

单颗粒煤粉声悬浮全息测量实验研究

赵华锋 吴学成 周斌武 薛志亮 陈玲红 邱坤赞 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 运用数字全息测量技术对声悬浮场中煤粉颗粒的冷态、热态现象进行了实验研究。通过电荷耦合器件 (CCD) 记录煤粉颗粒的冷热态全息图, 应用小波变换对图像进行重建, 获得同一煤粉颗粒在不同投影面下的粒径以及空间位置。重点分析了煤粉在 CO_2 激光器照射下, 挥发分析出及颗粒破碎现象, 挥发分只在竖直方向析出, 且主要集中在尖角处。破碎形成的颗粒大小不一, 位置比较随机, z 轴方向距离较大。通过分析热态时颗粒粒径随时间的变化, 获得了颗粒的燃烧速度, 同时给出了颗粒 z 轴位置随时间的变化。实验结果表明数字全息技术可以应用于声悬浮场中煤粉颗粒燃烧时的测量, 是研究煤粉燃烧的有力工具。

关键词 全息; 声悬浮; 单颗粒; 煤粉

中图分类号 TB877.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1008003

Measurement of a Single Coal Particle in an Acoustic Levitation Field by Digital Holography

Zhao Huafeng Wu Xuecheng Zhou Binwu Xue Zhiliang Chen Linghong
Qiu Kunzan Cen Kefa

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

Abstract The phenomena of a single coal particle in an acoustic levitation field both cold and hot state are investigated by digital holography. Particle size and three-dimensional location of the same coal particle both cold and hot state are obtained using wavelet transformation for the reconstruction of holograms recorded by charge coupled device (CCD). The key point is to analyze the phenomenon of volatile release and particle breakage of coal particle irradiated by CO_2 laser. Results show that the volatile separates out only in the vertical direction, especially in sharp corners. And the pieces after being broken apart differed in both dimensions and position, particularly distance in z axis. The combustion rate of heated particle is computed through particle size change over time. In addition, the z position change over time of heated particle is presented. The experimental results indicate that digital holography is a feasible tool for the measurement of flaming coal particles in acoustic levitation field. It is proved to be a powerful method for researching the combustion characteristics of coal particle.

Key words holography; acoustic levitation; single particle; pulverized coal

OCIS codes 090.1995; 100.6890; 120.6650

1 引言

随着世界能源消耗的不断增长, 人们越来越重视能源的利用效率。我国在未来的一段时间内, 煤

炭仍是主要能源。研究煤炭的燃烧情况, 对于提高煤炭的利用率具有极高的价值。传统的研究主要集中在锅炉整体的燃烧效率, 现在更关注单颗粒煤

收稿日期: 2014-03-10; 收到修改稿日期: 2014-04-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51176162)、国家自然科学基金重大项目(51390491)、浙江省重点科技创新团队项目(2011R50017)

作者简介: 赵华锋(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事多相流燃烧全息诊断技术方面的研究。

E-mail: HuafengZhao@zju.edu.cn

导师简介: 吴学成(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事多相流燃烧光学诊断技术等方面的研究。

E-mail: wuxch@zju.edu.cn(通信联系人)

粉^[1-2]的研究。

悬浮技术具有无容器处理颗粒的优点,广泛应用于先进材料的研究领域,而基于声悬浮技术^[3]的实验手段还具有样品固定易测量、无明显热效应等优点,特别适合研究单颗粒燃料燃烧机理。声悬浮现象最早于 1886 年由 Wang 等^[4]发现,后由 King 等^[5-6]对其物理机理进行了比较全面的理论阐述。1934 年,King^[5]从理论上揭示了声悬浮是理想流体中刚性小球受到的声辐射压力,并揭示了声悬浮是高声强条件下的非线性现象。声场产生的这种力称为声辐射力或声辐射压力。

数字全息技术利用电荷耦合器件(CCD)代替传统全息干板,直接通过电子成像器将全息图保存到计算机中,再利用计算机模拟技术对全息图进行重建再现。数字全息技术由于具有三维、瞬态、实时和多参数^[7]测量的特点,相比于传统图像法,数字全息技术景深更大,可重建出不同断面的颗粒形状,在多相流场诊断^[8]领域具有巨大的应用潜力。

本文利用声悬浮技术和数字全息技术,研究了单颗粒煤粉的运动及燃烧情况。搭建了一套激光全息测量声悬浮中煤粉颗粒的系统,利用 CO₂ 激光器点燃煤粉,分别拍摄了同一煤粉颗粒在冷态和热态时的全息图。采用小波变换方法对全息图进行重建,并对其进行分析,验证了数字全息技术应用于声悬浮场中颗粒形状测量的可行性。

2 实验原理及装置

2.1 单轴式声悬浮

声悬浮是高声强条件下的一种非线性效应,其基本原理是利用声驻波与物体的相互作用产生竖直方向的悬浮力以克服物体的重量,同时产生水平方向的定位力将物体固定于驻波波节处,从而实现颗粒悬浮。入射声场计算模型如图 1 所示, Φ 为环向坐标, H_1 为发射端高度, R_1 为发射端截面半径, Γ 为所有结构的外表面, R 为反射端圆柱体凹球面的曲率半径, H 为凹球面最低点到发射面的距离, H_2 为反射端圆柱体高度, R_2 为反射端圆柱体截面半径, ρ 为极坐标。

单轴式声悬浮技术^[9-10]是最简单的一种,其声辐射力计算如下:

单轴式声悬浮通常工作于声介质的谐振状态^[11]以获得足够强的声场和足够大的声悬浮力。基于 Gor'kov^[6]定义的声辐射压力的时间平均势,时间平均势 ϕ 可定义为^[12]

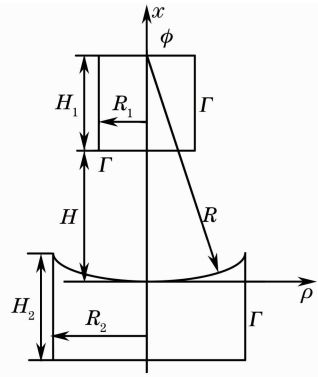


图 1 单轴式声悬浮入射声场计算模型

Fig. 1 Calculation model of incident wave field of acoustic levitation

$$\phi = 2\pi R_s^3 \left(\frac{\overline{\rho_{in}^2}}{3\rho c^2} - \frac{\rho \overline{v_{in}^2}}{2} \right), \quad (1)$$

式中 R_s 是悬浮颗粒的半径, ρ 是空气密度, c 是声速。 $\overline{\rho_{in}^2}$ 和 $\overline{v_{in}^2}$ 分别是颗粒悬浮处声压的均方差和空气流速的均方差。

为研究方便,定义一个标量 $\Phi_v(M)$, 即速度势。速度势 $\Phi_v(M)$ 与声压 ρ_{in} 和空气质点速度 v_{in} 的关系为

$$\rho_{in} = \rho \frac{\partial \Phi_v(M)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$v_{in} = -\nabla \Phi_v(M), \quad (3)$$

式中 M 是空间中任意一点。

为了求得入射声压和空气质点速度,入射声场速度势 $\Phi_v(M)$ 可用边界元方法计算:

$$C(M)\Phi_v(M) =$$

$$\int_{\Gamma} \left\{ \frac{\partial \Phi_v(Q)}{\partial n} \frac{\exp(jkr)}{4\pi r} - \Phi_v(Q) \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\exp(jkr)}{4\pi r} \right] \right\} d\Gamma(Q), \quad (4)$$

式中 M 是空间中任意一点, Q 是表面 Γ 上任意一点, k 是波数, n 是边界 Γ 的单位内法向量, r 是 M 到 Q 点的距离, C 是点 M 处表面的几何性质相关的常数。

悬浮颗粒所受的声辐射力可表示为

$$F = -\nabla \phi. \quad (5)$$

2.2 数字同轴全息记录与重建

2.2.1 全息记录

图 2 是数字同轴全息记录的示意图。由图 2 可知,经准直扩束平行激光束照射颗粒场 (ζ, η) , 颗粒的散射光波与入射光波在其传播路径上发生干涉形成颗粒全息图 (x, y) , 并被 CCD 阵列面拍摄记录。 z_0 表示颗粒场平面与全息记录平面之间的距离^[13]。

假设物平面上颗粒光强函数为 $R(\zeta, \eta)$, 则记录平面 (x, y) 的光强分布 $I_{z_0}(x, y)$ 可表示为^[14]

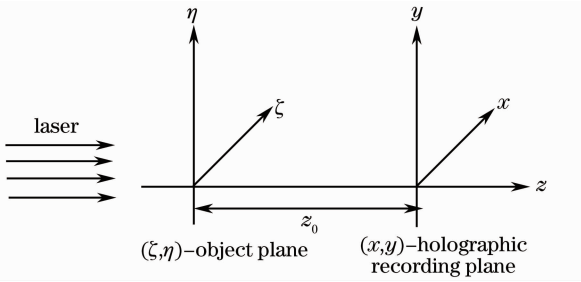


图2 激光数字全息记录示意图

Fig. 2 Schematic of laser digital holographic recording

$$I_{z_0}(x, y) = 1 - \frac{2}{\lambda z_0} R(x, y) \otimes \sin\left[\frac{\pi}{\lambda z_0}(x^2 + y^2)\right], \quad (6)$$

式中 \otimes 表示二维卷积算, λ 表示激光波长。

2.2.2 全息重建

数字同轴全息图数值重建以标量衍射理论为基础^[15], 目前主要有菲涅耳近似^[16]、小波变换^[17-18]以及分数傅里叶变换^[19]等算法。其中基于小波变换的全息图重建算法具有重建图像信噪比高、图像背景均匀等优点。采用小波算法来对全息图进行重建。

观察一个小波基函数 $\Psi(x, y) = \sin(x^2 + y^2)$ 和尺度参数 $k = (\lambda z_0 / \pi)^{1/2}$, 构造小波函数:

$$\phi_k(x, y) = \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{x^2 + y^2}{k^2}\right), \quad (7)$$

则(6)式可表示为

$$I_{z_0}(x, y) = 1 - \frac{2}{\pi} R(x, y) \otimes \phi_k(x, y). \quad (8)$$

这表明全息图的光强分布函数可以被描述为物函数的小波变换。

激光数字全息图可以用小波变换法则进行重建。由于衍射过程和全息图的形成过程均能用小波变换来表征, 因此可以用全息图 $I_{z_0}(x, y)$ 的小波变换来表示:

$$W_{I_z}(k, x, y) = I_{z_0}(x, y) \otimes \phi_k(x, y). \quad (9)$$

由于构造的小波函数还不满足严格意义上的小波函数, 需要进行适当调整。一方面, 引入一个高斯窗函数, 在空域和频域对小波函数进行限制, 使其在偏离中心点的区域迅速趋零; 另一方面, 引入一个调零参数 M_ψ 中, 使其均值为零。最终的小波函数可表示为

$$\phi_k(x, y) = \frac{1}{k^2} \left[\sin\left(\frac{x^2 + y^2}{k^2} - M_\psi\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{k^2 \sigma^2}\right), \quad (10)$$

式中 $M_\psi = \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^4}$ 。

与传统的菲涅耳近似和衍射积分卷积重建算法相比, 小波变换的重建图像具有图像信噪比高且图像背景均匀的优点, 其主要原因是空域和频域均受限的合适尺度的小波函数充分利用了粒子干涉图像信息的同时也很好屏蔽了噪音的干扰。

2.3 实验装置

本实验采用激光数字全息技术对单轴式声悬浮仪中悬浮的单颗粒煤粉参数进行测量。实验分为冷态和热态。图3为实验系统图与实物图, 主要包括声悬浮系统、激光点火系统和数字全息光学系统。

声悬浮系统采用单轴式超声波悬浮仪 SY-2000F, 包括超声波发生器、超声波换能器、变幅杆、发射端、反射端、调谐手柄和频率调节器。超声波发生器的工作频率范围是 19 ~ 21 kHz, 功率为 250 W, 振幅大于等于 70 μm 。超声波发生器产生的电能经换能器转化为机械振动, 再经变幅杆放大, 由发射端以超声波的方式向谐振腔中发射高强度超声波, 最后形成驻波。调节反射端与发射端的间距, 使声场达到谐振状态, 强度达到相应的峰值, 这时出现悬浮势阱, 使颗粒稳定悬浮。

激光点火系统采用 CO₂ 激光器, 包括激光管、光学谐振腔、电源及抽运。二氧化碳激光器是以 CO₂ 气体作为工作物质的气体激光器, 激光波长为 10.6 μm , 处于红外区, 肉眼不能觉察, 工作方式有连续、脉冲两种。本实验所用的激光器是上海御虹激光设备有限公司定制生产的, 采用脉冲方式, 最大输出功率 150 W, 光斑直径为 3 mm。

全息光学系统包括连续激光器、衰减片和 CCD。入射光束是由 He-Ne 激光器产生的连续激光, 波长为 632.8 nm, 经衰减后照射悬浮的单颗粒煤粉, 干涉形成的全息图被 CCD 记录。实验所用 CCD 分辨率为 1392 pixel \times 1040 pixel, 像素尺寸 6.45 $\mu\text{m} \times$ 6.45 μm , 曝光时间为 20 μs 。

3 实验结果与讨论

3.1 冷态实验

研究的是单颗粒褐煤, 煤粉粒径范围为 2 ~ 5 mm, 通过筛选获得。图4是单颗粒煤粉的全息图和重建图。图4(a)是同一褐煤颗粒不同时刻的全息记录图, 图4(b)中白色亮斑是对应时刻重建后的煤粉颗粒。由图4(b)可知, 声悬浮场中单颗粒煤粉的全息图经小波变换重建后, 颗粒的外形轮廓非常清晰, 亮斑光强明显高于背景光强, 颗粒具有很高

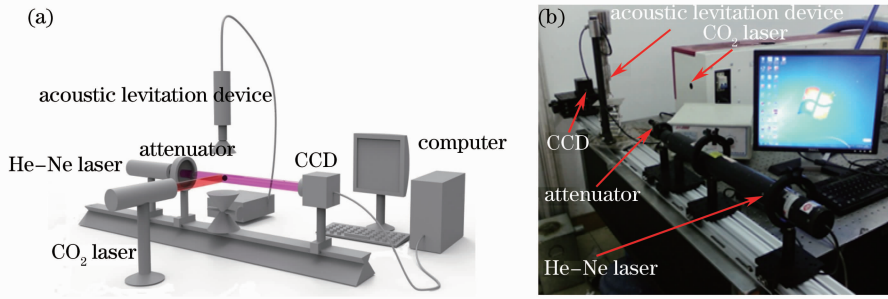


图 3 数字全息技术测量声悬浮场中单颗粒煤粉实验系统示意图(a)及实物图(b)

Fig. 3 Sketch (a) and picture (b) of experimental setup of digital holography diagnostics system used for single coal particle measurement in an acoustic levitation device

的识别度。由图 4 可知, (a1)和(a4)颗粒形状基本相同, 但与(a2)、(a3)存在较大差异, 这是由于单颗粒煤粉在声场中并非处于完全静止状态, 而是处于运动中。这种运动又不是简单的振荡, 而是高速旋转与振荡的复合运动。因为煤粉颗粒的形状并不是严格意义上的球体, 这样导致声场作用在颗粒上下表面的声辐射力大小不相等, 而且在同一高度上不同位置处的声辐射力也不尽相同, 导致颗粒随声场振荡的同时还在作旋转运动。相比于水平方向的旋转运动, 颗粒在竖直方向的振动幅度较小, 通过调节

声场强度, 可以近似保持颗粒在竖直方向静止, 这就能提供颗粒静止状态的完整全息图, 相比水平面上和自由落体时的颗粒, 其全息图更加准确完整。比较图 4(a)和(b)可知, 颗粒不同投影面下, 全息图样式差别不大, 图形都能被重建出来, 且重建图像轮廓清晰, 重建颗粒到 CCD 记录平面的距离均为 240 mm 左右, 从这个角度来看, 声场对数字全息的影响不大。灰度阈值取 0.6, 对图 4(b1)~(b4)进行二值化处理, 求得颗粒的等效直径分别为 2.330、2.317、2.445、2.317 mm, 平均粒径为 2.352 mm。

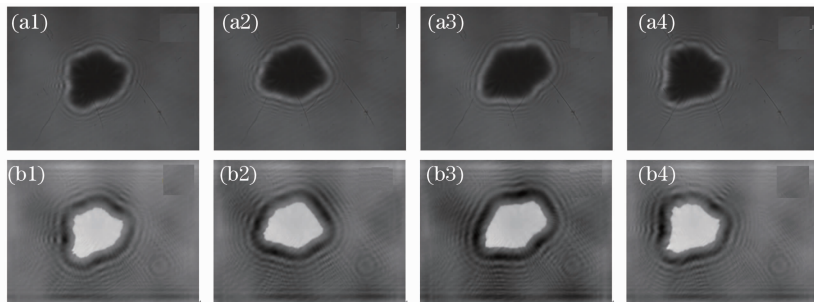


图 4 单颗粒褐煤煤粉全息记录图与重建图。(a) 全息记录图; (b) 颗粒全息重建图

Fig. 4 Holographic and reconstructed images of single lignite particle. (a) Holographic recording images; (b) holographic reconstruction images

3.2 热态实验

研究单颗褐煤颗粒在声悬浮场中的燃烧情况, 获得了不同颗粒热态的全息记录图和重建图。CO₂激光器采用手动触发方式, 激光功率为 100%, 热流密度为 150 W/cm², 从水平方向点燃煤粉颗粒。由图 5 可以看出, 在竖直方向产生了大量不规则的条纹, 这是由于煤粉颗粒燃烧时所产生的挥发分在此处改变了空气的折射率, 使入射激光在此处发生了干涉, 但由于气流的不稳定, 且空气的折射率较小, 所以重建图中无法得到清晰的重建图像。图中气流主要存在于竖直方向, 尽管颗粒是从水平方向点燃, 但水平方向几乎观察不到气流。这是由声场的分布

所决定的, 声悬浮装置所产生超声波是驻波, 颗粒悬浮时正好处于波节处, 颗粒在水平方向受到回复力的作用, 不析出挥发分。比较图 5(c)和(d)可知, 挥发分主要从颗粒上下表面的尖角处析出, 如图中 1 处和 2 处, 这是由于在尖角处颗粒与空气的接触面积较大, 空气流动速度较大, 便于挥发分的飘散和持续析出。水平方向由于受声场力的压迫作用, 即使在尖角处也没有观察到挥发分, 如图 5(c)中 3 处。重建颗粒到 CCD 记录平面的距离均为 240 mm 左右。灰度阈值取 0.6, 颗粒的等效直径分别为 2.327 mm、2.441 mm。

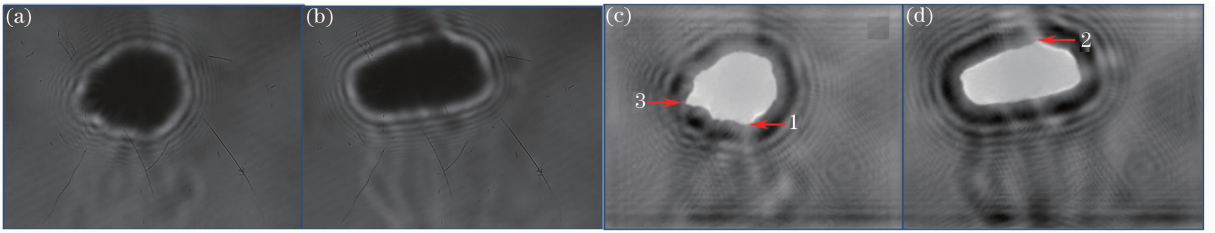


图5 不同褐煤颗粒全息记录图与重建图

Fig. 5 Holographic and reconstructed images of different lignite particles

图6是颗粒燃烧破碎时的全息记录图和重建图。图6(a)是某一时刻 CCD 记录下的颗粒全息图,图6(b)~(e)是图6(a)在不同重建距离(即不同 z)下的重建图。由图可知,大颗粒在燃烧过程中发生了破碎,产生了微米级的小颗粒,小颗粒在不同平面内聚焦,表明大小颗粒不在同一 z 轴平面内。图6(b)是小颗粒1的重建图像,聚焦平面 $z=103$ mm,图6(c)是小颗粒2的重建图像,聚焦平面 $z=114$ mm,图6(d)是大颗粒的重建图像,聚焦平

面 $z=240$ mm,此时小颗粒3的轮廓也比较清晰,可见小颗粒3与大颗粒基本在同一重建平面内,图6(e)是小颗粒4的重建图像,聚焦平面 $z=262$ mm。小颗粒在破碎时随机地向前或向后运动,这是由于颗粒在破碎时遵循动量守恒定律,小颗粒的质量较小,因此获得的速度较大,使得小颗粒足以克服声场回复力的作用,脱离驻波波节处。灰度阈值取0.6,颗粒1、2、3、4的等效粒径分别为0.071、0.070、0.061、0.189 mm。

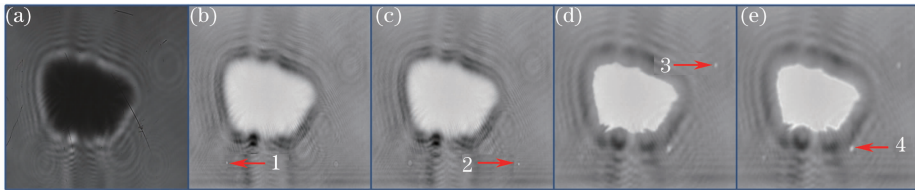


图6 颗粒燃烧破碎全息记录图与重建图。(a) 全息记录图; (b) 重建图 $z=103$ mm; (c) 重建图 $z=114$ mm; (d) 重建图 $z=240$ mm; (e) 重建图 $z=262$ mm

Fig. 6 Holographic recording and reconstruction images of particle crushing when burning. (a) Holographic image; (b) reconstruction image of $z=103$ mm; (c) reconstruction image of $z=114$ mm; (d) reconstruction image of $z=240$ mm; (e) reconstruction image of $z=262$ mm

通过按键程序控制 CCD 连续记录一段时间,获得同一颗粒不同时刻的全息记录图,相邻两张图之间的时间间隔(即图7中相邻两个数据点间的时间间隔)为160 ms。选取悬浮时间较长的颗粒1和2,对其重建图进行二值化,并用 Matlab 程序读取粒

径,获得了颗粒1和2不同时刻的等效粒径 d 。粒径变化规律如图7所示,由于颗粒的旋转,不同时刻颗粒的投影面不同,投影的等效粒径也不同。因此 d 并不是逐渐减小而是伴随着剧烈地振荡,但整体趋势是减小的,由图7可知,颗粒1和2在8.96 s内,粒径分别从3018.3 μm 和3045.5 μm 减小到2349.2 μm 和2596.3 μm ,分别减小了22.2%和14.7%。颗粒1和2分别在燃烧9.44 s和8.96 s后因震荡掉落,脱离视场。

声悬浮场中颗粒不仅绕轴旋转,还在 z 轴方向来回摆动,图8记录了颗粒1、2的 z 轴重建位置随时间的变化。从图8中可以看出,颗粒在声场中燃烧时非常不稳定, z 轴位置不断变化,颗粒1的最大 z 轴间距为18 mm,颗粒2为23 mm。普通高速摄影无法满足如此大的景深要求,全息可以通过设置不同的重建距离,得到清晰的成像。

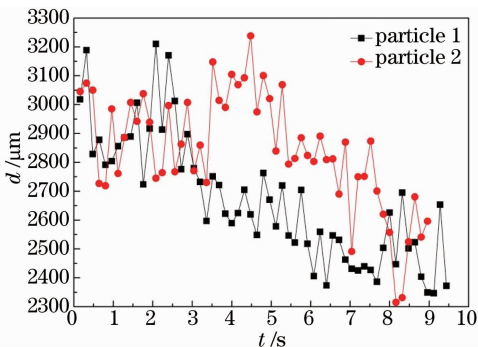


图7 颗粒燃烧时粒径随时间的变化

Fig. 7 Particle size change over time when combustion

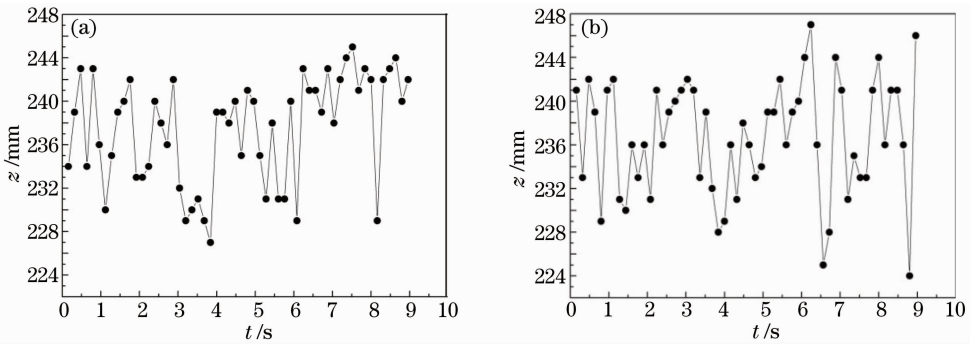


图 8 颗粒燃烧时 z 轴位置随时间的变化。(a) 颗粒 1; (b) 颗粒 2

Fig. 8 z position change over time when combustion. (a) Particle 1; (b) particle 2

4 结 论

数字全息技术能提供无接触的颗粒三维测量,对声悬浮场中的煤粉颗粒进行了冷态、热态的全息实验研究,获得了比普通高速摄影更准确、丰富的信息,反映了煤粉颗粒在声悬浮场中的燃烧、破碎特性:

1) 由于煤粉颗粒形状的不规则性,声场中的颗粒并不是静止的,而是高速旋转与振荡的复合运动。通过调节声场强度可以近似保持颗粒在竖直方向静止,但水平方向始终出于高速旋转。

2) 声悬浮场作用下颗粒不同投影面的全息图像轮廓清晰,声场对全息记录的影响较小。全息可以用于声场中单颗粒煤粉燃烧的研究。

3) 声场中煤粉的燃烧具有明显的方向性,挥发分的析出集中在竖直方向,在尖角处有非常明显的气流打断全息条纹,但不影响颗粒的重建。

4) 由于颗粒的旋转,同一煤粉颗粒燃烧时的等效粒径振荡减小。煤粉在声场中燃烧时发生破碎,产生更小的微米级别的小颗粒,小颗粒的景深差达 159 mm。大颗粒在 z 轴方向围绕着波节来回震动,最大景深差达 23 mm。通过设置不同的重建距离可以得到准确的颗粒信息,这是全息相对于普通高速摄影的优势。

参 考 文 献

- 1 Maffei T, Khatami R, Pierucci S, *et al.*. Experimental and modeling study of single coal particle combustion in O_2/N_2 and oxy-fuel (O_2/CO_2) atmospheres[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(11): 2559–2572.
- 2 Bejarano P A, Levendis Y A. Single-coal-particle combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 environments[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 153(1): 270–287.
- 3 Leiterer J, Grabolle M, Rurack K, *et al.*. Acoustically levitated droplets[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1130(1): 78–84.
- 4 Wang T G, Trinh E H, Croonquist A P, *et al.*. Shapes of

- rotating free drops: spacelab experimental results[J]. *Phys Rev Lett*, 1986, 56(5): 452–455.
- 5 King L V. On the acoustic radiation pressure on spheres[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A-Mathematical and Physical Sciences*, 1934, 147(861): 212–240.
- 6 Gor'kov L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid[C]. *Soviet Physics Doklady*, 1962, 6: 773.
- 7 Lou Yuli, Li Junchang, Gui Jinbin, *et al.*. Research of color digital holography in image space[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0409001.
- 楼宇丽, 李俊昌, 桂进斌, 等. 像空间彩色数字全息研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0409001.
- 8 Li Guangyong, Yang Yan. Digital holography particle image velocimetry applied for measurement of the rotating flow fields [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0609001.
- 李光勇, 杨 岩. 数字全息粒子图像测速技术应用于旋转流场测量的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0609001.
- 9 Feng Dasheng, Jiao Feng, Chen Juan, *et al.*. Experimental study and numerical analysis on single-axis acoustic levitation [J]. *Physics Examination and Testing*, 2007, 25(5): 27–30.
- 冯大圣, 焦 锋, 陈 娟, 等. 单轴式声悬浮的实验研究及数值模拟分析[J]. *物理测试*, 2007, 25(5): 27–30.
- 10 Zhang Lin, Li Enpu, Feng Wei, *et al.*. A study of acoustic levitation process based on laser holographic interferometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(5): 2038–2042.
- 张 琳, 李恩普, 冯 伟, 等. 声悬浮过程的激光全息干涉研究 [J]. *物理学报*, 2005, 54(5): 2038–2042.
- 11 Xie Wenjun, Wei Bingbo. Physical characteristics of single-axis acoustic levitation[J]. *Technical Acoustics*, 2001, 20(2): 84–86.
- 解文军, 魏炳波. 单轴式声悬浮的物理特性[J]. *声学技术*, 2001, 20(2): 84–86.
- 12 Barmatz M, Collas P. Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields [J]. *J Acoust Soc Am*, 1985, 77(3): 928–945.
- 13 Zhou Binwu, Wu Xuecheng, Wu Yingchun, *et al.*. Influence of recording parameters on particle field measurement by digital holographic microscopy: a numerical investigation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(20): 204203.
- 周斌武, 吴学成, 吴迎春, 等. 数字显微全息中记录参数对颗粒测量影响的数值模拟[J]. *物理学报*, 2013, 62(20): 204203.
- 14 Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Wang Zhihua, *et al.*. Coal powder measurement by digital holography with expanded measurement area[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(34): H22–H29.
- 15 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):

0309001.

沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0309001.

- 16 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0309002.

马利红, 王辉, 金洪震, 等. 数字全息显微定量相位成像的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0309002.

- 17 Buraga-Lefebvre C, Coëtmelec S, Lebrun D, *et al.*. Application of wavelet transform to hologram analysis: three-dimensional location of particles[J]. Opt & Lasers in Eng, 2000, 33(6): 409-421.

- 18 Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Cen Kefa. Development of digital holography in particle field measurement[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0601001.

吴迎春, 吴学成, 岑可法. 数字全息测量颗粒场研究进展[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0601001.

- 19 Pei Hui, Yang Zhenya, Zheng Chujun. Phase-shifting on-axis fourier transform digital holography based on compressed sensing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040901.

裴慧, 杨振亚, 郑楚君. 基于压缩传感的相移同轴傅里叶变换数字全息[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040901.

栏目编辑:何卓铭