

文章编号: 1001-3806(2004)01-0045-03

微射流粒子场的同轴 Fraunhofer 全息测试

李作友, 李泽仁, 叶 雁, 郑贤旭, 刘振清, 钟 杰, 罗振雄
(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 利用超短脉冲激光作为记录光源可以在瞬间将高速运动微粒“冻结”的原理, 建立了同轴 Fraunhofer 远场全息测试系统, 研究了在爆轰加载下物质的微射流现象。获取了清晰的高速运动微射流粒子场的全息图, 通过激光再现给出了微射流粒子的分布、形状、尺寸速度等信息。

关键词: 瞬态全息; 粒子场信息; 记录和再现; 微射流
中图分类号: O438.1 文献标识码: A

Micro-jet particle field measurement using in-line Fraunhofer holography

LI Zuoyou, LI Zerren, YE Yan, ZHENG Xian-xu, LIU Zhen-qing, ZHONG Jie, LUO Zhen-xiong
(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the principle of “freezing” high velocity particles, an in-line Fraunhofer far-field holography measurement system, which uses the ultra short pulse laser as the recording light source, is constructed. The metal micro jet is loaded by detonation. The hologram of micro jet is obtained by this system. By reconstructing the hologram, the distribution and the size of the micro jet can be analyzed.

Key words: pulse holography; the information of the particles field; recording and reconstruction; micro jet

引 言

研究在强冲击载荷下材料自由面的喷射现象, 获取喷射粒子的大小、形状、分布、速度及总质量等信息, 有利于材料性能的检测和仪器的优化设计。该项研究工作始于 20 世纪 70 年代初, 主要有两种方法: 其一是以用 Asay 膜^[1]和石英传感器^[2]为代表的测量喷射微粒的总质量, 这种方法的特点是实验简单, 数据提取容易, 但不能给出微粒的大小、形状及分布。其二是以激光全息技术为代表的测量喷射微粒的大小、形状、分布及速度等信息, 该方法获取的信息量大, 但实验装置和实验技术复杂。

由于激光全息技术进行物理测试时具有图像直观、信息量大、非接触测量、抗电磁干扰等优点, 而受到人们的广泛关注。尤其在同轴 Fraunhofer 激光全息技术中, 采用超短脉冲激光作为记录光源可以在瞬间将被测目标“冻结”, 从而达到测量高速运动粒子的大小、形状、分布、速度及质量等的目的。

作者简介: 李作友(1962), 男, 副研究员, 从事瞬态全息测试技术方面的研究工作。

E-mail: lizy901@sohu.com

收稿日期: 2003-05-13; 收到修改稿日期: 2003-07-14

THOMPSON 等人在 1965 年首次报道了用激光远场全息技术测量海面附近水雾粒子的大小、分布与蒸发速度^[3]; 1988 年, 美国 LLNL 的 MILLAN 等人测量了铅靶在爆轰作用下微粒子的分布、速度与尺寸^[4]; 1997 年 9 月 18 日在内华达试验场进行的试验中, 美国人采用了同轴激光全息技术测量喷射粒子的分布及喷射粒子大小与速度^[5]。

1 实验理论

1.1 同轴 Fraunhofer 远场全息的记录

当有一振幅为 B , 波长为 λ 的平面波沿着 z 轴入射并照射粒子如图 1 所示, 如果被记录粒子的

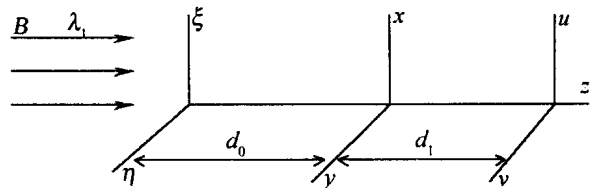


Fig. 1 The configuration coordinate of the holography
(ξ, η)—object plane (x, y)—hologram plane (u, v)—reconstructing image plane

大小相对于粒子到记录平面的距离 d_0 小得多, 就可以认为满足远场条件; 针对不同形状的粒子和粒子的不同尺寸, 其远场条件有一个范围, 在这一范围

内,全息图再现像的对比度变化不是很大。

被粒子衍射的光波以及未被扰动而直射的平面波,在全息记录介质平面(x, y)上产生干涉而被记录下来。全息记录介质记录下来的光强分布为^[6]:

$$I(x, y) = B^2 \left\{ 1 - \frac{2}{\lambda_1 d_0} \left[\sin \left(\frac{\pi R^2}{\lambda d_0} \right) \operatorname{Re} T \left(\frac{x}{\lambda_1 d_0}, \frac{y}{\lambda_1 d_0} \right) + \cos \left(\frac{\pi R^2}{\lambda d_0} \right) \operatorname{Im} T \left(\frac{x}{\lambda_1 d_0}, \frac{y}{\lambda_1 d_0} \right) \right] + \frac{1}{\lambda_1^2 d_0^2} T \left(\frac{x}{\lambda_1 d_0}, \frac{y}{\lambda_1 d_0} \right) T^* \left(\frac{x}{\lambda_1 d_0}, \frac{y}{\lambda_1 d_0} \right) \right\} \quad (1)$$

式中, $[1 - t(\xi, \eta)]$ 是粒子的振幅透射函数, $T \left(\frac{x}{\lambda_1 d_0}, \frac{y}{\lambda_1 d_0} \right)$ 是 $t(\xi, \eta)$ 的傅里叶变换式, $R = \sqrt{x^2 + y^2}$, 式中的第 2 项和第 3 项是由粒子互补屏(相同投影截面的孔)的空频谱所调制的正弦及余弦函数, 粒子的信息就寄寓在这个空频谱中, 第 3 项是自相关函数的空频谱, 比第 2 及第 3 项小得多。

1.2 同轴 Fraunhofer 全息图的再现

全息记录介质经过线性处理后, 其振幅透射函数正比于光强 $I(x, y)$, 为了便于分析, 设全息记录介质的振幅透射函数为 $I(x, y)$, 用平面波 c 沿 z 轴入射到全息图, 在离全息图 d_1 处的再现实像平面 (u, v) 处, 应用实像聚焦条件: $\lambda_1 d_0 = \lambda_2 d_1$, 全息再现像的光强分布如下式:

$$I(u, v) = C^2 B^4 \left\{ 1 - \frac{1}{\lambda_1 d_0} \left[\sin \left(\frac{\pi R^2}{2 \lambda_1 d_0} \right) \times \operatorname{Re} T \left(\frac{u}{2 \lambda_1 d_0}, \frac{v}{2 \lambda_1 d_0} \right) + \cos \left(\frac{\pi R^2}{2 \lambda_1 d_0} \right) \times \operatorname{Im} T \left(\frac{u}{2 \lambda_1 d_0}, \frac{v}{2 \lambda_1 d_0} \right) \right] + \frac{1}{4 \lambda_1^2 d_0^2} \times T \left(\frac{u}{2 \lambda_1 d_0}, \frac{v}{2 \lambda_1 d_0} \right) T^* \left(\frac{u}{2 \lambda_1 d_0}, \frac{v}{2 \lambda_1 d_0} \right) \right\} + C^2 B^4 t^*(u, v) t(u, v) + \text{其它小项} \quad (2)$$

式中, $t(u, v) t^*(u, v)$ 是粒子的像, 其它项代表虚像在实像平面上的 Fraunhofer 全息的光强分布, 由于是同轴 Fraunhofer 全息, 虚像对全息图的干扰不是很大, 因而可以获得清楚的粒子全息实像。

2 实验的布置

采用同轴 Fraunhofer 全息技术记录微射流粒子场的实验装置如图 2 所示, 该实验装置由激光器、扩束准直系统、爆轰实验装置、4f 传像系统、记录系统、时间同步系统(DG535)、起爆装置等组成, YAG 倍频激光器输出脉冲激光, 经扩束准直系统照射在爆轰实验装置产生的微射流粒子场上, 4f 传像系

统将粒子场的转移到全息记录介质上, 并可根据实验的需要放大或缩小粒子场的图像。

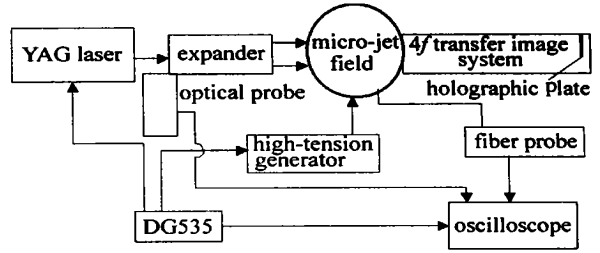


Fig. 2 Schematic of experimental setup

纳秒 YAG 倍频激光器, 其输出波长为 $0.532 \mu\text{m}$, 输出激光脉宽小于 10ns , 单脉冲输出激光能量大于 50mJ , 能量不稳定性小于 5% , 出光漂移为 $\pm 10\text{ns}$, 激光模式为 TEM_{00} 模。根据曝光时间、粒子运动速度和粒子直径之间的关系可以推断出: 脉冲宽度为 10ns 的记录激光可以将直径为几十微米、运动速度为每秒几千米的微射流粒子场瞬间“冻结”, 从而获得清晰的全息图像。

爆轰实验装置为一可抽真空的爆炸容器, 其目的是为了产生一个微射流粒子场。爆轰加载装置如图 3 所示, 实验测得在该装置下从雷管引爆到冲击波传到炸药后表面的时间为 $2.9 \mu\text{s}$, 冲击波传到飞片后表面的时间随炸药后表面到飞片间空腔的距离不同而不同, 在几微秒到几十微秒之间。

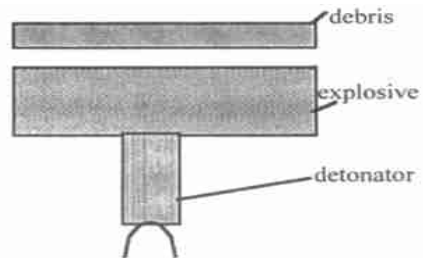


Fig. 3 The loaded equipment by detonation

通过调节 DG535 精密数字延迟脉冲发生器输出信号的延迟时间, 控制 YAG 倍频脉冲激光器出光和爆轰实验装置爆炸的时间, 从而达到产生运动粒子场和脉冲激光束到达时间的同步。通过同步调节延迟时间, 可以获取同一空间不同时刻的粒子场信息。对拍摄的全息图经过线性处理后在连续 YAG 倍频激光器下再现, 将再现获取的信息利用 CCD 相机储存在计算机上, 对图片进行处理可以获取运动粒子场的分布、粒子的大小、粒子的质量等信息。

实验研究中在铜飞片上打一些小坑, 当冲击波到达时小坑中将能产生微射流, 采用同轴 Fraunhofer 激光全息技术可记录下微射流场的三维立体

图像。在直接爆轰加载的情况下,微射流粒子的运动速度可达每秒几千米,当粒子的粒径较大时(几十微米左右),用纳秒级脉宽的 YAG 倍频激光器作为光源记录是可行的。实验中对铜飞片的处理如图 4 所示:在铜飞片的表面加工了 5 个约 $\varnothing 0.5\text{mm}$ 的小坑,间距约 5mm;在小坑的两侧加工了宽度约为 1mm,间距为 10mm 的两槽。

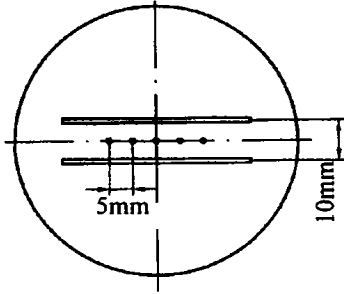


Fig. 4 The processing situation of the copper debris

3 实验结果

采用同轴激光全息技术记录的在爆轰加载下产生微射流分布的全息图片如图 5 所示。对全息图片

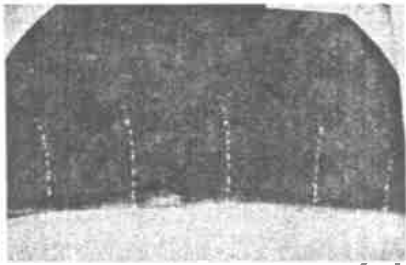


Fig. 5 The hologram of microjet distribution

中从左至右第 4 孔的微射流分布进行全息再现,用 CCD 采集得到了图 6 所示的结果,经过图像处理

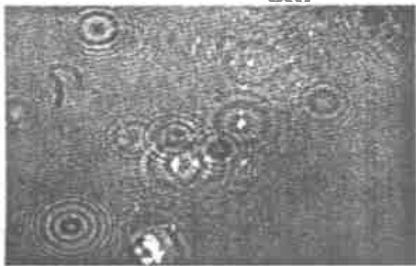


Fig. 6 The reconstructed image of the hologram

后的结果如图 7 所示,从图中可清晰的分辨出微射流粒子的数量、形状、大小及分布。

实验中,在铜飞片的表面同时安装了光纤探针和电探针测量冲击波到达铜飞片表面的时间,采用光电探头测量输出激光的时刻。爆轰理论认为:当冲击波传到铜飞片表面的小坑处时,微射流就产生。实验中光纤探针和电探针是同时监测冲击波到达铜

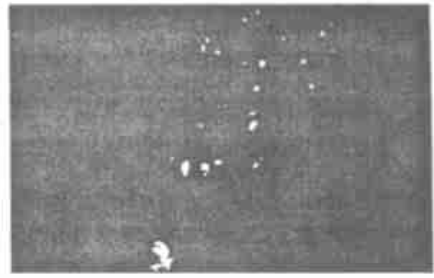


Fig. 7 The reconstructed image after image process

飞片上表面的时间,实验所取得的信号比较一致,用示波器记录下的各路信号如图 8 所示。微射流粒子从飞片上表面(小坑处)喷出到激光输出时的运动距离是可以测量的,光纤探针(或电探针)与光电探头所探测的时间差为运动时间,运动距离除以所需时间就得到了粒子的运动速度。以全息图中最远处的粒子为例,可计算出其运动速度为 5.1km/s 左右,图 7 中微射流粒子的个数为 30 个,平均粒径在 $70\mu\text{m}$ 左右。

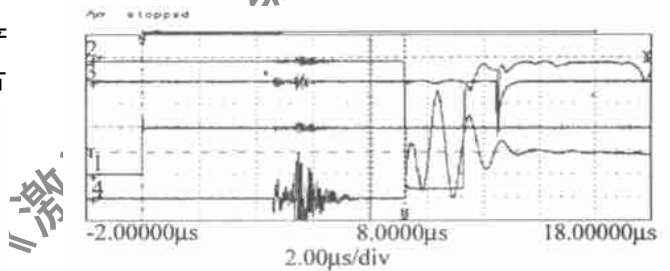


Fig. 8 The signals recorded with an oscilloscope

1—the synchron signal 2—the fiber probing signal 3—the optical probing signal 4—the electric probing signal

4 结论

通过对同轴 Fraunhofer 激光全息技术测量爆轰加载下物质产生微射流现象的研究,表明激光全息技术在高温高压等极端条件下进行物理测试的有效性,测试中可以给出被测场的三维直观信息。实验结果表明:微射流粒子的大小、速度、分布和质量等与材料的特性、表面的缺陷密切相关,因此,有助于材料特性的研究和设备的优化设计。

参 考 文 献

- [1] ASAY J R, BARKER L M. J A P, 1974(45): 2540~ 2548.
- [2] TAYLOR J W. Metallurgical effects at high strain rates. N Y: Plenum Press, 1973. 57~ 59.
- [3] THOM PSON B J. J A P, 1965(14): 302~ 308.
- [4] MILLAN C M, WHIPKEY R. SPIE, 1988, 1032: 553~ 559.
- [5] 余 泳. 核武器与高技术, 2000(4): 28~ 38.
- [6] 刘子超, 赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量原理. 北京: 宇航出版社, 1988. 294~ 305.