
景德镇陶瓷学院 科技艺术学院

毕业设计

题目： 年产 340 万 M² 内墙砖宽体辊道窑设计

院 系： 工程系

专 业： 热能与动力工程

学 号： 201030453103

姓 名： 曾奥

指导教师： 孙健



景德镇陶瓷学院

前 言

随着经济不断发展，人民生活水平的不断提高，陶瓷工业在人民生产、生活中都占有重要的地位。陶瓷的发展与窑炉的改革密切相关，一定结构特点的窑炉烧出一定品质的陶瓷，因此正确选择烧成窑炉是获得性能良好制品的关键。

陶瓷窑炉可分为两种：一种是间歇式窑炉，比如梭式窑；另一种是连续式窑炉，比如辊道窑。辊道窑由于窑内温度场均匀，从而保证了产品质量，也为快烧提供了条件；而辊道窑中空、裸烧的方式使窑内传热速率与传热效率大，又保证了快烧的实现；而快烧又保证了产量，降低了能耗。产品单位能耗一般在 $2000\sim 3500\text{ KJ/Kg}$ ，而传统隧道窑则高达 $5500\sim 9000\text{ KJ/Kg}$ 。所以，辊道窑是当前陶瓷工业中优质、高产、低消耗的先进窑型，在我国已得到越来越广泛的应用。

烧成在陶瓷生产中是非常重要的一道工序。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。

目 录

一、摘 要.....	1
二、设计任务书及原始资料.....	3
三、窑体主要尺寸的确定.....	4
3.1 窑内宽的确定	4
3.2 窑长的确定	4
3.2.1 窑容量.....	4
3.2.2 窑体各带长度的确定.....	4
3.3 窑内高的确定	4
3.4 烧成制度的确定	5
四、工作系统.....	7
4.1 排烟系统	7
4.2 燃烧系统	7
4.2.1 烧嘴的设置.....	7
4.2.2 烧嘴布置.....	7
4.3 冷却系统	8
4.3.1 急冷通风系统.....	8
4.3.2 缓冷通风系统.....	8
4.3.3 快冷通风系统.....	8
4.4 窑体附属结构	8
4.4.1 事故处理孔.....	8
4.4.2 检查孔.....	9
4.4.3 测温孔.....	9
4.4.4 测压孔.....	9
4.4.5 观火孔.....	10
4.4.6 膨胀缝.....	10
4.4.7 挡墙、挡板.....	10
4.4.8 钢架结构.....	10
4.5 传动系统.....	10
4.5.1 传动系统的选择.....	10
4.5.2 传动过程:	11
4.5.3 辊子材质的选择.....	11
4.5.4 辊距的确定.....	11
4.5.5 辊子传动过程中的联接方式.....	11
4.5.6 辊子转速的选择.....	11
五、窑体材料确定.....	13
5.1 窑体材料确定原则	13
5.2 窑体材料厚度的确定原则	13
5.3 全窑体所用材料及厚度列表	13

六、燃烧计算.....	14
6.1 燃料所需空气量	14
6.1.1 理论空气量 V_a^0	14
6.1.2 实际空气量 V_a	14
6.2 燃料产生烟气量	14
6.2.1 理论烟气量.....	14
6.2.2 实际烟气量.....	14
6.3 燃烧温度	14
6.3.1 理论燃烧温度 t_m	14
6.3.2 实际燃烧温度 t_p	14
七、物料平衡计算.....	15
7.1 每小时烧成干制品的质量	15
7.2 每小时入窑坯的质量	15
7.3 每小时欲烧成湿制品的质量	15
7.4 每小时蒸发的自由水的质量	15
7.5 每小时从精坯中产生的 CO_2 的质量.....	15
7.5.1 每小时从精坯中引入的 CaO 和 MgO 质量 计算.....	15
7.5.2 产生的 CO_2 质量.....	15
7.6 每小时从精坯中排除结构水的质量 G_{IP}	15
八、预热带烧成带热平衡计算.....	16
8.1 热平衡计算准则.....	16
8.2 热平衡示意图.....	16
图 2 热平衡示意图.....	16
8.3 热收入项目	17
8.3.1 坯体带入显热 Q_1	17
8.3.2 燃料带入化学热及显热 Q_f	17
8.3.3 助燃空气带入显热 Q_a	17
8.3.4 预热带漏入空气带入显热 $Q_a'(KJ/h)$	17
8.4 热支出项目	17
8.4.1 产品带出显热 Q_2	17
8.4.2 窑体散失热 Q_3	17
8.4.3 物化反应耗热 Q_4	19
8.4.4 烟气带走显热 Q_g	19
8.4.5 其他热损失 Q_5	20
8.5 热平衡方程.....	20
九、冷却带热平衡计算.....	21
9.1 热平衡计算准则	21
9.2 热平衡示意图.....	21
9.3 热收入项目	21
9.3.1 产品带入显热.....	21
9.3.2 助燃风带入显热.....	21
9.4 热支出项目	22

9.4.1 产品最终带出的显热: Q_7	22
9.4.2 热风抽出时带走的显热.....	22
9.4.3 窑体散热 Q_9	22
9.5 热平衡方程.....	24
十、烧嘴选型.....	26
十一、管道尺寸、阻力计算及风机的选用	27
11.1 排烟风机的管道尺寸、阻力计算	27
11.1.1 管道尺寸:	27
11.1.2 阻力计算.....	27
11.1.3 风机的选型.....	28
11.2 其它系统管道尺寸确定、风机的选型.....	29
11.2.1 天然气输送管径的计算.....	29
11.2.2 助燃风管的计算.....	29
11.2.3 冷却带风管计算.....	30
11.3 其他风机选型	31
11.3.1 助燃风机的选型.....	31
11.3.2 急冷风机的选型.....	32
11.3.3 缓冷抽热风机的选型.....	32
11.3.4 轴流风机的选型.....	32
十二、材料概算.....	34
12.1 轻质耐火粘土砖	34
12.2 轻质高铝砖	34
12.3 硅藻土砖	34
12.4 普通硅酸铝耐火纤维毡	35
12.5 高纯型纤维针刺毡	35
十三、后 记.....	36
参考文献.....	37
英文文献翻译	38
陶瓷窑炉烧成技术的介绍.....	45

一、摘 要

本辊道窑采用窑头集中排烟，大量的烟气由烧成带流向预热带，烟气温度由烧成带至预热带逐渐降低，而待烧砖坯则与烟气逆向而行达到逐渐升温之目的，窑头集中排烟有效的利用了烟气余热，降低了能耗。传动系统采用 45 度斜齿轮传动。每 2~3 个窑段为一传动组，每组配一套减速机，每若干个减速机配一个变频器调节速度。可将全窑调成一个速度，也可每组调成不同速度。当发生堵窑事故需处理时，事故前的辊子可以调成往返摆动，事故后的辊子可以继续将砖坯送至窑外。整个传动系统简捷、规整，传动平衡可靠、调整简单、维修量小。窑炉采用模块式结构，箱体采用优质结构钢管在专用模具上焊接，保证结构刚性和尺寸误差。无需特殊的基础，方便运输和安装。根据不同温度的要求，选用温度级别不同的高质量的耐火保温材料，保证工作温度的要求。

关键词：辊道窑，传动系统，温度，节能

Abstract

Roller kiln adopts concentrating exhausting fume from the kiln head. Lots of fume flows from the firing section to preheat section. The temperature of fume will gradually low down and the tile will go reverse with the fume direction to make the temperature rising gradually. Concentrating fume exhausting can make good use of the remained heat of fume and save the energy consumption. Transmission system adopts 45 bevel gear wheel transmission. Every 2~3 kiln section is as one transmission group, which is equipped with 1 set of reducer. Several reducers are equipped with a frequency converter to control speed. The speed of the whole kiln can be same and the speed of different section can also be different. When there are block occurs, the rollers before the block can be adjusted to shunting swinging and the rollers after the block can still send the tiles out of kiln. The whole transmission system is simple, clear and neat with balanced and reliable transmission, simple adjusting and easily repair. Kiln adopts mould structure and the standard length of each mould is 2200 mm. Section body is welded together with high quality structure steel pipe in a special mould, which ensure the structure rigidity and size error. According to the different temperature requirement, different temperature degree fire-resistant material is selected to meet the working temperature.

Key words: Roller kiln, tansmission system, temperatu

二、设计任务书及原始资料

题 目	年产 340 万 M ² 内墙砖宽体辊道窑设计
<p>设计技术指标、参数或课题研究主要内容人：</p> <p>① 年产量：340 万 m²(年工作日 330 天，合格率 95%).</p> <p>② 产品规格：300×450×8.8mm，2.3kg/片</p> <p>③ 最高烧成温度：1180℃</p> <p>④ 燃料：液化石油气</p> <p>⑤ 烧成曲线：自定</p> <p>⑥ 氧化气氛烧成</p>	
<p>基本要求：</p> <p>① 运用所学的知识进行正确设计和计算。</p> <p>② 设计过程要独立完成，有一定的创新性。</p> <p>③ 独立编写的设计说明书要符合规范，语言通顺、准确。</p> <p>④ 提供规范、完整、整洁的设计图纸。</p> <p>⑤ 完成 1 篇英文译作。</p>	
<p>工作进度：</p> <p>1. 1—4 周：实习，收集资料</p> <p>2. 5—6 周：资料整理、消化吸收，提出初步的设计思路 and 理念</p> <p>3. 7—16 周：主要结构设计与计算，绘图和编写说明书</p> <p>4. 17 周起：整理，准备答辩</p>	

三、窑体主要尺寸的确定

3.1 窑内宽的确定

气烧明焰辊道窑内宽一般在2000—2900mm, 收缩率为8%。

则：坯体尺寸=产品尺寸/(1-8%)

$$300/(1-8\%) = 326\text{mm}$$

$$450/(1-8\%) = 490\text{mm}$$

坯体离窑墙一般应有100~200mm间隙, 暂取100mm, 坯体间间距取30mm, 坯体并排八块进砖, 窑内宽 $326 \times 8 + 30 \times 7 + 100 \times 2 = 3020\text{mm}$ 。

3.2 窑长的确定

3.2.1 窑容量

窑容量= [年产量(m^2/a) \times 烧成周期(min)]/[年工作日 $\times 24 \times 60 \times$ 合格率(%)]

$$= [3400000 \times 40] / (330 \times 24 \times 60 \times 95\%) = 301.26 (\text{m}^2/\text{每窑})$$

装窑密度 = 每米排数 \times 每排件数 \times 每件面积 (件/每米窑长)

$$= (1000/420) \times 8 \times 0.135 = 2.4 (\text{m}^2/\text{每米窑长})$$

$$\text{窑长} = \text{窑容量}(\text{件/每窑}) / \text{装窑密度}(\text{件/每米窑长}) = 301.26 / 2.4 = 125.5\text{m}$$

利用装配式, 由若干节联接而成, 设计每节长度为2100mm,

$$\text{节数} = 125.5 / 2.1 = 59.77, \text{取整数}60\text{节}。$$

$$\text{则：窑体设计长度 } L = 2.1 \times 60 = 126\text{m}$$

3.2.2 窑体各带长度的确定

预热带: $126 \times 34\% = 42.84\text{m}$, 取20节 (第1-20节)

烧成带: $126 \times 26\% = 32.76\text{m}$, 取16节 (第21-36节)

冷却带: $126 \times 40\% = 50.4\text{m}$, 取24节 (第37-60节)

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 (辊道中心线至窑底的距离) 之和。内高必须合理, 既能有利于产品换热满足烟气有足够的流动空间, 又必须满足一定的烧成空间和冷却空间。

取内高如下:

标准砖：230X150X76mm；辊孔砖：233X200X114mm。一般考虑耐火砖及轻质砖灰缝在 2mm，预热、缓冷、快冷辊上高 4 层砖，辊下高 5 层砖。烧成、保温、急冷、辊上 5 层，辊下 5 层。

表 3 窑内高

位置	预热、冷却段 第 1 节～17 节和第 34 节～第 56 节	烧成 第 18 节～第 33 节
辊上高	370mm	448mm
辊下高	448mm	448mm
总高	818mm	896mm

3.4 烧成制度的确定

(1) 温度制度：

① 烧成周期:40 分钟

② 各温度段的划分与升温速率

表 4 温度制度

名称	温度/℃	时间/min	升温速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	长度比例/%	节数
预热带	20～250	4.24	10.86	10.6	7
预热带	250～600	3.52	16.53	8.8	5
预热带	600～900	4.24	10.54	10.6	8
烧成带	900～1180	9	6.02	23.5	12
保温段	1180	3	0	8.8	4
急冷带	1180～800	4.28	-15.6	11.7	6
缓冷段	800～500	6.72	-9.29	14.7	10
快冷段	500～80	5	-14.89	11.7	8
累计		40		100	60

③ 温度曲线图

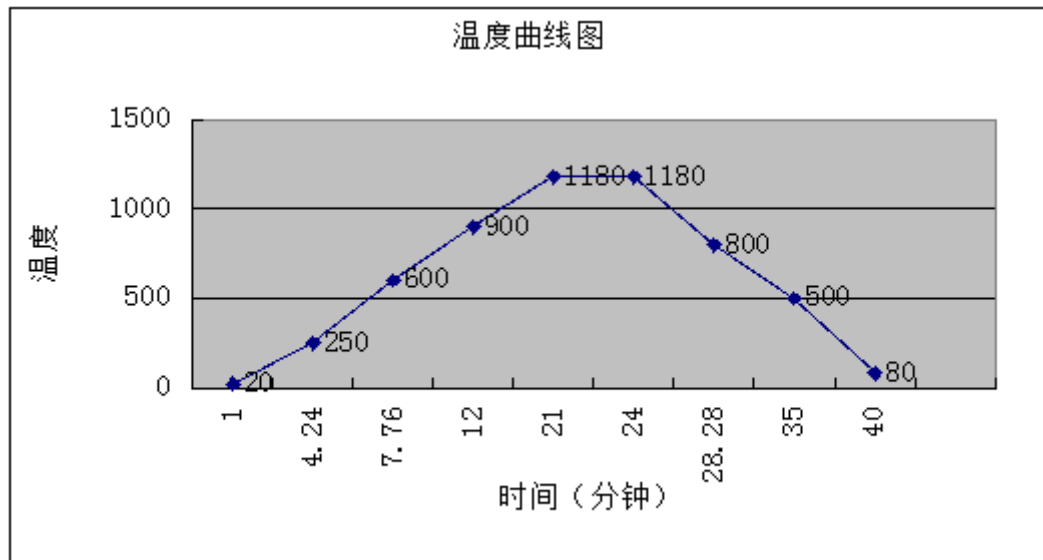


图 1 温度曲线图

(2) 气氛制度：全窑氧化气氛；

(3) 压力制度：预热带 $-8\sim-4$ Pa，烧成带 < 8 Pa。

四、工作系统

辊道窑的工作系统包括排烟系统、燃烧系统、冷却系统等，下面是各系统的初步安排。

4.1 排烟系统

在窑前段第 1、2、3、4、5、6 节设置排烟口，采用四段分散排烟的方式。在每段排烟口的窑顶、窑底各设 5 个排烟口直通窑体外，在排烟口出口处设置一条垂直支烟管，每垂直支烟管设置排烟闸，以调节烟气支流量。然后经水平分管进入总烟管，水平管道第 2、3 节之间设置排烟闸，控制水平管道的烟气量。总烟管设于窑顶，上有总闸。利用烟气抽力，引导窑内气体流运动。

在第 5、6 节之间设置一个工作平台，上面布置两台排烟风机，一台为正常云作风机，另一台备用。

4.2 燃烧系统

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

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

4.2.1 烧嘴的设置

由于本窑烧成周期较长，升温速率较慢，故本设计在只在烧成带开始设置烧嘴，因此，在烧成带的 21—26 节每节辊下设置 2 对烧嘴，交错布置；以更好调节窑内温差，在烧成带的 27—36 节每节设置 4 对烧嘴，辊上下烧嘴及对侧烧嘴均互相错开排列，并在每烧嘴的对侧设置一观察孔，但如遇到事故处理孔，则取消观察孔。考虑每节事故处孔交错布置。

4.2.2 烧嘴布置

表 5 烧嘴布置

位置	烧成带（21—26）	烧成带（27—36）
烧嘴布置	每节 2 对烧嘴	每节 4 对烧嘴
烧嘴总数	24 个	80 个

4.3 冷却系统

制品在冷却带有晶体成长,转化的过程,并且冷却出窑是整个烧成过程最后的一个环节。从热交换的角度来看,冷却带实质上是一个余热回收设备,它利用制品在冷却过程中所放出的热量来加热空气,余热风可供干燥,达到节能的目的。

4.3.1 急冷通风系统

从烧成最高温度至少 800℃ 以前,制品中由于液相的存在而且具有塑性,此时可以进行急冷,最好的办法是直接吹风冷却。辊道窑急冷段应用最广的是直接风冷是在辊上下设置横窑断面的冷风喷管。每根喷管上均匀地开有圆形或狭缝式出风口,对着制品上下均匀地喷冷风,达到急冷的效果。由于急冷段温度高,横穿入窑的冷风管须用耐热钢制成。

本设计也采用此种结构,在第 39 节~42 节,每节辊上 4 根、辊下 4 根,内径 $\phi 90\text{mm}$ 急冷风管,风管采用相对排列布置。共 54 根急冷风管。

4.3.2 缓冷通风系统

制品冷却到 800~500℃ 范围时,是产生冷裂的危险区,应严格控制该冷却降温速率。为达到缓冷目的,一般采用热风冷却制品的办法。大多数辊道窑在该处设有 3~6 处抽风口,使从急冷段与窑尾段过来的热风流经制品,让制品慢速均匀得冷却。

本设计采用抽热风冷却方法,在 43-52 节设置抽热风口,抽热风管每节辊上 4 根、辊下 4 根,在每根支管上设置一个控制阀,支管经汇总后与分管连接。

4.3.3 快冷通风系统

本设计从第 53 节~60 节在辊上辊下布置快冷管,交错布置,每节 16 支,具体安装位置见图纸,为了更好的提倡节能减排,故此,本次设计在快冷阶段将其热气抽出用于其他用处。

4.4 窑体附属结构

4.4.1 事故处理孔

为了方便处理断辊、卡砖、起摞等事故,在窑侧每隔一定距离设置事故处理孔,一般设置在辊下,在窑两侧交错分布,为了能清除窑内侧任何位置的事故,两事故处理孔之间距离应不大于事故孔对角线与对侧内壁交点的连线。

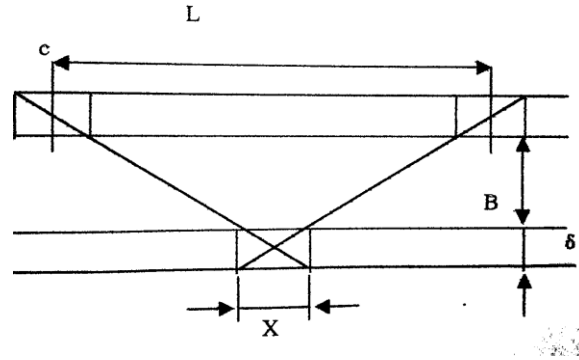


图 2 事故处理孔

根据公式 $L \leq 2(b+c) = 2b(1+B)/\delta$ ，考虑到砌筑应该比求出值稍大一点，故取事故处理孔长度为：320 mm，所以我们取事故处理孔尺寸为：380×234，在事故处理口上设置一个 460×230×76 的过桥砖。

对于事故处理孔在不处理事故时，要进行密封，内部堵塞耐火材料做成的大盖板，间隙填入陶瓷棉，最外部的钢板密封前端仍需一段耐火材料。密封是为了防止热气体外溢，冷风漏入等引起的热损失对烧成制度产生影响。

4.4.2 检查孔

在第 14 节和第 42 节的后半段处设置检查孔，大小为 400 X400，过桥砖是 640 X230 X65，全窑只设置两处。

4.4.3 测温孔

为严密监视及控制窑内温度制度，及时调整烧嘴开度，一般在窑道顶及火道侧墙留设若干处测温孔以安装热电偶。测温孔间距一般为 3~5 米，高温段布密些，低温段布稀些，在烧成曲线的关键点，如氧化末段、晶体转化点、釉始溶点、成瓷段、急冷结束等都应设测温孔。

本设计如下：第 1 到 20 节和第 43 到 60 节每节窑顶布置一个，21 节到 42 节的窑顶和辊下侧墙各设置一个测温孔。窑顶测温孔设计安装在距离每节窑前方向 1600mm 处，侧墙安装位置距离窑底 160mm，距窑前 1600mm。

4.4.4 测压孔

零压应设在预热带与烧成带界面附近。所以零压面设在第 10 节处的窑顶设一测压孔。

4.4.5 观火孔

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

4.4.6 膨胀缝

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

4.4.7 挡墙、挡板

由于辊道窑属中空窑，工作通道空间大，气流阻力小，难以调节窑内压力制度及温度制度。因此，通常在辊道窑工作通道的某些部位，辊下筑挡墙，辊上插挡板，缩小该外工作通道面积，以增加气流阻力，便于压力与温度制度的调节。

为了更好的调节窑炉内温度制度的调节，本设计将在每个换带之间设计上挡板，在烧成带和冷却带设置挡墙、挡板是为避免烧成带的烟气倒流，又避免了压力波动时急冷风窜流向烧成带而降低高温区温度。再一个就是防止高温烟气的辐射对急冷管的损害。预热带设置挡墙、挡板可以增加烟气在高温区的滞留时间，提高烟气利用率比可控制低温区的温度。

本设计在第 19、36、42 节后部各设置挡墙、挡板。挡墙、挡板位置及尺寸见图。

4.4.8 钢架结构

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

4.5 传动系统

4.5.1 传动系统的选择

辊道窑的传动系统由电动机，减速设备和传动机构所构成。常见的传动机构由链传动和齿轮传动两种，本设计采用齿轮传动。

传动系统采用螺旋斜齿轮传动方式，采用分段传动，一般是每三节窑长为一传动组，1-20 节分 7 段，21-36 节分 8 段，37-60 节分 8 段，每组由一台摆线针轮减速机带动，高温区每台摆线针轮减速机由一个变频器调节速度，低温区每两台摆线针轮减速机由一个变频器调节速度。

操作人员可以将全窑调成一个速度。当发生堵窑事故需要处理时，事故前的棍棒可以调成往返摆动，事故后的棍棒可以继续将砖坯送至窑出口。这种传动方式运行平稳可靠，调整简单，维修量小。螺旋斜齿轮传动都采用油浴润滑，润滑效果好，磨损少，使用寿命长。

4.5.2 传动过程：

电机→主动链轮→滚子链→从动链轮→传动轴→主动螺旋齿轮→从动螺旋齿轮→棍棒传动轴→辊子。

4.5.3 辊子材质的选择

辊子的材质要求十分严格，它要求辊子具有很好的抗热震性能，使辊子经受得起急冷急热得冲击；要求辊子直径一致和平直，确保产品得平直移动；要有强的高温抗氧化性能，使辊子能承受高温；要有高的荷重软化温度和小的蠕变性，使辊子在高温下具有最小的弯曲变形；要有好的高温耐久性，使辊子能在高温下长久的工作。另外，还要有好的去污性能，使粘在辊子上的釉滴或其它污物容易去掉。

本设计在低温段（1—7 节）采用的是 $\Phi 60 \times 3260$ 的金属质棍棒；在中温段（8—20 节，41—49 节和 50—60 节）采用的是 $\Phi 60 \times 3260$ 的莫来石棍棒；在高温段（21—40 节）采用的是 $\Phi 60 \times 3260$ 的莫来石—刚玉质陶瓷棍棒。

4.5.4 辊距的确定

辊距 $H = (1/3 \sim 1/5) \times L$ ，因制品长度 $L = 600$ ，每节窑长 2100mm，则最后确定辊距， $1/4L = 120\text{mm}$ ，但现实辊距取 80mm，快冷段辊距取 108mm，

4.5.5 辊子传动过程中的联接方式

依据以上原则，联接方式辊子主动端采用弹簧夹紧式，从动端采用托轮摩擦式，双支点混合支撑，便于更换辊子。

4.5.6 辊子转速的选择

根据辊子转速的公式：
$$n = \frac{K \times L}{\pi \times d \times t}$$

L——窑长, mm

t——烧成周期, min

d——辊子直径, mm

K——考虑到制品的滑动系数，一般取 $K = 1.05$

则： $n = (1.05 \times 123120) / (3.14 \times 60 \times 40) = 17.15 \text{ r/min}$

五、窑体材料确定

5.1 窑体材料确定原则

窑体材料要用耐火材料和隔热材料。耐火材料必须具有一定的强度和耐火性能以便保证烧到高温窑体不会出现故障。隔热材料的积散热要小，材质要轻，隔热性能要好，节约燃料。

5.2 窑体材料厚度的确定原则

- 为了砌筑方便的外形整齐，窑墙厚度变化不要太多。
- 材料的厚度应为砖长或砖宽的整数倍；墙高则为砖厚的整数倍，尽量少砍砖。

5.3 全窑体所用材料及厚度列表

表 6 所用材料及厚度列表

排烟段1-20节		
窑顶	窑墙	窑底
高铝纤维毯2*20mm	高铝纤维毡2*50mm	高铝聚轻球砖76*2
高铝聚轻球吊顶砖230mm	高铝纤维毯20mm	粘土砖76
	高铝聚轻球砖230mm	
烧成段21-36节		
窑顶	窑墙	窑底
含锆纤维毯3*20mm	高铝纤维毡2*50mm	TJM26莫来石76
TJM26莫来石吊顶230mm	含锆纤维毡50mm	高铝聚轻球砖76
	含锆纤维毯20mm	粘土砖76
	TJM26莫来石230mm	
冷却段37-42节		
窑顶	窑墙	窑底
含锆纤维毯2*20mm	高铝纤维毡2*50mm	TJM26莫来石76
TJM26莫来石吊顶230mm	含锆纤维毯20mm	高铝聚轻球砖76
	TJM26莫来石230mm	粘土砖76
冷却段39-56节		
窑顶	窑墙	窑底
高铝纤维毯2*20mm	高铝纤维毡2*50mm	高铝聚轻球砖65*2
高铝聚轻球吊顶砖230mm	高铝纤维毯20mm	粘土砖76
	高铝聚轻球砖230mm	

六、燃烧计算

6.1 燃料所需空气量

6.1.1 理论空气量 V_a^0

可由经验公式计算根据经验低发热量 Q_{net} 取 40 MJ/Nm³

$$V_a^0 = (Q_{\text{net}} \times 0.264/1000 + 0.02) \times 0.81 = (40000 \times 0.264/1000 + 0.02) \times 0.81 = 8.57 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

6.1.2 实际空气量 V_a

取空气过剩系数 $\alpha=1.10$ ，则实际空气量： $V_a = \alpha V_a^0 = 1.10 \times 8.57 = 9.43 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

6.2 燃料产生烟气体量

6.2.1 理论烟气体量

根据经验公式计算 $V_g^0 =$

$$\alpha V_a^0 + 0.38 + 0.018 \times Q_{\text{net}}/1000 = 9.43 + 0.38 + 0.018 \times 40000/1000 = 10.53 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

6.2.2 实际烟气体量

$$\text{取 } \alpha = 1.1, V = V_g^0 + (\alpha - 1)V_a^0 = 10.53 + (1.10 - 1) \times 8.57 = 11.39 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

6.3 燃烧温度

6.3.1 理论燃烧温度 t_m

此时已知， $Q_{\text{net, ar}} = 40 \text{ MJ/kg}$ ，助燃室温 $t_a = 20^\circ\text{C}$ ，此时空气的比热为 $c_a = 1.30 \text{ KJ/m}^3\text{C}$ ， $C_f = 1.69 \text{ KJ/m}^3\text{C}$ ， $V = 2.358 \text{ (Nm}^3/\text{kg)}$

当 $t = 1500 - 1800$ ，则 $C_g = 1.638$ 假设 $T_{\text{th}} = 1750^\circ\text{C}$

$$\text{则 } t_m = (40000 + 9.43 \times 1.3 \times 20 + 1.69 \times 20) / (11.39 \times 1.638) = 2158.94^\circ\text{C}$$

6.3.2 实际燃烧温度 t_p

取温度系数为 0.75 得 $t_p = t_m \times \eta = 0.75 \times 2158.94 = 1619.21^\circ\text{C}$

实际烧成最高温度比产品烧成温度高 389.21°C ，说明可以充分烧成此产品，还可实现快速烧成。

七、物料平衡计算

表 7 坯体组成成份

组成	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	$K_2O + Na_2O$	灼减
%	68.35	16.11	2.27	2.63	1.17	4.45	5.0

7.1 每小时烧成干制品的质量

每小时烧成制品质量 G_m ，每件产品质量为 7.8kg

$$G_m = (5700 \times 7.8) / (24 \times 0.97 \times 0.36) = 5305 \text{ kg/h}$$

7.2 每小时入窑坯的质量

每小时生成干坯的质量 G_g

$$G_1 = G_m \cdot \frac{100}{100 - IL} = 5305 \times \frac{100}{100 - 5} = 5584.19 \text{ kg/h}$$

7.3 每小时欲烧成湿制品的质量

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100}{100 - \omega} = 5584.19 \times \frac{100}{100 - 1} = 5640.6 \text{ kg/h}$$

7.4 每小时蒸发的自由水的质量

$$G_w = G_2 - G_1 = 5640.6 - 5584.19 = 56.41 \text{ kg/h}$$

7.5 每小时从精坯中产生的 CO_2 的质量

7.5.1 每小时从精坯中引入的 CaO 和 MgO 质量 计算

$$G_{CaO} = G_1 \cdot CaO\% = 5584.19 \times 2.27\% = 126.76 \text{ kg/h}$$

$$G_{MgO} = G_1 \cdot MgO\% = 5584.19 \times 2.63\% = 146.86 \text{ kg/h}$$

7.5.2 产生的 CO_2 质量

$$G_{CO_2} = G_{CaO} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} + G_{MgO} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{MgO}} = 99.6 + 157.61 = 257.21 \text{ kg/h}$$

7.6 每小时从精坯中排除结构水的质量 G_{ip}

$$G_{ip} = G_1 \times IL\% - G_{CO_2} = 5584.19 \times 5.0\% - 257.21 = 22 \text{ kg/h}$$

八、预热带烧成带热平衡计算

8.1 热平衡计算准则

计算准则： 基准温度 0°C 基准质量 1 小时进入系统的物料

8.2 热平衡示意图

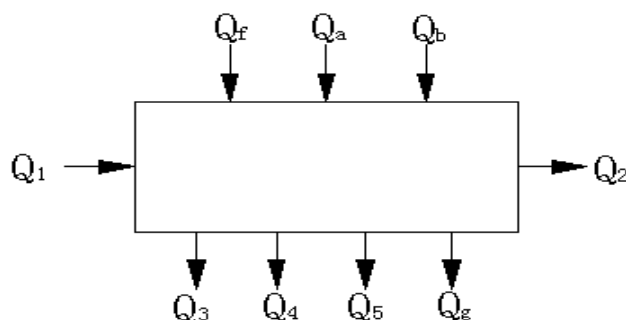


图 2 热平衡示意图

坯体带入显热： Q_1

燃料带入化学热及显热： Q_f

助燃空气带入显热： Q_a

预热带漏入空气带入显热： Q_b

热制品带出显热： Q_2

窑体散失热： Q_3

物化反应耗热： Q_4

其他热损失： Q_5

烟气带走显热： Q_g

8.3 热收入项目

8.3.1 坯体带入显热 Q_1

取烧成灼减为 5.0%

入窑干制品质量 $G_1 = 1881000 \times 7.8 / (330 \times 24 \times 97\% \times 95\% \times 0.36) = 5584.19 \text{ (kg/h)}$

入窑制品含自由水 1.0%

湿基制品质量 $G_2 = G_1 / (1 - 1.0\%) = 5584.19 / (1 - 1.0\%) = 5640.6 \text{ (kg/h)}$

制品入窑温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$

入窑制品比热容 $c_1 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 40 = 0.86 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

$\therefore Q_1 = G_2 c_1 t_1 = 5640.6 \times 0.86 \times 20 = 97018.32 \text{ (kJ/h)}$

8.3.2 燃料带入化学热及显热 Q_f

$Q_{\text{net}} = 40 \text{ (MJ/kg)}$

入窑天然气温度 $t_f = 20^\circ\text{C}$, 20°C 时 $c_f = 1.69 \text{ KJ/(m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

设每小时耗燃料量 $X \text{ m}^3/\text{h}$

则 $Q_f = X (Q_{\text{net}} + c_f t_f) = X * (40000 + 1.69 \times 20) = 40033.8 * X \text{ (kJ/h)}$

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

助燃空气实际总量 V_a , 总 $= V_a \cdot X = 9.43X \text{ (m}^3/\text{h)}$

$\therefore Q_a = V_{a, \text{总}} c_a t_a = 9.43X \times 1.30 \times 20 = 245.2 * X \text{ (kJ/h)}$

8.3.4 预热带漏入空气带入显热 Q_a' (KJ/h)

取预热带空气过剩系数 $a_g = 2.0$, 漏入空气湿度 $t_a = 20^\circ\text{C}$, $c_{a'} = 1.30 \text{ KJ/(m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

$\therefore Q_{a'} = V'_{a'} c_{a'} t_a = 0.2 * V_o * 1.3 * 20X + 0.5 * V_o * 1.30 * 200X = 1293.8X \text{ (kJ/h)}$

8.4 热支出项目

8.4.1 产品带出显热 Q_2

烧成产品质量 $G_3 = G_1 * 95\% = 5358.57 \text{ (kg/h)}$

制品出烧成带温度 $t_2 = 1230^\circ\text{C}$

制品平均比热容 $c_2 = 0.84 + 26 \times 10^{-5} \times 1230 = 1.16 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

$\therefore Q_2 = G_3 c_2 t_2 = 5358.57 \times 1.16 \times 1230 = 7645607.7 \text{ (kJ/h)}$

8.4.2 窑体散失热 Q_3

将窑体分为 2 部分

第1~20节预热带:20~900℃,取平均值460℃;

第21~35节烧成带:900~1230℃,取平均值1065℃;

1) 第1~20节:窑内平均温度460℃,窑外平均温度40℃

a. 窑顶散热:

轻质高铝砖230mm, $\lambda_{\text{高铝砖}}=0.71(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

岩棉毡150mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.12(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

单位热流 $q=(460-40)/(0.23/0.71+0.15/0.12)=267.52(\text{w/m}^2)$

窑顶散热面积 $A_{\text{顶}}=(2.280+0.3) \times 2.16 \times 20=111.46\text{m}^2$

$\therefore Q_{\text{顶}}=q \times A \times 3.6=267.52 \times 111.46 \times 3.6=107344(\text{kJ/h})$

b. 窑墙散热:

轻质粘土砖150mm, $\lambda_{\text{高铝砖}}=0.33(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

陶瓷纤维150mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.10(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

单位热流 $q=(460-40)/(0.15/0.33+0.15/0.10)=215.38(\text{w/m}^2)$

一侧墙散热面积 $A_{\text{墙}}=[0.719+0.19+0.067] \times 2.16 \times 6=12.65\text{m}^2$

另一段侧墙散热面积 $A_{\text{墙}}=[0.719+0.19+0.10] \times 2.16 \times 14=30.54\text{m}^2$

\therefore 二侧墙散热量 $Q_{\text{墙}}=2 \times 43.19 \times 215.38 \times 3.6=51468.93(\text{kJ/h})$

c. 窑底散热:

轻质粘土砖67mm, $\lambda_{\text{高铝砖}}=0.20(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

硅藻土砖67mm, $\lambda_{\text{硅藻土}}=0.23(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

后一段是硅藻土砖134mm, $\lambda_{\text{硅藻土}}=0.23(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

单位热 $q=((140-40)/(0.067/0.2+0.067/0.23))=333.33(\text{w/m}^2)$

单位热 $q=((460-40)/(0.067/0.2+0.134/0.23))=482.8(\text{w/m}^2)$

窑底散热面积 $A_{\text{底}}=2.58 \times 6=15.48\text{m}^2$; $A_{\text{底}}=2.58 \times 14=36.12\text{m}^2$

$\therefore Q_{\text{底}}=q \times A \times 3.6=333.33 \times 15.48 \times 3.6+482.8 \times 36.12 \times 3.6=81355.25(\text{kJ/h})$

2) 第21~35节, 窑外平均温度80℃, 窑内平均温度1070℃,

a. 窑顶散热:

轻质高铝砖230mm, $\lambda_{\text{高铝砖}}=0.76\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

高纯型耐火纤维针刺毡200mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.16(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

单位热流 $q=(1070-80)/(0.23/0.76+0.2/0.16)=638.71(\text{w/m}^2)$

窑顶散热面积 $A_{\text{顶}}=(2.28+0.43) \times 2.16 \times 15=87.8\text{m}^2$

$$\therefore Q_{\text{顶}} = q \times A \times 3.6 = 638.71 \times 87.8 \times 3.6 = 201883.46 \text{ (kJ/h)}$$

b. 窑墙散热:

轻质莫来石高铝砖230mm, $\lambda_{\text{高铝砖}} = 0.23 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

高纯型耐火纤维针刺毡200mm, $\lambda_{\text{棉}} = 0.16 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q = (1070 - 80) / (0.23/0.23 + 0.2/0.16) = 440 \text{ (w/m}^2\text{)}$

二侧墙散热量 $Q_{\text{墙}} = [0.786 + 0.358] \times 2.16 \times 15 \times 2 \times 440 \times 3.6 = 117532.8 \text{ (kJ/h)}$

c. 窑底散热:

轻质莫来石高铝砖67mm, $\lambda_{\text{高铝砖}} = 0.2 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$; 聚轻球高铝砖134mm, $\lambda_{\text{高铝砖}} = 0.15 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$; 硅藻土砖67mm, $\lambda_{\text{硅藻土}} = 0.23 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q = (1070 - 80) / (0.067/0.2 + 0.134/0.15 + 0.067/0.23) = 664.43 \text{ (w/m}^2\text{)}$

窑底散热面积 $A_{\text{底}} = A_{\text{顶}} = (2.28 + 0.43) \times 2.16 \times 15 = 87.8 \text{ m}^2$

$$\therefore Q_{\text{底}} = q \times A \times 3.6 = 664.43 \times 87.8 \times 3.6 = 210013.03 \text{ (kJ/h)}$$

窑体总散热量:

$$Q_3 = 107344 + 51468.93 + 81355.25 + 201883.46 + 117532.8 + 210013.03 = 587902.47 \text{ (kJ/h)}$$

8.4.3 物化反应耗热 Q_4

1) 自由水蒸发吸热 Q_w

自由水质量 $G_w = G_2 - G_1 = 5640.6 - 5584.2 = 56.4 \text{ (kg/h)}$

烟气离窑温度 $t_g = 400^\circ\text{C}$

$$\therefore Q_w = G_w (2490 + 1.93 t_g) = 56.4 \times (2490 + 1.93 \times 400) = 162206.4 \text{ (kJ/h)}$$

2) 其余物化反应热 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 $G_1 = 5584.2 \text{ (kg/h)}$; Al_2O_3 含量=16.34%;

$$\therefore Q_r = G_1 \times 2100 \times \text{Al}_2\text{O}_3\% = 5584.2 \times 2100 \times 16.34\% = 1916162.4 \text{ (kJ/h)}$$

$$\text{故 } Q_4 = Q_w + Q_r = 162206.4 + 1916162.4 = 2078368.8 \text{ (kJ/h)}$$

8.4.4 烟气带走显热 Q_g

$$\text{离窑烟气总量 } V_g = [V_g^0 + (\alpha_g - \alpha) \times V_a^0] \cdot X$$

$$= [10.53 + (1.1 - 1.0) \times 8.57] \cdot X$$

$$= 11.39X \text{ (m}^3\text{/h)}$$

烟气离窑温度 $t_g = 200^\circ\text{C}$, 200°C 时烟气比热容 $c_g = 1.45 \text{ (kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$

$$\therefore Q_g = V_g c_g t_g = 11.39X \times 1.45 \times 200 = 3303.1X \text{ (kJ/h)}$$

8.4.5 其他热损失 Q₅

根据经验占热收入的5%

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

8.5 热平衡方程

热收入=热支出

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

$$(97018.32 + 40033.8X + 245.2X + 1293.8X) = 7645607.7 + 587902.47 + 2078368.8 + 3303.1X$$

经处理得 解得 $X = 282.4 \text{ m}^3/\text{h}$

所以每公斤产品热耗为 $X \times 40000 / G_3 = 282.4 \times 40000 / 5358.57 = 2108.03 \text{ (kJ/kg)}$

表8 预热带、烧成带热平衡表

热收入			热支出		
坯体带入 显热 Q_1	97018.32	0.82%	产品带出 显热 Q_2	7645607.7	64.6%
助燃空气带入 显热 Q_a	69244.48	0.58/%	烟气带走 显热 Q_g	932795.44	7.9%
漏入空气带入 显热 Q_a'	365369.12	3.1%	物化反应耗热 Q_4	2078368.8	17.5%
燃料化学热及 显热 Q_f	11305545.12	95.5%	窑炉散失之热 Q_3	587902.47	5%
			其他热损失 Q_5	591858.85	5%
总计	11837177.04	100%	总计	11836533.3	100%

由表可以看出热支出项中产品带走显热和物化反应耗热两项不可能减少。而其他三项则可采用适当措施节省能耗。对于烟气出窑温度适当控制在较低温度下。至于窑体散热在资金允许的情况下，则可采用新型耐火，隔热材料。

九、冷却带热平衡计算

9.1 热平衡计算准则

计算准则： 基准温度 0°C
 基准质量 1 小时进入系统的物料

9.2 热平衡示意图

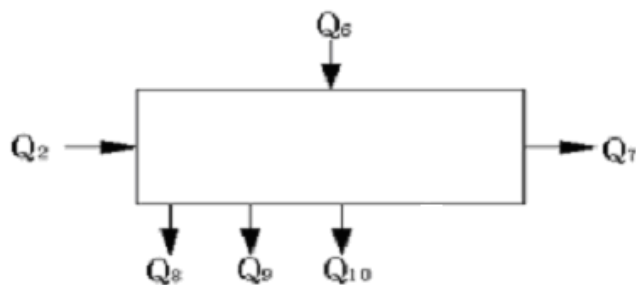


图 3 热平衡示意图

制品带入的显热 Q_2

从窑道内抽出空气带走显热 Q_8

急冷风窑尾风带入显热 Q_6

窑体散失热量 Q_9

制品带出显热 Q_7

其他热损失 Q_{10}

。

9.3 热收入项目

9.3.1 产品带入显热

此项热量为预热带和烧成带产品带走的显热

$$Q_2 = 7645607.7 \text{ (kJ/h)}$$

9.3.2 助燃风带入显热

鼓入冷风的温度为： $t_a = 20^{\circ}\text{C}$ 查表知此时冷风的比热为： $C = 1.3 \text{ KJ/(m}^3\text{C)}$

设定窑尾鼓入风量为 $V_x \text{ m}^3/\text{h}$ 。一般急冷鼓入风量是窑尾风的 $(0.25 \sim 0.5)$ 。本设计取急冷鼓入风量是窑尾风量的 0.5 。急冷风与窑尾的总风量是 $1.5 V_x$ 。查表得：

20℃时空气的比热为 $1.3 \text{ KJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

$$\therefore Q_6 = c_a t_a V_x = 1.3 \times 20 \times 1.5 V_x = 39 V_x \text{ (kJ/h)}$$

。

9.4 热支出项目

9.4.1 产品最终带出的显热:Q7

产品离窑温度为 $t_7=80^\circ\text{C}$ 。

制品的平均比热容 $C_7=0.84+0.00026 \times 80=0.89 \text{ (kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

出窑制品质量 $G_m=G_3=5358.57 \text{ (kg/h)}$

$$Q_7=G_m C_7 t_7=5358.57 \times 0.89 \times 80=381530.18 \text{ (kJ/h)}$$

9.4.2 热风抽出时带走的显热

热风量等于冷风量，风量为 V_x ，取热风抽出的温度 $t_8=200^\circ\text{C}$ ，查表得比热为 $1.3 \text{ KJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

$$Q_8=V_x \times C_8 t_8=1.3 \times 200 V_x=260 V_x \text{ (kJ/h)}$$

9.4.3 窑体散热 Q9

1) 急冷段：第36-40节，共五节，温度 $1230^\circ\text{C}-800^\circ\text{C}$ 阶段：窑内平均温度 1015°C ，窑外平均温度 80°C 。

a. 窑顶散热：

轻质高铝砖230mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.76 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

高纯型耐火纤维针刺毡200mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.16 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q=(1015-80)/(0.23/0.76+0.2/0.16)=603.2 \text{ (w/m}^2)$

窑顶散热面积 $A_{\text{顶}}=29.3 \text{ m}^2$

$$\therefore Q_{\text{顶}}=q \times A \times 3.6=29.3 \times 603.2 \times 3.6=63652.5 \text{ (kJ/h)}$$

b. 窑墙散热：

轻质莫来石高铝砖230mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.23 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

高纯型耐火纤维针刺毡200mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.16 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q=(1015-80)/(0.23/0.23+0.2/0.16)=415.6 \text{ (w/m}^2)$

一侧墙散热面积 $A_{\text{墙}}=12.3 \text{ m}^2$

$$\therefore \text{二侧墙散热量 } Q_{\text{墙}}=2 \times 12.3 \times 415.6 \times 3.6=36805.5 \text{ (kJ/h)}$$

c. 窑底散热：

轻质莫来石高铝砖67mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.23 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

聚轻球高铝砖134mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.15 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

硅藻土砖67mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.23 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q=(1018-80)/(0.067/0.23+0.134/0.16+0.067/0.23)=658.45 \text{ (w/m}^2\text{)}$

窑底散热面积 $A_{\text{底}}=A_{\text{顶}}=29.3 \text{ m}^2$

$\therefore Q_{\text{底}}=q \times A \times 3.6=658.45 \times 29.3 \times 3.6=69453.31 \text{ (kJ/h)}$

2) 缓冷: 41-49节, 窑内平均温度 650°C , 窑外平均温度 40°C 。

a. 窑顶散热:

轻质高铝砖230mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.76 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

普通硅酸铝耐火纤维毡150mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.14 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q=(650-40)/(0.23/0.76+0.15/0.15)=438.85 \text{ (w/m}^2\text{)}$

窑顶散热面积 $A_{\text{顶}}=2.58 \times 2.16 \times 9=50.16 \text{ (m}^2\text{)}$

$\therefore Q_{\text{顶}}=q \times A \times 3.6=438.85 \times 50.16 \times 3.6=79245.78 \text{ (kJ/h)}$

b. 窑墙散热:

轻质耐火粘土砖150mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.3 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

普通硅酸铝耐火纤维毡150mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.10 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q=(650-40)/(0.150/0.76+0.150/0.1)=305 \text{ (w/m}^2\text{)}$

一侧墙散热面积 $A_{\text{墙}}=1.01 \times 2.16 \times 9=19.63 \text{ m}^2$

\therefore 二侧墙散热量 $Q_{\text{墙}}=2 \times 19.63 \times 305 \times 3.6=433107.48 \text{ (kJ/h)}$

c. 窑底散热:

轻质高铝砖65mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.16 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

硅藻土砖134mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.2 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q=(650-40)/(0.065/0.16+0.134/0.2)=628.87 \text{ (w/m}^2\text{)}$

窑底散热面积 $A_{\text{底}}=A_{\text{顶}}=50.16 \text{ m}^2$

$\therefore Q_{\text{底}}=q \times A \times 3.6=50.16 \times 628.87 \times 3.6=113558.83 \text{ (kJ/h)}$

3) 快冷段: 50-57节, 窑内平均温度 290°C , 窑外平均温度 40°C 。

a. 窑顶散热:

轻质高铝砖230mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.71 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

普通硅酸铝耐火纤维毡150mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.12 \text{ (w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

单位热流 $q=(650-40)/(0.23/0.71+0.15/0.12)=159.24 \text{ (w/m}^2\text{)}$

窑顶散热面积 $A_{\text{顶}}=2.58 \times 2.16 \times 8=44.58$ (m²)

$\therefore Q_{\text{顶}} = q \times A \times 3.6=159.24 \times 44.58 \times 3.6=25556.11$ (kJ/h)

b. 窑墙散热:

轻质耐火粘土砖150mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.29$ (w/m² · °C)

普通硅酸铝耐火纤维毡150mm, $\lambda_{\text{棉}}=0.10$ (w/m² · °C)

单位热流 $q=(650-40)/(0.150/0.29+0.150/0.1)=123.76$ (w/m²)

一侧墙散热面积 $A_{\text{墙}}=0.943 \times 2.16 \times 8=16.3$ m²

\therefore 二侧墙散热量 $Q_{\text{墙}}=2 \times 16.3 \times 123.76 \times 3.6=14524.47$ (kJ/h)

c. 窑底散热:

硅藻土砖65mm, $\lambda_{\text{砖}}=0.23$ (w/m² · °C)

单位热流 $q=(290-40)/(0.065/0.16)=862$ (w/m²)

窑底散热面积 $A_{\text{底}}=A_{\text{顶}}=44.58$ m²

$\therefore Q_{\text{底}} = q \times A \times 3.6=44.58 \times 862 \times 3.6=138340.66$ (kJ/h)

所以:

$Q_9=63265.5+36805.5+69453.31+79245.78+43107.48+113558.83+25556.11+14524.47+138340.66=584217.64$ kJ/h

4) 其它热损失 Q_{10}

根据经验值为热收入的5%

$Q_{10}=0.05(Q_2+Q_6)$ (kJ/h)

9.5 热平衡方程

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

$$(7645607.7+39V_x) \times 0.95=381530.18+260V_x+584217.64$$

$$\text{解得 } V_x=28240.27 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

表9 冷却带热平衡表

热吸入			热支出		
项目	kJ/h	%	项目	kJ/h	%
产品带入显热 Q_2	7645607.7	87.41	产品带出显热 Q_7	381530.18	4.36
冷却风带入显热 Q_6	1101370.53	12.59	抽热风带出显热 Q_8	7342470.2	83.96

			窑体散热 Q_9	584217.64	6.68
			其它热损失 Q_{10}	437348.91	5.00
总计	8746978.23	100	总计	8745566.94	100

热平衡分析：从上表可以看出，抽出带走热所占比例最大，可以余热利用。把该热送至干燥窑进行干燥用。这样可以达到节能的目的。

十、烧嘴选型

每小时燃料消耗量为 $x=282.4 (Bm^3/h)$ ，考虑到烧嘴的燃烧能力和烧嘴燃烧的稳定性取安全系数 1.5。本设计一共设置了 76 对（152 个）烧嘴。

每个烧嘴的燃料消耗量为： $1.5 \times 282.4 / 144 = 2.9 (Bm^3/h)$

烧嘴的热负荷： $2.9 \times 40000 = 116000 (KJ/h)$ ，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：

表 10 烧嘴技术性能

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 ~ $350^{\circ}C$	1500~ 3500 Pa	1: 6	200~ 3000	~70	~ 1800 $^{\circ}C$

所以该烧嘴符合本设计要求。

十一、管道尺寸、阻力计算及风机的选用

11.1 排烟风机的管道尺寸、阻力计算

11.1.1 管道尺寸:

排烟系统需排除烟气体量:

$$V_g = [V_g^0 + (\alpha_g - 1) \times V_a^0] \times X = [10.53 + (2-1) \times 9.43] \times 282.4 = 5636.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

烟气抽出时实际体积:

$$V = V_g \times (273+400)/273 = 5636.7 \times 673/273 = 13152.3 \text{ m}^3/\text{h} = 3.7 \text{ m}^3/\text{s}$$

① 总烟管尺寸

烟气在金属管中流速 W , 据经验数据取 $W=10\text{m/s}$

$$\text{内径 } d_{\text{总}} = \sqrt{4V/\pi W} = \sqrt{4 \times 3.7/(3.14 \times 10)} = 0.69\text{m}$$

所以, 总管内径取值为 700mm, 长度为 13m。

② 分烟管尺寸

烟气在分烟管中的流速 $\omega=10\text{m/s}$, $n=3$, 分管流量 $V'=V/3=1.23 \text{ m}^3/\text{s}$

$$d_{\text{总}} = \sqrt{4V'/\pi \omega} = \sqrt{4 \times 1.23/(3.14 \times 10)} = 0.4\text{m}。$$

所以, 分管内径取 400mm, 长度为 3.2m。

③ 支烟管尺寸

烟气在分烟管中的流速 $\omega=10\text{m/s}$, $n=40$, 分管流量 $V_{\text{支}}=V/40=0.093\text{m}^3/\text{s}$ 。

$$\text{内径 } d_{\text{支}} = \sqrt{4 \times 0.093/(3.14 \times 10)} = 0.110\text{m}$$

取 $d_{\text{支}}=250\text{mm}$, 所以, 考虑到调节的方便性取值为: 250mm, 顶部支管长 1.1m, 两侧支管 0.5m。

11.1.2 阻力计算

① 料垛阻力 h_i

根据经验每米窑长料垛阻力为 0.5Pa。

设 0 压在 20-21 节交接处。

$$\text{则 } h_i = (12+0.5) \times 2 \times 0.5 = 12.5\text{Pa}。$$

② 位压阻力 h_g

烟气从窑炉至风机, 高度升高 $H=1.8\text{m}$, 此时几何压头位烟气流动的动力即负位压阻力, 取烟气温度位 400°C ,

$$\therefore h_g = -H(\rho_a - \rho_g)g$$

$$\begin{aligned}
 &= -1.8 \times \left(1.29 \times \frac{273}{273+20} - 1.30 \times \frac{273}{273+400} \right) \times 9.8 \\
 &= -11.82 \text{Pa}
 \end{aligned}$$

③ 局部阻力 h_e

局部阻力 ζ 由表查得:

烟气从窑炉进入支管: $\zeta_1 = 1$

支烟管进入分烟管: $\zeta_2 = 1.5$

并 90° 急转弯: $\zeta_3 = 1.5$

分管 90° 急转弯: $\zeta_4 = 1.5$

分管 90° 圆弧转弯: $\zeta_5 = 0.35$

分管进入总管: $\zeta_6 = 1.5$

分管 90° 圆弧转弯: $\zeta_7 = 0.35$

为简化计算, 烟管中烟气流速均按 10m/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, 且取定的截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.

$$\begin{aligned}
 h_e &= (1+1.5+1.5+1.5+0.35+1.5+0.35) \times 10 \times 10 \times 1.3 \times 273 / (273+400) + 0.28 \times \\
 &\quad (2^2/2) \times 1.3 \times 273 / (273+250) \\
 &= 233.6 \text{ (Pa)}
 \end{aligned}$$

④ 摩擦阻力 h_f

摩擦阻力系数: 金属管取 $\zeta = 0.03$.

$$\begin{aligned}
 h_f &= \zeta (L_{\text{支}}/d_{\text{支}} + L_{\text{分}}/d_{\text{分}} + L_{\text{总}}/d_{\text{总}}) \times \omega^2 / 2 \times \rho \\
 &= 0.03 \times (0.5/0.24 + 3.2/0.34 + 4/0.59) \times (10 \times 10 \times 2) \times 273 \times (273+400) \\
 &= 9.925 \text{Pa}
 \end{aligned}$$

烟囱阻力忽略不计(可由本身几何压头来克服).

\therefore 风机应克服总阻力 $h_{\text{总}} = h_i + h_g + h_e + h_f = 254.2 \text{Pa}$

11.1.3 风机的选型

为保证正常工作, 取风机抽力余量 0.5, 所以选型应具备风压:

$$H = (1+0.5) \times 254.2 = 381.3 \text{Pa}.$$

流量取储备系数为 1.5, 风机排出烟气平均温度 250°C

$$\therefore Q = 1.5 \times 3613.23 \times (273+250) / 273 = 10383.1 \text{m}^3/\text{h}.$$

选用风机应考虑窑炉有空气、其它气体比例失调, 大量增加烟气量, 增大抽风阻力, 造成较大阻力, 故选型时全风压应留有较大余地.

所以排烟风机选用 Y4-73-14No12D 25.04kw 耐磨离心锅炉引风机.

表 11 排烟风机

型号	转速 (r/min)	流量 (m ³ /h)	全压 (Pa)	所需 功率 (kw)	电动机		联轴器(1 套)			底脚 垫板 部
					型号	功 率	F2508 A	风机 轴	电动 机轴	
Y4— 73-14N ₀ 12D	960	62973	857	25.04	Y225M-6	30	5-75 ×55	75	55	-004

11.2 其它系统管道尺寸确定、风机的选型

11.2.1 天然气输送管径的计算

① 燃料总管

天然气的流量为：282.4m³/h，取天然气在总管中的流速为：2m/s，
总管选用一根管子，那么总管的内径为：

$$d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4x}{3600 \times \pi \omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 164.8}{3600 \times 3.14 \times 2}} = 0.17 \text{ m},$$
$$d_{\text{总}} = \sqrt{\frac{4x}{3600 \pi \omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 282.4}{3600 \pi \omega}} = 0.223, \text{ 总管内径取值：250mm。}$$

② 窑顶、窑侧的分管尺寸

天然气分管分组控制，共分 20 组 8 根，气体在金属分管中流速，根据经验数据取
 $\omega = 4\text{m/s}$ ，

$$\text{内径 } d_{\text{分}} = \sqrt{\frac{4x}{3600 \pi \omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 282.4}{3600 \times 3.14 \times 4 \times 20}} = 0.035\text{m}, \text{ 分管内径取值：50mm}$$

③ 通往烧嘴的汽化石油气支管内径计算

窑体共安装了 152 个烧嘴，天然气支管总共有 152 根，而流速取 $\omega = 8\text{m/s}$

$$\text{内径 } d_{\text{支}} = \sqrt{\frac{4x}{3600 \pi \omega}} = \sqrt{\frac{4 \times 282.4}{3600 \times 3.14 \times 8 \times 152}} = 0.009\text{m}$$

考虑到在实际操作中有些烧嘴是关闭的所以分管内径取值：30mm

11.2.2 助燃风管的计算

助燃风量： $V_a = 9.43 \times 282.4 = 2654.56 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

实际助燃风量 $V=2654.56 \times (273+20)/273=2849 \text{ m}^3/\text{h}$

① 助燃风总管内径的确定

取风在总管中的流速为: $\omega=5\text{m/s}$, 则:

$$d_{\text{总}} = \sqrt{4 \times 2849 / (3600 \pi \omega)} = 0.449\text{m}, \text{取助燃风总管的内径为 } 450\text{mm}.$$

② 窑顶、窑底分管内径

取 $\omega=8\text{m/s}$, $n=4$, 分管流量为: $2849/4=712.25\text{m}^3/\text{h}$

$$d_{\text{分}} = \sqrt{4 \times 712.25 / (3600 \pi \omega)} = 0.177\text{m}, \text{取分管内径为 } 200\text{mm}.$$

③ 助燃风管通往烧嘴的支管的内径

全窑总共有烧嘴 152 个, 因此通往烧嘴的支管 152 根, 取流速 $\omega=10\text{m/s}$, $n=152$, 每个分管流量为: $2849/152=18.74\text{m}^3/\text{h}$, 则: $d_{\text{支}} = \sqrt{4 \times 18.74 / (3600 \pi \omega)} = 0.026$, 取支管内径为 40mm。

11.2.3 冷却带风管计算

冷却带窑尾鼓入冷风总量为 $28240.27\text{m}^3/\text{h}$, 急冷鼓入风量是窑尾鼓入风量的 1/2, 即冷却带鼓入冷风比例:

表 12 冷却带风管计算

	所占比例 (%)	风量
急冷段	33.3	9412.48
快冷段	66.7	18827.79
缓冷段	0	28240.27

1) 缓冷抽热总管的确定

① 缓冷抽热总管内径

鼓入风量 $V_x=28240.27\text{m}^3/\text{h}$, 故抽出热风 $V=28240.27\text{m}^3/\text{h}$.

取 $\omega=10\text{m/s}$, $n=1$, 则:

$$d_{\text{总}} = \sqrt{4 \times 28240.27 / (3600 \pi)} = 0.999\text{m}, \text{取 } 1000\text{mm}.$$

② 抽热分管的内径

共设置了 (6 个抽风口, 6 根抽风分管), 取 $\omega=10\text{m/s}$, $n=6$, 每个分管的流量为: $28240.27/6=4706.71\text{m}^3/\text{h}$, 则:

$$d_{\text{分}} = \sqrt{4 \times 4706.71 / (3600 \pi)} = 0.408\text{m}, \text{取 } 410\text{mm}.$$

③ 抽热支管的内径

取 $\omega=10\text{m/s}$, $n=12$, 每个分管的流量为: $28240.27/12=2353.36\text{m}^3/\text{h}$, 则:

$$d_{\text{支}} = \sqrt{4 \times 2353.36 / (3600 \pi)} = 0.288\text{m}, \text{取 } 300\text{mm}.$$

2) 急冷风管内径的确定

① 急冷风总管内径的确定

取风在总管中的流速 $\omega=10\text{m/s}$, $V_{\text{急}}=9412.48\text{ m}^3/\text{h}$ 则:

$d_{\text{总}}=\sqrt{4\times 9412.48/(3600\pi)}=0.58$, 取 600mm。

② 窑顶的分管

取 $\omega = 10\text{ m/s}$, $n = 2$, 每个分管的流量为: $9412.48/2=4706.24\text{ m}^3/\text{h}$, 则:

$d_{\text{分}}=\sqrt{4\times 4706.24/(3600\pi)}=0.408\text{ m}$, 取 410 mm 。

③急冷支管

急冷支管上下交错排列, 共 54 根, 取 $\omega=12\text{m/s}$,

则: $d_{\text{支}}=\sqrt{4\times 9412.48/(3600\pi \times 54)}=0.071\text{m}$, 取 70mm。

每根管上开 20 个孔, 取 $\omega = 12\text{ m/s}$, $n=54\times 20=1080$, 流过每个孔的流量为:
 $9412.48/1080=8.72\text{m}^3/\text{h}$, 则: 孔径 $d_{\text{孔}}=\sqrt{4\times 98.72/(3600\pi)}=0.016\text{ m}$, 孔径取 20mm 。

3) 快冷带鼓入冷风量

快冷带鼓入冷风量 $V=18827.79\text{m}^3/\text{h}$ 。

11.3 其他风机选型

11.3.1 助燃风机的选型

助燃风机的风量为 $V =13.706\times 13.706\times 282.4= 3870.57\text{m}^3/\text{h}$, 依据风量选用风机的型号为:E150-6|0.865 高压离心通风机。

表 13 助燃风机的选型

型号	转速 (r/min)	流量 m^3/h	全压 (Pa)	所需 功率 (kw)	电动机		联轴器 GB4323-84 (1 套)
					型号	功率	
E150-6 0 .865	3000	9000	14021	75.9	Y315S -2	110	TL8 $\frac{65\times 142}{65\times 142}$ (200-65×65)

地脚螺栓 GB799—88 (4 个)	螺母 GB6170~6171—86 (4 个)	垫圈 GB96—85 (4 个)
M24×630	M24	M24

11.3.2 急冷风机的选型

急冷风机的风量为： $V_x = 9412.48 \text{ m}^3/\text{h}$ ，依据风量选用风机的型号为：9-26-No14D271.5kw 高压离心通风机。

表 14 急冷风机的选型

型号	转速 r/min	流量 m^3/h	全压 (Pa)	所需 功率 (kw)	电动机		联轴器 GB4323-84 (1 套)
					型号	功率	
9-26-No16 D168.2kw	960	64032	64811	168.2	Y355M 1-6	185	TL11 $\frac{100 \times 215}{95 \times 175}$ (350-95×90)

表 15 急冷风机的选型

地脚螺栓 GB799-88 (4 个)	螺母 GB6170~6171-86 (4 个)	垫圈 GB96-85 (4 个)
M24×630	M24	M24

11.3.3 缓冷抽热风机的选型

缓冷段抽出热风总量 $V = 28240.27 \text{ m}^3/\text{h}$ ，

所以排烟风机选用 Y4-73-14No12D 25.04kw 耐磨离心锅炉引风机。

表 16 缓冷抽热风机的选型

型号	转速 (r/min)	流量 (m^3/h)	全压 (Pa)	所需 功率 (kw)	电动机		联轴器 (1 套)			底 脚 垫 板 部
					型号	功率	F2508 A	风 机 轴	电 机 轴	
Y4- 73-14No12D	960	62973	857	25.04	Y225M-6	30	5-75 ×55	75	55	-0 04

11.3.4 轴流风机的选型

快冷带鼓入风量 $18827.79 \text{ m}^3/\text{h}$ ，快冷段一共有 8 节，第 51 节到第 57 节辊上布

置 4 台轴流风机。布置在窑墙的二侧，交错布置。所以一共布置 28 个风扇, 因此每个风扇每小时风的流量为:

$$Q = \frac{18827.79}{28} = 672.4 \text{ m}^3/\text{h}。$$

所以选用 Y70-45 型轴流通风机，其规格如下:

表 17 缓冷抽热风机的选型

机号	转速 (r/min)	叶片		全压 (Pa)	风量 (m ³ /h)	轴功率 (kw)	电动机	
		数 量	角 度				型号	功 率
LF	1450	4	15	31	4200	25.92	JW06B-4	90

十二、材料概算

确定了窑墙的材料及厚度，决定了窑的结构后，可以进行窑体所需材料的概算。材料的概算可以预备资金，预购材料，使窑炉工作不致盲目。

12.1 轻质耐火粘土砖

⑥ 窑墙所需耐火粘土砖数量

在全窑中用到耐火粘土砖有：预热带 1~20 节，快冷段 41~57 节，长 37 节。

$$n_1 = (0.719/0.067) * (2.16/0.114) * 2 * 37 = 15047$$

$$n_2 = [(2.28 - 0.8) / 0.114] * (2.16/0.23) * 37 = 3991$$

所需轻质耐火粘土砖数量 $N_1 = n_1 + n_2 = 19038$ 块。

所需轻质耐火粘土砖的体积为 $V_1 = n_1 * (0.15 * 0.065 * 114) + n_2 * (0.23 * 0.114 * 0.065) = 23.5 \text{ m}^3$ 。

12.2 轻质高铝砖

在全窑中所用到轻质高铝砖有：全窑窑顶都是用轻质高铝砖。

总共所需轻质高铝砖数 $N_2 = (2.28/0.23) * (2.16 - 0.2) * 57/0.97 = 1143$ 块，取 1143 块。

轻质高铝吊顶砖规格：

规格 230x320x97 吊顶砖所需：10 块

规格 230x258x97 吊顶砖所需：12 块

规格 230x230x97 吊顶砖所需：1121 块

12.3 硅藻土砖

在全窑窑底 1 节到 55 节所用硅藻土砖，窑底所需硅藻土砖：

总共所需轻质高铝砖数

$$N_3 = [(2.28 - 0.8) / 0.114] * (6 + 23 * 2 + 15 + 5 + 8) * (2.16/0.23) = 9754, \text{ 取 } 9754 \text{ 块。}$$

12.4 普通硅酸铝耐火纤维毡

在窑炉中所用普通硅酸铝耐火纤维毡有预热带和冷却带。密度取 $100\text{kg}/\text{m}^3$

① 窑墙所用普通硅酸铝耐火纤维毡

$$v_4=0.15*2.16*37*0.719=8.7 \text{ m}^3$$

② 窑顶所用普通硅酸铝耐火纤维毡

$$v_4'=0.15*2.16*37*(2.28+0.6)=34.6 \text{ m}^3$$

$$\text{总共所需 } V_4= v_4 + v_4'=8.7+34.6=43.3 \text{ m}^3$$

$$\text{所以总质量为 } M=43.3*100=4330 \text{ kg}$$

12.5 高纯型纤维针刺毡

⑦ 窑墙所需高纯型纤维针刺毡（体积密度 $128\text{kg}/\text{m}^3$ ）

$$v_5=0.2*0.786*2.16*20=6.8 \text{ m}^3$$

⑧ 窑顶所需高纯型纤维针刺毡

$$V_5'=0.2*2.16*20*(2.28+0.86)=27.2 \text{ m}^3 \quad \text{共 } 71.68\text{m}^3$$

$$\text{所以总共需要高纯型纤维针刺毡体积为: } V_6= v_5 + V_5'=34 \text{ m}^3$$

$$\text{所以所需的总质量为 } M=34*128=4352 \text{ kg}$$

因此次仅仅是初次进行材料概述，故此对一些材料的用量估计不准，为此，此次材料概述比较粗糙。

表 18 材料列表

材料名称	型号/规格	数量	单位
轻质耐火粘土砖	230x114x65	19038	块
轻质高铝砖	230x1320x97	1143	块
轻质高铝吊顶砖	230x320x97	10	块
轻质高铝吊顶砖	230x258x97	12	块
轻质高铝吊顶砖	230x230x97	1121	块
硅藻土砖	230x114x65	9754	块
普通硅酸铝耐火纤维毡	PXZ-1000	43.3	M ³
高纯型纤维针刺毡		34	M ³
烧嘴砖		152	块
过桥砖	420x230x65	152	块
热电偶	K	78	根
轴流风机	T40-11No2.5	28	台

十三、后 记

毕业设计环节是大学生涯中的最后一个环节，也是检查我们大学四年来所学成果，通过这一个月毕业设计，我把以前学过的所有知识作了个全面的检阅，通过相互的沟通和比较，使我更加深了对知识的理解和掌握。

此次毕业设计是我毕业前的最后一份答卷。为使能够获得一个圆满的结果，我在中瓷万景实习一个月，并从实习实践中了解到生产实际中存在的问题以及设备的不足之处，回校后花了大量时间去阅览有关的资料，进行了综合性思考。在确定整个设计的安排步骤后，就按部就班的进行下来。在设计过程中，遇到诸多问题，就是在遇到问题解决问题这循环过程中，将专业相关知识串联起来，可以说是理论与实践的结晶。

在本次设计过程中，不仅对窑炉的结构、设备、管路都有了较深的认识，也通过此次设计过程中发现自己的许多不足之处，比如对窑炉的一些管路的安装方式不是最优，对窑炉设备安装位置不是很合理，致使有部分窑墙需砌砖，这些都是对窑炉设计经验不足处。

在我整个设计的过程里得到了各位老师的大力帮助，我在这里特别感谢我的指导老师给予我的耐心指导，感谢同学们在设计过程中给予我的帮助！

参考文献

- [1] 胡国林 《建陶工业辊道窑》. 中国建材工业出版社. 1998. 6
- [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] 蒋鉴华 张振刚 《热工测量及过程自动控制》. 江西高校出版社. 2009. 2
- [4] 孙晋淘 《陶瓷工业热工设备》. 武汉理工大学出版社. 1989. 10
- [5] 蔡增基 龙天渝 《流体力学泵与风机》. 中国建筑工业出版社. 1999. 12
- [6] 陈 帆 《现代陶瓷工业技术设备》. 中国建材工业出版社. 1995. 5
- [7] 续魁昌 《风机手册》. 北京机械工业出版社. 1995. 5
- [8] 王秉铨 《工业炉设计手册》. 北京机械工业出版社. 1996. 8
- [9] 姜正侯 《燃气工程技术手册》. 同济大学出版社. 1993. 5
- [10] 刘麟瑞 林彬荫 《工业窑炉用耐火材料手册》 冶金工业出版社. 2001. 6
- [11] 杨世铭 陶文铨 《传热学》第三版 . 高等教育出版社. 1998

英文文献翻译

Ceramic kiln firing a technology

A, sintering atmosphere concept

Ceramic products of burning into atmosphere refers to the process of the burn within, combustion furnaces of free oxygen contained in the percentage of and reduction composition. General will burn into atmosphere oxidation atmosphere and reducing atmosphere is divided into two. Free oxygen content above 8% called strong oxidation atmosphere, free oxygen content in 4% ~ 5% is called common oxidation atmosphere, free oxygen content 1% ~ 1.5% called neutral atmosphere when free oxygen content less than 1%, and co content in below 3 percent, called weak reduction in atmosphere, co content above 5% called strong reducing atmosphere.

In actual production, the type of atmosphere system to fire ceramic products, according to the product formula of the raw material and fire process in each stage of materialization reflection situation determined. When raw material contained less, and organic matter and carbon cohesive low, adsorption weak, iron content high, and reduction atmosphere for burn conversely, criterion with burn for oxidation atmosphere.

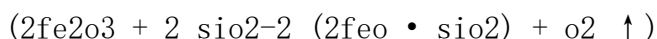
Second, sintering atmosphere of product performance influence

As is known to all, atmosphere can affect the body under high temperature ceramic billet chemical reaction speed, volume change grain size and stomata size etc, especially for ceramic billet color, the influence of light transmittance and glaze quality, more show prominent.

(1) the influence of iron and titanium remnant

In the actual production of oxidation atmosphere, when the blank when burned, Fe_2O_3 containing alkali amount in low glass phase is very low, experimen degrees of Fe_2O_3 colloidal precipitating to billet show yellow when burned, reducing atmosphere formed melted in the glass phase feo a weak cyan color. In addition, when the ferric oxide content must be given photo-cell and oxidation atmosphere,

if burn with glaze layer, was closed by Fe_2O_3 will have a part of reacts with SiO_2 iron peridot and release oxygen, the reaction is as follows:



The reactions that produce oxygen makes glazed with holes, and form bubbles of residual Fe_2O_3 will make given photo-cell and yellow. To contain the titanium higher stock should avoid burn with reducing atmosphere, otherwise TiO_2 will become part of blue purple, Ti_2O_3 , it is still possible to $2\text{FeO} \cdot \text{Ti}_2\text{O}_3$ form black spinel and a series of iron mixed crystals, thus titanium color burn.

(2) make SiO_2 reduction and co decomposition

At a certain temperature, reducing atmosphere can make SiO_2 reduction of gaseous the SiO , under the low temperature it will press $2\text{SiO} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Si}$ decomposition, thus formed on the surface of the products and Si dark spots. The co reducing atmosphere in certain temperatures $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ by decomposing. When the 400°C CO_2 is stable, and in 1000°C , only 0.7% (volume) CO_2 . Co decomposition in 800°C below, and only faster than 800°C when need certain catalysts. Carbon is also have catalysis, but requires a certain area, ferric oxide catalytic role of pre-column prior has nothing to do with the surface area, therefore, the atmosphere is very likely due to reducing carbon deposition in the co decomposition preform, glazes form shading. If we continue to rise in temperature burning into carbon was closed in, if given photo-cell and again was oxidized to CO_2 will create bubbles, the performance is strong adsorption given photo-cell and particularly serious.

Three, sintering atmosphere of product defects effects

Ceramic products in burning into could happen during a series of physical and chemical reaction, such as moisture evaporates, salts decomposition of organic material, carbon and sulfide oxidation, the crystal formation of crystalline phase transition, etc. The physical and chemical reaction speed, in addition to the influence of temperature and atmosphere by on its also have significant, if control undeserved, can make the ceramics product produce all sorts of defects, the most common introduces below several defects.

(1) "dirty"

Ceramic products of "dirty" refers to the given photo-cell and burn in the process of organic matter, sulfide, carbide, such as insufficient generated by oxidation of carbon particles and iron, causing the oxidative matter given photo-cell and a black or gray, among the phenomenon such as yellow. The existence of "dirty" defects will affect ceramic products of strength, bibulous rate, color, etc performance indicators. Ceramic products produce shoddy defect of the organic matter, carbide, key is insufficient, ceramic products sulfide oxidation process in the low temperature burn organic phase of decomposition and the oxidation reaction:

$(\text{fes} + \text{fes}_2 + \text{o}_2 \rightarrow \uparrow (350 \sim 450 \text{ so}_2 \text{ } ^\circ\text{C}), 4\text{fes} + 7\text{o}_2 \rightarrow 2\text{fe}_2\text{o}_3 (\uparrow (500 \sim + 4\text{so}_2 800 \text{ } ^\circ\text{C}), (\text{c} + \text{o}_2 \rightarrow \text{co}_2 \uparrow (600 \text{ } ^\circ\text{C above}))$

In this phase if insufficient, oxidation atmosphere of the organic decomposition and the oxidation reaction is cannot totally, c, fes₂ and residual accumulation overmuch ground feo etc in body and make given photo-cell and billet is black, gray, yellow. In the actual production of "dirty" to eliminate product, shall be in 600 ~ 650 °C let organic began to burn at 300 ~ 850 °C, organic matter, iron compounds and to carbon oxidative, that is to say, should be in the tropical ensure enough strong oxidation atmosphere. In addition, in the low temperature stage, burn of smoke co will be decomposition, reactive as follows:

$(2\text{co} \rightarrow 2\text{c press} + \text{o}_2 \uparrow)$

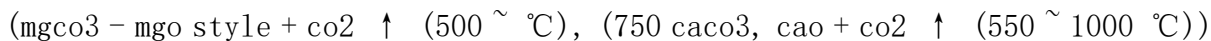
The decomposition in 800 °C above will is quite obvious, and 800 °C below a certain catalyst in the cases reflect also obviously (the feo pre-columri prior is the very good catalyst). If in low-temperature phase oxidation atmosphere is insufficient, cooling tiles and existence of reducing atmosphere in reduction due to the atmosphere, so there will be fierce feo breakdown co exudates c. In low-temperature phase because the porosity given photo-cell and higher, precipitation of c easily be given photo-cell and adsorption in stomatal surface and form shading defects.

Yi was given photo-cell and adsorption in stomatal surface and form shading

defects.

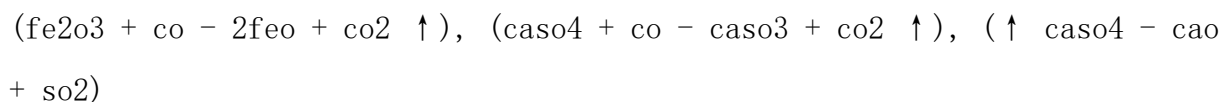
(2) the bubbles and pinhole

Ceramic products in the process of burned low temperature stage, in addition to happen mentioned outside the oxidation reaction of carbonate, with decomposing:



These response speed and completely by the degree of influence, oxidation atmosphere enough, fast and reaction would have more fully and vice, reaction speed slow and incomplete. When burning into process enters high temperature phase, given photo-cell and reaction liquid, appear unable to free the gas produced in vitro and then discharge billet appear pinhole, bubble etc defects.

In low-temperature phase will all the gas composition in billets oxidative decomposition is impossible, because in the carbonate and Fe_2O_3 oxidation atmosphere to above 1300°C above just decomposition, but in such a high temperature area, have been given photo-cell and liquid exist, viscosity decreased, the decomposition out would break through liquid escaping bubbles, killing glaze rough, or remain in glaze layer, forming a void defects within. To solve this problem, a former (1000°C in high temperature controlled) will burn into atmosphere control for reducing atmosphere, let Fe_2O_3 and sulfate reduction decomposition of happen as follows:



(3) chromatism

Ceramic products of off color refers to the piece products each part or sheet (batch) between the product color appeared two-tone. In the ceramic billet body and glaze materials raw materials, always more or less to introduce some iron, titanium compound, burn during sintering atmosphere of different will affect the price of iron, titanium exists, the number of several different price of iron, titanium have different color, when burning into atmosphere unstable,

given photo-cell and color change accordingly, thus forming product chromatism. At present, the market fashion vanadium titanium brick, because of its high, such as blank containing titanium in reducing atmosphere will have part under tio_2 turned into the blue to purple ti_2o_3 , form chromatism, may also form black $\text{feo} \cdot \text{ti}_2\text{o}_3$ spinel and iron titanium, thus deepening mixed crystals formed iron color, two-tone brickly face color, its type is as follows:



4, sintering atmosphere control

Burning into atmosphere by kiln structure and equipment control configuration of the restrictions, such as the size of the fan, air duct diameter size, exhaust smoke hot mouth, mouth, smoke wet mouth position Settings etc, will affect the burning into atmosphere control. But, the most critical or stable pressure system and rational operation burners.

(1) stable pressure system

Pressure change will affect air flow state, and therefore the stove system of volatility will cause pressure fluctuation, the atmosphere of the atmosphere, should control must be stable pressure system, and good stable pressure the key control system of zero pressure surface. In the tropics, because he would advance kiln platoon walk along the water and, when burned, its smoke, therefore the environment outside pressure than the relatively low, the kiln stove pressure in contrast with the negative state to drum into cold air cooling that products cooling, pressure than the external environment of relatively high furnace stove pressure, by contrast in positive pressure state between one zero pressure is negative pressure face, calcining zone is tropical and cooling gets with zero pressure between the mobile, and will cause calcining zone atmosphere of change. When zero pressure surface is located in calcining zone front-end, calcining zone and prediction in tropical between the pressure in the calcining zone for micro positive pressure condition, atmosphere for reducing atmosphere when zero pressure surface is located in the calcining zone backend, calcining zone in micro negative state oxidation atmosphere, atmosphere.

(2) the reasonable operation burners

Whether the fuel burn complete combustion will affect kiln atmosphere, especially calcining zone atmosphere. So reasonably operating burner, good control of the fuel combustion rate, it is an important means of control furnace atmosphere. In fuel under the condition of complete combustion of all flammable ingredient, fuel in air can completely oxidation, sufficient combustion without free c and co, h₂, such as ch₄ oxidation atmosphere, ensure combustible composition the realization of incomplete combustion when the fuel combustion, when there are some free c and co, h₂, ch₄ etc, make the stove in reducing atmosphere. To make fuel complete combustion, must pay attention to the following three points: (1) ensure that fuel and air mixing (2) full, evenly enough air supply, and maintain a certain amount of excess air quantity (3) ensure combustion process at higher temperatures.

Five, the actual production of burning into atmosphere adjustment

For the stability of atmosphere theoretical points, many people are very clear, but in actual operations, to solve some burn for a problem and not consciously change kiln atmosphere, this change often ignored, the following is a common the problem.

(1) in order to improve the sintering temperature and change in the air surplus coefficient

Some more enterprise in order to pursue the single kiln production maximization, burn continually accelerate speed, shorten the burning into cycle. The most commonly used method and operators is increasing fuel supply, but fuel supply timely adjust tend to have increased after combustion air supply and combustion of adjustment, total brake fan is caused by burn oxidation atmosphere into reduction atmosphere atmosphere.

(2) to solve the defects and advance tropical change its atmosphere

Some operators to reduce the temperature of the tropical hind paragraph gets decrease the smoke gate opening, the impact of the kiln pressure balance and gas velocity is proposed to make the tropical oxidation atmosphere is abate,

such as control bad easy to cause the bad condition before furnace combustion, make atmosphere fluctuate.

(3) to solve the defects and cooling with cold quantity change

Such operations not only affect the whole kiln pressure system change, and change can make atmosphere. For example, easy to increase cold wind gets zero pressure facing zero pressure, whereas tropical move to face and cooling section direction, these will make atmosphere change. In order to stabilize pressure, must the corresponding adjust the opening of smoke hot gates, to balance the whole kiln gas in quantity, stable zero pressure surface.

陶瓷窑炉烧成技术的介绍

一、烧成气氛的概念

陶瓷产品的烧成气氛是指在烧制的过程中，窑炉内的燃烧产物中所含的游离氧与还原成分的百分比。一般将烧成气氛分为氧化气氛和还原气氛两种。游离氧含量在 8% 以上的称为强氧化气氛，游离氧含量在 4%~5% 的称为普通氧化气氛，游离氧含量 1%~1.5% 的称为中性气氛当游离氧的含量小于 1%，并且 co 含量在 3% 以下时，称为弱还原气氛，co 含量在 5% 以上的称为强还原气氛。

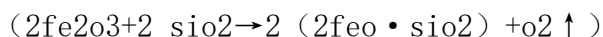
在实际生产中，采用何种气氛制度来烧制陶瓷产品，要根据产品配方中原料的组成以及烧制过程中各阶段的物化反映情况来确定。当原料中所含有机物和碳较少，且粘性低、吸附性弱、含铁量较高时，适合与还原气氛烧成反之，则适合与氧化气氛烧成。

二、烧成气氛对产品性能的影响

众所周知，气氛会影响陶瓷坯体在高温下的物化反应速度、体积变化、晶粒尺寸与气孔大小等，尤其对陶瓷坯的颜色、透光度和釉面质量的影响，更显突出。

① 影响铁和钛的化合价

在实际生产中，当氧化气氛烧成时，坯料中的 Fe_2O_3 在含碱量较低的玻璃相中熔解度很低，可析出胶态的 Fe_2O_3 使坯显黄色当还原气氛烧成时，形成的 FeO 熔化在玻璃相中呈淡青色。另外，当坯体中的氧化铁含量一定时，若用氧化气氛烧成，被釉层所封闭的 Fe_2O_3 将有一部分与 SiO_2 反应生成铁橄榄石并放出氧，其反应如下：



反应生成的氧会使釉面形成气泡与孔洞，而残留的 Fe_2O_3 会使坯体呈黄色。对含钛较高的坯料应避免用还原气氛烧成，否则部分 TiO_2 会变成蓝至紫色 Ti_2O_3 ，还可能形成黑色 $2\text{FeO} \cdot \text{Ti}_2\text{O}_3$ 尖晶石和一系列铁钛混合晶体，从而呈色加深。

② 使 SiO_2 还原和 CO 分解

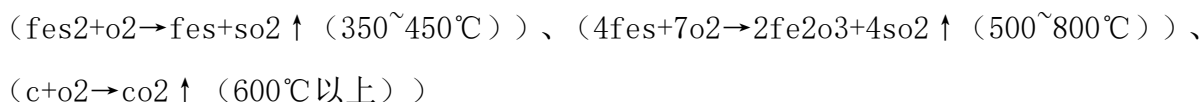
在一定的温度下，还原气氛可使 SiO_2 还原为气态的 SiO ，在较低的温度下它将按 $2\text{SiO} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Si}$ 分解，因而在制品表面形成 Si 的黑斑。还原气氛中的 CO 在一定的温度下会按 $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ 分解。在 400°C 时 CO_2 是稳定的，而在 1000°C 时，仅有 0.7%（体积） CO_2 。 CO 的分解在 800°C 以下才速度较快，而高于 800°C 时需要一定的催化剂。碳虽也有催化作用，但要求一定的表面积，游离态的氧化铁催化作用则与表面积无关，因此在还原气氛中很可能因 CO 分解出碳沉积在坯、釉上形成黑斑。若再继续升高温度烧成，在碳被封闭在坯体中若再被氧化成 CO_2 就会形成气泡，对吸附性能强的坯体尤为严重。

三、烧成气氛对产品缺陷的影响

陶瓷产品在烧成过程中会发生一系列的物理化学反应，如水分的蒸发，盐类的分解，有机物、碳和硫化物的氧化，晶型的转变，晶相的形成等。这些物理化学反应的速度，除了受温度影响之外，气氛对其也有很大的影响，如果控制不当，就会使陶瓷产品产生各种缺陷，下面介绍最常见的几种缺陷。

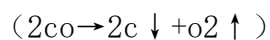
① 黑心

陶瓷产品的黑心是指在坯体的烧成过程中，有机物、硫化物、碳化物等因氧化不足而生成碳粒和铁质的还原物，致使坯体中间呈黑色或者灰色、黄色等现象。黑心缺陷的存在会影响陶瓷产品的强度、吸水率、色泽等性能指标。陶瓷产品产生黑心缺陷的关键是有机物、碳化物、硫化物氧化不足，陶瓷产品在烧成过程的低温阶段发生有机物的分解和如下的氧化反应：



在此阶段如果氧化气氛不足，有机物的分解和上述的氧化反应就无法完全地进行， C 、 FeS_2 和 FeO 等过多地残留积聚在坯体内而使坯体呈黑色、灰色、黄色。在实际生产中要消除产品黑心，须在 $600 \sim 650^\circ\text{C}$ 让有机物开始燃烧，在 $300 \sim 850^\circ\text{C}$ 让有机物、铁化

合物和碳充分氧化，也就是说，应在预热带保证足够强的氧化气氛。另外，在烧成的低温阶段，烟气中的 co 会被分解，反应式如下：



这一分解在 800°C 以上时会比较明显，而 800°C 以下时，在有一定催化剂的情况下反映也很明显（游离态的 feo 就是很好的催化剂）。如果在低温阶段窑内的氧化气氛不足，且存在还原气氛的情况下，由于在还原气氛中存在的 feo ，因此 co 会激烈分解而析出 c 。在低温阶段由于坯体的气孔率较高，析出的 c 很容易被吸附在坯体气孔的表面而形成黑斑缺陷。

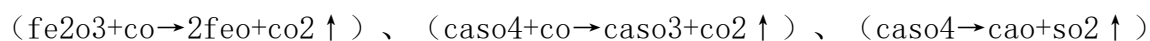
② 气泡和针孔

陶瓷产品在烧成过程的低温阶段，除了发生前面所述的氧化反应外，还伴随着碳酸盐的分解：



这些反应的速度和完全程度都受到气氛的影响，氧化气氛足够时，反应会快且进行得更完全反之，反应速度变缓且不完全。当烧成过程进入高温阶段后，坯体出现液相，反应所产生的气体无法自由排出坯体外，于是便出现针孔、气泡等缺陷。

在低温阶段将坯体内的气体成分全部氧化分解是不可能的，因为碳酸盐和 fe_2o_3 在氧化气氛中要在高于 1300°C 以上才进行分解，但是在这样高的温度区域，坯体已经有液相存在，粘度减小，分解出来的气泡会冲破液相逸出，造成釉面不平，或者残留在釉层内，形成气泡缺陷。为解决这一问题，在高温前（ 1000°C 左右）要将烧成气氛控制为还原气氛，让 fe_2o_3 及硫酸盐类发生如下还原分解：



③ 色差

陶瓷产品的色差是指单件产品的各部位或单件（批）产品之间的呈色深浅不一的显现。在陶瓷坯体和釉料的原料中，总会或多或少地引入一些铁、钛化合物，在烧结过程

中烧成气氛的不同会影响到铁、钛存在的价数，不同价数的铁、钛会有不同的呈色，当烧成气氛不稳定时，坯体的呈色相应改变，从而形成产品的色差。

目前，市场上流行的钒钛金属砖，由于其坯料含钛较高，如在还原气氛下会有部分 TiO_2 转变成蓝色至紫色的 Ti_2O_3 ，形成色差，也有可能形成黑色的 $\text{FeO} \cdot \text{Ti}_2\text{O}_3$ 尖晶石和铁钛混合晶体，从而加深铁的呈色，形成砖面颜色深浅不一，其反应式如下：



4、烧成气氛的控制

烧成气氛的控制受到窑炉结构和设备配置的限制，比如风机风量的大小，风管直径的大小，排烟口、抽热口、抽湿口位置的设置等，都会影响到烧成气氛的控制。但是，最关键的还是稳定压力制度和合理操作燃烧器。

① 稳定压力制度

压力变化会影响到气体的流动状态，因此窑内压力制度的波动会引起气氛的波动，要控制好气氛，就必须稳定好压力制度，而稳定压力制度的关键在于控制好零压面。在窑炉预热带，因要排走水分和燃烧时产生的烟气，故压力相对比窑外环境的低，对比之下窑内气压处于负压状态在冷却带要鼓入冷空气使制品冷却，压力相对比窑外环境的高，对比之下窑内气压处于正压状态在正负压之间有一零压面，烧成带就处在预热带和冷却带之间，因而零压面的移动就会引起烧成带气氛的变化。当零压面位于烧成带前段，处于烧成带与预热带之间时，烧成带的气压为微正压状态，气氛为还原气氛当零压面位于烧成带的后端时，烧成带处于微负压状态，气氛为氧化气氛。

② 合理操作燃烧器

烧成的燃料是否完全燃烧将会影响到窑炉气氛，特别是烧成带的气氛。因此合理地操作燃烧器，控制好燃料的燃烧程度，是控制窑内气氛的重要手段。在燃料完全燃烧的情况下，燃料中的全部可燃成分在空气充足时能完全氧化，燃烧产物中没有游离 C 及 CO、 H_2 、 CH_4 等可燃成分，保证氧化气氛的实现当燃料不完全燃烧时，燃烧产物中存在一些游离 C 及 CO、 H_2 、 CH_4 等，使窑内气氛呈还原性。要使燃料完全燃烧，须注意以下三点：

- ①确保燃料与空气充分，均匀地混合②保证充足的空气供给，并保持一定的过剩空气量
- ③确保燃烧过程在较高的温度下进行。

5、实际生产中烧成气氛的调整

对于上述稳定气氛的理论要点，许多人都很清楚，但在实际的操作中，会因为要解决某些烧成问题而不自觉地改变窑炉的气氛，这种变化往往容易被人忽视，以下是常见问题出现的情况。

① 为了提高烧成温度而改变空气过剩系数

有些企业为了追求单窑产量的最大化，不断地加快烧成速度，缩短烧成周期。而操作工最常用的手段就是加大燃料供应量，但燃料供应量增加后往往没有及时调节助燃空气的供应量和助燃风机总闸的调节，造成烧成气氛由氧化气氛变为还原气氛。

② 为解决预热带出现的缺陷而改变其气氛

一些操作工为了降低预热带后段的温度而减小排烟闸的开度，影响了窑炉压力平衡和气体流速，使预热带的氧化气氛减弱，如控制不好容易造成前炉燃烧状态不良，使气氛出现波动。

③ 为解决冷却带出现的缺陷而改变冷风量

这样操作不仅影响到全窑压力制度的变化，而且会使气氛发生变化。比如加大冷风，容易使零压面向预热带移动，反之零压面又会向冷却带方向移动，这些都会使气氛发生改变。为了稳定压力，必须相应调节抽热闸的开度，以平衡全窑的气体进出量，稳定零压面。