

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1112-04

用布里渊散射测量水的体粘滞系数*

徐建峰 李荣胜 周 静 刘大禾

(北京师范大学物理系 , 北京 100875)

摘要 : 提出了一种直接测量水的体粘滞系数的实验方法——布里渊散射方法。通过分析剪切粘滞系数和体粘滞系数与布里渊散射线宽的关系 , 得到了布里渊散射线宽和频移与水的体粘滞系数关系的公式 , 建立了实验测量水的体粘滞系数的基础 , 给出了不同温度下水的体粘滞系数的实验测量结果 , 估算了这种方法的测量误差。实验和理论分析都表明这是一种直接测量水的体粘滞系数的快速而精确的方法。

关键词 : 布里渊散射 ; 布里渊线宽 ; 水的体粘滞系数 ; 温度

中图分类号 : O436.3 文献标识码 : A

1 引 言

水的粘性或粘度系数是一个重要参数 , 在流体力学和水利建设方面有重要作用。体粘滞系数和剪切粘滞系数是从更微观的角度去认识水的粘性。然而 , 到目前为止 , 尚没有一种直接测量水的体粘滞系数的方法。目前采用的常规方法是通过测量(或由手册中查阅) 不同温度下的剪切粘滞系数 , 再根据剪切粘滞系数与体粘滞系数的理论或手册中给出的二者的比值去计算体粘滞系数。但在有关的理论中^[1-3] , 涉及很多其他参数 , 讨论起来相当复杂。而手册中也只给出了三、四个温度下剪切粘滞系数与体粘滞系数的比值^[4] , 要得到较大温度范围内的体粘滞系数是很困难的。因而快速、准确地直接测量水的体粘滞系数就成为一个迫切需要解决的问题。

另一方面 , 光散射方法已被广泛应用于物理、化学(如高分子化学) 检测^[5]及海洋监测中。其中布里渊散射就是一种重要的手段。布里渊散射自从被发现后 , 已经得到深入的研究^[6-10] , 并在相当多的领域中得到了应用。我们在用布里渊散射进行海洋监测的研究中^[11-14] , 从实验上发现了布里渊散射线宽对温度的依赖关系。在理论上 , 布里渊散射线宽与水的剪切粘滞系数、体粘滞系数、热容等有着密切的关系。这些参数又直接与温度有关。而布里渊散射线宽是可以在实验中精确测量的 , 这就为直接测量水的体粘滞系数开辟了一条途径。

2 理论分析

布里渊散射是由液体温度及其它参数的不均匀分布而导致的密度涨落所引起的 , 在布里渊散射频移值远远小于入射光频率值的条件下 , 散射光强度随频率的关系可以表示为^[4]

$$I(\omega) = I_{ad} \frac{\delta/2\pi}{(\omega - \Omega_0)^2 + \delta^2}, \quad (1)$$

其中 I_{ad} 为绝热密度涨落的散射光强 , $\delta = \frac{1}{2}\Gamma q^2$,

$\Omega_0^2 = v^2 q^2$, $q = \frac{4n\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$, ω 和 v 分别为散射光的圆频率和频率 , Γ 为热力学变量的函数 ,

$$\Gamma = \frac{1}{\rho} \left[\frac{4}{3} \eta_s + \eta_b + \frac{\kappa}{C_p} (\gamma - 1) \right],$$

η_s 为剪切粘滞系数 , η_b 为体粘滞系数 , κ 热传导系数 , $\gamma = C_p/C_v$ 。定义最大光强一半处的宽度值为线宽(半值全宽) , 由(1)式得到布里渊散射线宽为

$$\Gamma_B = 2\delta = \Gamma q^2 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{4}{3} \eta_s + \eta_b + \frac{\kappa}{C_p} (\gamma - 1) \right] q^2. \quad (2)$$

对液体(2)式中等号右边的第三项通常比前两项要小两个数量级 , 因此有

$$\Gamma_B = \frac{1}{\rho} \left[\frac{4}{3} \eta_s + \eta_b \right] q^2 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{4}{3} \eta_s + \eta_b \right] \frac{4\pi^2 \nu_B^2}{v^2}, \quad (3)$$

则体粘滞系数为

$$\eta_b = \frac{\rho v^2 \Gamma_B}{4\pi^2 \nu_B^2} - \frac{4}{3} \eta_s, \quad (4)$$

其中 , 剪切粘滞系数 η_s 可由手册中查出 , 或由理论

* 国家科委 863 高科技项目和国家自然科学基金(69988001) 资助课题。

计算出。 ν_B 为布里渊频移,可由实验测量, v 为水中声速,其值可由布里渊频移求出^[12,13]。(4)式就是测量体粘滞系数的依据,只要在实验中测出布里渊散射线宽 Γ_B 和频移 ν_B ,即可得到体粘滞系数。

3 实验结果及处理

实验装置如图 1 所示。由于布里渊散射的频移非常小,因此,要求所用激光器具有很好的频率稳定性和很窄线宽。用注入式锁模的脉冲 YAG 激光器作为光源,输出波长为 532 nm,线宽为 60 MHz,脉冲宽度为 10 ns,输出能量为每个脉冲 300 mJ,脉冲重复频率为 20 Hz。对于信号检测,使用了高精度扫描法布里-珀罗干涉仪,它由两个平面镜组成,每个平面镜的反射率均为 99.5%,因此干涉仪可获得很高的精细度。干涉仪的自由光谱范围为 18.54 GHz。实验中,选择扫描法布里-珀罗干涉仪的扫描周期为 100 s。这是由于在每秒 20 个脉冲的情况下,短扫描周期会造成信号的采样数过低,从而影响测量精度。用 Boxcar 采集数据,其门宽设定为 50 ns。为了尽可能降低噪声的影响,在大量实验的基础上,选用了直径为 15 μm 的针孔滤波器。通过温控循环装置实现水温的控制与稳定。温度的控制精度为 0.02 $^{\circ}\text{C}$ 。试验中的散射角为 170 $^{\circ}$ 。实验中所用的主要设备是:光谱物理公司 Quantary DCR 种子注入式锁模调 Q 脉冲 YAG 激光器;Burleigh 公司 RC-43 扫描干涉仪及驱动装置;Stanford Research System SR250 Boxcar;Tektroni 公司 7912AD 模数转换器。实验所用的水均为蒸馏水。

峰为布里渊散射峰。为了给出定标的依据,每个扫描周期均包括三个瑞利散射峰,相临两个瑞利峰之间的距离就是干涉仪的自由光谱范围(18.54 GHz),由此可确定布里渊散射线宽。由于瑞利散射峰的线型函数为高斯型,而布里渊散射峰的线型函数为洛伦兹型,我们用高斯和洛伦兹混合型函数(图中的实线)对实验数据(图中的点)进行了拟合,再由拟合的结果确定布里渊散射线宽和频移。可以看出,拟合的结果是令人满意的。实验中先将六次测量结果进行平均,然后进行拟合,最后再确定布里渊散射线宽和频移。

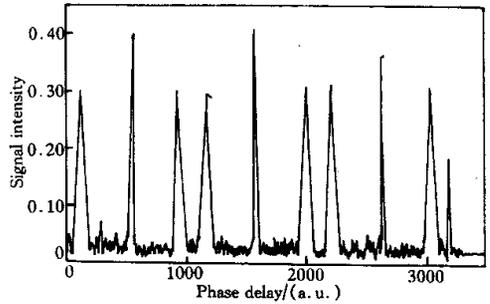


Fig.2 Measured spectrum of Brillouin scattering in water

图 3 为不同温度下测量的布里渊散射光谱。从中可清楚看到布里渊频移和线宽随温度的变化。

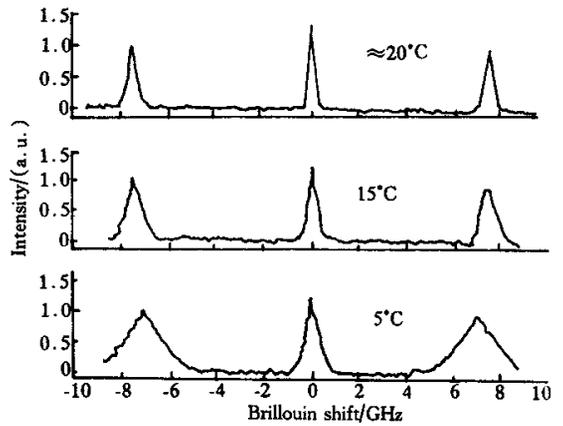


Fig.3 Measured spectra of Brillouin scattering in water at different temperatures

表 1 给出了水中布里渊散射频移和线宽随温度变化的实验结果。

在利用(4)式根据实测的布里渊线宽计算水的体粘滞系数时,还需要知道水的剪切粘滞系数。剪切粘滞系数由下式给出^[5,6]

$$\eta_s = 1.0018 \exp \frac{2.409(t - 20) + 0.0054(t - 20)^2}{79.6531 + t} \quad (5)$$

至此,即可由测量布里渊散射线宽而得到水的体粘

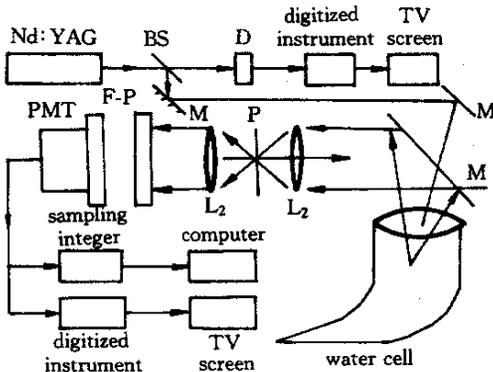


Fig. 1 Experimental set-up geometry for testing Brillouin scattering in water. M :mirror ;L :lens ;F-P :scanning Fabry-Parot ;D :detector ;BS :beam splitter ;P :pin-hole filter ;PMT :photomultiplier tube

图 2 给出了实验测量的布里渊散射光谱。图中较高的峰为瑞利散射峰。瑞利散射峰两侧对称的双

滞系数。

Table 1. Measured results of Brillouin line width and frequency shift at 10 temperatures

temperature / °C	2	3	4	8	10	15	20	25	30	35
line width /GHz	1.46	1.28	1.23	0.99	0.83	0.68	0.63	0.49	0.45	0.43
frequency shift /GHz	7.02	7.08	7.12	7.24	7.32	7.40	7.47	7.58	7.65	7.77

图 4 为通过测量布里渊散射线宽而得到的水的体粘滞系数。这样,通过测量不同温度下的布里渊散射线宽,即可由实验直接确定水的体粘滞系数。

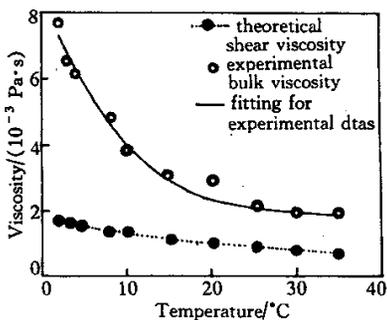


Fig.4 The relationship between the temperature of water and bulk viscosity and shear viscosity of water

在很多情况下,我们还需要知道不同温度下体粘滞系数与剪切粘滞系数的比值。图 5 所示的就是这个比值的温度依赖关系。其中体粘滞系数是由实验测量得到的,剪切粘滞系数是利用(5)式计算得到的。图中的实线是拟合后的结果,此结果可用下面公式近似表示

$$\frac{\eta_b}{\eta_s} = 4.8840 - 0.2488t + 7.3000 \times 10^{-3}t^2 - 0.6125 \times 10^{-5}t^3. \quad (6)$$

另外,由图 5 可以看出,水的体粘滞系数和剪切粘滞系数的比值在温度较高时,又会增大,而不是单调地减小。这个现象可以很容易地得到解释。布里渊散射线宽在温度升高时,变化越来越小。而剪切粘滞系数随温度的升高缓慢下降。由(4)式可知,体粘滞系数值在温度较高时会缓慢增大。这就造成二者之比在温度较高时增大。

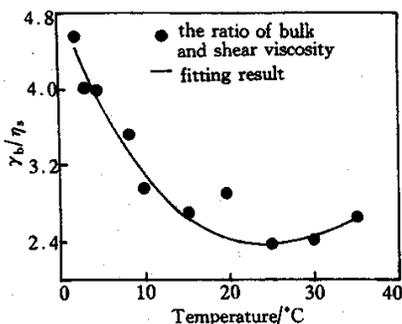


Fig.5 The ratio of bulk viscosity and shear viscosity of water at different temperatures

在实际测量中,水的浑浊度尽管会影响散射光谱,但不会影响布里渊散射的线宽和频移。这是由于,当水中的悬浮物或颗粒增多,使水变浑时,只是使瑞利散射的强度增大,而布里渊散射的线宽和频移与水中的悬浮物或颗粒无关。另外,在通常的情况下,所使用的激光器输出能量为每个脉冲 1 J,这时产生的仍是非受激布里渊散射。要产生受激布里渊散射等非线性现象,需要极强的激光。当然,在非受激布里渊散射的情况下,脉冲激光器的输出能量会影响在水中的测量深度。同时,在大深度测量时,系统的信噪比会有所降低。

本文考虑到各种水利工程及海洋、湖泊等大面积水域监测的实际环境,所以测量了 0 °C ~ 35 °C 温度范围内水中布里渊散射的线宽和频移。

4 本方法的误差估算

体粘滞系数的测量不确定度 $\Delta\eta_b$ 取决于布里渊散射线宽和频移的测量不确定度 $\Delta\Gamma_B$ 和 $\Delta\nu_B$, 其值可由下式计算

$$\Delta\eta_b = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta_b}{\partial\Gamma_B}\right)^2 (\Delta\Gamma_B)^2 + \left(\frac{\partial\eta_b}{\partial\nu_B}\right)^2 (\Delta\nu_B)^2}. \quad (7)$$

由(4)式可得

$$\Delta\eta_b = \sqrt{\left(\frac{\rho v^2}{4\pi^2 \nu_B^2}\right)^2 (\Delta\Gamma_B)^2 + \left(\frac{\rho v^2 \Gamma_B}{2\pi^2 \nu_B^3}\right)^2 (\Delta\nu_B)^2}. \quad (8)$$

下面,对本文所提出的方法的测量误差进行一个大致的估算。在(8)式中,各个参数均取典型值:

$$\nu_B = 7.5 \text{ GHz}, \quad \Gamma_B = 500 \text{ MHz},$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \quad v = 1500 \text{ m/s}.$$

若布里渊线宽和频移的最大测量不确定度为 10 MHz,则总测量不确定度值为 $1.022 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 而体粘滞系数的测量值为 10^{-3} 数量级,因此,测量的相对误差小于 1%。若布里渊线宽和频移的最大测量不确定度为 50 MHz,测量的相对误差仍可小于 5%。在实际测量中,即使使用很普通的仪器设备,也可以得到 50 MHz 的布里渊线宽和频移的测量不确定度。而小于 10 MHz 的测量不确定度也是不难实现的。可见,用布里渊散射方法测量水的体

粘滞系数,具有相当高的测量精度。

5 讨论与结论

一些手册曾给出过体粘滞系数和剪切粘滞系数在不同温度下的比值,但最多时也只给出了四个值,而且未说明这些值是如何给出的。我们用这四个值计算了水的体粘滞系数,并用拟合的方法求出了更多温度下的体粘滞系数。结果发现,在温度高于 15℃时,计算的结果与我们的实验结果符合得很好,在温度低于 15℃时,计算的结果与我们的实验结果出现了偏差,温度越低,差别越大,实验测量的数值大于用手册所给数据计算的数值。

我们更倾向于相信我们得到的结果,因为这是实验得到的测量结果。当然,也不排除下面的可能性,即我们在温度较低时对布里渊散射线宽和频移的测量不够准确。

本文提出了一种直接测量水的体粘滞系数的实验方法。由于水的体粘滞系数直接与布里渊散射的线宽和频移有关,因此,用布里渊散射方法测量水的体粘滞系数是一种切实可行的方法。并且布里渊散射探测的是频移和线宽,是一种调频测量技术,具有相当高的信噪比,因而具有很高的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Brush S G. Theory of liquid viscosity. *Chem. Rev.*, 1962, **62**(2):513~548
- [2] Marvin R S, Hogenboom D L. Viscosity of Liquids. *Handbook*. American Institute of Physics, McGraw-Hill Book Company, 1972
- [3] Dodd C, Mi H P. Viscosity and density in the supercooled

liquid state. section B in *The Proceeding of the Physical Society*(Landon), 1949, **62**:454~460

- [4] Litovitz T A, Davis C M. Structural and Shear Relaxation in Liquids. in Mason W P ed. *Phys. Acoustics*, New York: Academic Press, 1965. 297
- [5] 左 策. 激光散射原理及在分子科学中的应用. 第 2、3、4、5 章, 郑州:河南科技出版社, 1994
- [6] Rank D H. Brillouin effect in liquids in the prelar era. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1971, **49**(3):937~940
- [7] Chiao R Y, Fleury P A. Brillouin Scattering and the Dispersion of Hypersonic Waves. in *Physics of Quantum Electronics*, P. L. Kelly, P. E. Tannenwald, B. Laxs eds, New York: McGraw-Hill, 1965. 241~252
- [8] Cummins H Z, Gammon R W. Rayleigh and Brillouin scattering in liquids: The Landau-Placzek ratio. *J. Chem. Phys.*, 1966, **44**(7):2785~2796
- [9] Moutain R D. Thermal relaxation and Brillouin scattering in liquids. *J. Research of the National Bureau of Standards-A Physics and Chemistry*, 1966, **70A**(3):207~220
- [10] Patterson G D, Carroll P J. Light scattering spectroscopy of pure fluids. *J. Phys. Chem.*, 1985, **89**(8):1344~1354
- [11] Liu Dahe, Quan Xiaohong. Range and line resolved Brillouin scattering in pure water using pulsed Nd:YAG laser. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, **B4**(2):123~126
- [12] 刘大禾. 用布里渊散射方法实现海水声速的实时遥测. *声学学报*, 1998, **23**(2):184~188
- [13] 刘大禾, 汪华英, 周 静. 布里渊散射法测量盐度及温度不同的海水中的声速. *中国激光*, 2000, **A27**(4):381~384
- [14] Liu Dahe, Xu Jianfeng, Wang Huaying *et al.*. Remote sensing to ocean by using Brillouin scattering: Test of sound speed and submerged object. *Proc. SPIE*, 2000, **4222**:114~117

Measurements of Bulk Viscosity of Water Using Brillouin Scattering

Xu Jianfeng Li Rongsheng Zhou Jing Liu Dahe

(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

(Received 7 December 2000; revised 2 April 2001)

Abstract: A method of using Brillouin scattering technique for measuring directly the bulk viscosity of water is proposed. By analyzing the relationship between the line width of Brillouin scattering and the shear and bulk viscosities, a relation of the bulk viscosity of water with the line width and frequency shift of Brillouin scattering is suggested, which is the basis for determining bulk viscosity experimentally. The experimental data of bulk viscosity of water at different temperatures were given. The testing error of this method is analyzed. Both of theory and experiments show that Brillouin scattering technique is a quick and accurate method for measuring bulk viscosity of water.

Key words: Brillouin scattering; Brillouin line width; bulk viscosity of water; temperature