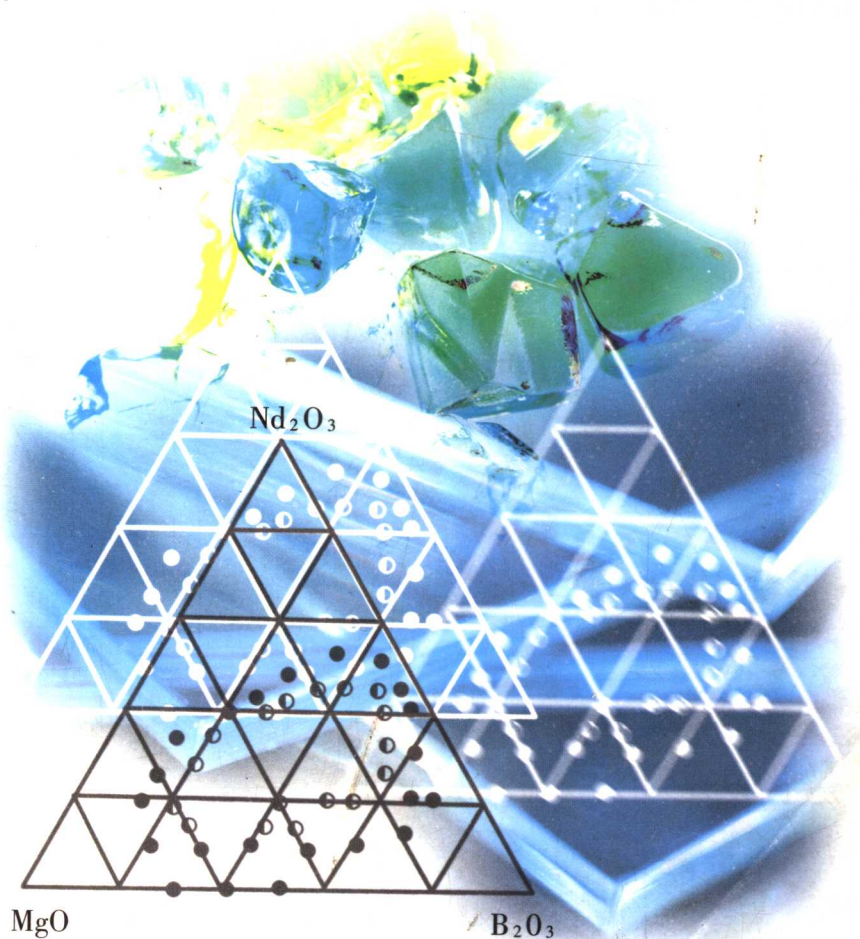


· 高等学校专业教材 ·

玻璃工艺学

· 西北轻工业学院 主编 ·



 中国轻工业出版社

高等学校专业教材

玻璃工艺学

西北轻工业学院 主编

中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

玻璃工艺学/西北轻工业学院主编.-北京:中国轻工业出版社,1982.1(2000.1重印)

高等学校专业教材

ISBN 7-5019-0179-1

I.玻… II.西… III.玻璃-生产工艺-高等学校-教材 IV.TQ171.1

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第03171号

责任编辑:朱骏

责任终审:滕炎福 封面设计:崔云

*

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印刷:三河市艺苑印刷厂

经销:各地新华书店

版次:1982年1月第1版 2000年1月第9次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:40

字数:906千字 印数:44201—47200

书号:ISBN 7-5019-0179-1/TS·0113 定价:61.00元

·如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换·

前 言

本教材由西北轻工业学院、大连轻工业学院、齐齐哈尔轻工学院，并邀请轻工业部设计院、北京玻璃总厂、上海轻工业专科学校、上海玻璃公司有关同志，根据共同制定的编写大纲联合编写，经轻工业部组织的日用玻璃专业教材编审委员会审定。参加编写的人员有金效先、袁怡松、王承遇、崔茂林、王在德、陶瑛、郑华琴、武广富、陈国新、周忠慎、许淑惠、沈长治、江朗、杨慰椿、俞包庭等，由崔茂林主编，全书由王裕光主审，第一编由庄柄群主审。

本教材供轻工业院校日用玻璃专业教学使用，也可以供有关研究人员、工厂技术人员参考。

本教材以原北京轻工业学院主编的玻璃工艺学为基础，结合十几年来玻璃工业的发展，加强基础理论和新工艺部分，力求理论联系实际，适合国内情况。全书共分三编：第一编为玻璃的物理化学，着重于组成、结构、性质三者的联系；第二编为玻璃工艺学基础，主要叙述有关工艺原理与工艺因素的影响；第三编为各种制品的生产，叙述工艺流程与生产技术。本书内容较广，篇幅较多，在采用时可根据实际情况有所取舍。当学时数不足时，可将第三编作为课外阅读材料。

在编写过程中，我们得到上海化工学院、湖北建工学院、北京工业大学、北京玻璃研究所、厦门玻璃厂等单位的大力支持和指导，在此表示衷心感谢。

由于水平有限，书中难免存在缺点和错误，希望读者批评指正。

编 者

绪 论

玻璃是熔融、冷却、固化的非结晶(在特定条件下也可能成为晶态)无机物,具有一系列非常可贵的特性:透明,坚硬,良好的耐蚀,耐热和电学、光学性质;能够用多种成形和加工方法制成各种形状和大小的制品;可以通过调整化学组成改变其性质,以适应不同的使用要求。特别是制造玻璃的原料丰富,价格低廉,因此获得了极其广泛的应用,在国民经济中起着重要的作用。

日用玻璃,包括瓶罐、器皿、保温瓶、工艺美术品等,已成为人们生活用品的一部分。其中玻璃瓶罐,也是食品工业、化学工业、医药工业、文教用品工业,大量采用的包装容器。

窗玻璃,平板玻璃,空心玻璃砖,饰面板和隔声、隔热的泡沫玻璃,在现代建筑中得到了普遍的采用。钢化玻璃,磨光玻璃,夹层玻璃,高质量的平板玻璃,装配着各种运输工具的风挡和门窗。各种颜色信号玻璃在海、陆、空交通中起着“指挥员”的作用。

电真空玻璃和照明玻璃,充分利用了玻璃的气密、透明、绝缘、易于密封和容易抽真空等特性,是制造电子管、电视机、电灯等不可取代的材料。

光学玻璃用于制造光学仪器的核心部件,广泛地应用于科研、国防、工业生产、测量等各方面。显微镜、望远镜、照相机、光谱仪和各种复杂的光学仪器,大大地改变了科学研究的条件和方法,使科学家作出了许多发现和发明。电影放映机,高质量的眼镜片都是用光学玻璃制造的。

玻璃化学仪器、温度计,是化学、生物学、医学、物理学工作者必备的实验用具。玻璃大型设备及管道,是化学工业上耐蚀、耐温的优良器材。

玻璃纤维、玻璃棉及其纺织品,是电器绝缘、化工过滤和隔声、隔热、耐蚀的优良材料。它们与各种树脂制成的玻璃钢,质量轻、强度高、耐蚀、耐热,用以制造绝缘件和各种壳体。

随着科学技术的发展,新品种玻璃不断出现,例如感光照相和印刷制板玻璃;耐热性好、硬度大、强度高的微晶玻璃;高折射、低色散或低折射、高色散的光学玻璃;透紫外线和透红外线玻璃等等。玻璃的应用日益扩大,愈来愈成为重要的材料。

玻璃的制造已有五千年以上的历史,一般认为最早的制造者是古代的埃及人,他们用泥罐熔融,以捏塑或压制方法制造饰物和简单器皿。

纪元前一世纪时,罗马人发明用铁管吹制玻璃,这一创造对玻璃的发展建立了极其巨大的功勋。

十一世纪到十五世纪,玻璃的制造中心在威尼斯。1291年威尼斯政府为了技术保密,把玻璃工厂集中在穆兰诺岛,当时生产窗玻璃,玻璃瓶,玻璃镜和其它装饰玻璃等,制品十分精美,具有高度艺术价值。

十六世纪以后,穆兰诺岛工人开始逃亡到国外,玻璃的制造技术也随之得到了传播。十七世纪时,欧洲许多国家都建立了玻璃工厂,并开始用煤代替木柴燃料,玻璃工业又

有了很大的发展。

1790年瑞士人狄南(Guinand)发明用搅拌法制造光学玻璃,为熔制高均匀度的玻璃开创了新的途径。

十八世纪后期,由于蒸汽机的发明,机械工业和化学工业不断地发展,路布兰制碱法问世,玻璃的制造技术也得到了进一步的提高。十九世纪中叶,发生炉煤气和蓄热室池炉应用于玻璃的连续生产。随后,出现了机械成形和加工。氨法制碱以及耐火材料质量的提高,这些对于玻璃工业的发展都起了重大的促进作用。

十九世纪末,德国人阿贝(Abbe)和肖特(Schott)对光学玻璃进行了系统的研究,为建立玻璃的科学基础作出了杰出的贡献。

二十世纪以来,玻璃的生产技术获得了极其迅速的发展,玻璃工艺学逐渐成为专门学科。目前多数制品的生产已达到完全自动控制的程度,玻璃的科学研究也达到了很高的水平。

我国在东周时代已能制造玻璃珠、玻璃璧等饰物,玻璃组成中都含有氧化铅和氧化钡,与其它国家的古代玻璃有明显的区别。

在半封建半殖民地的旧中国,玻璃工业十分落后,当时除了极少数几个用机器生产的窗玻璃和瓶罐玻璃工厂外,其余为数不多的玻璃工厂还处于手工生产状态,设备简陋,劳动条件很差,制品的品种不多。解放前夕在帝国主义和反动派统治的剥削和压迫下,玻璃生产几乎濒于停顿的境地。

解放以后,我国玻璃工业生产,科研和技术力量的培养等各方面都得到了飞跃的发展,取得了很大的成绩。许多自行设计的大型玻璃工厂已经投入生产。玻璃的科学研究与设计机构以及高等学校的玻璃专业已经建立起来。工人和工程技术人员的队伍不断增长,生产技术和科研水平逐年提高。现在某些制品,如玻璃瓶罐的生产已达到自动化的程度,玻璃的品种基本上已能适应我国的要求。我国的玻璃原料和能源都很丰富,玻璃工业的发展有着广阔的前途。但是科技水平和工业发达的国家相比还有一定的差距,生产发展还不能适应人民日益增长的生活需要和各项建设事业与科学技术发展的需要。为此,必须积极开展玻璃的科学研究,提高生产技术,改革生产工艺,改进生产设备,提高耐火材料质量、熔窑效率和劳动生产率,研制新品种玻璃,使玻璃工业达到更高的水平。

目 录

绪 论	1
-----	---

第一编 玻璃的物理化学

第一章 玻璃结构	1
1-1 玻璃态的特性	1
1-2 玻璃的结构学说	2
1-3 硅酸盐玻璃结构	4
1-4 硼酸盐玻璃结构	6
1-5 磷酸盐玻璃结构	10
1-6 其它氧化物玻璃结构	11
1-7 逆性玻璃	12
1-8 硫属化合物玻璃	14
1-9 卤化物玻璃	15
1-10 玻璃结构中阳离子的分类	16
1-11 各种氧化物在玻璃中的作用	17
1-12 玻璃的热历史	23
1-13 玻璃成分、结构、性能之间的关系	27
第二章 玻璃生成规律	29
2-1 热力学条件	29
2-2 动力学条件	29
2-3 熔体结构、键性、键强对生成玻璃的作用	32
2-4 氧化物玻璃的生成	35
第三章 熔体和玻璃体的相变	45
3-1 熔体和玻璃体的成核过程	45
3-2 晶体生长	49
3-3 微晶玻璃的核化和晶化	50
3-4 玻璃的分相	53
3-5 玻璃的析晶	63
第四章 玻璃的粘度	66
4-1 概述	66

4-2	粘度和温度的关系	66
4-3	粘度与熔体结构的关系	69
4-4	玻璃组成对粘度的作用	70
4-5	粘度参考点	72
4-6	粘度在生产中的应用	74
4-7	粘度的计算	76
第五章 玻璃的表面张力和表面性质		79
5-1	玻璃表面张力的物理与工艺意义	79
5-2	玻璃表面张力与组成及温度的关系	79
5-3	玻璃的润湿能力与润湿角	82
5-4	玻璃的表面性质	83
5-5	玻璃表面与生物的相互作用	87
第六章 玻璃的机械性质		88
6-1	玻璃的机械强度	88
6-2	玻璃的弹性	94
6-3	玻璃的硬度和脆性	98
6-4	玻璃的密度	100
第七章 玻璃的热学性质		104
7-1	玻璃的热膨胀系数	104
7-2	玻璃的比热	111
7-3	玻璃的导热系数	112
7-4	玻璃的热稳定性	113
第八章 玻璃的化学稳定性		115
8-1	玻璃的侵蚀机理	115
8-2	影响玻璃化学稳定性的因素	120
第九章 玻璃的电学、磁学性质		124
9-1	玻璃的导电性	124
9-2	玻璃的介电损失	131
9-3	玻璃的介电常数	133
9-4	玻璃的介电强度抗击穿程度	134
9-5	玻璃的电解现象	135
9-6	玻璃的半导体性	136
9-7	玻璃的磁学性质	138

第十章 玻璃的光学性质	140
10-1 玻璃的折射率	140
10-2 玻璃的光学常数	146
10-3 玻璃对光的反射、吸收和透过	147
10-4 玻璃的红外和紫外吸收	150
第十一章 玻璃的着色和脱色	154
11-1 概述	154
11-2 离子着色	154
11-3 硫、硒及其化合物的着色	178
11-4 金属胶体着色	182
11-5 玻璃的辐射着色	184
11-6 颜色的表示方法	186
11-7 玻璃的脱色	189

第二编 玻璃工艺学基础

第十二章 原料	191
12-1 概述	191
12-2 主要原料	191
12-3 辅助原料	205
12-4 碎玻璃	214
12-5 稀土元素氧化物在玻璃工业中的应用	215
第十三章 配合料的制备	216
13-1 原料的选择	216
13-2 原料的运输和储存	217
13-3 原料的加工处理	218
13-4 玻璃组成的设计和确定	222
13-5 配合料的计算	225
13-6 配合料的制备	230
13-7 配合料的质量检验	233
13-8 配合料的粒化	234
13-9 原料车间的除尘	235

第十四章 玻璃的熔制	236
14-1 玻璃的熔制过程	236
14-2 硅酸盐形成和玻璃形成	237
14-3 玻璃液的澄清和均化	249
14-4 玻璃液的冷却	257
14-5 影响玻璃熔制过程的工艺因素	258
14-6 玻璃熔窑的类型及其选择	265
14-7 玻璃熔制的温度制度	274
14-8 池窑熔制工艺的改进	279
14-9 玻璃池窑用耐火材料的蚀变和选用	288
第十五章 玻璃体的缺陷	300
15-1 概述	300
15-2 气泡(气体夹杂物)	300
15-3 结石(固体夹杂物)	305
15-4 条纹和节瘤(玻璃态夹杂物)	316
第十六章 玻璃的成形	323
16-1 玻璃的成形	323
16-2 玻璃的主要成形性质	323
16-3 成形制度	326
16-4 成形方法	333
16-5 模型	346
第十七章 玻璃的退火和淬火	351
17-1 概述	351
17-2 玻璃的应力	351
17-3 玻璃的退火	357
17-4 玻璃的淬火	367
第十八章 玻璃制品的加工	372
18-1 玻璃制品的冷加工	372
18-2 玻璃制品的热加工	381
18-3 玻璃的表面处理	383
18-4 玻璃的封接	396

第十九章 玻璃工业的环境保护	399
19-1 概述	399
19-2 玻璃工业对大气的污染	399
19-3 废水的污染及其处理	409
19-4 噪声及其防治	416

第三编 玻璃制品的生产

第二十章 玻璃瓶罐的生产	419
20-1 玻璃瓶罐的分类及其用途	419
20-2 玻璃瓶罐的基本要求	419
20-3 瓶罐玻璃的化学组成	420
20-4 玻璃瓶罐的生产工艺过程	421
20-5 玻璃瓶罐的缺陷及其消除方法	433
20-6 玻璃瓶罐生产的技术检验	435
20-7 玻璃瓶罐的轻量化	437
第二十一章 玻璃器皿的生产	439
21-1 器皿玻璃的化学组成及原料	439
21-2 器皿玻璃的熔制	446
21-3 器皿玻璃的脱色	448
21-4 玻璃器皿的成形	450
21-5 玻璃器皿的加工与装饰	454
第二十二章 平板玻璃的生产	464
22-1 平板玻璃制品的品种和生产工艺过程	464
22-2 平板玻璃的化学组成和原料	466
22-3 平板玻璃的熔制	466
22-4 平板玻璃的成形	467
第二十三章 保温瓶玻璃的生产	484
23-1 概述	484
23-2 保温瓶玻璃	484
23-3 瓶胆制造工艺	486
23-4 真空镀膜工艺	489
23-5 影响保温瓶质量的工艺因素	490

第二十四章 仪器玻璃	492
24-1 仪器玻璃的分类和要求	492
24-2 高硅氧玻璃	494
24-3 高硼硅仪器玻璃	496
24-4 硼硅酸盐中性玻璃	503
24-5 温度计玻璃	508
24-6 高铝玻璃	509
24-7 过渡玻璃	510
第二十五章 石英玻璃	512
25-1 石英玻璃的性能	512
25-2 石英玻璃的生产工艺	521
25-3 特种石英玻璃	529
第二十六章 光学玻璃	532
26-1 无色光学玻璃的生产	532
26-2 有色光学玻璃的生产	545
26-3 眼镜玻璃的生产	552
第二十七章 电真空玻璃	559
27-1 电真空玻璃的特性	559
27-2 电真空玻璃的分类	561
27-3 电真空玻璃的生产工艺	566
27-4 玻璃与金属的封接	567
第二十八章 微晶玻璃	569
28-1 概述	569
28-2 微晶玻璃的分类	569
28-3 微晶玻璃的性质及应用	571
28-4 微晶玻璃的工艺原理	573
28-5 微晶玻璃的生产工艺	576
第二十九章 玻璃纤维	586
29-1 玻璃纤维的分类、品种和用途	586
29-2 玻璃纤维的性能	589
29-3 玻璃纤维的制造工艺	592
29-4 特种玻璃纤维	598

第三十章 特种玻璃	601
30-1 概述	601
30-2 防护玻璃	601
30-3 半导体玻璃	605
30-4 激光玻璃	608
30-5 光学纤维玻璃	611
30-6 法拉第旋转玻璃	616
30-7 超声延迟线玻璃	618
30-8 声光玻璃	621
参考文献	626

第一编 玻璃的物理化学

第一章 玻璃结构

玻璃的物理化学性质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，才有可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玻璃材料或制品。

1-1 玻璃态的特性

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：

(一) 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，它的物理化学性质在任何方向都是相同的。

(二) 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。

(三) 亚稳性

玻璃态物质一般是由熔融体过冷却而得到。在冷却过程中粘度急剧增大，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。

(四) 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1-1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(或其它物理化学性质)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-T_f 温度区表示之)，是玻璃态物质所特有的。玻璃某些

性能(如密度、折射率、粘度等)随着这一区间(或其附近)的温度变化的快慢而变化。例如玻璃的比容,随玻璃熔体降温速度的增大而增大(如图1-2所示)。

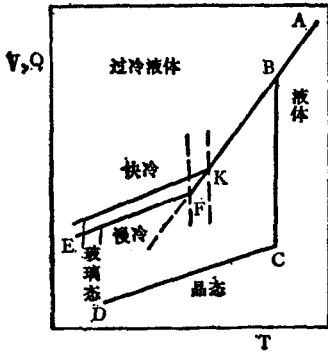


图1-1 物质内能与体积随温度的变化

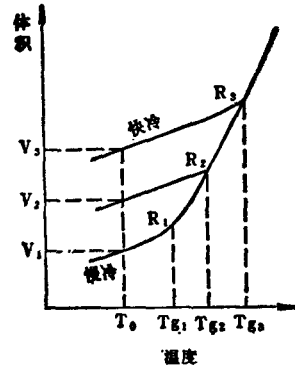


图1-2 不同冷却速度下玻璃的比容与温度的关系

从图可以看出,玻璃在温度 T_0 的比容可能是 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(参见“玻璃热历史”),它对玻璃的性质有重要的意义。

(五) 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。

1-2 玻璃的结构学说

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假说,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。

近代玻璃结构的学说有:晶子学说、无规则网络学说、凝胶学说、五角形对称学说、高分子学说等等。目前较为流行的是晶子学说和无规则网络学说,现分述如下:

1-2.1 晶子学说

列别捷夫(A·A·Лебедев)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1-3)。另外，实验证明，把晶体磨成细粉，颗粒度小于0.1微米时，其X-射线图也发生一种宽广的衍射峰，与玻璃类似，而且颗粒度愈小，衍射图的峰值宽度愈大。这些都是玻璃中存在“晶子”的佐证。

1-2·2 无规则网络学说

一九三二年查哈里阿森(W·H Zachariasen)提出了无规则网络学说。他是借助于哥尔德希密特(Goldschmidt)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度空间网络所组成，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1-4)。对硼酸盐与磷酸盐玻璃也作了类似的描述。把简单的 B_2O_3 和 P_2O_5 玻璃看成是分别由硼氧三角体和磷氧四面体 $[PO_4]$ 连结的无序的两度空间的网络。图1-4是无规则网络学说的玻璃结构模型。

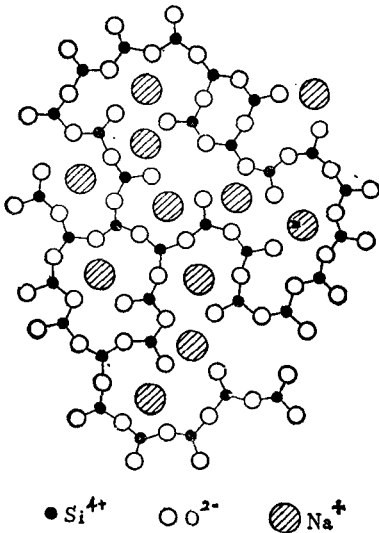


图1-4 无规则网络学说的钠硅酸盐玻璃结构模型

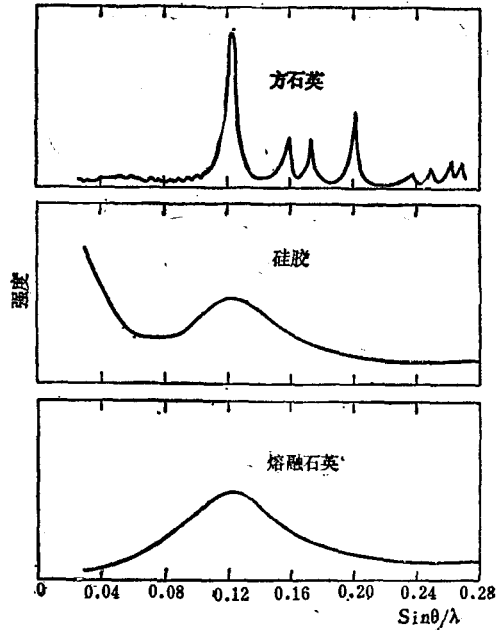


图1-3 方石英、硅氧凝胶和熔融石英 X-射线衍射图

后来瓦伦(Warren)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、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。

1-3 硅酸盐玻璃结构

1-3.1 石英玻璃结构

根据大量的实验结果，目前一般都倾向于用无规则网络学说的模型来描述石英玻璃结构，认为石英玻璃结构主要是无序而均匀的。而有序范围大约只有7~8埃(Å)，这样小的有序区，实际上已失去了晶体的意义。

石英玻璃样品无明显的小角度衍射，这说明结构是连续的，不像硅胶含有独立的颗粒，因为后者有明显的小角度衍射。

X-射线衍射(结合一些新的实验技术和分析数据的手段)测定的熔融石英玻璃中Si—O—Si键角的分布(见图1-5)。

图1-5表明，玻璃的键角分配是比较宽的，大约为120~180°，中心点大约落在145°角上，键角的分配范围要比结晶态的方石英宽。可是Si—O和O—O的距离在玻璃中与相应的晶体中是一样的。玻璃结构的无序性，主要是由于硅—硅距离(即Si—O—Si键角)的可变性而造成的。

X-射线衍射分析证明，硅氧四面体[SiO₄]之间的旋转角度完全是无序分布的。这充分说明在熔融石英玻璃中，硅氧四面体之间不可能以边相连，或以面相连，而只能以顶角相连。

Si—O键是极性共价键，据估计共价性与离子性约各占50%，因此，硅原子周围四个

氧的四面体分布，必须满足共价键的方向性和离子键所要求的阴阳离子的大小比。硅氧四面体[SiO₄]是熔融石英玻璃和结晶态石英的基本结构单元。硅氧键强相当大(估计为106千卡/克分子)整个硅氧四面体正负电荷重心重合，不带极性。硅氧四面体之间是

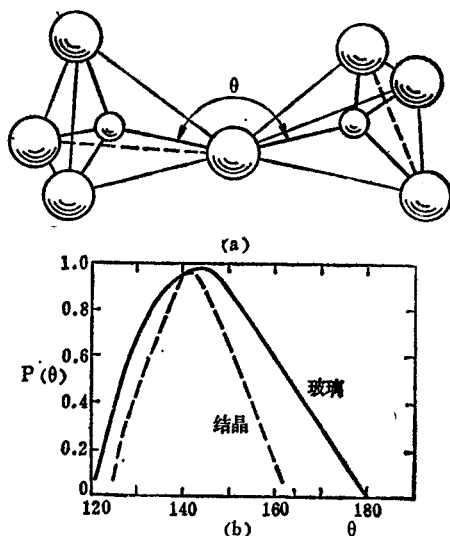


图1-5 (a)相邻两硅氧四面体之间的Si—O—Si键角示意图
(b)石英玻璃和方石英晶体的Si—O—Si键角分布曲线