

文章编号:1005-4642(2020)07-0016-03

基于光纤拉力传感器测量液体表面张力系数

王本阳,毛晓芹,刘 一,曲文葛,王新顺,郎昌鹏
(哈尔滨工业大学(威海)理学院 光电科学系,山东 威海 264209)

摘 要:基于法布里-珀罗干涉型拉力传感器,利用拉脱法测量了液体表面张力系数.设计制备出的光纤拉力传感器结合单频激光器、光纤环形器、光电探测器可使输出电压和拉力成正比,其灵敏度约为 64.5 mV/N.利用其测量室温下水的液体表面张力系数(0.076±0.001) N/m,相对偏差为 4.1%.

关键词:液体表面张力系数;光纤;拉力传感器;拉脱法

中图分类号:O451.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.07.004

液体的表面张力是讨论液体表面现象,了解液体性质的重要物理参量.液体表面张力使液体表面具有自发收缩的趋势以保持液体的表面积最小.形成球形液滴的原因即是液滴受到液体表面张力的作用^[1].单位长度液膜上的表面张力的大小即等于液体的表面张力系数.液体表面张力系数与液体温度、压强、密度、纯度以及液体种类等因素有关.精确测量液体表面张力系数在化工生产和生物医学等领域具有重要意义.测量液体的表面张力系数有多种方法,拉脱法是测量液体表面张力系数常用的方法.用拉脱法测量液体表面张力时,液体表面张力在 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ N之间,对测量拉力的传感器要求较高.常用的拉力传感器有硅压阻式力敏传感器(利用非平衡电桥)^[2-4]和位移力敏传感器(利用霍尔传感器).本文利用自制的高灵敏度的光纤拉力传感器测量水的液体表面张力系数,取得了较好的效果.

1 实验原理

1.1 拉脱法测量液体表面张力系数原理

测量已知周长的金属片从待测液体表面脱离时需要的力,求得该液体表面张力系数的实验方法称为拉脱法.若金属片为圆环时,考虑一级近似,可以认为脱离力为液体表面张力系数乘以脱

离表面的周长^[5],即

$$F = \alpha \pi (D_1 + D_2), \quad (1)$$

式中, F 为拉脱力, D_1 和 D_2 分别为圆环的外径和内径, α 为液体的表面张力系数.

1.2 高灵敏度光纤 F-P 干涉型拉力传感器原理

实验采用的力敏传感器为光纤法布里-珀罗干涉型拉力传感器,其基本原理为,通过在光纤内制备微腔,微腔的两侧能够在光纤纤芯处形成 2 个反射面,光纤纤芯内的光信号经过微腔的两侧时会分别被反射回 2 束光,在光纤中形成双光束 F-P 干涉.

自制的拉力传感器实物如图 1 所示,该传感器将光纤一端拉制成超长细锥,将其插入并熔接到光纤微型腔内.假设实际 F-P 干涉长度为 L_1 ,微腔总长度为 L_2 ,插入微腔的细锥长度为 L_3 ,则 $L_3 = L_2 - L_1$.例如, L_1 和 L_2 在图 1 中分别为 138 μm 和 1 100 μm .第 m 级 F-P 干涉峰的中心波长为^[6]



图 1 自制高灵敏度光纤 F-P 干涉型拉力传感器实物图

收稿日期:2020-04-09

基金项目:哈尔滨工业大学(威海)校内基金项目(No. ITGA10002114);山东省基金项目(No. B2016M020)

作者简介:王本阳(1979—),男,山东威海人,哈尔滨工业大学(威海)理学院光电科学系讲师,博士,主要从事基础物理和理论物理的教学和科研工作. E-mail: benyangwang@hit.edu.cn



$$\lambda_m = \frac{4\pi n(L_2 - L_3)}{2m + 1}, \quad (2)$$

光纤中微腔内为空气,折射率 $n = 1.00$. 当光纤两端施加拉力 F 时,由于光纤的拉伸变形,腔长将发生改变,导致干涉峰中心波长移动. 拉力 F 引起干涉峰中心波长移动的灵敏度为

$$K = \frac{\partial \lambda_m}{\partial F} = \frac{\partial \lambda_m}{\partial L_2} \frac{\partial L_2}{\partial F} = \frac{4\pi n}{2m + 1} \frac{\partial L_2}{\partial F} = \frac{\lambda_m}{L_1} \frac{\partial L_2}{\partial F}. \quad (3)$$

根据杨氏模量 E 的定义式 $E = \frac{(\partial F/A)}{(\partial L_2/L_2)}$, 这里 A 为横截面,则该拉力传感器的峰值波长漂移的应变力灵敏度是

$$K = \frac{\partial \lambda_m}{\partial F} = \frac{\lambda_m L_2}{AE L_1}. \quad (4)$$

由式(4)可知,当 F-P 干涉谱中的单频光作为入射光(1 550 nm),应变力灵敏度的值与 L_2/L_1 成正比. 通过实验测量图 1 传感器的应变力灵敏度约为 18.06 nm/N^[6]. 因此当拉力导致光纤 F-P 干涉腔的腔长发生变化,反射光的干涉谱,即干涉峰的位置会发生变化,反映在干涉谱上某波长附近的光强会发生变化. 此时利用光电探测器将光信号转变为电信号,电信号通过放大后可以看到拉力变化时输出电压也相应发生变化.

2 实验装置

高灵敏度光纤 F-P 干涉型拉力传感器的一端通过光纤环形器和单频激光器、拉力信号解调系统相连,另一端连接吊环. 一盛水的玻璃皿放在可通过螺旋测微器旋钮调节高度的平台上,使吊环悬于玻璃皿正上方. 通过调节平台的高度进行实验. 拉力信号解调系统利用光电探测器测量环形器输出的干涉光谱,数据采集软件部分用 LabVIEW 编程来实现数据自动采集. 整体实验装置原理图如图 2 所示.

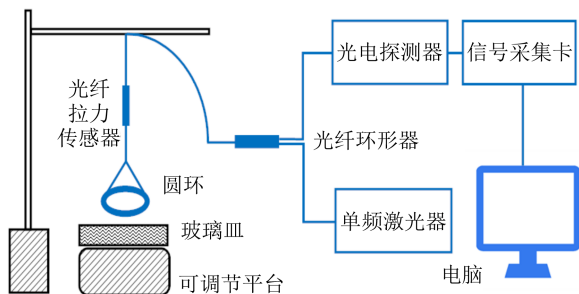


图 2 基于光纤拉力传感器的测量装置原理图

3 实验测量和数据处理

整机预热 15 min 以后,对力敏传感器进行定标. 在加砝码前首先对仪器调零,然后在力敏传感器上分别加 0.2~7.0 g 砝码,测出相应的电压输出值. 测量传感器灵敏度的定标曲线如图 3 所示. 从图 3 中可看到输出电压和拉力成正比. 通过最小二乘法对实验测量点做拟合得到传感器的灵敏度 k 为 64.5 mV/N,相关系数为 0.994.

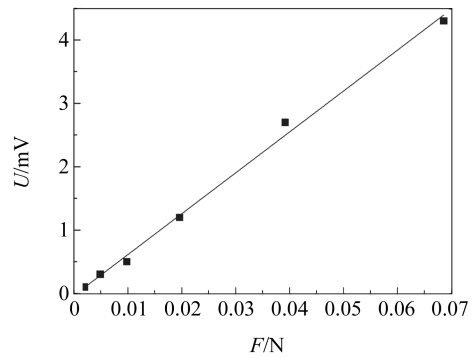


图 3 输出电压和拉力的定标曲线

以测量室温下水的液体表面张力系数为例. 调节玻璃皿下的升降台,使其缓慢上升,将圆环全部浸没于水中,反向调节升降台,使液面逐渐下降,这时金属圆环和液面间形成环形液膜. 继续下降液面,测出环形液膜即将拉断前瞬间电压读数值 U_1 和液膜拉断后瞬间电压读数值 U_2 . 实验过程中输出电压随时间的变化曲线如图 4 所示. 图 4 中右侧的波浪线主要是由于液膜断裂后,金属环上下振动导致的. 这里 $k = 64.5$ mV/N, $U_1 = 3.08$ mV, $U_2 = 1.74$ mV, $D_1 = 44.74$ mm, $D_2 = 43.50$ mm. 由公式^[7-8]

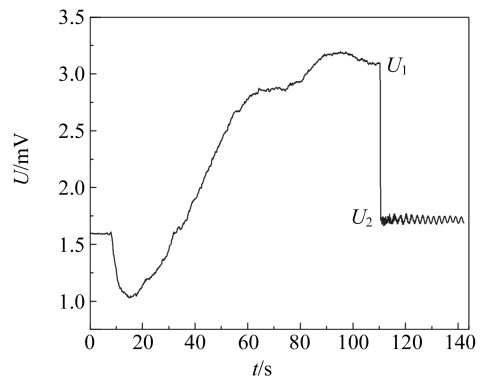


图 4 输出电压 U 随时间 t 的变化曲线

$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{\pi k(D_1 + D_2)}, \quad (5)$$

重复测量后可以得到水在室温下的表面张力系数为 (0.076 ± 0.001) N/m, 平均值与 20 °C 时的标准值 0.073 N/m^[9]相比, 相对偏差为 4.1%。

4 结束语

拉脱法中, 利用法布里-珀罗干涉原理设计高灵敏度光纤拉力传感器, 结合单频激光器、光纤环形器、光功率计和信号采集卡进行信号解调。测量得到传感器电压相对于拉力的灵敏度约为 64.5 mV/N, 室温下水的表面张力系数为 (0.076 ± 0.001) N/m, 平均值与 20 °C 标准值的相对偏差约为 4.1%。利用光纤 F-P 干涉型拉力传感器在实际微应力监测领域例如建筑物健康监测、铁轨应变监测等也具有应用前景。

参考文献:

- [1] 王祥委, 段娟娟, 彭朝阳. 液体表面张力测定(拉脱法)的误差分析与修正[J]. 物理通报, 2016(10): 67-70.
- [2] 罗泽, 梁开明, 张宏林, 等. 拉脱法测量液体表面张力系数实验的研究与设备改进[J]. 通信电源技术, 2019, 36(5): 126-127.
- [3] 林仁荣, 邱祖强, 陈丽敏, 等. 拉脱法测量液体表面张力系数的改进[J]. 大学物理, 2017, 36(2): 39-42.
- [4] 焦丽凤, 陆申龙. 用力敏传感器测量液体表面张力系数[J]. 物理实验, 2002, 22(7): 40-42.
- [5] 杨能勋, 王晓红, 崔凯. 拉脱法测量液体表面张力系数实验装置的改进[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 38-40, 44.
- [6] Liu Y, Lang C P, Wei X C, et al. Strain force sensor with ultra-high sensitivity based on fiber inline Fabry-Perot micro-cavity plugged by cantilever taper[J]. Opt. Express, 2017, 25(7): 7797-7806.
- [7] 秦平力, 余雪里, 张昱. 拉脱法测量液体表面张力系数实验中影响实验误差的因素及几个被忽略问题[J]. 大学物理实验, 2019, 32(4): 92-95.
- [8] 苏启录. 拉脱法测量液体表面张力系数 α 实验误差分析[J]. 大学物理实验, 2013, 26(2): 85-87.
- [9] 文军, 李芳菊. 基于表面张力的水质检测与分析[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(4): 37-40, 52.

Measuring liquid surface tension coefficient based on optical fiber tension sensor

WANG Ben-yang, MAO Xiao-qin, LIU Yi,
QU Wen-ge, WANG Xin-shun, LANG Chang-peng
(Department of Optoelectronic Science, School of Science,
Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China)

Abstract: Based on Fabry-Perot (F-P) interference type tension sensor, the liquid surface tension coefficient was measured by the pull-off method. The designed optical fiber tension sensor combined with single frequency laser, fiber circulator, and photodetector could make the output voltage proportional to the pulling force, and its sensitivity was about 64.5 mV/N. The relative error of the measured liquid surface tension coefficient of water at room temperature was 4.1%.

Key words: liquid surface tension coefficient; optical fiber; tension sensor; pull-off method

[责任编辑:尹冬梅]