



玻璃加工技术丛书
BOLI JIAGONG JISHU CONGSHU

BOLI

QIANGHUA JI
REJIAGONG JISHU

玻璃

强化及热加工技术

李超 编著



化学工业出版社



玻璃加工技术丛书

BOLI JIAGONG JISHU CONGSHU

BOLI
QIANGHUA JI
REJIAGONG JISHU

玻璃

强化及热加工技术

李超 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

玻璃强化及热加工技术/李超编著. —北京:
化学工业出版社, 2013. 6

(玻璃加工技术丛书)

ISBN 978-7-122-16924-2

I. ①玻… II. ①李… III. ①玻璃-热加工
IV. ①TQ171. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 065708 号

责任编辑: 常 青

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 吴 静

装帧设计: 韩 飞

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 装: 三河市延凤印装厂

710mm×1000mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 308 千字 2013 年 10 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: 49.00 元

版权所有 违者必究

丛书前言



玻璃是应用广泛的透明材料，玻璃经过各种工艺加工以后，其光学、热学、电学、力学及化学的性能改变，可以制得具有某设定值的太阳光反射率、透射率；辐射热的反射率、透射率；热传导率；表面电阻；机械强度；晶莹高雅的颜色或图案。因此加工玻璃制品具有隔热、控光、导电、隔声、防结露、防辐射、减反射、安全、美观舒适的功能。

随着我国国民经济的迅速发展和城乡居民生活水平的不断提高，对加工玻璃的数量和质量的要求也不断提高。进入 21 世纪，玻璃精细加工行业发展迅猛。玻璃的加工过程，常是运用热学、化学、电子学、磁学、分子动力学、离子迁移学的处理过程，更多时是运用多种工艺方法共同处理的过程。也就是说，玻璃加工行业已从简单的生产，发展为各学科、各技术相互渗透与交融的高新技术产业。在新的形势面前，为了使广大的生产、科研、使用者能够充分了解玻璃加工技术的发展，掌握其产品性能、生产工艺、检测手段和使用方法，我们在参考国内外有关玻璃深加工方面文献的基础上，并结合玻璃加工技术实践经验，组织编著了这套玻璃加工技术丛书，以飨读者。

本套丛书按照玻璃加工工艺及专业分为四册，即《玻璃冷加工技术》、《玻璃强化及热加工技术》、《玻璃镀膜技术》和《玻璃复合及组件技术》。本套丛书在编写过程中，力求做到既介绍玻璃加工基础知识，又联系生产实际，希望能为从事玻璃加工研究、开发设计、生产、施工、管理、监理等广大同仁提供一些帮助。

由于我们学识水平所限，难免在丛书的整体结构方面，各分册具体技术的阐述方面存在这样和那样的问题及不足，敬请有识之士批评、指正。

借此丛书出版之际，谨向所有关心我们的老领导、老前辈以及同事、朋友表示深切的谢意！

刘志海
2013 年 5 月

前言

FOREWORD

随着工业化、城镇化进程的加快，房地产、汽车等相关行业快速发展，各式各样的房屋设计造型、功能性玻璃幕墙以及轻型化汽车的出现，极大地拉动了加工玻璃的需求，促进了加工玻璃行业的发展。加工玻璃是以平板玻璃为基础，经过不同的加工或者处理方法，使其具有节能、环保、安全、装饰等新的功能或形状的二次加工制品。

玻璃强化和热加工是玻璃加工的主要内容。玻璃强化和热加工是通过加热或化学处理等方法，改变玻璃及玻璃制品的外形、表面状态，赋予新功能。

为满足玻璃加工生产技术人员、教学人员及研究人员的需要，我们在参考了大量有关玻璃强化和热加工技术的最新成果等文献资料，并访谈了有实践经验的从事强化和热加工玻璃生产的技术人员和一线操作人员的基础上，编写了本书。

本书以各种玻璃强化和热加工技术原理、生产工艺及设备、产品质量等为主线，介绍了玻璃热弯、物理钢化、化学钢化、特殊钢化、施釉、热熔、封接等玻璃强化和热加工技术方面的内容，力求使本书具有较强的参考性、实用性，以期对玻璃强化和热加工产业发展有些助益。

本书在编写中，得到同事、朋友及家人的大力支持，他们是马军、刘世民、王彦彩、王立坤、冀杉、刘笑阳、付一轩等，在此一并致以衷心的感谢！

鉴于玻璃加工行业发展势头强劲，加之笔者学识有限，实践经验不足，难免在某些问题的界定、分类以及表述等方面存在疏漏和不妥之处，敬请有识之士不吝赐教，给予批评指正。

编者

2013年5月

1.1 概述	1
1.1.1 玻璃强化的概念	1
1.1.2 玻璃热加工的概念	1
1.2 玻璃的黏度	2
1.2.1 玻璃黏度与温度关系	3
1.2.2 玻璃黏度与熔体结构的关系	6
1.2.3 玻璃黏度与组成的关系	7
1.2.4 玻璃黏度参考点	10
1.3 玻璃的热学性质	11
1.3.1 玻璃的热膨胀系数	11
1.3.2 玻璃的比热容	17
1.3.3 玻璃的导热性	19
1.3.4 玻璃的热稳定性	21

2.1 热弯玻璃基本概念	23
2.1.1 热弯玻璃概念	23
2.1.2 热弯玻璃分类	23
2.2 热弯玻璃生产方法	25
2.2.1 成型工艺分类	26
2.2.2 成型工艺控制	27
2.2.3 热弯退火	28
2.3 热弯玻璃生产设备及操作	28

三第 **3** 章

2.3.1	热弯炉	28
2.3.2	热弯炉操作	31
2.3.3	热弯模具的制作	32
2.4	热弯玻璃常见事故及处理	33
2.4.1	热弯炉生产中出现“卡车”现象	33
2.4.2	玻璃热弯后形状不合要求	33
2.4.3	两片玻璃同时热弯后吻合性不一致	34
2.4.4	热弯过程出现中间过火	34
2.4.5	热弯时造成玻璃炸裂	35
2.5	热弯玻璃质量要求及检测	35
2.5.1	材料要求	35
2.5.2	尺寸偏差要求及检测方法	35
2.5.3	吻合度偏差要求及检测方法	36
2.5.4	弧面弯曲偏差要求及检测方法	36
2.5.5	扭曲偏差要求及检测方法	37
2.5.6	应力要求及检测方法	37

玻璃钢化技术

40

3.1	钢化玻璃基本概念	40
3.1.1	钢化玻璃定义	40
3.1.2	钢化玻璃分类	40
3.1.3	钢化玻璃的性能特点	41
3.2	钢化玻璃的发展和应用领域	42
3.2.1	世界钢化玻璃发展	42
3.2.2	我国钢化玻璃发展	43
3.2.3	钢化玻璃的应用领域	44
3.3	物理钢化技术	46
3.3.1	物理钢化原理	46
3.3.2	物理钢化工艺	54
3.3.3	物理钢化工艺参数设定	58
3.3.4	特殊玻璃的物理钢化技术	61
3.3.5	物理钢化设备	68
3.3.6	物理钢化玻璃生产设备的发展	83
3.3.7	钢化炉操作规程	87

3.3.8	物理钢化生产过程中的节能措施	94
3.4	物理钢化玻璃缺陷及处理	95
3.4.1	炸裂缺陷及解决方法	95
3.4.2	变形缺陷及解决方法	96
3.4.3	自爆缺陷及解决方法	100
3.4.4	表面缺陷	104
3.4.5	应力斑缺陷	105
3.4.6	碎片状态不合格缺陷	106
3.4.7	抗冲击不合格缺陷	107
3.5	物理钢化玻璃标准及检测	108
3.5.1	物理钢化玻璃标准	108
3.5.2	衡量钢化玻璃质量的指标	108
3.5.3	尺寸、外观指标及检测	108
3.5.4	安全性能指标及检测	111
3.5.5	钢化性能指标及检测	114

4.1	化学钢化玻璃定义与分类	115
4.1.1	化学钢化玻璃定义	115
4.1.2	化学钢化玻璃分类	115
4.1.3	化学钢化玻璃的性能特点	116
4.2	化学钢化原理	116
4.2.1	玻璃表面离子交换机理	116
4.2.2	化学钢化原理	118
4.3	化学钢化工艺	119
4.3.1	高温离子交换工艺	119
4.3.2	低温离子交换工艺	120
4.3.3	影响化学钢化质量的因素	122
4.3.4	提高化学钢化效率的方法	126
4.4	化学钢化设备	127
4.4.1	化学钢化炉结构和特点	127
4.4.2	化学钢化炉性能参数	128
4.5	化学钢化玻璃质量要求及检测	129
4.5.1	厚度偏差要求及测量方法	129

4.5.2	尺寸偏差要求及测量方法	129
4.5.3	对角线偏差要求及测量方法	130
4.5.4	外观质量要求及检测方法	130
4.5.5	圆孔加工要求及检测	130
4.5.6	弯曲度要求及检测	131
4.5.7	弯曲强度(四点弯法)	131
4.5.8	耐热冲击性要求及检测	133
4.5.9	表面应力要求及检测	133
4.5.10	压应力层厚度要求及检测	134
4.5.11	抗冲击性要求及检测	135

玻璃特殊钢化技术

136

5.1	半钢化玻璃	136
5.1.1	半钢化玻璃与钢化玻璃的区别	136
5.1.2	淬冷和冷却曲线	137
5.1.3	钢化压力和冷却压力的时间控制	137
5.1.4	对于弯曲强度和表面应力的要求	138
5.1.5	对于碎片状态的要求	138
5.1.6	对于碎片状态放行条款	139
5.1.7	碎片状态的试验	139
5.2	区域钢化玻璃	140
5.2.1	定义与特点	141
5.2.2	生产工艺	141
5.2.3	碎片状态要求	142
5.3	均质钢化玻璃	144
5.3.1	定义	144
5.3.2	生产工艺控制	144
5.3.3	生产时注意事项	145
5.3.4	均质钢化玻璃特殊质量要求	147
5.4	弯钢化玻璃	147
5.4.1	定义及特点	147
5.4.2	生产工艺及设备	148
5.4.3	弯钢化玻璃吻合度超差	149
5.4.4	使用时注意事项	150

5.5 钢化夹层玻璃	150
5.5.1 定义及特点	150
5.5.2 加工工艺	150
5.5.3 应用范围	153
5.5.4 使用时注意事项	153
5.6 钢化中空玻璃	154
5.6.1 定义及特点	154
5.6.2 生产工艺	154
5.6.3 生产加工要求	155
5.7 钢化玻璃工程实例	156
5.7.1 钢化玻璃门施工工艺	156
5.7.2 钢化玻璃楼梯栏板施工工艺	159
5.7.3 钢化玻璃隔断施工工艺	160
5.7.4 钢骨架钢化玻璃天窗施工工艺	161

6.1 彩釉玻璃基本概念	163
6.1.1 彩釉玻璃定义	163
6.1.2 彩釉玻璃发展过程	164
6.1.3 彩釉玻璃特性	165
6.1.4 彩釉玻璃用途	165
6.2 彩釉玻璃的生产工艺	167
6.2.1 玻璃前期处理	168
6.2.2 釉料配制	171
6.2.3 印刷网版的准备	174
6.2.4 施釉	193
6.2.5 釉料的烧结	199
6.3 釉料的配制	202
6.3.1 釉料的种类	202
6.3.2 釉料的组成	203
6.3.3 釉料的性能要求	206
6.3.4 釉料的配制	208
6.4 釉料的配色	216
6.4.1 颜色的混合	216

6.4.2	颜色的三属性	220
6.4.3	彩釉的配色	220
6.5	彩釉玻璃常见问题及处理方法	226
6.5.1	釉料问题及处理	226
6.5.2	彩釉玻璃使用过程中出现的问题及处理	228
6.6	彩釉玻璃质量要求及检测	228
6.6.1	外观质量要求及检测	228
6.6.2	尺寸允许偏差及检测	230
6.6.3	弯曲度要求及检测	230
6.6.4	霰弹袋冲击性能要求及检测	230
6.6.5	碎片状态要求及检测	231
6.6.6	耐热冲击性能要求及检测	231
6.6.7	附着玻璃性能要求及检测	231
6.6.8	耐酸性和耐碱性要求及检测	231

第 7 章 玻璃热熔技术 233

7.1	热熔玻璃基本概念	233
7.1.1	热熔玻璃定义	233
7.1.2	热熔玻璃特点	234
7.1.3	热熔玻璃的发展	234
7.2	热熔玻璃生产工艺	234
7.2.1	热熔平板玻璃	235
7.2.2	热熔块(颗粒)玻璃	237
7.3	环保型热熔玻璃制备及性能	238
7.3.1	环保型热熔玻璃原料	239
7.3.2	环保型热熔玻璃制备	239
7.3.3	环保型热熔玻璃性能	241

第 8 章 玻璃封接技术 243

8.1	封接原理	243
8.2	对封接玻璃的性能要求	245
8.3	与玻璃封接用的金属	247
8.3.1	对金属的要求	247

8.3.2	与玻璃封接用的金属及其合金	247
8.4	封接的形式	247
8.4.1	匹配封接	247
8.4.2	非匹配封接	248
8.4.3	金属焊料封接	248
8.4.4	机械封接	249
8.5	玻璃封接的条件	249
8.5.1	两者的热膨胀系数要十分接近	250
8.5.2	玻璃能润湿金属表面	250

第 1 章

玻璃强化及热加工技术 基础知识

1.1 概述

1.1.1 玻璃强化的概念

玻璃强化又通称玻璃钢化。它是用物理的或化学的方法，在玻璃表面上形成一个压应力层，玻璃本身具有较高的抗压强度，不会造成破坏。当玻璃受到外力作用时，这个压力层可将部分拉应力抵消，避免玻璃的碎裂，虽然钢化玻璃内部处于较大的拉应力状态，但玻璃的内部无缺陷存在，不会造成破坏，从而达到提高玻璃强度的目的。玻璃强化加工可分为物理强化和化学强化。

物理强化是将普通平板玻璃在加热炉中加热到接近玻璃的软化温度（600℃）时，通过自身的形变消除内部应力，然后将玻璃移出加热炉，再用多头喷嘴将高压冷空气吹向玻璃的两面，使其迅速且均匀地冷却至室温，即可制得钢化玻璃。这种玻璃处于内部受拉，外部受压的应力状态，一旦局部发生破损，便会发生应力释放，玻璃被破碎成无数小块，这些小的碎片没有尖锐棱角，不易伤人。

化学强化是通过改变玻璃的表面的化学组成来提高玻璃的强度，一般是应用离子交换法进行钢化。其方法是将含有碱金属离子的硅酸盐玻璃，浸入到熔融状态的锂（ Li^+ ）盐中，使玻璃表层的 Na^+ 或 K^+ 与 Li^+ 发生交换，表面形成 Li^+ 交换层，由于 Li^+ 的膨胀系数小于 Na^+ 、 K^+ ，从而在冷却过程中造成外层收缩较小而内层收缩较大，当冷却到常温后，玻璃便同样处于内层受拉，外层受压的状态，其效果类似于物理钢化玻璃。

1.1.2 玻璃热加工的概念

玻璃制品的热加工原理与成形的原理相似，主要是利用玻璃黏度随温度改变的特性以及表面张力与热导率来进行的。各种类型的热加工都必须把制品加热到一定的温度，由于玻璃的黏度随温度升高而减少，同时玻璃的热导率较小，所以

能采取加热的方法，在需要热加工的地方使之变形、软化，甚至熔化流动，以进行改变形状的加工。

在热加工过程中，需掌握玻璃的析晶性能，防止玻璃析晶。玻璃与玻璃或其他材料（如金属陶瓷等）加热焊接时，两者的热膨胀系数必须相同或者相近。玻璃在火焰上加工时，要防止玻璃中的砷、锑、铅等成分被还原而发黑。要结合玻璃的组成与性能，控制适宜的火焰性质和温度。由于玻璃的导电性性能随温度升高而增强。可采用煤气与电加热的方法来加工厚壁玻璃制品。经过热加工的制品应缓慢冷却，防止炸裂或产生大的永久应力。对许多制品还必须进行二次退火。

平板玻璃的热加工主要包括热弯、热熔、叠烧、彩釉、封接等。当然火焰切割、钻孔，激光切割、钻孔，火焰抛光也应算作热加工，但为了总体分类和便于叙述，笔者将其划归冷加工。

1.2 玻璃的黏度

在重力、机械力和热应力等的作用下，玻璃液（或玻璃熔体）中的结构组元（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组元依次占据结构空位的方式来进行，则称为黏滞流动。当作用力超过“内摩擦”阻力时，就能发生黏滞流动。

黏滞流动用黏度衡量。黏度是指面积为 S 的两平行液面，以一定的速度梯度 $\frac{dV}{dx}$ 移动时需克服的内摩擦阻力 f 。

$$f = \eta S \frac{dV}{dx} \quad (1-1)$$

式中 η ——黏度或黏滞系数；

S ——两平行液面间的接触面积；

$\frac{dV}{dx}$ ——沿垂直于液流方向液层间速度梯度。

黏度是玻璃的一个重要物理性质，它贯穿于玻璃生产的全过程。在熔制过程中，石英颗粒的熔解、气泡的排除和各组分的扩散都与黏度有关。在工业上，有时应用少量助熔剂降低熔融玻璃的黏度，以达到澄清和均化的目的。在成形过程中，不同的成形方法与成形速度要求不同的黏度和料性。在退火过程中，玻璃的黏度和料性对制品内应力的消除速度都有重要作用。高黏度的玻璃具有较高的退火温度，料性短的玻璃退火温度范围一般较窄。

影响玻璃黏度的主要因素是化学组成和温度，在转变区范围内，还与时间有关。不同的玻璃对应于某一定黏度值的温度不同。例如黏度为 $10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时，钠钙硅玻璃的相应温度为 560°C 左右，钾铅硅玻璃为 430°C 左右，而钙铝硅玻璃为

720℃左右。

在玻璃生产中，许多工序（和性能）都可以用黏度作为控制和衡量的标志（表 1-1）。使用黏度来描述玻璃生产全过程较温度更为确切与严密，但由于温度测定简便、直观，而黏度和组成关系的复杂性及习惯性，因此习惯上用温度来描述和规定玻璃生产工艺过程的工艺制度。

表 1-1 黏度与特性温度的关系

工艺流程	相应的黏度 /Pa·s	温 度/℃		
		最大范围	一般范围	以 Na ₂ O-CaO-SiO ₂ 玻璃为例
①澄清	10	1000~1550	1200~1400	1460
②成型	开始成型	10 ² ~10 ³	850~1350	1000~1100
	机械供料			1070~1230
	吹料	10		
	落料	10 ³		
	吹制成型	10 ^{2.7} ~10 ^{3.7}		
	压制成型	10 ^{2.6} ~10 ⁵		800
	制品出模	10 ⁶		
③热处理 及其他	开始结晶	10 ³		1070
	结晶过程	10 ⁴ ~10 ⁵		870~960
	软化温度	10 ^{6.5} ~10 ⁷		580~915
	烧结温度	10 ⁸ ~10 ⁹		
	变形温度	10 ⁹ ~10 ¹⁰		640~680
	退化上限温度	10 ¹²		
	应变温度	10 ^{13.5}		510
	退化下限温度	10 ¹⁴		410

1.2.1 玻璃黏度与温度关系

由于结构特性的不同，因而玻璃熔体与晶体的黏度随温度的变化有显著的差别。晶体在高于熔点时，黏度变化很小，当到达凝固点时，由于熔融态转变成晶态的缘故，黏度呈直线上升。玻璃的黏度则随温度下降而增大。从玻璃液到固态玻璃的转变，黏度是连续变化的，其间没有数值上的突变。

所有实用硅酸盐玻璃，其黏度随温度的变化规律都属于同一类型，只是黏度随温度的变化速率以及对应于某给定黏度的温度有所不同。图 1-1 表示两种不同类型玻璃的黏度-温度曲线。这两种玻璃随着温度变化其黏度变化速率不同，称为具有不同的料性。曲线斜率大的玻璃 B 属于“短性”玻璃；曲线斜率小的玻

璃 A 属于“长性”玻璃。如果用温度差来判别玻璃的料性，则温度差值越大，玻璃的料性就越长，玻璃成形和热处理的温度范围就越宽广，反之就狭小。

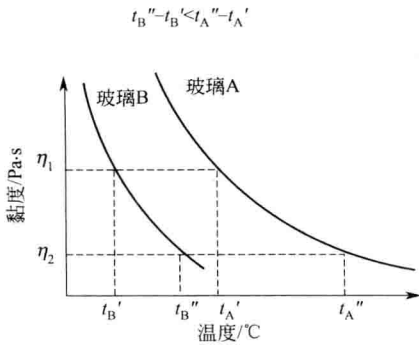


图 1-1 两种不同类型玻璃的温度-黏度曲线

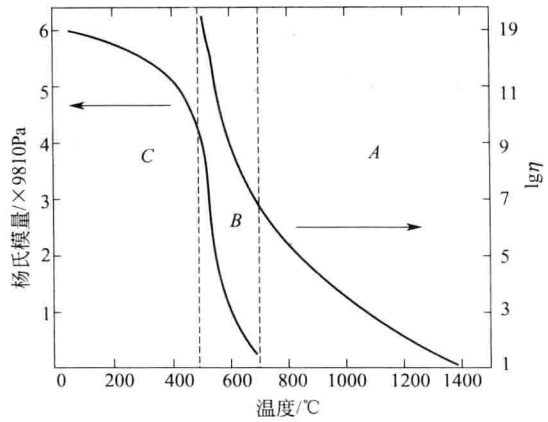


图 1-2 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 玻璃的弹性、黏度与温度的关系

图 1-2 是 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 玻璃的弹性、黏度与温度的关系曲线。图中分三个区。在 A 区因温度较高，玻璃表现为典型的黏性液体，它的弹性性质近于消失。在这一温度区中黏度仅决定于玻璃的组成与温度。当温度进入 B 区（温度转变区），黏度随温度下降而迅速增大，弹性模量（杨氏模量）也迅速增大。在这一温度区，黏度（或其他性质）除决定于组成和温度外，还与时间有关。当温度继续下降进入 C 区，弹性模量进一步增大，黏滞流动变得非常小。在这一温度区，玻璃的黏度（或其他性质）又仅决定于组成和温度，而与时间无关。上述变化现象可以从玻璃的热历史加以说明。

从液体的结构可知，液体中各质点之间的距离和相互作用力的大小均与晶体接近，每个质点都处于周围其他质点键力作用之下，即每个质点均是落在一定大小的势垒（ Δu ）之中。要使这些质点移动（流动），就得使它们具有足以克服该势垒的能量。这种活化质点（具有大于 Δu 能量的质点）数目越多，液体的流动度就越大；反之流动度就越小。按玻尔兹曼分布定律，活化质点的数目与 $e^{-\frac{\Delta u}{kT}}$ 成比例。则液体的流动度 ϕ 可表示为：

$$\phi = A' e^{-\frac{\Delta u}{kT}} \quad (1-2)$$

因 $\phi = \frac{1}{\eta}$ ，故

$$\eta = A e^{\frac{\Delta u}{kT}} \quad (1-3)$$

式中 Δu ——质点的黏滞活化能；

A ——与组成有关的常数；

K ——玻尔兹曼常数；

T ——绝对温度。

式(1-3)表明，液体黏度主要决定于温度和黏滞活化能。随着温度升高，液体黏度按指数关系递减。当黏滞活化能 (Δu) 为常数时，将式(1-3)取对数可得：

$$\lg \eta = \alpha + \frac{\beta}{T} \quad (1-4)$$

式中 $\beta = \frac{\Delta u}{K} \lg e$ ，为常数；

$\alpha = \lg A$ ，为常数。

式(1-4)表明， $\lg \eta$ 与 $\frac{1}{T}$ 成简单的线性关系。这是因为温度升高，质点动能增大，使更多的质点成为“活化”质点之故。

图 1-3 是一般玻璃的 $\lg \eta$ 与 $\frac{1}{T}$ 的关系曲线，高温区域 ab 段和低温区域 cd 段都近似直线，而 bc 段不呈直线，这是因为式(1-4)仅对不缔合的简单液体具有良好的适应性。对多数硅酸盐液体（如熔融玻璃）而言，高温时熔体基本上未发生缔合，低温时缔合趋于完毕， Δu 都为常数，故 ab 段和 cd 段都呈直线关系。但当玻璃从高温冷却时，对黏度起主要作用的阴离子团 ($\text{Si}_x\text{O}_y^{2-}$) 不断发生缔合，成为巨大复杂的阴离子团。伴随着阴离子团的缔合，其黏滞活化能亦随之增大，尤其在 $T_g - T_f$ 温度范围内。因而在 bc 段不呈直线关系，与式(1-4)产生很大偏差。

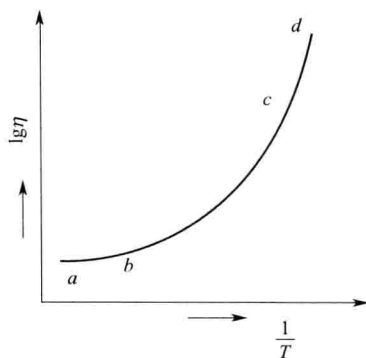


图 1-3 玻璃的 $\lg \eta$ 与 $1/T$ 的关系

进一步研究指出， $\Delta u = \frac{b}{T}$ ，说明黏滞活化能是温度的函数， Δu 与键强 b 成正比，与绝对温度 T 成反比。代入式(1-4)，则：

$$\lg \eta = \alpha + \frac{b'}{T^2} \quad (1-5)$$

式中， $b' = \frac{b}{K} \lg e$ 。

式(1-4)、式(1-5)都为近似公式，因而有人提出更精确的黏度计算公式如式(1-6)所示，但其很复杂不便计算，故式(1-4)、式(1-5)通常被采用。

$$\lg \eta = a + \frac{\alpha'}{T} e^{\frac{b}{T}} \quad (1-6)$$