

第六章 玻璃工业窑炉

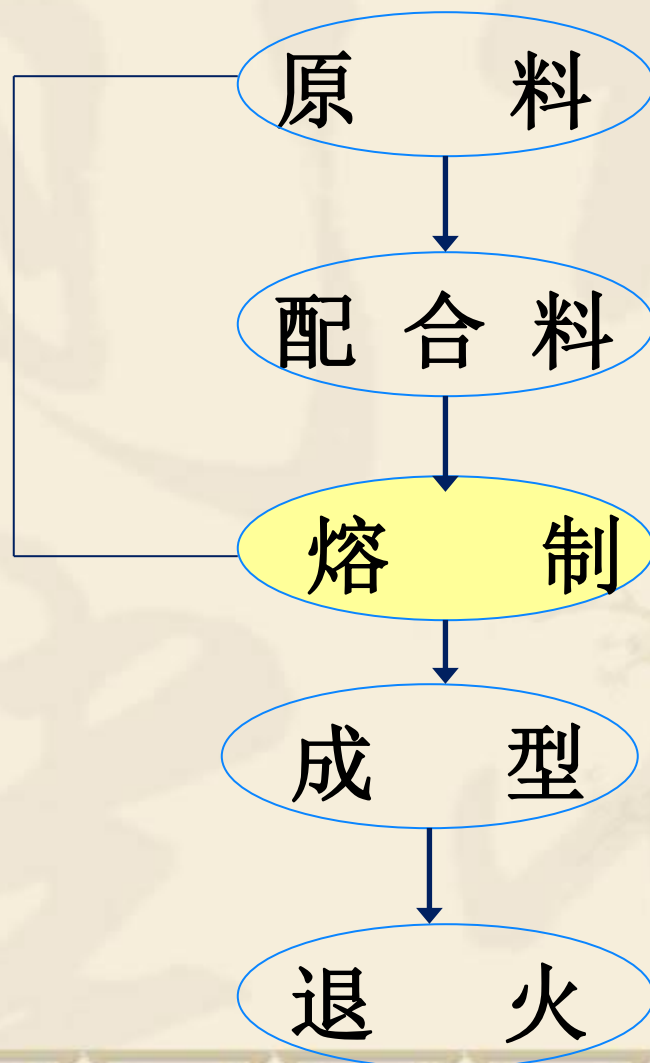
本章要点：

玻璃生产中所用的热工设备统称为玻璃窑炉，其中包括**玻璃熔窑**、退火窑和一些玻璃加工用的窑炉。

本章学习目的是掌握玻璃的熔制过程和玻璃池窑工作原理，进而了解玻璃的安全、低耗与清洁生产工艺。

玻璃制品生产工艺流程

玻璃液的制备



玻璃的熔制过程

将配合料经高温加热熔融成合乎成型要求的玻璃液的过程

一、硅酸盐形成阶段

配合料在入窑后，经800~1000℃作用下迅速发生的一系列物理的、化学的和物理—化学变化，如粉料受热、水分蒸发、盐类分解、多晶转变等。

二、玻璃液形成阶段

配合料加热至1200℃，形成各种硅酸盐以及出现熔融体。直到温度达到1300℃左右，玻璃液开始形成。

三、玻璃液澄清阶段

从玻璃液中除去肉眼可见的气体夹杂物，消除气孔组织的阶段称为澄清阶段。该过程要在高温下完成，因为玻璃粘度随温度升高而迅速降低。

四、玻璃液均化阶段

玻璃液形成后，各部分玻璃液的化学成分与温度不同，还夹杂一些不均体。故而要进行均化过程。其原理主要是依靠扩散和对流作用。

五、玻璃液冷却阶段

为利于玻璃的成型，玻璃液要均匀冷却到成型温度。一般成型温度比澄清温度低200~300℃。

玻璃液熔制

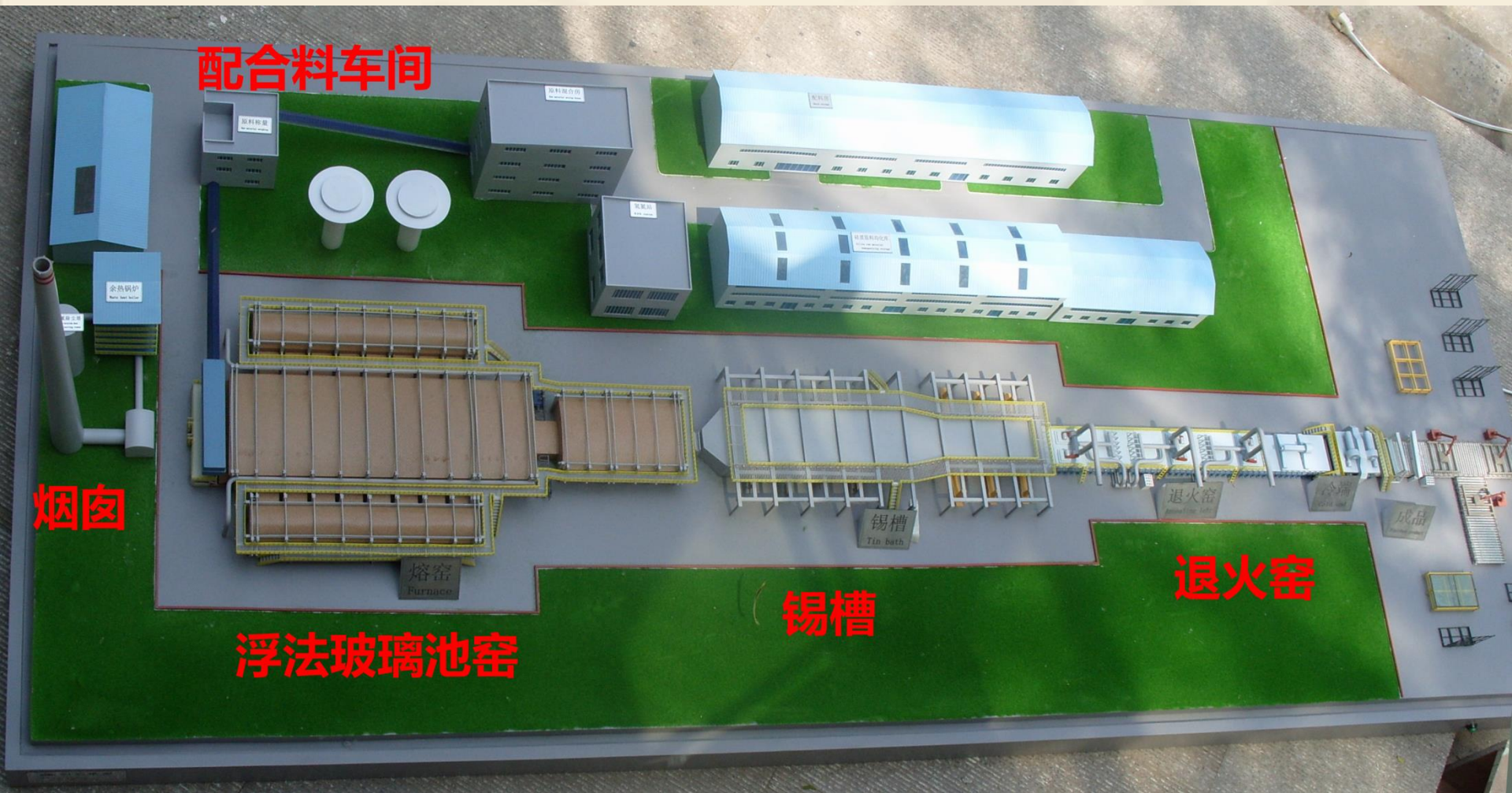
硅酸盐形成

玻璃的形成

玻璃液的澄清

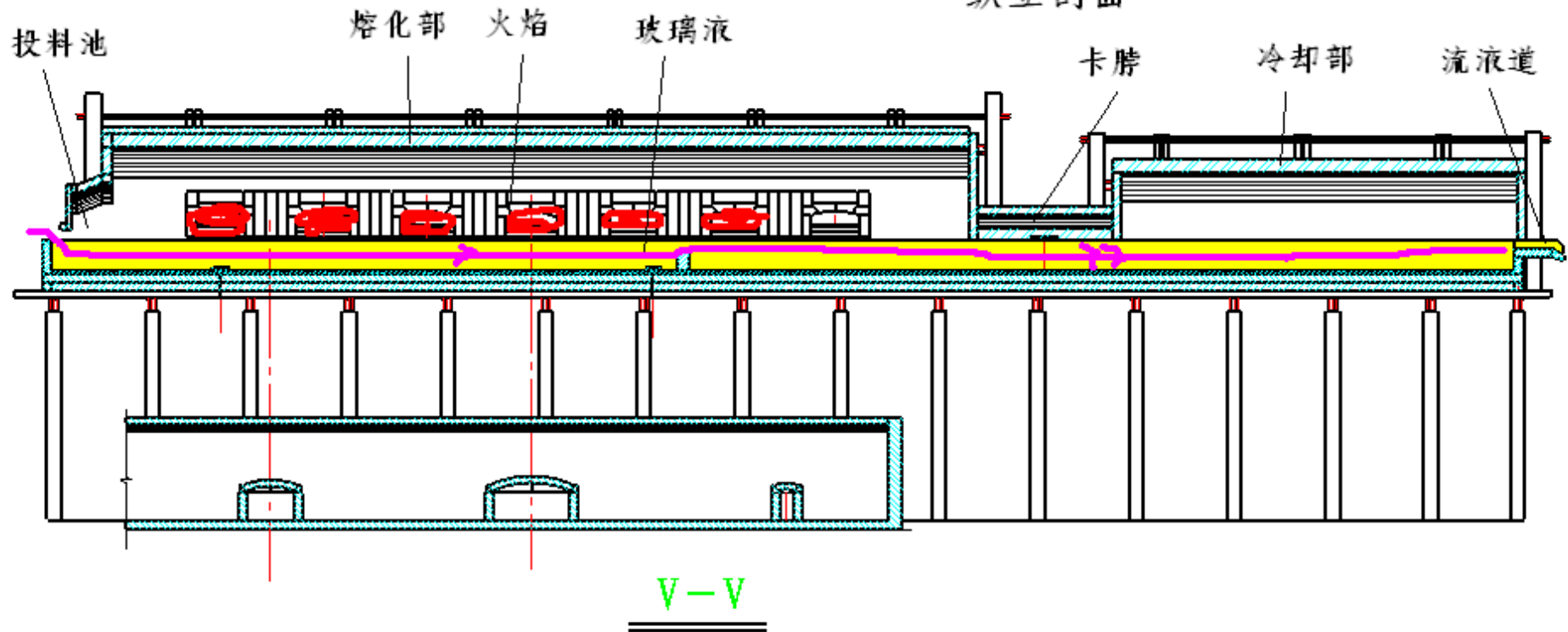
玻璃液的均化

玻璃液的冷却



浮法平板玻璃工厂模型图

蓄热式横焰浮法玻璃池窑
纵立剖面



横火焰浮法玻璃池窑横立纵立剖面示意

一、玻璃窑的分类

1、池窑分类（按所用热源）

火焰 以燃料（煤气，重油）燃烧为热源

电热 以电能作为热源

火焰——电热混合 以燃料为主要热源，
电能为辅助热源

2、按工作性质不同 （熔制过程的连续性）

连续式 玻璃熔制的各个阶段系在窑内同一时间、
不同部位同时进行，窑内温度制度是稳定的。

间歇式 玻璃熔制的各个阶段系在窑内同一部位、
不同时间依次进行，窑的温度制度是变动的

3、按烟气余热利用设备

蓄热室式窑 按蓄热方式回收烟气余热

换热器式窑 按换热方式回收烟气余热

4、按窑内火焰流动的方向

横焰窑 窑内火焰作横向流动、
与玻璃液流动方向相垂直

马蹄焰窑 窑内火焰呈马蹄形流动

纵焰窑 窑内火焰作纵向流动、
与玻璃液流动方向相平行

5、按生产类型
(制造的产品)

平板玻璃窑 制造平板、压延等玻璃
(比如, 浮法玻璃窑)

日用玻璃窑 制造瓶罐、器皿、化学仪器、
电真空玻璃等

6、按窑的生产能力

按生产能力

大型: 150吨/天
中型: 50~150吨/天
小型: 50吨以下/天

按熔化面积

大型: 60吨/m²
中型: 30~60吨/m²
小型: 30吨/m²

对浮法玻璃

大型: 500以上吨/天
中型: 300~500吨/天
小型: 300以下吨/天

二、玻璃熔制主要工艺制度与控制

1. 温度制度与控制

中间最高温度为热点。**热点温度**依据玻璃组成、耐材和窑的寿命而定。钠钙硅玻璃热点温度为 1580°C 。

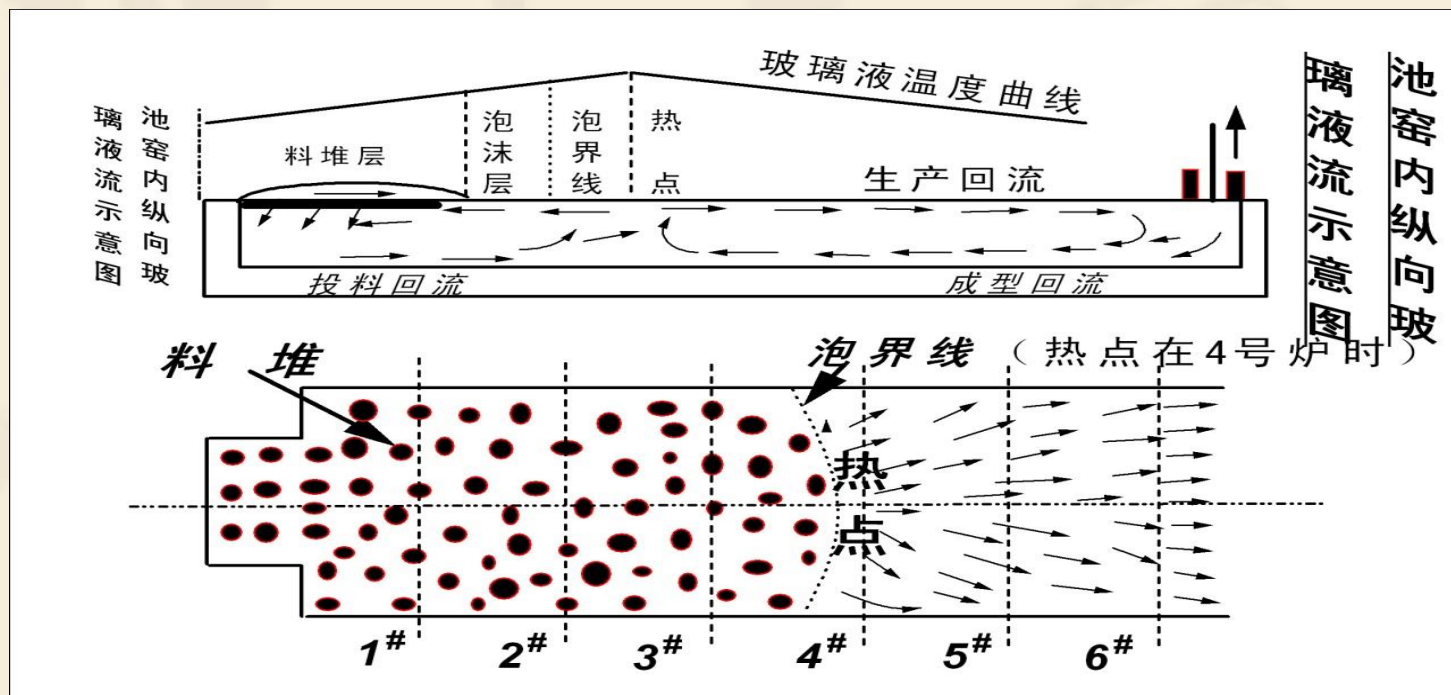


图6-1 玻璃池窑中玻璃液流动状况

2. 燃料加热温度与火焰控制

煤气加热温度制度对玻璃生产影响极大。要求煤气质量好且稳定，火焰主要以热辐射方式传热，火焰亮度取决于燃料性质与空气的配比；火焰长度适中，太长将烧损对面窑墙，火焰太短，覆盖面积小，温度分布不均匀。

表6.1 平板玻璃池窑各对小炉燃料量分配

小炉 对数	泡界线 位置	各小炉燃料耗量的百分数						
7	4# 小炉前	16	18	21	21—20	12	8	4
	4# 小炉后	17	19	21	21	13—12	6	3
6	4# 小炉前	16	18	21	20	16	9—8	— —
	4# 小炉后	17	19	21	21	15	7—8	— —
5	3# 小炉后	20	22	24—25	22—21	12	— —	— —
4	2#、3# 之间	23	35	28—30	14—8	— —	— —	— —

三、玻璃池窑主要结构

■ 1、投料部分

(1) 投料池

投料池的作用主要是使投料机连续、平稳地将配合料投入到熔窑当中。要求实现薄层投料。薄层投料有利于热量的传递，加速配合料的熔化，可以提高配合料的熔化效率。另外，投料池有一定的预熔作用。

(2) 前脸墙（L型吊墙）

前脸墙：是指正面投料时，投料口或投料池上部的挡墙。

作用：（1）保证将配合料、碎玻璃送到玻璃池窑内，
（2）遮挡玻璃池窑内热气体，减小其向外的溢出量以及向外的热辐射损失、对投料设备的烧损。

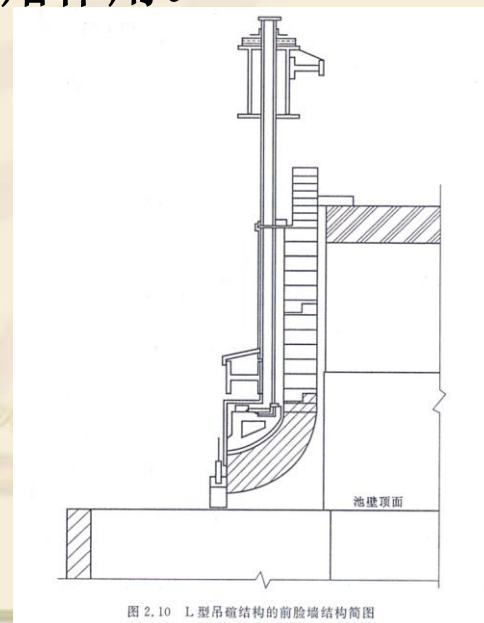


图 2.10 L型吊墙结构的前脸墙结构简图

■ 2、熔化部

玻璃池窑的熔化部（Melting Zone）是进行配合料熔化和玻璃液澄清、均化的部分。

由于工业化玻璃池窑大都采用火焰对玻璃液表面进行加热，所以玻璃池窑的熔化部可以分为上、下两部分。上部被称为“火焰空间”；下部被称为“窑池”。火焰空间包括大碓（拱顶）和胸墙等部分，窑池则由池壁和池底等部位所构成。

（1）熔化带：前脸墙到末对小炉中心线外1米所覆盖的面积。

（2）热点：玻璃熔窑中温度最高的点。浮法玻璃的热点温度为1580-1590℃

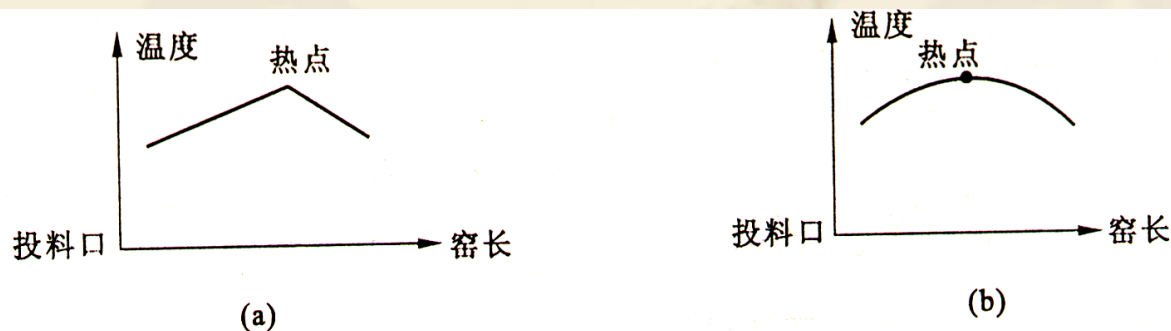


图 2.80 温度曲线的两种类型

(a) “山形”温度曲线；(b) “桥形”温度曲线

(3) 窑池

熔化部的形状是一个长方体。熔化部的作用是使加入到窑池中的配合料在高温下熔化成玻璃液，并使其澄清和均化。为了提高玻璃液的质量，现代浮法玻璃窑炉的结构有了演变———熔化区、澄清区———微小气泡。

(4) 熔化部澄清区长度和宽度的确定

- 浮法玻璃池窑澄清区的长度，从理论上和实际生产上都要求，气泡的排除需要一定的时间，应使玻璃液在澄清区停留。
- 玻璃池窑的长度设计要确保玻璃液的熔制质量与澄清质量。
- 玻璃池窑熔化部澄清区的宽度 B_R 与玻璃池窑熔化部熔化区的宽度 B_m 相同。

(5) 窑池的深度

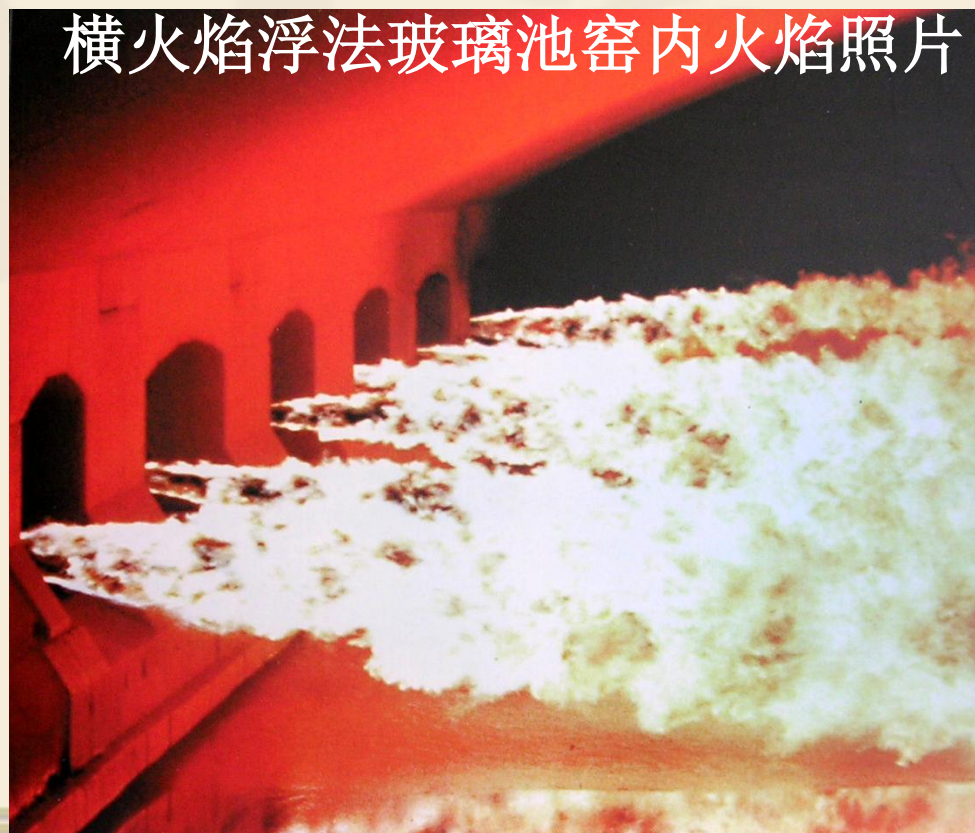
关于窑池的深度，国内外有两种比较通用的结构形式：深池结构（池深为1.5米）和浅池结构（池深为1.3米）。

3、火焰空间

在玻璃池窑熔化部的玻璃液面之上是由胸墙（窑墙）、大碓（窑顶）、前脸墙和后山墙所包围着的、充满火焰的整个炉膛空间，被称为火焰空间。

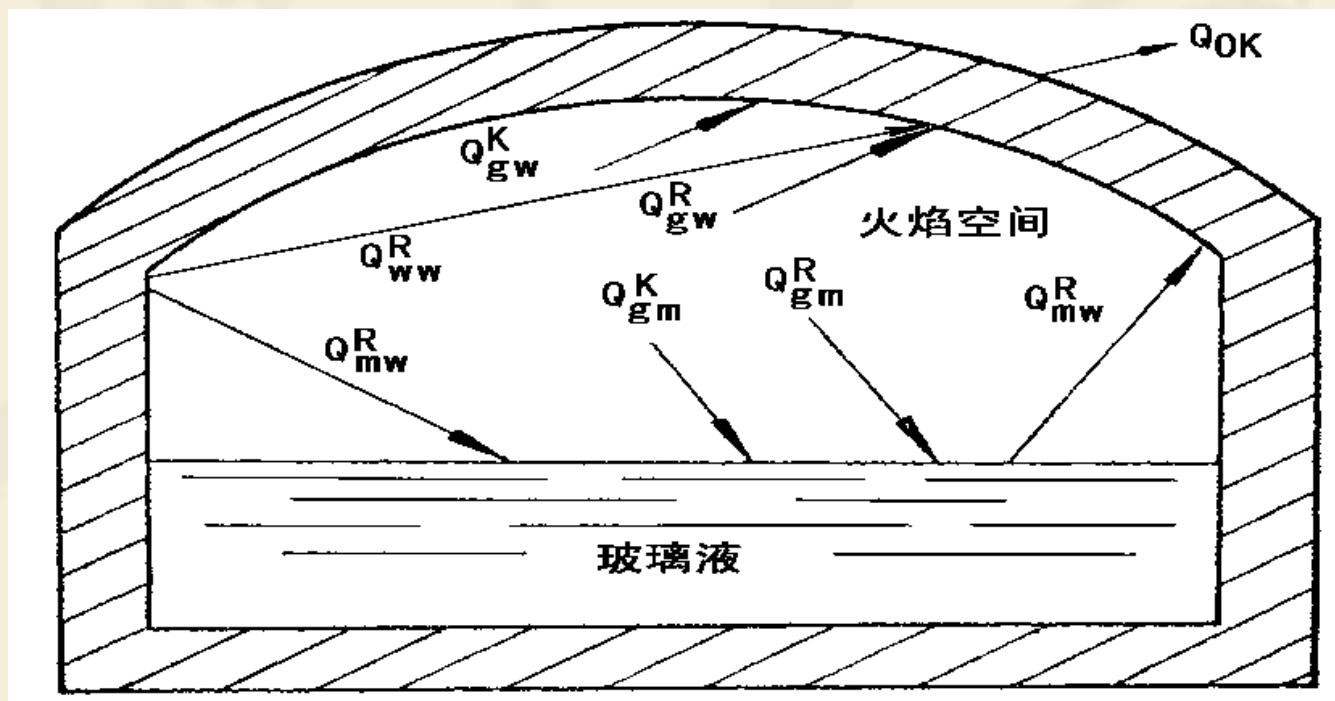


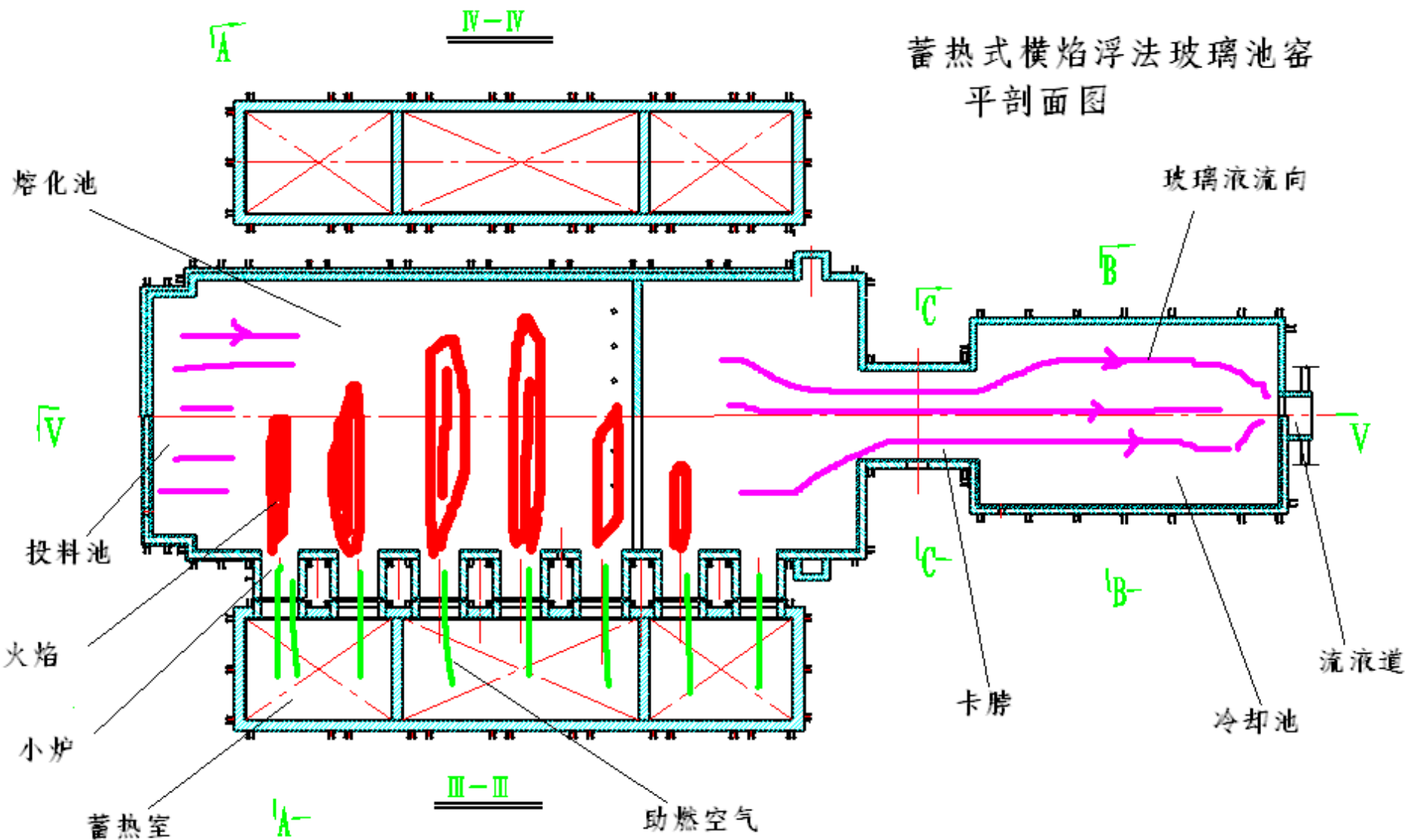
燃重油的小炉在喷火



横火焰浮法玻璃池窑内火焰照片

火焰空间内充满着炽热的气体 and 火焰，火焰及高温气体以**传导**、**对流和辐射**的传热方式将自身的热量传给胸墙、大碇和下面的玻璃液。要求火焰在平行于液面的前提下，尽量接近玻璃液面。这与燃烧设备小炉的结构有密切的关系。





蓄热式横焰浮法玻璃池窑
平剖面图

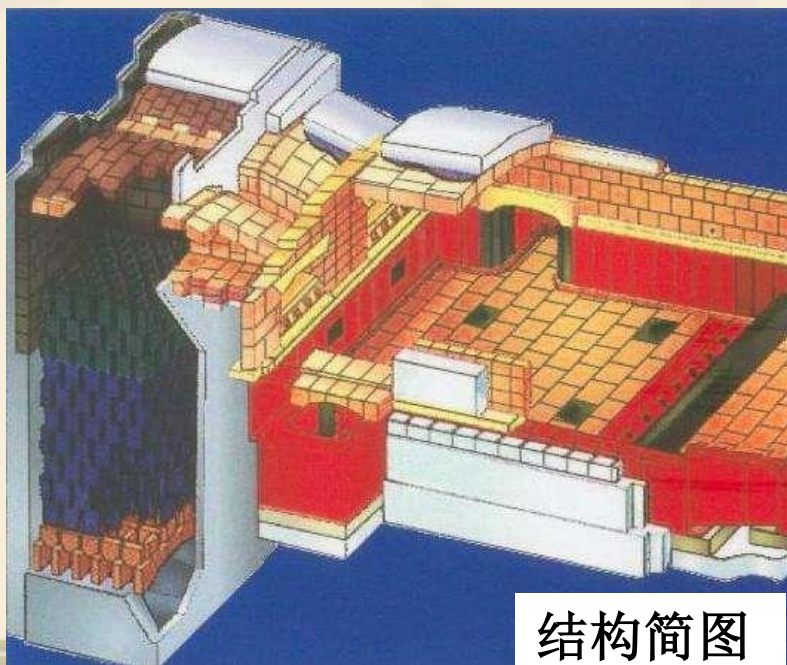
横火焰浮法玻璃池窑平剖面示意

4、热源供给部分

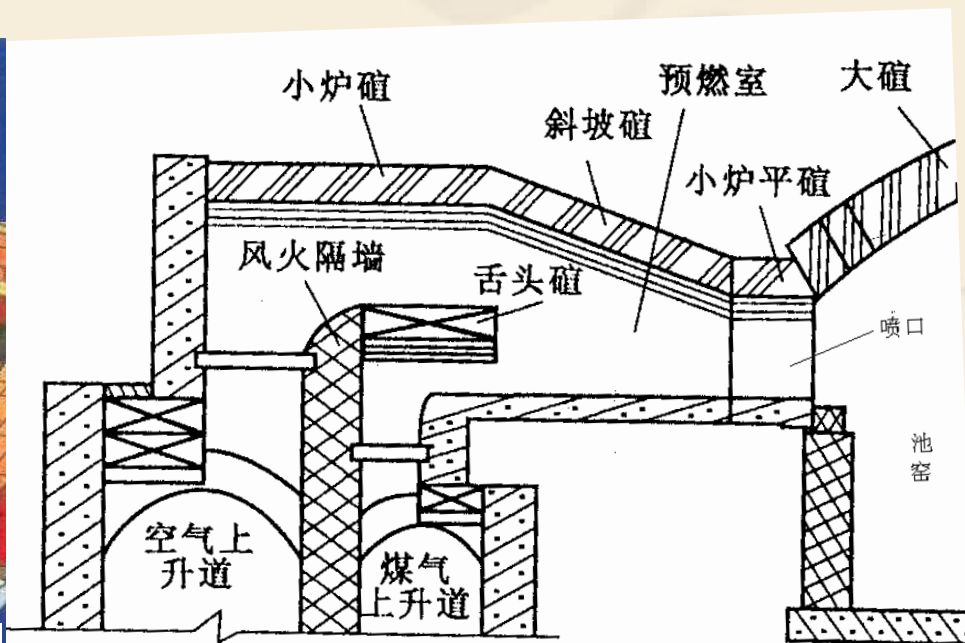
玻璃池窑的热源供给系统包括小炉与燃料供给系统。

小炉的作用是向熔窑内部提供助燃空气。

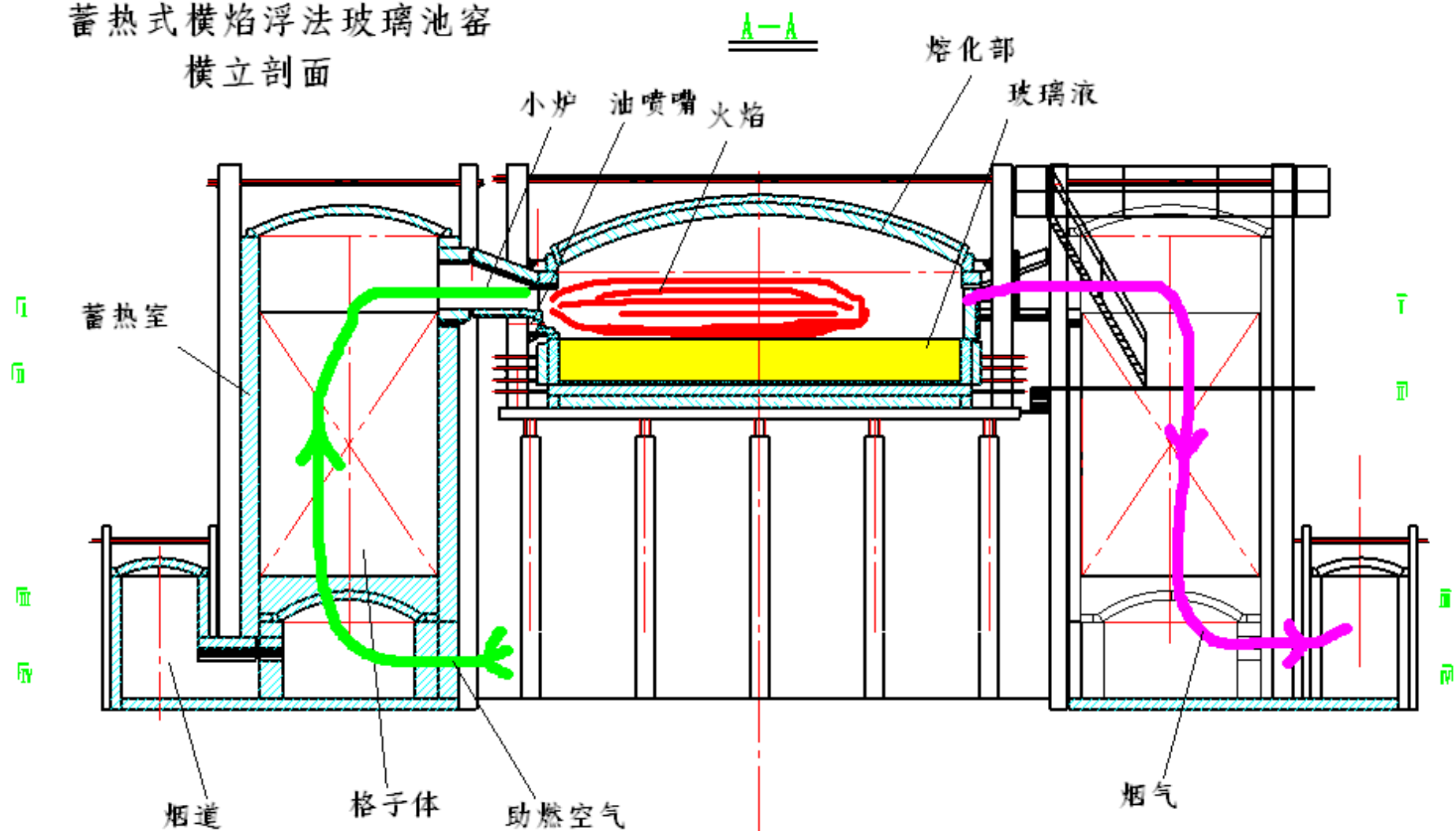
- 不同的燃料所用的小炉结构有较大的区别。天然气和重油由于可以通过管道输送，其小炉结构比较简单，燃料供给系统控制精度高。



结构简图



蓄热式横焰浮法玻璃池窑 横立剖面



横火焰浮法玻璃池窑横立平剖面示意

燃重油、天然气的小炉

对于玻璃池窑来说，选择**烧嘴安装位置**需要考虑：

- ① 燃料燃烧获得的热量尽可能多地传递给配合料和玻璃液，尽可能少地传递给玻璃池窑的上部结构；火焰平行并沿着液面向前运行，要求小炉有一个空气下倾角（ $24^{\circ}\sim 28^{\circ}$ ）。
- ② 燃料能够充分地在玻璃池窑的内部燃烧；
- ③ 避免火焰直接冲击玻璃池窑的耐火材料砌体；（烧大碯、冲击配合料）
- ④ 用最少的过剩空气，使燃料与助燃空气充分地混合和完全地燃烧（某些玻璃池窑的个别部位对燃烧气氛有特别要求的除外），助燃空气的实际用量与理论用量之比为 $1.05\sim 1.2$ 。
- ⑤ 便于操作人员的操作和维修。

■ 5、分隔装置（分隔设备）

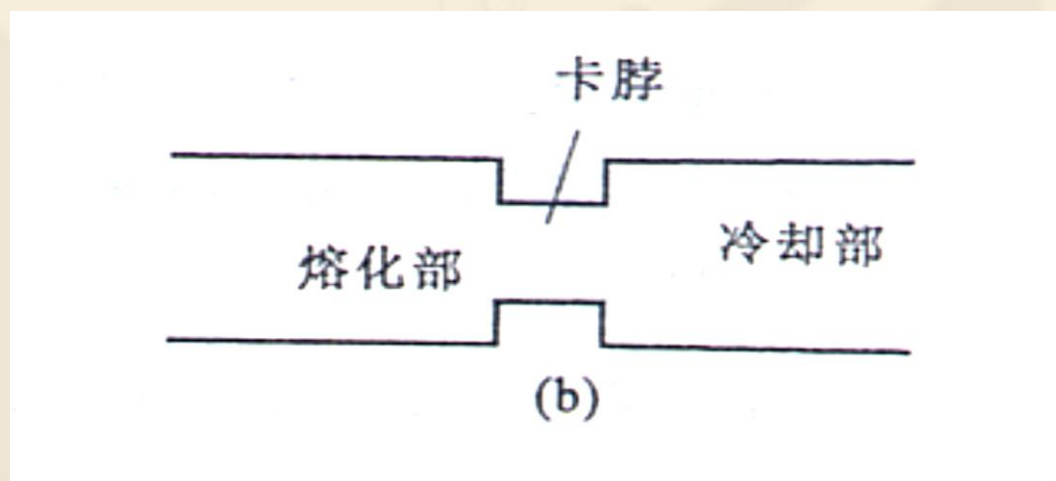
玻璃池窑的分隔装置是指玻璃池窑的**熔化部与冷却部**之间的分隔装置，它包括**玻璃液的分隔装置**和**气体空间的分隔装置**。

（1）玻璃液分隔设备的作用

- a、**防止玻璃液回流，选取熔化好的玻璃液，进入冷却部，提高玻璃质量。
- b、**减小熔化部对玻璃成型的影响。（温度波动及压力波动）。
- c、**节能。
- d、**可以加水管、搅拌机提高玻璃质量。
- e、**可以降低玻璃液的温度。它具有稳定成型部作用和促进玻璃液流动的作用。

(1) 卡脖

- 浮法玻璃池窑所用的玻璃液分隔装置是浅层分隔装置，具体来说有卡脖、冷却水管和窑坎等。
- 熔化部宽度缩窄后，经过一定的长度后，到冷却部再放宽。卡脖配合矮碓使用，此处可以加大水管和搅拌器。

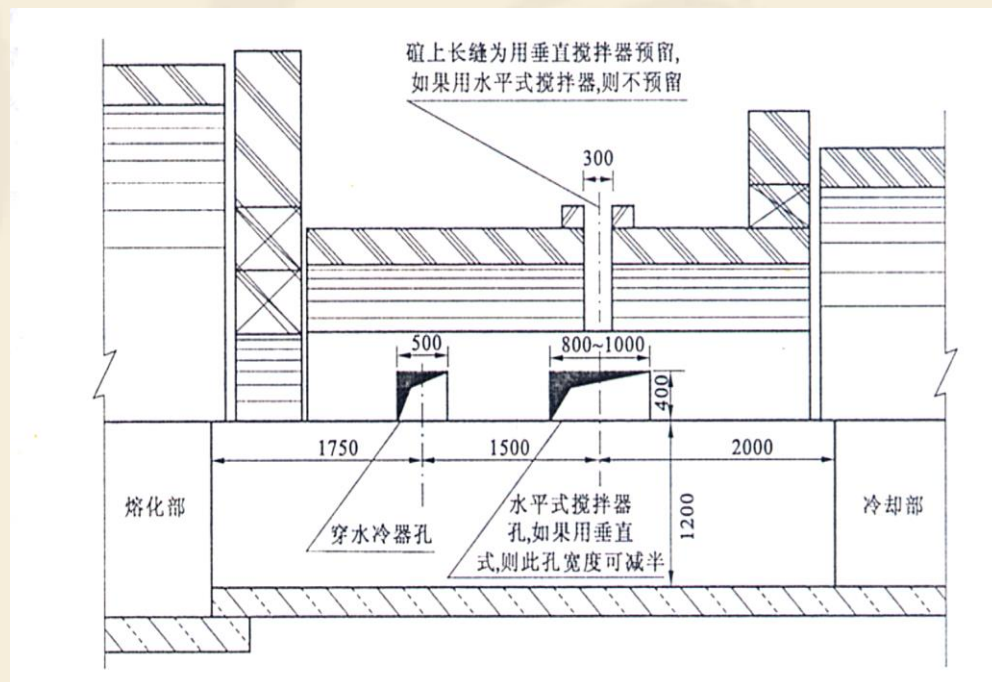


(2) 冷却水管

■ 冷却水管是内部通有冷却水的无缝钢管，目前一般是采用一对冷却水管，从卡脖的两侧插入。

■ 其工作原理是：由于冷却水管内流通的是冷却水，所以水管管壁附近的玻璃液因温度降低而粘度增大，从而对玻璃液的流动起到阻碍作用，于是就实现了它作为玻璃液分隔装置的目的。

■ 一般情况下：卡脖、大水管、搅拌配合使用为好



(3) 玻璃液的搅拌器

■ 在卡脖处使用玻璃液搅拌器（Stirrer）来搅拌玻璃液可以提高玻璃液的均化程度，从而提高玻璃制品的质量和稳定性。玻璃液搅拌器的作用：

① 玻璃液搅拌器的搅拌作用降低了玻璃液的流速，使得玻璃液流中化学成分不均一的质点有足够的时间向周围的玻璃液介质作充分的扩散，从而改善了玻璃液的化学均匀性。

② 通过玻璃液搅拌器的搅拌作用可以降低玻璃液的温度。在不降低玻璃液质量的前提下，使用玻璃液搅拌器以后，可以达到增产10%-15%的效果。

③ 使用玻璃液搅拌器后可以减少冷却部向熔化部的玻璃液回流量。

(4) 气体空间分隔装置

- 为了保持冷却部的作业制度，常在玻璃池窑的熔化部和冷却部之间设置有气体空间的分隔装置，以减小熔化部高温火焰对冷却部的影响。
- 气体空间的分隔装置有完全分隔和部分分隔这两大类。浮法玻璃池窑只用部分分隔装置。
- 玻璃冷却时，希望不受外界的温度上的和压力上的干扰温度上：熔化部的火焰换向，会造成**温度上的波动**。压力上：换向的时候会造成窑内的**压力波动**；压力波动会对玻璃液中的气体排除产生影响；
- 压力波动会对供料槽处的压力产生影响，使得玻璃板的厚薄产生微不均匀——国内与国外浮法玻璃的质量区别上有在厚薄差、微小波纹方面的差距。

■ 5、冷却部

从玻璃池窑熔化部进入冷却部的玻璃液要进行进一步的澄清、均化和冷却以满足玻璃液成型的要求。

玻璃池窑冷却部（Cooling End）的结构与熔化部的结构基本上相同，也分为下部窑池和上部空间两部分。

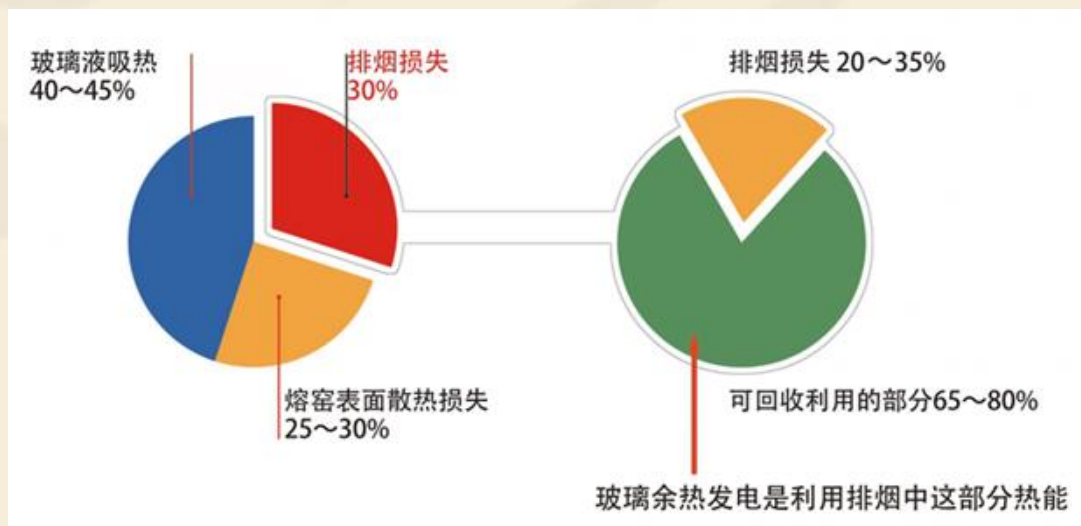
下部窑池由池底和池壁所组成，上部空间由胸墙和大碯所组成。只是冷却部的窑池深度比熔化部的窑池深度稍浅，冷却部的胸墙高度略低于熔化部的胸墙高度。

冷却部冷却时要注意降温要稳定，避免温度较大的波动，造成二次气泡。

6、余热回收部分

（一）玻璃厂余热回收的意义

- 玻璃池窑是玻璃工厂能耗最大的热工设备。其能耗约占玻璃工厂总能耗的80%以上。占玻璃成本的20%。
- 玻璃熔制过程中，玻璃液吸热仅占40~45%，排烟中热能占进入玻璃窑总热能的30%。余热发电可以使排烟中的热能回收利用率达65%~80%。
- 采用预热空气和煤气的方法除了可以节约燃料外，还能够提高燃料的燃烧温度，以满足玻璃熔化的要求。



在玻璃窑中产生的烟气余热的主要参数包括烟气的主要成分、温度、流量、压力以及形成的粉尘的特性等等，这些烟气余热的参数都会随着工业窑炉的变化而发生相应的变化

玻璃窑炉烟气余热特点

1、积灰性：玻璃窑余热锅炉受热管上同时存在着烟气高温沉积和低温沉积（结渣）的现象，高温沉积状态下，内层主要是以液态的形式冲刷附着在壁管表面，外层则是沉积在内层上的灰尘沉积物。在玻璃窑的低温沉积状态下，由于烟道和锅炉的受热面温度较低，因此主要是壁管表面的酸液或水蒸气凝结与灰尘凝聚而成。主要表现为**松散型积灰、粘结性积灰和粘附性积灰**三种形式，在最靠近壁管的一层积灰称为粘附性积灰，其可以捕捉灰尘颗粒形成第二层粘结性积灰，最外层的是松散型积灰。

2、腐蚀性：玻璃窑的粉尘中含有**碱金属和硫化物**，且部分碱金属熔点低，会在壁管的表面形成高温黏结的积灰，但是随着温度的逐渐降低，碱金属在硫酸盐等的作用下会和水蒸气形成强腐蚀性的化合物，且更容易捕捉到烟气中的灰尘，形成二次积灰。并且烟气的酸露点的主要影响因素是烟气中的三氧化硫，而燃料和配料中都含有一定的硫化物，这些都会影响玻璃窑中的酸露点温度。

(二) 蓄热室余热回收

- 原理是**利用废气与空气**（或者废气与煤气、废气与空气）**交替地通过其内的格子体，从而使得空气**（或者空气和煤气）**获得废气所传给格子体的热量。**
- 换向以及换向时间：当加热期开始后一格子砖温度急剧上升，格子体上部逐渐为热量所“饱和”，吸热能力逐渐减小—离开蓄热室的烟气温度的开始上升，烟气留在蓄热室内的热量逐渐减少，格子砖愈来愈少地参加热交换，其热效率相应降低。因此，蓄热室的相对热效率与换向间隔时间之间有一个最有利的关系，目前多采用20~30 min。
- 蓄热室的上面与小炉相连，下面与支烟道相接，蓄热室的结构主要包括：**顶碓、格子体、分隔墙、炉条碓以及有关的钢结构**等。

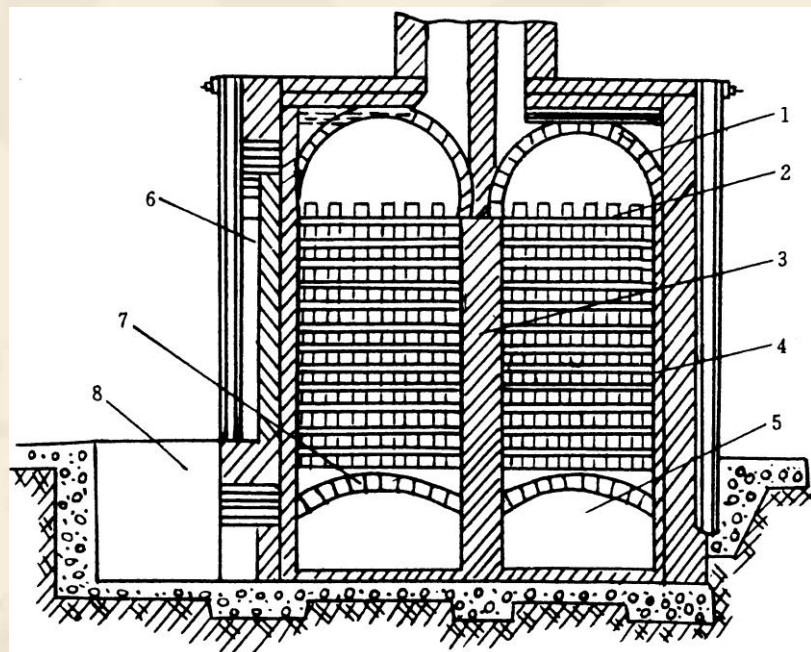
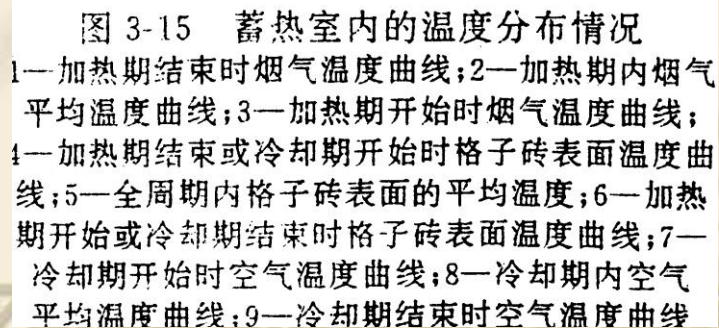
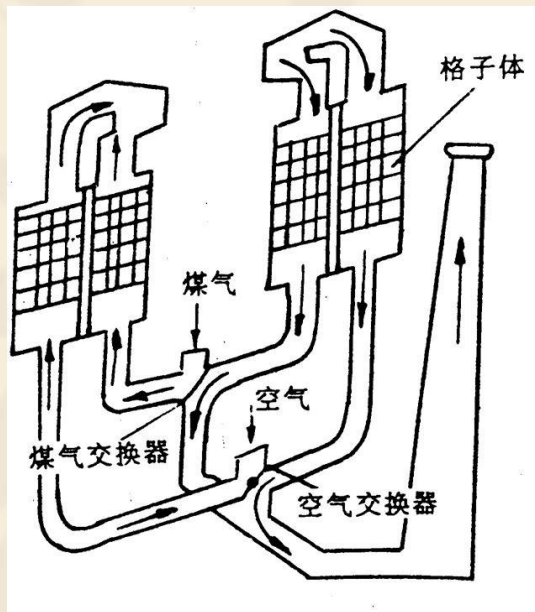


图 3-20 立式蓄热室构造示意图

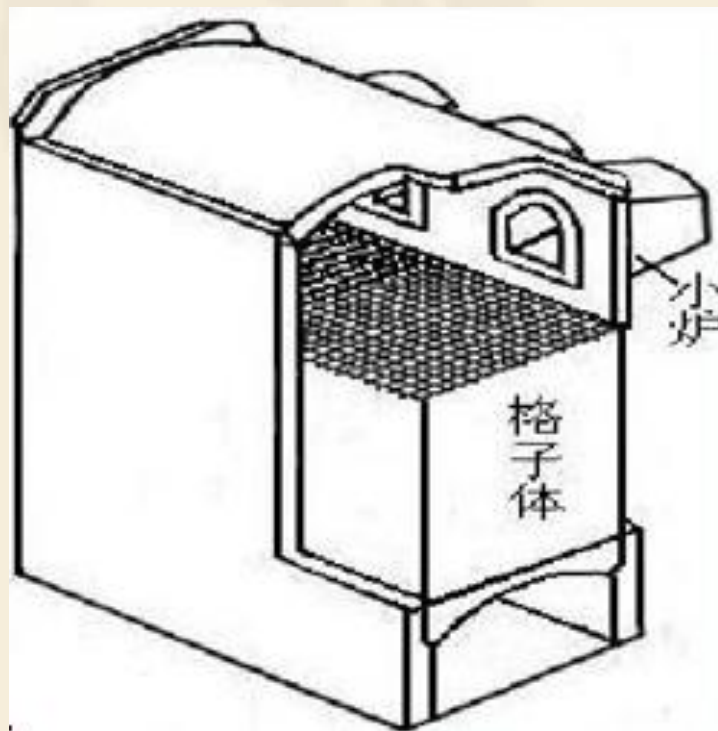
1—半圆碓；2—格子体；3—风火隔墙；4—蓄热室墙；5—烟道；6—热修门；7—炉条碓；8—扒灰坑

与换热器的区别：换热室内气流方向不变
由于每个周期中烟气、格子砖、空气或煤气的温度都随时间而变，故属于不稳定温度场，蓄热室内的传热过程属于不稳定传热。



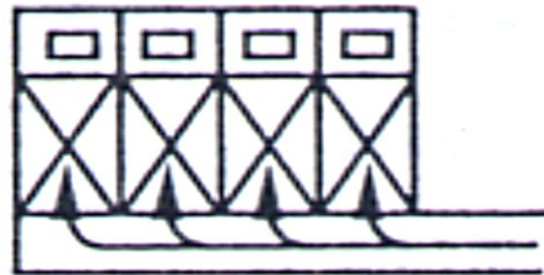
(三) 蓄热室的结构形式

- 为了提高蓄热室的蓄热效能和延长其使用寿命，改进玻璃池窑蓄热室结构。



箱式蓄热室

分隔式结构型式



将蓄热室以小炉为单元分成若干个室，每个小炉对应一个蓄热室。每个蓄热室内的气体不能串通，而且炉条下面的烟道也不相互联通，而是通过各个分支烟道与主烟道相连。

这样就形成了完全独立的、分隔状态的蓄热室。

特点：

- (a) 分配到每个室的气体靠每个室支烟道上的闸板来调节。可以实现助燃气体与燃料的比例调节、比例控制。气流分布均匀；不必增加外形尺寸就可增加格子体体积；气流阻力小。
- (b) 由于每个蓄热室之间有隔墙，减小了格子体的受热面积。减少沿途温降和散热；周期内气体温度变化小。
- (c) 空气预热温度提高，热效率高。
- (d) 热修时的工作条件比连通式结构型式大大改善。

目前结构稳定性是蓄热室设计和使用过程中最重要的。

蓄热室结构设计要求：

- 1) 工艺要求：满足熔化工艺所需温度的要求，预热温度高且度稳定；
- 2) 经济要求：蓄热室应有较高的换热效率，充分回收烟气余热，减少气体流动阻力和占地面积，
- 3) 结构要求：有足够的强度，特别是高温下的结构强度；
- 4) 操作要求：便于调节流量、清扫和热修。

格子体结构

- 格子体是蓄热室结构中重要的组成部分，格子体的结构是否合理，不仅会影响到其使用寿命，而且还会直接影响到格子体的蓄热效能。
- 理想的格子体结构应该具有使用寿命长、蓄热效能好以及周期温度波动小的特点，这也是蓄热室设计中选择格子体结构型式时要注意的原则。

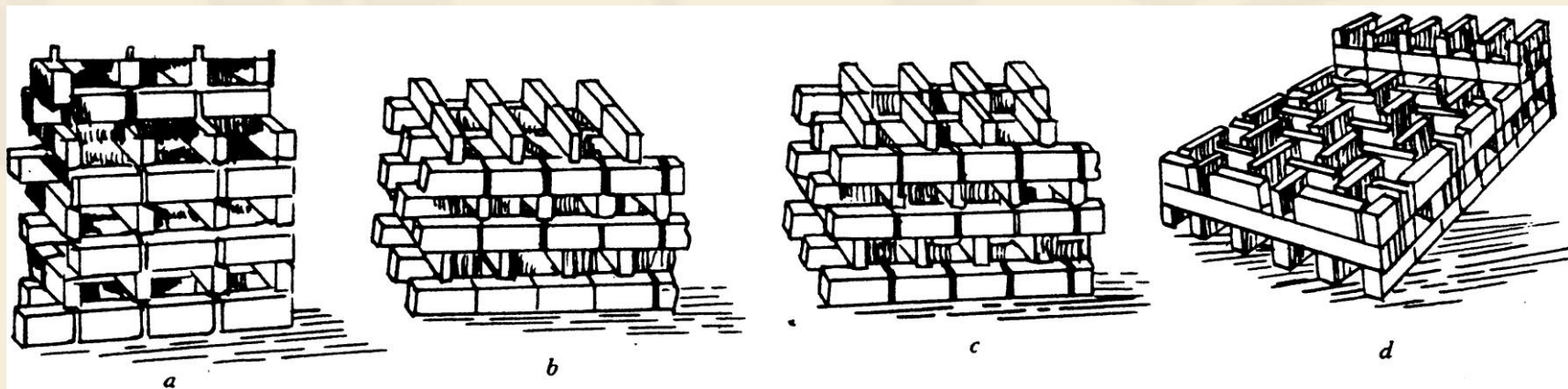


图 3-21 格子砖的排列方式

a —西门子式(上下不交叉); b —西门子式(上下交叉); c —李赫特式(上下交叉); d —编篮式

格子体受热表面：每立方米格子体中所具有的受热表面积的大小。

填充系数：每立方米格子体内砖材的体积。此值愈大说明格子体的蓄热能力愈大。

几种格子砖排列方式的性能比较

表 3-8

	连续通道	西门子式	李赫特式	编篮式
受热表面积	小	较大	大	大
热交换能力	小	较大	大	大
气流路程	短	较长	长 且涡流加强	长 且涡流加强
结构坚固性	好	较差	好	好
气流阻力	较小	较小	较大	较大
堵塞难易	不易	不易	易	不易
砌筑难易	易	易	较难	较难
某一通道堵塞后气流情况	气流不通	可绕道而行	可绕道而行	可绕道而行

提高蓄热室效率

着重考虑受热表面积或受热体积、气流分布均匀性和蓄热室气密性。