



# 材料工艺学

## ——玻璃工艺学

主讲人：韩高荣教授 赵高凌教授

2018年9月



# 内容

## 第一章

玻璃的定义、结构与性能

## 第二章

玻璃成分设计与配合料

## 第三章

**玻璃形成与熔制工艺**

## 第四章

玻璃的成型工艺及热处理

## 第五章

浮法玻璃的生产工艺与装备

## 第六章

瓶罐玻璃的生产工艺与装备

## 第七章

玻璃深加工与表面处理

## 第八章

新玻璃与新技术



# 玻璃的熔制

配合料经过高温加热形成均匀的、无气泡的、并符合成形要求的玻璃液的过程。

特点：包括一系列物理的、化学的、物理化学的现象和反应。

物理变化过程	化学变化过程	物理化学变化过程
配合料加热 吸附水的排除 个别组分的熔化 多晶转变 个别组分的挥发	固相反应 盐类分解 水化物的分解 化学结合水的排除 各组分相互作用并形成硅酸盐的反应	生成低熔混合物 各组分间相互熔解 玻璃和炉气介质间的相互作用 玻璃和耐火材料间的相互作用



## 玻璃熔制的五个阶段——硅酸盐的形成

**硅酸盐形成阶段：**（800—900℃）**在固态下进行**。配合料各组分在加热过程中发生一系列的物理和化学变化，主要的固相反应结束了，绝大部分气态产物从配合料中逸出。配合料变成**由硅酸盐和二氧化硅组成的不透明物**（半熔融的烧结物）。这个阶段是配合料直接投入高温窑内进行，各种变化交叉进行，经过3~5min完成



## 硅酸盐的形成

### ■ 配合料的加热反应

#### 单组分的加热反应特点

- 多晶转化：具有多种晶型的组分在高温下可由一种晶型转变为另一种晶型；
- 盐类分解：各种碳酸盐、硫酸盐、硝酸盐在一定的温度下均发生分解并释放出气体；
- 析出结晶水和化学结合水。

#### 多组分的加热反应特点

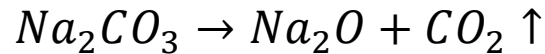
- 单组分的：各种碳酸盐的热分解
- 双组分的：各种碳酸盐的热分解和形成硅酸盐时的分解产生
- 三组分的：除上述外，有复盐的分解和低共熔混合物分解反应



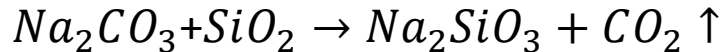
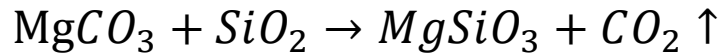
## 硅酸盐的形成

入窑后的料随温度升高，水分（结晶和吸附）蒸发

温度↑到300—400℃时，纯碱、石灰石等分解，形成碱金属和碱土金属氧化物及二氧化碳



温度升高到700℃，二氧化硅与某些组分形成硅酸盐



石英（SiO<sub>2</sub>）晶体在等温下晶型转变，使结构疏松  
硅酸盐大量分解，有CO<sub>2</sub>大量逸出，并有液相产生

结果：硅酸盐熔体和砂粒及未熔融的硅酸盐颗粒等粘附在一起的烧结物

结论：一般的工业玻璃，硅酸盐形成在800—900℃即可进行，反应速度较慢，时间较长（3-5分）



## 玻璃熔制的五个阶段——硅酸盐的形成

配合料加热时，开始主要是固相反应，有大量气体逸出。一般碳酸钙和碳酸镁能直接分解逸出二氧化碳，其它化合物与二氧化硅相互作用才分解。

随着二氧化硅和其它组分开始相互作用，形成硅酸盐和硅氧组成的烧结物

随后出现少量液相，一般这种液相属于低温共熔物，它能促进配合料的进一步熔化，反应很快转向固相与液相之间进行，又形成另一个新相，不断出现许多中间产物。

随着固相不断向液相转化，液相不断扩大，配合料的基本反应大部分完成，成为由硅酸盐和游离 $\text{SiO}_2$ 组成的不透明烧结物，硅酸盐形成过程基本结束。

随即进入玻璃液的形成过程。这时配合料经熔化基本上已为液相，过剩的石英颗粒继续熔化于熔体中，液相不断扩大，直至全部固相转化为玻璃相，成为有大量气泡的、不均匀的透明玻璃液。当固相完全转入液相后，熔化的这两个阶段即告完成。固相向液相转变及其平衡的主要条件是温度，只有在足够的温度下，配合料才能完全转化为玻璃液



## 玻璃熔制的五个阶段——玻璃液的形成

**玻璃液形成：**（1200—1250℃）随着温度的升高，烧结物熔融，变成**含有大量气泡、极不均匀的透明玻璃液**的过程。在玻璃液形成阶段，首先各种硅酸盐烧结物进一步熔融并相互扩散，另外，没有反应完的石英颗粒向熔体中熔解和扩散。玻璃液形成的阶段需要的时间为30—35min





## 玻璃液的形成

在硅酸盐形成阶段生成的硅酸钠、硅酸钙、硅酸铝及反应剩余的大量二氧化硅在继续提高温度的条件下，它们相互溶解和扩散，由不透明的半熔烧结物转变为透明的玻璃液，这一过程称为玻璃的形成阶段。

由于石英砂粒的溶解和扩散速度比各种硅酸盐的熔扩速度慢得多，所以玻璃形成过程的速度实际上取决于石英砂粒的熔扩散速度。

石英砂粒的溶解扩散过程分为两步，首先是砂粒表面发生溶解，而后溶解的 $\text{SiO}_2$ 向外扩散。两者的速度是不同的，其中扩散速度最慢。所以石英砂粒的溶解速度决定于扩散速度。

随着石英砂粒的逐渐溶解熔融物中的 $\text{SiO}_2$ 含量越来越高，玻璃液的粘度也随之增加。此时，扩散就越难进行，这导致石英砂粒的溶解速度减慢。因此，石英砂粒的溶解速度不仅与粘度和温度有关，而且与砂粒表面层 $\text{SiO}_2$ 和熔体中 $\text{SiO}_2$ 的浓度差有关。

除 $\text{SiO}_2$ 与各种硅酸盐之间的扩散外，各硅酸盐之间也相互进行扩散，这些扩散过程有利于 $\text{SiO}_2$ 更好地溶解，也利于不同区域的硅酸盐形成相对均匀的玻璃液



## 玻璃液的形成

是硅酸盐形成的继续。

温度 $\uparrow$ 1200—1500 $^{\circ}$ C，各种硅酸盐开始熔融，同时未熔化的石英砂被完全熔解在硅酸盐熔体中形成玻璃液。

结果：透明的玻璃液

硅酸盐形成和玻璃形成没有明显的界线，玻璃形成大约28—29分。



# 玻璃形成过程的动力学

在玻璃熔制过程中玻璃形成速度与玻璃成分、砂粒大小、熔制温度等有关。

## 1 玻璃成分

沃尔夫 (M.Volf)提出玻璃熔化速度常数 $\tau$ 的方程

一般工业玻璃 
$$\tau = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Na_2O + K_2O}$$

硼硅酸盐玻璃 
$$\tau = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Na_2O + K_2O + 0.5B_2O_3}$$

铅质玻璃 
$$\tau = \frac{SiO_2}{Na_2O + K_2O + 0.125PbO}$$

式中  $\tau$ —熔化速度常数，表示玻璃相对难熔的特征值  
 $SiO_2$ 、 $PbO$ 、 $Na_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $B_2O_3$ 、 $K_2O$ ——玻璃组份中的质量百分含量，wt%



## 玻璃形成过程的动力学

上式中的  $\tau$  值与一定的熔化温度相适应

表8-1 玻璃熔化温度与 $\tau$  值相对应的关系

$\tau$ 值	6.0	5.5	4.8	4.2
熔化温度/ $^{\circ}\text{C}$	1450 ~ 1460	1420	1380 ~ 1400	1320 ~ 1340

需要注意，常数  $\tau$  是经验值，在评定熔制温度时，不是十分精确，仅可以作为定性评价工具。常数  $\tau$  应与其它影响熔制速度的因素一起考虑。



## 玻璃形成过程的动力学

### 2 石英颗粒大小

鲍特维金方程  $t=0.125K_1D^3$

式中

$t$ —玻璃形成的时间（分）

$D$ —原始石英颗粒的半径cm

$K_1$ -与玻璃成分和实验温度有关的常数



## 玻璃形成过程的动力学

### 3 熔融体的温度

索林诺夫关系式  $T=ae^{-bt}$

式中  $t$ —玻璃形成时间

$T$ —熔融体温度

$e$ —自然对数

$a$ 、 $b$ —与玻璃成分和原料颗粒度有关的常数。对浮

法玻璃: $a=101256$ . $b=0.00815$



## 玻璃熔制的五个阶段——玻璃液的澄清

**澄清：**（1400—1500 °C）黏度降低（ $\eta \approx 10$ 帕·秒）

澄清是在玻璃液中建立气体平衡，**排除可见气泡**的过程。配合料中各种盐类在高温下分解放出的气体为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 等。

玻璃液中排除可见气泡就是通过**升高温度**或**添加澄清剂**产生新的气体等方式，**减小**气体在玻璃中的**溶解度**。气体进入气泡，使气泡逐渐长大，上升出液面，破裂，而将气体释放炉中。



## 玻璃熔制的五个阶段——玻璃液的澄清

**澄清：（1400—1500 °C）黏度降低（ $\eta \approx 10$ 帕·秒）**

在硅酸盐形成与玻璃形成阶段中，由于配合料的分解、部分组份的挥发、氧化物的氧化还原反应、玻璃与气体介质及耐火材料的相互作用等原因而放出大量气体。其中大部分气体将逸出玻璃液，剩余的部分气体将溶解于玻璃液中并与其中某种成分重新形成化合物。

存在于玻璃中的气体主要有三种状态：

可见气泡、溶解的气体、化学结合的气体

此外，尚有 $H_2$ 、 $NO_x$ 、 $N_2$ 、He、Ne。

气泡的生成和成长

在澄清过程中气体间的转化与平衡

在澄清过程中气体与玻璃液的相互作用

在澄清过程中的澄清剂作用机理

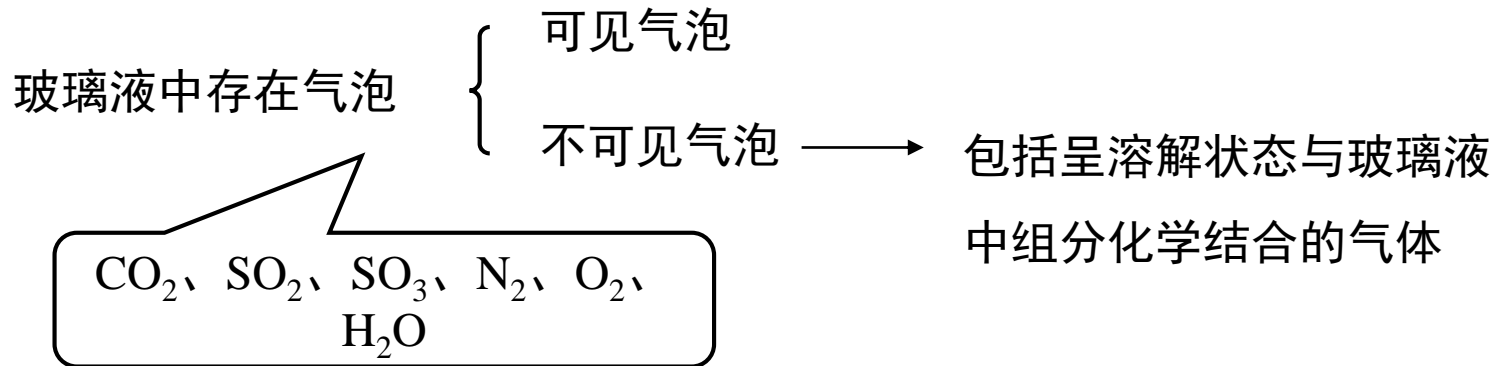




## ■ 玻璃液中的气体

来源：配合料中各组分的分解；挥发组分的分解；已溶解的气体在一定条件下从液相中重新析出

存在形式：气泡





## ■ 玻璃液的澄清过程

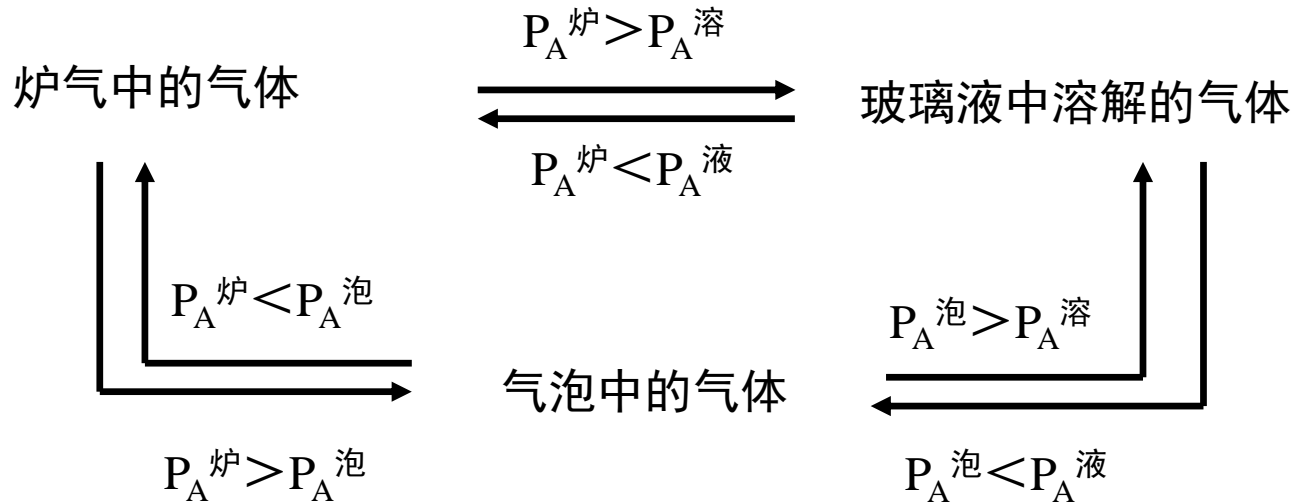
### 1 澄清过程

目的：消除可见气泡

实质：首先使**气泡中的气体**、**窑内的气体**与**玻璃液中的气体**之间建立平衡，再使可见气泡漂浮于玻璃液的表面加以消除。

### 2 澄清过程中气体中气体间转化与平衡

在高温澄清过程中，**玻璃液中所溶解的气体**、**气泡中的气体**及**炉气**三者间的平衡关系，是由某种气体在各组分中的**分压**所决定的。气体总是由分压高的相进入分压低的相



### 结论

气体从过饱和的玻璃液中分离出来，进入气泡或炉气中  
气泡中所含的气体分离出来进入炉气或溶解于玻璃液中。  
气体从炉气中扩散到玻璃液中。



## ■ 玻璃液的澄清过程

### 3 内气泡消除方式

(1) 使气泡的体积**增大**，加速上升，漂浮出玻璃表面而消除。

**在融化部进行：玻璃液粘度与气泡大小决定气泡能否漂浮**

$$V = \frac{2r^2g(\rho - \rho')}{9\eta} \quad \text{斯托克斯定律}$$

式中

$V$ —气泡的上浮速度(cm/s)

$r$ —气泡的半径(cm)

$g$ —重力加速度(cm / s<sup>2</sup>)

$\rho$ —玻璃液的密度(g/m<sup>3</sup>)

$\rho'$ —气抱中气体的密度(g / cm<sup>3</sup>)

$\eta$ —熔融玻璃液的粘度(Pa·s)



## ■ 玻璃液的澄清过程

气泡直径(毫米)	气泡上浮速度厘米/时	气泡上浮1米所需时间(小时)
1.0	70.0	1.4
0.1	0.7	140
0.01	0.007	14000

**结论：**大直径的气泡比小直径的气泡从玻璃液中逸出的速度要快得多。

在等温等压下，使玻璃液中气泡变大有二个因素

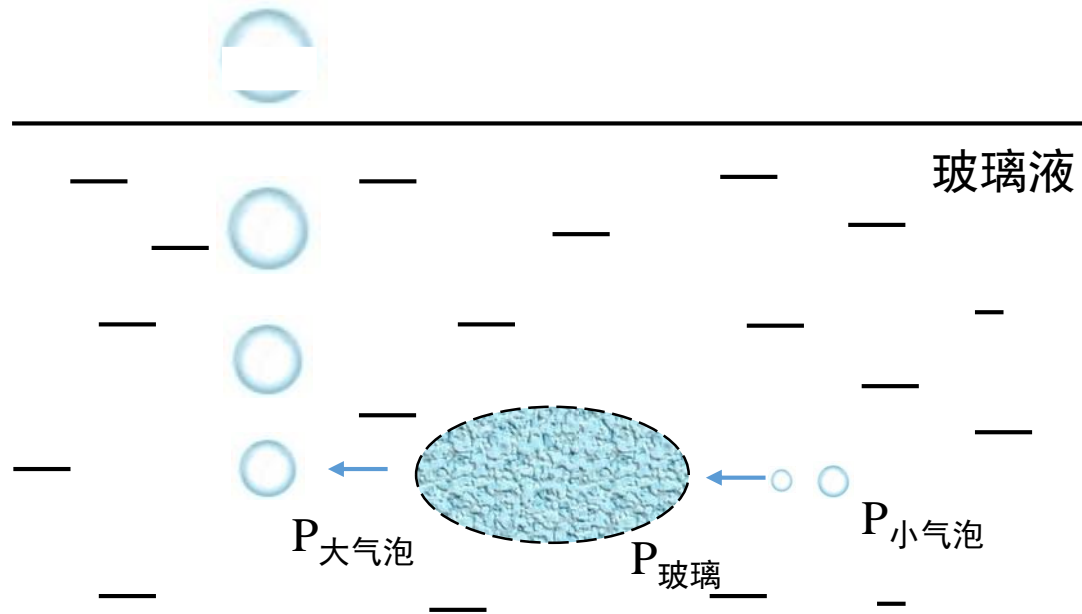
- A 多个小气泡集合为一个大气泡；
- B 玻璃液中溶解的气体渗入气泡，使之扩大。

说明：A过程在澄清时不会发生。澄清进行时主要是B过程

(2) 使小气泡中的气体组分**溶解**于玻璃液中，气泡为玻璃液所吸收而消失。

**气泡在玻璃液中的溶解度：**与温度有关，高温（1400—1500℃）的溶解度比低温小（1100—1200℃）。生产中适当控制温度。

## ■ 可见气泡的消除



对于大气泡， $P_{气泡} < P_{玻璃}$ ，玻璃液中的气泡将溶解于气泡内。气泡变大，上浮至玻璃液表面破裂。

对于小气泡， $P_{气泡} > P_{玻璃}$ ，气泡中的气体将溶解于玻璃内，气泡变小，逐渐溶解于玻璃液中而消失。



## 玻璃的澄清

### ■ 影响澄清过程的因素

- 配合料的组成
- 熔制制度
- 窑内气氛的组成与压力
- 气泡中气体的性质
- 使用澄清剂

#### 1 配合料的组成

**气体率**。过大则熔制成形的泡沫多，延长澄清时间且气泡难以消除；过小则形成不了强烈的翻腾，气泡排除困难。

#### 2 熔制制度

**澄清温度**。澄清温度一般比熔化温度高。过高，玻璃液黏度较低，则会加剧耐火材料的侵蚀和排除较多的气泡。



## ■ 影响澄清过程的因素

### 3 窑内气氛的组成与压力

**气体的组成与压力要保持稳定。**否则，会使已建立的平衡破坏，不利于玻璃液的澄清。**窑内必须维持微正压或微负压。**负压过大，使冷空气吸入窑内，玻璃液将产生大量气泡；相反正压过大，亦不利于气体的排除。

### 4 气泡中气体和澄清剂的使用

**常用的澄清剂：**硝酸盐与三氧化二砷、芒硝、硫酸铵、硝酸铵、氯化铵、食盐、三氧化二锑以及氟化物等。

#### 澄清机理

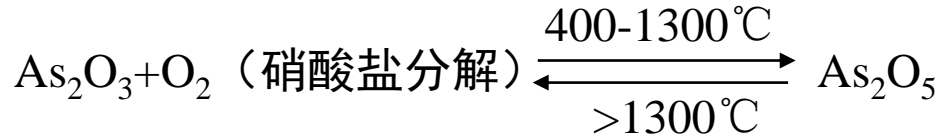
澄清剂能生成大量溶解于玻璃液中的气体,在玻璃液中呈过饱和状态,提高了它们在玻璃液中分压,并向残留于玻璃液中的气泡析出,降低气泡中已有其它气体的分压,重新加强它从玻璃液中吸取那些气体的能力。





## ■ 影响澄清过程的因素

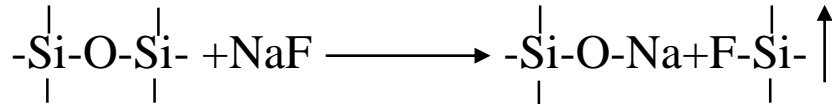
变价氧化物类澄清剂  $\text{As}_2\text{O}_3$   $\text{CeO}_2$   $\text{Mn}_2\text{O}_3$



温度上升,反应向左进行,玻璃液为 $\text{O}_2$ 过饱和, $\text{O}_2$ 扩散到气泡中去而降低气泡内其他气体的分压,使气泡长大上浮。

工业上,将 $\text{As}_2\text{O}_3$ 与 $\text{KNO}_3$ 混合使用。

卤化物类澄清剂:降低熔体的粘度



硫酸盐类澄清剂 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

分解出 $\text{O}_2$ 和 $\text{SO}_2$ ,对气泡的长大与溶解起重要作用。硫酸钡多用于瓶罐玻璃的配合料中,用量为 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量的0.5%。

### 结论

加速玻璃液澄清的方法:延长熔制时间,提高澄清温度,使玻璃液沸腾搅拌、鼓泡、施以高压或真空,采用超声波及澄清剂等。



## 玻璃熔制的五个阶段——玻璃液的均化

**均化**（1350—1420℃）均化的目的是**消除玻璃液中各部分的化学组成不均匀及热不均匀性**，使之达到均匀一致。玻璃液的均化过程主要是靠分子扩散和热对流作用实现。依扩散作用，使玻璃中的条纹、结石消除到允许限度，成为均匀一体。



## 条纹和其它不均匀体及其产生原因

(1) 配合料在微观上存在本身的不均匀和玻璃液的粘度高使得各化学组分难以扩散都会产生条纹。

(2) 配合料均匀度低、粉料的飞扬损失、熔制制度不合理或不稳定都可能会造成条纹。

(3) 耐火材料被侵蚀或某些组分的挥发及不同比重组份的分层会生成不均匀体。



## ■ 均化过程的动力学因素

### (1) 扩散

熔体中某组分较多的部分向该组分较少的其它部分转移的浓差扩散，由于玻璃液粘度大，扩散速度很慢，对玻璃均化作用小。适当提高温度可以有所改善。

### (2) 表面张力

通过不同表面张力(与组成不同有关)的玻璃液在相互接触时会发生的质点交换，使玻璃熔体均化。表面张力较低而密度较大的条纹容易在周围熔体上散流，反之表面张力较高而密度较小的条纹受表面张力作用而收缩熔体，不易于散流。



## ■ 均化过程的动力学因素

### (3)玻璃液的流动

因温差对流，气泡搅拌，成型流和机械搅拌引起的玻璃液流动能拉长、剪断和铺展条纹和其它不均匀体，起着重要的均化作用。

## ■ 改善玻璃均化效果的措施

- (1)保证原料和配合料质量,对配合料进行粒化、烧结等预处理；
- (2)进行人工均化(如机械搅拌、池底鼓泡等)，加强扩散；
- (3)采用先进的熔制技术(如电熔窑可减少挥发)；
- (4)对挥发量大的玻璃液可采用密封和液面挡料、撇料、定期池底放料等方法；



## 玻璃熔制的五个阶段——玻璃液的冷却

**冷却**（降低200—300 °C）通过降温，使已均化良好的玻璃液黏度增高到成形所需要的范围的过程（ $\eta = 10^2 - 10^3 \text{Pa}\cdot\text{s}$ ）

**注意：**会产生二次气泡

**特点：**在玻璃液冷却过程中,由于炉内温度降低,炉气改变,破坏了原有的气—液平衡,在已澄清的玻璃液中,有时会出现大量的直径小于0.1mm,分布均匀的气泡,称为二次气泡。



## ■ 二次气泡产生的原因

### (1) 碳酸盐或硫酸盐的继续分解

在冷凝时和炉气的改变下，可能达到碳酸盐和硫酸盐完全分解的条件， $\text{CO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 析出形成很多小气泡。

### (2) 含钡玻璃在高温和降温时易生气泡

含钡光学玻璃中，二次气泡的出现，可能由于部分的 $\text{BaO}$ 在高温下被氧化为 $\text{BaO}_2$ ，这个反应是吸热的。当温度降低时， $\text{BaO}_2$ 开始分解放出氧气即生成小气泡。

### (3) 溶解的气体被析出

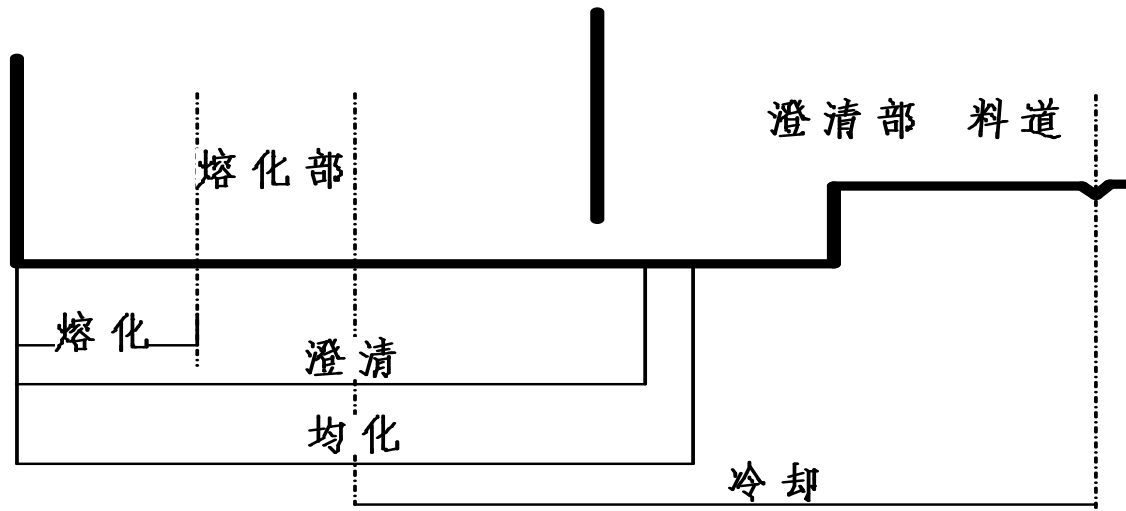
有些气体它与一般气体的溶解度随温度的降低而增高不同，它溶解时是吸热的。当温度降低时，溶解的气体放出而生成二次气泡。

### (4) 电化学反应引起的二次气泡

由于在玻璃液中产生的电动势，尤其使用的铂质器件和玻璃液的界面上产生的电动势，其带电离子向电极方向迁移，能引起 $\text{O}_2$ 气泡的产生。



# 池窑中玻璃熔融过程模型图







## 玻璃熔制的五个阶段

**硅酸盐形成阶段：**（800—900℃）在固态下进行。配合料各组份在加热过程中发生一系列的物理和化学变化，主要的固相反应结束了，绝大部分气态产物从配合料中逸出。**由硅酸盐和二氧化硅组成的不透明物。**

**玻璃液形成：**（1200—1250℃）易熔物熔融，同时硅酸盐和二氧化硅互熔。**烧结构变成了透明体并含有大量气泡，玻璃液化学组成和性质不均匀，有条纹。**

**澄清：**（1400—1500℃）黏度降低（ $\eta \approx 10$ 帕·秒），消除可见气泡。

**均化**（1350—1420℃）依扩散作用，使玻璃中的条纹、结石消除到允许限度，成为均匀一体。

**冷却**（降低200—300℃）以便使玻璃液具有成形所必须的黏度。（ $\eta = 10^2 - 10^3$ Pa·s）

**特点：彼此互相联系和影响；在窑内常是同时或交错进行**



## 影响玻璃熔制过程的工艺因素

- ① 配合料的化学组成
- ② 原料和配合料的性质
- ③ 加速剂的使用
- ④ 玻璃的熔制温度、气氛和窑压
- ⑤ 加料方式
- ⑥ 真空高压,辅助电熔与搅拌



## 影响玻璃熔制过程的工艺因素

### ①.配合料组成成分

高熔点组分( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )含量越高,熔化速度越慢;碱金属,碱土金属越多,熔化速度越快。

### ②.原料的性质

- 原料的性质及其种类的选择,对熔制的影响很大。如原料中杂质的难熔性,粒度及用量等。
- 加入碎玻璃量中等粒度碎玻璃(2~20mm)较好,粉碎过细的碎玻璃对熔化反而不利。
- 配合料的均匀性和润湿程度,可以通过粒化、烧结和压块或者适宜水分调整。



## 影响玻璃熔制过程的工艺因素

### ③.加速剂的使用

化学活性物质,不改变熔体的组成和性质,降低 $\delta, \eta$ ,增加透热性,有利于气体的排除与均化。

•**氟化物**:( $\text{CaF}_2, \text{Na}_2\text{SiF}_4, \text{Na}_2\text{AlF}_6$ -冰晶石),降低粘度,生成的挥发性的 $\text{SiF}_4$ 、 $\text{FeF}_3$  有利于澄清

• **$\text{B}_2\text{O}_3$  (0.5-1.5%)** :降低高温粘度,加速澄清,均化过程。

• **$\text{As}_2\text{O}_3$  ( $\text{KNO}_3$ )**:使 $\text{FeO}$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 生成无色的铁砷酸盐络合物,提高透明度,并放出氧气,加速熔制。

• **$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$** :熔化温度较低,350℃分解放出 $\text{NH}_3$ 和 $\text{SO}_3$ ,加速均化。



## 影响玻璃熔制过程的工艺因素

### ④.玻璃的熔制制度

#### 温度制度

熔制温度决定玻璃的熔化速度，温度愈高，硅酸盐生成的反应愈剧烈，石英颗粒溶解愈快，玻璃形成速度也愈快。但采用高温熔化受到耐火材料质量的限制，温度越高对耐火材料的侵蚀越剧烈。

如熔制平板玻璃时，在温度1400~1450℃范围内，熔化温度每提高1℃，熔化率增加2%，在1450~1500℃温度范围内，熔化温度每提高1℃，熔化率增加1%，在1500~1550℃温度范围内，熔化温度每提高1℃，熔化率增加0.7%。

#### 压力制度

分布在沿窑纵长方向上是随最高温度到最低温度的逐渐降低而逐渐增加。如熔化部是正压，则成型部的正压更大，如成型部为负压，则熔化部的负压更甚。



## 影响玻璃熔制过程的工艺因素

### 气氛制度

窑内各处气氛的性质视配合料和玻璃的组成和各项具体工艺要求而定。在熔制无色瓶罐玻璃的普通纯碱配合料时，必须保持氧化气氛。在熔制含有碳粉作为还原剂的纯碱-芒硝配合料时，为了要保持碳粉不在加料口烧尽，第一及第二对小炉必须保持还原焰，但是在最后的小炉区域又必须将碳粉完全烧尽，以避免玻璃液被着色，故最后的小炉喷出口应当是氧化焰。



## 影响玻璃熔制过程的工艺因素

### ⑤.加料方式（薄层加料）

- 料层薄（吸收辐射热和下层传导热）升温快而匀,反应快,另外有利于气体的排放。一般小于50mm。
- 碎玻璃铺底(在生料下面)的掺合方式有利于增加生料受热面积，防止石英砂未经完全反应就下沉。
- 薄而均匀的加料方式有利于增大吸热面，加速熔制

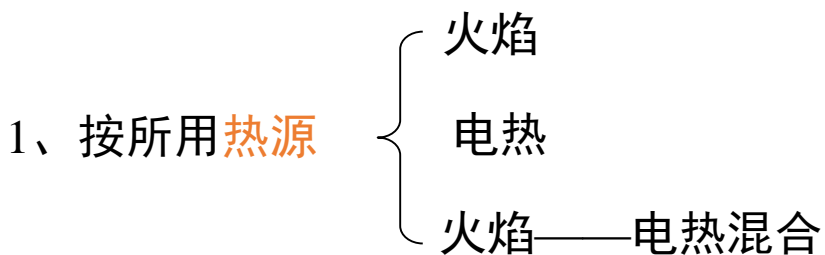
### ⑥.真空高压,辅助电熔与搅拌

# 玻璃熔窑



## 熔窑的种类

通常采用的熔窑主要有三种类型：**坩埚窑**、**火焰池窑**、**全电熔窑**。







5、按生产类型

- 平板玻璃窑
- 日用玻璃窑

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/m<sup>2</sup>
  - 中型：30~60吨/m<sup>2</sup>
  - 小型：30吨/m<sup>2</sup>
- 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

# 玻璃熔窑

## 熔窑的种类

空气助燃——氮氧化物排放——富氧、全氧

更高温度——电熔、电助熔





## 四、玻璃熔窑节能

### 3.2.3.1 节能途径

- (1) 目前主要的新型节能技术
- A. 富氧燃烧技术
- 富氧,其意是指其含氧量比普通空气(其含氧量为21%)高,富氧燃烧就是采用比普通空气含氧量高的空气来助燃。在玻璃熔窑中应用富氧燃烧技术,一方面可以提高熔窑的热效率,实现增产节能;另一方面可减少烟气以及烟气中的氮氧化合物的排放量,减轻对环境的污染。合理地组织富氧燃烧还可以减轻火焰对熔窑、蓄热室等的热蚀而延长其使用寿命。另外,因助燃作用增强,为较多地应用低发热值燃料提供了可能。



## 四、玻璃熔窑节能

- 助燃富氧空气的加入的3种形式：
- 第一种是将富氧喷嘴安装在燃油喷枪的下方，将富氧以高速射流的形式喷入窑内，在射流的作用下将火焰拉近液面；
- 第二种是采用富氧喷枪将富氧空气作为雾化介质直接与燃料充分混合而燃烧；
- 第三种是喷管将富氧空气混入助燃风中，为整体增氧。



## 四、玻璃熔窑节能

### B. 全氧燃烧技术

- 由于使用全氧替代助燃空气，气体中基本不含 $N_2$ ，仅含极少量的 $NO_x$ ，这样废气总体积可减少约80%，相应废气带走热量大大降低。同时由于使用全氧燃烧喷枪替代了传统小炉、蓄热室结构，节省了一次性投资。
- 采用全氧燃烧技术时，熔窑耐火材料的选择要注意，因烟气中水蒸汽的浓度相应增加，同时生产过程中产生的碱性蒸气的浓度明显增大，均对相应的耐火材料的侵蚀加速，特别是碓顶硅砖。



## 四、玻璃熔窑节能

### C.电助熔及全电熔技术

- 通过在浮法玻璃熔窑内合理地安装电极，直接在玻璃液中产生焦耳效应，这样电能提供的热量直接被玻璃液有效利用，相应窑内空间温度得到显著地降低，电助熔的热效率最高为95%左右。
- 全电熔全部采用电熔技术，目前耗电量为1w/kg。



## 四、玻璃熔窑节能

### D.池底鼓泡技术

- 通过在熔窑的热源处设置一排鼓泡管，向玻璃液中鼓泡以增强热障作用。由于热障作用的加强，玻璃液的对流加剧，熔池底层玻璃液温度明显提高，一方面起到稳定液流、促进配合料的熔化作用，另一方面还可适当降低窑内温度，提高熔化量，也相应地降低了能耗。



## 四、玻璃熔窑节能

### (2) 节能途径

- ①采用浅池结构
- ②设置宽投料池
- ③适当增加熔窑宽度，减少小炉对数
- ④卡脖处设置深层水包
- ⑤熔窑采用新型保温材料
- ⑥碓顶采用“蜂窝状”碓砖结构,增加火焰空间辐射面积
- ⑦熔化按“双高峰热负荷”操作
- ⑧提高熔化率





## 四、玻璃熔窑节能

### 3.2.3.2 改善蓄热室结构

- (1) 蓄热室的结构形式
- 提高蓄热室效率对节能非常重要，但蓄热室的寿命也不容忽视。在美国，几乎都是连通式，在欧、日则多采用分隔式，而国内以前都是分隔式，近年来也有一些厂家在改变。
- (2) 蓄热室尺寸
- 蓄热室格子体高度，国外一般都是在6m以上，有的高达8m以上。



## 四、玻璃熔窑节能

- (3) 格子砖型式
- 新型的除了众所周知的十字型电熔格子砖外，还有筒子型（Chimney）和组合型（Integrated），就其形式亦可称为工字型与双工字型。
-



## 作业3

试阐述玻璃液澄清机理