

文章编号: 1001-1455(2007)03-0278-05

同轴数字全息技术在高速射流粒子测量中的应用*

罗振雄, 李泽仁, 刘振清, 李作友, 叶 雁, 李 军
(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 讨论了数字全息的理论和数字全息在爆轰实验中的应用。在解决了系统分辨率、动态模糊、安全和防护、精确同步的基础上, 使用数字全息技术获得了中心刻有锥形小孔的铝飞片在爆轰加载下的喷射物的全息图, 并提供了该全息图的数字再现图像。在照相视场内喷射粒子的速度约 $2.7 \sim 4$ km/s, 粒子粒径从几微米至几十微米。

关键词: 爆炸力学; 粒子测量; 数字全息; 微喷射粒子

中图分类号: O384

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引 言

在高压加载下材料表面会产生微物质喷射, 喷射粒子的形状、尺寸、速度和总的喷射量与材料的纯度、表面状态、冲击压力、样品厚度等都有密切关系。目前还没有一套成熟的理论可以定量分析。而该过程对冲击波物理和爆轰物理及研究材料特性具有重要意义, 所以实验研究是目前重要的研究手段。全息法通过在全息干板上记录粒子的衍射光和参考光波的干涉条纹, 从而在再现过程中获得包含粒子形状和位置信息的再现图像, 从而获得粒子的尺寸分布并推导粒子的速度, 具有信息量大、图像直观、非接触测量等优点^[1-4]。

数字全息技术采用 CCD 相机记录获得数字全息图并储存在计算机中, 通过数字计算获得粒子场的再现图像。与干板记录、光学再现的传统全息技术相比, 该技术具有以下特点:

- (1) 不需要洗相和干板脱水的过程, 避免了这些过程给全息图带来污染, 实验过程简单、方便;
- (2) 重建图像很容易在计算机上显示出来, 不需要对微小粒子进行放大就可以获得可视化信息;
- (3) 直接用数字方法获得 3 维粒子场的数字图像, 不需要光学再现过程和对再现光场数字化;
- (4) 可消除像差、噪声及记录过程中底片非线性等因素的影响, 整个过程简单、灵活, 减少了粒子识别的难度, 便于定量分析与测量。

因为这些优点, 随着 CCD 技术的不断进步, 数字全息技术得到了越来越广泛的应用, 在很多领域正在逐渐取代传统全息技术。然而由于系统分辨率、动态模糊、安全和防护、精确同步控制等原因, 高速微喷射粒子场的全息测量仍然采用传统全息技术。本文中拟采用数字全息技术测量中心刻有锥形小孔的铝飞片在爆轰加载下的喷射物, 喷射粒子的速度约 2 km/s, 粒子粒径小于 $200 \mu\text{m}$ 。

2 同轴数字全息测试技术

2.1 同轴数字全息记录

测量粒子场的数字同轴全息记录光路如图 1 所示, 采用 CCD 感光面代替传统全息干板记录全息图, 激光经过扩束准直后照明粒子场, 一部分光被粒子衍射形成物光, 另一部分光通过粒子场而没有被衍射作为参考光, 物光和参考光形成干涉条纹(即全息图)被 CCD 相机记录下来。

* 收稿日期: 2005-12-16; 修回日期: 2006-11-14

基金项目: 中国工程物理研究院面上基金项目(20040426)

作者简介: 罗振雄(1978—), 男, 硕士, 助理研究员。

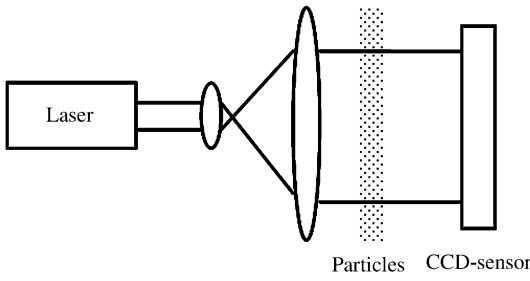


图 1 同轴全息记录粒子场光路图

Fig. 1 Sketch of inline digital holography for recording particles

2.2 数字全息的卷积再现方法

全息图的再现过程用 Rayleigh-Sommerfeld 衍射公式^[4]可以很好地模拟,由此,再现现象面上光波场可表示为

$$b'(x', y') = \frac{1}{i\lambda} \iint h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) \frac{\exp(ik\rho)}{\rho} \cos\theta d\xi d\eta \quad (1)$$

其中

$$\rho = \sqrt{d'^2 + (\xi - x')^2 + (\eta - y')^2} \quad (2)$$

式中: (x', y') 是象平面的坐标, (ξ, η) 是全息图平面坐标, $h(\xi, \eta)$ 为全息图, $r(\xi, \eta)$ 为再现光波, d' 为再现距离, θ 是衍射光张角。

若只考虑同轴全息的情况,可近似看作 $\cos\theta = 1$,再现光波采用平面波 $r(\xi, \eta) = 1 + 0i$,则式(1)可简化为

$$b'(x', y') = \frac{1}{i\lambda} \iint h(\xi, \eta) \frac{\exp(ik\rho)}{\rho} \cos\theta d\xi d\eta \quad (3)$$

将它看作一个线性移不变系统,可以表示为卷积形式

$$b'(x', y') = \iint h(\xi, \eta) g(x' - \xi, y' - \eta) d\xi d\eta \quad (4)$$

卷积核

$$g(x', y') = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp(ik\sqrt{d'^2 + x'^2 + y'^2})}{\sqrt{d'^2 + x'^2 + y'^2}} \quad (5)$$

用符号 F 表示 Fourier 变换,则式(4)表示为

$$b' = A' F^{-1}(F(h) \cdot F(g)) \quad (6)$$

设全息图为 $M \times N$ 的矩阵图像, $\Delta\xi$ 、 $\Delta\eta$ 为 CCD 相机单个像元尺寸,则脉冲响应函数 g 的离散形式可写为

$$g(k, l) = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda} \sqrt{d'^2 + (k - N/2)^2 (\Delta\xi)^2 + (l - M/2)^2 (\Delta\eta)^2}\right)}{\sqrt{d'^2 + (k - N/2)^2 (\Delta\xi)^2 + (l - M/2)^2 (\Delta\eta)^2}} \quad (7)$$

引入 $N/2$ 是为了再现图像的对称性。公式(6)、(7)即为数字全息图的卷积再现方法。

2.3 分辨率和防护

由于目前 CCD 像元尺寸和感光面的限制, CCD 的光学分辨率只有两三百线对,而传统全息干板很容易达到几千线对的分辨率。加上 CCD 相机的感光面的大小有限,采用传统全息干板则可以获得很大的感光面积。由于这些条件的限制,采用 CCD 接收全息图的数字全息很难分辨几微米的目标粒子。文献[5-7]中主要采用无透镜数字全息研究尺寸在几十微米左右的粒子。采用无透镜系统时,无法将粒子场与 CCD 感光面靠得很近而使小粒子获得合适的远场距离^[8],在此条件下要提高数字全息系统分辨小粒子的能力,可采用提高 CCD 相机感光面尺寸和加大 CCD 的感光灵敏度的办法,但提升有限。通过在 CCD 接收面前端采用 4F 传像透镜组作为成像透镜,将物场放大并转移到相机前的适当位置,可以有效解决数字全息系统分辨率不足的问题,而且可使 CCD 相机避开高压、高温等极端测试环境的影响。因为传像透镜组为 4F 结构,并没有对物场或全息图引入额外的 Fourier 变换,对数字再现几乎没有影响。

2.4 高速粒子的动态模糊

为了用同轴全息光路记录高速移动的粒子而不引起动态模糊,需要保证激光的脉宽 τ 满足关系

$$\tau < d/(10v) \quad (8)$$

式中: d 为粒子直径, v 为粒子速度。对于微小高速运动的目标粒子,需要一个很窄的激光脉宽。如粒子直径为 $10 \mu\text{m}$,速度为 2 km/s ,则要求照明光源的脉宽应小于 500 ps ,也就是说要开展此类研究需要皮秒脉宽的激光光源。由于 CCD 相机的感光灵敏度很高,动态范围相对较小,通常需要调整照明光源

的光强,而皮秒脉冲激光器的光强可调性较低,最佳选择是采用一个较高功率的激光脉冲,通过衰减片来调整进入 CCD 相机的光强来获得合适的感光度。

3 动态实验

如图 2 所示,动态实验在一个小型爆炸容器里进行,两侧使用光学玻璃作透光窗口,容器内抽真空。其中爆轰加载装置如图 3 所示,采用炸药紧贴飞片的加载方式,为获得微射流并保证射流粒子有足够的尺寸和速度,在铝飞片中心加工一个直径约 1 mm 的锥形小坑,照相视场取在飞片上方 8~12 mm 处。

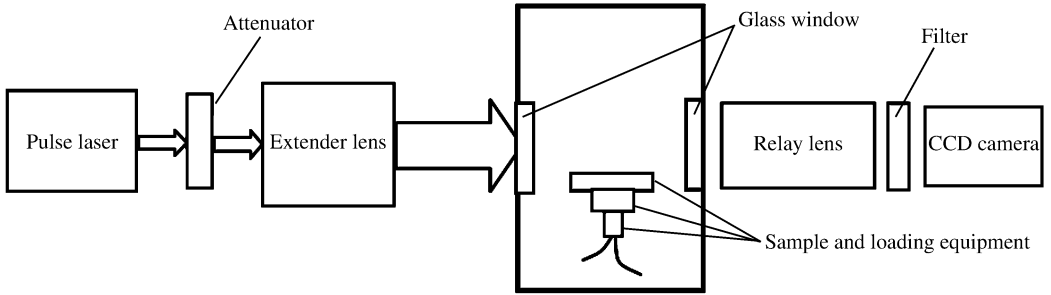


图 2 动态实验布置图

Fig. 2 Sketch of dynamic experimental setup

因微喷射粒子的速度高,通常都大于 2 km/s,照相中为了避免动态模糊,采用了皮秒脉冲激光器作为照明光源,脉宽为 160 ps,在此脉宽下,可以保证尺寸大于 4 μm,速度约 2 km/s 的粒子不会出现动态模糊。为了保证激光器具有较高的能量稳定性,激光器的输出功率较高,采用了一组衰减片减弱出射激光,避免 CCD 感光面曝光饱和。扩束准直透镜组将激光扩束为一束平面波,作为照明光源。传像透镜组负责将喷射粒子场放大并转移到 CCD 相机感光面所在的平面,CCD 相机前面的窄带滤光片用来避免爆炸发光的干扰。为了成功记录微小尺寸的粒子,采用的照相距离为 2 mm。

通过一个高精度延时同步控制装置来实现激光器出光时间、起爆时间和 CCD 相机电子快门打开时间的同步,需要确保在激光脉冲出光的时刻 CCD 相机电子快门处于打开状态,且微喷射粒子场恰好在 CCD 相机视场中,由于采用的 CCD 相机面阵为 1 300×1 030 像素,感光面纵向尺寸只有 8 mm,加上传像透镜组对物场的 2 倍放大作用,该照相系统的有效视场只有 4 mm,微喷射粒子的速度以 2 km/s 计算,同步时间精度要求小于 2 ns,如图 4 所示。

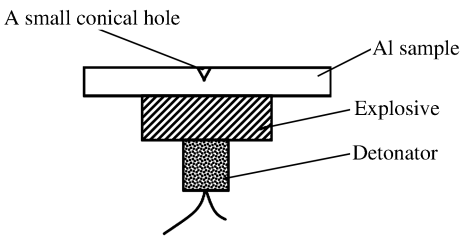


图 3 爆轰加载装置示意图

Fig. 3 Sketch of loading equipment

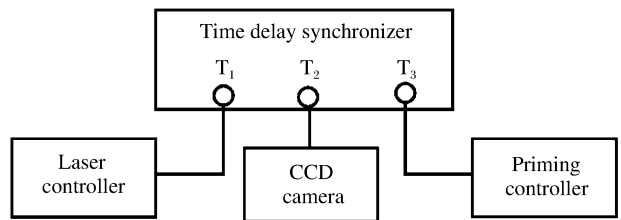


图 4 动态实验时序控制

Fig. 4 The time controller of dynamic experiment

4 实验结果及分析

实验获得的数字全息图如下图 5 所示,其中图 5(b)为图 5(a)中部分区域放大后显示的结果,由于 CCD 视场的限制,该实验只得到了射流粒子束中间的一部分的图像。

图 6 为该全息图采用式(6)和式(7)数字再现的结果,其中图 6(b)为图 6(a)中部分区域放大后显示的结果。图 6(c)和图 6(d)是将图 6(b)进行处理后的图像和粒子尺寸分布结果。若所有粒子在冲击波

到达飞片表面时同时起喷,根据照相区域与飞片的距离和曝光时间推算,处在图像中央部分的粒子的平均速度约 2.7 km/s,图像前端的粒子速度则达到了 4 km/s,而且,从图 6 中可以看出所取得的图像只是中间段的粒子图像,在前端的粒子速度显然大于 4 km/s,而后端的粒子速度则会小于 2.7 km/s。从粒子尺寸 d 分布图可以看出大部分粒子尺寸较小只有几微米,而较大尺寸的粒子也占有一定的比例,其尺寸多在几十微米。在粒子的飞行方向上越靠近前端粒子的分散越好,平均粒径也较小。

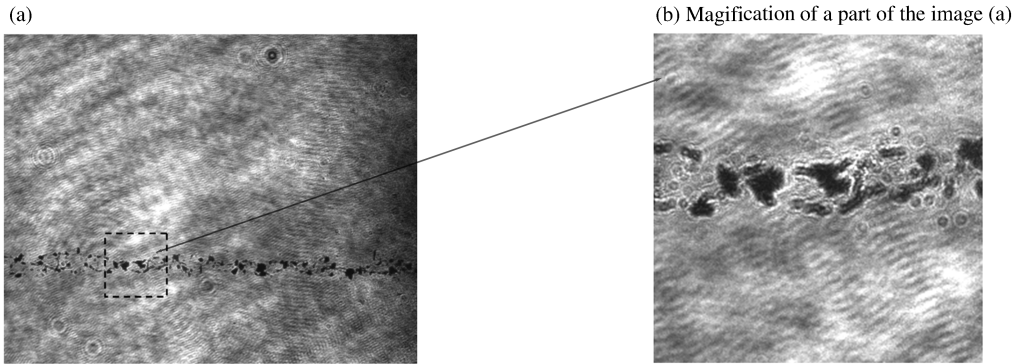


图 5 微射流粒子的数字全息图

Fig. 5 The digital hologram of micro-jet particles

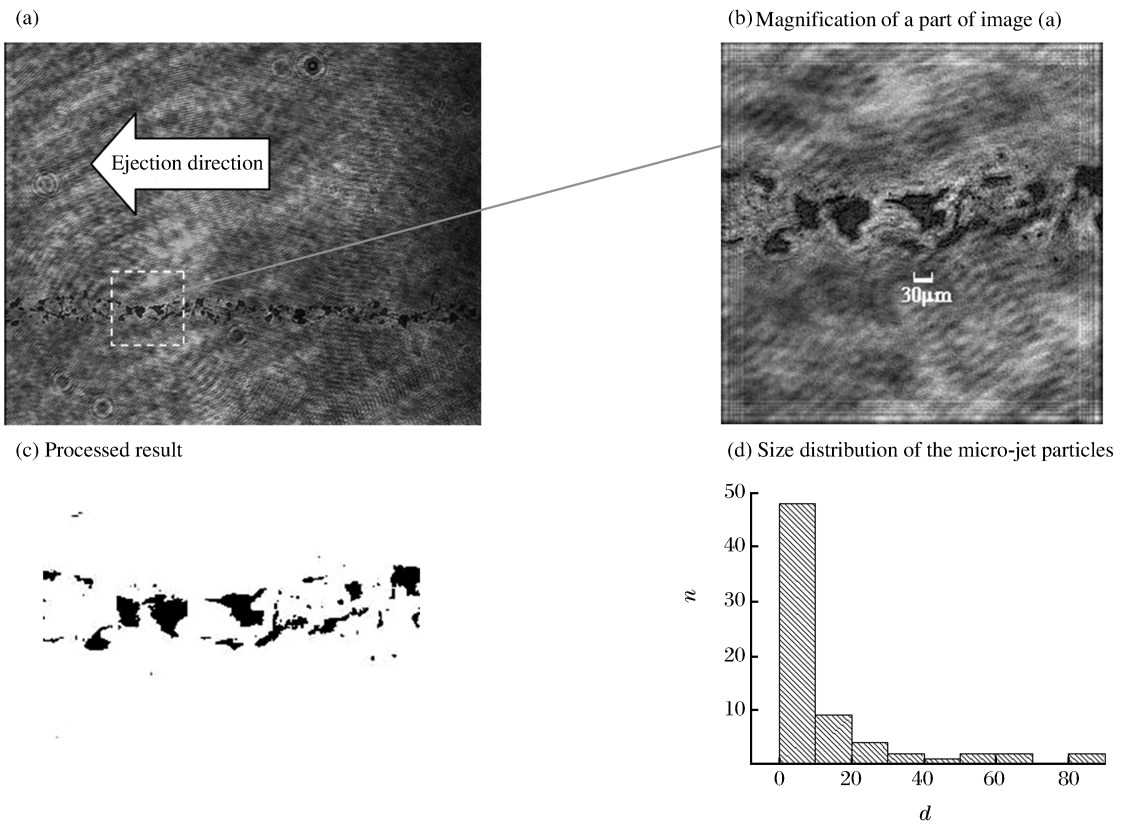


图 6 微射流粒子再现图像

Fig. 6 The reconstruction image of micro-jet particles

与用传统全息获得的测试结果^[4]比较可以发现,由于采用了皮秒脉冲作为照明光源,该实验获得了几个微米尺寸的喷射粒子,而没有动态模糊。由于 CCD 相机的感光灵敏度很高,所需的激光能量很低,所以对激光器的要求相对大幅度降低,而且在低输出能量下也很容易获得很高的光束质量,价格也更好,该实验中由于激光器的输出能量太高(只有一台用于传统全息的高输出能量的皮秒激光器),不得不

采用了衰减片降低进入 CCD 相机的能量,衰减倍率高达数万倍。因为没有全息干板以及洗相、再现进一步引入的噪声,该实验获得的图像的信噪比高,实验数据处理方便。实验过程中由于 CCD 相机可以实时监控的特点,照相距离的调整方便快捷、精确。

5 结 论

使用数字全息技术成功地获得了铝飞片在冲击加载下小孔微射流粒子图像,获得了小于 $10\ \mu\text{m}$ 的高速粒子的再现图像,有效视场约 $4\ \text{mm}$ 。很显然,从图像中可以看出,该次实验并没有照到完整的射流粒子喷射情况,主要原因是由于所采用的 CCD 相机分辨率($1\ 300\times 1\ 030$ 像素)的限制,若改用目前市场上可购的 $4\ 096\times 4\ 096$ 像素以上分辨率的面阵 CCD 相机,此系统的有效视场可达到十几毫米,或者在牺牲一部分可视范围的条件下对物场进一步放大,可以获得更高的空间分辨率。

参考文献:

- [1] 刘子超,赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量[M]. 北京:宇航出版社,1988:294-397.
- [2] Sorenson D, Minich R, Romero J, et al. Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals[J]. Journal of Applied Physics, 2002,92(10):5 830-5 836.
- [3] Ang J, Hansche B, Konrad C, et al. Pulsed holography for hypervelocity impact diagnostics[J]. International Journal of Engineering, 1993,14:13-24.
- [4] 李作友,李泽仁,叶雁,等. 微射流粒子场的同轴 Fraunhofer 全息测试[J]. 激光技术,2004,28(1):45-47.
LI Zuo-you, LI Ze-ren, YE Yan, et al. Micro-jet particle field measurement using in-line Fraunhofer holography [J]. Laser Technology, 2004,28(1):45-47.
- [5] 王仕璠,朱志强. 现代光学原理[M]. 成都:电子科技大学出版社,1998:91-94.
- [6] Adams M, Kreis T M, Jueptner W P. Particle measurement with digital holography[J]. SPIE, 1999,3 823:38-43.
- [7] Shigeru M, Norifumi Y. Potential of digital holography in particle measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2000,32:567-574.
- [8] Kunihiro N, Sachiko H, Keishi N. FFT analysis method for pulse laser in-line hologram of small particles[J]. SPIE, 1999,3 516:442-447.

Application of in-line digital holography to micro-jet particles measurement

LUO Zhen-xiong^{*}, LI Ze-ren, LIU Zhen-qing, LI Zuo-you, YE Yan, LI Jun

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The digital holographic theories and application in explosion were discussed. The digital hologram of micro-jet from Al flyer with a small conical hole in center under shock load was obtained, based on the questions solved about the resolving power, the dynamic blur, the safety and the accurate time delay synchronization. The micro-jet particles were reconstructed from the hologram in computer. The velocities of micro-jet particles ranged from 2.7 to 4 km/s. And their diameters were from several micrometers to tens of micrometer.

Key words: mechanics of explosion; particle measurement; digital holography; micro-jet particles

* Corresponding author: LUO Zhen-xiong
E-mail address: luozhenxiong@gmail.com
Telephone: 86-816-2484168