

文章编号: 0258-7025(2009)06-1508-04

基于远场干涉测平板玻璃内的气泡直径

李建民¹ 王蕴芬² 冯天宝¹ 袁志成¹ 宋元军¹ 陈桂强¹ 储润增¹

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

摘要 提出一种测量平板玻璃中气泡直径的方法。用平行 He-Ne 激光束照射平板玻璃内的气泡, 在远场产生圆环状干涉条纹。利用气泡远场干涉理论模型, 使用分光仪对平板玻璃外干涉条纹角位置进行测量, 由折射定律换算为平板玻璃内干涉条纹角位置, 进而使用计算机软件 mathematica 计算出气泡直径, 测量结果显示平板玻璃内气泡的形状为椭球。给出了快速测量气泡直径的建议。因为是远场干涉, 对气泡在载物台上方的位置要求不严格。对夫琅和费圆屏衍射条纹的干扰进行了分析, 为平板玻璃内气泡直径测量提供了一种新的方法。

关键词 测量与计量; 气泡直径; 远场干涉; 平板玻璃

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1508

Measurement of Bubble Diameter in a Flat Glass Based on Far-Field Interference

Li Jianmin¹ Wang Yunfen² Feng Tianbao¹ Yuan Zhicheng¹
Song Yuanjun¹ Chen Guiqiang¹ Chu Runzeng¹

¹Department of Physics, Hebei North University, Zhangjiakou, Hebei 075000, China

²Department of Machine, Hebei Institute of Architectural Civil Engineering, Zhangjiakou, Hebei 075024, China

Abstract A method for measurement of bubble diameter in the flat glass is presented. With parallel He-Ne laser beam irradiating the bubble, circular interference fringe is produced in the far-field. Based on the far-field theoretical model, the angle position of interference fringes outside the flat glass is measured with spectrometer and converted into the angle position of interference fringes inside the flat glass according to Snell's law and then the bubble diameter is calculated with mathematica. The measurement results indicate the bubble in the flat glass is ellipsoid. Suggestion of rapid measurement of bubble diameter is given. Because of far-field interference, the demand for the bubble location over platform is not strict. The interference caused by Fraunhofer screen diffraction fringes is analyzed and a completely new method is provided for measurement of the bubble diameter in the flat glass.

Key words measurement and metrology; bubble diameter; far-field interference; flat glass

1 引 言

当平行激光束照射到透明物质中的气泡时, 由于气泡具有分波阵面的作用, 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]。利用远场干涉可以对气泡进行相关测量。通过测量干涉条纹的角位置再利用计算工具软件 mathematic 计算出气泡在入射激光束方向(或称穿透方向)的直径。

本文探讨用远场干涉对平板玻璃中的气泡直径进行测量, 使用的是常规测角仪器分光仪(也称测角仪)。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。

有关气泡的研究涉及材料、化工、舰船尾流等诸多领域。目前已有的气泡光学测量方法大多集中于使用成像或视频技术^[2,3]、激光全息术^[4,5]及光通过

收稿日期: 2008-08-28; 收到修改稿日期: 2008-10-10

基金项目: 河北省教育厅科学研究项目(Z2006410)资助课题。

作者简介: 李建民(1956—), 男, 副教授, 主要从事光学、物理测量技术方面的研究及教学工作。

E-mail: ljmx318@tom.com

众多微气泡时的散射^[6~8]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。

2 理论模型与测量系统

2.1 气泡干涉的远场干涉模型

由图1所示,平行激光束照射到半径为 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,图1中两出射光线 $a'b'$ 与 $a''b''$ 在远场的光程差为

$$\Delta = 2r(\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2\cos\alpha} - n_1\sin\alpha). \quad (1)$$

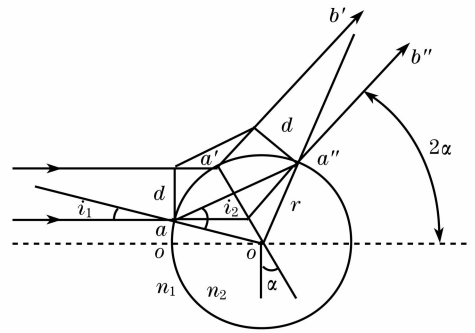


图1 气泡远场干涉示意图

Fig.1 Diagram of bubble far-field interference

如 n_1 与 n_2 已知, $2\alpha_1$ 与 $2\alpha_2$ 可测, $2\alpha_1$ 与 $2\alpha_2$ 两方向间的条纹数 N 可读出,由(1)式得气泡直径 $2r$,用 D 表示

$$D = \frac{N\lambda}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2\cos\alpha_1} - n_1\sin\alpha_1 - (\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2\cos\alpha_2} - n_1\sin\alpha_2)}, \quad (2)$$

其中 λ 为真空中的波长。

参照图1,在气泡右侧角半径 $2\alpha=0\sim 180^\circ - 2i_c$ 范围内存在远场干涉条纹, i_c 为气泡界面处的临界角。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。

由(1)式可知,光程差正比于气泡直径,观察方向相同时气泡大则条纹密,反之亦然。

2.2 测量系统

He-Ne激光器输出平行激光束照射到平板玻璃内的气泡上,分光仪测量干涉条纹角位置,电子计算机用于计算及数据处理,阿贝比长仪用来测量气泡直径以便与干涉法测量值比较。

所使用分光仪(FGY-01)最小分度为 $30''$,玻璃折射率 $n_1=1.5221$,空气折射率 $n_2=1.0003$,氦氖激光波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 。

图2为分光仪望远镜中看到的干涉条纹,由于所用望远镜相对孔径较小,所以看到的条纹近似为直条纹。

3 测量

3.1 仪器调整

使分光仪望远镜聚焦于无穷远,且使望远镜的主轴垂直于分光仪中心竖直主轴,调节激光器和平板玻璃使激光束和待测气泡与分光仪望远镜共轴,

还要使平板玻璃与激光束垂直。

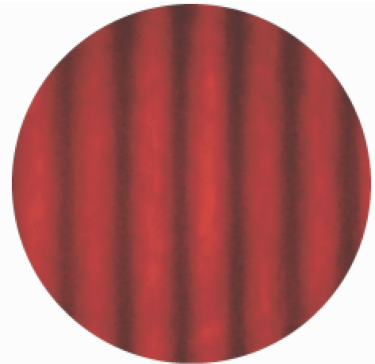


图2 望远镜中看到的干涉条纹

Fig.2 Interference fringes in the telescope

3.2 干涉条纹角位置测量

平板玻璃法线方向即激光束直射方向由分光仪读数为 $30^\circ 13' 30''$ 记录于表1。

转动望远镜可记录各级干涉条纹的角位置,由(2)式可知这里需求出 N 个连续干涉条纹的始末角位置,不必知道干涉条纹的真实级数。为方便将距法线较近且要记录的条纹级数设为0级,间隔10个条纹测量1次角位置并记录于表1。

3.3 玻璃内外角度转换

由表1中数据可求得玻璃外所测条纹角位置与平板玻璃法线方向的夹角 $2\alpha'$ 为所测条纹角位置与平板玻璃法线角位置之差。设转换为玻璃内的角度为 2α ,由折射率公式

表1 干涉条纹角位置

Table 1 Angular position of interference fringes

Normal direction			$30^{\circ}13'30''=30.225^{\circ}$								
0	$46^{\circ}49'0''$	10	$49^{\circ}6'0''$	20	$51^{\circ}29'30''$	30	$53^{\circ}57'0''$	40	$56^{\circ}32'30''$	50	$59^{\circ}20'0''$
60	$62^{\circ}17'0''$	70	$65^{\circ}25'0''$	80	$68^{\circ}49'0''$	90	$72^{\circ}29'30''$	100	$76^{\circ}29'30''$		

表2 干涉条纹的 α 值Table 2 α values of interference fringes

Ordinal	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\alpha/(^{\circ})$	5.406	6.136	6.893	7.664	8.467	9.319	10.204	11.124	12.096	13.112	14.170

$$n_1 \sin 2\alpha = n_2 \sin 2\alpha', \quad (3)$$

其中取玻璃折射率 $n_1 = 1.5221$, 空气折射率 $n_2 = 1.0003$. 求出玻璃内的角度 2α

$$2\alpha = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1} \sin 2\alpha'\right). \quad (4)$$

由(4)式可得 α 角值如表2所示,为计算方便表2以($^{\circ}$)作为角度单位。

4 计算结果及分析

4.1 气泡直径计算

利用直径公式(2)式及计算工具软件

表3 气泡直径的计算值

Table 3 Calculated values of the bubble diameter

N	Ordinal	D/mm	Ordinal	D/mm	Ordinal	D/mm	Ordinal	D/mm	Ordinal	D/mm	Average D/mm
10	D_{0-10}	0.4041	D_{10-20}	0.4016	D_{20-30}	0.4069	D_{30-40}	0.4036	D_{40-50}	0.3939	0.3963
	D_{50-60}	0.3935	D_{60-70}	0.3935	D_{70-80}	0.3880	D_{80-90}	0.3877	D_{90-100}	0.3898	
20	D_{0-20}	0.4027	D_{10-30}	0.4042	D_{20-40}	0.4052	D_{30-50}	0.3987	D_{40-60}	0.3937	0.3961
	D_{50-70}	0.3935	D_{60-80}	0.3907	D_{70-90}	0.3879	D_{80-100}	0.3887			
30	D_{0-30}	0.4042	D_{10-40}	0.4040	D_{20-50}	0.4014	D_{30-60}	0.3970	D_{40-70}	0.3936	0.3963
	D_{50-80}	0.3917	D_{60-90}	0.3897	D_{70-100}	0.3885					
40	D_{0-40}	0.4041	D_{10-50}	0.4014	D_{20-60}	0.3994	D_{30-70}	0.3961	D_{40-80}	0.3922	0.3962
	D_{50-90}	0.3904	D_{60-100}	0.3897							
50	D_{0-50}	0.4020	D_{10-60}	0.3998	D_{20-70}	0.3982	D_{30-80}	0.3944	D_{40-90}	0.3913	0.3960
	D_{50-100}	0.3905									
60	D_{0-60}	0.4005	D_{10-70}	0.3988	D_{20-80}	0.3965	D_{30-90}	0.3933	D_{40-100}	0.3910	0.3960
70	D_{0-70}	0.3995	D_{10-80}	0.3975	D_{20-90}	0.3877	D_{30-100}	0.3928			0.3944
80	D_{0-80}	0.3980	D_{10-90}	0.3960	D_{20-100}	0.3880					0.3940
90	D_{0-90}	0.3969	D_{10-100}	0.3953							0.3961
100	D_{0-100}	0.3995									0.3995

相对差 $\eta = 6.8\%$ 较大并非测量误差大,而是测量方向不同所致。干涉法测量气泡垂直于平板方向的直径,阿贝比长仪测量气泡平行于平板方向的直径。 $\bar{D} > D_t$ 说明两个方向直径不同,而用干涉法测棱镜内气泡直径的相对差小于 1% ^[1],说明平板玻璃内气泡应为垂直于玻璃平面方向为对称(短)轴的旋转椭球。从表3数据还可看出当 N 值相同时, α 值越大则 D 值越小,这也说明气泡是椭球。

使用 CCD 记录望远镜焦平面处干涉条纹并将分光仪活动臂固定,再连接计算机对干涉图形进行

mathematic,取 N 为不同值,计算气泡直径 D ,如表3所示。

对表中各平均值取总平均 $D_t = 0.3961 \text{ mm}$ 。

4.2 测量结果分析

用精确测量长度的仪器阿贝比长仪对同一气泡的直径进行多次测量,测得25组直径值取平均为 $\bar{D} = 0.4248 \text{ mm}$

$$\text{相对差为 } \eta = \frac{\bar{D} - D_t}{\bar{D}} \times 100\%. \quad (5)$$

将上述数据代入(5)式求得 $\eta = 6.8\%$

二值化处理、数据采集和计算可快速输出测量结果,可输出垂直于玻璃平板方向的平均直径 D_t 。

一般来说将平板玻璃放置到载物台上时,总是希望待测气泡在出射光方向的视位置应在载物台中心上方,或者说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^[9]。

测量中产生测量误差的最主要原因是激光束经

过气泡时在远场产生的衍射——夫琅和费圆屏衍射,由巴比涅原理知在远场(焦平面上)所形成的衍射条纹与圆孔衍射相同。其条纹特点是中央有一个高辐照度的圆形亮斑——艾里斑。在衍射条纹中 91% 的光能量在第 2 暗环之内^[10]。由一阶贝塞耳函数的渐近公式^[11]可求得当衍射角 $\theta=2\alpha=10.000^\circ$ 时,其衍射光强极大值 I 与 $\theta=0$ 时艾里斑中心光强 I_0 的关系为 $I=1.4\times 10^{-8}I_0$ (仅本文适用),由 mathematic 可求得衍射条纹约为 177 级,这说明衍射条纹所引起的干扰已很微弱,控制 $2\alpha>10.000^\circ$ 。

由分光仪说明书知此仪器的测量误差为 $30''$,根据(2)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以本文为例为 0.2%。或者说由仪器引起的不确定范围应为 $\pm 0.2\%$,这应是测量时由仪器误差引起的最大不确定范围。

除仪器测量误差外,上面提到的衍射干扰、平板两表面的不平行性、平板两表面的不平度、气泡和平板界面处多次折反射引起的背景干扰、仪器调整水平等诸多因素都会增大测量的不确定范围。这必将影响到测量的精准程度及重复性和再现性,对多种产生测量误差的因素都作详细分析会使文章冗长且都分析到位也是困难的。这里选择用实验的方法来说明,其做法为:选择试样平板玻璃上的一个气泡,将玻璃沿平板平面方向每旋转 90° 读测一组数据,这样可读测 4 组数据,将平板玻璃翻转 180° 后又可读测 4 组数据,共 8 组数据。计算得该气泡直径的平均值分别为 0.3981 mm, 0.3947 mm, 0.3961 mm, 0.3951 mm, 0.3925 mm, 0.3910 mm, 0.3998 mm 和 0.3988 mm,上面数据仅是其中一组(第 3 组),对此 8 个数据取平均值 D 有 $D=0.3958$ mm,此 8 个数据中与 D 偏差最大的为 0.3910 mm,最大相对偏差为

$$\Psi = (0.3958 - 0.3910)/0.3958 = \pm 1.2\%,$$

Ψ 值表述了这 8 个数据与 D 值之间的最大不确定范围,同时也对此测量方法的重复性和再现性给出了定量描述。相对偏差 Ψ 值包括了所有上述提到和没提到的因素对不确定度的影响。

5 结 论

通过对远场干涉条纹角位置的测量进而求得气泡直径,干涉条纹的疏密对应着气泡直径的大小,可对单个气泡进行测量研究亦可通过多次测量对多个气泡尺寸进行统计。利用远场干涉模型并使用分光仪和激光器对平板玻璃内气泡直径进行测量,计算出垂直于平板方向气泡直径的平均值,平板玻璃内

气泡形状为以垂直于平板方向为对称轴的旋转椭球,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。为测量平板玻璃中气泡直径增加了一种新方法,此方法还可用于非可见光波段。

参 考 文 献

- Li Jianmin, Yang Fu, Wei Jianyu *et al.*. Far field interferometric analysis and application of bubble[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1301~1304
李建民,杨富,魏建宇等. 气泡的远场干涉分析和应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1301~1304
- Zhang Rongsheng, Zheng Yuan, Cheng Yunshan. Study of measuring micro-bubble diameter[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, **19**(2):91~95
张荣生,郑源,程云山. 微小气泡粒径的测量研究[J]. *实验流体力学*, 2005, **19**(2):91~95
- Zhao Xiaofei, He Junhua, Wei Mingzhi *et al.*. A new method of getting wake character based image process technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):443~446
赵晓飞,何俊华,韦明智等. 一种基于图像处理技术获取尾流特性的新方法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3):443~446
- Xie Jianjun, Lu Yang, Pan Qinmin *et al.*. Holography application in characterization of dynamic bubbles of Foam-DV in cyclohexane/PDMS[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(2):159~164
谢建军,鲁阳,潘勤敏等. 激光全息在环己烷/PDMS体系起泡脱挥气泡场中的应用[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(2):159~164
- Lü Qieni, Ge Baozhen, Zhang Yimo. Digital microscopic image plane holography[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(4):475~478
吕且妮,葛宝臻,张以谟. 数字显微像面全息技术研究[J]. *光子学报*, 2006, **17**(4):475~478
- Zhao Weijiang, Su Liping, Ren Deming *et al.*. Measurement on the angular scattering properties of wake bubbles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):744~747
赵卫疆,苏丽萍,任德明等. 尾流气泡激光散射的测量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):744~747
- Zhang Xiaohui, Ge Weilong, Zhu Donghua. Research on torpedo wake homing by lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1355
张晓晖,葛卫龙,朱东华. 鱼雷激光尾流自导方法的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11):1355
- Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):647~651
李微,杨克成,张晓晖等. 水中气泡上的体散射函数的模拟与计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5):647~651
- Ye Shenghua. *Laser Application in Measuring in Precision*[M]. Beijing:China Machine Press, 1980. 140~144
叶声华. *激光在精密计量中的应用*[M]. 北京:机械工业出版社, 1980. 140~144
- Eugene Hecht. *Optics*[M]. First Edition, Qin Kecheng Transl., Beijing: People's Education Press, 1979. 720~726
Eugene Hecht. *光学*[M]. 第 1 版, 秦克诚译, 北京:人民教育出版社, 1979. 720~726
- Math Teaching and Research Group of Nanjing Engineering College. *Mathematical Physics Equation and Special Function* [M]. Beijing: People's Education Press, 1978. 114~115
南京工学院数学教研组. *数学物理方程与特殊函数*[M]. 北京:人民教育出版社, 1978. 114~115