

文章编号: 1001-3806(2010)01-0067-04

基于远场干涉测量棱镜内气泡直径

李建民¹, 王蕴芬², 田野¹, 牛振凤¹, 刘伟东¹, 韩冰¹, 刘钰¹, 马艳丽¹

(1. 河北北方学院 物理系, 张家口 075000; 2. 河北建筑工程学院 机械系, 张家口 075024)

摘要: 为了测量固态透明物质中气泡直径, 采用远场干涉的方法测量玻璃棱镜中气泡直径。平行激光束照射到棱镜中的气泡时, 在远场将产生圆环状干涉条纹, 利用气泡远场干涉模型进行理论分析, 并用分光仪对三棱镜外干涉条纹进行测量, 取得一组关于干涉条纹角位置的数据, 由折射定律换算为棱镜内干涉条纹角位置, 进而使用计算机软件 MATHEMATICA 计算出气泡直径。结果表明, 测量相对差为 0.2%, 所测气泡直径的方向应为入射激光束的方向, 对气泡在载物台上方的位置要求不严格; 对测量方法进行适当改变, 亦可测量其它形状透明介质内的气泡直径。这一测量结果对透明物质中气泡形状的研究是有帮助的。

关键词: 测量与计量; 气泡直径; 远场干涉; 棱镜

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.019

Measurement of bubble diameter in a prism based on far-field interference

LI Jian-min¹, WANG Yun-fen², TIAN Ye¹, NIU Zhen-feng¹,

LIU Wei-dong¹, HAN Bing¹, LIU Yu¹, MA Yan-li¹

(1. Department of Physics, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China; 2. Department of Machine, Hebei Institute of Architectural Civil Engineering, Zhangjiakou 075024, China)

Abstract: In order to measure bubble diameter in transparent solid materials, the bubble diameter in the prism is measured by means of far-field interference. When parallel laser beam is irradiating the bubble in the prism, circular interference fringe is produced in the far-field. It is analyzed based on the far-field theoretical model. The interference fringes outside the prism is measured with spectrometer and a set of data of angle position of interference fringes is obtained and converted into the angle position of interference fringes inside the prism according to Snell's law and then bubble diameter is calculated with computing software MATHEMATICA. The results showed that the relative error is 0.2%, the measured diameter direction is incident laser beam direction and the demand for the bubble location over platform is not strict. When appropriate change in measurement method is made, the bubble diameter of transparent medium in other shape can also be measured. The result is helpful for studying the shape of the bubble in a transparent material.

Key words: measurement and metrology; bubble diameter; far-field interference; prism

引言

固体或液体物质中存在气泡是普遍的现象, 用光的远场干涉原理对气泡直径进行测量是一种新的方法。当平行激光束照射到透明物质中的气泡时, 在远场产生干涉并形成内密外疏且干涉级内高外低的圆环状干涉条纹^[1]。远场干涉法测量气泡直径的特点是, 通过测量干涉条纹的角位置, 进而求出气泡在入射激光束方向(或称激光穿透方向)的直径, 而显微成像类方法测量与透射照明光束垂直方向的直径。

有关气泡的研究涉及材料、化工、舰船尾流等诸多

领域, 目前已有的气泡直径光学测量方法大多集中于使用成像或视频技术^[2-3]、光通过微气泡时的散射^[4-6]、激光全息术^[7-9]等。干涉测量法的引入为透明介质中气泡直径的检测提供了新方法。由于干涉法测量的是干涉条纹角位置, 很容易使用 CCD 等光电器件接收条纹图像并使用计算机进行处理。

1 气泡远场干涉模型^[1]

如图 1 所示, 平行激光束照射到半径等于 r 的气泡上, 泡外介质折射率为 n_1 , 泡内介质折射率为 n_2 , 一近轴光线(入射角 i_1 小于临界角)入射于气泡界面 a 点, 折射角为 i_2 , 经界面两次折射后光线 $a''b''$ 最终以折射角 i_1 出射; 一远轴光线(入射角大于临界角)入射于气泡界面 a' 点, 全反射光线 $a'b'$ 与 $a''b''$ 平行出射, 2α 为出射光相对于入射光的偏向角, 若 n_1 与 n_2 已知, 干

作者简介: 李建民(1956-), 男, 副教授, 从事光学、物理测量技术的研究及教学工作。

E-mail: ljmx318@tom.com

收稿日期: 2008-11-20; 收到修改稿日期: 2009-04-13

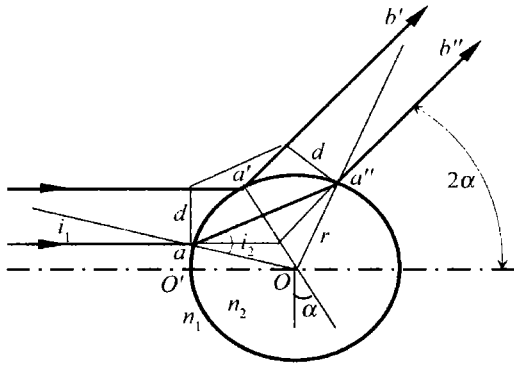


Fig.1 Diagram of bubble far-field interference

涉场中任意两级差为 N 的相干干涉条纹之偏向角 $2\alpha_1$ 与 $2\alpha_2$ 可测, 则气泡直径 D 可表示为:

$$D = N\lambda / [\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2\cos\alpha_1} - n_1\sin\alpha_1 - \sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2\cos\alpha_2} - n_1\sin\alpha_2] \quad (1)$$

式中, λ 为真空中的波长。

如果在图 1 中气泡右侧放置一凸透镜且与气泡共轴, 则在凸透镜右侧焦平面上, 必然呈现以 OO' 为轴内密外疏且干涉级内高外低的圆环状干涉条纹。

2 棱镜内气泡直径的干涉法测量

2.1 测量装置及调整

测量装置主要由分光仪、激光器组成, 装有数学计算工具软件 MATHEMATICA 的计算机作为辅助装置, 可加快运算速度减小工作量。

测量前应先对分光仪进行调整, 望远镜应为准直状态且其光轴与仪器中央竖直主轴垂直, 载物台上的三棱镜主截面与仪器中央竖直主轴垂直, 平行激光束与仪器中央竖直主轴垂直且照射到三棱镜光学面上, 激光束通过三棱镜时处于最小偏向角状态, 且在棱镜中照射到待测气泡上(见图 2)。在棱镜左侧出射光方向可用望远镜观察干涉条纹, 由于望远镜相对孔径较小,

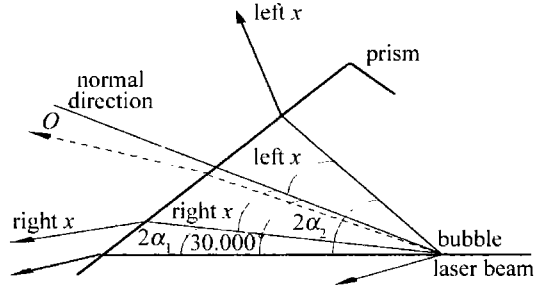


Fig.2 Diagram of position of interference fringes

仅能看见圆环状干涉条纹很小的部分, 看上去很像是直条纹(见图 3)。

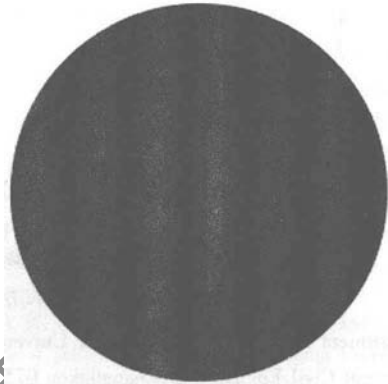


Fig.3 Interference fringes in the telescope

经测量棱镜顶角为 $60^\circ 0' 0''$, 棱镜折射率 $n_1 = 1.7349$ ($\lambda = 632.8\text{nm}$, 最小偏向角法测得); 空气折射率为 1.0003; 所使用分光仪型号为 FGY-01, 最小分度 $30''$; He-Ne 激光器, $\lambda = 632.8\text{nm}$ 。

2.2 干涉条纹角位置的记录

由(1)式计算气泡直径时仅需知道干涉条纹级差 N , 在用分光仪记录某一级相长干涉条纹的角位置时, 不必知道这一级干涉条纹的真实级数, 可令距离棱镜光学面法线最近的一条干涉条纹为 0 级, 法线左侧右侧的干涉条纹级数在记录时标为 left x 和 right x , 条纹记录间隔为 10 级, 见图 2 和表 1。为便于后面计算,

Table 1 Angular position of interference fringes

normal direction	left 50	left 40	left 30	left 20	left 10
$148^\circ 10' 0''$	$188^\circ 32' 0''$	$184^\circ 26' 0''$	$173^\circ 18' 0''$	$163^\circ 57' 30''$	$155^\circ 37' 0''$
0	right 10	right 20	right 30	right 40	right 50
$147^\circ 58' 0''$	$140^\circ 52' 0''$	$134^\circ 8' 30''$	$127^\circ 41' 0''$	$121^\circ 22' 0''$	$115^\circ 7' 30''$

表中还需记录法线方向。

2.3 数据变换

原始数据还不能代入(1)式进行计算, 先变换为棱镜左外侧的折射角, 计算方法是每个数据都和法线方向相减即为折射角。

再将折射角根据折射定律变换为棱镜左光学面内的入射角, 为计算方便此次变换仅使用度作角度单位,

原有的分秒值都变换为 $^\circ$, 见表 2。

由图 2 可知, 棱镜左表面法线方向与棱镜内激光束直射方向(即图 1 中光轴 $O'O$ 方向)夹角为 30.000° , 将表 2 中所有数据都加 30.000° 得到玻璃内部一组级差为 10 的 2α 值, 再除 2 即可得到 α , 见表 3。表 3 中各 α 的下标 150 和 r40 等对应表 1 和表 2 中的角位置 left 50 和 right 40 等。

Table 2 Incident angle of interference fringes

normal direction	left 50	left 40	left 30	left 20	left 10
0°	26.352°	19.935°	14.170°	9.024°	4.286°
0	right 10	right 20	right 30	right 40	right 50
-0.115°	-4.200°	-8.029°	-11.636°	-15.062°	-18.316°

Table 3 α values of interference fringes

α_{150}	α_{140}	α_{130}	α_{120}	α_{110}	α_0	α_{r10}	α_{r20}	α_{r30}	α_{r40}	α_{r50}
28.176°	24.968°	22.085°	19.512°	17.143°	14.943°	12.900°	10.986°	9.182°	7.469°	5.842°

2.4 气泡直径计算

由表 3 中的数据利用(1)式可计算气泡直径 D , 为加快运算速度, 使用数学计算软件 MATHEMATICA 进行计算。由左 50 级到右 50 级共 11 个角位置, 可计算

出; $N = 10, 10$ 组结果数据; $N = 20, 9$ 组结果数据; $N = 30, 8$ 组结果数据……; $N = 100, 1$ 组结果数据, 如表 4 所示。对所有平均值再取平均为总平均值 $D_t = 0.1527\text{mm}$ 。

Table 4 Calculated values of the bubble diameter

No.	ordinal d/mm					d_a/mm
10	$D_{r50-r40} = 0.1531$	$D_{r40-r30} = 0.1528$	$D_{r30-r20} = 0.1530$	$D_{r20-r10} = 0.1528$	$D_{r10-0} = 0.1526$	0.1528
	$D_{0-110} = 0.1521$	$D_{110-120} = 0.1527$	$D_{120-130} = 0.1535$	$D_{130-140} = 0.1516$	$D_{140-150} = 0.1535$	
20	$D_{r50-r30} = 0.1529$	$D_{r40-r20} = 0.1529$	$D_{r30-r10} = 0.1529$	$D_{r20-0} = 0.1527$	$D_{r10-110} = 0.1523$	0.1527
	$D_{0-120} = 0.1524$	$D_{110-130} = 0.1531$	$D_{120-140} = 0.1525$	$D_{130-150} = 0.1525$		
30	$D_{r50-r20} = 0.1529$	$D_{r40-r10} = 0.1528$	$D_{r30-0} = 0.1528$	$D_{r20-110} = 0.1525$	$D_{r10-120} = 0.1525$	0.1527
	$D_{0-130} = 0.1528$	$D_{110-140} = 0.1526$	$D_{120-150} = 0.1528$			
40	$D_{r50-r10} = 0.1529$	$D_{r40-0} = 0.1528$	$D_{r30-110} = 0.1526$	$D_{r20-120} = 0.1526$	$D_{r10-130} = 0.1527$	0.1527
	$D_{0-140} = 0.1525$	$D_{110-150} = 0.1528$				
50	$D_{r50-0} = 0.1529$	$D_{r40-110} = 0.1526$	$D_{r30-120} = 0.1526$	$D_{r20-130} = 0.1527$	$D_{r10-140} = 0.1525$	0.1527
	$D_{0-150} = 0.1527$					
60	$D_{r50-110} = 0.1527$	$D_{r40-120} = 0.1527$	$D_{r30-130} = 0.1529$	$D_{r20-140} = 0.1525$	$D_{r10-150} = 0.1526$	0.1527
70	$D_{r50-120} = 0.1527$	$D_{r40-130} = 0.1528$	$D_{r30-140} = 0.1526$	$D_{r20-150} = 0.1527$		0.1527
80	$D_{r50-130} = 0.1528$	$D_{r40-140} = 0.1526$	$D_{r30-150} = 0.1527$			0.1527
90	$D_{r50-140} = 0.1527$	$D_{r40-150} = 0.1527$				0.1527
100	$D_{r50-150} = 0.1528$					0.1528

3 分析与讨论

3.1 测量气泡沿激光束入射方向的直径

由图 1 可知, 沿入射激光束方向 ($2\alpha = 0$) 全反射光束与折射光束光程差最大, 直径 D 的大小对应着条纹的密疏, 由此可知, 这里测量的是气泡沿激光束入射方向 (或称激光穿透方向) 的直径。而用显微成像技术类所测气泡直径方向与透射照明光束方向垂直。这是远场干涉法测气泡直径的特点。

3.2 气泡位置的不同不影响测量结果

一般来说, 将棱镜放置到载物台上时, 总是希望待测气泡在棱镜出射光方向的视位置应在分光仪中央竖直轴上, 测量中对此并无严格要求, 因为远场干涉和远场衍射一样当分波阵面器件 (单缝、光栅等) 沿着或垂

直于入射光束方向移动时, 远场 (这里指望远镜焦平面处) 的干涉或衍射条纹是不动的^[10]。

3.3 对测量结果的分析

3.3.1 测量结果的不确定范围 对表 4 中数据进行分析可知: 条纹间隔值 N 愈小, 则计算出之气泡直径数据个数愈多, 结果数据的不确定范围较大, $N = 10$ 时, 计算得气泡直径数据个数为 10 个, 气泡直径的不确定范围为 $0.1516\text{mm} \sim 0.1536\text{mm}$ 。条纹间隔值 N 愈大则计算出之气泡直径数据个数愈少, 结果数据的不确定范围较小, $N = 100$ 时仅有 1 个气泡直径数据。但各平均值差别很小, 即各组数据平均值之间具有良好的收敛性或者说平均值的不确定范围很小, 在 $0.1527\text{mm} \sim 0.1528\text{mm}$ 之间。各平均值在总平均值中的权重应是相等的, 其总平均值为 0.1527mm 。

3.3.2 引起测量误差的因素及分析 影响测量结果精准程度的因素主要有:分光仪精准度、分光仪瞄准误差、三棱镜折射率误差、衍射对干涉的影响等。

(1)由仪器误差引起的不确定范围。由分光仪说明书知此仪器的测量误差为 $30''$,以 $N=100$ 级进行误差传递分析,表1中分光仪测量从左50到右50级条纹的角度变化 73.408° ,折算为表3中左50到右50级 α 的变化为 22.334° ,仪器测量误差在(1)式中应以 $30'' \times 22.334/73.408 \approx 0.003^\circ$,根据(1)式,当 α_1 与 α_2 的测量误差方向相反时产生最大误差传递为 0.1% ,或者说由仪器引起的不确定范围应为 $\pm 0.1\%$,这应是测量时由仪器误差引起的不确定范围。

(2)分光仪瞄准误差。分光仪瞄准误差主要影响(1)式中的 N 值,当对干涉条纹(明纹极大)瞄准不准确时,使 N 值不是准确的整数而产生偏差,由表1中所测的100级干涉条纹对应测量角为 73.408° ,每级条纹平均为 0.734° ,望远镜的放大倍数为7倍,则一级干涉条纹的视角宽为 5.138° ,远大于眼睛的分辨角,当刻线从明纹中央向某一侧产生0.1倍明纹宽的偏移时,人眼能判别,则此偏移为0.05级条纹宽,如测 $2\alpha_1$ 与 $2\alpha_2$ 的瞄准偏移方向相反时则对(1)式中的 N 值产生0.1级的误差。 $N=100$ 时由瞄准误差传递给气泡直径的误差为 $\pm 0.1\%$ 。

(3)测量总误差。经过计算棱镜折射率误差和衍射对干涉的影响对气泡直径产生的误差传递相对较小可略,由上述分析可知,测量总误差应为(1)和(2)两项误差之和为 $\pm 0.2\%$,这也是测量结果的不确定范围。

3.3.3 与阿贝比长仪测量直径的对比 为对比远场干涉法测量气泡直径的精准程度,选用不同的测量方法将其结果对比。这里用阿贝比长仪对该气泡直径进行测量,对所测12个数据取平均值 $D=0.1530\text{mm}$ 。干涉法 $D=0.1527\text{mm}$,则相对差为 0.2% 。

4 结论

由远场干涉法测量气泡直径是一种基于气泡远场

干涉模型的新方法,利用远场干涉模型并使用分光仪和激光器对棱镜内气泡直径进行测量,可获得较为精准的测量结果。特别是测量激光束穿透方向气泡直径的特点可对其它方法形成互补,尤其是对气泡变形的研究提供了参考方法。对测量方法进行适当调整,此装置亦可用于测量其它形状规则透明体中气泡的直径。还可通过多次测量对多个气泡尺寸进行统计。由于测量的是干涉条纹,适合用CCD等光电器件进行记录并连接计算机快速处理。此方法还可用于非可见光波段。

参考文献

- [1] LI J M, YANG F, WEI J Y, *et al.* Far field interferometric analysis and application of bubble [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1031-1034 (in Chinese).
- [2] ZHAO X F, HE J H, WEI M Zh, *et al.* A new method of getting wake character based image process technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(3): 443-446 (in Chinese).
- [3] ZHANG R Sh, ZHENG Y, CHENG Y Sh. Study of measuring micro-bubble diameter [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(2): 91-95 (in Chinese).
- [4] JI Y J, HE J H, CHEN L Y, *et al.* Scatter light of bubble and the distribution of bubble size [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 414-416 (in Chinese).
- [5] WANG J A, JIANG X Zh, MA Zh G, *et al.* Study on back light-scattering property of bubbles in ship wake [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 205-218 (in Chinese).
- [6] JI Y J, MA X, HE J H, *et al.* The influence of bubble on the transmitting of light in wake [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(5): 626-628 (in Chinese).
- [7] XIE J J, LU Y, PAN Q M, *et al.* Holography application in characterization of dynamic bubbles of foam-DV in cyclohexane/PDMS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(2): 159-164 (in Chinese).
- [8] LU Q N, GE B Hh, ZHANG Y M. Digital microscopic image plane holography [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(4): 475-478 (in Chinese).
- [9] LI Z Y, LI Z R, YE Y, *et al.* Micro-jet particle field measurement using in-line Fraunhofer holography [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 45-47 (in Chinese).
- [10] YE Sh H. Laser application in measuring in precision [M]. Beijing: China Machine Press, 1980: 140-144 (in Chinese).