文章编号:1000-5773(2012)06-0681-06

用光纤探针测量飞层前界面状态的初步探索*

王荣波,叶　雁,陈永涛,周维军,刘振清,何莉华,吴廷烈

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳　621900)

摘要:对用光纤探针测量飞层前界面微喷、微层裂等现象的机理进行了分析,设计了光纤探针与瞬态粒子场全息照相技术联合测量泰安药柱加载下铅飞层的前界面状态的实验。实验结果表明,光纤探针的测量结果与瞬态全息照相的结果相吻合,说明利用光纤探针可以对微喷粒子场进行有效探测,是一种很有发展潜力的测试技术。

关键词:光纤探针;微物质喷射;微层裂;粒子场全息照相

中图分类号:O521.3;O384　　**文献标识码**:A

1　引　言

飞层表面的微喷、微层裂现象是冲击波物理研究中不可回避的重要研究课题之一。目前,国内外的研究者开发了多种测试技术,以对飞层前界面的状态进行探测。这些测试手段包括电探针技术[1]、激光全息照相[2-3]、X光照相[4]、高速摄影[5]、Asay膜、压电石英计[6]等。其中,用电探针测量飞层走时的波形是研究冲击动力学特性、飞层运动规律及校验数值模拟程序的重要手段。激光全息照相是诊断稀疏微物质喷射区的重要手段,可以识别微喷物质颗粒的大小、空间分布等信息。X光照相对可见光不透过的稠密微物质喷射区域和微层裂区域具有优势,可以定性或半定量进行观测。高速摄影(阴影或纹影)技术在微喷、微层裂实验中可以实现连续多幅观测,提供微喷图像时间空间演化信息,但其局限于可见光能透过的区域。Asay膜测试技术可以提供微喷物质的量化信息,是目前国内外微喷实验中应用最多的测试技术之一。压电石英计可以给出微喷物质随时间的累积量,属量化测量技术,不足之处是其测量范围较小,无法给出低速高密度微层裂区信息。这些测试技术为飞层前界面状态的研究提供大量有效的数据,取得了较多的研究成果。

目前并无一种成熟的测试技术既可以对飞层前界面的状态从低速高密度微喷区到飞层密实基底之间的整个过程进行全程探测,又可以给出飞层前界面各个区域的速度、密度等定量信息。光纤探针技术[7-8]由于其独特的工作机理将有望成为这样一种全过程测试技术。

2　光纤探针测量飞层非密实过渡层的工作机理分析

非密实过渡层即飞片受冲击后前表面物质(如喷射粒子场或微层裂区)与光纤探针的作用原理如图1所示,假设:(1) 冲击波从飞层自由表面反射稀疏波的同时,所有喷射物同时喷射出来,即冲击波到达自由表面的时刻即为微物质喷射的起始时刻;(2) 喷射物横向空间分布为均匀分布,整个光纤端面均匀受到微喷物质冲击;(3) 喷射物撞击光纤探针时为完全非弹性碰撞。

探针受到的冲力$F(t)$、入射粒子的总动量$P(t)$和粒子数密度n的关系可以由(1)式表示

* **收稿日期**:2011-03-07;**修回日期**:2011-07-13

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金(2009B0201013);中国工程物理研究院"双百"人才基金(2009R);国家空间碎片专项(KJSP09203)资助

作者简介:王荣波(1976—),男,学士,副研究员,主要从事瞬态光学测试技术研究. E-mail:wangrbo@tom.com

$$F(t) \equiv \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}p(t) = \frac{n(A\Delta z)}{\Delta t}\Delta P \tag{1}$$

式中：A 为光纤截面积；Δz 为 Δt 时间内粒子的位移；$n(A\Delta z)/\Delta t$ 是单位时间内入射到面积 A 上的粒子数量；ΔP 是每个粒子动量的变化量。

假设粒子与探针的碰撞是发生在 z 轴上的一维过程，粒子初速度为 $u=\mathrm{d}z/\mathrm{d}t$，碰到探针端面后粒子完全停止（速度变为零），则质量为 m_p 的粒子的动量变化量 $\Delta P=m_\mathrm{p}(u-0)$。由此可知，探针承受的压强为

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A} = \frac{1}{A}nAu \times m_\mathrm{p}u = \rho u^2 \tag{2}$$

式中：ρ 为粒子场的体密度，$\rho=nm_\mathrm{p}$。

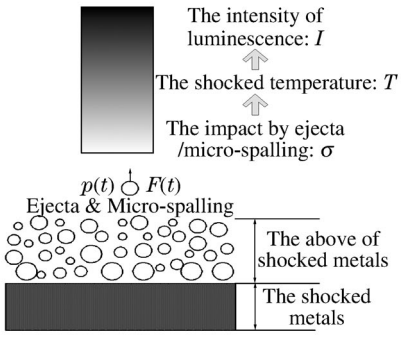


图 1 喷射粒子场或微层裂区与光纤探针的作用原理

Fig. 1 The illustration of the interaction between ejecta & micro-spalling and fiber-optic pins

光纤探针是利用光纤芯材料（熔石英）在冲击下的发光特性工作的。在假设光纤芯受冲击后形成的高温石英辐射体为绝对黑体的情况下，光纤探针光信号的功率可由下式进行估算

$$I = L^0(\lambda_\mathrm{c}, T) \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta\Omega \cdot S \tag{3}$$

式中：$L^0(\lambda,T)$为黑体光谱辐射亮度；λ为记录系统的工作波长（滤光片中心波长）；$\Delta\lambda$ 为记录系统带宽（滤光片通带半高宽）；$\Delta\Omega$ 为光纤接收立体角；S 为光纤受冲击面积。

由普朗克黑体辐射公式可知

$$L^0(\lambda,T) = \frac{c_1}{\pi}\lambda^{-5}\left(\mathrm{e}^{\frac{c_2}{\lambda T}}-1\right)^{-1} \tag{4}$$

式中：$c_1=2\pi hc^2$，$c_2=hc/k$，其中 c 为光速，h 为普朗克常数，k 为玻尔兹曼常数。

由(3)式可知，光纤探针所给出的光信号强度与光纤芯内的冲击温度和光纤受冲击（发光）面积的大小有关。石英光纤芯的冲击雨贡纽压强 σ（单位 GPa）与温度 T（单位 K）的关系可由(5)式近似给出[9]

$$T = -2\,000 + 97\sigma - 0.044\sigma^2 \tag{5}$$

由(2)式～(5)式知，可以将光纤探针给出的光信号强度与入射的粒子场密度和速度联系起来，由于光电探测器在其线性范围之内给出的信号幅度与输入的光信号功率成正比，因此通过示波器给出的信号幅度变化，可以判断出入射粒子场的密度变化。进一步利用上述粒子与光纤探针相互作用的假设，并通过台阶探针或高速摄影等方法测量粒子速度，由此可以计算出粒子场的密度值。

3 实验结果

设计了光纤探针和瞬态粒子场全息照相系统联合测试铅飞层前界面状态的探索实验。实验装置如图 2 所示。采用⌀32 mm×11 mm 的泰安传爆药柱与铅样品接触爆轰，并在铅样品前表面贴厚度为 0.05 mm的半圆形钽片，以挡住样品的一半受冲击区域，便于进行对比分析。实验中共安装 20 根芯径为62.5 μm的多模石英光纤探针，光纤探针的结构请参见文献[7]。探针布局如图 2 所示，20 根探针对称地安装为两排，排间距为 3 mm，同排探针间距 3 mm。其中，编号为 4、5、6、7 的探针直接顶在样品的表面上，编号为 1、2、3、8、9、10 的探针距离铅样品表面 7 mm，编号 11～20 的探针距离铅样品表面 5 mm。编号 1～5、编号 11～15 号探针对准未贴钽片的区域，编号 6～10、编号 16～20 号探针对准贴钽片的区域。整个爆轰实验装置放置在爆炸容器内，实验前将容器内部抽真空至 0.1 kPa。瞬态粒子场全息照相系统的组成和布局请参见文献[2-3]。

光纤探针的信号通过光纤传输到光电探测器中，输出信号由示波器记录。实验中采用同步触发器，以实现示波器、高压脉冲发生器和脉冲激光器的同步触发，同步触发器受触发的时刻为零时刻。实验得到了1 号～19 号探针的信号（20 号探针未记录）和瞬态粒子场全息照相系统记录的静态（如图 3(a)）和

动态(如图 3(b))图像。图 3 中用标示线标出了飞层前表面的初始位置,用箭头指示了光纤探针的位置和动态图像中的飞片前界面位置及微喷粒子的位置。图 4 给出了每根探针的信号波形。

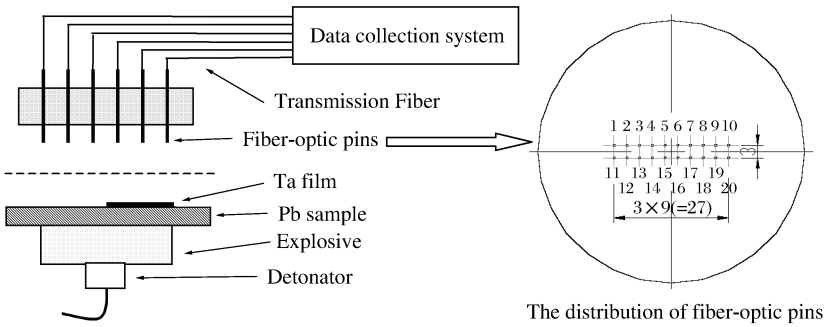
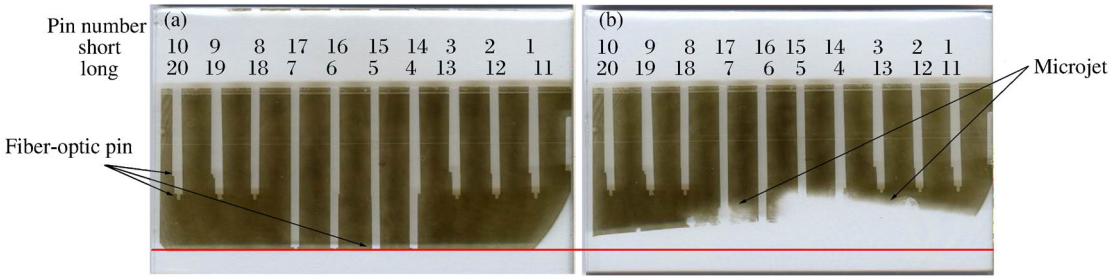


图 2 光纤探针测量铅飞层微喷粒子场系统示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup and distribution of fiber-optic pins



(a) Static exposure (b) Dynamic exposure

图 3 全息照相系统给出的样品表面和探针的静动态图像

Fig. 3 Optical shadowgraphs taken with the in-line holography

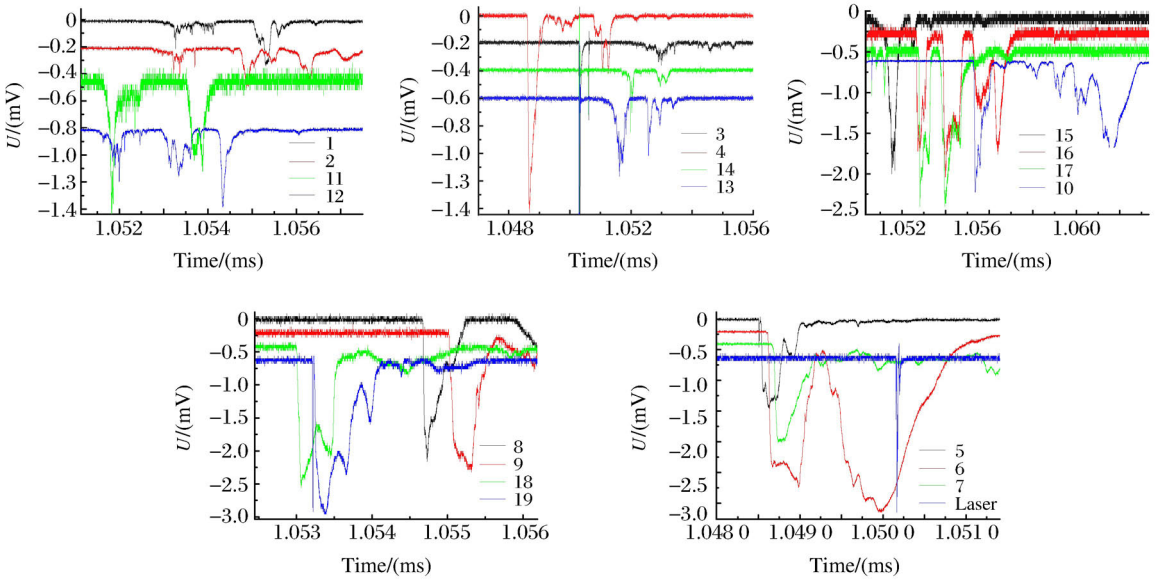
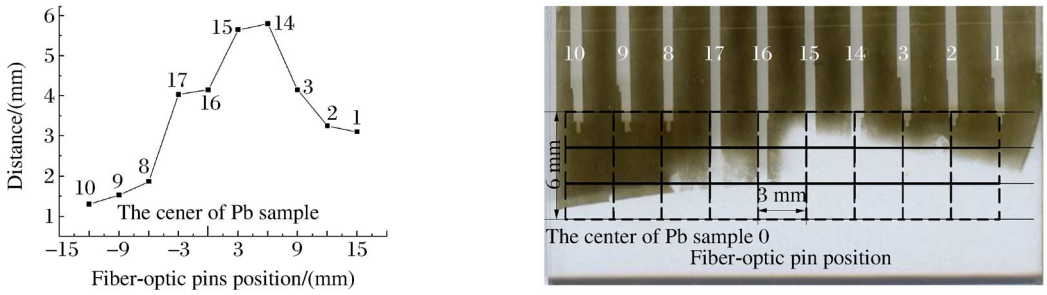


图 4 实验得到的光纤探针信号波形

Fig. 4 The signals measured by fiber-optic pins

4 分析讨论

利用(1、11)、(2、12)探针信号的起跳时间差和探针安装高度差,可大致计算微喷前锋面的速度,计算出的平均速度值为 1.50 km/s;类似地,利用(8、18)、(9、19)号探针数据计算出钽片的平均速度值为 1.14 km/s。再利用光纤探针不同的到达时刻和探针位置信息,可获得在照相时刻的微喷射和钽膜的运动位移(如图 5(a)所示)。全息照相得到的微物质喷射位置如图 5(b)所示。可以看出,两者结果基本吻合。



(a) Data of fiber-optic pins (b) Shadow photo of in-line holography

图 5 光纤探针和全息照相获得的微物质喷射距离的比较

Fig. 5 Comparison of the ejecta distance measured by fiber-optic pins and in-line holography

由测试数据可知,微喷粒子给出的信号前沿时间(从起跳到第一个峰值的时间)在 280～923 ns 之间,冲击波和飞片作用下给出的信号前沿时间在 26～72 ns 之间,二者有量级上的差异。这种差异是由光纤探针的工作机理造成的,当光纤探针在冲击波阵面或飞片的冲击作用下时,它的发光面积为整个光纤芯的截面,其信号会很快达到最大值,前沿时间很短;在微喷粒子的作用下,由于微喷粒子的尺寸很小,一个粒子只能使光纤的端面上的一个小区域发光,粒子密度越大,同时打在光纤端面上的粒子就越多,光纤的发光面积就越大,探针给出的信号幅度也越大,由于微喷粒子在前锋面上的密度较低,因此探针给出的信号起点不明显。随着粒子密度的增大,信号幅度慢慢增加,并且微喷的持续时间较长,所以信号的变化过程也较长,信号的前沿时间较长。说明光纤探针具备连续测量微喷粒子场状态的能力。

从图 4 中给出的探针信号波形可以看出,光纤探针在非密实层的作用下给出的信号持续时间较长,几乎给出了从微喷区到飞片密实基底到达的全过程信号。以第 12 号探针信号(如图 6 所示)为例进行分析。

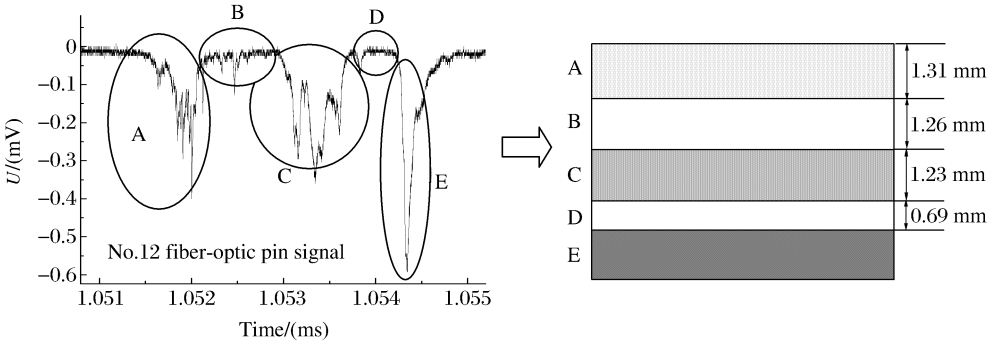


图 6 光纤探针典型全程信号分析

Fig. 6 The analysis of typical full-range measured by fiber-optic pins

图 6 的信号从直观上可以分为 5 个区域,即图中标示的 A、B、C、D、E 5 个区域。从开始出现信号的 A 区到信号达到峰值的 E 区共持续了 3.1 μs 时间,其中 A 区持续时间 0.87 μs,B 区持续时间 0.86 μs,C 区持续时间 0.82 μs,D 区持续时间 0.46 μs;其中 B 区和 D 区的信号幅度大部分在 0 V 附近,说明在这两个区域的粒子很少,粒子场出现了断层,若按上文得到的粒子速度 1.5 km/s 计算,B 区和 D 区的间隙厚度分别为 1.26 mm 和 0.69 mm;从粒子场形成的整个物理机制来分析,A 区可能对应传统意义上的微喷区,计算可得该区域厚度为 1.31 mm;C 区厚度通过计算可知为 1.23 mm,该区是否对应了目前研究较多的微层裂区,尚需进一步的实验和分析;E 区出现了一个幅度较大(590 mV)、前沿较陡(99 ns)的脉冲信号,从信号特征来看,可能是铅飞层的密实基底冲击探针所给出的信号。而且从图 4 可知,并不是所有的探针都给出了飞层密实基底到达的信号,说明飞层在到达探针之前已经碎裂,飞层碎裂可能是造成粒子场出现断层的原因。

5　结　论

通过初步实验,证明了光纤探针在微喷粒子场作用下可以给出有效的信号,并且通过对实验结果的分析,可以推测光纤探针的探测区间较长,有可能给出从低密度微喷区到飞片密实基底到达的全过程信号。若对其进行进一步的研究,完善标定方法并设计相应的验证物理实验,光纤探针可望成为一种有效的探测飞层前界面状态的手段。

References:

[1] Mitchell A C, Nellis W J. Shock compression of aluminum, copper, and tantalum [J]. J Appl Phys, 1981, 52(5): 3363-3374.

[2] Ye Y, Zheng X X, Li Z Y, et al. Microjet measurement using the pulsed in-line holography [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 18(2): 159-162. (in Chinese)
叶　雁,郑贤旭,李作友,等. 用脉冲激光同轴全息技术测量微射流 [J]. 强激光与粒子束,2004,18(2):159-162.

[3] Luo Z X, Li Z R, Liu Z Q, et al. Application of in-line digital holography to microjet particles measurement [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(3): 278-282. (in Chinese)
罗振雄,李泽仁,刘振清,等. 同轴数字全息技术在高速射流粒子测量中的应用 [J]. 爆炸与冲击,2007,27(3):278-282.

[4] Elias P, Chaperon P, Mondot M. Experimental study of the slowing down of shock-induced matter ejection into argon gas [A]//Schmidt S C, Johnson J N, Davison L W. Shock Compression of Condensed Matter-1989 [C]. Amsterdam: North-Holland, 1990: 783-786.

[5] Ye Y, Wang W, Li Z Y, et al. High-speed photography and pulsed in-line holography diagnostics of microjet [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(6): 471-475. (in Chinese)
叶　雁,汪　伟,李作友,等. 用高速摄影和脉冲同轴全息照相联合诊断微射流 [J]. 高压物理学报,2009,23(6):471-475.

[6] Vogan W S, Anderson W W, Grover M, et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surfaces [J]. J Appl Phys, 2005, 98(11): 113508-1-10.

[7] Wang R B, Wu T L, Wang G C, et al. A fast rise-time fiber-optic pin for shock wave measurement [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 375-379. (in Chinese)
王荣波,吴廷烈,王贵朝,等. 冲击作用下快响应光纤探针研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):375-379.

[8] Wang R B, He L H, Tian J H, et al. The time response character of two types of fiber-optic pins under shock loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3): 284-288. (in Chinese)
王荣波,何莉华,田建华,等. 两种光纤探针在冲击波作用下的时间响应 [J]. 高压物理学报,2005,19(3):284-288.

[9] George M J, Menikoff R, Vesser L R. The use of optical fibers for shock pressure and timing measurements at high pressures, LA-11148-MS [R]. USA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1988: 1-33.

Micron-Scale Fragments Ejected from Shocked Metal Surfaces Measured by Fiber-Optic Pins

WANG Rong-Bo, YE Yan, CHEN Yong-Tao, ZHOU Wei-Jun,
LIU Zhen-Qing, HE Li-Hua, WU Ting-Lie

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The interaction mechanism was analyzied between ejecta & micro-spalling and fiber-optic pins. The fiber-optic pins and pulsed in-line particles holography were applied in the diagnosis of ejecta and micro-spalling from shocked metal surface. The experimental results from fiber-optic pins are in agreement with those from pulsed in-line particles holography. In other words, the signals of fiber-optic pins illustrated the process of micron-scale fragments ejected from shocked metal surfaces. Due to the fact that fiber-optic pins have simple structures and the full-range of measurement from the zone of low areal density to the zone of thick metal sample, it is potentially effective in dectecting the phenomena of shocked metal surfaces.

Key words: fiber-optic pins; ejecta; micro-spalling; in-line particles holography