

“十二五”普通高等教育本科规划教材

泡沫玻璃 生产技术

郭宏伟 高档妮 莫祖学 著

PAOMO BOLI
SHENGCHAN JISHU



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育本科规划教材

泡沫玻璃生产技术

郭宏伟 高档妮 莫祖学 著



化学工业出版社

· 北京 ·

泡沫玻璃作为一种新型建筑材料,是21世纪世界各国崛起的新型建筑、高层及超高层建筑物理想的墙体吸音、保温、隔断材料,其应用范围和需求也越来越大。本书根据作者课题组十多年的教学和科研积累,充分论述了泡沫玻璃的理论知识、生产工艺、质量控制、应用领域及施工。对泡沫玻璃的组成、结构、性能及其应用作了深入、系统的阐述。本书内容全面,深入浅出,理论联系实际,全面反映了该领域国内外研究的最新成果和应用技术,具有很强的实用性。

本书为大专院校相关专业的教学用书。也可供从事泡沫玻璃材料研究的科研人员以及广大生产技术人员使用与参考。

图书在版编目(CIP)数据

泡沫玻璃生产技术/郭宏伟,高档妮,莫祖学著.
北京:化学工业出版社,2014.8

“十二五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-122-20745-6

I. ①泡… II. ①郭…②高…③莫… III. ①泡沫玻
璃-生产工艺-高等学校-教材 IV. ①TQ171.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第104373号

责任编辑:杨菁

文字编辑:徐雪华

责任校对:蒋宇

装帧设计:孙远博

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张10 字数238千字 2014年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

泡沫玻璃是由碎玻璃、发泡剂、改性添加剂和发泡促进剂等,经过细粉碎和均匀混合后,再经过高温熔化、发泡、退火而制成的多孔状无机非金属玻璃材料。泡沫玻璃具有防火、防水、无毒、耐腐蚀、防蛀、不老化、无放射性、绝缘、防磁波、防静电、机械强度高、与各类泥浆黏结性好的特性。泡沫玻璃已被广泛作为建筑外墙和屋面隔热、隔音、防水材料。

本教材是在编者多年对泡沫玻璃的研究及教学积累基础上,按照教学大纲和授课内容,以及自编的特种玻璃讲义,参考了大量的专著及文献编写而成。

本书按照泡沫玻璃的生产工艺流程为主线,充分论述了泡沫玻璃的理论知识、生产工艺、质量控制、应用领域及施工,内容全面,深入浅出。本书可供从事泡沫玻璃材料研究的科研人员,以及广大生产技术人员使用与参考,也可作为大专院校相关专业的教学参考书。

本书由郭宏伟、高档妮、莫祖学著。其中第1章、第2章、第6章由郭宏伟编写,第3章和第5章由高档妮编写,第4章由莫祖学编写。在本书编写过程中,韩方明、李宁、吴亮亮、程乐志、田鹏等为本书提供了大量翔实的资料和图片。刘盼、王宇飞为全书完成了大量的文稿打印及图表工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,经验不足,加之泡沫玻璃新材料的不断涌现,书中难免有不妥之处,欢迎使用本书的读者批评指正。

编 者

于陕西科技大学未央大学园区

2014年5月

第1章 绪论	1
1.1 保温节能的重要意义	1
1.1.1 建筑节能的意义	1
1.1.2 泡沫玻璃的节能环保意义	2
1.2 泡沫玻璃的定义	2
1.3 泡沫玻璃的分类	3
1.4 泡沫玻璃的发展历史	4
1.5 应用现状及发展前景	5
1.6 泡沫玻璃的研究与发展趋势	6
第2章 泡沫玻璃的性能及结构	7
2.1 泡沫玻璃的通性	7
2.1.1 玻璃态物质的特性	7
2.1.2 玻璃的结构	8
2.1.3 钠钙硅玻璃的结构	9
2.1.4 钠硼硅玻璃的结构	10
2.2 泡沫玻璃的显微结构	11
2.3 泡沫玻璃的颜色	12
2.4 泡沫玻璃的物理性能	13
2.4.1 密度	13
2.4.2 强度	16
2.4.3 导热性能	20
2.4.4 膨胀系数	22
2.4.5 其他性能	22
2.4.6 外观缺陷及其规定	26
第3章 泡沫玻璃配合料的组成	29
3.1 概述	29
3.2 富含玻璃相的原料	29
3.2.1 玻璃粉	29
3.2.2 粉煤灰	34
3.2.3 金属冶炼尾渣	35

3.2.4	电熔棕刚玉除尘粉	36
3.2.5	硼泥	37
3.2.6	煤矸石	37
3.3	发泡剂	38
3.3.1	发泡剂的选用	38
3.3.2	泡孔中气体的组成	39
3.3.3	发泡剂与玻璃料的相互作用	42
3.4	辅助原料	47
第4章	泡沫玻璃的生产工艺过程	52
4.1	概述	52
4.2	泡沫玻璃的制备工艺	52
4.2.1	主要工艺步骤	52
4.2.2	生产工艺流程	54
4.3	各种类型泡沫玻璃制品的生产方法	55
4.3.1	用废弃碎玻璃生产泡沫玻璃	55
4.3.2	用CRT玻璃生产泡沫玻璃	60
4.3.3	用矿渣生产泡沫玻璃	66
4.3.4	用粉煤灰生产泡沫玻璃	70
4.3.5	泡沫玻璃环保轻石材料的制备	71
4.3.6	高密度泡沫玻璃贴砖的制备	73
4.3.7	硼硅酸盐泡沫玻璃的制备	74
4.3.8	吸音泡沫玻璃的制备	76
4.3.9	夹丝泡沫玻璃的制备	77
4.3.10	具有硬壳层泡沫玻璃的制备	78
4.4	泡沫玻璃生产缺陷及质量控制	79
第5章	泡沫玻璃生产机械与设备	82
5.1	概述	82
5.2	粉碎机械	82
5.2.1	原料粉碎的作用	82
5.2.2	破碎机	84
5.2.3	球磨机	86
5.2.4	雷蒙磨	91
5.3	称量设备	94
5.3.1	称量的重要性	94
5.3.2	磅秤	94
5.3.3	电子自动秤	95

5.4	混料机	96
5.4.1	概述	96
5.4.2	桨叶式混合机	98
5.4.3	QH 式混合机	99
5.4.4	V 形混合机	100
5.5	模具	101
5.6	发泡窑	102
5.6.1	概述	102
5.6.2	电加热发泡窑	103
5.6.3	燃气发泡窑	104
5.7	退火窑	108
5.8	切割装置	110
5.9	其他设备	111
5.9.1	除尘设备	111
5.9.2	包装设备	113
第 6 章	泡沫玻璃的应用及施工	116
6.1	概述	116
6.2	建筑屋面保温隔热材料	117
6.3	建筑外墙外保温隔热材料	118
6.4	泡沫玻璃保温系统的施工过程	119
6.5	在吸声隔声工程上的应用及施工	120
6.5.1	隔声及吸声材料	120
6.5.2	隔声及吸声材料的安装	120
6.5.3	使用中应注意的问题	122
6.6	在大型储罐底部绝热层上的应用	123
6.7	在地铁集中供冷工程上的应用与施工	125
6.7.1	施工中应注意的问题	125
6.7.2	安装要求	125
6.8	在高原寒区路基边坡上的应用研究	126
6.9	在火力发电厂烟囱防腐中的应用与施工	129
6.9.1	施工工艺流程	129
6.9.2	施工方案	130
6.10	硼硅酸盐泡沫玻璃在化工设备上的应用	130
6.11	在地面保温体系中的应用及施工	132
6.12	在严寒地区隧道保温工程中的应用及施工	134
6.13	泡沫玻璃吸波材料的应用研究	134

6.14	在农垦方面的应用及施工	136
6.15	在宾馆、商场等无土绿化方面的应用	139
6.16	在高尔夫球场草坪养护方面的应用	139
6.17	作为填充材料的应用及施工	139
6.18	墙面装饰材料	142
6.18.1	规格尺寸及推荐厚度	143
6.18.2	施工方法	143
6.19	其他用途	144
参考文献		145

第 1 章 绪 论

1.1 保温节能的重要意义

节约能源、保护环境是我国的基本国策，是建设节约型社会的根本要求。2001 年 2 月原国家经贸委发布了国经贸运行 [2001] 99 号文《关于 2001 年建筑行业总量控制的实施意见》，明确表示 2001 年将关闭高污染、高能耗的小玻璃生产线 100 条。

节能，是指加强用能管理，采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以承受的措施，减少从能源生产到消费各个环节中的损失和浪费，更加有效、合理地利用能源。这既是《中华人民共和国节约能源法》对“节能”的法律规定，也是国际能源委员会的节能概念。节能不能简单地认为只是少用能。节能的核心是提高能源效率。从能源消费的角度，能源效率是指为终端用户提供的能源服务与所消耗的能源量之比。

1.1.1 建筑节能的意义

(1) 建筑节能是社会经济可持续发展的需要

能源短缺是制约我国经济发展的瓶颈。在我国，建筑是用能大户。建设部统计数字显示，我国每年城乡建设新建房屋近 20 亿平方米，其中 80% 以上为高能耗建筑；现有建筑近 400 亿平方米，95% 以上是高能耗建筑。我国新建建筑已经基本实现按节能标准设计，比例高达 95.7%，而施工阶段执行节能设计标准的比例仅为 53.8%。空调是住宅能耗的另一个重要方面，我国住宅空调总量年增加约 1100 万台，空调电耗在建筑能耗中所占的比例迅速上升。根据预测，今后 10 年我国城镇建成并投入使用的民用建筑至少为每年 8 亿平方米，如果全部安装空调或采暖设备，则 10 年增加的用电设备负荷将超过 1 亿千瓦，约为我国 2000 年发电能力的 1/3。建筑能耗占全国总能耗的比例将快速上升。

(2) 建筑节能是建设环境友好型社会的需要

近几十年来，燃烧矿物质燃料所产生的污染问题备受世界关注，各个发达国家的节能政策，也是以减少燃料燃烧的排放物为明确的目标。其原因众所周知，所排放的颗粒物及硫和氮的氧化物会危害人体健康，并造成环境酸化；而造成的二氧化碳积累，使地球温室效应不断加强，全球温度持续增高。在过去的 100 年内，地球表面温度升高了 0.5°C 。由于温室气体浓度的增高，预计每 10 年可能要增温 $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ，即地球还会加速变暖。地球变暖的后果是极为严重的；水旱灾害更加频繁和猛烈；森林和草原的火灾也会更多；两极冰层将会融缩，高山冰川会后退或者消失，使海平面升高，一些低地和岛国被淹没；大量物种迅速灭绝等，使人类生存面临重大危机，为了拯救环境，必须加强建筑节能。

我国，煤炭占能源消费总量的 75% 左右。大气污染以煤烟型为主，以灰尘和酸雨的危害最大。几个大气污染指标，如悬浮颗粒、降尘、二氧化碳和氮氧化物，北方城市高于南方城市，采暖期重于非采暖期。上述污染物是许多疾病的致病因素，对居民健康造成严重危害。我国排放的二氧化碳已占世界第二位，建筑用能的二氧化碳的排放量占到全国用能排放量的 25%。随着建筑物的大量建造，情况可能还会进一步恶化，前景堪忧。所以，实施建

筑节能是保护环境,建设环境友好型社会的必然要求。

(3) 建筑节能是改善建筑热环境的需要

随着经济发展和人民生活水平的提高,舒适的建筑热环境日益成为人们的需要。在发达国家,适宜的室温已成为一种基本需要,他们通过一年四季有效利用优质能源,满足了这种需要。在我国,这种需要也在日益迫切,这与我国大部分地区冬冷夏热的气候特点关系很大。与世界同纬度的地区相比,1月份平均气温我国东北地区要低 $14\sim 18^{\circ}\text{C}$,黄河中下游要低 $10\sim 14^{\circ}\text{C}$,长江以南要低 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$,东部沿海地区要低 5°C 左右;而7月份平均气温,我国绝大部分地区却要比同纬度地区高出 $1.3\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ 。加之热天整个东北地区湿度均大,冷天东南地区仍保持高湿度,形成了我国夏天闷热、冬天潮凉的气候特征,这种气候需要冬天采暖,夏天降温,耗能巨大,使我国能源供应紧张的状况雪上加霜。

改善热环境必须与节约建筑能耗相结合。要在走逐步改善建筑热舒适条件下节约能源,也只有节约能源才有可能改善热舒适条件。对于新建筑及室温满足要求的建筑,着重在节约能源;对于冬季室温过低结露的建筑和夏季室温过高的建筑,首先要改善建筑热环境,也要注意节约能源;在夏热冬冷区及农村,则应在节约能源条件下逐步改善建筑热环境。从而实现我国“不断提高建筑用能源利用效率,改善居住热舒适条件,促进城乡建设、国民经济和生态环境的协调发展”的目标。

(4) 建筑节能是发展建筑业的需要

实践证明,建筑技术、建筑产品的发展都与建筑节能的发展息息相关。比如在建筑节能的大潮中产生的外墙内保温技术、空心砖墙及复合墙技术、加气混凝土墙技术、混凝土轻质砌块墙体技术、供热管网技术、锅炉连续供暖辅以间歇调节技术、太阳能热水器、农村太阳房建筑技术等。材料设备、建筑构造、施工安装等方面都在进行大规模的革新,许多新的保温材料、密封材料、节能设备、保温管道、自动调控元件大量进入建筑市场。

1.1.2 泡沫玻璃的节能环保意义

泡沫玻璃材料的研制立足于废物利用,改善环境。目前,我国每年粉煤灰排放量约8000~12000万吨,居世界第二位,这些粉煤灰的排放占用了大量的土地,并对环境造成了一定的污染。我国目前的综合利用率仅有 $30\%\sim 40\%$ 。而废玻璃的回收利用率更低。国外发达国家已经较好地将其用于建筑材料的生产上。与其相比,我国的利用水平尚有差距。在我国每年产生的大量固体垃圾中,包括了各类民用、建筑、医用等玻璃废弃物,而这些有用的废弃物并没有得到有效回收利用,只是被堆积、乱扔和抛弃掉,这不仅对环境带来严重污染,而且也造成大量资源浪费。泡沫玻璃的诞生及其研制成功为消化废玻璃和粉煤灰开辟了一条有效途径,使社会资源得以再生利用,并且较好地解决了固态垃圾对环境的污染,形成了较好的循环经济产品。泡沫玻璃保温隔热建筑材料因其具有轻质、节能、节土、利废、环保的特点,成为近年来建筑行业发展新重点。因而,泡沫玻璃有了新型“环境材料”的美誉。“十一五”期间,国家建设部公告第659号,已将泡沫玻璃列为建设事业建筑节能与新能源开发利用技术领域推广应用技术。

1.2 泡沫玻璃的定义

泡沫玻璃是由碎玻璃、发泡剂、改性添加剂和发泡促进剂等,经过细粉碎和均匀混合

后,再经过高温熔化,发泡、退火而制成的无机非金属玻璃材料,如图 1-1 所示。其中吸声泡沫玻璃为 50% 以上开孔气泡,绝热泡沫玻璃为 75% 以上的闭孔气泡,制品密度为 $160 \sim 220 \text{ kg/m}^3$,可以根据使用的要求,通过改变生产技术参数而对其性能要求进行调整。



图 1-1 泡沫玻璃的图片

泡沫玻璃是一种性能优越的绝热(保冷)、吸声、防潮、防火的轻质高强建筑材料和装饰材料,使用温度范围为零下 196°C 到 450°C ,A 级不燃与建筑物同寿命,热导率为 $0.058 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,透湿系数几乎为 0。虽然其他新型隔热材料层出不穷,但是泡沫玻璃以其永久性、安全性、高可靠性在低热绝缘、防潮工程、吸声等领域占据着越来越重要的地位。它的生产是废弃固体材料再利用,是保护环境并获得丰厚经济利益的范例。

泡沫玻璃是一种以废平板玻璃、瓶罐玻璃、电子玻璃等原料,经高温发泡成型的多孔无机非金属材料,具有防火、防水,无毒、耐腐蚀、防蛀、不老化,无放射性、绝缘、防磁波、防静电、机械强度高、与各类泥浆黏结性好的特性。是一种性能稳定的建筑外墙和屋面隔热、隔音、防水材料。熔岩泡沫玻璃:用珍珠岩、黑曜岩等天然熔岩或工业废渣作基础原料,也可加入一定量的玻璃粉,以降低发泡温度,用芒硝等作发泡剂制成的泡沫玻璃。一般可作建筑及工业设备的保温材料和墙体材料等。

1.3 泡沫玻璃的分类

泡沫玻璃根据用途可分为隔热泡沫玻璃和吸声泡沫玻璃。

根据基础原料可分为普通泡沫玻璃、石英泡沫玻璃、熔窑泡沫玻璃。

根据结构和物化性能的不同来分,可分为隔热保温型、保冷型、吸声型、装饰型和粒状填充料。

根据颜色可以分为白色、棕色、黄色、蓝色、纯黑色等。

根据外形可以分为平板(用 P 表示)、管壳(用 G 表示)和弧形板(用 H 表示),其中平板产品主要规格:长度 $300 \sim 600 \text{ mm}$,宽度 $200 \sim 450 \text{ mm}$,厚度 $30 \sim 120 \text{ mm}$;管壳产品主要规格:长度 $300 \sim 600 \text{ mm}$,公称内径 $180 \sim 480 \text{ mm}$,公称内径 $\leq 102 \text{ mm}$,厚度 $25 \sim 120 \text{ mm}$;公称内径 $\geq 102 \text{ mm}$,厚度 $40 \sim 120 \text{ mm}$;弧形板产品主要规格:长度 $300 \sim 600 \text{ mm}$;公称内径 $\geq 480 \text{ mm}$;厚度 $40 \sim 120 \text{ mm}$ 。

根据泡沫玻璃密度可以分为:140 号(密度 $\leq 140 \text{ kg/m}^3$)、160 号($140 \text{ kg/m}^3 \leq \text{密度} \leq 160 \text{ kg/m}^3$)、180 号($160 \text{ kg/m}^3 \leq \text{密度} \leq 180 \text{ kg/m}^3$)和 200 号($180 \text{ kg/m}^3 \leq \text{密度} \leq 200 \text{ kg/m}^3$),对于特殊用途密度可以大于 200 kg/m^3 ;按产品外观质量和物理性能分为优等品(用 A 表示)

和合格品（用 B 表示），其产品的物理性能应符合 JC/647—2005 的规定（如表 1-1 所示）。

表 1-1 JC/647—2005 泡沫玻璃的物理性能指标

项目	分类	140		160		180	200
	等级	优等(A)	合格(B)	优等(A)	合格(B)	合格(B)	合格(B)
体积密度/(kg/m ³)	≤	140		160		180	200
抗压强度/MPa	≥	0.4		0.5	0.4	0.6	0.8
抗折强度/MPa	≥	0.3		0.5	0.4	0.6	0.8
体积吸水率/%	≤	0.5		0.5	0.5	0.5	0.5
透湿系数/[Ng/(Pa·s·m)]	≤	0.007	0.05	0.007	0.05	0.05	0.05
热导率/[W/(m·K)]	≤						
308K(35℃)		0.048	0.052	0.054	0.064	0.066	0.070
298K(25℃)		0.046	0.050	0.052	0.062	0.064	0.068
233K(-40℃)		0.037	0.040	0.042	0.052	0.054	0.058

1.4 泡沫玻璃的发展历史

泡沫玻璃出现较早，在 1935 年法国圣哥本（St.Gobain）公司在其本国申请了泡沫玻璃的第一份专利，专利申请第二年又发表了该公司 Bernard Long 的研究成果。当时的制品是用粉碎的玻璃粉作为原料，以碳粉和碳酸钙作为发泡剂，两者混合之后放在耐热模具中加热，使之发泡膨胀，然后退火，便制成轻石状的材料，但外观和性能都不均匀，只不过用来作为混凝土的轻骨料，从那时起就称之为泡沫玻璃。这种方法称为“一步法”，即从装料到退火在同一窑炉和同一模具中进行，也称为 B. Long 粉末烧结法。

之后，美国、德国、英国、前苏联、捷克等国也发表了很多的专利和研究报告。其中美国的匹茨堡-康宁（Pittsburgh-Corning）公司以碳素作发泡剂。PCC 采用的制造方法被称为“二步法”，即将发泡好的半成品脱模后再进行退火，制成了具有封闭气孔的低密度泡沫玻璃，最早投入工业化生产，产品从 20 世纪 50 年代就进入国际市场，商品名称“Foam glass”。二步法的优点是发泡和退火阶段分别独立控制，相互不受牵制，而且可以大大节省模具。目前泡沫玻璃的生产大部分采用二步法，在冷保温的设备、管道、冷冻、船舱等领域广泛应用。美国还制成了一种新型的泡沫玻璃隔墙材料，广泛应用于高层建筑的房间间隔设施。这种隔墙材料的表面为二层平板玻璃。这种新颖的材料既美观，又具有良好的隔音、隔热性能。

德国的高温发泡型泡沫玻璃是由玻璃液直接发泡，将玻璃配合料与发泡剂混合均匀，加入熔炉中熔化。在熔融过程中施加压力，使气体不断从玻璃液中排出。当熔融好的玻璃从窑炉中流出时，溶解在玻璃液中的饱和气体就开始发泡，使其压力降低为大气压。此时，可形成连续的泡沫玻璃带。然后切割成所需大小并进行退火。

英国提出用浮法工艺生产泡沫玻璃，生产带状泡沫玻璃和中间夹有金属网的夹丝型泡沫玻璃。发泡剂用 Na₂SO₄ 或 CaSO₄。

前苏联也是泡沫玻璃的主要生产国，特别注重于工业废渣的综合利用。明斯克建材研究所长期以来对泡沫玻璃的特征和工艺做了大量的研究工作。除了绝热制品以外，还开发可吸声、饰面和粒状泡沫玻璃品种，饰面用泡沫玻璃用作建筑物的内外墙装饰，还可以拼成大幅

艺术图案。前苏联还成功地采用工业废渣作为发泡剂,在旋转炉中将玻璃发泡制造颗粒状泡沫玻璃。对于降低产品成本和提高经济效益迈出了新的一步。

日本从1945年以后才逐渐重视泡沫玻璃,旭玻璃公司和日本玻璃公司(日本硝子)这时着手研究泡沫玻璃,与此同时,旭玻璃公司买到圣哥本公司粉末烧成法的主要专利技术的使用权,同日本玻璃公司共同创办永昌玻璃厂,使用碳酸钙作为发泡剂,制成白色和红紫色的泡沫玻璃制品投入市场。随后采用了旭玻璃研究所吉川弘等人的基础研究成果,使日本生产的泡沫玻璃质量与PCC制品相比,毫不逊色,生产技术进入了一个新阶段。

美国是最早批量生产泡沫玻璃的国家之一,曾垄断国际泡沫玻璃市场长达50多年之久。日本旭硝子公司虽然曾获得St. Gobain(法国圣戈班)公司的专利使用权,生产出泡沫玻璃,但在日本市场大多仍销售美国生产的泡沫玻璃。

法国、捷克、英国、德国和前苏联等许多国家在20世纪30年代先后均发表了很多有关泡沫玻璃的专利,除了推出粉末法外,还有吹入气体法和连续制造法。

近几十年来,世界各国又发展了异型泡沫玻璃、彩色吸音泡沫玻璃、叠层泡沫玻璃、泡沫玻璃发泡粒、有金属层玻璃发泡粒、隔离热辐射泡沫玻璃;另外还有一种泡沫微晶玻璃材料等纷纷亮相,受到人们的关注及青睐。

当前国际上仍广泛采用美国推出的“二步法”制造泡沫玻璃。其优点是发泡和退火阶段均可以独立控制,互不牵制,并可节约模具。这种发泡后脱模再退火的二步法使模具不必经过长时间的退火周期,大为减少用模数量,降低生产成本。

目前,泡沫玻璃已在欧、美、日等地区及国家大量生产和广泛应用,其中美国、俄罗斯、英国、匈牙利、法国、捷克、日本、德国等玻璃工业发达国家已成为泡沫玻璃主要的生产、消费、出口大国。

从20世纪70年代中期,泡沫玻璃在我国进行小批量生产以来,经历了几十年的发展。毛坯产量已从初期的 $300\text{m}^3/\text{年}$ 增加到约 $50\times 10^4\text{m}^3/\text{年}$,单窑生产能力也从 $300\text{m}^3/\text{年}$ 提高到 $1\times 10^4\text{m}^3/\text{年}$ 。产品品种也从单一的绝热泡沫玻璃,相继开发了吸声泡沫玻璃、建筑保温泡沫玻璃、低硼硅泡沫玻璃、高硼硅泡沫玻璃、中性泡沫玻璃、清洁用泡沫玻璃、彩色泡沫玻璃等产品。产品的应用市场也从乙烯深冷设备保冷发展到冶金、冷库热力、地下工程、隧道、建筑墙体和屋面等领域,并且大量出口国外。

1.5 应用现状及发展前景

由于泡沫玻璃优良的物理、化学性能,使其广泛应用于石油、化工、电力、国防军工等领域,也可直接用来制作手脚美容奇石、大型雕塑、各种工程构件、绿化墙等。泡沫玻璃作为一种绝热保温材料,具有强度高、热导率低、耐水耐潮、耐侵蚀等优异性能,可用于冷库、地下输油管道及各类建筑物的墙体与顶棚,起绝热保温作用。

吸声消音用泡沫玻璃不仅能起到良好的降噪作用,而且具有质轻、不燃、不腐及受潮、吸水后不软化等特点,因此被广泛用于游泳馆、地铁、食品和纺织车间等潮湿、防火并有低噪要求的建筑工程中。

建筑装饰用泡沫玻璃具有质轻、美观、耐热抗冻和防污自洁等诸多优异性能,是一种理想的墙面装饰材料。

与此同时,吸声消音用和绝热保温用泡沫玻璃在适当的工艺下也可做成彩色制品,既起

到吸声、保温作用，又可以作为一种良好的装饰材料，具有双重作用。

环保轻石作为一种新型泡沫玻璃，其可以广泛应用于农垦方面。利用环保轻石进行农作物、蔬菜类的无农药栽培，日本最近已总结出在多种植物试验上取得成功的案例。因此，寻找新的廉价原料，以及进一步提升泡沫玻璃的各项性能，是以后泡沫玻璃的研究方向。此外，进一步制定和健全泡沫玻璃相关产品的标准及施工规范将是扩大泡沫玻璃使用范围亟待解决的问题。

1.6 泡沫玻璃的研究与发展趋势

立足于可持续发展，保护环境，有效利用资源和节约能源，解决环境恶化，资源匮乏和能源危机等现实问题为背景，泡沫玻璃的研究正在被广泛关注。虽然已经开展了大量研究工作，尝试了多种制备方法，取得了较大的成绩和进步，并开发出了多种相关产品，但目前我国的泡沫玻璃生产技术还不够成熟，在现有的研究及应用基础上，还应该加强以下几个方面的研究：

(1) 降低生产成本

随着人们节能环保意识的提高，泡沫玻璃无论是作为轻质保温隔热材料，还是高强建筑承重材料都将获得更加广泛的使用。但是，泡沫玻璃的生产成本较其他轻质保温材料仍然较高，这严重阻碍了泡沫玻璃的推广应用。针对目前商品化的轻质保温隔热泡沫玻璃，除了配方的研究，迫切需要研究如何改进工艺参数、设计更加合理的工艺路线、提高成品率等工程问题。

(2) 寻找新的生产原料

充分利用废旧原料，比如利用废旧显像管玻璃生产泡沫微晶玻璃应该得到大力提倡和推广。另外，充分借鉴泡沫玻璃的成熟生产工艺，从产品的力学性能、外观颜色等方面进一步完善泡沫玻璃新产品的性能。而采用工业废渣生产泡沫玻璃，导致发泡温度提高，同样造成了成本的上升，甚至得不偿失。因此，工业废渣生产泡沫玻璃还需进一步加强实验室研究，其方向为如何实现低温发泡，为未来工业化生产时减少燃料消耗、降低成本进行实验探索。

(3) 低温化生产，工艺简化

在满足产品使用要求的条件下，应尽可能地降低发泡温度。一般平板和瓶罐玻璃的软化温度为 650°C ，而一般生产的泡沫玻璃的发泡温度都在 800°C 以上。降低发泡温度可以节约能源，节约生产成本。另一方面，在泡沫玻璃的制备工艺上，在满足产品性能的前提下，应该简化制备工艺，尽量采用无模发泡工艺，不仅降低了模具的投入，又减少了能耗。此外，通过计算机优化泡沫玻璃的切割尺寸。通过模具设计，设计出不必切割的泡沫玻璃的生产工艺也需大力提倡使用。

(4) 寻找新的用途

当前所生产的泡沫玻璃和泡沫微晶玻璃基本都用在建筑和石化领域。像用泡沫微晶玻璃做 HF 气体的吸收材料及装置的开发和利用，也应该大力提倡。另外，充分利用泡沫微晶玻璃的多孔性，高强度的性能特点，将其用作过滤材料、生物材料载体等应该引起人们的重视。除此之外，对国内泡沫玻璃产业的发展来讲，必须提高产品质量，扩大规模。在未来的发展中，应做好合理布局，避免重复上马，使泡沫玻璃产业在我国能够良性发展。

第 2 章 泡沫玻璃的性能及结构

2.1 泡沫玻璃的通性

泡沫玻璃的物理化学性能不仅决定于其化学组成，而且与玻璃结构有密切的联系。只有充分认识玻璃的结构，掌握玻璃成分、结构、性能三者之间的内在联系，才能通过改变化学成分、热历史，或利用某些物理、化学处理，制取符合预定要求的物理化学性能的泡沫玻璃材料或制品。普通钠钙硅玻璃常用于制备闭孔结构的泡沫玻璃，而硼酸盐及硼硅酸盐玻璃常用于制备具有化学稳定性要求高、耐温高、强度高等特殊用途的特种泡沫玻璃。

2.1.1 玻璃态物质的特性

玻璃是一种具有无规则结构的非晶态固体，其原子不像晶体那样在空间作长程有序的排列，而近似于液体那样具有短程有序。玻璃像固体保持一定的外形，而不像液体那样能在本身的重力作用下流动。

玻璃态物质具有以下五个特性：

(1) 各向同性

玻璃态物质的质点排列总的说是无规则的，是统计均匀的，因此，它的物理化学性质（如强度、导热系数、线膨胀系数、弹性模量等）在任何方向都是相同的。

(2) 无固定熔点

玻璃态物质由固体转变为液体是在一定温度区域（软化温度范围）内进行的，它与结晶态物质不同，没有确定的熔点。泡沫玻璃的发泡同样也是在一个比较宽的温度段下发泡。根据最终发泡试样的密度、强度等指标确定泡沫玻璃的发泡最高温度。

(3) 亚稳性

玻璃态物质一般是由熔融体过冷却而得到。在冷却过程中黏度急剧增大，质点来不及作有规则排列而形成晶体，没有释出结晶潜热（凝固热），因此，玻璃态物质比相应的结晶态物质含有较大的能量。它不是处于能量最低的稳定状态，而属于亚稳状态。这就给制备微晶泡沫玻璃提供了理论依据。

(4) 变化的可逆性

玻璃态物质从熔融状态冷却（或相反加热）过程中，其物理化学性质产生逐渐和连续的变化，而且是可逆的。图 2-1 是物质从熔融状态冷却，在冷却过程中内能与体积的变化情况。

从图 2-1 可以看出，在结晶情况下，从熔融态（液体）到固态过程中，内能与体积（或其他物理化学性质）在它的熔点发生突变（沿 ABCD 变化）。而冷却形成玻璃时，其内能和体积（或其他物理化学性质）却是连续的和逐渐的变化（沿 ABKFE 变化）。KF 区域一般称“转变区”（一般以 $T_g \sim T_f$ 温度区表示），是玻璃态物质所特有的。玻璃某些性能（如密度、折射率、黏度等）随着这一区间（或其附近）的温度变化的快慢而变化。例如玻璃的体积，随玻璃熔体降温速度的增大而增大（如图 2-2 所示）。

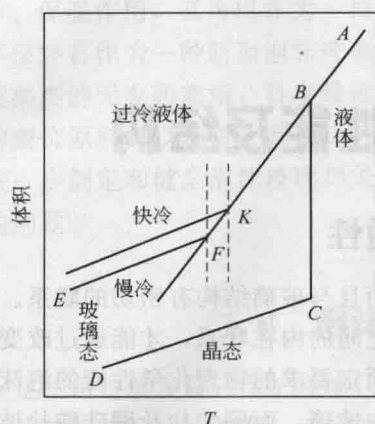


图 2-1 物质内能与体积随温度的变化

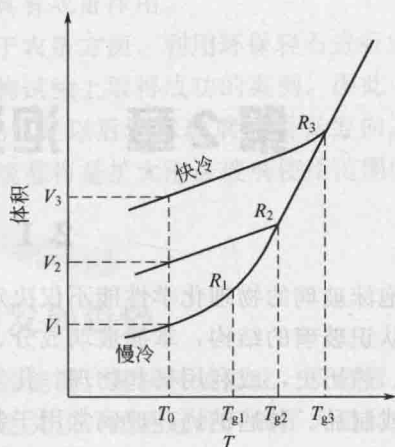


图 2-2 不同冷却速度下玻璃的体积与温度的关系

从图 2-2 可以看出，玻璃在温度 T_0 的体积可能是 V_1 、 V_2 或 V_3 ，它决定于玻璃的降温速度。还可以看出，玻璃的转变温度也随降温速度的增大而增高。因此 T_g 温度与试验条件有关。

由上可知，玻璃在室温时的某些物理性能与转变区间的热历史有密切的关系，它对玻璃的性质有重要的意义。对于泡沫玻璃来讲，良好的退火是保证其优良力学性能的关键。

(5) 可变性

玻璃的性质（在一定范围内）随成分发生连续和逐渐的变化。即玻璃可以由固体向熔融态或相反过程多次进行，而不会有新相生成。泡沫玻璃即利用玻璃这一特性经过加工发泡后制备而成。

2.1.2 玻璃的结构

人们对玻璃结构的认识，是一个实践、认识、再实践、再认识，并不断深化的过程。多年以来，人们曾提出过各种有关玻璃结构的学说，但由于涉及的问题比较复杂，到目前为止还没有完全一致的结论。目前，大家较为认可的是晶子学说和无规则网络学说。

(1) 晶子学说

列别捷夫在研究光学玻璃退火中发现，在玻璃折射率随温度变化的曲线上，于 520°C 附近出现突然的变化。他把这一现象解释为玻璃中的石英“微晶”发生晶形转变所致。因为 β -石英与 α -石英之间的转变温度为 573°C ，他认为玻璃是由无数“晶子”所组成。晶子是具有晶格变形的有序排列区域，分散在无定形介质中，从“晶子”部分到无定形部分是逐步过渡的，两者之间并无明显界线。晶子学说为 X 射线结构分析数据所证实，玻璃的 X 射线衍射图，一般发生宽的（或弥散的）衍射峰，与相应晶体的强烈尖锐的衍射峰有明显的不同，但二者峰值所处的位置基本是相同的（参见图 2-3）。

(2) 无规则网络学说

1932 年查哈里阿森提出了无规则网络学说。他是借助于哥尔德希密特的离子结晶化学原理，并参照玻璃的某些性能（如硬度、热传导、电绝缘性等）与相应晶体的相似性而提出来的。认为像石英晶体一样，熔融石英玻璃的基本结构单元也是硅氧四面体，玻璃被看作是

由硅氧四面体为结构单元的三维空间网络所组成，但其排列是无序的，缺乏对称性和周期性的重复，故不同于晶态石英结构。当熔融石英玻璃中加入碱金属或碱土金属氧化物时，硅氧网络断裂，碱金属或碱土金属离子均匀而无序地分布于某些硅氧四面体之间的空隙中，以维持网络中局部的电中性（见图 2-4）。对硼酸盐与磷酸盐玻璃也作了类似的描述。把简单的 B_2O_5 和 P_2O_5 玻璃看成是分别由硼氧三角体 $[BO_3]$ 和磷氧四面体 $[PO_4]$ 连结的无序的两度空间网络。图 2-4 是无规则网络学说的玻璃结构模型。

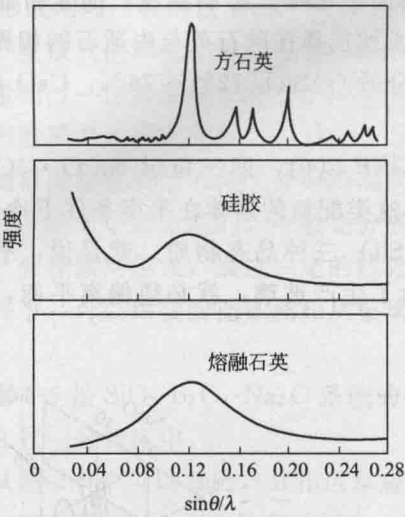


图 2-3 方石英、硅氧凝胶和熔融石英 X 射线衍射图

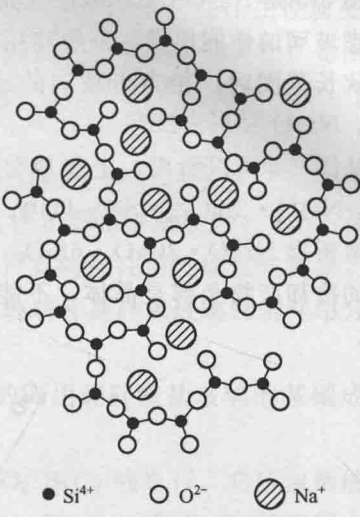


图 2-4 无规则网络学说的钠硅酸盐玻璃结构模型

后来瓦伦通过一系列的 X 射线结构分析数据证实了无规则网络学说的基本观点。无规则网络学说宏观上强调了玻璃中多面体相互间排列的连续性、均匀性和无序性方面。这可以说明玻璃的各向同性，以及玻璃性质随成分变化的连续性等基本特性。因此，这个学说获得较为广泛的应用，流传较广。

从目前有关玻璃性质及其玻璃结构的研究资料来看，可以认为短程有序和长程无序是玻璃态物质结构的特点。在宏观上玻璃主要表现在无序均匀和连续性方面，而在微观上它又是有序、微不均匀和不连续性的。

晶子学说强调玻璃的有序性、不均性和不连续性方面，它反映了玻璃结构的另一重要特性。尤其是发现微不均匀性是玻璃的普遍现象之后，晶子学说得到更为有力的支持。

近代由于使用了电子显微镜等一些新的结构分析仪器，发现了液相分离（分相）是玻璃形成系统中的普遍存在现象之后，玻璃结构理论进入了一个崭新的阶段，有人誉之为是玻璃结构概念的一次革命。分相是指玻璃在冷却或热处理过程中，内部形成两个互不相溶的液相（玻璃相）。玻璃中的分相大都发生在相平衡图中液相线以下，在热力学上也处于亚稳态，可称为亚稳相。

2.1.3 钠钙硅玻璃的结构

在碱硅二元玻璃中加入碱土金属氧化物时，例如钠硅玻璃中加入 CaO 时，使玻璃的结构和性质发生明显的变化，主要表现在结构的加强，一系列物理化学性能变好，成为各种实