

泡沫玻璃

Н. Н. 基泰戈羅德斯基 T. H. 凱施相 著

薛志麟 童祐嵩 譚興元 譯

重工業出版社

泡 沫 玻 璃

И.И.基泰戈羅德斯基, Т.Н.凱施相 著

薛志麟 童祐嵩 譚興元 譯

重 工 業 出 版 社

И.И.КИТАЙГОРОДСКИЙ, Т.Н.КЕШИЦАН
ПЕНОСТЕКЛО

Промстройиздат (Москва 1953)

* * *

泡沫玻璃

薛志麟 童祐嵩 譚興元 譯

重工業出版社 (北京前門內大街三岔廟口號) 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第〇一五號

* * *

重工業出版社印刷廠印

一九五五年四月北京第一版

一九五五年四月第一次印刷 (1-2,135)

787×1092 • $\frac{1}{25}$ • 75,000字 • 印張 $\frac{18}{25}$ • 定價(3) 0.45元

書號 0262

* * *

發行者 新華書店

目 次

序 言	(4)
第一章 泡沫玻璃的物理化學性質及其結構	(6)
第二章 泡沫玻璃的製造法	(11)
第三章 發泡過程及玻璃料的化學成分	(13)
1. 用平板玻璃生產中的廢品製造泡沫玻璃	(13)
2. 用低鹼和無鹼的玻璃料製取泡沫玻璃	(27)
3. 用硼矽玻璃料製造泡沫玻璃	(31)
4. 用高氧化鋁玻璃料製造泡沫玻璃	(35)
5. 用易熔性粘土製成的玻璃料製造泡沫玻璃	(36)
6. 用粗面岩製成的玻璃料製造泡沫玻璃	(38)
第四章 發泡劑	(40)
1. 發泡劑與玻璃料在燒成時的相互作用	(40)
2. 製造泡沫玻璃時採用發泡劑的條件	(49)
第五章 用各種配合料配製法製造泡沫玻璃	(53)
1. 用濕法配製的配合料製造微孔泡沫玻璃	(53)
2. 直接用霞石配合料製造泡沫玻璃	(60)
3. 用壓製的配合料塊製造泡沫玻璃	(60)
第六章 泡沫玻璃的工業製造	(62)
第七章 泡沫玻璃的用途	(64)
參考文獻	(68)

序 言

本書係敘述榮獲列寧勳章的莫斯科 Д. И. 門捷列夫化工學院所作的試驗室研究。這些研究結果使得能夠決定了製造各種結構的泡沫玻璃的條件，並且確定了在它製造工藝中影響着泡沫玻璃工業製造過程的許多因素。

此外，這些研究資料能夠在一定程度內預知泡沫玻璃在各種使用條件下之性能。

所進行的這些研究工作，擴大了我們關於設計與建築泡沫玻璃車間和工廠，以及關於在民用和工業建築中採用這種新型絕熱和隔音材料的知識和可能性。

我們所進行的研究主要是有關化工方面的問題。爲了在科學技術方面對工廠工作者有所幫助，我們發表門捷列夫化工學院所積累的試驗資料是必要的。

無疑的，將來各部門研究院和從事泡沫玻璃車間和工廠的設計、建築和安裝的組織亦能在這方面進行研究。

目前，我們與關心比較廣泛而熟練的採用這種新型建築用絕緣材料的建築組織和蘇聯建築科學院共同進行一系列研究的必要性已經成熟了。

試驗室和設計機構在這方面合作，將會促使泡沫玻璃生產的技術操作過程，在工業範圍內得到進一步的改進。

作 者



用玻璃粉和發泡劑配成的混合料經煨燒而得之新型絕緣裝備材料和絕緣建築材料稱為泡沫玻璃。泡沫玻璃與一般建築材料不同的地方，就是它具有較高的機械強度，對水分、蒸汽和氣體的不滲透性、抗凍性和耐久性。雖然泡沫玻璃強度大，但易於機械加工：泡沫玻璃可以鋸、鑽、車和往裡釘釘子等等。

泡沫玻璃的優良物理化學性質，即預定着它能够廣泛地用於國民經濟的許多部門中，以及廣泛地用於住宅建築和工業建築中，尤其是在建築高建築物時，其利用更廣。

泡沫玻璃生產在為工業所掌握之前，作者在榮獲列寧勳章的莫斯科 М. И. 門捷列夫化工學院玻璃工學教研室進行了長期的研究。這些研究其目的是要確定泡沫玻璃配合料——最初為平玻璃粉料和發泡劑（煤和石灰石）的混合料，而後來為各種不同成分的玻璃粉料和發泡劑的混合料——在燒成時發泡過程的主要規律性。

除了試驗室研究外，於1939年在世界上第一次在該學院的中間生產工廠試製成了工業樣品。

目前泡沫玻璃的工藝過程愈益完善。為了這些目的，綜合已作的試驗，無疑的是有所裨益的，這樣就能够更深入地來研究這種先進建築材料的多樣性能及其生產工藝上的所有特性。

第一章 泡沫玻璃的物理化學性質及其結構

泡沫玻璃乃是一種粗糙多孔的分散體系，其氣態的分散相分布在體積較小的分散介質（玻璃料）中，氣相在泡沫玻璃中佔總體積的30~95%，而玻璃相當於總體積的5~20%。根據所用發泡劑的化學成分之差異，在泡沫玻璃的氣相中可能含有：碳酸氣，一氧化碳，二氧化硫，硫化氫，水蒸氣，氧，氮等。玻璃相的化學成分，實際上亦就是原玻璃粉料的化學成分。

根據配合料加工的工藝制度的不同，泡沫玻璃可能有封閉的非連通孔（圖1）連通或部分連通孔（圖2）。用肉眼可以看得見的氣孔大致具有同樣的大小。但是分隔氣孔的壁也含有大量的微小氣孔，這些小氣孔僅在放大時才能分清（圖3）

氣孔的大小及其數量

泡沫玻璃的均勻的小氣孔結構，使其具有較高的機械強度，而且特別重要的是使其具有較低的導熱性，這是因為隨着絕緣材料氣孔直徑的減小對流傳熱成為不甚強烈的緣故。在生產條件下製造的泡沫玻璃，其氣孔直徑一般為0.1到3—5公厘。作者在實驗室中製得的泡沫液，其氣孔直徑為1—5微米。

如上所述可以確定泡沫玻璃為一種在單位體積內大多數是氣相的體系。由這個觀點來看，含有50%以上真氣孔率的多孔玻璃體就稱為泡沫玻璃。在工廠中製得的泡沫玻璃其真氣孔率等於85—90%。

導熱係數

由於物料的單位體積重量小而使熱傳導係數低，這是泡沫玻璃極重要性質之一。單位體積重量為0.25—0.40克/立方公分的泡沫玻璃，其導熱係數的變動範圍由0.06至0.09仟卡/公尺·小時·°C（圖4）。

泡沫玻璃也像所有的熱絕緣材料一樣，其導熱係數是隨着溫度上昇而增加的（圖5）。

熱容量

泡沫玻璃的熱容量等於0.1793卡/克·°C，由於氣相的密度較玻璃質的密度小，其熱容量幾乎不因構造而改變。

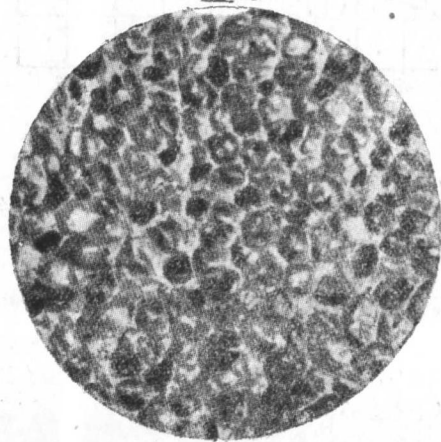


圖 1 封閉孔 ($\times 150$)

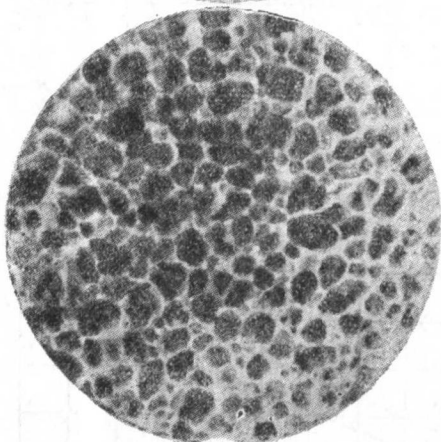


圖 2 連通孔 ($\times 150$),

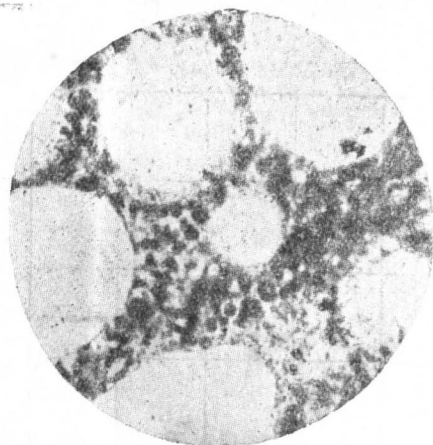


圖 3 泡沫玻璃氣孔壁之構造 ($\times 150$)

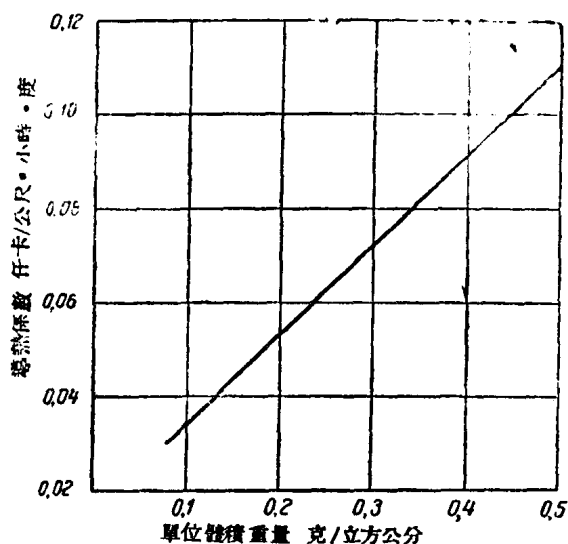


圖 4 泡沫玻璃的導熱係數與其單位體積重量之關係

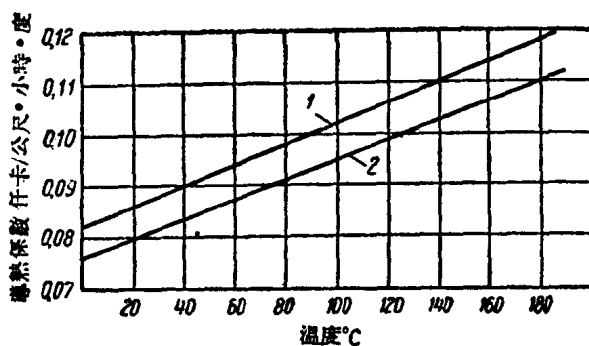


圖 5 泡沫玻璃的導熱係數根據溫度之變化

1—單位體積重量0.40克/立方公分；2—單位體積重量0.30克/立方公分

機械強度

泡沫玻璃與其他熱絕緣材料不同，當熱傳導係數低時，它便有較高之機械強度。耐壓強度極限變動之範圍由8到150公斤/平方公分，這主要是根據泡沫玻璃的單位體積重量而定（圖6）；如單位體積重量為0.25—0.40克/立方公分時，耐壓強度則為28—58公斤/平方公分。

吸水率

泡沫玻璃的吸水率只是由氣孔的性質而定；泡沫玻璃中連通孔越多，則吸水率就越大。具有閉孔的泡沫玻璃的吸水率為其體積的 6--9%，這是因為水分僅被表面吸附的緣故。

泡沫玻璃吸水率的長期試驗結果列於圖 7 中。當試樣的吸水率達到了極限值以後，雖然將其繼續浸入水中，但試樣的吸水率却不致改變。

吸音性

具有連通孔的泡沫玻璃，其吸音係數較隔音板大得多，而且其吸音係數在很寬的頻率範圍內（250 — 4000 週/秒）不致改變（圖 8）。

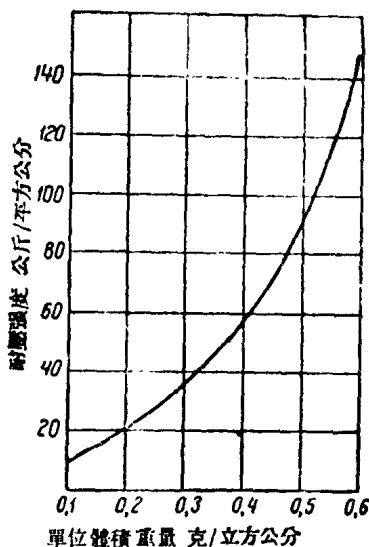


圖 6 泡沫玻璃的耐壓強度與其單位重量之關係

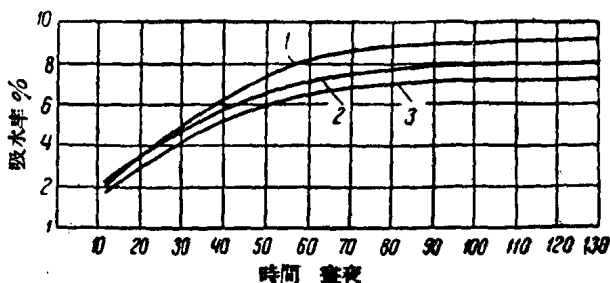


圖 7 泡沫玻璃的吸水率

1—單位體積重量0.311克/立方公分；2—單位體積重量0.385克/立方公分；
3—單位體積重量0.450克/立方公分

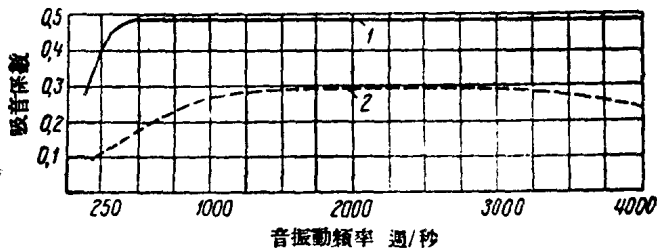


圖 8 泡沫玻璃的吸音係數

耐凍性

因為泡沫玻璃是一種不吸水和機械強度大的材料，所以它能有效地抵抗着反復的凍結和融化。用水飽和的試樣經受五十次在 -30°C 凍結和 $15-20^{\circ}\text{C}$ 融化的反復循環試驗。經過五十次凍結和融化循環試驗後，其強度減低了20—25%。

泡沫玻璃與其他材料的性能比較資料列入表1。

表 1

熱絕緣材料的主要性能

材 料 名 稱	單位體積重 量, 公斤/立方公尺	在 20°C 下的導 熱係數, 仟卡 公尺/小時 $\cdot^{\circ}\text{C}$	耐 壓 強 度 公斤/平方公分	吸水率% (按體積 計算)
泡沫玻璃.....	100	0.031	9	6—9*
"	200	0.032	20	"
"	300	0.071	35	"
"	400	0.090	60	"
"	500	0.110	90	"
"	600	0.150	150	"
非蒸壓的泡沫混凝土.....	400	0.085	4	18
"	500	0.105	6	20
"	600	0.125	8	22
蒸壓的泡沫混凝土, 泡沫 矽酸鹽製品, 泡沫苦土製 品.....	400	0.085	8—18	20—22
"	500	0.105	10—20	22—25
"	600	0.125	12—22	25—30
煅燒矽藻土(硬質矽藻的) 製品.....	550—650	0.11—0.13	5—8	—
用礦物棉以有機質結合劑 製成的板.....	350	0.065	1.5**	—
石棉水泥瓦.....	300—400	0.075—0.090	4.0**	—
泥炭板.....	200—300	0.53—0.06	1.5—2.5*	—

* 僅算表面開孔吸水者

** 抗折強度

由上表可見，泡沫玻璃有利地區別於其他的硬質絕緣材料，因為前者的單位體積重量小、導熱係數低、機械强度高和吸水率很小。

第二章 泡沫玻璃的製造法

泡沫玻璃製造過程的主要任務是在於製得均勻地貫穿着同樣直徑氣孔的物料。

在玻璃生產過程中，一般力求從玻璃液中排出凡是可見的氣體雜質；而在製造泡沫玻璃時，其目的則相反，即是製得具有盡量多的氣體雜質的玻璃熔體。

一些研究者運用在真空中所發生的玻璃熔化物和溶解在其中的氣體之間的均衡受破壞的現象，將在 1200°C 下熔化的玻璃置於真空中，這樣就引起了強烈的出氣和發泡，並且使玻璃液的體積擴大六倍。向熔化的玻璃中加入氣體或水蒸氣亦可製得氣孔性的玻璃液，但是這並不能製得均勻的，而更主要的是所規定結構的泡沫玻璃。因此應當認為所謂粉料法才是能够保證製得均勻和規定結構的泡沫玻璃的生產方法。

按此種方法生產，配合料係由95—99份的玻璃粉料和5—1份的發泡劑配成。採用配合料加熱時隨着氣相分離而分解的物質做為發泡劑。通常發泡劑的分解溫度應當比玻璃的軟化溫度高 $150—200^{\circ}\text{C}$ 。將仔細混合好的配合料撒入坩堝（圖9a）中。然後將坩堝置於燒成窖內，當加熱時物料的體積有些縮小，因此生料表面要力求成為球形（圖9b）。在此期間內，玻璃液的粘度甚大，而且它本身也包含着各個發泡劑的顆粒——即是以後泡沫玻璃氣孔的發源地。

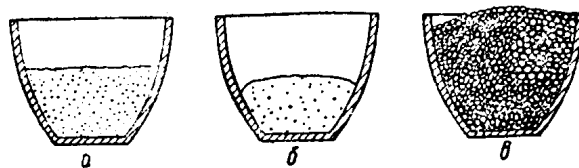


圖 9 發泡過程之示意圖

a — 裝有泡沫玻璃配合料的坩堝； b — 配合料燒成開始；

b — 泡沫玻璃氣孔的形成；

當配合料繼續加熱時，發泡劑即開始分解。逸出的氣體在玻璃液中形成氣孔，其直徑逐漸增加，致使玻璃液的體積顯著增加（圖9b）。當玻璃液的體積達到一定時，將窖內的溫度降低，以便停止發泡劑的分解過程以及固定試料的體積。

圖 10 係表示在實驗室條件下所製得的泡沫玻璃試樣；冷卻至室溫以後，由坩堝（圖10 a）中將泡沫玻璃（圖10 6）取出，並將取出的泡沫玻璃鑄成立方體，供作試驗之用（圖10 8）。

根據粉料的顆粒成分、發泡劑的種類和數量、燒成過程的溫度和燒成時間的不同，用粉料法可以製得各種不同構造和各種不同性質的泡沫玻璃。

可以採用微粒的粉料製造泡沫玻璃。被燒成的物料的顆粒愈小，泡沫玻璃的構造就愈均勻。用微粒粉料可以製得單位體積重量小的、熱導係數低的、機械強度高的泡沫玻璃。實際上所採用的粉料，其粉磨細度規定應能全部通過 2500—6400 孔/平方公分的篩子。

配合料中發泡劑的含量提高到一定的限度時，亦即在物料加熱時相應地增加氣相，泡沫玻璃的單位體積的重量就會減小。但是，此時通常會提高氣孔的直徑。

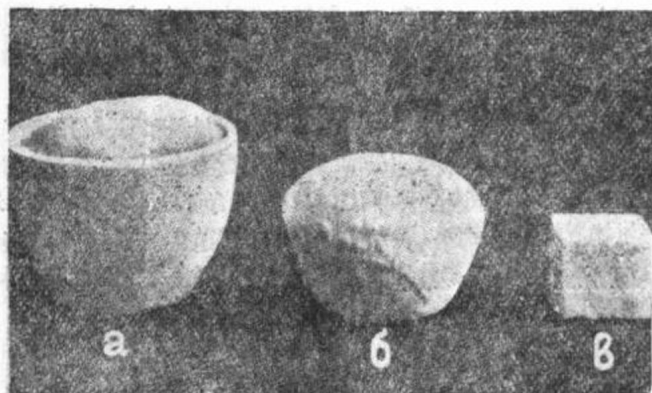


圖 10 泡沫玻璃實體重的試樣

a—在坩堝中的泡沫玻璃； 6—由坩堝中取出之泡沫玻璃；

8—由泡沫玻璃鑄成的立方體

如果發泡劑的攪加量大於3—5%時，由於在加熱時氣相所生成的壓力高，因此製得的泡沫玻璃具有不均勻的大氣孔的結構。

泡沫玻璃生料常在750—850°C的溫度下燒成：燒成的溫度越高，則所製得的泡沫玻璃的單位體積重量就越小。泡沫玻璃的單位體積重量同樣亦根據燒成過程的持續時間（在同樣的溫度下）而變化：燒成過程越長（發泡劑分解程度越大），則泡沫玻璃的單位體積重量就越小。

因此，如係用粉料法製造泡沫玻璃時，可以在相當大的範圍內調節燒成物料中的發泡過程。

第三章 發泡過程及玻璃料的化學成分

1. 用平板玻璃生產中的廢品製造泡沫玻璃

採用玻璃粉料做為主要原料，其成分(%)： SiO_2 —72.9； Al_2O_3 —1.57； Fe_2O_3 —0.59； CaO —3.79； MgO —2.20； Na_2O —15.15；石灰石和焦炭為發泡劑。

我們會採用了下列研究方法。將碎玻璃在瓷質球磨機中磨碎，並將磨得的粉末通過 200孔/平方公分的篩子過篩。在某些情況下，曾採用了顆粒更細的粉料；其發泡劑亦磨至同樣的細度。

將仔細混合好的配合料(99份玻璃粉和1份發泡劑)撒入瓷坩堝中(在實驗室試驗時)或金屬模型中(當用中間生產工廠設備時)。在燒成、退火和冷卻結束之後，將泡沫玻璃由窖爐中取出，並鋸成所規定大小的試體。

在實驗室的坩堝中，裝入20—30克的配合料，而在金屬模型中則裝入3—4到10—12公斤的配合料，其裝入量係根據試體的大小(由 $250 \times 250 \times 125$ 至 $500 \times 500 \times 200$ 公厘)而定。

將裝有配合料的坩堝和模型均置於燒成窖中，並在窖中於最高的燒成溫度下保持所規定的時間。

實驗室的試樣係在附有鎢絲加熱器的電爐中燒成。而工業的試料是在特建的馬弗爾式煤油爐(圖11)中燒成。在馬弗爾爐內，燒成物料能均勻受熱。在馬弗爾爐中測量了溫度，其測量的位置是在三個水平面上，每個水平面有五個測量點，所得結果證明，沿垂直面的溫度落差為 $2-3^\circ\text{C}$ ，而沿水平面則為 $2-5^\circ\text{C}$ 。

當燒成結束後，將窖急行冷卻到退火的溫度，成品退火後，再將其緩慢地冷卻。

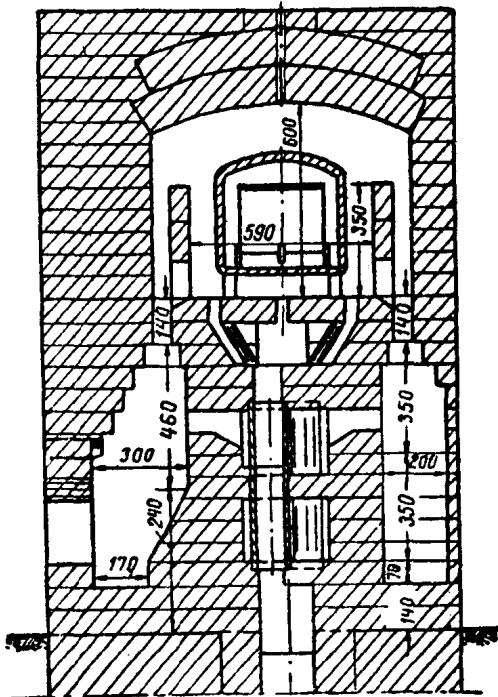


圖 11 B.П. 蘇洛夫采夫設計的泡沫玻璃燒成用的馬弗爾煤油爐

在實驗室中試驗時，並不將泡沫玻璃由坩堝中取出，即行退火和冷卻。可是用中間工廠設備製造工業試樣時，需將燒成物由模型中取出，而後才行冷卻。

泡沫玻璃工業試樣的退火和冷卻制度係根據計算來確定。

在燒成過程中，爲了防止玻璃液粘附到坩堝壁上，在裝配合料之前，將坩堝和模型的內部塗一層白堊浮漿並將其烘乾之。

泡沫玻璃氣孔中的氣相和固體殘渣之研究

封閉孔中的氣相的分析，係按研究玻璃中氣體雜質所廣泛採用的方法來進行。泡沫玻璃的氣孔在覆蓋的玻璃下，於甘油中進行。所生成的氣泡的體積根據直徑來計算，其直徑是藉目鏡測微計，在顯微鏡下測得的，然後將氣泡依次地用吸收劑處理和測量之。曾經測定了氣孔中 H_2S 、 SO_2 、 O_2 、 CO_2 的含量。

用石灰石做發泡劑所製得的泡沫玻璃，其氣孔中固體殘渣 CaO 的含量按檢驗水泥中游離石灰的甘油法來測定。

單位體積重量不同的泡沫玻璃製造條件的研究

根據玻璃粉和發泡劑（大理石）的顆粒大小而使單位體積的重量改變之研究係用下列方法進行。當試驗用玻璃的軟化溫度爲 $600-650^{\circ}C$ ，大理石實際顯著開始分解的溫度爲 $750^{\circ}C$ 和燒成持續時間爲20分鐘時，對所有試驗均採用了下列燒成制度：燒成溫度爲 $750^{\circ}C$ 持續時間爲20分鐘。會有各種粉磨細度的粉料經過了燒成：在第一組試驗中，採用了通過576—2,500孔/平方公分篩子的粉料，在第二組試驗中，採用了通過2,500—10,000孔/平方公分篩子的粉料，而在第三組試驗中，採用了通過10,000孔/平方公分篩子的粉料。大理石的粉磨細度也和玻璃一樣。試樣是在實驗室的坩堝中燒成。試驗的結果列於圖12中。

由圖可見，在其他條件相同時，玻璃粉的顆粒愈小，所製得泡沫玻璃的單位體積重量亦愈小。有些試驗，曾用較玻璃磨得更細的發泡劑。玻璃粉係通經2,500孔/平方公分的篩子，而大理石則通過10,000孔/平方公分的篩子。在 750° 下，經過了20分鐘燒成。試樣的平均單位體積重量爲0.539克/立方公分。玻璃和大理石的粉磨細度相同時，則泡沫玻璃的單位體積重量等於0.536克/立方公分。發泡劑的粉磨細度降低則使泡沫玻璃的單位體積重量共減少了10%。

爲了研究泡沫玻璃的單位體積重量與燒成溫度和燒成持續時間的關係，曾將配合料分別在 750 、 775 、 800 和 $825^{\circ}C$ 溫度下燒製10—30分鐘。其試驗結果列於第2表和第13、14圖中。

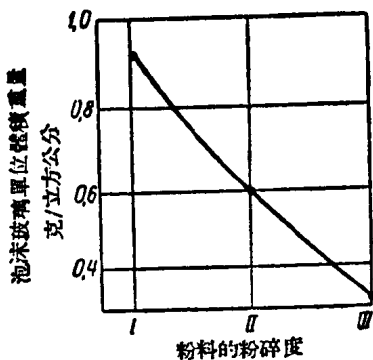


圖 12 泡沫玻璃的單位重量與玻璃粉粒度的關係

在 750 °C 下持續 10 分鐘所燒製的試樣未有膨脹起泡，而將它折斷時，它才是帶有氣孔的緻密物質，這些氣孔僅在顯著的放大時才能看得出。

在 750° 下，經 20 分鐘燒成，即可製得均勻的微孔結構的材料。

泡沫玻璃試樣的性質

表 2

成燒溫度 °C	燒成時間 分鐘	試 樣 的 外 形	氣孔的直徑 公厘	單位體積的重量, 克 / 立方公分
750	10	帶有肉眼不能見到的氣孔的緻密石狀物質.....	—	1.42
750	20	均勻結構.....	0.5—0.6	0.596
750	30	"	0.7—0.8	0.446
775	10	"	0.25—0.1	0.585
775	20	"	0.65—0.70	0.417
775	30	"	0.75—1.05	0.389
800	10	均勻的結構但在試體中發現有些空洞.....	0.60—1.15	0.300
800	20和30	在泡沫玻璃中發現有很大的分佈不均勻的氣泡.....	—	—
825	10	帶有顯然不同氣泡的不均勻結構.....	—	—

在 800 °C 下可得到均勻結構的泡沫玻璃，它具有中等大小的氣孔 (0.6—0.15 公厘)；此外，在試樣中還發現了一些較大的氣孔，其直徑約為 3—5 公厘。

在 800 °C 下所製得之試樣，其氣孔直徑顯然不同。在用平板玻璃粉和石灰

石粉（發泡劑）燒成溫度為

750—800 時，得到了較好

的結果；在此溫度範圍內，

玻璃料的粘性約為 4×10^8

泊， CaCO_3 的熱分解壓力為

8—18 公分水銀柱。

試樣的單位體積重量隨

着燒成溫度提高而減小；燒

成時間愈長則在不同溫度下

燒成的試樣，其單位體積的

重量就愈小，因此，在較低

的溫度下延長燒成時間，在

某些情況下，也能得到與在

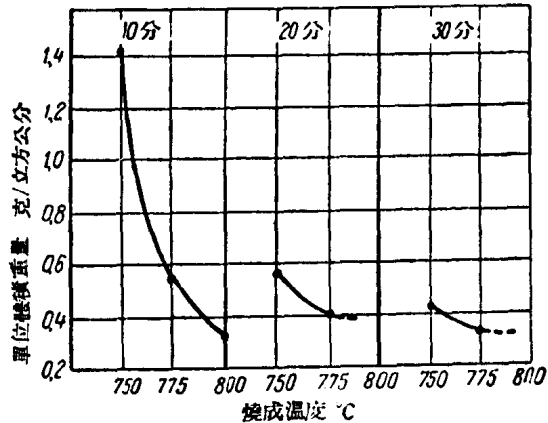


圖 13 泡沫玻璃的單位體積重量與平板玻璃粉燒成溫度的關係

短時間內用較高的溫度燒成的同樣結果。

把圖14的資料加以比較，就可以看出，在 800°C 下持續10分鐘；在 775°C 持續20分鐘；在 750°C 持續30分鐘所製造的試樣，其單位體積重量的數值很接近。

因此，可以確定，在 $700-750^{\circ}\text{C}$ 的範圍內，將燒成溫度降低 25°C ，且同時增加燒成時間0.5—1倍時，可以得到大約同樣單位體積重量的泡沫玻璃。

曾經研究了所製試樣氣孔中的氣相。經過分析後證明，氣孔中各種氣體的含量不同（第3表）。 CO_2 的含量的變動範圍極大，由0到30%。

在某些試體的氣孔中，完全沒有 CO_2 ，而 O_2 的含量也幾乎和空氣中的含量相同。在此種情況下，氣泡的膨大顯然是靠配合料中的空氣而發生的。

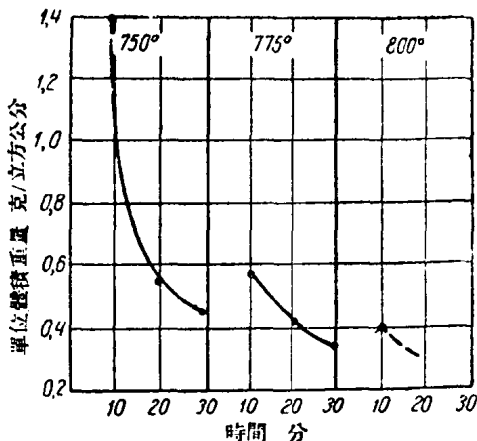


圖 14 泡沫玻璃的單位體積重量與平板玻璃粉燒成時間的關係

泡沫玻璃氣孔中氣相的成分

表 3

試樣編號	氣孔中之含量%體積				試樣編號	氣孔中之含量%體積			
	H_2S	SO_2	CO_2	O_2		H_2S	SO_2	CO_2	O_2
1	0	0	30.5	6.5	12	0	0	12.0	8.9
2	0	0	30.2	8.1	13	0	0	10.5	16.7
3	0	0	30.1	7.3	14	0	0	10.3	12.5
4	0	0	29.6	9.5	15	0	0	8.3	15.6
5	0	0	28.5	9.3	16	0	0	4.1	15.3
6	0	0	28.3	8.6	17	0	0	4.1	15.0
7	0	0	27.3	8.1	18	0	0	3.9	16.3
8	0	0	27.1	5.6	19	0	0	2.8	7.6
9	0	0	24.2	9.2	20	0	0	0	20.1
10	0	0	13.6	15.8	21	0	0	0	19.7
11	0	0	13.4	14.5	22	0	0	0	21.2

當測定泡沫玻璃氣孔中發泡劑氧化鈣的固體殘渣時，確定了氣泡中的氧化鈣