

高速运动粒子的脉冲全息诊断技术

曹娜, 曹亮, 徐青, 崔广斌,
马继明, 张占宏, 杜继业, 董静然

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 对爆炸冲击波作用下微喷射粒子的全息诊断方法进行了简要的理论分析,介绍了基于粒子场全息测试原理而研制的高速运动粒子空间分布参数脉冲全息诊断系统的组成和作用,并给出了该诊断系统对爆炸粒子场实际测量的结果。结果表明,该系统可以实现对高速运动粒子的三维诊断,满足实际工作的要求。另外,对这一测试系统和技术的应用发展方向中的问题进行了简要讨论。

[关键词] 脉冲全息;粒子场;诊断系统;高速运动

[中图分类号] 0438.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)09-0043-04

1 前言

现代科学与技术研究中,很多情形需要对微米量级的小颗粒进行定量分析研究,如烟雾、喷射物、灰尘颗粒、燃烧的煤粉颗粒、气穴和水中的气泡、燃烧室中的燃料液滴等。传统的显微技术虽然有较好的分辨率,但由于所研究对象为动态立体区域而非一个平面,同时还需要了解测试对象的大小与形状信息,因而无法满足研究需求。自从 B. J. Thompson 等将全息技术首次应用于微粒大小的分析后^[1],全息术很快被广泛应用于各种微粒场的测量,并形成了一个独立分支——微粒场全息术,使得动态三维微粒场的测量成为现实。

粒子场全息技术广泛应用于各种均匀背景介质微粒场的大小分布测量^[2-7],而且双曝光全息术还广泛地应用于各种微粒的速度测量^[7]。随着理论和实验技术的不断发展和成熟,全息术在科学与军事研究中得到了更深入的应用。例如,在某些特殊材料受强冲击作用的特性研究中,由于材料中的缺陷引起其内部密度不均匀,当冲击波到达材料-真空(气体)介面时,会产生射流。这些喷射出来的小粒子存在于材料表面上方空间,运动速度高达几千

米每秒,尺度在微米量级,形状各异,但在系统分辨率极限附近可近似视为球形颗粒。材料特性、表面形态、初始冲击条件等因素与喷射物的总量和速度密切相关。通过同轴粒子场脉冲全息诊断技术对喷射颗粒进行测量,可以获得粒子的尺度分布、空间分布及速度分布数据,据此可以对材料特性、冲击波的作用效果进行定量分析,从而为材料研究、冲击系统设计提供一定的实验数据。

2 基本理论

离轴全息是全息测量技术中最常用的记录方法,但实际工作中,傅立叶全息、无透镜傅立叶全息、像面全息和同轴夫朗和费全息等记录方式在针对一些特殊对象进行测量时表现出明显的优势,特别是同轴夫朗和费全息在粒子场测量中占据非常重要的地位^[2-5]。其原因在于当满足远场条件时,粒子再现孪生像在实像中相当于均匀的背景,提高了再现图像质量。同时,由于同轴记录方式结构简单,光路调节简便,对光路元件的精度要求降低,因此,在实际工程环境条件下,通常采用同轴夫朗和费全息方式对微喷射粒子场进行记录。

如图 1 所示,采用波长为 λ , 振幅为 B 的准直相

[收稿日期] 2009-01-05

[作者简介] 曹娜(1969-),女,河南南阳市人,西北核技术研究所副研究员,研究方向为脉冲全息诊断;E-mail: cnt96@yahoo.com

干光照在一个半径为 a 的粒子上,粒子表面的光场分布由 $A(\xi, \eta)$ 描述。在距粒子为 z (z 满足远场条件 $z \gg \pi a^2$) 处的记录介质上,粒子散射光与通过粒子区域未被散射的直通光相干涉形成干涉条纹被记录下来,形成粒子场的同轴夫朗和费全息图。

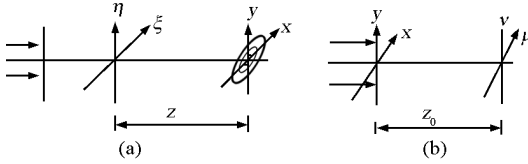


图1 粒子场夫朗和费全息记录与再现示意图
Fig.1 Recording and reconstruction scheme of the in-line Fraunhofer particle field

全息图记录的光场强度分布为^[8]:

$$I(x, y) = \left[\frac{B}{m_0} \right]^2 \left\{ 1 - \frac{m_0 k a^2}{z} \sin \left[\frac{k r^2}{m_0 z} \right] \left[2J_1 \left[\frac{k a r}{z} \right] / \left[\frac{k a r}{z} \right] \right] + \left[\frac{m_0 k a^2}{2z} \right]^2 \left[2J_1 \left[\frac{k a r}{z} \right] / \left[\frac{k a r}{z} \right] \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式(1)中, $k = 2\pi/\lambda$ 是光波空间角频率, λ 是记录光波长; m_0 为记录系统放大倍数,在平行光入射条件下 $m_0 = 1$; $r^2 = x^2 + y^2$; J_1 为一阶贝塞尔函数;记录光场强度 $I(x, y)$ 的分布表现为由贝塞尔函数调制的正弦或余弦振荡干涉细条纹。式中第一项代表均匀的背景光;第二项描述了参考光与物散射光之间的干涉,它由一个高频正弦函数项和一个低频贝塞尔函数项组成,包含了有关粒子尺寸、位置的全部信息,必须被忠实地记录下来;第三项是圆孔夫朗和费衍射给出的辐射分布,与条纹信息项相比可以忽略不计。从理论上说,在全息记录过程中,应尽可能多地记录贝塞尔函数波瓣的数目,但实际应用表明,为了能够分辨所记录的粒子大小,要求干涉场的中心最大区域必须被记录下来。

用波长与记录光波长相等的再现平行光照明经显影处理后的全息图,由于衍射的作用,在距离全息图前方 z_0 ($z_0 = z$) 处的观察面上得到的再现粒子场强度分布为^[8]

$$I(R) \propto \left| 1 + \Gamma \text{circ} \left(\frac{R}{a} \right) + \frac{\pi \Gamma}{8N} \left[\frac{2J_1(\pi R/4aN)}{\pi R/4aN} \right] \exp \left(\frac{i\pi R^2}{8a^2 N} - \frac{\pi i}{2} \right) - \frac{\Gamma \pi^2}{16N^2} \left[\frac{2J_1(\pi R/2aN)}{\pi R/2aN} \right]^2 \right|^2 \quad (2)$$

式(2)中, circ 为圆盘函数; $R^2 = \mu^2 + \nu^2$, μ, ν 为观察面横向坐标; $\Gamma = KB^2/B'$ (B' 为再现光场振幅, K 是常数); $N = \lambda z / (2a)^2$ 为远场数。式(2)中第一项是零级衍射光;第二项是被记录粒子的共轭像;第

三项则是记录粒子的孪生像;第四项为伴随出现的干扰。可见,由于 $z \gg \pi a^2$,全息图再现后得到的孪生虚像与实像相距较远,相当于均匀的背景光,清晰的粒子再现像凸现于背景中。

在上述讨论中忽略了粒子的多次散射,当粒子数目增加时,远离光源的粒子所接受的光是被前方粒子多次散射的光,其光波复振幅是越来越复杂的未知函数,这时,前面所采用的单粒子模型已不再成立。在粒子密度极高的极端情况下,在记录面上只有散斑图案而观察不到任何单个粒子形成干涉图案。因此,在同轴全息图的记录中,必须保证测试区域截面中有至少 80% 以上的未调制光。

3 全息诊断系统组成与功能

在爆炸微喷射粒子场的全息诊断中,受记录材料分辨率限制,传统的光学全息记录方式仍然被采用。由于喷射颗粒飞行速度高达几千米每秒,对记录光源的脉冲宽度及稳定性、触发时间精度提出了较高要求,同时在实验设计中还需要着重考虑测试对象和测试系统的同步问题。测试系统主要由记录、再现、自动采集、图像处理和三维再现几个分系统组成。

3.1 记录系统

该系统主要由准直记录光源、成像传输系统、介质记录系统和同步触发控制系统几部分组成,如图2所示。

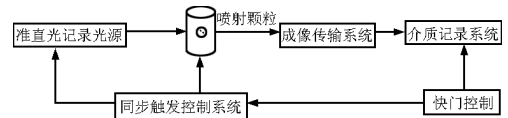


图2 记录系统组成示意图

Fig. 2 Scheme of the recording system combination

记录光源系统包括脉冲激光光源及激光准直扩束系统,以获得测试所需要的平行光。全息记录要求被测对象在曝光时间内保持相对静止,这样可以避免由于粒子运动引起干涉条纹的模糊。因此,在对高速运动粒子进行记录时,激光器的脉冲宽度是一个很重要的参数。理论计算与实验结果表明^[8],粒子的横向运动是引起干涉条纹淹没的主要原因。因此,在一个光脉冲的时间间隔内,当粒子的位移小于其直径的 $1/10$ 时,可以实现运动粒子的全息记录。

由于所记录的对象是微米量级的小颗粒,满足其远场要求的记录位置距颗粒往往在毫米量级,全息干板在这一位置肯定会被高速运动的颗粒损坏,

无法实现安全的全息记录。因此,必须通过成像透镜将粒子场成像到合适的记录位置进行记录。由于单透镜的像空间放大率不均匀,通常采用 $4f$ 成像系统,组成该系统的两组透镜可以采用不同的焦距,获得不同的放大倍率。这样,由于粒子处在平行光路中,在经过变换放大后,光场仍然保持平行,因此,像空间的所有粒子都具有相同的放大率,便于系统标定及粒子数据处理。

受空间及物理上的限制,粒子在测试区域的飞行时间只有几个微秒,采用研制的脉冲同步触发控制系统对激光器、爆炸源及研制的干板记录系统进行精确同步控制,实现了爆炸冲击波作用下产生的高速运动粒子的全息记录。

3.2 粒子场再现与图像采集系统

扩束后的平行再现光垂直投射到冲洗后的全息干板上,在干板前后空间成像位置处形成粒子场的再现像。粒子的空间分布信息通过成像物镜将再现粒子成像于 CCD (charge coupled device) 靶面上,随后进行图像处理获得。受 CCD 灵敏面积大小的限制,再现粒子场图像的采集由多次分幅采集完成。采用三维精密平移台控制干板或 CCD 的移动,在 X, Y, Z 3 个方向上按某种顺序运动即可实现整个再现粒子场图像的完整采集,如图 3 所示。在采集过程中,考虑在垂直于光轴的截面上,相邻的每幅图像之间需有一定程度的重叠以便于后期图像拼接;而沿光轴方向则需考虑再现像的景深及粒子大小,确定合适的步长,便于轴向空间位置的确定。采用笔者研发的粒子场再现图像采集软件,如图 4 所示,根据实际工作的需求,控制全息干板的移动方向、距离等参数,可以得到空间不同位置、不同层面、不同区域的粒子像。

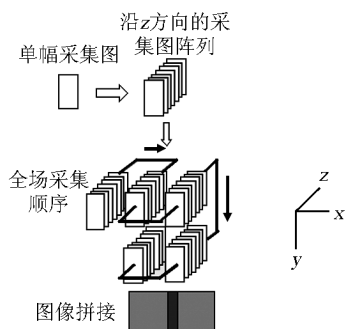


图 3 粒子场采集顺序图

Fig. 3 Sequences for particle field image collection

3.3 再现粒子像处理及三维显示

采集得到的粒子再现像经过图像数据处理,从

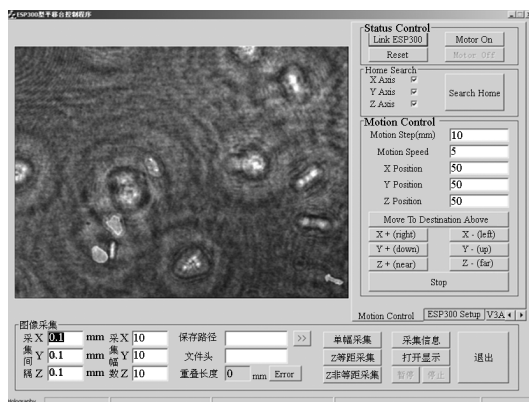


图 4 粒子场采集软件图

Fig. 4 Interface of the software for particle field image collection

复杂的背景图像中提取出来,从而获得所需的粒子形状、尺寸分布、空间分布等特征参数和统计规律。对粒子的识别建立在其全息再现像特征的基础上。爆轰微喷颗粒的全息再现像多处于图像的高亮度区域,且多数粒子周围有较为明显的衍射环。在焦粒子图像内部强度较为均匀,图像边沿较为规则、平滑,且具有较高的边沿梯度。同时,由于再现图像采集中沿光轴方向的采样率通常较高,粒子图像均存在于多个层面,且相邻层面粒子图像形状非常相似,根据这些粒子特征,采用排除法逐步剔除不符合条件的区域,获得粒子目标。

经过图像处理得到粒子大小、形状和空间位置等参数信息,将这些参数输入到三维空间模拟显示系统中,可以直接显示喷射粒子在空间的分布情况。同时,可以根据需要对特定大小、位置的粒子进行切面观察,这样能够更直观地从不同角度了解爆炸冲击波作用下表面喷射粒子的空间分布特征。

图 5 给出了某次爆轰实验中 $0.48 \text{ cm} \times 0.36 \text{ cm} \times 1.25 \text{ cm}$ 空间区域内的再现粒子场经图像处理得到的粒子尺寸分布,图 6 为三维显示结果。实验得到的再现粒子像粒径分布与空间分布,同实验前粒子的统计大小与预设空间位置一致,表明研制的同轴夫朗和费全息诊断系统可以对爆炸微喷射颗粒参数进行准确测量。

4 结语

脉冲全息技术在美国军事方面的应用极其深入,许多测试领域都大力发展和应用了全息技术^[9-12],如美国军事航空力学实验室的直升机流体测量、Idaho 国家工程实验室的两相流和电弧诊断、

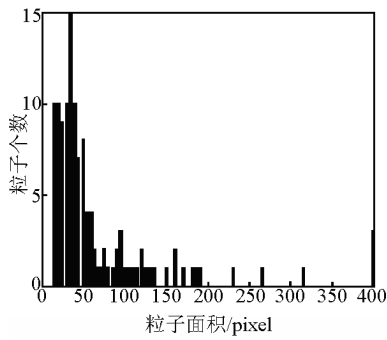


图5 再现粒子尺寸分布统计图

Fig. 5 Statistic distribution of the reconstructed particles size

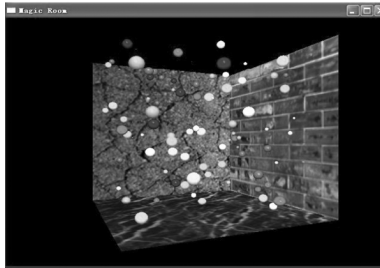


图6 再现粒子的三维显示

Fig. 6 Three - dimensional display of the reconstructed particles

Sandia 和 Livermore 实验室的点火试验、Los Alamos 实验室的核聚变研究、标准局的燃烧诊断等工作中都采用了脉冲全息技术; Los Alamos 实验室的流体动力学实验、Sandia 国家实验室的高速冲击事件诊断、Florida 空军基地的弹道事件碎片测量等实验都采用了粒子场全息技术。近年来,美国国家航空航天局在空间飞行实验、微重力场实验中采用脉冲全息技术对粒子的分布及运动进行了测量。

粒子场全息技术目前正逐渐向数字全息技术方向发展^[13],虽然传统的胶片记录可以获得很高的空间分辨率,但是由于全息胶片商品生产量的大量萎缩、暗室冲洗及再现过程会带来噪声、冗长的数据采集及访问时间等问题,人们考虑采用光电探测器代替传统记录介质进行全息图记录,通过计算机数值模拟取代光学衍射来实现物场再现这种新的数字全息技术来实现粒子参数的测量。随着高分辨率 CCD、高速计算机及先进的数字图像处理方法的出现,该技术近年来得到了快速发展并得到了实际应用。需要指出的是,目前无论是传统的干板全息记录模式还是数字全息记录模式,对于高速喷射粒子场的全息记录,都只能得到一个或两个时刻的单幅粒子场图像,在实际使用中,如何实现多幅图像记录

则成为目前的一个难题。

经过系统的研究,建立了爆炸微喷射粒子脉冲全息诊断系统和方法,并在此系统上开展了系列实验研究工作,获得了直径约为 $10\ \mu\text{m}$ 、运动速度在几千米每秒的爆炸喷射粒子的尺寸、形状及空间分布状态等参数信息,表明该测试系统完全可以满足目前实验研究的需要,而该测试系统性能的改进和测试技术方面的提高则在进一步的研究中。

参考文献

- [1] Thompson B J, Ward J, Zinky W. Application of hologram technique for particle size analysis [J]. J Opt Soc Am, 1965, 55: 1566 - 1573
- [2] Sorenson D S, Minich R W, Romero J L, et al. Ejecta particle sizing distributions for shocked loaded Sn and Al metals [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(10): 5830 - 5836
- [3] Yamakawa Masahisa, Kamikawa Masahiro, Yoshizaki Takuo, et al. Measurement of droplet distribution of a D. I. gasoline spray with pulsed laser holography [J]. Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan, 2001, 32(4): 45 - 50
- [4] Li Tie, Nishida Keiya, Hiroyasu Hiroyuki. Characterization of initial spray from a D. I. gasoline injector by holography and laser diffraction method [J]. Atomization and Spray, 2004, 14(5): 103 - 120
- [5] Vossing H J, Bormann S, Jaenicke R. In - line holography of cloud volumes applied to the measurement of raindrops and snowflakes [J]. Atmospheric Research, 1998, 49: 199 - 212
- [6] Thompson B J. Holographic methods for particle sizing and velocity measurement recent advances [J]. Holographic Optics II: Principles and Applications, Proc SPIE, 1989, 1136: 308 - 326
- [7] Coupland, Jeremy M, Halliwell, et al. Particle image velocity: Three - dimensional fluid velocity measurements using holographic recording and optical correlation [J]. Applied Optics, 1992, 31(8): 1005 - 1007
- [8] Chandras Vikram. Particle Field Holography [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 18 - 38
- [9] James A, Hansche, Bruce D, et al. Pulsed Holography for Hypervelocity Impact Diagnostics [R]. DE92 040259, SAND - 91 - 2871C, TX: Austin, 1992
- [10] Ankney J S, Bush G E. Classical and Holographic Interferometry Combined to Document Inertial Fusion Experiment [A]. AIP Conference Proceedings [C]. 1987, 160: 661 - 663
- [11] Theodore R, Pattinson, Donald L, et al. The role of sandwich holography in ICF [J]. J Vac Sci Technol, 1989, 7(3): 993 - 995
- [12] Busch Garland, George Charatis. Multiframe Holographic Shadowgraphy and Interferometry of Laser - Target Plasmas [A]. The 15th Intern Congr on High Speed Photography and Photonics [C]. San Diego, California, 1982
- [13] Zhang Yimo, Lu Qieni, Ge Baozhen, et al. Digital holography and its application [J]. Proceeding of SPIE, 2005, 5365: 200 - 211

(下转 58 页)