



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 |



2.1 玻璃的成分设计

玻璃成分是指构成玻璃的**元素或氧化物**，它是玻璃化学组成的基础。玻璃成分对结构、性质和工艺起决定性作用。

2.1.1 玻璃成分表示方法

① **质量百分数**。也称重量百分数，其表示方法wt%

$$w_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \times 100\%$$

w_i —— 玻璃中成分i的质量百分数， wt%；
 m_i —— 玻璃中成分i的质量含量；
 $\sum m_i$ —— 玻璃中所有成分质量含量的总和

② **摩尔百分数**。其表示方法为mol%

$$x_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100\%$$

x_i —— 玻璃中成分i的摩尔物质的量分数， %；
 n_i —— 玻璃中成分i的物质的量；
 $\sum n_i$ —— 玻璃中所有成分物质的量的总和

在研究玻璃成分与性质关系时，常采用摩尔分数。



2.1 玻璃的成分设计

③ **摩尔比**。首先将玻璃成分中各成分的量换算成摩尔数，再列出相互之间摩尔数的比例。用摩尔比来表示玻璃成分既可以预测玻璃的性质，也可便于各种玻璃之间对比。

④ **原子分数**。也称原子百分率，是指构成玻璃的原子分数，主要用于特种玻璃组成表示，如红外夜视玻璃为 $\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$ 和 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 等。

⑤ **阳离子相对分数**。指每种阳离子与氧离子的原子比

$$f_{Me} = \frac{\text{Me的原子数量}}{\text{O的原子数量}}$$



2.1 玻璃的成分设计

2.1.2 玻璃成分设计原则

(1).玻璃成分体系稳定可靠

设计的组成能形成玻璃而析晶倾向小。

以玻璃形成区图为依据时，透明玻璃成分要在玻璃形成区内。

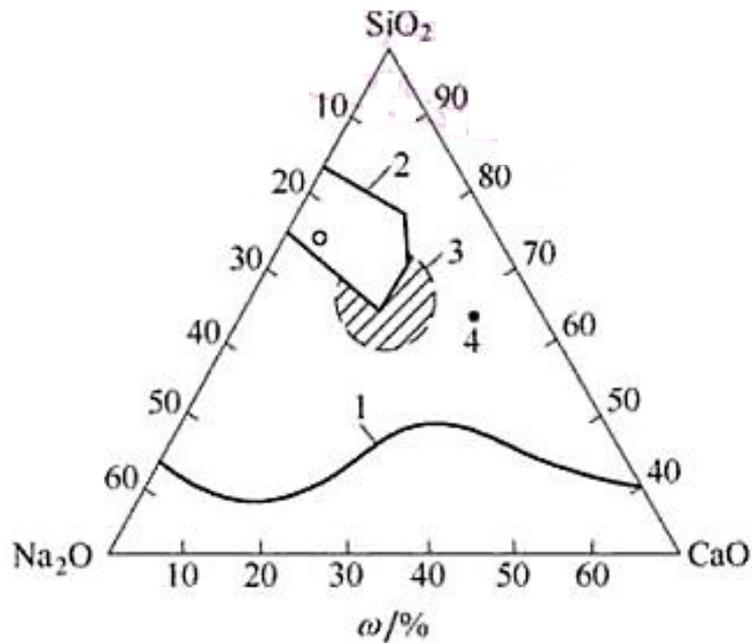
以相图为依据时，玻璃成分应位于相图中相交界线和低共熔点附近。

还要考虑玻璃是否容易分相和析晶的问题，微晶玻璃应获得要求的晶相和形貌



2.1 玻璃的成分设计

2.1.2 玻璃成分设计原则



Na₂O-CaO-SiO₂系统玻璃形成区图

1-玻璃形成范围线，此线以上成分即可形成玻璃；

2-现代实用玻璃形成范围

3-古代玻璃形成范围

4-低温共熔物

钠钙硅玻璃实用成分范围（摩尔分数）

SiO₂ 60%-80%，CaO 5%-20%，Na₂O

10%-20%。



2.1 玻璃的成分设计

2.1.2 玻璃成分设计原则

(2).设计的玻璃性能达到要求

不同用途的玻璃材料与制品有不同的性能要求，玻璃成分设计必需满足产品性能要求

(3).符合绿色制造概念

尽量不用或少用对环境有害的成分，如Pb、Hg、F等，但目前还很难做到理想。

(4).符合熔制、成形、退火等工艺要求

(5).原料质量的稳定和供应

原料易得，成本低，玻璃价格低。



2.1 玻璃的成分设计

2.1.2 玻璃成分设计原则

具体地

首先：根据玻璃制品的物理-化学性能和工艺性能，选择**合适**的**氧化物系统**，确定3-4种总量达90%左右的主要氧化物含量。利用相图或玻璃形成区图选择组成点时，**组成点接近低共熔点或相界线，远离析晶区，以降低玻璃的析晶倾向。**

此外：还加入一些赋予玻璃必要性质而不使玻璃主要性质变差的氧化物，使其组成氧化物在5-6种以上。这里须结合各种氧化物的作用，以及双碱效应、硼反常、铝反常等知识。

最后：还应当考虑加入适当的**辅助原料**如澄清剂、助熔剂等。



2.1 玻璃的成分设计

2.1.3 玻璃成分设计方法

(1).经验设计 (2).计算机辅助设计

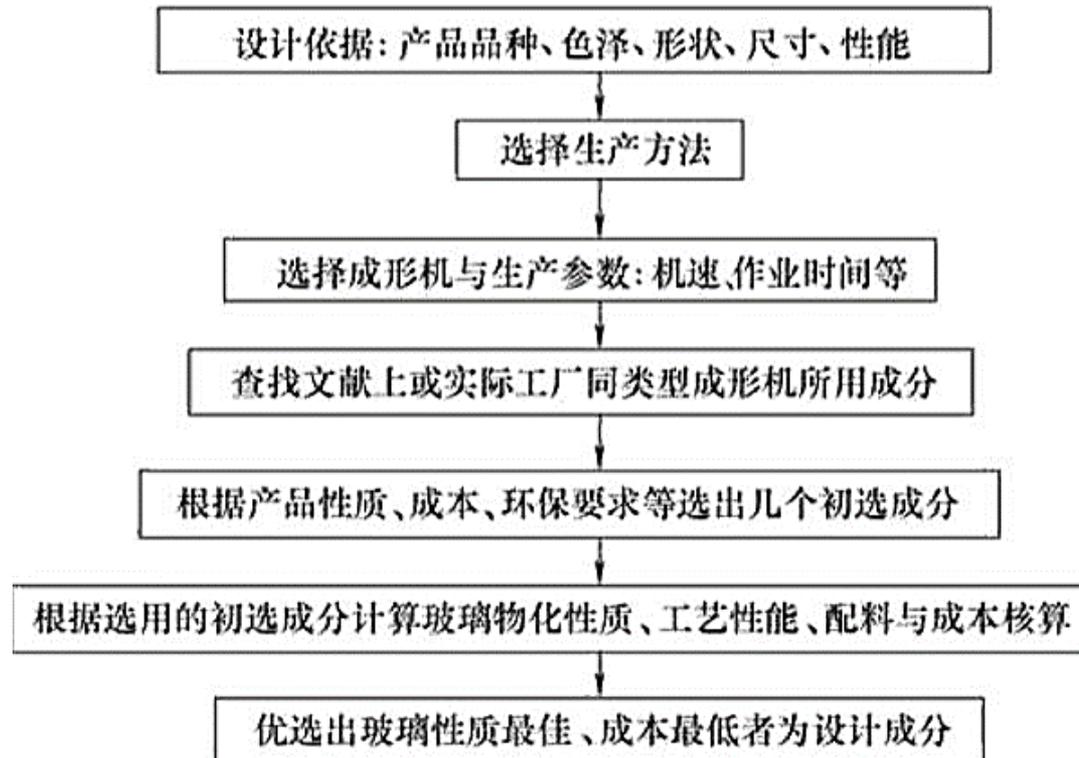
■ 经验设计

- 1.根据玻璃品种及其性能指标，生产方法，原料，成本核算等要求，
- 2.进行调研和查阅文献，找出国内外类似的玻璃成分作为参考，
- 3.然后考虑原料、成本等因素，对参考玻璃组分作一些局部修改和调整
- 4.考量新成分的物理和化学性质，工艺性能，原料用量以及成本，看是否符合设计任务书要求，
- 5.如某一方面的指标与要求有差距，则进一步调整，直至符合要求。



2.1 玻璃的成分设计

2.1.3 玻璃成分设计方法



传统玻璃成分设计流程图



2.1 玻璃的成分设计

2.1.3 玻璃成分设计方法

(1)经验设计(2)计算机辅助设计

■ 计算机辅助设计

(1) 计算机模拟

又称计算机实验，是指利用计算机对真实玻璃成分系统进行模拟实验，提供实验结果，以指导成分设计.可分为全面试验法和正交试验法

(2) 计算机优化设计

一种计算机辅助设计，先通过资料或者经验根据性能指标确定玻璃组分，然后编制计算机程序进行优选

(3) 利用数据库进行玻璃成分设计

2.1.4 几种典型玻璃的成分



	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SnO ₂
浮法玻璃	72.5	1.2	8.2	4			14.00	
瓶罐玻璃	73.6	1.6	8.5	2.3			14.6	
大猩猩	61.6	18.9	0.08	1.6	4.3	0.009	13.1	0.2
TFT	62.2	16.7	7.5	1.5	10.4			



2.2 玻璃性能计算

玻璃密度计算

玻璃热膨胀系数计算

玻璃比热容计算

玻璃热导率计算

玻璃光学性质计算

玻璃电学性质计算

玻璃粘度计算

玻璃表面张力计算

玻璃析晶温度计算



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.1 原料的选择

主要原料：在玻璃中引入各种组成氧化物的原料。

辅助原料：为使玻璃获得某些必要的性能或加速熔制过程而使用的原料。

选择原则

- 1 原料的质量要符合要求
- 2 易于加工
- 3 成本低，储量丰富，供应可靠
- 4 对耐火材料的侵蚀要小
- 5 尽量采用适于熔制和无害的原料



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

1. 引入SiO₂的原料

- **作用**：玻璃形成体氧化物，以[SiO₄]存在，是玻璃结构的骨架。
- **原料**：主要有石英砂、砂岩、石英岩、脉石英

石英砂

又称硅砂，是石英岩、长石等受水、碳酸酐以及温度变化等作用，逐渐分解风化由水流冲击沉积而成

化学成分：SiO₂是主要有用成分，并含有少量Al₂O₃、K₂O、Fe₂O₃等杂质。

高质量的石英砂含SiO₂应在99.0%~99.9%以上

玻璃用硅砂的颗粒直径：在0.15-0.80mm之间，颗粒过大，熔化困难；颗粒过小，易飞扬，且一般粒度越小，杂质含量越高



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

1. 引入SiO₂的原料

砂岩

石英砂颗粒和粘性物质在高压下胶结而成的一种碎屑沉积岩

化学成分：砂岩化学成分与胶结物的性质和含量有关，二氧化硅（硅胶）胶结的砂岩SiO₂纯度高，粘土质砂岩中Al₂O₃含量较高。

化学成分质量要求：SiO₂：98%，Fe₂O₃<0.2%

特性：硬度高，接近于莫氏硬度七级。

因此开采成本比石英砂高，且破碎加工过程中机械掺铁高。



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

1. 引入SiO₂的原料

石英岩

硅质砂岩经变质作用使石英颗粒彼此紧密结合，再结晶的岩石。

特性：硬度大（比砂岩大），不易粉碎。

化学成分：氧化硅含量高，杂质含量低。

应用：无色玻璃

脉石英

脉石英属火成岩。外观一般为纯色，半透明，呈油脂光泽，断口呈贝壳状。无色透明的称为水晶。脉石英有明显的结晶面。

化学成分：主要成分是孪生的石英结晶体。

应用：石英玻璃



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

2.引入 Na_2O 的原料

➤**作用：**网络外体、助熔、降低粘度,不超过18%

➤**原料：**纯碱、芒硝、硝酸钠、氢氧化钠

纯碱

白色粉末、易溶、极易吸水潮解和结块，熔化过程中容易挥发，约为本身重量的0.5-3.2%

质量要求： $\text{Na}_2\text{CO}_3 > 98\%$ 、 $\text{NaCl} < 1\%$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 < 0.1\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.1\%$

硝酸钠

无色或淡黄色六角形结晶，能吸湿潮解，可溶；可作氧化剂（如用于铅玻璃）；脱色剂；与白砒共同使用可起到澄清作用；代替部分碳酸钠提高气体率；侵蚀性较大

质量要求： $\text{NaNO}_3 > 98\%$ 、 $\text{NaCl} < 1\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.01\%$



2.3 玻璃的原料和配料

芒硝

助熔性好，分解温度高，需要加入本身重量的4%的还原剂（主要为碳粉、煤粉等），能吸收水分

质量要求： $\text{Na}_2\text{SO}_4 > 85\%$ 、 $\text{CaSO}_4 < 4\%$ 、 $\text{NaCl} < 2\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.3\%$ 、 $\text{H}_2\text{O} < 5\%$

与纯碱比较，使用芒硝有如下缺点：

- ①分解和反应温度高，热耗大，挥发量是纯碱2倍；
- ②易侵蚀耐火材料并产生芒硝泡；
- ③需使用还原剂，且用量过多时， Fe_2O_3 被还原成FeS而使玻璃着成棕色；
- ④纯碱和芒硝的理论 Na_2O 含量分别为58.53%和43.7%，即芒硝中有效 Na_2O 含量较低。



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

3.引入CaO的原料

作用：网络外体，增加化学稳定性、机械强度，缩短料性，易使玻璃发脆，引入量一般不超过12.5%。

原料：方解石、石灰石、白垩、工业碳酸钙等

钙原料质量要求： $\text{CaO} \geq 50\%$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.15\%$

方解石

白色（或淡黄、灰色、浅红）岩石，纯度比石灰石高。

石灰石

为多为灰色，淡黄或淡红色，常含石英、粘土、氧化铁等杂质

白垩

白色，含有水分，须经烘干处理，其它杂质较少

工业碳酸钙

白色，纯度高（含量在98%以上）



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

4. 引入 Al_2O_3 的原料

- **作用**：提高粘度、抑制析晶
- **原料**：长石、高岭土、叶蜡石、氧化铝和氢氧化铝等

长石

性状：钾长石(淡红)、钠长石(白)、钙长石(白)，解理面明显。

能引入碱，从而减少纯碱用量，易熔化。

质量要求： $\text{Al}_2\text{O}_3 > 16\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.3\%$ 、 $\text{R}_2\text{O} > 12\%$

高岭土

易碎、含铁杂质和有机物时呈黑色或灰色。

质量要求： $\text{Al}_2\text{O}_3 > 30\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.4\%$ 。



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

5. 引入 Li_2O 的原料

作用：网络外体、强烈助熔、断网或者积聚作用，少量引入时降低析晶能力，过多则增加析晶能力

原料：碳酸锂、含锂矿物等

碳酸锂

白色粉末。溶于稀酸。微溶于水，在冷水中溶解度较热水下大。不溶于醇及丙酮。可用于制陶瓷、药物、催化剂等。常用的锂离子电池原料。



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

6. 引入 B_2O_3 的原料

- **作用**：结构、硼氧反常、助熔、料性、挥发
- **原料**：硼酸和硼砂（化工原料）、含硼矿物；

硼酸 (H_3BO_3)

白色鳞片状三斜结晶，具有特殊光泽，触之有脂肪感觉，易溶于水。

加热后会失去水最终形成 B_2O_3

质量要求 $H_3BO_3 > 99\%$ ， $Fe_2O_3 < 0.01\%$ 、 $SO_4^{2-} < 0.2\%$

硼砂

又分为含水硼砂和无水硼砂。含水硼砂状色白、菱形结晶、易溶，易失水；无水硼砂无色、玻璃状小块。

此外还有硼酐(B_2O_3)和含硼矿物如硼镁石 ($2MgO \cdot B_2O_3 \cdot H_2O$)、钠硼解石 ($2NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$) 等



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

7. 引入 K_2O 的原料

- **作用**：网络外体、降低析晶倾向，提高透明度和光泽，降低表面张力（**氧化钠不能**），**双碱效应**
- **原料**：碳酸钾，硝酸钾

碳酸钾

白色结晶粉末、极易吸湿潮解

质量要求： $K_2CO_3 > 96\%$ ， $Na_2O < 0.2\%$ ， $KCl + K_2SO_4 < 3.5\%$ ，水不溶物 $< 0.3\%$ ， $H_2O < 3\%$

硝酸钾

透明结晶，易溶，**不会吸湿潮解**；可充当**澄清剂、氧化剂、脱色剂**；

质量要求： $KNO_3 > 98\%$ 、 $KCl < 1\%$ 、 $Fe_2O_3 < 0.01\%$



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

8. 引入MgO的原料

作用：网络外体，部分取代CaO时，料性加长、密度降低、硬度减小（形成 $[MgO_4]$ 进入网络）、易脱片，降低析晶倾向

原料：白云石、菱镁矿等

白云石

蓝白色或淡灰色，伴生矿有石英、方解石、黄铁矿等，**能吸水**；同时引入CaO和MgO。

质量要求： $MgO > 20\%$ ， $CaO < 32\%$ ， $Fe_2O_3 < 0.15\%$

菱镁矿

灰白色、淡红色或肉红色。当白云石引入MgO量不足时，才使用菱镁矿。



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.2 主要原料

9. 引入BaO的原料

作用：网络外体，增加折射率、密度、化稳性，吸收辐射能力强

原料：硫酸钡和碳酸钡等，可做澄清剂

10. 引入ZnO的原料

作用：网络中间体，适当引入降低膨胀系数、提高化稳性和热稳性，提高玻璃表面光滑度；**最大特点是**提高玻璃的折射率、防止硒挥发

原料：氧化锌（锌白）和菱锌矿

11. 引入PbO的原料

作用：**高色散、高折射、高电阻、高比重**，吸收X-射线，有助熔作用，侵蚀性强

原料：铅丹（ Pb_3O_4 ），黄丹（ PbO ），硅酸铅（ $PbO \cdot SiO_2$ ）



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.3 辅助原料

辅助原料：使玻璃获得某些必要的性质和加速玻璃熔制过程的原料。

1. 澄清剂
2. 助熔剂
3. 碎玻璃
4. 乳浊剂
5. 氧化剂
6. 着色剂



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.3 辅助原料

■ 澄清剂

概念

往玻璃配合料或熔体中加入高温时本身能气化或分解放出气体，以促进玻璃中气泡排除的物质。

常用的澄清剂

白砷（ As_2O_3 ）：用量为配合料的0.2—0.6%

三氧化锑（ Sb_2O_3 ）：与白砷混合使用效果好

硫酸盐（ Na_2SO_4 ）：为配合料的1—1.5%

氟化物、食盐、二氧化铈、铵盐等



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.3 辅助原料

■ 助熔剂

概念：

能促使玻璃熔制过程加速的原料。

常用的助熔剂：

氟化合物、硼化合物、钡化合物和硝酸盐

■ 乳浊剂

概念：

使玻璃产生不透明的乳白色的物质。

常用的乳浊剂：

氟化合物、磷酸盐、锡化合物、氧化砷和氧化铈等。



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.3 辅助原料

■ 碎玻璃

目的

节约原料、降低成本和能耗，加速玻璃熔制过程，提高产质量。

用量

一般钠钙硅玻璃中，为配合料的25~30%

碎玻璃粒度：粒径在2~20mm的熔制较快，考虑到片状和块状，通常加工到20~40mm

加料方式

- 可与配合料共同混合加入熔窑中
- 可以和配合料分别加入窑内。在分别加料时，可将碎玻璃垫在配合料下面，一起送入窑中



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.3 辅助原料

■ 着色剂

概念：

玻璃着色的物质。

常用的着色剂：

离子着色剂：锰、钴、镍、铜、铬等化合物

胶体着色剂：金、银、铜化合物

硫硒化物着色剂



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.3 辅助原料

■ 脱色剂

概念：

脱去玻璃原料中由于含有铁、铬、钛、钒等化合物和有机的有害杂质使玻璃带上的颜色

常用的脱色剂：

化学脱色剂：

常用的有：硝酸盐、白砒、三氧化二锑、氧化铈等

物理脱色剂：

常用的有：二氧化锰、硒、氧化钴、氧化钕、氧化镍等。



2.3 玻璃的原料和配料

2.3.3 辅助原料

■ 氧化剂与还原剂

概念：

在玻璃熔制时能分解放出氧的原料，称为氧化剂，反之，能夺取氧的原料称为还原剂。它们能给出氧化性或还原性的熔制条件。

常用的氧化剂：

硝酸盐、三氧化二砷、氧化铈等

常用的还原剂：

碳(煤粉、焦炭粉、木炭、木屑、酒石酸钾、锡粉及化合物(氧化亚锡、二氧化锡)、金属锑粉、金属铝粉等。



配合料计算

基础数据： 玻璃的重量百分比组成

原料的干湿基化学成分（重量百分含量）

如果玻璃是以摩尔百分组成来表示的，则应将摩尔百分组成换算成质量百分组成，然后进行质量配料计算

配合料计算

计算程序相关

先以100公斤玻璃为计算基准，求出各原料的用量

——每副玻璃配合料中各原料的用量

对含两种以上主要成分的原料，列出多元联立方程式，求解各原料的需要量；

计算辅助原料的需要量，若同时引入了主要成分，则须减去引入此成分的主要原料相应的用量；

对挥发性成分，补加所挥发的量；



配合料计算

计算配料的气体率和产率：

$$\text{气体率} = \frac{100\text{Kg玻璃原料总重} - \text{生成玻璃重}}{100\text{Kg玻璃的原料总重}} \times 100\%$$

$$\text{产率} = 1 - \text{气体率} = \frac{\text{玻璃生成重量}(100\text{Kg})}{\text{配合料重量}} \times 100\%$$

换算成一付配合料的原料用量并计算碎玻璃用量：

一付配合料（包括碎玻璃在内）的总重量由所选的混料机加工能力决定，如500公斤。

一付配合料中各原料用量=100Kg玻璃各原料用量×增大系数

增大系数=一付配合料中生料总重÷100Kg玻璃所需原料总重



配合料计算

计算每付配合料原料湿基用量：

$$\text{湿基用量} = \frac{\text{每付配合料各原料干基用量}}{1 - \text{水分}\%}$$

计算配合料中生料加水量：

$$\begin{aligned} & \text{加水量} \\ &= \text{每付配合料中生料含制定水分时总重} - \text{生料湿基总重} \\ &= \frac{\text{每付配合料中粉料干基总重}}{1 - \text{生料指定含水率}} - \text{生料湿基总重} \end{aligned}$$



配合料计算

经过计算，应得出下列结果：

- ①熔制100公斤玻璃液时所需的各种原料用量；
- ②配合料气体率；
- ③各挥发性原料补入量；
- ④校正后配合料的料方；
- ⑤按每付配料量（除去碎玻璃）求出增大系数，计算出每付配合料的干基料方；
- ⑥湿基原料的用量；
- ⑦配合料的加水量；
- ⑧每付配合料中碎玻璃用量。



■ 计算举例1

某厂生产安瓿玻璃，根据其物理化学性能要求和本厂的熔制条件，确定玻璃组成为： SiO_2 70.5%， Al_2O_3 5.0%， B_2O_3 6.2%， CaO 3.8%， ZnO 2.0%， Na_2O 12.5%。计算其配合料的配方。

选用石英砂引入 SiO_2 ，长石引入 Al_2O_3 ，硼砂引入 B_2O_3 ，方解石引入 CaO ，氧化锌引入 ZnO ，纯碱引入 Na_2O ，采用白砷与硝酸钠为澄清剂，萤石为助熔剂。



(1) 计算石英和长石的用量

设石英的用量为 x ，长石的用量为 y

$$\text{SiO}_2 \quad 0.9989x + 0.6609y = 70.5$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \quad 0.0018x + 0.1804y = 5$$

$$x = 52.6 \quad y = 27.2$$

计算由长石同时引入的

$$\text{R}_2\text{O} \quad 27.2 \times 0.1480 = 4.03$$

$$\text{CaO} \quad 27.2 \times 0.0083 = 0.226$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad 27.2 \times 0.0020 = 0.054$$

(2) 计算硼砂量

$$6.2 \div 0.3621 = 17.1$$

同时引入 R_2O

$$17.1 \times 0.1645 = 2.82$$

(3) 计算纯碱用量

玻璃组成中 R_2O 为12.5

由长石引入 R_2O 为4.03

由硼砂引入 R_2O 为2.82

尚需引入 R_2O 为： $12.5 - 4.03 - 2.82 = 5.65$

纯碱用量： $5.65 \div 0.578 = 9.78$

(4) 计算方解石的用量

玻璃组成中 CaO 为3.8

由长石引入 CaO 为0.226

尚需引入 CaO 为： $3.8 - 0.226 = 3.574$

方解石用量为： $3.574 \div 0.5578 = 6.41$

(5) 计算氧化锌用量

玻璃组成中 ZnO 为2.0

氧化锌用量为 $2.0 \div 0.998 = 2.01$



根据上述计算，熔制100千克玻璃各**主要原料用量**为：

石英粉	52.6
长石粉	27.2
硼砂	17.1
纯碱	9.78
方解石	6.41
氧化锌	2.01
总计	115.10



(6) 计算辅助原料

①白砒与硝酸钠共用作澄清剂，白砒用量为配合料的0.2%，即：

$$115.10 \times 0.002 = 0.23$$

②硝酸钠用量为白砒的6倍，为

$$0.23 \times 6 = 1.38$$

由硝酸钠引入 R_2O 为 $1.38 \times 0.3653 = 0.502$

相应的减去纯碱用量为 $0.502 \div 0.578 = 0.87$

纯碱用量为 $9.78 - 0.87 = 8.91$

③萤石作为助熔剂，用量为配合料的1.03%

为： $115.10 \times 0.0103 = 1.18$

萤石引入CaO为 $1.18 \times 0.684 = 0.8$

相应减去方解石的用量为 $0.8 \div 0.5578 = 1.45$

方解石实际用量为： $6.41 - 1.45 = 4.96$



(7)考虑 R_2O 和 B_2O_3 的挥发损失

① 一般情况 B_2O_3 的挥发损失为本身重量的12%，则应补足 B_2O_3 为：

$$6.2 \times 0.12 = 0.74$$

补硼砂为：

$$0.74 \div 0.3621 = 2.04$$

同时引入 R_2O 量为： $2.04 \times 0.1645 = 0.34$

硼砂实际用量为： $17.1 + 2.04 = 19.14$

② R_2O 的挥发损失为本身重量的3.2%，则应补足

R_2O 为 $12.5 \times 0.032 = 0.40$

硼砂引入 R_2O 为0.34

补纯碱为 $(0.4 - 0.34) \div 0.578 = 0.1$

纯碱实际用量为： $8.91 + 0.1 = 9.01$



(7)考虑 R_2O 和 B_2O_3 的挥发损失

① 一般情况 B_2O_3 的挥发损失为本身重量的12%，则应补足 B_2O_3 为：

$$6.2 \times 0.12 = 0.74$$

补硼砂为：

$$0.74 \div 0.3621 = 2.04$$

同时引入 R_2O 量为： $2.04 \times 0.1645 = 0.34$

硼砂实际用量为： $17.1 + 2.04 = 19.14$

② R_2O 的挥发损失为本身重量的3.2%，则应补足

R_2O 为 $12.5 \times 0.032 = 0.40$

硼砂引入 R_2O 为0.34

补纯碱为 $(0.4 - 0.34) \div 0.578 = 0.1$

纯碱实际用量为： $8.91 + 0.1 = 9.01$



熔制100千克玻璃实际原料用量为：

石英粉	52.6
长石粉	27.2
硼砂	19.14
纯碱	9.01
方解石	4.96
氧化锌	2.01
萤石	1.18
硝酸钠	1.38
白砒	0.23
总计	117.71



(8)计算配合料气体率，配合料的气体率为：
$$\frac{117.71-100}{117.71} \times 100 = 15.05\%$$

玻璃的产率为：
$$\frac{100-15.05}{100} \times 100 = 84.95\%$$

(9)如每次配合料量为500kg，碎玻璃用量为30% 碎玻璃中 B_2O_3 和 Na_2O 的挥发损失略去不计，则：碎玻璃用量 $500 \times 30\% = 150$ kg，粉料用量为 $500 - 150 = 350$ kg，放大倍数 = $\frac{350}{117.71} = 2.973$

500kg配合料中各原料的粉料用量 = 熔制100kg玻璃中各原料用量 × 放大系数。

每付配合料中：

石英粉的用量为 $51.4 \times 2.973 = 156.38$ kg

长石粉的用量为 $27.1 \times 2.973 = 80.87$ kg

硼砂的用量为 $19.14 \times 2.973 = 56.90$ kg

纯碱的用量为 $9.02 \times 2.973 = 26.79$ kg

方解石的用量为 $3.63 \times 2.973 = 14.75$ kg

氧化锌的用量为 $2.00 \times 2.973 = 5.98$ kg

萤石的用量为 $11.7 \times 2.973 = 3.51$ kg

硝酸钠的用量为 $1.38 \times 2.973 = 4.1$ kg

白砒的用量为 $0.03 \times 2.973 = 0.08$ kg

总计 $= 349.96$ kg



原料中如含水份，湿基用量计算如下

原料	熔化100kg玻璃 各原料需干基用 量(kg)	原料含水率(%)	每次制备500kg配合料减去碎 玻璃后，各种原料用量(kg)	
			干基	湿基
石英粉	52.60	1.0	156.38	157.95
长石粉	27.20	1.0	80.87	81.62
硼砂	19.14	2.0	56.90	58.06
纯碱	9.01	0.5	26.79	26.92
方解石	4.96	0.8	14.75	14.86
氧化锌	2.01	0.5	5.98	6.01
硝酸钠	1.38	1.0	4.10	4.14
萤石	1.18	1.0	3.51	3.54
白砒	0.23	1.0	0.68	0.68
合计			349.96	353.70

拟定配合料粉料中含水量为5%计算加水量：

$$\frac{349.96}{1 - 0.05} - 353.70 = 14.68\text{kg}$$

即在制备配合料时，需要加湿润水的水量为14.68 kg。



■ 计算举例2——平板玻璃

玻璃的设计成分

单位：%（质量分数）

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	总计
72.0	1.0	<0.1	8.5	4.2	14.0	0.20	100

配料计算步骤如下。

第1步先进行粗算。即假定玻璃中全部 SiO₂ 和 Al₂O₃ 均由砂岩和长石引入；CaO 和 MgO 均由白云石和石灰石引入；Na₂O 由纯碱和芒硝引入。在进行粗算时，可选择含氧化物种类最少或用量最多的原料开始计算。

第2步进行校正。例如，在进行粗算时，在砂岩和长石用量中没有考虑其他原料所引入的 SiO₂ 和 Al₂O₃，所以应进行校正。

第3步把计算结果换算成实际配料单。



② 各种原料的化学成分

各种原料的化学成分

单位:% (质量分数)

原 料	含水率	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ SO ₄	C
砂 岩	1.0	98.76	0.56	0.08	0.14	0.02	0.19			
白云石	0.3	0.69	0.15	0.13	31.57	20.47				
石灰石	2.0	0.3		0.07	55.4	0.2				
长 石		66.0	19.5	0.4			8.5	5.5		
纯 碱	1.8						57.94			
芒 硝	4.2	1.10	0.29	0.05	0.50	0.37	41.47		95.03	
煤 粉										84.11

③ 配料的工艺参数与所设数据

纯碱挥散率	1.6%	玻璃获得率	82.5%
碎玻璃掺入率	20%	芒硝含率	3%
碳粉含率	4.7%	计算基础	100kg 玻璃液
计算精度	0.01		



相关参数

(1) 纯碱飞散率

纯碱飞散率是指纯碱在称量之后的混合输送、熔化过程中的飞散量占纯碱总用量的百分比，可表示为

$$\text{纯碱飞散率} = \frac{\text{飞散量}}{\text{纯碱总用量}} \times 100\%$$

(2) 芒硝含率

芒硝含率是指由芒硝引入玻璃中的氧化钠与芒硝和纯碱向玻璃中引入的氧化钠总量的百分比。可表示为

$$\text{芒硝含率} = \frac{\text{芒硝中的 Na}_2\text{O}}{\text{纯碱引入的 Na}_2\text{O} + \text{芒硝引入的 Na}_2\text{O}} \times 100\%$$

(3) 硫酸盐比率

硫酸盐比率是指配合料中每 1000kg 砂子含 SO_3 量 (kg)，直接描述为

$$\text{配合料 SO}_3 \text{ 含量} = \frac{\text{芒硝加入量 (kg)} \times 80 \times \text{芒硝含量 \%}}{142 \times \text{配合料 (t)} \times \text{玻璃获得率 \%}}$$



相关参数

(4) 碳粉含率

碳粉含率是指由炭粉引入到配合料中的固定碳与由芒硝引入的 Na_2SO_4 的比值，可表示为

$$\text{碳粉含率} = \frac{\text{炭粉用量} \times \text{碳含量}(\%)}{\text{芒硝用量} \times \text{芒硝含量}(\%)} \times 100\%$$

(5) 玻璃获得率

玻璃获得率又称熔成率，是指 100kg 配合料经高温熔化反应生成的玻璃量。配合料中所含的气体一般在 18% 左右，不同性质配合料气体含量不同，熔成率也不相同。

玻璃获得率不是配合料计算必需的参数，它是在配料表基本完成后计算得出的数值。

玻璃获得率计算公式

$$\text{玻璃获得率} = \frac{100\text{kg 玻璃液}}{\text{制备 100kg 玻璃所需配合料的量}} \times 100\%$$



计算过程

① 纯碱和芒硝用量的计算 设芒硝引入量为 $x\text{kg}$ ，根据芒硝含率得下式

$$\frac{x \times 0.4147}{14.0} = 3\% \quad x = 1.01(\text{kg})$$

则由芒硝引入的各氧化物量见表 2-8。

表 2-8 芒硝引入的各氧化物的量

质量份

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O
0.01	0.003	0.001	0.005	0.004	0.42

$$\text{纯碱用量} = \frac{14.0 - 0.42}{0.5794} = 23.44(\text{kg})$$

② 煤粉用量 设煤粉用量为 $x\text{kg}$ ，根据煤粉含率得

$$\frac{x \times 0.8411}{1.01 \times 0.9503} = 4.7\% \quad x = 0.05(\text{kg})$$

③ 砂岩与长石用量的计算 设砂岩用量为 $x\text{kg}$ ，长石用量为 $y\text{kg}$ ，则

$$0.9876x + 0.66y = 72.0 - 0.01 = 72.89$$

$$0.0056x + 0.195y = 1.0 - 0.003 = 0.997$$

解得

$$x = 75.67(\text{kg}) \quad y = 2.94(\text{kg})$$

由砂岩和长石引入的各氧化物的量见表 2-9。



计算过程

表 2-9 由砂岩和长石引入的各氧化物的量

单位: kg

原 料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
砂 岩	74.73	0.42	0.06	0.11	0.02	0.14	
长 石	1.94	0.57	0.01			0.25	0.16

④ 白云石和石灰石用量的计算 设白云石用量为 x kg, 石灰石用量为 y kg, 则

$$0.3157x + 0.554y = 8.5 - 0.005 - 0.11 = 8.385$$

$$0.2047x + 0.002y = 4.2 - 0.004 - 0.02 = 4.176$$

解得

$$x = 20.37(\text{kg}) \quad y = 3.56(\text{kg})$$

由白云石和石灰石引入的各氧化物的量见表 2-10。

⑤ 校正纯碱用量和挥散量 设纯碱用量为 x kg, 挥散量为 y kg, 长石引入的 K₂O 也归入纯碱, 则

$$x \times 0.5794 = 14.0 - 0.42 - 0.14 - 0.25 - 0.16$$

得

$$x = 22.49(\text{kg})$$

$$\frac{y}{22.49 + y} = 0.016$$

得

$$y = 0.37(\text{kg})$$



⑥ 校正砂岩和长石用量 设砂岩用量为 x kg, 长石用量为 y kg, 则

$$0.9876x + 0.66y = 72.0 - 0.001 - 0.14 - 0.01 = 71.849$$

$$0.0056x + 0.195y = 1.0 - 0.003 - 0.03 = 0.967$$

解得

$$x = 70.66(\text{kg}) \quad y = 2.93(\text{kg})$$

⑦ 把上述计算结果汇总成原料用量表 见表 2-11。

⑧ 玻璃获得率

$$\text{玻璃获得率} = \frac{100}{121.44} = 82.35\%$$

⑨ 换料单计算

已知条件 碎玻璃掺入率为 20%；各种原料含水率见表 2-11；

配合料的含水量为 4%；混合机容量为 2000kg 干基。



表 2-11 原料用量表

质量份

原料	用量	占混合料 质量分数 / %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	含水量	干基	湿基
砂岩	70.66	58.19	69.78	0.40	0.62	0.10	0.01	0.13		1.0	931.0	940.4
白云石	20.37	16.77	0.14	0.03	0.03	6.43	4.17			0.3	268.3	276.6
石灰石	3.56	2.93	0.01		0.002	1.97	0.01			2.0	46.9	47.9
长石	2.93	2.41	1.93	0.57	0.01			0.41		2.0	38.6	39.4
纯碱	22.49	18.82								1.8	301.1	306.6
挥发率	0.37							13.25				
芒硝	1.01	0.83	0.01	0.003	0.001	0.005	0.004	0.42		4.2	13.3	13.9
煤粉	0.05	0.04								2.1	0.64	0.65
合计	121.44	100									1599.84	1625.45
碎玻璃												400
总计												2025.45

计算如下

2000kg 中砂岩的干基用量为

$$[2000 - (2000 \times 20\%)] \times 58.19\% = 931.0\text{kg}$$

$$\text{硅砂的湿基用量} = \frac{931}{1 - 1.0\%} = 940.4\text{kg}$$

根据要求配合料的水分为 4%，所以

$$\frac{2000 - 400}{1 - 4\%} = 1666.67\text{kg}$$

$$1666.67 - 1625.45 = 41.22\text{kg}$$

所以混合时必须另外加水 41.22kg。



2.4 玻璃配合料制备

1. 配合料的质量要求
2. 原料的运输和贮存
3. 原料的加工处理
4. 配合料的称量
5. 配合料的混合
6. 配合料的输送与贮存



玻璃配合料制备

配合料质量要求

- (1) 必须具有正确性和稳定性——玻璃成分的正确和稳定
- (2) 具有一定的水份：用水润湿配合料，加水量 随颗粒不同而不同。越细加水量越多。纯碱配合料加水量3—5%，芒硝配合料加水量5—7%。

水温 $> 35^{\circ}\text{C}$, 否则, Na_2CO_3 将转化为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 使配合料产生胶结作用。

注意

有一定的水分——润湿原料的颗粒表面，增加原料颗粒之间的黏附力，有利于防止分层，提高混合均匀度；可以溶解部分助熔剂原料(如纯碱等)，有助于加速熔化



玻璃配合料制备

配合料质量要求

(3) **要有一定的颗粒组成**：可减少配合料的分层 和提高混合质量。

纯碱的颗粒度应比石英大 一个筛号。

有一定的颗粒级配

——配合料的均匀度、玻璃熔化速度、玻璃液的均匀度

同一原料有适宜的颗粒度；各种原料之间有一定粒度比 ——提高混合均匀度和防止配合料在运输过程中的分层。 控制过细原料的比例



(4) 具有一定的气体率: 易于澄清和均化。一般钠钙硅玻璃的气体率为16—20%。

$$\text{气体率} = \frac{\text{逸出气体量}}{\text{配合料}} \times 100\%$$

具有一定的气孔率 配合料加热后逸出的气体量与配合料质量之比称为气孔率。配合料中必须含有能受热分解并放出气体的原料，逸出一定量的气体能对配合料和玻璃熔体产生搅拌作用，有利于玻璃液的澄清和均化。气孔率过高，会造成玻璃起泡



(5) 必须混合均匀：配合料混合不均匀，会使玻璃产生结石、条纹、气泡等缺陷，易熔物较多的还会侵蚀耐火材料。

均匀性好 配合料是否混合均匀，将影响玻璃制品的产量和质量。如果混合不均匀，则在石英砂等较难熔物较多之处，熔化困难，甚至会残留未熔化的石英颗粒，破坏了玻璃的均匀性，使玻璃中产生结石、条纹、气泡等缺陷。

一般玻璃制品对配合料均匀度要求

水不溶物：允许误差小于 $\pm 0.1\%$

酸不溶物：允许误差小于 $\pm 0.1\%$

含碱量：允许误差小于 $\pm 0.6\%$

水分：允许误差小于 $\pm 0.6\%$



玻璃配合料制备

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

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。

(1) 工艺流程

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



原料的加工处理

(2) 原料的干燥

目的：为了便于过筛、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。

(3) 原料的破碎

- 破碎方法选择依据：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。



原料的加工处理

(4) 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

(5) 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。

(6) 粉状原料的输送与料仓分层

- 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

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。

适用于排仓

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。

适用于排仓和塔仓

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

(2) 混合设备

重力式（鼓形混合机、滚筒式混合机）

强制式（浆叶式、艾立赫式等）

(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。

注意

选择混料机的混料时，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



玻璃配合料制备

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。

单元料：用单轨电葫芦用垂直和水平输 送。小型厂采用。

(4) 配合料贮存

用窑头料仓， <8小时



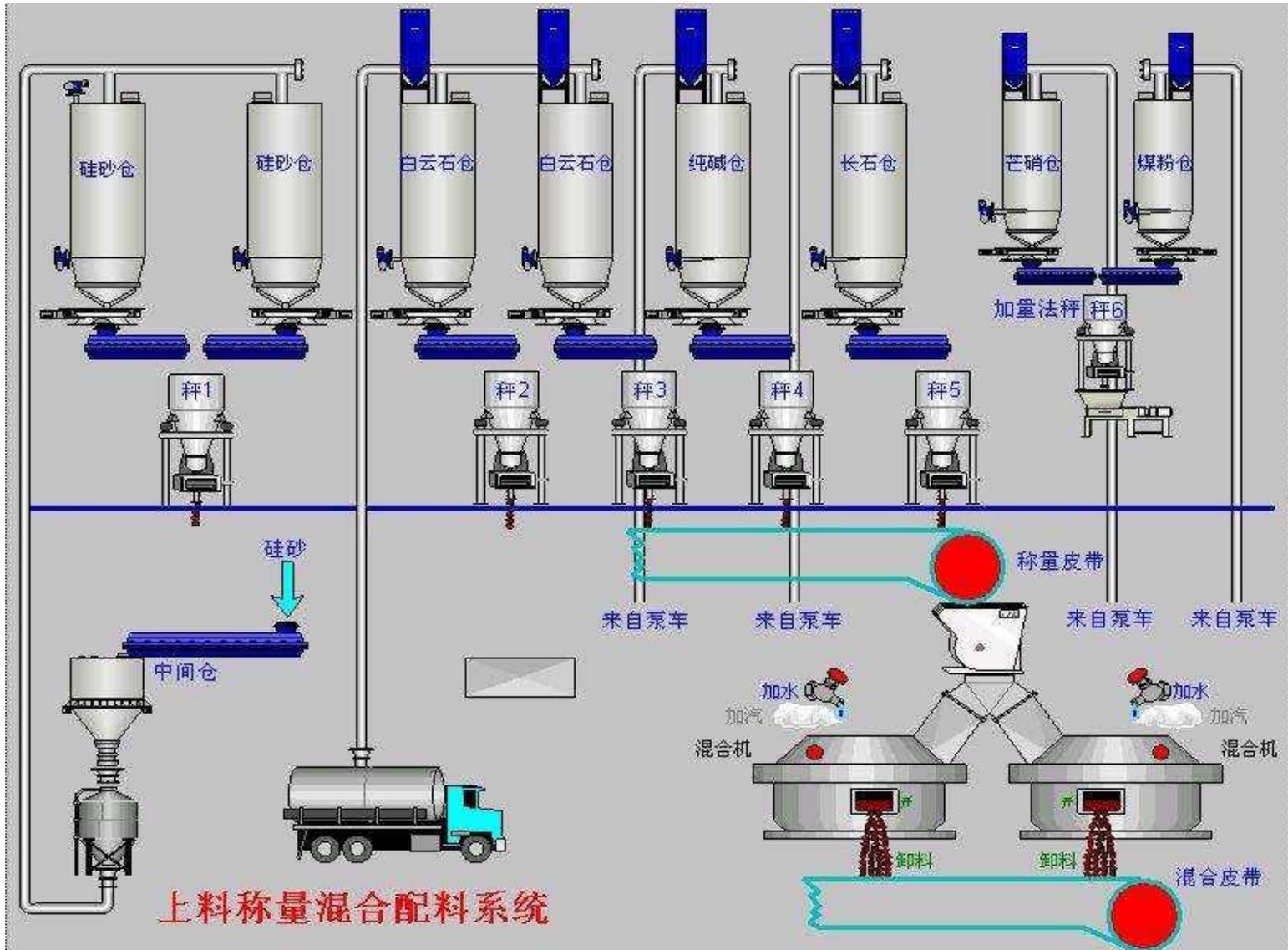
均化库

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



配料控制室



作业：

请从课本后的玻璃成分表中选择一个玻璃组分，并选择原料进行配合料设计