

采用液晶涂层测量介质流与壁面间剪切应力的定量模型与试验研究*

张松鹏 张向军[†] 田煜 孟永钢

(清华大学, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(2012 年 3 月 30 日收到; 2012 年 6 月 26 日收到修改稿)

流场中介质流与壁面间剪切应力的定量测量, 在运动物体例如航天器等的表面流场观测与表面减阻等领域有重要意义. 本文采用向列相液晶涂层技术针对介质流与固体壁面间的剪切应力展开定量测量. 首先利用液晶弹性变形理论建立了向列相分子在剪切应力场作用下旋光性光强信号与剪切应力大小的定量模型; 进而, 在固体表面制备了 5 CB 与 7 CB 向列相液晶涂层, 采用搭建的实验装置对不同剪切应力场下的测试涂层的光强进行了测试与理论模型的计算模拟, 测试结果与定量模型相当吻合; 进一步探讨了液晶涂层测试技术的极限剪切应力、灵敏范围以及涂层膜厚、分子弹性等关键影响因素.

关键词: 壁面剪切应力, 液晶弹性理论, 向列相, 液晶涂层

PACS: 47.27.Lx, 83.50.Lh, 61.30.Cz, 83.80.Xz

1 引言

剪切流动场(气体、液体)与固体壁面间剪切应力的定量测试在诸多领域有重要意义, 如边界润滑机理的研究、固液界面减阻、密封端面应力分布、航天器等表面流场观测、智能皮肤仿生等^[1].

对于固气界面或者固液界面剪切流动行为的研究目前大致分为两个尺度, 即宏观连续介质尺度和微观尺度. 宏观上对界面剪切行为的研究主要基于理想化的假设, 使用了宏观连续的物理量定义, 如边界滑移速度、速度梯度、边界剪切应力等^[2-5]; 微观尺度的试验观测技术直接考虑了分子尺度的效应, 如界面吸附、双电层、流体介质的有序化排列、黏度或密度变化以及分层结构等^[6].

同时, 针对固体界面剪切流动的观测技术主要包括近壁面的速度观测和应力观测两种. 速度观测可以利用可见的示踪粒子, 如粒子图像测速

法(PIV), 观测其跟随流体运动的轨迹, 从而测得速度场, 得到流场分布和速度梯度. 进而结合一些理论假设, 推导出如边界滑移等近壁面的剪切流动行为. 而针对壁面剪切应力的测量直接反映了流动场中流动介质对固体壁面的作用力, 对揭示流动场下固体壁面的受力情况更有基础价值.

近年来, 随着微纳米技术的发展, 出现了多种测试表面剪切应力的装置和方法. 按测量拾取的信号分, 包括光学信号、热信号、电信号等^[7,8]. 按照测量装置分, 包括油膜干涉技术^[9], MEMS 传感器技术^[10,11], 以及敏感涂层, 如液晶涂层技术^[12-17]等. 油膜干涉技术是基于不同剪切作用下油膜厚度的变化, 采用光学方法测量得到表面剪切应力信号^[9], 其测量分辨率受到油膜特性与光学信号的限制, 实验中需要测试表面进行特殊的处理以保证其反射特性, 同时重力、压力梯度、表面曲率和粗糙度等也会对其测量油膜的干涉特性产生影响. 基于 MEMS 传感器技术的方法, 设计形式多样, 包

* 国家自然科学基金重大研究计划(批准号: 2012CB934101) 和国家自然科学基金(批准号: 50975154, 51175282) 资助的课题.

[†] E-mail: xjzhang@mail.tsinghua.edu.cn

括浮动单元法、热丝法、薄膜热学方法、微柱列法、表面栅技术等^[10,11], 测试空间分辨率在微米级, 但是通常只能实现剪切流场的单点测量, 或者依靠阵列能够实现剪切流场的测量, 造价高昂, 无法实现对表面上剪切应力场分布的多点面积测量, 测量范围具有局限性. 目前的液晶涂层技术, 主要使用向列相液晶分子和胆甾相液晶分子两种. 采用液晶薄膜层在剪切应力下光学性质的改变进行信号测量, 可以实现介质流与壁面间剪切应力场的“面分布”测试而非单点测量, 并具有很高的灵敏度^[12-17]. 值得一提的是, 由于液晶涂层的优点在于可以制备成几个微米厚度的薄膜, 其对周围流场边界层的扰动非常小, 几乎可以忽略, 可以认为是“非扰动式”(non-intrusive)的测量方式; 如果液晶涂层的传感面积不是很大, 可以认为流场流经涂层传感面积时的剪切应力场分布是连续的, 可以反映流场与壁面的真实应力情况. 而且, 液晶涂层还可以实现介质流与壁面间剪切应力场的直接可视化观测.

所以, 液晶涂层测量介质流与壁面间剪切应力的技术因其较高的分辨率和灵敏度以及可视化性质, 具有非常大的应用潜力和优势. 但目前的研究尚有很大局限, 首先, 对于液晶薄层的分子在剪切场作用下的响应规律缺少定量化模型, 从而导致剪切应力的测试难以定量化; 其次, 目前测量技术大都使用光学测量, 装置较复杂且测量结果受到光学信号、涂层技术以及环境等影响严重, 关于液晶涂层技术中的关键影响因素等揭示不够. 本文针对液晶涂层技术定量测试介质流与壁面间剪切应力的方法, 建立定量化的分子响应模型, 并采用试验技术进行真实流场下介质流与壁面间剪切应力的测试, 揭示其关键影响因素与规律.

2 剪切应力测试的液晶涂层与其分子响应模型

2.1 液晶涂层测试表面剪切应力的原理分类

目前剪切应力测量涂层中用到的主要是向列相和胆甾相两种(曾有对铁电液晶(属于近晶相)在剪切应力测量方面的研究^[16], 但研究较少). 基本

原理是利用剪切流场下涂层中液晶分子指向矢的变形规律来获得剪切应力分布. 若使用向列相液晶涂层技术, 需将涂层置于两个偏振面相互垂直的偏振片之间, 当液晶分子取向因剪切而发生结构改变时, 穿过液晶的光束的偏振方向将改变(旋光性), 检测到的光强也会随剪切应力改变, 即液晶涂层的光强信号直接反映了介质流与壁面间的剪切应力. 本文采用向列相液晶涂层测试技术.

2.2 向列相液晶涂层及其分子弹性变形理论

液晶具有与一般的固体弹性理论相似的连续体弹性形变理论. 对于一定温度, 一定体积的液晶, 指向矢是一个非常重要的概念. 它的物理意义是表示液晶中空间某点附近分子平均取向的单位矢量, 用 $\mathbf{n}$ 表示.

对于向列相液晶来说, 其自由平衡状态(能量最低)下各处指向矢具有同一方向. 假设液晶内部某点 A 的指向矢为 $\mathbf{n}$, 那么在 A 点附近的 B 点处指向矢将为 $\mathbf{n} + \Delta\mathbf{n}$, $\Delta\mathbf{n}$ 是从 A 点到 B 点指向矢的改变量. $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$, $\Delta\mathbf{n}$ 与 $n_{i,j} \equiv \frac{\partial n_i}{\partial x_j}$ 有关.

向列相液晶有三种形变: 展曲形变, 扭曲形变和弯曲形变. 展曲形变与 $\mathbf{n}$ 的散度($\nabla \cdot \mathbf{n} = \text{div} \cdot \mathbf{n} = n_{1,1} + n_{2,2} + n_{3,3}$)有关; 扭曲形变与 $\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n}$ 有关; 弯曲形变与 $\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n}$ 有关. 其中

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{n} &= \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \\ &= (n_{3,2} - n_{2,3}, n_{1,3} - n_{3,1}, n_{2,1} - n_{1,2}). \end{aligned}$$

由液晶的变形形式, 可以推导出向列相液晶的弹性自由能密度为

$$\begin{aligned} g_{\text{el}} &= \frac{1}{2} [K_{11}(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_{22}(\mathbf{n} \times \nabla \cdot \mathbf{n})^2 \\ &\quad + K_{33}(\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2], \end{aligned} \quad (1)$$

其中 K_{11} , K_{22} , K_{33} 分别表示了三种变形(展曲形变, 扭曲形变, 弯曲形变)所对应的弹性系数.

利用向列相液晶涂层测量剪切应力时, 液晶分子发生的是扭曲转变, 如图 1 所示.

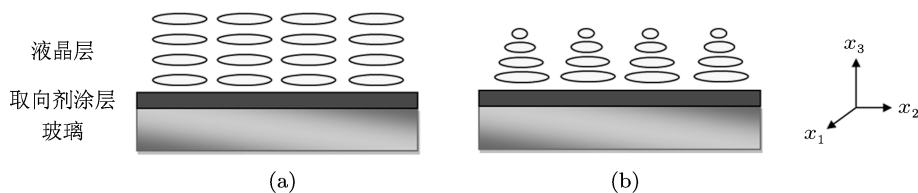


图1 向列相液晶涂层中的扭曲转变 (a) 预先取向的液晶涂层薄膜; (b) 外场作用下扭曲形变的液晶涂层

我们设计的液晶涂层测试结构包括三部分: 石英玻璃基底(下), 聚酰亚胺的取向剂涂层(中), 液晶涂层薄膜(上). 聚酰亚胺涂层的作用是使液晶分子在同一水平面内固定取向, 即沿图中 x_2 轴取向, 如图 1(a) 所示.

假设当液晶分子处于电场作用 ($\mathbf{E}$ 方向沿 x_1 轴) 下时, 将发生扭曲转变, 形成螺旋形结构 (如图 1(b) 所示), 此时液晶涂层具有旋光性. 液晶的电场自由能密度可表示为

$$g_\varepsilon = -\frac{D\mathbf{E}}{2} = -\frac{\varepsilon_0\varepsilon_\perp\mathbf{E}^2}{2} - \frac{\varepsilon_0\Delta\varepsilon(\mathbf{E}\mathbf{n})^2}{2}, \quad (2)$$

其中 ε_0 为真空介电常数, $\varepsilon_\perp$ 为垂直方向相对介电常数, $\Delta\varepsilon$ 为相对介电常数各向异性, $\mathbf{D} = \varepsilon_\perp\mathbf{E} + \Delta\varepsilon(\mathbf{n}\mathbf{E})\mathbf{n}$. 式中第一项为常数, 可以忽略.

电场中液晶的自由能为弹性自由能和电场自由能之和

$$G = G_{\text{el}} - G_\varepsilon = \frac{1}{2} \iiint [K_{11}(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_{22}(\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + K_{33}(\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2 - \varepsilon_0\Delta\varepsilon(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2] d\tau. \quad (3)$$

在图 1 中, 液晶的指向矢角度 θ (与 x_2 轴的夹角) 是关于坐标 x_3 的变量, 任意位置指向矢为 $\mathbf{n} = (\sin \theta, \cos \theta, 0)$, 电场强度 $\mathbf{E} = (E, 0, 0)$, 则代入 (3) 式可得出液晶自由能的进一步表达式为

$$G = \frac{1}{2} \iiint \left[K_{22} \left(\frac{d\theta}{dx_3} \right)^2 - \varepsilon_0\Delta\varepsilon E^2 \sin^2 \theta \right] d\tau = \iint_A \int_0^d \frac{1}{2} \left[K_{22} \left(\frac{d\theta}{dx_3} \right)^2 - \varepsilon_0\Delta\varepsilon E^2 \sin^2 \theta \right] dx_3 dA$$

$$= \iint_A g_A dA, \quad (4)$$

其中 g_A 为 x_1x_2 平面上单位面积的液晶自由能密度, d 为液晶涂层的厚度,

$$g_A = \int_0^d g dx_3 = \frac{1}{2} \int_0^d \left[K_{22} \left(\frac{d\theta}{dx_3} \right)^2 - \varepsilon_0\Delta\varepsilon E^2 \sin^2 \theta \right] dx_3, \quad (5)$$

可以看出, g_A 的表达式中只有 K_{22} 扭曲弹性系数, 而不包括 K_{11} 和 K_{33} , 表明液晶为纯扭曲形变. 其中 g 是 x_3 , θ 和 $d\theta/dx_3$ 的函数. 当满足该函数的 Euler-Lagrange 方程时, 即可得到 g_A 的最小值, 即自由平衡状态下的 g_A 值. g_A 的 Euler-Lagrange 方程为

$$\frac{\partial g}{\partial \theta} - \frac{d}{dx_3} \left(\frac{\partial g}{\partial \left(\frac{d\theta}{dx_3} \right)} \right) = 0, \quad (6)$$

即

$$K_{22} \frac{d^2\theta}{dx_3^2} + \varepsilon_0\Delta\varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta = 0, \quad (7)$$

这就是液晶分子处于电场 E 下取向矢转角的微分方程. 可以看出, 该方程是弹性能与电场能相平衡的结果. 这表述了液晶分子经过一定时间处于平衡的状态. 如果要描述从初始平衡状态到由于外界作用到达一个新的平衡状态的整个过程, 则需要引入由于黏度而产生的黏性扭矩. 此时方程可改写为

$$K_{22} \frac{\partial^2\theta}{\partial x_3^2} + \varepsilon_0\Delta\varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta = \mu \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (8)$$

其中 μ 为液晶的动力学黏度.

可以认为, 当液晶涂层上所加电场的作用被流体的剪切作用所代替, 也会有相似的情况^[13], 剪切应力会使液晶涂层产生速度梯度, $\tau_w = \mu \frac{du}{dx_3}$. 当

不考虑弹性项, 即把液晶分子看成互不影响的单一个体时, 其角度随时间的变化为 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\Delta u \cos \theta}{r}$, 其中 r 为液晶分子的半长轴长, Δu 为分子端部与分子中心的速度差, $\Delta u = \frac{du}{dx_3} r \sin \varphi$, 其中 φ 是倾斜角, 即取向矢与 $x_1 x_2$ 平面的夹角, 所以有 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{du}{dx_3} \sin \varphi \cos \theta = \frac{\tau_w \sin \varphi \cos \theta}{\mu}$. 从而得到同时考虑弹性、黏性及剪切作用的方程为 $K_{22} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_3^2} + \tau_w \sin \varphi \cos \theta = \mu \frac{\partial \theta}{\partial t}$, 可简化为

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X_3^2} + S \cos \theta = \frac{\partial \theta}{\partial T}, \quad (9)$$

其中 $T = \frac{K_{22} t}{\mu d^2}$, $X_3 = \frac{x_3}{d}$, $S = \frac{\tau_w \cdot \sin \varphi \cdot d^2}{K_{22}}$. 平衡状态方程为

$$\frac{d^2 \theta}{dX_3^2} + S \cos \theta = 0. \quad (10)$$

由于向列相液晶分子受到外加电场或物理剪切场的作用, 形成从下至上的螺旋形结构, 这种结构具有光学活性, 即旋光性, 可以改变偏振光的偏振方向. 此结构目前已广泛使用于 TN (扭曲向列, twisted nematic) 型液晶显示器.

当液晶分子受到流体剪切场作用时, 扭曲变形的液晶表现出的旋光性可以用来检测剪切应力. 如图 2 所示. 流体的流动方向为沿 x_1 轴方向. 假设经过起偏器时, 光强为 I_0 , 则经过液晶层的旋光作用偏振方向旋转了 θ 角, 而光强不变, 此时光的偏振方向与检偏器偏振方向夹角为 $90^\circ - \theta$, 则经过检偏器后光强变为

$$I_0 \cos^2(90^\circ - \theta) = I_0 \sin^2 \theta, \quad (11)$$

上式中偏转角 θ 与流场的剪切应力相关; 光强可以使用相机采集光信号得到强度信息或者采用光强

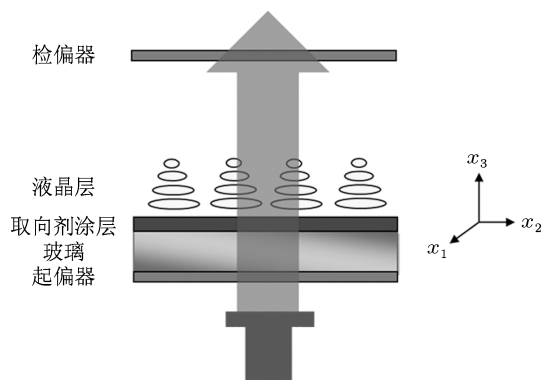


图 2 剪切场下液晶分子的旋光性

传感器等获取, 则通过液晶分子弹性变形的模型 (10) 式进行校准, 可以得到光强与剪切应力的定量关系. 这也是本文定量测试介质流与壁面间剪切应力的模型基础.

3 介质流与壁面间剪切应力测试实验

3.1 实验装置

本文试验采用向列相液晶涂层的旋光性来测量剪切应力, 装置如图 3 所示.

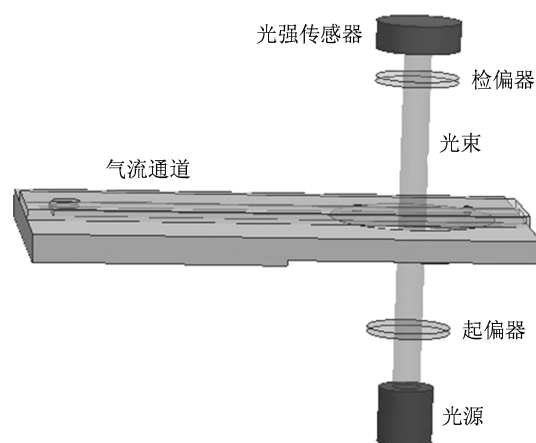


图 3 测试装置

气流通道宽度为 20 mm, 高度为 2 mm, 进气孔位于左侧, 右端放置液晶涂层和两个取压孔. 取压孔之间距离为 40 mm, $\tau_w = \frac{h \Delta p}{2 \Delta x}$ (两个无穷大平行板之间的理论值, h 为流道高度, Δp 为压差, Δx 为距离). 压差 Δp 使用 P3000 电子式差压表测量. 光源为 670 nm 的单色光, 起偏器偏振方向和涂层取向均垂直于气体流向, 检偏器偏振方向平行于气体流向. 光强传感器用于检测透过的光束强度, 并将信号通过 Labview 加以输出.

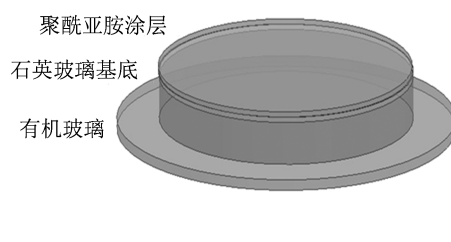
3.2 聚酰亚胺涂层和液晶涂层的制备

聚酰亚胺涂层的作用是使表面液晶分子取向, 进而对内部液晶分子的状态及指向矢的分布产生影响. 聚酰亚胺具有耐高温、耐腐蚀、易成膜、取向稳定等优点. 本实验所用的是水平取向, 液晶分子与平面的倾斜角在 7° — 9° 之间.

聚酰亚胺涂层及液晶涂层制备按以下步骤进行.

1) 将聚酰亚胺旋涂于石英玻璃基底上 (如图 4 左图所示). 一级转速为 60 r/min, 时间为 10 s, 二级转速为 120 r/min, 时间为 90 s.

2) 固化过程: 将样品置于烘干机上, 温度加热到 80 °C 并保持 30 min, 然后再将温度加热到 200 °C 并保持 2 h.



3) 用丝绒布沿同一方向擦拭涂层, 形成微槽结构. 其原子力显微镜 (AFM) 的扫描图像如图 4 右图所示.

4) 将一定体积比的乙醇和液晶混合, 并将此混合液体滴于聚酰亚胺涂层上, 使其铺满整个涂层, 放于微波炉中加低火力 5 min, 使乙醇挥发, 从而形成均匀的液晶涂层. 液晶涂层表面为直径 60 mm 的圆形.

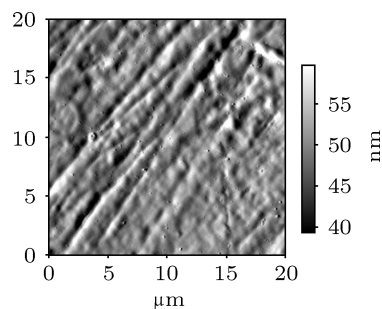


图 4 聚酰亚胺涂层及其表面 AFM 扫描图

试验中, 分别采用两种向列相液晶涂层, 5 CB 和 7 CB. 二者具有不同的分子大小和分子弹性. 两组 5 CB 液晶厚度分别为 $d \approx 14 \times 10^{-6}$ m 和 $d \approx 35 \times 10^{-6}$ m, 7 CB 液晶涂层的厚度为 $d \approx 35 \times 10^{-6}$ m.

3.3 介质流与壁面间剪切应力的测试结果

通过流道施加不同的流速, 其对应不同的气流压差, 从而可以改变边界流体的剪切应力. 记录液晶涂层的光强变化, 结果如图 5 所示, 光强信号是电压信号, 对应相对光强信号为 $I/I_0 = \sin^2 \theta$. 由图 5 中可知:

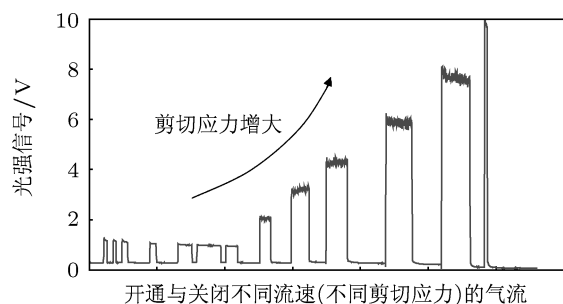


图 5 液晶在不同剪切应力下的光强信号

1) 当无气流时, 液晶分子取向无改变, $\theta = 0$, 相对光强信号此时为 0;

2) 当有微弱气流通过时, 液晶分子取向会逐层发生改变, 从而发生旋光现象, 此时出现同步增加的光强信号;

3) 继续增大气流, 即增大剪切应力时, 液晶取向的改变即 θ 角也随着增大, 此时相对光强信号会逐渐变大;

4) 当去除气流时, 光信号可回复到初始状态, 说明信号稳定.

经过实验可得到剪切应力与相对光强信号 (I/I_0) 的数据点 (剪切应力可根据压差推算得到, I_0 可在剪切应力很大时近似得到), 如图 6 中的空心点所示. 可看出相对光强与剪切应力是正相关, 斜率随剪切应力增大而逐渐减小. 剪切应力较小时, 光强信号的变化斜率较大, 说明这时的信号较为灵敏.

本次实验包括三组, 分别采用两组同厚度的 5 CB 涂层与 7 CB 涂层进行了测试. 同时也测试了不同厚度的 5 CB 涂层的响应. 测试数据采用图 6 中的数据点表示. 由图 6 中可知:

1) 几种液晶涂层均存在可测试的剪切应力极值, 对于 35 μ m 厚的涂层, 此极限应力值为 0.5 Pa;

对于 14 μm 厚的 5 CB 液晶薄膜, 大约 2 Pa;

2) 几种液晶涂层均存在一段剪应力的灵敏区, 在灵敏区范围内, 液晶涂层光强对剪应力测试非常敏感, 随着剪切应力进一步增大, 由于液晶分子的扭转角度逐渐接近 90° 而饱和, 灵敏度会逐渐减小;

3) 相同厚度的 5 CB 液晶涂层与 7 CB 液晶涂层, 5 CB 液晶涂层的光强信号随剪切应力变化更明显, 即其在测试范围内具有比 7 CB 液晶较高的灵敏度.

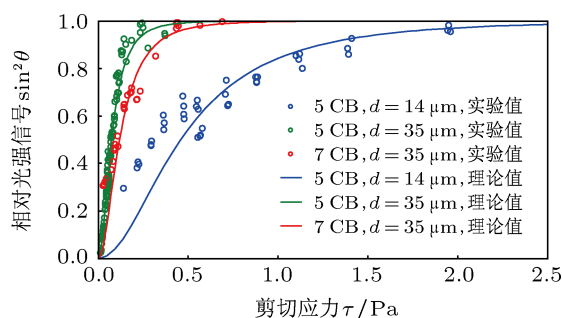


图6 相对光强与剪切应力的关系

进一步采用上述的液晶分子变形的模型来进行剪切应力定量计算. 根据 (10) 式, 以及边界条件为 $\theta|_{X_3=0} = 0$, $\frac{\partial \theta}{\partial X_3}|_{X_3=1} = 0$, 其中 $S = \frac{\tau_w \cdot \sin \phi \cdot d^2}{K_{22}} = k\tau_w$, S 与 τ_w 成正比, 即 $S \propto \tau_w$. 根据实验采用的实验参数: 倾斜角 $\varphi \approx 8^\circ$, 5 CB 液晶的 $K_{22} = 6.2 \times 10^{-12} \text{ N/m}$, 7 CB 液晶的 $K_{22} = 10 \times 10^{-12} \text{ N/m}$, 其中两组 5 CB 液晶厚度分别为 $d \approx 14 \times 10^{-6} \text{ m}$ 和 $d \approx 35 \times 10^{-6} \text{ m}$, 7 CB 液晶涂层厚度为 $d \approx 35 \times 10^{-6} \text{ m}$, 可推出三组的 k 值分别为 $k = \frac{\sin \varphi \cdot d^2}{K_{22}} \approx 4.4$, $k \approx 27.5$

和 $k \approx 17.05$. 采用数值方法, 则可模拟得到相对光强信号 $\sin^2 \theta|_{X_3=1}(\tau_w)$ 与 τ_w 的关系 (分别如图 6 中三条实线所示). 经过理论计算与实验数据相比较并模拟, 可拟合出实验中的实际系数分别为 $k = 5.06$, $k = 27.9$ 和 $k = 18.97$, 总体来看, 理论与实验结果具有较好的一致性.

由 (10) 式可知, 液晶涂层的剪切应力测量范围和灵敏度与涂层的参数 k ($k = S/\tau_w = \sin \phi \cdot d^2/K_{22}$) 密切相关. 当液晶涂层厚度 d 越小, 或者液晶分子扭曲弹性系数 K_{22} 越大, 可测量的剪切应力范围越大, 但是灵敏度也会相应下降. 三组不同条件下实验结果的明显差别, 都能够很好地反映定量模型中各参数对光信号的影响. 所以, 通过设计液晶涂层的厚度、选择液晶分子的种类与弹性, 可以实现可测的剪切应力范围以及灵敏度的控制.

4 结 论

本文采用向列相液晶涂层, 利用其经表面流场剪切作用后表现出的旋光性, 通过采集光强信号, 实现了介质流与壁面间剪切应力的测试. 利用液晶弹性变形理论建立了向列相液晶分子在剪切场作用下旋光性光强信号与剪切应力大小的定量模型; 制备了向列相 5 CB 与 7 CB 液晶的不同厚度的涂层, 采用搭建的实验装置对不同介质流速度下壁面的剪切应力实验测试与理论模型的计算模拟, 测试结果与定量模型符合良好. 结合测试规律与模型参数进一步探讨了液晶涂层测试技术的极限剪切应力、灵敏范围的关键影响因素.

- [1] Naughton J W, Sheplak M 2002 *Progress in Aerospace Sciences* **38** 515
- [2] Wang X, Zhang X J, Meng Y G, Wen S Z 2009 *China Mechanical Engineering* **20** 2081
- [3] Wang X, Zhang X J, Meng Y G, Wen S Z 2009 *Tribology* **29** 200
- [4] Wang X, Zhang X J, Meng Y G, Wen S Z 2009 *Nanotechnology and Precision Engineering* **7** 428
- [5] Wang X, Zhang X J, Meng Y G, Wen S Z 2008 *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)* **48** 1302
- [6] Xiong Y, Zhang X J, Zhang X H, Wen S Z 2010 *Acta Phys. Sin.*

59 7998 (in Chinese) [熊毅, 张向军, 张晓昊, 温诗铸 2010 物理学报 **59** 7978]

- [7] Lu H F, Jiang C Y, Deng J J, Ma B H, Yuan W Z 2010 *Chin. J. Mech. Eng.* **46** 54
- [8] Heng Z, Jian Q, Ming X, Cheng H, Jiang W M 2008 *Journal of Experiments in Fluid Mechanics* **22** 94
- [9] Tanner L H, Blows L G 1976 *Journal of Physics E Scientific Instruments* **9** 194
- [10] Fukang J 1997 *Proceedings of the Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems* Nagoya, January

- 26–30, 1997 p465
- [11] Lofdahl L, Gad-el-Hak M 1999 *Measurement Science & Technology* **10** 665
- [12] Buttsworth D R, Elston S J, Jones T V 1998 *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme* **120** 847
- [13] Buttsworth D R, Elston S J, Jones T V 1998 *Measurement Science & Technology* **9** 1856
- [14] Reda D C, Wilder M C, Farina D J, Zilliac G 1997 *Aiaa Journal* **35** 608
- [15] Fujisawa N, Oguma Y, Nakano T 2009 *Measurement Science & Technology* **20** 065403
- [16] Parmar D S 1991 *Rev. Sci. Instru.* **62** 474
- [17] Fujisawa N, Aoyama A, Kosaka S 2003 *Measurement Science & Technology* **14** 1655

A quantitative model and experimental investigations of wall shear stress between solid and gaseous fluid using liquid crystal coating*

Zhang Song-Peng Zhang Xiang-Jun[†] Tian Yu Meng Yong-Gang

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 30 March 2012; revised manuscript received 26 June 2012)

Abstract

Measurement of wall shear stress (WSS) has important significance in many fields, such as spacecraft surface flow visualization and drag reduction of solid-liquid interface. Various measuring methods have been developed with the rapid development of micro and nano technology. This paper focuses on the measurement of WSS by using nematic liquid crystal coating. A quantitative model is built to describe the relationship between the variations of director orientation and the WSS based on the curvature elasticity theory of liquid crystal. Then an experiment setup is built to verify this model using 5 CB and 7 CB through the optical method. There is good consistence between the theoretical model and experiment results. Finally, the WSS measuring limits and influencing factors are discussed such as the thickness of the liquid crystal layer, the elastic coefficient of the molecule and measurement resolution.

Keywords: wall shear stress, curvature elasticity theory, nematic phase, liquid crystal coating

PACS: 47.27.Lx, 83.50.Lh, 61.30.Cz, 83.80.Xz

* Project supported by the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 2012CB934101) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50975154, 51175282).

[†] E-mail: xjzhang@mail.tsinghua.edu.cn