

# 高通滤波器尺寸对粒子离轴滤波全息像的影响

张连永<sup>1</sup>, 徐青<sup>2</sup>, 曹娜<sup>2</sup>, 曹亮<sup>2</sup>, 李斌康<sup>2</sup>, 刘运牙<sup>1</sup>, 雷岚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411100;

<sup>2</sup>西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西西安 710000

**摘要** 粒子场离轴滤波全息技术是减少背景噪声影响、改善粒子场再现像质量的有效方法。滤波器尺寸与再现粒子像密切相关,合适的滤波器尺寸有利于粒子的识别和测量。解析分析了高通滤波器尺寸、 $4F$ 系统前焦距及粒径对圆形粒子离轴滤波全息再现像强度分布的影响规律,数值模拟了不同尺寸的高通滤波器对相同粒径粒子全息再现像强度分布的影响,并开展了离轴滤波全息实验。研究表明,高通滤波器可以有效提高粒子图像的对比度;粒子尺寸不变时,滤波器尺寸越小或 $4F$ 系统前焦距越大,再现粒子像强度分布越均匀,同时边界梯度越大;滤波器尺寸和 $4F$ 系统前焦距恒定时,粒子越大,再现粒子像内部逐渐呈现明暗相间变化的圆环,同时粒子边界越来越清晰。

**关键词** 全息; 离轴全息; 高通滤波器; 解析; 粒子

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.060901

## Effect of the Size of High-Pass Filter on the Off-Axis Particle Holographic Image

Zhang Lianyong<sup>1</sup>, Xu Qing<sup>2</sup>, Cao Na<sup>2</sup>, Cao Liang<sup>2</sup>, Li Binkang<sup>2</sup>, Liu Yunya<sup>2</sup>, Lei Lan

<sup>1</sup> School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411100, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China

**Abstract** The holography of particle field by off-axis filter is an effective method for reducing the background noises and improving the reconstructed image quality. The filter size and the reconstructed particle image are closely related, a suitable filter size is important for the particle recognition and measurement. The relationship between the high-pass filter size, front focal length of  $4F$  system, particle size and the intensity distribution of holographic reconstructed images of circle particle by off-axis filter are analyzed respectively, and the influences of different high-pass filter sizes on the same size particle images are simulated numerically. In addition, the off-axis filtering holography experiment is carried out. The results show that, the particle image contrasts are increased effectively by the high-pass filter. The uniformity of the reconstructed image intensity distribution becomes better, and the boundary gradient increases with the smaller the filter size or the larger the front focal length of  $4F$  system, while with the increasing of particle size, some black and white circles appear gradually in the reconstructed particle image interior, and the particle boundary becomes increasingly clear.

**Key words** holography; off-axis holography; high-pass filter; analysis; particle

**OCIS codes** 090.2880; 350.2450; 110.3175; 050.1940

## 1 引言

脉冲激光全息是粒子场三维量化测量的标准方法,其可以得到粒子的空间分布、直径以及速度等信息<sup>[1-2]</sup>,因此普遍应用于受冲击材料的性能分析<sup>[3-4]</sup>、发动机燃烧室内液态燃料雾化特性测量<sup>[5-7]</sup>等力学过程

**收稿日期:** 2016-12-24; **收到修改稿日期:** 2017-01-24

**作者简介:** 张连永(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光全息技术方面的研究。E-mail: m13571845077\_1@163.com

**导师简介:** 曹娜(1969—),女,博士,研究员,主要从事脉冲激光全息诊断技术方面的研究。

E-mail: caona@nint.ac.cn(通信联系人)

的诊断和机理研究。然而,在实际测量中发现<sup>[8]</sup>,对于密度较高的粒子场,所记录的全息干涉条纹对比度严重下降,再现粒子图像中的背景噪声严重影响了粒子的识别率及粒子尺寸的测量精度。

针对上述问题,研究者提出了不同的解决方法,如 Cao 等<sup>[9]</sup>采用的侧向散射光干涉记录方法、Hinsch 等<sup>[10]</sup>提出的短相干长度技术等均取得了一定效果,但这些方法在工程中难以实施。研究发现,在全息中应用滤波技术可进一步改善测量性能<sup>[11-13]</sup>,Zhang 等<sup>[14]</sup>在离轴全息记录系统延迟透镜焦点处放置了一个 L 型支架固定的直径 2 mm 的圆盘进行滤波,改善了再现图像的信噪比;Anezaki 等<sup>[8]</sup>在高温高压室内喷嘴雾化测量中采用了滤波全息技术消除背景噪声。

在滤波全息应用中,滤波器尺寸是非常重要的参数,尺寸合适的滤波器可以有效地降低图像背景噪声、改善再现粒子图像的质量、提高测量数据的精度。在实际测量中,不同力学过程产生的粒子场中粒子尺度存在不同分布,甚至分布跨度较大,在特定尺寸的滤波器作用下,不同粒径粒子的再现像表现出不同的特征。确定合适的滤波器尺寸,系统研究不同滤波器作用下不同粒径粒子全息再现像的特征,是后期图像处理获取粒子信息的基础。然而,这方面尚未见到系统研究报道。

本文采用解析分析及数值模拟方法研究离轴粒子场全息成像系统中不同尺寸滤波器作用下的再现粒子像强度分布特征,以粒子板为对象开展相关实验研究,并分析高通滤波效应对粒子再现像的影响及规律,这可作为滤波器设计及后期数据处理的参考依据。

## 2 基本原理

离轴滤波全息记录及再现光路如图 1 所示。其中,准直入射光照射位于物平面 O 上的粒子板,粒子衍射光经过  $L_1$  与  $L_2$  透镜组成的  $4F$  光学成像系统与平行参考光相互干涉,在记录面 H 上形成粒子的全息图,物参光夹角为  $\theta$ ,F 面为  $4F$  光学成像系统高通滤波器所在的平面,I 面是物面 O 上的粒子经过  $4F$  光学成像系统的成像平面。再现过程中,使用原参考光照射全息干板,在 RI 面上形成粒子的全息再现像。再现像强度分布公式为<sup>[15-16]</sup>

$$I(r_i) = \frac{I_B I_C^2}{m_\phi^2} \left[ 1 - \alpha - \text{circ} \left( \frac{r_i}{a |m_\phi|} \right) + \frac{2\pi a \alpha}{\lambda f_1} \int_0^b \left( \frac{k a \rho}{f_1} \right) J_0 \left( \frac{k \rho r_i}{f_1 |m_\phi|} \right) d\rho \right]^2, \quad (1)$$

式中  $I_B$ 、 $I_C$  分别为入射光和参考光强度, $\alpha$  为高通滤波器吸收率, $r_i$  为再现像半径(再现像任意一点到粒子像中心的距离), $|m_\phi|$  为  $4F$  系统放大率, $a$  为物面圆形粒子半径, $\lambda$  为入射光、参考光及再现光波长, $f_1$  为  $L_1$  透镜焦距, $b$  为高通滤波器半径,circ 为圆盘函数, $J_0$ 、 $J_1$  分别为零阶和一阶贝塞尔函数。

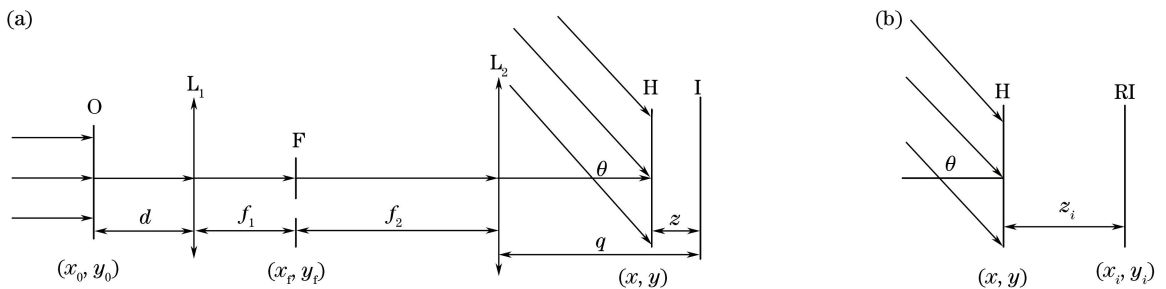


图 1 离轴滤波全息记录及再现光路图。(a)全息记录光路;(b)全息再现光路

Fig. 1 Schematic of recording and reconstructed path for off-axis holographic filtering.

(a) Holographic recording path; (b) holographic reconstructed path

## 3 理论分析

### 3.1 高通滤波器尺寸与再现像强度分布关系的解析分析

理论模拟中均采用实验系统的光学参数作为计算参数。依据(1)式,设  $I_B$  和  $I_C$  均为 1, $\alpha = 100\%$ , $|m_\phi| = 2$ , $f_1 = 220 \text{ mm}$ , $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ , $a = 0.05 \text{ mm}$ 。通过计算可以得到不同尺寸高通滤波器作用下圆形粒子离轴滤波全息再现像及其径向强度分布,坐标原点为粒子像圆心,结果如图 2 所示。

从图2中可以看出,经过放大率为1:2的4F光学系统传输后,再现粒子像半径为0.1 mm,是原粒子半径的2倍。未加滤波器时,再现粒子像表现为暗粒子和亮背景,并且强度分布均匀,如图2(a)和图2(b)所示;加入半径为0.15 mm的高通滤波器后,频谱面中的零频光被滤除,粒子像与背景强度发生反转,即再现粒子像表现为亮粒子与暗背景,强度分布均匀,如图2(c)和图2(d)所示;当高通滤波器半径从0.45 mm增加到3.75 mm的过程中,物光中被滤去的低频分量越来越多,相对的高频分量被加强,再现粒子像强度分布越来越不均匀,其中心强度随滤波器尺寸增大先减小为0而后增大到一定值后转而减小,如此反复变化,最终,当频谱面放置较大尺寸的高通滤波器时,粒子离轴滤波全息中的高频成分凸现,在再现像中呈现为多条亮暗相间的圆环,如图2(e)~(l)所示;此外,上述过程中再现粒子像边界始终处于最高亮度区,且随着滤波器尺寸的增加,粒子边界梯度增大,再现粒子像边界越来越明显清晰。通过对再现粒子像强度观察发现,图2(c)中最高强度约为图2(g)中的4倍,这表明物光能量主要集中在低频部分。

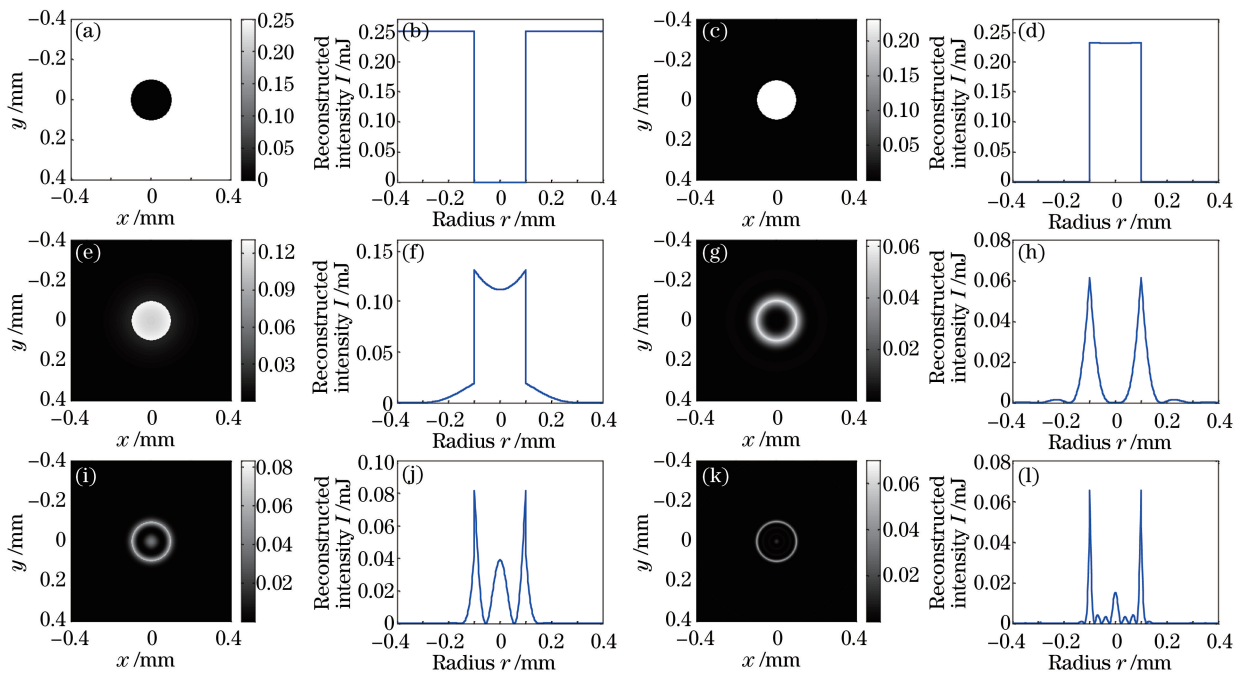


图2 不同高通滤波器半径下的圆形粒子离轴滤波全息再现像及径向强度分布。

(a)(c)(e)(g)(i)(k)半径为0,0.15,0.45,0.9,1.5,3.75 mm时的全息再现像;(b)(d)(f)(h)(j)(l)对应的径向强度分布曲线

Fig. 2 Holographic reconstructed images of circle particle by off-axis filter and corresponding radial intensity distributions

with different high-pass filter radiuses. (a)(c)(e)(g)(i)(k) Holographic reconstructed images with

radius of 0, 0.15, 0.45, 0.9, 1.5, 3.75 mm; (b)(d)(f)(h)(j)(l) corresponding radial intensity distribution curves

### 3.2 不同粒径粒子离轴滤波全息再现像

设滤波器半径为1.5 mm,根据(1)式计算得到不同粒径粒子全息再现像,结果如图3所示。图中标注的再现粒子像直径均为实际粒子直径的两倍。由图3可知,在特定的滤波器尺寸下,粒子粒径越小,再现粒子像强度分布越均匀,随着粒径的增加,再现粒子像由中心向边缘呈现亮暗交替变化,这与准直光照射不同粒

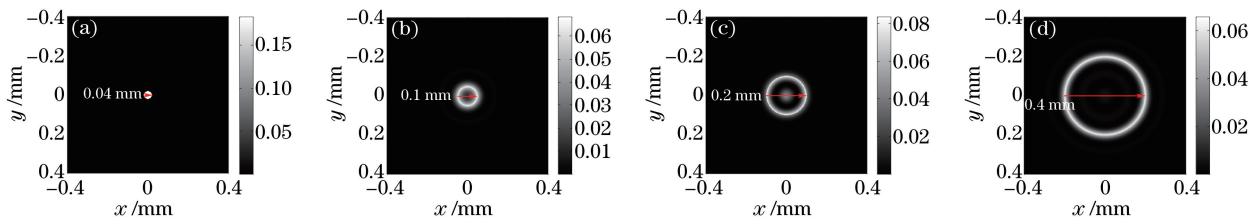


图3 不同粒径粒子离轴滤波全息再现像。(a) 0.01 mm;(b) 0.025 mm;(c) 0.05 mm;(d) 0.1 mm

Fig. 3 Holographic reconstructed images of off-axis filter with different particle sizes.

(a) 0.01 mm; (b) 0.025 mm; (c) 0.05 mm; (d) 0.1 mm

径粒子所形成的物光场的频谱分布有关。对比观察图 3(b)~(d)可见,当高通滤波器半径为 1.5 mm 不变时,粒径较大粒子再现粒子像边界轮廓更明显,粒子的识别和读取更容易。

### 3.3 不同 4F 系统前焦距对离轴滤波全息再现像的影响

设滤波器半径为 1.25 mm,其他参数与 3.1 节中一致,根据(1)式计算得到不同 4F 系统前焦距  $f_1$  条件下圆形粒子离轴滤波全息再现像及其径向强度分布曲线,结果如图 4 所示。对比图 4 与图 2 可以明显发现,随 4F 系统前焦距减小,离轴滤波全息再现粒子像变化规律与随着高通滤波器尺寸增大所表现的规律一致。这主要是由于焦距影响频谱面空域坐标与频域坐标之间的对应关系,当焦距增大时,空域空间所对应的频率减小,相当于频域空间进行了拉伸,因此,相同尺寸的滤波器所阻挡的频率成分减小,类似于频率空间不变时滤波器尺寸减小,相应阻挡频率减小所表现的特征。

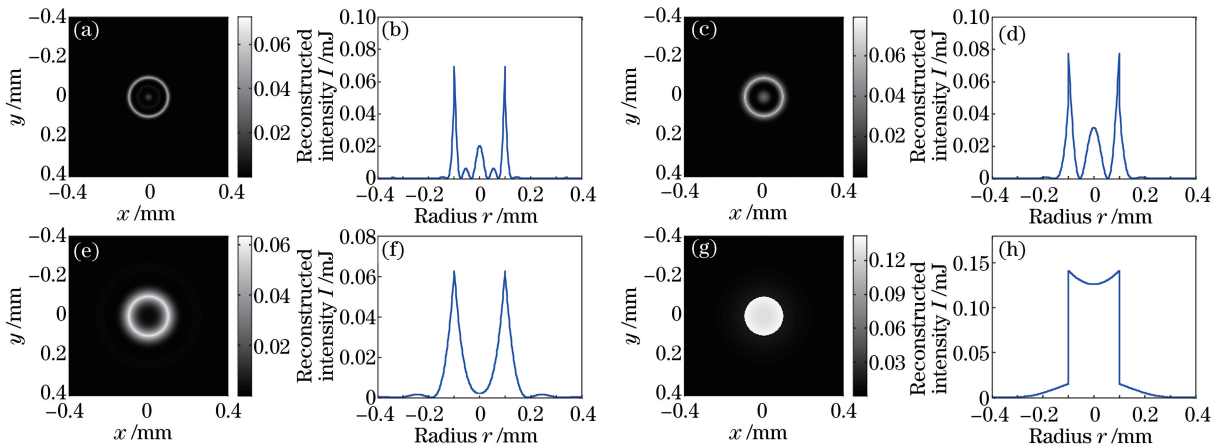


图 4 不同 4F 系统前焦距下圆形粒子离轴滤波全息再现像及径向强度分布。

(a)(c)(e)(g)焦距为 110,220,330,660 mm 时的全息再现像;(b)(d)(f)(h)对应的径向强度分布曲线

Fig. 4 Holographic reconstructed images of circle particle by off-axis filter and corresponding radial intensity distributions with different 4F system focal lengths. (a)(c)(e)(g) Holographic reconstructed images with focal length of 110, 220, 330, 660 mm; (b)(d)(f)(h) corresponding radial intensity distribution curves

### 3.4 数值模拟

解析分析通过(1)式得到  $I$  随  $r_i$  的变化曲线,而数值模拟对整个离轴滤波全息过程进行分步衍射数值计算得到再现像强度分布。模拟过程中根据衍射距离的不同选择一次快速傅里叶变换(S-FFT)、两次快速傅里叶变换(D-FFT)等不同的衍射数值公式。

设物面尺寸为  $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$ ;采样点数为  $512 \times 512$ ;物面到  $L_1$  透镜前表面距离  $d = 215 \text{ mm}$ ;  $L_2$  透镜后表面到成像面的距离  $q = 460 \text{ mm}$ ;全息图到成像面的距离与再现过程中全息图到再现像面的距离相等,即  $z = z_i = 20 \text{ mm}$ ;其他参数与 2.1 节中相同。

图 5 为圆形粒子离轴滤波全息再现像及再现像中与  $x$  轴平行且过圆心的直线上的强度分布的数值模拟结果。通过对比可见,数值模拟结果与解析分析结果相吻合;图中再现像比较模糊,强度分布曲线也存在一些曲折,这是由于粒子像所占像素数很少以及吉普斯现象的影响。两种分析方式相互证明了高通滤波器尺寸对离轴全息再现像强度分布的影响规律。

## 4 实 验

开展了离轴滤波全息实验,对理论分析结果进行了实验验证。实验记录光源为 532 nm 脉冲激光器,被测物体为分布着粒径  $10 \sim 100 \mu\text{m}$  圆形小粒子点阵的标准粒子板,物光经 1:2 的 4F 光学传输系统后与参考光干涉形成全息图。再现过程中,再现像经放大率 1:3 的成像物镜放大后被 CCD 采集并传输到计算机。

图 6 为直径 0.1 mm 的圆形粒子离轴滤波全息再现像及再现像中与  $x$  轴平行且过圆心的直线上的灰度分布的实验结果。比较理论与实验结果可以发现,不同尺寸滤波器对直径为 0.1 mm 圆形粒子离轴滤波全息再现像的影响趋势基本一致。图 6(a)结果显示为暗粒子、亮背景,图 6(c)、(e)、(g)均显示为亮粒子、暗背

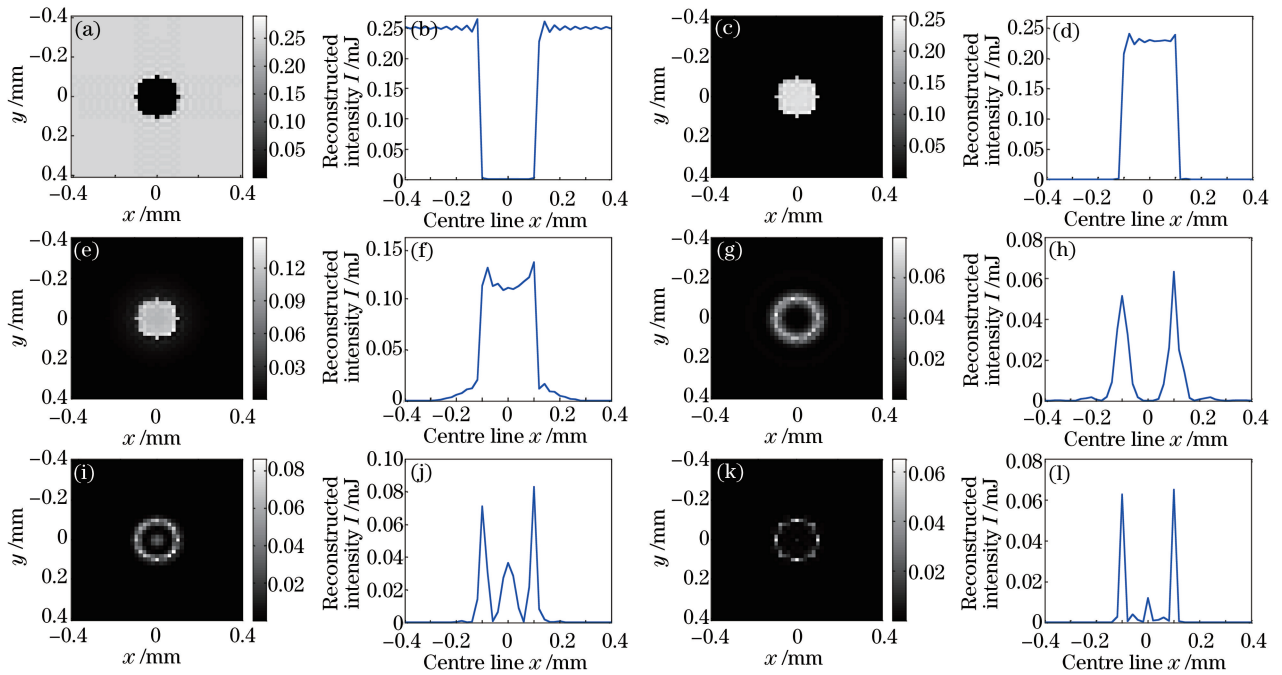


图5 不同高通滤波器半径下圆形粒子离轴滤波全息再现像及再现像中与 $x$ 轴平行且过圆心的直线上的强度分布。(a)(c)(e)(g)(i)(k)半径为0,0.15,0.45,0.9,1.5,3.75 mm时的全息再现像;(b)(d)(f)(h)(j)(l)对应的强度分布曲线

Fig. 5 Holographic reconstructed images of circle particle by off-axis filter and corresponding intensity distributions at centre line of circle parallel to  $x$ -axis with different high-pass filter radiuses. (a)(c)(e)(g)(i)(k) Holographic reconstructed images with filter radius of 0, 0.15, 0.45, 0.9, 1.5, 3.75 mm; (b)(d)(f)(h)(j)(l) corresponding intensity distribution curves

景,同时背景噪声较少,粒子像边界轮廓也比较明显。但由于曝光量不足等实验因素造成图像对比度较差,如图6(c)所示。根据图6(g)中粒子像边界灰度最大点确定的粒子直径为0.1024 mm,误差为2.4%。

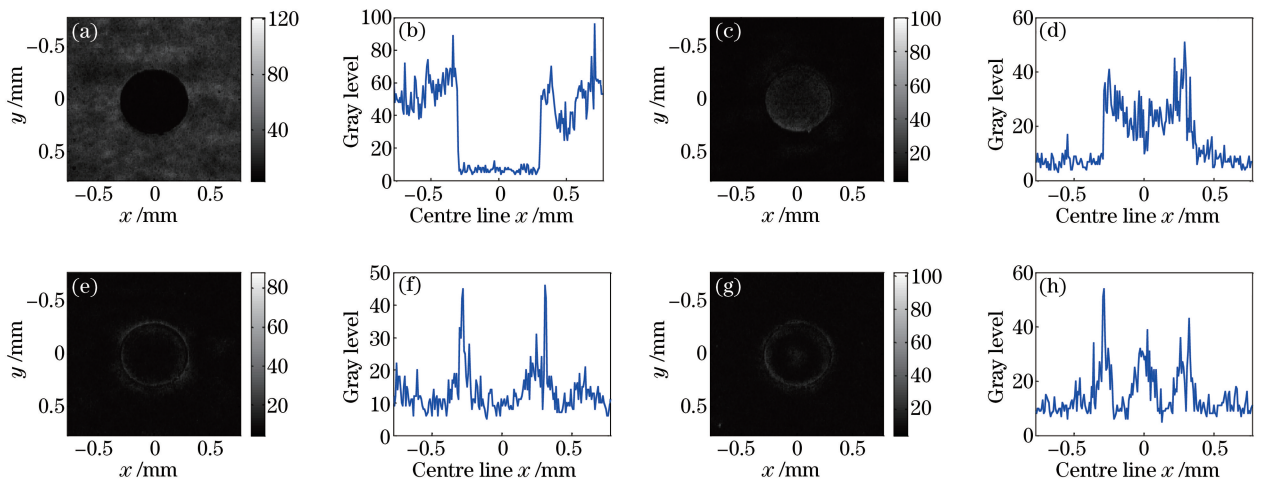


图6 不同高通滤波器半径下圆形粒子离轴滤波全息再现像及再现像中与 $x$ 轴平行且过圆心的直线上灰度分布的实验结果。

(a)(c)(e)(g)半径为0,0.45,0.9,1.5 mm时的全息再现像;(b)(d)(f)(h)对应的灰度分布曲线

Fig. 6 Experimental results of holographic reconstructed images of circle particle by off-axis filter and corresponding gray level distributions at centre line of the circle parallel to  $x$ -axis with different high-pass filter radiuses.

(a)(c)(e)(g) Holographic reconstructed images with filter radius of 0, 0.45, 0.9, 1.5 mm;

(b)(d)(f)(h) corresponding gray level distribution curves

图7为不同粒径粒子离轴滤波全息实验结果。其中,图7(a)和图7(b)分别为高通滤波器半径为0.45 mm和1.5 mm时不同粒径圆形粒子的全息再现像。每一行粒子粒径相同,每一列由上往下对应的粒子

粒径依次为 0.05, 0.02, 0.01, 0.1 mm; 图 7(a) 中 0.1 mm 粒子再现像呈现不均匀性, 其他小粒子再现像强度分布比较均匀, 且强度高出很多; 图 7(b) 中 0.02 mm 粒子再现像强度分布比较均匀, 0.05 mm 粒子再现像中心强度几乎为 0, 0.1 mm 粒子再现像由中心向边缘呈现亮-暗-亮的交替变化, 并且粒子粒径越小, 再现像强度越高。上述实验结果与 3.2 节中的理论结果一致, 即在特定的滤波器尺寸下, 粒子粒径越小, 再现粒子像强度分布越均匀, 随着粒径的增加, 高频信息凸显, 再现粒子像由中心向边缘呈现亮暗交替变化。

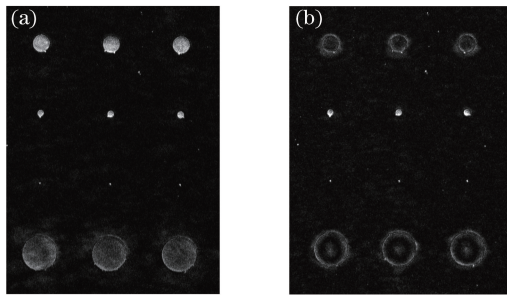


图 7 不同高通滤波器半径下的再现像结果。(a) 0.45 mm; (b) 1.5 mm

Fig. 7 Results of reconstructed images with different high-pass filter radiuses. (a) 0.45 mm; (b) 1.5 mm

## 5 结 论

采用解析分析、数值模拟以及实验验证 3 种方法研究了高通滤波器尺寸对粒子离轴滤波全息再现像强度分布的影响, 3 种方式得到的结果具有一致性。同时, 解析分析了高通滤波器尺寸一定时,  $4F$  系统前焦距及粒径对粒子离轴滤波全息再现像强度分布的影响。

通过研究发现, 对不同粒径粒子选择合理尺寸的高通滤波器, 有利于根据全息再现粒子像特征进行粒子的识别与尺寸的测量。 $4F$  系统前焦距变化对粒子离轴滤波全息再现像强度分布的影响与高通滤波器尺寸或粒径变化所带来的影响相反。在实际测量中, 由于小粒子的衍射光强较弱, 采用大尺寸滤波器虽然可以降低背景噪声, 但同时导致粒子再现像强度更低、对比度变差而无法对粒子边界进行界定, 因此, 对于  $50 \mu\text{m}$  以下的粒子, 仍然采用小尺寸的滤波器以消除相干背景光, 获得完全反转的均匀再现像进行粒子记录和识别; 而对于大粒径粒子, 由于完全消除背景光所需的滤波器尺寸往往很小, 如直径  $100 \mu\text{m}$  以上粒子对应的滤波器尺寸一般要求在  $600 \mu\text{m}$  以下, 对于滤波器设计加工及使用而言非常困难, 因此, 采用大尺寸滤波器比较有利。

## 参 考 文 献

- [1] Lei Lan, Cao Na, Cao Liang, *et al.* Holographic measurement of atomization characteristics of fan-shaped air-blast atomization SNCR nozzle[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 28-34.  
雷 岚, 曹 娜, 曹 亮, 等. 扇形气力雾化 SNCR 喷嘴雾化特性的全息测量[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(10): 28-34.
- [2] Sorenson D S, Pazuchanics P D, Johnson R P, *et al.* Ejecta particle-size measurements from the break-up of micro-jets in vacuum and helium gas using ultraviolet in-line Fraunhofer holography [C]. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2015, 1793(1): 100026.
- [3] Cao Na, Cao Liang, Xu Qing, *et al.* Pulsed holography diagnosis of high-speed particles[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(9): 48-51.  
曹 娜, 曹 亮, 徐 青, 等. 高速运动粒子的脉冲全息诊断技术[J]. 中国工程科学, 2009, 11(9): 48-51.
- [4] Luo Zhenxiong, Li Zeren, Liu Zhenqing, *et al.* Application of in-line digital holography to micro-jet particles measurement[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(3): 278-282.  
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.
- [5] Zhang Long, Zhang Lihu, Cao Na, *et al.* Spray fuel particle field measurement by using laser holography and PDPA

- technology[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(2): 83-87.
- 张 龙, 张力虎, 曹 娜, 等. 运用激光全息术和 PDPA 测量喷射燃料粒子场[J]. *实验流体力学*, 2011, 25(2): 83-87.
- [6] Wu P K, Lin K C, Jackson T A. Effects of flow initial conditions on spray characteristics with and without crossflows [C]. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006: 1506.
- [7] Sallam K A, Aalburg C, Faeth G M, *et al.* Primary breakup of round aerated -liquid jets in supersonic crossflows[J]. *Atomization and Sprays*, 2006, 16(6): 657-672.
- [8] Anezaki Y, Shirabe N, Kanehara K, *et al.* 3D spray measurement system for high density fields using laser holography [C]. SAE Technical Paper, 2002.
- [9] Cao L J, Pan G, de Jong J, *et al.* Hybrid digital holographic imaging system for three-dimensional dense particle field measurement[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(25): 4501-4508.
- [10] Hinsch K D, Herrmann S F. Signal quality improvements by short-coherence holographic particle image velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(4): 622-630.
- [11] Ma Jianshe, Cheng Bingchao, Cao Wenbo, *et al.* Holographic display system of digital micro-mirror devices based on LED light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0709001.  
马建设, 程炳超, 曹文波, 等. 基于 LED 光源的数字微镜器件全息显示系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0709001.
- [12] Ma Yanxiao, Wang Huaying, Gao Yafei. Study of the generalized linear reconstruction algorithm in the pre-magnification digital holographic technology with spherical reference wave [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040901.  
马彦晓, 王华英, 高亚飞. 基于广义线性重建算法的球面参考光预放大数字全息技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040901.
- [13] Chen Jiazhen, Zheng Zihua, Ye Feng, *et al.* Method on controllable reconstruction of fresnel computer-generated hologram watermark for digital hologram[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120901.  
陈家祯, 郑子华, 叶 锋, 等. 数字全息图可控再现菲涅耳计算全息水印方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 120901.
- [14] Zhang J, Katz J. Off-axis HPIV with forward light scattering from particles[C]. ASEM, 1994, 191: 173-177.
- [15] Lai Tianshu. Automatic analysis of particle field holography theory, the application and particle hologram[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1990: 36-59.  
赖天树. 微粒场全息术理论、应用及微粒全息图的自动分析[D]. 西安: 西安交通大学, 1990: 36-59.
- [16] Lai T S, Tan Y S. Filtering effects in off-axis far-field holography[C]. SPIE, 1990, 1319: 431-432.