文章编号:1000-5773(2009)06-0471-05

用高速摄影和脉冲同轴全息照相联合诊断微射流*

叶 雁,汪 伟,李作友,李 剑,刘振清,钟 杰,
李 军,尚长水,罗振雄,李欣竹,李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳 621900)

摘要:针对强冲击载荷下金属材料的微物质喷射中微射流的实验研究,提出了高速摄影与脉冲同轴全息照相联合诊断的测试方案,并组建了由微射流产生装置、高速摄影系统、脉冲同轴全息照相系统和高精度时序控制同步系统组成的测试系统。动态实验结果表明,高速摄影和脉冲同轴全息照相联合诊断微射流能在一次实验获得微射流的发展图像和微射流头部低动态模糊图像。

关键词:微射流;微物质喷射;高速摄影;同轴全息
中图分类号:TN26;O384 **文献标识码**:A

1 引 言

强冲击载荷下自由表面的粒子喷射现象还没有被很清楚地认识,也很难从理论上给以准确的计算模型,因而从实验上测定材料在冲击载荷下自由面喷射物质的发展过程、分布和粒子尺寸大小就显得非常重要[1]。由于微喷机理的复杂性,数值模拟常以微射流[2]进行建模分析,实验研究微射流对验证理论数值分析具有重要工程应用价值。常用的实验研究方法有如脉冲同轴全息[3-4]、高速摄影[5]以及 X 光辐射成像的照相类测试技术;也有以 Asay 膜和石英计为代表的光电类传感器测试技术。照相类测试技术因其直观和获得信息量大,一直是研究微喷射和微射流的重要测试方法。

脉冲同轴全息技术[6-7]具有在纳秒或更在短时间内"固化"运动微粒场、测量精度高、景深长、光路简单和能获得粒子空间分布和尺寸等优点,但是脉冲同轴全息技术只能获得单幅图像。高速摄影[8-9]是瞬态过程的经典测试技术,能够获得微射流形成发展的二维图像,但受限于时空分辨率,不能给出细节信息。

本研究设计并组建了脉冲同轴全息技术与高速摄影联合诊断微射流的实验系统,获得了微射流发展的序列图像和微射流高清晰局部图像,并对实验结果进行了处理和分析。脉冲同轴全息技术与高速摄影联合诊断微射流可以在一发实验中获得多种信息,对实验研究微射流提供了有效的测试技术。

2 实验装置

联合测试方案结构示意图如图 1 所示,将微射流产生装置放置于带玻璃窗口的双轴小型爆炸容器内;脉冲同轴全息与高速摄影的光路采用垂直布局,脉冲同轴全息照相系统包括脉冲激光光源、光学传像透镜组和全息干板组成,高速摄影系统包括脉冲氙灯照明系统、光学耦合透镜和转镜相机组成;利用时序控制系统,对激光器、脉冲氙灯照明系统、转镜相机和爆轰加载起爆台进行同步控制。

* **收稿日期**:2008-12-16;**修回日期**:2009-03-02
基金项目:中国工程物理研究院预先研究资助项目
作者简介:叶 雁(1978—),女,硕士,助理研究员,主要从事全息照相、X 光成像研究. E-mail:shelly_yezi@sina.com

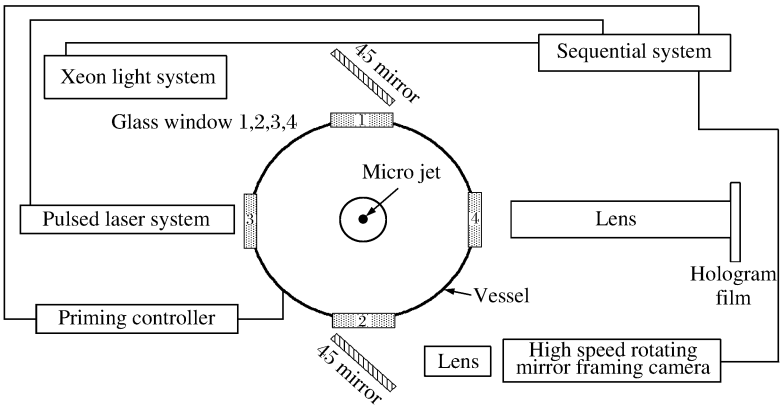


图 1 联合测试实验结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment configuration

脉冲同轴全息照相系统采用皮秒激光器作为光源，激光经过扩束器变成平行光，平行激光穿过微射流区，再由光学传像系统将带有物场信息的光记录在全息干板上，光学传像系统能避免由于全息干板离物场太近而引起的损坏，有效记录微射流信息。

脉冲同轴全息照相的原理是利用激光照射粒子场，粒子散射与未发生散射的光干涉，用全息干板记录干涉条纹，干涉条纹中包含了粒子场信息。通过干板线性处理后，得到全息图，用相同波长的连续激光再现全息图得到粒子场分布。粒子场需要达到一定的透光比例，才能获得充足的参考光并与之发生干涉，这样才能得到重建三维粒子场。一旦粒子场过密，就会出现重建困难，得到的图像就是阴影图像。微射流具有的特点就是既有密度较大的区域也有分布稀疏的区域，采用皮秒脉冲同轴全息既可以获得低于高速摄影动态模糊 1 到 2 个量级的阴影图像，而且可以获得稀疏区域的粒子颗粒度分布。

高速摄影系统采用脉冲氙灯进行照明，为了视场内均匀照明采用针孔加透镜组方式产生近平行光，再由反射镜将光引入微射流区，采用转镜相机记录。其中脉冲氙灯脉宽不大于相机工作周期，避免相机像面的重复曝光，使用 FJZ-1000 型转镜式高速分幅相机，转镜转速 1.8×10^5 r/min 时，对应的摄影频率为 6×10^6 fps，每幅图像的有效曝光时间和相邻图像的时间间隔均为 0.17 μs。爆轰加载装置[10]如图 2 所示，金属平板材料为锡，加载区域厚度为 2 mm，中心位置为孔径∅0.3 mm、孔深 0.8 mm 的盲孔，其余部分表面粗糙度为 1.6 μm。在炸药起爆后，冲击波到达盲孔时，将会产生微射流和微物质喷射。时序控制系统时间框图如图 3 所示，由于微射流速度到千米每秒，约在几个微秒时间范围内，微射流就超出全息和高速摄影视场范围，所以时序控制系统的同步精度要求小于微秒，该时序控制系统精度可达数十纳秒。

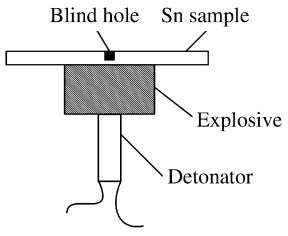


图 2 实验加载装置图

Fig. 2 Diagram of experimental setup

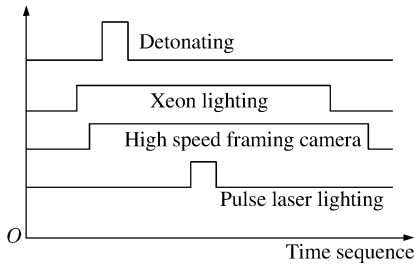


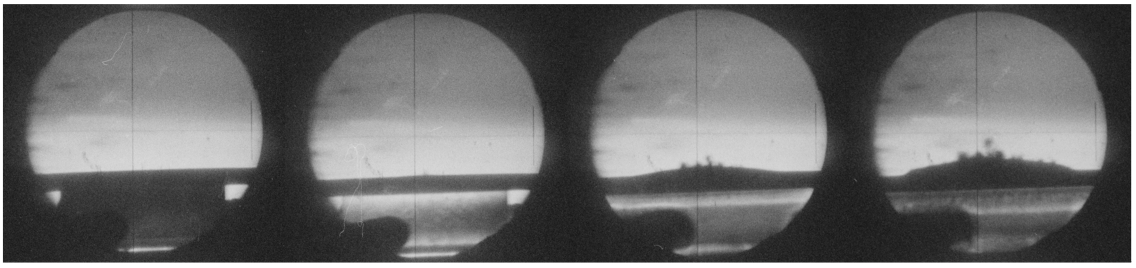
图 3 测试系统时序框图

Fig. 3 Diagram of time sequence

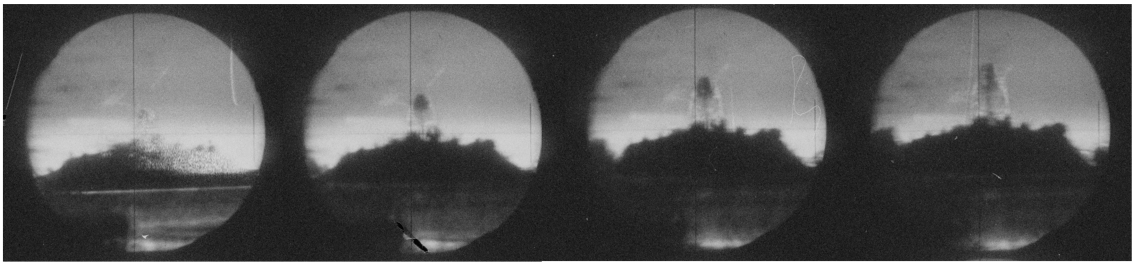
3　实验结果及其分析

爆炸容器内未抽真空,在常压下、一次实验中,脉冲同轴全息和高速摄影均获得了锡材料飞片中心打孔的微射流图像,时序系统控制精度满足要求。

高速摄影结果如图 4 所示,清晰可见微射流发展过程,图 4(b)微射流处于萌发状态,随着时间推移,微射流出现了明显的头部;在图 4(e)中出现了类似缺失区,放大观察图像发现可能是材料自身有发光,且出现了曝光现象,直观产生缺失的视觉感受;到了微射流发展后期,头部与锡样品主体及其微喷距离加大,而且出现了微射流周边折射率发生变化,图像灰度上出现明显变化。



(a)　　(b)　　(c)　　(d)



(e)　　(f)　　(g)　　(h)

图 4　高速摄影获得的微射流发展图像

Fig. 4　Micro-jet developing images gained by high-speed photography

以微射流头部发展的前一幅图作为时间起点,并以微射流头部离开视场的前一幅图作为时间终点,其运动距离随时间变化的曲线如图 5 所示,微射流的平均速度为 5.19 km/s。

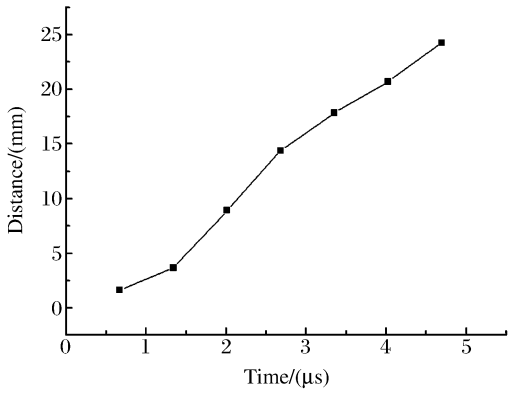
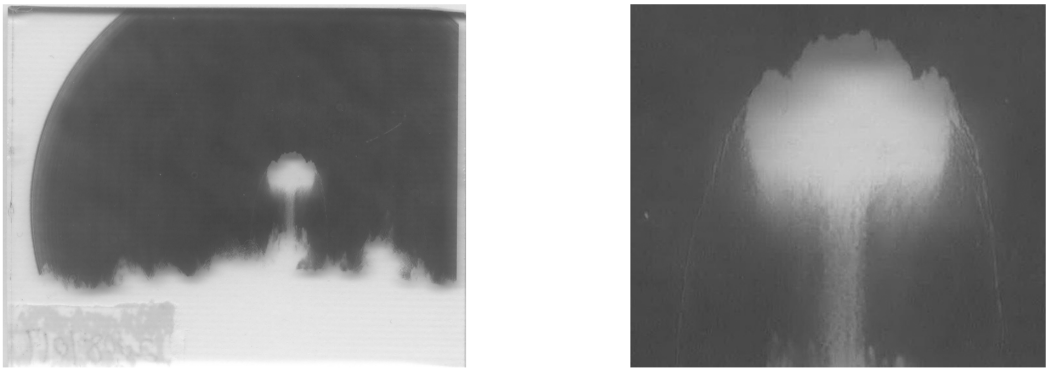


图 5　微射流随时间移动距离曲线图

Fig. 5　Micro-jet moving distance versus time

脉冲同轴全息照相得到的图像结果如图 6(a)所示,局部放大图如 6(b)所示,结果是正片未曝光区域呈白色。图 6 中可见微射流头部形状清晰呈郁金香花型,横向尺寸为 4 mm、纵向尺寸为 3 mm,微射流尾部呈柱状与锡样品主体及其微喷相连,其周边出现弹头形不曝光区域,分析原因是微射流托体波导致的折射率局部变化,将该区域平行激光改变传播方向不能形成有效曝光。由于采用的锡材料开盲孔尺寸较大,微射流前端出现质量积累形成较大头部区域,未出现微射流断裂和较小颗粒物,所以被测物不能获得充足的参考光。全息照相的结果不能再现其三维粒子场图像,而是类似高分辨的阴影照相。

根据出光时间和微射流运动距离粗估微射流速度为 5.15 km/s，与高速摄影结果得到微射流平均速度接近。两种成像诊断技术的比较，脉冲同轴全息照相得到的图像清晰度比较高，细节更清晰，与射流头部实际形状更加接近，原因主要在于两种照相类技术的空间分辨率存在一定差异，全息采用的脉冲光源为皮秒单色激光，动态模糊小于脉冲氙灯动态模糊 1 到 2 个量级，并且全息记录介质感光波长与胶片感光波长不同的是带通感光，微射流自身发光不影响记录质量。



(a) Entire image (b) Local image

图 6 脉冲同轴全息照相获得的微射流图像

Fig. 6 Micro-jet images gained by pulse in-line holography

4 结 论

为了实验研究强冲击载荷下金属材料的微物质喷射中的微射流现象，提出了高速摄影与脉冲同轴全息照相联合诊断的测试方案，充分发挥两种测试技术的优点对同一微射流进行诊断，获得了微射流的发展图像和微射流头部低动态模糊图像，并根据图像处理出微射流的平均运动速度。实验证明，所建立的微射流产生装置、高速摄影系统、脉冲同轴全息照相系统和高精度时序同步系统对诊断爆轰加载下的微射流是有效的。

References:

[1] Sorenson D S, Minich R W, RomeroJ L, et al. Ejecta Particle Size Distribution for Shock Loaded Sn and Al Metals [J]. J Appl Phys, 2002, 92(10): 5830-5836.

[2] Wang P, Qin C S, Zhang S D, et al. Simulated Microjet from Free Surface of Aluminum Using Smoothed Particle Hydrodynamics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(2): 149-156. (in Chinese)
王 裴, 秦承森, 张树道, 等. SPH 方法对金属表面微射流的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 149-156.

[3] Mcmillan C, Whispky R. Holographic Measurement of Ejecta from Shocked Metal Surface [J]. SPIE High Speed Photography and Photonics, 1988, 1032: 553-557.

[4] Liu Z C, Zhao Y H. Liquid Spray and Grain Measurement with the Laser [M]. Beijing: Space Navigation Press, 1988. (in Chinese)
刘子超, 赵云惠. 液雾粒子的激光测量 [M]. 北京: 宇航出版社. 1988.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Wang W,Li Z Y,Li X Z,et al. Study on Microjet on Ultra-High Speed Shadow Photography [J]. Journal of Applied Optics,2008,29(4):526-529. (in Chinese)
汪　伟,李作友,李欣竹,等. 用超高速阴影摄影技术研究微喷射现象 [J]. 应用光学,2008,29(4):526-529.

[9] Tan X X. Test Technique for Optical High Speed Photography [M]. Beijing:Science Press,1992. (in Chinese)
谭显祥. 高速光学摄影测试技术 [M]. 北京:科学出版社,1992.

[10] Zheng X X,Liu Z Q,Wang R B,et al. Measurement of Shock Wave Front Produced by Ejecta Loading Drive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2004,18(2):187-192. (in Chinese)
郑贤旭,刘振清,王荣波,等. 微喷加载装置中爆轰波阵面的测量 [J]. 高压物理学报,2004,18(2):187-192.

High-Speed Photography and Pulsed in-Line Holography Diagnostics of Microjet

YE Yan, WANG Wei, LI Zuo-You, LI Jian, LIU Zhen-Qing, ZHONG Jie, LI Jun, SHANG Chang-Shui, LUO Zhen-Xiong, LI Xin-Zhu, LI Ze-Ren

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

Abstract: High-speed photography and pulsed in-line holography were applied in the diagnosis of microjet from shocked metal surface. Microjet loading driver, high-speed photography system, pulsed in-line holography system, and high-accuracy synchronization timing system were established. Shown as the experiment, the evolutionary images of microjet can be gained by high-speed photography, and the clear image of microjet can be gained by pulsed in-line holography. The two diagnosis methods are effective means for microjet.

Key words: microjet; ejecta; high-speed photography; in-line holography