

文章编号:1001-4888(2000)01-0001-08

高接收效率可调景深 VISAR 探头的研制及应用*

赵剑衡^{1,2}, 孙承纬¹, 马如超¹, 段祝平²

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 919 信箱 113 分箱, 621900;

2. 中国科学院力学研究所, 北京海淀中关村, 100080)

摘要: 本文介绍了一种新型的 VISAR 探头,它具有接收效率高和景深可调的优点。与国外同类装置相比,结构简单,对制作工艺要求较低。并介绍了这种光学探头的工作原理,较详细地讨论和分析了影响 VISAR 探头接收效率的各种影响因素。相关技术指标接近国外同类装置的技术水平。多次实验表明,这种探头很好地满足了冲击动力学动态测量的使用要求。

关键词: VISAR; VISAR 探头; 景深; 接收效率

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A

1 引言

基于光学 Doppler 效应的测量任意自由表面速度的激光干涉仪,简称 VISAR (Velocity interferometers system for any reflector),是 1972 年左右由 Barker 等^[1]发展起来的,是目前冲击动力学、爆炸力学等学科领域中非常重要的高精度、快响应、非接触式动态测试技术,具有广泛的应用前景。VISAR 探头是 VISAR 的主要组成部分之一,它将激光传输到运动靶目标上,并回收带 Doppler 效应信息的漫反射光,将其传给激光速度干涉仪。从 VISAR 问世以后,有诸多的学者^[2-8]致力于 VISAR 探头的研究工作,试图解决 VISAR 探头的接收效率和工作景深不易同时兼顾的问题,并使 VISAR 系统小型化和降低对环境的要求,保证对任意自由面测试的成功和获取真实的实验信息。早期的 VISAR 中曾采用快透镜和慢透镜系统来发射激光和接收漫反射光^[2]。慢透镜系统工作景深长,但接收效率低。快透镜系统的接收效率高,可以使用几百毫瓦的激光器,而不必使用带水冷系统数瓦功率的氙离子激光器,从而使系统小型化成为可能,并使实验更为安全。但其弱点是景深小,运动物体的反光面易离焦,且到达光电倍增管时,其光束超

* 收稿日期: 1999-03-10; 修订日期: 2000-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(19772048); 中国工程物理研究院基金(980103)

作者简介: 赵剑衡(1969-),男,中国科学院在读博士研究生,主要从事激光与物质相互作用、冲击动力学方面的研究工作。

过光电倍增管的口径,带来不可忽视的测量误差.上述的快透镜系统和慢透镜系统对测试环境要求都较苛刻.国外从1992年起研制光纤耦合的三透镜组合的VISAR探头^[3,5,6],较好地解决了VISAR透镜的接收效率和工作景深之间的矛盾,并降低了VISAR测试对环境的要求.由于发射激光要通过接收透镜,这样会造成接收透镜端面处部分反射光被耦合进接收光纤,造成干扰信号.1993年Barker^[7]提出了一种在技术上更为成熟的三透镜组合的光纤探头,但是上述的三透镜光纤组合探头的光路复杂,制作工艺要求高,因此成本很高,使VISAR测试很难为一般的研究课题所能承受.1998年我国流体物理研究所马如超研制出了两透镜光纤耦合的VISAR探头,这种探头结构有所简化,体积小,但接收效率不高,制作成本也相对较高.国内胡绍楼等^[8]也从事过这方面的研究工作.

本文工作的目的是设计一种有较高接收效率和较长工作景深的VISAR探头,简化光路和制作工艺,降低VISAR探头的制作成本.本文工作对VISAR系统小型化,增加VISAR的测试成功率和数据的可靠性,推广测试应用范围等有重要意义.

2 VISAR 探头工作原理

图1给出了W. C. Sweatt等^[3]于1992年发表的VISAR探头的工作原理图.可以看到该探头将发射光纤传输过来的氩离子激光束通过两个透镜3、6后会聚到靶上,然后将漫反射回来的光通过两个透镜6、4和一个平面反射镜7后输入接收光纤.这种探头使用透镜较多、结构比较复杂.

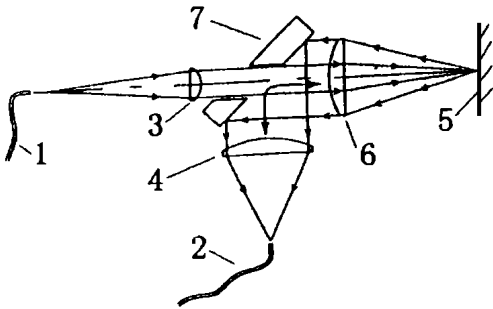


图1 三透镜VISAR探头工作原理图

Fig.1 Schematic of three lenses probe

1. projecting optical fiber, 2. signal-collecting optical fiber, 3. projecting lens,
4. Signal-collecting lens, 5. moving target surface, 6. Front lens of three lenses, 7. mirror

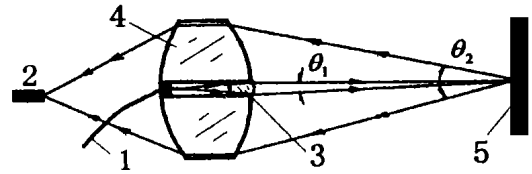


图2 新型两透镜VISAR探头工作原理图

Fig.2 Schematic of the two lenses probe

如果从等效光路的角度考虑图1的设计,可以将其中的两个发射透镜和两个接收透镜分别看成一个透镜,从而可以简化为两透镜系统,注意到图1中兼做发射和接收用的透镜6的中心区域对接收漫反射光没有贡献,而且发射激光束通过该透镜中心处时,一部分光被反射并耦合入接收光纤,导致不必要的干扰信号.因此我们提出的VISAR探头工作的光路原理如图2所示.可以看到接收透镜组被简化为一个带孔双凸透镜4.采用双凸透镜是为了让漫反射光通过接收透镜4的两端面之间时保持为准直平行光,透镜4本身的厚度可以增加,为安装发射光纤和发射透镜提供足够空间,同时保证了漫反射光在接收透镜上的损耗减小.这种设计与图1中漫反射光在通过两接收透镜6、4之间时是近似平行光,从而给反光镜和发射光纤留出空间的

作法是一样的. 可以根据具体的实验要求将接收双凸厚透镜 4 两曲面设计成不同曲率. 马如超^[4]的接收透镜为平凸的. 本文作者认为双凸透镜与平凸透镜相比,除了上面提到的使漫反射光在通过厚透镜时,在透镜的两个曲面之间保持为准直平行光以便减小其损失的好处外,相同的焦距下,双凸透镜将由两个曲面来分担曲率,这样不会使透镜的曲率过大而造成漫反射光通过曲面时损失过大,同时可以减小像差.

根据图 1 可以看出, Sweat^[3]探头的靶面 5 位于透镜 6 的焦平面附近,当运动的靶面进入透镜 6 的焦距以内时,会使透镜 4、6 之间的光变得发散,这一方面是使探头的回收光损耗增大,另一方面也是探头整体的工作景深偏小. 本文采用几何光学成像的原理,将发射光纤端面成像在运动靶目标表面上,再将靶面上的这个像成像到接收光纤的端面附近,靶面 5 位于透镜 4 的两倍焦距外. 根据这种设计方式和几何光学原理,靶表面在探头的接收透镜两倍焦距以外,探头的测量景深可以根据需要设置,既可获得较长的工作景深,且不会出现 Sweat^[3]的探头遇到的问题.

3 影响探头接收效率的因素

3.1 VISAR 探头对漫反射激光能量的接收效率

假定平面靶为郎伯漫反射面,则接收透镜在与主光轴成 α_1 和 α_2 角度范围内收集到的漫反射光的能量可以表示如下:

$$E_r = \int_0^{\alpha_2} 2I_0 \sin \alpha \cos d = I_0 (\sin^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_1) = I_0 \frac{D^2 - D_1^2}{4x^2} \quad (1)$$

I_0 是轴线方向的漫反射光强度. 这样探头接收效率可以表示如下:

$$\eta_{rec} = \frac{D^2 - D_1^2}{4x^2} \quad (2)$$

式中 x 是透镜 4 到靶的焦物距, D 和 D_1 分别为接收透镜 4 的有效直径和发射透镜 3 的直径, (2) 式比参考文献 [4] 中在半空间内是均匀漫反射光基础上推导出的接收效率高两倍. 实际的靶表面并不是完全漫反射的,靠近入射激光束方向的反射光能量为尖峰分布,因此被接收透镜收集到的漫反射光的能量效率应该比 (2) 式还要高.

从 (2) 式中可以看到接收透镜的有效直径和发射透镜的直径及探头与靶之间的距离 x 是影响探头接收效率的主要因素. 以上几个参数是透镜焦距、接收和发射光纤的芯径及数值孔径、景深等的函数. 由几何光学的成像原理可以推出它们的关系如下^[4]:

$$x_1 = f_2 + 0.5 \left[d + \sqrt{d^2 + \frac{4df_2^2 \text{tg} \sin^{-1} NA_2}{K c_2}} \right] \quad (3)$$

$$x_2 = x_1 - d \quad (4)$$

$$D_1 = 2 \text{tg} \sin^{-1} NA_1 \left[f_1 + \frac{f_1^2}{x_1 - f_2} \right] \quad (5)$$

$$D = 2(f_2 + f_2^2 / (x_1 - f_2)) \text{tg} \sin^{-1} NA_2 - \frac{f_2}{f_1} \left[1 - \frac{f_1 - f_2}{x_1 - f_2} \right] c_1 \quad (6)$$

x_1 和 x_2 分别是靶与接收透镜的最大和最小焦物距, f_1 、 f_2 是发射和接收透镜的焦距, c_1 、 c_2 、 NA_1 和 NA_2 分别是发射和接收光纤的芯径和数值孔径, K 是用于确定 x_1 和 x_2 的一个待定常

数. d 为探头景深.

3.2 光纤参数对探头接收效率的影响

光纤的参数对探头的接收效率有着重要的影响. 由(5)式知选用发射光纤的芯径和数值孔径比较小时, 会使发射透镜的外径 D_1 变小, 同时由(6)式知小的发射光纤芯径会使接收透镜的有效直径变大, 由(2)式知这样接收透镜上收集漫反射光的有效面积变大, 从而达到提高接收效率的目的. 选用芯径小的光纤还有一个好处是使光纤端面成像在靶上的像点较小. 由于 VISAR 测试的是靶表面点的位移或速度, 显然靶面上的光点越小越能真实反映实际的运动, 这对曲面靶的测试尤为重要. 对于接收光纤而言, 其参数通过(3)和(6)式对接收透镜的外径影响, 从而使探头的接收效率发生变化. 一般而言, 接收光纤的数值孔径和芯径越大, 探头的接收效率越高. 但是考虑到与 VISAR 系统的匹配关系, 以及一些特殊的使用工况对 VISAR 探头的外形尺寸有要求, D 以及 α_2 和 NA_2 的增大是有限制的.

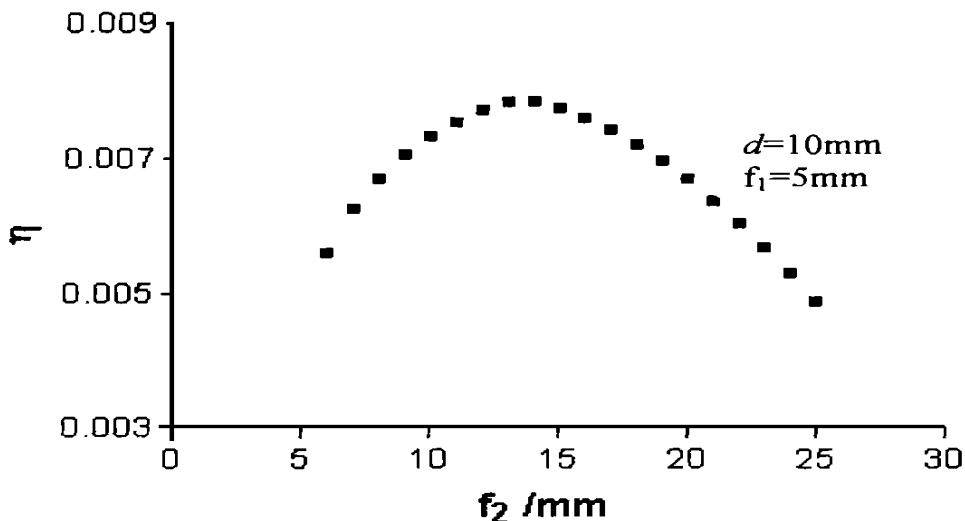


图3 接收透镜焦距与探头接收效率之间的关系

Fig. 3 Focus of signal-collecting lens vs. signal-collecting efficiency of probe

3.3 透镜焦距及工作景深对探头接收效率的影响

从(3)~(6)式可以看到, 接收和发射透镜的焦距是影响接收透镜和发射透镜的有效外径以及探头与靶之间的距离的重要因素. 因此其组合关系的优化选取对提高 VISAR 探头的接收效率非常重要. 当发射透镜的焦距、光纤的参数及探头的工作景深确定后, 由(3)式知接收透镜的焦距增加时, 导致探头的工作距离增加, 接收透镜的有效外径也变大, 因此从(2)式中较难直观地判断接收透镜焦距变化对探头接收效率的影响. 通过计算发现接收透镜焦距的增大导致探头与靶之间的距离呈现非线性增加, 同时接收透镜的焦距与探头接收效率之间具有类似抛物线的变化关系, 如图3所示. 接收透镜焦距为14mm左右, 发射透镜的焦距为5mm, 测量景深为10mm时, 探头的接收效率最大. 此时探头与靶之间的最大距离为52mm左右. 这表明在光纤参数和工作景深确定的情况下, 确定探头上接收透镜和发射透镜的参数, 可以达到较高接收效率.

从(3)和(4)式知, 工作景深较大时, 发射透镜的有效外径变小, 同时探头的工作距离变大,

接收透镜有效外径变小. 因此原理上讲, 提高探头工作景深会使探头的接收效率减小. 本文工作结果表明, 在给定探头的工作景深和光纤参数条件下, 探头的接收透镜和发射透镜参数之间有一个最佳组合关系.

4 实验结果和应用情况

表 1 给出了本文设计的探头的技术指标及与国外同类装置参数的对比, 从中可以看到 A01 探头工作时需要的激光功率比国外同类研究的探头略高, 这主要是因为本文探头采用的光纤质量不高, 而且采用接收透镜的材料是普通的有机玻璃, 其光学表面是在普通车床上加工和抛光得到的质量比国外玻璃透镜要明显地差, 因此光的透过率较小. 另一方面本文探头的景深和工作距离都比国外产品大. 从上面的分析可知, 探头 A01 和 A02 的性能已经基本达到国外同类产品的水平.

表 1 VISAR 探头的技术指标及与国外同类装置的比较

样品 编号	发射光纤 芯径/ μm	发射光纤 数值孔径	接收光纤 芯径/ μm	接收光纤 数值孔径	景深 / mm	最大焦 物距/ mm	激光束 功率 mw	接收效率 %
国外	50	0.15	300	0.15	5	35	50	> 0.22
A01	50	0.2	300	0.3	10	52	75	0.22
A02	50	0.2	300	0.3	35	65	200	0.054

由于 VISAR 探头的基本工作原理是将光纤端面成像在靶上, 当靶在探头工作景深范围内运动时, 靶上的像点被再次成像到接收光纤的端面附近. 以往探头的设计中要求由接收透镜射出的成像光线的入射角小于或等于接收光纤数值孔径, 同时像在接收光纤端面附近处的弥散直径必须小于或等于接收光纤的芯径^[4,7], 这主要是为了让接收透镜收集回来的光全部进入接收光纤. 本文工作表明, 当将发射光纤端面在靶上的像点被再次成像到接收光纤端面附近时, 如果其像点在接收光纤端面附近处的弥散直径比接收光纤的芯径大 1~2 倍时, 可在测量景深不变的情况下使 VISAR 探头与靶之间距离缩小, 例如在 10mm 工作景深下, 采用上述方法后可使 VISAR 探头与靶之间距离缩近 11mm, 从而降低对加工精度的要求, 并使探头的接收效率有所提高. 这从几何光学成像的原理上是很容易理解的.

本文所研制的探头的工作景深在 5~35mm 范围内可调. 由前面的 (3)~(6) 式知道, 当透镜的焦距和光纤参数确定时, 增加探头的工作景深将导致探头接收透镜和发射透镜的有效外径变小. 本文设计探头的技术参数是以测量景深 5~10mm 为条件进行优化的, 使用中增加探头的测量景深是可以的, 只是此时透镜的焦距组合不是最优化, 对接收效率有影响. 当探头的透镜的焦距和光纤参数按表 1 选择, 其工作景深调到 35mm 时, 实际接收效率约 0.054%, 但它在激光输出功率 200mw 时便可以使 VISAR 正常工作.

目前本文研制的探头已在多点测试技术和双精度测试技术中得到成功的应用, 包括各种典型的冲击加载下的平面靶和曲面靶. 图 4 给出了用本文研制的探头测得的柱筒壁在内部炸药爆轰驱动下的表面速度时间史. 图 5 给出 VISAR 测量的冲击压缩下玻璃靶后自由表面速度时间史, 这是该探头在双精度测试技术中的应用实例. 所谓双精度测试技术将一个 VISAR 探头收集回来的漫反射光分成两份, 分别传给两台条纹常数不同的 VISAR, 根据测试结果的对比, 可以知道 VISAR 测试中的丢波现象发生在何处, 丢了几个波. 在图 5(a) 中的两个信号是由

一个探头将靶上一个点的漫反射光收集回来,分成两部分,分别传给条纹常数为 159m/s/f 和 423m/s/f 的两台 VISAR 处理后,由示波器记录下来的信号.从图 5(a)中可以看到条纹常数为 159m/s/f 的 VISAR 在记录玻璃样品后自由表面粒子速度时,丢失一个条纹,这样由条纹常数为 159m/s/f 的 VISAR 处理出来的玻璃后自由表面的粒子速度比条纹常数为 423m/s/f 的 VISAR 记录的后自由表面粒子速度小 159m ,如图 5(b)所示.这主要是 VISAR 中的光电倍增管响应不过来造成的.采用双精度测试技术可在一定范围内解决国内外 VISAR 测试中普遍存在的丢波现象.而 VISAR 的激光器的输出功率不高,因此具有高接收效率的探头对保证这种测试技术的成功是非常关键的.

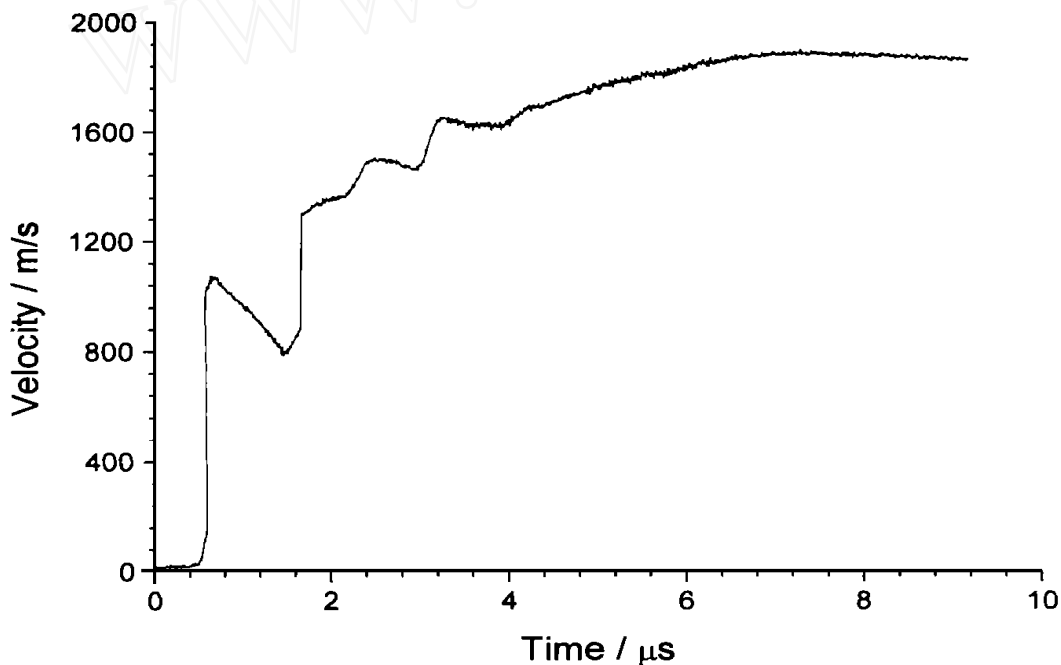


图 4 柱筒壁在内部炸药驱动下的速度时间史

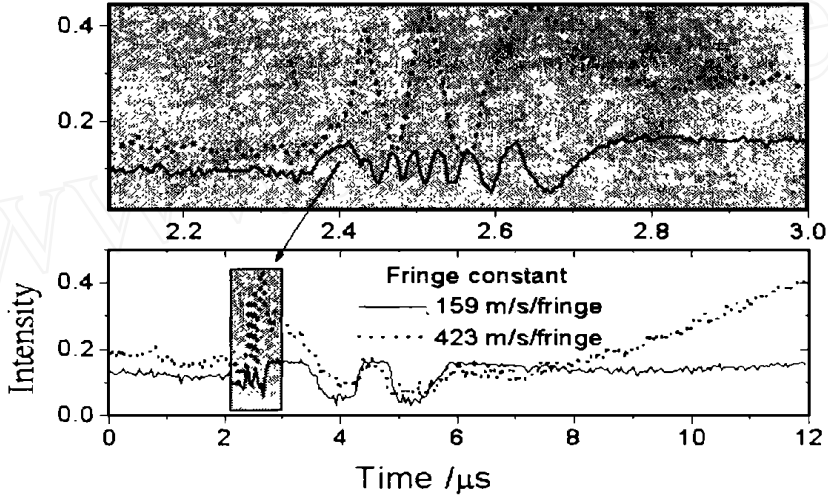
Fig. 4 Time vs. velocity of shell driven by the detonation

从理论上讲,在 VISAR 测试中,其测试精度一般取决于 VISAR 本身,如使用的光电倍增管的响应时间不一样等,与 VISAR 探头无关.但是实验上一般很难保证 VISAR 探头的发射激光束与靶面严格垂直,这会给实验带来一定的误差,其误差大小一般与激光束与靶面法线方向的夹角有关.在实际实验中,这是必须注意的问题,特别是对测试精度要求较高的实验,必须设计专门的夹具来固定探头,保证发射激光束与靶面法线方向重合.但是通常衡量一个 VISAR 探头好坏的主要指标是 VISAR 探头的测量景深和接收效率.

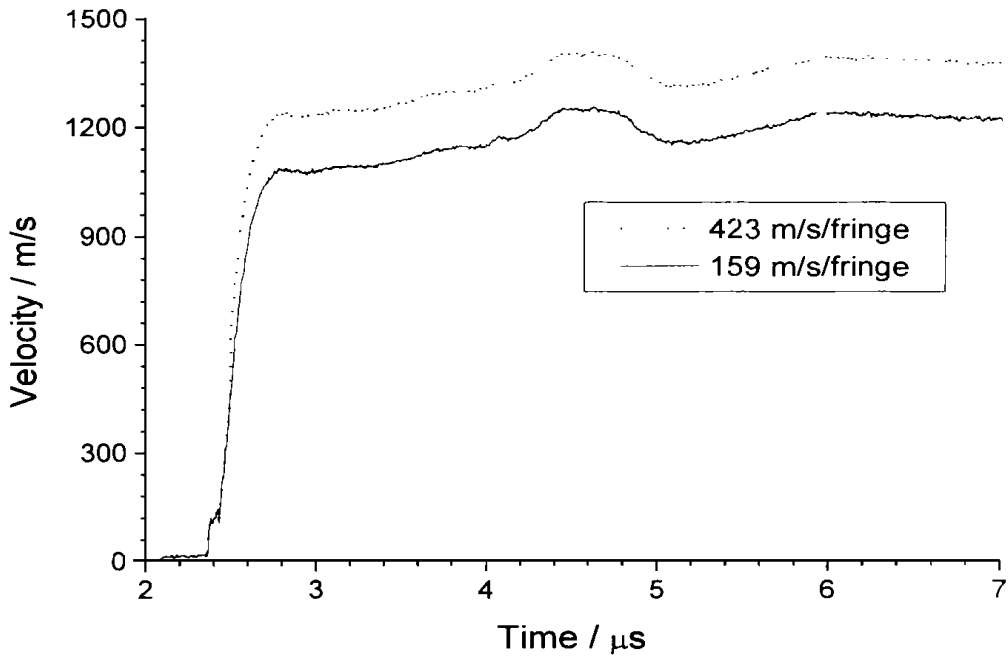
5 结论

(1) 在 VISAR 系统允许的情况下,发射光纤的芯径和数值孔径越小,接收光纤的芯径和数值孔径越大,以及在确定的工作景深下,选用接收透镜和发射透镜之间的最佳关系,对提高探头的接收效率是非常重要的.

(2) 如果接收光纤端面附近像点的弥散直径在接收光纤芯径的 1~2 倍之间变化时,可在测量景深不变的情况下使 VISAR 探头与靶之间距离缩小,降低探头设计精度的要求,同时使探头的接收效率有所提高.



(a) The Oscilloscopic traces in double channel



(b) The velocity of back free surface of K9 target.

图 5 双精度测试结果(K9 玻璃后自由表面粒子速度)

Fig. 5 The results recorded by VISAR with double channels (Copper flyer with velocity 950m/ s impact on target of K9 glass)

- (3) 本文提出的新型探头,在保留国外同类设计优点的基础上,具有更为简单的结构.
- (4) 经多次实用考核,探头的相关技术指标已接近或达到国外同类设计的水平.

致谢:本文工作得到流体物理研究所谭显祥研究员的指导和帮助,赵峰博士和文尚刚博士给作者许多帮助.陈达华、刘元坤和刘俊等参加本文工作.

参考文献:

- [1] Barker L M. J. Appl. Phys. , 1972 , 43(11) :4669.
- [2] William C. Sweat and Crump O B. Using a fast lense to collect the signal in a VISAR system[J]. Rev. Sci. Instrum. , 1991 ,62 (12) :2946 - 2949.
- [3] William C. Sweat. Depth of focus in velocity interferometers system for any reflector systems[J]. Rev. Sci. Instrum. ,1992 ,63(5) : 2945 - 2949.
- [4] 马如超,李泽仁等. 用于激光多点测速的长景深激光发射和接收探头小型化研究[C]. 光子学报,1999 ,28(Z1) :93 - 98.
- [5] Fleming KJ , Crump O B. Portable solid state fiber optic coupled doppler interferometer system for detonation and shock diagnostics [R]. SAND-94-04410.
- [6] William C. Sweat and Crump O B , *et al.* SAND-91-2804c.
- [7] Lynn M. Barker. United states Patent[P]. Patent number :5202558 , 1993.
- [8] 胡绍楼等. 用于激光干涉测速仪的新型光纤探头[C]. 光子学报 ,1999 ,28(Z1) :177 - 180.

Development and Application of VISAR Probe with Higher Signal-collecting Efficiency and Adjusted Depth of Field

ZHAO Jian-heng^{1,2} , SUN Cheng-wei¹ , MA Ru-chao¹ , DUAN Zhuping²

(1. Southwest Institute of Fluid Physics , P. O. Box 523-58 , Chengdu , Sichuan , China , 610003 ;

2. Institute of Mechanics , Chinese Academy of Science , Beijing , China ,100080)

Abstract : A new design of VISAR probe is presented in this paper. The design has the merit of higher signal-collecting efficiency and adjusted depth of field , and its performance is approaching that of some foreign products. It is suitable for use in experiments of impact dynamics. The working principle of the probe is briefly introduced , and various factors which may have influence on the collecting efficiency of the probe are discussed.

Key words : VISAR ; VISAR probe ; depth of field ; signal-collecting efficiency