

干涉粒子成像技术可测粒径上限分析

付春帅^{1,2}, 吕且妮^{1,2*}, 刘浩^{1,2}, 刘泰裕^{1,2}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 从实验上研究了干涉粒子成像技术(IPI)的最大可测粒子尺寸。分析了同一视场中不同物面导致的物距变化对 IPI 最大可测粒径的影响。搭建了单光束照射的 IPI 实验系统,对粒子直径为 51 μm 和 110 μm 的聚苯乙烯混合粒子场进行测量,分析了同一视场内不同采集区域的最大可测粒径。实验结果表明,IPI 技术最大可测粒径受实验系统物距影响,对于一固定参数的实验系统,同一视场内不同采集区域的最大可测粒径不同。

关键词 散射; 干涉粒子成像; 离焦条纹图; 粒子尺寸测量; 最大可测粒径

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212913

Upper Limit Analysis of Measurable Particle Size by Interferometric Particle Imaging Technology

Fu Chunshuai^{1,2}, Lü Qieni^{1,2*}, Liu Hao^{1,2}, Liu Taiyu^{1,2}¹School of Precision Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract This study experimentally investigates the maximum measurable particle size of interferometric particle imaging (IPI). The maximum measurable particle size for IPI was examined in relation to the effect of object distance variation brought on by several object planes in the same field of vision. The IPI experimental system irradiated by a single beam was built to measure the polystyrene mixed particle fields with particle diameter of 51 μm and 110 μm , and the maximum measurable particle size in different collection areas in the same field of view was analyzed. The outcomes of the experiment demonstrate that the spatial relationship between the objects in the experimental system has an impact on the maximum quantifiable particle size of IPI technology. The maximum quantifiable particle size of various acquisition areas within the same field of view varies for an experimental system with fixed parameters.

Key words scattering; interferometric particle imaging; defocus fringe pattern; particle size measurement; maximum measurable particle size

1 引言

基于光散射理论的粒子尺寸测量方法主要利用粒子的散射光反演计算得到粒子尺寸信息^[1-3]。干涉粒子成像技术(IPI)是一种基于 Mie 散射理论的相对较新的球形粒子尺寸和空间分布测量技术,该技术利用片状激光束在球形粒子表面的反射光和经粒子后的折射光在离焦平面干涉形成条纹图,通过测量干涉条纹的条纹数,计算得到粒子尺寸,广泛应用在喷雾场^[4-8]、

气泡^[9-12]和流场^[13]粒子尺寸测量等领域。在 IPI 技术中,可测粒子尺寸范围与实验系统参数有关,因此如何设计实验系统来满足实际粒子场的测量要求具有重要意义。Damaschke 等^[14]分析了 IPI 可测粒径范围和可测粒子场浓度,并研究了实验中如何改变实验系统参数实现对高浓度小颗粒的准确测量。吕且妮等^[15]分析了影响 IPI 实验系统中最大和最小可测粒径及粒径测量精度的因素,同时给出了标准粒子测量光路系统设计实例和测量结果。Xu 等^[16]讨论了成像系统综合参

收稿日期: 2021-11-09; 修回日期: 2022-01-08; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61275019)

通信作者: *qienil@tju.edu.cn

数对 IPI 系统可测粒径范围的限制,并提出了扩展 IPI 技术,该技术采用不同散射角和入射光偏振性的双 IPI 测量系统,扩展了 IPI 技术的可测粒径范围。

本文主要分析了在同一采集视场中,由于不同物面导致的物距变化对 IPI 实验系统最大可测粒径的影响。搭建单光束照射的 IPI 实验系统,对不同尺寸的混合标准粒子进行测量,分析同一视场内不同区域的最大可测粒径。理论与实验结果具有较好的一致性。研究内容对 IPI 在宽尺寸喷雾场粒子粒径和粒度分布测量的实验系统设计具有指导性意义。

2 理论分析

片状激光束照射到球形粒子表面产生不同阶的散射光,即反射光($P=0$)、一阶透射光($P=1$)和二阶透射光($P=2$)等,其中 P 表示散射光的阶数, $P=1$ 表示入射光折射进入粒子后直接折射出粒子, $P>1$ 表示入射光折射进入粒子后先在粒子内部发生 $P-1$ 次反射再折射出粒子。对于球形透明颗粒,在散射角 θ 在 $30^\circ\sim 80^\circ$ 之间时,粒子散射光主要为 0 阶反射光和 1 阶透射光,在聚焦平面产生两点像,在离焦平面干涉产生条纹图,如图 1 所示。

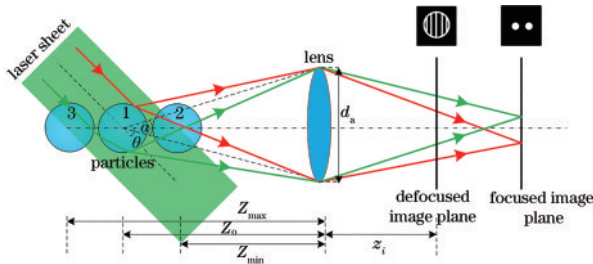
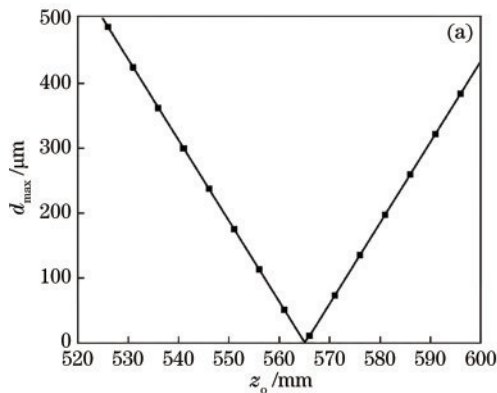


图 1 IPI 测量原理图
Fig. 1 Principle of IPI

干涉条纹图的形状与成像透镜的孔径有关,粒子尺寸 d 与条纹数 N 的关系^[14]为



$$d_{\text{IPI}} = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left[\cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right]^{-1} = \frac{\lambda \beta N}{\alpha}, \quad (1)$$

$$\beta = 2 \left[\cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中: λ 为入射激光波长;成像系统收集角 $\alpha = \arctan(d_a/z_0)$, d_a 为成像透镜孔径, z_0 为成像系统物距; m 为粒子相对折射率; θ 为实验系统散射角。由式(1)可知,粒子尺寸 d 与条纹数 N 成正比。因此,当 $N=1$ 时, IPI 系统可测粒径最小:

$$d_{\text{IPI, min}} = \frac{\lambda \beta}{\alpha}. \quad (3)$$

系统最大可测粒径受到 Nyquist 准则限制,该准则要求每个干涉条纹至少要覆盖 2 个像素,即 $d_{\text{IPI, min}}/N_{\text{max}} \geq 2\Delta x$, 其中 $d_{\text{IPI, min}}$ 为最小条纹图尺寸, N_{max} 为最大条纹数, Δx 为 CCD 像素尺寸。 $d_{\text{IPI, min}}$ 可以表示为

$$d_{\text{IPI, min}} = d_a \left| 1 - z_i \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z_{\text{min}}} \right) \right|, \quad (4)$$

式中: f 为成像透镜焦距; $z_{\text{min}} = z_0 - s_i/2\sin\theta$, s_i 为片状激光束宽度; z_i 为成像系统像距。则最大可测粒径为

$$d_{\text{IPI, max}} = \frac{\lambda \beta}{2\alpha \Delta x} d_a \left| 1 - z_i \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z_{\text{min}}} \right) \right|. \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可知, IPI 系统最大和最小可测粒径范围只与实验系统参数有关,是 z_0 、 z_i 、 f 、 Δx 、 d_a 、 λ 和 m 的函数。对于一固定实验系统,如图 1 所示,在片状激光束照射方向、不同位置的粒子所处的物面不同时,其对应的物距不同。当 $m=1.33$ 、 $\lambda=532 \text{ nm}$ 、成像透镜焦距 $f=100 \text{ mm}$ 、孔径 $d_a=50 \text{ mm}$ 、CCD 相机的像素尺寸 $\Delta x=5 \mu\text{m}$ 、放大倍率 $M=0.2$ 时, IPI 系统可测粒径范围随物距变化的曲线如图 2 所示。

由图 2 可知:对于一固定 IPI 实验系统,最大可测粒径受实验系统物距影响,且在聚焦位置所对应物距

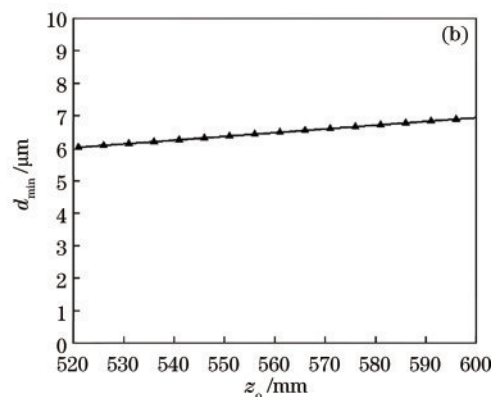


图 2 可测粒径范围随物距变化曲线。(a)最大可测粒径随物距变化曲线;(b)最小可测粒径随物距变化曲线

Fig. 2 Variation curve of measurable particle size range with object distance. (a) Curve of maximum measurable particle size with object distance; (b) curve of minimum measurable particle size with object distance

两侧呈对称分布;最小可测粒径随物距变化不明显。

3 实验及结果分析

3.1 实验设计

为了验证 IPI 实验系统最大可测粒径随物距的变化关系,设计了如图 3(a)所示的实验系统,实验中对粒子直径 d 为 $51\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$ 的混合 PSL 标准粒子场进行了测量,散射角设置为 58° ,此时对应空气中的散射角 $\theta=45^\circ$,图 3(b)为系统采集粒子场的条纹图。CCD 像素数为 2560×2048 ,像素尺寸 $\Delta x=5\ \mu\text{m}$,成像镜头为 AF 85mm f/2.8D 镜头,放大倍率 $M=0.238$,光束宽度 $s_r=0.6\ \text{mm}$ 。光束宽度内不同位置相对于物距变化导致的最大可测粒径变化较小,因此本实验忽略了光束宽度对系统可测粒径上限的影响。图 3(a)中 A、B 和 C 分别代表不同物面,从 A 到 B 实验系统物距逐渐减小。在物面 C 位置放置标定物, C' 为其在 CCD 上的聚焦像面,通过物像关系可以得到物距 $z_0=442.1\ \text{mm}$,像距 $z_i=105.2\ \text{mm}$,对应图 3(b)中绿色线所示的像面。将标定物从物面 C 向物面 B 移动,移动距离为 Δl ,图 3(a)中 Δl 表示从物面 C 移动到物面 D 的

距离。每移动 5 mm 后,调整相机位置,重新得到标定物的聚焦像,同时记录各个位置的离焦距离 g ,图 3(b)中红色线所在位置为各测量点位置。理论上根据几何关系,离焦距离 g 与标定物移动距离 Δl 之间的函数关系为

$$g = \frac{f^2 \Delta l \cos \theta}{(z_0 - f)^2 - \Delta l \cos \theta (z_0 - f)} \quad (6)$$

对实验得到的各测量位置的离焦距 g 和标定物移动距离 Δl 进行拟合,如图 3(c)中虚线所示。由图 3 可知,实验拟合曲线与理论计算曲线具有较好的一致性,这为接下来的视场选择提供了依据。对于所设计的实验系统,由式 (5) 可知,当 $d_{\max} \leq 100\ \mu\text{m}$ 时对应的物距范围为 $[435.9\ \text{mm}, 442.1\ \text{mm})$ 和 $(442.1\ \text{mm}, 448.3\ \text{mm}]$,当 $z_0=442.1\ \text{mm}$ 时,此时在聚焦平面形成粒子的两点像。根据视场对应关系可知,当 $d_{\max}=100\ \mu\text{m}$ 时, $z_0=435.9\ \text{mm}$,对应的像面如图 3(b)中 D' 平面所示。

3.2 实验结果

图 4(a)和图 4(b)分别为图 3(b)中不同视场区域的条纹图,图 4(a)对应物距 $435.9\ \text{mm} \leq z_0 < 442.1\ \text{mm}$,

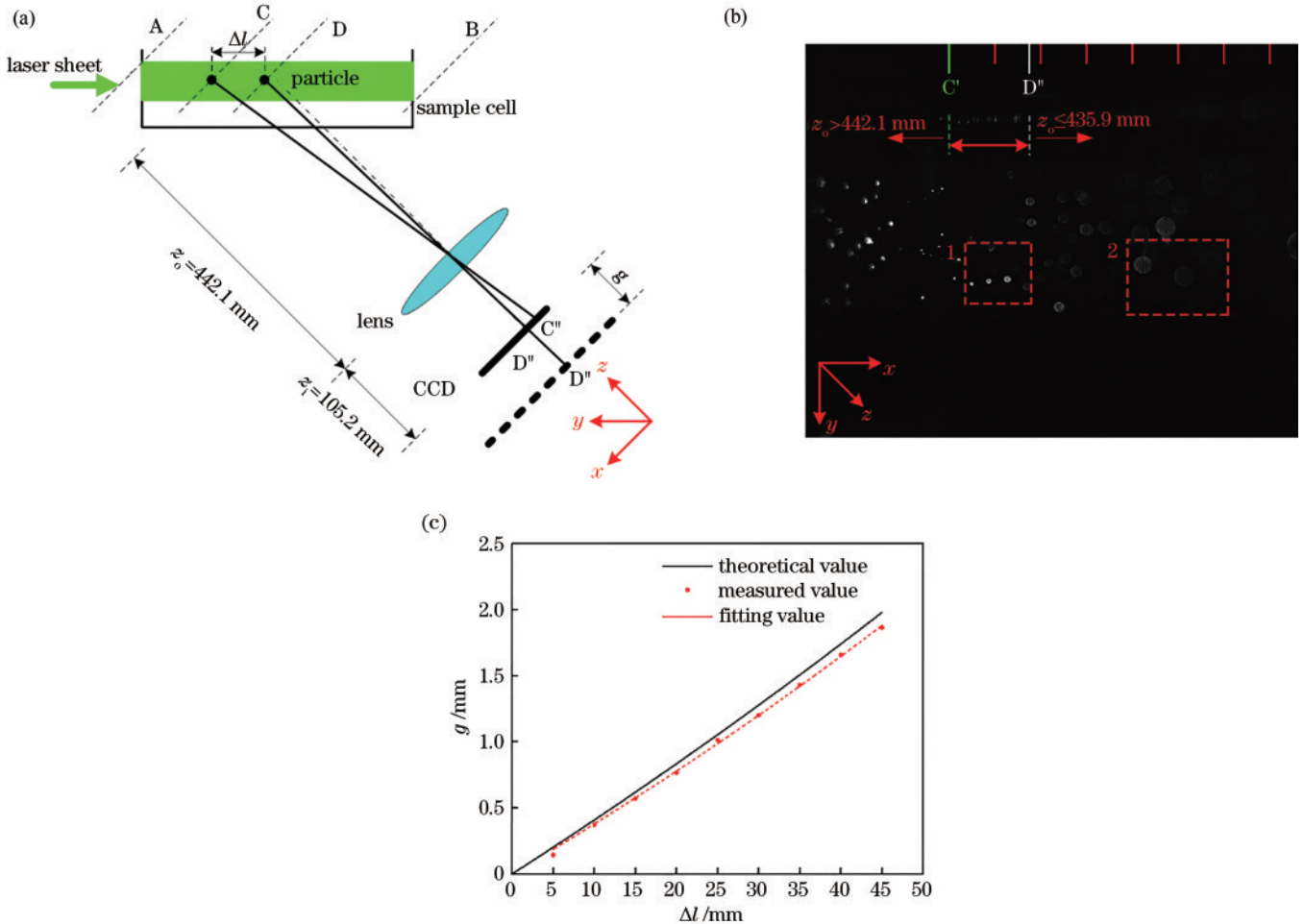


图 3 实验系统及结果分析。(a)实验系统原理图;(b)实验系统采集条纹图;(c)离焦距 g 与 Δl 关系曲线

Fig. 3 Experimental system and result analysis. (a) Principle of experimental system; (b) fringe images collected by experimental system; (c) function between defocusing distance g and Δl

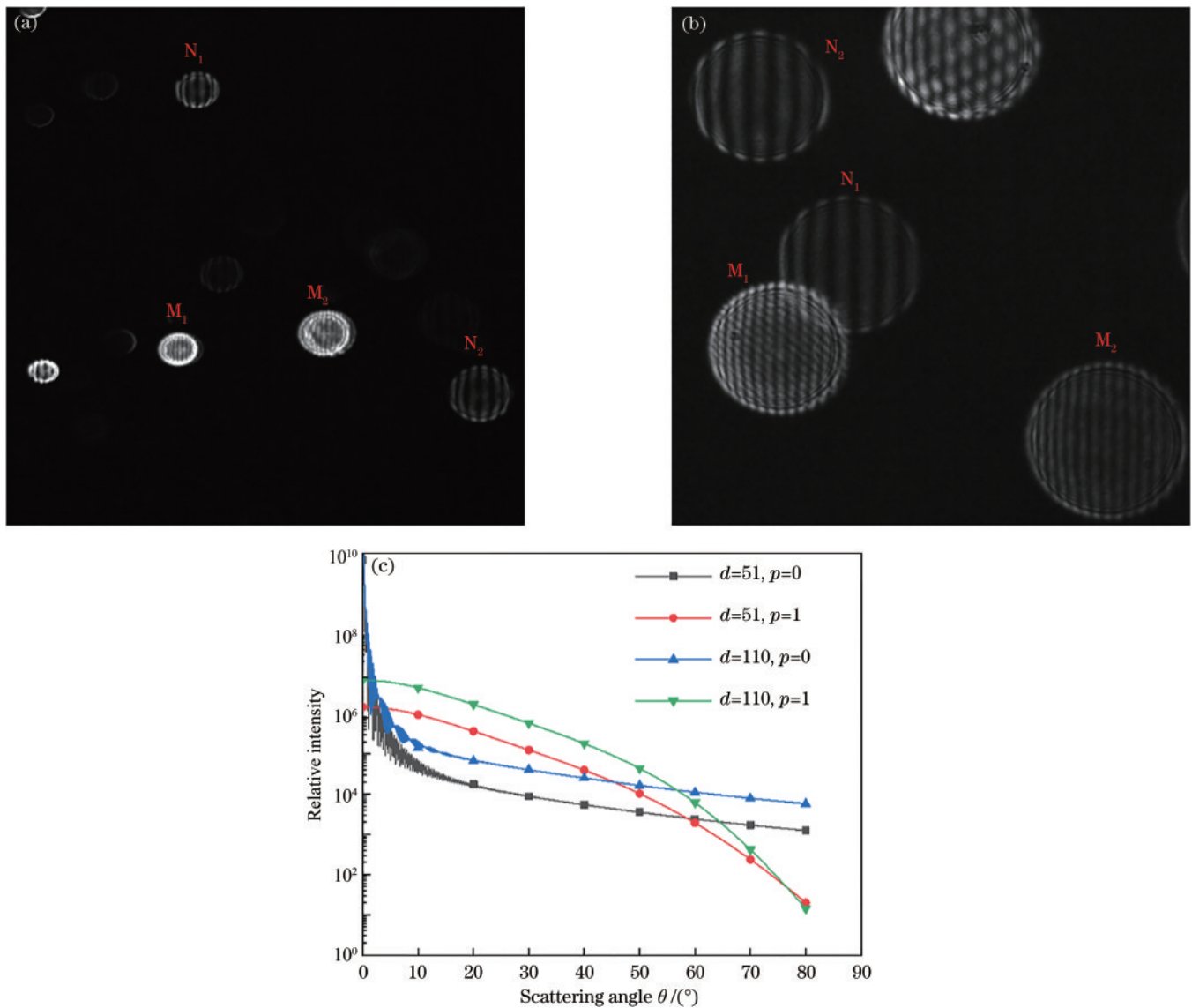


图 4 IPI 系统不同视场内图像。(a) $435.9 \text{ mm} \leq z_0 < 442.1 \text{ mm}$; (b) $z_0 \leq 435.9 \text{ mm}$; (c) $d=51 \mu\text{m}$ 和 $d=110 \mu\text{m}$ 粒子 $P=0$ 和 $P=1$ 阶光光强

Fig. 4 Images in different fields of view of IPI system. (a) $435.9 \text{ mm} \leq z_0 < 442.1 \text{ mm}$; (b) $z_0 \leq 435.9 \text{ mm}$; (c) light intensity of $P=0$ and $P=1$, $d=51 \mu\text{m}$ and $d=110 \mu\text{m}$

$d_{\text{max}} \leq 100 \mu\text{m}$, 图 4(b) 对应物距 $z_0 \leq 435.9 \text{ mm}$, $d_{\text{max}} \geq 100 \mu\text{m}$, 分别对应图 3(b) 中的红色方框 1 和方框 2, 图中 M 和 N 分别表示两种不同尺寸的粒子图像。

图 4(c) 为 $d=51 \mu\text{m}$ 和 $d=110 \mu\text{m}$ 粒子 0 阶和 1 阶光光强分布, 在前向散射区域, $d=110 \mu\text{m}$ 粒子散射光强于 $d=51 \mu\text{m}$ 粒子。因此对于图 4(a) 中在同一物面的粒子 M_1 和 N_1 , M_1 粒子图像光强明显强于 N_1 , 对应粒子直径 $d=110 \mu\text{m}$, N_1 对应粒子直径 $d=51 \mu\text{m}$ 。对于粒子 M_1 所在的平面, 根据视场对应关系可知, 物距 $z_0=438.0 \text{ mm}$, 由式 (5) 可以计算得到 $d_{\text{max}}=68 \mu\text{m}$ 。对于图 4(a) 中粒子 M_2 、 N_1 和 N_2 所在物面的物距 $z_0 \leq 438.0 \text{ mm}$, 因此 $d_{\text{max}} \geq 68 \mu\text{m}$ 。条纹图主要处理过程如图 5 所示, 每一行从左到右分别是粒子条纹图、二维傅里叶频谱和一维傅里叶频谱, 其中 Power

spectrum 表示粒子条纹图的相关功率谱。图 5(a) 中, 对于条纹图 M_1 , 将所在平面物距 z_0 代入式 (4), 可计算得到条纹图尺寸为 19 pixel, 再由式 (1) 计算可得 $110 \mu\text{m}$ 粒子条纹数 $N=13.58$, 因此条纹间距为 $6.9 \mu\text{m} \leq 2\Delta x$, 不满足 Nyquist 准则, 无法准确提取条纹数计算得到粒径。对于条纹图 N_1 , 如图 5(b) 所示, 可以正确提取出粒径。图 5(c) 为图 4(b) 中 M_2 粒子条纹图, 对应粒子直径 $d=110 \mu\text{m}$, 可以正确提取粒径。图 5(a) 和图 5(c) 中两个粒子条纹图大小不同是因为对应的物距不同, 分别为 438.0 mm 和 423.93 mm 。实验结果表明, IPI 技术的最大可测粒径受实验系统物距影响, 对于一固定实验系统, 同一视场内不同物面导致的物距变化使得不同视场区域最大可测粒径不同。

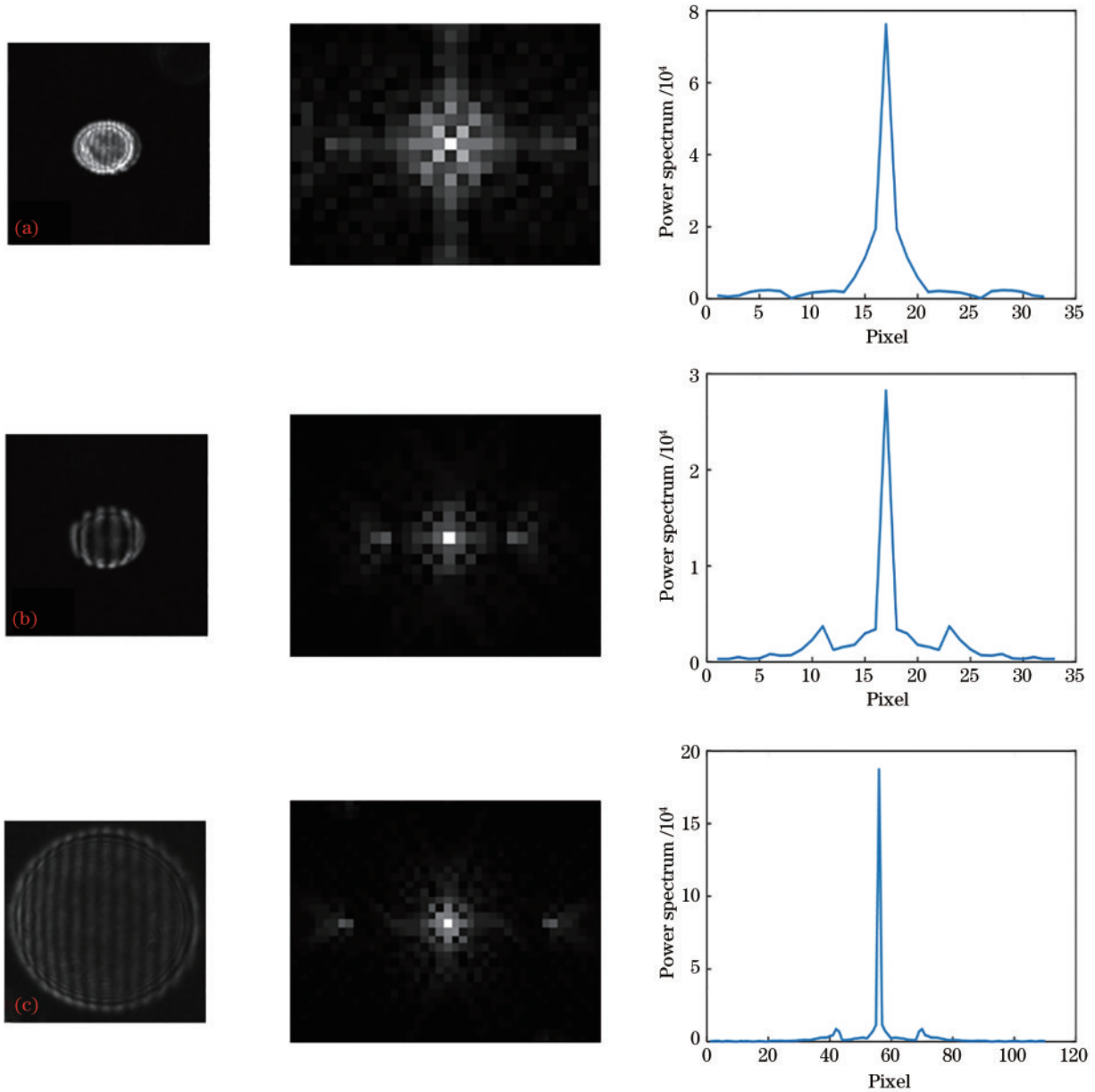


图5 条纹图处理结果。(a)(b)图4(a)中 M_1 粒子和 N_1 粒子;(c)图4(b)中 M_2 粒子

Fig. 5 Processing results of fringe. (a)(b) M_1 particle and N_1 particle in Fig. 4 (a); (c) particle M_2 in Fig. 4 (b)

4 结 论

从实验上研究了IPI系统最大可测粒径。根据粒径测量公式,IPI最大可测粒径与实验系统参数有关,对于一固定实验系统,IPI技术最大可测粒径主要受不同物面导致的物距变化的影响,且在聚焦位置对应物距两侧呈对称分布。搭建单光束照射的IPI实验系统,对 $d=110\ \mu\text{m}$ 和 $d=51\ \mu\text{m}$ 的混合PSL标准粒子场进行测量,采集同一视场内不同区域不同尺寸的粒子干涉条纹图。实验结果表明,对一固定参数的IPI实验系统,同一视场不同位置对应的物距不同,因此最大可测粒径不同。实验中应合理设计实验系统满足同一视场内不同尺寸粒子的测量要求,这一研究对IPI在宽尺寸喷雾场测量中的实验系统设计和提高测量精度

具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 单良, 查婷婷, 孔明, 等. 韦伯分布布谷鸟搜索算法颗粒粒径分布反演[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0229001.
Shan L, Zha T T, Kong M, et al. Particle size distribution inversion of cuckoo search algorithm using weber distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0229001.
- [2] 张晨雨, 吕且妮, 张福根. 基于散射光偏振分布差的颗粒尺寸及折射率测量[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1929001.
Zhang C Y, Lü Q N, Zhang F G. Particle size and refractive index measurement based on the polarization distribution difference of scattered light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1929001.

- [3] 储晨曦, 周红根, 刘娟, 等. 用于云粒子探测器的非球形粒子的光散射特性模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0529003.
Chu C X, Zhou H G, Liu J, et al. Light scattering characteristic simulation of nonspherical particles for cloud particle probe[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0529003.
- [4] 吕且妮, 葛宝臻, 陈益亮, 等. 激光干涉粒子成像乙醇喷雾场粒子尺寸和粒度分布测量[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308003.
Lü Q N, Ge B Z, Chen Y L, et al. Particle sizing and size distribution measurement of alcohol spray by interferometric particle imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 0308003.
- [5] Yilmaz E, Suzuki T, Ito K, et al. Analysis of the spray characteristics of water and water/glycerin mixtures using an interferometric laser imaging for droplet sizing technique[J]. International Journal of Technology, 2021, 12(1): 101-112.
- [6] Lacour C, Durox D, Ducruix S, et al. Interaction of a polydisperse spray with vortices[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(2): 295-311.
- [7] Evans H B, Dam N, van der Voort D, et al. Measuring droplet size distributions from overlapping interferometric particle images[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(2): 023709.
- [8] Lu Q N, Li Z X, Fu C S, et al. Simultaneous retrieval of particle size and refractive index by extended interferometric particle imaging technique[J]. Optics Express, 2019, 28(2): 2192-2200.
- [9] Lacagnina G, Grizzi S, Falchi M, et al. Simultaneous size and velocity measurements of cavitating microbubbles using interferometric laser imaging[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(4): 1153-1167.
- [10] Liu X, Shen J Q, Gong P, et al. Inclusion of the tunneling phase shift for interferometric particle imaging for bubble sizing[J]. Particuology, 2021, 54: 50-57.
- [11] Ouldarbi L, Pérret G, Lemaitre P, et al. Simultaneous 3D location and size measurement of bubbles and sand particles in a flow using interferometric particle imaging [J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7773-7780.
- [12] Shen H, Saengkaew S, Gréhan G, et al. Interferometric out-of-focus imaging for the 3D tracking of spherical bubbles in a cylindrical channel[J]. Optics Communications, 2014, 320: 156-161.
- [13] Tropea C. Optical particle characterization in flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43: 399-426.
- [14] Damaschke N, Nobach H, Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics[J]. Experiments in Fluids, 2002, 32(2): 143-152.
- [15] 吕且妮, 吕通, 靳文华, 等. 干涉粒子成像测量系统可测粒径范围及精度分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508006.
Lü Q N, Lü T, Jin W H, et al. Analysis of measurable size range and its measuring accuracy of particle in interferometric particle imaging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0508006.
- [16] Xu J, Ge B Z, Lu Q N. Wide-range and accurate particle sizing using extended interferometric particle imaging technique[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(12): 123707.