

文章编号: 1007-2780(2013)04-0527-07

向列相液晶旋转黏度测试方法的研究

贵丽红^{1,2}, 丰景义^{1,2}, 史子谦^{1,2}, 刘宏改^{1,2}, 乔云霞^{1,2}

(1. 石家庄诚志永华显示材料有限公司, 河北 石家庄 050091, E-mail: glh@slichem.com;

2. 河北省平板显示材料工程技术研究中心, 河北 石家庄 050091)

摘 要: 文章总结了液晶旋转黏度的几种测试方法, 分析了其各自的优缺点。根据瞬态电流法得到了混合液晶的旋转黏度值, 通过对目前正性液晶材料的 $\Delta\epsilon$ 测试方法进行改良和优化得到了准确的混合液晶旋转黏度值。提出了单体液晶分子旋转黏度的拟合方法。测试了液晶的旋转黏度和介电常数随温度变化的趋势。总结了不同结构单体液晶旋转黏度和介电常数的关系。

关 键 词: 向列相液晶; 旋转黏度; 介电各项异性

中图分类号: TH836

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132804.0527

Method of Measuring Nematic LC Rotational Viscosity

GUI Li-hong^{1,2}, FENG Jing-yi^{1,2}, SHI Zi-qian^{1,2}, LIU Hong-gai^{1,2}, QIAO Yun-xia^{1,2}

(1. Shijiazhuang Chengzhi Yonghua Display Material Co., Ltd.,

Shijiazhuang 050091, China, E-mail: glh@slichem.com;

2. Hebei Province Flat-Panel Display Material Engineering and Technology Research Centre,

Shijiazhuang 050091, China)

Abstract: This paper introduced several methods of measuring rotational viscosity of nematic liquid crystal, and analyzed the characteristic of each. According to the method of transient current, the rotational viscosity of nematic LC mixture has been gotten. Through improving the method of measuring dielectric constant $\Delta\epsilon$ of liquid crystal, rotational viscosity of LC mixture can be measured exactly. The changing line between $\Delta\epsilon$ and rotational viscosity have been measured. A method for calculating the rotational viscosity of LC monomer was supplied. The relations of rotational viscosity and dielectric constant of liquid crystal monomer with different structures were summarized.

Key words: liquid crystal; rotational viscosity; dielectric anisotropy

1 引 言

目前,越来越多的液晶应用都要求液晶材料具有更短的响应时间,如液晶电视、应用自适应光学的液晶空间光调制器^[1]、应用于光通讯的液晶光开关和光调制器等^[2-4]。降低液晶的旋转黏度是提高液晶材料响应速度的有效方法。所谓旋转黏度就是以垂直于导向的一个方向为轴做旋转时

所遭遇黏滞力的大小的一个衡量。对显示器而言,当然配合电场反应的时间越短越好,也就是旋转黏度越小越好。一般向列性液晶的旋转黏度 γ_1 在 $0.02 \sim 0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。旋转黏度对于液晶材料来说是一个非常重要的参数。而且旋转黏度受许多因素的影响,如分子的组成、结构、分子间的相互作用和温度等^[5-6]。然而液晶旋转黏度值报道很少,对旋转黏度的研究也远远不够。

收稿日期: 2012-12-13; 修订日期: 2013-02-07

作者简介: 贵丽红(1981—), 女,河北邢台人,硕士,工程师,主要从事混合液晶材料的研究与开发。

本文对旋转黏度的几种测量方法的做了简单的介绍,并分析了各自的优缺点。本文利用瞬态电流法来测量液晶的旋转黏度,并通过大量的实验,对比分析数据,对目前正性液晶材料的 $\Delta\epsilon$ 测试方法进行改良和方法的优化得到了准确的介电 $\Delta\epsilon$ 的值,从而使瞬态电流法测试的旋转黏度值误差缩减到 5% 以内。提出了单体液晶分子旋转黏度的拟合方法。测试了不同单体液晶的旋转黏度和介电常数随温度的变化,得到了不同结构单体液晶旋转黏度的拟合值。

2 旋转黏度的测量方法

测量黏度的测量方法大致分为两类:一是直接测量法。根据其原理来测量的一种方法,这种技术的测量数据具有高的精度,但是需要的样品数量很多;二是根据液晶的黏弹特性产生的具体物理现象,黏滞系数可通过这些特定效应的理论分析并通过数据处理得到。这些技术通常需要很少量的样品,但是这类方法需要首先测出弹性常数、介电常数、磁化率或折射率的值。而且,测量数据不稳定,重复性也较差。不同测试者所测得数据相差很大,同一物质的不同样品测得数据相差也很大,这与样品的纯度有很大的关系。下面简单介绍几种液晶旋转黏度的测量方法。

2.1 旋转黏度计

如图 1 所示,旋转黏度计法^[7]直接运用了旋转黏度的定义,由 Tsvetkov 提出。通过测量特定扭矩 T/V ,来得到旋转黏度的值。

将液晶置于一圆柱容器中,在垂直圆柱轴向方向,施加一磁场。如果液晶分子与柱表面的作用很弱,而且磁场的旋转频率低于临界频率。那么,液晶分子将以一定的相位差随磁场转动。因此在液晶的旋转过程中产生黏滞扭矩 $V\gamma_1\omega$,将给圆柱一个力矩 $M, M=V\gamma_1\omega$ 。如果将盛有液晶的柱形容器由钨丝悬吊起来。那么,钨丝所受的机械扭矩为 $T=C(\alpha-\alpha_0)$ 。磁场对液晶产生的扭矩为:

$$C(\alpha-\alpha_0)=\frac{1}{2}\mu_0\chi_a H^2 V \sin 2(\varphi-\phi)$$

因此得到公式 $C(\alpha-\alpha_0)=V\gamma_1\omega$

这样我们就可以通过测量金属丝的扭矩来得到旋转黏度的值^[8]。旋转磁场法测量的实验误差的主要来源有两个。一是金属丝扭矩的非线性和

虎克定律的偏差等类似效应的影响,此方面较大的误差来源于扭曲常数的测量,误差达到 0.5%,而引起结果的误差将是 1%。;二是壁面效应,包括“back”、“flow”、“inversion walls”、弹性扭转^[9]等。这种测试方法的优点是原理简单,容易实现;缺点就是误差太大,需要的样品量太多,一般需要 5 g 以上。测量效率较低,不太适用于工业化测试。

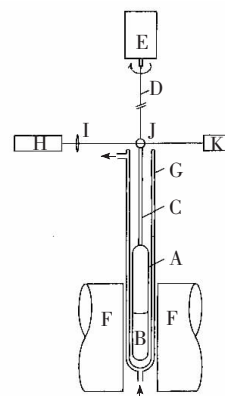


图 1 旋转磁场法示意图

Fig. 1 Method of circumvolving magnetic field

2.2 电容监测法

通过对 TN-LCD 中液晶的指向矢弛豫的研究,可以得到旋转黏度。但是要首先知道弹性常数的值,或是磁化率各向异性,这两个参数都是较难测量的。磁化率是通过测量电场和磁场的阈值电压得到的,在实际测量中,由实部和虚部共同确定复杂的磁化率,由此来表示指向矢的分布。

指向矢的微弱变化是由电容测得^[10]:

$$C_R(f,t)=G_c(f)\theta_m^2(t)=C_0(f)\exp(-2t/\tau)$$

实验用 100 Hz 的方波电场,电容的测量频率为 10 kHz。液晶受到很强的锚定力,具有很小但不能忽略的预倾角。在 $t=0$ 时,一个直流电压逐步增大,由于指向矢的旋转,所以有一个最大电流 I_p :

$$V/(d \cdot I_p^{1/3})=[2\gamma_1/(A \cdot \Delta\chi_E^2)]^{1/3}[1+\beta/V]$$

A 是电极面积, β 是与电流引起的弹性变形有关的正值。描出 $V/(d \times I_p^{1/3})$ 与 $1/V$ 得出, $[2\gamma_1/(A \times \Delta\chi_E^2)]^{1/3}$ 。如果 $\Delta\chi_E$ 确定以后, γ_1 便可以得出。

但是这种方法受外部因素和测试条件的影响很大,得到的数据可靠性和稳定性较差。在实验上较难实现,实验结果的处理也比较复杂。在实

验的可重复性上我认为是很难做到的。

2.3 电场法(交变磁场法)

电场方法^[11]是通过液晶分子指向矢在交变磁场的延迟时间来测量旋转黏度,指向矢的瞬时变化由电容的大小来反映。

实验装置如图 2,液晶盒厚度大约为 1 mm,放在两个相互垂直的磁场中,一个主磁场 H_0 ,一个小的翻转磁场 H_1 ($H_1 = H_0/1\ 000$)。液晶盒联在 3 kHz 的电桥电路中,电路还包括功率放大器、数据记录单元、方波产生器等。 H_1 的瞬间变化导致了磁场在 $H_1 + H_0$ 方向上一个微小的变化。指向矢的瞬时变化导致电容值的变化,并存在一个延迟时间 τ 。

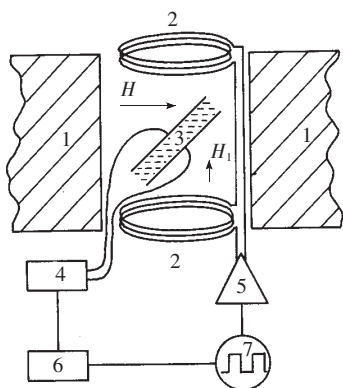


图 2 电场法示意图

Fig. 2 Method of electric field

$$\gamma_1 \frac{d\varphi}{dt} = -\chi_a H^2 \varphi$$

$$\gamma_1 = \tau \chi_a H^2$$

表面对整体黏度的影响也需要考虑,表面取向不充分的厚度由磁相干长度来确定。

$$\xi = \left(\frac{k}{\chi_a H^2} \right)^{1/2}$$

k 是某种弹性常数。在 Gerber 的实验中,使用 8KOe 的电磁场 H_0 (Varian V-4005) 和 10Oe 的电磁场 H_1 。电容的值被 3 kHz 的桥路测量后,由瞬时记录仪记录并分析指数延迟曲线,得到 τ 。

磁化率各向异性由液晶在电场和磁场的阈值来确定:

$$\chi_a = \frac{(\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) V_c^2}{4\pi (H_c d)^2}$$

d 是液晶的盒厚。其他温度的磁化率值可由

折射率来计算:

$$\chi_a(T) \approx \chi_a(T) \Delta n(T) / \Delta n(T_0)$$

这一计算的误差并不大,大约在 6%,测量的误差主要来源与 V_c 、 H_c 的测量。

2.4 光散射法

光散射法是确定液晶黏弹特性很好的方法,但是得到的大多是某种特定形变的黏弹比。光散射法是根据散射角、指向矢的方位以及入射光和散射光的偏振状态共同确定液晶等效黏度的。不同的形变模式具有不同的散射状态。

如果液晶的弹性常数已知,便可以得到 leslie 黏度系数。但是弹性常数也是比较难以确定的物理量,而且数据误差也不稳定,直接造成旋转黏度数据的精度和稳定性很差。一般的黏滞系数精度在 20%,leslie 黏度系数精度在 4%~50%。由于测试误差太大,失去了参考价值。

2.5 瞬态电流法

以上 4 种方法目前只处于理论研究或小实验阶段。通过系统的分析我们选择了用瞬态电流法来测量液晶的旋转黏度。

用瞬态电流法测试旋转黏度,测试前要把待测液晶灌入测试盒中。当一个电压施加到液晶盒上,可以检测到较强的电流峰值 I_p ,这是由于液晶的介电性质导致的电容充电,电极两端充电的最终结果是使液晶分子根据电场方向排列(正性液晶平行于电场,负性液晶垂直于电场)。液晶指向矢在重新排列的过程中,液晶层的电容随液晶的介电各向异性而变化。

如图 3 所示,对液晶测试盒施加方波电压,然后监测其电流波形,通过分析其电流波形,根据旋转黏度的计算公式,并带入相应的数值,可以得到旋转黏度的值。然后监测其电流波形,通过分析其电流波形,根据旋转黏度的计算公式,并将电极面积和盒厚等值带入相应的数值,可以得到旋转黏度的值。

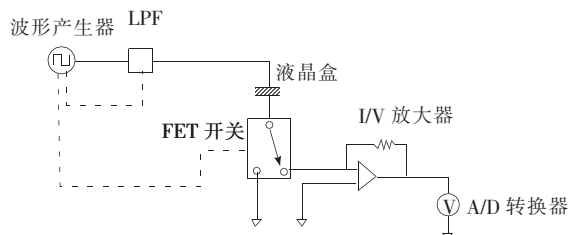


图 3 瞬态电流法原理

Fig. 3 Principle of transient current method

$$\gamma_1 = \frac{S(\Delta\epsilon \times \epsilon)^2}{2I_p} \times \frac{V^3}{d^3}$$

其中, S 为液晶盒的电极面积, d 为液晶盒的盒厚, V 是驱动电压, I_p 为测量得出的瞬态电流。

3 旋转黏度测量

以上对旋转黏度的测试方法做了简单的介绍。旋转磁场法原理简单,容易实现但是缺点就是误差太大,需要的样品量太多。测量效率较低,不太适用于工业化测试;电容检测法需要测量磁化率或者 K 值,得到的数据可靠性和稳定性较差。在实验上较难实现,实验结果的处理也比较复杂;交变磁场法测试误差较小,得到的实验数据比较真实可信,难以实现的是稳定的交变磁场;光散射法是确定液晶黏弹特性很好的方法,旋转黏度具体的数据还没法单独的测试;瞬态电流法相对比较容易实现,主要输入的一个未知量液晶介电 $\Delta\epsilon$ 的值,误差也主要来源于液晶盒本身的定向和 $\Delta\epsilon$ 的误差。

本文利用瞬态电流法来测量液晶的旋转黏度,所用仪器为日本东洋公司(TOYO)的 Model 6254 液晶参数综合测试仪。但是这种测试原理,需要输入液晶的介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 的值,所有这个介电各向异性的测量数据必须十分准确,才能得

到准确的旋转黏度值,本文的一部分重点工作和意义就是通过测试方法的改善,提高了液晶介电常数的测试准确度。

3.1 测试盒选择

根据旋转黏度的计算公式,计算旋转黏度的值,首先要测试液晶的介电各向异性。如果测试的介电各向异性差距较大,会导致旋转黏度的结果失去意义。通过以下数据可以明显的得到结论,要想正确的得出旋转黏度的值,必须正确的测试出 $\Delta\epsilon$ 的值。

鉴于目前普遍应用的方法所测液晶样品的 $\Delta\epsilon$ 数值与文献数据及国外公司同类产品数据相比均偏小,需要在现有测试方法的基础上进行改良。经分析,数据误差主要来源于液晶盒自身的缺陷,针对该问题,为了更好地体现出不同液晶盒中的排列状况,选用一种 $\Delta\epsilon$ 较大的向列相液晶灌注在各种液晶盒中进行对比测试,以选择更适合的液晶盒来实现液晶分子在电场下的排列。测试样品选取诚志永华公司 $\Delta\epsilon$ 数值较大的液晶 gg-321 为实验样品,实验中所采用的液晶盒,非特殊说明,均为信利公司产品,具体规格和测试数据见表 1。

综合分析表 2 可以看出,对于样品 gg-321 所测的 $\epsilon_{//}$ 相差 5.69, $\epsilon_{\perp}$ 相差仅为 1.02,且各种液晶

表 1 液晶在不同规格液晶盒中测得的介电常数
Table 1 Dielectric of LC material in different kinds of cell

规格	14000-000		14000-100		14200-000	
	$\Delta\epsilon$	γ_1 (mPa · s)	$\Delta\epsilon$	γ_1 (mPa · s)	$\Delta\epsilon$	γ_1 (mPa · s)
7.0 μm 平行盒	20.06	494.9	20.22	538	18.50	—
20.0 μm 平行盒*	18.26	113.7	18.28	113.9	18.08	111.4
5.0 μm 无取向盒	25.91	1 381.0	27.01	1 500	25.69	—

表 2 gg-321 在不同规格液晶盒中测得的介电常数
Table 2 LC material GG-321 in different kinds of cell

规格	C_0	$\epsilon_{//} = C_{20}/C_0$	$\epsilon_{\perp} = C_{\perp}/C_0$	$\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$	$r = \Delta\epsilon/\epsilon_{\perp}$
7.0 μm 平行盒	120.4	19.74	5.71	14.03	2.46
7.0 μm TN 盒	136.3	20.07	5.69	14.38	2.53
20.0 μm 平行盒*	14.61	18.01	4.94	13.07	2.64
20.0 μm 无取向盒*	95.4	22.01	5.69	16.32	2.87
5.0 μm 无取向盒	183.5	23.70	5.96	17.74	2.98
7.0 μm 垂直盒	131.5	21.21	-	-	-

* 20.0 μm 平行盒为国外进口,20.0 μm 无取向盒为自制盒

盒用 LCR 仪所测得的 $\epsilon_{\perp}$ 相差不多, 可见 $\Delta\epsilon$ 的误差主要是由 $\epsilon_{//}$ 引起。表明在小电压下各种盒都能够实现较好的垂直于电场排列, 但在大电压下由于表面锚泊情况的不同, 表面附近分子的转动情况也有较大差别, 导致 $\epsilon_{//}$ 差别较大。7.0 μm 平行盒和 7.0 μm TN 盒数据较为接近, TN 盒的测量数据略高, 主要是由于这两种液晶盒表面均进行平行锚泊处理 (PI 层摩擦), 锚泊表面附近分子即使在大电场作用下的转动也并不彻底, 影响了 $C_{//}$ 的数据, 导致 $\epsilon_{//}$ 较小。5.0 μm 无取向盒由于没有平行取向层, 液晶分子与接触表面之间只有弱锚泊作用, 在不加电的状态下分子基本平行于玻璃表面, 但是表面附近分子由于没有强的锚泊作用, 在电场作用下液晶分子转动时不受强的锚定力影响, 几乎可以全部转动成指向矢与电场平行, 能够较好地实现平行电场排列, 因此测得的 $\epsilon_{//}$ 较大, $\Delta\epsilon$ 也较大。

3.2 C-1/V 曲线拟和处理

经分析, 对表 2 中测得 $\Delta\epsilon$ 最大的 5.0 μm 无表面取向液晶盒 (以下简称 5.0 无取向盒) 数据进行拟合处理: 分别测试液晶样品在无取向盒中 0.1 V 电压下的电容 $C_{\perp}$, 以及 5~20 V (1 V 步长) 电压下的一系列电容, 输入计算机, 如图 4 所示, 利用 $C-1/V$ 曲线法进行拟和, 计算出截距 C_{∞} 和直线斜率, 然后根据 $C_{\perp}$ 和 C_{∞} 求出 $\epsilon_{//}$ 、 $\epsilon_{\perp}$ 、 $\Delta\epsilon$ 的值。

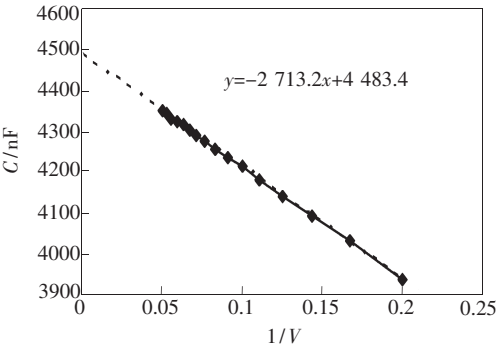


图 4 样品 gg_321 的 C-1/V 曲线拟和图
Fig. 4 C-1/V curve of LC material GG-321

根据 3.1、3.2 所述的测试方法, 将液晶注入 5.0 μm 没有 PI 的液晶测试盒中, 然后将液晶盒放入控温箱内, 可以测试不同温度下的液晶介电常数。然后将液晶灌入 20 μm 的平行测试盒中, 测试其一定温度下的旋转黏度值。测试仪器为

TOYO Model6254 液晶综合测试系统。通过准确的液晶介电常数值, 得到的旋转黏度测试结果和国外测试据相比基本相同。

表 3 液晶的旋转黏度值
Table 3 Rotational viscosity of LC material

名称	$\Delta\epsilon$	$\epsilon_{//}$	$\epsilon_{\perp}$	旋转黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)
TFT 混晶 1 国外数据	7.4	10.7	3.3	102
TFT 混晶 1 测试数据	7.4	10.6	3.2	101
TFT 混晶 2 国外数据	6.9	10.3	3.4	100
TFT 混晶 2 测试数据	6.8	10.3	3.5	97

3.3 单体液晶旋转黏度的测试方法

由于多数 TFT 用液晶单体, 在常温下是结晶状态, 所以要测试其介电和旋转黏度等参数, 需要对单体进行必要的处理。首先是要找到合适的母体, 并以一定的比例溶解。通过大量对比实验, 配制了一款互溶性好、各项参数较为适中的 TFT 混晶作为母体。具体组分如下:

表 4 母体液晶 TFT-1 的组成
Table 4 Composition of TFT-1

单体	组分
	10
	10
	24
	5
	39
	12

按以上比例混合后得到 TFT 混合液晶命名为 TFT-1, 将 TFT 液晶用单体以 10% 的比例和 TFT-1 混合后测试其常规参数并拟合介电常数。得到的结果如下:

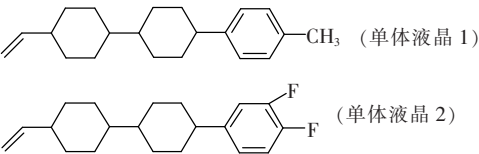


表 5 不同温度下液晶的旋转黏度值
Table 5 Rotational viscosity of LC material indifferent temperature

温度/℃	单体液晶 1(10%)		单体液晶 2(10%)		TFT-1	
	介电常数	旋转黏度/(mPa·s)	介电常数	旋转黏度/(mPa·s)	介电常数	旋转黏度/(mPa·s)
60	4.12	32.4	4.25	30.0	—	—
50	4.64	42.9	4.84	40.2		
40	5.11	56.3	5.40	55.7		
30	5.61	79.9	5.95	83.0		
20	6.19	119.2	6.55	130.3	6.5	127.7
10	6.68	198.6	7.06	213.8	—	—
0	7.20	343.9	7.66	412.1		

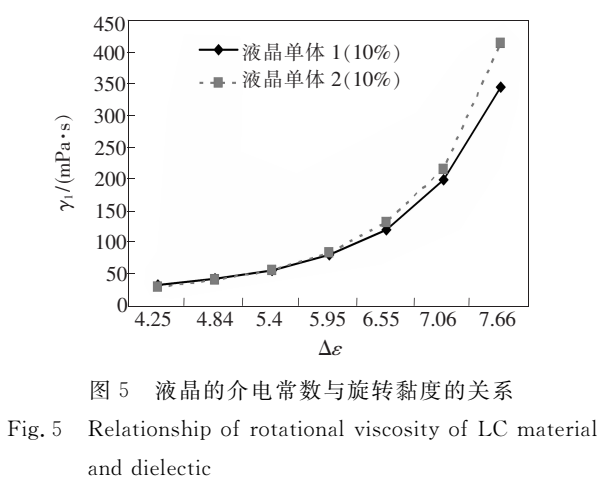


图 5 液晶的介电常数与旋转黏度的关系
Fig. 5 Relationship of rotational viscosity of LC material and dielectric

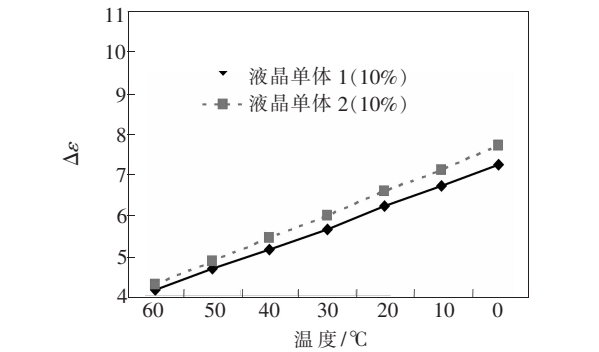


图 6 不同温度下的液晶介电常数值
Fig. 6 Dielectric of LC material in different temperature

通过表 5、图 5 和图 6 的对比我们可以看出，不同单体液晶旋转黏度与介电常数的大小趋势。单体液晶 2 的旋转黏度和介电各相异性均大于单体液晶 1。另外通过拟合还得到了 20℃下不同单体液晶的旋转黏度值。具体计算过程如下：

根据黏度的拟合公式 $\lg \eta = \sum C_i \lg \eta_i$

C_i 是各组分的含量， η_i 是对应组分的黏度值， η 是混合后的黏度值。

如果设 20℃时的单体液晶 1 单体的旋转黏度为 X ，在 20℃时，10%的单体液晶 1 与 90%的 TFT-1 混合后得到的旋转黏度值为 119.2 mPa·s。

$$\lg 119.2 = 0.1 \lg x + 0.9 \lg 127.7$$

计算得到 $X = 64.1$ mPa·s。也就是单体液晶 1 的旋转黏度为 64.1 mPa·s。

同样方法拟合计算单体液晶 2 在 20℃的旋转黏度值为 156.2 mPa·s。

通过这种方法可以得到多个温度下不同结构单体液晶的旋转黏度拟合值。但是，目前由于是对数拟合，所以测试误差会被放大，造成单体液晶旋转黏度的拟合数据有时会失真。所以还是要改善测试方法来提高单体液晶旋转黏度的测试精度。

4 结 论

介绍了测量液晶旋转黏度的几种测试方法，分析了其各自的优缺点。用瞬态电流法测量混合液晶的旋转黏度值，并且通过大量的实验，分析数据，确定使用无摩擦取向的液晶盒能够更准确地测试液晶的介电 $\Delta\epsilon$ 值，由于无摩擦取向的液晶盒内液晶分子与接触表面之间只有弱锚泊作用，在不加电的状态下分子基本平行于玻璃表面，表面附近分子由于没有强的锚泊作用，在电场作用下液晶分子转动时不受强的锚定力影响，几乎可以全部转动成指向矢与电场平行，能够较好地实现平行电场排列，所以测试的介电 $\Delta\epsilon$ 值。通过对正性液晶材料的 $\Delta\epsilon$ 测试方法进行改良和方法的优

化使瞬态电流法测试的旋转黏度值误差缩减到5%以内。提出了单体液晶分子旋转黏度的拟合方法。测试了不同单体液晶的旋转黏度和介电常数随温度的变化,得到了不同结构单体液晶旋转

黏度的拟合值。通过本文提出的测试方法可以得到混合液晶的旋转黏度值和单体液晶的旋转黏度拟合值。从而可以分析各种单体的旋转黏度值得到单体液晶旋转黏度值与其分子结构的关系等。

参 考 文 献:

- [1] 芦水军,曹召良,曲艳玲,等.液晶波前校正器动态位相应特性研究[J].液晶与显示,2012,27(6):730-735.
- [2] Demus D, Goodbye J W, Gray G W, et al. *Handbook of Liquid Crystals* [M]. Germany: Wiley-VCH, 1998.
- [3] 杨傅子.近期液晶研究中的几个新方向——液晶非显示应用基础研究中的进展[J].物理学进展,2008,28(2):107-129.
- [4] 周建伟,梁静秋,梁中翥,等.液晶调制光子晶体微腔光衰减器[J].发光学报,2013,34(2):245-250.
- [5] Wu S T, Wu C S. Experimental confirmation of the opsitov-terentjev theory on the viscosity of nematic liquid crystals [J]. *Liq. Cryst.*, 1990, 33(42): 2219-2227.
- [6] Dark M L, Moore M H, Shenoy D K, et al. Rotational viscosity and molecular structure of nematic liquid crystals [J]. *Liq. Cryst.*, 1990, 33(1): 67-73.
- [7] Prost J, Gasparoux H. Determination of twist viscosity coefficient in the nematic mesophases [J]. *Phys. Lett.*, 1971, 36(3): 245-246.
- [8] Knepe H, Schneider F. Determination of the rotational viscosity coefficient of r_1 nematic liquid crystals [J]. *J. Phys. E*, 1983, 16(6): 512-515.
- [9] Leenhouts F. Determination of the rotational viscosity from the director pattern relaxation in twisted nematic cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, 58(6): 2180-2183.
- [10] Gerber P R. Measurement of the rotational viscosity of nematic liquid crystals [J]. *Appl. Phys. A*, 1981, 26(3): 139-142.
- [11] Dietich D. *Physical Properties of Liquid Crystals* [M]. Germany: Wiley-VCH, 1999: 387-400.