文章编号:1000-5773(2008)04-0384-05

VISAR 条纹常数的检测方法*

马 云,张 林,彭其先,王 翔,李剑峰,蔡灵仓,
李加波,汪小松,翁继东,陈 宏

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621900)

摘要:提出了 4 种可检测 VISAR 条纹常数的方法。在这 4 种方法中,DISAR 和 VISAR 的混合测试系统对 VISAR 条纹常数的测定精度高,适用范围广,是一种普适方法。在不具备 DISAR 仪器以及 DISAR、VISAR 混合测试技术的条件下,也可以通过 VISAR 延迟时间的测定、加窗熔石英对称碰撞产生的相对标准速度源以及标检过的 VISAR 仪器对 VISAR 条纹常数进行检测。

关键词:VISAR;DISAR;熔石英;冲击波

中图分类号:O521.3;O384 **文献标识码**:A

1 引 言

随着精密物理实验的发展,对速度剖面测量的精度要求越来越高。VISAR(Velocity Interfereometer System for Any Reflector)作为冲击波物理研究领域最重要的速度剖面测试技术,其测量精度尤为大家所关注。在众多影响 VISAR 测速精度的因素中,VISAR 条纹常数是最为重要的一个因素。在产品出厂时,厂家会给出 VISAR 精确的条纹常数。但在实际使用过程中,由于某些产品不能实现完全免调,在经一定时间使用后 VISAR 条纹常数将会发生漂移。因此,VISAR 的条纹常数应该按照计量器具相关规定进行定期标检。

对于一台装调好的 VISAR 仪器,尤其是采用透镜延迟系统的 VISAR 仪器,很难采用长度器具测定光程差的办法来对 VISAR 的条纹常数进行准确测量,因此需要寻求其它可以对 VISAR 条纹常数进行精确测量的方法。根据实验室现有的实验条件,我们提出了几种精确测量 VISAR 条纹常数的方法,在本文中将逐一介绍。

2 VISAR 条纹常数的定义

用 VISAR 测量速度剖面时,用示波器记录的条纹数变化 $F(t)$ 与样品速度 $u(t)$ 的关系[1]可表示为

$$u(t)=\frac{\lambda}{2\tau}\cdot\frac{F(t)}{(1+\delta)(1+\Delta\nu/\nu)} \tag{1}$$

式中:λ 为所用激光器的中心波长;τ 为静态情况下 VISAR 干涉仪中两支路相对延迟时间;$1+\delta$ 为干涉仪两支路中光学元件(尤其采用标准具作延迟器件时)因为折射率色散效应而引入的条纹常数修正因子;$1+\Delta\nu/\nu$ 为 VISAR 用于加窗实验测量时,窗口材料在冲击波作用下因折射率改变而引入的测速结果修正因子。$\Delta\nu/\nu$ 的大小与所用窗口材料以及窗口材料中的冲击压力和温度大小有关,在没有加窗的情况下,其值为零。

在(1)式中,$\lambda/[2\tau(1+\delta)]$ 是一个仅由 VISAR 仪器系统确定的常数,定义为 VISAR 的条纹常数 F_V

* **收稿日期**:2008-04-18;**修回日期**:2008-07-15

基金项目:中国工程物理研究院科学技术基金(2007B01003)

作者简介:马 云(1975—),男,硕士,助理研究员,主要从事冲击波物理测试技术研究. E-mail:myun102@21cn.com

$$F_V = \lambda/2\tau(1+\delta) \tag{2}$$

F_V 的物理含义为:用 VISAR 对自由面速度进行测量时,示波器记录一个条纹变化对应的速度变化量。条纹常数决定了 VISAR 测量的速度范围、速度分辨力、时间分辨力以及最后测量结果的精确度,是 VISAR 仪器最基本的也是最主要的技术参数。

3　VISAR 条纹常数检测方法

3.1　通过 τ 的测定确定 VISAR 条纹常数

根据条纹常数的定义(2)式,如果分别确定了 λ、τ、δ 3 个参数,便可计算 VISAR 的条纹常数。

λ 是 VISAR 仪器所用激光器的中心波长。对于目前国内外的 VISAR 仪器,基本上都采用半导体泵浦的固体激光器,其中心波长由激光工作介质固有能级决定。一般情况下可以直接引用厂家提供的参数,必要时也可以通过高分辨率光谱分析仪对激光器中心波长进行测定。由于激光波长测量的精度非常高,其对 F_V 测量不确定度的贡献基本可忽略。

δ 的大小与光学元件材料、所用激光器波长以及所测速度大小有关。对于采用透镜系统延迟的 VISAR 仪器,其两支路中透镜组件的折射率因素对光程差计算的影响非常微小,δ 值可直接取为零。对于采用标准具延迟的 VISAR 仪器,δ 值不可忽略。比如常用的熔石英标准具,根据其色散关系曲线[2],对目前常用的 532 nm 激光器波长而言,δ 值为 0.031 7(相当于对条纹常数有 3.17%的影响)。

τ 是 VISAR 干涉仪中两支路针对所用激光器中心波长的固有延迟时间。根据这个定义,如果采用与激光器中心波长相同的一个脉冲光输入 VISAR 干涉仪,用快响应探测系统记录 VISAR 干涉仪输出的两个脉冲时间间隔,可直接对 τ 进行测量。

测量 τ 值的实际系统如图 1 所示。由波长与 VISAR 所用激光器中心波长相同的皮秒激光器输出单脉冲光,经分束器分出一束光,由快速光电二极管(PIN)转换成电信号触发示波器,并同时监测皮秒激光器输出光脉冲波形。从分束器透过的单脉冲光经光纤送入 VISAR 仪器,并经过 VISAR 两支路形成时间间隔为 τ 的两个脉冲,然后由 VISAR 合束镜后的光纤引到快速光电探测器(如扫描相机或快速双平面二极管)记录。由于皮秒激光器输出激光的中心波长与 VISAR 所使用激光光源波长一致,因此探测器记录系统读出的两脉冲之间的时间间隔就是 VISAR 两支路的相对延迟时间 τ。

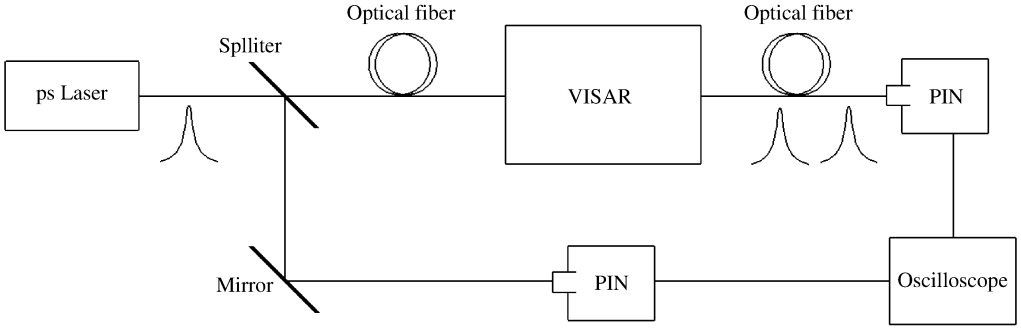


图 1　VISAR 延迟时间 τ 测试图

Fig. 1　The configuration for τ measurement

图 2 是对一台条纹常数名义值 100 m/(s·Fr)的透镜延迟 VISAR 仪器的 τ 值进行测量的实验记录结果。所用皮秒激光器脉宽 60 ps,能量约 90 μJ,波长为 532 nm。所用探测器为国产 GD-5001 快速双平面二极管,光阴极直径∅20 mm,光谱响应范围 300～1 100 nm,响应时间 $t \leqslant 60$ ps。记录示波器带宽 6 GHz,采样率 20 GSa/s,记录长度 100 μs(采样速率 20 GSa/s)。本次实验 τ 的测量结果为(2.590±0.028)ns($k=2$),VISAR 仪器的条纹常

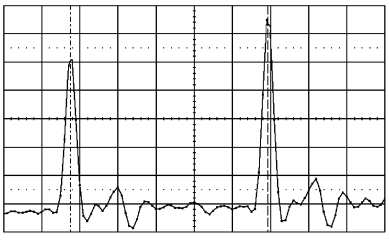


图 2　典型的 τ 值测量信号

Fig. 2　The model signal of measured τ

数为(102.7±1.1)m/(s·Fr)(k=2)。

理论上,如果脉冲激光器的脉宽足够窄,而且光电探测记录系统响应足够快、记录长度足够长,利用脉冲激光和快速光电探测系统可以测量所有不同标称值和不同光路结构 VISAR 的 τ 值,从而对其条纹常数进行标定。但是,由于受到脉冲激光器脉宽以及探测器响应时间和记录长度的限制,利用脉冲激光标定 VISAR 的条纹常数实际上受到一定的限制。如果考虑到到光学元器件的色散(尤其是光纤传输)、同步触发、环境杂光等具体实验条件的进一步影响,系统的检测范围还会继续受到限制。我们的实验结果表明,上述检测系统检测 τ 大于 0.9 ns 以上(也即小于 286 m/(s·Fr))的 VISAR(532 nm 波长,熔石英标准具延迟)条纹常数精度比较高。

3.2 利用相对标准速度源方法测定 VISAR 条纹常数

由加窗 VISAR 测速方程(1)式可知,如果给定速度源 $u(t)$,并且已知窗口折射率变化修正因子 $\Delta\nu/\nu$,那么根据 VISAR 仪器记录的条纹数 $F(t)$可计算出 VISAR 的条纹常数。

$$F_{\mathrm{V}}=\frac{\lambda}{2\tau(1+\delta)}=\frac{u(t)(1+\Delta\nu/\nu)}{F(t)} \tag{3}$$

在相同均匀材料的对称平面正碰实验中,样品波后粒子速度精确为飞片击靶速度的一半。如果精确测量到飞片碰靶的速度,则样品内部的粒子速度剖面是一个比较理想的标准速度源。

作为标准速度源的对碰实验,实验的靶材料本身必须为窗口材料。熔石英是一种常用的窗口材料,其折射率变化修正因子以及物理力学特性有比较充分的研究[3],其对称碰撞样品内部的粒子速度剖面波形呈方波,是一种较为理想的速度源。

对熔石英窗口,(3)式可进一步改写为[4]

$$F_{\mathrm{V}}=\frac{u(t)+c_1[u(t)]^{c_2}}{F(t)} \tag{4}$$

式中:c_1=0.026 00,c_2=0.668 0[5]。(4)式中对应的 $u(t)$单位为 km/s。

图 3 是我们建立的实验系统示意图,设计在一级轻气炮上进行。实验最关键的是飞片击靶速度的精确测量,其测量的精确度直接影响到 VISAR 条纹常数测定的精确度。采用 OBR 技术(Optical Beam Reflectance)对飞片击靶速度进行测量。OBR 是一种非接触式的弹丸测速系统,测量精度可达 0.5%。其原理为:在炮口处布置一个有源激光光纤探头,弹丸上刻有一定间距的 3 条窄沟槽,沟槽底部漆黑。当弹丸通过光纤探头时,由于反射率不同,3 条沟槽通过时将给出 3 个脉冲信号。依据 3 条沟槽的间距和 3 个脉冲信号之间的时间间隔,可计算弹丸的飞行速度。

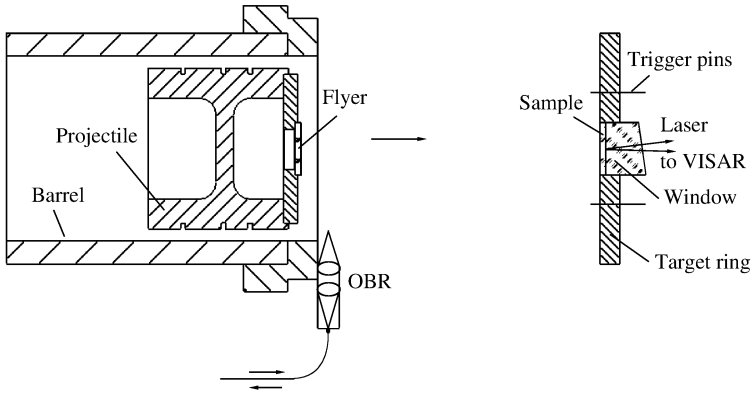


图 3 加窗对称碰撞实验系统图

Fig. 3 The experimental setup for symmetric impact with a window

实验所用飞片、样品和窗口材料皆为熔石英。熔石英材料采用气熔法工艺生产,密度 2.2 g/cm^3,杂质含量 $5\times10^{-5}\sim1\times10^{-4}$。窗口后表面镀铝内反射膜,用作多普勒反射面。样品和窗口之间用透明环氧树脂粘接,粘接层厚度约 6 μm。

图 4 是对前述同一台 100 m/(s·Fr)VISAR 的条纹常数进行测定时,实测的熔石英内部粒子速度剖面,实验给出非常典型的方波,充分显示了其作为速度源的适用性。实验给出 VISAR 条纹常数的测量结果为(102.6±0.6)m/(s·Fr)(k=2)。

加窗熔石英对称碰撞的方法比较复杂,并且由于受到气炮弹速范围、弹速测量、窗口折射率修正因子以及记录条纹数的确定等多方面因素的影响,其适用范围比较有限。就本实验室目前的实验条件而言,加窗熔石英对称碰撞方法适合于 300 m/(s·Fr) 以下 VISAR 条纹常数的检测。

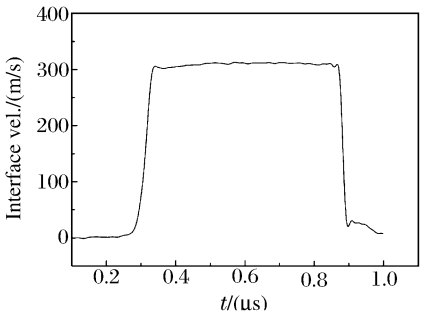


图 4　加窗熔石英对称碰撞实验结果

Fig. 4　The result of symmetric impact for fused silica with a window

3.3　用同类仪器测定 VISAR 的条纹常数

如果拥有条纹常数已经过测定校准的 VISAR 或其它经过校准的测速仪器,可以利用它们与待检 VISAR 测量同一速度,以此对待检 VISAR 的条纹常数进行测定。此方法的基本思想与利用相对标准的速度源测定 VISAR 条纹常数的方法实际上是一致的,只不过放宽了对速度源的要求。

利用同类 VISAR 测定待检 VISAR 的条纹常数时,一般要求用于测定的标准 VISAR 的条纹常数小于待检 VISAR 的条纹常数。为了实现待检 VISAR 与标准 VISAR 对同一速度源测量的要求,校准时需要将它们组成多灵敏度 VISAR 测量系统。

使用同类 VISAR 测定待检 VISAR 条纹常数的方法,由于误差的传递和积累相对较大,而且实验测试时还可能发生条纹丢失现象,因此其检测条纹常数的范围和精度都有限,一般情况下我们并不推荐此方法。

最近,发展起来了一种全新的全光纤位移干涉测速技术 DISAR(Displacement Interferometer for Any Reflector)[6],它对冲击波实验中某一段时间内的稳恒速度测量精度可达千分之几。将待检 VISAR 与 DISAR 组成混合测试系统,可对 VISAR 的条纹常数进行高精度测定。目前,DISAR 的测速能力覆盖几米每秒至 9 km/s,测速范围非常宽,因此利用 DISAR 对 VISAR 的条纹常数进行测定可在非常宽的范围内适用。图 5 给出了该测定实验的测试系统示意图,DISAR 和 VISAR 共用一个测试探头,以便对同一速度源进行测量。

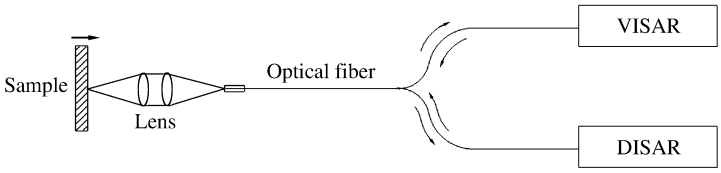


图 5　DISAR 和 VISAR 混合测试系统示意图

Fig. 5　The measurement configuration of the integrated VISAR and DISAR

图 6 是我们在冲击实验中,利用 DISAR 与 VISAR 混合测试系统对样品自由面速度剖面进行测量,并对 VISAR 的条纹常数进行测定的一个实验结果,校准后的 VISAR 和 DISAR 给出的速度剖面完全一致。其中,"MAVIS"为通过实际测量的飞片速度计算得出的自由面速度。

利用 DISAR 测定 VISAR 条纹常数的方法,是一个值得推广的普遍适用方法,其优点有二。第一,测量的精度高。因为我们总可以通过实验装置的专门设计,使 DISAR 对某一特定速度测量的精确度达到很高,从而提

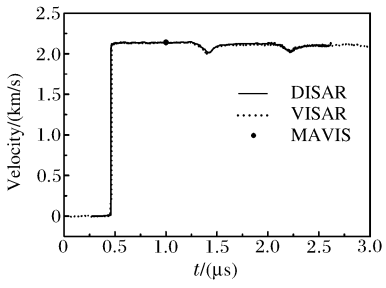


图 6　DISAR 和 VISAR 混合系统测量结果

Fig. 6　The measurement result by the integrated VISAR and DISAR

高 VISAR 条纹常数测量的精确度。第二,测定 VISAR 条纹常数的范围不受限制。由于 DISAR 可测速度范围宽广,且不发生条纹丢失,所以我们可以方便地选取不同大小的速度源,使得待测 VISAR 的记录的条纹数始终大于 1 甚至更多,从而在保证精度的情况下实现对任意条纹常数进行测定。

4 结 论

根据 VISAR 条纹常数的定义以及 VISAR 测速方程,提出了几种可测定 VISAR 条纹常数的方法。在几种方法中,DISAR 和 VISAR 的混合测试系统对 VISAR 条纹常数的测定精度高,适用范围广,是一个值得推广的 VISAR 条纹常数测定普适方法。

但在不具备 DISAR 仪器以及 DISAR、VISAR 混合测试技术的实验室,也可根据待测 VISAR 的仪器结构和条纹常数大小选用其它几种方法。比如,对 300 m/(s·Fr)以下的 VISAR 条纹常数,可以通过 τ 的测定进行确定,或者利用加窗熔石英对称碰撞的方法进行确定;对于 300 m/(s·Fr)以上的条纹常数,可以选用几台 VISAR 测量同一速度源的方法进行确定。

References:

[1] Barker L M, Schuler K W. Correction to the Velocity-per-Fringe Relationship for the VISAR Interferometer [J]. J Appl Phys, 1974, 45(8): 3692-3693.

[2] Malitson I H. Interspecimen Compsrison of the Refractive Index of Fused Silica [J]. J Opt Soc Am, 1965, 55(10): 1205-1209.

[3] Setchell R E. Index of Refracton of Shock-Compressed Fused Silica and Sapphire [J]. J Appl Phys, 1979, 50(12): 8186-8192.

[4] Barker L M, Hollenbach R E. Shock-Wave Studies of PMMA, Fused Silica, and Sapphire [J]. J Appl Phys, 1970, 41(10): 4208-4226.

[5] Setchell R E. Index of Refraction of Shock-Compressed Fused Silica and Sapphire [J]. J Appl Phys, 1979, 50(12): 8186-8192.

[6] Weng J D, Tan H, Hu S L, et al. New All-Fiber Velocimeter [J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76(9): 093301.

The Measurement of Velocity-per-Fringe Constants of VISAR

MA Yun, ZHANG Lin, PENG Qi-Xian, WANG Xiang, LI Jian-Feng,
CAI Ling-Cang, LI Jia-Bo, WANG Xiao-Song,
WENG Ji-Dong, CHEN Hong

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Four experimental approaches were developed to measure the velocity-per-fringe constants of VISAR. In particular, owing to the high accuracy and the wide applicable range, the integrated VISAR and DISAR should be a versatile method to measure arbitrary velocity-per-fringe constants of VISAR. In the absence of the integrated VISAR and DISAR system, the velocity-per-fringe constants of VISAR can also be measured through the measurement of the VISAR's delay time, a relatively standard velocity source produced by the symmetric impact of fused silica with a window, or the calibrated VISAR.

Key words: VISAR; DISAR; fused silica; shock wave