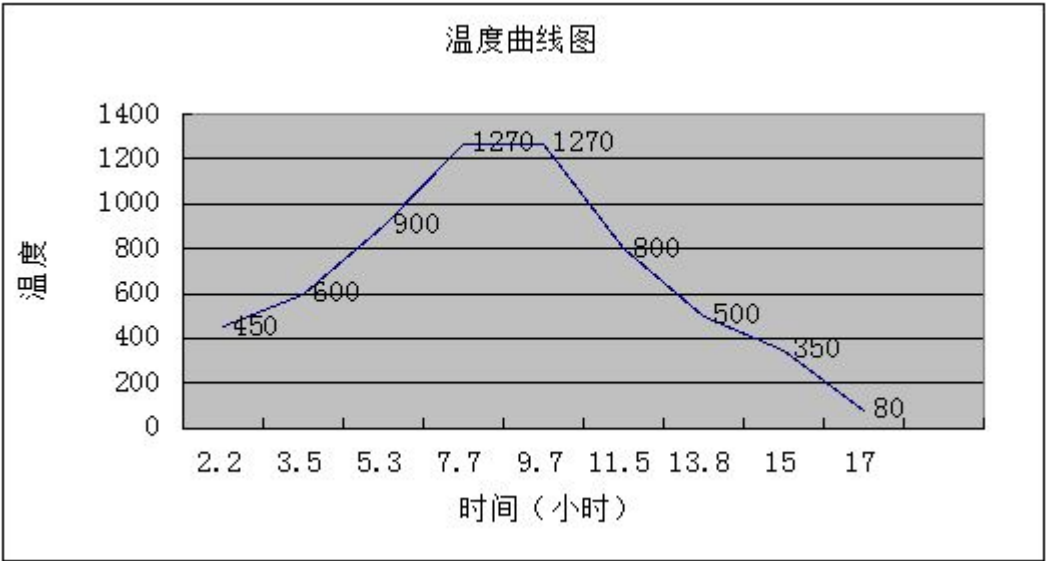


图 3-1 烧成温度曲线



## 4、窑体主要尺寸的确定

### 4.1 棚板和立柱的选用

选用棚板的材料是 SiC 50%，体积密度  $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ ，最高使用温度  $1400^\circ\text{C}$ ，导热系数计算式  $5.23-1.28\times 10^{-3}t$ 。

棚板尺寸：长 $\times$ 宽 $\times$ 高： $700\times 500\times 10\text{mm}$

棚板质量= $700\times 500\times 10\times 10^{-6}\times 2.2=7.7\text{ Kg}$

支柱规格：长 $\times$ 宽 $\times$ 高： $50\times 50\times 230\text{mm}$

支柱质量= $50\times 50\times 230\times 10^{-6}\times 2.2=1.27\text{Kg}$

### 4.2 窑长及各带长

#### 4.2.1 装车方法

装两层，在窑车的长度方向上设置 2 块棚板，宽度方向上设置 6 块棚板。

棚板间的间隙在长度方向上为 60mm，在宽度方向上为 10mm，棚板与车边间距为 30mm。

因此确定窑车车面尺寸为：

宽： $500\times 6+10\times 5+30\times 2=3110\text{mm}$

长： $700\times 2+60+30\times 2=1520\text{mm}$

#### 4.2.2 窑长的确定

每车装载制品数为 24 件。

$$\text{窑长 } L = \frac{\text{生产任务} \times \text{烧成时间}}{\text{年工作日} \times 24 \times \text{成品率} \times \text{装窑密度}} = \frac{800000 \times 17 \times 1.52}{330 \times 24 \times 0.95 \times 24} = 114.48\text{m}$$

窑内容车数： $n=114.48/1.52=75.52$  辆，取 76 辆。

推车时间： $17 \times 60/76=13.42$  min/车；推车速度： $60/13.42=4.47$  车/小时

全窑不设进车和出车室，所以窑有效长为  $76 \times 1.52=115.52\text{m}$  取 116m。

### 4.2.3 各带长度的确定

全窑长 116m，分为 58 个标准节，每节长 2000mm

预热带占全窑长的 30.9%， $58 \times 30.9\%=18$  节，则长度为 36000mm

烧成带占全窑长的 29.1%， $58 \times 25.9\%=15$  节，则长度为 30000mm

冷却带占全窑长的 40.1%， $58 \times 43.2\%=25$  节，则长度为 50000mm

### 4.2.4 窑内宽、内高、全高、全宽的确定

#### 1) 窑内宽：

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

$$B_1=3110+30 \times 2=3170\text{mm}$$

#### 2) 窑全宽

预热带和冷却带(除急冷段外)全宽=窑内宽 3170+两侧墙宽  $415 \times 2=4000\text{mm}$ 。

烧成带和急冷段全宽=窑内宽 3170+两侧墙宽  $550 \times 2=4270\text{mm}$ 。

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

#### 3) 内高

为避免烧嘴喷出的高速火焰直接冲刷到局部制品上，影响火焰流动，造成较大温差，窑车台面与垫板间、上部制品与窑顶内表面之间都设有火焰通道，其高度(大于或等于烧嘴砖尺寸)：棚板下部通道取 240mm，上部火焰通道取 260mm。

窑内高=上部火焰通道 250 mm+ 制品码装高度  $(230+10) \times 2\text{mm}$  + 窑车台面距棚板 250mm =980mm。

通用砖厚取 65，需要  $980/65=15.08$  块，取 16 块，故

砖高= $16 \times 65=1040\text{mm}$ ，灰缝= $16 \times 2=32\text{mm}$ ，

故预热带和冷却带(除急冷段外)的内高= $1040+32\text{mm}=1072\text{mm}$

为加强传热烧成带和急冷段加高 100mm，内高为 1172mm

4) 全窑高(轨面至窑顶外表面)

预热带和冷却带(除急冷段外)的窑总高:

车架高度 280 + 窑车内衬 335+内高 1072+窑顶高 430=2117mm;

烧成带和急冷段的窑总高:

车架高度 280+ 窑车内衬 335+内高 1172+窑顶高 430=2217mm

## 5、工作系统的确定

### 5.1 预热带工作系统的确定

预热带共 18 节，其中 1—8 节为排烟段，第一节前半节两侧窑墙各设置一道封闭气幕，气幕风由冷却带抽来的热空气提供。后半节设 1 对排烟口（尺寸  $230 \times 260$ ），目的是使窑头气流压力自平衡，以减少窑外冷空气进入窑体。第 2—8 节每节在窑车台面棚板通道处各设 2 对排烟口，位置正对，共 15 对排烟口。

另外，为方便调节预热带温度，尽量减少上下温差，在第 9—18 节设置高速调温烧嘴，每节 3 只，交错布置，同时烧嘴的正对面是观火孔（尺寸  $\Phi 65$ ），高速调温烧嘴喷出的热烟气在窑内断面上形成气流循环，使窑内气流实现激烈的搅动，促进上下温度场的均匀，而且加快了窑内的对流传热，缩短烧成时间。

### 5.2 烧成带工作系统布置

第 19 节到 33 节为烧成带，设置高速调温烧嘴，19、20 节仍与预热带一样每节仅在下部设置 3 只烧嘴；21—24 节每节各下部设置 3 只，上部设置 2 只烧嘴；25—33 节每节设置 6 只烧嘴，上部 2 只，下部 4 只，上下部设置与两侧窑墙均呈现交错布置，有利于烧成带温度制度的调节，烧嘴和观火孔一一正对，烧嘴、观火孔共有 110 只。

### 5.3 冷却带工作系统布置

#### 5.3.1 急冷段

34—40 节为急冷段，在 34—38 节采用喷入急冷风直接冷却的方式，除 34 节只在后半节设置冷风喷管（上设 2 对，下设 2 对），其余每节上部设 4 对冷风喷管，下部设 4 对冷风喷管，共设置了 36 对急冷风管（尺寸  $\Phi 80$ ）。39、40 节设置四对侧部抽热口。

#### 5.3.2 缓冷段

41—49 为缓冷段，采用间壁冷却的形式，在 41—48 节的侧墙设置四段间冷壁，每两节作一段，49 节作为缓冲段不设置。

### 5.3.3 快冷段

在 50—56 节为快冷段，布置冷风喷管，直接鼓入冷风，除 56 节上下各一对外，其余每节 6 对，上下各 3 对，交错布置，共设置 38 对快冷风管（尺寸  $\Phi 80$ ），气源为外界空气。并在顶部设置抽热口，由抽热风机送至干燥室。

### 5.3.4 窑尾段

在 57-58 节设置 4 对轴流风机，直接对窑内的制品进行冷却，以保证制品的出窑温度低于  $80^{\circ}\text{C}$ 。

## 6、窑体的确定

### 6.1 窑体

以 2 米为一个模数单元节，全窑 116 米，共有 58 节。窑体由窑墙主体、窑顶和钢架组成窑体材料由外部钢架结构（包括窑体加固系统和外观装饰墙板）和内部耐火隔热材料衬体组成。砌筑部分，均采用轻质耐火隔热材料。窑墙、窑顶和窑车衬体围成的空间形成窑炉隧道，制品在其中完成烧成过程。

### 6.2 钢架

每一钢架长度为 2 米，含钢架膨胀缝。全窑共 58 个钢架结构，其高度、宽度随窑长方向会有所改变。钢架主要由轻质方钢管、等边角钢等构成，采用焊接工艺，并在焊接处除去焊渣、焊珠，并打磨光滑。窑墙直接砌筑在钢板上，钢架承担着窑墙和窑顶及附属设备的全部重量。

### 6.3 窑墙

窑墙采用轻质耐火隔热材料。常用材质如下：聚轻高铝砖、轻质高铝砖、轻质粘土砖、堇青莫来石板、莫来石绝热砖、含锆散棉、硅酸铝棉等耐火材料。窑墙砌筑在钢结构上。每隔两米留设 20mm 左右的热膨胀缝，用含锆散棉填实。窑墙最外面用 20mm 厚的碳酸钙板。

### 6.4 窑顶

窑顶是由吊顶板或吊顶砖和角钢或细钢筋等组成的平顶结构。角钢直接焊接在窑顶钢架上，细钢筋则是做成钩状挂在窑顶钢架上。吊顶板或吊顶砖与角钢或细钢筋紧固。这样，窑顶的重量也由钢架承担。

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

### 6.5 曲封、砂封和车封

窑墙与窑车之间、窑车与窑车之间做成曲折封闭。曲封面贴一层高温耐火棉。窑车之间要承受推力，所以在窑车接头的槽钢内填充散棉，以防止上下漏气。砂封是利用窑车两侧的厚度约 6~8mm 的钢制裙板，窑车在窑内运动时，裙板插入窑两侧的内装有直径为 1~3mm 砂子的砂封槽内，隔断窑车上下空间。砂封槽用厚度

3mm 左右的钢板制作而成，且留有膨胀缝。在预热带头部缓冷段头部的窑墙上各设置一对加砂斗。

## 6.6 测温孔

为了严密监视及控制窑内温度和压力制度，及时调节烧嘴的开度，一般在窑道顶及侧墙留设测温孔安装热电偶。测温孔的间距一般为 3-5 米，高温段布置密集些，低温段布置相对稀疏。本设计在窑体的第 1 节~13 节，在第 1 节设置一处测温孔，接下来每隔一节设置一处测温孔，共 7 处测温孔；在进入烧成带之后的第 14 节与 16 节各设置一处测温孔，第 18、20、22 节的窑顶和窑侧墙处设置测温孔，共 6 处测温孔；第 24，26，28，31，33，35，37，38 节各设置一处测温孔，共 8 处测温孔。因此在烧成曲线的关键点，如窑头、氧化末段、晶型转化点、成瓷段、急冷结束等都有留设。

## 6.7 检查坑道和事故处理孔

由于窑车上棚架稳固，不容易发生倒窑事故。即使发生窑内卡车或者其他事故，也可停窑，能够快速冷却下来，再进行处理，对生产影响不大。因此该隧道窑不设置窑内车下检查坑道。这样既简化了窑炉基础结构，减少了施工量和难度，又降低了成本，窑体保温也得到明显改善。

## 7、窑体材料和厚度的确定

窑体所采用的材料及其厚度应该满足各段使用性能要求，综合考虑各处的温度对窑墙、窑顶的要求，窑体表面最高温度限制以及砖形、外观整齐等方面的因素，确定窑体材料和厚度见如下。

20℃—900℃ （1—18节）					
窑顶		厚度	窑墙		厚度
JM26莫来石吊顶砖	230mm	430mm	轻质高铝砖	230mm	415mm
硅酸铝纤维毯	100mm		轻质粘土砖	115mm	
岩棉毯	100mm		硅酸铝纤维毯	50mm	
			硅酸钙硬板	20mm	
900℃—1270℃ （19—33 节）					
窑顶		厚度	窑墙		厚度
JM26莫来石吊顶	230mm	430mm	JM26莫来石砖	230mm	550mm
含锆纤维毯	100mm		轻质粘土砖	150mm	
硅酸铝纤维毯	100mm		硅酸铝纤维毯	150mm	
			硅酸钙硬板	20mm	
1270℃—800℃ （34—40节）					
窑顶		厚度	窑墙		厚度
JM26莫来石吊顶砖	230mm	430mm	JM26莫来石砖	230mm	550mm
含锆纤维毯	100mm		轻质粘土砖	150mm	
硅酸铝纤维毯	100mm		硅酸铝纤维毯	150mm	
			硅酸钙硬板	20mm	
800℃—80℃ （41—58 节）					
窑顶		厚度	窑墙		厚度
JM26莫来石吊顶砖	230mm	430mm	轻质高铝砖	230mm	415mm
硅酸铝纤维毯	100mm		轻质粘土砖	115mm	
岩棉毯	100mm		硅酸铝纤维毯	50mm	
			硅酸钙硬板	20mm	



## 8、燃料燃烧计算

### 8.1 空气量的计算

#### 8.1.1 理论空气量的计算

所用燃料是天然气，低位发热量  $Q_d$  为  $34500 \text{ kJ}/\text{m}^3$  至  $41870 \text{ kJ}/\text{m}^3$  之间，按  $35960 \text{ (kJ}/\text{m}^3)$  计算。查表《理论空气量和燃烧生成烟气经验计算公式》

根据经验公式计算单位理论空气量：

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

#### 8.1.2 实际空气量的计算

取空气过量系数为  $a=1.3$ ，则实际空气需要量为：

$$L_a = L_o \times 1.3 = 9.513 \times 1.3 = 12.367 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

### 8.2 烟气量的计算

根据经验公式计算实际烟气量为：

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

### 8.3 燃烧温度的计算

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

式中  $c_r$ 、 $c_a$ 、 $c_g$  — 燃料、空气及烟气的比热容， $\text{kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$L_a$  — 一定空气消耗系数下的单位燃料燃烧空气消耗量， $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$ ，

$V_g$  — 一定空气消耗系数下单位燃料燃烧生成烟气量， $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$ ；

$t_r$ 、 $t_a$  — 燃料及空气的预热温度， $^\circ\text{C}$ 。

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

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

烟气的比热容  $c_g$  根据公式为：

$$c_g = 1.424 + 0.000105t = 1.424 + 0.000105 \times 1700 = 1.6025 \text{ KJ/Nm}^3。$$

现设  $t_{th} = 1700^\circ\text{C}$ ,

则理论燃烧温度为:

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

$(1700 - 1691) / 1700 < 5\%$ , 所设温度合理。

取高温系数为  $\eta = 0.8$ , 则实际温度为:

$$t = 0.8 \times 1700 = 1360^\circ\text{C}$$

实际温度比最高烧成温度  $1270^\circ\text{C}$  高出  $90^\circ\text{C}$ , 符合烧成要求, 认为合理。

## 9、物料平衡计算

### 9.1 每小时烧成干制品的质量

$$G_m = \text{推车速度} \times \text{每车载重} = 4.47 \times 480 = 2145.6 \text{ kg}$$

每小时进 4.47 车，每车装载制品 480kg

### 9.2 每小时入窑干坯的质量

$$G_1 = G_m \cdot \frac{100}{100 - IL} = 2145.6 \times \frac{100}{100 - 4.8} = 2253.8 \text{ kg/h}$$

### 9.3 每小时欲烧成湿制品的质量

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100}{100 - \omega} = 2253.8 \times \frac{100}{100 - 2.1} = 2302.1 \text{ kg/h}$$

### 9.4 每小时蒸发的自由水的质量

$$G_w = G_2 - G_1 = 2302.1 - 2253.8 = 48.35 \text{ kg/h}$$

### 9.5 每小时从精坯中引入的 CaO 和 MgO 质量 计算

$$G_{CaO} = G_1 \cdot CaO\% = 2253.8 \times 0.32\% = 7.212 \text{ kg/h}$$

$$G_{MgO} = G_1 \cdot MgO\% = 2253.8 \times 0.23\% = 5.184 \text{ kg/h}$$

### 9.6 产生的 CO<sub>2</sub> 质量

$$G_{CO_2} = G_{CaO} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} + G_{MgO} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{MgO}} = \frac{7.212 \times 44}{56} + \frac{5.184 \times 44}{40} = 11.37 \text{ kg/h}$$

### 9.7 每小时从精坯中排除结构水的质量 G<sub>ip</sub>

$$G_{ip} = G_1 \times IL\% - G_{CO_2} = 2253.8 \times 4.8\% - 11.37 = 96.81 \text{ kg/h}$$

### 9.8 窑具的质量 G<sub>b</sub>

总共每车 24 块棚板，72 个火道支柱。

$$G_b = (24 \times 7.7 + 1.27 \times 72) \times 4.47 = 1234.8 \text{ kg/h}$$

## 10、预热带和烧成带的热平衡计算

### 10.1 确定热平衡计算的基准、范围

以 1 小时为计算基准，以  $0^{\circ}\text{C}$  作为基准温度。以预热带和烧成带为计算范围。

### 10.2 热平衡示意图

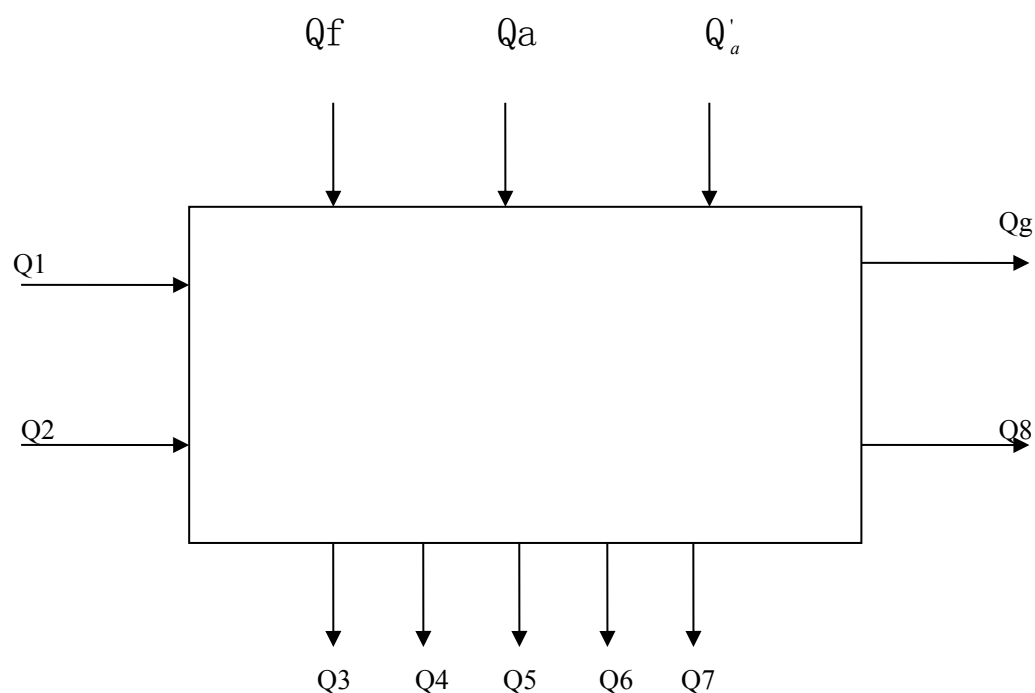


图 10—2 预热带和烧成带的热平衡示意图

$Q_1$ —坯体带入显热；

$Q_2$ —硼板、支柱等窑具带入显热；

$Q_3$ —产品带出显热；

$Q_4$ —硼板、支柱等窑具带出显热；

$Q_5$ —窑墙、顶总散热；

$Q_6$ —物化反应耗热；

$Q_7$ —窑车蓄热和散失热量；

$Q_8$ —其他热损失；

$Q_g$ —烟气带走显热；

$Q_f$ —燃料带入化学热及显热；

$Q_a$ —助燃空气带入显热；

$Q'_a$ —预热带漏入空气与气幕喷人风带入显热；

## 10.3 热收入项目

### 10.3.1 坯体带入显热 $Q_1$

$$Q_1 = G_1 C_1 T_1 \quad (\text{kJ/h})$$

其中： $G_1$ —入窑湿制品质量 ( $\text{Kg/h}$ )； $G_1=2302.1\text{Kg/h}$ ；

$T_1$ —入窑制品的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )； $T_1=20^{\circ}\text{C}$

$C_1$ —入窑制品的平均比热  $\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；此处取  $0.9\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

$$Q_1 = G_1 C_1 T_1 = 2302.1 \times 0.9 \times 20 = 41437.8 \quad (\text{kJ/h})$$

### 10.3.2 棚板、支柱等窑具带入显热 $Q_2$

其中： $G_2$ —入窑棚板、支柱等窑具质量 ( $\text{Kg/h}$ )； $G_2=1234.8\text{Kg/h}$ ；

$T_2$ —入窑棚板、支柱等窑具的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )； $T_2=20^{\circ}\text{C}$

$C_2$ —入窑棚板、支柱等窑具的平均比热 ( $\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ )；棚板、支柱的平均比热容按下式计算：

$$C_2 = 0.963 + 0.000146t = 0.963 + 0.000146 \times 20 = 0.966\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$Q_2 = G_2 C_2 T_2 = 1234.8 \times 0.966 \times 20 = 23856.3 \quad (\text{kJ/h})$$

### 10.3.3 燃料带入化学热及显热 $Q_f$

$$Q_f = (Q_{\text{net,ar}} + T_f C_f) x \quad (\text{kJ/h})$$

其中： $Q_d$ —所用燃料低位发热量 ( $\text{KJ}/\text{m}^3$ )；燃料为天然气，低位发热量为：

$$Q_d = 35960\text{KJ}/\text{m}^3；$$

$T_f$ —入窑燃料温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；入窑天然气温度为  $T_f=20^{\circ}\text{C}$ ；

$C_f$ —入窑燃料的平均比热容  $\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；查表， $T_f=20^{\circ}\text{C}$ 时天然气平均比热容为  $C_f=1.58\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

$x$ —设每小时天然气的消耗量为  $x$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$$Q_f = (Q_d + T_f C_f) x = (35960 + 20 \times 1.58) x = 35991.6x \quad \text{kJ/h}$$

### 10.3.4 助燃空气带入显热 $Q_a$

$$Q_a = q_v C_a T_a \quad (\text{kJ/h})$$

其中:  $q_{v,a}$ —入窑助燃风流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) 前面燃烧部分计算得:  $q_v = V_a x = 12.367 x \text{ (m}^3/\text{h)}$ ;

$T_a$ —入窑助燃风的平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ); 助燃风用冷却带抽出热风,  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$ ;

$C_a$ —入窑助燃风的平均比热容  $\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ; 查表,  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$  助燃风时平均比热容为:  $C_a = 1.30 \text{ KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$$Q_a = q_v C_a T_a = 12.367x \times 1.30 \times 20 = 321.542x \quad (\text{kJ/h})$$

### 10.3.5 预热带漏入空气与气幕喷人风带入显热 $Q'_a$

$$Q'_a = q'_v \times C'_a \times t'_a$$

取预热带烟气中的空气过剩系数  $a_g = 2.5$ ,  $a_f = 1.3$ 。理论空气量  $L_0 = 9.513 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$  漏入空气温度  $t_s = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $C_s = 1.30 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 漏入空气温度为  $t'_a = 20^{\circ}\text{C}$ , 此时  $C'_a = 1.30 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,

$$V'_a = x \times (a_g - a_f) \times L_0 = x(2.5 - 1.3) \times 9.513 = 12.367x \quad (\text{Nm}^3/\text{h}), \text{ 则:}$$

$$Q'_a = q'_v \times C'_a \times t'_a = 12.367 x \times 1.30 \times 20 = 321.54x \quad (\text{kJ/h})$$

喷入热风取理论空气量的 0.6 倍, 温度为  $200^{\circ}\text{C}$ , 此时空气比热为  $1.32 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 漏入风为理论空气量的  $0.6(=2.5 - 1.3 - 0.6)$  倍。

$$Q_a = 0.6 \times 9.513 \times 1.3 \times 20x + 0.6 \times 9.513 \times 1.32 \times 200x = 1655.262x$$

## 10.4 热支出项目

### 10.4.1 制品带出显热 $Q_3$

$$Q_3 = G_3 C_3 T_3 \quad (\text{kJ/h})$$

出烧成带产品质量:  $G_3 = 2145.6 \text{ Kg}$

出烧成带产品温度:  $t_3 = 1270^{\circ}\text{C}$

查手册<sup>[11]</sup>, 此时产品平均比热:  $C_3 = 1.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

$$\text{则: } Q_3 = G_3 \times C_3 \times t_3 = 2145.6 \times 1270 \times 1.2 = 3269894.4 \quad (\text{kJ/h})$$

### 10.4.2 棚板、支柱等窑具带出显热 $Q_4$

$$Q_4 = G_4 C_4 T_4 \quad (\text{kJ/h})$$

棚板、立柱质量:  $G_4 = 1234.8 \text{ kg/h}$

出烧成带棚板、立柱温度:  $T_4 = 1270^{\circ}\text{C}$

此时棚板、立柱的平均比热:

$$C_4=0.96+0.000146t=0.96+0.000146\times 1270=0.98 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot ^\circ\text{C})$$

$$Q_4= G_4\times C_4\times T_4=1234.8\times 0.98 \times 1270=1536832.08 \quad (\text{kJ/h})$$

#### 10.4.3 烟气带走显热 $Q_g$

$$Q_g=q_gC_gT_g \quad (\text{kJ/h})$$

烟气中包括燃烧生成的烟气,预热带不严密处漏入空气外,还有用于气幕的空气。用于气幕的空气的体积  $V_g^0=12.367x \quad (\text{Nm}^3/\text{h})$

离窑烟气体积:  $q_g=[La+(a_g-1.3)\times L_0]x+V_s$  烟气温度为  $200^\circ\text{C}$  此时烟气比热  $C_g=1.445\text{kJ}/(\text{Nm}^3\cdot ^\circ\text{C})$

$$\begin{aligned} Q_g &= q_g \times C_g \times t_g = \{[12.367+(2.5-1.3)\times 9.513]x+7.42x\} \times 1.445 \times 200 \\ &= 9017.55x \quad (\text{kJ/h}) \end{aligned}$$

#### 10.4.4 窑墙、窑顶散失热量 $Q_5$

根据各段材料不同,并考虑温度范围不能太大,将预热带和烧成带分成四段  $20\sim 300^\circ\text{C}$ ,  $300\sim 600^\circ\text{C}$ ,  $600\sim 900^\circ\text{C}$ ,  $900\sim 1270^\circ\text{C}$ 。所用材料的导热系数如下

材 料	导热系数 ( $\text{W}/\text{m}\cdot ^\circ\text{C}$ )	材 料	导热系数 ( $\text{W}/\text{m}\cdot ^\circ\text{C}$ )
轻质高铝砖	$0.341+0.000249t$	JM26 莫来石砖	$0.0815+0.0002t$
轻质粘土砖	$0.291+0.00026t$	含锆纤维毯	0.18
硅酸铝纤维毯	0.09	岩棉毯	0.35
硅酸钙硬板	0.07		

##### 10.4.4.1 20—300℃段

该段窑长度为 16 米,窑宽为 3.17 米。窑外壁表面平均温度  $40^\circ\text{C}$ ,窑内壁表面平均温度:  $(20+300)/2=160^\circ\text{C}$

##### 10.4.4.1.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:

轻质高铝砖,  $\delta_1=230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1=0.341+0.000249 \times 160=0.381 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

轻质粘土砖,  $\delta_2=115 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2=0.291+0.00026 \times 160=0.333 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3=50 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸钙硬板,  $\delta_4=20 \text{ mm}$ ,  $\lambda_4=0.07 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = \frac{160 - 40}{\frac{0.23}{0.381} + \frac{0.115}{0.333} + \frac{0.05}{0.09} + \frac{0.02}{0.07}} = 67.03 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = 1.072 \times 16 = 17.15 \text{ m}^2$

则两侧窑墙散热量:  $Q'_1 = 2 \times 67.03 \times 17.15 \times 3.6 = 8276.86 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.4.1.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石吊顶砖,  $\delta_1=230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1=0.0815+0.0002 \times 160=0.114 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_2=100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

岩棉毯,  $\delta_3=100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.35 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{160 - 40}{\frac{0.23}{0.144} + \frac{0.1}{0.09} + \frac{0.1}{0.35}} = 40.08 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = (3.17 + 2 \times 0.43) \times 16 = 64.48 \text{ m}^2$

则窑顶散热量:  $Q'_2 = 40.08 \times 64.48 \times 3.6 = 9470.82 \text{ (kJ/h)}$

所以, 20—300℃段的窑体散热总量为:

$Q'_3 = Q'_1 + Q'_2 = 8276.86 + 9470.82 = 17747.68 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.4.2 300—600℃段

该段长度为 10 米, 窑宽为 3.17 米。窑外壁表面平均温度 40℃, 窑内壁表面平均温度:  $(300+600)/2=450^\circ\text{C}$

##### 10.4.4.2.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:



轻质高铝砖,  $\delta_1=230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1=0.341+0.000249 \times 450=0.453 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

轻质粘土砖,  $\delta_2=115 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2=0.291+0.00026 \times 450=0.408 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3=50 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸钙硬板,  $\delta_4=20 \text{ mm}$ ,  $\lambda_4=0.07 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = \frac{450 - 40}{\frac{0.23}{0.453} + \frac{0.115}{0.408} + \frac{0.05}{0.09} + \frac{0.02}{0.07}} = 251.4 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = 1.072 \times 10 = 10.72 \text{ m}^2$

则两侧窑墙散热量:  $Q'_4 = 2 \times 251.4 \times 10.72 \times 3.6 = 19404.05 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.4.2 .2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石吊顶砖,  $\delta_1=230\text{mm}$ ,  $\lambda_1=0.0815+0.0002 \times 450=0.172\text{w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_2=100\text{mm}$ ,  $\lambda_2=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

岩棉毯,  $\delta_3=100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.35 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{450 - 40}{\frac{0.23}{0.172} + \frac{0.1}{0.09} + \frac{0.1}{0.35}} = 149.96 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = (3.17 + 2 \times 0.43) \times 10 = 40.3\text{m}^2$

则窑顶散热量:  $Q'_5 = 149.96 \times 40.3 \times 3.6 = 21756.2 \text{ (kJ/h)}$

所以, 300—600℃段的窑体散热总量为:

$Q'_6 = Q'_4 + Q'_5 = 19404.05 + 21756.2 = 41160.25 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.4.3 600—900℃段

该段长度为 10 米, 窑宽为 3.17 米, 窑外壁表面平均温度 40℃, 窑内壁表面平均温度:  $(600+900)/2=750^\circ\text{C}$

##### 10.4.4.3.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:

轻质高铝砖,  $\delta_1=230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1=0.341+0.000249 \times 750=0.528 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

轻质粘土砖,  $\delta_2=115 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2=0.291+0.00026 \times 750=0.486 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3=50 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸钙硬板,  $\delta_4=20 \text{ mm}$ ,  $\lambda_4=0.07 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = \frac{750 - 40}{\frac{0.23}{0.528} + \frac{0.115}{0.486} + \frac{0.05}{0.09} + \frac{0.02}{0.07}} = 469.11 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = 1.072 \times 10 = 10.72 \text{ m}^2$

则两侧窑墙散热量:  $Q'_7 = 2 \times 469.11 \times 10.72 \times 3.6 = 36207.79 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.4.3. 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石吊顶砖,  $\delta_1=230\text{mm}$ ,  $\lambda_1=0.0815+0.0002 \times 750=0.232\text{w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_2=100\text{mm}$ ,  $\lambda_2=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

岩棉毯,  $\delta_3=100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.35 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{750 - 40}{\frac{0.23}{0.232} + \frac{0.1}{0.09} + \frac{0.1}{0.35}} = 297.29 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = (3.17 + 2 \times 0.43) \times 10 = 40.3 \text{ m}^2$

则窑顶散热量:  $Q'_8 = 297.29 \times 40.3 \times 3.6 = 43131.48 \text{ (kJ/h)}$

所以, 600—900℃段的窑体散热总量为:

$Q'_9 = Q'_7 + Q'_8 = 36207.79 + 43131.48 = 79339.27 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.4.4 900—12700℃段

该段长度为 30 米, 窑外壁表面平均温度 40℃, 窑内壁表面平均温度:

$$(900 + 1270) / 2 = 1085^\circ\text{C}$$

##### 10.4.4.4.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石砖,  $\delta_1=230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1=0.0815+0.0002\times 1085=0.299 \text{ w/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

轻质高铝砖,  $\delta_2=150\text{mm}$ ,  $\lambda_2=0.341+0.000249\times 1085=0.61 \text{ w/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3=150 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.09 \text{ w/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

硅酸钙硬板,  $\delta_4=20 \text{ mm}$ ,  $\lambda_4=0.07 \text{ w/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = \frac{1085 - 40}{\frac{0.23}{0.299} + \frac{0.15}{0.61} + \frac{0.15}{0.09} + \frac{0.02}{0.07}} = 325.15 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = 1.172 \times 30 = 35.16 \text{ m}^2$

则两侧窑墙散热量:  $Q'_{10} = 2 \times 325.15 \times 35.16 \times 3.6 = 82312.37 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.4.4.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石砖,  $\delta_1=230\text{mm}$ ,  $\lambda_1=0.0815+0.0002\times 1085=0.299\text{w/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

含锆纤维毯,  $\delta_2=100\text{mm}$ ,  $\lambda_2=0.18 \text{ w/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3=100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.09 \text{ w/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1085 - 40}{\frac{0.23}{0.299} + \frac{0.1}{0.18} + \frac{0.1}{0.09}} = 429 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = (3.17 + 2 \times 0.43) \times 30 = 120.9 \text{ m}^2$

则窑顶散热量:  $Q'_{11} = 429 \times 120.9 \times 3.6 = 186717.96 \text{ (kJ/h)}$

所以, 600—900℃段的窑体散热总量为:

$Q'_{12} = Q'_{10} + Q'_{11} = 82312.37 + 186717.96 = 269030.33 \text{ (kJ/h)}$

综上所述, 预热带和烧成带窑体散失热量总和为:

$Q_5 = 17747.68 + 41160.25 + 79339.27 + 269030.33 = 407337.53 \text{ (kJ/h)}$

#### 10.4.5 窑车蓄热和散失热量 $Q_6$

取经验数据, 占热收入的 10%。

#### 10.4.6 物化反应耗热 $Q_7$

##### 10.4.6.1 自由水蒸发吸热 $Q_w$

$$Q_w = G_w \times (2490 + 1.93 \times t_g) \text{ 自由水的质量 } G_w = 48.35 \text{ kg/h}$$

烟气离窑的温度  $t_g = 200^\circ\text{C}$ 。制品中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 20.04%

$$\text{则可得: } Q_w = 48.35 \times (2490 + 1.93 \times 200) = 139054.6$$

#### 10.4.6.2 结构水脱水吸热 $Q'_w$

$$Q'_w = 6700 q'_{m,w} \text{ (kJ/h)}$$

其中:  $q'_{m,w}$ —入窑制品所含结构水的质量流量

6700—1 Kg 结构水脱水所需热量 (KJ/Kg);

$$Q'_w = 6700 q'_{m,w} = 96.81 \times 6700 = 648627 \text{ KJ/Kg}$$

#### 10.4.6.3 其余物化反应吸热 $Q_d$

$$Q_d = q_m^d \times 2100 \times w(\text{Al}_2\text{O}_3) \text{ (kJ/h)}$$

其中,  $q_m^d$ —入窑干制品质量流量 (Kg/h);  $q_m^d = 2253.8 \text{ Kg/h}$ ;

2100—1 Kg  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的反应热 (KJ/Kg);

$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  —陶瓷洁具结合剂中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量占总质量的质量分数;

$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 20.04\%$ ;

$$Q_d = q_m^d \times 2100 \times w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 2253.8 \times 2100 \times 20.04\% = 948489.19 \text{ (kJ/h)}$$

则物化反应总耗热为:

$$Q_7 = 139054.6 + 648627 + 948489.19 = 1736170.79 \text{ (kJ/h)}$$

#### 10.4.7 其他热损失 $Q_8$

一般取经验数据, 此项热支出占热收入的 5%—10%, 本次计算取 5%。

### 10.5 列热平衡方程式

由热平衡方程: 热收入=热支出, 有

$$Q_1 + Q_2 + Q_r + Q_a + Q'_a + Q_s = Q_3 + Q_4 + Q_g + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8$$

$$41437.8 + 23856.3 + 35991.6x + 321.542x + 1655.262x = 3269894.4 + 9017.55x +$$

$$1536832.08 + 407337.53 + 1736170.79 + 10\% Q_{\text{收}} + 5\% Q_{\text{收}}$$

$$\text{解得 } x = 296.48 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

即每小时需天然气  $B = 296.48 \text{ (Nm}^3/\text{h)}$ , 每小时烧成产品质量  $G = 2145.6 \text{ Kg/h}$

所以, 单位质量得产品热耗为:

$$B \cdot Q_{DW} / G = \frac{296.48 \times 35960}{2145.6} = 4968.97 \text{ (kJ/kg)}, \text{ 合 } 1188.75 \text{ Kcal/Kg}$$

## 10.6 预热带和烧带热平衡表

表 10-6 预热带和烧成带热平衡表

热 收 入			热 支 出		
项 目	(kJ/h)	(%)	项 目	(kJ/h)	(%)
坯体带入显热	41437.8	0.37	产品带走显热	3269894.4	28.88
燃料化学显热	10670789.57	94.43	烟气带走显热	2673523.22	23.61
助燃空气显热	95330.77	0.84	窑墙、窑顶带走显热	407337.53	3.7
棚板、立柱带 入显热	490752.08	4.33	物化反应耗热	1736170.79	15.33
			棚板、立柱带出显热	1536832.08	13.57
漏入空气及喷 入风带入显热	23856.3	0.03	窑车积、散热	1132216.65	10
			其它热损失	566108.33	5
总 计	11322166.52	100	总 计	11322163	100

分析：

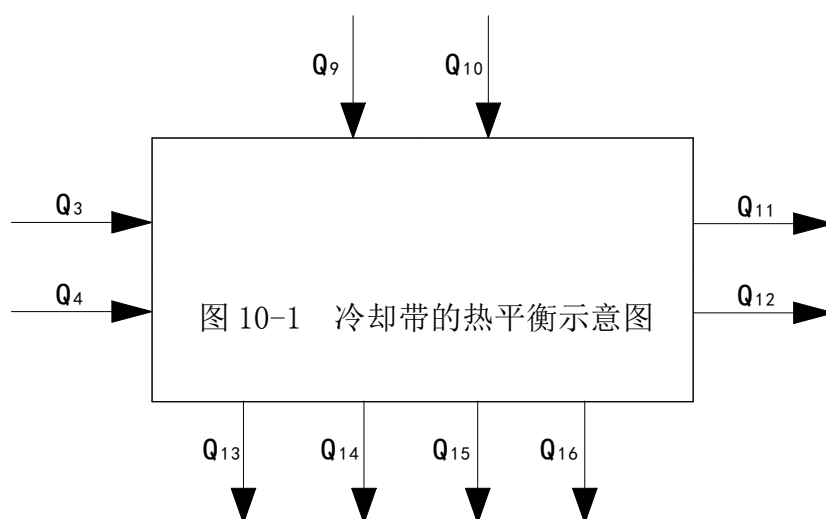
两者之间存在差值，是因为预热带窑内负压在该次计算中忽略了窑底漏入窑内风带来的热量，实际上虽然窑车上下压力控制手段非常完善，但仍有误差，由于误差很小所以整个预热带、烧成带热量可认为是收支平衡的。

# 11、冷却带的热平衡计算

## 11.1 确定热平衡计算的基准、范围

以 1 小时为计算基准，以  $0^{\circ}\text{C}$  作为基准温度。以冷却带为计算范围。

## 11.2 热平衡示意图



$Q_3$ —制品带入显热；

$Q_4$ —砌板、支柱等窑具带入显热；

$Q_9$ —窑车带入显热；

$Q_{10}$ —急冷风带入显热与冷却带末端送入冷却风带入显热；

$Q_{11}$ —制品带出显热；

$Q_{12}$ —砌板、支柱等窑具带出显热；

$Q_{13}$ —窑车蓄热、带出及散失之热；

$Q_{14}$ —窑墙、顶总散热；

$Q_{15}$ —抽走余热风带走热量；

$Q_{16}$ —其他热损失；

## 11.3 热收入项目

### 11.3.1 制品带入显热 $Q_3$

制品带入冷却带的显热等于预热带和烧成带制品带出显热, 所以

$$Q_3=3269894.4 \text{ (kJ/h)}$$

### 11.3.2 棚板、支柱等窑具带入显热 $Q_4$

此项热量即为预热带和烧成带棚板、支柱等窑具带出热, 所以  $Q_4=1536832.08$  (kJ/h)

### 11.3.3 窑车带入显热 $Q_9$

预热带和烧成带窑车散失之热约占窑车积热的 5%, 即 95%之积热进入了冷却带。

$$Q_9=0.95 \times Q_6=1736170.79 \times 0.95=1649363.4 \text{ (kJ/h)}$$

### 11.3.4 急冷风与窑尾风带入显热 $Q_{10}$

设窑尾风风量为  $V_x$ , 一般急冷风量为窑尾风量的 (1/2-1/4), 本设计取急冷风是窑尾风的 1/2, 则急冷风与窑尾风的总风量为:  $1.5V_x$ 。

空气的温度  $t_a=20^\circ\text{C}$ , 此时空气的平均比热  $Ca=1.296 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

$$\text{则: } Q_{10}=V_a \times Ca \times t_a=1.5V_x \times 1.296 \times 20=38.88V_x \text{ (kJ/h)}$$

## 11.4 热支出项目

### 11.4.1 制品带出显热 $Q_{11}$

出窑产品质量  $G_{11}=2145.6 \text{ kg}$

出窑产品温度  $t_{11}=80^\circ\text{C}$ , 产品比热  $C_{11}=0.896 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

$$Q_{11}=G_{11} \times C_{11} \times t_{11}=2145.6 \times 80 \times 0.896=153796.61 \text{ (kJ/h)}$$

### 11.4.2 棚板、支柱等窑具带出显热 $Q_{12}$

出窑棚板、立柱质量  $G_{12}=1234.8 \text{ kg/h}$

出窑棚板、立柱温度  $t_{12}=80^\circ\text{C}$ , 棚板、立柱比热  $C_{12}=0.861 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

$$Q_{12}=G_{12} \times C_{12} \times t_{12}=1234.8 \times 0.861 \times 80=85053.02 \text{ (kJ/h)}$$

### 11.4.3 窑车蓄热、带出及散失之热 $Q_{13}$

此项热量占窑车带入显热的 55%,

$$Q_{13}=0.55 \times Q_9=0.55 \times 1649363.4=907149.87 \text{ (kJ/h)}$$

#### 11.4.4 窑墙、顶总散热 $Q_{14}$

根据各处的材料,并考虑温度范围不能太大,将窑墙分两段计算其向外散热。

##### 11.4.4.1 1270—800℃段

该段长度为 14 米,窑外壁表面平均温度 40℃,窑内壁表面平均温度:  
(1270+800)/2=1035℃

##### 11.4.4.1.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石砖,  $\delta_1=230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1=0.0815+0.0002 \times 1035=0.289 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

轻质高铝砖,  $\delta_2=150 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2=0.341+0.000249 \times 1035=0.6 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3=150 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸钙硬板,  $\delta_4=20 \text{ mm}$ ,  $\lambda_4=0.07 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = \frac{1035 - 40}{\frac{0.23}{0.289} + \frac{0.15}{0.6} + \frac{0.15}{0.09} + \frac{0.02}{0.07}} = 331.86 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = 1.172 \times 14 = 16.41 \text{ m}^2$

则两侧窑墙散热量:  $Q''_1 = 2 \times 331.86 \times 16.41 \times 3.6 = 39209.92 \text{ (kJ/h)}$

##### 11.4.4.1.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石砖,  $\delta_1=230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1=0.0815+0.0002 \times 1035=0.289 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

含锆纤维毯,  $\delta_2=100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2=0.18 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3=100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3=0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1035 - 40}{\frac{0.23}{0.289} + \frac{0.1}{0.18} + \frac{0.1}{0.09}} = 404.06 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = (3.17 + 2 \times 0.43) \times 14 = 56.42 \text{ m}^2$



则窑顶散热量:  $Q''_2 = 404.06 \times 56.42 \times 3.6 = 82069.43$  (kJ/h)

所以, 1270—800℃段的窑体散热总量为:

$$Q''_3 = Q''_1 + Q''_2 = 39209.92 + 82069.43 = 85999.35 \text{ kJ/h}$$

#### 11.4.4.2 800—400℃段

该段长度为 18 米, 窑外壁表面平均温度 40℃, 窑内壁表面平均温度:  
(800+400) / 2 = 600℃

##### 11.4.4.2.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:

轻质高铝砖,  $\delta_1 = 230$  mm,  $\lambda_1 = 0.341 + 0.000249 \times 600 = 0.49$  w/ (m · °C);

轻质粘土砖,  $\delta_2 = 115$  mm,  $\lambda_2 = 0.291 + 0.00026 \times 600 = 0.447$  w/ (m · °C);

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3 = 50$  mm,  $\lambda_3 = 0.09$  w/ (m · °C);

硅酸钙硬板,  $\delta_4 = 20$  mm,  $\lambda_4 = 0.07$  w/ (m · °C);

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = \frac{600 - 40}{\frac{0.23}{0.49} + \frac{0.115}{0.447} + \frac{0.05}{0.09} + \frac{0.02}{0.07}} = 357.16 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = 1.072 \times 18 = 19.3 \text{ m}^2$

则两侧窑墙散热量:  $Q''_5 = 2 \times 357.16 \times 19.3 \times 3.6 = 13786.38$  (kJ/h)

##### 11.4.4.2.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石吊顶砖,  $\delta_1 = 230$  mm,  $\lambda_1 = 0.0815 + 0.0002 \times 600 = 0.2$  w/ (m · °C);

硅酸铝纤维毯,  $\delta_2 = 100$  mm,  $\lambda_2 = 0.09$  w/ (m · °C);

岩棉毯,  $\delta_3 = 100$  mm,  $\lambda_3 = 0.35$  w/ (m · °C);

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{600 - 40}{\frac{0.23}{0.2} + \frac{0.1}{0.09} + \frac{0.1}{0.35}} = 219.88 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = (3.17 + 2 \times 0.43) \times 18 = 72.54 \text{ m}^2$

则窑顶散热量:  $Q''_4 = 219.88 \times 72.54 \times 3.6 = 57420.34$  (kJ/h)

所以, 800—400℃段的窑体散热总量为:

$$Q''_6 = Q''_4 + Q''_5 = 13786.38 + 57420.34 = 71206.72 \text{ (kJ/h)}$$

#### 11.4.4.3 400—80℃段

该段长度为 18 米, 窑外壁表面平均温度 40℃, 窑内壁表面平均温度:

$$(400+80)/2=240^\circ\text{C}$$

##### 11.4.4.3.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:

轻质高铝砖,  $\delta_1 = 230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1 = 0.341 + 0.000249 \times 240 = 0.4 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

轻质粘土砖,  $\delta_2 = 115 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2 = 0.291 + 0.00026 \times 240 = 0.353 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_3 = 50 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3 = 0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸钙硬板,  $\delta_4 = 20 \text{ mm}$ ,  $\lambda_4 = 0.07 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = \frac{240 - 40}{\frac{0.23}{0.4} + \frac{0.115}{0.353} + \frac{0.05}{0.09} + \frac{0.02}{0.07}} = 114.81 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = 1.072 \times 18 = 19.3 \text{ m}^2$

则两侧窑墙散热量:  $Q''_7 = 2 \times 114.81 \times 19.3 \times 3.6 = 15953.63$  (kJ/h)

##### 11.4.4.3.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下:

JM26 莫来石吊顶砖,  $\delta_1 = 230 \text{ mm}$ ,  $\lambda_1 = 0.0815 + 0.0002 \times 240 = 0.13 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

硅酸铝纤维毯,  $\delta_2 = 100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_2 = 0.09 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

岩棉毯,  $\delta_3 = 100 \text{ mm}$ ,  $\lambda_3 = 0.35 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{240 - 40}{\frac{0.23}{0.13} + \frac{0.1}{0.09} + \frac{0.1}{0.35}} = 63.17 \text{ W/m}^2$$

散热面积:  $A = (3.17 + 2 \times 0.43) \times 18 = 72.54 \text{ m}^2$

则窑顶散热量:  $Q''_8 = 63.17 \times 72.54 \times 3.6 = 16496.48$  (kJ/h)

所以, 400—80℃段的窑体散热总量为:

$$Q''_9 = Q''_7 + Q''_8 = 15953.63 + 16496.48 = 32450.11 \text{ (kJ/h)}$$

综上所述, 冷却带窑体散失热量总和为:

$$Q_{14} = 85999.35 + 71206.72 + 32450.11 = 189656.19 \text{ (kJ/h)}$$

#### 11.4.5 抽走余热风带走热量 $Q_{15} = q_{15} \times C_a \times t_a$

$$Q_{15} = q_{15} \times C_a \times t_a$$

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

$T_{15}$ —抽走余热风的平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ); 取  $T_{15} = 250^{\circ}\text{C}$

$C_{15}$ —抽走余热风的平均比热 ( $\text{KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ );

查表,  $T_{15} = 250^{\circ}\text{C}$ 时, 热空气的平均比热为:  $C_{15} = 1.038 \text{ KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

$$\text{则: } Q_{15} = q_{15} \times C_{15} \times t_{15} = 1.5V_x \times 250 \times 1.038 = 389.25V_x \text{ (kJ/h)}$$

#### 11.4.6 其他热损失 $Q_{16}$

取经验数据, 占冷却带热收入的 5%—10%, 本次计算取 5%。

### 11.5 列热平衡方程式

列出热平衡方程式

热收入=热支出,

$$\text{即: } Q_3 + Q_4 + Q_9 + Q_{10} = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15} + Q_{16}$$

$$3269894.4 + 1536832.08 + 1649363.4 + 38.88x$$

$$= 153796.61 + 85053.02 + 907149.87 + 189656.19 + 389.25x + 5\% Q_{\text{收}}$$

$$\text{得: } V_x = 13617.48 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

因此得窑尾风量为  $13617.48 \text{ Nm}^3/\text{h}$

急冷风量为  $6808.74 \text{ Nm}^3/\text{h}$

则每小时应抽余热风为： $1.5 \times 13617.48 = 20426.22 \text{Nm}^3$

## 11.6 冷却带热平衡表

表 11-6 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	3269894.4	46.81	产品带出显热	153796.61	2.2
棚板、立柱带入显热	1536832.08	22	棚板、立柱带 出显热	85053.02	1.21
窑车带入显热	1649363.4	23.61	窑体散热	189656.19	2.71
急冷、窑尾风 带入显热	529447.62	7.58	窑车带走和向车 下散失显热	907149.87	13
			抽热风带走显热	5300604	75.88
			其它散热	349276.83	5
合 计	6985536.5	100	合 计	6985537.65	100

分析：

热平衡分析:从上面热平衡列表可以看出，热收入与热支出基本保持平衡，为了节能，提高热效率往往要充分利用，冷却带余热可以用它去干燥坯体。

## 12、管道尺寸、阻力计算及烧嘴、风机的选用

### 12.1 排烟系统的设计

#### 12.1.1 排烟量计算

排烟系统需排除烟气量:

$$V = [V_g + (\alpha_g - \alpha) L_0] \times \\ = [13.394 + (2.5 - 1.3) \times 9.513] \times 296.48 = 7355.55 \text{ m}^3/\text{h} = 2.04 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 12.1.2 排烟口及水平支烟道尺寸

共有 15 对排烟口, 则每个排烟口的烟气流量为:

$$q_v = 2.04/30 = 0.068 \text{ m}^3/\text{s}$$

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

$$A = 0.068/1.5 = 0.045 \text{ m}^2$$

排烟口取长 0.230m, 则宽为 0.25m, 考虑砖型, 取 4 层厚, 即 0.26m。

#### 12.1.3 垂直支烟道尺寸

烟气由排烟口至垂直支烟道流量不变, 流速相同, 所以截面积应相等。但考虑到砖的尺寸, 取截面尺寸为:  $0.23 \times 0.232 \text{ m}^2$ 。垂直深度应和窑墙 (车台面至窑顶) 高度一样, 为 1072mm。

其截面积为:  $0.23 \times 0.232 = 0.05336 \text{ m}^2$ 。

$$\text{其水力半径为: } R = \frac{4 \times 0.23 \times 0.232}{2 \times (0.23 + 0.232)} = 0.23 \text{ m}$$

窑墙以上部分用金属管道连接, 考虑到实际流量、砌筑方法、垂直烟道的当量直径等, 取垂直金属烟道直径为  $\Phi_1 = 200 \text{ mm}$ 。

此部分垂直金属烟道高度约为 1.072 米左右, 实际距离要以现场风机安装位置等实际情况为准。

#### 12.1.4 水平主烟道尺寸

水平主烟道长度 12 米, 直径  $\Phi_2 = 450 \text{ mm}$ 。

### 12.2 阻力计算

阻力计算应包括料垛阻力、位压阻力、摩擦阻力和烟囱阻力的计算之和。

### 12.2.1 料垛阻力 $h_1$

取经验数据，每米窑长料垛阻力为 1Pa，按理想情况假设，零压应在预热带和烧成带相接的位置，即第 18 节，最后一对排烟口在第 8 节，每节长 2 米，则：

$$h_1 = (18-8) \times 2 \times 1 = 20\text{Pa}$$

### 12.2.2 位压阻力 $h_2$

风机与烟囱设在窑外的车间地面上，烟气从排烟口到风机（烟囱底部），位置升高 1.0 米。取烟气平均温度为 200℃。

$$\begin{aligned} h_g &= -H(\rho_a - \rho_g) \cdot g \\ &= -1.0 \times [1.29 \times 273 / (273 + 20) - 1.3 \times 273 / (273 + 200)] \times 9.8 \\ &= -4.43\text{Pa} \end{aligned}$$

### 12.2.3 局部阻力 $h_3$

烟气从炉膛内进入排烟口，突然缩小，取  $\xi_1 = 0.5$ ； $v = 1.5\text{m/s}$

90° 转弯至垂直支烟道，取  $\xi_2 = 2$ ； $v = 1.5\text{m/s}$

垂直支烟道至分烟管截面突增，取  $\xi_3 = 0.70$ ； $v = 1.5\text{m/s}$

水平支烟道与水平主管道成 90°，取  $\xi_4 = 2$ ； $v = 1.5\text{m/s}$

水平主管 90° 转弯，取  $\xi_5 = 2$ ； $v = 5\text{m/s}$

再 45° 下降至风机接口，取  $\xi_6 = 0.5$ ； $v = 5\text{m/s}$

$$\begin{aligned} h_e &= \xi_{1-4} \frac{\omega_1^2}{2} \rho + \xi_{5-6} \frac{\omega_2^2}{2} \rho \\ &= (0.5 + 2 + 0.7 + 2) \times \frac{1.5^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273 + 200}{273} + (2 + 0.5) \times \frac{5^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273 + 200}{273} \\ &= 83.56\text{ Pa} \end{aligned}$$

### 12.2.4 摩擦阻力 $h_4$

对非圆形通道应求当量直径  $d$ ：

排烟口的直径和长度

$$d_1 = \frac{4 \times \text{通道截面积}}{\text{通道周边长}} = \frac{4 \times 0.23 \times 0.26}{2 \times (0.23 + 0.26)} = 0.244\text{m} ; l_1 = 0.28\text{m}$$

垂直支烟道当量直径和长度（砌筑部分）：

$$d_2 = \frac{4 \times 0.23 \times 0.232}{2 \times (0.23 + 0.232)} = 0.23 \text{ m}; \quad l_2 = 1.2 \text{ m};$$

垂直支烟道当量直径和长度（金属管道部分）：

$$d_3 = 4 \times \frac{0.2}{2} = 0.4 \text{ m}; \quad l_3 = 1.2 \text{ m};$$

水平支烟道当量直径和长度：

$$d_4 = 4 \times \frac{0.2}{2} = 0.4 \text{ m}; \quad l_4 = 0.5 \text{ m};$$

水平主烟道当量直径和长度：

$$d_5 = 4 \times \frac{0.45}{2} = 0.9 \text{ m}; \quad l_5 = 15 \text{ m};$$

摩擦阻力系数：金属管取  $\zeta_1 = 0.03$ ，砌筑管道取  $\zeta_2 = 0.05$ ，则有

$$\begin{aligned} h_4 &= \zeta_1 \left( \frac{l_1}{d_1} + \frac{l_2}{d_2} \right) \times \frac{w_1^2}{2} \times \rho + \zeta_2 \left( \frac{l_3}{d_3} + \frac{l_4}{d_4} + \frac{l_5}{d_5} \right) \times \frac{w_2^2}{2} \times \rho \\ &= 0.05 \times \left( \frac{0.28}{0.244} + \frac{1.2}{0.23} \right) \times \frac{1.5^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273+200}{273} + 0.03 \times \left( \frac{1}{0.4} + \frac{0.5}{0.4} + \frac{15}{0.9} \right) \times \frac{5^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273+200}{273} \\ &= 24 \text{ Pa} \end{aligned}$$

### 12.2.5 烟囱阻力 $h$

取烟囱高度为 10 米，标准状态下取烟气在烟囱内的流动速度为 6m/s，平均温度 160℃，烟囱排出烟气量为：

$$F = \frac{Vg}{3600\omega} = \frac{12078}{6 \times 3600} = 0.56 \text{ m}^2$$

因此，烟囱直径为：

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.56}{3.14}} = 0.84 \text{ m}, \quad \text{取直径为 } 900 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} h &= -H(\rho_a + \rho_g) + \xi \frac{\omega^2}{2} \rho \frac{H}{d} + \frac{\omega^2}{2} \rho \\ &= -10 \times (1.29 \times \frac{273}{273+20} - 1.3 \times \frac{273}{273+160}) + (0.03+1) \times \frac{6^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273}{273+160} \\ &= 11.37 \text{ Pa} \end{aligned}$$

由于烟囱较矮,烟气在烟囱中的流速比较大,烟囱本身的抽力尚不能克服烟囱本身的摩擦阻力及出口动压头的损失,因此烟囱本身也成为阻力作用。须用风机来克服阻力。

风机应克服的总阻力为:

$$h_x = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h = 24 - 4.43 + 83.56 + 20 + 11.37 = 134.5 \text{ Pa}$$

## 12.3 烧嘴选型

### 12.3.1 每个烧嘴所需的燃烧能力

由于全窑共有 110 个烧嘴,且每小时燃料的消耗量为  $296.48\text{m}^3$ ,考虑每个烧嘴的燃烧能力和烧嘴燃烧的稳定性,取安全系数 1.5,所以每个烧嘴的燃烧能力为:

$$296.48 \times 1.5 / 110 = 4.043 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

则每个烧嘴的热负荷为:

$$4.043 \times 35960 = 145383.01 \text{ kJ/h}$$

### 12.3.2 选用烧嘴应注意的原则

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

### 12.3.3 选用烧嘴

由于本设计的窑内宽达到 3170mm,为了保证断面温度的均匀与稳定,通过资料查询,选用广东施能燃烧设备有限公司生产的型号为 SIO-200 烧嘴,其主要参数为:火焰长度 1100mm-2400mm,出口速度为 80m/s,燃气压力 2000 Pa,助燃空气压力 4200Pa。

此烧嘴不需要专门的燃烧室,烧嘴砖直接砌筑在窑墙上即可。

## 12.4 风机选型

为保证正常工作,取安全系数为 1.3

所以选型应具备风压  $H$  为:



$$H = 1.30 \times h_x \times \frac{\rho_a}{\rho_g} = 1.3 \times 138.5 \times \frac{1.29 \times \frac{273}{273+20}}{1.3 \times \frac{273}{273+200}} = 288.46 \text{ Pa}$$

风量为:

$$Q = 1.3 \times V \times (273+200)/273 = 1.3 \times 7051.07 \times 473/273 = 15881.69 \text{ m}^3/\text{h}$$

查《风机选用手册》选引风机 Y8-39No5.6, 其参数见表 11-1。

## 12.5 其它系统管道尺寸的确定及风机选型

### 12.5.1 各管道尺寸的计算

#### 12.5.1.1 助燃风管的计算

$$\text{助燃风量 } V^1 = V_a \times x = 12.367 \times 296.48 = 3666.57 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\text{实际助燃风量 } V = 12.367 \times 296.48 \times (273+20)/273 = 3935.18 \text{ m}^3/\text{h} = 1.09 \text{ m}^3/\text{s}$$

取助燃风在总管中的流速为 6m/s

$$\text{助燃风总管内径: } d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.09}{3.14 \times 6}} = 0.48 \text{ m} \quad \text{取 } 500 \text{ mm}$$

$$\text{助燃风分管内径: } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.09}{3.14 \times 6 \times 2}} = 0.34 \text{ m} \quad \text{取 } 400 \text{ mm}$$

共有 110 个烧嘴, 取流速为  $w=6\text{m/s}$

$$\text{所以 } d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.09}{3.14 \times 6 \times 110}} = 0.046 \text{ m} \quad \text{取 } 50 \text{ mm}$$

#### 12.5.1.2 急冷风管的计算

该段冷风鼓入量一般为冷却带鼓入量的 1/3, 所以为  $6808.74 \text{ Nm}^3/\text{h}$

实际鼓风量为:

$$V'_1 = 6808.74 \times \frac{273+20}{273} = 7307.55 \text{ m}^3/\text{h} = 2.03 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{总管 } D_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.03}{3.14 \times 6}} = 0.7 \text{ m}, \quad \text{取 } 700 \text{ mm}$$

$$\text{分管 } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.03}{3.14 \times 6 \times 2}} = 0.46 \text{ m}, \quad \text{取 } 500 \text{ mm}$$

$$\text{支管 } d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.03}{3.14 \times 6 \times 110}} = 0.063 \text{ m}, \quad \text{取 } 80 \text{ mm}$$

### 12.5.1.3 急冷段抽热风管的计算

冷却带总抽风量：20426.22N m<sup>3</sup>/h，抽出温度为 250℃

$$\text{实际抽风量 } V'_2 = 20426.22 \times \frac{273 + 250}{273} = 39131.54 \text{ m}^3/\text{h} = 10.87 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{总管 } d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 10.87}{3.14 \times 6}} = 1.52 \text{ m}, \text{ 取 } 1600 \text{ mm}$$

$$\text{支管 (共有 8 个抽热风口) } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 10.87}{3.14 \times 6 \times 8}} = 0.54 \text{ m}, \text{ 取 } 600 \text{ mm}$$

### 12.5.1.4 封闭气幕管道尺寸的计算

封闭气幕总管直径取 100mm

### 12.5.1.5 窑尾鼓冷风管尺寸的计算

窑尾鼓冷风量为 18699.55Nm<sup>3</sup>/h

$$\text{实际鼓风量 } V'_1 = 18699.55 \times \frac{273 + 20}{273} = 20069.48 \text{ m}^3/\text{h} = 5.57 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{总管 } D_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 5.57}{3.14 \times 6}} = 1.09 \text{ m}, \text{ 取 } 1100 \text{ mm}$$

$$\text{分管 } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 5.57}{3.14 \times 6 \times 2}} = 0.77 \text{ m}, \text{ 取 } 770 \text{ mm}$$

$$\text{支管 } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 5.57}{3.14 \times 6 \times 24}} = 0.22 \text{ m}, \text{ 取 } 220 \text{ mm}$$

## 12.5.2 各窑段的风机选型

### 12.5.2.1 急冷段急冷风机的选用

为保证正常工作，取安全系数为 1.3，

风机鼓风量  $Q = 1.3 \times 6808.74 = 8851.36 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

比较各种风机性能后，采用 G6-43No6.3 型离心通风机。它是新型高效率中、低压离心通风机，具有效率高，节约电力，运转平稳，噪声低，结构完善，便于维修，拆装方便等优点。

### 12.5.2.2 窑尾风机的选用

为保证正常工作，取安全系数为 1.3，

风机鼓风量  $Q=1.3 \times 13617.48=17702.72\text{Nm}^3/\text{h}$

### 12.5.2.3 缓冷段抽热风量

缓冷不设风机。

### 12.5.2.4 助燃风机的选用

为保证正常工作，取安全系数为 1.3，

助燃风机需鼓入风量  $Q=1.3 \times 2307.25=2999.43\text{Nm}^3/\text{h}$

由于助燃风要求高压强制通风，且本设计助燃风不要求预热。.

### 12.5.2.5 车下风机

车下风为冷却窑车而用，每个车轮下设一小吹风口，风量不需要很大，这里以窑尾风量的一半计算，即： $Q=24309.42/2=12154.71\text{Nm}^3/\text{h}$ 。

### 12.5.2.6 轴流风机

为了更好的保证制品出窑温度低于  $80^\circ\text{C}$ ，在窑尾设置了 4 对环保低噪音轴流风机。其参数为：型号，T35；流量， $5951\text{m}^3/\text{h}$ ；功率，1.1KW；转速，2900r/min.

列出风机选型表：

表 11-1 风机型号表

用途	风机名称	机型	转速 r/min	全压 Pa	风量 $\text{m}^3/\text{h}$	电动机	
						型号	功率 /kW
排烟风机	锅炉引风机	Y8-39N <u>0</u> 5.6	2900	3971	12214	Y200L1-2	30
助燃风机	离心通风机	G6-43N <u>0</u> 6.3	1440	1797	3106	Y132S-4	5.5
快冷风机	离心通风机	G6-43N <u>0</u> 8.5	1470	3271	13034	Y160M-4	22
抽热风机	锅炉引风机	Y4-73N <u>0</u> 9D	1450	1644	25976	Y180L-4	22
急冷风机	离心通风机	G6-43N <u>0</u> 6.3	1440	1652	5896	Y132S-4	5.5
车下风机	离心通风机	G6-43N <u>0</u> 6.3	1440	1652	5896	Y132S-4	5.5

## 13、工程材料概算

### 13.1 窑体材料概算

#### 13.1.1 窑墙材料

##### 13.1.1.1 密度为 1.0 的轻质粘土砖用量为

$$(\text{该段窑长} \times \text{墙高} \times \text{该材料厚}) \times 2 = 72 \times 1.072 \times 0.115 \times 2 = 17.75 \text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 17.75 \times 1.0 = 17.75 \text{t}$$

##### 13.1.1.2 密度为 1.5 的轻质高铝砖用量为:

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

$$= 72 \times 1.072 \times 0.23 \times 2 + 44 \times 1.172 \times 0.15 \times 2 = 50.98 \text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 50.98 \times 1.5 = 76.46 \text{t}$$

##### 13.1.1.3 密度为 0.13 的硅酸铝纤维毯用量为:

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

$$= 72 \times 1.072 \times 0.05 \times 2 + 44 \times 1.172 \times 0.15 \times 2 = 23.19 \text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 23.19 \times 0.13 = 3.01 \text{t}$$

##### 13.1.1.4 密度为 0.25 的硅钙板用量为:

$$(\text{该段窑长} \times \text{墙高} \times \text{该材料厚}) \times 2 = 116 \times 1.072 \times 0.02 = 2.49 \text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 2.49 \times 0.25 = 0.62 \text{t}$$

##### 13.1.1.5 密度为 1.0 的 JM26 莫来石砖用量为:

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

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

#### 13.1.2 窑顶材料

##### 13.1.2.1 密度为 1.0 的 JM26 莫来石吊顶砖用量为:

$$\text{该段窑长} \times \text{顶宽} \times \text{该材料厚} = 116 \times 3.17 \times 0.23 = 84.58 \text{m}^3$$

$$\text{即质量为: } 84.58 \times 1.0 = 84.58 \text{t}$$

##### 13.1.2.2 密度为 0.13 的硅酸铝纤维毯用量为:

$$\text{该段窑长} \times \text{顶宽} \times \text{该材料厚} = 116 \times 3.17 \times 0.1 = 36.77 \text{m}^3$$

即质量为： $36.77 \times 0.13 = 4.78\text{t}$

#### 13.1.2.3 密度为 0.11 的岩棉毯用量为：

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

即质量为： $22.82 \times 0.11 = 2.51\text{t}$

#### 13.1.2.4 密度为 0.15 含锆纤维毯用量为：

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

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

#### 13.1.2.5 含锆散棉

用于填塞膨胀缝等其他缝、孔，窑墙的平均厚度为 0.35m，膨胀缝宽为 0.02m，高度为 1.072m，所以  $V = 0.35 \times 0.02 \times 1.072 \times 73 = 0.55\text{m}^3$

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

### 13.1.3 其他材料

热电偶（含瓷管）：20 套。

烧嘴 110 只。

烧嘴砖 110 块。

看火孔（含瓷管和看火孔盖）：110 套。

执行器 8 个。

电磁阀 1 个。

流量计 1 个。

补偿导线 500 米。

自动控制柜（显示仪表、电路已组装完成）1 套。

顶车机 1 套，含备用快（慢）进（退）。

柴油发电机 1 套。

本概算未包括窑炉、回车线、拖车到道基础。

## 13.2 钢材材料概算

由图纸中的详细计算，得出下列材料图表：

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

## 14、参考文献

- [1] 陈功备,《毕业设计任务书》,景德镇陶瓷学院科技艺术学院,2014
- [2] 胡国林、陈功备、周露亮,《陶瓷工业窑炉》,武汉理工大学出版社,2010
- [3] 刘振群,《陶瓷工业热工设备》,武汉理工大学出版社,1989。
- [4] 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
- [5] 孙晋涛,《硅酸盐工业热工基础》,武汉理工大学出版社,1992
- [6] 杨世铭,《传热学》,第二版,高等教育出版社,1987.10
- [7] 胡国林、陈功备,《窑炉砌筑与安装》,武汉理工大学出版社,2005
- [8] 韩昭沧.《燃料及燃烧》.冶金工业出版社,1984年6月
- [9] 续魁昌.《风机手册》.机械工业出版社,2004年7月