

景德镇陶瓷学院

毕 业 设 计 说 明 书

题目：天然气隧道窑设计

学 号：201030453101

姓 名：曹 若 侠

院（系）：科技艺术学院

专 业：热能与动力工程

指导教师：周 露 亮

完成日期：2014.05

摘 要

关键词：隧道窑、天然气、节能

为了降低全窑的热损失减小单位产品热耗，全窑均采用轻质耐火材料。燃料用天然气，对制品进行裸烧来强化窑炉内部传热，同时对高速烧嘴可进一步调节使窑内温度均匀提高成品率，从而达到节能的目的。

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

本设计特点：在提高产品质量的同时降低单位产品热耗，实现陶瓷行业上的“绿色、环保、节能”。

Abstract

In order to reduce the entire kiln the heat lose to reduce the unit product to consume hotly, the entire kiln uses the light quality fire-proof material. Because the fuel uses the natural gas is the clean fuel , to naked to burn to enhancing heat transfer inside the kiln products, simultaneously may further adjust to the high speed burner nozzle makes in the kiln the temperature to enhance the rate of finished products evenly, thus achieves the energy conservation the goal.

Is hot for the effective use haze, the section selects the method in front of the kiln stove which the disperser discharges fume, moreover uses in the slow cold section pulls out the hot air the way to cool the product, also may perform to the hot haze to use. Uses the computer automatic control to the entire kiln control to realize, both enhanced staff's working strength which the product rate of finished products and reduces, reduced the production cost.

This design characteristic: While improves the product quality to reduce the unit product to consume hotly, realizes in the ceramic profession “the green, the environmental protection, the energy conservation”

Key word: Tunnel kiln, natural gas, conservation

目 录

1 毕业设计任务书·····	3
2 烧成制度的确定·····	4
3 窑体主要尺寸计算·····	5
3.1. 棚板和立柱的选用·····	5
3.2. 窑长及各带长度的确定·····	5
4 窑体及工作系统的确定·····	7
4.1 窑体·····	7
4.2 工作系统·····	8
4.3 输送系统及附属装置·····	9
5 窑体材料和厚度·····	10
6 燃料燃烧计算·····	12
6.1 所需空气量·····	12
6.2 燃烧产生烟气量·····	12
6.3 燃烧温度·····	12
7 物料平衡计算·····	13
7.1 每小时烧成干制品的质量·····	13
7.2 每小时入窑干坯的质量·····	13
7.3 每小时欲烧成湿制品的质量·····	13
7.4 每小时蒸发的自由水的质量·····	13
7.5 每小时从精坯中产生的 CO ₂ 的质量·····	13
7.6 每小时从精坯中排除结构水的质量 G _{ip} ·····	13
7.7 窑具的质量 G _b ·····	14
8 预热带和烧成带的热平衡计算·····	15
8.1 确定热平衡计算的基准、范围·····	15

8.2	热平衡示意图	15
8.3	热收入项目	15
8.4	热支出项目	17
8.5	列热平衡方程式	22
8.6	预热带和烧成带热平衡表	23
9	冷却带的热平衡计算	24
9.1	确定热平衡计算的基准、范围	24
9.2	热平衡示意图	24
9.3	热收入项目	24
9.4	热支出项目	25
9.5	列热平衡方程式	28
9.6	冷却带热平衡表	29
10	管道尺寸、阻力计算、烧嘴及风机选型	30
10.1	排烟系统的设计	30
10.2	阻力计算	30
10.3	风机选型	32
10.4	其它系统管道尺寸的确定及风机的选型	32
11	工程材料概算	36
11.1	窑体材料概算	36
11.2	钢材材料概算	38
12	烧嘴的选用	39
12.1	选用烧嘴应注意的原则	39
13	后记	40
14	参考文献	41

1 景德镇陶瓷学院窑炉课程设计任务书

院（系） 科技艺术学院

2013 年 11 月

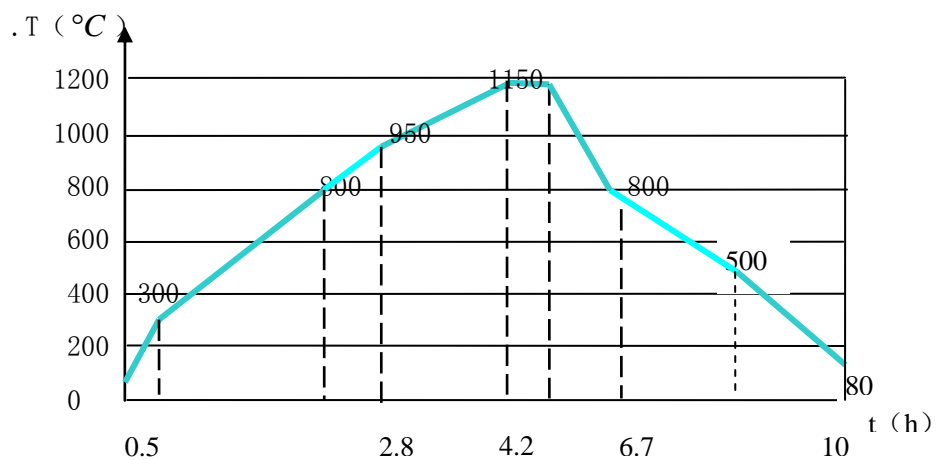
专业	热能与动力工程	班级	10 热工
学生姓名	曹若侠	指导教师	周露亮
题目	天然气隧道窑设计		
主要研究内容和设计技术参数： 1、生产能力：3.3 万件/年 2、产 品：陶缸 Φ550*500 15kg/件 3、烧成周期：烧成周 10 小时；最高烧成温度 1150℃（温度曲线自定） 4、合格率 ： 95% 5、燃 料：天然气 7、其他参数自定			
基本要求（含成果要求）： 1、 窑炉结构和工作系统合理，设计计算正确，独立完成，大胆创新 2、图纸清洗干净、规范齐全 图纸包括：窑体结构砌筑图、钢架结构图、管路布置安装图、异型砖图等 3、设计说明详细，含设计计算，材料概算等。说明书格式规范，A4 纸打印 4、负荷计算机绘图，外文应用等毕业设计要求			
工作进度计划： 第 4 周：整理资料，确定设计方案 第 5-6 周：设计计算，结构确定 第 7 周：调整设计方案，构思设计草图 第 8-15 周：绘图，描图 第 16-17 周：编写设计说明书，打印 第 18 周：答辩准备			

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℃—300℃	0.5 小时	预热带
300℃—800℃	1.8 小时	预热带
800℃—950℃	0.5 小时	预热带
950℃—1150℃	1.4 小时	烧成带
1150℃—1150℃	1 小时	烧成带（高火保温）
1150℃—800℃	1.5 小时	冷却带
800℃—500℃	1.8 小时	冷却带
500℃—80℃	1.5 小时	冷却带

烧成曲线如图 2.1 所示



3 窑体主要尺寸的确定

3.1 棚板和立柱的选用

棚板尺寸: $700 \times 700 \times 10 \text{ mm}$ 单重: 5 kg

支 柱: $50 \times 50 \times 150 \text{ mm}$ 单重: 0.937 kg

单个棚板质量: $700 \times 700 \times 10 \times 2.5 \times 10^{-6} = 12.5 \text{ kg}$

单个支柱质量: $50 \times 50 \times 150 \times 2.5 \times 10^{-6} = 0.937 \text{ kg}$

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 2 块棚板, 宽度方向上设置 1 块棚板, 在窑车高度方向上装 1 层。棚板间的间隙在长度方向上为 20 mm , 棚板与车边间距为 40 mm 。在宽度方向上为 20 mm , 棚板与车边间距为 35 mm 。

由此确定窑车车面尺寸为: 长: $700 \times 2 + 20 + 40 \times 2 = 1500 \text{ mm}$

宽: $700 \times 1 + 40 \times 2 = 780 \text{ mm}$

3.2.2 窑内宽的确定

一般而言, 窑车与窑墙尺寸为 $25 \sim 30 \text{ mm}$, 这里取间距为 30 mm 。则窑内宽为 $780 + 30 \times 2 = 840 \text{ mm}$

3.2.3 窑内高的确定

窑车的高度确定: 窑内车架高为 285 mm , 窑车车面高铝砖厚 270 mm , 轻质粘土砖厚 145 mm , 因此轨面到窑车车面的高度为 $285 + 270 + 145 = 700 \text{ mm}$, 窑车台面距棚板面高 300 mm 。为了避免火焰直接冲刷制品, 考虑到上部烧嘴安装尺寸, 制品装载顶面离窑顶内表面取 240 mm 。制品装车时共放 1 层, 则有效内高为 500 mm 。

窑内高为 $300 + 700 + 500 = 1500 \text{ mm}$

窑全高为 $240 + 1500 = 1740 \text{ mm}$

3.2.4 窑长的确定

装车装载量为 2 件每车， 所以装窑密度为 $2/(1.50)=1.3$ 件/ m

$$\frac{\text{生产任务} \times \text{烧成时间}}{\text{年工作日} \times 24 \times \text{成品率} \times \text{装窑密度}}$$

$$\text{窑长 } L = (33000 \times 10) / (330 \times 24 \times 0.95 \times 1.3) = 30.45 \text{ m}$$

窑内容车数： $n=30.45/1.5=20.3$ 辆 取 21 辆 窑长 $L=21 \times 1.5=31.5\text{m}$

3.2.5 各带长度的确定

根据烧成曲线：

$$\text{预热带长} = (\text{预热时间} \times \text{总长}) / \text{总烧成时间} = 2.8 \times 31.5 / 10 = 8.82\text{m}$$

$$\text{烧成带长} = (\text{烧成时间} \times \text{总长}) / \text{总烧成时间} = 2.4 \times 31.5 / 10 = 7.56\text{m}$$

$$\text{冷却带长} = (\text{冷却时间} \times \text{总长}) / \text{总烧成时间} = 4.8 \times 31.5 / 10 = 15.12\text{m}$$

3.2.6 窑车

窑内容车数 21 辆， 则

推车时间： $10 \times 60 / 21 = 28.6\text{min/车}$ ； 推车速度： $60 / 28.6 = 2.09$ 车/小时。

4 窑体及工作系统的确定

4.1 窑体

以 1.5 米为一个模数单元节，全窑 31.5 米，共有 21 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 1.5 米，含钢架膨胀缝。全窑共 21 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、含铬耐火纤维毡、轻质粘土砖、矿渣棉等耐火材料。窑墙砌筑在钢结构上。每隔 1.5 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。

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。一般在窑道顶

及侧墙留设测温孔安装热电偶。分别置于 1、3、5、7、9、11、12、14、17、19 车位中部各设置一处测温孔，共 10 支。

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 工作系统

4.2.1 预热带工作系统布置

预热带共 6 节，在窑头设置封闭气幕。窑顶设立管道，风源为窑内烟气。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—3 节箱体位近窑车台面的窑墙上设 4 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。

为提高预热带后段下部制品温度，进一步缩小预热带后带的上下温差，在 4—6 节下部设置高速调温烧嘴，每节设 2 只。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。

4.2.2 烧成带工作系统布置

第 7—11 节为烧成带在空间上大于预热带和冷却带，第 7—8 节在下部设置 2 只烧嘴，上部设置 2 只烧嘴，交错排列。而 9 节—10 节，每节上下均布置高速烧嘴，上部设置 3 只，下部设置 3 只，上下与两侧均呈交错布置。第 11 节在上

下部各设置 4 个烧嘴，这样有利于烧成带温度控制的调节。每个烧嘴的对侧窑墙上开观察孔。

4.2.3 冷却带工作系统布置

第 12—21 节为冷却带，按烧成工艺分为三段，第 12—14 节为急冷段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，上下喷风口交错设置。

第 15—18 节为缓冷段，一节 2 对抽热风管。

第 19—21 节为快冷段，在 19—20 节分上下两排设置 10 对快冷风管，气源为外界空气，21 节安置风机。

4.3 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

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:

排烟段 第 1-3 节: 厚 405mm, 为 230mm 轻质粘土砖、115mm 硅藻土砖、60mm 矿渣棉。

预热段 第 4-6 节: 厚 405mm, 为 230mm 轻质粘土砖、115mm 硅藻土砖、60mm 矿渣棉。

烧成段 第 7-11 节: 厚 455mm, 为 230mm 轻质高铝砖、115mm 轻质粘土砖、100mm 含铬耐火纤维毡。

急冷段 第 12-14 节: 厚 405mm, 为 230mm 轻质粘土砖、115mm 硅藻土砖、60mm 矿渣棉。

缓冷段 第 15-18 节: 厚 405mm, 为 230mm 轻质粘土砖、115mm 硅藻土砖、60mm 矿渣棉。

快冷段 第 19-21 节: 厚 405mm, 为 230mm 轻质粘土砖、115mm 硅藻土砖、50mm 矿渣棉。

窑顶部分:

排烟段 第 1-3 节: 厚 350mm, 为 250mm 轻质粘土吊顶砖、100mm 普通硅酸盐耐火纤维板。

预热段 第 4-6 节: 厚 350mm, 为 250mm 轻质粘土吊顶砖、100mm 普通硅酸盐耐火纤维板。

烧成段 第 7-11 节: 厚 450mm, 为 250mm 轻质粘土吊顶砖、100mm 含铬耐火纤维毡、100 mm 普通硅酸盐耐火纤维板。

急冷段 第 12-14 节: 厚 350mm, 为 250mm 轻质粘土吊顶砖、100mm 普通硅酸盐耐火纤维板。

缓冷段 第 15-18 节: 厚 350mm, 为 250mm 轻质粘土吊顶砖、100mm 普通硅酸盐耐火纤维板。

快冷段 第 19-21 节：厚 350mm，为 250mm 轻质粘土吊顶砖、100mm 普通硅酸盐耐火纤维板。

6 燃料燃烧计算

6.1 所需空气量

所用燃料为天然气。

$$\text{理论空气量 } V_a^0 = (0.264 \times Q_{\text{net}}) / 1000 + 0.02 = 9.513 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$\text{则理论需氧量 } L_a^0 = V_a^0 / 0.21 = 0.299 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$\text{取空气过剩系数 } n=1.4, \text{ 则实际空气量 } V_a = 1.4 \times 9.513 = 13.318 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3。$$

6.2 燃烧产生烟气体量

$$\text{理论烟气体量: } V_g^0 = (\text{CO} + \text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{N}_2) \times 0.01 + 0.79 \quad V_a^0 = 10.544 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

$$\text{实际烟气体量为: } V = V_g^0 + (n-1) V_a^0 = 10.544 + (1.4-1.00) \times 9.513 = 14.394 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

6.3 燃烧温度

设计任务书给出燃料的低热值 $Q_{\text{net}}=35960 \text{ KJ}/\text{Nm}^3$ 。

$$\text{理论燃烧温度 } t = (Q_{\text{net}} + V_a C_a t_a + C_f T_f - Q_{\text{分}}) / (V_c)$$

估计理论燃烧温度为 1600°C 。查表在 $t=1700^\circ\text{C}$ 时的烟气比热为 $C=1.424+0.000105 \times 1600=1.592 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 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 $C_f=1.58 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 代入公式得

$$t = (35960 + 1.459 \times 1.30 \times 20 + 1.58 \times 20) / (14.394 \times 1.592) = 1572^\circ\text{C}$$

相对误差为: $(1600-1572)/1600 < 5\%$, 认为合理。

取炉温系数 $\eta=0.75$, 则实际燃烧温度为 $t_p = \eta t = 0.75 \times 1572 = 1479^\circ\text{C}$, 比最高烧成温度 1150°C 高, 所选燃料合理。

7 物料平衡计算

坯料组成(%)：

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	I. L
70.10	19.65	0.25	0.45	1.05	1.03	1.75	5.72

7.1 每小时烧成干制品的质量

$$G_{\text{干}} = \text{推车速度} \times \text{每车载重} = 2.09 \times 30 = 62.7 \text{ kg/h}$$

7.2 每小时入窑干坯的质量

$$G_I = G_{\text{干}} \cdot \frac{100}{100 - IL} = 62.7 \times 100 / (100 - 5.72) = 66.51 \text{ kg/h}$$

7.3 每小时欲烧成湿制品的质量

$$G_{\text{湿}} = G_I \cdot \frac{100}{100 - w} = 66.51 \times 100 / (100 - 0.5) = 66.84 \text{ kg/h}$$

7.4 每小时蒸发的自由水的质量

$$G_{\text{水}} = G_{\text{湿}} - G_I = 66.84 - 66.51 = 0.33 \text{ kg/h}$$

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

$$G_{\text{CaO}} = G_I \cdot \text{CaO}\% = 66.51 \times 0.25\% = 0.166 \text{ kg/h}$$

$$G_{\text{MgO}} = G_I \cdot \text{MgO}\% = 66.51 \times 0.45\% = 0.299 \text{ kg/h}$$

7.5.2 产生的 CO₂ 质量

$$G_{\text{CO}_2} = G_{\text{CaO}} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} + G_{\text{MgO}} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{MgO}}} = 0.459 \text{ kg/h}$$

7.6 每小时从精坯中排除结构水的质量 G_{ip}

$$G_{\text{ip}} = G_I \times IL\% - G_{\text{CO}_2} = 66.51 \times 5.72\% - 0.459 = 3.345 \text{ kg/h}$$

7.7 窑具的质量 G_b

单个棚板质量: $700 \times 700 \times 10 \times 2.5 \times 10^{-6} = 12.5 \text{ kg}$

单个支柱质量: $50 \times 50 \times 150 \times 2.5 \times 10^{-6} = 0.937 \text{ kg}$

棚板总质量: $2 \times 12.5 = 25 \text{ kg}$

支柱总质量: $2 \times 4 \times 0.937 = 7.496 \text{ kg}$

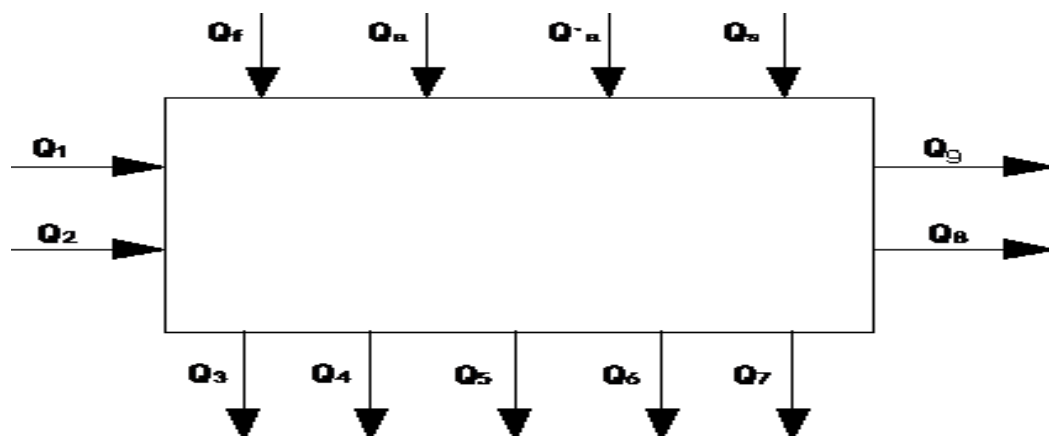
窑具的质量: $G_b = (25 + 7.496) \times 2.09 = 67.917 \text{ kg/h}$

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



上图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 —砌板、支柱等窑具带入显热；

Q_3 —产品带出显热；

Q_4 —砌板、支柱等窑具带出显热；

Q_5 —窑墙、顶总散热；

Q_6 —窑车蓄热和散失热量；

Q_7 —物化反应耗热；

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)； $G_1=66.51\text{Kg/h}$ ；

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， $C_1=0.86\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot^\circ\text{C})$ ；

$$Q_1 = G_1 C_1 T_1 = 66.51 \times 0.86 \times 20 = 1143.97 \quad (\text{kJ/h})$$

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_2 —入窑硼板、支柱等窑具质量 (Kg/h)； $G_2=67.917\text{Kg/h}$ ；

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：

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

$$Q_2 = G_2 C_2 T_2 = 67.917 \times 0.966 \times 20 = 1312.16 \quad (\text{kJ/h})$$

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：

$$Q_{\text{net,ar}} = 35.96 \text{MJ}/\text{Nm}^3$$

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 时天然气比热容 $C_f=1.58 \text{KJ}/(\text{Kg}\cdot^\circ\text{C})$ ；

X —设每小时发生炉煤气的消耗量为 $X \text{ (m}^3/\text{h)}$ ；

$$Q_f = (Q_{\text{net,ar}} + T_f C_f) X = (35960 + 20 \times 1.58) X = 35991.6 X \quad \text{kJ/h}$$

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 (m³/h)； 前面燃烧部分计算得： $q_v = V_a \cdot X = 13.318 X \text{ (m}^3/\text{h)}$ ；

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: $C_a=1.30 \text{ KJ}/(\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

$$Q_a=q_v C_a T_a=13.318x \times 1.30 \times 20=346.268x \quad (\text{kJ/h})$$

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 $V_a^0=9.513\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$

烧成带燃料燃烧时空气过剩系数 $a_f=1.3$ 。

$$V'_a=x \times (a_g - a_f) \times V_a^0=x(2.5-1.3) \times 9.513=11.4156x \quad (\text{Nm}^3/\text{h})$$

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:

$$Q'_a=q'_v \times C'_a \times t'_a=11.4156x \times 1.30 \times 20=296.81x \quad (\text{kJ/h})$$

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: $V_s=0.6q_v=0.6 \times 13.318x=7.99x \quad (\text{Nm}^3/\text{h})$, 设 $t_s=20^{\circ}\text{C}$, 查得 $C_s=1.30 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$,

$$Q_s=V_s \times C_s \times t_s=7.99x \times 1.30 \times 20=207.74x \quad (\text{kJ/h})$$

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: $G_m=62.7\text{kg/h}$

出烧成带产品温度: $t_3=1150^{\circ}\text{C}$

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: $Q_3=G_m \times C_3 \times t_3=62.7 \times 1150 \times 1.20=86526 \quad (\text{kJ/h})$

8.4.2 棚板、支柱等窑具带出显热 Q_4

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

棚板、立柱质量: $G_4 = 67.917 \text{ kg/h}$

出烧成带棚板、立柱温度: $T_4 = 1150^\circ\text{C}$

此时棚板、立柱的平均比热:

$$C_4 = 0.84 + 0.000264t = 0.84 + 0.000264 \times 1150 = 1.144 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$Q_4 = G_4 \times C_4 \times T_4 = 67.917 \times 1150 = 78104.55 \text{ (kJ/h)}$$

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 $V_s = 7.42x \text{ (Nm}^3/\text{h)}$

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 250°C

此时烟气比热 $C_g = 1.45025 \text{ kJ/(Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

$$\begin{aligned} Q_g &= q_g \times C_g \times t_g = \{[10.544 + (2.5 - 1) \times 9.513]x + 7.42x\} \times 1.45 \times 250 \\ &= 11684.64x \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

8.4.4 窑墙、窑顶散失热量 Q_5

根据窑体砌筑材料的不同, 将预热带和烧成带按不同材料与温度段将它们分为五

段, 分别按前述方法进行多层墙壁稳定传热计算 $Q = q \cdot F$ $q = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}$

各种材料的导热系数查阅陶瓷工业窑炉附录一(筑炉材料导热系数计算式)。

根据所处温度不同将预热带和烧成带分成三段 $20 \sim 300^\circ\text{C}$, $300 \sim 800^\circ\text{C}$, $800 \sim 950^\circ\text{C}$, $950 \sim 1150^\circ\text{C}$

所用材料的导热系数:

矿渣棉: $0.05 + 0.000198 \cdot t$

硅藻土砖: $0.198 + 0.000268 \cdot t$

轻质粘土(吊顶)砖: $0.291 + 0.000256 \cdot t$

轻质高铝(吊顶)砖: $0.656 + 0.000081 \cdot t$

含铬耐火纤维毡: $0.027 + 0.000137 \cdot t - 2.2 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 9.314 \cdot 10^{-11} \cdot t^3$

轻质高铝吊顶砖: $0.0033 + 0.00108 \cdot t + 1.4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$

$20 \sim 300^\circ\text{C}$, 共 3 节, 4.5m

$$\text{窑内壁平均壁温 } t_1 = \frac{20 + 300}{2} = 160^\circ\text{C}$$

轻质粘土砖 $\lambda_1 = 0.291 + 0.000256 \times 160 = 0.33 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.198 + 0.000268 \times 160 = 0.24 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

矿渣棉的 $\lambda_3 = 0.05 + 0.000198 \times 160 = 0.08 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 62.30 \text{ w/m}^2$$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.291 + 0.000256 \times 160 = 0.33 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

普通硅酸盐耐火纤维板

$\lambda_2 = 0.033 + 1.08 \times 10^{-3} \times 160 + 1.4 \times 10^{-7} \times 160^2 = 0.21 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = 97.26 \text{ w/m}^2$$

300~800℃, 共3节, 4.5m

窑内壁平均壁温 $t = (300 + 800) / 2 = 550^\circ\text{C}$,

轻质粘土砖 $\lambda_1 = 0.291 + 0.000256 \times 550 = 0.43 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.198 + 0.000268 \times 550 = 0.35 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

矿渣棉的 $\lambda_3 = 0.05 + 0.000198 \times 550 = 0.16 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 411.29 \text{ w/m}^2$$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.291 + 0.000256 \times 550 = 0.43 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$

普通硅酸盐耐火纤维板

$$\lambda_2 = 0.033 + 1.08 \times 10^{-3} \times 550 + 1.4 \times 10^{-7} \times 550^2 = 0.67 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = 6898.01 \text{ w/m}^2$$

800~950℃，共1节，1.5m

窑内壁平均壁温 $t = (950 + 800) / 2 = 875^\circ\text{C}$ ，

$$\text{轻质粘土砖 } \lambda_1 = 0.291 + 0.000256 \times 875 = 0.5 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{硅藻土砖 } \lambda_2 = 0.198 + 0.000268 \times 875 = 0.42 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{矿渣棉的 } \lambda_3 = 0.05 + 0.000198 \times 875 = 0.21 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙：

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 819.01 \text{ w/m}^2$$

窑顶：

$$\text{轻质粘土吊顶砖 } \lambda_1 = 0.291 + 0.000256 \times 875 = 0.5 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

普通硅酸盐耐火纤维板

$$\lambda_2 = 0.033 + 1.08 \times 10^{-3} \times 875 + 1.4 \times 10^{-7} \times 875^2 = 1.08 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = 1409.06 \text{ w/m}^2$$

950~1050℃，共3节，4.5m

窑内平均壁温 1000°C

$$\text{轻质粘土砖 } \lambda_1 = 0.291 + 0.000256 \times 1000 = 0.74 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{硅藻土砖 } \lambda_2 = 0.198 + 0.000268 \times 1000 = 0.55 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{矿渣棉的 } \lambda_3 = 0.05 + 0.000198 \times 1000 = 0.26 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

取窑外壁平均温度 $t_a = 80^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 982.31 \text{ w/m}^2$$

窑顶:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 836.36 \text{ w/m}^2$$

1050~1150℃, 共 2 节, 3m

窑内平均壁温 1100℃

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 1155.24 \text{ w/m}^2$$

窑顶:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 1000 \text{ w/m}^2$$

计算结果列于表。其中散热面积是以窑内面积计算。

长度	4.5	3	1.5	4.5	3
节位置	1-3	4-5	6	7-9	10-11
温度 (℃)	20-300	300-800	800-950	950-1050	1050-1150
窑墙热流密 (w-m)	62.30	411.29	819.01	982.31	1155.24
单侧窑墙散热面积 (m ²)	6.75	4.5	2.25	6.75	4.5
窑墙散热量 (kJ/h)	3027.78	13325.79	13267.96	47740.27	31191.48
窑顶热流密度(w-m)	97.26	698.01	1409.06	836.36	1000
散热面积 (m ²)	7.425	4.95	2.475	7.785	5.25
窑顶散热量 (kJ/h)	2599.76	12438.54	12554.73	23439.83	18900

8.4.5 窑车蓄热 Q_8 . 其它热量散失 Q_6

根据经验数据, 取热收入的 5%。

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 $G_w = 0.33 \text{ kg/h}$

烟气离窑的温度 $t_g = 250^\circ\text{C}$ 。制品中 Al_2O_3 含量为 19.65%

则可得: $Q_w = 0.33 \times (2490 + 1.93 \times 250) = 980.93 \text{ (kJ/h)}$

8.4.6.2 结构水脱水吸热 Q_w'

$$Q_w' = 3.345 \times 6700 = 22411.5 \text{ kJ/kg}$$

8.4.6.3 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); $G_1 = 66.51 \text{ Kg/h}$;

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;

$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 19.65\%$;

$$Q_d = G_1 \times 2100 \times w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 66.51 \times 2100 \times 19.65\% = 27445.35 \text{ (kJ/h)}$$

则物化反应总耗热为:

$$Q_7 = 980.93 + 22411.5 + 27445.35 = 50837.78 \text{ (kJ/h)}$$

8.5 列热平衡方程式

由热平衡方程: 热收入=热支出, 有

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

$$\text{解得 } x = 17.335 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

单位燃耗: $x = 17.335 \text{ (m}^3/\text{h)}$

由于单位时间产量 $G = 62.7 \text{ Kg/h}$, $Q_d = 35960 \text{ (kJ/m}^3)$

单位热耗: $= 9942.05 \text{ (KJ/Kg)}$

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	1143.97	0.18	产品带走显热	86526	13.88
燃料化学显热	616980.39	97.80	烟气带走显热	202552.54	32.11
助燃空气显热	6002.59	0.89	窑墙、窑顶带 走显热	178486.14	28.29
漏入空气显热	5145.20	0.81	物化反应耗热	50837.78	8.06
棚板、立柱带 入显热	1312.16	0.29	棚板、立柱带 出显热	78104.55	12.38
气幕显热	207.74	0.03	其它热损失	33289.22	5.28
总 计	630789.05	100	总 计	630790.54	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。

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

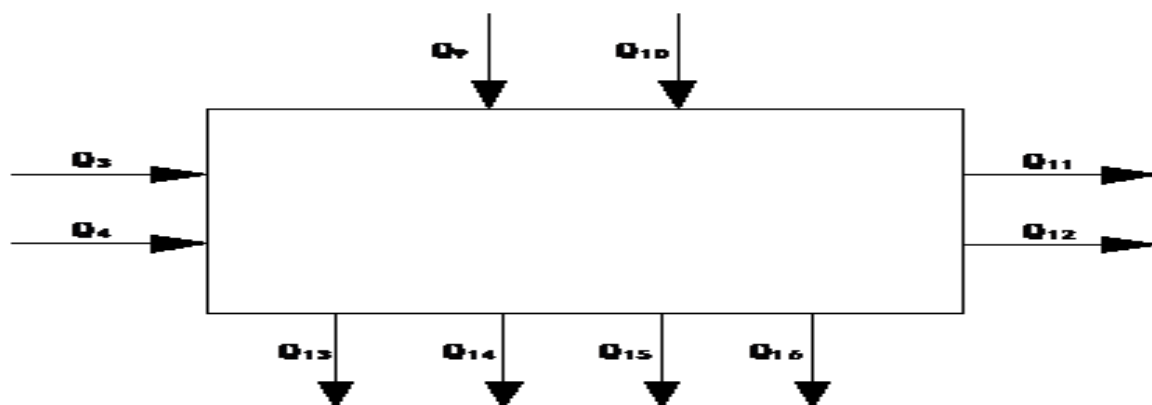


图 9-1 冷却带的热平衡示意图

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_8 —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 $Q_3=86526$ (kJ/h)

9.3.2 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 $Q_4=78104.55$ (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。

$$Q_9=0.95 \times Q_6=2749.69 \times 0.95=2612.21 \text{ (kJ/h)}$$

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

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

9.4 热支出项目

9.4.1 制品带出显热 Q_{11}

出窑产品质量 $G_m=62.7 \text{ kg/h}$

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

$$Q_{11}=G_m \times C_{11} \times t_{11}=62.7 \times 80 \times 0.896=4493.39 \text{ (kJ/h)}$$

9.4.2 棚板、支柱等窑具带出显热 Q_{12}

出窑棚板、立柱质量 $G_b=67.917 \text{ kg/h}$

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

$$Q_{12}=G_b \times C_{12} \times t_{12}=67.917 \times 0.861 \times 80=4678.12 \text{ (kJ/h)}$$

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%，

$$Q_{13}=0.55 \times Q_9=0.55 \times 2612.21=1436.72 \text{ (kJ/h)}$$

9.4.4 窑墙、顶总散热 Q_{14}

按前述方法进行多层墙壁稳定传热计算 $Q=q \cdot F$ $q = \frac{t_1 - t_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}$ 各种
材料的导热系数查阅陶瓷工业窑炉附录一（筑炉材料导热系数计算式）。

1150~800℃，共 3 节，4.5m

$$\text{窑内壁平均壁温 } t_1 = \frac{1150 + 800}{2} = 975^\circ\text{C}$$

轻质粘土砖 $\lambda_1 = 0.54 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.46 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

矿渣棉的 $\lambda_3 = 0.24 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙：

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 1009.8 \text{ W/m}^2$$

窑顶：

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.54 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

普通硅酸盐耐火纤维板 $\lambda_2 = 0.27 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = 1122 \text{ W/m}^2$$

800~500℃，共 4 节，6m

窑内壁平均壁温 $t = (800 + 500) / 2 = 650^\circ\text{C}$ ，

轻质粘土砖 $\lambda_1 = 0.46 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.37 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

矿渣棉的 $\lambda_3 = 0.18 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 533.14 \text{ W/m}^2$$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.46 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

普通硅酸盐耐火纤维板 $\lambda_2 = 0.16 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = 522.05 \text{ W/m}^2$$

500~80℃, 共 3 节, 4.5m

窑内壁平均壁温 $t = (500 + 80) / 2 = 290^\circ\text{C}$,

轻质粘土砖 $\lambda_1 = 0.36 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

硅藻土砖 $\lambda_2 = 0.28 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

矿渣棉的 $\lambda_3 = 0.11 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

窑外壁平均壁温取 $t_a = 40^\circ\text{C}$

窑墙:

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = 157.23 \text{ W/m}^2$$

窑顶:

轻质粘土吊顶砖 $\lambda_1 = 0.36 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

普通硅酸盐耐火纤维板 $\lambda_2 = 0.76 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

平均热流密度

$$q = \frac{t_1 - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = 302.65 \text{ w/m}^2$$

根据各处的材料,并考虑温度范围不能太大,将窑墙分为三段计算其向外散热窑墙、窑顶总散热,各段窑体散热结果如下表

长度	4.5	6	4.5
节位置	12-14	15-18	19-21
温度 (°C)	1150-800	800-500	500-80
窑墙热流密度 (w-m)	1009.8	533.14	157.23
单侧窑墙散热面 (m ²)	6.75	9	6.75
窑墙散热量 (kJ/h)	49076.28	34547.47	7641.37
窑顶热流密度(w-m)	1122	522.05	302.65
散热面积 (m ²)	7.425	9.9	7.425
窑顶散热量 (kJ/h)	29991.06	1860 5.86	8089.83

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 (m³/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 (°C); 取 $T_{15}=200^\circ\text{C}$

C_{15} —抽走余热风的平均比热 (KJ/ (Kg · °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%。

$$Q_{16} = (Q_3 + Q_4 + Q_9 + Q_{10}) * 5\% = 4468.44 + 1.3 V_a (kJ/h)$$

9.5 列热平衡方程式

列出热平衡方程式

热收入=热支出，即：

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

得应抽余热风 $V_a = 256.12 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，其中窑尾风量为 $170.75 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，急冷风量为 $85.37 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

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	86526	49.88	产品带出显热	4493.39	2.59
棚板、立柱带入显热	78104.55	45.03	棚板、立柱带出显热	4678.12	2.69
窑车带入显热	2312.21	1.50	窑体散热	94898.65	54.71
急冷、窑尾风带入显热	6659.12	3.59	窑车带走和向车下散失显热	1436.72	0.83
			抽热风带走显热	63595.68	36.42
			其它散热	4501.79	2.76
合 计	173601.88	100	合 计	173604.26	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，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:

$$V_g = [V_g^0 + (a_g - 1) \times V_a^0] X + V_s$$

$$= [10.544 + (2.5 - 1) \times 9.513] \times 23.24 + 20.92 = 597.59 \text{ m}^3/\text{h} = 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$$

10.1.2 排烟口及水平支烟道尺寸

共有 4 对排烟口, 则每个排烟口的烟气流量为:

$$q_v = 0.16 / 8 = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$$

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:

$$A = 0.02 / 1.5 = 0.037 \text{ m}^2$$

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

$$\text{内径 } d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.16}{3.14 \times 10}} = 0.14 \text{ m}, \text{ 根据工程经验取直径为 } 140 \text{ mm}$$

10.1.2.2 支烟管尺寸

排烟段总计有 8 个支管排烟, 因此

$$\text{支管 } d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.16}{3.14 \times 10 \times 8}} = 0.05 \text{ m}, \text{ 根据工程经验取直径为 } 100 \text{ mm}$$

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 3 节处。最后一对排烟口在第 1 节处, 每车位长 1.5m。则

$$h_i = (3-1) \times 1.5 \times 1 = 3 \text{ Pa}$$

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 250°C ，所以

$$\begin{aligned} h_g &= -H(\rho_a - \rho_g) \cdot g \\ &= -1.5 \times [1.29 \times 273 / (273+20) - 1.3 \times 273 / (273+250)] \times 9.8 \\ &= -7.56 \text{ Pa} \end{aligned}$$

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： $\zeta_2=1.1$

支烟管进入分烟管截面突增： $\zeta_3=0.6$

90° 急转弯： $\zeta_4=1.1$

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 10 Nm/s 计，烟气温度均按 250°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。

$$\begin{aligned} h_e &= \xi_1 \frac{\omega_1^2}{2} \rho + \xi_{2-5} \frac{\omega_2^2}{2} \rho \\ &= 0.5 \times \frac{1.5^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+250}{273} + (1.1+1.1+0.6+3) \times \frac{10^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+250}{273} \\ &= 723.6 \text{ Pa} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} h_f &= \lambda_1 \frac{\omega_1^2}{2} \rho \frac{L}{d} + \lambda_2 \frac{\omega_2^2}{2} \rho \left(\frac{L_1}{d_1} + \frac{L_2}{d_2} \right) \\ &= 0.03 \times \frac{1.5^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273+250}{273} \times \frac{0.56}{0.269} + 0.05 \times \frac{10^2}{2} \times 1.3 \times \frac{273+250}{273} \times \left(\frac{1.27}{0.1} + \frac{7}{0.2} \right) \end{aligned}$$

=297Pa

10.2.5 烟囱阻力

烟囱尺寸

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi w}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.16}{3.14 \times 10}} = 0.14 \text{ m}$$

取直径为 140mm，长度为 10m

$$\begin{aligned} h &= -H(\rho_a + \rho_g) + \xi \frac{\omega^2}{2} \rho \frac{H}{d} + \frac{\omega^2}{2} \rho \\ &= -10 \times (1.29 \times \frac{273}{273+20} - 1.30 \times \frac{273}{273+250}) + 0.03 \times \frac{10^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+250}{273} \times \frac{10}{0.65} \\ &\quad + \frac{10^2}{2} \times 1.30 \times \frac{273+250}{273} \\ &= 227.2 \text{ Pa} \end{aligned}$$

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

$$h_x = h_i + h_g + h_e + h_f + h = 3 - 7.65 + 723.6 + 297 + 227.2 = 1243.24 \text{ Pa}$$

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：

$$H = 1.30 \times h_x \times \frac{\rho_a}{\rho_g} = 1.3 \times 1243.24 \times \frac{1.29 \times \frac{273}{273+20}}{1.30 \times \frac{273}{273+170}} = 2852.8 \text{ Pa}$$

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 $V' = V_a \times K = 13.318 \times 23.24 = 309.51 \text{ Nm}^3/\text{h}$

实际助燃风量 $V = 8.57 \times 309.51 \times (273 + 20) / 273 = 2846.8 \text{ m}^3/\text{h} = 0.79 \text{ m}^3/\text{s}$ (其中 8.57 为经验参数)

取助燃风在总管中的流速为 10 m/s

助燃风总管内径: $d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.79}{3.14 \times 10}} = 0.316 \text{ m}$, 取 350 mm 。

助燃风分管内径: $d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.79}{3.14 \times 10 \times 20}} = 0.071 \text{ m}$, 取 100 mm 。

共有 34 个烧嘴, 取流速为 $w = 10 \text{ m/s}$ 。

助燃风支管内径 $d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.79}{3.14 \times 10 \times 34}} = 0.054$, 取 60 mm 。

10.4.1.2 燃料管的计算

燃料量 $23.24 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。取燃气在总管中的流速为 10 m/s 。

燃气总管内径: $d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 23.24}{3.14 \times 10 \times 3600}} = 0.089 \text{ m}$ 取 100 mm

因为共有烧嘴 34 个 取分管 9 根

燃气分管内径: $d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 23.24}{3.14 \times 90 \times 3600}} = 0.011 \text{ m}$ 取 20 mm

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 $V_1 = 56.92 \text{ Nm}^3/\text{h}$

实际鼓风量为

$$V'_1 = 56.92 \times \frac{273 + 20}{273} = 61.09 \text{ m}^3/\text{h} = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$$

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:

总管 $D_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.017}{3.14 \times 10}} = 0.047 \text{ m}$, 取 50 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：

$$\text{分管 } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.017}{3.14 \times 10 \times 2}} = 0.33 \text{ m}, \text{ 取 } 40 \text{ mm}$$

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：

$$d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.017}{3.14 \times 10 \times 24}} = 0.009 \text{ m}, \text{ 根据经验取 } 10 \text{ mm}。$$

10.4.1.4 急冷段抽热风管的计算

冷却带总抽风量： $170.75 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，抽出温度为 300°C

$$\text{实际抽风量： } V'_2 = 170.75 \times \frac{273+300}{273} = 358.39 \text{ m}^3/\text{h} = 0.099 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{总管直径 } d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.099}{3.14 \times 10}} = 0.11 \text{ m}, \text{ 取 } 200 \text{ mm}$$

10.4.1.5 封闭气幕管道尺寸的计算

封闭气幕总管直径取 230 mm

10.4.1.6 窑尾鼓冷风管尺寸的计算

窑尾鼓冷风量为 $85.37 \text{ Nm}^3/\text{h}$

$$\text{实际鼓风量 } V'_1 = 85.37 \times \frac{273+20}{273} = 91.62 \text{ m}^3/\text{h} = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$$

a. 鼓冷风总管直径：

气体在鼓冷风中的流速取 $w = 12 \text{ m/s}$

$$\text{总管 } D_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.025}{3.14 \times 12}} = 0.05 \text{ m}, \text{ 取 } 70 \text{ mm}$$

$$\text{分管 } D_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.025}{3.14 \times 2 \times 12}} = 0.036 \text{ m}, \text{ 取 } 40 \text{ mm}$$

$$\text{支管 } D_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.025}{3.14 \times 20 \times 12}} = 0.011 \text{ m}, \text{ 取 } 20 \text{ mm}$$

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

风机鼓风量 $Q = 1.3 \times 53.18 = 69.13 \text{ Nm}^3/\text{h}$

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。

10.4.2.2 窑尾风机的选用

$$Q=1.3 \times 79.77=103.701 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

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

$$\text{助燃风机需鼓入风量 } Q=1.3 \times V_g=1.3 \times =311.09 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

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: $Q=79.77/2=39.89 \text{ Nm}^3/\text{h}=0.011 \text{ m}^3/\text{s}$
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	G6-43No3.3	2840	1785	1474	Y190S-2	1.5
车下风机	离心通风机	G6-43No6.3	1440	1652	5896	Y132S-4	5.5
排烟风机	锅炉引风机	Y8-39No5.6	2900	3971	12214	Y200L1-2	30
助燃风机	离心通风机	G6-43No6.3	1440	1797	3106	Y132S-4	5.5
快冷风机	离心通风机	G6-43No8.5	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

11 工程材料概算

11.1 窑体材料概算

11.1.1 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°C ，在全窑砌有厚度 230mm，全窑所砌筑的长度为 24m，窑体的平均身高为 1.74m，所以砌有粘土砖的窑墙体积为

$$V = 2 \times 0.23 \times 1.74 \times 24 = 19.21\text{m}^3$$

共需粘土砖数量为

$$19.21 / (0.345 \times 0.230 \times 0.065) = 3725 \text{ 块}$$

11.1.2 硅藻土砖，规格：115×115×60mm

全窑所砌筑的长度为 24m，因为窑宽为 0.78m 故

$$V = 2 \times 0.115 \times 0.78 \times 24 = 4.31\text{m}^3$$

共需硅藻土砖数量为

$$4.31 / (0.115 \times 0.115 \times 0.06) = 5432 \text{ 块}$$

11.1.3 轻质高铝砖，规格：230×230×65mm

全窑所砌筑的长度为 7.5m，故

$$V = 2 \times 0.23 \times 1.74 \times 7.5 = 6.003\text{m}^3$$

共需轻质高铝砖数量为

$$6.003 / (0.23 \times 0.230 \times 0.065) = 1892 \text{ 块}$$

11.1.4 普通硅酸盐耐火纤维板 规格：500×300×20

全窑所砌筑的长度为 31.5m，故

$$V = 0.02 \times 0.78 \times 31.5 = 0.49 \text{ m}^3$$

共需普通硅酸盐耐火纤维板数量为

$$0.49 / (0.5 \times 0.3 \times 0.02) = 164 \text{ 块}$$

11.1.5 含铬耐火纤维毡

纤维直径 $2-4 \mu\text{m}$ ，密度 $\rho = 260\text{kg/m}^3$ ，纤维长度约 50mm，在全窑窑墙与窑顶部分填充含铬耐火纤维，在窑顶全窑所填含铬耐火纤维长度为 7.5m，宽为 0.78m，所填棉的高为 0.45m，体积为： $V_f = 0.78 \times 0.45 \times 7.5 = 2.63\text{m}^3$ 在窑墙所

填充铬耐火纤维长度为 7.5m, 宽为 0.445m, 高为 1.74m, 体积为: $V_2=2 \times 0.445 \times 1.74 \times 7.5=11.61\text{m}^3$

在窑车内填棉长为 1.5m, 宽为 0.84m, 高为 0.2m, 在全窑的窑车数为 21 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 $21+7=28$ 辆, 得出含铬耐火纤维体积为: $V_3=1.5 \times 0.84 \times 0.2 \times 28=7.06 \text{ m}^3$

全窑所需含铬耐火纤维的总体积为: $V=V_1+V_2+V_3=2.63+11.61+7.06=21.3\text{m}^3$

11.1.6 轻质粘土吊顶砖

全窑所砌筑的长度为 31.5m, 故

$$V=0.23 \times 1.65 \times 24 + 0.23 \times 7.5 \times 1.75 = 12.13\text{m}^3$$

共需轻质粘土吊顶砖数量为

$$12.13 / (0.23 \times 0.23 \times 0.065) = 3528 \text{ 块}$$

11.1.7 含锆散棉

用于填充膨胀缝等其他缝、孔, 窑墙的平均厚度为 0.405m, 膨胀缝宽为 0.02m, 高度为 1.74m, 所以 $V=0.405 \times 0.02 \times 1.74 \times 21=0.296\text{m}^3$

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。

11.1.8 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 34 只;

烧嘴砖 34 块;

看火孔 (含瓷管和看火孔盖) 34 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 11-1 中；

表 11-1

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 烧嘴的选用

由于全窑共有 34 个烧嘴，且每小时燃料的消耗量为 417028.36KJ/h，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：

$$417028.36 \times 1.5 / 34 = 10302.14 \text{Nm}^3/\text{h}$$

12. 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。

13 后 记

大学四年的学习生活就要告一段落了，我的毕业设计经过周露亮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实际问题的能力。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！

14 参考文献

- [1]、周露亮 《窑炉课程设计指导书》. 景德镇陶瓷学院. 2010. 5.
- [2]、胡国林 陈功备 《窑炉砌筑与安装》. 武汉理工大学出版社. 2005. 5.
- [3]、韩昭沧 《燃料与燃烧》. 冶金工业出版社. 2007. 10.
- [4]、刘振群 《陶瓷工业热工设备》. 武汉理工大学出版社. 2008. 1.
- [5]、徐维忠 《耐火材料》. 冶金工业出版社. 2008. 2.
- [6]、马建隆 宋之平 《实用热工手册》. 水利电力出版社. 1988. 8
- [7]、王秉铨 《工业炉设计手册》. 北京机械工业出版社. 2004. 7.
- [8]、陈景雨 《陶瓷工业热工过程及设备》. 中国轻工业出版社. 1992. 4.
- [9]、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. 8.
- [10]、杨世铭 陶文铨 《传热学》第三版. 高等教育出版社. 1998. 8