



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09月



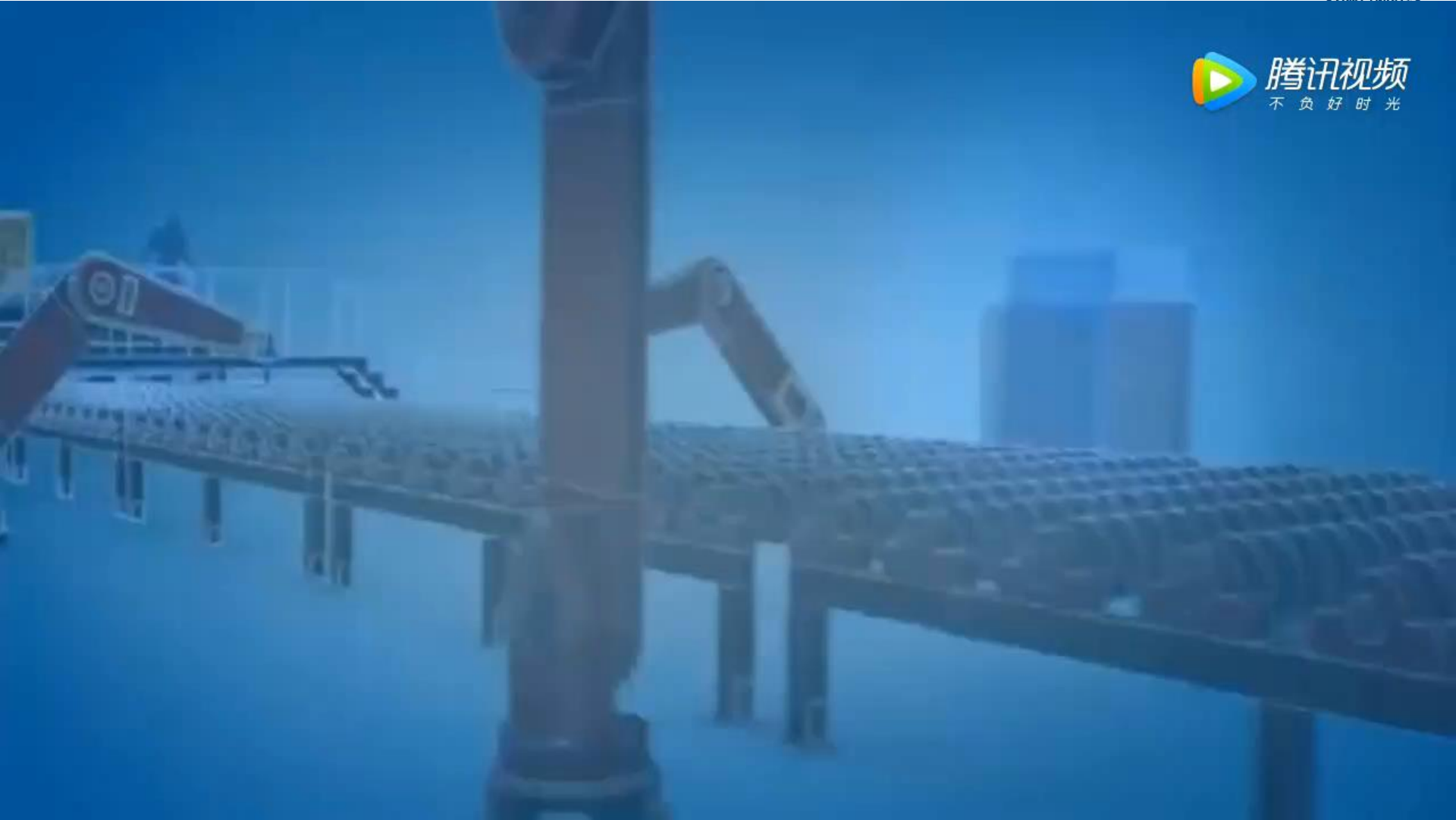
目录

- | | |
|-----|--------------|
| 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 |



本章主要内容

- 一、浮法玻璃的原料与配料工艺
- 二、浮法玻璃的熔制工艺及熔窑
- 三、浮法玻璃的成型工艺及锡槽
- 四、浮法玻璃的退火工艺及退火窑
- 五、浮法玻璃的冷端工艺及设备





浮法玻璃厂区

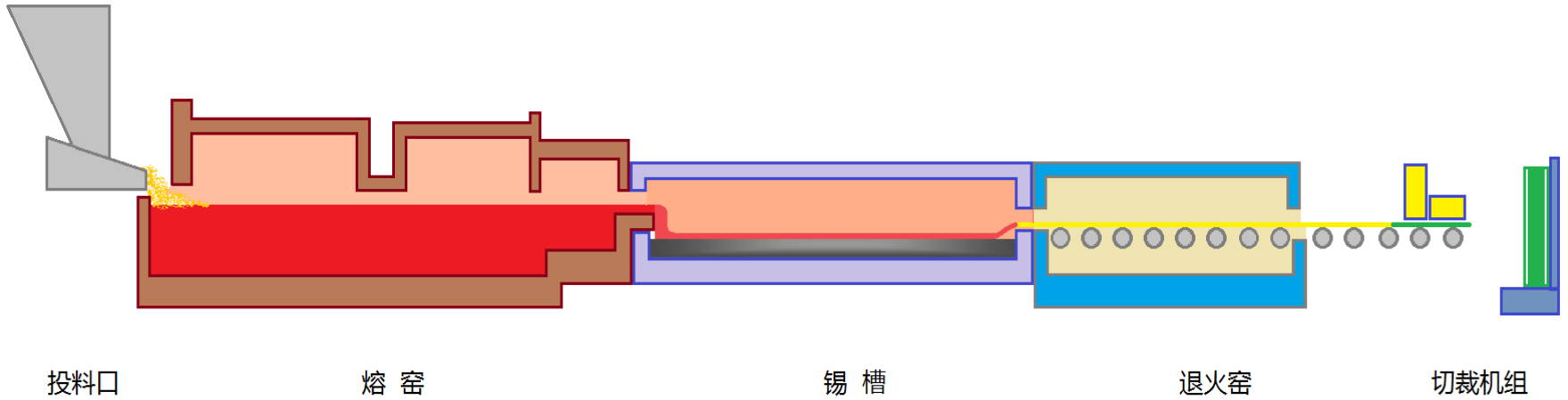


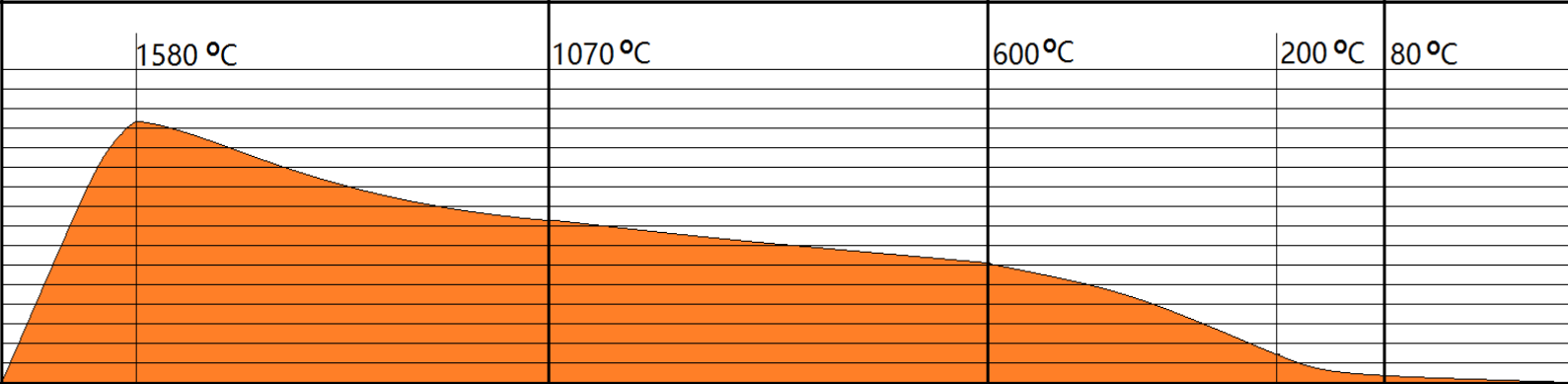


浮法玻璃生产工艺流程



浮法玻璃生产工艺流程示意图与温度制度



配料	熔制	成型	退火		切裁包装
	1580 °C	1070 °C	600 °C	200 °C	80 °C
					



一、浮法玻璃的原料与配料工艺

国内外浮法玻璃化学成分（课本附录一）

国内外平板玻璃化学组成一览表

序号	国家	生产工艺	化学组成 质量分数/ %								
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	其它
1	中国	浮法工艺	72.50	1.20	8.20	4.00	14.00		0.100		
2	中国		72.05	1.50	8.05	4.00	14.06		0.140		
3	中国		70.90	1.84	9.07	3.82	14.07		0.090		
4	中国		72.11	0.98	8.48	3.94	13.79		0.130		
5	英国		72.33	1.20	9.19	3.00	13.99				
6	英国		72.50	1.00	9.00	3.20	13.30	0.50	0.090	0.21	
7	美国		72.40	1.20	8.10	3.84	4.4.001		0.130	0.30	
8	美国		73.20	0.17	8.50	3.96	13.90	0.01	0.120	0.30	
9	日本		72.19	1.67	8.05	3.74	12.52	0.87	0.100		
10	捷克		72.50	1.00	8.10	3.90	13.70	0.30	0.070		
11	比利时		71.00	1.90	8.50	4.50	14.50		0.100		
12	法国		73.00	0.10	8.90	3.90	13.60	0.05	0.100	0.30	
13	西班牙		71.78	0.84	9.14	3.49	14.07	0.08	0.113	0.32	
14	前苏联		73.00	1.00	8.60	3.60	13.40		0.080	0.32	



浮法玻璃基本化学成分

基本配方：钠钙硅系统

基本含量：12%~15% Na_2O ，8%~10% CaO ，70%~74% SiO_2
~4% MgO ， $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.15\%$



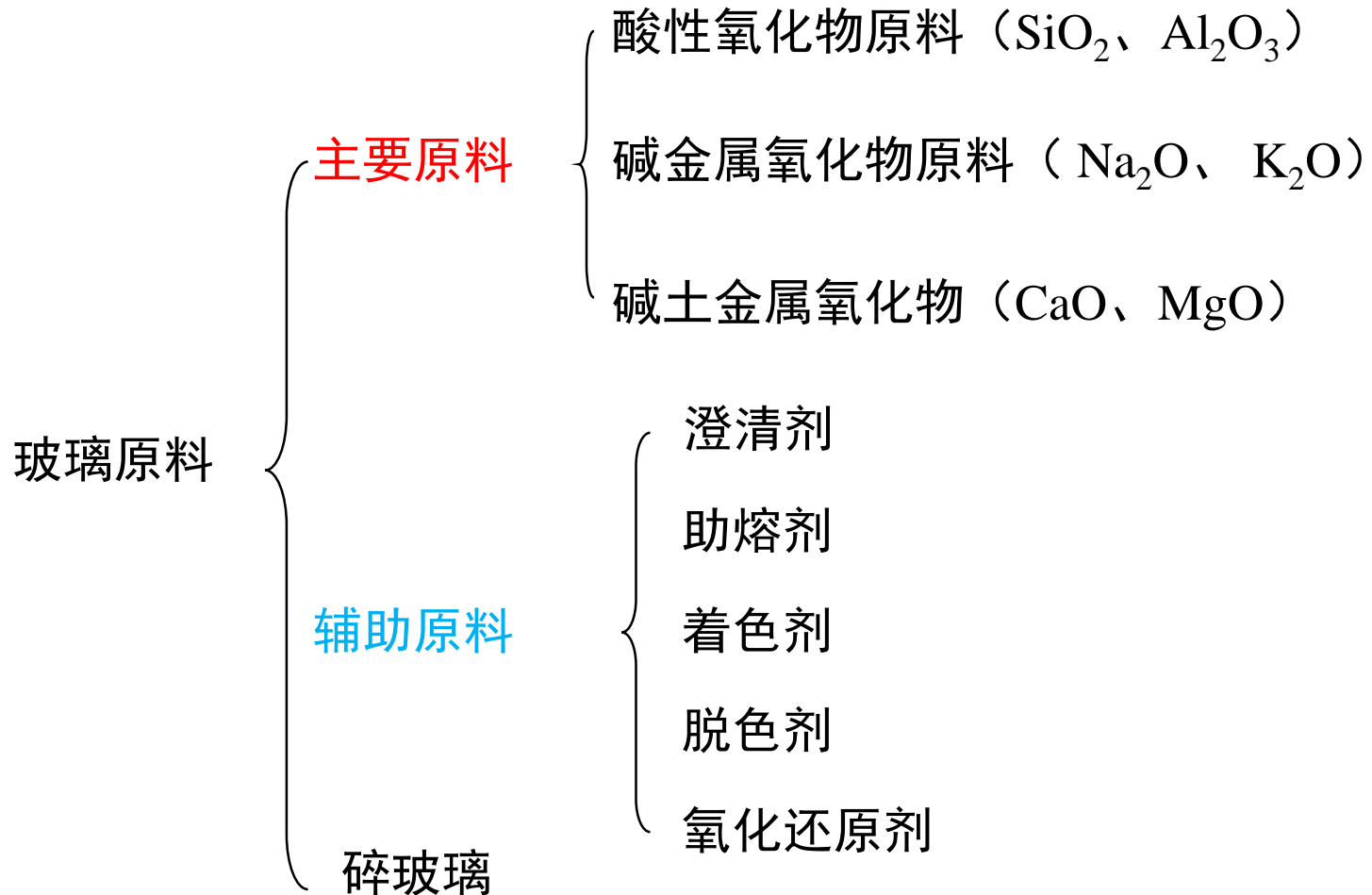
浮法玻璃的成分特点

- **高钙：**浮法玻璃拉引速度快，在成型中必须采用硬化速度快的“短”性玻璃成分，即调整 CaO 到 8%~9%。
- **中镁：** CaO 含量增加，使玻璃发脆并容易产生硅灰石析晶 ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)。因此 MgO 控制在 4% 左右，以改善玻璃的析晶性能。
- **低铝：**铝高将增加玻璃的黏度，不利于均化和澄清，将 Al_2O_3 的含量降低到 1.3% 以下，
- **微铁：**熔化时着色能力强的 Fe^{2+} 被氧化为着色能力弱的 Fe^{3+} ，但在锡槽中又被还原成 Fe^{2+} 因此严格限制在 0.1% 以内。



浮法玻璃原料

原料分类





根据浮法玻璃成分，可以计算得出配合料的配方：

例如100kg配合料中：

砂岩的用量为 70.66 kg

白云石的用量为 20.37 kg

石灰石的用量为 3.56 kg

长石的用量为 2.93 kg

纯碱的用量为 22.49 kg

芒硝的用量为 1.01 kg

煤粉的用量为 0.05 kg

总 计 =121.44 kg



玻璃配合料制备工艺

原料的运输和存储

(1) 原料的运输

原料在运输进厂前，要经过有关部门的化验和鉴定。

原料运输分厂内和厂外两种。运输时应尽量减少粉尘，不使原料彼此污染，要注意除铁。

(2) 原料的储存

要满足一定的数量，考虑一定的储存期，分块状、粉状、化工、有毒原料的储存。



玻璃配合料制备工艺

原料的加工处理

原料的加工处理包括**破碎**、**粉碎**、**过筛**等过程。

单系统流程：各种矿物原料共同使用一个破碎、粉碎、过筛系统。
小型玻璃工厂

多系统流程：每种原料各有一套破碎、粉碎、过筛系统。
大中型玻璃工厂

混合系统：用量较多的原料单独为一个加工系统，用量小的性质相近的共用一个系统。
大中型玻璃工厂



玻璃原料制备工艺

(1) 原料的干燥

目的：为有利于过筛、贮存和干法配料，须将水分含量的原料进行干燥。

方法：离心脱水、蒸汽加热、回转干燥筒、热风炉干燥器等。

(2) 原料的破碎

- 破粉碎方法选择依据：依原料的粒度、硬度和需要粉碎的程度。
- 硬度高的预先煅烧，可在原料内部产生许多裂纹，提高破碎比；减少机械铁的引入。

砂岩粗碎前预先在 1000°C 以上进行煅烧。



(3) 原料的过筛

目的：满足一定的颗粒组成以保证配合料的均匀混合和避免分层。

过筛设备：六角筛、振动筛、摇筛等

硅砂：36~49孔/厘米²；

控制 砂岩、石英岩、长石：81孔/厘米²；

纯碱、芒硝、石灰石、白云石：64孔/厘米²

(4) 原料的除铁

目的：保证玻璃的含铁量符合规定要求。

方法：物理除铁 筛分、淘洗、水力分级、超声波浮选和磁选等
化学除铁（湿法、干法）除去石英原料中的铁化合物。

(5) 粉状原料的输送

- 用溜管、皮带机、斗式提升机等机械设备和气力输送设备进行输送入仓。
- 加料与卸料方式会影响颗粒发生分层。



玻璃配合料制备工艺

配合料的称量

要求：快速、准确。

称量方法：分别称量、累计称量

分别称量：在每个粉料仓下面各设一称，原料称量后分别卸到皮带机上送入混合机中。

适用于排库

累计称量：用一个称依次称量各种原料，每次累计计算重量，称后直接送入混合机。

适用于排库和塔库

称：自动称和台称（磅称）。精度一般为 $1/500$ ($1/1000$)。要定期校正、维修。



玻璃配合料制备

配合料的混合

(1) 配合料的加料顺序

石英（喷水）、长石、石灰石、白云石、纯碱和澄清剂、脱色剂；

石英（喷水）、纯碱、长石、石灰石、小料；

加料为设备容积的30—50%，混合时间2~5分钟

(2) 混合设备

强制式（浆叶式、艾立赫式等）

注意

选择混料机混料时，应考虑称量和混合周期，一般前一付料混合时，后一付料开始称量，可缩短配料车间的每日工作班数

(3) 小料予混合

芒硝、燃料予混合机MH80（搅拌容积80升、混合时间1分钟）或V型混合机。

(4) 碎玻璃的混合

依混合机不同。一般在配合料混合终了将近卸料时再加入；直接加入在配合料内。



玻璃配合料制备工艺

配合料的输送和贮存

(1) 要求

保证生产的连续性和均衡性，避免分层结块和飞料。

(2) 工艺布置：配料车尽量靠近熔制车间，输送时应避免震动和减少卸料落差。

(3) 输送设备

皮带机：有分层现象，大型厂使用。

(4) 配合料贮存

用窑头料仓， <8 小时



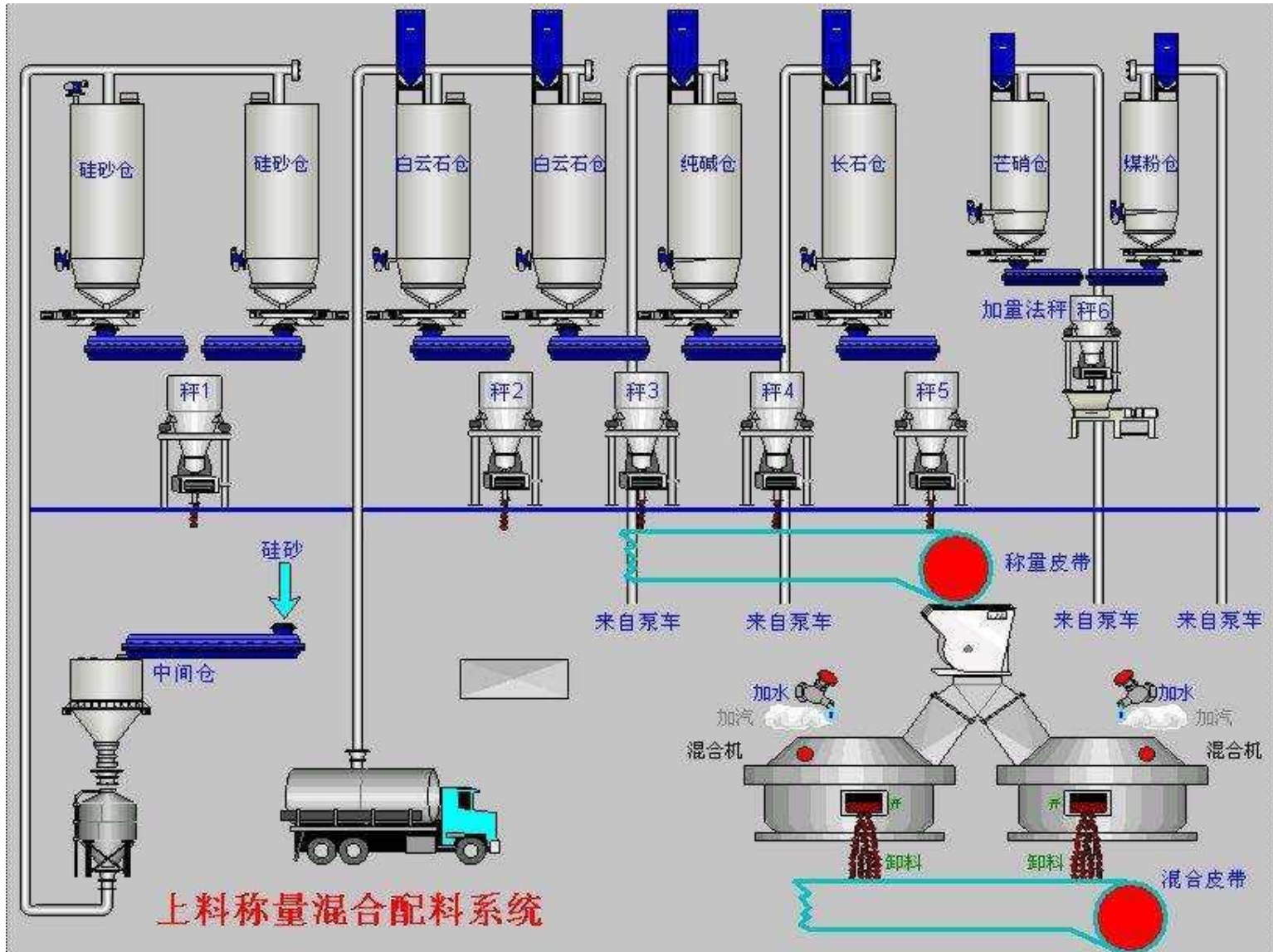
均化库

配料间

混合房



原料车间





综合原料库



硅砂均化库



配料称量线



混合机



熔窑投料机



配料控制室



二、浮法玻璃的熔制工艺与熔窑

浮法玻璃熔制的五个阶段：

- **硅酸盐形成阶段** 800~1000℃：由硅酸盐和二氧化硅组成不透明烧结物；
- **玻璃液形成阶段** 1200~1300℃：烧结体成为含大量可见气泡、条纹、化学成分不够均匀的透明的玻璃液。
- **玻璃液澄清阶段** 1400~1500℃：气体因玻璃液粘度降低而大量逸出
- **玻璃液均化阶段** 1300~1100℃：由于对流、扩散、溶解等作用，玻璃液中化学组成和温度逐渐趋向均一。
- **玻璃液冷却阶段** 1100~1050℃：将澄清和均化的玻璃液均匀降温，使玻璃液具有成型所需的粘度；



玻璃熔制工艺制度

熔制“四小稳”：

温度稳、压力稳、泡界线稳、液面稳

熔窑的工艺制度：

温度、压力、泡界线、液面、气氛和换向。



温度制度

- 沿熔化部窑长方向的温度分布，用温度曲线表示；
- 温度制度对玻璃的**熔化速度**、**玻璃液对流情况**、**成型作业**、**燃料消耗**、**窑龄**等都有影响；
- 最重要的是：保证配合料的化料情况，突出和稳定泡界线，适应能力强，有利于控制生产。
- 具体采用哪种曲线可根据窑炉大小，质量要求，燃料情况分别考虑制定；一般有三种、“山形”、“桥形”、“双高”曲线。



温度制度

① “山形” 曲线

热点（不是一个点，而是玻璃液表面的最高温度带）突出，热点与1#小炉及末对小炉间的温差大，泡界线清晰稳定；配合料熔化滞后。

② “桥形” 曲线

热点前后两对小炉的温度与最高温度相差不大，温度曲线似拱桥形。特点是熔化高温带较长，有利于配合料的熔化和玻璃液的澄清。

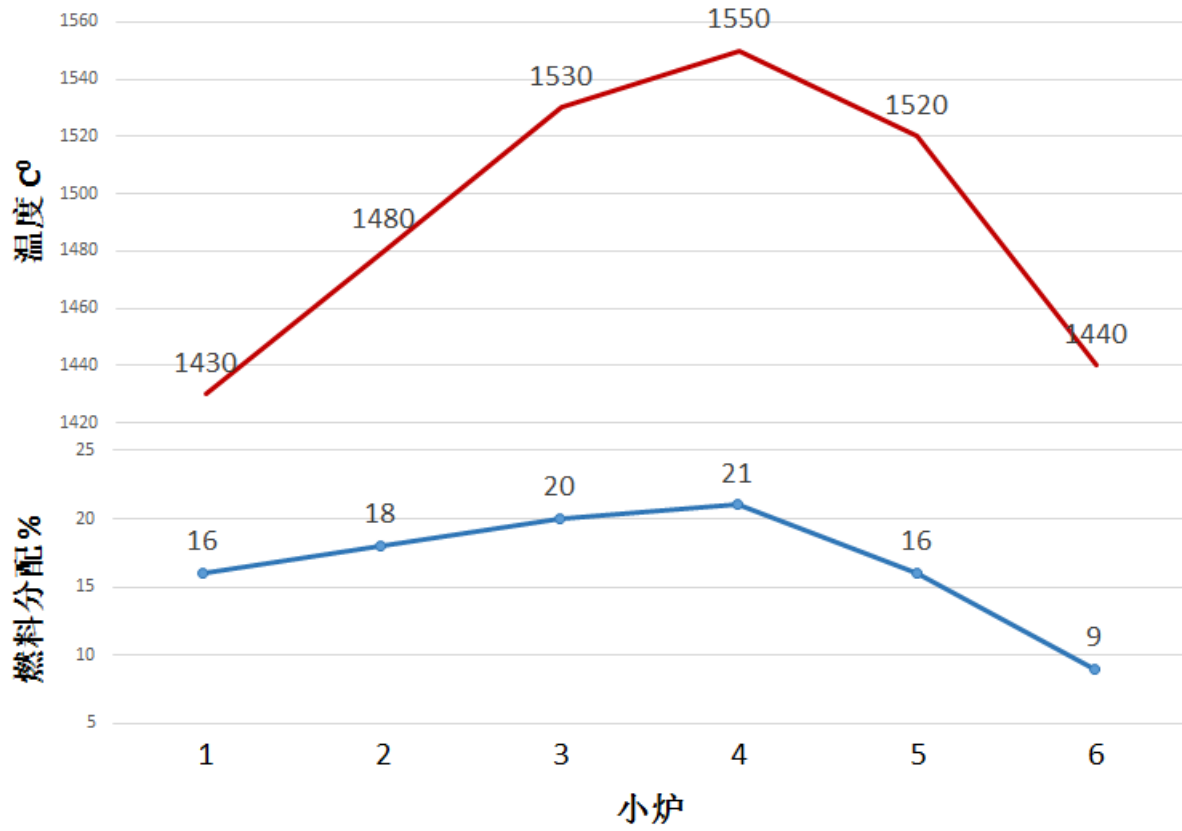
③ “双高” 曲线

即“双高热负荷点”温度制度，核心是减少处在泡沫稠密区的小炉燃料分配量，降低了此处的热负荷；配合料入窑预助熔。

目前，国内浮法熔窑均采用此法。

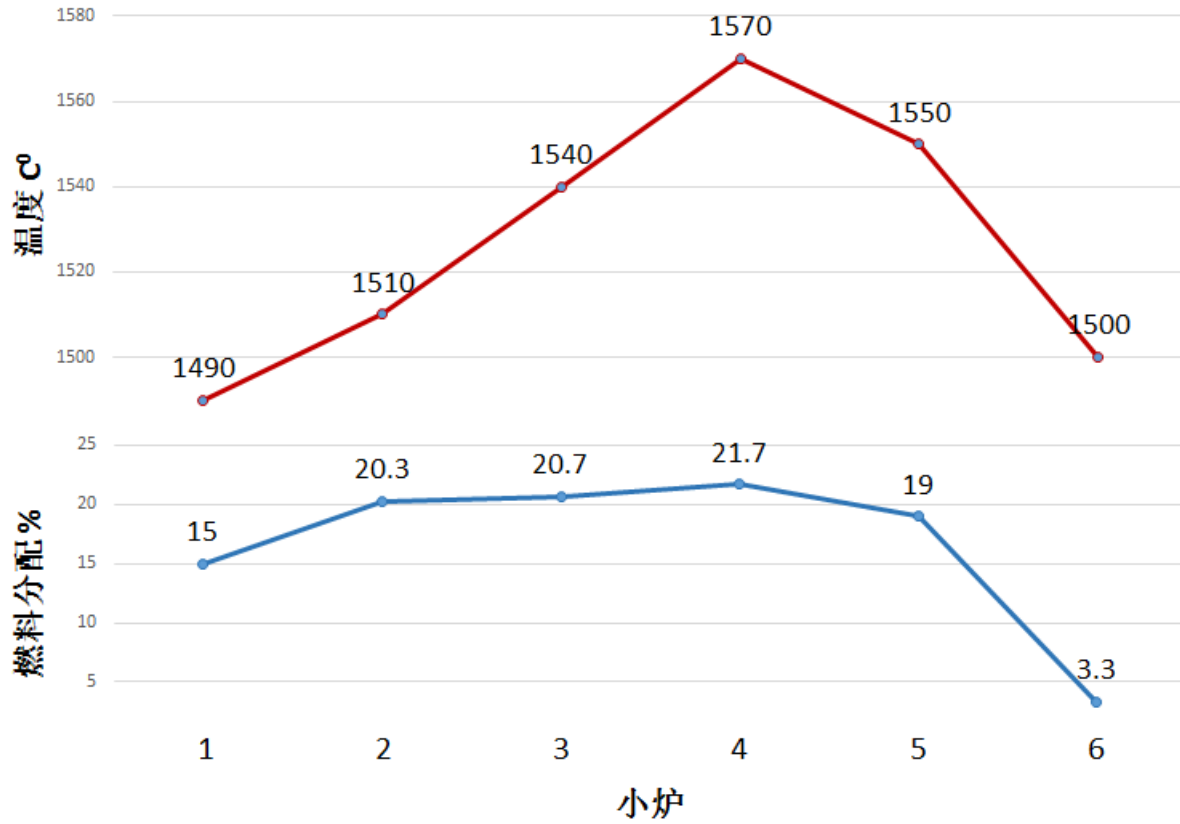


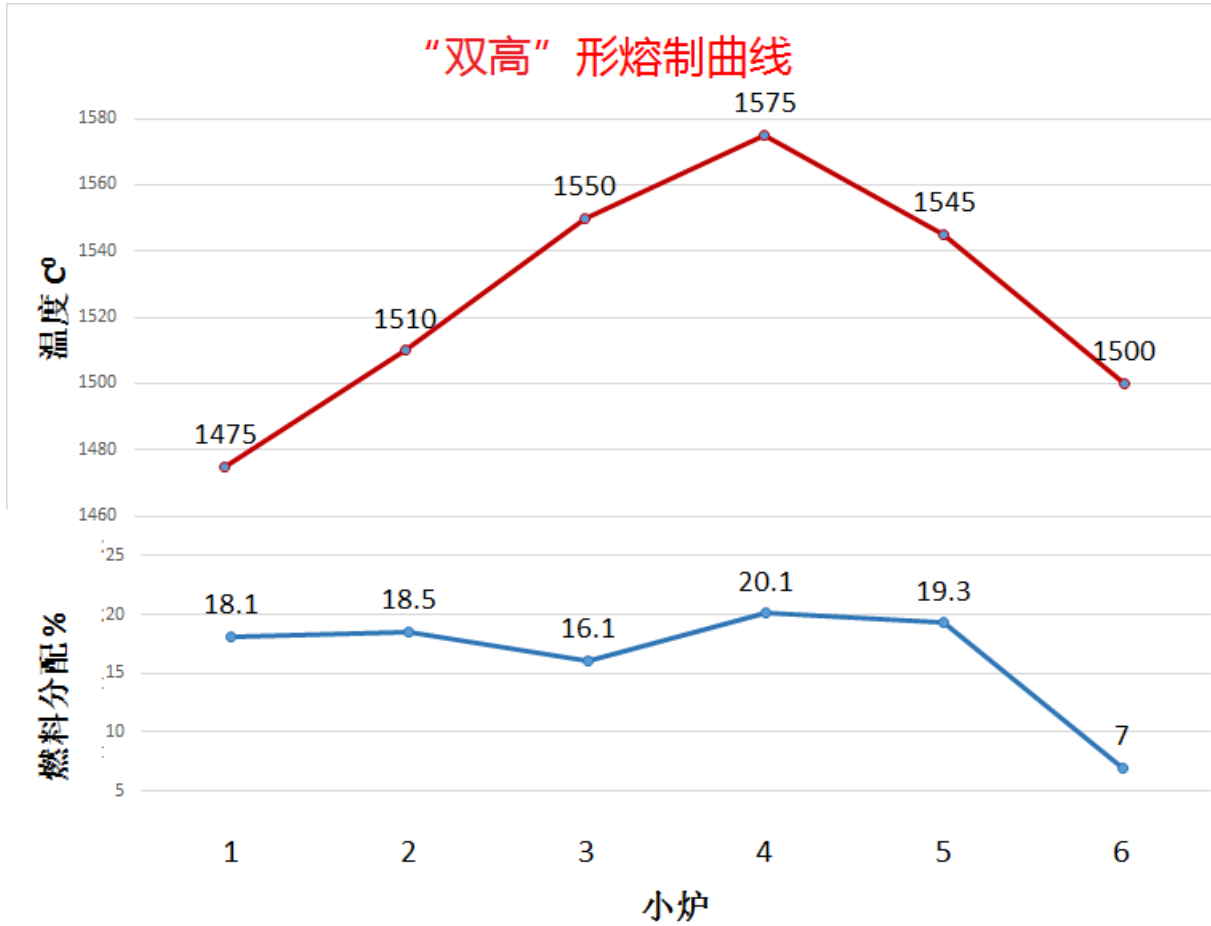
“山”形熔制曲线





“桥”形熔制曲线







平板玻璃连续池窑温度制度

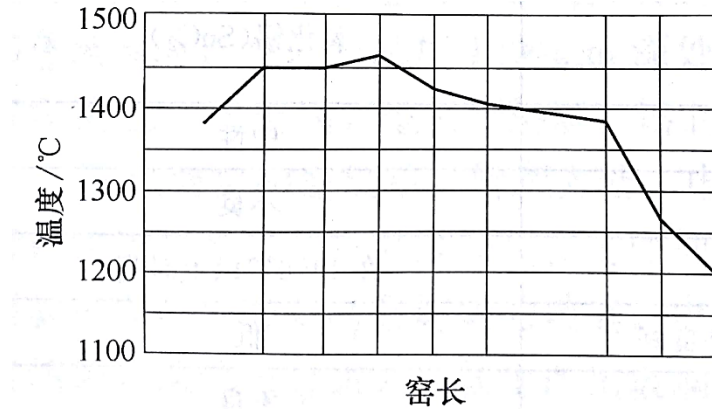


图 8-40 平板玻璃熔制温度制度

配窑料的温度曲线，玻璃熔制时的最高窑温点最高温度的选择，
最初温度到是足够地满足要求的。应该已经完成。当进入高温区域时，
玻璃熔体因热的对流和均化，不允许渣滓在继续玻璃熔制过程中，
热焓更温度逐渐降低，玻璃液重新融化，接着渣滓成形部，使玻璃。
冷却到符合于成形操作所必须的粘度，即可用不同方法来进行成形。

压力制度

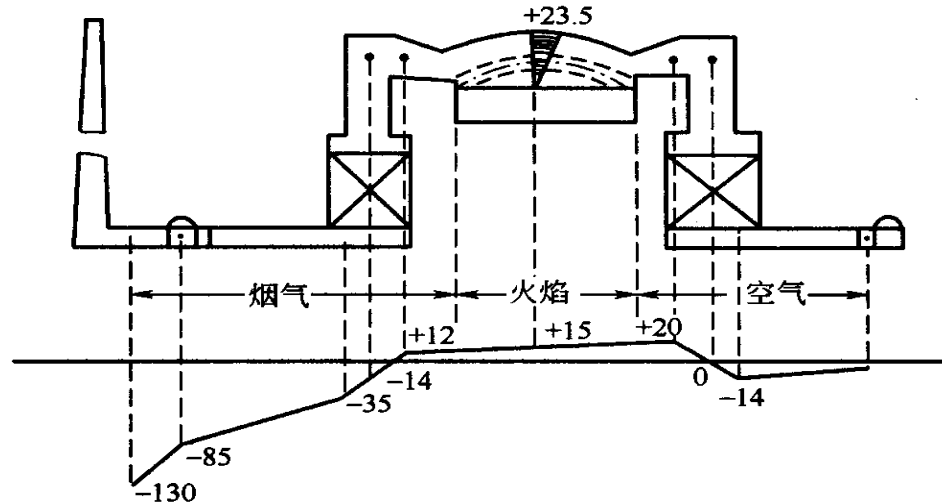


图 3-2 气流压力分布图

单位：mmH₂O。1mmH₂O=9.80665Pa

熔窑的压力通常是指受控的熔化(澄清部)的压力，应合理的控制为微正压，杜绝负压。冷却部窑压也很重要，压力的稳定与否关系到成型部玻璃液流量的稳定与否，同时也是控制成型玻璃液温度的重要手段，控制方法主要由压力的控制通常是由烟囪的抽力来控制的。压力的大小与稳定与否稀释风量和窑体的密封程度来调整，切记不可有过大的稀释风量和过小的压力。对熔制温度与熔化质量影响很大，负压过大，使冷空气进入窑内，将产生大量的气泡，相反，正压过大，也不易于气泡的排出。应该加以合理的控制。



泡界线制度

泡界线的形成：投料机的推力，投料回流，物流的熔化作用，三者相互作用并平衡时。物料的前沿就会固定在某一个位置并与纯净的玻璃液之间形成一条整齐明晰的分界线。

泡界线的控制：泡界线在玻璃行业中是一个非常重要的受控点，其形状、位置、厚薄、清晰度是反应熔化作业好坏的重要标志。质量好的泡界线形成应向外突出，相对对称，位置应较稳定以利稳定各部位的液流稳定，清凉整齐，线外镜面区干净无沫子，泡沫区应有一定的厚度。生产中要严格控制投料，稳定拉引量，合理稳定的控制风火配比，控制稳定的温度及温度梯度，有利于稳定泡界线。



液面制度

液面的波动？不仅对熔窑的池壁侵蚀加剧外，还可以影响到玻璃液的纵向和横向对流，从而也会产生气泡，沙粒等质量缺陷，生产中要严格加以控制。

实际上控制液面最好最有效的方法不是由熔制，而是由成型工段来稳定拉引量来完成的。

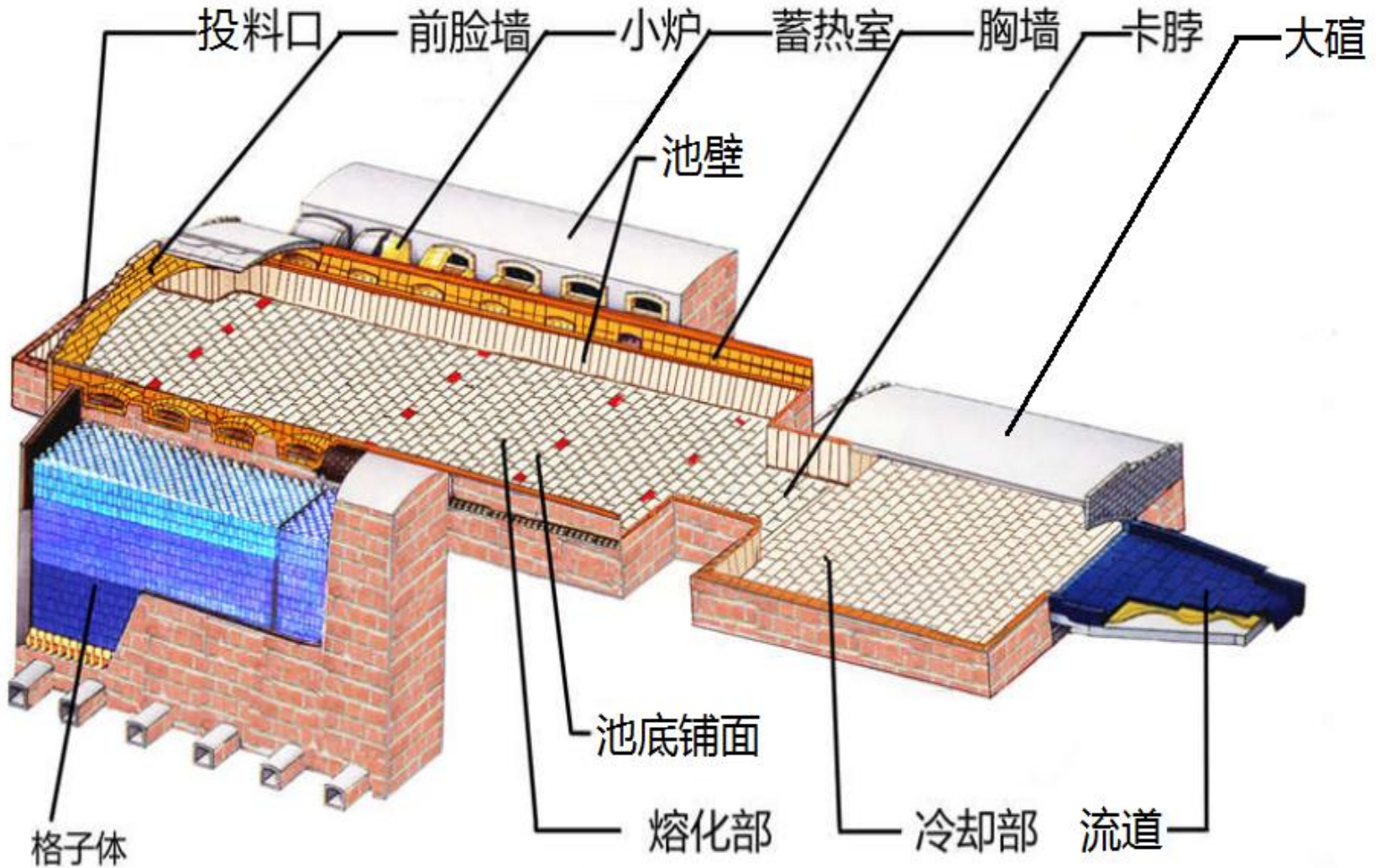


气氛制度

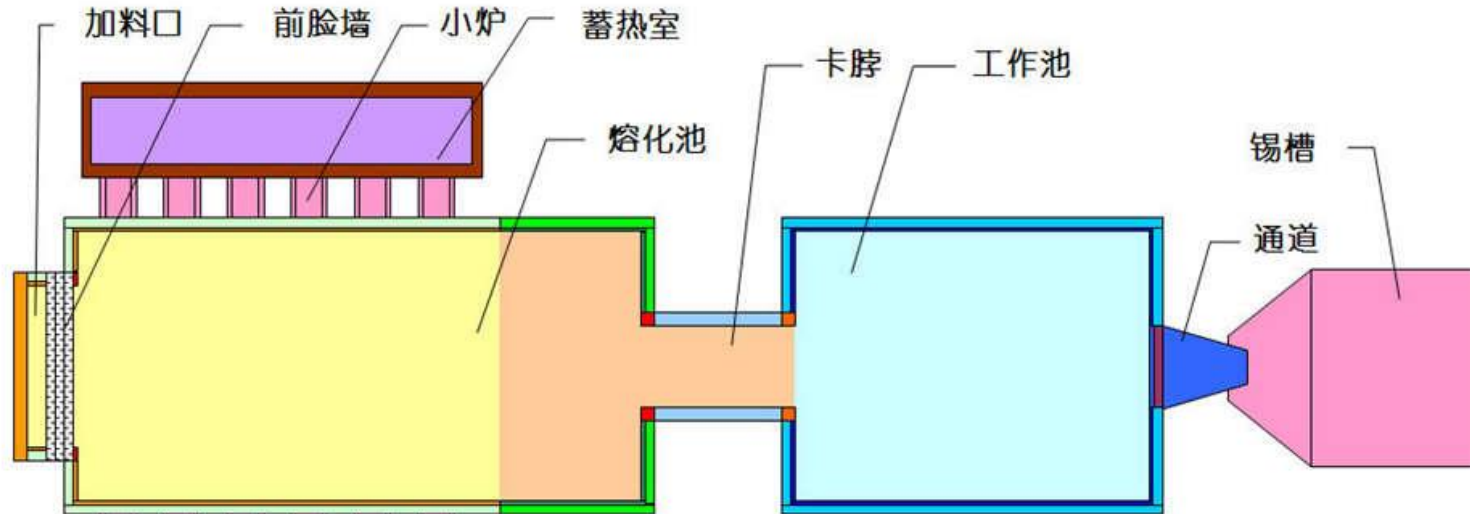
窑内气体或火焰按其化学组分以及具有的氧化或还原能力，分为氧化气氛、还原气氛、中性气氛三种。

- 1、热点以前的为弱还原气氛，燃烧产物有一定的CO，以保证与芒硝预先混合的碳粉不被烧掉，以利以后阶段芒硝的高温充分分解。
- 2、热点区为还原气氛或中性气氛，不能使该区为氧化焰，否则会形成大量的致密泡沫层，不利于玻璃的澄清和均化。
- 3、热点后为氧化气氛，燃烧产物中含有O₂这样不仅可以使微气泡中少量SO₂，CO，SO₃，O₂吸收，之后多余的O₂可以使多余的碳粉烧尽而不会使玻璃着色。

浮法玻璃熔窑结构示意图



结构示意图与耐火材料



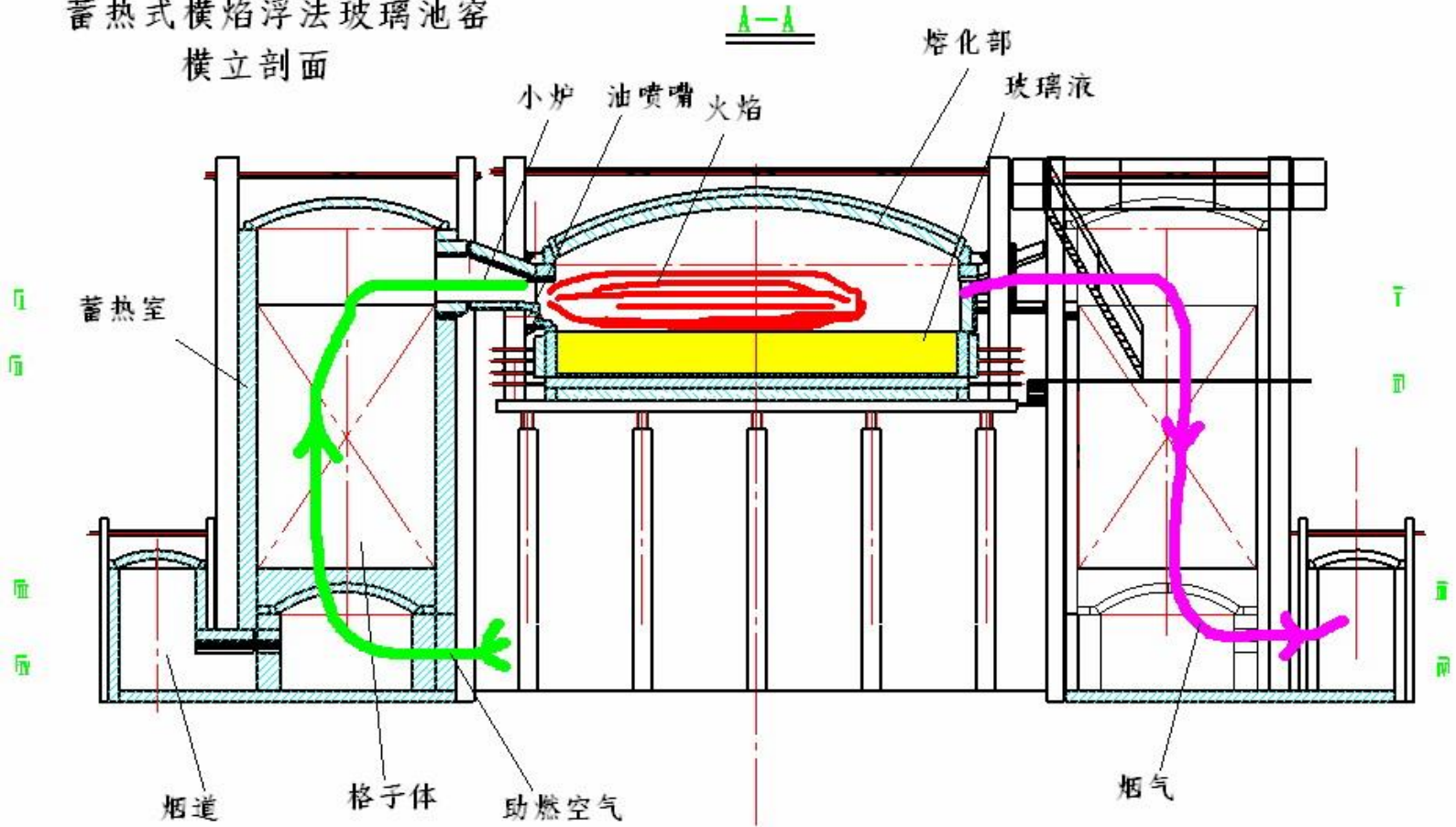
	池壁 (前)	33#/36# ZWS		上部 (前)	33# PT		池壁	33# PT/ZWS
	池壁 (后)	33#/36# ZWS ZM-G WS		上部 (后)	33# PT ZM-U PT		上部结构:	烧结材料
	拐角	41# WS		铺面 (前)	33#/36# WS		铺面	33# WS ZM-G PT/WS
	小炉	33# PT/WS		铺面 (后)	33# WS ZM-G WS		通道碓	ZM-U PT
							通道	ZM-G WS



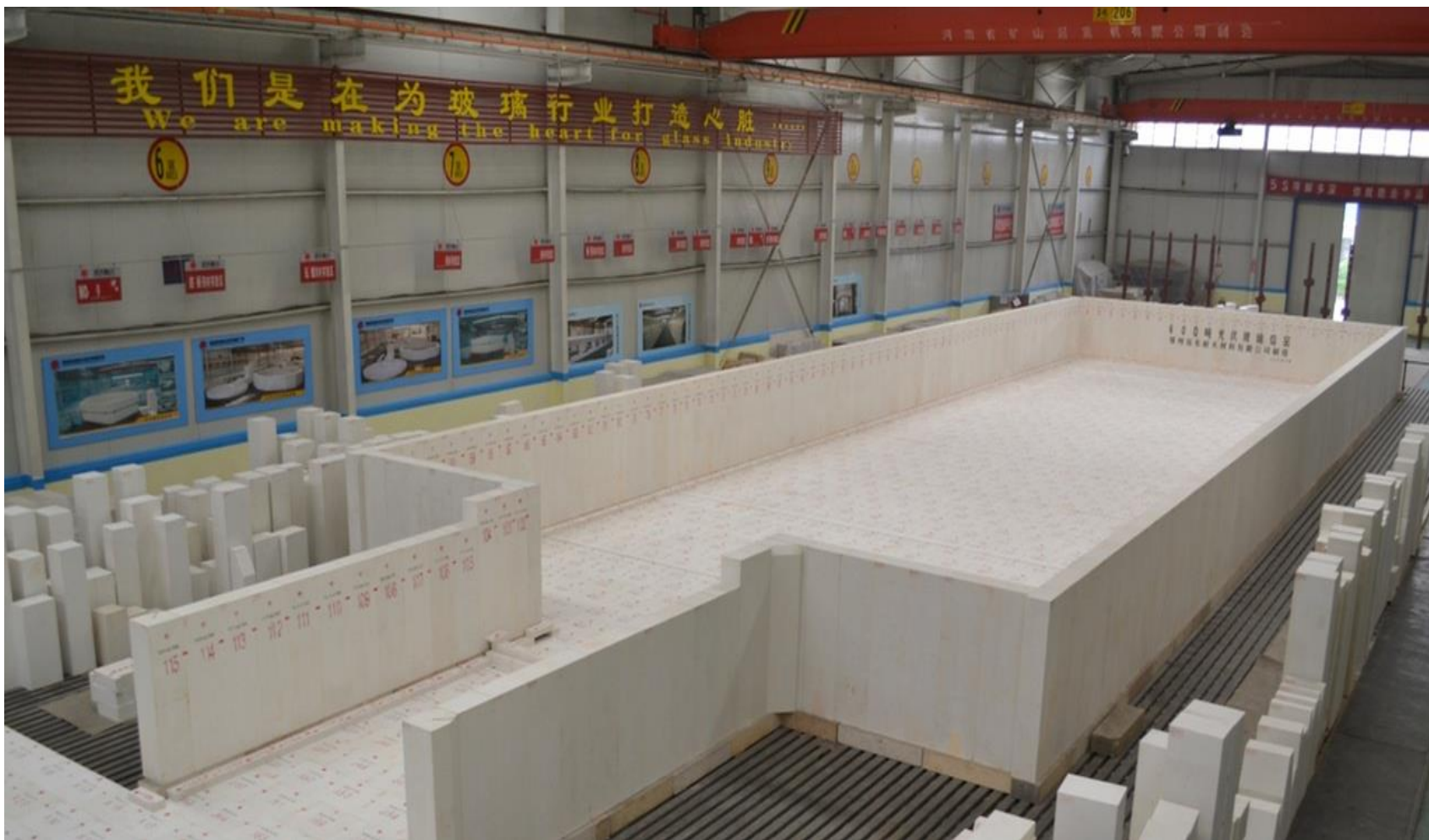
熔窑耐火材料配置

前脸L型吊墙	33# 熔铸锆刚玉、锆莫来石砖
碓顶	优质硅砖
胸墙	33# 熔铸锆刚玉、优质硅砖
池壁	33#、36#、41# 熔铸锆刚玉
小炉口	33# 熔铸锆刚玉、熔铸 β -Al ₂ O ₃
蓄热室格子体	上段：高纯镁砖，中段：熔铸锆刚玉砖，下段：低气孔粘土砖
熔化部池底	铺面：33# 熔铸锆刚玉，底部：粘土大砖
冷却部池底	铺面：熔铸 α - β Al ₂ O ₃ 砖，底部：粘土大砖
流道	熔铸 α - β Al ₂ O ₃ 砖
唇砖	熔铸 α - β Al ₂ O ₃ 砖

蓄热式横焰浮法玻璃池窑 横立剖面

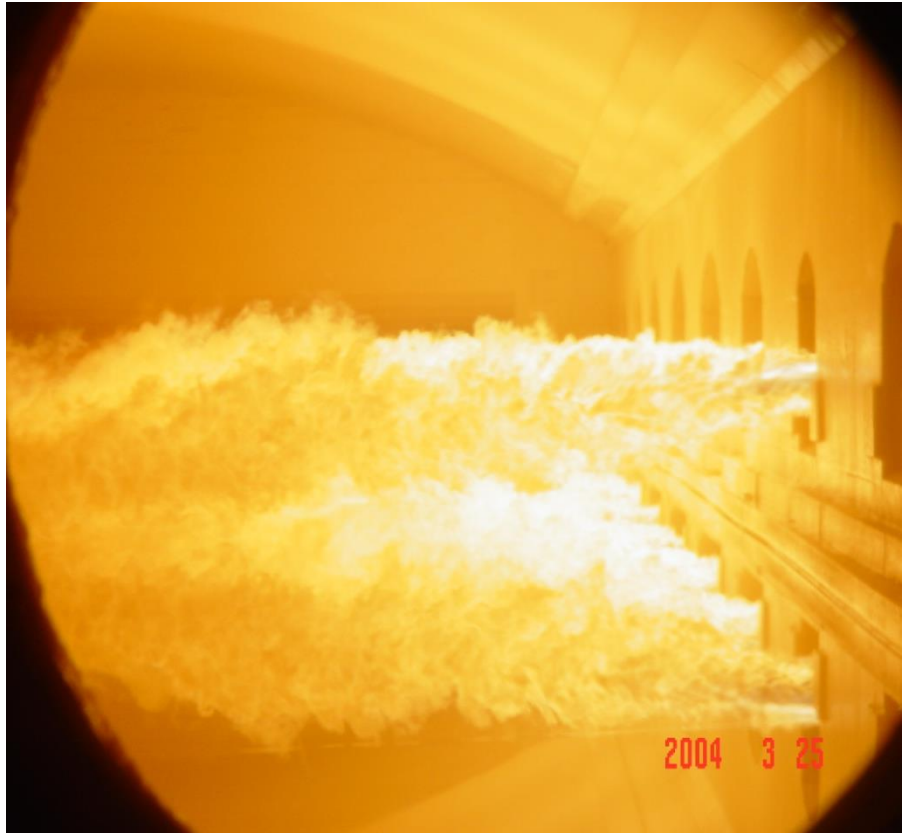


■ 熔窑耐火材料结构示意图





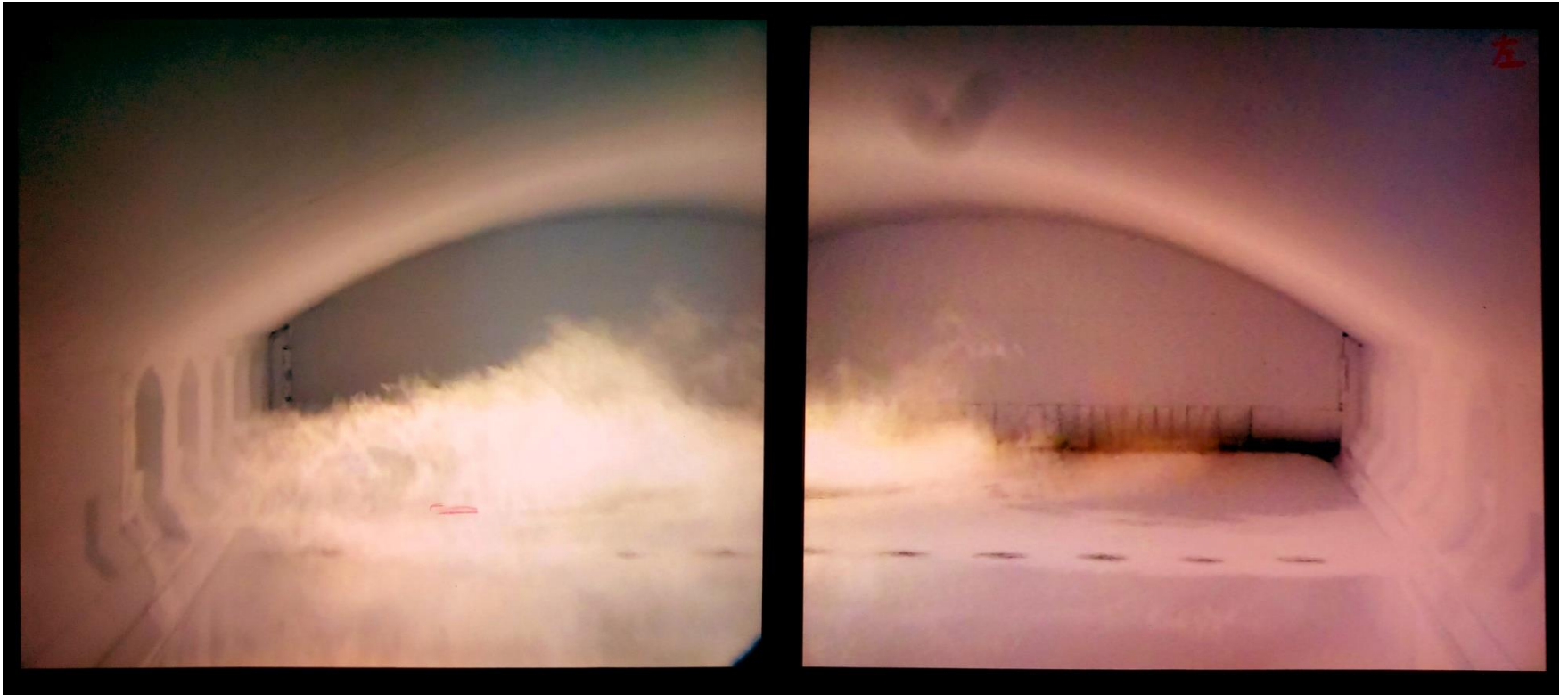
横火焰熔化池内部结构



熔窑



熔窑燃烧监控



流道、流槽





熔窑控制系统





三、浮法玻璃成型工艺及锡槽

世界三大浮法成型技术

英国的皮尔金顿PB法 (PB)

美国的PPG法 (LB)

中国洛阳浮法



浮法工艺的发明简况

1902年，美国Heal和Hitchcock申请“浮法工艺”专利

40年后，英国Pilkington试验探索研究浮法成型原理，建立“浮法工艺”初步概念

1952年英国Pilkington公司开始浮法工艺中间试验一尺(304.8mm)宽试验线

1953年初步解决玻璃和锡的接触问题

1959年正式宣布浮法工艺成功，取得专利权，7年中拉引10万t废玻璃，试验研究费500万英镑

1960年建设全球第一条浮法线(300t/d)

1961年英国技术发展部组织100名专家，攻克锡槽中的物理化学反应。



中国洛阳浮法的诞生

1960-1967年，实验室试验，上海耀华研究院、北京建材研究院，浮抛工艺试验

1967-1971年，株洲中间试验，改建停产球窑为15t/d浮法中间试验线，板宽300-900mm

1971-1981年洛阳工业试验：

1971年80t/d压延线改建浮法工业试验线，保护气体-发生炉煤气

1974年改扩建，生产试验规模提高至135t/d

1978年熔窑改烧重油，保护气体-氮氢混合气体，试验规模255t/d

1981年4月通过国家级鉴定，命名为“中国洛阳浮法”，获得国家发明二等奖



浮法玻璃成型特点

浮法玻璃成型是指熔化好的玻璃液在调节闸板的作用下，经流道平稳连续的**流入**锡槽锡液面上，在自身重力的作用下**摊平**、在表面张力作用下**抛光**、在主传动牵引力作用下向前漂浮，通过挡边器控制玻璃带的中心偏移，在拉边机作用下实现玻璃带的**展薄或积厚**而成为高质量平板玻璃的过程。



浮法成型工艺参数

浮法玻璃的成形是在锡槽中进行的，其成形过程由**玻璃液流到锡液面、玻璃液展薄、玻璃的抛光、拉薄**四部分组成。与之对应的工艺参数为玻璃液在锡液面上**浮起的高度、自由厚度、抛光时间、拉薄**。



① 玻璃液在锡液面上的浮起高度

玻璃液和锡液是互不浸润的，也不起化学反应，锡液的密度大于玻璃液，因而玻璃液浮于锡液表面上，如图9-20所示，其浮起高度与两者密度比有关。锡的密度与温度的对应关系见表9-4所示。

表9-4

锡的密度与温度的关系

温度 $^{\circ}\text{C}$	25	500	550	600	700	800	900	1000	1050	1100
密度 (g/cm^3)	7.298	6.780	6.746	6.711	6.643	6.574	6.505	6.437	6.403	6.368

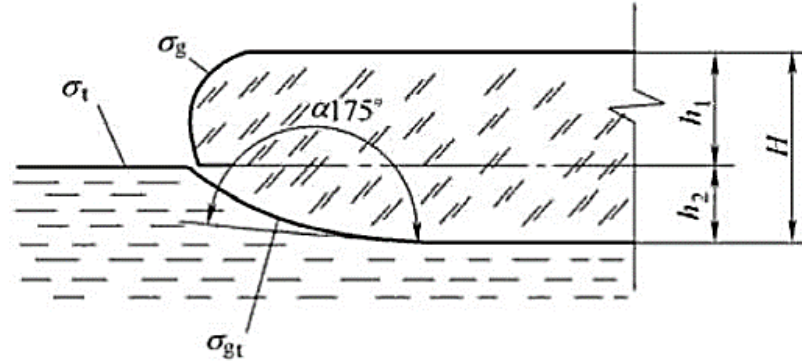


图9-20 玻璃液在锡液面上的浮起高度

假设平板玻璃室温密度为 2.505 g/cm^3 ，在 $1000 \sim 1050^\circ\text{C}$ 时的密度为 2.330 g/cm^3 。此时玻璃液在锡液面上的浮起高度 h_1 和沉入深度 h_2 分别是：

$$h_1 = \left(1 - \frac{2.330}{6.403}\right) H = 0.6361H$$

$$h_2 = \frac{2.330}{6.403} H = 0.3639H$$

式中 H -玻璃液在锡液面上的自由厚度。



②浮法玻璃的自由厚度

当玻璃液的表面张力 σ_g 与界面张力 σ_{gt} 之和小于锡的表面张力 σ_t 时，玻璃液将展成薄膜，即

$$\sigma_g + \sigma_{gt} < \sigma_t$$

而当 $\sigma_g + \sigma_{gt} > \sigma_t$ 时，则玻璃液的展薄是有限度的。

1933年Langmuir计算并经Prince的修正,提出自由厚度的计算公式:

$$H^2 = \frac{2\rho_t(\sigma_g + \sigma_{gt} - \sigma_t)}{g\rho_g(\rho_t - \rho_g)}$$

式中 ρ_t ——浮抛介质密度， g/cm^3 ；

ρ_g ——玻璃密度， g/cm^3 。

增大浮抛介质锡的表面张力 σ_t 、减少玻璃液的表面张力 σ_g ，增大浮抛介质的密度 ρ_t 、增大玻璃的密度 ρ_g 都可以减小玻璃液的自由厚度H值。

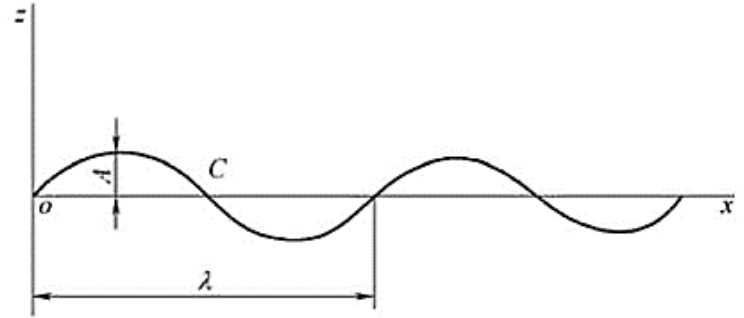


估算：当成形温度为 1000°C 左右时， $\sigma_g = 340\text{dyn/cm}$ ($1\text{dyn/cm} = 1\text{尔格/cm}^2$, $1\text{J} = 10^{-7}\text{尔格}$), $\sigma_t = 500\text{ dyn/cm}$, $\sigma_{gt} = 550\text{dyn/cm}$, $\rho_t = 6.44\text{g/cm}^3$, $\rho_g = 2.35\text{ g/cm}^3$, 把上述各值代入公式, 得 $H = 7.3\text{mm}$, 与实际情况相近



③ 玻璃液在锡液面上的抛光时间

由于玻璃液流入锡槽时速度不均，窑温升降等原因引起的冲击变化作用，使玻璃液表面出现了不平整，它的断面曲线可近似地假定为正弦函数。



可以把一个波长 λ 范围内（oc段）的玻璃液视为一个玻璃液滴，因而其中任一点 x 处所受到的压强为 P ，它是由表面张力所形成的压强和流体的静压强之和，即

$$p = \sigma_g \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \rho_g g z$$

- 式中 σ_g ——玻璃液在成型温度（1000℃）时的表面张力；
 R_1 、 R_2 ——分别为玻璃液在长度和宽度方向的曲率半径；
 ρ_g ——玻璃液在成型温度（1000℃）时的密度；



③ 玻璃液在锡液面上的抛光时间

$\sigma_g \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ —— 表面张力形成的附加压强，可以假定不平整曲线是沿着x轴方向前进的平面波，所以y轴方向的曲率半径无限大，则 $1/R_2 \rightarrow 0$ ， $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{R_1}$ ，带入上式，根据表面张力不小于静压值，得出。

$$\sigma_g \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \geq \rho_g g$$

所以： $\lambda^2 \leq \frac{4\pi^2}{\rho_g g} \sigma_g$

按上式可求得临界 λ_0 值。

假设浮法玻璃成形温度为 1000°C ，则玻璃液 $\sigma_g = 340$ 尔格/ cm^2 ， $\rho_g = 2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ， $g = 1000\text{cm}/\text{s}^2$ ，则 $\lambda_0 = 2.36$ 厘米。如果 $\lambda_0 > 2.36$ 时，重力起主要作用；如果 $\lambda_0 < 2.36$ 时，表面张力起主要作用。



③ 玻璃液在锡液面上的抛光时间

在表面张力作用下，波峰和波谷趋向平整的速度 V 可应用粘滞流体运动的管流公式，如下式所示。

$$\sigma_g = \eta \cdot V$$

假设浮法玻璃成形温度为 1000°C ，其粘度为 $10^4\text{dPa}\cdot\text{s}$ ， $\sigma_g = 340$ 尔格/ cm^2 ，代入式，则 $V=0.034\text{cm/s}$ 。临界抛光时间为：

$$t = \lambda_0 / V = 2.36 / 0.034 = 69.4\text{秒}$$

实践证明，流入锡槽的均质玻璃液，在抛光区（均匀温度场内）停留70秒左右，就可以获得光洁平整的抛光玻璃表面。



④浮法液的拉薄

拉引厚度小于自然厚度的玻璃时，必须对玻璃带施加一定的拉力。

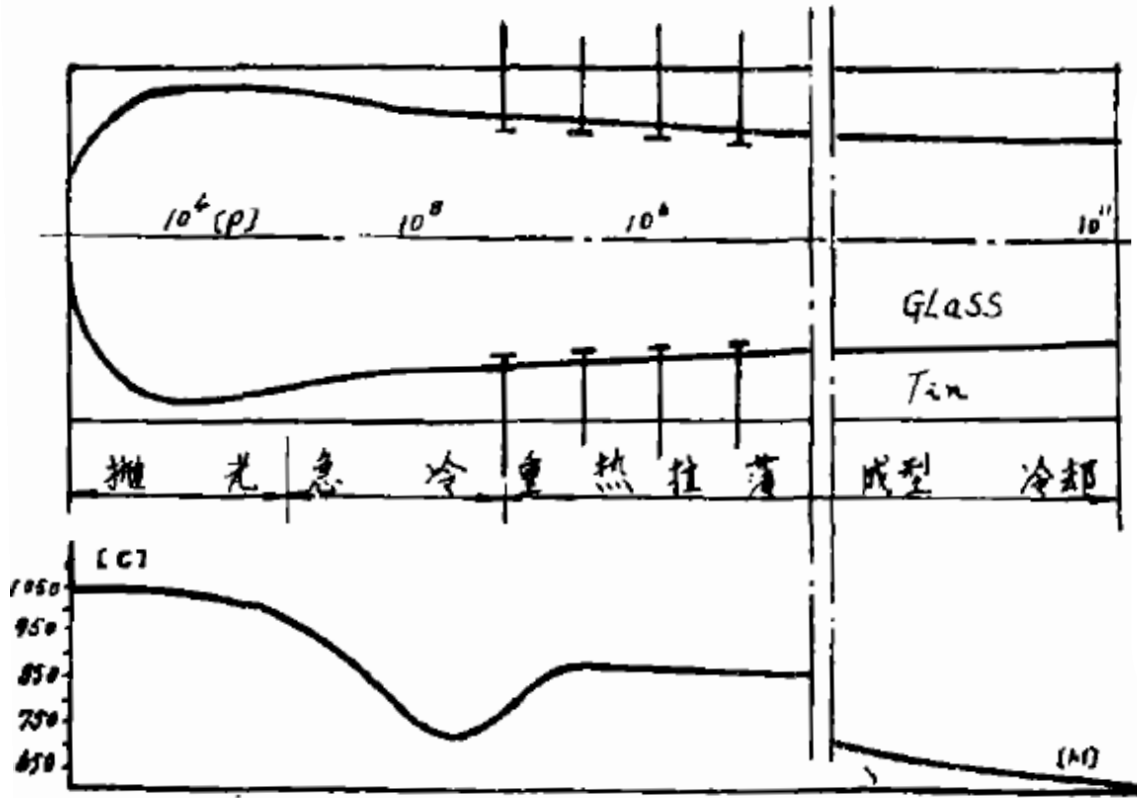
随着拉引力的增加，玻璃宽度和厚度就成比例地减小。因为在玻璃带被拉薄的同时，表面张力的作用使得玻璃带增厚或使带宽有所收缩。

要使拉薄过程有效地、顺利地进行，必须选择**适宜的温度范围**、采用**合理的工艺参数**和**拉薄措施**。实践证明，温度范围 $883\sim 769^{\circ}\text{C}$ ，相应的粘度范围 $105.25\sim 106.75\text{PaS}$ 时，有利于玻璃带的拉薄。

为了得到并维持玻璃带在拉薄区内所获得的宽度，在拉薄区玻璃带的两边，可根据工艺要求安置若干个**拉边机**。

④浮法液的拉薄

1. 低温拉薄法(强冷重热拉薄法):



(1).玻璃抛光

(2).急速冷却至700°C
(10⁸PaS);

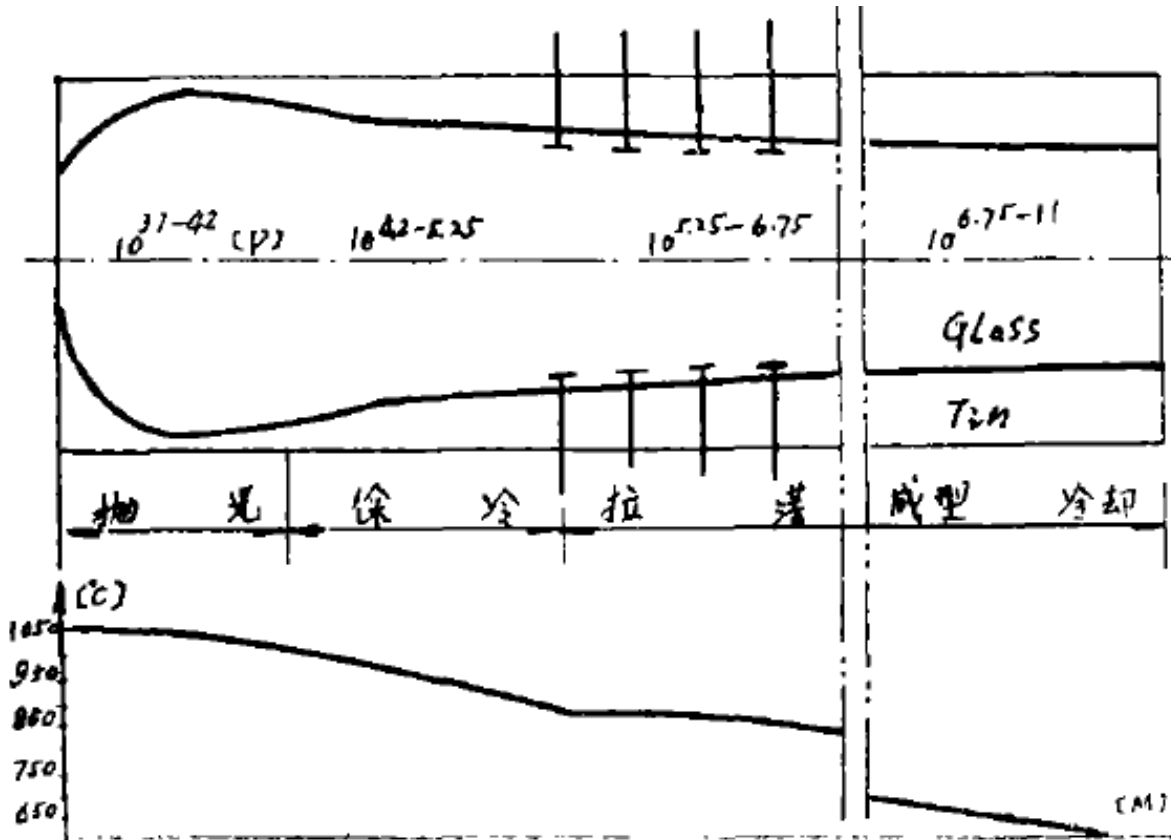
(3).重新加热至850°C
(10⁶PaS);

(4).拉引速度增加，玻
璃被拉薄；



④浮法液的拉薄

2.徐冷拉薄法：3~5mm



- (1).摊平抛光区：1065-996°C，充分摊平抛光
- (2).徐冷区：996-883°C，纵向展薄，保持宽度；
- (3).成型拉薄区：883-769°C，施以纵向、横向拉力，横向展薄；
- (4).冷却区：769-600°C

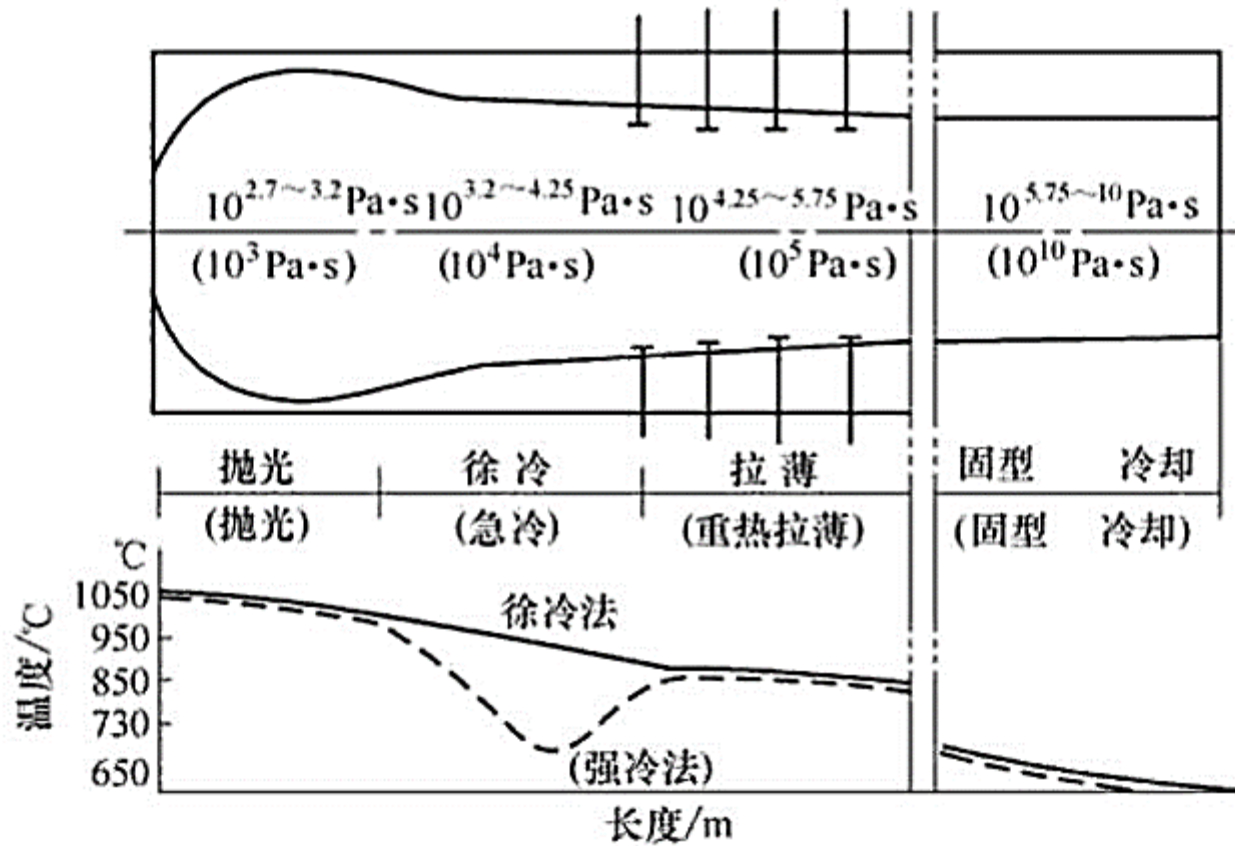


图9-23 正常降温拉薄法和急冷重热拉薄法
(图中有括号和虚线者均为低温急冷法，其它均是低温徐冷法)



浮法玻璃的积厚

当玻璃液厚度大于其自然平衡厚度时，重力和侧向力的合力大于表面张力的合力，其作用结果使玻璃展薄，玻璃愈厚，展薄作用愈强。要生产这种厚度的玻璃必须采取一定的措施。

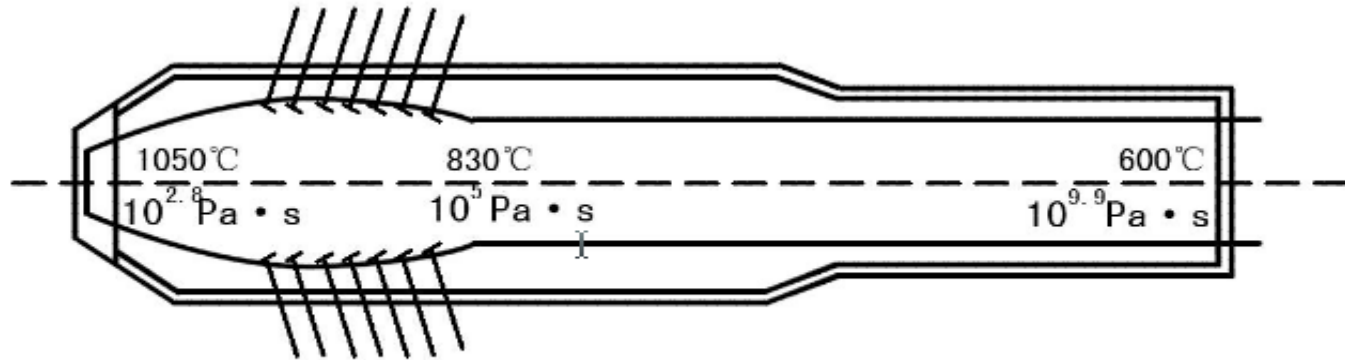
(1) 一般采用负角度摆角的拉边机，利用这种设置产生的反推力使玻璃积厚。

(2) 采用在玻璃带两边设置石墨挡墙，阻挡玻璃液的横向流动来实现。

因此，厚玻璃的生产方法大体分为以下三种成型工艺。

- 拉边机法（RADS法）
- 挡墙法（FS法）
- 挡墙拉边机法（DT法）

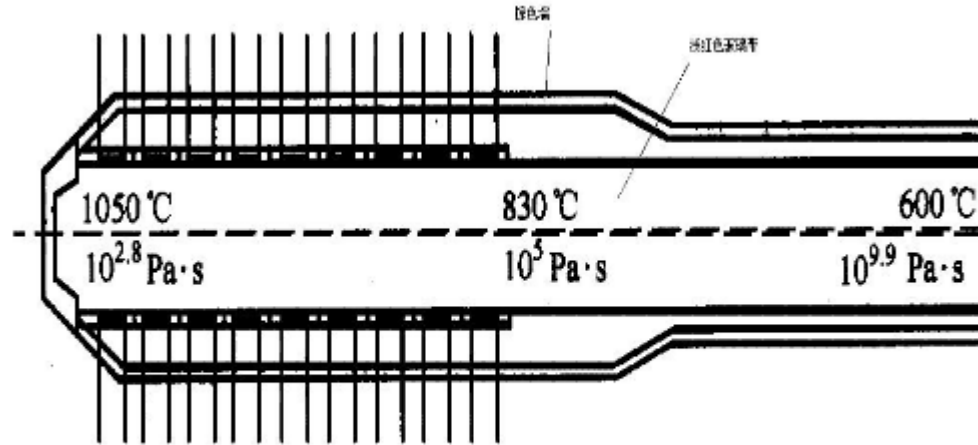
RADS法：一般用于生产8-12mm厚的玻璃



RADS法

采用的拉边机和生产薄玻璃时的一样，所不同的是，拉边机摆角以负角配置，即向锡槽进口端倾斜一定的角度，是玻璃带边部产生往里推挡的力量，阻止玻璃带边部产生往里推挡的力，阻止玻璃液因重力向两边摊开，从而达到增厚的目的。

FS法：一般用于生产 $\geq 15\text{mm}$ 超厚浮法玻璃

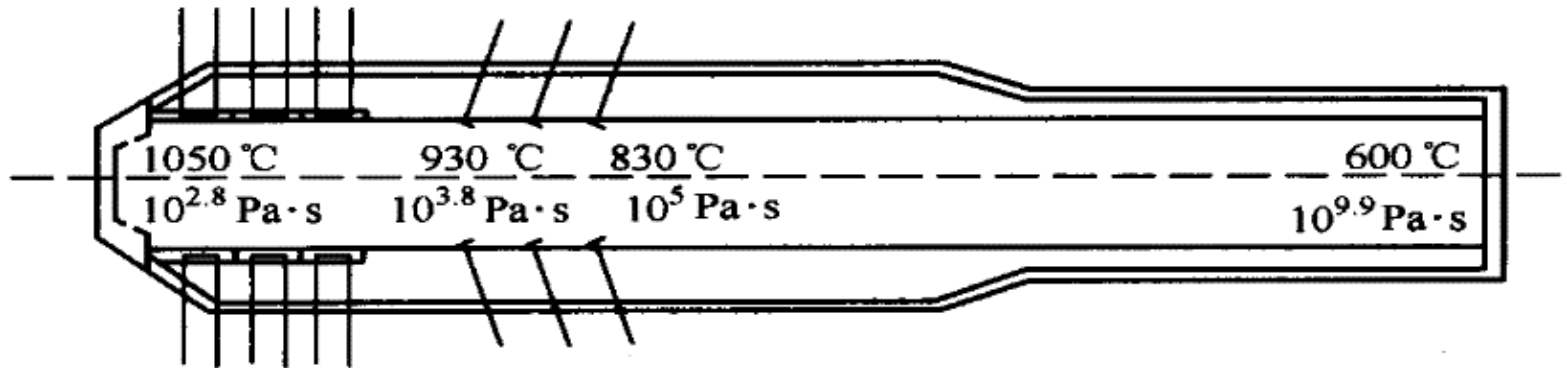


FS法

采用石墨挡条既可以避免玻璃带对挡条的黏附，也可以减少边部的摩擦阻力，充分利用了浮法成型的基本原理，玻璃的平整度和光学质量好。



DT法：厚度可调范围大



DT 法

挡墙拉边机法，简称DT法，DT法是秦皇岛玻璃设计研究院开发的浮法厚玻璃的成型方法，其吸收了拉边机法和挡墙法的优点，把它们有机地结合在一起，其工艺特点是在高温区设置短挡墙，使玻璃液在其间堆积成所需的厚度，在挡墙出口处设置几对倒八字拉边机来阻止玻璃带向外摊开，其操作灵活。



浮法玻璃成型的决定因素

对浮法玻璃成型起决定作用的因素有玻璃的**粘度**、**表面张力**和**自身的重力**。

粘度主要起定型的作用，表面张力主要起抛光的作用，重力则主要起摊平作用。但是三者对摊平、抛光和展薄都有一定作用，这三者结合才能很好的进行浮法玻璃的生产。

生产优质浮法玻璃关键条件

- (1) 适于平整化的均匀的温度场
- (2) 足够的摊平时间



浮法玻璃成型过程对锡槽的要求:

具有**良好的气密性和可调性**

锡槽的气密性

在锡槽的进口端、出口端、拉边机、挡边辊、冷却器、测量监控等操作孔，一般均采用气封装置。

锡槽的密封方法有二种：

- (1) 气封装置
- (2) 耐火挡帘

锡槽可调性

是指锡槽纵向和横向的温度、玻璃液流量、玻璃带在锡槽中的形状与尺寸、锡液对流、保护气体纯度、成份和分配量等等的调节与控制。

锡槽结构示意图

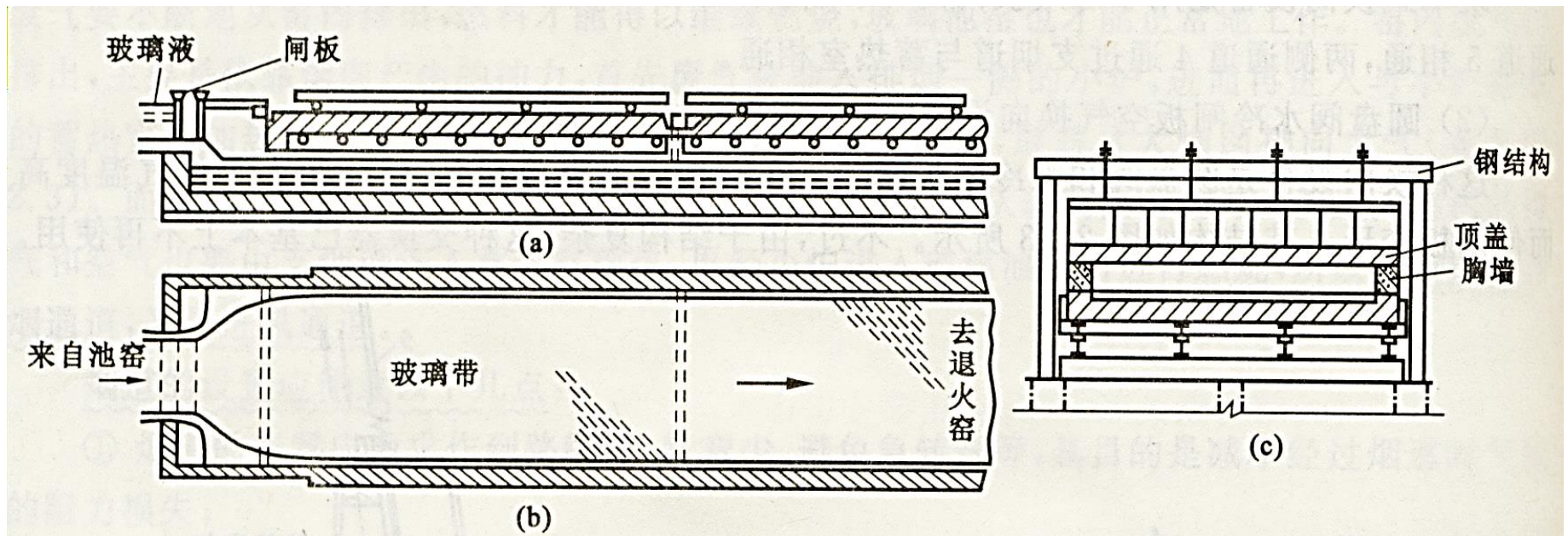
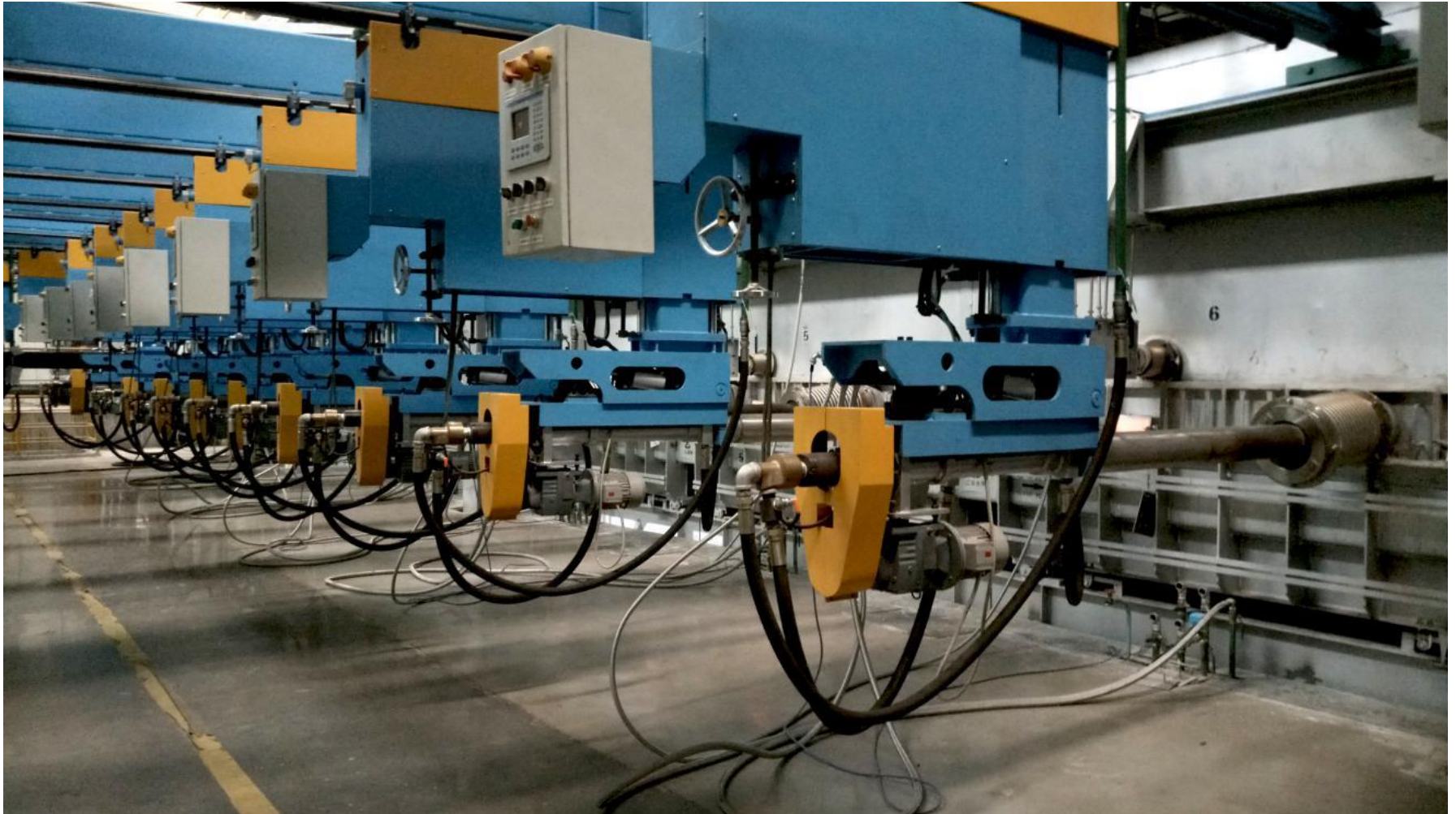


图 2.36 锡槽的整体结构简图

(a) 立面正视图; (b) 俯视图; (c) 一个断面的放大图

锡槽拉边机





四、浮法玻璃的退火工艺及退火窑

退火基本原理

玻璃中的应力

退火温度工艺

退火窑的分类与结构



退火的基本原理

在低于玻璃转变温度 T_g 附近某一温度保温以消除、减少玻璃残余应力，稳定玻璃内部结构和光学不均匀性。



■ 玻璃中的应力

玻璃中由于温度差而产生的应力

永久应力 玻璃在高于其应变点时,温度梯度会引起玻璃结构变化,这种结构变化在低于应变点时产生并保持的热应力,在温度梯度消失后仍残留在内部,这种应力称为永久应力。

暂时应力 当玻璃温度低于应变点($\eta=10^{13.6}\text{Pa}\cdot\text{S}$)时处于弹性变形温度范围内(即脆性状态)时,经受不均匀的温度变化时产生的热应力,随温度梯度的消失而消失



退火温度工艺：

运用降温手段和合理的降温速度，在低于玻璃转变温度 T_g 附近某一温度保温以消除内应力

退火上限温度：经过3min能消除95%的应力的保温温度(T_g ，其对应粘度点为 $\eta=10^{13.0}\text{dPa}\cdot\text{s}$)

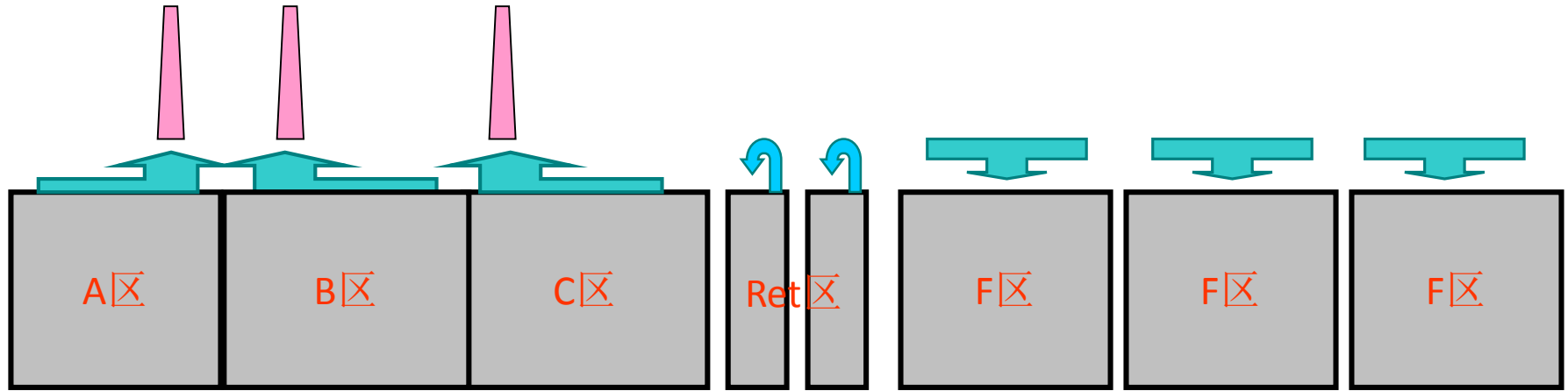
退火下限温度：经3min只能消除5%的应力的温度(应变点，其对应粘度点为 $\eta=10^{14.5}\text{dPa}\cdot\text{s}$)

退火温度范围：退火下限温度~退火上限温度。

对一般工业玻璃而言，退火上限温度在 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 之间，下限温度比上限温度低 $50\sim 150^\circ\text{C}$ 左右。



退火窑的温度制度



600-550	550~480	480~390	390~230	230~90	
加热均热带	重要冷却带	缓慢冷却带	快速冷却带	急速冷却带	
1.5:1冷却速度	5:1冷却速度	2.5:1冷却速度	3:1冷却速度	3:1冷却速度	1.75:1冷却速度

退火冷却速度按6mm计算一般选18.52°C/min

各区长度就可以算出

退火窑的主要结构和分区



5个功能区和2个过渡区，分别是A、B、C、D、Ret、E和F区。

A区：又称加热均热区，温度范围在 $600\sim 550^{\circ}\text{C}$ ，玻璃板温度均化；

B区：又称重要退火区，温度范围在 $550\sim 450^{\circ}\text{C}$ 。永久应力区控制区；

C区：又称缓慢冷却区，温度范围在 $450\sim 270^{\circ}\text{C}$ 。

D区：又称为封闭或自然冷却区。

Ret区：又称为热风循环强制对流冷却区。

E区：为一敞开过渡区。

F区：又称为快速冷却区。温度范围在 $120-60^{\circ}\text{C}$ 。



退火窑



退火窑的分类与结构



- 目前，浮法玻璃退火窑均为全钢全电退火窑，就其结构而言，它包括辊道和壳体两部分。
- 世界上在制造该种退火窑上较著名的公司有两家，一家是起步最早的比利时 CUND 公司，另一家为法国 STEIN 公司，两家产品各有特点，CUND公司以冷风工艺为基础，而STEIN公司则以热风工艺为基础，其他部分基本上趋于一致。

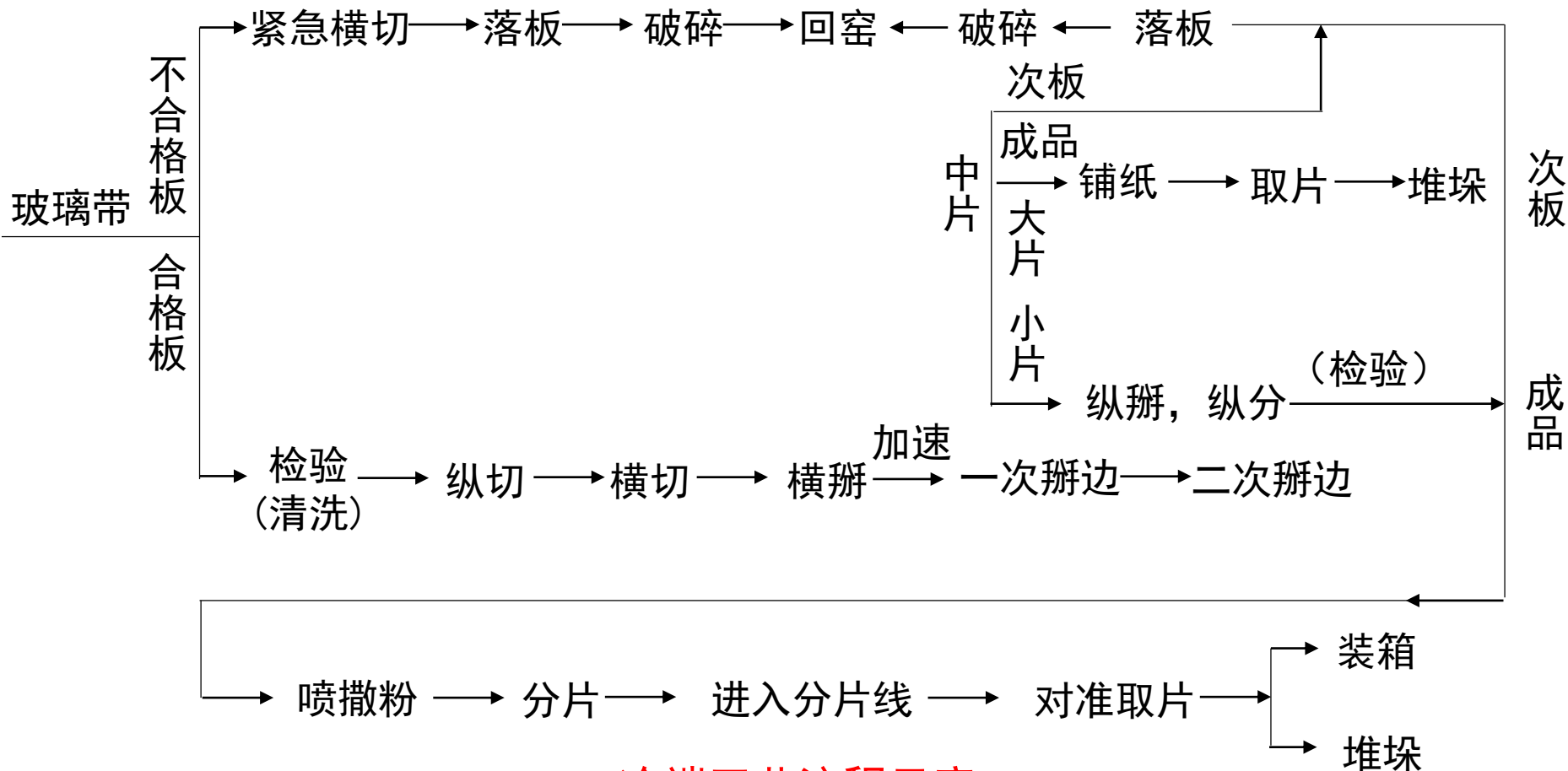


五、浮法玻璃的冷端技术及设备

- 冷端的工艺原理
- 冷端各项设备的功用
- 玻璃的切裁系统
- 浮法玻璃表面保护
- 玻璃的堆垛与装箱



冷端设备主要执行生产工艺过程中退火后的玻璃带（板）的各种检测、切裁掰断、表面保护、堆垛装箱以及完成这些工艺过程的输送。



冷端工艺流程示意



从冷端设备的功能及其工作先后顺序来划分，**可以概略地将其分为3个主要区段。**

(1) 玻璃带检测和预处理区段

在此区段内，对由退火窑出来的玻璃带进行应力分布、全板宽的厚度和质量检验；应将不能作为产品出厂的质量不合格的废板处理掉。

(2) 切裁掰断区段

本区段要完成玻璃带**纵切（包括切边和纵向分切）、横切、横向掰断、加速输送、掰边、纵向掰断、纵向分片和落板**等工序。

(3) 分片、堆垛及装箱区段

在本区段将切裁掰断后的质量合格玻璃板，按大、中、小片不同规格和质量等级分别运送到大片堆垛区、中片堆垛装箱区和小片堆垛装箱区，并在堆垛装箱前，由各自的喷撒粉、铺纸装置进行表面保护。



冷端各项设备

①玻璃带输送辊道

玻璃带离开退火窑到横向掰断为止的这段输送辊道。在此段辊道上装有**紧急切割、应力检测、板厚检测、玻璃运行速度及距离的脉冲检测、洗涤干燥、点状缺陷检测**和**横向掰断**等设备。

②分片输送装置

将主线上运行的玻璃板，横向分送到各支线上，以便对玻璃板进行进一步的处理，如改切、掰断、表面保护及堆垛装箱

③浮法玻璃检测装置

为了调整、控制生产和操作，保证产品质量，需要对玻璃带、板进行各项检测，一般在线设有应力检测、板厚检测、拉边位置及板宽检测、点状缺陷检测等装置。



玻璃切裁系统

机理

玻璃表面的**微裂纹**会严重影响玻璃的机械强度，有资料介绍，当裂纹深度为 $1\mu\text{m}$ 时玻璃的强度会降低到原强度的 $1/100$ 。当玻璃表面被刀轮滚压出一条划痕时，只需要很小的弯折力，便可以将玻璃沿切痕掰断。

设备

这一系统的设备是**冷端的核心关键设备**，包括紧急横切机、边位以及速度和长度的测量装置、纵切机、横切机、横向掰断、掰边装置、落板辊道、纵向掰断及纵向分离装置和其电子计算机控制系统等



表面保护

浮法工艺所生产的玻璃板表面平整，光学性能极好。为了减少擦伤和发霉，在浮法生产线的冷端，一般都采用表面保护措施，如

- 涂防霉药剂
- 铺纸
- 喷粉
- 吹扫碎玻璃屑
- 横向掰断前后采用快慢辊道
- 气垫输送等。



堆垛与装箱

一般将堆垛和装箱设备按规格分为大、中、小3种;按堆垛和装箱的方式分为水平和竖直的两种。



冷端



堆垛区



成品库





作业:

1.请阐述浮法玻璃生产工艺流程及特点