



中华人民共和国国家标准

GB/T 45505.3—2025

平板显示器基板玻璃测试方法 第3部分：热学性能

Test method of flat panel display glass substrate—
Part 3: Thermal properties

2025-08-01 发布

2026-02-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 45505《平板显示器基板玻璃测试方法》的第 3 部分。GB/T 45505 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：外观与几何；
- 第 2 部分：表面性能；
- 第 3 部分：热学性能；
- 第 4 部分：力学性能；
- 第 5 部分：光电性能。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国半导体设备和材料标准化技术委员会(SAC/TC 203)提出并归口。

本文件起草单位：芜湖东旭光电科技有限公司、中国电子技术标准化研究院、郑州旭飞光电科技有限公司、彩虹集团有限公司、蚌埠中光电科技有限公司、河北光兴半导体技术有限公司、彩虹显示器件股份有限公司、中建材玻璃新材料研究院集团有限公司、石家庄旭新光电科技有限公司、东旭集团有限公司、甘肃旭盛显示科技有限公司、彩虹集团(邵阳)特种玻璃有限公司、青岛融合光电科技有限公司、浙江星柯光电科技有限公司、浙江创柔显示科技有限公司、湖南邵虹特种玻璃股份有限公司、新疆腾宇光电科技有限公司。

本文件主要起草人：李青、胡恒广、金良茂、陈晓宁、赵俊莎、吴怡然、石志强、张玉娇、赵玉乐、曹可慰、杨国洪、仵小曦、曹志强、朱明柳、郑权、孔秀梅、李森、舒众众、李赫然、苏记华、王世岚、李瑞佼、闫冬成、高伟明、李志军、张广涛、沈玉国、韦泽光、徐莉华、杨荣、史泽远、张宝帅、曹欣、崔介东、刘元奇、罗康、张盼、刘文渊、高羽、薛新建、刘丹、张文亮、路士广、黄星桦、李靖波、刘正茂、石丽芬、杜秀红、杨懿、刘俊、江志文、王萍萍、高强。

引 言

平板显示器基板玻璃是电子信息显示产业的关键战略材料,基板玻璃质量与面板成品的分辨率、透光度、厚度、重量、可视角度等指标密切相关,代表着全球现代玻璃规模化制造领域的最高水平。在显示基板玻璃不断高清化、大尺寸化、超薄化的情况下,对显示基板玻璃的质量要求逐年提高。

外观、长宽尺寸及偏差、厚度偏差、厚薄差、边缘形状、切角偏差、定位角偏差、直角度、挠度、翘曲度、表面粗糙度、波纹度、退火点、应变点、软化点、平均线热膨胀系数、导热系数、再热线收缩率、密度、应力、杨氏模量、剪切模量、泊松比、维氏硬度、透过率、折射率、体积电阻率、介电常数和介质损耗因数是平板显示器基板玻璃的重要指标,这些指标会影响平板显示器基板玻璃的产品质量,因此有必要确立平板显示器基板玻璃测试方法。

GB/T 45505 旨在给出平板显示器基板玻璃各项性能测试方法,拟由五个部分构成。

- 第1部分:外观与几何尺寸。目的在于提供平板显示器基板玻璃外观与几何尺寸的测试方法。
- 第2部分:表面性能。目的在于提供平板显示器基板玻璃表面性能的测试方法。
- 第3部分:热学性能。目的在于提供平板显示器基板玻璃热学性能的测试方法。
- 第4部分:力学性能。目的在于提供平板显示器基板玻璃力学性能的测试方法。
- 第5部分:光电性能。目的在于提供平板显示器基板玻璃光电性能的测试方法。

平板显示器基板玻璃测试方法

第3部分:热学性能

1 范围

本文件描述了平板显示器用基板玻璃退火点、应变点、软化点、平均线热膨胀系数、导热系数和再热线收缩率的测量方法。

本文件适用于所有类型的平板显示器用基板玻璃热学性能的测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 1216 外径千分尺

GB/T 16920—2015 玻璃 平均线热膨胀系数的测定

GB/T 21389 游标、带表和数显卡尺

GB/T 38711—2020 超薄玻璃再热线收缩率试验方法 激光法

GB/T 38712—2020 超薄玻璃导热系数试验方法 热流法

3 术语和定义

GB/T 16920—2015、GB/T 38712—2020、GB/T 38711—2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

退火点 annealing point

相应于基板玻璃黏度为 10^{13} dPa·s 时的温度。

3.2

应变点 strain point

相应于基板玻璃黏度为 $10^{14.5}$ dPa·s 时的温度。

3.3

软化点 softening point

对应于基板玻璃黏度为 $10^{7.6}$ dPa·s 时的温度。

3.4

平均线热膨胀系数 mean coefficient of linear thermal expansion

在一定的温度间隔内,试样的长度变化与温度间隔及试样初始长度之比。

[来源:GB/T 16920—2015,3.1,有修改]

3.5

导热系数 thermal conductivity

在单位面积上,由垂直此面方向的单位温度梯度引起的稳态热流的速率。

注：在稳态导热条件下，以热流量的密度除以温度梯度表示。

[来源：GB/T 38712—2020,3.2,有修改]

3.6

再热线收缩率 reheating shrinkage

将玻璃试样按一定加热、保温、冷却工艺进行重新加热冷却处理，玻璃结构出现松弛导致尺寸相对于原长度的收缩变化率。

[来源：GB/T 38711—2020,3.2]

4 试验方法

4.1 退火点、应变点测量

4.1.1 仪器设备

退火点应变点仪；立式管状炉炉温控制精度不低于±2℃；测量玻璃丝伸长装置能够准确测量出6mm范围内玻璃丝长度变化，测量偏差为±0.01mm；计时器精度为1s。

4.1.2 试样要求

选取无结石、气泡和条纹等缺陷的待测玻璃，拉制成直径为0.65mm±0.10mm的玻璃丝。玻璃丝上直径相差不大于0.02mm，不含有气泡和斑点。玻璃丝两端烧熔成直径为2mm±0.5mm的圆珠。圆珠之间丝的长度为460mm±5mm，即为试样。注意试样上两圆珠圆心和丝的中心线应保持在一同一直线上，测量试样丝(不包括两圆珠)长度和直径；从距离试样丝顶端25.4mm的第一个点开始，每隔25.4mm测量一次直径，获取12个直径的平均值即为试样丝直径。

4.1.3 测试步骤

4.1.3.1 接通电源，使管状炉升温，到高于试样预定退火点约30℃，保温30min。

4.1.3.2 将试样放入石英夹具上，小心地放入炉膛，将上石英夹具悬挂于试样架上，此时石英夹具和试样应位于炉膛中央，不应接触炉壁，必要时可调节管状炉底盘上水平调节螺丝。

4.1.3.3 管状炉以4℃/min±1℃/min的速度降温，到试样预定退火点以上20℃时，用链子将重锤悬挂在下石英夹具上，光学杠杆支臂放置在重锤上。调节反射镜支点的位置，直到在望远镜视场内能看到反射镜，并且在镜面内有清晰的刻度尺所反射的刻度为止。

4.1.3.4 每隔1min测量一次试样伸长值，间隔中，于30s时测量一次温度值，直到试样不再伸长时，停止测量，放下重锤，取出石英夹具和试样，测试完成。

4.1.4 计算

退火点时试样每分钟伸长长度ΔL₁按公式(1)计算：

ΔL₁ = 2.5 × 10⁻¹⁰ × (m × L × F) / d²(1)

式中：

ΔL₁ ——退火点时试样每分钟伸长长度，单位为米(m)；

m ——加于试样上的质量，单位为千克(kg)；

L ——试样长度，单位为米(m)；

F ——光学杠杆系统放大倍数；

d ——试样直径，单位为米(m)。

应变点时试样每分钟伸长长度 ΔL_2 按公式(2)计算:

$$\Delta L_2 = 7.9 \times 10^{-12} \times \frac{m \times L \times F}{d^2} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

ΔL_2 ——应变点时试样每分钟伸长长度,单位为米(m);

m ——加于试样上的质量,单位为千克(kg);

L ——试样长度,单位为米(m);

F ——光学杠杆系统放大倍数;

d ——试样直径,单位为米(m)。

将 4.1.3.4 中测量出的各点数据在半对数坐标纸上做温度(由毫伏换算)-伸长速度关系曲线(等分坐标表示温度,对数坐标表示伸长速度),此线与计算得到的伸长速度为 ΔL_1 和 ΔL_2 直线相交,交点所对应的温度分别为退火点和应变点,如图 1 所示。

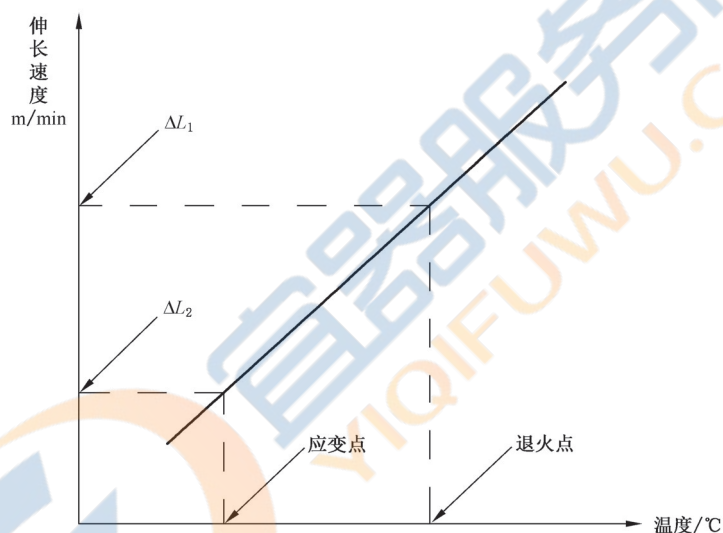


图 1 温度-伸长速度关系图

4.2 软化点测量

4.2.1 仪器设备

4.2.1.1 软化点仪:温度控制器能控制电炉的加热速度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;纤维伸长测量装置精确度为 0.02 mm ;计时器精度为 1 s 。

4.2.1.2 纤维直径测量工具:最小分度值不低于 0.01 mm 的外径千分尺。

4.2.2 试样要求

4.2.2.1 纤维样品应符合如下要求:

- 圆形;
- 平滑,无孔隙和杂质;
- 平均直径为 $0.65\text{ mm} \pm 0.10\text{ mm}$,在纤维的全长范围内,最大直径与最小直径之差不大于 0.02 mm ;
- 长度为 $235\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ (不包括顶端球);

——试验过程中玻璃不能发生失透。

4.2.2.2 纤维样品的制备:用两根不易熔化的棒(例如铂棒、瓷棒或石英玻璃棒)分别连在清洁的试验样品两端,用火焰灼烧样品直至玻璃完全熔化并拉制成玻璃纤维。样品是长棒形,则可直接用火焰烧制,不必加把手。从拉成的玻璃纤维上截取符合要求的区段,将此区段的一端用火焰烧成一个球,另一端按规定长度截下,要求时,可对此端用火焰精加工。也可使用任何适当的设备来拉制纤维。

4.2.3 测试步骤

4.2.3.1 参考标准玻璃校准

选择与试验玻璃软化点接近的参考标准玻璃,测量参考标准玻璃的软化点,对仪器进行校准。计算用参考标准玻璃所测得的软化点的平均值与标准玻璃软化点标准值之间的差值。重复上述试验,求出这两次试验差值的平均值。当平均差值大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,则将此偏差作为修正值,对测出的试验玻璃软化点需加上或减去此修正值。

4.2.3.2 测量

试样测量步骤如下。

- a) 为使电炉的热分布均匀,将电炉加热到比试验玻璃预测的软化点高 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,然后降温,使炉温达到低于预测软化点 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。调节加热速度控制器使加热速度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测出此时的控制位置。
- b) 重复上述试验,降温并使炉温保持在比预测软化点低 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度上。把纤维插入炉中,将纤维的球端放在炉子的样品支架上。检查纤维是否自由悬挂在炉子中央。必要时,可重新调整炉子的水平,预备好温度测量装置并调好伸长测量装置。
- c) 调节炉温控制器,使加热速度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,当纤维开始以大约 $0.1\text{ mm}/\text{min}$ 的速度伸长时,记下纤维的长度,精确至 0.02 mm 。以第一次记录纤维长度值的时间点为起点,每隔 1 min 读取一次纤维长度值,以每次读取纤维长度值的时间点为起点,间隔 30 s 读取一次炉温值。连续读出和记录长度、温度,直至每分钟的伸长大于或等于 1.2 mm 时为止。当 1 min 内的伸长超过 1.2 mm 时,取出纤维,使炉子冷却至备用状态,以便再次进行测量;另一种方法是以第一次记录纤维长度值的时间点为起点,每隔 30 s 读取一次纤维长度值,以每次读取纤维长度值的时间点为起点,间隔 15 s 读取一次炉温值,连续读出并记录长度和温度,直到每 30 s 内的伸长大于或等于 0.6 mm 时为止。

4.2.4 计算

读取伸长速率为 $1.0\text{ mm}/\text{min}$ 的温度,这个温度即为软化点。

4.3 平均线热膨胀系数测量

4.3.1 仪器设备

4.3.1.1 膨胀仪应具备以下功能:

- 加热炉升降温速率能控制在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,温度控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 温度测量装置显示精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 推杆式膨胀仪(水平或垂直)能测出 $2\times 10^{-6}L$ 的试样长度变化量(即 $0.2\text{ }\mu\text{m}/100\text{ mm}$)。

4.3.1.2 外径千分尺应符合 GB/T 1216 的要求,游标卡尺应符合 GB/T 21389 的要求。

4.3.2 试样要求

4.3.2.1 形状和尺寸

试样通常为棒状,其形状取决于所用膨胀仪的类型,长度 L 。至少应为膨胀仪长度测量分辨率的 5×10^5 倍。

注:例如,试样是直径为5 mm的圆棒,长度为 $50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$,或根据膨胀仪结构,试样是截面为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、长度为 $25 \text{ mm} \sim 100 \text{ mm}$ 的正方形棒,其他方形或矩形截面要能保证测量的精度和重复性。

4.3.2.2 试样制备

选取没有结石、气泡和条纹等缺陷的玻璃,用机械切割或热加工的方法制成试样所需的形状和尺寸,然后进行退火。退火方法是:将试样加热到比玻璃化转变温度高约 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,以 $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率将试样冷却至比玻璃化转变温度低约 $150 \text{ }^\circ\text{C}$,在无通风的条件下将试样进一步冷却至室温。

4.3.2.3 数量

每次试验应测试两个试样。

4.3.3 测试步骤

4.3.3.1 仪器校准

为了核对试验装置是否正常运行,用标准材料做样品。按4.3.3和4.3.4进行试验和计算,标准样品的平均线热膨胀系数值是已知的标准值。

宜使用下面的标准材料:

- 蓝宝石玻璃标准样品;
- 氧化铝陶瓷标准样品;
- 硼硅玻璃标准样品;
- 纯铂棒;
- 按照4.3.2.2退过火的石英玻璃。

标准样品的形状和尺寸,应与通常在试验装置中进行试验的样品形状和尺寸相似。

应确保标准材料的热膨胀特性不被试验所改变,如果标准材料是玻璃应按4.3.2.2退火,除非标准材料的验证者规定了其他步骤。

4.3.3.2 试验温度范围的选择

标称起始温度 t_0 为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,由于实际环境原因,实际起始温度可在 $20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$;终点在 $300 \text{ }^\circ\text{C} \sim 380 \text{ }^\circ\text{C}$,即 $300 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 380 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在计算中应使用温度的实际测量值,但在结果中应用标称温度表示,只要所选的实际温度在规定的范围内,系数所受影响可小到忽略不计。所有温度和温差的读数精度应为 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4.3.3.3 基准长度的测定

在基准温度为 t_0 时,测定退过火的试样的基准长度 L_0 ,其精度为 0.1% ,然后将试样放在膨胀仪内,稳定5 min后按照4.3.3.4或4.3.3.5开始试验。

4.3.3.4 升温试验

在初始温度为 t_0 时确定膨胀仪的位置,并将这个读数作为将要测量的未修正的长度变化量 ΔL_{meas}

的零点,然后将炉温控制装置(4.3.1.1)调到所需的加温程序开始升温,升温速率不应超过 5 °C/min。记录温度 t 和相应的长度变化量 ΔL_{meas} ,直到所需要的终点温度。

因为在温度由 $t_0 \sim t$ (根据 4.3.3.2 选择)的升温期间,记录的膨胀读数 ΔL_{meas} ,由于热电偶的热接点和试样之间存在温差,所以试样的表观温度应加上修正值。

注:此修正值的大小,依赖于温度变化速率和加热炉与试样之间热交换的速率。从根本上讲,修正值是要与恒温试验相比较而确定的。

4.3.3.5 恒温试验

在初始温度为 t_0 时确定膨胀仪的位置,并将这个读数作为将要测量的未修正的长度变化量 ΔL_{meas} 的零点,然后加热使炉温达到所选择的终点温度 t ,并保持炉温恒定到 $t \pm 2$ °C,20 min 后从膨胀仪上读取 ΔL_{meas} 的值。

注:虽然升温试验能够在试验进行中测定各种温度 t 的系数 $\alpha(t_0; t)$,如果只要求一个终点温度 t 时,将优先采用恒温试验,因为这个试验能提供比较好的精度。

4.3.4 计算

4.3.4.1 最终长度计算

由测得的长度变量 ΔL_{meas} ,计算温度为 t 时的修正后的长度 L 用公式(3)表示:

$$L = L_0 + \Delta L_{\text{meas}} + \Delta L_Q - \Delta L_B \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- L —— 温度为 t 时的修正后的试样长度,单位为毫米(mm);
- L_0 —— 基准温度为 t_0 时,退过火的试样的基准长度,单位为毫米(mm);
- ΔL_{meas} —— 未修正的长度变化量,单位为毫米(mm);
- ΔL_Q —— 承载试样装置膨胀,单位为毫米(mm);
- ΔL_B —— 膨胀仪修正值,单位为毫米(mm)。

修正项 ΔL_Q 和 ΔL_B 分别在 4.3.4.2 或 4.3.4.3 中解释。

4.3.4.2 承载试样装置膨胀(ΔL_Q)的计算

在使用单推杆式膨胀仪的情况下,公式(3)中的修正项 ΔL_Q 是位于试样近旁的承载试样装置在温度为 t_0 时长度为 L_0 的那部分的热膨胀。

在使用差动式推杆膨胀仪的情况下,修正项 ΔL_Q 是标准杆的热膨胀长度,标准杆与样品有相同的长度,在温度为 t_0 时长度为 L_0 。

在任何一种情况下,修正项 ΔL_Q 都用公式(4)计算:

$$\Delta L_Q = L_0 \alpha_Q(t_0; t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- ΔL_Q —— 承载试样装置膨胀,单位为毫米(mm);
- L_0 —— 基准温度为 t_0 时,退过火的试样的基准长度,单位为毫米(mm);
- $\alpha_Q(t_0; t)$ —— 在单推杆式膨胀仪的情况下, α_Q 是制作承载试样装置所用材料的平均线热膨胀系数;在差动式推杆膨胀仪的情况下, α_Q 是制作标准杆材料的平均线热膨胀系数;单位为每开(K⁻¹)。

如果承载试样装置,推杆或标准杆是由基本上不含氢氧根的石英玻璃制作,可使用表 1 中给出的 α_Q 值,膨胀仪的这些部件在第一次使用之前应在 1 100 °C 退火 7 h,然后以 0.2 °C/min 恒定速率从 1 100 °C 冷却至 900 °C。

为了避免石英玻璃的失透,表面要保持清洁,建议用分析纯乙醇清洗两次,清洗后避免用手指接触表面。

表 1 石英玻璃的平均线热膨胀系数 α_Q 值

温度范围 ℃	α_Q 值 K ⁻¹
20~100	0.54×10^{-6}
20~200	0.57×10^{-6}
20~300	0.58×10^{-6}
20~400	0.57×10^{-6}

注：当系统加热到高于 700 ℃ 时，表中给出的 α_Q 值会有变化。

4.3.4.3 膨胀仪修正值(ΔL_B)的测定

设置膨胀仪的修正项 ΔL_B 是必要的，因为处于温度为 t 的试样和处于环境温度的测长计之间的过渡区域内温度分布不均匀，膨胀仪修正项用空白试验测定。

使用单推杆式膨胀仪时，空白试验的试样由与制造膨胀仪相同材料制作。如果空白试验试样是由石英玻璃制作的则应按 4.3.2.2 退火。

使用差动式推杆膨胀仪时，允许使用石英玻璃或其他合适的材料制作的两个相同的样品。

空白试验应和玻璃的测定在相同的条件下进行，在每次按 4.3.3.1 进行仪器校准时要重复空白试验。

4.3.4.4 平均线热膨胀系数的计算

为计算平均线热膨胀系数 $\alpha(t_0; t)$ ，将 L_0 和 ΔL_{meas} 的测量值，根据 4.3.4.2 和 4.3.4.3 确立的修正值， t_0 实测值及 t 值(如果是升温试验，用修正后的值)代入公式(5)：

$$\alpha(t_0; t) = \frac{1}{L_0} \times \frac{\Delta L_{\text{meas}} + \Delta L_Q - \Delta L_B}{t - t_0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\alpha(t_0; t)$ —— 平均线热膨胀系数，单位为每开(K⁻¹)；

L_0 —— 基准温度为 t_0 时，退过火的试样的基准长度，单位为毫米(mm)；

ΔL_{meas} —— 未修正的长度变化量，单位为毫米(mm)；

ΔL_Q —— 承载试样装置膨胀，单位为毫米(mm)；

ΔL_B —— 膨胀仪修正值，单位为毫米(mm)；

t —— 终点温度(如果是升温试验，用修正后的值)，单位为摄氏度(℃)；

t_0 —— 基准温度实测值，单位为摄氏度(℃)。

计算两个试样(4.3.2.3)的 $\alpha(20 \text{ }^\circ\text{C}; 300 \text{ }^\circ\text{C})$ ，也可根据需求分别测定出 $\alpha(20 \text{ }^\circ\text{C}; 200 \text{ }^\circ\text{C})$ ， $\alpha(20 \text{ }^\circ\text{C}; 100 \text{ }^\circ\text{C})$ 或 $\alpha(20 \text{ }^\circ\text{C}; 400 \text{ }^\circ\text{C})$ 。如果 $\alpha(20 \text{ }^\circ\text{C}; t) < 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 取两位有效数字，如果 $\alpha(20 \text{ }^\circ\text{C}; t) \geq 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 取 3 位有效数字。

4.3.5 测试结果要求

两个试样结果的绝对差值应不大于 $0.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，此时，测量结果取两个试样结果的算术平均值；否则，重新制样进行试验。

4.4 导热系数测量

4.4.1 仪器设备

导热系数测量仪主要由加热源、冷极、热极、加压系统、冷却系统、热电偶等组成,其中加热器温度偏差小于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷却系统温度偏差小于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、热电偶分度值应为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.4.2 试样要求

4.4.2.1 试样制备

试样制备应符合如下要求:

- 在玻璃原片上截取满足测试用同规格圆形或正方形玻璃小片,并且玻璃小片的直径或对角线长度与热极直径的偏差不大于 1 mm ;
- 使用符合 GB/T 1216 要求的千分尺测量玻璃小片厚度,计算叠加厚度大于 2 mm 的玻璃小片数量;
- 将玻璃小片进行清洗烘干,确保表面清洁;
- 采用导热系数大于 $1.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的导热硅脂,将清洗后的玻璃小片进行逐层黏结叠加,玻璃小片间的导热硅脂应涂抹均匀;
- 采用不小于 200 N 的压力对叠加后的试样进行压实,然后将试样边部溢出的导热硅脂擦拭干净;
- 使用符合 GB/T 1216 要求的千分尺测量压实后的试样厚度,按 120° 旋转测量 3 次取平均值,记为 d ,要求玻璃叠片之间的导热硅脂厚度不大于试样厚度 d 的 20% 。

4.4.2.2 试样数量

每次试验应测试 3 个试样。

4.4.3 测试步骤

4.4.3.1 仪器校正

必要时,应采用已知导热系数的样品按 4.4.3.2~4.4.3.4 测试步骤对试验装置进行校正。

4.4.3.2 测试准备

测试准备步骤如下:

- 将所有热电偶的冷端插入冰水混合物中($0\text{ }^{\circ}\text{C}$),进行冷端温度补偿;
- 设置冷极温度, $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 设置热极温度,热极温度应大于冷极温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.4.3.3 试样放置

将试样上下两面涂抹导热系数不小于 $1.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 导热硅脂,试样上下两面的导热硅脂总厚度不大于 0.1 mm ,然后将其放置在冷极和热极之间。

4.4.3.4 试样测试

对试样进行加压,作用力不小于 200 N ,开始测试,当达到热平衡时(每分钟波动小于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,视为热平衡),记录热极温度 t_1 、 t_2 和冷极温度 t_3 、 t_4 。

4.4.4 计算

按公式(6)分别计算 3 个玻璃试样的导热系数,分别记为 λ_{S1} 、 λ_{S2} 和 λ_{S3} 。

$$\lambda_s = \frac{A_c}{A_s} \times \frac{\lambda_c \times [(t_1 - t_2) \times l_2 + (t_3 - t_4) \times l_1] \times d}{2 \times l_1 \times l_2 \times (t_2 - t_3)} \dots\dots\dots(6)$$

式中:

- λ_s ——测定样品的导热系数,单位为瓦每米开[W/(m·K)];
- A_c ——垂直于热流方向的热极截面积,单位为平方米(m²);
- A_s ——垂直于热流方向的样品截面积,单位为平方米(m²);
- λ_c ——热极平均温度的导热系数,单位为瓦每米开[W/(m·K)];
- t_1 和 t_2 ——热电偶 1 和热电偶 2 的温度,单位为开(K);
- l_2 ——热电偶 3 和热电偶 4 之间的距离,单位为米(m);
- t_3 和 t_4 ——热电偶 3 和热电偶 4 的温度,单位为开(K);
- l_1 ——热电偶 1 和热电偶 2 之间的距离,单位为米(m);
- d ——样品的厚度,单位为米(m)。

4.4.5 测试结果要求

4.4.5.1 测试结果

计算 3 个试样测量结果的算术平均值记为所测玻璃导热系数 λ_a ,保留至小数点后两位。

4.4.5.2 结果重复性

3 个试样测量结果相对标准偏差不大于 5%,则测试结果视为有效;相对标准偏差大于 5%,则重新制样和测试,直到符合偏差要求。

4.5 再热线收缩率测量

4.5.1 仪器设备

再热线收缩率测试仪包括加热炉、测距仪三向调整平台、激光传感器、智能温度控制系统、架体、石英支架、石英顶杆等,其中激光传感器精度 0.20 μ m、控温精度 ± 1 $^{\circ}$ C。

4.5.2 试样要求

4.5.2.1 形状和尺寸

试样要求为长方形,推荐尺寸为长度不小于 270 mm,宽 20 mm~25 mm,长方向的两个端面磨平抛光,两边平行且四角垂直。

4.5.2.2 试样数量

每次试验应测试两个试样。

4.5.3 测试步骤

4.5.3.1 试样静置

将仪器装置放置在大理石台面实验桌或减震台上,在试验前,试样在测量环境中放置不少于 1 h。

4.5.3.2 仪器校准

按照以下步骤进行：

- a) 采用与托架同材质且经过严格热处理的石英校正试样，其长度、厚度与玻璃试样相近；
- b) 采用符合 GB/T 21389 要求的游标卡尺测量石英校正试样长度 L_0 ，结果保留至 0.000 01 m；
- c) 石英校正试样放置在石英支架上，并置入加热炉内；
- d) 将石英顶杆一端（炉内）压实在石英校正试样端部，施加 80 g 配重砝码；
- e) 调节测距仪三向调整平台，使激光传感器的光斑对准石英顶杆炉外端面；
- f) 调节三向调整平台的前后位置使激光传感器处于量程测量范围之内；
- g) 设定升温速率；
- h) 设定保温温度；

注：不同玻璃品种保温温度不同，保温温度低于玻璃转变温度 T_g 不超过 100 °C。

- i) 设定保温时间，使玻璃受热均匀；
- j) 设定降温速率，使测试仪器冷却至室温；
- k) 将石英玻璃标准样品放入测试仪器中，在实验环境中静置 30 min，待激光传感器示值稳定后，读取并记录激光传感器示值 D_0 ；
- l) 按步骤 g)~j) 温度制度对石英校正试样进行加热、保温、冷却处理，恢复到室温 2 h 后读取并记录激光传感器示值 D_1 ；
- m) 按公式(7)计算此装置的再热线收缩率校准值 S_J 。

$$S_J = (D_0 - D_1) / L_0 \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- S_J ——装置的再热线收缩率校准值，单位为微米每米($\mu\text{m}/\text{m}$)；
- D_0 ——升温前激光传感器示值，单位为微米(μm)；
- D_1 ——降温后激光传感器示值，单位为微米(μm)；
- L_0 ——玻璃试样的初始长度，单位为米(m)。

4.5.3.3 试样测试

将玻璃试样按 4.5.3.2 进行测试。两个试样测量结果分别记为 S_1 、 S_2 ，求算术平均值 S_C 。

4.5.4 计算

玻璃试样的再热线收缩率 S 按公式(8)计算。

$$S = S_C - S_J \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- S ——玻璃试样的再热线收缩率，单位为微米每米($\mu\text{m}/\text{m}$)；
- S_C ——玻璃试样再热线收缩率测量值，单位为微米每米($\mu\text{m}/\text{m}$)；
- S_J ——系统校正的再热线收缩率，单位为微米每米($\mu\text{m}/\text{m}$)。

4.5.5 测试结果要求

当 4.5.3.3 中两个平行试样测量结果相对偏差大于 3% 时，应重新制样并进行测试。

5 试验报告

试验报告应至少包括以下内容：

- 测试方法标准名称及编号；
 - 样品相关信息；
 - 设备相关信息；
 - 试验相关参数；
 - 测试结果；
 - 检验人、审核人、日期；
 - 其他相关信息。
-

