
景德镇陶瓷学院科技艺术学院

本科生毕业论文（设计）

利用有硼玻璃纤维废丝制备泡沫玻璃的研究

The preparation of foam glass with boron glass fiber waste using research

学 号：	201030451308
姓 名：	刘 炜
专业班级：	无机非金属材料工程 专业（3）班
指导老师：	谢志翔
完成日期：	2014-5-21

工程系

摘 要

本文研究了玻璃纤维泡沫玻璃的制备过程中，发泡剂含量，不同稳泡剂及其含量，助溶剂含量以及烧成温度对泡沫玻璃性能的影响，对泡沫玻璃的表观密度，吸水率，抗压强度和抗折强度进行了测试。

根据谢老师的指导我们采用碳化硅为发泡剂作为泡沫玻璃的泡沫剂，发泡效果较好。以碳化硅为发泡剂的实验探究可知，随着发泡剂含量的增大泡沫玻璃孔径也相应增大，发泡剂含量在 3% 时能使表观密度达到最低值 0.213g/cm^3 。

通过反复的实验研究表明，泡沫玻璃添加剂中稳泡剂采用 C 和 Na_2SO_4 ，且二者的含量均为 1% 时，才能制备性能较好的制品。使泡沫玻璃性能达到最佳。

实验研究证明烧成温度对泡沫玻璃的性能影响也较大。在一定温度范围内随着烧成温度的升高泡沫玻璃气孔结构相应增大，最佳烧成温度为 1030°C 。

另本实验采用的助溶剂为 Sb_2O_3 ，探讨加入 Na_2SiF_6 与 Ca_2CO_3 时观察其烧成效果，结果发现其二者含量在 1% 时比较理想。

关键词：玻璃纤维 泡沫玻璃 添加剂 含量 表观密度 烧成制度

Abstract

This paper studies the glass fiber in the process of the preparation of foam glass, foaming agent content, different soaking agent and its content, content of cosolvent and the influence of sintering temperature on the properties of foam glass, apparent density of foam glass, water absorption, compressive strength and flexural strength were tested.

According to the guidance of teacher Xie we use silicon carbide as foaming agent as foaming agent of foam glass, foaming effect is better. Silicon carbide as foaming agent experiments to explore the unknown, with the increase of content of foaming agent foam glass aperture also increases accordingly, foaming agent content in 3% can make apparent density reached the lowest 0.213 g/cm^3 .

Through repeated experiments show that stable bubbles in the foam glass additive agent using C and Na_2SO_4 , and the content of the two factors are all 1%, better products to the preparation of performance. The foam glass optimal performance.

Experimental study that the sintering temperature on the properties of foam glass is bigger also. In a certain temperature range with the increase of sintering temperature foam glass porosity structure increases accordingly, best sintering temperature is 1030°C .

Another this experiment adopts the cosolvent is Sb_2O_3 , discussed joining Ca_2CO_3 Na_2SiF_6 and observe its firing effect, the results showed that the content of both ideal at 1%.

Keywords: glass fiber foam glass additives grain size apparent density
firing

目 录

摘 要	i
Abstract.....	ii
1 前言.....	1
2 文献综述.....	2
2.1 泡沫玻璃的定义、性质及用途.....	2
2.2 泡沫玻璃按气泡的分类.....	2
2.3 泡沫玻璃的国内外发展历史及研究现状.....	2
2.4 泡沫玻璃的发展趋势.....	3
2.5 泡沫玻璃的制备方法.....	3
2.5.1 粉末烧结法.....	3
2.5.2 压制法.....	3
2.6 泡沫玻璃的发泡机理.....	3
2.6.1 泡沫玻璃的发泡原理.....	3
2.7 粘度及表面张力的影响.....	3
2.7.1 粘度的影响.....	4
2.7.2 表面张力的影响.....	4
2.8 泡沫玻璃的烧成制度.....	5
2.9 发泡剂的选择.....	6
2.9.1 碳化硅.....	6
2.10 添加剂的选择.....	6
2.10.1 助熔剂.....	6
2.10.2 促进剂.....	7
2.10.3 稳泡剂.....	7
2.10.4 脱模剂.....	7
2.11 本实验所研究的玻璃纤维泡沫玻璃.....	7
3 实验内容与研究方法.....	9
3.1 试验内容.....	9
3.1.1 基础原料.....	9
3.1.1 辅助原料.....	9
3.1.2 实验设备.....	9
3.1.3 试验过程.....	10
3.2 研究方法.....	10
3.2.1 表观密度.....	10
3.2.2 吸水率.....	10

3.2.3 抗折强度.....	10
3.2.4 抗压强度.....	11
4 实验结果与讨论.....	12
4.1 发泡剂碳化硅含量对泡沫玻璃性能的影响.....	12
4.2 添加剂对泡沫玻璃性能的影响.....	15
4.2.1 稳泡剂硫酸钠与碳酸钠对泡沫玻璃性能的影响.....	15
4.2.2 稳泡剂碳与磷酸钠对泡沫玻璃性能的影响.....	18
4.2.3 稳泡剂硫酸钠的含量对泡沫玻璃的性能的影响.....	20
4.2.4 稳泡剂碳的含量对泡沫玻璃的性能的影响.....	23
4.3 温度制度对泡沫玻璃性能的影响.....	26
4.4 添加剂氟硅酸钠与碳酸钙的配比对泡沫玻璃性能的影响.....	29
5 结论.....	33
6 经济分析.....	34
6.1 单位样品的原材料成本核算.....	34
6.2 耗能成本.....	34
6.3 水耗成本及设备折旧费用.....	34
6.4 税收与利润.....	34
7 致谢.....	35
8 参考文献.....	36

1 前言

随着现代社会的进步、科技的发展，人们对于材料的性能要求越来越高，对能源的消耗以及环境的保护也显得愈加重要。

我国墙体的主要材料依旧是秦砖汉瓦，但其以粘土作为原料，环保性能差，不符合可持续发展的国策。应市场的要求，利用废玻璃，粉煤灰为原料的泡沫玻璃早已问世。并在研究与生产上取得了成功和应用。

正是由于泡沫玻璃的耐高温、隔热性能好、密度小、吸声性能好等等优势，我国泡沫玻璃将取代玻璃纤维保暖管和聚氨酯泡沫硬质塑料，成为主要的保温材料，将会在建筑、交通、绿化等方面得到广泛的应用。届时，随着我国基础设施建设的加大，到 2020 年我国对泡沫玻璃的需求量将达到 66.8 亿 m^3 ，市场容量将达到 60 亿元，平均年增长率在 35% 以上。泡沫玻璃国际市场很好，许多国家已进入产品的成长期和成熟期，我们可以利用生产泡沫玻璃的低成本、高品质等优势，积极开拓海外市场。同时我们要加快泡沫玻璃产品标准化生产以及一体化施工，实现设计标准化、构件定型化、制造工厂化、施工装配化和产品系列化。

本文利用有硼废玻璃纤维为原料通过添加助溶剂、稳泡剂、发泡剂制作的泡沫玻璃，该玻璃具有低的密度和高的抗折强度，降低了能源消耗并且将废玻璃纤维变废为宝，响应国家的“节能减排”的号召；并且具有组成无铅化的优点，减少对环境和人体造成的伤害。

2 文献综述

2.1 泡沫玻璃的定义、性质及用途

泡沫玻璃又称多孔玻璃，内部充满无数开口或闭口的气孔，气孔面积占总体积80%以上。其主要是以废平板玻璃和瓶罐玻璃作为原料，加入适当的发泡剂、促进剂、稳泡剂、改性剂等添加剂并粉碎混匀，放在特定的模具中经预热、熔融、发泡、冷却、退火而制成的一种无机非金属特种玻璃材料。

泡沫玻璃是目前市场上最佳的绝热、隔音、防潮、防火的轻质高强建筑和装饰材料。由于其无毒、无放射性、不燃烧、不易风化、使用温度范围宽、吸水率低、不受虫害、易于加工切割、施工极其方便等优点，已广泛应用于化工、石化、轻工、冷藏、暖气输送、建筑环保等领域。

2.2 泡沫玻璃按气泡的分类

按孔型结构可分为：开孔型和闭孔型泡沫玻璃。开孔泡沫玻璃所有的孔洞相通，因此叫开孔泡沫玻璃。主要的特点是降低噪音、轻质、机械强度高、加工方便、不然、不易老化无异味，实用于电厂的机房、隧道、电影院、候车室、高速铁路等等。

闭孔泡沫玻璃采用石英砂矿粉或碎玻璃粉经烧制发泡生成的容重轻、独立闭孔的发泡体。主要的特点是容重轻、导热系数低、不透湿、不吸水、不霉变、不燃烧、机械强度高、加工方便，还具有较高的化学稳定性、热稳定性和节能环保性为一身的无须更换的永久性产品，实用于电厂的烟囱脱硫改造、化工、管道、建筑屋的外墙保温、防火隔离带等等。本文所研究的为闭孔泡沫玻璃。

2.3 泡沫玻璃的国内外发展历史及研究现状

20 世纪三十年代，法国 Saint-Gobain 公司率先研发出以碳酸钙为发泡剂的泡沫玻璃，并与 1935 年首个申请专利。随后美国、德国、前苏联、日本等国也先后投入生产。

当前，国际上最大的泡沫玻璃生产厂商是美国的康宁和日本的纺绩两家公司，它们的年产量均有 $50 \times 10000 \text{m}^3$ 左右。按退火工艺可分为：“一步法”和“二步法”泡沫玻璃，一步法是一次发泡后得到的泡沫微晶玻璃，二步法是将已经制得的泡沫玻璃再次送入退火炉中晶化。现国际普遍采用“二步法”生产泡沫玻璃，其特点是泡沫玻璃在发泡窑中进行发泡，随后进行脱膜，然后进行退火、切割而成。中国的泡沫玻璃研究始于 20 世纪 50 年代，由于缺乏专业的指导和规划，加之我们的专业比较落后，生产规模比较小，70 年代才开始正式研发泡沫玻璃制品，先后在上海、杭州、广西、嘉兴、宜兴、湖北潜江、浙江淳安、南宁等省市兴建了多个泡沫玻璃生产厂。经过几十年的发展，我国目前产品的质量可以和国外同行业产品相媲美，一部分产品已向国外出口。我国许多科研院所都开展过泡沫玻璃的研究工作。中国科学院上海硅酸盐研究所硅藻土为硅质原料，研制出硅藻土微孔泡沫玻璃；浙江

绍兴粮机厂玻璃分厂以金云母碎料和碎玻璃为原料，生产出金云母泡沫玻璃砖为主要原料（占 70%），研制了粉煤灰泡沫玻璃；长春市建筑设计研究院利用废玻璃、珍珠岩尾矿和浮石为主要原料，生产建筑用泡沫玻璃保温砖；北京工业大学研究了泡沫玻璃生产过程中的关键工艺与质量控制、泡沫玻璃所采用玻璃体系与发泡剂的匹配关系、泡沫玻璃模具设计、高性能泡沫玻璃的研究等；1013 年，中国鹤壁万里建材有限公司年产 6 万立方米泡沫玻璃项目点火。

2.4 泡沫玻璃的发展趋势

由于泡沫玻璃拥有多种功能，绝热保温功能，吸声消音功能，装饰功能，防水防火功能，耐腐蚀功能等，随着节能环保技术的推广和应用，建筑等领域的需求不断增加，生产成本低质量高的泡沫玻璃发展前景将极为广阔。泡沫玻璃墙面砖作为新型节能材料，在现代工业、建筑业将发挥十分重要的作用，国外发达国家已得到广泛的应用，新型泡沫玻璃墙面砖以其高性能、低成本、环保、节能已受到越来越多的关注，必将产生较大的经济效益和社会效益。由于我国泡沫玻璃的生产技术还不够成熟，但其在节能、环保、安全、装饰等方面所起的作用是不容忽视的，高性能的泡沫玻璃成为了亟待研发的重点。

2.5 泡沫玻璃的制备方法

2.5.1 粉末烧结法

粉末烧结法是将主料与发泡剂以及其他辅助外掺剂等一起球磨至一定细度，然后过筛、装模成型、再烧制的方法。

2.5.2 压制法

压制法是将泡沫玻璃配合料研磨成细粉后，加入液体粘结剂、促凝剂，使原料成为介于干粉料和液态料之间的一种可塑性状态。将塑性配合料放入与成品规格要求相一致的模具中，施加一定的压力，使其紧密结合成为一块整体，然后脱模。将压制的坯块进行必要烘烤，排除水分，然后送入加热炉中经加热、发泡、冷却、退火等过程，便得到了一定规格的泡沫玻璃制品。

2.6 泡沫玻璃的发泡机理

发泡剂的发泡原理是由于发泡剂在加热到基础玻璃原料熔融温度时，发泡剂此时能够发生氧化或分解反应，产生大量的气体，而这些气体刚好被已经软化的基础玻璃原料所包裹，随着时间的延长，温度的升高，玻璃相粘度降低，气泡内压力增大，当气体压力大于玻璃表明张力，玻璃壁变薄，气体体积增大，形成具有一定孔径的气泡，经过快速冷却，形成具有稳定多孔结构的泡沫玻璃。

2.7 粘度及表面张力的影响

2.7.1 粘度的影响

粘度的定义：在重力、机械力和热应力等作用下，玻璃液（或玻璃熔体）中的结构单元（离子或离子组团）相互间发生流动。如果这种流动是通过结构单元依次占据结构空位的方式来进行，则称为粘滞流动。当作用力超过“内摩擦”阻力时，就能发生粘滞流动。粘滞流动用粘度来衡量。粘度是指面积为 S 的两平行液层，以一定的速度梯度移动时，需克服的内摩擦阻力 f 。

$$f = \eta S \frac{dv}{ds} \quad (1)$$

式中 η —玻璃粘度， $\text{dPa} \cdot \text{s}$ 。

温度对玻璃粘度的影响：玻璃的粘度和温度有着密切的关系，玻璃的粘度随温度的下降而增大，从液态玻璃到固态玻璃的发生连续转变，粘度是连续变化的，没有突变现象。玻璃粘度与温度的关系属于连续渐变过程，玻璃粘度与温度的关系对泡沫玻璃的制备有着决定性的作用。

化学组成对粘度的影响：玻璃的化学组成对粘度的影响比较繁杂，一般来说，玻璃内的硅铝含量越高，玻璃的粘度越高。玻璃内碱金属氧化物(如 Na_2O 、 K_2O)，能降低玻璃粘度。碱土金属氧化物对粘度的作用比较复杂，对增加粘度的一般顺序为 $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+}$ 。

气泡的上升速度同玻璃粘度的关系，根据斯托克斯公式，气泡的上升速度是

$$\mu = \frac{2r^2 dg}{9\eta} \quad (2)$$

式中： r —气泡半径 m

d —玻璃液密度与气体密度差，一般直接取玻璃液密度 Kg/m^3

g —重力加速度 m/s^2

η —玻璃粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$

μ —气泡上升速度 m/s

由(2)式可知粘度越小，气泡上升速度越慢；粘度越大，气泡上升速度就越快。但是，粘度过大时，气体膨胀阻力增大，这不利于产生大小和分布均匀的气泡。因此，适当的粘度对气泡的稳定很重要。

粘度是玻璃的重要性质之一，对泡沫玻璃也有相当重要的作用。当泡沫玻璃配合料中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 等含量在一定的配比时，恰好可以控制适于发泡剂发泡的粘度，这样，发泡剂将在一定温度下、一定的粘度范围发泡，气泡不断长大到一定程度，通过降温使玻璃液的粘度增大，从而使气孔结构固定下来。

2.7.2 表面张力的影响

表面张力的定义：玻璃表面张力指玻璃与另一相接触的相分界面上（一般指空气），在恒温、恒容下增加一个单位表面时所做的功，单位为 N/m 和 J/m^2 。硅酸盐玻

璃的表面张力为 $(200—380) \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。

温度对表面张力的影响：表面张力随着温度的升高而降低，二者几乎成直线关系，实际上可认为，当温度提高 100°C 时表面张力减少 1%，然而在表面活性组分及一些游离的氧化物存在的情况下，表面张力能随温度升高而稍微增加。

化学组成对表面张力的影响：各种氧化物对玻璃的表面张力有不同的影响，如 Al_2O_3 、 La_2O_3 、 CaO 、 MgO 能提高表面张力。 K_2O 、 PbO 、 B_2O_3 、 Sb_2O_3 等如加入量较大，则能大大降低表面张力。同时， Cr_2O_3 、 V_2O_5 、 MoO_3 、 WO_3 用量不多时也能降低表面张力。组成氧化物对玻璃熔体与空气界面上表面张力的影响可分为三类：第 I 类组成氧化物对表面张力的影响关系，符合加和性法则；第 II 类和第 III 类组成氧化物对熔体的表面张力的关系是组成的复合函数，不符合加和性法则。由于这些组成的吸附作用，表面层的组成与熔体内的组成是不同的：氟化物如 Na_2SiF_6 、 Na_3AlF_6 ，硫酸盐如芒硝，氯化物如 NaCl 等都能显著地降低玻璃的表面张力。

表面张力一定程度上决定了气泡的形成和长大，当发泡剂产生气体的压力和玻璃表面张力达到平衡时，气泡就能稳定。因此适当降低表面张力，会使得气泡容易长大，泡壁变薄，但是表面张力太低，会出现气泡相互结合不断增大，部分较大的气泡会因泡壁太薄而破裂，导致连通孔的出现。因此适当的表面张力对泡沫玻璃的制备起关键作用。

2.8 泡沫玻璃的烧成制度

在泡沫玻璃发泡过程中，将配合料加热到基础玻璃纤维原料软化温度以上时，发泡剂开始产生气体，当气体产生量最大这一过程中时，能刚好被已经软化的基础玻璃纤维原料所包裹，这样气体不会过多地从尚未成玻璃相的固体粉料空隙中逸出去，从而导致气孔量减少，制品容重过大等缺陷。随着温度的升高，发泡时间延长玻璃相黏度降低，气泡内压力增大，当气体压力大于玻璃表面张力，玻璃壁变薄，气体体积增大，形成较大的气泡，在稳泡阶段保温一段时间以利于气泡的稳定生长，发泡充分，再经过快速冷却，形成稳定的多孔玻璃结构。

泡沫玻璃的制备分为四个阶段：预热阶段、发泡阶段、稳定阶段、退火阶段。

(1) 预热阶段：这一阶段，主要是排出配合料间隙中的吸附水、游离水和化学结合水，从玻璃纤维的差热曲线中可以知道此阶段的温度最佳为 530°C ，而且尚未发泡。此阶段内要能保证排除各种水份，由于配合料尚未烧结，成自然堆积状态，因此配合料的导热性能较差，若升温速率过快或保温时间过短，不能完全排除水分。残存的水分带入烧结过程，将被烧结体包裹，在发泡过程中，温度高水蒸气压力急剧增大而形成连通孔。若升温速率过慢或保温时间过长，完全排除水分后导致不必要能源浪费。

(2) 发泡阶段：这一阶段，温度不断升高，发泡剂在未达到发泡温度时就已经开始产生气体了，此过程要求升温速率要快，使气体产生量最大这一过程中时，能

刚好被已经软化的基础玻璃纤维原料所包裹，即要求达到发泡温度的时间要早于气体最大生成量温度的时间。在气体尚未大量形成之前，烧结而成的玻璃体还有较好的导热能力，可以保证坯体受热迅速，从而使发泡均匀，如果升温过程太慢，发泡剂反应产生的气体就会从尚未行成玻璃相的固体粉料的空隙中逸出，导致这样制品的气相就会很少，容重就越大。当达到发泡温度后，需要保温一段时间，让气泡充分长大，但发泡时间不宜过长，否则会让小气泡相互结合形成大气泡，使制品结构不均匀。温度也不能过高，否则会使玻璃相粘度下降较大，不能包裹住气体，气体逸出导致气泡量减少。因此，这一阶段最重要了，要控制三方面的因素，即发泡温度、发泡时间及升温速率。

(3) 稳定阶段：这阶段要求迅速降温，使玻璃液相迅速冷却固化，形成稳定的泡孔结构。

(4) 退火阶段：由于制品在稳定阶段迅速冷却，内部会产生热应力，为了消除应力，增加制品的机械强度，一般冷却到 600°C 时，保温一段时间，消除应力。

2.9 发泡剂的选择

发泡剂一般分为两类，一类是自身放出的气体，一类是与原料发生化学反应放出气体，不论使用哪类发泡剂，其分解温度应在模内物料达到发泡时所需要粘度时的温度范围内，或稍高一些，以满足发泡体表面或内部发泡时的温差。目前常用的发泡剂有：碳、碳化硅、碳酸钙、白云石粉、金云母、二氧化锰、芒硝、水玻璃、碳酸盐类、硅酸盐类、硫酸盐类等。不同的发泡剂要求的发泡温度和发泡时间不同，所制成的泡沫玻璃的孔径和孔壁的薄厚也不同。

2.9.1 碳化硅

发泡原理： $\text{SiC} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{SiO}_2$

本实验采用的碳化硅发泡温度在 1030°C 。

2.10 添加剂的选择

2.10.1 助熔剂

助溶剂的必要性：根据配方的不同，决定是否采用助溶剂。一般来说，如果配合料熔融温度较高或料性较长则可适当加入助溶剂。原始玻璃纤维粉料由于 SiO_2 ， Al_2O_3 的含量较高，这些都是高熔点的物质，使得物料的熔融温度很高。因此为了使物料易于熔融，使得气体在大量产生时，配合料刚好软化成玻璃相包裹住生成的气体，必须加入适量的助溶剂。助溶剂的添加要求是加入助熔，使得配合料软化成玻璃相的温度与发泡剂发泡温度相等。

助溶剂的作用机理：以碱金属盐的作用为例（如 Na_2O 、 K_2O ），玻璃的微观结构是大小不同的硅氧四面体群，群内（间）有较大的孔隙（自由体积），可容纳半

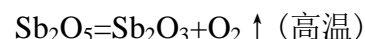
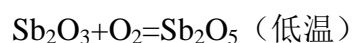
径较小的离子穿插移动。在高温时，自由体积较大，碱金属离子能在孔隙中穿插移动，使得氧离子极化变形，共价键成分增加而减弱硅氧键的作用，降低熔体的粘度，从而使玻璃易于熔融。

助溶剂的种类：一般是碱金属盐、碱土金属盐和 II B 金属盐等，如氟硅酸钠、碳酸钠、硼砂、硫酸钙、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、乙二氨盐、 Sb_2O_3 、 MnO_2 、 As_2O_3 等。

2.10.2 促进剂

促进剂的必要性：加入适量的促进剂能够促进气泡的长大，改善泡沫玻璃的光泽，提高强度等。

促进剂的作用机理：以 Sb_2O_3 为例，在低温时，与氧气反应生成 Sb_2O_5 ，到高温时，再发生分解释放出氧气。



促进剂的种类：常用的有 Sb_2O_3 、 As_2O_3 、硝酸盐、硫酸盐、碳酸盐等。

2.10.3 稳泡剂

稳泡剂的必要性：加入适量的稳泡剂能够增大发泡温度范围，稳定气泡结构，减少连通孔，改善泡沫玻璃的性能，提高成品率。

稳泡剂的作用机理：以磷酸盐和硼酸盐为例。在高温下，磷酸盐或硼酸盐受热分解产生 P_2O_5 或 B_2O_3 ，其中 P 或 B 是网络形成离子，在玻璃相内形成 PO_4 四面体或 BO_4 四面体，与 SiO_4 四面体一起构成连续的网络结构，起到修补网络的作用，使已断裂的小型 SiO_4 四面体群重新连接为大型四面体群，网络连接程度变大，熔体的聚合度上升，从而提高高温下玻璃熔体的粘度，延缓气泡壁变薄的速率，达到稳定气泡结构的作用。稳泡剂的种类：常用的是磷酸盐、硼酸盐、醋酸盐、 Al_2O_3 、 ZrO_4 、 ZnO 、 BeO 。

2.10.4 脱模剂

脱模剂的必要性：由于磨具为钢铁磨具，若不在磨具内壁涂一层脱模剂，在经过高温发泡冷却后会与制备的泡沫玻璃粘连在一起，后期难以脱模。

脱模剂的作用机理：将配合料与磨具隔绝。

脱模剂的种类：常用的有黏土加水玻璃混合在一起使用，高铝粉、石英砂等加入无机胶凝剂和水按照一定比例配合而成。

2.11 本实验所研究的玻璃纤维泡沫玻璃

目前国内外生产泡沫玻璃主要以废弃平板玻璃或瓶罐等为主要生产原料，很少使用玻璃纤维为原料的。本文所研究的泡沫玻璃以企业生产所产生的废弃玻璃纤维为主要原料，添加适量外加剂，经高温发泡制备出质量符合要求的泡沫玻璃。

由于所用玻璃纤维中 Al_2O_3 的含量远大于普通废玻璃或瓶罐中 Al_2O_3 含量， Al_2O_3 的熔点高达 2000°C ，因此在使用废玻璃纤维作为泡沫玻璃的主要原料时，材料的熔点很高，这对于泡沫玻璃的制备是个难题，但是所制备的泡沫玻璃强度要高。使用废玻璃研制泡沫玻璃，不仅可以更好的综合利用工业废弃物，保护环境，还可以从源头上降低泡沫玻璃的制造成本，提高泡沫玻璃的质量与性能，具有显著的经济效益和社会效益。

3 实验内容与研究方法

3.1 试验内容

3.1.1 基础原料

泡沫玻璃基础材料原则上采用便宜的和丰富的玻璃材料。本实验以玻璃纤维为主要原料，来自九江某玻璃厂。玻璃纤维的配方如（表）：

表 3-1 玻璃纤维成分

Table3-1 Name and source of raw materials for the experiment:

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	B ₂ O ₃
含量	57.5	16	0.3	0.8	23.8	0.35	0.3	0.3	0.6

3.1.1 辅助原料

原料名称	纯度	产地
焦炭	工业	江西
SiC	工业	河南
碳酸钙	工业纯	国药集团化学试剂
二氧化锰	化学纯	国药集团化学试剂
硝酸钠	化学纯	国药集团化学试剂
Sb ₂ O ₃	分析纯	国药集团化学试剂
Na ₂ CO ₃	分析纯	国药集团化学试剂
Na ₃ PO ₄	分析纯	国药集团化学试剂

3.1.2 实验设备

表 3-2 实验主要设备仪器名称和型号

Table3-2 Name and modle number of equipments

设备名称	型号	产地
电子天平	ES-B 系列小型电子天平	河南爱博特科技发展有限公司
电热恒温干燥箱	PYX-DH280	上海春佳有限公司
球磨机	AY 式滚筒球磨机	无锡臣力粉体设备有限公司
电炉	4008163588	深圳市中达电炉厂

3.1.3 试验过程

原料处理→配料称量→混合球磨→入模成型→加热发泡→脱模测试

①原料处理:

将玻璃纤维洗净烘干,放入球磨罐中,球磨至粉料能过 200 目筛即可。

将焦炭研磨过筛,留 250-350 目筛之间的备用。

将石灰石研磨过筛,留 250-350 目筛之间的备用。

②配料称量

将原料按照一定的配比称量,放入球磨罐中,再根据配合料的多少向球磨罐中添加一定的去离子水和氧化铝球。其中大小氧化铝球的比例要合适,以便达到最佳的球磨效果。

③混合球磨

设置合理的干磨时间,以便让配合料均匀混合。

④入模成型

将球磨后的配合料倒入磨具中,适当敲打,震动让配合料成自然堆积状态。

⑤加热发泡

将混合好的配合料放入窑炉内,设置烧成曲线,并记录数据。

⑥脱模测试

将制备的泡沫玻璃小心脱模,保持原状,不损坏,做性能测试。

3.2 研究方法

3.2.1 表观密度

由于采用的磨具有碗状和正方体状,制备的泡沫玻璃形状也各不相同。故测密度时需要用小锯条切割成立方体来进行测密度,测出长(a)、宽(b)、高(c)。由公式(8)即可算出。

$$\rho = \frac{m}{a.b.c} \quad (8)$$

3.2.2 吸水率

称量泡沫玻璃的干重 G_0 ,将试样放入去离子水中,完全浸沫,在室温下浸泡 2h,取出试样,放在干毛巾上,擦去试样表面吸附的水分,称量重量 G_1 。由公式(9)即可算出。

$$\omega = \frac{G_1 - G_0}{G_0} \quad (9)$$

3.2.3 抗折强度

抗折强度采用液压加荷,电子测力,具有负荷数字显示、加荷速率显示、负荷

最大值显示的实验机测定。

测试步骤：

- ①取试样，按长宽高标准裁用。
- ②测试机调零，将试样放至两层板之间，规范平整，以匀速加载，直至试样折断，记录荷载数值 P。

由公式(10)即可算出。

$$N = \frac{M}{W} = \frac{\frac{P}{2} \cdot \frac{L}{2}}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (10)$$

—N-抗折强度，MPa

—M-在破坏荷重处产生的最大弯矩

—W-截面矩量，断面为矩形时 $W=bh^2/6$

—P-作用于试样的破坏荷重，KG

—L-抗折夹具两支承圆柱的中心距离，m

—b-试样宽度，m

—h-试样高度，m

3.2.4 抗压强度

抗压强度的测定可以利用抗压强度测试机来进行测定。

4 实验结果与讨论

4.1 发泡剂碳化硅含量对泡沫玻璃性能的影响

本实验采用使用温度为 1020-1050℃ 的碳化硅做发泡剂，通过调整试验配方和烧成制度，制备了一系列以表观密度为主要参考指标的低容重闭孔泡沫玻璃。

4.1.1 发泡剂碳化硅含量对泡沫玻璃性能的影响

烧成曲线：

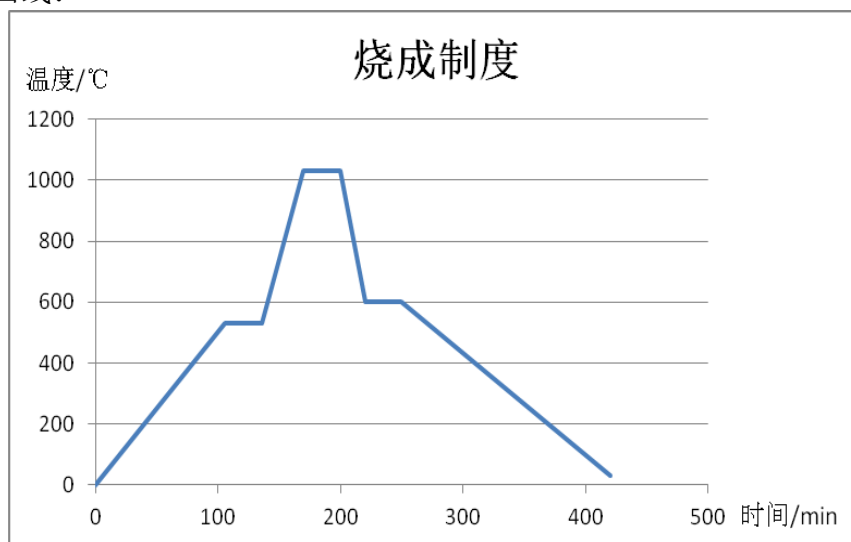


图 4-9 烧成工艺

Figure4-9 firing process

球磨时间：12h

实验配方：

配方成分	编号	玻璃纤维	SiC	Na ₂ SO ₄	C	NaNO ₃	Sb ₂ O ₃
含量	①	90%	2%	1%	1%	5%	1%
	②	89%	3%	1%	1%	5%	1%
	③	88%	4%	1%	1%	5%	1%
	④	87%	5%	1%	1%	5%	1%

①、②、③、④号试样如（图）：

①号：

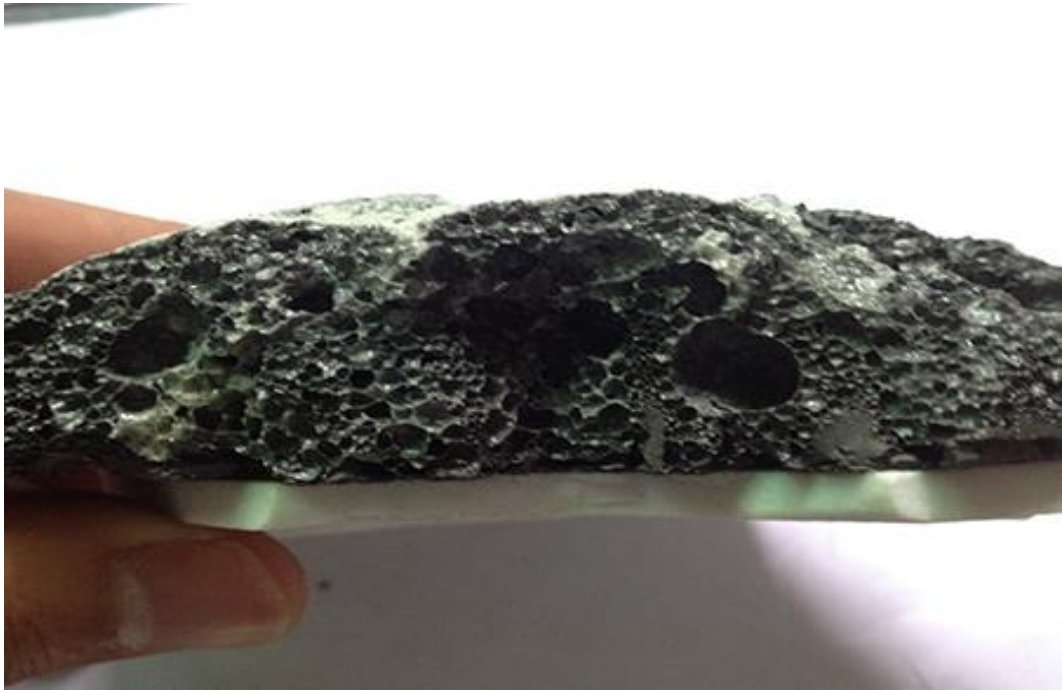


图 1-1 SiC 为 2% 的发泡效果

Figure1-1 Product of SiC2% as the foaming agents

②号:



图 1-2 SiC 为 3% 的发泡效果

Figure1-2 Product of SiC3% as the foaming agents

③号:



图 1-3 SiC 为 4%的发泡效果

Figure1-3 Product of SiC4% as the foaming agents

④号:



图 1-4 SiC 为 5%的发泡效果

Figure1-4 Product of SiC5% as the foaming agents

发泡效果分析: ①号制品发泡效果不好, 气泡孔径比较小, 有的比较大, 且底部很多没发起来。②号制品表面还是比较光滑平整的, 没有大的凹陷或突起等缺陷,

制品内部气孔均匀，结构也比较均匀，表现密度低，强度也比较大，非常理想。

③号制品发泡效果不好，出现类似①号制品的发泡不均匀，气泡有大有小。上部分有很多大的气泡，底部气泡比较小甚至没发泡。连通孔也比较多，不是很理想。④号制品为 5% 的碳化硅，发泡过大，分析为碳化硅量过多的原因。

分析得出：采用②号 3% 的 SiC 能达到一个比较好的发泡效果，制品气孔结构均匀，表现密度低，泡壁薄但强度大。制品整体基本没有缺陷。

4.2 添加剂及其含量对泡沫玻璃性能的影响

表 4-1 玻璃纤维的化学成分

Table 4-1 The chemical composition of glass fiber

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	B ₂ O ₃
含量	57.5	16	0.3	0.8	23.8	0.35	0.3	0.3	0.6

查资料发现对玻璃纤维进行差热分析时，得到此玻璃纤维的熔融温度为 1131℃。而本实验采用的碳化硅使用温度为 1020-1050℃，因此通过添加试剂硫酸钠与碳，降低玻璃纤维的熔融温度。

通过添加 C 和 Na₂SO₄ 做为稳泡剂，稳定气泡结构，减少连通孔，改善泡沫玻璃的性能，提高成品率。

引入 Sb₂O₃ 做为发泡促进剂，低温时 Sb₂O₃ 吸氧，高温时三氧化二锑放氧。保证高氧电位。同时减小玻璃的表面张力，防止连通孔的出现。同时引入的助熔剂 NaNO₃ 和 Na₃SiF₆ 也可配合 Sb₂O₃ 使用。

4.2.1 稳泡剂硫酸钠与碳酸钠对泡沫玻璃性能的影响

采用以上②号实验配方、球磨时间和烧成制度，把硫酸钠与碳酸钠作对比选取稳泡剂

烧成曲线：

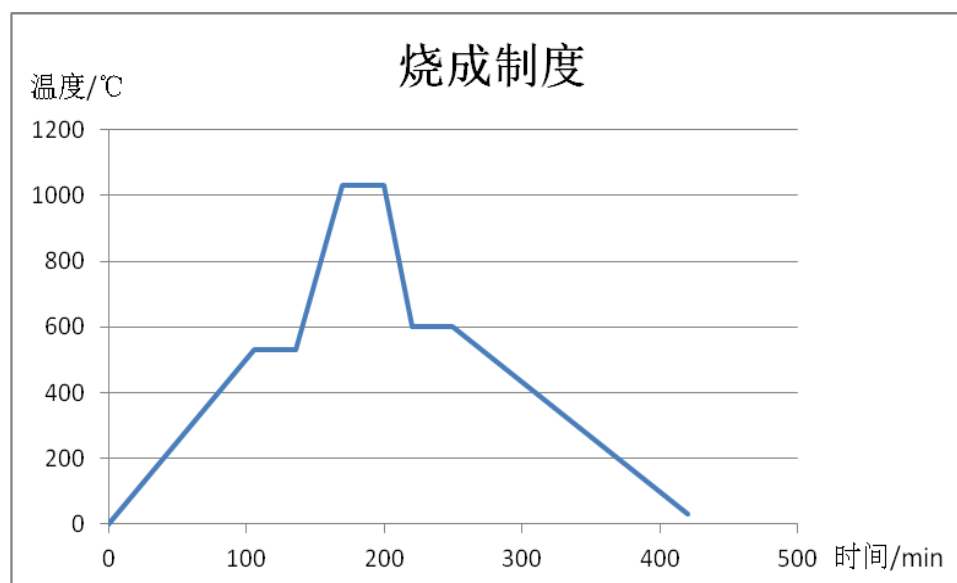


图 4-10 烧成工艺

Figure4-10 firing process

球磨时间：12h

实验配方：

配方成分	编号	玻璃纤维	SiC	C	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	NaNO ₃	Sb ₂ O ₃
含量	1	89%	3%	1%	1%	/	5%	1%
	2	89%	3%	1%	/	1%	5%	1%
	3	89%	3%	1%	0.5%	0.5%	5%	1%

1、2、3 号试样如(图)：

1 号：



图 2-1 添加剂硫酸钠 1%的发泡效果

Figure2-1 Product of Na_2SO_4 1% as the foaming additives

2 号:



图 2-2 添加剂碳酸钠 1%的发泡效果

Figure2-2 Product of Na_2CO_3 1% as the foaming additives

3 号:



图 2-3 添加剂碳酸钠 0.5%、硫酸钠 0.5%的发泡效果

Figure2-3 Product of Na_2CO_3 0.5%、 Na_2SO_4 0.5% as the foaming additives

发泡效果分析：2 号制品和 3 号制品都没有发泡，烧制出来类似于石块，分析认为加入碳酸钠之后发泡温度范围不宽，碳酸钠分解后生成 CO_2 不是网络形成离子，在玻璃相内形成不了四面体，网络连接程度没有变大，降低不了玻璃熔体的粘度。1 号制品能够发泡，发泡比较均匀，连通孔比较少，达到了实验所要求的效果。

分析得出：采用 1 号 Na_2SO_4 能制备发泡效果较好的泡沫玻璃。

4.2.2 稳泡剂碳与磷酸钠对泡沫玻璃性能的影响

采用以上②号实验配方、球磨时间和烧成制度，把碳与磷酸钠作对比选取稳泡剂。

球磨时间：12h

实验配方：

配方成分	编号	玻璃纤维	SiC	Na_2SO_4	C	Na_3PO_4	NaNO_3	Sb_2O_3
含量	A	89%	3%	1%	1%	/	5%	1%
	B	89%	3%	1%	/	1%	5%	1%
	C	89%	3%	1%	0.5%	0.5%	5%	1%

A、B、C 号试样如(图)：

A 号：



图 3-1 添加剂碳 1% 的发泡效果图

Figure3-1 Product of C 1% as the foaming agents

B 号:



图 3-2 为添加剂磷酸钠 1% 的发泡效果图

Figure3-2 Product of Na_3PO_4 1% as the foaming agents

C 号:



图 3-3 为添加剂碳 0.5%，磷酸钠 0.5% 的发泡效果图

Figure3-3 Product of Na_3PO_4 0.5%, C 0.5% as the foaming agents

发泡结果分析：A 号制品发泡气孔很均匀，剖面很整齐，连通孔很少。制品表

面也很光滑，测试表面密度很理想，强度也很好。能够达到实验所要求的效果。B号制品的气孔很不均匀，大致上来说偏大的，存在着较多的连通孔。且孔径都比较大，不是很理想。C号制品相对B发泡比较均匀，有些气孔比较大，整体上看比较好。但是相对于A号制品气孔就不是很均匀了，存在着较多的连通孔，气泡孔径很大，表面也没有A号制品那么光滑平整。

分析得出：稳泡剂用磷酸钠取代碳的话发泡不是很均匀，很难达到碳的发泡效果。所以本实验采用碳作为稳泡剂来达到实验所要求的发泡效果。

4.3 稳泡剂硫酸钠的含量对泡沫玻璃性能的影响

烧成曲线：

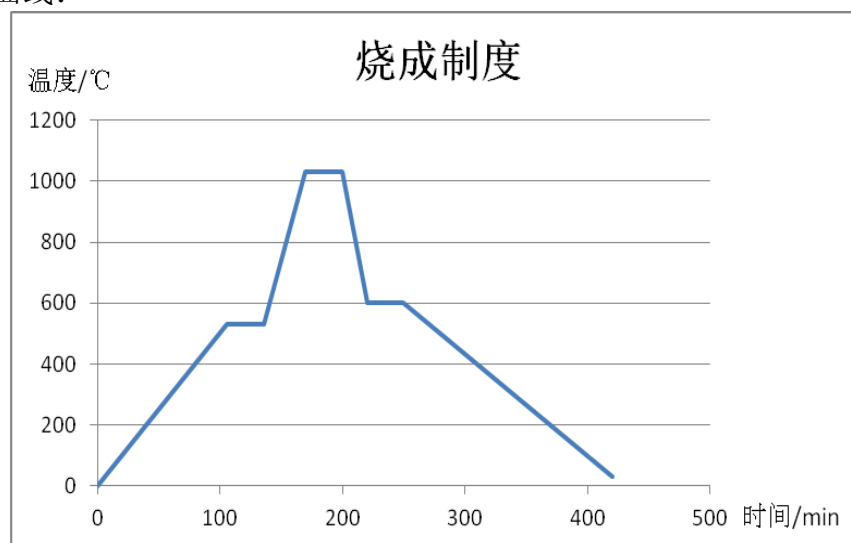


图 4-11 烧成工艺

Figure4-11 firing process

球磨时间：12h

实验配方：

配方成分	编号	玻璃纤维	SiC	Na ₂ SO ₄	C	NaNO ₃	Sb ₂ O ₃
含量	A	89.5%	3%	0.5%	1%	5%	1%
	B	89%	3%	1%	1%	5%	1%
	C	88.5%	3%	1.5%	1%	5%	1%
	D	88%	3%	2%	1%	5%	1%

A、B、C、D号试样如（图）：

A:



图 4-1 硫酸钠含量 0.5%时的发泡效果

Figure4-1 Product of Na_2SO_4 0.5% as the foaming agents

B:



图 4-2 硫酸钠含量 1%时的发泡效果

Figure4-2 Product of Na_2SO_4 1% as the foaming agents

C:



图 4-3 硫酸钠含量 1.5%时的发泡效果

Figure4-3 Product of Na_2SO_4 1.5% as the foaming agents

D:



图 4-4 硫酸钠含量 2%时的发泡效果

Figure4-4 Product of Na_2SO_4 2% as the foaming agents

发泡结果分析:A 号制品基本没有发泡。B 号制品发泡很好, 比较均匀, 表面光滑平整, 没有凹陷或者突起的局部不良现象, 制品孔径都在 1.5mm 左右, 局部没有出现大的连通孔。但也有些气泡过大, 整体效果比较好。C 号制品发泡比之 2 号不够均匀, 大气泡开始多了起来, 剖开样品发现底部没有很好的发泡, 中部气孔比较大, 上部也有些大气泡。效果不是很好。D 号制品底部基本没有发泡, 上表面的气泡过大。可能是由于模具的原因, 靠近底部的发泡也不是很好, 细微的小泡, 越到上表面气泡越来越大。效果很不好。

分析得出: Na_2SO_4 含量在 1% 时对泡沫玻璃的烧成最好, 能够达到很好的效果。

4.4 稳泡剂碳的含量对泡沫玻璃性能的影响

烧成曲线:

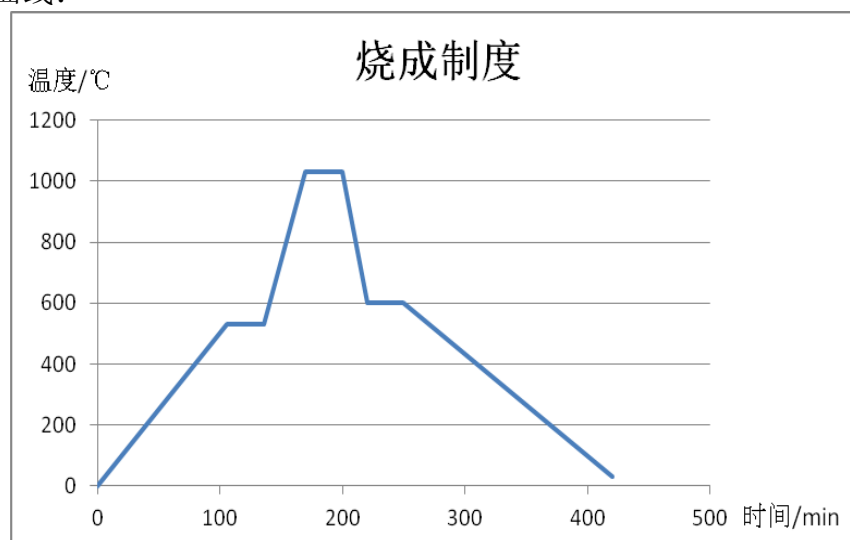


图 4-12 烧成工艺

Figure4-12 firing process

球磨时间: 12h

实验配方:

配方成分	编号	玻璃纤维	SiC	Na_2SO_4	C	NaNO_3	Sb_2O_3
含量	1	90%	3%	1%	0.5%	5%	1%
	2	89%	3%	1%	1%	5%	1%
	2	88%	3%	1%	1.5%	5%	1%
	4	87%	3%	1%	2%	5%	1%

1、2、3、4 号试样如 (图):

1:

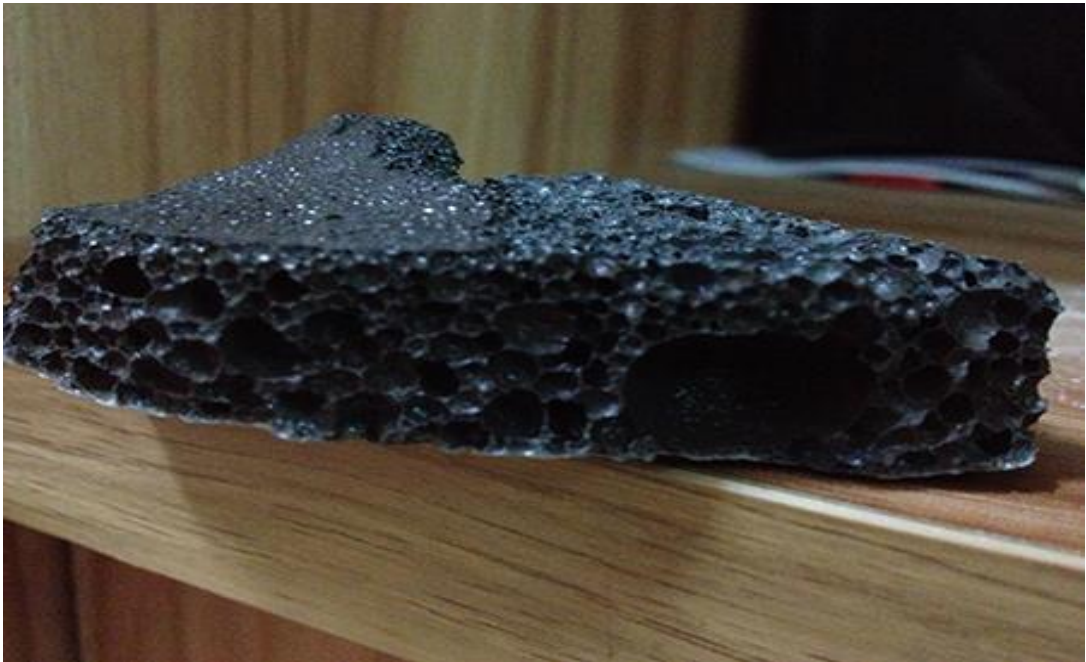


图 5-1 碳含量为 0.5%时的发泡效果

Figure5-1 Product of C 0.5% as the foaming agents

2:



图 5-2 碳含量为 1%时的发泡效果

Figure5-2 Product of C 1% as the foaming agents

3:



图 5-3 碳含量为 1.5%时的发泡效果

Figure5-3 Product of C 1.5% as the foaming agents

4:



图 5-4 碳含量为 2%时的发泡效果

Figure5-4 Product of C 2% as the foaming agents

实验结果分析：1 号制品整体发泡还是很均匀的，表面也很平整，没有大的凹陷，切开样品发现有的气泡没有发起来，有点堵塞泡。个别地方有些稍大的气泡。效果还好。分析认为原料混合不够导致烧成不够理想。2 号制品发泡非常理想，气孔孔径也相当均匀，表面非常光滑，没有连通孔，孔径在 1.3mm 左右，密度为 0.263g/cm^3 。抗折强度达到要求。3 号制品整体也很好，发泡不是很均匀，气泡有大有小，剖开后发现每个面都有几个大的气泡，中间部位还有些地方没有发泡，效果一般。将 4 号制品切割成长方体，从侧面看还是很均匀的，类似于 1 号制品的有些地方没有发泡，有些发泡有点大，不是很均匀，分析认为是可能 C 的含量有点大，混合也不够均匀导致。

分析得出：C 的含量在 1% 时对泡沫玻璃发泡最为理想。

4.5 温度制度对泡沫玻璃性能的影响

采用最佳实验配方：玻璃纤维 89%、SiC3%、 Na_2SO_4 1%、C1%、 NaNO_3 5%，球磨时间 12h，改变烧成制度，分析泡沫玻璃发泡效果。

编号		a	b	c	d
烧成温度		1020℃	1030℃	1040℃	1050℃
保温时间		30min	30min	30min	10min
升温速率	0-530℃	4℃/min	4℃/min	4℃/min	4℃/min
	530℃ 保温	30 min	30 min	30 min	30 min
	530-1020℃	15℃/min	15℃/min	15℃/min	15℃/min
	1020℃ 以上	15℃/min	15℃/min	15℃/min	15℃/min

发泡效果图：

a:



图 6-1 烧成温度为 1020℃ 的发泡效果

Figure6-1 Product of 1020℃ as firing temperature

b:



图 6-2 烧成温度为 1030℃ 的发泡效果

Figure6-2 Product of 1030℃ as firing temperature

c:



图 6-3 烧成温度为 1040℃ 的发泡效果

Figure6-3 Product of 1040℃ as firing temperature

d:



图 6-4 烧成温度为 1050℃ 的发泡效果

Figure6-4 Product of 1050℃ as firing temperature

发泡结果分析：a 制品基本没有发泡，处于粉料烧结状态，玻璃粉料尚未熔融。b 制品整体发泡效果还可以，底部有些还没发泡，靠近上层的有个别大的气孔，分析认为底部料混合不够好。c 制品相对于 b 制品大的气泡更多，且有较多的连通孔，整体发泡不理想。分析认为制品温度稍高，玻璃液粘度下降，气泡孔径随之增大的比较厉害。从图片看出 d 制品的温度就过高了，气泡过大了。分析认为在一定的烧成温度内，随着烧成温度的升高，气泡孔径是增大的，超过了某一烧成温度上限，制品就很容易形成大的连通孔，得不到孔径均一的泡沫玻璃。

结论：在上述配方下，温度限制在 1030 ℃ 时对泡沫玻璃的发泡比较理想。

4.6 添加剂氟硅酸钠与碳酸钙的配比对泡沫玻璃性能的影响

本实验采取的促进剂为 Sb_2O_3 ，现试想加入一定量的添加剂 Na_2SiF_6 与 CaCO_3 来观察对本实验的影响。

采用以上②号的实验配方，球磨时间和烧成制度，通过改变氟硅酸钠与碳酸钙的配比，分析泡沫玻璃发泡效果。

烧成曲线：

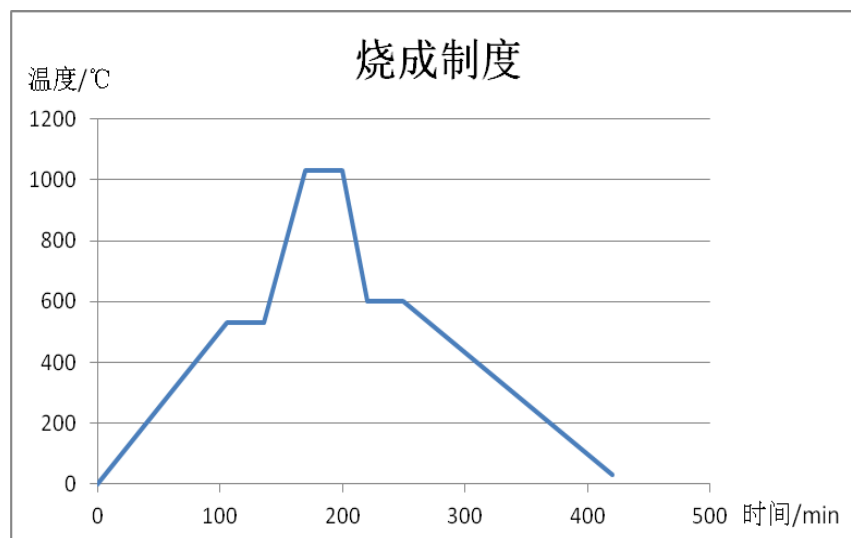


图 4-13 烧成工艺

Figure4-13 firing process

球磨时间：12h

实验配方：

配方成分	编号	玻璃纤维	SiC	Na ₂ SO ₄	NaNO ₃	Sb ₂ O ₃	Na ₂ SiF ₆	CaCO ₃
含量	I	89%	3%	1%	5%	1%	0.5%	0.5%
	II	88.5%	3%	1%	5%	1%	1%	0.5%
	III	88%	3%	1%	5%	1%	1%	1%
	IV	88.5%	3%	1%	5%	1%	0.5%	1%

I、II、III、IV 号试样如（图）：

I 号：



图 7-1 添加剂 Na₂SiF₆0.5%、CaCO₃0.5% 的发泡效果

Figure7-1 Product of Na₂SiF₆0.5%、CaCO₃0.5% as the foaming additives

II 号:



图 7-2 添加剂 Na_2SiF_6 1%、 CaCO_3 0.5% 的发泡效果
Figure7-2 Product of Na_2SiF_6 1%、 CaCO_3 0.5% as the foaming additives

III 号:



图 7-3 添加剂 Na_2SiF_6 1%、 CaCO_3 1% 的发泡效果
Figure7-3 Product of Na_2SiF_6 1%、 CaCO_3 1% as the foaming additives

IV 号:



图 7-4 添加剂 Na_2SiF_6 0.5%、 CaCO_3 1% 的发泡效果

Figure 7-4 Product of Na_2SiF_6 0.5%、 CaCO_3 1% as the foaming additives

发泡效果分析: 从 I 号制品中可以看出发泡不是很均匀, 剖开发现有些连通孔, 并集中在上层, 气孔大小也不均一。II 号制品类似于 I 号制品, 有许多的大气泡, 连通孔很多, 很不均匀。分析认为 Na_2SiF_6 作为助溶剂能加速玻璃形成反应, 降低玻璃液的粘度、表面张力和热透性, 而碳酸钙的含量偏少导致烧制过程中助溶剂含量偏高促进剂碳酸钙与 Sb_2O_3 含量偏少导致的不平衡而引起的。III 号制品气孔很均匀, 发泡效果很理想, 但存在少许的连通孔。表面不是很光滑平整。IV 号制品类似于 I、II 号, 存在较多的连通孔, 发泡也不均匀。

分析结果: 观察加入氟硅酸钠与碳酸钙的配比对泡沫玻璃的影响发现二者在比例都为 1% 时效果比较好, 但也存在少许的连通孔, 由于氟化合物挥发后会污染大气, 不宜使用。

5 结论

实验以玻璃纤维为主要原料，碳化硅为发泡剂，采用粉末烧结法，制备了高硅高铝高钙体系泡沫玻璃。研究了发泡剂碳化硅含量对泡沫玻璃性能的影响、不同稳泡剂及其含量对泡沫玻璃性能的影响、助溶剂含量对泡沫玻璃性能的影响及温度制度对泡沫玻璃性能的影响，得到以下结论：

- 1、采用发泡剂碳化硅含量为 3% 时发泡效果最好。
- 2、稳泡剂硫酸钠的发泡效果比碳酸钠的好，碳的发泡效果比磷酸钠的好。
- 3、添加剂硫酸钠的含量为 1%、碳的含量在 1% 时发泡效果最好。
- 4、确定烧成温度为 1030℃ 时发泡最为理想。
- 5、添加剂氟硅酸钠与碳酸钙有一个最佳组合为氟硅酸钠 1%、碳酸钙 1%，使泡沫玻璃性能达到最佳，能使泡沫玻璃的主要性能指标表观密度达到最小。添加剂硝酸钠、三氧化二锑在固定值 5%、1% 时泡沫玻璃性能达到最好。
- 6、采用发泡剂碳化硅含量为 3%，稳泡剂硫酸钠 1%、碳 1%，助溶剂硝酸钠 5%、促进剂三氧化二锑 1% 时泡沫玻璃性能指标达到最佳。表观密度 0.215 g/cm^3 、抗折强度 2MPa、抗压强度 4MPa、吸水率 0.5%。

6 经济分析

6.1 单位样品的原材料成本核算

表 1 列出了本实验配合料的价格

表 1 原料价格

原料	价格
碳化硅	20000 元/吨
硝酸钠	1500 元/吨
磷酸钠	480 元/吨
硫酸钠	500 元/吨
氟硅酸钠	2200 元/吨
Sb_2O_3	78000 元/吨
焦炭	1400 元/吨

按照配方，推算出生产 1kg 配合料所需原料成本为 50.87 元，初步保守估计每制得这样一份泡沫玻璃投放市场时售价为 200 元。

6.2 耗能成本

1. 粉碎有硼废玻璃纤维、混匀原料的球磨机耗能：20 度电

2. 有硼废玻璃纤维干燥过程干燥箱耗能：80 度电

3. 烧制泡沫玻璃的马弗炉耗能：160 度电

计电价为 1.1 元/度，则用 1Kg 有硼废玻璃纤维制备泡沫玻璃的能耗成本为：

$$(20+80+160) \times 1.1 = 286 \text{ 元}$$

6.3 水耗成本及设备折旧费用

用 10Kg 有硼废玻璃纤维制备泡沫玻璃用水量可以忽略不计。

取设备折旧率为 0.01，设备的损耗成本为：（球磨机 500+干燥箱 1960+马弗炉 600） \times 0.01=84.6 元

用 10Kg 有硼废玻璃纤维制备泡沫玻璃的总成本为 9.69+286+84.6=380.29 元，根据市场上同等性能同等大小的泡沫玻璃价格在 1000 元左右。

6.4 税收与利润

根据税率为 10% 计算，其税额为 100 元；

利润额为 1000-380.29-100=519.71 元；

税前利润率为 163%，税后利润率 137%。

7 致谢

时间流逝，大学就要接近尾声了，在此要感谢大学对自己四年来的培养。

首先，要感谢谢志翔老师对此次毕业设计的倾心指导，为此次毕业设计实验提供了一些列的实验条件和指导性意见。在谢老师身上学到了很多，这将让我受益终生。

其次，还要感谢学校提供了这么好的一个平台，可以让我独立的去思考、参与并完成这个实验。在做实验的这个学期里可以让我充分的发挥自己的动手操作能力，可以让我更加独立的思考一些事物的变化并做出他们的规律，对所学知识有一个高度的概括和实践，对马上面临就业的我们无疑是个很好的帮助。

最后，感谢在实验室一起做毕业设计实验的同学们，感谢他们的帮助，感谢他们的热情让我们的毕业设计实验更加的丰富多彩，我相信未来的我们一定会更加的美好！

8 参考文献

- <1>□ 张剑波, 吴勇生. 泡沫玻璃的研究进展. 中国资源综合. 2010, 28: 25-29
- <2>□ 郭晓琛, 高淑雅, 郭宏伟. 泡沫玻璃强化技术的研究进展. 材料导报. 2011, 1: 112-115
- <3>□ 河北福安防腐保温集团公司. 泡沫玻璃论. 2010 年中国绝热节能材料协会论文集. 2010
- <4>□ 文震, 臧其威, 汪丽媛. 国内泡沫玻璃的研究现状及发展趋势. 科技致富向导. 2010, 5: 24
- <5>□ 葛伟青, 杨静. 国内泡沫玻璃的研究现状及发展趋势. 唐山学院学报. 2008, 2: 67
- <6>□ 成慧杰. 硼硅酸盐泡沫玻璃发泡剂与添加剂的研究. 天津大学. 2006
- <7>□ 张心致, 韦晓英. 年产 6 万立方米泡沫玻璃项目点火. 壁日报. 2013, 1: 1
- <8>□ 马彦平, 靳媛利. 新型绝热保温装饰材料——泡沫玻璃墙面砖工艺初探. 陶瓷. 2007, 6. 18-20
- <9>□ 杜娟娟. 硼硅酸盐泡沫玻璃制备工艺及性能的研究. 天津大学. 2007
- <10>□ 张婕. 温度制度对硼硅酸盐泡沫玻璃结构及性能的影响. 天津大学. 2006
- <11>□ 田英良, 邹玉林, 赵飞等. 高性能泡沫玻璃的研究. 北京工业大学学报. 2001, 2: 247-250
- <12>□ 沈青峰, 张生辉, 沈承金等. 辅助添加剂对泡沫玻璃性能的影响. 中国矿业大学. 2008, 22: 336-338
- <13>□ D.U.Tulyaganov, M.J.Ribeiro, J.A.Labrincha. Development of glass-ceramics by sintering and crystallization of fine powders of calcium-magnesium-aluminosilicate glass . Ceramics Interational . 2002, 515-520.
- <14>□ D.U.Tulyaganov, H.R.Fernandes, S.Agathopoulos, J.M.F.Ferreira. Preparation and characterization of high compressive strength foams from sheet glass . J Porous Mater . 2006, 13: 133-139
- <15>□ Yu. A. Spiridonov¹ and L. A. Orlova¹ . Problems of foam glass production. Glass and Ceramics. 2003, 60: 9-10.
- <16> Jakob König, Rasmus R. Petersen, Yuanzheng Yue. Influence of the glass-calcium carbonate mixture's characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass. Volume 34, Issue 6, June 2014, Pages 1591–1598

