

# 基于高速数字全息燃烧生物质颗粒测试

姚龙超, 吴学成\*, 林小丹, 吴迎春, 陈玲红, 高翔, 岑可法

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 搭建了基于高速数字全息的燃烧颗粒测试系统。通过对全息图进行处理, 观察了竹粉颗粒形貌变化和颗粒破碎等现象; 验证了对颗粒三维轨迹追踪的可行性; 比较了燃烧前后颗粒粒径分布和速度分布。重建结果展示了各种不同形貌竹粉颗粒的清晰图像。统计结果表明, 燃烧后的小颗粒(粒径小于  $30\ \mu\text{m}$ ) 数量增多, 大颗粒(粒径大于  $50\ \mu\text{m}$ ) 数量减少; 径向速度分布范围变大; 轴向速度整体增大, 并出现双峰分布, 与观察结果吻合较好。

**关键词** 全息; 生物质颗粒; 数字同轴全息; 形貌与粒径; 颗粒破碎; 运动速度

中图分类号 TK16

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.100901

## Measurement of Burning Biomass Particles via High-Speed Digital Holography

Yao Longchao, Wu Xuecheng\*, Lin Xiaodan, Wu Yingchun,  
Chen Linghong, Gao Xiang, Cen Kefa

State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** In this study, a high-speed digital holographic system is established for measuring the amount of burning particles. After processing the hologram, the evolution of the morphology and the fragmentation of bamboo powder are observed. Further, the ability of the system to track the three-dimensional trajectories of particles is validated. The size and speed distributions of the particles before and after combustion are compared, and the reconstruction results display high-quality images of bamboo powders having various morphologies. The statistical results denote that the number of small particles (diameter  $< 30\ \mu\text{m}$ ) increases, whereas that of the big particles (diameter  $> 50\ \mu\text{m}$ ) decreases after combustion. Subsequently, the distribution range of the radial speed of the particles is extended, and the axial speed denotes an overall increase with a bimodal distribution. The statistical results are observed to agree very well with the direct observations.

**Key words** holography; biomass particle; digital in-line holography; morphology and size; particle fragmentation; motion velocity

**OCIS codes** 090.1995; 120.1740; 120.7250

## 1 引言

全息术是一种基于光的衍射和干涉的波前重建技术。近 20 年来, 数字全息被广泛地应用于流体力学<sup>[1-3]</sup>、能源<sup>[4-5]</sup>、环境<sup>[6-8]</sup>、生物医学<sup>[9]</sup>、微流体<sup>[10]</sup>等领域中颗粒物的三维(3D)测量。结合粒子图像测速(PIV)、粒子追踪测速(PTV)、高速摄影等连续记

录多张全息图, 经颗粒识别、定位、匹配等过程, 可实现颗粒形貌、粒径、空间浓度、三维速度、旋转等多参数的定量分析<sup>[4, 11-13]</sup>。同时, 也可以在全息光路中添加单透镜或  $4f$  成像透镜组( $f$  为透镜焦距), 达到调节分辨率和传像的目的<sup>[14-15]</sup>。早在 1980 年, 就有研究者开始尝试用传统的光学全息测试燃料颗粒的燃烧和热解, 观察到了一些有趣的现象<sup>[16-17]</sup>。但

收稿日期: 2018-11-16; 修回日期: 2018-12-07; 录用日期: 2018-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(91741129)、国家自然科学基金重大项目(51390491)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51621005)

\* E-mail: wuxch@zju.edu.cn

是,此后利用全息技术对颗粒燃烧的研究并不多,一个原因是传统的光学全息图记录和重建过程过于复杂耗时,另一个原因<sup>[18]</sup>是因温度梯度引起的不均匀折射率会导致全息条纹图的变形,以致严重影响重建像的质量。近几年,数字全息逐渐被应用于铝粉<sup>[18]</sup>、煤粉<sup>[5,19]</sup>等燃料燃烧过程中颗粒和挥发分的研究。研究者们通过标定测量精度<sup>[20]</sup>、建立模型<sup>[21]</sup>、改进光路<sup>[22]</sup>等方法分析了不均匀介质的影响,原来的难点也逐步得到了解决。这些研究初步奠定了数字全息用于燃烧颗粒测量的基础。

生物质燃料作为一种可再生能源,对其合理利用在一定程度上能缓解当下的能源压力。另一方面,生物质燃料的高水分、高挥发分、高碱金属含量等特点也容易造成燃烧器腐蚀、污染物排放等技术问题和环境问题<sup>[23]</sup>。对生物质燃料燃烧过程中颗粒参数的动态观察和定量测量对了解燃烧机理、改

进燃烧条件至关重要。目前,高速摄影直接成像的方法只能得到二维、定性结果<sup>[24]</sup>。由于景深的限制,只有聚焦的颗粒被用于分析。本研究采用高速数字全息对燃烧竹粉颗粒进行测试,得到三维空间中的颗粒粒径、形貌信息,观察和分析颗粒运动、破碎等行为。这不仅为生物质燃料研究提供了一种新的思路,也拓展了全息技术在能源测量领域的应用。

## 2 数字全息颗粒测量原理

如图1所示,数字全息成像分为两步。第一步是数字化记录全息图:平面波激光入射至颗粒,一部分被颗粒散射成为物光;未经干扰的直透光作为参考光,与物光干涉形成全息图,被数字相机记录。第二步是数值重建:在计算机中模拟光的传播,传播距离与记录距离相等时得到颗粒的聚焦像。图1重建图中实线圆圈标出聚焦颗粒,虚线圆圈标出离焦颗粒。

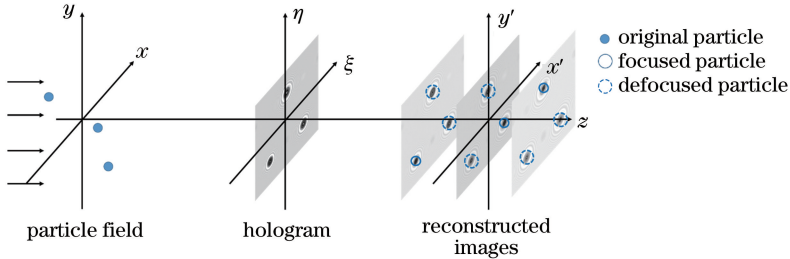


图1 数字颗粒全息图的记录与重建

Fig. 1 Recording and reconstruction of digital particle hologram

根据瑞利-索末菲衍射公式<sup>[25]</sup>,全息图平面的光波场复振幅分布可以表示为

$$U(\xi, \eta; z_0) = \frac{1}{j\lambda z_0} \iint_{\Sigma} [1 - O(x, y)] \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z_0^2} \right] \frac{dx dy}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z_0^2}} \quad (1)$$

式中: $(x, y)$ 和 $(\xi, \eta)$ 分别代表颗粒平面和全息图平面的坐标; $j$ 为虚数单位; $z_0$ 为记录距离; $\lambda$ 为激光波长; $[1 - O(x, y)]$ 为颗粒的透射率函数,在颗粒阴影之内为0,其余地方为1。记录的全息图强度为 $I(\xi, \eta; z_0) = |U(\xi, \eta; z_0)|^2$ 。重建时,利用(1)式,并用 $I(\xi, \eta; z_0)$ 代替 $[1 - O(x, y)]$ 计算光的传播。本研究采用角谱算法重建颗粒图像,表达式为

$$U(x', y'; z_r) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [ I(\xi, \eta; z_0) ] G(f_x, f_y, z_r) \}, \quad (2)$$

式中: $(x', y')$ 为重建平面的坐标; $z_r$ 为重建距离;符号 $\mathcal{F}$ 和 $\mathcal{F}^{-1}$ 分别代表傅里叶变换及傅里叶逆变

换; $G(f_x, f_y, z_r)$ 为角谱传递函数; $(f_x, f_y)$ 为频域坐标; $G$ 为脉冲响应函数 $\exp [ j (2\pi/\lambda) \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + z_r^2} ] / \sqrt{x^2 + y^2 + z_r^2}$ 的傅里叶变换的解析解,其表达式为

$$G(f_x, f_y, z_r) = \exp [ j k z_r \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} ]. \quad (3)$$

在一系列深度位置重建图像之后,经图像融合、颗粒识别、颗粒定位等算法处理,可得到每个颗粒的粒径、形貌、三维位置。有关颗粒参数测量的详细实施过程可参考文献<sup>[26]</sup>。

## 3 实验方法

实验装置如图2所示。利用甲烷在平焰燃烧器(火焰区域直径为60 mm)中燃烧时提供的高温尾部烟气点燃生物质颗粒。这里使用的生物质颗粒为研磨和烘干后的竹粉,其元素分析和工业分析如表1所示,数据代表成分或元素所占的质量分数。首先将流量为2.4 L/min(在25 °C,一个标准大气压下测得,全文同)氧气和9.6 L/min氮气混合。其中

10 L/min 混合气体与 2 L/min 甲烷再次混合后通入燃烧器燃烧,提供高温烟气。其余的 2 L/min 氧气-氮气混合气体携带竹粉颗粒从燃烧器中间的通孔(内径 7.7 mm)进入,竹粉被高温烟气加热后燃烧。图 2 中展示的燃烧颗粒图像在正式测试之前由

表 1 烘干后竹粉的特性

Table 1 Properties of air-dried bamboo powder

Component	Proximate analysis				Ultimate analysis			
	Moisture	Ash	Volatile matter	Fixed carbon	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulfur
Mass fraction /%	7.62	1.21	72.59	18.58	46.61	5.18	1.42	0.14

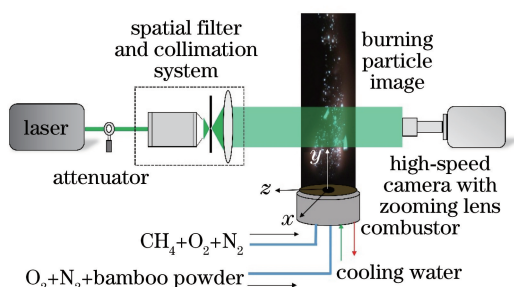


图 2 高速数字全息燃烧颗粒测量的实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup for burning particle measurement via high-speed digital holography

布置光路系统时,激光器(LCX-532S, Oxxius 公司,法国,波长为 532 nm,功率为 50~500 mW)发出的激光先经衰减片控制强度,然后经空间滤波和准直得到直径约为 50 mm 的平面波。平面波传播至燃烧器上方颗粒所在区域,颗粒散射光与直透光干涉形成全息图,被高速相机(Memrecam HX-4, Nac image technology 公司,日本)记录。为了提高分辨率,在相机上安装一个带有微距接圈的镜头(AF 50 mm, Nikon 公司,日本, 1:1.8D)。在镜头上安装一片激光带通滤波片(532 nm±10 nm),用于过滤火焰辐射。镜头的成像平面至燃烧器中心位置约为 80 mm。全息图记录频率为 6000 Hz,图像分辨率为 1280 pixel×960 pixel,曝光时间为 2 μs。相机的像素尺寸为 22 μm,镜头的标定放大倍数为 2.7 倍,因此等效像素尺寸为 8.2 μm,测量区域为 7.9 mm(宽)×10.5 mm(高)。有关燃烧和光学装置更多信息见文献[20]。

## 4 实验结果与分析

图 3 展示了典型的竹粉全息图及其处理过程。图 3(a)为全息图,虚线矩形框中是局部放大图像。先在  $z = -12$  mm 和  $z = 12$  mm 之间每隔 0.1 mm

相机直接拍摄得到,可见大部分颗粒处于燃烧状态。以燃烧器中心为原点建立三维直角坐标系,光轴方向为  $z$  轴, $x$  和  $y$  轴表示与光轴垂直平面的坐标轴,作为后文分析中的参考坐标。 $(x, y, z)$  表示坐标系中的任一点。

重建全息图。从图 3(b1)、(b2)中可以看出,不同深度( $z$  轴)位置的颗粒聚焦平面不同。其中图 3(b1)是  $z = -2.5$  mm 平面的重建图,图 3(b2)是  $z = 3.2$  mm 平面的重建图,对应图 3(a)中的局部放大区域。箭头所指的为聚焦颗粒,其余颗粒处于离焦状态。通过基于小波分解的图像融合算法<sup>[26]</sup>,将在不同平面上的聚焦颗粒融合于一张景深拓展图中。图 3(b3)是图 3(b1)、(b2)对应的景深拓展图,所有颗粒处于清晰聚焦状态,来自图 3(c)虚线框中的局部放大。图 3(c)为完整的景深扩展图,通过二值化处理从中提取颗粒,并用边缘梯度方差作为聚焦判据对颗粒进行深度定位<sup>[26]</sup>。识别的颗粒如图 3(d)所示,颜色代表深度位置(黑色为背景)。图中线段标注尺寸为 1 mm。需要说明的是,数字全息适用于较低浓度颗粒的测量。随着颗粒浓度的增大,可能出现前后颗粒的重叠。部分重叠的颗粒容易被识别成一个颗粒,这样的情况可根据聚焦曲线的多峰特征加以进一步分割<sup>[27]</sup>。本研究每张全息图中的颗粒数在 100~300 之间,出现颗粒重叠的情况较少。

### 4.1 颗粒形貌与粒径

根据对大量颗粒重建图像的观察,总结出几种常见的颗粒形貌。图 4(a1)~(a7)依次是较规则、不规则、中空形、针形、十字形、聚集形、挥发形颗粒,它们选自于不同的全息重建图。相比于煤粉,竹粉的质地松软、堆积密度低、易黏连。表现在颗粒形貌层面,就是边界不规则、多毛刺、多孔隙,因此颗粒容易聚集,较难于分散。例如,十字形颗粒有可能是两个针形颗粒碰撞在一起的结果,聚集形颗粒很明显是许多颗粒团聚的结果。从连续多帧的观察中发现,聚集形颗粒形貌一直在变化,并且有分离的趋势。另外,可以观察到极少部分颗粒的挥发分和燃烧产物。例如,从图 4(a7)中可以观察到透明度较低的挥发分火焰和一些小颗粒(虚线包围区域),它



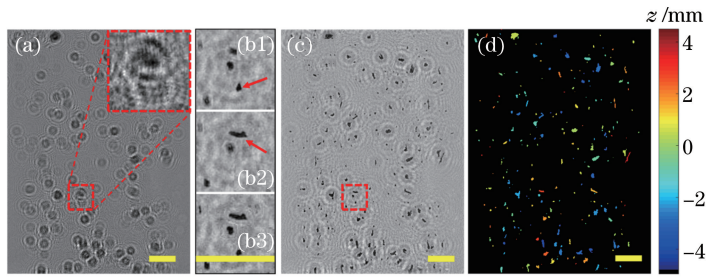


图3 典型竹粉全息图的处理过程。(a)全息图;(b1)  $z = -2.5$  mm处放大区域的重建图;(b2)  $z = 3.2$  mm处放大区域的重建图;(b3)景深拓展图;(c)完整的景深拓展图;(d)识别的三维分布颗粒。标注尺寸为1 mm

Fig. 3 Processing of typical hologram of bamboo powder. (a) Hologram; (b1) reconstructed image of magnified region at  $z = -2.5$  mm; (b2) reconstructed image of magnified region at  $z = 3.2$  mm; (b3) depth-of-field extended image; (c) depth-of-field extended image of full hologram; (d) recognized 3D distributed particles. Scale bar represents 1 mm

们实际上是挥发分燃烧产生的碳烟聚集物。相比于文献[20]中对烟煤的研究,竹粉颗粒燃烧观察到的碳烟要少得多,这很可能是样品的高含氧量导致的。

竹粉颗粒的形貌变化、破碎也是常见的现象。图4(b)中的一系列连续图像显示了颗粒的破碎,每张子图时间间隔为1 ms。对图像序列的分析可知,竹粉在燃烧过程中由于温差、流场等作用逐渐解体,最后变成多个很小的颗粒和几个较大的颗粒。经过对大量全息图的分析,发现在视场中观察到颗粒形貌变化和破碎的整体概率并不大,主要原因是颗粒在视场中的停留时间仅为10~20 ms,还不足以包含整个燃烧过程。但是相比之前对煤粉颗粒的研究[20],观察到竹粉颗粒破碎的概率要大得多,这也是竹粉质地松软、多挥发分等物理化学特性的结果。

可以有效避免重复统计。可以发现,燃烧后粒径小于30  $\mu\text{m}$ 的小颗粒概率密度明显增大,大于50  $\mu\text{m}$ 的大颗粒概率密度明显下降。这与颗粒破碎、碳烟颗粒聚集等观察结果相符。

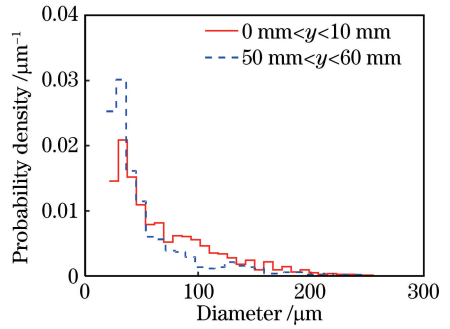


图5 燃烧前后颗粒粒径分布

Fig. 5 Particle size distributions before and after combustion

### 4.2 颗粒运动

通过连续图像中的颗粒匹配,可以得到颗粒运动速度和运动轨迹。图6展示了单个颗粒的三维运动轨迹。图6(a)为不同时刻颗粒重建图叠加在一张图中的结果,时间间隔为1 ms。图6(b)为颗粒识别和定位后的三维运动轨迹。该颗粒在平动过程还伴随着旋转和形貌变化,并未见到破碎产生的小颗粒。对该颗粒的分析可得三维运动速度为  $v_x = 0.075$  m/s,  $v_y = 0.7$  m/s,  $v_z = 0.15$  m/s。而根据计算,携带竹粉的气流最大速度为1.43 m/s,平均速度为0.72 m/s,测得的颗粒速度在合理的预测范围之内。

每个测量区域记录6000张全息图,持续时间1 s,选择其中10对(每对为连续两张,对与对之间相隔17 ms以上,避免重复统计)用于分析颗粒速度。图7比较了0 mm < y < 10 mm和50 mm < y < 60 mm两个不同高度的径向速度的统计结果。

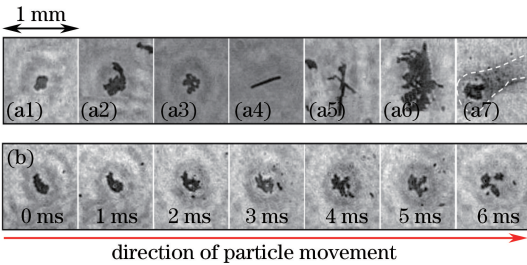


图4 颗粒形貌及其变化。(a)颗粒的多种形貌;(b)颗粒破碎过程的形貌变化

Fig. 4 Particle morphology and its evolution. (a) Various particle morphologies; (b) morphology evolution in particle fragmentation

为了研究燃烧前后的颗粒粒径变化,测量和比较了燃烧器出口附近(0 < y < 10 mm,颗粒尚未被点燃)和50 mm < y < 60 mm两个高度区域的颗粒粒径分布,如图5所示。针对每个测量区域,在高速相机记录的全息图序列中,每隔17 ms抽取一张全息图处理,一共10张,用于统计粒径分布。这样可

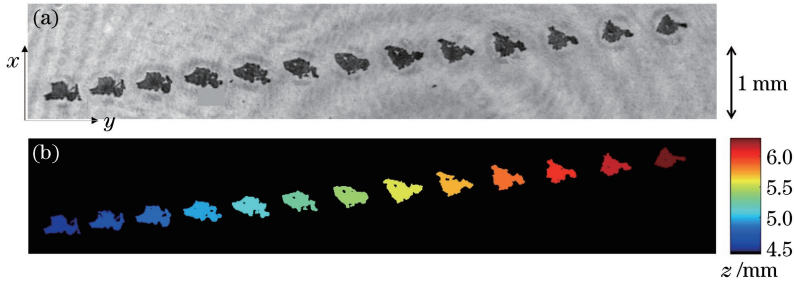


图6 单个颗粒的三维运动轨迹。(a)多帧重建的合成图;(b)提取的颗粒及其 $z$ 轴位置。图像序列的时间间隔为1 ms  
Fig. 6 3D trajectory of single particle. (a) Synthesized image from multi-frame reconstruction; (b) extracted particle and its  $z$  locations. Time interval between sequential images is 1 ms

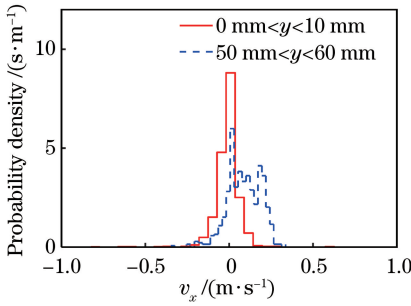


图7 径向速度分布

Fig. 7 Radial speed distribution

由于 $z$ 方向的速度测量误差较大,考虑到燃烧器的对称结构,这里采用 $x$ 方向的速度 $v_x$ 代表径向速度。可以发现,50 mm <  $y$  < 60 mm区域的速度分布更加分散,且稍有增大,稍微偏离中心位置。这说明了在燃烧过程中,颗粒有向外扩散的趋势,同时因为流场的不稳定性产生偏离。

图8比较了0 mm <  $y$  < 10 mm和50 mm <  $y$  < 60 mm两个不同高度的轴向速度( $v_y$ )的统计结果。发现随着高度的增加,轴向速度总体上明显增加。这是因为携带竹粉的冷气流进入高温区域后被加热、膨胀产生热浮升力,使气体速度增加,其拖拽力对颗粒加速。流场的这种变化在之前的研究中已有体现和说明<sup>[20]</sup>。另一个特点是,50 mm <  $y$  < 60 mm高度的颗粒轴向速度分布概率密度呈双峰分

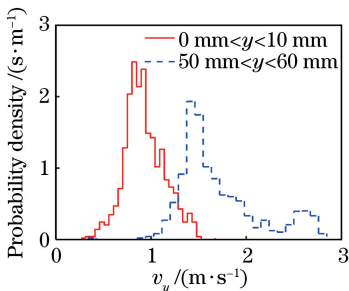


图8 轴向速度分布

Fig. 8 Axial speed distribution

布,第1个大峰为竹粉颗粒经加速后的结果,分布形态上与0 mm <  $y$  < 10 mm处类似,而第2个小峰则是燃烧产物(碳烟聚集物)的速度。直接观察中也发现燃烧产物与母颗粒之间有明显的相对速度,统计结果则对观察作了很好的定量分析。这种特点也有利于后续对燃料颗粒和燃烧产物颗粒的分别研究。

## 5 结 论

全息重建图展示了各种形貌的竹粉颗粒的清晰像,对连续图像的分析可以观察到颗粒形貌变化、破碎等现象,得到颗粒的三维运动轨迹和速度。这为生物质燃烧的在线、三维、定量监测提供了一种先进的光学手段。燃烧前后颗粒粒径和速度分布变化的统计结果与观察结果符合得很好,尤其是生物质颗粒和燃烧产物颗粒在粒径和速度上的差别,为两者的分别研究提供了一种可能,对污染物控制研究具有重要意义。由于生物质具有质地松软、高挥发分、高含氧量等特点,研究结果表明它与之前对烟煤测量的结果有很大差别,例如,观察到生物质颗粒形貌更加多样化、更容易发生破碎、燃烧产生的碳烟更少,说明本研究利用高速数字全息对生物质的测试是很有必要的。

研究还存在一些可以改进的地方:利用更大视场的测量系统,可以观察到更长时间内颗粒的变化,以便研究整个燃烧过程;增大成像系统的放大率,可以观察到更细微的燃烧产物,以便对污染物生成进行更深入的研究。因此,以后的研究可以将数字全息与变焦成像系统结合,根据需要调整视场和放大率。

## 参 考 文 献

- [1] Katz J, Sheng J. Applications of holography in fluid mechanics and particle dynamics [J]. Annual Review

- of Fluid Mechanics, 2010, 42(1): 531-555.
- [2] Lü Q N, Chen Y L, Yuan R, *et al.* Trajectory and velocity measurement of a particle in spray by digital holography [J]. Applied Optics, 2009, 48 (36): 7000-7007.
- [3] Yang Y, Li G Y, Tang L L, *et al.* Integrated gray-level gradient method applied for the extraction of three-dimensional velocity fields of sprays in in-line digital holography [J]. Applied Optics, 2012, 51(2): 255-267.
- [4] Wu Y C. Digital particle holography for 3D measurement and its applications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.  
吴迎春. 数字颗粒全息三维测量技术及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [5] Wu X C, Yao L C, Wu Y C, *et al.* *In-situ* characterization of coal particle combustion via long working distance digital in-line holography [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(8): 8277-8286.
- [6] Wu X C, Xue Z L, Zhao H F, *et al.* Measurement of slurry droplets by digital holographic microscopy: fundamental research [J]. Fuel, 2015, 158: 697-704.
- [7] Fugal J P, Shaw R A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2009, 2(1): 259-271.
- [8] Liu H P, Yu J, Wang T, *et al.* Digital holographic three-dimensional sensing and imaging for aquatic species [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020901.  
刘惠萍, 于佳, 王添, 等. 水下微生物的三维数字全息探测 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020901.
- [9] Choi Y S, Lee S J. Three-dimensional volumetric measurement of red blood cell motion using digital holographic microscopy [J]. Applied Optics, 2009, 48(16): 2983-2990.
- [10] Wu Y C, Wu X C, Wang Z H, *et al.* Measurement of microchannel flow with digital holographic microscopy by integrated nearest neighbor and cross-correlation particle pairing [J]. Applied Optics, 2011, 50(34): H297-H305.
- [11] Yu X, Hong J, Liu C G, *et al.* Review of digital holographic microscopy for three-dimensional profiling and tracking [J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 112306.
- [12] Yao L C, Chen J, Sojka P E, *et al.* Three-dimensional dynamic measurement of irregular stringy objects via digital holography [J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1283-1286.
- [13] Zeng Y N, Lu J S, Liu Y, *et al.* Three-dimensional displacement tracking technique of particle based on digital holographic microscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1204001  
曾雅楠, 卢钧胜, 刘源, 等. 基于数字全息显微的微粒三维位移跟踪测量技术 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204001.
- [14] Liu Z Q, Luo Z X, Ye Y, *et al.* Differences between 4f lenses system and single lens in particle field in-line holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020901.  
刘振清, 罗振雄, 叶雁, 等. 粒子场同轴全息中 4f 光学透镜组与单透镜的区别 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020901.
- [15] Zhang L Y, Xu Q, Cao N, *et al.* Effect of the size of high-pass filter on the off-axis particle holographic image [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 060901.  
张连永, 徐青, 曹娜, 等. 高通滤波器尺寸对粒子离轴滤波全息像的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060901.
- [16] Trolinger J D, Heap M P. Coal particle combustion studied by holography [J]. Applied Optics, 1979, 18(11): 1757-1762.
- [17] Samuelsen G S, Trolinger J D, Heap M P, *et al.* Observation of the behavior of coal particles during thermal decomposition [J]. Combustion and Flame, 1981, 40: 7-12.
- [18] Guildenbecher D R, Cooper M A, Gill W, *et al.* Quantitative, three-dimensional imaging of aluminum drop combustion in solid propellant plumes via digital in-line holography [J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5126-5129.
- [19] Wu Y C, Yao L C, Wu X C, *et al.* 3D imaging of individual burning char and volatile plume in a pulverized coal flame with digital inline holography [J]. Fuel, 2017, 206: 429-436.
- [20] Yao L C, Wu C Y, Wu Y C, *et al.* Investigating particle and volatile evolution during pulverized coal combustion using high-speed digital in-line holography [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 2911-2918.
- [21] Wu Y C, Brunel M, Li R X, *et al.* Simultaneous amplitude and phase contrast imaging of burning fuel particle and flame with digital inline holography: model and verification [J]. Journal of Quantitative

- Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 199: 26-35.
- [22] Guildenbecher D R, Hoffmeister K N G, Kunzler W M, *et al.* Phase conjugate digital inline holography (PCDIH) [J]. Optics Letters, 2018, 43(4): 803-806.
- [23] Demirbas A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31(2): 171-192.
- [24] Khatami R, Stivers C, Joshi K, *et al.* Combustion behavior of single particles from three different coal ranks and from sugar cane bagasse in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(3): 1253-1271.
- [25] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. New York: McGraw Hill. 1996.
- [26] Wu Y C, Wu X C, Yang J, *et al.* Wavelet-based depth-of-field extension, accurate autofocusing and particle pairing for digital inline particle holography [J]. Applied Optics, 2014, 53(4): 556-564.
- [27] Gao J. Development and applications of digital holography to particle field measurement and in vivo biological imaging [D]. West Lafayette: Purdue University, 2014.