



Engineering Glass Processing
Technical Manual

玻璃

中国建筑玻璃与工业玻璃协会推荐读物

工程玻璃深加工技术手册

白振中 张会文 编著

中国建材工业出版社

中国建筑玻璃与工业玻璃协会推荐读物

工程玻璃深加工技术手册

白振中 张会文 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程玻璃深加工技术手册/白振中, 张会文编著.
—北京: 中国建材工业出版社, 2014. 4
ISBN 978-7- 5160-0726-6

I. ①工… II. ①白…②张… III. ①玻璃—加工—
技术手册 IV. ①TQ171.6-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 004824 号

内 容 简 介

本书编写按照平板玻璃深加工过程, 全书分为九章。第 1 章浮法玻璃, 主要介绍玻璃的特点、性质, 使读者对用于深加工基片的平板玻璃有一个初步的了解。第 2 章玻璃预处理, 介绍了玻璃深加工的切割、磨边、钻孔、清洗工艺及设备组成、使用和维护, 以及控制系统原理和组成。第 3 章钢化玻璃, 对物理钢化玻璃的原理及工艺、钢化玻璃质量缺陷及解决方法、典型钢化设备使用与维护、钢化玻璃自爆及处理等进行了介绍。第 4 章夹层玻璃, 对夹层玻璃胶片的使用与储运、夹层玻璃设备及工艺、夹层玻璃设备的使用与保养、夹层玻璃缺陷及处理进行了介绍。

第 5 章镀膜玻璃, 第一节介绍薄膜光学基础, 包括几何光学基本定律、波动光学中的干涉原理、色度学基础; 第二节介绍磁控溅射原理、磁控溅射电源和阴极、磁控溅射对真空度的要求; 第三节介绍各种真空系统、真空泵及其使用维修、真空阀门、真空测量, 以及如何进行真空检漏等; 第四节对大型磁控溅射镀膜生产线以及控制系统进行介绍; 第五节介绍热反射镀膜玻璃、单银 Low-E 和双银 Low-E 镀膜玻璃的膜层设计、生产工艺, 以及生产中常见质量问题的解决方法; 第六节结合热量传递方式、镀膜玻璃的性能介绍镀膜玻璃的节能原理和效果, 介绍了镀膜节能玻璃的发展历史, 并对镀膜玻璃正确应用给出了建议。

第 6 章彩釉玻璃, 对彩釉玻璃的特点和应用、釉料的性能和使用、丝网制作和使用、彩釉玻璃的生产工艺和设备、彩釉玻璃缺陷及处理方法等进行了介绍。第 7 章中空玻璃, 对中空玻璃的组成和性能、中空玻璃生产工艺过程、中空玻璃设备的使用与保养、中空设备电控系统原理进行了介绍。第 8 章玻璃深加工工厂的管理, 结合玻璃深加工的工艺、产品特点, 对设备布局、生产订单管理、生产计划管理给出参考性建议。第 9 章玻璃产品标准解读, 对钢化、夹层、彩釉、镀膜、中空玻璃标准在生产过程中经常遇到的标准问题进行了解释, 并将国标与美标、欧标、日本标准等进行了对比。

工程玻璃深加工技术手册

白振中 张会文 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 33.5

字 数: 800 千字

版 次: 2014 年 4 月第 1 版

印 次: 2014 年 4 月第 1 次

定 价: 298.00 元



本社网址: www.jcbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

广告经营许可证: 京西工商广字第 8143 号

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

《工程玻璃深加工技术手册》 编 委 会

主 编 单 位：中国南玻集团股份有限公司

副 主 编 单 位：上海北玻镀膜技术工业有限公司

杭州之江有机硅化工有限公司

福建新福兴玻璃有限公司

北京明日之星玻璃机械有限公司

荣誉参编单位：山东金晶科技股份有限公司

郑州中原应用技术研究开发有限公司

主 编：白振中 张会文

副 主 编：施玉安 刘 明 陈玉平 刘长礼

参 编：左养利 韩全寿 张会文 曾小绵

崔平生 陈海峰 李文胜 曾裕斌

荣 誉 参 编：张式泰

序 言

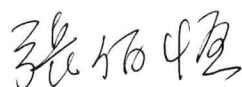
玻璃与经济社会发展有着极为密切的联系，一方面，玻璃及其加工制品广泛应用于建筑、交通运输、装饰装修、电子信息等领域，不仅用作生产资料，也是不可缺少的生活资料；另一方面，玻璃属基础的原材料，其所具有的特殊性能，至少在可预见的一段时期内仍然是不可替代的，并且随着技术的进步，应用的广度和深度将进一步扩大。从我国玻璃行业的发展历程看，在100余年的发展过程中，改革开放以来的30多年是发展最快的时期，正是在以“洛阳浮法工艺”为代表的技术创新推动和一批骨干玻璃企业的共同奋斗下，玻璃行业实现了由旧到新、由低到高的不断发展，在国际市场占有重要地位，并为下一步实现“创新提升、超越引领”打下坚实的基础。

加工玻璃不仅是玻璃行业发展的重要方向，而且也是目前转型升级、结构调整的必然要求。我国的加工玻璃经过多年的发展已经具有一定的基础和规模，但与国际先进水平的差距突出的即是理论研究的不足。超越引领目标的实现，需要行业共同努力，在不断总结的基础上开展有针对性的研究。

《工程玻璃深加工技术手册》是近年来少有的集大成之作，这是南玻集团组织行业专家，将多年的实践整理提升的结果。本书共分九个章节，围绕主要加工玻璃品种全面总结了其性能、技术、工艺以及装备的操作维护等，内容全面，逻辑清晰，语言简练。本书的特点之一是理论与实际紧密结合，其中的观点和方法均具有很强的可操作性，可以直接借鉴和应用；另外，对于管理和标准方面的内容也具有其独到之处，值得借鉴和分享。

《工程玻璃深加工技术手册》不仅可作为企业培训的专门教材，亦可成为行业交流的良好工具书，对于提高行业技术创新和管理创新是非常有意义的。在此，对《工程玻璃深加工技术手册》的出版表示祝贺！对参与编纂的有关人员及单位的辛勤工作表示感谢！

中国建筑玻璃与工业玻璃协会
常务副会长兼秘书长



让加工玻璃更多惠及民生

对于民生朴素的理解，也即吃穿住行用等与人们生活紧密相关的诸多事项。芸芸众生，来到世上一遭，都想活出个精彩，活的更加可心如意一些。尽管过去条件不够，对于民生的忽视也源自民众对于民生的认识和认知的缺失。如今，民众的生存质量如何，不仅仅成为一个个鲜活个体最为上心的事情，也成为政府执政的着力点。更多惠及民生，能否更好地满足居住舒适要求和建筑节能要求，政府是最大的责任人，加工玻璃企业做得如何，其中也有一份责任。

在几十年前的老家，因为塑料纸既能遮风挡雨又能透光，还很便宜，损坏了也很容易更换，因而塑料纸成为替代玻璃的门窗遮盖物。在不能忘却的那个历史、那个年代里，用今天的眼光看质量上只能算是劣等品的玻璃片那个时候还是稀罕物，有门路、家境富裕的人家才用得上玻璃门窗。那个时候的门窗玻璃，用现在的术语说就是简单的玻璃原片，除了挡风雨、透光线外，根本谈不上其他功能。

回首望去，看看现在，时代的进步有时候让人瞠目结舌。我国建筑玻璃产量早已经多年位居世界第一，先进企业的玻璃质量也已经与世界接轨。然而，巨大的成绩依旧遮掩不了现存的巨大的差距和问题。在玻璃原片方面，量大面广的普通玻璃产品仍然是主流产品，优质玻璃和超薄、超厚产品整体上依旧缺乏显著的竞争力。巨大的差距和问题更多地反映在加工玻璃行业。且不说不足60%的玻璃加工率与发达国家接近90%加工率之间的差距，也不说加工设备、技术、管理以及产品质量等方面存在的差距，单就产品的应用方面而言，我们的政府和有关机构、企业还肩负着重大的现实和历史责任。

经过加工后，包括钢化玻璃、中空玻璃等加工玻璃制品因而不仅具备基础的遮风挡雨和穿透光线等基本功能，更因此具备了保温、隔热、隔声、安全、健康、美观等多种功能，也因此鲜明地改善了门窗质量和居住舒适度，于公于私都有着很大的好处和显著的优点。然而，就是这样一类利国利民的好产品，加工玻璃在我国的应用还依旧存在着巨大的短板。且不说偏远落后的农村地区，也不说经济社会境况相对好一些的农村地区、县城以及三线四线城市等，单就人们通常挂在嘴边的北上广等一类城市，遍布广泛的老旧公共建筑的门窗以及门窗玻璃依旧是传统的质量很差的铝合金、单片玻璃，这样的门窗导致的建筑能耗可想而知，更遑论舒适度了。在北上广成片成片的老旧居民楼里，功能先进的加工玻璃门窗也属于新鲜事物。

新一届政府在喊破嗓子地大力推动经济社会的转型发展，其中一个要义就是要实现通过

内需拉动的内涵质量型增长目标，实现既要节约能源又要环境保护的可持续发展。建筑能耗目前占到全社会总能耗的 1/3，伴随着城镇化的不断扩大，这个比例会逐步接近 1/2。如果不解决建筑节能问题，越来越大的建筑能耗对于实现全社会的健康持续发展将构成重大挑战。通过门窗消耗掉的能耗占到建筑能耗的 1/3，全面推广应用加工玻璃和质量优良的加工玻璃门窗，就可以较好而经济地实现建筑节能目标。随着加工玻璃技术、工艺、装备的进步以及科技进步，不仅加工玻璃自身的多个优良功能会得以提升、丰富，而且在光伏发电等方面还可以为社会提供清洁能源。加工玻璃作为一类显著有利于建筑节能、符合国家发展战略的好产品，理应得到全社会的广泛采用。面对现实的巨大短板，政府有关部门应该从宏观上高度重视在全社会推广应用加工玻璃，从政策设计上大力推动建筑节能产品的采用，在建筑节能问题上采取硬措施，实现硬约束。

作为加工玻璃企业，其历史责任也是责无旁贷的。平板玻璃企业尤其是加工玻璃行业有关机构、企业需要切实肩负起生产具有良好功能、品质优良的加工玻璃产品，不断丰富和提升加工玻璃的质量、功能，以切实做到对消费者负责，对实现建筑节能的历史责任负责。担负着这些历史责任的还包括相关配套企业、门窗企业、设计企业、施工企业以及房地产业主企业乃至广大的消费者等等，唯有广泛达成共识，形成共同的行动准则和约束条款，才能将建筑节能工作切实落实到位，以不负历史期待。

中国建材工业出版社社长兼总编辑



前 言

30年前，玻璃在国人的心目中只是一种普通建筑材料，除了固有的透明、颜色之外并没有赋予更高性能的要求。随着玻璃深加工技术的发展，通过深加工的玻璃具有节能环保、安全、舒适、美观等多种性能，满足了人们对生活环境不断提高的要求。

玻璃的深加工是指对平板玻璃进行再加工，使其具有新结构、新形态和新功能。常用的建筑玻璃深加工工艺有切割、磨边、钻孔、钢化、彩釉、夹层、镀膜和中空等。通过深加工，提高了玻璃产品的技术含量和附加值，赋予了玻璃安全、环保节能、美观等功能，扩大了建筑玻璃作为建筑材料的使用范围，使玻璃成为一种名副其实的“建筑功能材料”。钢化玻璃和夹层玻璃满足了人们对高层建筑的安全要求，镀膜玻璃和中空玻璃满足了人们面临的节能环保、可持续发展的需求，镀膜玻璃和彩釉玻璃满足了人们对建筑美观的需求。

据工业和信息化部统计资料，目前国内平板玻璃深加工率已经达到40%以上，但距发达国家80%、世界平均55%以上的平板玻璃深加工率还有很大的差距。随着国家节能环保政策的实施和人们对生活环境要求的不断提高，我国平板玻璃深加工率会不断提高，玻璃深加工行业将会持续发展。

本书编者为国内建筑节能玻璃行业领航者中国南玻集团的技术人员。南玻集团在30年的发展过程中，积累了大量的玻璃深加工技术经验，也为国内玻璃深加工行业培养了大量的技术和管理人才。本书是玻璃深加工行业中一本实用的工具书。南玻集团工程玻璃研发中心江少华主任组织了本书的编写工作，本书第1章、第3章由白振中编写，第2章、第7章由左养利编写，第4章、第8章由张会文编写，第5章由崔平生、曾小绵、陈海峰、韩全寿编写，第6章由李文胜编写，第9章由曾裕斌编写。

本书在编写过程中得到了南玻集团领导的大力支持，也得到了南玻集团下属工厂技术人员的支持，在此表示感谢。本书在编写过程中得到了玻璃加工设备制造商和原材料厂家的大力支持，他们提供了包括设备操作说明书、产品说明书在内的诸多资料，在此不再一一列举公司名称，特向他们表示感谢。同时感谢中国建材工业出版社的大力支持，使本书得以顺利出版。

编者

目 录

第 1 章 浮法玻璃	1
1.1 玻璃的结构与成分	1
1.1.1 玻璃的结构	1
1.1.2 玻璃的热历史	6
1.1.3 玻璃的成分	8
1.2 玻璃的性质	8
1.2.1 玻璃的黏度	8
1.2.2 玻璃的表面张力	10
1.2.3 玻璃的表面性质	12
1.2.4 玻璃的密度	13
1.2.5 玻璃的力学性质	14
1.2.6 玻璃的热学性质	18
1.2.7 玻璃的光学性能	21
1.2.8 玻璃的电学性质	25
1.2.9 玻璃的化学稳定性	26
1.3 浮法玻璃生产工艺	28
第 2 章 玻璃预处理	32
2.1 玻璃切割	32
2.1.1 玻璃切割概述	32
2.1.2 玻璃切割工艺及设备调整	33
2.1.3 玻璃切割质量缺陷分析	42
2.2 玻璃磨边	42
2.2.1 玻璃磨边概述	42
2.2.2 玻璃磨边工艺及设备	43
2.2.3 玻璃磨边质量缺陷分析	53
2.3 玻璃的清洗干燥	57
2.3.1 玻璃清洗机介绍	57
2.3.2 清洗机的调整	58
2.3.3 清洗机的维护保养	59
2.4 玻璃钻孔	60
2.4.1 玻璃钻孔概述	60
2.4.2 钻孔工艺	63

第3章 钢化玻璃	64
3.1 玻璃钢化的原理	64
3.1.1 玻璃的应力	64
3.1.2 玻璃的退火	68
3.1.3 玻璃钢化原理	71
3.2 玻璃钢化技术及工艺	76
3.2.1 玻璃钢化技术	76
3.2.2 钢化玻璃性能	77
3.2.3 玻璃钢化工艺	78
3.2.4 钢化工艺参数的使用	88
3.2.5 钢化玻璃对玻璃原片的要求	91
3.2.6 钢化玻璃质量缺陷及解决方法	93
3.3 钢化玻璃设备及操作使用	100
3.3.1 玻璃平钢化设备	100
3.3.2 玻璃平钢化设备的操作使用	104
3.3.3 玻璃平钢化设备的工艺参数设置	108
3.3.4 玻璃连续平钢化设备	115
3.3.5 玻璃弯钢化设备	120
3.4 钢化设备维护保养	123
3.4.1 平钢化设备维护	124
3.4.2 平弯钢化设备维护	128
3.5 钢化玻璃的自爆及热浸处理	132
3.5.1 钢化玻璃自爆概述	132
3.5.2 钢化玻璃自爆的解决方法	134
3.5.3 钢化玻璃“热浸”设备	137
第4章 建筑夹层玻璃	139
4.1 概述	139
4.1.1 夹层玻璃品种和应用	139
4.1.2 建筑夹层玻璃的主要生产方法	141
4.2 夹层玻璃中间材料	141
4.2.1 聚乙烯醇缩丁醛胶片 PVB	142
4.2.2 离子型胶片 SGP	145
4.2.3 乙烯-醋酸乙烯共聚物胶片 EVA	146
4.3 夹层玻璃工艺及设备	147
4.3.1 PVB 胶片夹层玻璃生产工艺	147
4.3.2 离子型 SGP 胶片的生产工艺	156
4.3.3 夹层玻璃生产设备、操作及保养	162
4.4 夹层玻璃产品的缺陷及处理方法	170
4.4.1 夹层玻璃外观缺陷的表现及处理	171

4.4.2 夹层玻璃性能缺陷现象及处理	174
第5章 镀膜玻璃	176
5.1 光学理论基础	176
5.1.1 几何光学基本定律	176
5.1.2 波动光学	179
5.1.3 色度学	182
5.2 磁控溅射镀膜原理	188
5.2.1 磁控溅射原理	188
5.2.2 磁控溅射的阴极及阴极电源	190
5.2.3 磁控溅射的真空要求	192
5.3 真空系统	194
5.3.1 真空系统的组成	194
5.3.2 真空机组	195
5.3.3 真空阀门	199
5.3.4 真空泵	202
5.3.5 真空测量	226
5.3.6 真空检漏	237
5.4 建筑玻璃镀膜生产线	249
5.4.1 镀膜线概述	249
5.4.2 玻璃镀膜生产线介绍	251
5.4.3 镀膜线的电气控制系统	258
5.4.4 外围辅助设备	271
5.4.5 镀膜设备使用及维修保养	272
5.5 镀膜玻璃产品及工艺	283
5.5.1 热反射镀膜玻璃	283
5.5.2 单银 Low-E 镀膜玻璃	291
5.5.3 双银 Low-E 镀膜玻璃	302
5.6 Low-E 镀膜玻璃应用	332
5.6.1 Low-E 镀膜玻璃节能分析	332
5.6.2 常用建筑玻璃的节能性及其使用建议	352
5.6.3 建筑玻璃的选择	354
5.6.4 Low-E 镀膜玻璃的合理使用	358
第6章 彩釉玻璃	368
6.1 概述	368
6.1.1 彩釉玻璃介绍	368
6.1.2 彩釉玻璃的特性	371
6.1.3 彩釉玻璃的用途	371
6.1.4 彩釉玻璃的发展	375
6.2 彩釉玻璃釉料	377

6.2.1	彩釉玻璃釉料介绍	377
6.2.2	彩釉玻璃釉料成分	377
6.2.3	彩釉玻璃釉料的生产	380
6.2.4	彩釉玻璃釉料技术性能及参数	380
6.2.5	彩釉玻璃釉料的配色	384
6.2.6	彩釉玻璃釉料的发展趋势	385
6.3	彩釉玻璃印前准备	386
6.3.1	制版的主要材料	386
6.3.2	彩釉玻璃制版工艺	392
6.4	彩釉玻璃生产工艺	404
6.4.1	生产准备	405
6.4.2	主要生产工艺介绍	412
6.4.3	烘干和清洁	421
6.4.4	釉料的烧结	421
6.4.5	彩釉玻璃常见问题及应对措施	423
第7章	中空玻璃	426
7.1	中空玻璃概述	426
7.1.1	产品概述	426
7.1.2	中空玻璃的性能	426
7.1.3	中空玻璃的选用	429
7.2	中空玻璃工艺及设备	431
7.2.1	中空玻璃的加工工艺	431
7.2.2	中空玻璃的主要缺陷	434
7.2.3	提高中空玻璃技术性能的途径	437
7.2.4	中空玻璃设备	438
第8章	玻璃深加工工厂管理	455
8.1	工厂工艺布局	455
8.1.1	玻璃深加工工艺分析	456
8.1.2	设备布局	457
8.1.3	玻璃仓储及在制品评估	459
8.2	生产过程管理	460
8.2.1	生产过程管理系统	460
8.2.2	计划管理	462
8.3	生产过程注意事项	464
8.3.1	切割机上片	464
8.3.2	零单补片及齐片交货	464
8.3.3	中空配片	464
8.3.4	节能环保	464
第9章	玻璃产品标准及解读	466

9.1 标准概述	466
9.2 钢化玻璃标准及解读	469
9.2.1 概述	469
9.2.2 钢化玻璃的主要技术要求与检测方法	469
9.3 夹层玻璃标准及解读	477
9.3.1 概述	477
9.3.2 夹层玻璃性能测试	478
9.4 彩釉玻璃标准及解读	480
9.4.1 概述	480
9.4.2 釉层的耐久性检验	481
9.5 镀膜玻璃标准及解读	483
9.5.1 概述	483
9.5.2 镀膜玻璃的主要性能指标及检验方法	483
9.6 中空玻璃标准及解读	488
9.6.1 概述	488
9.6.2 中空玻璃标准的基本内容	489
9.6.3 中空玻璃国标检测内容的介绍	489
参考文献	499

第1章 浮法玻璃

玻璃是一种具有许多优良特性的无机非金属材料，随着科学技术的发展，逐步从日用材料进入到重要的工程材料行列。平板玻璃具有透光、隔声、隔热、耐候性好等优良性能，能够用多种成型方法和加工方法制成各种形状、大小和不同特性的玻璃制品。平板玻璃及其后加工制品广泛用于建筑物、车辆、船舶、飞机等运输工具，在国民经济中起着重要的作用。硅酸盐玻璃、硼硅玻璃及其他配方的特种玻璃随着材料技术的发展，也有了更多的应用，采用超薄玻璃制作触摸屏的智能手机促进了人们的交流，玻璃新产品日新月异，已经成为人们生活中不可或缺的重要组成部分。

不同组成的玻璃制品有着明显不同的性质，除了日用玻璃外，还有各种具有特殊性能的玻璃产品，如激光玻璃、变色玻璃、电子玻璃等。

1.1 玻璃的结构与成分

随着科学进步及先进仪器的使用，人们对玻璃的认识有了进一步的提高，对玻璃进行了重新定义。现较公认的广义玻璃的定义为：结构上完全表现为长程无序的、性能上具有玻璃转变特性的非晶态固体，也可理解为：无论是有机、无机、金属，还是何种制备技术，只要具备上述特性的都可成为玻璃。

玻璃的物理、化学性质不仅取决于其化学成分，而且与其微观结构有着密切的关系。只有认识了玻璃的微观结构，掌握了玻璃成分、微观结构、性能三者之间的内在联系，才有可能通过改变其化学成分、热历史，或利用某些物理的、化学的处理方法，制取符合预期物理化学性能的玻璃材料或制品。

1.1.1 玻璃的结构

在自然界中固体物质存在着晶态和非晶态两种状态。晶态固体在自然界中占主导地位，晶态固体中每一晶粒内部结构具有与三维点阵对应的三维周期性，晶体内原子、离子、分子在空间排列上的这种三维周期性贯穿于整粒晶体，使晶体内部结构呈长程有序的状态。所谓非晶态是以结构无序为主要特征的固体物质状态。玻璃态是非晶态固体的一种，玻璃中的原子不像晶体那样在空间作远程有序排列，而近似于液体，具有近程有序排列。玻璃像固体一样能保持一定的外形，而不像液体那样在自重作用下流动。

1. 玻璃的特征

按照《硅酸盐词典》的定义，玻璃是由熔融物而得的非晶态固体，因此玻璃的定义也可理解为：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）的无机物，是过冷的液体。现代科学技术的发展已使玻璃的含义有了很大的扩展。因此，有人把具有下述四个通性的物质不论其化学性质如何，均称为玻璃。这四个通性是：

(1) 各向同性

玻璃体的任何方向具有相同性质。就是说，玻璃态物质各个方向的硬度、弹性模量、热膨胀系数、热导热系数、电导率、折射率等都是相同的。实际上，玻璃的各向同性是统计均质结构的外在表现，表明物质内部质点的随机分布和宏观的均匀状态，这点与液体类似。

必须指出，当玻璃中存在内应力时，结构均匀性就遭到破坏，玻璃就显示出各向异性。例如，出现明显的光程差。

(2) 介稳性

所谓玻璃处于介稳状态，是因为玻璃是由熔体急剧冷却而得。由于在冷却过程中黏度急剧增大，质点来不及形成晶体的有规则排列，系统的内能不是处于最低值，而是处于介稳状态（热力学因素）。

尽管玻璃处于较高能量状态，但由于常温下黏度很大，转变成晶体的速率极小，因而实际上不能自发地转化为晶体（动力学因素）。只是在一定的外界条件下，即必须克服物质由玻璃态转化为晶态的势垒，才能使玻璃析晶。因此，从热力学的观点看，玻璃态是不稳定的；但从动力学的观点看，它又是稳定的。因为它虽具有从自发放热转化为内能较低的晶体倾向，但在常温下，转变为晶体的概率很小，所以说玻璃处于介稳状态。

(3) 固态和熔融态间转化的渐变性和可逆性

玻璃态物质由熔体转变为固体是在一定温度区间（转化温度范围）进行的，性质变化过程是连续的和可逆的，它与结晶态物质不同，没有固定的熔点。

当物质由熔体向固体转化时，如果是结晶过程，在系统中必有新相生成，并且在结晶温度时，许多性质发生突变。但是，当熔体向固态玻璃转化时，随着温度的逐渐降低，熔体的黏度逐渐增大，最后形成固态玻璃。此凝固过程是在较宽温度范围内完成的，始终没有新的晶体生成。从熔体向固态玻璃过渡的温度范围取决于玻璃的化学组成，一般波动在几十到几百度内。因此玻璃没有固定的熔点，而只有一个软化温度范围。在此范围内，玻璃由黏性体经黏塑性体、黏弹性体逐渐转变成为弹性体。这种性质的渐变过程正是玻璃具有良好加工性能的基础。

(4) 性质随成分变化的连续性和渐变性

在玻璃形成范围内，玻璃的性质随成分发生连续的逐渐的变化。例如，在 R_2O-SiO_2 系统中，玻璃的弹性模量随 Na_2O 或 K_2O 含量的上升而下降，随 Li_2O 含量的上升而上升。

由于性质随成分变化的连续性，因此在大部分情况下，玻璃的一些物理性质是玻璃中所含各氧化物成分的部分性质之和，可以利用玻璃性质的加和性计算已知成分玻璃的性质。

综上所述，任何物质只要具有以上四个基本特征，不论它们的化学组成如何，都可以称之为玻璃。

2. 玻璃的转变

玻璃体可以看做是介于液体与晶体间的特殊状态。玻璃从熔融态冷凝转变成固态过程中，结构不断重新组合和调整，具有链状或三维空间结构的原子团相互间进一步聚合，即玻璃内部有序区域同组成的熔体内有进一步的扩展。这个转变过程和液态与晶态相变过程有本质上的区别，它反映了玻璃内部结构的变化。

任何熔体转变为固态玻璃是带有动力学条件的。熔体冷却速率越快，冷却后固态玻璃的结构越接近高温时熔体的结构。同组成的玻璃可能根据成形条件不同而具有不同的结构和性

质。淬火玻璃的结构较退火玻璃更接近于熔体的结构，差别的大小主要取决于冷却速度。

值得注意的是，在转变温度区域内的某一温度下，玻璃熔体有对应于该温度的平衡结构。温度越低，玻璃的黏度越大，达到平衡结构的速度越慢，需要的时间也越长（即松弛时间）。接近平衡结构的过程也是玻璃稳定化的过程。因而在一定意义上，固态玻璃的物理性质是相对的，并不是一个常数，例如玻璃的密度、折射率、电阻等性质，是随着冷却速度的增加而降低的，这是由于固态玻璃从熔体冷却至某一温度，需要一定时间才能达到该温度下的均衡所致。工业生产中，可以利用这一点来调整玻璃的性质。

3. 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。

“玻璃结构”是指离子或原子在空间的几何配置以及它们在玻璃中形成的结构形成体。最早试图解释玻璃本质的是塔曼（G. Tamman）的过冷液体假说，认为玻璃是过冷液体，玻璃从熔体凝固为固体的过程仅是一个物理过程，即随着温度的降低，组成玻璃的分子因动能减小而逐渐接近，同时相互作用力也逐渐增加，使黏度上升，最后形成堆积紧密的无规则的固体物质。实际上玻璃的形成过程要比单纯分子间距的改变要复杂得多。随后有许多人做了大量工作，最有影响的近代玻璃结构的假说有：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，其中能够最好地解释玻璃性质的是晶子学说和无规则网络学说。

(1) 晶子学说

1921年，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 附近出现突变（图1-1），难以单纯用玻璃内部存在应力来解释，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。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。1930年，兰德（Randell）提出玻璃由微晶与无定形物质两部分组成，微晶具有规则的原子排列并与无定形物质间有明显的界限，微晶尺寸为 $1.0\sim 1.5\text{nm}$ ，含量为 80% 以下，微晶取向无序。

根据晶子学说，在 500°C 以下，玻璃折射率的变化只与温度有关，而 $520\sim 590^{\circ}\text{C}$ 范围内折射率的突变则是由于结构的变化，假定玻璃中存在微晶石英结构，因而在上述温度范围内发生了多晶转变现象。

在较低温度范围内，测定玻璃折射率时也发现若干突变。将 SiO_2 含量高于 70% 的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 与 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 系统的玻璃，在 $50\sim 300^{\circ}\text{C}$ 范围内加热并测定折射率时，观察到在 $85\sim 120^{\circ}\text{C}$ 、 $145\sim 165^{\circ}\text{C}$ 和 $180\sim 210^{\circ}\text{C}$ 范围内折射率有明显的变化（图1-1）。这些温度恰巧与磷石英及方石英的多晶转变温度相符合。折射率变化的幅度与玻璃中 SiO_2 的含量有关。根据这些实验数据，可以进一步认为玻璃中含有多种晶子。

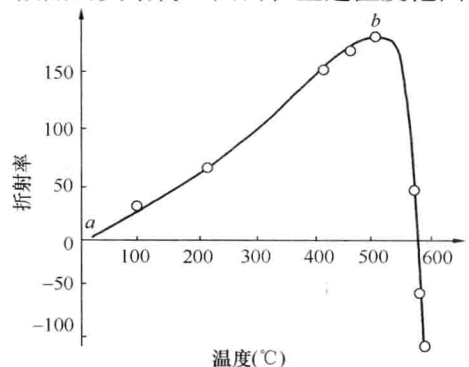


图1-1 玻璃折射率随温度变化的曲线

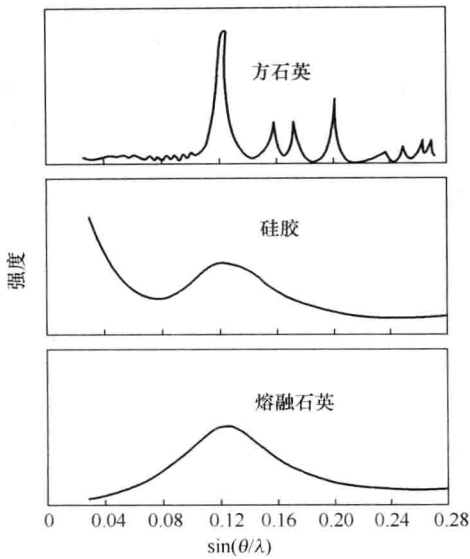


图 1-2 方石英、硅胶、熔融石英
X-射线衍射图

晶子学说为 X-射线衍射结构分析数据所证实，玻璃的 X-射线衍射图一般有宽广的（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相同（图 1-2）。另外，实验证明，把晶体磨成细粉，颗粒度小于 $0.1\mu\text{m}$ 时，其 X-射线衍射图也发生一种宽广的（或弥散的）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。

玻璃的晶子学说揭示了玻璃中存在有规则排列区域，换句话说，在玻璃结构中有一定的有序区域，这构成了这个学说的合理部分。这对于玻璃的分相、晶化等本质的理解有重要价值，但初期的晶子学说机械地把这些有序区域当作微小晶体，并未指出相互之间的联系，因而对玻璃结构的理解是初级的和不完善的。

在长期的发展过程中，该学说将晶子的看法逐渐深化，目前倾向于认为晶子不同于具有正常晶格的微小晶体，而是晶格极度变形的较有规则排列的区域。在多组分玻璃中，晶子的化学组成也可不同。晶子相互间由中间过渡层所隔离，距晶子愈远，不规则程度也愈显著。总的说来，晶子学说强调了玻璃结构的近程有序性、不均匀性和不连续性。晶子学说可以解释玻璃的一些性质变化的规律。

(2) 无规则网络学说

1932 年查哈里阿森 (W. M. Zachariasen) 提出了玻璃结构无规则网络学说。他借助于哥希密特 (Goldschmidt) 的离子结晶化学的一些原理，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。他描述了离子—共价键的化合物，如熔融石英、硅酸盐和硼酸盐玻璃的结构，指出玻璃的近程有序与晶体相似，即形成阴离子多面体（三角体和四面体），多面体间顶角相连形成三度空间连续的网络，但其排列是拓扑无序的。

无规则网络学说提出氧化物 A_mO_n 能形成玻璃应具备以下条件：

- ① 一个氧离子最多同两个阳离子 A 相结合；
- ② 围绕阳离子 A 的氧离子数不应过多（一般为 3 或 4）；
- ③ 网络中这些氧多面体以顶角相连，不能以多面体的边或面相连；
- ④ 每个多面体中至少有三个氧离子与相邻的多面体相连形成三度空间发展的无规则连续网络。

根据上述条件， B_2O_3 、 SiO_2 、 GeO_2 、 P_2O_5 、 V_2O_5 、 Ta_2O_5 、 As_2O_5 、 Sb_2O_5 等能形成玻璃，由它们所组成的多面体成为网络的结构单元，而 R_2O 和 RO 未能满足上述条件只能作为网络外体，处在网络之外，填充在网络的空隙之中。

对于熔融石英玻璃，该学说提出熔融石英玻璃的基本结构单元像石英晶体一样也是硅氧四面体，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。当熔融石英玻璃中加入碱金属或碱土金属氧化物时，硅氧