

景德镇陶瓷学院科技艺术学院

毕 业 设 计 说 明 书

题目： 年产 108 万件卫生洁具隧道窑设计

学 号： 201030453130

姓 名： 余 忠 健

院（系）： 工 程 系

专 业： 热能与动力工程

指导教师： 宫 小 龙

完成日期： 2014. 5. 21

摘 要

本设计说明书为年产 108 万件卫生洁具隧道窑。说明书中具体论述了设计时应考虑的因素, 诸如窑体结构、排烟系统、烧成系统和冷却系统等等。同时详细的进行了对窑体材料的选用、热平衡、管路、传动设计等的计算。

本次设计窑炉的燃料为天然气, 在烧成方式上采用明焰裸烧的方法, 既提高了产品的质量和档次, 又节约了能源, 同时具有很高的自动化控制水平, 在燃烧及温度控制上采用 PID 智能仪表, 可以很方便的调节和稳定烧成曲线。

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

ABSTRACT

The design specification is the sanitary ware tunnel kiln of annual 108million . The specifications expound the factors in detail that should be taken in account in design, such as the structure of the kiln body, exhaust system, burning system and the cooling system etc. It also specifically calculates the kiln materials and elects the kiln body heat balance, the pipeline design, the transmission.

The design of furnace fuel is natural gas. In the firing mode, it takes use of open flame burning method that can improve the quality and grade of products, and saving energy and has high level of automation control. Using PID intelligent instrument in combustion and temperature control can be very convenient to adjust and stabilize the firing curve.

The instructions include: the main dimensions of the kiln body, kiln body work system design, material selection, fuel combustion, heat balance calculation, pipe size calculation, fan selection and engineering materials budget.

目 录

1	毕业设计任务书	6
2	烧成制度的确定	7
3	窑体主要尺寸计算	8
3.1	砌板和立柱的选用	8
3.2	窑长及各带长度的确定	8
3.3	窑车车面尺寸	8
4	窑体及工作系统的确定	10
4.1	窑体	10
4.2	排烟系统	11
4.3	气幕的设定	11
4.4	燃烧系统	11
4.5	冷却系统	12
4.6	车下风系统	12
4.7	输送系统及附属装置	12
5	窑体材料和厚度的确定	14
6	燃料及燃烧计算	16
6.1	所需空气量	16
6.2	燃烧产生烟气量	16
6.3	燃烧温度	16
7	物料平衡计算	17
8	预热带和烧成带的热平衡计算	18
8.1	确定热平衡计算的基准, 范围	18
8.2	热平衡示意图	18
8.3	热收入项目	19
8.4	热支出项目	20
8.5	列热平衡方程式	24
8.6	预热带和烧成带热平衡表	25
9	冷却带的热平衡计算	26
9.1	确定热平衡计算的基准, 范围	26
9.2	热平衡示意图	26
9.3	热收入项目	27
9.4	热支出项目	27
9.5	列热平衡方程式	30
9.6	冷却带热平衡表	30
10	管道计算、阻力计算、烧嘴及风机选型	31
10.1	排烟系统的设计	31
10.2	阻力计算	31
10.3	风机选型	33
10.4	其他系统管道尺寸的确定及风机选型	33
10.5	烧嘴的选用	37

11	工程材料概算.....	38
11.1	窑体材料概算.....	38
11.2	钢材材料概算.....	40
12	后记.....	41
13	参考文献.....	42
14	浅谈隧道窑余热利用.....	43
15	英文翻译.....	45

景德镇陶瓷学院科技艺术学院毕业设计任务书

院(系) 热能工程

13 年 11 月 18 日

专 业	热能工程	班 级	热工 10
学生姓名	余忠建	指导教师	宫小龙
题 目	年产 108 万件卫生洁具天然气隧道窑设计		

主要研究内容和设计技术参数:

1.产品: 卫生洁具(750×485×185mm)洗脸盆, 单重 8Kg;

2.产量: 108 万件/年;

3.年工作日: 330 天;

4.坯体组成(%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	I.L
72.28	18.15	0.35	0.45	1.5	1.2	1.25	4.82

5. 燃料: 天然气

天然气	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S
体积 %	93.36	3.72	0.69	0.24	0.08	1.26	0.65	0

注: 天然气高位发热量 40.97MJ/ Nm³, 低位发热量 36.98MJ/ Nm³

6.烧成合格率: 90%; 坯体入窑水分: <2%;

7.烧成周期: 16 小时;

8.氧化气氛烧成; 烧成温度: 1260℃。

基本要求(含成果要求):

1. 通过设计计算, 确定窑体材料及厚度、主要结构尺寸、管路系统尺寸等;
2. 确定窑炉的工作系统;
3. 认真思考, 独立完成, 绘出部分图纸: 主体结构图、管路系统图;
4. 编写详细设计说明书, 说明书采用学院统一格式, 一律 A4 纸打印;
5. 要求完成 2000~3000 字的英文文献调研报告和不少于 2000 字的英文摘要。

工作进度计划:

1. 13~20 周: 查阅、整理、收集与该窑炉有关的文献资料;
2. 1~6 周: 进行设计计算;
3. 7~12 周: 编写说明书初稿; 绘制所要求的部分图纸;
4. 13 周~ : 整理设计思路与资料, 完善说明书, 准备答辩。

2 烧成制度的确定

根据制品的化学组成、形状、尺寸、线收缩率及其他一些性能要求，制订烧成制度如下：

20℃—500℃	2.2 小时	预热带
500℃—600℃	1.2 小时	预热带
600℃—900℃	1.7 小时	预热带
900℃—1260℃	3.1 小时	烧成带
1260℃—1260℃	2.1 小时	烧成带
1260℃—800℃	1.4 小时	急冷带
800℃—400℃	3.0 小时	缓冷带
400℃—80℃	1.3 小时	快冷带

烧成曲线如图 2.1 所示

(3) 烧成温度曲线大致如下：

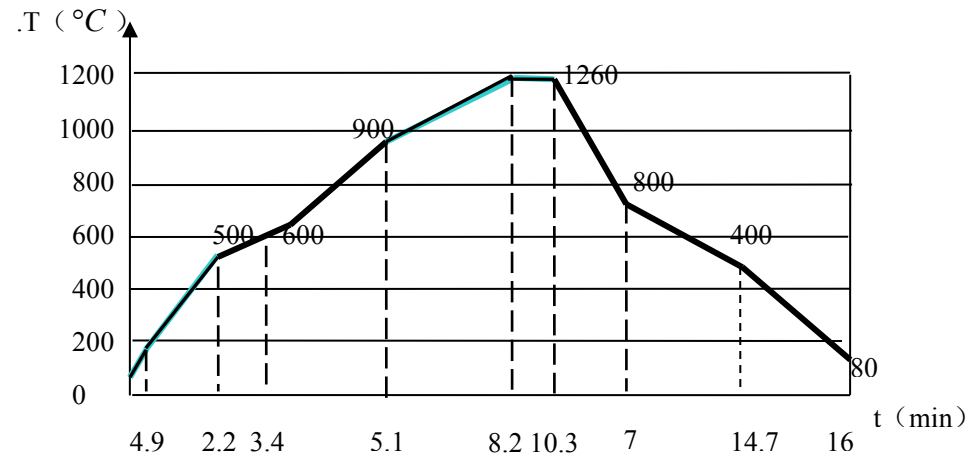


图 2.1：烧成温度曲线

3 窑体主要尺寸的确定

3.1 砌板和立柱的选用

砌板尺寸：800×800×10 mm 单重：5 kg

支柱：40×70×190mm 单重：0.98 kg

3.2 窑长及各带长的确定

3.2.1 装车方法

在窑车的长度方向上设置 3 块砌板，宽度方向上设置 4 块砌板，在窑车高度方向上装 5 层。砌板间的间隙在长度方向上为 30mm，砌板与车边间距为 20 mm。在宽度方向上为 10mm，砌板与车边间距为 15 mm。

由此确定窑车车面尺寸为：长：800×3+30×2+20×2=2500mm

宽：800×4+10×3+15×2=3260mm

3.2.2 窑长的确定

装车装载量为 60 件每车，

所以装窑密度为 60/2.5=24 件/ m³

$$\begin{aligned} \text{窑长 } L &= \frac{\text{生产任务} \times \text{烧成时间}}{\text{年工作日} \times 24 \times \text{成品率} \times \text{装窑密度}} \\ &= (1080000 \times 16) / (330 \times 24 \times 0.90 \times 24) = 101.01\text{m} \end{aligned}$$

窑内容车数：n=101/2.5=40.4 辆 取 41 辆

全窑不设进车和出车室，所以窑有效长为 41×2.5=102.5 m 取 103m

3.2.3 各带长度的确定

根据烧成曲线：

预热带长=（预热时间×总长）/总烧成时间=5.1×103/16=33m

烧成带长=（烧成时间×总长）/总烧成时间=5.2×103/16=33m

冷却带长=（冷却时间×总长）/总烧成时间=5.7×103/16=37m

3.3 窑车车面尺寸

3.3.1 窑车

窑内容车数 41 辆，则

推车时间： $16 \times 60 / 41 = 23.4 \text{ min/车}$ ；推车速度： $60 / 23.4 = 2.56 \text{ 车/小时}$ 。

窑车架高 255mm，窑车衬面边缘用三层的轻质砖共 260mm，在窑车的中部铺 4 层硅酸铝纤维棉和 1 层含锆纤维毯。

窑车总高为： $255 + 260 = 515 \text{ mm}$

在车面与砌板间留火道，其高度为 300mm。

3.3.2 确定窑截面的尺寸

根据窑车和制品的尺寸，内宽 B 取 3600mm，

3.3.3 全窑高

窑全高（轨面至窑顶）：预热带、冷却带为 1700mm，为了加强传热烧成带加高 100mm，为 1800 mm。

4 窑体及工作系统的确定

4.1 窑体

以 2.5 米为一个模数单元节，全窑 103 米，共有 41 节。窑体由窑墙主体、窑顶，钢和窑体的附属结构组成。

4.1.1 钢架

每一钢架长度为 3 米，含钢架膨胀缝。全窑共 41 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。

4.1.2 窑墙

窑墙采用轻质耐火隔热材料。常用材质如下：堇青莫来石板、莫来石绝热砖、聚轻高铝砖、轻质粘土砖、硅酸铝棉等耐火材料。窑墙砌筑在钢结构上。每隔 2 米留设 20mm 左右的热膨胀缝，用含锆散棉填实。

4.1.3 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，可大大减少窑体散热。

4.1.4 检查坑道和事故处理孔

由于窑车上砌架稳固，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。

4.1.5 测温孔和观察孔

在窑体关键处设置测温孔，以便于更好地了解窑内各段的温度情况，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。在窑体的第 1 节~13 节，自第 1 节开始，每隔一节设置一处测温孔；在进入烧成带之后的第 13 节与

16节各设置一处测温孔，第18，19，20，21节的窑顶和窑侧墙处都设置测温孔，共6处测温孔；在第24，26，28，30，32，34节各设置一处测温孔，共6处测温孔。此外在烧成曲线的关键点，如窑头、氧化末段、晶型转化点、成瓷段、急冷结束等初都有测温孔的留设。观察孔是为了观察烧嘴的情况，其布置见后文。

4.1.6 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。在预热带和缓冷段头部的窑墙上各设置一对加砂斗。

4.1.7 窑炉基础

窑炉基础、拖车道基础、回车线基础用毛石、混凝土或钢筋混凝土、三七灰土三层夯实。

4.2 排烟系统

为了更好的利用烟气热量能，采用分散排烟的方式。在预热带2—8节箱体位近窑车台面的窑墙上设14对排烟口，可以迫使烟气自上而下流动，克服由于几何压头的作用使气体向上的倾向，在第一节窑头处采用窑顶直接排烟，汇总到排烟总管由排烟机排出，一部分送干燥房，其余从烟囱排入大气。

4.3 气幕的设置

1号车位窑头设封闭气幕，封闭气幕的风源为外界空气。

4.4 燃烧系统

4.4.1 烧嘴的设置

此窑采用小功率多分布高速调温烧嘴的布置方式。两侧垂直和水平交错排列，这样有利于均匀窑温和调节烧成曲线。下部烧嘴喷火口对准装载制品的下部火道，上部烧嘴喷火口对准装载制品上方的部分。

烧嘴砖直接砌筑在窑墙上，采用刚玉莫来石材质。

14~24节为烧成带，烧嘴的布置情况为：14~16节设置4对共8只，17~

21 节设置 32 只, 23~24 设置 16 只, 并在每个烧嘴的对侧窑墙上设置一个观火孔。烧嘴总数为: 56 只。

助燃风全部为外界空气。

4.5 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, 冷却带实质上也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, 余热风可供干燥用, 从而达到节能目的。

4.5.1 急冷段

25~28 节为急冷带。采用直接向窑内吹入冷风的方式, 共设置了 12 对急冷风管, 直接向窑内喷入冷风, 并设置 3 对侧部抽热风口。

4.5.2 缓冷段

29~35 节为缓冷带。缓冷采用间壁冷却的形式, 在 30 到 34 节设置中空墙为间壁冷却。

4.5.2 快冷段

36~41 节为快冷带。在 36-41 节分上下两排设置 15 对快冷风管, 气源为外界空气。

4.6 车下风系统

车下风风源为室内冷空气。在 18~28 节, 由车下风风机抽冷空气直接送至窑下, 每隔 1m 开一个车下风孔。

4.7 输送系统及附属装置

隧道窑内铺设轨道, 轨道安放在钢架上的轨道垫板上, 用螺丝联结并焊接。窑车是制品运输的载体。窑车底架由槽钢、钢板等用螺丝联结或焊接而成。

在窑头和窑尾各有一手动拖车道, 每拖车道上有一辆拖车。窑外有一条手动回车线。拖车轨道和窑内轨道和回车线轨道相连接, 并在同一水平面上。空窑车在回车线上装载制品, 然后推到拖车上, 将拖车推到窑头, 再用顶车机将窑车推入窑内, 窑车从窑尾出来经拖车道送至回车线, 并在回车线卸载制品。

窑头装有油压顶车机。根据设定好的推车速度, 顶车机将窑车顶入窑内。顶

车速度可调。

拖车道和回车线轨道直接装在轨道垫板上。

在自动回车线上设置有一个窑车下检查坑道，深约 1.5 米，其长宽尺寸约同窑车大小，用来检修运行不良的窑车。

在回车线前部和后部，各设置一道安全检查门，其断面尺寸和窑头断面、曲封尺寸一致。检查门用多块薄钢板制作而成，用螺丝联结，可以调整其高度和宽度。

5 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的要求,受表面最高温度限制以及砖形、外观整齐等方面的因素的影响,综合考虑后,确定窑体材料和厚度如下所列。

窑墙部分:

第 1-11 节窑墙: 厚 445mm, 为 345mm 轻质保温砖+100mm 岩棉毡;

第 12-22 节窑墙: 厚 560mm, 为 230mm 聚轻高铝砖+230mm 轻质粘土砖+100mm 硅酸铝纤维毡;

第 23-26 节窑墙: 厚 560mm, 为 230mm 聚轻高铝砖+230mm 轻质粘土砖+100mm 硅酸铝纤维毡;

第 27-41 节窑墙: 厚 445mm, 为 345mm 轻质保温砖+100mm 岩棉毡;

窑顶部分:

堇青莫来石板制品具有热膨胀系数小,抗震稳定性好,使用寿命长,且不会突然断裂,使用过程中不氧化不落脏掉渣,不污染烧品,是烧成陶瓷制品最理想的材料。

第 1-11 节窑顶: 厚 250mm, 为 20mm 堇青莫来石板+230mm 硅酸铝纤维毡;

第 12-22 节窑顶: 厚 460mm, 为 230mm 莫来石绝砖+230 mm 硅酸铝纤维毡;

第 23-26 节窑顶: 厚 460mm, 为 230 莫来石绝热砖+230 mm 硅酸铝纤维毡;

第 27-41 节窑顶: 厚 250mm, 为 20mm 堇青莫来石板+230mm 硅酸铝纤维毡;

窑体材料的校核, 选烧成带为例。

材料 s_1 用聚轻高铝砖, 厚度为 230mm, 导热系数 $\lambda_1=0.45\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

s_2 用轻质粘土砖, 厚度 230mm, 导热系数 $\lambda_2=0.342$

s_3 用硅酸铝纤维毡, 厚度为 100mm, 导热系数 $\lambda_3=0.24$

总的热阻 $R = R_1 + R_2 + R_3 = 0.23/0.45 + 0.23/0.342 + 0.1/0.24 = 1.60 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$

热流密度 $q = (1260 - 80)/1.60 = 737.5 \text{ (W/m}^2\text{)}$

验算:

已知 $T_1 = 1260^\circ\text{C}$,

$T_2 = T_1 - q \times R_1 = 1260 - 737.5 \times 0.51 = 883.9^\circ\text{C}$,

$$T_3 = T_2 - q \times R_2 = 883.9 - (737.5 \times 0.67) = 389.8^\circ\text{C},$$

$$T_4 = T_3 - q \times R_3 = 389.8 - (737.5 \times 0.42) = 80.05^\circ\text{C}。$$

经过计算，设计完全符合窑体散热的要求。不仅造价少，而且热流量小，即窑体的散热少。同理可得，经过对预热带、烧成带、急冷带、缓冷带、的材料校核计算，所选用的材料厚度均符合设计要求。

6 燃料燃烧计算

6.1 所需空气量

所用燃料为天燃气，低位发热量： $Q_{\text{net,ar}}=36.98\text{MJ/m}^3$ 。查工具书，得理论空

气燃烧计算式， $V_a^0=0.264 \times \frac{Q_{\text{net,ar}}}{1000} + 0.02 \quad (\text{m}^3/\text{m}^3)$

则理论空气需要量为： $V_a^0=0.264 \times 36980/1000 + 0.02 = 9.783 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$

取空气过剩系数为 1.2，则实际需要空气量为：

$$V_a = q_{v,a} = \alpha V_a^0 = 1.2 \times 9.783 = 11.7396 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$$

6.2 燃烧产生烟气量

查工具书，得实际烟气计算式，

$$V_g = \alpha V_a^0 + 0.38 + 0.018 \times Q_{\text{net,ar}}/1000$$

则实际烟气量为：

$$V = \alpha V_a^0 + 0.38 + 0.018 \times Q_{\text{net,ar}}/1000 = 1.2 \times 9.783 + 0.38 + 0.018 \times 36980/1000 = 12.785 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$$

6.3 燃烧温度

$$t = (Q_{Dw} + V_a C_a t_a + C_f T_f) / (VC)$$

查表在 $t=1730^\circ\text{C}$ 时的烟气比热为 $C=1.64 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ，在室温 20°C 时空气比热为 $C_a=1.30 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ，天然气的比热为 $C_f=1.56 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ，代入公式得

$$t = (36980 + 11.7396 \times 1.30 \times 20 + 1.56 \times 20) / (12.785 \times 1.64) = 1780^\circ\text{C}$$

相对误差为： $(1780-1730)/1782=2.8\% < 5\%$ ，认为合理。

取高温系数 $n=0.8$ ，则实际燃烧温度为 $t_p = \eta t_{th} = 0.8 \times 1780 = 1424^\circ\text{C}$ 。

$1424 - 1260 = 164^\circ\text{C}$ ，比烧成温度高出 164°C ，认为合理。

7 物料平衡计算

7.1 每小时烧成干制品的质量

$$G_m = \text{推车速度} \times \text{每车载重} = 2.56 \times 480 = 1228.8 \text{ kg/h}$$

7.2 每小时入窑干坯的质量

$$G_I = G_m \cdot \frac{100}{100 - IL} = 1228.8 \times \frac{100}{100 - 4.82} = 1291 \text{ kg/h}$$

7.3 每小时欲烧成湿制品的质量

$$G_2 = G_I \cdot \frac{100}{100 - \omega} = 1291 \times \frac{100}{100 - 2} = 1317.3 \text{ kg/h}$$

7.4 每小时蒸发的自由水的质量

$$G_W = G_2 - G_I = 1317.3 - 1291 = 26.3 \text{ kg/h}$$

7.5 每小时从精坯中产生的 CO₂ 的质量

7.5.1 每小时从精坯中引入的 CaO 和 MgO 质量 计算

$$G_{CaO} = G_I \cdot CaO\% = 1291 \times 0.35\% = 4.52 \text{ kg/h}$$

$$G_{MgO} = G_I \cdot MgO\% = 1291 \times 0.45\% = 5.81 \text{ kg/h}$$

7.5.2 产生的 CO₂ 质量

$$G_{CO_2} = G_{CaO} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} + G_{MgO} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{MgO}} = 9.94 \text{ kg/h}$$

7.6 每小时从精坯中排除结构水的质量 G_{ip}

$$G_{ip} = G_I \times IL\% - G_{CO_2} = 1291 \times 4.82\% - 9.94 = 45.31 \text{ kg/h}$$

7.7 窑具的质量 G_b

60 块硼板，240 个支柱，共重约 535.2 kg

$$G_b = 535.2 \times 2.26 = 1209.6 \text{ kg/h}$$

8 预热带和烧成带的热平衡计算

8.1 确定热平衡计算的基准、范围

本次计算选用 1 小时为计算基准，以 0°C 作为基准温度。以预热带和烧成带为计算范围。

8.2 热平衡示意图

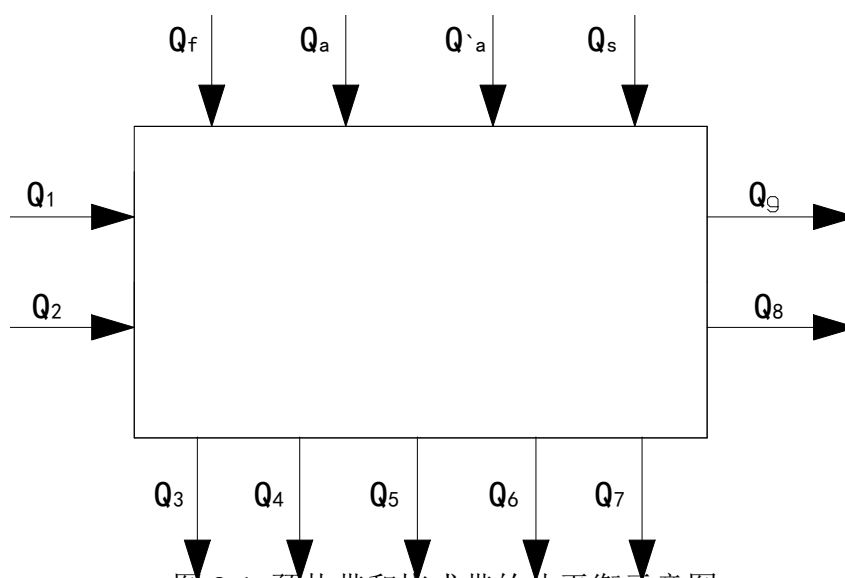


图 8-1 预热带和烧成带的热平衡示意图

图 8-1 为预热带和烧成带的热平衡示意图，图中各符号分别代表

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_9 —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 —预热带漏入空气带入显热；

Q_s —气幕、搅拌风带入显热；

8.3 热收入项目

8.3.1 坯体带入显热 Q_1

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

其中： G_1 —入窑制品质量 (Kg/h)； $G_1=1291\text{Kg/h}$ ；

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

C_1 —入窑制品的平均比热 (KJ/(Kg·°C))； $T_1=20^\circ\text{C}$ 时， $C_1=0.92\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot^\circ\text{C})$ ；

$$Q_1 = G_1 C_1 T_1 = 1291 \times 0.92 \times 20 = 23754.4 \quad (\text{kJ/h})$$

8.3.2 硼板、支柱等窑具带入显热 Q_2

$$Q_2 = G_2 C_2 T_2 \quad (\text{kJ/h})$$

其中： G_b —入窑硼板、支柱等窑具质量 (Kg/h)； $G_b=1209.6\text{Kg/h}$ ；

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

C_2 —入窑硼板、支柱等窑具的平均比热 (KJ/(Kg·°C))；碳化硅硼板、支柱的平均比热容按下式计算：

$$C_2 = 0.963 + 0.000147t = 0.963 + 0.000147 \times 20 = 0.966 \text{KJ}/(\text{Kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$Q_2 = G_b C_2 T_2 = 1209.6 \times 0.966 \times 20 = 23369.5 \quad (\text{kJ/h})$$

8.3.3 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： $Q_{\text{net,ar}}$ —所用燃料低位发热量 (KJ/m³)；燃料为天然气，低位发热量为：

$$Q_{\text{net,ar}} = 36980 \text{kJ}/\text{Nm}^3$$

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

C_f —入窑燃料的平均比热容 (KJ/(Kg·°C))。查表，20°C时天然气平均比热容 $C_f=1.56\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot^\circ\text{C})$ ；

x —设每小时发生炉煤气的消耗量为 x (m³/h)；

$$Q_f = (Q_{\text{net,ar}} + T_f C_f) x = (36980 + 20 \times 1.56) x = 37011x \text{ kJ/h}$$

8.3.4 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 (m^3/h)；前面燃烧部分计算得： $q_v = V_a \cdot x = 11.7396x$ (m^3/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： $C_a = 1.30 \text{ KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

$$Q_a = q_v C_a T_a = 11.7396x \times 1.30 \times 20 = 305.2296x \quad (\text{kJ/h})$$

8.3.5 从预热带不严密处漏入空气带入显热 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 $a_g = 2.5$ ，已求出理论空气量 $V_a^0 = 9.783 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$

烧成带燃料燃烧时空气过剩系数 $a_f = 1.2$ 。

$$V'_a = x \times (a_g - a_f) \times V_a^0 = x(2.5 - 1.2) \times 9.783 = 12.718x \quad (\text{Nm}^3/\text{h})$$

漏入空气温度为 $t'_a = 20^{\circ}\text{C}$ ，此时 $C'_a = 1.30 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，则：

$$Q'_a = q'_v \times C'_a \times t'_a = 12.718x \times 1.30 \times 20 = 330.668x \quad (\text{kJ/h})$$

8.3.6 气幕、搅拌风带入显热 Q_s

气幕包括封闭气幕和搅拌气幕，封闭气幕只设在窑头，不计其带入显热。取搅拌气幕风源为空气，其风量一般为理论助燃空气量的 0.5-1.0 倍，取为 0.6 倍。所以： $V_s = 0.6q_v = 0.6 \times 11.7396x = 7.044x$ (Nm^3/h)，设 $t_s = 20^{\circ}\text{C}$ ，查得 $C_s = 1.30 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，

$$Q_s = V_s \times C_s \times t_s = 7.044x \times 1.30 \times 20 = 183.144x \quad (\text{kJ/h})$$

8.4 热支出项目

8.4.1 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： $G_m = 1228.8 \text{ kg/h}$

出烧成带产品温度： $t_3 = 1260^{\circ}\text{C}$

查手册知，此时产品平均比热： $C_3 = 1.20 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

则： $Q_3 = G_m \times C_3 \times t_3 = 1228.8 \times 1260 \times 1.20 = 1857945.6 \quad (\text{kJ/h})$

8.4.2 砌板、支柱等窑具带出显热 Q_4

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

硼板、立柱质量: $G_b = 1209.6 \text{ kg/h}$

出烧成带硼板、立柱温度: $T_4 = 1260^\circ\text{C}$

此时硼板、立柱的平均比热:

$$C_4 = 0.84 + 0.000264t = 0.84 + 0.000264 \times 1360 = 1.17 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$Q_4 = G_b \times C_4 \times T_4 = 1209.6 \times 1.17 \times 1260 = 1783192.32 \text{ (kJ/h)}$$

8.4.3 烟气带走显热 Q_g

$$Q_g = q_g C_g T_g \text{ (kJ/h)}$$

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 $V_s = 6.044x \text{ (Nm}^3/\text{h)}$

离窑烟气体积: $q_g = [V_g^0 + (a_g - 1) \times V_a^0]x + V_s$ 烟气温度为 100°C

此时烟气比热 $C_g = 1.44 \text{ kJ/(Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

$$\begin{aligned} Q_g &= q_g \times C_g \times t_g = \{[12.785 + (2.5 - 1) \times 9.783]x + 6.044x\} \times 1.068 \times 100 \\ &= 3578.17x \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

8.4.4 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三段计算

8.4.4.1 20—600°C 段

该段窑长度为 21.9 米, 窑宽为 3.6 米。窑外壁表面平均温度定为 80°C , 窑内壁表面平均温度: $(20 + 600) / 2 = 310^\circ\text{C}$

8.4.4.1.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下:

轻质保温砖, 厚度 $\delta = 345 \text{ mm}$, 导热系数为 $0.375 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$;

岩棉毡, 厚度 $\delta = 100 \text{ mm}$, 导热系数 $0.037 \text{ w/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$;

$$\text{热流密度 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{310 - 80}{\frac{0.345}{0.375} + \frac{0.1}{0.037}} = 63.5 \text{ W/m}^2$$

不考虑车台面以下部分的窑墙散热, 窑内高按 1215mm 计算,

则两侧窑墙散热量: $Q'_1 = 2 \times 63.5 \times 1.215 \times 21.9 \times 3.6 = 12165.4062 \text{ (kJ/h)}$

8.4.4.1.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下：

堇青莫来石板，厚度 $\delta=20$ mm，导热系数 0.2 w/ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)；

硅酸铝纤维毡，厚度 $\delta=230$ mm，导热系数 0.24 w/ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)；

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{310 - 80}{\frac{0.02}{0.2} + \frac{0.23}{0.24}} = 217.4 \text{ W/m}^2$$

窑顶散热量： $Q'_2 = 217.4 \times 3.6 \times 21.9 \times 3.6 = 61703.3376$ (kJ/h)

所以，20—600℃段的窑体散热总量为：

$$Q'_3 = Q'_1 + Q'_2 = 61703.3376 + 12165.4062 = 73868.7438 \text{ (kJ/h)}$$

8.4.4.3 600—900℃段

该段长度为 10.9 米，窑外壁表面平均温度 80℃，窑内壁表面平均温度：

$$(600 + 900) / 2 = 750^\circ\text{C}$$

8.4.4.3.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下：

轻质保温砖，厚度 $\delta=345$ mm，导热系数 0.375 w/ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)；

岩棉毡，厚度 $\delta=100$ mm，导热系数 0.037 w/ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)；

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{750 - 80}{\frac{0.345}{0.375} + \frac{0.1}{0.037}} = 184.9 \text{ W/m}^2$$

则两侧窑墙散热量： $Q'_4 = 2 \times 184.9 \times 1.215 \times 10.9 \times 3.6 = 17630.8067$ (kJ/h)

8.4.4.3.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下：

堇青莫来石板，厚度 $\delta=20$ mm，导热系数 0.2 w/ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)；

硅酸铝棉，厚度 $\delta=230$ mm，导热系数 0.24 w/ ($\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)；

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{750 - 80}{\frac{0.02}{0.2} + \frac{0.23}{0.24}} = 633.3 \text{ W/m}^2$$

窑顶散热量： $Q'_5 = 3.6 \times 633.3 \times 10.9 \times 3.6 = 89462.4912$ (kJ/h)

所以，600—900℃段的窑体散热总量为：

$$Q'_6 = Q'_4 + Q'_5 = 17630.8067 + 89462.4912 = 107093.2979 \text{ (kJ/h)}$$

8.4.4.4 900—1260℃段

该段长度为 20 米，窑外壁表面平均温度 80℃，窑内壁表面平均温度：
 $(900+1260)/2=1080℃$

8.4.4.4.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下：

聚轻高铝砖，厚度 $\delta=230\text{ mm}$ ，导热系数 $0.45\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$

轻质粘土砖，厚度 $\delta=230\text{ mm}$ ，导热系数 $0.342\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$

硅酸铝纤维毡，厚度 $\delta=100\text{ mm}$ ，导热系数 $0.24\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ；

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1080 - 80}{\frac{0.23}{0.45} + \frac{0.23}{0.342} + \frac{0.1}{0.24}} = 625\text{ W/m}^2$$

不考虑车台面以下部分的窑墙散热，窑内高按 1315mm 计算，

则两侧窑墙散热量： $Q'_7 = 2 \times 625 \times 1.315 \times 20 \times 3.6 = 118350\text{ (kJ/h)}$

8.4.4.4.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下：

莫来石绝热砖，厚度 $\delta=230\text{ mm}$ ，导热系数 $0.3\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ；

硅酸铝棉，厚度 $\delta=230\text{ mm}$ ，导热系数 $0.24\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ；

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{1080 - 80}{\frac{0.23}{0.3} + \frac{0.23}{0.24}} = 579.7\text{ W/m}^2$$

窑顶散热量： $Q'_8 = 579.7 \times 20 \times 3.6 \times 3.6 = 150258.24\text{ (kJ/h)}$

所以，900—1210℃段的窑体散热总量为：

$Q'_9 = Q'_7 + Q'_8 = 118350 + 150258.24 = 268608.24\text{ (kJ/h)}$

综上所述，预热带和烧成带窑体散失热量总和为：

$Q_5 = 73868.7438 + 107093.2979 + 268608.24 = 449570.2817\text{ (kJ/h)}$

8.4.5 窑车蓄热和散失热量 Q_6

根据经验数据，取热收入的 10%。

8.4.6 物化反应耗热 Q_7

8.4.6.1 自由水蒸发吸热 Q_w

$Q_w = G_w \times (2490 + 1.93 \times t_g)$ 自由水的质量 $G_w = 26.3\text{ kg/h}$

烟气离窑的温度 $t_g=100^\circ\text{C}$ 。制品中 Al_2O_3 含量为 18.15%

则可得: $Q_w=26.3 \times (2490+1.93 \times 100) = 70562.9 \text{ (kJ/h)}$

8.4.6.2 其余物化反应吸热 Q_d

$$Q_d = G_1 \times 2100 \times w(\text{Al}_2\text{O}_3) \text{ (kJ/h)}$$

其中, G_1 —入窑干制品质量 (Kg/h); $G_1=1291 \text{ Kg/h}$;

2100—1Kg Al_2O_3 的反应热 (KJ/Kg);

$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ —陶瓷洁具结合剂中 Al_2O_3 含量占总质量的质量分数;

$w(\text{Al}_2\text{O}_3)=18.15\%$;

$$Q_r = G_1 \times 2100 \times w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1291 \times 2100 \times 18.15\% = 492064.65 \text{ (kJ/h)}$$

则物化反应总耗热为:

$$Q_7 = 70562.9 + 492064.65 = 562627.55 \text{ (kJ/h)}$$

8.4.7 其他热损失 Q_s

根据经验数据, 此项热支出占热收入的 5%—10%, 本设计取 5%。

8.5 列热平衡方程式

由热平衡方程: 热收入=热支出, 有

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

$$23754.4 + 23369.5 + 37011x + 305.2296x + 330.668x + 183.144x = 1857945.6 + 1783192.32 + 3578.17x + 449570.2817 + 10\% Q_{\text{收}} + 562627.55 + 5\% Q_{\text{收}}$$

$$28577.36544x = 4613280.4367$$

解得 $x = 161.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$

单位燃耗: $161.4/1228.8 = 0.13 \text{ (标准立方米/千克瓷)}$

单位热耗: $0.13 \times 36980 = 4857.24 \text{ (千焦/千克瓷)}$

8.6 预热带和烧成带热平衡表

表 8-1 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	23754.4	0.31	产品带走显热	1857945.6	22.7
燃料化学显热	5973575.4	97.7	烟气带走显热	577516.638	28.4
助燃空气显热	49264.05744	0.56	窑墙、窑顶带 走显热	449570.2817	4.2
漏入空气显热	53369.8152	0.77	物化反应耗热	562627.55	6.8
硼板、立柱带 入显热	23369.5	0.32	硼板、立柱带 出显热	1783192.32	22.9
气幕显热	29559.4416	0.34	窑车积、散热	615289.2614	10
			其它热损失	307644.6178	5
总 计	6065883.5182	100	总 计	6065852.154	100

分析：

$$Q=6065883.5182-6065852.154=31.3642(\text{kJ/h})$$

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。

9 冷却带的热平衡计算

9.1 确定热平衡计算的基准、范围

本次计算选用 1 小时为计算基准，以 0°C 作为基准温度。以冷却带为计算范围。

9.2 热平衡示意图

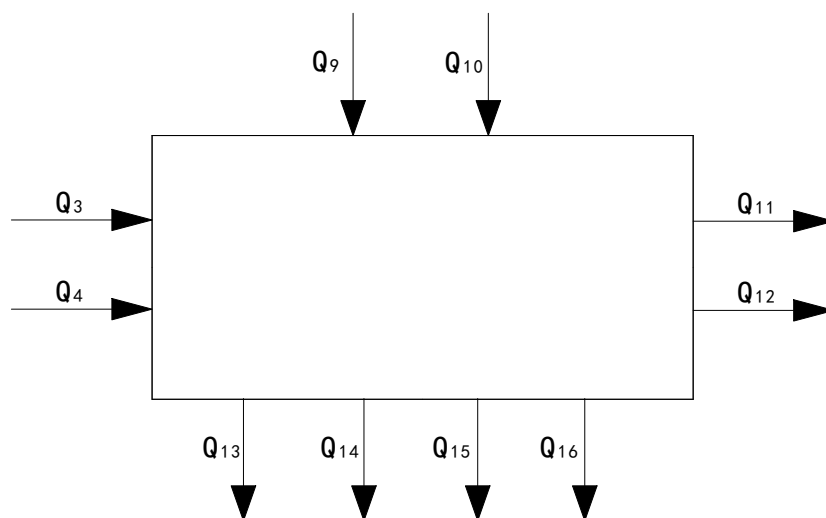


图 9-1 冷却带的热平衡示意图

图 9-1 为冷却带的热平衡示意图，图中各符号分别代表

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；

9.3 热收入项目

9.3.1 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 $Q_3=1857945.6$ (kJ/h)

9.3.2 砌板、支柱等窑具带入显热 Q_4

此项热量即为预热带和烧成带砌板、支柱等窑具带出热 $Q_4=1783192.32$ (kJ/h)

9.3.3 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。

$$Q_9=0.95 \times Q_6=606588.35182 \times 0.95=576258.93423 \text{ (kJ/h)}$$

9.3.4 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： $V_a=1.5V_x$ 。

空气的温度 $t_a=20^\circ\text{C}$ ，此时空气的平均比热 $c_a=1.3 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

则： $Q_{10}=V_a \times c_a \times t_a = V_a \times 1.3 \times 20 = 26 V_a \text{ (kJ/h)}$

9.4 热支出项目

9.4.1 制品带出显热 Q_{11}

出窑产品质量 $G_m=1228.8 \text{ kg}$

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

$$Q_{11}=G_m \times C_{11} \times t_{11}=1228.8 \times 80 \times 0.896=88080.384 \text{ (kJ/h)}$$

9.4.2 砌板、支柱等窑具带出显热 Q_{12}

出窑砌板、立柱质量 $G_b=1209.6 \text{ kg/h}$

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

$$Q_{12}=G_b \times C_{12} \times t_{12}=1209.6 \times 0.861 \times 80=83317.25 \text{ (kJ/h)}$$

9.4.3 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%，

$$Q_{13}=0.55 \times Q_9=0.55 \times 576258.93423=316942.41383 \text{ (kJ/h)}$$

9.4.4 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

9.4.4.1 1260—800℃段

该段长度为 9 米，窑外壁表面平均温度 80℃，窑内壁表面平均温度：
(1260+800)/2=1030℃

9.4.4.1.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下：

聚轻高铝砖，厚度 $\delta=230$ mm，导热系数 0.45 w/(m·℃)

轻质粘土砖，厚度 $\delta=230$ mm，导热系数 0.342 w/(m·℃)

硅酸铝纤维毡，厚度 $\delta=100$ mm，导热系数 0.24 w/(m·℃)；

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1030 - 80}{\frac{0.23}{0.45} + \frac{0.23}{0.342} + \frac{0.1}{0.24}} = 593.75 \text{ W/m}^2$$

不考虑车台面以下部分的窑墙散热，窑内高按 1215mm 计算，

则两侧窑墙散热量： $Q''_1 = 2 \times 593.75 \times 1.215 \times 9 \times 3.6 = 46747.125$ (kJ/h)

9.4.4.1.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下：

莫来石绝热砖，厚度 $\delta=230$ mm，导热系数 0.23 w/(m·℃)；

硅酸铝棉，厚度 $\delta=230$ mm，导热系数 0.24 w/(m·℃)；

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{1030 - 80}{\frac{0.23}{0.3} + \frac{0.23}{0.24}} = 550.72 \text{ W/m}^2$$

窑顶散热量： $Q''_2 = 550.72 \times 3.6 \times 9 \times 3.6 = 49961.3184$ (kJ/h)

所以，1210—800℃段的窑体散热总量为：

$$Q''_3 = Q''_1 + Q''_2 = 31657.1 + 33735.7 = 96708.4434 \text{ kJ/h}$$

9.4.4.2 800—80℃段

该段长度为 27.68 米，窑外壁表面平均温度 80℃，窑内壁表面平均温度：
(800+80)/2=440℃

9.4.4.2.1 窑墙部分散热计算

此部分用材料如下：

轻质保温砖，厚度 $\delta=345$ mm，导热系数 0.375 w/(m·℃)；

岩棉毡，厚度 $\delta=100\text{ mm}$ ，导热系数 $0.037\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ；

$$\text{热流 } q_1 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{440 - 80}{\frac{0.345}{0.375} + \frac{0.1}{0.037}} = 99.3\text{ W/m}^2$$

不考虑车台面以下部分的窑墙散热，窑内高按 1215mm 计算，

不考虑车台面以下部分的窑墙散热，窑内高按 1215mm 计算，

则两侧窑墙散热量： $Q''_4 = 2 \times 99.3 \times 1.215 \times 27.68 \times 3.6 = 24067.39\text{ (kJ/h)}$

9.4.4.2.2 窑顶部分散热计算

此部分用材料如下：

堇青莫来石板，厚度 $\delta = 20\text{ mm}$ ，导热系数 $0.2\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ；

硅酸铝棉，厚度 $\delta=230\text{ mm}$ ，导热系数 $0.24\text{ w/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ；

$$\text{热流 } q_2 = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{440 - 80}{\frac{0.02}{0.2} + \frac{0.23}{0.24}} = 340.26\text{ W/m}^2$$

窑顶散热量： $Q''_5 = 340.26 \times 27.68 \times 3.6 \times 3.6 = 94938.74\text{ (kJ/h)}$

所以，800—80℃段的窑体散热总量为：

$$Q''_6 = Q''_4 + Q''_5 = 24067.39 + 94938.74 = 119006.13\text{ (kJ/h)}$$

综上所述，冷却带窑体散失热量总和为：

$$Q_{14} = 96708.4434 + 119006.13 = 215714.57\text{ (kJ/h)}$$

9.4.5 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 (m^3/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 $q_{15} = 1.5V_x = V_a\text{ Nm}^3$ 。漏出空气忽略不记

T_{15} —抽走余热风的平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)；取 $T_{15} = 200^{\circ}\text{C}$

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

查表， $T_{15} = 250^{\circ}\text{C}$ 时，热空气的平均比热为： $C_{15} = 1.32\text{ KJ/(Kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$

$$\text{则： } Q_{15} = q_{15} \times C_{15} \times t_{15} = V_a \times 200 \times 1.32 = 264 V_a\text{ (kJ/h)}$$

9.4.6 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%。

9.5 列热平衡方程式

列出热平衡方程式

热收入=热支出，即：

$$\begin{aligned}
 Q_3 + Q_4 + Q_9 + Q_{10} &= Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15} + Q_{16} \\
 1857945.6 + 1783192.32 + 576258.93 + 26 V_a \\
 &= 88080.384 + 83317.25 + 316942.41383 + 215714.57 + 264 V_a + 5\% \\
 &\quad Q_{\text{收}}
 \end{aligned}$$

得应抽余热风 $V_a = 13800.6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，其中窑尾风量为 $9200.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，急冷风量为 $4600.2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

9.6 冷却带热平衡表

表 9-1 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	1857945.6	38.1	产品带出显热	88080.384	1.9
硼板、立柱带入显热	1783192.32	38.2	硼板、立柱带出显热	83317.25	1.8
窑车带入显热	576258.934	15.9	窑体散热	215714.57	3.3
急冷、窑尾风带入显热	358815.6	7.8	窑车带走和向车下散失显热	316942.4638	8.7
			抽热风带走显热	3643358.4	79.3
			其它散热	228810.62	5
合 计	4576212.45 42	100	合 计	4576223.640 5	100

分析：

$$Q = 4576223.6405 - 4576212.4542 = 11.1863$$

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，而热支出大于热收入是因为窑底冷风带入显热要大于现在的计算值。主要的热支出是抽出的热空气带走的显热，为了节能，提高热效率往往要充分利用。本设计将冷却带的余热用来干燥坯体。

10. 管道尺寸、阻力计算、烧嘴及风机选型

10.1 排烟系统的设计

10.1.1 排烟量计算

排烟系统需排除烟气量:

$$V_g = [V_g^0 + (\alpha_g - 1) \times V_a^0]x + V_m$$

$$= [12.758 + (2.5 - 1) \times 9.783] \times 161.4 + 6.044 \times 161.4 = 5407.46 \text{ m}^3/\text{h} = 1.50 \text{ m}^3/\text{s}$$

10.1.2 排烟口及水平支烟道尺寸

共有 14 对排烟口, 则每个排烟口的烟气流量为:

$$q_v = 1.50/28 = 0.054 \text{ m}^3/\text{s}$$

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:

$$A = 0.054/1.5 = 0.036 \text{ m}^2$$

排烟口取长 0.230m, 则宽为 0.16m, 考虑砖型, 取 5 层厚, 即 0.325m。

10.1.2.1.分烟管尺寸

取烟气在管内的流速为 10 m/s

$$\text{内径 } d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.50}{3.14 \times 10}} = 0.44 \text{ m}, \text{ 根据工程经验取直径为 } 450\text{mm}$$

10.1.2.2 支烟管尺寸

排烟段总计有 28 个支管排烟, 因此

$$\text{支管 } d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.50}{3.14 \times 10 \times 28}} = 0.08 \text{ m}, \text{ 根据工程经验取直径为 } 100\text{mm}$$

10.2 阻力计算

10.2.1 料垛阻力 h_i

根据经验, 取每米窑长料垛阻力为 1Pa, 零压位控制在第 11 节处。最后一对排烟口在第 5 节处, 每车位长 3m。则

$$h_i = (11-5) \times 3 \times 1 = 18 \text{ Pa}$$

10.2.2 位压阻力 h_g

烟气从窑炉至风机，高度升高 $H=1.5\text{m}$ ，烟气温度 100°C ，所以

$$\begin{aligned} h_g &= -H(\rho_a - \rho_g) \cdot g \\ &= -1.5 \times [1.29 \times 273 / (273 + 20) - 1.3 \times 273 / (273 + 100)] \times 9.8 \\ &= -3.68192\text{Pa} \end{aligned}$$

10.2.3 局部阻力 h_e

局部阻力系数 ζ 查得：

烟气从窑炉进入支管： $\zeta_1=0.5$

支烟道进入金属管道有 90° 转弯： $\zeta_2=2$

支烟管进入分烟管截面突增： $\zeta_3=0.7$

90° 急转弯： $\zeta_4=2$

分管进入烟囱时有三通管： $\zeta_5=3$

砌筑管道中烟气流速为 1.5Nm/s ，烟管中烟气流速 10Nm/s 计，烟气温度均按 100°C 计，虽在流动过程中烟气会有温降，但此时流速会略小，且取定的面积均比理论计算的偏大，故按此值算出的局部阻力只会略偏大，能满足实际操作需要。

$$\begin{aligned} h_e &= \xi_1 \frac{\omega_1^2}{2} \rho + \xi_{2-5} \frac{\omega_2^2}{2} \rho \\ &= 0.5 \times \frac{1.5^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+100}{273} + (2+2+0.7+3) \times \frac{10^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+100}{273} \\ &= 684.8\text{Pa} \end{aligned}$$

10.2.4 摩擦阻力 h_f

对非圆形通道应求当量直径 d ：

排烟支烟道的当量直径和长度

$$d = \frac{4 \times \text{通道截面积}}{\text{通道周边长}} = \frac{4 \times 0.23 \times 0.325}{2 \times (0.23 + 0.325)} = 0.269\text{m}$$

$$L = 0.23 + 0.33 = 0.56\text{m}$$

沿程阻力系数：金属管取 $\lambda_1=0.03$ ，砌筑管道取 $\lambda_2=0.05$ ，则有

$$\begin{aligned}
 h_f &= \lambda_1 \frac{\omega_1^2}{2} \rho \frac{L}{d} + \lambda_2 \frac{\omega_2^2}{2} \rho \left(\frac{L_1}{d_1} + \frac{L_2}{d_2} \right) \\
 &= 0.03 \times \frac{1.5^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273+100}{273} \times \frac{0.56}{0.269} + 0.05 \times \frac{10^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273+100}{273} \times \left(\frac{1.27}{0.1} + \frac{7}{0.2} \right) \\
 &= 211.94 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

10.2.5 烟囱阻力

烟囱尺寸

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi w}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.57}{3.14 \times 10}} = 0.45 \text{ m}$$

取直径为 450mm，长度为 10m

$$\begin{aligned}
 h &= -H(\rho_a + \rho_g) + \xi \frac{\omega^2}{2} \rho \frac{H}{d} + \frac{\omega^2}{2} \rho \\
 &= -10 \times \left(1.3 \times \frac{273}{273+20} - 1.30 \times \frac{273}{273+100} \right) + 0.03 \times \frac{10^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+100}{273} \times \frac{10}{0.45} \\
 &\quad + \frac{10^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+100}{273} \\
 &= 150.61 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

由于烟囱较矮，且烟气在烟囱内流速较大，烟囱造成的抽力尚不能克服烟囱本身的摩擦力及出口动压头损失，因此，烟囱成为起阻力作用的设备。

风机应克服的总阻力为

$$h_x = h_i + h_g + h_e + h_f + h = 18 - 3.68 + 684.8 + 211.94 + 150.61 = 1061.67 \text{ Pa}$$

10.3 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：

$$H = 1.30 \times h_x \times \frac{\rho_a}{\rho_g} = 1.3 \times 1252.24 \times \frac{1.29 \times \frac{273}{273+20}}{1.30 \times \frac{273}{273+170}} = 2872.8 \text{ Pa}$$

流量取储备系数为 1.3，风机排出烟气平均温度为 250℃，所以流量为

$$Q = 1.3 \times V_g \times (273+250)/273 = 1.3 \times 1.57 \times 523/273 = 3.91 \text{ m}^3/\text{s}$$

经过上面计算风机选型其参数如表 10—1 所示：

查《风机选用手册》选引风机 Y200L—4-30KW，其参数见表 10—1。

10.4 其它系统管道尺寸的确定及风机的选型

10.4.1 各管道尺寸的计算

10.4.1.1 助燃风管的计算

助燃风量 $V' = V_a \times X = 11.7396 \times 161.4 = 1894.8 \text{ Nm}^3/\text{h}$

实际助燃风量 $V = 8.57 \times 1894.8 \times (273 + 20) / 273 = 17428.1 \text{ m}^3/\text{h} = 4.84 \text{ m}^3/\text{s}$

(其中 8.57 为经验参数)

取助燃风在总管中的流速为 10m/s

助燃风总管内径: $d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 4.84}{3.14 \times 10}} = 0.78 \text{ m}$, 取 800mm。

助燃风分管内径: $d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 4.84}{3.14 \times 10 \times 40}} = 0.123 \text{ m}$, 取 130mm。

共有 56 个烧嘴, 取流速为 $w = 10 \text{ m/s}$ 。

助燃风支管内径, $d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 4.84}{3.14 \times 10 \times 56}} = 0.104 \text{ m}$ 取 110 mm。

10.4.1.2 燃料管的计算

燃料量 $1093.7 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。取燃气在总管中的流速为 10m/s。

燃气总管内径: $d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 1093.7}{3.14 \times 10 \times 3600}} = 0.19 \text{ m}$ 取 200mm

因为共有烧嘴 56 个 取分管 14 根

燃气分管内径: $d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 1093.7}{3.14 \times 140 \times 3600}} = 0.052 \text{ m}$ 取 60mm

10.4.1.3 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 $V_1 = 3066.8 \text{ Nm}^3/\text{h}$

实际鼓风量为

$$V'_1 = 3066.8 \times \frac{273 + 20}{273} = 3291.5 \text{ m}^3/\text{h} = 0.91 \text{ m}^3/\text{s}$$

a. 急冷风管总管内径:

急冷风管总管选用一根管子, 急冷风在总管中的流速为: $\omega = 10 \text{ m/s}$,

那么总管的内径为:

$$\text{总管 } D_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.91}{3.14 \times 10}} = 0.34 \text{ m, 取 } 350 \text{ mm}$$

b. 急冷风管分管内径:

急冷风在分管中的流速为: $\omega = 10 \text{ m/s}$,

急冷风管分管选用两根管子, 那么分管的内径为:

$$\text{分管 } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.91}{3.14 \times 10 \times 2}} = 0.24 \text{ m, 取 } 250 \text{ mm}$$

c. 急冷风管支管内径

急冷风在支管中的流速为: $\omega = 10 \text{ m/s}$,

急冷风管支管选用 24 根管子, 那么支管的内径为:

$$d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.91}{3.14 \times 10 \times 24}} = 0.069 \text{ m, 根据经验取 } 100 \text{ mm}。$$

10.4.1.4 急冷段抽热风管的计算

冷却带总抽风量: $9200.4 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 抽出温度为 300°C

$$\text{实际抽风量: } V'_2 = 9200.4 \times \frac{273 + 300}{273} = 19310.7 \text{ m}^3/\text{h} = 5.36 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{总管直径 } d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 5.36}{3.14 \times 10}} = 0.82 \text{ m, 取 } 900 \text{ mm}$$

$$\text{支管 (共有 8 对抽热风口) 直径 } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 5.36}{3.14 \times 10 \times 16}} = 0.203 \text{ m, 取 } 230 \text{ mm 抽}$$

热风管 16 支, 直径为 230mm。

10.4.1.5 封闭气幕管道尺寸的计算

封闭气幕总管直径取 230mm

10.4.1.6 窑尾鼓冷风管尺寸的计算

窑尾鼓冷风量为 $4600.2 \text{ Nm}^3/\text{h}$

$$\text{实际鼓风量 } V'_1 = 4600.2 \times \frac{273 + 20}{273} = 4937 \text{ m}^3/\text{h} = 1.37 \text{ m}^3/\text{s}$$

a. 鼓冷风总管直径:

气体在鼓冷风中的流速取 $w = 12 \text{ m/s}$

$$\text{总管 } D_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.37}{3.14 \times 12}} = 0.38 \text{ m, 取 } 400 \text{ mm}$$

$$\text{分管 } D_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.37}{3.14 \times 2 \times 12}} = 0.27 \text{ m}, \text{ 取 } 300 \text{ mm}$$

$$\text{支管 } D_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.37}{3.14 \times 20 \times 12}} = 0.084 \text{ m}, \text{ 取 } 90 \text{ mm}$$

10.4.2 各窑段的风机选型

10.4.2.1 急冷段急冷风机的选用

$$\text{风机鼓风量 } Q = 1.3 \times 3066.8 = 3986.84 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

比较各种风机性能后，采用 G6-43N₀6.3 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。

10.4.2.2 窑尾风机的选用

$$Q = 1.3 \times 4600.2 = 5980.26 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

10.4.2.3 缓冷段抽热风量

缓冷设两台风机，1 开 1 备。

10.4.2.4 助燃风机的选用

$$\text{助燃风机需鼓入风量 } Q = 1.3 \times V_a = 1.3 \times 13800.6 = 17940.78 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

10.4.2.5 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： $Q = 4600.2/2 = 2300.1 \text{ Nm}^3/\text{h} = 0.64 \text{ m}^3/\text{s}$
取直径为 150mm

表 10-1 风机参数表

用途	风机名称	机型	转速 r/min	全压 Pa	风量 m ³ /h	电动机	
						型号	功率/kW
搅拌风机	离心通风机	G6-43N ₀ 3.3	2840	1785	1474	Y190S-2	1.5
车下风机	离心通风机	G6-43N ₀ 6.3	1440	1652	5896	Y132S-4	5.5
排烟风机	锅炉引风机	Y8-39N ₀ 5.6	2900	3971	12214	Y200L1-2	30
助燃风机	离心通风机	G6-43N ₀ 6.3	1440	1797	3106	Y132S-4	5.5
快冷风机	离心通风机	G6-43N ₀ 8.5	1470	3271	13034	Y160M-4	22

抽热风机	锅炉引风机	Y4-73No9D	1450	1644	25976	Y180L-4	22
急冷风机	离心通风机	G6-43No6.3	1440	1652	5896	Y132S-4	5.5

10.5 烧嘴的选用：

由于全窑共有 56 个烧嘴，且每小时燃料的消耗量为 28.09m^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：

$$159.1 \times 1.5 / 56 = 4.26 \text{Nm}^3/\text{h}$$

则每个烧嘴的热负荷为

$$29.3 \times 36980 = 157594.23 \text{ kJ/h}$$

查《工业炉设计手册》，选用低压涡流式天然气烧嘴，其燃烧能力 $V=10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

10.5.1 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。

11 工程材料概算

11.1 窑体材料概算

11.1.1 轻质保温砖，规格：230×345×65mm

取窑墙的平均高度为 1.8m，全窑所砌筑的长度为 33+33=66mm，所以砌有保温砖的窑墙体积为

$$V=2 \times 0.23 \times 1.8 \times 66=54.648\text{m}^3$$

共需粘土砖数量为

$$54.648 / (0.345 \times 0.230 \times 0.065) = 10596 \text{ 块}$$

11.1.2 轻质粘土砖，规格：230×230×65mm

密度 $\rho = 1.0\text{g/cm}^3$ ，重烧线变化不大于 2% 的试验温度 1350℃，在全窑砌有厚度 230mm，全窑所砌筑的长度为 37m，窑体的平均身高为 1.8m，所以砌有粘土砖的窑墙体积为

$$V=2 \times 0.23 \times 1.8 \times 37=30.636\text{m}^3$$

共需粘土砖数量为

$$30.636 / (0.345 \times 0.230 \times 0.065) = 5940 \text{ 块}$$

11.1.4 莫来石绝热砖，规格：230×200×199mm

全窑所砌筑的长度为 37m，因为窑宽为 3.6m 故

$$V = 2 \times 0.23 \times 3.6 \times 37 = 30.636 \text{ m}^3$$

共需轻质莫来石绝热砖数量为

$$30.636 / (0.23 \times 0.2 \times 0.199) = 3347 \text{ 块}$$

11.1.5 聚轻高铝砖，规格：230×230×65mm

全窑所砌筑的长度为 37m，故

$$V = 2 \times 0.23 \times 1.8 \times 37 = 30.636 \text{ m}^3$$

共需聚轻高铝砖数量为

$$30.636 / (0.23 \times 0.230 \times 0.065) = 8910 \text{ 块}$$

11.1.7 堇青莫来石板 规格：500×300×20

全窑所砌筑的长度为 66m，故

$$V = 0.02 \times 3.6 \times 66 = 4.752 \text{ m}^3$$

共需堇青莫来石板数量为

$$4.752 / (0.5 \times 0.3 \times 0.02) = 1584 \text{ 块}$$

11.1.8 硅酸铝纤维毡

纤维直径 $2-4 \approx \mu\text{m}$ ，密度 $\rho = 260 \text{ kg/m}^3$ ，纤维长度约 50 mm ，在全窑窑墙与窑顶部分填充硅酸铝纤维，在窑顶全窑所填硅酸铝纤维长度为 103 m ，宽为 3.6 m ，所填棉的高为 0.23 m ，体积为： $V_1 = 3.6 \times 0.23 \times 103 = 85.284 \text{ m}^3$ 在窑墙所填硅酸铝纤维长度为 37 m ，宽为 0.1 m ，高为 1.8 m ，体积为： $V_2 = 2 \times 0.1 \times 1.8 \times 37 = 13.32 \text{ m}^3$

在窑车内填棉长为 2.7 m ，宽为 1.09 m ，高为 0.2 m ，在全窑的窑车数为 41 辆，预留全窑的 $1/3$ 窑车数为干燥和装车所用，因此总的窑车数为 $41 + 14 = 55$ 辆，得出硅酸铝纤维体积为： $V_3 = 2.7 \times 1.09 \times 0.2 \times 55 = 32.373 \text{ m}^3$

全窑所需硅酸铝纤维的总体积为： $V = V_1 + V_2 + V_3 = 85.284 + 13.32 + 32.373 = 130.977 \text{ m}^3$

11.1.9 岩棉毡

在窑墙所填硅酸铝纤维长度为 66 m ，宽为 0.1 m ，高为 1.8 m ，体积为：

$$V_2 = 2 \times 0.1 \times 1.8 \times 66 = 23.76 \text{ m}^3$$

11.1.10 含锆纤维毯，厚度 60 mm

每辆窑车内填含锆纤维毯长为 2.7 m ，宽为 1.09 m ，高为 0.06 m ，所以全部窑车所需的体积为 $2.7 \times 1.09 \times 0.06 \times 55 = 9.7119 \text{ m}^3$

11.1.11 含锆散棉

用于填充膨胀缝等其他缝、孔，窑墙的平均厚度为 0.35 m ，膨胀缝宽为 0.02 m ，高度为 1.8 m ，所以 $V = 0.35 \times 0.02 \times 1.8 \times 32 = 0.4 \text{ m}^3$

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。

11.1.12 其他材料

根据前面的计算，还需其它物体的数量为：

热电偶（含瓷管） 18 套；

烧嘴 56 只；

烧嘴砖 56 块；

看火孔（含瓷管和看火孔盖） 56 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；

11.2 钢材材料概算

由图纸中的详细计算，得出材料的规格、尺寸等，列于表 10-2 中；

表 10-2

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 ²	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 ²	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 ²	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

12 后 记

大学四年的学习生活就要告一段落了,我的毕业设计经过李杰老师的指导和自己的努力也即将完成。能够顺利的完成毕业设计,我要感谢指导老师李杰的指导以及同学们的帮助。

毕业设计不仅是对大学所学专业知识和专业基础的一次实际检验和巩固,更多的是走向工作岗位前的一次热身,和对自己能力的一种提高。设计就是要把理论知识与实际生产情况、具体技术结合起来,将所学到的知识能够融会贯通、熟练应用,并要求我们能够理论联系实际,培养我们的综合运用能力以及解决问题的能力。然而实际操作总比想象的困难,所以在做设计时遇到一些个难题,也就暴露了自身知识的缺漏。通过这次毕业设计使我看到了自己专业知识的缺陷与不足,确定在以后的学习中必须得更加的努力,做到脚踏实地,切勿眼高手低。

在这次毕业设计过程中,我学到更加丰富的专业知识,并且还培养了我更加认真的学习态度,也为以后走更远的路打下了良好的基础。通过这次毕业设计,使我明白学习是一个长期积累的过程,在以后的工作、生活中都应该不断的学习,努力提升自己知识和综合素质。

由于本人知识和能力的不足,加之时间有限,在毕业设计中不可避免的出现了一些纰漏之处以及不如人意的地方,在此诚恳地希望各位老师、诸位前辈、同学能够多多批评指正,本人将不胜感激!

13 参考文献

- [1] 周露亮.《课程设计指导书》.景德镇陶瓷学院,2008.9
- [6] 刘振群著.《陶瓷工业热工设备》.武汉理工大学出版社,1989
- [4] 胡国林,陈功备.《窑炉砌筑与安装》.武汉理工大学出版社,2005.5
- [2] 韩昭沧.《燃料及燃烧》(第 2 版).冶金工业出版社,1994.10
- [9] 王秉铨著.《工业炉设计手册》.机械工业出版社,2006.7
- [3] 李家驹.《日用陶瓷工艺学》.武汉工业大学出版社,1992.7
- [5] 杨世铭.《传热学》,第 2 版,高等教育出版社,1987.10
- [7] 沈慧贤,胡 道.《硅酸盐热工工程》.武汉工业大学出版社,1991.12
- [8] 孙 研.《通风机选型实用手册》.机械工业出版社,2000.1

14 浅谈隧道窑余热利用

生产陶瓷的一个重要过程是烧成，烧成是在窑炉中进行的。陶瓷生产的窑炉有连续式的（隧道窑）也有间隙式的（倒焰窑），不管是隧道窑还是倒焰窑，其热效率都比较低。效率低的原因除了燃烧损失、散热损失等原因外，重要的一点是排烟损失。隧道窑废气带走的热量损失约占总热量的 20%~40%，而倒焰窑废气带走的热量约占 30%~50%。因此回收窑尾废气的热量加以利用是提高窑炉效率的关键。国内隧道窑排烟温度一般在 200~300℃，也有高达 400℃，个别倒焰窑的排烟温度可高达 560℃。一方面窑炉排烟带走大量余热，另一方面为了干燥坯件，一些工厂又另外建造窑炉或锅炉产生热风 and 蒸汽以满足烘干坯件的要求。为了充分利用隧道窑的余热，下面从冷却带余热利用和高温烟气的再利用等方面来略谈其余热的利用。

1. 冷却带的余热利用情况

在新型隧道窑的冷却带，其余热的利用共分为二大部分，基本沿用传统的余热利用方法。其一是急冷区的热气，将其抽出后送至烧嘴用于助燃，另一部分是缓冷区的热气，将其抽出后直接送成型工段，用于该工段的坯体干燥。

2. 高温烟气的再利用情况

a. 高温喷嘴直接用烟气

在引进的隧道窑中，有很多是在预热带设置多对烧嘴以提高预热带温度。我们在研制新型隧道窑时注意吸收消化引进隧道窑先进的一面，不用烧煤气升温，而是把其中一对排烟口的高温，烟气引出后直接通过喷嘴喷入窑内，起到了引进隧道窑在该段设置低温烧嘴的同样的作用。

b. 预热带搅拌风

在总烟道中设置一组热交换器，把交换来的热空气抽出后直接送入预热带，与高温烟气在同截面的上、下火道的位置上分别进入到窑内，以调节控制预热带温度制度和压力制度。

c. 用于白坯的干燥和升温

为配合新型隧道窑的温度制度，我们在研制时在该窑的前方设置了一条长约 30.0m 的干燥隧道。经过热交换后的废烟气被排烟风机抽出后又被分为两部分送出，其中的一部分被送入干燥隧道的两侧墙的中空部分，实现对通过干燥隧道的白坯进行干燥和升温的目的。通过调节有关闸板，来控制通入干燥隧道的废烟气的量，从而达到控制隧道内温度的目的。

d.用于施釉工段的坯体干燥

从排烟风机中出来的另外一部分废烟气，被强制通过一条呈“非”字型的烟道，以地炕的形式对存放在其上方地表面上的素坯实施最后的干燥。烟道通过的整个室内部分为施釉工段，等待施釉的素坯全部在此处存放，同时，刚施过釉的白坯在此处等待装车，亦得到了初步干燥。

e.用于石膏模具的烘干

石膏模具烘干隧道设置在施釉工段厂房的墙外侧，经过施釉工段的烟气从烘干隧道的入口端进入设在隧道底部的烟道内，在设在出口端的烟囱及排烟风机的共同作用下通过两条并列的烘干隧道。经过一定的自然干燥期的各种石膏模具在烘干隧道内被强制性烘干，最后废烟气从烟囱里排放到大气中。

单位合格产品热耗是评价窑炉设计和操作的主要指标，在设计时应尽量降低无用热量，采用轻型的无窑车的，使用煤气为燃料的明焰露装的结构。在操作时应尽量降低离窑烟气的温度，降低烟气中的空气过剩系数，减少窑内温差，缩短烧成时间。把单位质量的热耗降至最合理的水平，使窑炉在最佳状态下操作。但是利用好余热就可以相应的降低热耗。现有的各种陶瓷烧成窑炉，或是排烟温度很高、或是因漏风严重，表观排烟温度虽不很高，但排烟量很大，造成排烟损失过大。所以有效的利用余热可以节能同时可以减少烟气排入到大气的量。

15 On the tunnel kiln waste heat recoverya.

An important process for production of ceramic is fired, firing is carried out in the furnace. Ceramics kilns are continuous in (tunnel kiln) has space-like (down draft kiln), whether the tunnel kiln, or down draft kiln, the thermal efficiency are relatively low. In addition to the reasons for the low efficiency of combustion loss, heat loss and other reasons, the important point is smoke damage. Tunnel kiln exhaust gas heat loss taken away by about 20% of total calories to 40% of down draft kiln exhaust heat away fuel consumption accounts for about 30% to 50%. Consequent recovery of exhaust heat kiln to be used to improve the efficiency of key furnace.

Domestic tunnel kiln exhaust gas temperature is generally 200 ~ 300 °C, there are up to 400 °C, individual down draft kiln exhaust gas temperatures up to 560 °C. On the one hand take away a lot of the furnace exhaust waste heat to dry and blank on the other hand, some factories has also built the furnace or boiler produces hot air and steam to meet the requirements of dry preforms.

In order to make full use of the tunnel kiln of heat, the following cooling with waste heat from gas use and reuse of high temperature and so on to briefly use the remaining heat

Cooling with waste heat utilization

In the new tunnel kiln cooling zone, the remaining heat is divided into two parts using the basic follow the traditional methods of waste heat utilization. One is the quench zone heat, be sent out after the burner for combustion, the other part is the slow cooling zone of the heat, be sent out directly after the second and third floors of the forming steps, the use of the Section of dried green body exercise.

Re-utilization of high temperature gas

a.High-temperature gas nozzle directly

The introduction of the tunnel kiln, there are many more than in the preheating zone settings to improve the preheating zone of the burner temperature. We pay attention to

when developing new tunnel kiln tunnel kiln to absorb and digest the introduction of the advanced side, do not burn gas to heat up, but a pair of exhaust port to which the high temperature, gas extraction and directly through the spray nozzle into the kiln, played the introduction of the tunnel set the temperature in the kiln burner section of the same role.

b. Warm air with stirring

The total set in a heat exchanger flue, the exchange came directly after the hot air out into the warm zone, and the high temperature gas in the same section, the position under the flue into the kiln, respectively, to adjust the control Preheat zone temperature system and the pressure system.

c. Drying and warming up for tofo

In line with the new tunnel kiln temperature regime, when we develop in front of the kiln to set up a stem of about 30.0m operating the tunnel. After the exhaust gas after heat exchange exhaust fan was out after being sent in two parts, one part is sent to drying on both sides of the tunnel wall of the hollow part, achieved through the drying tunnel for drying and warming tofo purposes. By adjusting the gate, to control operating through the tunnel into the dry amount of exhaust gas to achieve the purpose of controlling the temperature inside the tunnel.

d. Section of dried green body for glazing

Out from the exhaust fan in another part of the exhaust gas, was forced by a "non"-shaped flue, the form of ground-kang stored above the ground surface in its implementation of the final dry biscuit. Flue through the entire interior portion of glazing steps, wait for the glazing of biscuit all stored here, while just over glaze tofo facilities here waiting for loading, also received a preliminary drying.

e. For drying plaster molds

Plaster molds drying tunnel set in glaze Section of the lateral wall of plants, through the glazing section in the flue gas from the drying tunnel entrance set into the bottom of the flue gas in the tunnel, located at the exit of the chimney and exhaust fan interaction drying under par through two tunnels. After some natural drying plaster molds of all

kinds to be mandatory in the drying tunnel drying, the final exhaust gas emissions from the chimney into the atmosphere.

Units of qualified products to evaluate the kiln heat consumption design and operation of key indicators, should be designed to minimize unwanted heat, using a light non-kiln cars, using gas as the fuel-flame structure of exposed equipment. In the operation should be to minimize the temperature of flue gas from the kiln and reduce the flue gas excess air coefficient, reducing the kiln temperature to shorten the firing time. The reduced heat consumption per unit mass of the most reasonable level so that the furnace operation in top form. However, you can make good use of waste heat corresponding heat loss. Ceramic firing kiln various existing, or exhaust gas temperature is high, or because of serious leakage, and the apparent gas temperature while not very high,

However, large amount of smoke caused excessive smoke damage. Therefore, effective use of waste heat energy savings while reducing the amount of gas discharged into the atmosphere.