

景德镇陶瓷学院 科技艺术学院

毕业设计说明书

题目：年产 260 万平米玻化砖天然气辊道窑设计

专业：10 热能与动力工程

姓名：陈思林

学号：201030453123

目 录

1 前言

2 设计任务及原始资料

3 窑体主要尺寸的确定

3.1 窑内宽的确定

3.2 窑长及各带长度的确定

3.3 窑内高的确定

4 烧成制度的确定

5 工作系统的确定

5.1 排烟系统

5.2 燃烧系统

5.3 冷却系统

5.4 传动系统

5.5 窑体附属结构

5.5.1 事故处理孔

5.5.2 测温孔及观察孔

5.5.3 膨胀缝

5.5.4 挡板及挡墙

5.6 窑体加固钢架结构形式

6 燃料燃烧计算

6.1 空气量

6.2 烟气量

6.3 燃烧温度

7 窑体材料及厚度的确定: 列表表示全窑所用材料及厚度

8	热平衡计算	.....
8.1	预热带及烧成带热平衡计算	.....
8.1.1	热平衡计算基准及范围	.....
8.1.2	热平衡框图	.....
8.1.3	热收入项目	.....
8.1.4	热支出项目	.....
8.1.5	热平衡方程式	.....
8.1.6	预热带与烧成带热平衡表	.....
8.2	冷却带热平衡计算	.....
8.2.1	热平衡计算基准及范围	.....
8.2.2	热平衡框图	.....
8.2.3	热收入项目	.....
8.2.4	热支出项目	.....
8.2.5	热平衡方程	.....
8.2.6	冷却带热平衡表	.....
9	烧嘴的选用	.....
9.1	每个烧嘴所需的油(气)压	.....
9.2	烧嘴的选用	.....
10	参考文献	.....

1. 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，在釉面砖、墙地砖、彩釉砖等建筑陶瓷工业生产中已普遍用作主要的烧成设备，近几年正逐步在日用瓷等陶瓷工业中得到应用。

与隧道窑相比，辊道窑用连续多排辊子代替窑车输送制品，取消了窑车，取消了砂封，避免车下窑外冷空气漏入隧道，使窑内同一截面上下温度均匀，大大缩短烧成时间，为优质高产低热耗创造了条件。辊道窑的设计计算包括：窑体主要尺寸计算，燃料燃烧计算、热平衡计算、通风阻力计算等，使用发生炉煤气烧窑，可减少环境污染。

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

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

全窑利用余热干燥生坯，热效率高，温度控制准确、稳定，传动用齿轮传动，摩擦式联结辊筒，传动平衡、稳定，维护方便，无级调节，控制灵活。通过对其窑炉结构和控制的了解，借鉴其经验数据，结合中试窑的情况，我所设计的辊道窑总长 239 米，内宽 2.5 米，烧成温度是 1250 摄氏度，燃料采用天然气。

为了更好的掌握辊道窑的结构和窑炉设计的程序，我对老师给定的设计任务进行了为期三周的设计计算，并绘制窑体视图。

2. 设计任务及原始资料

一、设计任务

年产 260 万平米玻化砖天然气辊道窑设计；

二、原始数据

（一）玻化砖

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
68.35	16.27	2.30	2.65	0.85	2.20	2.15	4.85

表 2—1：坯料组成（%）

2. 产品规格：600×600×11mm

3. 入窑水分：<1%

4. 产品合格率：95%

5. 烧成周期：55 分钟（全氧化气氛）

6. 最高烧成温度：1180℃（温度曲线自定）

（二）燃料

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	41.58

表 2—2：燃料组成

（三）年工作日：300 天

3.窑体主要尺寸的确定

3.1 窑内宽的确定

产品的尺寸为 $600\times 600\times 11\text{mm}$ ，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： $667\times 667\text{mm}$

两侧坯体与窑墙之间的距离取150mm，设内宽 $B=2.3\text{m}$ ，计算宽度方向坯体排列的块数为： $n=(2300-150\times 2)/667=2.99$ ，确定并排3块。

最后，确定窑内宽 $B=667\times 3+150\times 2=2301\text{mm}$ ，取2500mm。

3.2 窑长及各带长度的确定

3.2.1 窑体长度的确定

窑容量=（年产量 \times 烧成周期） \div [年工作日 $\times 24\times 60\times$ 产品合格率 \times （1-收缩率）]

$$=(2600000\times 55)\div (300\times 24\times 60\times 95\%\times 0.9)$$

$$=387.2(\text{m}^3/\text{窑})$$

装窑密度=每米排数 \times 每排片数 \times 每片砖面积

$$=(1000\div 667)\times 3\times (0.6\times 0.6)$$

$$=1.62(\text{m}^2/\text{每米窑长})$$

窑长=窑炉每小时进入生坯 \div 装窑密度

$$=387.2\div 1.62$$

$$=239(\text{m})$$

利用装配式，由若干节联接而成，设计每节长度为2100mm，节间联接长度为8mm 总长度为2108mm，窑的节数 $=239\div 2.108=113.4$ 节，取整为114节。

所以算出窑长为 $L=114\times 2108-8=240304\text{mm}=240.3\text{m}$

3.2.2 窑体各带长度的确定

预热带:取 35 节，长度 $=22\times 2100=46200\text{mm}$ ；

烧成带:取 52 节，长度 $=52\times 2100=109200\text{mm}$ ；

冷却带:取 27 节，长度 $=27\times 2100=56700\text{mm}$ 。

3.3 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。

辊上高应大于制品高度，考虑到玻化砖的高度小，又是单层焙烧，只要保证气流顺畅即可。

从理论上来说对焙烧建筑瓷砖的辊道窑辊下高最好应大于砖对角线长度,但由于该制品较大,若按此计算会造成内高太大,既增大了窑墙散热,又不利于窑内传热。由于制品从辊上掉下,一般都发生了破损,尺寸都比整砖小了,故据各地辊道窑实际状况来看取辊下高400mm。

表 1-1 窑内高度表

	1-15 节	16-26 节	27-51 节
辊上高 (mm)	532	532	591
辊下高 (mm)	456	456	455
内总高 (mm)	988	988	1046

4. 烧成制度的确定

(1) 温度制度

①烧成周期: 55min

②各带划分

表 4-1 各段温度的划分、升温速率与窑节数分布

名称	温度 (/°C)	时间 (/min)	升温速率 (/°C • min ⁻¹)	节数 (/节)
排烟带	室温~250	7	38.33	1~15
预热带	250~900	14	50	16~22
烧成带	900~1250	9	36.25	23~54
烧成带 (保温)	1250	4	0	55~74
急冷带	1250~700	6	-98	75~83
缓冷带	700~500	7.5	-30.77	84~100
快冷带	500~80	7.5	-64.62	101~114
累计		55		114

(2) 气氛制度: 全窑氧化气氛

(3) 烧成温度曲线大致如下：

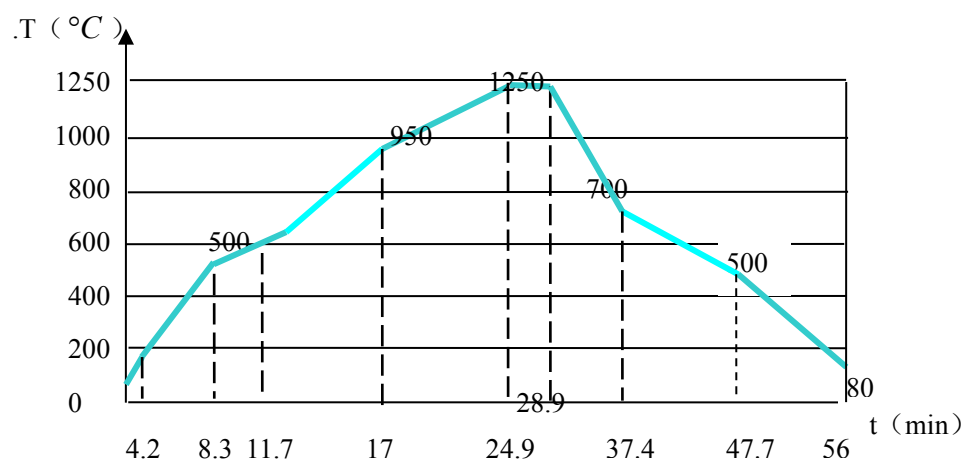


图 4—2：烧成温度曲线

五. 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。

5.1 排烟系统

由于本设计的辊道窑较长，总长为 240.3 米，因此共设了七处排烟，分别设在窑前第一节、第二节、第四节、第六节、第九节、第十一节和第十四节。每节排烟口的设置为在窑顶和窑底分别设有四个 $\phi 300$ 的排烟支管，第一、二节的排烟支管伸入窑内且开口向着烟气的流动方向；烟气从各排烟口进入排烟支管，然后通过每节的排烟支管进入上下排烟分管进，最后通过 $\phi 1000$ 的总排烟管由排烟机排出室外。

5.2 燃烧系统

5.2.1 烧嘴的设置

选用的燃料是天然气，为均匀窑温强化窑内对流换热和利于烧成带温度的调节，本设计选用烧嘴芯为材料的烧嘴，保证燃烧充分。并从 23 节到 34 节开始布置烧嘴，每节辊下布置两对烧嘴，从 35 节开始到烧成带 74 节结束，辊上辊下分别设置两对烧嘴，并在辊上辊下每个烧嘴的对侧窑墙上设置一个观火孔。

5.2.2 天然气、助燃空气输送装置

气烧辊道窑的天然气总管一般设置在窑顶上方，天然气由总管经过支管流向烧嘴，助燃空气总管经过两支支管分别从 40 节、57 节流入，先通过钢架结构的空心管再由软管通向烧嘴。

5.3 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，余热风可供干燥或作助燃风用，达到节能目的。

5.3.1 急冷带通风系统

从烧成最高温度至 700°C 以前，制品中由于液相的存在而具有塑性，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直接风冷是在辊上下设置横穿窑断面的冷风喷管。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，达到急冷效果。由于急冷段温度高，横穿入窑的冷风管须用耐热钢制成，管径为 $40\sim 100\text{mm}$ 。

本设计也采用此种结构，用 9 节窑长进行急冷，每节辊上下分布 8 对 $\phi 75$ 急冷风管（急冷的前半节不设置急冷风管），交错排列横穿过窑内，窑内部分的管子开圆孔若干。

5.3.2 抽热风口的设置

制品冷却到 $700\sim 400^{\circ}\text{C}$ 范围时，是产生冷裂的危险区，应严格控制该段冷却降温速率。为达到缓冷目的，一般采用热风冷却制品的办法。大多数辊道窑在该段设有 $3\sim 8$ 处抽热风口，使从急冷段与窑尾快冷段过来的热风流经制品，让制品慢速均匀地冷却。

本设计一方面采用抽急冷带过来的热风的方法来调节温度，另一方面，由缓冷风机从窑外抽空气通过缓冷风管，来缓和降温速率。风罩抽走这一带的空气。并且从 85 节开始到 99 节中每节设置一对间壁管和 6 对支管。

5.3.3 快冷通风系统

在终冷带第一区，配置支管小孔直接冷却系统，在辊面上、下室内空气并在窑内形成空气回路来冷却，由与高压小流量冷却形成，所以冷却后的热空气温度比较高，可回收做余热利用。在终冷二区，用低压大流量轴流风机强制冷却，将砖坯温度进一步降低，一般直接排入大气。

5.4 传动系统的选择

5.4.1 传动系统的选择

该窑传动采用传统的 45 度斜齿传动，齿轮常浸于油槽中，使传动系统处于良好的润滑状态中，从而最大限度地保证传动的平衡性。在烧成带采用差速齿轮传动方案，有效地减少辊棒高温蠕变倾向，增强辊棒的自净能力。传动电机采用摆线针轮电机 40 台，全窑传动电机用十三台变频器来进行独立调速，使该窑炉能够最大限度地适应不同产品，烧成周期具有很大的调节范围。

5.4.2 辊子材质的选择

辊道窑对辊子材质要求十分严格，它要求制辊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，支污能力强，本设计选用陶瓷棍棒。

5.4.3 辊子直径的确定

辊子的直径大，则强度大，但直径过大，会影响窑内辐射换热和对流换热。对于用托辊磨擦式联接的辊子来说，辊子的直径大些，有阻于增加辊子之间的摩擦力。因此，辊子的直径可根据制品的重量和辊子的联接方式来决定。如制品较重或辊子的联接方式是托辊摩擦式，辊子应选择直径大一些的，故选用直径为 60mm 的辊棒。

5.4.4 辊距的确定

模数为 2100 的部分每节布置 28 根的辊子，其它的每节布置 26 根的辊子。

低温区：2100/28=75

高温区：2100/26=80.77

所以低温区的辊距为 75mm, 高温区的辊距为 80.77mm.

辊子的总数为 $N=51 \times 28 + 68 \times 26 = 3196$ 根

5.4.5 辊子的转速的选择

$$n = KL / \pi \cdot d \cdot t$$

L---窑长，mm

t--- 烧成周期 min

d--- 辊子直径 mm

K 取 1.05

那么, $n = (249900 \times 1.05) / (3.14 \times 60 \times 48) = 29 \text{ r/min}$

辊道窑采取分段传动时, 各段速度略有不同, 为防止制品在运行过程时起擦、垒砖, 自窑头向窑尾方向各段转速依次加快, 但由于各段间转速差别不大 (后一段仅比前一段快 0.05 r/min 左右), 在传动设计时通常采用变频电机或变频调速器。因此, 进行传动比计算是, 辊子转速取其平均值

5.4.6 传动过程

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

5.5 窑体附属结构

5.5.1 事故处理孔

事故处理孔设在辊下, 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坏碎片。高箱事故处理孔和低箱事故处理孔尺寸: $400 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 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、冷风漏入等对烧成制度产生影响。

5.5.2 膨胀缝

窑体受热膨胀产生很大的热应力, 为避免窑体开裂、挤坏, 必须重视窑体的膨胀缝的留设, 孔砖间也应留设。窑体膨胀缝应在窑体的每一节的中间, 保证节间气密性, 所以本设计的窑体膨胀缝 (10 mm) 设置在每节的中部。

5.5.3 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, 一般在窑道顶及火道侧墙留设测温孔及安装热电偶。一般高温成瓷区每节设一对, 辊上设在窑顶, 辊下设在窑侧墙; 两侧墙的侧温孔交错布置。除高温区外一般是按烧嘴控制区 2-3 节设置一对侧温孔, 并且设在烧嘴对侧窑墙上。本设计在 1~22 节每两节的奇数节于窑顶布置, 23—74 节每两节偶数节在窑顶、窑侧墙布置, 急冷段奇数节窑顶布置, 缓冷段每隔四节在窑顶布置。选用 48 套 PID 温控仪表, 72 套热电偶, 其中 S 偶 40 支, K 偶 32 支, 窑炉的各执行机构通过工业 PLC 集中控制, 传动速度由变频器调控。窑炉的进砖或出砖情况通过专门设置的摄像机和监视器来监控。排烟、助燃风机设报警开关, 通过压力开关与窑炉的燃烧系统进行联锁。

这样, 在烧成曲线的关键点, 如氧化末段、晶型转化点、釉始熔点、成瓷段、急冷结束等都有留设。

5.5.4 挡火板和挡火墙的设置

由于辊道窑是中空窑, 工作通道空间大, 气流阻力小, 为便于调节窑内压力制度和温度制度, 在预热带和烧成带 (22 和 23 节之间), 烧成带和急冷带之间 (74 和 75 节之间) 设置

挡板和挡火墙。烧成带下枪区和烧成带上下升温区(34 和 35 节之间), 烧成带上下升温区和烧成带上下保温区(54 和 55 节之间), 急冷二区和缓冷带之间(83 和 84 节之间), 缓冷带和快冷带之间(100 和 101 节之间) 设挡火墙, 上方采用耐火纤维板吊挂, 下方用高铝砖砌筑, 上挡板还以上、下调节以控制各段温度。

5.5.5 测压孔

压力制度中零压面的位置控制特重要, 一般控制在预热带和烧成带的交界面附近。若零压过多移向预热带, 则烧成带正压过大。有大量热气体逸出窑外, 不但损失热量, 而且恶化操作条件; 若零压过少移向烧成带, 则预热带负压大, 易漏入大量冷风, 造成气体分层, 上下温差过大, 延长了烧成周期, 消耗了燃料。故本设计在第 17、26、34 节每节的窑侧墙观察孔位置布置了测压孔。

5.5.6 观察孔

在每个烧嘴的对侧窑墙设置了 $\phi 70$ 的观察孔, 并在急冷区也布置了 7 对 $\phi 70$ 的观火孔, 在缓冷区 84 节到 86 节也设置了 5 对 $\phi 50$ 观火孔, 以便及时观察窑内情况。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。

5.6 钢架结构

主要以矩型方管为主而构成, 规格为: 100×50 、 70×50 、 60×40 、 50×30

6 燃料燃烧计算

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 $Q_d = 35960 \text{ kJ/Nm}^3$

用表 6.4 中经验公式计算理论空气量:

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

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

按表 6.4 中经验公式计算实际烟气量为:

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

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 $c_a = 1.3 \text{ kJ/ (Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

天然气比热为 $c_r = 1.69 \text{ kJ/ (Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$, $t_a = t_r = 20^\circ\text{C}$

现设 $t_{th} = 1700^\circ\text{C}$, 燃烧产物温度 $c_g = 1.603 \text{ kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 。则理论燃烧温度为:

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

$$t_{th} = \frac{35960 + 1.69 \times 20 + 1.3 \times 20 \times 12.367}{13.394 \times 1.603} = 1691^\circ\text{C}$$

$(1700 - 1691) / 1700 < 5\%$, 所设温度合理。

取高温系数为 0.75, 则实际温度为:

$t = 0.75 \times 1700 = 1275^\circ\text{C}$, 比最高烧成温度 1170 高出 105 $^\circ\text{C}$, 符合烧成要求, 认为合理。

7 窑体材料的确定

窑体材料及厚度的确定：列表表示全窑所用材料及厚度

表 4-1 窑体材料和厚度表（1）

1-15、27-51 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	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150
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	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	190
窑底	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310+0.176\times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14\times 10^{-3}t$	130
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	100

表 4-2 窑体材料和厚度表（3）

16-26 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	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150
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	混合纤维	1350	0.12	120
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
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	100

8. 热平衡计算

热平衡计算包括预热带、烧成带热平衡计算和冷却带热平衡计算。

在第1~4节热源为烟气余热，即利用烟气带走显热，所以1~4节不列入热平衡计算中，但是在计算时，应以第4节坯体计算配体带入显热，以第5节烟气温度的值计算烟气带走显热。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。

8.1 预热带及烧成带热平衡计算

8.1.1 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。

8.1.2 热平衡框图

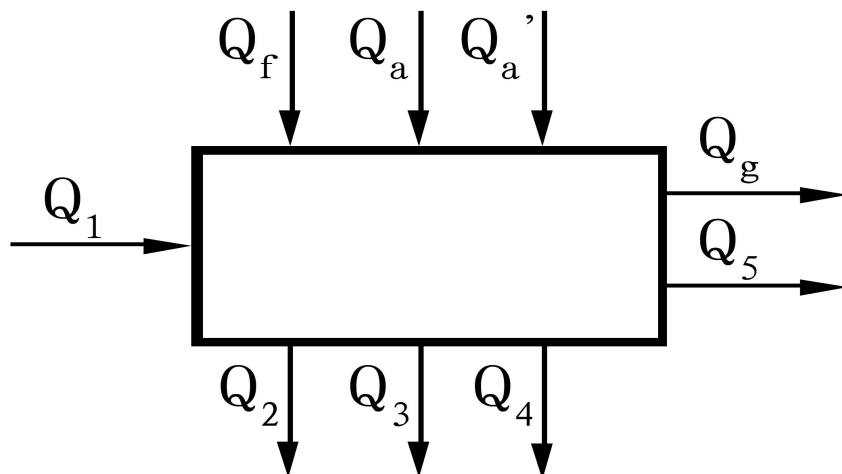


图 预热带和烧成带热平衡示意图

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

8.1.3 热收入项目

第 1-6 节热源为烟气余热，即利用烟气带走显热，所以 1-6 节不列入热平衡计算中，但是计算时，应以第 6 节计算坯体带入显热，以第 7 节烟气温度值计算烟气带走显热。

8.1.3.1 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。

取烧成灼减量 4%，瓷砖单重 3.2 公斤

$$\text{入窑干制品质量 } G_r = \frac{1300000}{330 * 24 * 97\% * 96\%} \times \frac{3.2}{0.6 * 0.6} = 1566.83 \text{ (kg/h)}$$

入窑制品含自由水 1.1%

$$\text{入窑胚体质量 } G_1 = \frac{1566.83}{1 - 1.1\%} = 1584.26 \text{ (kg/h)}$$

制品入窑时的温度为 20°C，取入窑制品比热为: 0.86J/(kg · °C)

则胚体带入显热为: $Q_1 = G_1 c_1 t_1 = 1584.26 \times 0.86 \times 20 = 27249.27 \text{ (KJ/h)}$

8.1.3.2 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 $c_f = 1.38 \text{ KJ/ (Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

设天然气消耗量为 $X \text{ Nm}^3/\text{h}$

$$Q_f = X(Q_{net} + c_f t_f) = X(35960 + 1.38 \times 20) = 35987.6X \text{ (KJ/h)}$$

8.1.3.3 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 $V_a=12.367X$ (Nm³/h)

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

8.1.3.4 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 $c_a=1.30\text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ $\alpha=1.15$

漏入空气总量： $V_a=X(\alpha_g-\alpha)V_a^0=X(2.0-1.15) \times 6.571=5.585X$ (m³/h)

所以 $Q'_a=V_a c_a t_a=5.585X \times 1.3 \times 20=145.21X$ (KJ/h)

8.1.4 热支出项目

8.1.4.1 产品带出显热 Q_2 (KJ/h)

烧成产品质量 $G_3=1566.83$ (g/h)

制品出烧成带产品温度 $t_2=1170^{\circ}\text{C}$ ，表可知:产品平均比热为:1.14

所以 $Q_2=G_3 c_2 t_2=1566.83 \times 1170 \times 1.14=2089837.854$ (KJ/h)

8.1.4.2体散热损失 Q_3

将计算分为2部分,即第8~15节: 500~950^oC,取平均值725^oC；第16~26节: 950~1170^oC取平均值为1060^oC。

i 第8~15节:窑外壁表面平均温度 40^oC，窑内壁平均温度 725^oC

a. 窑顶

窑 顶	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600 ^o C	0.310+0.176×10 ⁻³ t	230
	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150

$t_1=725^{\circ}\text{C}$ $t_a=40^{\circ}\text{C}$

设 $t_2=445^{\circ}\text{C}$, $t_3=76^{\circ}\text{C}$

$\lambda_1=0.31+0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176 \times 10^{-3} (725+445) / 2=0.413\text{ W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$$a = 2.56(t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3 - t_a}$$

$$a = 2.56(76 - 40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+76}{100})^4 - (\frac{273+40}{100})^4]}{76 - 40} = 12.88 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23\text{m}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\delta_2 = 0.15\text{m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{725 - 40}{\frac{0.23}{0.413} + \frac{0.15}{0.2} + \frac{1}{12.88}} = 495 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 725 - \frac{0.23}{0.413} \times 495 = 449^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{449 - 445}{445} \times 100\% = 1\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 725 - \left(\frac{0.23}{0.413} + \frac{0.15}{0.2} \right) \times 495 = 78$$

$$\varepsilon = \frac{78 - 76}{76} \times 100\% = 2.63\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = \frac{2.73 + 3.55}{2} \times 2.21 \times 8 = 55.515\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q^{\text{顶}} = qA^{\text{顶}} = 495 \times 55.515 \times 3.6 = 98927\text{kJ/h}$$

b. 窑墙

窑	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	0.310+0.176×10 ⁻³ t	230
墙	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	190

$$t_1 = 725^\circ\text{C} \quad t_a = 40^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2 = 485^\circ\text{C} \quad , \quad t_3 = 73^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1 + t_2}{2} = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} (725 + 485) / 2 = 0.416 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$a = 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 [(\frac{273 + t_3}{100})^4 - (\frac{273 + t_a}{100})^4]}{t_3 - t_a}$$

$$= 2.56 (73 - 40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 [(\frac{273 + 73}{100})^4 - (\frac{273 + 40}{100})^4]}{73 - 40} = 12.65 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\delta_2 = 0.19 \text{ m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{725 - 40}{\frac{0.23}{0.416} + \frac{0.19}{0.2} + \frac{1}{12.65}} = 433 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 725 - \frac{0.23}{0.416} \times 433 = 486^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{486 - 485}{485} \times 100\% = 0.62\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 725 - \left(\frac{0.23}{0.416} + \frac{0.19}{0.2} \right) \times 433 = 74^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{74 - 73}{73} \times 100\% = 1.4\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑墙散热面积:

$$A_{\text{墙}} = \frac{0.68 + 1.42}{2} \times 2.21 \times 8 = 18.565 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}} = 2qA_{\text{墙}} = 2 \times 433 \times 18.565 \times 3.6 = 57878 \text{ (kJ/h)}$$

C. 窑底

窑	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600°C	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$	230
---	-----	----------	--------	----------------------------------	-----

底	隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14 \times 10^{-3} t$	130
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	100

$$t_1=725^{\circ}\text{C} \quad t_a=40^{\circ}\text{C}$$

$$\text{设 } t_2=470^{\circ}\text{C} \quad t_3=74^{\circ}\text{C},$$

$$\lambda_1=0.31+0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176 \times 10^{-3} (725+470) / 2=0.415 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$a=2.56 (t_3-t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3-t_a}$$

$$=2.56 (73-40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+74}{100})^4 - (\frac{273+40}{100})^4]}{74-40}=12.73 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$\delta_1=0.23\text{m}$$

$$\delta_2=0.13\text{m}$$

$$\lambda_2=0.063+0.14 \times 10^{-3} \frac{t_1+t_2}{2}=0.063+0.14 \times 10^{-3} (725+470) / 2=0.147 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

热流密度:

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{725-40}{\frac{0.23}{0.415} + \frac{0.13}{0.147} + \frac{1}{12.73}}=451 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2=t_1-\frac{\delta_1}{\lambda_1} q=725-\frac{0.23}{0.415} \times 451=475^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{475-470}{470} \times 100\%=1.1\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 725 - \left(\frac{0.23}{0.415} + \frac{0.13}{0.147} \right) \times 451 = 75^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{75 - 74}{74} \times 100\% = 1.35\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$\text{窑底散热面积: } A_{\text{底}} = 111.03 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{底}} = q A_{\text{底}} = 451 \times 111.03 \times 3.6 = 180244 \text{ (kJ/h)}$$

ii 第 16-26 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 1060°C

d. 窑顶

窑	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600°C	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3}t$	0.23
顶	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150

$$t_1 = 1060^\circ\text{C} \quad t_a = 80^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2 = 380^\circ\text{C}, \quad t_3 = 124^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1 + t_2}{2} = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} (1060 + 380) / 2 = 0.463 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$a = 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + t_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_a}{100} \right)^4 \right]}{t_3 - t_a}$$

$$a = 2.56 (124 - 80)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + 124}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 80}{100} \right)^4 \right]}{124 - 80} = 16.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_2 = 0.15 \text{ m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{1065 - 80}{\frac{0.23}{0.463} + \frac{0.15}{0.12} + \frac{1}{16.2}} = 753 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 1065 - \frac{0.23}{0.463} \times 753 = 691^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{491 - 680}{680} \times 100\% = 1.62\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 1065 - \left(\frac{0.23}{0.463} + \frac{0.15}{0.2} \right) \times 753 = 126^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{126 - 124}{124} \times 100\% = 1.6\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = \frac{2.73 + 3.43}{2} \times 2.21 \times 14 = 95.3 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{顶}} = q A_{\text{顶}} = 753 \times 95.3 \times 3.6 = 258383 \text{ (kJ/h)}$$

e. 窑墙

窑	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	0.310+0.176×10 ⁻³ t	0.23
墙	隔热层	混合纤维	1350	0.12	120

$$t_1 = 1060^\circ\text{C} \quad t_a = 80^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2 = 580^\circ\text{C}, \quad t_3 = 133^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1 + t_2}{2} = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} (1060 + 580) / 2 = 0.454 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$a = 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + t_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_a}{100} \right)^4 \right]}{t_3 - t_a}$$

$$= 2.56 (133 - 80)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + 133}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 80}{100} \right)^4 \right]}{133 - 80} = 16.88 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 0.25 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_2=0.12\text{m}$$

$$\text{热流密度: } q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{1}{a}}=\frac{1060-80}{\frac{0.23}{0.454}+\frac{0.12}{0.25}+\frac{1}{16.88}}=943\text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2=t_1-\frac{\delta_1}{\lambda_1}q=1060-\frac{0.23}{0.454}\times 943=588^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{588-580}{580}\times 100\%=1.38\%<5\% \text{ 允许}$$

$$t_3=t_1-(\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2})q=1060-(\frac{0.23}{0.455}+\frac{0.12}{0.25})\times 943=136^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{136-133}{133}\times 100\%=2.26\%<5\% \text{ 允许}$$

窑墙散热面积:

$$A_{\text{墙}}=\frac{0.82+1.42}{2}\times 2.21\times 14=34.65\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}}=2qA_{\text{墙}}=2\times 943\times 34.65\times 3.6=235156\text{ (kJ/h)}$$

f. 窑底

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
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	100

$$t_1=1060^{\circ}\text{C} \quad t_a=80^{\circ}\text{C}$$

$$\text{设 } t_2=890^{\circ}\text{C} \quad , \quad t_3=380^{\circ}\text{C} \quad t_4=95^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_1=0.31+0.176\times 10^{-3}\frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176\times 10^{-3}(1060+890)/2=0.473\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$a = 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 [(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3 - t_a}$$

$$= 2.56 (380 - 80)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 [(\frac{273+380}{100})^4 - (\frac{273+80}{100})^4]}{380 - 80} = 35.82 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.13 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \frac{t_2 + t_3}{2} = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \frac{890 + 380}{2} = 0.15 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_2 = 0.13 \text{ m}$$

$$\lambda_3 = 0.2 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_3 = 0.1 \text{ m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{a}} = \frac{1060 - 80}{\frac{0.13}{0.473} + \frac{0.13}{0.15} + \frac{0.1}{0.2} + \frac{1}{35.82}} = 594 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3 、 t_4

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 1060 - \frac{0.13}{0.473} \times 594 = 902^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{902 - 890}{890} \times 100\% = 1.35\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 1060 - \left(\frac{0.13}{0.473} + \frac{0.13}{0.15} \right) \times 594 = 394^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{394 - 380}{380} \times 100\% = 3.68\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_4 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) q = 1060 - \left(\frac{0.13}{0.473} + \frac{0.13}{0.15} + \frac{0.1}{0.2} \right) \times 594 = 97^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{97 - 95}{95} \times 100\% = 2.1\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑底散热面积:

$$A_{\text{底}}=95.3 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{底}} = qA_{\text{底}} = 894 \times 95.3 \times 3.6 = 203766 \text{ (kJ/h)}$$

所以窑体总散热量为:

$$\begin{aligned} Q_3 &= 197744 + 115806 + 180244 + 258383 + 235156 + 203766 \\ &= 1007709 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

8.1.4.3物化反应耗热 Q_4 (kJ/h)

i 自由水蒸发吸热 Q_w

$$\text{自由水质量 } G_w = G_1 - G_r = 1584.26 - 1566.83 = 17.43 \text{ (kg/h)}$$

$$\text{烟气离窑温度 } t_g = 500^\circ\text{C}$$

$$\text{所以 } Q_w = G_w (2490 + 1.93 t_g) = 17.43 \times (2490 + 1.93 \times 500) = 60220.65 \text{ (kJ/h)}$$

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

入窑干制品质量 $G_r = 1566.83$ (kg/h), Al_2O_3 含量 = 16.34%

$$\begin{aligned} Q_r &= G_r \times 2100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \% \\ &= 1566.83 \times 2100 \times 16.34\% = 537642 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

总的物化反应耗热:

$$Q_4 = Q_w + Q_r = 60220.65 + 537642 = 597862.65 \text{ (kJ/h)}$$

8.1.4.4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:

$$V_g = [V_{g0} + (\alpha_g - \alpha) L_o] X = [13.394 + (2.0 - 1.3) 12.367] X = 22.051X$$

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

$$Q_g = V_g t_g c_g = 22.051X \times 200 \times 1.455 = 6416.8X$$

8.1.4.5其它热损失 Q_5 (kJ/h)

根据经验占热收入的5%

$$\begin{aligned} Q_5 &= (Q_1 + Q_f + Q_a + Q'_a) \times 0.05 \\ &= (27249.27 + 35987.6X + 321.5X + 145.21X) \times 0.05 = 1362.46 + 1822.72X \end{aligned}$$

8.1.5 列出热平衡方程式

由热收入=热支出得:

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

$$\text{左边} = 27249.27 + 35987.6X + 321.5X + 145.21X$$

$$\text{右边} = 2089837.854 + 1007709 + 597862.65 + 1362.46 + 1822.72X + 6416.8X$$

计算得出 $x=12.14\text{ (Nm}^3/h\text{)}$

即每小时需天然气12.14 (Nm³/h), 每小时烧成产品质量1566.83所以, 单位质量得产
品热耗为: $\frac{12.14 \times 35960}{1566.83} = 278.8\text{ (kJ/kg)}$

8.1.6 预热带与烧成带的热平衡表

表 8—1: 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	27249.27	5.8	产品带走显热	2089837.854	55
燃料化学显热	436889.464	93	窑体散热	1007709	26.5
助燃空气显热	3903	0.80.	物化反应耗热	597862.65	15.8
漏入空气显热	1762.85	0.4	其它热损失	22127.8	0.6
			烟气带走显热	77899.95	2.1
总热量	469804.58	100	总散热	3795437.25	100

8.2 冷却带热平衡计算

8.2.1 热平衡计算基准及范围

时间基准：1h； 温度基准：0℃

8.2.2 热平衡框图

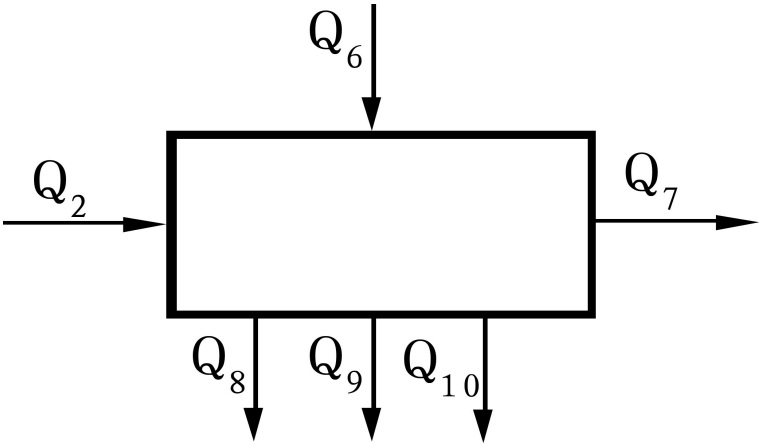


图8—1: 冷却带热平衡示意图

- Q_2 ——产品带入显热

Q_7 ——产品带出显热

Q_9 ——窑体散热
- Q_6 ——冷却风带入显热

Q_8 ——热风抽出带走显热

Q_{10} ——其它热损失

8.2.3 热收入项目

8.2.3.1 产品带入显热 Q_2

制品带入显热在上面已经算出： $Q_2 = 2089837.854 \text{ kJ/h}$

8.2.3.2 冷风带入显热 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：

$$c_a = 1.30 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

设鼓入风量为 $V_x \text{ m}^3/\text{h}$ ，则： $Q_6 = V_a c_a t_a = 26 V_x$

8.2.4 热支出项目

8.2.4.1 制品带走显热 Q_7

出窑时产品的质量 $G_3 = 1566.83 \text{ (Kg/h)}$ ，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 $Q_7 = G_3 c_7 t_7 = 1566.83 \times 80 \times 0.8608 = 107898.18 \text{ kJ/h}$

8.2.4.2 热风抽出时带走的显热 Q_8

抽风为鼓入风的95%，故抽出热风量为 $0.95 V_x \text{ m}^3/\text{h}$ 。取热风抽出时的温度为： $t_8 = 400^\circ\text{C}$ ，查表知此时的比热为： $c_8 = 1.45 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ，则：

$$Q_8 = 0.95 V_x c_8 t_8 = 0.95 \times 400 \times 1.45 \times V_x = 551 V_x$$

8.2.4.3 窑体的散热 Q_8

i 在急冷带的窑体散热 (27~34 节)

窑外壁温度取 80°C ，窑内壁平均温度为 940°C

a. 窑顶

窑 顶	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600 $^\circ\text{C}$	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$	0.23
	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150

$$t_1=935^{\circ}\text{C} \quad t_a=80^{\circ}\text{C}$$

$$\text{设 } t_2=560^{\circ}\text{C} \quad , \quad t_3=123^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_1=0.31+0.176\times 10^{-3} \frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176\times 10^{-3} (935+560) /2=0.442 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} a &= 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3 - t_a} \\ &= 2.56 (123-80)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+123}{100})^4 - (\frac{273+80}{100})^4]}{123-80} = 16.13 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\delta_1=0.23\text{m}$$

$$\lambda_2 = 0.25 \text{ W} / (\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$\delta_2=0.15\text{m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{935 - 80}{\frac{0.23}{0.442} + \frac{0.15}{0.25} + \frac{1}{16.13}} = 727 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 935 - \frac{0.23}{0.442} \times 727 = 562^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{562 - 560}{560} \times 100\% = 0.36\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 935 - \left(\frac{0.23}{0.442} + \frac{0.15}{0.25} \right) \times 727 = 125^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{125 - 123}{123} \times 100\% = 1.63\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = \frac{2.73 + 3.34}{2} \times 2.21 \times 11 = 74.87 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{顶}} = q A_{\text{顶}} = 727 \times 74.87 \times 3.6 = 196044 \text{ (kJ/h)}$$

b. 窑墙

窑	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	0.23
墙	隔热层	混合纤维	1350	0.12	120

$$t_1=935^{\circ}\text{C} \quad t_a=80^{\circ}\text{C}$$

$$\text{设 } t_2=650^{\circ}\text{C}, \quad t_3=112^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_1=0.31+0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176 \times 10^{-3} (935+650) / 2=0.443 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$a=2.56 (t_3-t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3-t_a}$$

$$=2.56 (112-80)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+112}{100})^4 - (\frac{273+80}{100})^4]}{112-80}=15.23 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$\delta_1=0.23\text{m}$$

$$\lambda_2=0.12 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$\delta_2=0.12\text{m}$$

热流密度:

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{1060-80}{\frac{0.23}{0.443} + \frac{0.12}{0.12} + \frac{1}{15.23}} = 543 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2=t_1-\frac{\delta_1}{\lambda_1}q=1060-\frac{0.23}{0.443} \times 543=658^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{658-650}{650} \times 100\%=1.23\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3=t_1-(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2})q=1060-(\frac{0.23}{0.443} + \frac{0.12}{0.12}) \times 543=116^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{116-112}{112} \times 100\%=3.57\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑墙散热面积:

$$A_{\text{墙}}=\frac{0.82+1.42}{2} \times 2.21 \times 11=27.23\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}} = 2qA_{\text{墙}} = 2 \times 543 \times 27.23 \times 3.6 = 106369 \text{ (kJ/h)}$$

c. 窑底

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
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	100

$$t_1 = 935^\circ\text{C} \quad t_a = 80^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2 = 795^\circ\text{C}, \quad t_3 = 340^\circ\text{C}, \quad t_4 = 92^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1 + t_2}{2} = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} (935 + 795) / 2 = 0.455 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$a = 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + t_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_a}{100} \right)^4 \right]}{t_3 - t_a}$$

$$= 2.56 (340 - 80)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + 340}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 80}{100} \right)^4 \right]}{340 - 80} = 32.22 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.13\text{m}$$

$$\lambda_2 = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} \frac{t_2 + t_3}{2} = 0.063 + 0.14 \times 10^{-3} (795 + 340) / 2 = 0.14 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_2 = 0.13\text{m}$$

$$\lambda_3 = 0.2 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_3 = 0.1\text{m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{a}} = \frac{935 - 80}{\frac{0.13}{0.455} + \frac{0.13}{0.14} + \frac{0.1}{0.2} + \frac{1}{32.22}} = 497 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3 、 t_4

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 935 - \frac{0.13}{0.455} \times 497 = 798^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{798 - 795}{795} \times 100\% = 0.38\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 935 - \left(\frac{0.13}{0.455} + \frac{0.13}{0.14} \right) \times 497 = 344^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{344 - 340}{340} \times 100\% = 1.2\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_4 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) q = 935 - \left(\frac{0.13}{0.455} + \frac{0.13}{0.14} + \frac{0.1}{0.2} \right) \times 497 = 95^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{95 - 92}{92} \times 100\% = 3.26\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑底散热面积:

$$A_{\text{底}} = 74.87 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{底}} = q A_{\text{底}} = 497 \times 74.87 \times 3.6 = 134031 \text{ (kJ/h)}$$

ii 在缓冷带的窑体散热 (35~43 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

窑	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3} t$	230
顶	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150

$$t_1 = 600^\circ\text{C} \quad t_a = 40^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2 = 360^\circ\text{C}, \quad t_3 = 70^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1 + t_2}{2} = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} (600 + 360) / 2 = 0.39 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$a = 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + t_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_a}{100} \right)^4 \right]}{t_3 - t_a}$$

$$= 2.56 (70 - 40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + 73}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 40}{100} \right)^4 \right]}{70 - 40} = 12.41 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_2 = 0.15 \text{ m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{600 - 40}{\frac{0.23}{0.39} + \frac{0.19}{0.12} + \frac{1}{12.41}} = 394 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 600 - \frac{0.23}{0.39} \times 394 = 368^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{368 - 360}{360} \times 100\% = 2.22\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 600 - \left(\frac{0.23}{0.39} + \frac{0.15}{0.2} \right) \times 394 = 72^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{72 - 70}{70} \times 100\% = 2.86\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{顶}} = \frac{2.73 + 3.55}{2} \times 2.21 \times 13 = 90.21 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{顶}} = q A_{\text{顶}} = 394 \times 90.21 \times 3.6 = 128067 \text{ (kJ/h)}$$

e. 窑墙

窑	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310 + 0.176 \times 10^{-3}t$	230
墙	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	190

$$t_1 = 600^\circ\text{C} \quad t_a = 40^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2 = 390^\circ\text{C}, \quad t_3 = 67^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1 + t_2}{2} = 0.31 + 0.176 \times 10^{-3} (600 + 390) / 2 = 0.393 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$a = 2.56 (t_3 - t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + t_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_a}{100} \right)^4 \right]}{t_3 - t_a}$$

$$= 2.56 (67 - 40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54 \left[\left(\frac{273 + 67}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 40}{100} \right)^4 \right]}{72 - 40} = 12.17 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \text{ W / (m} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\delta_2=0.19\text{m}$$

热流密度:

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{1}{a}}=\frac{600-40}{\frac{0.23}{0.393}+\frac{0.19}{0.2}+\frac{1}{12.17}}=346 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2=t_1-\frac{\delta_1}{\lambda_1}q=600-\frac{0.23}{0.393}\times 346=397^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{397-390}{390}\times 100\%=1.8\%<5\% \text{ 允许}$$

$$t_3=t_1-(\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2})q=600-(\frac{0.23}{0.393}+\frac{0.19}{0.2})\times 346=68^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{68-67}{67}\times 100\%=1.5\%<5\% \text{ 允许}$$

窑墙散热面积:

$$A_{\text{墙}}=\frac{0.68+1.4}{2}\times 2.21\times 13=29.88\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}}=2qA_{\text{墙}}=2\times 346\times 29.88\times 3.6=74463 \text{ (kJ/h)}$$

f. 窑底

窑底	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310+0.176\times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14\times 10^{-3}t$	130
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	

$$t_1=600^\circ\text{C} \quad t_a=40^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2=395^\circ\text{C} \quad , \quad t_3=67^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1=0.31+0.176\times 10^{-3}\frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176\times 10^{-3}(600+395)/2=0.393 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$$

$$a=2.56(t_3-t_a)^{\frac{1}{4}}+\frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4-(\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3-t_a}$$

$$=2.56 (67-40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+67}{100})^4 - (\frac{273+40}{100})^4]}{67-40} = 12.17 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1 = 0.23\text{m}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\delta_2 = 0.13\text{m}$$

热流密度:

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{725 - 40}{\frac{0.23}{0.393} + \frac{0.13}{0.2} + \frac{1}{12.17}} = 340 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 600 - \frac{0.23}{0.393} \times 340 = 401^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{401 - 395}{395} \times 100\% = 1.52\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3 = t_1 - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) q = 600 - \left(\frac{0.23}{0.393} + \frac{0.13}{0.2} \right) \times 340 = 74^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{68 - 67}{67} \times 100\% = 1.5\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑底散热面积:

$$A_{\text{底}} = 90.21\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{底}} = qA_{\text{底}} = 340 \times 90.21 \times 3.6 = 110399 \text{ (kJ/h)}$$

iii 快冷段窑体的散热量 (44~51 节)

此段温度范围为 $500\sim 80^\circ\text{C}$, 所以窑内壁平均温度为 290°C , 窑外壁温度取为 40°C .

g. 窑顶

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	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150

$$t_1 = 290^\circ\text{C} \quad t_a = 40^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2 = 175^\circ\text{C} \quad , \quad t_3 = 54^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1=0.31+0.176\times 10^{-3}\frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176\times 10^{-3}(290+175)/2=0.349\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} a &= 2.56(t_3-t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3-t_a} \\ &= 2.56(54-80)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+54}{100})^4 - (\frac{273+40}{100})^4]}{54-40} = 10.91\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\delta_1=0.23\text{m}$$

$$\lambda_2=0.2\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$$

$$\delta_2=0.15\text{m}$$

热流密度：

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{1}{a}}=\frac{290-40}{\frac{0.23}{0.349}+\frac{0.15}{0.2}+\frac{1}{10.91}}=167\text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2=t_1-\frac{\delta_1}{\lambda_1}q=290-\frac{0.23}{0.349}\times 167=180^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{180-175}{175}\times 100\%=2.86\%<5\%\text{ 允许}$$

$$t_3=t_1-(\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2})q=290-(\frac{0.23}{0.349}+\frac{0.15}{0.2})\times 167=55^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{55-54}{54}\times 100\%=1.85\%<5\%\text{ 允许}$$

窑顶散热面积：

$$A_{\text{顶}}=\frac{2.73+3.55}{2}\times 2.21\times 11=76.33\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{顶}}=qA_{\text{顶}}=167\times 76.33\times 3.6=45766\text{ (kJ/h)}$$

h. 窑墙

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	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	190

$$t_1=290^{\circ}\text{C} \quad t_a=40^{\circ}\text{C}$$

$$\text{设 } t_2=190^{\circ}\text{C} \quad , \quad t_3=52^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_1=0.31+0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176 \times 10^{-3} (290+190) / 2=0.35 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$a=2.56 (t_3-t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3-t_a}$$

$$=2.56 (52-40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+52}{100})^4 - (\frac{273+40}{100})^4]}{52-40}=10.66 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

$$\delta_1=0.23\text{m}$$

$$\lambda_2=0.2 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$\delta_2=0.19\text{m}$$

热流密度:

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a}} = \frac{290-40}{\frac{0.23}{0.35} + \frac{0.19}{0.2} + \frac{1}{10.66}} = 147 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3

$$t_2=t_1-\frac{\delta_1}{\lambda_1}q=290-\frac{0.23}{0.35} \times 147=193^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{193-190}{190} \times 100\%=1.58\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3=t_1-(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2})q=290-(\frac{0.23}{0.35} + \frac{0.19}{0.2}) \times 147=54^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon=\frac{54-52}{52} \times 100\%=3.85\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑顶散热面积:

$$A_{\text{墙}}=\frac{0.68+1.4}{2} \times 2.21 \times 11=25.28\text{m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{墙}}=2qA_{\text{墙}}=2 \times 147 \times 25.28 \times 3.6=26755 \text{ (kJ/h)}$$

i. 窑底

窑底	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14 \times 10^{-3}t$	130
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	

$$t_1=600^\circ\text{C} \quad t_a=40^\circ\text{C}$$

$$\text{设 } t_2=210^\circ\text{C}, \quad t_3=50^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1=0.31+0.176 \times 10^{-3} \frac{t_1+t_2}{2}=0.31+0.176 \times 10^{-3} (600+210) / 2=0.352 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$a=2.56 (t_3-t_a)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+t_3}{100})^4 - (\frac{273+t_a}{100})^4]}{t_3-t_a}$$

$$=2.56 (50-40)^{\frac{1}{4}} + \frac{4.54[(\frac{273+50}{100})^4 - (\frac{273+40}{100})^4]}{50-40}=10.39 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\delta_1=0.23\text{m}$$

$$\lambda_2=0.036+0.14 \times 10^{-3} \times \frac{t_1+t_2}{2}=0.098\text{W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\delta_2=0.13\text{m}$$

热流密度:

$$q=\frac{t_1-t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{a}} = \frac{290-40}{\frac{0.23}{0.352} + \frac{0.13}{0.098} + \frac{0.13}{0.2} + \frac{1}{10.39}}=120 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

校核 t_2 、 t_3 、 t_4

$$t_2=t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q=290 - \frac{0.13}{0.352} \times 120=211^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{211-210}{210} \times 100\%=0.48\% < 5\% \text{ 允许}$$

$$t_3=t_1 - (\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}) q=290 - (\frac{0.13}{0.352} + \frac{0.13}{0.2}) \times 120=52^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \frac{52-50}{50} \times 100\% = 0.5\% < 5\% \text{ 允许}$$

窑底散热面积：

$$A_{\text{底}} = 76.33 \text{ m}^2$$

$$\text{则 } Q_{\text{底}} = qA_{\text{底}} = 120 \times 76.33 \times 3.6 = 33081 \text{ (kJ/h)}$$

则冷却带窑体总散热量为：

$$\begin{aligned} Q_9 &= 196044 + 106369 + 134031 + 128067 + 74463 + 110399 + 45766 + 26755 + 33081 \\ &= 854975 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

8.2.4.4 其它热损失 Q_{10}

其它热损失为总收入的5%，则：

$$Q_{10} = 0.05 (Q_2 + Q_6) = 0.05 \times (2089837.854 + 26V_x) = 104491.89 + 1.3V_x$$

8.2.5 列出热平衡方程

热收入=热支出

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

$$2089837.854 + 26V_x = 107898.18 + 551V_x + 854975 + 104491.89 + 1.3V_x$$

$$\text{解得 } V_x = 1942.76 \text{ m}^3/\text{h}$$

即每小时鼓入风量为1942.76m³/h.

8.2.6冷却带热平衡表

表 8—2 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	2089837.854	97.64	产品带出显热	107898.18	5.04
冷却风带入显热	50511.76	2.36	抽热风带走显热	1070460.76	50.02
			窑体散热	854975	39.94
			其它散热	107017.478	5.00
总热量	2140349.614	100	总散热	2140351.418	100

9. 烧嘴的选用

9.1 每个烧嘴所需的油（气）压

每小时燃料消耗量为： $x=1214\text{m}^3/\text{h}$

考虑到烧嘴的燃烧能力和烧嘴燃烧的稳定性的安全系数 1.5

本设计共设置了 76 个烧嘴。

每个烧嘴的燃料消耗量为： $\frac{1214 \times 1.5}{76}=23.96$

烧嘴的热负荷： $23.96 \times 41580=996256.8\text{ (kJ/h)}$

9.2 烧嘴的选用

所以本设计采用北京神雾公司的 WDH-TCC2 型烧嘴。

该烧嘴技术性能如下：

热负荷	燃气		助燃空气			流量调节 比例	火焰 长度	火焰 锥角	炉膛温 度
	流量	压力	流量	温度	压力				
2×10^4 Kcal/h	2.4 Bm ³ /h	1000Pa~ 0.2MPa	24 Bm ³ /h	常温 ~350℃	1500~ 3500 Pa	1: 6	200~ 3000	~70	~1800 ℃

所以该烧嘴符合本设计要求。

10. 参考文献

- [1] 周露亮, 《窑炉课程设计》, 景德镇陶瓷学院, 2005
- [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