

材料概论实验

汪济奎 宋鹂 王以群
章圣苗 史凌云 编写

华东理工大学
材料科学与工程学院

2015.3

前言

《材料概论实验》是材料类专业的学科基础教育实验课，课程内容面向大材料，通过对高分子材料、无机非金属材料 and 金属材料等若干宏观性能的实验操作和对实验结果的数据处理分析，让学生初步掌握和了解材料的力学、热学、光学和电学等宏观性能的基本测试方法，提高学生的实验动手能力和分析问题的能力。结合《材料概论》理论课程的学习，为后续的专业课程学习和实验打下良好的基础。

本实验讲义是根据材料学院所开设的《材料概论实验》内容而编写的，主要包括四个方面的实验内容：材料的力学性能、热学性能、光学性能和电学性能的测试。

第一部分由汪济奎教授编写，第二部分由宋鹂副教授和史凌云编写，第三部分由王以群副教授编写，第四部分由章圣苗编写。

在讲义编写的过程中，难免会出现错误，希望使用本讲义的老师和学生随时给予建议和指正，以便改进，不胜感谢之至。

编者
2015.3

目录

第一部分 材料的力学性能测试	(1)
1.1 塑料冲击性能实验	(1)
1.1.1 简支梁冲击试验	(1)
1.1.2 悬臂梁冲击实验	(7)
1.2 塑料硬度实验	(13)
1.2.1 邵氏硬度	(13)
1.2.2 洛氏硬度	(15)
1.3 材料拉伸试验	(21)
第二部分 材料的热学性能测试	(24)
2.1 热膨胀系数的测试	(24)
2.2.1 基本概念	(24)
2.2.2 玻璃、陶瓷等材料的线膨胀系数测试	(26)
2.2.3 金属线膨胀系数的测试	(29)
2.2.4 其他测试方法简介	(32)
2.3 导热系数的测试	(34)
2.3.1 基本概念	(34)
2.3.2 YBF-3 型导热系数测试仪	(35)
2.3.2 其他测试方法简介	(40)
第三部分 材料的光学性能测试	(42)
3.1 材料折射率的测试	(42)
3.1.1 基本概念	(42)
3.1.2 材料折射率的测定	(43)
3.2 材料透过率和光谱的测试	(45)
3.2.1 基本概念	(45)
3.2.2 玻璃、高分子材料的透过率测试	(46)
3.3 材料雾度值的测试	(48)
3.3.1 基本概念	(48)
3.2.2 玻璃、高分子材料的透过率测试	(48)
第四部分 材料的电学性能测试	(51)
4.1 表面电阻及体积电阻的测试	(51)
4.2 介电常数及介质损耗的测试	(54)

第一部分 材料力学性能实验

1.1 塑料冲击性能实验

冲击性能试验是在冲击负荷作用下测定材料的冲击强度。冲击强度用于评价材料抵抗冲击的能力或判断材料的脆性或韧性程度，因此，冲击强度也称冲击韧性。塑料材料的冲击韧性在工程应用上是一项重要的性能指标，它反映不同材料抵抗高速冲击而致破坏的能力。

通常，冲击性能试验对工程材料的缺陷很敏感，而且影响因素也很多，特别是对高分子材料，其抗冲击性能常常受到温度、湿度、冲击速度、试样的几何形状以及应力方式等影响，因此冲击性能用于工程设计只能作为参考指标，因为冲击性能试验只是该材料在试验方法规定条件下的冲击韧性，没有绝对的物理意义。

冲击试验的方法很多，例如依据试验温度可分为常温冲击、低温冲击和高温冲击三种，依据试样的受力状态，可分为弯曲冲击(包括简支梁冲击和悬臂梁冲击)、拉伸冲击、扭转冲击和剪切冲击；依据采用的能量和冲击次数，可分为大能量的一次冲击(简称一次冲击试验或落锤冲击试验)和小能量酌多次冲击试验(简称多次冲击试验)。不同材料或不同用途可选择不同的冲击试验方法，并得到不同的冲击试验结果。这些结果并不能进行比较。因此，冲击性能试验得不到表征该材料特征的固定参数。

1.1.1 简支梁冲击试验

简支梁式摆锤冲击弯曲试验方法规定用简支梁冲击试验机，对硬质塑料试样施加一次冲击弯曲负荷使之破坏，并用试样破坏时单位面积所吸收的能量表征该材料的冲击韧性。简支梁式摆锤冲击试验尽管有缺点，但比较简单易行，在控制产品质量和比较结构或制品的韧性时仍是一种经常使用的测试方法。

一、定义

(1) 无缺口试样简支梁冲击强度 无缺口试样在冲击负荷作用下，试样破坏时吸收的冲击能量与试样原始横截面积之比，并以 kJ/m^2 表示。

(2) 缺口试样简支梁冲击强度 缺口试样在冲击负荷作用下，试样破坏时吸收的冲击能量与试样缺口处的横截面积之比，并以 kJ/m^2 表示。

(3) 相对冲击强度 缺口试样的冲击强度与无缺口试样的冲击强度之比；或同类型试样 A 型缺口冲击强度与 B 型缺口冲击强度之比。但 C 型缺口试样的冲击强度与 A 型或 B 型缺口试样的冲击强度之比不得作为相对冲击强度的量度。

(4) 完全破坏 指经过一次冲击使试样分成两段或几段

(5) 部分破坏 指一种不完全性破坏，即无缺口试样或缺口试样横断面至少断开 90% 的破坏。

(6) 无破坏 指一种不完全性破坏，即无缺口试样或缺口试样的横断面断开部分小于 90% 的破坏。

二、方法原理

使用已知能量的摆锤经一次冲击支承成水平梁的试样并使之破坏,冲击线应位于两支座的正中间,被测试样若为缺口试样,则冲击线应正对缺口,以冲击前后摆锤的能量差确定试样在破坏时吸收的能量,并用试样的单位横截面积所吸收的冲击能表示冲击强度。

摆锤式冲击试验机的工作原理如图 1-1 所示。

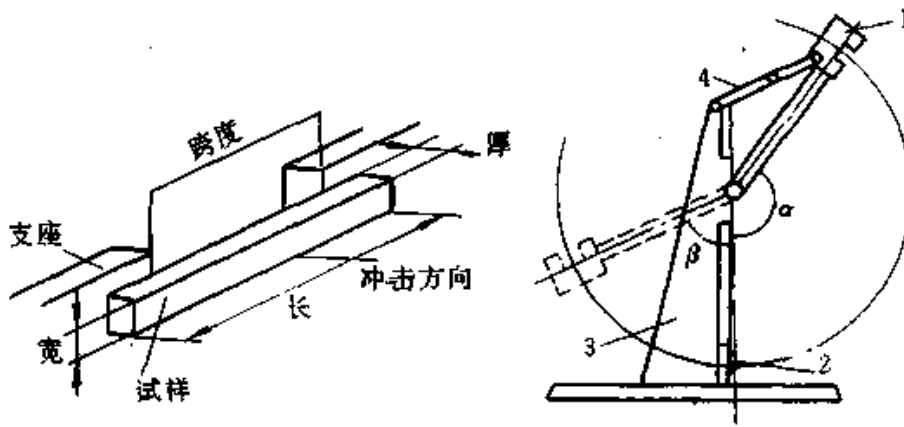


图 1-1 摆锤式冲击试验机工作原理图

1—摆锤； 2—试样； 3—机架； 4—扬臂

试验时摆锤挂在机架的扬臂上,摆锤杆的中心线与通过摆锤杆轴中心的铅垂线成一角度为 α 的扬角,此时摆锤具有一定的位能;然后让摆锤自由落下,在它摆到最低点的瞬间其位能转变为动能;随着试样断裂成两部分,消耗了摆锤的冲击能并使其大大减速;摆锤的剩余能量使摆锤继续升高至一定高度, β 为其升角。如以 W 表示摆锤的重量, l 为摆锤杆的长度,则摆锤所作的功为:

$$A_0 = Wl(1 - \cos\alpha) \quad (1-1)$$

若考虑进冲断试样时克服的空气阻力和试样断裂而飞出时所消耗的功,可用下式表示:

$$A_0 = Wl(1 + \cos\beta) + A + A\alpha + A\beta + \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-2)$$

式中 A ——冲断试样所消耗的功;

$A\alpha$ ——在 α 角内摆锤克服空气阻力所消耗的功;

$A\beta$ ——在 β 角内摆锤克服空气阻力所消耗的功;

$\frac{1}{2}mv^2$ ——试样断裂后飞出时所具有的动能(m 为断裂试样质量)。

通常,式中后三项都忽略不计,则可简单地把试样断裂时所消耗的功表示为下式:

$$A = Wl(\cos\beta - \cos\alpha) \quad (1-3)$$

式中除 β 角外均为已知数,因此,根据摆锤冲断试样后的升角 β 的数值即可绘出读数盘,并由该读数盘直接读取冲断试样时所消耗功的数值。

三、方法要点

(1) 试样 简支梁冲击试验的试样可用模具直接经压塑或注塑成型;也可用压塑或注塑成型的板材经机械加工制得。试样为矩形截面的长条形,分无缺口试样和缺口试样,其

中包括 3 种不同的缺口类型和 4 种不同的尺寸类型，其具体规定见表 1-1、表 1-2 和图 1-2。其中 1 型试样还可由依据 GB11997 方法制备的标准多用途试样中部直接切取。

表 1-1 不同试样类型的尺寸 mm

试样类型	长度 l	宽度 b	厚度 d
1	80 ± 2	10 ± 0.5	4 ± 0.2
2	50 ± 1	6 ± 0.2	4 ± 0.2
3	120 ± 2	15 ± 0.5	10 ± 0.5
4	125 ± 2	13 ± 0.5	13 ± 0.5

表 1-2 缺口类型与缺口尺寸 mm

试样类型	缺口类型	缺口剩余厚度, d_k	缺口底部圆弧半径 r	缺口宽度 n
1~4	A	$0.8d$	0.25 ± 0.05	
	B		1.0 ± 0.05	
1,3	C	$\frac{2}{3}d$	≤ 0.1	2 ± 0.2
2	C			0.8 ± 0.1

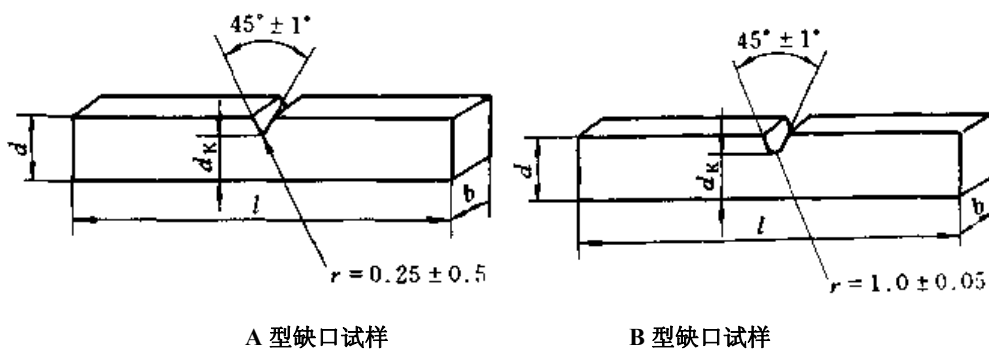
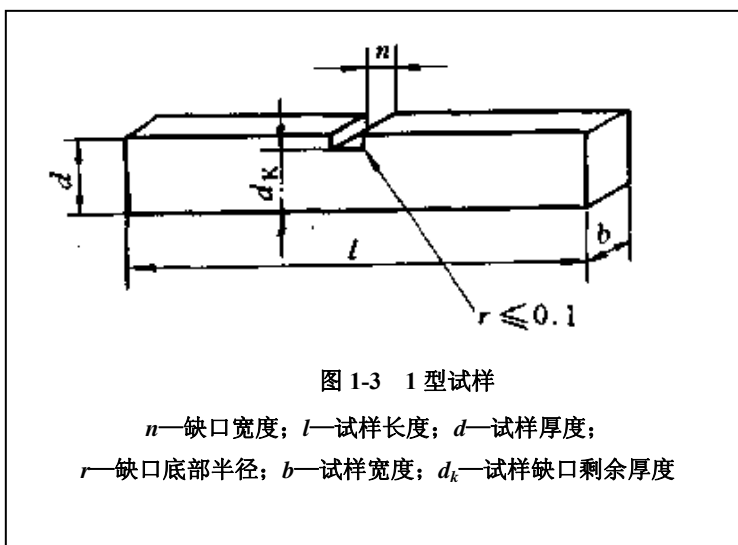


图 1-2 试样缺口类型

l —试样长度, d —试样厚度; r —缺口底部半径; b —试样宽度; d_k —试样缺口剩余厚度

试样的缺口可在铣床、刨床或其他专用缺口加工机床上加工。如果受试材料的产品标准

没有规定, 一般不用带模塑缺口的试样, 因为模塑缺口的试样和经机械加工缺口的试样所得试验结果不能相比。由于 A 型缺口对多数材料所得数据的分散性小和重复性好, 因此把 A 型缺口作为首选缺口, 并把 1 型试样作为首选试样 (图 1-3)。此外试验方法还规定厚度小于 3mm 的试样不作冲击试验。



(2) 冲击试验机 简支梁冲击试验机的特性参数应符合表 1-3 的规定, 并应定期由国家计量部门对参数作检定。

表 1-3 摆锤式冲击试验机的特性参数^①

冲击能量 J	冲击速度 m/s	允许最大摩擦损失 %	校正后允许误差 %
0.5	2.9±10%	4	0.01
1.0		2	0.01
2.0		1	0.01
4.0		0.5	0.02
7.5	3.8±10%	0.5	0.05
15.0			0.05
25.0			0.10
50.0			0.10

① 由不同摆锤所得结果不能相比。

(3) 摆锤 应根据试样破坏时所需能量选择摆锤, 并使消耗的能量在摆锤总能量的 10%~85% 范围内。如果符合这一能量范围的不只一个摆锤时, 应选用最大能量的摆锤。试验时按照规定把试样放置在两支撑块上, 试样的支撑面紧贴在支撑块上, 并使冲击刀刃对准试样中心。对于缺口试样, 冲击刀刃应对准缺口背面的中心位置, 平稳释放摆锤后从度盘上读取试样吸收的冲击能。试样为层压板时应分别对板面方向和板边方向进行冲击, 板面方向的缺口长度等于试样宽度, 而板边方向的缺口长度则等于板材厚度。

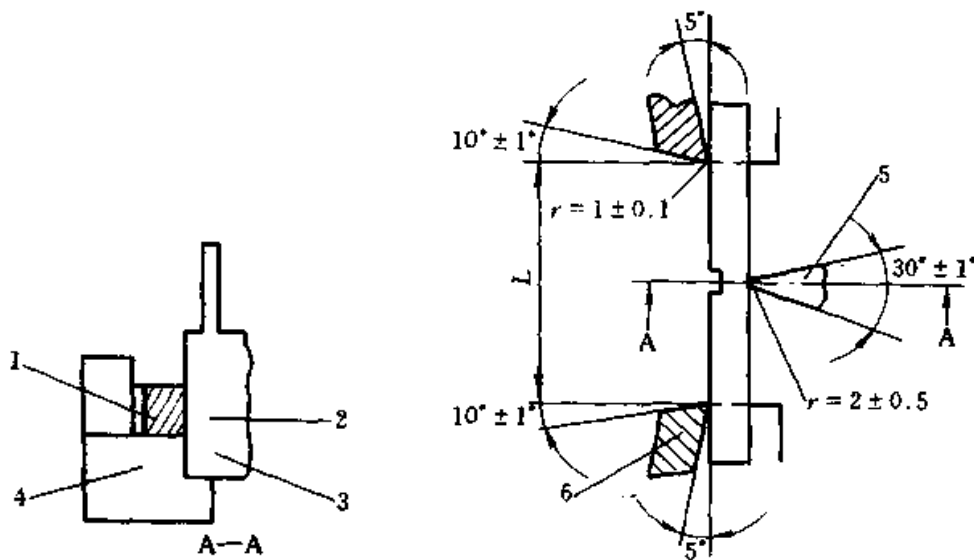


图 1-4 简支梁冲击试验中冲锤刀刃、试样和支座的相互关系

1—试样; 2—冲击方向; 3—冲击瞬间摆锤位置; 4—下支座; 5—冲击刀刃; 6—支持块

四、结果表示

(1) 无缺口简支梁冲击强度按下式计算:

$$a = \frac{A}{b \cdot d} \times 10^3 \quad (1-4)$$

式中 a ——无缺口试样冲击强度, kJ/m^2 ;

A ——试样吸收的冲击能量, J;

b ——试样宽度, mm;

d ——试样厚度, mm。

(2) 缺口试样简支梁冲击强度按下式计算:

$$a_K = \frac{A_K}{b \cdot d_K} \times 10^3 \quad (1-5)$$

式中 a_K ——缺口试样的冲击强度, kJ/m^2 ;

A_K ——缺口试样吸收的冲击能, J;

b ——试样宽度, mm;

d ——缺口试样的缺口处剩余厚度, mm。

(3) 侧向缺口试样简支架冲击强度按下式计算:

$$a_K = \frac{A_K}{b_K \cdot d} \times 10^3 \quad (1-6)$$

式中 a_K ——侧向缺口试样的冲击强度, kJ/m^2 ;

A_K ——侧向缺口试样吸收的冲击能, J;

b ——试样宽度, mm;

d ——侧向缺口试样的缺口处剩余厚度, mm。

如果有要求, 还要按照定义计算试样的相对冲击强度。试样完全破坏或部分破坏的冲击值可以取值, 试样无破坏的冲击值不取值。冲击试验结果以每组 10 个试样的算术平均值表示, 并取两位有效数字。如果在同一试验材料中观察到一种以上的破坏类型, 须标明每种破坏类型的平均冲击值和试样破坏的百分数, 不同破坏类型的试验结果不能进行比较。

五、影响因素

(1) 飞出功的影响 由于试样在冲击过程中要产生弹性变形, 这种弹性变形积蓄的能量在试样破坏时要释放出来, 因此摆锤冲击在试样上的能量总大于试样断裂所需的能量, 所以断裂后的试样会飞出。如果摆锤冲击试样的能量刚好等于试样断裂所需的能量, 试样断裂后将不会飞出, 这只是一极端情况, 试验中较难出现。所以, 在摆锤式冲击试验机的度盘上读出的数值, 不仅包括使试样产生裂痕、裂痕在试样中扩展和产生变形的能量; 还包括使试样断裂后飞出的能量即飞出功。飞出功与试样的韧性并无关系, 但有时竟占很大比例, 例如 PMMA 标准试样, 其断裂飞出功可占试样断裂消耗能量的 50% 左右; 酚醛材料约占 40% 左右。因此对吸收能量较小的脆性材料必须对此部分能量进行修正。为此 ISOR180 和 ASTM D256 中都作了明确规定。

图 1-5 给出 PMMA 的飞出功与试验跨度和试样厚度的关系。

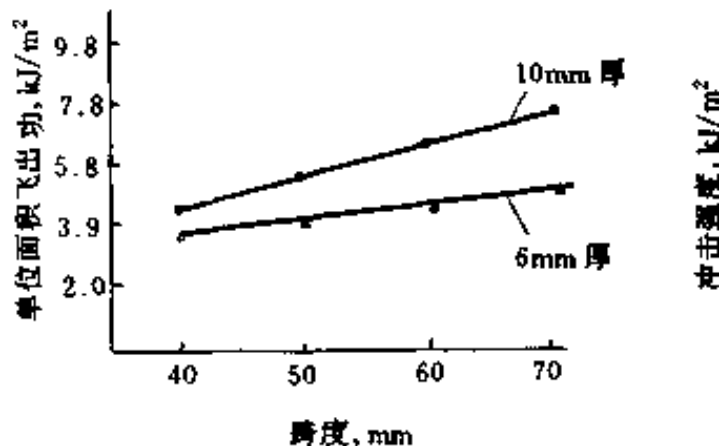


图 1-5 PMMA 飞出功与试验跨度和试样厚度的关系

(2) 试样尺寸的影响 使用同一配方相同成型条件而厚度不同的塑料试样作冲击试验时,可发现不同厚度的试样在同一跨度和不同跨度上的试验结果以及使用相同厚度的试样但在不同跨度上所作冲击试验结果不同,所得冲击强度都不能进行比较和换算。可以看出同一试样的厚度越大,冲击强度值越高;而在相同的试样厚度下,试验跨度越大,冲击强度值也越高,其结果见图 1-6。

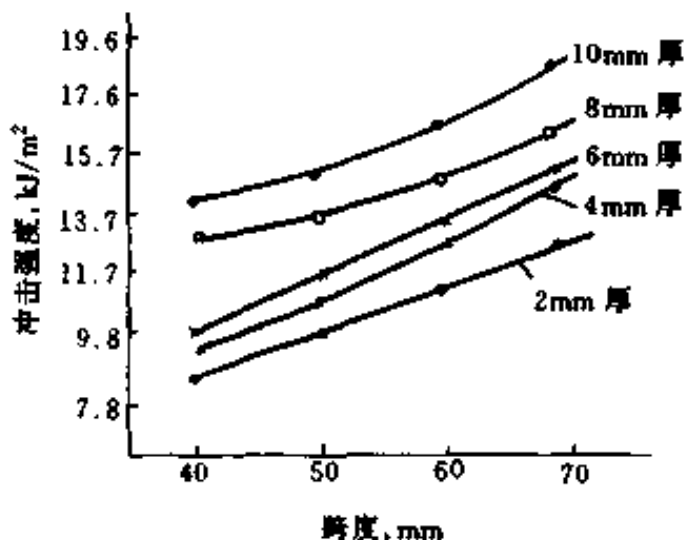


图 1-6 PMMA 试样厚度和试验跨度与冲击强度的关系

可见,只有相同厚度的试样并在相同跨度上作冲击试验,所得结果才能进行比较。

(3) 冲击速度的影响 通常,冲击试验机摆锤的冲击速度为 3~5m/s,由于某些对变形速度敏感的材料如 PVC 等,摆锤的冲击速度高时冲击强度的数值反而降低,因此,国家标准中规定冲击速度为 2.9m/s 或 3.8m/s。不同冲击速度对各种塑料试样冲击强度的影响见表 1-4 和表 1-5。

可以清楚地看出:无论是简支梁冲击试验还是悬臂梁冲击试验,冲击强度值均随冲击速度的增加而降低;且热塑性塑料比热固性塑料影响更为显著。

表 1-4 简支梁冲击速度对冲击强度的影响

试样材料	冲击速度 m/s	冲击强度 kJ/m ²	试验条件
ABS	2.9	18	摆锤能量为 4J; C 型缺口; 10 条试样的平均值
	2.5	37	
	1.7	61	
PF	2.9	0.86	摆锤能量 2J; V 型缺口; 10 条试样的平均值
	2.5	17	
	1.7	39	
UF	2.9	1.1	摆锤能量为 2J; V 型缺口; 10 条试样的平均值
	2.5	1.7	
	1.7	38	

表 1-5 悬臂梁冲击速度对冲击强度的影响

试样材料	冲击速度 m/s	冲击强度 kJ/m ²	试验条件
PMMA	3.5	1.36	V 型缺口, 15 条试样
	2.9	32.8	
PVC	3.5	6.02	V 型缺口, 15 条试样
	2.9	36.7	
PVC	3.5	10.7	U 型缺口, 15 条试样
	2.9	39.4	

由于简支梁冲击试验与悬臂梁冲击试验均属摆锤式弯曲冲击试验, 因此, 诸如试验温度、环境湿度、试样缺口半径以及缺口加工方法等对冲击强度的影响都有共同之处, 可参见悬臂梁冲击试验中各项影响因素的讨论。

1.1.2 悬臂梁冲击实验

悬臂梁冲击试验是对材料的脆性(或韧性)进行测量的另一种试验方法, 对使用简支梁冲击试验中冲不断的材料, 使用悬臂梁冲击试验就显得特别重要。

一、定义

(1) 无缺口试样悬臂梁冲击强度 无缺口试样在悬臂梁冲击破坏过程中所吸收的能量与试样原始横截面积之比, 用 kJ/m^2 表示。

(2) 缺口试样悬臂梁冲击强度 指缺口试样在悬臂梁冲击破坏过程中所吸收的能量与试样缺口处原始横截面积之比, 用 kJ/m^2 表示。试验时摆锤的冲击方向为试样有缺口的一面。

(3) 反置缺口试样悬臂梁冲击强度 指反置缺口试样在悬臂梁冲击破坏过程中所吸收的能量与试样缺口处原始横截面积之比。试验时摆锤的冲击方向为缺口的背面, 用 kJ/m^2 表示。

(4) 平行冲击 对层压增强材料在悬臂梁冲击试验中摆锤的冲击方向平行于板材的层压面。

- (5) 完全破坏 指试样断裂成两段或多段。
- (6) 绞链破坏 指断裂的试样由没有刚性的很薄表皮连在一起的一种不完全破坏。
- (7) 部分破坏 指除绞链破坏以外的不完全破坏。
- (8) 不破坏 指试样未破坏，只是产生弯曲变形并有应力发白现象产生。

二、方法原理

由已知能量的摆锤一次冲击垂直固定成悬臂梁的试样，测量试样破坏时所吸收的能量。摆锤的冲击线与试样的夹具和试样缺口的中心线相隔一定距离见图 1-7。

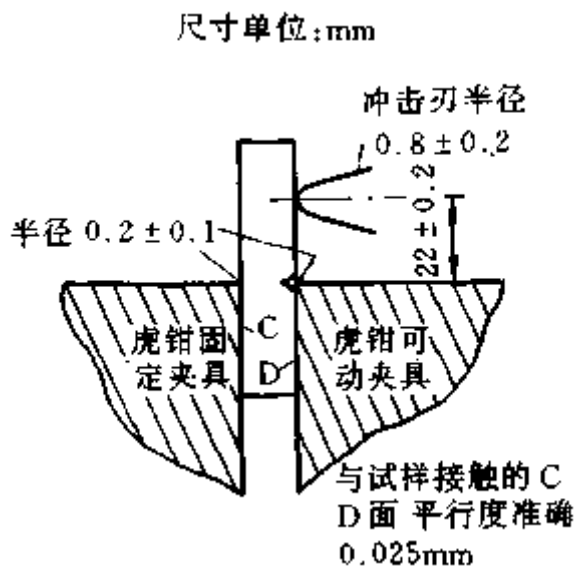


图 1-7 虎钳支座、缺口试样及冲刃位置图

三、方法要点

(1) 试验使用的摆锤式悬臂梁冲击试验机应能测量试样破坏时所吸收的冲击能，其值为摆锤的初始能量与摆锤破坏试样后剩余能量之差。应该注意对该值进行摩擦和风阻损失的校正，使满足表 1-6 的要求，并在摆锤容量 10%~80% 的范围内不得超过允许误差。如果摩擦损失等于或小于表 1-6 所列的相应值，这种摩擦损失才可用在吸收能量的修正计算中；超过表列的相应值应找出超过的原因，并对试验机进行校正，通常试验机出厂时都备有校正风阻和摩擦损失的图表或其他修正方法。

表 1-6 摆锤式冲击试验机特性表

冲击能 J	冲击速度 m/s	无试样时的最大 摩擦损失, J	有试样时经校正后 的允许误差, J
1.0	$3.5 \pm 10\%$	0.02	0.01
2.75		0.03	0.01
5.5		0.03	0.02
11.0		0.05	0.05
22.0		0.10	0.10

(2) 试验机必须有一套可替换的摆锤，以保证吸收的能量在摆锤容量范围内；若有几个摆锤都能满足要求，应选用能量最大者；不同摆锤所测结果不能相互比较。

(3) 试样可用模具直接经压塑或注塑；也可从压塑或注塑的板材上经机械加工制成；1型试样还可从依照 GB11997 方法制备的标准多用途试样的中部直接切取。试样类型及尺寸、试样缺口类型及尺寸见表 1-7 和表 1-8。

表 1-7 试样类型及尺寸 mm

试样类型	长度, L	宽度, b	厚度, h
1	80 ± 2	10.0 ± 0.2	4.0 ± 0.2
2	6.35 ± 2	12.7 ± 0.2	12.7 ± 0.2
3			6.4 ± 0.2
4			3.2 ± 0.2

表 1-8 1 型试样的缺口类型及尺寸 mm

试样类型	缺口类型	缺口底部半径 r_n	缺口底部剩余 宽度, b_n
1	无缺口	-	-
	A	0.25 ± 0.05	8.0 ± 0.2
	B	1.0 ± 0.05	8.0 ± 0.2

由于 ISO180 — 1993 中已提出今后修订时将取消 2、3、4 型试样，只保留 1 型试样，因此我国也将只使用 1 型试样。其缺口类型见图。

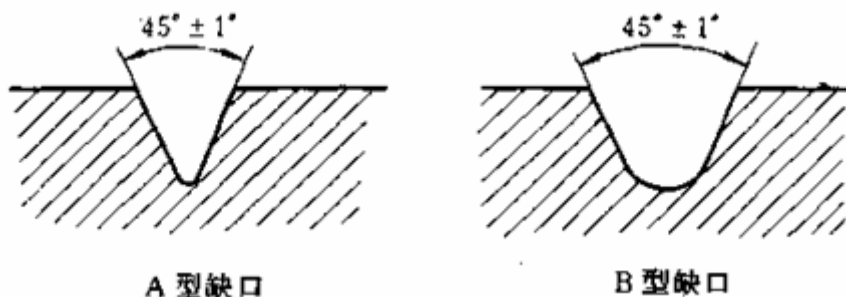


图 1-8 A 型缺口与 B 型缺口图

A 型缺口底部半径 $r_n=0.25 \pm 0.05\text{mm}$ ； B 型缺口底部半径 $r_n=1 \pm 0.05\text{mm}$

试样的缺口可在铣床、刨床或专用缺口加工机上加工，切削齿形应符合图 1-8 要求，其中 A 型缺口为首选缺口。

(4) 对于各向异性材料应分别按平行和垂直板材的某一特征方向分别切取试样。特征方向可由目视观察或由生产方法推断。当试验为反置缺口试样时，为了避免材料表面层的影响，板材原表面应面向冲锤。对于各向异性的材料，通常是冲击平行于板面的试样侧面。

(5) 试验时首先抬起并锁住摆锤，把试样放在虎钳中并夹住试样。测定缺口试样时，

缺口应在摆锤冲击刃的一侧；然后释放摆锤，记录试样吸收的冲击能并对摩擦损失时进行修正。被测试样可能出现前述 4 种破坏类型中的某一种或一种以上，此时应把其中属于完全破坏和绞链破坏的测定值用以计算其算术平均值；在出现部分破坏时，如果要求报告此种部分破坏的测定值，应用字母 P 表示；对完全不破坏的试样不报告其数值，并用 NB 表示。

四、结果表示

(1) 无缺口试样悬臂梁冲击强度按下式计算：

$$a_{iv} = \frac{W}{h \cdot b} \times 10^3 \quad (1-7)$$

式中 a_{iv} ——悬臂梁冲击强度， kJ / m^2 ；

W ——破坏试样所吸收并经修正后的能量，J；

h ——试样厚度，mm；

b ——试样宽度，mm。

(2) 缺口试样悬臂梁冲击强度按下式计算：

$$a_{in} = \frac{W}{h \cdot b_n} \times 10^3 \quad (1-8)$$

式中 a_{in} ——缺口试样悬臂梁冲击强度， kJ / m^2 ；

W ——破坏试样所吸收并经修正后的能量，J；

h ——试样厚度，mm；

b_n ——试样缺口底部的剩余宽度，mm。

冲击试验结果应以一组试样结果的算术平均值表示，并取两位有效数字。若同一组试样中出现不同的破坏类型，应注明各种破坏类型的试样数目及其算术平均值。

五、影响因素

(1) 温度的影响 高分子材料在室温、低温和较高温度下冲击强度的变化见图 1-9 和图 1-10。可以看出：无论是悬臂梁冲击还是简支梁冲击，其冲击强度值均随温度的降低

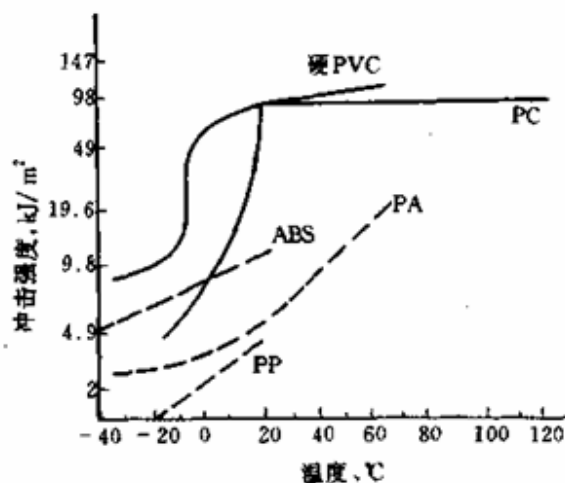


图 1-9 悬臂梁冲击强度与温度的关系

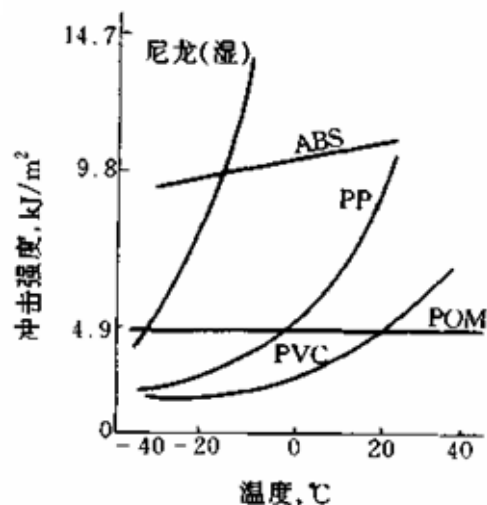


图 1-10 简支梁冲击强度与温度的关系

而降低。这是因为随着温度的下降，材料从韧性状态转变为脆性状态，这种转变是在一个较窄的温度范围内产生，试样在脆性温度以下呈现脆性断裂，其冲击强度值较低；而在高于脆性温度下发生的韧性断裂，其冲击强度较高，因此在冲击试验中试验温度对测试结果的影响是不可忽视的。通常，标准试验方法均规定冲击试验应在标准环境温度 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 下进行。

(2) 缺口加工方式的影响 标准试验方法中规定除非受试材料有要求可以使用模塑缺口试样外，推荐使用机械加工的缺口试样。不同加工方式对其冲击强度的影响见表 1-9。

表 1-9 缺口加工方法对冲击强度的影响

试样材料	直接注塑成型	注塑试样经机械加工缺口	
	缺口	刨床加工	铣床加工
	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2
PC	52.0	8.02	6.16
PS	8.34	2.14	1.72
PA-1010	27.2	6.97	6.97
ABS	28.2	—	27

可以看出：采用不同加工方式加工的试样，缺口对其冲击强度有很大影响，一次注塑的缺口试样冲击强度较高，而经二次机械加工成型的缺口试样冲击强度较低，其中又以经铣床加工的缺口试样冲击强度最低。因此，使用不同加工方式加工的缺口试样，其测得的冲击强度数值不可比。究其原因是：使用模塑方法一次性直接成型时，由于材料的收缩率不同，脱膜后试样缺口的实际外形尺寸总要发生不同程度的改变，特别是缺口底部曲率半径变化较大，难以保证缺口各部分符合标准规定的要求，从而影响其冲击强度值。而使用机械加工方法加工缺口，则可以提高缺口尺寸的精度要求，如果使用经过严格检查的刀具，可以达到标准要求。因此，标准试验方法推荐使用机械加工方式加工试样缺口，以减少对结果的影响并提高试验结果的可比性。

(3) 湿度的影响 某些吸湿性较大的材料例如尼龙在干燥状态下和吸湿后状态下测试，其冲击强度值有明显的不同，在相同温度下吸湿越多，其冲击强度值也越高，其结果见图 1-11。因此，在试样加工和测试过程都要严格控制环境湿度。

(4) 试样缺口底部曲率半径的影响 试样缺口曲率半径的大小对冲击强度的影响见表 1-10 和图 1-12。

表 1-10 简支梁缺口底部半径对冲击强度的影响

试样材料	缺口半径 mm	冲击强度 kJ/m^2	变异系数 %
PVC	0.25	7.8	14
	0.50	10	17
	1.00	10	27
	2.00	25	14
PC	0.25	9.0	30
	0.50	14	44
	1.00	17	53
	2.00	28	46

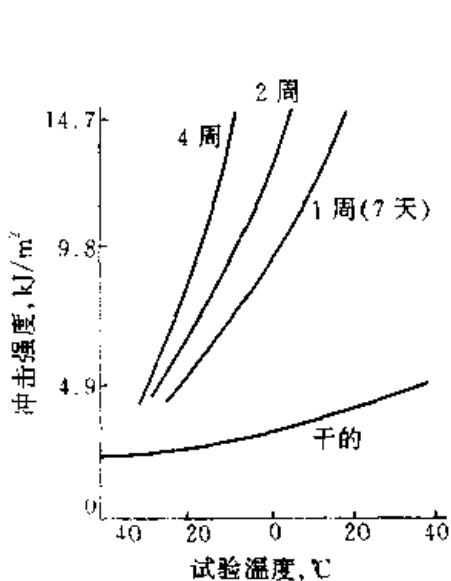


图 1-11 水浸时间对尼龙冲击强度的影响

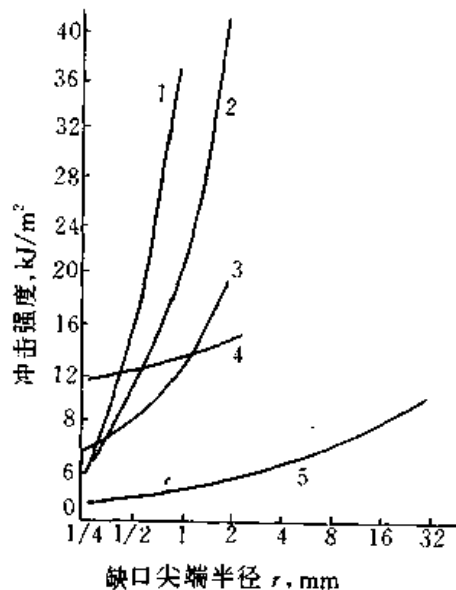


图 1-12 悬臂梁冲击强度与缺口尖端半径的关系

1—PVC; 2—PA; 3—POM;
4—ABS; 5—丙烯酸类聚合物

可以看出：同一材料试样其缺口底部半径不同，测得的冲击强度值有显著不同，半径越小，冲击强度值越低，变异系数也越小。其原因是：缺口底部的曲率半径越小，冲击时产生的初始裂纹所需要的能量也越小，因此冲击强度值较低；而随着缺口底部曲率半径的增大，使产生初始裂纹所需能量也越大，因而冲击强度值也较高。这种结果从弹性理论分析其应力集中系数，也可以获得同样解释：

$$K_t = 1 + 2 \left(\frac{C}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

式中 K_t ——应力集中系数；

C ——试样缺口深度，mm；

r ——试样缺口底部的曲率半径，mm。

试样的缺口是为了使应力集中，以减少塑性形变并使裂痕发生在缺口的底部，以减少试验结果的分散性。从上式可以看出：应力集中系数与试样缺口深度和缺口底部曲率半径有直接关系，缺口底部曲率半径越小，则应力集中系数也越大，因而冲击强度值越低。因此，不同缺口底部曲率半径的试样所测的冲击强度值不可比。

(5) 试样夹持力的影响 在悬臂梁冲击试验中，某些塑料材料对夹持力较敏感，其对冲击强度的影响见表 1-11。

表中数值表明：夹持力过大者冲击强度一般偏低；夹持力过小者则冲击强度一般偏高。还可看出：夹持力过大和过小的变异系数均高于夹持力适中者，表明夹持力对冲击强度数值的分散性也有影响。因此，试验过程中应严格掌握使同一组试样保持相同的夹持力。

表 1-11 夹持力对冲击强度的影响

试样材料	酚醛模塑料			PVC			氨基模塑料		
	过大	适中	过小	过大	适中	过小	过大	适中	过小
冲击强度 kJ/m ²	1.19	1.34	1.45	9.17	7.17	11.4	2.2	2.5	2.4
变异系数 %	21	9.7	15	23.6	11.9	27	8.8	4.2	9.1
说明	试样尺寸： (80×10×4)mm 缺口尖端半径 r=1.0mm			试样尺寸： (80×10×4)mm 缺口尖端半径 r=1.0mm			试样尺寸： (63.5×12.7×12.7)mm 无缺口		

综上所述,可知冲击性能试验是一种操作较简单而影响因素较复杂的试验,因此,试验过程中不可忽视上述有关的各种因素,否则将得出不正确的试验结果。

1.2 塑料硬度实验

硬度是指材料抵抗其他较硬物体压入其表面的能力。硬度值的大小是表示材料软硬程度的有条件性的定量反映,它本身不是一个单纯的确定的物理量,而是由材料的弹性、塑性、韧性等一系列力学性能组成的综合性指标。硬度值的大小不仅取决于该材料的本身,也取决于测量条件和测量方法。

硬度试验的主要目的是测量该材料的适用性,并通过对硬度的测量间接了解该材料的其他力学性能,例如磨耗性能、拉伸性能、固化程度等。因此,硬度检测在生产过程中对监控产品质量和完善工艺条件等方面有非常重要的作用。硬度试验因其具有测量迅速、经济、简便且不破坏试样的特点,是工程材料应用极为普遍的方法,也是检测塑料性能最容易的一种方法。

测定硬度的方法很多,可分为以下三类。

(1) 测定材料耐顶针(球形顶针)压入能力的硬度试验 例如布氏(Brinell)硬度、维氏(Vickers)硬度、努普(Knoop)硬度、巴科尔(Barcol)硬度、邵氏(Shore)硬度和塑料球压痕硬度等。

(2) 测定材料对尖头或另一种材料的抗划痕性硬度试验 例如比尔鲍姆(Bierbaum)硬度和莫斯(Mohs)硬度等。

(3) 测定材料回弹性的硬度试验 例如洛氏(Rockwell)硬度和邵氏反弹硬度等。

通常,大多数硬度试验都是由第一类和第三类方法组合起来的。

1.2.1 邵氏硬度

邵氏硬度又称肖氏硬度,是表示塑料和橡胶材料硬度等级的一种方法。邵氏硬度分为邵氏压痕硬度和邵氏反弹硬度两种,前者被测样品放在硬度计台面的适当位置,压紧到规定时间后立即读取用数字 0~100 表示的压痕硬度读数。使用的压痕硬度计有 A 型、C 型和 D 型

三种刻度型号；后者则使用邵氏反弹式硬度计进行测定，使用顶端装有金刚石的总重约 3g 的冲头，从约 300mm 高度的玻璃管中垂直落于试件上，由玻璃管的刻度读取其垂直反弹的高度，用下式计算其硬度值：

$$HS = K \frac{H}{H_0} \quad (1-10)$$

式中 HS——邵氏反弹硬度；
 H ——冲头反弹的高度，mm；
 H_0 ——冲头原始高度，mm；
 K ——反弹硬度系数。

一、原理

邵氏压痕硬度计的工作原理是将规定形状的压针在标准的弹簧压力下，并在严格的规定时间内，把压针压入试样的深度转换为硬度值，表示该试样材料的硬度等级，直接从硬度计的指示表上读取。指示表为 100 个分度，每一个分度即为一个邵氏硬度值。

二、方法要点

邵氏硬度计分为 A 型、C 型和 D 型三种刻度，其硬度读数分别用 H_A 、 H_C 和 H_D 表示。邵氏 A 型适用于软质塑料和橡胶，邵氏 C 型和 D 型则适用于较硬或硬质塑料和硫化橡胶。测定邵氏硬度时，我国与 ISO 规定一致，只使用 A 型和 D 型两种。

(1) 硬度计在使用过程中压针的形状、尺寸以及弹簧的性能都会发生变化，因此应定期校准，使之符合图 1-13 所规定的压针尺寸和精度。

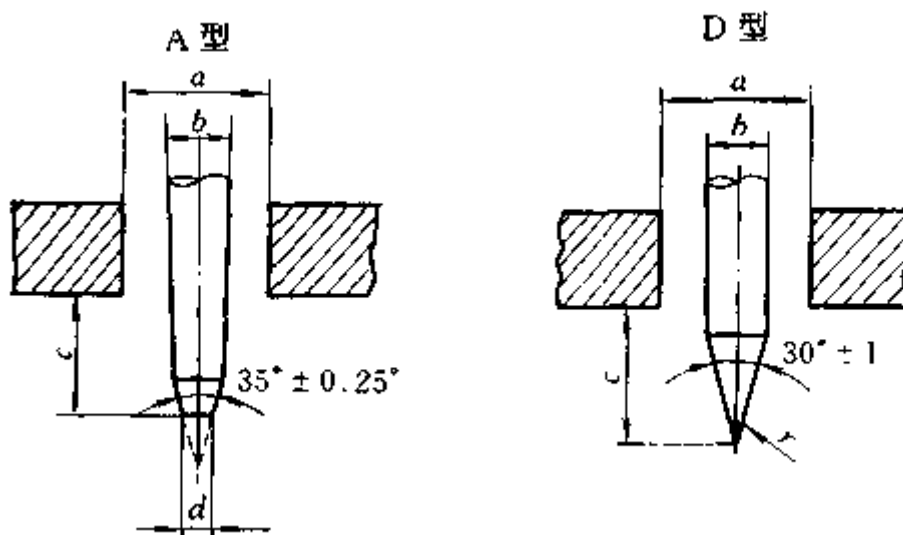


图 1-13 邵氏 A 型和 D 型硬度计压针

a — $\phi 3.00 \pm 0.50$ ； b — $\phi 1.25 \pm 0.15$ ；

c — $\phi 2.50 \pm 0.04$ ； d — $\phi 0.79 \pm 0.03$ ； r — 0.1 ± 0.012

(2) 硬度计弹簧对压针所施加的力应与压针伸出压板位移量有恒定的线性关系，其大小与硬度计指针所指刻度的关系应符合下式：

$$\text{A 型} \quad F_A = 550 + 75H_A \quad (1-11)$$

$$\text{D 型} \quad F_D = 550 + 75H_D \quad (1-12)$$

上两式中 F_A 和 F_D —— 弹簧施加于 A 型和 D 型硬度计压针上的力, mN;

系数 550 —— H_A 为零时弹簧对压针所施加的力;

系数 75 和 445 —— 硬度计的系数。

为此, 推荐使用邵氏硬度检定仪校准其弹簧力, 一般进口仪器都配有检定仪, 目前国内也已有生产。使用检定仪校准压针弹簧力的误差, A 型要求偏差在 $\pm 3.9\text{mN}$ 之内; D 型要求偏差在 $\pm 19.6\text{mN}$ 之内。如果没有检定仪, 也可用天平校准, 只是被测的力应对应于上式计算的力(偏差为 $\pm 78.5\text{mN}$)或等于上式计算的力(偏差为 $\pm 441.3\text{mN}$)。

(3) 操作时还应检查硬度计的指针不得与度盘相摩擦, 以保持指针摆动灵活和平稳, 摆幅从 0 到 100, 压针呈自由状态时指针应指零位, 将硬度计下压板与平整玻璃片完全接触时, 指针应从零位指到 100, 指针位置偏差不得大于 1 个硬度值。测试时硬度计应安装在支架上, 并加上规定的负荷(A 型加 1kg 砝码; D 型加 5kg 砝码), 以避免由于操作人员不同、用力大小、均匀程度和施力方向(不是垂直施力)等原因而导致测试结果的偏差。

(4) 试样的厚度规定与 H_A 不小于 5mm, H_D 不小于 3mm; 测定点与试样边缘的距离应不小于 12mm; 各测点之间的距离不小于 6mm。试样置于硬度计平台上后, 缓慢均匀地在规定重量的重锤作用下, 使压针压在试样上, 从下压板与试样完全接触 15 秒后立即读数, 但如果要求瞬间读数, 也可以在下压板与试样完全接触后于 1 秒钟内读数, 该读数即为该测点的硬度值。邵氏硬度计的测量范围应在 20~90 之间, 当用 A 型硬度计测量时, 如果读数大于 90 应改用 D 型硬度计; 同样, 当用 D 型硬度计测量时, 如果读数小于 20 则应改用 A 型硬度计, 以避免上下端值所可能带来的误差。

三、结果表示

每一试样应按规定间距测量 5 个点, 然后取其算术平均值表示该试样的硬度。如果使用 A 型硬度计并在压针与试样接触 15 秒后读数为 45, 则该点的邵氏硬度用 $H_A/15:45$ 表示; 同样, 使用 D 型硬度计在 1 秒钟内瞬间读数为 60, 则该点的邵氏硬度用 $H_D / 1: 60$ 表示。

四、影响因素 可参见下节球压痕硬度的影响因素讨论。

1.2.2 洛氏硬度

洛氏硬度试验方法是 1919 年由美国人洛克威尔(Rockwell)提出的, 塑料的洛氏硬度试验方法是在金属洛氏硬度试验方法的基础上发展的, 可用于软的弹性体材料到较刚硬塑料的硬度值评价。由于塑料材料较金属材料软, 塑料洛氏硬度试验需采用较小的负荷、较大的压痕器和大量程结构的硬度计。适用于塑料的洛氏硬度计有 M、L、R 三种标尺。国外 ISO2039 / II、ASTM D785 和 JIS K 7202 等即为此类方法的标准, 我国也已制订了此方法的国家标准。

一、定义与原理

(1) 定义 洛氏硬度是指用规定的压头对试样先施加初试验力, 接着再施加主试验

力，然后卸除主试验力，只保留初试验力，用前后两次初试验力作用下压头压入试样的深度差经计算得出的值表示。

(2) 原理 图 1-14 给出洛氏硬度测定的原理示意图。

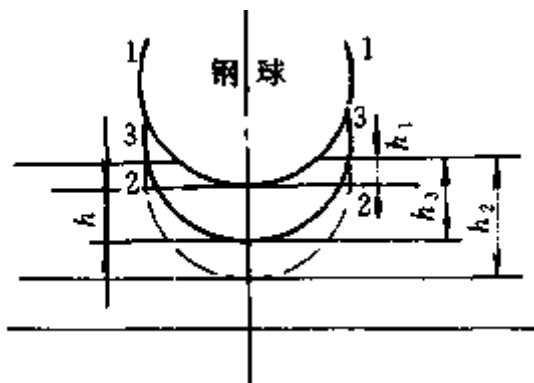


图 1-14 洛氏硬度测定原理示意图

采用金刚石圆锥或钢球作为压头，分两次对试样加荷，首先施加初试验力，压头压入试样的压痕深度为 h_1 ；接着再施加主试验力，压头在总试验力作用下的压痕深度为 h_2 ；然后压头在总试验力作用下保持一定时间后卸除主试验力，只保留初试验力，压痕因试样的弹性回复而最终形成的压痕深度为 h_3 ；最后用 h 表示前后两次初试验力作用下的压痕深度差即 $h = h_3 - h_1$ ，按下式计算硬度值：

$$HR = K - \frac{h}{C} \tag{1-13}$$

式中 HR——塑料的洛氏硬度值，准确到分度值；

h ——两次初试验力作用下的压痕深度差，mm；

C ——常数，其值规定为 0.002mm；

K ——换算常数，其值规定为 130。这是因为若直接用两次压痕深度差 h 表示该材料的硬度值大小，将得到较硬材料的 h 值较小，而较软材料的 h 值反而较大的结果，为了适应人们数值越高，硬度也应越高的习惯概念，人为地规定了这一换算常数。

二、方法要点

(1) 表 1-12 给出洛氏硬度不同标尺的初试验力、主试验力和压头直径。初试验力和主试验力都应准确到±2%以内。

表 1-12 不同标尺的试验力与压头直径

洛氏硬度 标尺	初试验力 N	主试验力 N	压头直径, mm	
			基本尺寸	极限偏差
M	98.1	980.7	6.350	±0.015
L	98.1	588.4	6.350	
R	98.1	588.4	12.700	
F	98.1	980.7	3.175	

试验时施加初试验力主要是为了确定压入深度的起点，消除压头、试样和工作台之间的间隙以及试样表面凹凸不平对硬度值的影响，以保证试验结果的可比性。

(2) 试样应平稳放在工作台上，试验过程中不得有位移；试样厚度应均匀，厚度应不小于 10mm；试样大小应能保证在同一表面可进行 5 个点的测量，每个测点的中心距离以及距试样边缘的距离均不得小于 10mm。试样若为非平面的其他形状，其尺寸可由有关的产品标准规定。采用叠层试样时，层数不得多于 3 层。试验时必须保证施加的试验力与试样表面垂直。

(3) 试验前应使用已知硬度的标准块用 E 标尺进行校准，大批量试验前还应用 M、L、R 标尺的标准块进行校准，以便在试前发现并校正由于加力装置的失准或机架变形等引起的测试结果误差。标准计量块由中国计量科学院硬度室提供。

(4) 试验前还应根据试样材料的软硬程度选择合适的标尺，以便使测得的硬度数值处于 50~115 之间，少数材料如不能处于此范围内、也不得超过 125。如果一种材料同时可用两种标尺，且所测值均处于规定范围内，则应选用较小试验力的标尺。同一试样材料必须应用同一标尺进行测定。

(5) 试验时应按标准中规定的时间施加载荷和读数。

三、结果表示

洛氏硬度试验结果若使用例如日本东洋精机 DRH—FA 型全自动数字显示硬度计，可直接读取洛氏硬度值；若使用按硬度值分度的度盘式硬度计，应参照图 1-15 分别记录施加主试验力后长针通过 B0 的次数和卸除主试验力后长针通过 B0 的次数，两数相减后按以下方法得到硬度值：

- ① 差数为 0 时，标尺读数加 100 为硬度值；
- ② 差数为 1 时，标尺读数即为硬度值；
- ③ 差数为 2 时，标尺读数减 100 为硬度值。

此外，也可按上式计算得出硬度值。测得的洛氏硬度值用前缀字母和数字表示，例如使用 M 标尺测得的洛氏硬度值为 70，则表示为 HRM70。试验结果取 5 个单点测定值的算术平均值，并取 3 位有效数字。试验过程中如发现试样的正反两面有裂痕，该数据无效。

四、影响因素

(1) 试验仪器的影响 涉及硬度计自身存在的缺陷包括：机架的变形量超过规定标准；主轴倾斜；压头夹持方式不正常；加荷不平稳以及压头轴线偏

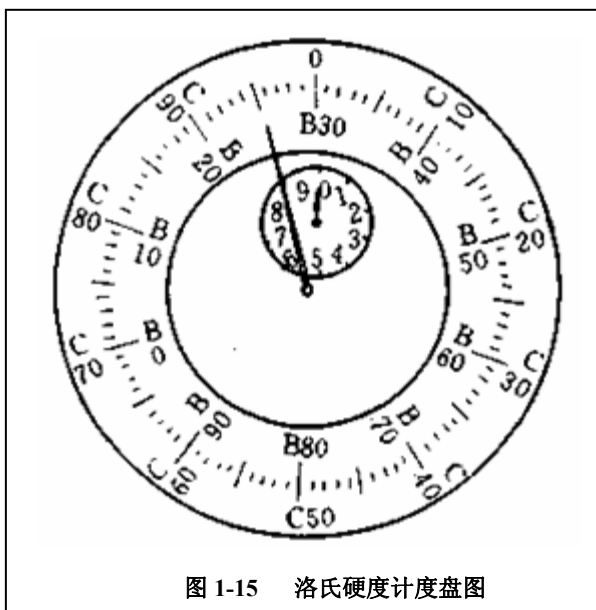


图 1-15 洛氏硬度计度盘图

移等，均可导致测试结果的误差。另外，使用不同的测量装置例如使用百分表或使用光学投影装置，也能影响测试结果的偏差。上述各因素都应在仪器使用前按照规定的要求和方式予以校准消除。

(2) 测试温度的影响 测试温度对洛氏硬度的影响见图 1-16。

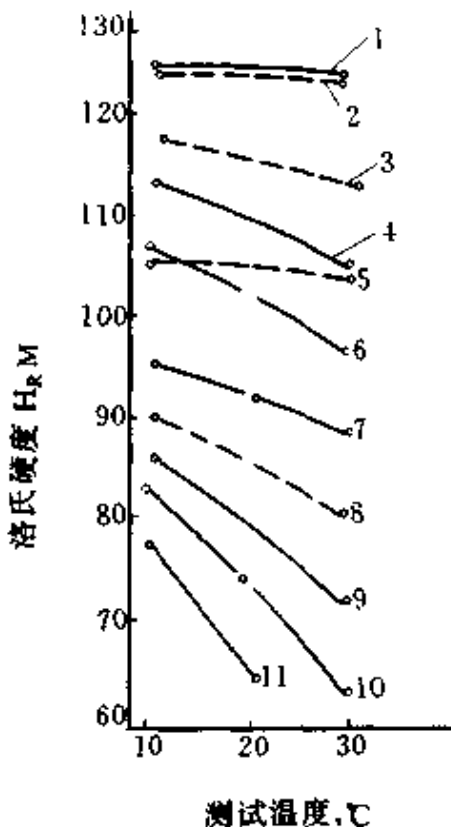


图 1-16 测试温度对洛氏硬度的影响

1—PF; 2—MF; 3—UF; 4—UP; 5—PF 层压板;

6—PMMA; 7—PA66; 8—PA6; 9—PVC 板; 10—PC; 11—PP

可以看出：随着测试温度的上升、各种塑料材料的洛氏硬度值都将下降，其中尤其对热塑性塑料的影响更为显著。为此，必须严格控制环境温度在规定的 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 范围内。

(3) 试样厚度的影响 和前述的邵氏硬度和球压痕硬度一样，洛氏硬度也存在载物台效应的影响。表 1-13 给出其试验结果。

可以看出：试样厚度小于 6mm 时，对硬度值的影响较大；而试样厚度大于 6mm 时对硬度值的影响较小。为此规定试样厚度不得小于 6mm。

表 1-13 试样厚度对洛氏硬度的影响

试样材料	标尺	试样厚度, mm						硬度差	
		2	4	6	8	10	12	2~6	8~12
PVC	1.	83.8	87.8	89.6	89.8	89.8	89.4	5.8	0.4
PP	1.	43.7	64.1	70.5	70.8	71.1	72.0	26.8	1.2

(4) 主试验力保持时间的影响 见表 1-14。

表 1-14 主试验力保持时间对洛氏硬度的影响

试样材料	标尺	保持时间, s					硬度差
		5	10	15	20	30	
LDPE	R	71.2	71.4	67.8	64.5	59.8	11.6
PMMA	M	103.4	100.0	98.3	96.6	93.1	10.3
ABS	L	69.7	69.0	65.7	65.4	63.0	6.7
PF	M	117.1	117.1	117.0	116.1	115.7	1.4
氨基塑料	M	118.6	118.1	117.5	117.3	117.0	1.6

由表 1-14 可以看出；由于塑料属于粘弹性材料，在试验载荷作用下，试样的压痕深度必定会随加荷时间的增加而增加，因而主试验力保持时间越长，其硬度值越低。此外，还可以看出：主试验力的保持时间对低硬度材料的影响较对高硬度材料的影响要明显得多。

(5) 读数时间的影响 主试验力卸除后，试样压痕将产生弹性恢复，其速度是先快后慢，最终趋于稳定。因此卸荷后距读数时间越长，压痕的弹性恢复时间也越长，测得的硬度值应当偏高。结果见表 1-15。

表 1-15 读数时间对洛氏硬度的影响

试样材料	标尺	读数时间, s					硬度差
		5	10	15	20	30	
LDPE	R	63.6	65.3	65.5	66.9	67.8	4.2
PVC	M	59.1	60.7	61.8	61.4	62.5	3.4
ABS	L	64.9	66.0	66.4	67.5	68.4	3.5
PF	M	115.7	115.2	116.7	117.2	117.4	2.2
氨基塑料	M	117.1	118.9	118.4	119.0	119.7	2.6

可以看出：读数时间的长短对硬度值的影响是显而易见的，其中，由于热固性材料的弹性恢复变形较小，读数时间长短的影响相对小于热塑性材料。

(6) 标尺的选择对硬度的影响 表 1-16 绘出不同级别的 PMMA 试样选用不同的标尺，测得的硬度值及其差值：

表 1-16 PMMA 洛氏硬度的标尺效应

标尺	八级品	五级品	硬度差
R	121	120	1
L	109	99	10
M	92	76	16

可见：测得的硬度值如果超过 50~115 的规定范围，由于标尺的线性关系变差，灵敏度降低，不同品级产品的硬度差值变小，不利于产品质量的评定，例如采用 R 标尺测得的结果即属于此。因此，合理地选择标尺使测得的硬度值在规定的 50~115 范围内是不可忽视的。

五、洛氏 α 硬度

前述的洛氏硬度试验方法是把塑料材料的硬度作为试样弹性恢复后压痕器压入试样深度的函数来测定的，因此，使用 L、M 和 R 标尺测得的硬度不能与前述的球压痕硬度联系起来，因为后者是由负荷下压入深度求得的，不考虑试样材料的弹性恢复。然而，可以使用洛氏硬度计并使用合适的标尺，测量在总试验力作用下的压入深度的方法得到硬度值，这就是洛氏 α 硬度。

(1) 定义 洛氏 α 硬度指定使用唯一的 R 标尺、压头直径为 12.7mm、主试验力为 588.4N 的条件下，以在总试验力作用下测得的压入深度，并将其记作以 0.002mm 为单位的数值，经换算得到。

洛氏 α 硬度只适用于软材料的测定。

(2) 方法要点 首先，使用 R 标尺测定试验机的弹性常数 C。方法是：将一块厚为 6mm 的软铜块置于硬度计的工作台上，通过升降装置使铜块与压头接触，直到硬度计指示表短针指向零点，长针垂直向上指向 B30 或 C0 点，此时已施加的初试验力即为 98.07N，接着施加主试验力，并保持主试验力直到长针稳定为止，记录此读数；再卸除主试验力并调整指示表，使长针重新对准 B30 或 C0 点。在严格保持工作台和铜块不发生移动的情况下，多次重复上述施加主试验力和卸除主试验力的操作，直到指示表的读数恒定为止，此值即为硬度计的弹性变形常数 C 并以每格 0.002mm 为单位表示。

然后，用试样代替铜块，于 10s 内调节硬度计的指示表，使长针指向 B30 或 C0 点，立即施加主试验力，经 15s 后立即记录压头压入深度，并以 0.002mm 为单位表示，此值即为总试验力作用下的压入深度 h。

最后，按下式计算得到该洛氏 α 硬度：

$$HR_{\alpha} = 150 - (h - C) \quad (1-14)$$

式中 HR_{α} ——洛氏 α 硬度值；

h ——总试验力作用下的压入深度，以每格 0.002mm 为单位表示；

C ——硬度计的弹性变形常数，以每格 0.002mm 为单位表示；

150——换算常数。

洛氏 α 硬度与塑料球压痕硬度之间有以下近似的经验换算式：

$$HR_{\alpha} = 150 - \left(\frac{448.6}{H^{0.813}} \right) \quad (1-15)$$

式中 HR_{α} ——塑料洛氏 α 硬度；

H ——塑料球压痕硬度。

六、洛氏硬度的优缺点

塑料洛氏硬度试验方法操作简便、快捷、工作效率较高；不破坏试样，可对成品和半成品进行检测；可使用不同的标尺、负荷和压头，因而适用于各种软硬程度不同的材料；测定过程始终保持固定的初试验力，可减少试样表面轻微的不平整对测试结果的影响。正是由于可采用不同标尺、不同负荷和不同直径的压头，因而测得的硬度值相互间均不可比，也不存在相互间的换算关系。

七、结语

材料的硬度不是一个固定的物理常数，它与使用的试验方法和试验条件有关。因此，从理论分析讲，各种不同试验方法和试验条件测得的硬度值不存在可比性，也不存在数学上的换算关系。然而可以通过对大量实验数据进行整理后，使用数学方法得出一些经验性的近似换算式，但误差一般较大，算得的结果只能供参考。同样，对某同一材料使用不同的标尺测得的洛氏硬度值，也可以运用同样方法获得以下类似的经验换算式：

$$HRR=95.5+0.36HRM \quad (1-16)$$

$$HRR=95.8+0.31HRM \quad (1-17)$$

上式适用于硬质 PVC，下式则适用于 PS。

1.3 材料拉伸试验

一、实验目的

拉伸实验是在常温下以缓慢均匀的速度对专门制备的试件施加轴向载荷，在试件加载过程中观测载荷与变形的关系，从而决定材料有关力学性能实验。

二、实验内容：

- (1) 观察分析不同材料拉伸过程及实验现象；
- 2、掌握材料力学性能测试的基本实验方法；
- 3、测定几种典型材料的强度指标和塑性指标；
- 4、认识典型材料力学性能特点和断裂特征；
- 5、了解材料力学基本实验设备的工作原理和使用方法

三、实验仪器

电子万能试验机



四、实验原理

拉伸过程高分子链的三种运动情况：

- ▲弹性形变（开始~e 点）
- ▲强迫高弹形变
- ▲塑性变形

1、弹性变形的特点

- (1) 可逆性：去掉外力后变形消失，弹性变形都是可逆变形
- (2) 金属、陶瓷或结晶态高聚物：应力-应变线性关系，弹性变形量都较小
- (3) 橡胶态的高聚物：应力-应变不呈线性关系，且变形量较大。

2、弹性变形的力学性能指标

(1) 弹性模量：是单位应变所需应力的大小，物理意义是产生 100 %弹性变形所需的应力。

(2) 比例极限 σ_p ：是保持应力与应变成正比关系的最大应力，即在应力-应变曲线上刚开始偏离直线时的应力

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_0} \quad (1-18)$$

(3) 弹性极限 σ_e ：是材料发生可逆的弹性变形的上限应力值，应力超过此值，则材料发生塑性变形。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (1-19)$$

塑性变形是微观结构的相邻部分产生永久性位移，而不引起材料断裂的现象。塑性变形是一种不可逆变形。

塑性变形主要是由于切应力引起的。材料塑性变形过程中仍然保留着弹性变形，所以整个变形过程是弹性加塑性变形过程，可称为弹塑性变形。

塑性变形的力学性能指标

- (1) 屈服极限：材料的屈服极限定义为应力-应变曲线上屈服平台的应力

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \quad (1-20)$$

(2) 抗拉强度 σ_b ：是试样拉断前所承受的最大应力，即试样所能承受的最大载荷 F_b 与其原始截面积的比值

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1-21)$$

- (3) 伸长率和断面收缩率

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-22)$$

$$\varphi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\% \quad (1-23)$$

3、晶态高聚物的应力-应变曲线

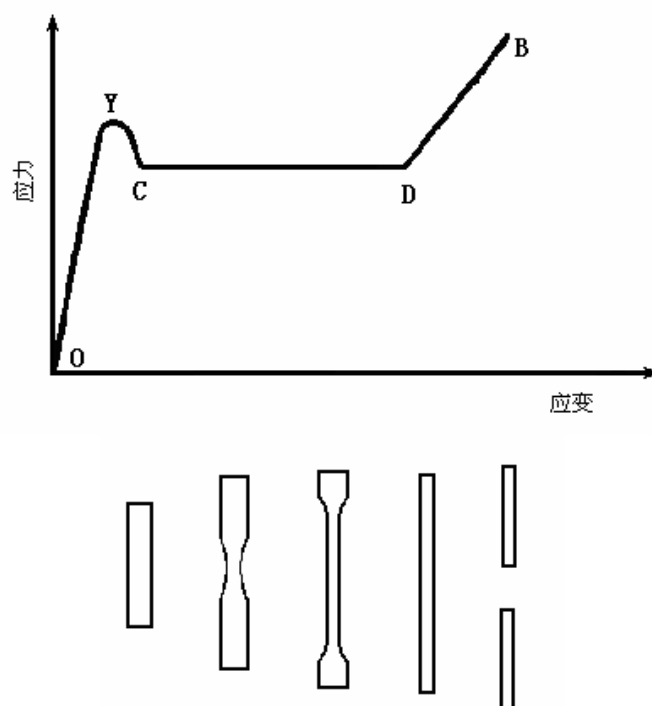


图 1-17 晶态高聚物的应力-应变曲线

第一阶段 OY 段：出现“细颈”。

第二阶段，细颈的发展阶段。

第三阶段 (DB)：成颈变细的试样重新被均匀拉伸，直到断裂点 B。

思考题

- (1) 冲击强度主要表现材料的哪类性能，一般有哪些测试方法？
- (2) 材料的硬度测试主要目的是什么？
- (3) 材料的拉伸强度如何测定？

第二部分 材料的热学性能测试

热学性能包括热膨胀系数、导热系数（表征导热能力）、导温系数（表征均温能力）、热容、热电势、热稳定性、熔化、升华、表面发射热辐射率和对外来热辐射的吸收率等，在工程上有许多特殊的要求和广泛的应用。比如，在道路、桥梁、建筑等工程设计，精密仪器仪表设计，材料的焊接、加工等各种领域，都必须对材料的热膨胀特性予以充分的考虑。又如，工业上炉衬、建筑材料，以及航天飞行器重返大气层的隔热材料要求具有优良的绝热性能；燃气轮机叶片、晶体管散热器等却要求优良的导热性能；另一方面，材料的组织结构发生变化时常伴随一定的热效应，在研究热函与温度的关系中，可以确定热容和潜热的变化，热学性能分析特别是对于确定临界点，并且判断材料相变特征有重要意义。

2.2 热膨胀系数的测试

2.2.1 基本概念

大多数材料随着环境温度的变化将产生膨胀或收缩，表征材料受热时长度或体积增大程度的热膨胀系数，是重要的热学性能之一。通常，热膨胀系数指的是温度变化 1°C 固体材料单位长度的变化量，故也称线膨胀系数，以区别于表示物体单位体积变化量的体膨胀系数。

线膨胀系数 α_l 和体积膨胀系数 α_v 的精确表达式为：

$$\alpha_l = \frac{dL(t)}{L_0 dt} \quad (2-1)$$

$$\alpha_v = \frac{dV(t)}{V_0 dt} \quad (2-2)$$

L_0 、 V_0 ——分别为初始温度 T_0 时试样的长度和体积；

$dL(t)/dt$ 、 $dV(t)/dt$ ——在温度 t 时，分别为试样长度和体积对温度的变化率。

必须指出，热膨胀系数实际上不是一个恒定的值，而是与温度有关的物理量，由于在不大的温度范围内它们相差很小，所以通常以平均值 $\bar{\alpha}$ 表示，无论线膨胀系数或体膨胀系数均是在

给定的温度范围内的一个平均值。如图 2-1 所示，某些无机材料的热膨胀系数 α 值，都是指定温度范围内的平均值，应用时要注意适用的温度范围。

平均线膨胀系数的定义为当物体温度上升 1°C 时其长度的相对变化：

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{L_2 - L_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (2-3)$$

式中： $\bar{\alpha}$ ——平均线膨胀系数 ($1/^{\circ}\text{C}$)；

L_0 ——温度为 T_0 时试样的长度，通常指规定温度（如 25°C ）或室温时试样的长度 (mm)；

L_1 、 L_2 ——温度分别为 T_1 、 T_2 时试样的长度 (mm)；

$\Delta L = L_2 - L_1$ 为在 ΔT 温度差内所对应的伸长量 (mm)；

$\Delta T = T_2 - T_1$ ：计算时选择的温度差 ($^{\circ}\text{C}$)。

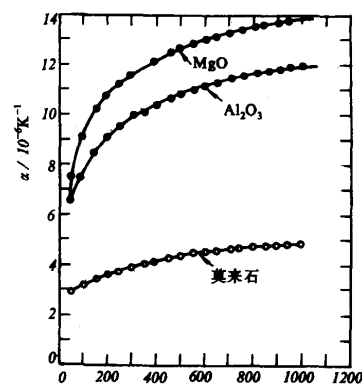


图 2-1 某些无机材料的热膨胀系数与温度的关系

热膨胀系数不仅是材料重要使用性能，而且是工程技术中进行材料设计的重要物理参数之一。特别在电真空技术中，玻璃、陶瓷、云母、人造宝石等与金属或合金之间的封接工艺，需要在低温和高温下两种材料的 α_l 值均相近，两者必须控制在 $\pm 10\%$ 的范围内，称之为膨胀系数匹配，如高温钠灯透明 Al_2O_3 灯管的 $\alpha_l = 8 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，选用的封接导电金属铌的 $\alpha_l = 7.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ ；玻璃温度计和玻璃仪器要求准确测定热膨胀；用于尺寸稳定零件的微波谐振腔、精密计时器、精密天平、标准尺、宇宙航行雷达天线等场合的材料，都要求在气温变化范围内具有很低的膨胀系数，而用于制造热敏感性元件的双金属却要求高膨胀合金。

材料的热膨胀本质，归结为点阵结构中的质点间平均距离随温度升高而增大。材料的热膨胀与材料结构、键型及键力大小、热容、熔点等密切相关，热膨胀系数主要由其化学组成和组织结构决定。热膨胀和其他性能之间的关系如下：

(1) 结合能和熔点：热膨胀与材料内部原子间的斥力、引力以及原子间的键能大小直接有关。具有强健的材料， α 值一般比较小，反之亦然。熔点是其结合键强度的表征之一，熔点高的材料， α 值也较小。金属元素和化合物的 α_l 与熔点之间的内在联系如图 2-2 和图 2-3 所示。

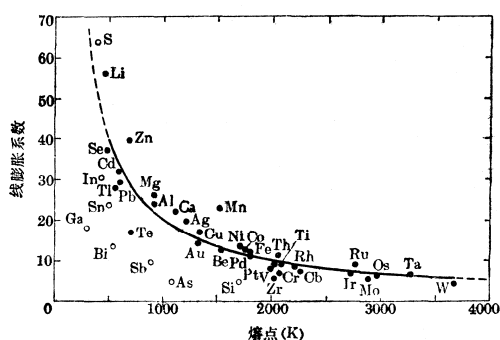


图 2-2 元素的线膨胀系数($\times 10^{-6}/\text{K}$)与熔点的关系

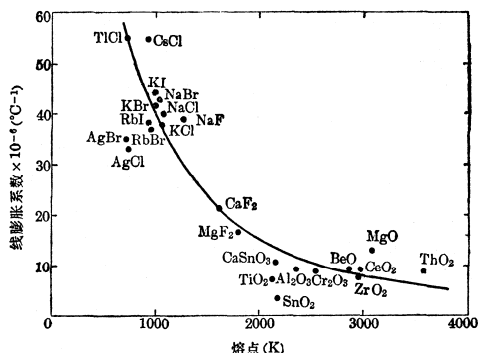


图 2-3 化合物的线膨胀系数与熔点的关系

(2) 温度和热容：热膨胀是固体材料受热以后晶格运动加剧而引起的容积膨胀，而晶格振动的激化就是热运动能量的增大。升高单位温度时能量的增量也是热容的定义。所以热膨胀显然与热容密切相关，并有着相似的规律，如图 2-4 所示，在很宽的温度范围内 Al_2O_3 的热容和热膨胀随温度的变化趋势相同。

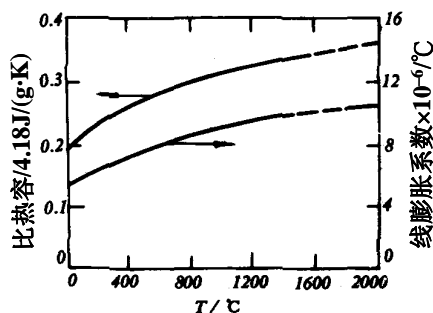


图 2-4 Al_2O_3 的热容、热膨胀系数与温度的关系

(3) 材料结构：对于相同组成的材料，由于结构不同，膨胀系数也不同。通常结构紧密的晶体，膨胀系数较大，而非晶态结构的玻璃，则往往有较小的膨胀系数。最明显的例子是石英晶体的膨胀系数为 $12 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，而石英玻璃则只有 $0.57 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。这是由于玻璃的结构较疏松，内部空隙较多，所以当温度升高，原子振幅加大，原子间距离增加时，部分地被结构内部空隙所容纳，而整个物体宏观的膨胀量就少些。对于各向异性的晶体，各晶轴方向的线膨胀系数不同。此外，由于温度变化材料内部发生相变时，热膨胀系数在相变点会发生突变。在各类相变中，最重要的是高一低温转变或同质多晶转变，材料的体积在转变点将产生一个

不连续的增大。以石英、方石英和 ZrO_2 为例，同质多晶转变引起体膨胀系数突变的现象示于图 2-5。可以发现：当温度升到快接近转变点时，石英的热膨胀速率已开始逐渐加快；温度到达转变点（ 573°C ）时，热膨胀系数出现最大值；在转变点以上，热膨胀系数则出现负值。

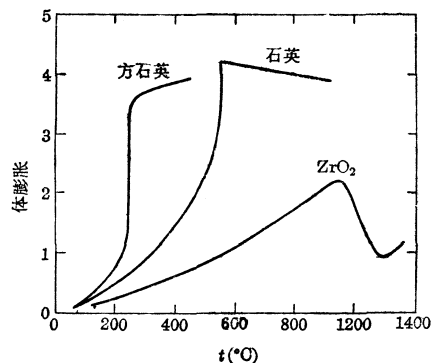


图 2-5 石英、方石英和 ZrO_2 发生同质多晶转变时的热膨胀行为

与金属材料相比，无机材料的热膨胀系数一般都比较小；而且，由于许多无机材料属于非等轴晶体即各向异性，所以不同晶轴具有不同的热膨胀系数，有时，因为材料的各相异性，会使整体的值 α_r 值为负值。

一般硅酸盐玻璃的热膨胀系数如图 2-6 所示，通常在 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 温度范围内出现突然的增大，所以对应的转变温度范围与玻璃的加热速率和前期热处理（即热历史）有关，所以玻璃试样必须经过良好的退火。无机材料的线膨胀系数一般都不大，约为 $10^{-5}\sim 120\times 10^{-6}/\text{K}$ 。一般硅酸盐玻璃线膨胀系数的波动范围在 $5.7\times 10^{-7}\sim 120\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ($15\sim 100^\circ\text{C}$)；一般陶瓷线膨胀系数的波动范围在 $50\times 10^{-7}\sim 120\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ($15\sim 100^\circ\text{C}$)。

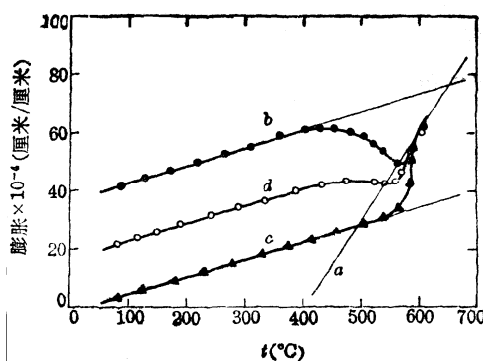


图 2-6 同一玻璃试样进行不同热处理后的线度变化
a) 升温极其缓慢使玻璃在 400°C 以上各点温度达到平衡；
b) 快速冷却；c) 在 500°C 长时间退火；d) 缓慢冷却

材料的膨胀系数 α 大小直接与热稳定性有关。一般 α_l 小，热稳定性就好。 Si_3N_4 的 $\alpha_l = 2.7\times 10^{-6}/\text{K}$ ，在陶瓷材料中是偏低的，因此热稳定也好。

实际上大多数陶瓷材料都是一些多晶体或由几种晶体和玻璃相组成的复合体。各相同性晶体组成的多晶体，其热膨胀系数与单晶相同。假如晶体是各相异性的，或复合材料中各相的膨胀系数不同，则它们在烧成后的冷却过程中产生热膨胀导致了内应力，有时内应力甚至会发展到使坯体产生微裂纹，因此测得的多晶聚集体或复合体出现热膨胀系数的滞后现象。

2.2.2 玻璃、陶瓷等材料的线膨胀系数测试

一、实验目的

- (1) 了解材料热膨胀系数的基本概念和测试方法；
- (2) 掌握熔石英膨胀仪测定材料热膨胀系数的基本原理和过程；
- (3) 学习根据膨胀曲线确定玻璃特征温度的方法；
- (4) 了解影响测定结果的主要因素；
- (5) 了解影响材料热膨胀系数的主要因素。

二、测试原理

采用石英膨胀仪法测定试样的线膨胀系数，是利用石英玻璃具有较小的膨胀系数 ($\alpha=5.7\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)，同时它具有随温度变化很小的特点。将试样放入石英玻璃套管中，试样通过石英玻璃棒与伸长测量机构（位移传感器）相连，石英玻璃套管放在加热炉内金属管的中心区受到均匀加热，试样便与石英玻璃套管及石英玻璃棒同时受热膨胀，由于一般试样受热膨胀的伸长量远比石英玻璃的大，因此通过位移传感器能精确测出试样在不同温度下的伸长量（假如石英玻璃套管与石英玻璃棒的长度相近，则二者的伸长量相互抵消，反之相差较大，则需引入了仪器常数 α_k ），便可计算一定温度范围内材料的平均线膨胀系数。

如前所述，玻璃和陶瓷等材料的热膨胀系数与组成、结构及热历史等有关。对于玻璃材料，膨胀过程如图 2-7 所示，膨胀曲线通常可以分成 3 个阶段：从室温加热至 T_g 温度之前，其热膨胀主要取决于质点的热振动，伸长量与温度基本上保持线性关系（AB 段）；超过 T_g 温度，热振动和结构调整将同时影响玻璃的热膨胀，伸长量随温度变化速率显著增加（BC 段）；当达到一定的高温后，在位移传感器的压力作用下玻璃出现了软化变形，膨胀速率开始降低，甚至出现负值（CD 段）。根据玻璃的热膨胀曲线不仅可计算 T_g 温度以下的平均热膨胀系数，同时还可以确定玻璃转变 T_g 和玻璃软化温度 T_f （最高点 C 所对应的温度）。

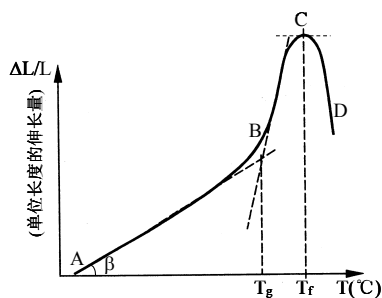


图 2-7 典型的玻璃膨胀曲线示意图

试样的线膨胀系数值 α_t 可按直线段（如玻璃样品的 AB 段）对横坐标轴倾斜角的正切与原长之比来确定，计算公式为：

$$\alpha_t = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta t} + \alpha_k = \tan \beta + \alpha_k \quad (2-4)$$

式中， α_k 为仪器常数 ($1/^{\circ}\text{C}$)，即熔石英的平均线膨胀系数，一般取 $5.7\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 。

三、测试仪器

(1) 熔石英膨胀仪：如图 2-8 所示，由加热电炉、石英玻璃套管、石英玻璃棒、石英玻璃片、待测试样、样品支架、热电偶毫伏信号)、位移传感器（毫伏信号）、温度变送器（毫伏信号转化为毫安信号）、位移变送器（毫伏信号转化为毫安信号）、数据采集卡、计算机自动采集程序（可以采集温度和对应的伸长量数据，并自动显示和记录）组成。技术参数如下：

测量温度范围：0~1000℃；

变形膨胀范围：0~1mm；

温度精度：误差 $\leq \pm 3^{\circ}\text{C}$ ；

变形精度：误差 $< 0.5\mu\text{m}$ 。当

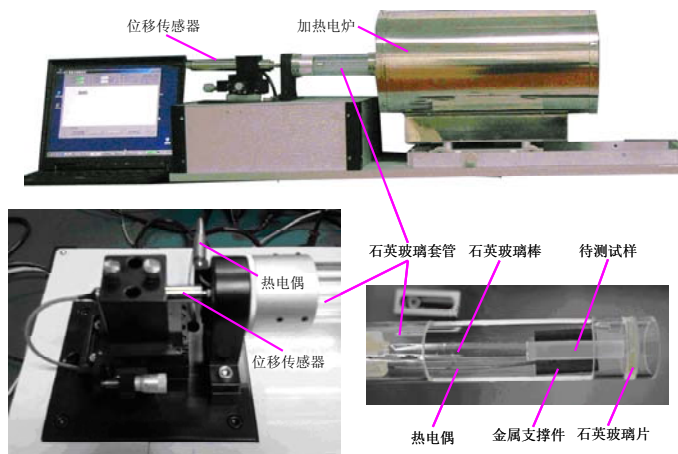


图 2-8 熔石英膨胀仪

温度超过 950℃，膨胀超过 0.95mm 时，采集程序将给出警告。

测量温度范围：0~1000℃。

(3) 其他仪器：游标卡尺。

四、试样制备

取无缺陷并经过良好退火的玻璃或陶瓷材料，加工成尺寸为 5×5×30mm 或 φ5×30mm 左右的试样棒，将两端磨平，以保证试样在石英玻璃套管中与石英玻璃棒和石英玻璃片接触良好。

五、实验步骤

1、检查各种接线：一条电源线，两条 USB 线；

2、测量试样的初始长度 L_0 ：用游标卡尺进行精确测量试样长度（精确至 0.02mm），测量时应转动试样棒，共测三次，取其平均值。

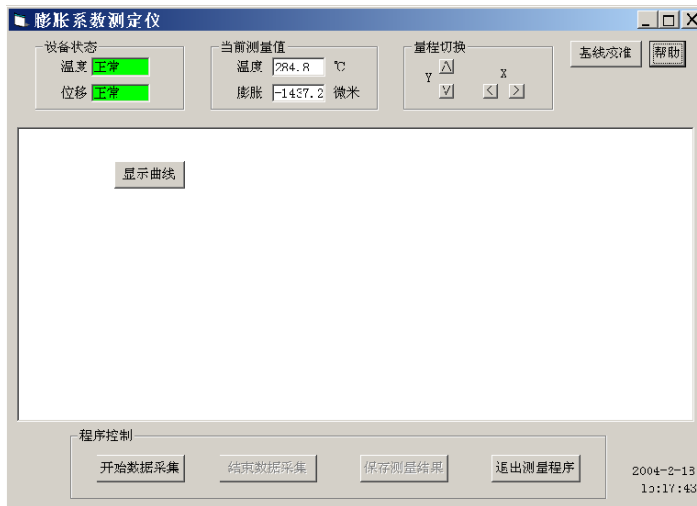
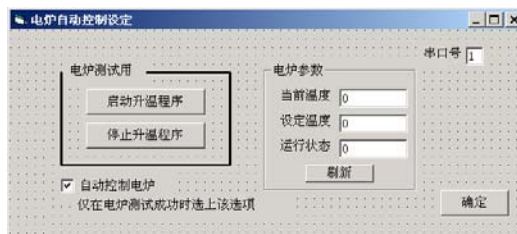
3、安装被测样品：(1) 松开加热炉锁紧螺丝，轻轻推开加热炉；(2) 将待测样品放在样品支架上，然后慢慢调节位移传感器下面的调整架（调节下图中的旋钮），直到石英玻璃棒顶到样品为止（如图 2-8 所示）；(3) 轻轻推动加热炉到合适的位置，并拧紧加热炉锁紧螺丝。

4、开启计算机，运行测试程序，依次进入：

(1) “电炉自动控制设定”窗口和膨胀系数测定仪程序界面，慢慢调节调整旋钮，直到测试程序中当前测量值下的膨胀值为 10μm 左右；

(2) 点击“开始数据采集”，测试正式开始，测试结果将同步显示出来；

(3) 测试结束：对于具有明显软化点的玻璃样品，测试程序能够自动停止；对于无明显软化点的样品，则需点击“结束数据采集”要手动停止测试程序；然后点击“保存测试结果”，以“*.txt”形式保存；最后点击“退出测量程序”。测试结果将保存成文本文档，可以导入各种作图软件进行作图。



六、数据处理要求（作图与计算）

(1) 根据所得测试数据，以温度 T (°C) 为横坐标，以伸长量 ΔL (或 $\Delta L/L_0$) 为纵坐标作图，得到试样的膨胀曲线（标明坐标名称及单位）。

(2) 根据测试结果，按照下面的计算公式计算样品室温至某一温度 t 的平均线膨胀系数：

$$\bar{\alpha}_t = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\Delta L_t - \Delta L_0}{T_t - T_0} + \alpha_k \quad (2-5)$$

式中， α_k 为仪器常数 (1/°C)，即熔石英的平均线膨胀系数，一般取 $5.7 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。

(3) 对于玻璃样品，根据膨胀曲线确定其 T_g 温度和 T_f 温度，并在图上标出。

七、思考题

- (1) 影响材料膨胀系数大小的主要因素有哪些?
- (2) 测试时, 升温速度的大小对膨胀系数有何影响?
- (3) 为什么在计算公式 (2-5) 中较定义式 (2-3) 增加了 α_k 一项?
- (4) 为什么要用熔石英玻璃做膨胀头? 熔石英玻璃的平均线膨胀系数能否用本膨胀仪测试? 为什么? 若不能, 则可以采用何种方法测试。

八、注意事项

- (1) 在测试过程中, 不要让计算机进入待机状态, 否则将中断测试;
- (2) 实验过程中必须尽可能地防止震动而造成实验误差;
- (3) 计算过程中写明计算步骤, 数量级不要搞错。

2.2.3 金属线膨胀系数的测试

一、实验目的

- (1) 掌握测量金属线膨胀系数的原理和方法;
- (2) 学习千分表的使用方法;
- (3) 以及用最小二乘法处理实验数据的方法和技巧。

二、实验原理

本实验采用电加热法给加热棒加热, 加热棒给样品材料传热, 金属样品微小伸长量用千分表测量。通过测量不同温度下样品长度变化量来计算其线膨胀系数。

大部分金属材料在温度升高时, 其伸长量与 0°C 时的长度和温度均成正比, 即

$$L-L_0=L_0\alpha T \quad (2-6)$$

$$L=L_0(1+\alpha T) \quad (2-7)$$

式 (2-6) 中, L 为金属样品在温度为 T 时的长度, L_0 为样品 0°C 时的长度, α 为一比例系数, 称为金属线膨胀系数。

设在温度为 T_1 时样品的长度为 L_1 , 在温度为 T_2 时样品的长度为 L_2 , 由 (2-7) 式可得

$$L_1=L_0(1+\alpha T_1) \quad (2-8)$$

$$L_2=L_0(1+\alpha T_2) \quad (2-9)$$

由 (2-8)、(2-9) 式可得

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{1+\alpha T_1}{1+\alpha T_2} \quad (2-10)$$

由 (2-10) 式可得

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_1 T_2 - L_2 T_1} \quad (2-11)$$

当温度变化范围不大时, L_1 与 L_2 相差极小, 所以 $L_1 \approx L_2$, 则 (2-11) 式可变换为

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_1 \Delta T} \quad (2-12)$$

式 (2-12) 中, $\Delta L=L_2-L_1$, $\Delta T=T_2-T_1$ 。

由 (2-12) 式可知金属的线膨胀系数定义为温度每升高 1°C , 金属每单位长度的伸长量。

多数金属的线膨胀系数在 $(0.8\sim 2.5)\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 之间。线膨胀系数是与温度有关的物理量。当 ΔT 很小时,由(2-12)式测得的 α 称为固体在温度为 T_1 时的微分线膨胀系数。当 ΔT 是一个不太大的变化区间时,可近似认为金属线膨胀系数 α 是不变的,由(2-12)式测得的 α 称为固体在 $T_1\sim T_2$ 温度范围内的线膨胀系数。由(2-12)式可知,在 L_1 已知的情况下,固体线膨胀系数的测量实际归结为温度变化量 ΔT 与相应的长度变化量 ΔL 的测量。由于 α 数值较小,在 ΔT 不大的情况下, ΔL 也很小,因此准确地测量 ΔL 及 T 是保证测量准确的关键。

三、实验仪器

THQJZ-1 型金属线膨胀系数测量实验仪:由金属线膨胀系数测量装置、温度测量控制装置、金属棒样品组成。

金属线膨胀系数测量装置(如图 2-9 所示)由千分表、加热棒、加热管、温度传感器 Pt100、金属防护罩、底座组成。测量装置右侧开口,用于更换金属棒样品,金属棒样品装进加热管后用螺钉通过弹簧拧紧,为固定端,另一端通过顶杆与千分表接触,为自由端。金属棒样品自由端在弹簧作用下将长度变化转化成千分表指针的偏转,通过表盘刻度读出。

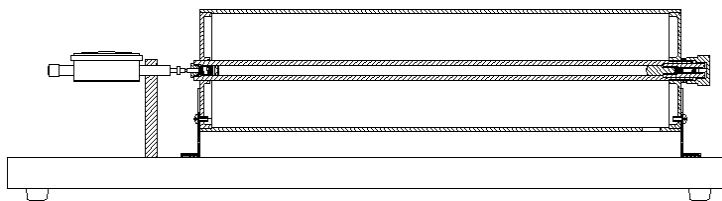


图 2-9 金属线膨胀系数测量装置示意图

千分表测量范围:0~1mm,分度值:0.001mm;

温度测量控制装置由 PID 智能温度调节器、可控硅组成。

四、实验样品

金属棒样品有铜、铁、铝棒三种,实验时根据测量需要安装所要测量的样品。

五、实验步骤

(1) 样品安装:实验时将所要测量的金属棒样品从线膨胀系数测量装置右侧装进加热管,拧紧螺钉。

(2) 千分表调整:检查千分表与金属棒样品自由端顶杆接触是否良好,调节千分表调零转盘,使室温下千分表读数在 0.1~0.2mm 之间,否则用螺丝刀松开其千分表固定螺丝,调整千分表固定位置。

(3) 导线连接:用二号导线将 Pt100 输出接至实验仪面板 Pt100 输入,将温度传感器信号送入 PID 智能温度调节器。将加热电源线接至实验仪面板加热输出,用可控硅调节输出的电压给加热棒加热。

(4) 打开实验仪后面板电源开关, PID 智能温度调节器显示窗亮,设置 SV=110.0 $^{\circ}\text{C}$,记录室温下千分表读数。

(5) 打开加热开关,金属棒样品开始升温,稳定后千分表指针匀速偏转,按照表 2-1 的格式记录金属棒样品温度为 T=35 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、45 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、...、100 $^{\circ}\text{C}$ 时千分表读数 L。

表 2-1 金属线膨胀系数测量实验数据记录表

测试日期与时间		年 月 日, 星期 第 节						
仪器编号		操作者姓名						
样品名称		初始温度 T_0 (°C)			千分表初始读数 (μm)			
升	温度 T (°C)	35	40	45	50	55	60	65
	千分表读数 L (μm)							
过	温度 T (°C)	70	75	80	85	90	95	100
	千分表读数 L (μm)							
降	温度 T (°C)	100	95	90	85	80	75	70
	千分表读数 L (μm)							
程	温度 T (°C)	65	60	55	50	45	40	35
	千分表读数 L (μm)							

(6) 当金属棒样品温度 $T \geq 105^\circ\text{C}$ ($PV \geq 105^\circ\text{C}$) 时, 关闭加热开关, 停止给金属棒样品加热, 由于温度具有滞后性, 经过短时间超调, 金属棒样品温度开始下降。记录金属棒样品降温期间, 温度为 $T=100^\circ\text{C}$ 、 95°C 、 90°C 、 \dots 、 40°C 时千分表读数 L 。

(7) 测量另外两种金属棒样品的线膨胀系数, 重复实验内容与步骤 (1) ~ (6)。

六、数据处理要求 (作图与计算)

1. 根据表 2-1 所记录的金属棒样品实验数据, 以温度 T ($^\circ\text{C}$) 为横坐标, 以伸长量 ΔL (或 $\Delta L/L_0$) 为纵坐标作图。

2. 实验数据处理

已知室温下金属棒样品的长度 $L_1=370\text{mm}$, 按照 (2-12) 式, 只要计算出 $\frac{\Delta L}{\Delta T}$ 即可计算出金属的线膨胀系数 α 。

用最小二乘法计算铜、铁、铝三种金属棒样品的线膨胀系数。

令金属棒样品温度 $T=X$, 金属棒样品长度 $L=Y$, 斜率 $\frac{\Delta L}{\Delta T}=b$, 则有线性函数关系

$$Y=a+bX \quad (2-13)$$

用最小二乘法求得

$$a = \frac{\overline{X \cdot XY} - \overline{Y} \cdot \overline{X^2}}{\overline{X^2} - \overline{X}^2} \quad (2-14)$$

$$b = \frac{\overline{X \cdot Y} - \overline{XY}}{\overline{X^2} - \overline{X}^2} \quad (2-15)$$

计算待定系数 b 及线性相关系数 γ , 从而求出金属棒样品的线膨胀系数 α , 并验证线性关系 $L=a+bT$ 是否成立。验证是通过相关系数 γ 来进行的, 其表达式是

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2-16)$$

当 $\gamma \rightarrow 1$ 时 (一般达到 0.999 即可) 表示 Y 和 X 的线性关系好, 即线性函数形式正确; 当 $\gamma \rightarrow 0$ 时说明实验数据分散, 即线性关系不存在。最小二乘法的统计不确定度与相关系数密切相关: 当 $\gamma \rightarrow 1$ 时, 统计不确定度变小; 当 $\gamma \rightarrow 0$ 时, 统计不确定度变大。

3. 分别计算出升温和降温两种方式下金属线膨胀系数, 求平均值, 即为被测金属棒样品的线膨胀系数 α 。

4. 将实验测得的铜、铁、铝棒三种金属样品的线膨胀系数与参考值进行比较, 计算实验误差, 分析误差产生的原因。铜、铁、铝的线膨胀系数在 20~100°C 的参考值如表 2-2 所示。

表 2-2 金属的线膨胀系数

物质	铜	铁	铝
线膨胀系数 α ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	17.8	10.6~12.2	22.2

七、思考题

- (1) 实验时用升温 and 降温两种方式测金属线膨胀系数有什么区别, 求平均值有何意义?
- (2) 金属线膨胀系数的测量误差主要有哪些因素, 如何减小?

八、注意事项

- (1) 本实验仪为 AC220V 供电, 实验仪通电后不要触摸各个电源接口, 以免发生危险。
- (2) 安装金属棒样品时动作要轻, 防止金属棒变形, 快接触千分表时动作要缓慢, 防止损坏千分表, 螺钉要拧紧。
- (3) 千分表为精密贵重易损仪器, 一般不要自行装卸, 不要粗暴操作, 用螺丝刀调整位置时要小心谨慎。
- (4) 实验时应将实验仪放在平整、平稳桌面上, 实验过程中无任何振动, 如受外力作用, 将给实验带来较大误差。
- (5) 除 SV 参数外, PID 智能温度调节器其它参数在实验仪出厂前均已设置好, 一般情况下不要随意更改, 实验时金属棒样品加热温度不得超过 110°C。

2.2.4 其他测试方法简介

热膨胀系数的测试方法和装置有很多种, 分别适用于不同的测试要求和场合, 通常分为相对法 (或比较法) 和绝对法两大类, 前者的特点是待测材料的热膨胀是相对于另一种材料 (参考) 热膨胀的比较值; 后者是直接测定材料的热膨胀。最基本且应用最广泛的有以下五种: 示差法、测微望远镜直接观察法、干涉仪法、X 射线法、体积测定法。近年来激光法越来越受到人们的重视, 应用也日趋广泛, 测定温度范围可从略高于绝对零度一直到 4000K 左右。

一、示差法 (顶杆法)

示差法是一种经典方法, 测定装置简图见图 2-9。试样的膨胀, 由一端与试样接触、另一

端与千分表接触的顶杆传递给千分表。由于支杆和顶杆等部件与试样同时被加热和膨胀，因此千分表上的读数是试样与这些有关部件热膨胀的综合反应。膨胀计各部件（如顶杆、支杆）所用的材料，根据不同的试验温度确定：在1200K以下通常用石英玻璃；1200K以上，可根据温度的高低分别用蓝宝石单晶或高纯度刚玉、碳化硅、钽、钨以及其它耐高温材料。目前，此法最高温度已超过3200℃。

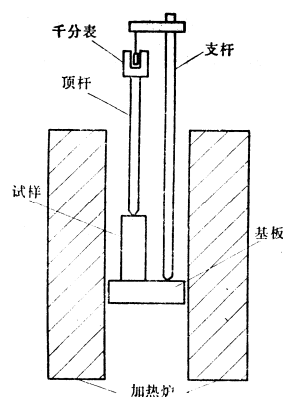


图 2-9 示差法膨胀系数测定装置简图

优点是结构简单，比较可靠、实用，易于进行自动操作以及试验温度范围比较宽广；主要缺点是需要利用已知热膨胀系数的材料做膨胀计。常见的误差来源是温度的测定和待测材料在试验过程中的变形问题，后者常用的解决办法是适当增大待测试样直径，减小顶杆的压力，或把试样水平放置进行测试。

二、测微望远镜直接观测法

测微望远镜直接观测法结构图见图 2-12，最大特点是试验温度高，目前已达 3600℃ 以上，是膨胀系数测试中，特别是高温下测定大试样绝对膨胀值最常用的一种方法，其测试精度相当高。

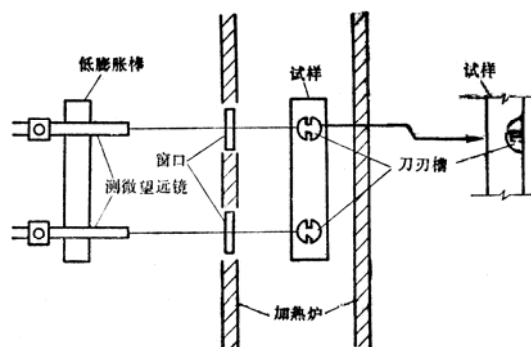


图 2-12 测微望远镜观测法结构示意图

三、干涉仪法

利用被测试样分隔的两个表面反射的单色光的干涉原理，测定热膨胀系数的方法。图 2-13 是 Fizeau 干涉仪简图。其最高测试温度因受石英板限制，约为 1000℃ 左右。如改用蓝宝石，则有可提高试验温度。用该装置测定热膨胀系数时，即可进行相对值的测定，也可进行绝对值的测定。

主要优点是可以测定厚度不到 1~2mm 的薄片试样，特别适用于釉层、涂层、珐琅和单晶体等试样；此外，具有比其它方法更高的测试精度，并可用照相方法自动记录数据。主要缺点是，建立测试装置和实验操作难度比较大，测试过程中的轻微振动或倾斜都会带来很大的测试误差。

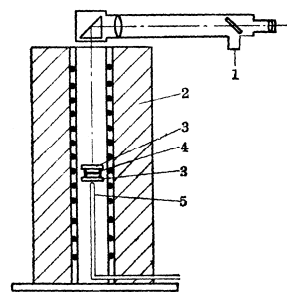


图 2-13 Fizeau 干涉仪简图

- 1.单色光; 2.加热炉; 3.熔融石英板;
- 4.待测试样; 5.测温热电偶

四、X 射线法

X 射线法的主要特点，能够测定非常小的试样内晶体不同方向的热膨胀系数 α 。正常条件下，由此给出的膨胀系数测试精度约为 1~2%，不如其他精度的测试方法那么理想。主要优点是：能测试外形不规则、体积很小而强度差的晶体试样，这是其它方法无法与之相比的。测试时，通常把试样加工成细丝或做成粉末后放入薄壁的玻璃管中。

2.3 导热系数的测试

2.3.1 基本概念

导热系数(热导率)是反映材料热性能的物理量,导热是热交换三种(导热、对流和辐射)基本形式之一,是工程热物理、材料科学、固体物理及能源、环保等各个研究领域的课题之一,要认识导热的本质和特征,需了解粒子物理而目前对导热机理的理解大多数来自固体物理的实验。材料的导热机理在很大程度上取决于它的微观结构,热量的传递依靠原子、分子围绕平衡位置的振动以及自由电子的迁移,在金属中电子流起支配作用,在绝缘体和大部分半导体中则以晶格振动起主导作用。因此,材料的导热系数不仅与构成材料的物质种类密切相关,而且与它的微观结构、温度、压力及杂质含量相联系。

导热系数不仅是评价材料的重要依据,而且是应用材料时的一个设计参数,在加热器、散热器、传热管道设计、房屋设计等工程实践中都要涉及这个参数。因为材料热导率不仅随温度、压力变化,而且材料的杂质含量、结构变化都会明显影响热导率的数值,所以在科学实验和工程设计中所用材料的导热系数都需要用实验的方法测定(粗略的估计,可从热学参数手册或教科书的数据和图表中查寻)。测量物质的导热系数是热学实验中的一个重要内容。

1882年法国科学家 J·傅里叶奠定了热传导理论,目前各种测量导热系数的方法都是建立在傅里叶热传导定律基础之上,从测量方法来说,可分为两大类:稳态法和动态法。

存在温差是产生热传导过程的必要条件。不同的物质以及不同的物质状态(气态、液态和固态),由于结构上的差别,导热机理当然也不相同,相应的导热能力也大不一样。不过,有一点是共同的:即所有物质的热传导,不管它处于什么状态,都是由于物质内部微观粒子相互碰撞和传递的结果。对于处在不同状态的各种物质的导热过程,用分子导热、电子导热、声子导热和光子导热的机理来描述,可以把物质内部传导热能的载体分成四种,即分子、电子、声子和光子。这样,所有物质导热系数的通式可表示为:

$$\lambda = \frac{1}{3} \sum_i C_{vi} \cdot V_i \cdot l_i \quad (2-17)$$

式中脚注 i 表示四种不同的导热载体。

在物质的导热过程中不同热载体所作的贡献远不相同。金属的导热主要靠电子作为热载体,声子载体的贡献多数情况下可予以忽略;介电体的导热主要靠声子作为热载体,电子载体的贡献几乎没有,光子载体的贡献则随温度等许多因素而变化。

同一类物质,如介电体,不同载体对导热过程的贡献,也会因其它条件的变化而发生较大的变化。在很低温度下,声子平均自由程达到最大值,这时声子是导热的唯一载体;在很高温度下,特别是那些具有较好透射性的玻璃及其单晶体,声子的平均自由程达到最小值,而光子平均自由程则越来越大,这时光子对导热的贡献就明显增大。

至于半导体材料在较高温度下的导热过程,电子载体的贡献将增大。而在某些情况下,电子有时并不是热的载体,但却能限制声子平均自由程的大小。

可见,固体物质的微观导热过程非常复杂,它受到许多内在的外界的因素影响,而且这

些因素通常又都是相互制约的。

通过对不同聚集状态下各种物质导热系数的测试和研究发现，导热系数的一般规律是：

(1) 物质中导热系数较大的是固体金属，大多数金属在室温下导热系数的数量级为 10^{-1} 卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ 。由于金属的导热机理和导电机理相类似，所以导热率也和导电率一样，一般都是随温度升高而缓慢减小。

(2) 除金属以外的其它固体，室温下导热系数的数量级绝大多数为 10^{-2} - 10^{-4} 卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 液体（液态金属除外）的导热系数的数量级为 10^{-3} - 10^{-4} 卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ ，除水和甘油等以外，绝大多数液体的导热系数均随着温度升高而减小。

(4) 大多数气体的导热系数的数量级为 10^{-3} - 10^{-5} 卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ ，一般随着温度升高而增大。

(5) 同一种物质的导热系数，一般来说，固态>液态>气态。如 0°C 时冰的 $\lambda=5\times 10^{-3}$ 卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ ， 20°C 时水的 $\lambda=1.4\times 10^{-3}$ 卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ ， 100°C 时水蒸汽的 $\lambda=5.5\times 10^{-5}$ 卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ 。

目前国际上所使用导热系数单位至今还未完全统一，各国正在使用的六种导热系数单位以及它们的换算值见表 2-3。我国常用的导热系数单位是千卡/小时·米· $^{\circ}\text{C}$ 和卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$ 。其中千卡/小时·米· $^{\circ}\text{C}$ 广泛用于工程的传热计算，所以又称为导热系数的工程单位。

表 2-3 常用的导热系数单位的换算表

	千卡/小时·米· $^{\circ}\text{C}$	卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$	瓦特/厘米· $^{\circ}\text{C}$	英制热量单位·英寸 英尺 ² ·小时· $^{\circ}\text{F}$	英制热量单位 英尺·小时· $^{\circ}\text{F}$	英制热量单位 英寸·小时· $^{\circ}\text{F}$
千卡/小时·米· $^{\circ}\text{C}$	1	2.778×10^{-3}	0.01163	8.064	0.6719	0.05599
卡/秒·厘米· $^{\circ}\text{C}$	360	1	4.168	290.3	241.9	20.16
瓦特/厘米· $^{\circ}\text{C}$	86	0.2389	1	693.5	57.79	4.815
$\frac{\text{英制热量单位}\cdot\text{英寸}}{\text{英尺}^2\cdot\text{小时}\cdot\text{F}}$	0.124	3.445×10^{-4}	1.442×10^{-3}	1	0.08333	6.944×10^{-3}
$\frac{\text{英制热量单位}}{\text{英尺}\cdot\text{小时}\cdot\text{F}}$	1.488	4.134×10^{-3}	1.731×10^{-3}	12	1	0.08333
$\frac{\text{英制热量单位}}{\text{英寸}\cdot\text{小时}\cdot\text{F}}$	17.88	1.964×10^{-3}	0.2077	144	12	1

2.3.2 YBF-3 型导热系数测试仪

本测试仪是采用稳态平板法测量不同材料的导热系数，其设计思路清晰、简捷、实验方法具有典型性和实用性。仪器由加热器、数字电压表、计时秒表、冰点补偿装置组成（采用一体化设计）。测试样品（硬铝、硅橡胶、胶木板）；测量温度范围：室温- 100°C 。

一、实验目的

了解热传导现象的物理过程；学习用稳态平板法测量材料的导热系数；学习用作图法求冷却速率；掌握一种用热电转换方式进行温度测量的方法。了解热传导现象的物理过程。

二、实验原理

为了测定材料的导热系数,首先从热导率的定义和它的物理意义入手。热传导定律指出:如果热量是沿着 Z 方向传导,那么在 Z 轴上任一位置 Z_0 处取一个垂直截面积 dS (如图 2-14)以 $\frac{dT}{dz}$ 表示在 Z 处的温度梯度,以 $\frac{dQ}{dt}$ 表示在该处的传热速率(单位时间内通过截面积 dS 的热量),那么传导定律可表示成:

$$dQ = -\lambda \left(\frac{dT}{dz} \right)_{Z_0} dS \cdot dt \quad (2-18)$$

式中的负号表示热量从高温区向低温区传导(即热传导的方向与温度梯度的方向相反)。式中比例系数 λ 即为导热系数,可见热导率的物理意义:在温度梯度为一个单位的情况下,单位时间内垂直通过单位面积截面的热量。

利用(2-18)式测量材料的导热系数 λ ,需解决的关键问题两个:一个是在材料内造成一个温度梯度 $\frac{dT}{dz}$,并确定其数值;另一个是测量材料内由高温区向低温区的传热速率 $\frac{dQ}{dt}$ 。

1. 关于温度梯度 $\frac{dT}{dz}$

为了在样品内造成一个温度的梯度分布,可以把样品加工成平板状,并把它夹在两块良导体——铜板之间(图 2-15)使两块铜板分别保持在恒定温度 T_1 和 T_2 ,就可能在垂直于样品表面的方向上形成温度的梯度分布。样品厚度可做成 $h \leq D$ (样品直径)。这样,由于样品侧面积比平板面积小得多,由侧面散去的热量可以忽略不计,可以认为热量是沿垂直于样品平面的方向上传导,即只在此方向上有温度梯度。由于铜是热的良导体,在达到平衡时,可以认为同一铜板各处的

温度相同,样品内同一平行平面上各处的温度也相同。这样只要测出样品的厚度 h 和两块铜板的温度 T_1 、 T_2 ,就可以确定样品内的温度梯度 $\frac{T_1 - T_2}{h}$ 。当然这需要铜板与样品表面的紧密接触(无缝隙),否则中间的空气层将产生热阻,使得温度梯度测量不准确。

为了保证样品中温度场的分布具有良好的对称性,把样品及两块铜板都加工成等大的圆形。

2. 关于传热速率 $\frac{dQ}{dt}$

单位时间内通过一截面积的热量 $\frac{dQ}{dt}$ 是一个无法直接测定的量,我们设法将这个量转化为较为容易测量的量,为了维持一个恒定的温度梯度分布,必须不断地给高温侧铜板加热,热量通过样品传到低温侧铜块,低温侧铜板则要将热量不断地向周围环境散出。当加热速率、传热速率与散热速率相等时,系统就达到一个动态平衡状态,称之为稳态。此时低温侧铜板的散热速率就是样品内的传热速率。这样,只要测量低温侧铜板在稳态温度 T_2 下散热的速率,也就间接测量出了样品内的传热速率。但是,铜板的散热速率也不易测量,还需要进一

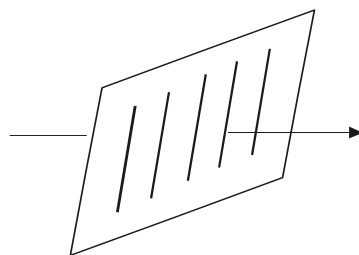


图 2-14 Z 轴方向

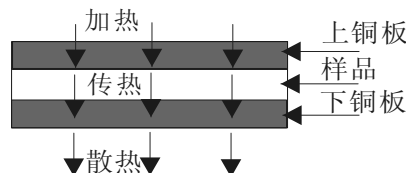


图 2-15 热量的传递

步作参量转换, 我们已经知道, 铜板的散热速率与其冷却速率(温度变化率)有关, 其表达式为:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{T_2} = -mc \left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_2} \quad (2-19)$$

式中 m 为铜板的质量, c 为铜板的比热容, 负号表示热量向低温方向传递。因为质量容易直接测量, c 为常量, 这样对铜板的散热速率的测量又转化为对低温侧铜板冷却速率的测量。测量铜板的冷却速率可以这样测量: 在达到稳态后, 移去样品, 用加热铜板直接对下金属铜板加热, 使其的温度高于稳定温度 T_2 (大约高出 10°C 左右) 再让其在环境中自然冷却, 直到温度低于 T_2 , 测出温度在大于 T_2 到小于 T_2 区间中随时间的变化关系, 描绘出 $T-t$ 曲线, 曲线在 T_2 处的斜率就是铜板在稳态温度时 T_2 下的冷却速率。

应该注意的是, 这样得出的 $\frac{dT}{dz}$ 是在铜板全部表面暴露于空气中的冷却速率, 其散热面积为 $2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p$ (其中 R_p 和 h_p 分别是下铜板的半径和厚度) 然而在实验中稳态传热时, 铜板的上表面(面积为 πR_p^2) 是样品覆盖的, 由于物体的散热速率与它们的面积成正比, 所以稳态时, 铜板散热速率的表达式应修正为:

$$\frac{dQ}{dt} = -mc \frac{dT}{dt} \cdot \frac{\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p}{2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p} \quad (2-20)$$

根据前面的分析, 这个量就是样品的传热速率。

将上式代入热传导定律表达式, 并考虑到 $ds = \pi R^2$ 可以得到导热系数:

$$\lambda = -mc \frac{2h_p + R_p}{2h_p + 2R_p} \cdot \frac{1}{\pi R^2} \cdot \frac{h}{T_1 - T_2} \cdot \left. \frac{dT}{dt} \right|_{T=T_2} \quad (2-21)$$

式中的 R 为样品的半径、 h 为样品的高度、 m 为下铜板的质量、 c 为铜块的比热容、 R_p 和 h_p 分别是下铜板的半径和厚度。右式中的各项均为常量或直接易测量。

三、实验仪器及其技术参数

采用 YBF-3 导热系数测试仪, 主要由加热器、数字电压表、计时秒表、冰点补偿装置组成。

(1) 主要技术指标如下:

- ①. 电源: AC (220±10%)V, (50/60)Hz
- ②. 数字电压表: 3 位半显示, 量程 0~20mV, 测量精度: 0.1%+2 个字
- ③. 数字计时秒表: 计时范围: 0~9999.9s; 最小分辨率 0.1S; 精度: 10-5
- ④. 测量温度范围: 室温~100°C
- ⑤. 加热电压: 高端: AC36V 低端: AC25V
- ⑥. 散热铜板: 半径: 65mm 厚度: 7mm 质量: 815g

(以上的参数已在每一块铜板上标注)

- ⑦. 测试介质: 硬铝、硅橡胶、胶木板、空气等
- ⑧. 连续工作时间: >8 小时

(2) 加热温度的设定

- ① 按一下温控器面板上设定键 (S)，此时设定值 (SV) 显示屏一位数码管开始闪烁。
- ② 根据实验所需温度的大小，再按设定键 (S) 左右移动到所需设定的位置，然后通过加数键 (▲)、减数键 (▼) 来设定好所需的加热温度。
- ③ 设定好加热温度后，等待 8 秒钟后返回至正常显示状态。

(3) 仪器的面板图

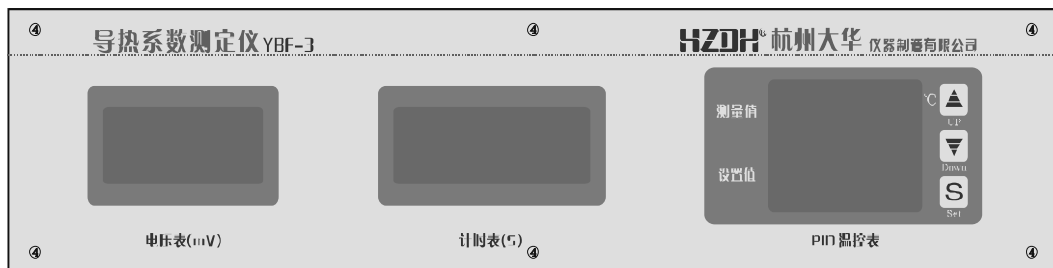


图 2-16 上面板图

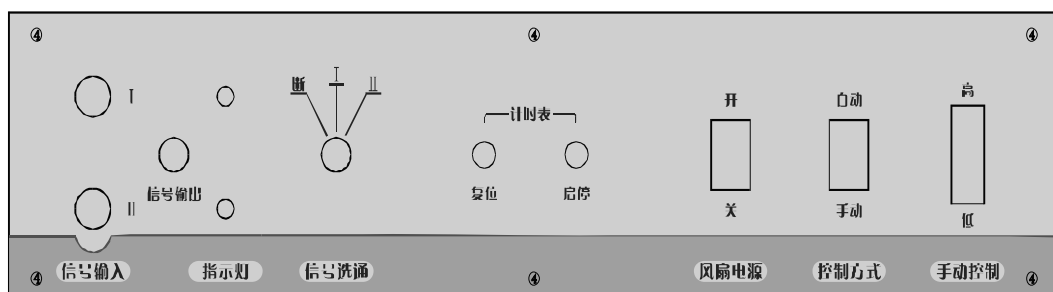


图 2-17 下面板图

四、实验步骤

- (1) 测量样品（胶木板或硅橡胶）的直径和厚度各三次，计算平均值，填入表 2-4。
- (2) 将加热温度设定好，该温度即为 T_1 。将样品放在下铜板上，松开上铜板的螺丝然后将上铜板与样品接触，螺丝拧紧。上铜板、样品、下铜板要紧贴在一起并全面接触。
- (3) 打开开关至“自动”，开始加热。温度稳定约需 40 分钟左右，具体时间与被测材料和目标温度及环境温度的不同而不同。
- (4) 稳态温度 T_2 的确定，每隔 120s 读仪表盘左上方的热电势读数，连续 3 次读数保持不变，即 6 分钟内热电势保持不变，认为达到稳态，该电动势对应的温度为 T_2 ，在表格 2-4 中记录这 3 次的热电势读数，查表 2-5 铜-康铜热电偶分度表获得对应的温度。
- (5) 稳态温度 T_2 确定后，将样品（胶木板或硅橡胶）取出，让上铜板和下铜板直接接触，当下铜板的温度升高至 $T_2+10^{\circ}\text{C}$ 时，移去上铜板，让下铜板在室温下冷却，每隔 30s 在表 2-4 中记录热电势读数，直下铜板的温度降低至 $T_2-10^{\circ}\text{C}$ ，实验结束。热电势和温度的对应关系可以查表 2-5 铜-康铜热电偶分度表。

表 2-4 导热系数测试实验数据记录表

仪器编号/型号								
样品名称								
操作者姓名								
样品尺寸	第 1 次测	第 2 次测	第 3 次测	平均值				
直径 R (mm)								
厚度 h (mm)								
下铜板参数	Rp(mm)	hp(mm)	m(g)					
	65	7						
稳态温度的测定								
时间 t(min)	热电势(mV)		T ₂ (°C)		T ₁ (°C)			
0								
2								
4								
6								
下铜板冷却速率 (T-t)								
时间 t(S)	热电势 (mV)	温度 T(°C)	时间 t(S)	热电势 (mV)	温度 T(°C)	时间 t(S)	热电势 (mV)	温度 T(°C)
0			300			600		
30			330			630		
60			360			660		
90			390			690		
120			420			720		
150			450			750		
180			480					
210			510					
240			540					
270			570					

五、数据处理

(1) 根据所测数据，用坐标纸画出下铜板的冷却曲线，注明样品名称。作图时，坐标的名称、单位以及计算过程中数量级不要搞错。

(2) 用式 2-21 计算本组两台仪器所测样品（硅橡胶、胶木板）的导热系数，注意要写明计算步骤。

六、思考题

(1) 计算所测样品（硅橡胶、胶木板）的导热系数，比较不同材质样品的导热系数大小，对其结果作简单的分析讨论。并简述材料的导热系数大小与材料保温性能的关系。

(2) 影响材料导热系数大小的主要因素有哪些？

(3) 稳态法与非稳态法各有什么优缺点？

七、注意事项

(1) 使用前将加热盘与散热盘面擦干净。样品两端面擦净，可涂上少量硅油。以保证接触良好。注意样品不能连续做试验，特别是硅橡胶，必须降至室温半小时以上才能下一次试验。

(2) 在实验过程中，如若移开电热板，就先关闭电源。移开热圆筒时，手应拿住固定轴转动，以免烫伤手。

(3) 数字电压表数字出现不稳定时先查热电偶及各个环节的接触是否良好。

(4) 仪器使用时，应避免周围有强烈磁场源的地方。

(5) 实验结束后，切断电源，保管好测量样品。不要使样品两端划伤，以至影响实验的精度。

(6) 仪器长时间不使用时，请套上塑料袋，防止潮湿空气长期与仪器接触。房间内空气湿度应小于 80%。

(7) 仪器在搬运及放置时，应避免强烈振动和受到撞击。

(8) 长期放置不用后再次使用时，请先加电预热 30min 后使用。

2.3.3 其它测试方法简介

由于影响物质导热系数的物理、化学因素很多，导热系数对物质晶体结构、显微结构和组分的很小变化都非常敏感，因此所有的导热系数的理论计算方程式几乎都有较大的局限性。导热系数数据至今仍然主要依靠实验测定获得。

导热系数的测定方法很多，按热流的状态，一般可分为稳态法和非稳态法（动态法）两大类；也有人将其分为稳态法、准稳态法和非稳态法三类。在非稳态法测试中，试样的温度分布随时间而变化。测试时，通常是使试样的某一部分温度作突然的或周期的变化，而在试样的另一部分测量温度随时间的变化速率，从而直接测出试样的导温系数或热扩散率 α ，再通过下式求出导热系数 λ ，即：

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho \quad (2-22)$$

式中， C_p ——比热； ρ ——密度。

非稳态法的最大特点（也是其优点）有两个：一是测定周期短。通常只需几分钟甚至几秒钟，就可完成稳态法需要几小时才能测出的实验结果；二是非稳态法中的不少测试方法，通常有可能同时测出导温系数、导热系数和比热的数据。这在稳态法中一般无法做到。

其缺点是：大多数非稳态法的测试误差通常要比大多数稳态法略大一些。主要是因为：测试过程中往往很难完全满足非稳态所要求的边界条件；而且由此引进的误差不象稳态法那样易于作数学上的描述和计算。此外，在大多数情况下它所要求的二次仪表要比稳态法精密和复杂些。

表 2-5 铜-康铜热电偶分度表

温度 ℃	热 电 势 (mV)										温度 ℃	热 电 势 (mV)									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
31	1.237	1.241	1.245	1.249	1.253	1.258	1.262	1.266	1.27	1.274	61	2.511	2.515	2.52	2.524	2.528	2.533	2.537	2.542	2.546	2.55
32	1.279	1.283	1.287	1.291	1.295	1.299	1.304	1.308	1.312	1.316	62	2.555	2.559	2.564	2.568	2.572	2.577	2.581	2.586	2.59	2.594
33	1.32	1.324	1.328	1.332	1.336	1.341	1.345	1.349	1.353	1.357	63	2.599	2.603	2.608	2.612	2.616	2.621	2.625	2.63	2.634	2.638
34	1.361	1.365	1.369	1.374	1.378	1.382	1.386	1.39	1.394	1.399	64	2.643	2.647	2.652	2.656	2.66	2.665	2.669	2.674	2.678	2.682
35	1.403	1.407	1.411	1.415	1.419	1.424	1.428	1.432	1.436	1.44	65	2.687	2.691	2.696	2.7	2.704	2.709	2.713	2.718	2.722	2.726
36	1.444	1.448	1.452	1.457	1.461	1.465	1.469	1.473	1.477	1.482	66	2.731	2.735	2.74	2.744	2.748	2.753	2.757	2.762	2.766	2.77
37	1.486	1.49	1.494	1.498	1.502	1.506	1.511	1.515	1.519	1.523	67	2.775	2.779	2.784	2.788	2.792	2.797	2.801	2.806	2.81	2.814
38	1.528	1.532	1.536	1.54	1.544	1.548	1.553	1.557	1.561	1.565	68	2.819	2.823	2.828	2.832	2.837	2.841	2.846	2.85	2.855	2.859
39	1.569	1.573	1.577	1.581	1.585	1.59	1.594	1.598	1.602	1.606	69	2.864	2.868	2.873	2.877	2.882	2.886	2.891	2.895	2.9	2.904
40	1.611	1.615	1.619	1.624	1.628	1.632	1.636	1.64	1.644	1.649	70	2.908	2.912	2.917	2.921	2.926	2.93	2.935	2.939	2.944	2.948
41	1.653	1.657	1.661	1.665	1.669	1.674	1.678	1.682	1.686	1.69	71	2.953	2.957	2.961	2.966	2.97	2.975	2.979	2.984	2.988	2.993
42	1.695	1.699	1.704	1.708	1.712	1.716	1.721	1.725	1.729	1.733	72	2.997	3.001	3.006	3.01	3.015	3.019	3.024	3.028	3.033	3.037
43	1.738	1.742	1.746	1.75	1.755	1.759	1.763	1.767	1.772	1.776	73	3.042	3.046	3.051	3.055	3.06	3.064	3.069	3.073	3.078	3.082
44	1.78	1.784	1.788	1.793	1.797	1.801	1.805	1.81	1.814	1.818	74	3.087	3.091	3.096	3.1	3.105	3.109	3.114	3.118	3.123	3.127
45	1.822	1.826	1.831	1.835	1.839	1.843	1.848	1.852	1.856	1.86	75	3.131	3.136	3.14	3.145	3.149	3.154	3.158	3.163	3.167	3.172
46	1.865	1.869	1.873	1.878	1.882	1.886	1.89	1.895	1.899	1.903	76	3.176	3.18	3.185	3.189	3.194	3.198	3.203	3.207	3.212	3.216
47	1.907	1.911	1.916	1.92	1.924	1.928	1.933	1.937	1.941	1.945	77	3.221	3.225	3.23	3.234	3.239	3.243	3.248	3.252	3.257	3.261
48	1.95	1.954	1.958	1.963	1.967	1.971	1.975	1.98	1.984	1.988	78	3.266	3.271	3.275	3.28	3.284	3.289	3.293	3.298	3.302	3.307
49	1.992	1.996	2.001	2.005	2.009	2.013	2.018	2.022	2.026	2.03	79	3.311	3.316	3.32	3.325	3.329	3.334	3.338	3.343	3.347	3.352
50	2.035	2.039	2.043	2.047	2.052	2.056	2.06	2.065	2.069	2.073	80	3.357	3.362	3.366	3.371	3.375	3.38	3.384	3.389	3.393	3.398
51	2.078	2.082	2.086	2.09	2.095	2.099	2.103	2.108	2.112	2.116	81	3.402	3.406	3.411	3.415	3.42	3.424	3.429	3.433	3.438	3.442
52	2.121	2.125	2.13	2.134	2.138	2.143	2.147	2.151	2.155	2.16	82	3.447	3.451	3.456	3.46	3.465	3.47	3.474	3.479	3.483	3.488
53	2.164	2.168	2.173	2.177	2.181	2.186	2.19	2.194	2.198	2.203	83	3.493	3.497	3.502	3.506	3.511	3.516	3.52	3.525	3.529	3.534
54	2.207	2.211	2.216	2.22	2.224	2.229	2.233	2.237	2.241	2.246	84	3.538	3.543	3.547	3.552	3.556	3.561	3.565	3.57	3.575	3.579
55	2.25	2.254	2.259	2.263	2.267	2.272	2.276	2.28	2.285	2.289	85	3.584	3.589	3.593	3.598	3.602	3.607	3.611	3.616	3.621	3.625
56	2.294	2.298	2.302	2.307	2.311	2.315	2.32	2.324	2.328	2.333	86	3.63	3.635	3.639	3.644	3.648	3.653	3.657	3.662	3.667	3.671
57	2.337	2.341	2.345	2.35	2.354	2.358	2.363	2.367	2.371	2.376	87	3.676	3.68	3.685	3.689	3.694	3.698	3.703	3.708	3.712	3.717
58	2.38	2.384	2.389	2.393	2.397	2.402	2.406	2.41	2.415	2.419	88	3.721	3.726	3.73	3.735	3.739	3.744	3.748	3.753	3.758	3.762
59	2.424	2.428	2.433	2.437	2.441	2.446	2.45	2.454	2.459	2.463	89	3.767	3.771	3.776	3.78	3.785	3.79	3.794	3.799	3.803	3.808
60	2.467	2.471	2.476	2.48	2.484	2.489	2.493	2.498	2.502	2.506	90	3.813	3.818	3.822	3.827	3.831	3.836	3.841	3.845	3.85	3.854

第三部分 材料的光学性能测试

固体材料的光学性质主要是指光在材料内和界面上的传播规律以及光的发射和吸收。固体材料的种类繁多,他们的光学特性很不相同。随着光学理论和光学技术的不断发展和应用,新的光学材料(如透光材料、反光材料、激光材料、发光材料以及各种非线性光学材料等)的研究和开发已成为高科技领域中极为重要的内容。

3.1 材料折射率的测定

3.1.1 基本概念

材料的折射率和平均色散是材料特别是玻璃的重要光学性质,是设计光学仪器的重要参数,并且影响玻璃制品的外观品质。由于光线在空气中传播的速度与在材料中传播的速度不同,所以在它们的界面处光的传播方向会发生变化,称为光的折射。折射率随入射光波长的增大而减小(可见光范围内)称为光的色散。光在棱镜中的色散使光展为光谱;在透镜中的色散引起成像的色差,这是在光学系统设计中必须考虑的。折射率的大小与玻璃的化学组成、结构和热历史等因素有关。因此,玻璃的折射率可用来研究玻璃的结构变化,分析玻璃组成的均匀性。

玻璃的主折射率一般用 n_D 表示,在中国,玻璃的折射率还常以 C, e, F, g 等谱线的折射率表示。

n_D $\lambda_D=589.3\text{nm}$ 黄光(钠灯)

n_C $\lambda_C=656.3\text{nm}$ 红光(氢灯)

n_F $\lambda_F=486.1\text{nm}$ 蓝光(氢灯)

n_e $\lambda_e=546.1\text{nm}$ 绿光(汞灯)

n_g $\lambda_g=435.8\text{nm}$ 蓝光(汞灯)

$n_F - n_C$ 称为平均色散。 $\gamma = (n_D - 1 / n_F - n_C)$ 称为色散系数或阿贝数。

玻璃以及透明材料折射率的测定方法,常用的有 V 棱镜折射仪(精度为 $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$, 色散测定精度可至 $\pm 1 \times 10^{-9}$, 折射率测定范围 $n_D=1.291 \sim 2.050$)、阿贝折射仪(精度为 3×10^{-4} , 测定范围 $n_D=1.30 \sim 1.70$)。此外,偏光显微镜油浸法测 n_D , 可测粉末样品,但精度只能达 $\pm 2 \times 10^{-3}$ 。另外还有最小偏向角法、干涉法和反射法等。宝石折射率的测定还有宝石折射仪,测定范围为 $1.30 \sim 1.80$, 精度为 1×10^{-2} , 大于 1.80 的宝石可用反射以测定其折射率值。

V 棱镜折射仪对试样的制备有一定的要求,待测试样必须具备两个互相垂直的抛光的平面,但测试时间短,已成为我国个光学仪器厂测试折射率的标准仪器。宝石折射仪要求待测试样具备一个抛光良好的面,平面或弧面均可,测试简单、快速,是宝石鉴定常用的仪器之一。

3.1.2 材料折射率的测定

一、实验目的

- (1) 了解材料折射率的基本概念和测试方法;
- (2) 掌握宝石折射仪的基本原理和测试过程;
- (3) 学会通过从折射仪的观察到的现象区分材料的光性特征。

二、测试原理

折射仪是宝玉石鉴定工作中极为重要的常规检测工具，其作用是能无损、快速、准确地测出待测宝石的折射率。折射仪不仅可以测定宝石的折射率，只要折射率在其可测定范围内的固体材料，无论透明与否，只要具备一个抛光的面，平面弧面均可，就可测定其折射率值。

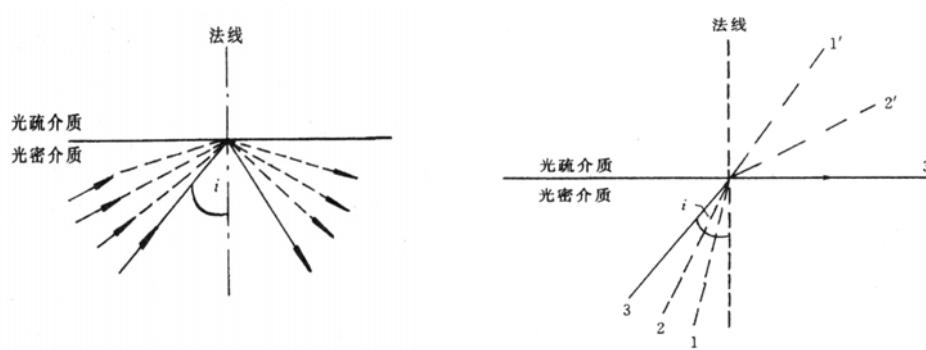


图 3-1 折射仪工作原理图

折射仪的工作原理是建立在折射和全内反射基础上的。它是一种测量宝石的临界角值、再将它换算成宝石折射率的一种仪器。由于各品种宝石的临界角和折射率不同，故可以用来准确地鉴定宝石。当一定波长的光由光密介质倾斜射入光疏介质时，因折射角大于入射角而偏离法线，向两个介质界面的方向靠近，当入射角增大到一定角度时，折射角达到 90° ，这时光将沿着两个介质的界面射出，此时光的入射角称为临界角（见图 3-1）。当入射角大于临界角时，就造成全反射，光线就全部反射回光密介质内。根据折射率公式：

$$N_{\text{宝}} = N_{\text{棱镜}} \times \sin i \quad (3-1)$$

$N_{\text{宝}}$ 为待测宝石的折射率； $N_{\text{棱镜}}$ 为棱镜的折射率； i 为临界角值。

棱镜的折射率为已知，即只要测出临界角值，就可以计算得到待测宝石的折射率值。

三、测试仪器

本实验采用宝石折射仪测定材料的折射率值。折射仪的结构主要由高折射率材料制成的棱镜、标尺、透镜、目镜、偏光片和光源等主要部件组成（见图 3-2）。折射仪的结构和接触液的折射率决定了折射仪的测定范围为 1.35-1.78（或 1.81）之间。

折射仪的用途范围：

- (1) 确定材料的折射率值和双折射率值；
- (2) 确定材料为各向异性或各向同性；
- (3) 确定材料的轴性及光性正负；

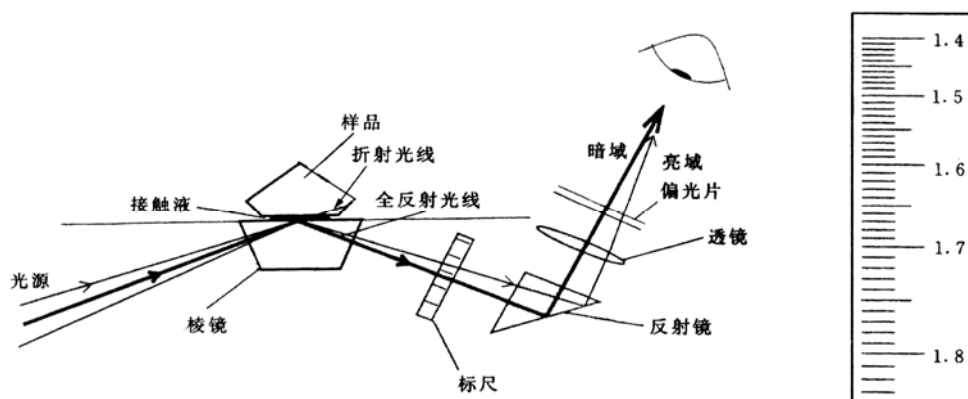


图 3-2 折射仪的结构及光路图

四、试样制备

要求样品要有一个光滑的表面，平面或弧面均可。测试时当光线从光密介质的棱镜射向光疏介质的材料时，视域中标尺上方的暗域由于入射角小于临界角的光被折射所致，标尺下方亮域由于入射角大于临界角的光全内反射所致，其两者的边界即是材料临界角值所对应的材料折射率值，各向同性的材料只出现一条阴影边界，各向异性的材料出现两条阴影边界，若样品的折射率大于接触液的折射率，则视域全暗，反之，若样品的折射率小于 1.35，则视域全亮。

五、实验步骤

- (1) 用酒精擦拭棱镜和样品；
- (2) 选择最大且抛光最好的刻面置于金属台上；
- (3) 打开光源，观察视域的清晰程度；
- (4) 在棱镜中央点一小滴接触液，其多少以样品待测刻面的大小而定。
- (5) 用手轻推样品至棱镜中央，使样品待测刻面与棱镜产生良好的光学接触。
- (6) 眼睛靠近目镜观察视域内标尺的明暗情况，读数并记录。若阴影边界不清晰，可加偏光片观察。观察时转动偏光片到阴影边界清晰时读数并记录。
- (7) 用手轻轻转动样品 360° ，观察阴影边界变化，读数并记录。
- (8) 分析获得的折射率值，选取其最大、最小和稳定不变的值，判断样品的轴性和光性符号。

(9) 测试完毕，将样品轻推至金属台上，清洗样品和棱镜。

结果与解释：

- (1) 转动样品 360° ，始终出现一条固定不变的阴影边界，说明该样品为各向同性材料。
- (2) 转动样品 360° ，出现两条阴影边界，说明该样品为各向异性材料。

六、数据处理要求

记录所测数据并分析材料的光性特征。

七、思考题

- (1) 为什么在样品与棱镜之间需滴入少许浸油？
- (2) 如何通过从折射仪的观察到的现象区分宝石的光性特征？

八、注意事项

- (1) 折射仪一般只能测折射率在 1.35—1.81 范围内的材料。
- (2) 所获结论必须有其他仪器或检测方法支持，因为折射仪有局限性，样品也有特殊性。
- (3) 由于棱镜的硬度低，易被划伤，故使用折射仪时需用手小心地取放样品，切不可使用镊子。
- (4) 接触液具挥发性，使用后及时盖好瓶盖，置于安全的地方。

3.2 材料透过率和光谱的测定

3.2.1 基本概念

光通过有色透明材料如玻璃、溶液时由于部分光能被玻璃吸收，因此透过透明材料的光能有所降低。

若材料的吸收系数与入射光波长无关，则称普遍吸收，这种材料在白光照射下是五色透明的，若吸收系数与入射光波长有关，即材料对某些波长的光吸收特别强烈，则称为选择性吸收，该材料在白光的照射下就会呈现出颜色。

可见光的能量分布约在 1.6~3eV 范围内，而不同的材料具有不同的能带结构，当白光照射时，材料会吸收某些特定波长的光，使得其组成中某些原子中的电子被激发，从较低的能级 (E_1) 跃迁到较高的能级 (E_2)。人眼看到的反射或透射光的成分中缺少了被材料所吸收的那一部分光谱，因而看到的颜色是白光中除去被吸收光的补色。若二能级的能量差 (E_2-E_1) 等于可见光(波长约为 400~760nm)的能量时，材料就呈现了颜色。若二能级的能量差 (E_2-E_1) 大于可见光的能量时，材料一般是无色的。

金属的导带中有许多空能级，白光照射时很容易被吸收，使电子向上跃迁，而被激发的电子又会返回到较低能级，同时释放出光子，因此金属的吸收系数和反射率都很大。例如银在整个可见光区向下跃迁所发射的光谱与吸收的入射光谱相近，故呈现白色。金和铜被超过一定频率(这频率在可见光范围的短波部分)的入射光子激发后，可使已填满的 d 能带中的电子跃迁到 s 能带的空能级中，而这些电子直接跃回 d 能带的几率较小，故强烈再发射的主要是长波长的光子，因而呈现出桔红色和黄色。锗和硅半导体材料的禁带宽度约 1~2eV，可见光区的光子能量很容易使电子从价带激发到导带，因此能全部吸收可见光，因此他们的颜色呈现深灰色。硫化镉的禁带宽度较大，约 2.4eV，故能吸收白光中的蓝、紫部分，所以硫化镉的颜色为橙黄色。许多绝缘体晶体，如冰、石英、金刚石、岩盐、氯化钾、氟化锂等，他们的禁带宽度较大，可见光不能使价带中的电子跃迁到导带，即他们不吸收入射的可见光，所以这些材料是无色透明的。

由于不同材料的光学性质不同，所以对光学仪器中的光学器件，如棱镜、透镜、透光窗口等，必须考虑所选择材料的光谱吸收范围。在可见光区一般使用玻璃，紫外区使用石英玻璃，而红外区选择氯化钠、溴化钾等晶体。

不同波长的光具有不同的颜色，其光子的能量也不相同。由于原子结构不同，电子跃迁的能级不同，对可见光中不同波长的光便产生了选择性吸收，对某些波长的光吸收强，而对另一些波长的光则吸收弱或不吸收，当自然白光照射有色玻璃时，因选择性吸收而使透过玻璃的光的组成发生了改变。有色玻璃所呈现的颜色实质上是被吸收光的补色即透过光的颜色。因此透过光的波长及数量决定了玻璃的颜色、纯度及亮度，是鉴定有色玻璃的重要依据。

3.2.2 玻璃、高分子材料的透过率测试

一、实验目的

- (1) 了解材料透过率的基本概念和测试方法；
- (2) 掌握分光光度计测定材料透过率的基本原理和过程；
- (3) 掌握吸收系数的计算方法。

二、测试原理

垂直投射于玻璃表面的光 I_0 在空气—玻璃界面上产生反射损失 I_1 ，见图 3-3。

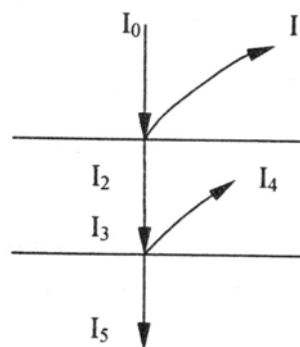


图 3-3 光线通过玻璃板的反射与吸收

$$I_1 = R I_0 \tag{3-2}$$

R 是空气—玻璃界面的反射系数，进入玻璃的光通量为

$$I_2 = I_0 - I_1 = (1 - R) I_0 \tag{3-3}$$

I_2 通过玻璃吸收了一部分，出射前光通量为 I_3

$$I_3 = I_2 e^{-\epsilon d} \tag{3-4}$$

I_3 在出射端玻璃空气界面上反射损失 I_4

$$I_4 = R I_3 \tag{3-5}$$

因此出射光进入光电接受器的光通量为 I_5

$$I_5 = I_3 (1 - R) = I_0 (1 - R)^2 e^{-\epsilon d} \tag{3-6}$$

因此透射率为 T

$$T = I_5 / I_0 = (1 - R)^2 e^{-\epsilon d} \tag{3-7}$$

其中 ϵ 为吸收系数， d 为玻璃厚度

本实验让一定波长 λ 光通过空气后（作为空白试样），其光强度为 I_0 ，再让此光通过一定厚度的试样，光强度为 I ，便可得到玻璃对于该波长 λ 光的透射率 T_λ 。

根据 Frenel 公式，自然光垂直日射到表面层时，反射系数

$$R = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \tag{3-8}$$

n 为玻璃的折射率，常见钠钙硅玻璃 $n \approx 1.5$ ，可得 $R \approx 4\%$ 。

三、测试仪器

本实验采用 722G 型分光光度计测定有色光学玻璃和分子材料在不同波长光照射下的透过率。

722G 型分光光度计采用光栅 CT 式色散系统和单光束结构光路，其光学系统见图 3-4。

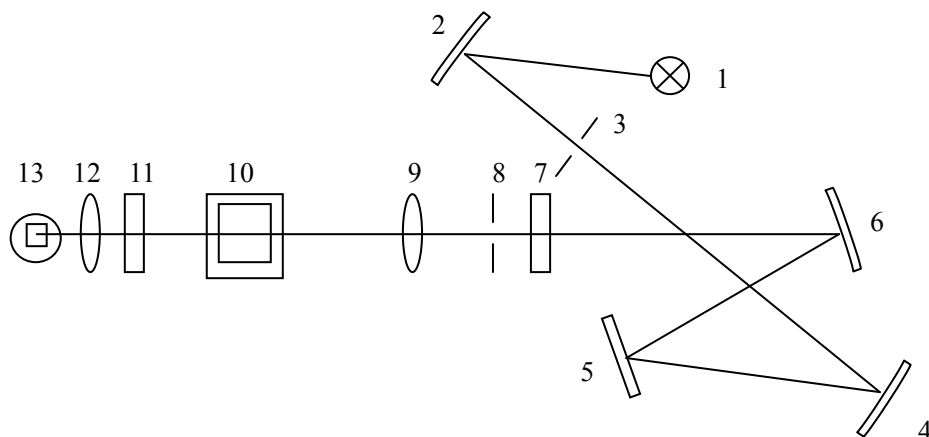


图 3-4 722G 型分光光度计光学系统

1—钨卤素灯；2—反射镜；3—进狭缝；4—准直镜 I；5—光栅；6—准直镜 II；7—滤色片；
8—出狭缝；9—聚光镜；10—样品架；11—光门；12—聚光镜；13—光电池

钨卤素灯发出的连续辐射光，由反射镜聚光后投向单色器进狭缝，此狭缝正好于聚光镜及单色器内准直镜的焦平面上，因此进入单色器的复合光通过准直镜准直变成平行光射向色散原件光栅，光栅将入射的复合光通过衍射作用形成按照一定顺序均匀排列的连续的单色光谱，此单色光谱照射到准直镜上，由于仪器出射狭缝设置在准直镜的焦平面上，这样从光栅色散出来的光谱经准直镜后利用聚光原理成像在出射狭缝上，出射狭缝选出指定带宽的单色光通过聚光镜落在试样室被测样品中心，样品吸收后透射的光经光门射向光电池接收。

其他仪器：数显卡尺。

四、试样制备

选择无缺陷的透明或半透明材料如玻璃，试样切裁、研磨、抛光后成 50mm*14mm*2mm 片状试样，用酒精擦洗，并用镜头纸擦净。

五、实验步骤

- (1) 仪器接通电源，预热 30min。
- (2) 仪器键盘共有四个键，分别为 MODE、PRINT、0%、100%。

MODE 键：每按此键来切换 A、T、C、F 之间的值。

A——吸光度 (Absorbance)

T——透射比 (Trans)

C——浓度 (Conc.)

F——斜率 (Factor)

本次实验测定样品透过率，按动 MODE 键切换至 T 值。

- (3) 手持试样边缘，将其嵌入弹性夹内，并放入比色器座内靠单色器一侧，使其紧靠

比色器座壁。使比色器座处于空气空白校正位置。

- (4) 旋转波长旋钮至所需的波长数目。
- (5) 打开样品室盖，按 0%键后显示 00.0；轻轻地将比色器暗箱盖合上，按 100%键后显示 100.0。反复操作至数据“00.0”和“100.0”不发生变化，既可以进行测试。
- (6) 将待测试样推入光路，显示屏所显示的数据即为该光波下的透过率 T。
- (7) 重复 (4)、(5)、(6) 步骤，即可测试不同光波下的透过率值。
- (8) 在单色光的波长为 360~800nm 范围内，每隔 50nm 测定试样透过率 T。

六、数据处理要求（作图与计算）

- (1) 记录各样品的厚度和实验测得的数据。
- (2) 将实验记录数据，以透过率 T 作纵坐标，单色光波长 λ (nm) 为横坐标，用描点法作出材料的透过光谱曲线。
- (3) 按透射率公式 $T = (1 - R)^2 e^{-\epsilon d}$ 计算 500nm 波长下的吸收系数 ϵ ，然后换算成 5mm 的透射率。

七、思考题

- (1) 改变波长后，为什么必须重新调整“0”及“100%”？
- (2) 试样倾倒如何影响透过率的测定？

八、注意事项

- (1) 为确保仪器稳定工作，在电源波动较大的地方，建议使用交流稳压电源。
- (2) 当仪器停止工作时，应关闭仪器电源开关，再切断电源
- (3) 为避免仪器积灰和沾污，在停止工作的时间里，用防尘罩罩住仪器，同时在罩子内放置防潮剂，以免灯室受潮、反射镜镜面发霉或沾污，影响仪器日后的工作。
- (4) 仪器工作数月或搬运后，要检查波长准确度，以确保仪器的使用和测定精度。

3.3 材料雾度值的测定

3.3.1 基本概念

材料的透光性能主要是以透广率和雾度来表示。透光率和雾度是两个独立的指标，是透明材料两项十分重要的光学性能指标。一般来说，透光率高的材料，雾度值低，反之亦然，但不完全如此。例如窗玻璃材料透光率高，也不浑浊，磨砂玻璃透光率高，雾度值却很大。而用作光学仪器罩的材料要求屏蔽亮光源，应具有最大的漫反射和最小的透明度，也就是要求低透光率高雾度值的材料。

3.3.2 玻璃、高分子材料的透过率与雾度的测试

一、实验目的

- (1) 了解材料透光率及雾度的基本概念和测试方法；

(2) 掌握光电雾度仪测定材料透光率和雾度值的基本原理和过程;

(3) 了解透过率与雾度之间的关系。

二、测试原理

雾度又称浊度,表示透明或透明材料不清晰的程度。以散射光通量与透过材料的光通量之比的百分率表示。用标准“C”光源的一束平行光垂直照射到透明或半透明材料上,由于材料内部或表面造成散射,使部分平行光偏离入射方向大于 2.5° 的散射光通量 T_d 与透过材料的光通量 T_2 之比的百分率,即

$$H=T_d/T_2*100 \quad (3-9)$$

由光源(卤素灯)发出的光经聚光镜汇聚在物镜的焦点上,因此出射的光线为一束平行光。光栏 L 的直径保证出射的光线在 $\pm 3^{\circ}$ 范围之内。光栏 L 经物镜成像在积分球的出窗上,形成的光斑为 L 的像,其大小按 GB2410 的规定,略小于出窗,光斑边缘与出窗形成 1.3° 的环带。出窗对入射窗口中心的张角为 8° 。

测透光率时,右边的反射板始终挡住积分球。无样品时,积分球测得的光能量为仪器全光;放上样品后,为样品全光。由于透光率为样品全光对仪器全光(入射光)的比值,只要将全光调整到 100%,则放上样品后测得的数据即为透光率(%)。

测雾度时,反射板的位置是要改变的。由于雾度为透过样品光能量中散射光所占的比例,因此,透过样品的全光需要将反射板拉“在位”,使透过样品的直射光和反射光全部被积分球接收。测透过样品的散射光时,需要将反射板移开(拉手推开),以光陷阱取代,把透射出射窗的光在光陷阱中吸收掉。这时,只有样品的散射光被积分球接受。如果先将透过样品的全光调整到 100%,则在测散射光时所得的数据即为雾度值(%)。

三、测试仪器

本实验采用 WGW 光电雾度仪,WGW 光电雾度仪是根据 GB2410-80 及 ASTM D1003-61(1997)设计的小型雾度仪。适用于平行平板或塑膜样品的测试,能广泛应用于透明、半透明材料雾度、透光率的光学性能检验。仪器具有结构小巧、使用操作方便的特点。主要技术指标如下: C 光源

测定范围:透光率 0%—100%、雾度 0%—30%;

最小读数: 0.1%;

准确度:透光率 1.5%、雾度 0.5%;

重复性:透光率 0.5%、雾度 0.2%;

四、试样制备

试样尺寸应大到可以遮盖住积分球的入口窗,可以是直径 50mm 的圆片,也可以是 50*50mm 的方片,保持试样表面光滑与清洁。

五、实验步骤

(1) 将仪器的电源插头插入 220V 交流电源,并将接地线可靠接地。

(2) 开机将仪器预热数分钟,此时仪器的拉手应在拉近位置。等光源稳定

后显示数字不再变动时，即可测试。

(3) 测透光率（拉手在拉近位置）；

①校“0”：用黑板挡住积分球入窗，调节校“0”电位器至读数为“0”；

②校“100”：取出黑板，调节校“100”电位器至读数为“100”；

校“0”校“100”反复几次，读数稳定为止。

③测试：放上样品，所得数据即为透光率（%）。

(4) 测雾度：

①校“0”：拉手在推开位置，样品室无样品时，调节校“0”电位器至读数为“0”；

②校“100”：拉手在拉近位置，样品室放上样品，调节校“100”电位器至读数为“100”；

校“0”校“100”反复几次，读数稳定为止。

③测试：放上样品时，将反射板拉手置推开位置，所得读数即为雾度值（%）。

六、数据处理要求（作图与计算）

记录仪器测得的透光率和雾度数据。

七、思考题

试分析相同条件下雾度和透光率之间的关系。

八、注意事项

(1) 仪器应置于干燥洁净的室内，尤其应注意湿度、烟雾对雾度的影响；

(2) 被测样品表面应清洁，必要时用溶剂或洗涤剂擦清，干透，或用软笔去灰。

第四部分 材料的电学性能测试

4.1 表面电阻及体积电阻的测定

一、实验目的

- (1) 了解材料表面电阻和体积电阻的概念；
- (2) 了解高阻仪测量材料电阻率的基本原理；
- (3) 掌握常温下用高阻仪测量高分子材料体积电阻和表面电阻的方法。

二、测试装置：

ZC-36型高阻计是一种直读式的高电阻和微电流测试仪器，最高量限分别是 $10^{17}\Omega$ (测试电压为 1000v) 和 10^{-14} A 微电流，可用于测量材料，电工产品，电子设备以及元件的绝缘电阻，也可用于微电流测量。

三、仪器结构及工作原理：

仪器结构主要由以下六部分组成，如图 4-1 所示：

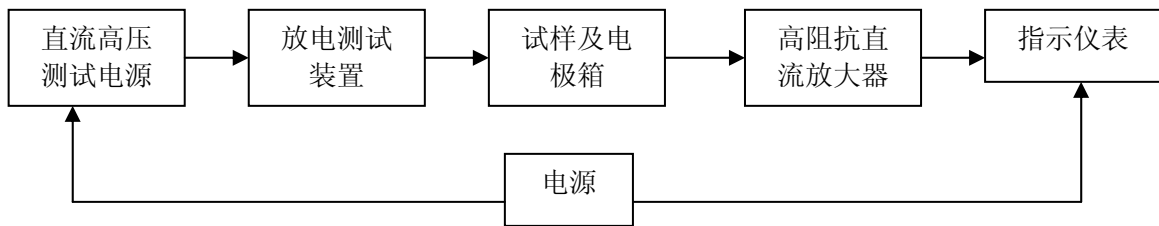
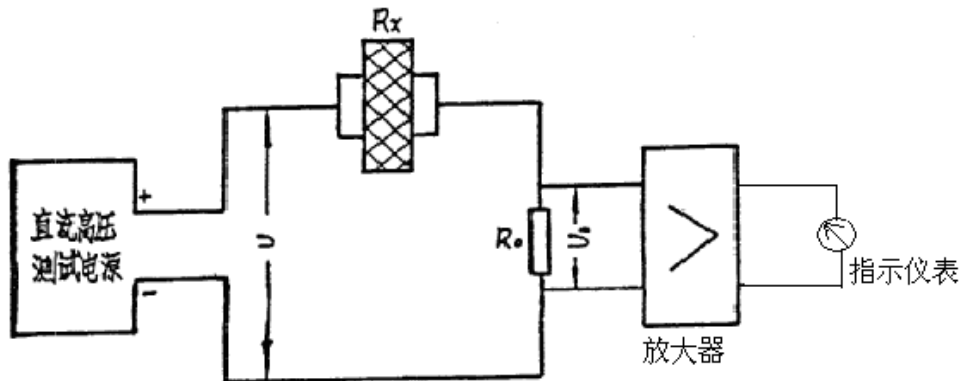


图 2-1 高阻计测量原理图



图中： U —测试电压(伏)
 R_0 —输入电阻(欧)其上电压为 U_0 (伏)
 R_x —被测试样的绝缘电阻(欧)

测试时，被测试样与高阻抗直流放大器的输入电阻“ R_0 ”串联并跨接于直流高压测试电源上（由直流高压发生器产生）。高阻抗直流放大器将其输入电阻上的分压讯号经放大后输出至指示仪表，由指示仪表直接读出被测绝缘电阻值。

由于 $R_x \gg R_0$ 及 $R_x = (U/U_0) \times R_0$ ，仪器对 U 采用 $10 \sim 1000V$ ，对 R_0 （即倍率）采用 1×10^5 ， 1×10^6 ， 1×10^7 ， 1×10^8 ， 1×10^9 ， 1×10^{10} ， 1×10^{11} ， $1 \times 10^{12} \Omega$ 八只电阻，直流放大器的量限 (U_0) 为 $0 \sim 1000mA$ ，最小可检测 $10mV$ ，因此仪器测量范围为 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^{17} \Omega$ 。

四、试样制备：

根据测试材料的不同，可采用板状；管状或棒状等不同形式的试样和电极。本试样中制备板状试样。电极采用厚度不超过 $0.01mm$ 的铝箔或锡箔，用少量精炼凡士林粘贴于试样表面作为接触电极，并以相同面积的铜电极作为辅助电极加在上面。

五、实验步骤

1、使用前步骤：

(1) 使用前面板上的各开关位置应如下：

- ① 测试电压开关置于“10V”处。
- ② 倍率开关置于最低档位置 ($1 \times 10^2 \Omega$)。
- ③ “放电—测试”开关置于“放电”位置。
- ④ 电源开关置于“断”位置。
- ⑤ 输入短路开关置于“短路”位置。
- ⑥ 极性开关置于“0”位置。

(2) 检查测试环境的温度及湿度应在 $20 \pm 2^\circ C$ ， $65\% \pm 15\%$ 允许范围内，否则会导致测量误差。

(3) 检查交流电源电压为 $220V \pm 10\%$ 允差。

(4) 将仪器接地端用导线妥善接地。

(5) 将仪器接通电源，合上电源开关，指示灯亮，并有峰鸣声。如发现指示灯不亮，立即切断电源。

(6) 接通电源预热 30 分钟，将极性开关置于“+”处，此时可能发现指示仪表的指针可能会离开“ ∞ ”及“0”处，慢慢调节“ ∞ ”及“0”电位器，使指针置于“ ∞ ”及“0”处，直至不再变动。

(7) 将倍率选择开关由“ $\times 10^2$ ”转至“满度”位置（这时输入端开关应拨向“开路”），这时指针将从“ ∞ ”指向“满度”，如果不到或超过“满度”，则调节“满度”电位器。指针指到“满度”，再把倍率开关拨到 $\times 10^2$ 处，使指针仍处于“ ∞ ”及“0”处，这样重复多次即把仪器灵敏度调好。

2、测试步骤

(1) 采用三电极系统测试材料的体积电阻(R_v)和表面电阻(R_s)时可按图 4-2 接线：

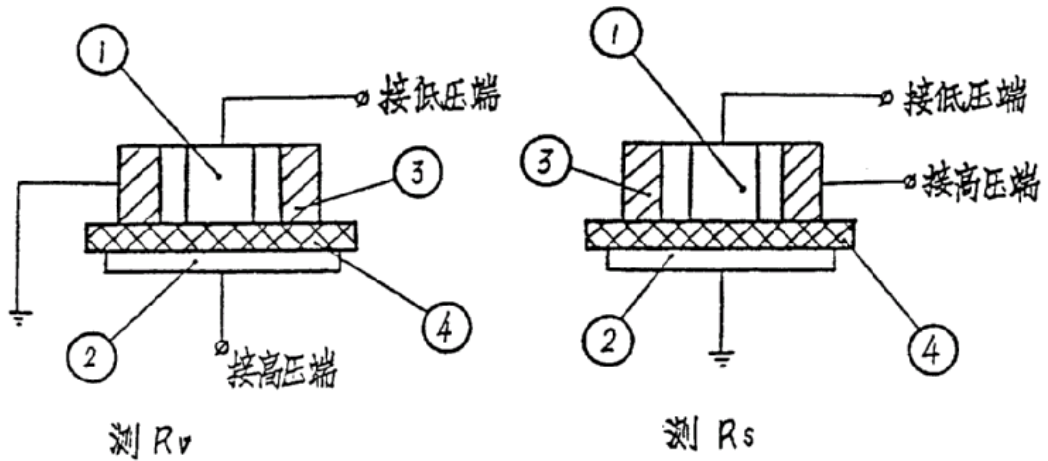


图 4-2 接线示意图

①测量电极 ② 高压电极 ③ 保护电极 ④ 被测试样

选择体积电阻 (R_v) 或表面电阻 (R_s) 转换开关

(2) 将被测试样置于电极箱, 用导线接至测试端钮和高压接线柱, 注意使测量电极和保护电极的间隙均匀。

(3) 按下列步骤开始测试

选 步 骤	面 板 按 键 用	测 试 短 路	开 关
(a) 充电 (500V) 15s 以上		短路	开 (注意安全)
(b) 测试 读取 1min 时的数值		测试	开 (注意安全)
(c) 放电 30s 以上		短路	关

a—b—c 各步重复三次, 最后取仪表读数平均值。

(4) 将 R_v 或 R_s 读数平均值乘以倍率开关所指示的倍率及测试电压所指示的系数 (10V 为 0.01, 100V 为 0.1, 250V 为 0.25, 500V 为 0.5, 1000V 为 1) 即为被测试样的绝缘电阻值。

(5) 结束时, 先关闭总电源, 取出试样, 并将面板上各开关恢复到测试前的位置。

六、数据处理

测试塑料样品的体积电阻 (R_v) 和表面电阻 (R_s), 并计算出其体积电阻系数 (ρ_v) 和表面电阻系数 (ρ_s)。

(1) 求体积系数 ρ_v

$$\rho_v = R_v \frac{A_e}{t} \quad (4-1)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4} (d_1 + g)^2 \quad (4-2)$$

d_1 : 测量电极直径, 本实验中为 5cm。

T : 试样厚度 (cm)

g : 测量电极与保护电极的间隙 (0.2cm)

A_e : 本电极的底面积

$$A_e = \frac{\pi}{4} (d_1 + g)^2 = \frac{\pi}{4} (5 + 0.2)^2 = 21.237 (\text{cm}^2) \quad (4-3)$$

下表列出 A_e/t 的值:

t	A_e/t
1mm	212.37
2mm	106.19
3mm	70.79

(2) 求表面电阻系数 (ρ_s)

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (4-4)$$

d_2 —保护电极的内径, 本电极为 5.4cm。

\ln —自然对数, 本实验中: $2\pi/\ln(d_2/d_1)=81.6$

七、思考题:

(1) 样品在测试之前需要进行哪些预处理?

(2) 为什么高阻计在测试前需要预热 30 分钟?

(3) 测定表面电阻和体积电阻的过程中, 经常会遇到仪表盘指针不停偏移, 引起这一现象的原因有哪些?

4.2 介电常数及介质损耗测试

一、实验目的

(1) 探讨介质极化与介电常数、介质损耗的关系;

(2) 了解高频 Q 表的工作原理;

(3) 掌握室温下用高频 Q 表测定材料的介电常数和介质损耗角正切值。

二、STD-A 型仪器的技术指标

1、Q 值测量

(1) Q 值测量范围：5~999。

(2) Q 值量程分档：30、100、300、999、自动换档。

(3) 标称误差

频率范围：25kHz~10MHz；

固有误差： $\leq 5\% \pm$ 满度值的 2%；工作误差： $\leq 7\% \pm$ 满度值的 2%；

频率范围：10MHz~50MHz；

固有误差： $\leq 7\% \pm$ 满度值的 2%；工作误差： $\leq 10\% \pm$ 满度值的 2%。

2、电感测量

(1) 测量范围：0.1 μ H~1H。

(2) 分 档：分七个量程。

0.1~1 μ H, 1~10 μ H, 10~100 μ H, 0.1~1mH, 1~10mH, 10~100mH, 100mH~1H。

3、电容测量

(1) 测量范围：1~460pF

(2) 电容量调节范围

主调电容器：40~500pF；

准 确 度：150pF 以下 ± 1.5 pF；150pF 以上 $\pm 1\%$ ；

微调电容量：-3pF~0~+3pF；

准 确 度： ± 0.2 pF。

4、振荡频率

(1) 振荡频率范围：25kHz~50MHz；

(2) 频率分档：

25~74kHz, 74~213kHz, 213-700kHz, 700kHz~1.95MHz,

1.95MHz~5.2MHz, 5.2MHz~17MHz, 17~50MHz。

(3) 频率误差： $2 \times 10^{-4} \pm 1$ 个字。

5、Q 合格指示预置功能，预置范围：5~999。

6、仪器正常工作条件

(1) 环境温度：0 $^{\circ}$ C~+40 $^{\circ}$ C；

(2) 相对湿度： $< 80\%$ ；

(3) 电源: 220V±22V, 50Hz±2.5Hz。

7、试样尺寸

圆片形: 厚度 2±0.5mm, 直径为 Φ30~40mm (ε<12 时), Φ25~35mm (ε=12~30 时), Φ15~20mm (ε>30 时)

8、其他

- (1) 消耗功率: 约 25W;
- (2) 净重: 约 7kg;
- (3) 外型尺寸: (l×b×h) mm: 380×132×280。

三、测试原理

1、仪器的工作原理

(1) “Q” 的定义

Q 表是根据串联谐振原理设计, 以谐振电压的比值来定位 Q 值。“Q” 表示元件或系统的“品质因数”, 其物理含义是在一个振荡周期内贮存的能量与损耗的能量之比。对于电抗元件(电感或电容)来说, 即在测试频率上呈现的电抗与电阻之比。

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi fL}{R} \quad (4-5)$$

或

$$Q = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{\omega C / R} = \frac{1}{2\pi fCR} \quad \dots\dots\dots (4-6)$$

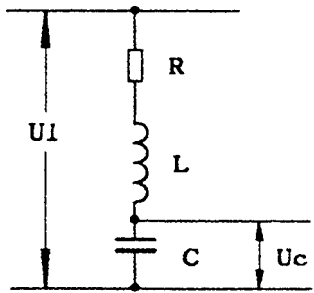


图 4-3 串联谐振电路示意图

在图 4-3 所示的串联谐振电路中, 所加的信号电压为 U_i , 频率为 f , 在发生谐振时:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad \dots\dots\dots (4-7)$$

回路中电流:

$$i = \frac{U_i}{R} \quad \dots\dots\dots (4-8)$$

故电容两端的电压:

$$U_c = i|X_c| = \frac{U_i}{R} \cdot \frac{1}{2\pi fc} = u_i Q \quad \dots\dots\dots (4-9)$$

即谐振时电容上的电压与输入电压之比为 Q:

$$Q = \frac{U_c}{U_i} \quad \dots\dots\dots (4-10)$$

(2) 介电常数的定义

介电常数 (ϵ): 某一电介质(如硅酸盐、高分子材料)组成的电容器在一定电压作用下所得到的电容量 C_x 与同样大小的介质为真空的电容器的电容量 C_0 之比值, 被称为该电介质材料的相对介电常数。

$$\epsilon = \frac{C_x}{C_0} \quad \dots\dots\dots (4-11)$$

式中: C_x — 电容器两极板充满介质时的电容;

C_0 — 电容器两极板为真空时的电容;

ϵ — 电容量增加的倍数, 即相对介电常数。

介电常数的大小表示该介质中空间电荷互相作用减弱的程度。作为高频绝缘材料, ϵ 要小, 特别是用于高压绝缘时。在制造高电容器时, 则要求 ϵ 要大, 特别是小型电容器。在绝缘技术中, 特别是选择绝缘材料或介质储能材料时, 都需要考虑电介质的介电常数。此外, 由于介电常数取决于极化, 而极化又取决于电介质的分子结构和分子运动的形式。所以, 通过介电常数随电场强度、频率和温度变化规律的研究, 还可以推断绝缘材料的分子结构。

(3) 介电损耗 ($\text{tg}\delta$) 的定义

介电损耗 ($\text{tg}\delta$): 指电介质材料在外电场作用下发热而损耗的那部分能量。在直流电场作用下, 介质没有周期性损耗, 基本上是稳态电流造成的损耗; 在交流电场作用下, 介质损耗除了稳态电流损耗外, 还有各种交流损耗。由于电场的频繁转向, 电介质中的损耗要比直流电场作用时大许多 (有时达到几千倍), 因此介质损耗通常是指交流损耗。

在工程中, 常将介电损耗用介质损耗角正切 $\tan\delta$ 来表示。 $\tan\delta$ 是绝缘体的无效消耗的能量对有效输入的比例, 它表示材料在一周期内热功率损耗与贮存之比, 是衡量材料损耗程度的物理量。

凡是体积电阻率小的, 其介电损耗就大。介质损耗对于用在高压装置、高频设备, 特别是用在高压、高频等地方的材料和器件具有特别重要的意义, 介质损耗过大, 不仅降低整机的性能, 甚至会造成绝缘材料的热击穿。

2、整机工作原理

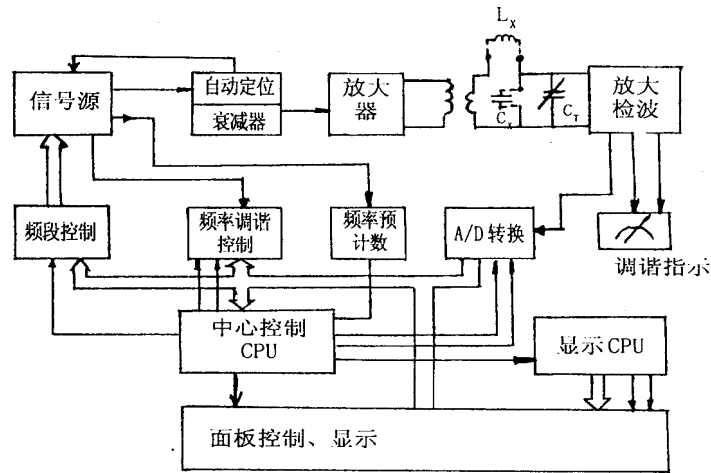


图 4-4 仪器工作原理

仪器的工作原理框图如图 4-4。它以 89C51 单片计算机作为控制核心，实现对各种功能的控制。压控信号源为 Q 值测量提供了一个优质的高频信号，频率从 25kHz-50MHz，共分为七个波段。信号源的频率受频率调谐和数字锁定单元的控制。信号源输出一路送到程控衰减器和自动稳幅控制单元，该单元根据 CPU 的指令对信号衰减后送回信号激励单元，同时对信号检波后送出一直流控制信号到压控信号源实现自动稳幅。信号源的另一路输出送到频率计数电路，在这里完成对信号的整形，预计数，然后再送到 CPU 实现计数。信号激励部分输出送到一个宽带分压器，由分压器馈给测试调谐回路一个恒定幅度的信号。当测试回路处于谐振状态时，在调谐电容 C_T 两端的信号幅度将是分压器提供的信号幅度 Q 倍。在 C_T 两端取得的调谐信号被信号放大单元适当放大后送到检波和数字取样单元，检波后经数码取样转换，送到控制中心 CPU 去进行数据处理，同时再送给面板 Q 调谐指示表。由控制中心 CPU 处理过的频率值，Q 值及其它需显示数据送到显示控制 CPU，由显示控制 CPU 完成面板显示的控制。

3、结构特性

采用了较低的台式机箱，面板采用 PC 丝印面板，美观大方。各主要功能单元，除了显示部分为了显示方便和调谐测试回路、放大单元为了减小分布参数，安装在面板上外，其余都安装在机内底板上。见图 4-5 面板示意图。面板左半部是频率和 Q 值显示，操作按键和频率调谐钮所在部位。面板右半部是调谐回路的主，付调电容所在部位。仪器的频段控制，标频设定，谐振点搜索，Q 值合格点设置都以轻触按键实现控制，频率调谐由数码开关完成，面板上无一可调电位器，极大地简化了操作，又提高了可靠性。



图 4-5 面板各功能键说明

(1) 自动量程键：开机默认状态为 Q 值手动量程（LCD 屏右上角显示“⊙”）。按该键即为 Q 值自动量程，此时“⊙”消失，再按该键，又为手动量程。

(2) 手动量程键：分高、中、低三档。高—LCD 屏右上角显示“HIGH-Q”，Q 值约在 300-999。中—LCD 屏显示“⊙”，Q 值约在 30-300。低—LCD 屏显示“LOW-Q”，Q 值约在 5-100。

(3) Q 记忆键：默认为手动测 Q 状态，按该键即为 Q 自动记忆状态，此时 LCD 屏右上方显示“**AUTO**”，自动显示调谐过程中谐振峰值，即 Q 值。

(4) Q 预置键，当按键后，即能把当时显示的 Q 值作为预置值，以后当测试超过该值时，会显示“GO”并蜂鸣，表示超过原预置值。适宜于批量元件测试。

(5) LCD 显示屏，（另见 LCD 屏示意图）。

(6) 频率调节旋钮。

(7) 频率频段选择键（由于是稳幅信号源，在高频段时，将会有几秒的稳幅过程。）

(8) 信号输出端口：能输出测试信号，频率从 50kHz 至 50MHz，幅值随 Q 量程变化，可用于监视。

(9) 电感测量频率表格，按该表格规定的频率点测试电感值，可以直接从右边刻度盘读出。

(10) 测试回路接线柱：左边是电感器接线柱，右边是接电容器接线柱。

(11) 调谐电容刻度（相应是电感刻度）

(12) 主调电容：同轴慢转调谐旋钮。

(13) 微调电容调谐旋钮。

后面板器件安装位置示意图，见图 4-6。

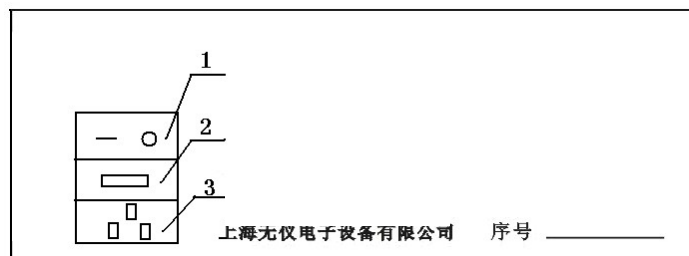


图 4-6 后面板器件安装位置示意图

1—电源开关；2—保险丝座；3—电源插座（220V）

LCD 显示屏示意图，见图 4-7。

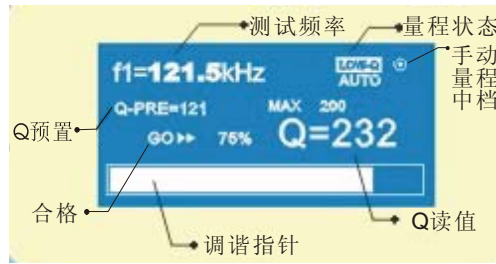


图 4-7 LCD 显示屏示意图

四、操作方法

(1) 本仪器适用于 110V/220V, 50Hz 交流电，使用前要检查电压情况，以保证测试条件的稳定。

(2) 开机预热 15 分钟，使仪器恢复正常状态后才能开始测试。

(3) 按部件标准制备好的测试样品，两面用特种铅笔或导电银浆涂覆，使样品两面都各自导电，但南面之间不能导通，备用。

(4) 选择适当的辅助线圈插入电感接线柱。根据需要选择振荡器频率，调节测试电路电容器使电路谐振。假定谐振时电容为 C_1 ，品质因素为 Q_1 。

(5) 将被测样品接在 C_x 接线柱上。

(6) 再调节测试电路电容器使电路谐振，这时电容为 C_2 ，可以直接读出 Q_2 。

(7) 用游标卡尺量出试样的直径 Φ 和厚度 d （分别在不同位置测得两个数据，再取其平均值）。

五、实验结果

1、 $\text{tg}\delta$ 和 ϵ 测定记录

实验数据按表 4-1 要求填写。

序号	1	2	3	4	5
试样厚度					
试样直径					
测试数据	C1				
	C2				
计算结果	ϵ				
	$\text{tg}\delta$				
	平均值	$\epsilon =$ $\text{tg}\delta =$			

2、计算

(1) 介电常数 ε

$$\varepsilon = 11.9 \times \frac{Cd}{\varphi^2} \quad (4-12)$$

式中: C---试样的电容量 (PF), $C = C_1 - C_2$; C_1 ---放样前电容量 (PF); C_2 ---放样后电容量 (PF);

d---试样厚度 (cm);

 Φ —试样直径 (cm)。(2) 介质损耗角正切 $\tan\delta$

$$\tan\delta = \frac{C_1}{C_1 - C_2} \times \frac{\Delta Q}{Q_1 Q_2} = \frac{C_1}{C_1 - C_2} \times \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} \quad (4-13)$$

(3) Q 值

$$Q = \frac{1}{\tan\delta} = \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 - Q_2} \times \frac{C_1 - C_2}{C_1} \quad (4-14)$$

六、思考题:

- (1) 测试环境对材料的介电常数和介质损耗角正切值有何影响?
- (2) 试样厚度对介电常数的测量有何影响?
- (3) 电场频率对极化、介电常数和介质损耗有何影响?

七、注意事项

(1) 圆片形试样的尺寸 ($\Phi=38\text{mm}\pm 1\text{mm}$, $d=2\text{mm}\pm 0.5\text{mm}$) 要符合公差要求, 两面烧渗银层、浸锡及焊接引出线要符合技术条件。

(2) 电压或频率的剧烈波动常使电桥不能达到良好的平衡, 所以测定时, 电压和频率要求稳定, 电压变动不得大于 1%, 频率变动不得大于 0.5%。

(3) 电极与试样的接触情况, 对 $\tan\delta$ 的测试结果有很大影响, 因此烧渗银层电极要求接触良好、均匀, 而厚度合适。

(4) 试样吸湿后, 测得的 $\tan\delta$ 值增大, 影响测量精度, 应严格避免试样吸潮。

(5) 在测量过程中, 注意随时检查电桥本体屏蔽的情况, 当电桥真正达到平衡, “本体-屏蔽”开关置于任何一边时, 检查计光带均应最小, 而无大变化。

八、附录

附表 4-2 Q 表测 Q 值修正值 (K 值)

No	测试频率	有效 Q 值	K 值
1	100 kHz	114	0.95
2	400 kHz	135	0.95
3	1 MHz	133	0.98
4	2 MHz	154	0.98
	4.5 MHz	183	0.98
5	4.5 MHz	170	0.98
	12 MHz	237	0.93
6	12 MHz	227	0.80
	25 MHz	301	0.80
7	25 MHz	217	0.7
	50 MHz	258	0.65

被测电感有效 Q 值=Q 表直读 Q 值/K。