文章编号: 1001 - 2060(2012)04 - 0442 - 07

Micro-PIV 三维测量图像处理及优化研究

王 凌, 罗 锐, 王补宣
(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: Micro-PIV 是一种重要的微尺度流动测速技术, 可获得示踪颗粒速度和绘制流体速度场。在实验室已有显微测量技术基础上, 发展了 Micro-PIV 三维测量图像处理技术, 并对图像处理进行了优化和修正。颗粒图像中心二维坐标的精确性关键在于如何根据图像中心主要特征进行识别定位。荧光颗粒的三维识别是基于颗粒衍射图像随离焦量变化而变化, 通过待测实验图像与数值模板的匹配实现 Micro-PIV 三维测量, 数值图像的离焦量就是实验图像的离焦量。在分析实验图像和数值模板基础上分别对实验图像进行预处理和对数值模板进行修正, 使得实验荧光颗粒图像与数值模板匹配效果更好。

关 键 词: 微流体; Micro-PIV; 三维测量; 图像处理

中图分类号: O358 **文献标识码**: A

引 言

随着科学技术发展, 微尺度流动越来越多应用在微机电系统(MEMS)、航空航天、微流控芯片(Microfluidic)、电子器件冷却和生物医学工程等领域中。传统流体测量技术难以准确测量微流动, 不断发展出各种微流体测量技术, 其中 Micro-PIV 技术是微流动研究方面非常有效的实验测量手段。

文献[1]最早把 PIV 技术借鉴到微尺度装置上开始发展 Micro-PIV 技术。文献[2]采用直径 0.9 mm 的荧光颗粒对截面尺寸 11 mm × 72 mm 硅质微流道进行二维流速示踪测量, 利用汞弧灯持续照射, 采用荧光显微镜和 CCD 相机观测粒子运动, 空间分辨率可达 10 μm。文献[3]采用 Micro-PIV 测量了矩形微通道的流场, 利用脉冲激光器间断照射直径 200 nm 的聚苯乙烯球示踪粒子, 空间分辨率可达 0.9 mm。文献[4~5]描述了测量深度方程式, 最先发展了相关深度理论。文献[6]发展 Micro-PIV 技术来测量三维微结构系统内部的微流场, 获得全体积的速度分布。文献[7]进行了近壁流动二维 Micro-PIV 测量来确定微通道壁面形状。文献[8]应用 Micro-PIV 对 100 μm 方形截面的微通道内连续液滴两相流进行测量, 每隔 5 μm 进行三维流场速度分布图绘制, 在液滴中和液滴外面观察到两个环流。文献[9]对方形管道液液两相流进行了 Micro-PIV 三维测量, 研究了液滴内部的对流。文献[10]采用 Micro-PIV 研究了 T 型微流道产生的气液两相流, 叠加 4 个不同深度的平面二维速度获得了三维速度分布。文献[11]采用计算机控制的新型线型马达在玻璃毛细管内产生稳定移动的气泡, 在不同毛细数下进行 Micro-PIV 测量, 给出了气泡周围区域三维速度分布。

回顾前述研究, 可看出 Micro-PIV 技术测量空间分辨率高, 为微尺度测量研究提供了重要的技术手段, 但多应用于二维定常低速微流动测量, 三维流场常由二维叠加而成。本研究在实验室已有显微测量技术基础上, 发展优化了 Micro-PIV 三维测量图像处理技术, 以期为深入研究微流动特性奠定基础。

1 可视化 Micro-PIV 系统

Micro-PIV 技术原理是将宏观 PIV 测量应用于微尺度流动的流场测量, 主要区别在于 Micro-PIV 技术必须采用显微图像观测获取技术和体照明方式。本研究实验可视化 Micro-PIV 系统由 CCD 摄像机、落射荧光显微镜、数据采集卡、微型计算机和数据采集软件构成, 实验装置如图 1 所示。

CCD 摄像机、数据采集卡、数据采集软件和计算机构成图像采集系统。实验采用 A102f BASLER CCD 像机, 最大分辨率为 1 392H × 1 040V, 每个像素的大小为 6.45 μm(H) × 6.45 μm(V)。图像采集软件为实验室配合 CCD 和数据采集卡自行开发的, 可以连续采集上千帧图像。

收稿日期: 2011 - 09 - 16; **修订日期**: 2011 - 11 - 25
基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(50736002)
作者简介: 王 凌(1978 -), 男, 山东菏泽人, 清华大学博士研究生.

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

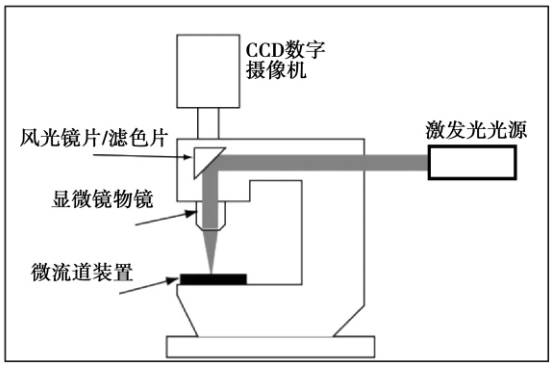

图 1　Micro-PIV 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of a Micro-PIV test device

实验时,采用与激发光波长对应的荧光示踪颗粒。激发光进入到显微镜,经分光镜反射后经物镜聚焦在微流道上。荧光颗粒受到激发光照射,激发出比激发光波长更长的荧光,滤色片滤除激发光而使荧光通过,通过显微镜物镜放大成像,利用 CCD 相机采集荧光颗粒图像存储在计算机中,即可完成图像采集工作。核心仪器是北京科仪电光仪器厂生产的 YZ-2 型落射式荧光显微镜,物镜放大倍数为 40 倍、数值孔径(N. A.) 为 0. 60。采用北京榜首科技公司生产的 500 mW 连续绿色(波长 532 nm) 固体激光器作为光源,采用 VD-III 型激光驱动器进行激光强度调节。整个装置放置在江西连胜实验装备公司生产的 VLT-B 型精密隔振光学平台上,采用自动充气气垫隔振,振幅不大于 2 μm,可以较好的保证实验台稳定。

Micro-PIV 对示踪粒子要求高,实验工质为浓度 0.01 M 的硼砂溶液,采用 Duke Scientific 公司生产的直径 0.5 μm 聚苯乙烯球作为示踪粒子。工质 1 mL 中荧光颗粒数量约为 1.5×10^{9} 个。颗粒数量少则不能充分显示流场细节,多则颗粒图像会相互重叠,无法处理,需要根据实验条件选择合适的颗粒浓度。粒子的激发光峰值波长约为 542 nm,被激发的荧光峰值波长约为 612 nm。实验所用激光器波长为 532 nm,荧光颗粒产生 610 nm 的受激荧光,满足荧光显微镜的设计条件。为精微控制工质流量,采用 Aitecs 公司生产的 SEP-10S 型数控注射泵驱动工质流动,其相对精度 ±2.0%。

2　荧光颗粒亚微米三维识别与定位

普通体照明方式 Micro-PIV 仅能测量二维流场,罗锐等人已经做了大量的 Micro-PIV 三维亚微米荧光颗粒衍射图像识别实验和研究[12~13]。本研究所用实验平台与罗锐先前研究所用相同,只是采用了新的大功率激光器和新的荧光颗粒,以获得更加清晰和详细的流场显示图像,在此基础上进一步发展亚微米荧光颗粒识别和定位处理技术,针对颗粒识别和三维定位等做出优化。

2.1　荧光颗粒三维识别原理

实验获得的微通道内荧光颗粒图像如图 2 所示,首要任务是进行粒子识别,包含两方面内容: 一是区分粒子图像和背景图像,即识别出哪些是粒子图像,哪些是背景图像; 二是对粒子中心位置进行定位,获得中心位置二维参数。由于荧光颗粒衍射图像其中心亮斑的亮度分布符合高斯分布,因此可利用高斯分布函数生成粒子中心亮斑的数值模板,然后对实验图像和数值模板进行二维卷积运算可获得粒子中心位置的二维参数[12]。

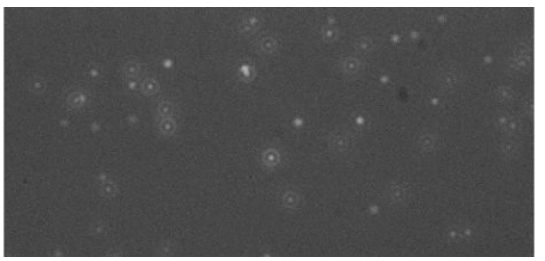

图 2　原始实验图像

Fig. 2 Original test image

在获得粒子中心位置的二维参数基础上进行三维测量,利用荧光颗粒因距离显微镜物镜不同而成不同衍射图像的特征,分析荧光粒子离焦衍射图样的差别来确定粒子在垂直于图像平面的轴向位置,实现粒子的三维定位。

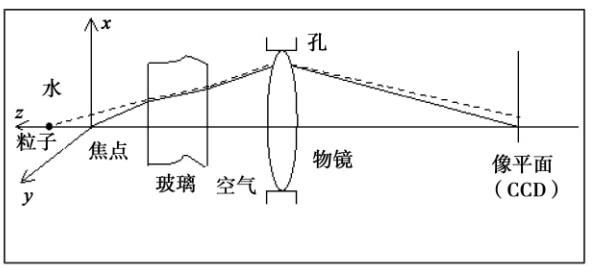

图 3　荧光粒子衍射成像原理图

Fig. 3 Schematic diagram of fluorescent particle diffraction imaging

荧光粒子衍射成像原理如图 3 所示,实验所用球形荧光颗粒直径只有 0. 5 μm,可将其视作点光

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

源。物镜可看做小孔，因此荧光通过物镜后将发生衍射，可借助光通过圆孔的衍射理论来分析荧光颗粒形成的衍射图样。图 4 为实验光路系统示意图。

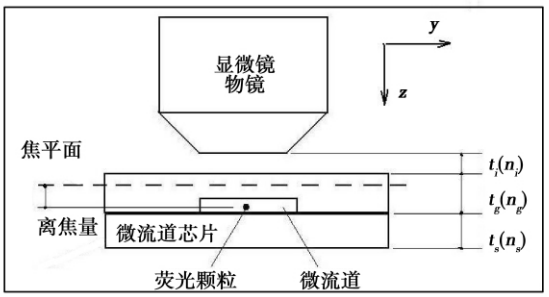

图 4 实验光路系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a test optical path system

三维测量需要荧光颗粒产生清晰的衍射图像条纹，这要求荧光相干且具有足够的相干长度。实验荧光波长带较窄，$\Delta\lambda$ 约为 30 nm，平均波长 λ 大约为 610 nm，根据相干长度计算式：

$$L = \lambda^2 / \Delta\lambda \tag{1}$$

计算得相干波长是 20.3λ，最多可产生 20 对明暗相间的衍射光环，因此可产生清晰的衍射图像。

粒子受布朗运动影响所带来的相对误差 ε_B 为：

$$\varepsilon_B = \frac{1}{u}\sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \tag{2}$$

式中：u—流体速度；Δt—时间间隔；D—扩散系数。

D 由下式计算：

$$D = \frac{kT}{3\pi\mu d_p} \tag{3}$$

式中：μ—动力粘度；d_p—粒子直径；T—温度；k—Boltzman 常数。

选实验温度 50 ℃，图像采集时间 1/28 s，荧光颗粒直径 0.5 μm，液体速度 0.2 mm/s，则布朗运动相对误差为 4.5×10^{-2}。

2.2 数值模板与实验图像匹配

获得清晰的荧光颗粒衍射实验图像后，需要与数值模板匹配实现粒子三维定位。采用文献［14］提出的光强衍射模型，颗粒衍射图样沿径向的光强分布函数近似为：

$$I(r,z) = \left| C\int_0^1 J_0(\nu\rho)\, e^{iW(\rho)}\rho d\rho \right|^2 \tag{4}$$

式中：z—粒子的离焦量；C—常数，J_0—零阶 Bessel 函数；v—无量纲半径，$v = 2\pi r N.A./\lambda$；$N.A. = n\sin\alpha_0$ 是物镜的数值孔径。并且有：

$$W(\rho) = \frac{2\pi}{\lambda} OPD \tag{5}$$

$$\begin{aligned} OPD = {} & n_i z\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_i}\right)^2} + \\ & n_g t_g\left(\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_g}\right)^2} - \left(\frac{n_i}{n_g}\right)^2\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_i}\right)^2}\right) - \\ & n_g^* t_g^*\left(\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_g^*}\right)^2} - \left(\frac{n_i}{n_g^*}\right)^2\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_i}\right)^2}\right) - \\ & n_i^* t_i^*\left(\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_i^*}\right)^2} - \left(\frac{n_i}{n_i^*}\right)^2\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_i}\right)^2}\right) + \\ & n_s t_s\left(\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_s}\right)^2} - \left(\frac{n_i}{n_s}\right)^2\sqrt{1-\left(\frac{NA\rho}{n_i}\right)^2}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

式中：OPD—显微镜设计条件与实际工作条件之间的光程差[15]；n_i, n_g, n_s—沉浸介质、覆盖的玻璃和工作液体的折射率；t_i, t_g, t_s—三者的厚度；带有星号（*）的符号代表设计参数。对于显微镜物镜数值孔径 $N.A. < 0.8$ 的情况，误差不到 3%，说明此衍射模型足够精确。

设定上述参数值后，可计算得到数值模型，图 5 为不同离焦量 z 下沿半径方向的数值模型光强分布曲线，归一化强度是各点像素亮度除以图像中心像素亮度获得。从图 5 可看出，随着离焦量增大，明暗光环逐渐增多，这可从波峰的数目直观看出；中心亮斑的半径逐渐减小，中心亮斑外的第一个波峰逐渐靠近颗粒中心。相对于内部光环，外部光环在总光强中所占的份额也越来越大。这些规律有助于修正数值模板，提高图像的识别程度。

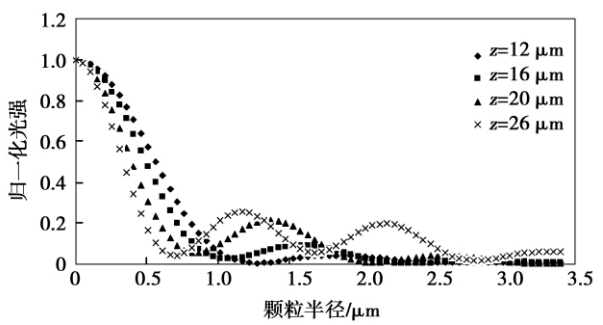

图 5 数值模板中不同离焦量沿半径光强分布

Fig. 5 Distribution of the light intensities at various defocus distances along the direction of the radius on the numerical template

采用编制的 MatLab 函数对实验图像进行处理，获得实验图像光强分布，然后与数值模型进行匹配计算，可实现荧光颗粒的三维识别和定位。数值模型可选用亚微米步长计算，因此可实现荧光颗粒亚

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

微米定位,追踪荧光颗粒运动,进而实现微流场三维测量。图 6 是从图 2 中选出的不同离焦量的粒子进行光强分布与模型计算值比较的结果。

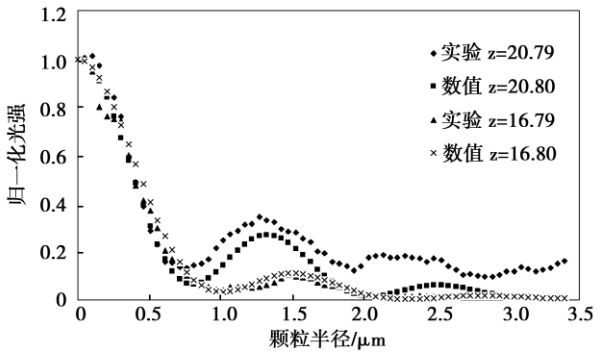

图 6　实验图像与数值模板光强分布对比

Fig. 6 Contrast of the distribution of the light intensities of the test image and numerical template

从图 6 可以看出,同等离焦量下实验图像和数值模板的光强分布的整体趋势符合比较好,可以依据数值模板对实验中的各个荧光颗粒衍射图像进行光强特征的对比,以此来判断实验图像中的各个荧光颗粒的离焦量。不过,也可看出在局部的光强趋势方面符合的并不是很好,并且由于实验图像的背景噪声以及图像的不完全对称性,在整体上也影响了光强的分布,特别是外部光环部分,因此需要对上述数值模板进行改进。

3　荧光颗粒三维定位优化

荧光颗粒的识别,一是要尽可能多的识别出颗粒,二是识别出来的颗粒其中心位置坐标的精度尽可能高。由于实验条件的多样性和数值模板的精度和准确性,并不能做到非常好的识别效果,所以继续讨论如何对荧光颗粒进行三维定位的优化。

3.1　实验图像处理优化

图 7 是本实验采集到的微通道柱塞流的原始图像,可看出被激光直接照射的荧光颗粒图像清晰,而不能被激光直接照射的颗粒图像较昏暗模糊。而且图像背景具有一定的亮度,使得不太明亮的衍射图像识别难度增大,背景图像中的噪音也有可能被误认为是颗粒图像。因此,对背景先做预处理,以获得较好的识别效果。

流体速度对测量结果有较大影响,当速度较大时采集到的实验荧光颗粒图像模糊,不能进行图像识别,因此实验对象是低速的柱塞流。

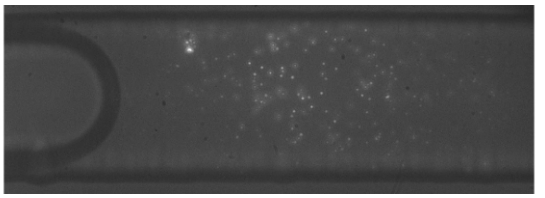

图 7　微通道柱塞流原始图像

Fig. 7 Original image of a two-phase flow in a microchannel

为了减少图像背景噪音的干扰,消除由中心光强引起的不确定性对实验图像光强分布产生的差异。在图像预处理中,首先对待处理图像做整体灰度计算,求得灰度的平均值,然后生成与原始图像同样大小的平均图像模板,再用原始图像减去此平均图像模板,获得新的图像。做减平均后的图像识别结果如图 8 所示。从图 8 可看出,减去平均图像模板后,背景的影响被大大降低,更易于进行图像识别。不过由于图像整体亮度降低,给利用灰度梯度进行边缘识别运算的 canny 算子带来困难,因此在减去平均图像背景的基础上再做进一步优化,对图像整体进行灰度值倍增的方法,即对整个图像像素矩阵乘以一个系数来提高整体的灰度梯度。对图 8 的像素灰度值乘 1.6 倍再进行颗粒识别得到图 9。

从图 9 可看出,灰度倍增的图像对比度大大增加,使灰度梯度增大,能够实现更多荧光颗粒的识别定位。

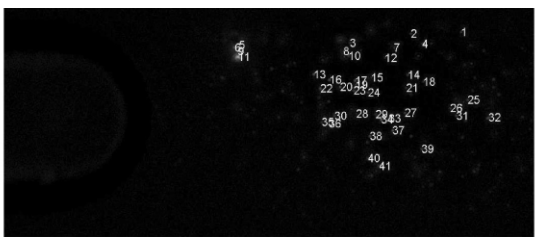

图 8　减平均背景模板的图像识别结果

Fig. 8 Image identification results when only subtracting the average background template

3.2　衍射图像计算修正

在图像匹配进行相关性计算时,首先要保证数值模型的准确度。待测实验图像和数值模板的光强分布具有相同的图像径向尺寸 $r = 3.4$ μm 和相同的径向步长 1/67。相当于对每一个离焦距离的荧光颗粒图像在半径上分成 67 等份,分别计算每一个等份的光强。对于激发光为 473 nm 激发的 530 nm 荧光实验光学系统,文献 [6] 认为光学系统中 1 μm

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

=5 个像素，采用 18 个像素对计算模板进行了放大修正，倍增因子为 18/17，并证实了数值模板与待测实验图像具有良好的相似性。

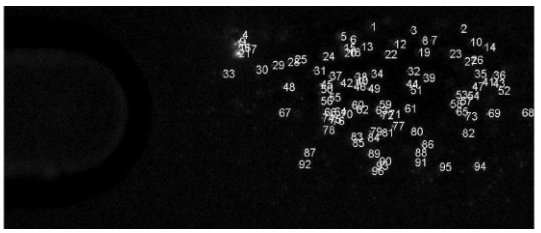

图 9　减平均背景模板后乘 1.6 系数图像识别结果

Fig. 9 Image identification results when multiplied by a factor of 1.6 after subtracting the average background template

本研究采用 532 nm 激发光，受激荧光 610 nm，需要对径向尺寸 $r = 3.4$ μm 的衍射图像模板修正。由画图软件可粗略计算实验图像中 3.4 μm 大约是 14 ~ 15 个像素，为保证计算精确性，需要对具体的像素数值进行试算和比较。选取 14、14.5 和 15 进行比较试算，计算不同离焦量下的荧光颗粒衍射图像的光强分布，并与数值光强分布进行对比。选取离焦量 10.4、20.4 和 28.4 μm 的荧光颗粒实验图像做计算比较，如图 10 ~ 图 12 所示。

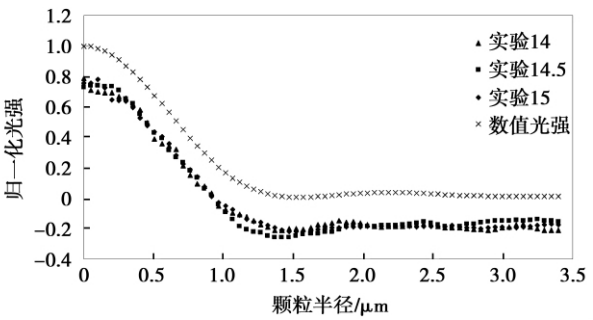

图 10　离焦量 $z = 10.4$ μm 不同取值计算下光强分布比较

Fig. 10 Comparison of the distributions of the light intensity calculated at various pixels when $z = 10.4$ μm

从图 10 ~ 图 12 看出，对离焦量为 10.4、20.4 和 28.4 μm 的颗粒综合比较，取 14.5 进行计算更符合不同离焦量下的光强分布曲线变化趋势，因此取 14.5 进行光强分布计算。还可看到由于实验图像采用减去平均图像模板的处理方式，因此有很多像素的灰度值小于零，不便于与数值模板比较分析，需要对数值模板进行修正。修正的方法是把数值模板中每一个离焦量下的 67 个光强值进行累加然后再除以 67 做平均，接着减去平均值得到修正后的数值模板。选取 $z = 23.40$ 和 $z = 19.41$ μm 两个离焦量下的实验图像进行计算其光强分布，并与修正后数值模板进行比较，如图 13 所示。

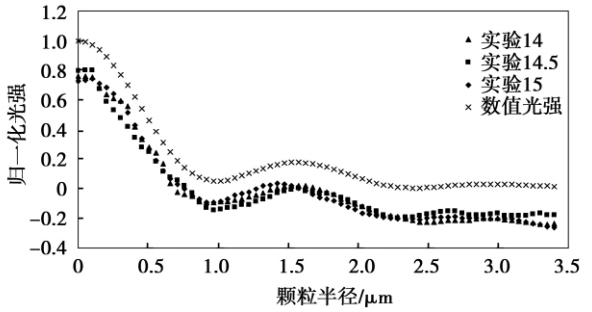

图 11　离焦量 $z = 20.4$ μm 不同取值计算下光强分布比较

Fig. 11 Comparison of the distributions of the light intensity calculated at various pixels when $z = 20.4$ μm

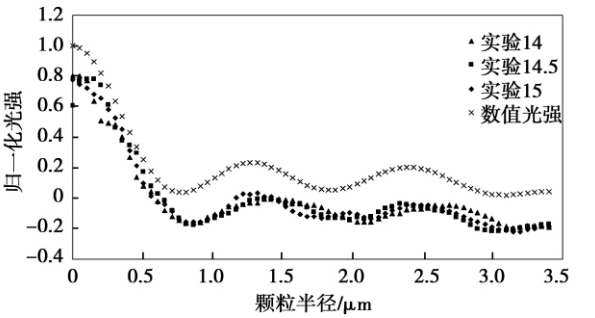

图 12　离焦量 $z = 28.4$ μm 不同取值计算下光强分布比较

Fig. 12 Comparison of the distributions of the light intensity calculated at various pixels when $z = 28.4$ μm

从图 13 可以看到，修正后的实验与数值衍射图像变化趋势符合较好，说明采用数值模板进行实验图像的匹配进而确定实验图像中荧光颗粒的离焦量是适合的。实验模板与数值模板相似性较差的地方主要是在外部衍射光环部分。还可以看出衍射图像中包括中心亮斑在内的 3 个光强波峰其峰值都具有同样的分布，即 $I_{peak1} > I_{peak2} > I_{peak3}$。随着离焦距离从 19.41 μm 增大到 23.4 μm 时，第二个波峰峰值也随之增大并向图像中心靠拢。这与罗锐等发现的随着离焦量的变化，亮光环峰值的相对强度比要比衍射光环半径变化重要这一现象不同[16]。主要原因是本实验采用的激光器激发光波长是 532 nm，而

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

罗锐其实验所用是 473 nm 波长,荧光颗粒发出的波长分别是 610 和 530 nm,随之带来了荧光颗粒衍射图像的变化。

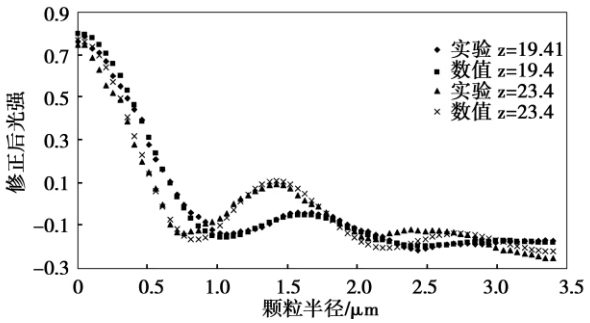

图 13　修正后数值模板与实验图像光强分布图

Fig. 13 Chart showing the light intensity of the numerical template and image obtained from the test after corrected

为了进一步验证这个现象,对数值计算模板中的离焦量 $z=8$、12、18、22、22.2、28 和 36 μm 的光强分布做比较分析,如图 14 所示。从图中可看出,随着离焦量增大,第二个波峰峰值先增大后减小,并且其半径越来越小,而外部的光环峰值却增大,表明衍射光环数目随着离焦距离增大而增多,且外部光环所占总光强的份额也在增大。对于图 14,考察离焦量从 22.0 μm 增大到 22.2 μm 时,发现衍射光环半径和光环峰值都几乎没有变换,这与文献 [16] 发现的衍射光环半径几乎没有变化,而 I_{peak2}/I_{peak1} 却有显著增长也不一致,同时从图 14 也未发现第三个峰值随着离焦量的增大超过第二个峰值的现象。因此,这些荧光颗粒衍射图像特征可以在图像匹配计算中发挥重要作用,不仅要考虑衍射光环半径,还要综合考虑衍射光环强度随着离焦量变换等特征,进而寻找最大相似性,达到更准确的匹配效果。

在对实验图像进行预处理和对数值模板进行修正以后,可使实验荧光颗粒图像与数值模板匹配效果更好,能识别出更多的荧光颗粒,颗粒的三维坐标精度也得到提高,本研究优化方法可为后继研究提供一种有效的 Micro-PIV 图像处理方法和参考。

4　结　论

(1) 颗粒图像中心二维坐标的精确性关键在于如何根据图像中心主要特征进行识别,本研究中衍射图像的共有特征是中心亮度分布具有高斯分布。

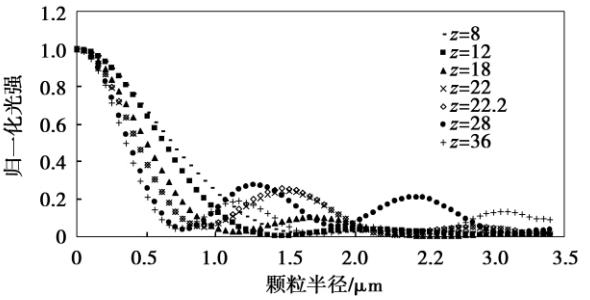

图 14　不同离焦量下数值模板光强分布图

Fig. 14 Chart showing the distribution of the light intensity of the numerical template at various defocus distances

(2) 荧光颗粒的三维识别是基于衍射图像随离焦量变化而变化进行的,通过待测实验图像与数值模板的匹配实现 Micro-PIV 三维测量,数值图像的离焦量就是实验图像的离焦量。

(3) 对荧光颗粒图像识别与定位的进行了优化。在对实验图像和数值模板进行分析的基础上分别对实验图像进行预处理和对数值模板进行修正,可使得实验荧光颗粒图像与数值模板匹配效果更好。

参考文献:

[1] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics. 1991, 23: 261 – 304.

[2] Broby J P, Yager P, Goldstein R E, et al. Biotechnology at low Reynolds numbers [J]. Biophysical Journal, 1996, 71: 3430 – 41.

[3] Meinhart C D, Wereley S T, Santiago J G. PIV measurements of a microchannel flow [J]. Experiments in Fluids, 1999, 27: 414 – 19.

[4] Meinhart C D, Wereley S T, Santiago J G. A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields [J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122: 285 – 89.

[5] Olsen M G, Adrian R J. Brownian motion and correlation in particle image velocimetry [J]. Optical & Laser Technology, 2000, 32(8): 621 – 627.

[6] Klank H, Goranovi G, Kutter J P, et al. PIV measurements in a microfluidic 3D-sheathing structure with three-dimensional flow behaviour [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002: 12: 862 – 869.

[7] Stone S W, Meinhart C D, Wereley S T. A microfluidic-based nanoscope [J]. Experiments in Fluids, 2002, 33: 613 – 619.

[8] Miessner U, Lindken R, Westerweel J. Velocity measurements in microscopic two-phase flows by means of micro-piv [C] //Proceedings of the 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Pts A and B, 2008: 1111 – 1118.

[9] Kinoshita H, Kaneda S, Fujii T, et al. Three-dimensional measurement and visualization of internal flow of a moving droplet using

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

confocal Micro-PIV [J]. Lab Chip, 2006, 7: 338 – 346.

[10] Van Steijn V, Kreutzer M T, Kleijn C R. Velocity fluctuations of segmented flow in microchannels [J]. Chemical Engineering, 2007, 62: 7505 – 7514.

[11] Yamaguchi E, Smith B J, Gaver D. μ-PIV measurements of the ensemble flow fields surroundinga migrating semi-infinite bubble [J]. Experiments in Fluids, 2009, 47: 309 – 320.

[12] Luo R, Yang X Y, Peng X F, et al. Three-dimensional tracking of fluorescent particles applied to micro-fluidic measurements [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16: 1689 – 1699.

[13] Luo R, Sun Y F. Tracking sub-micron fluorescent particles in three dimensions with a microscope objective under non-design optical conditions [J]. Measurement Science & Technology. 2006, 17: 1358 – 1366.

[14] Gibson S F, Lanni F. Experimental test of an analytical model of aberration in an oil-immersion objective lens used in three-dimensional light microscopy [J]. Journal of Optical Society of American. 1991, 8: 1601 – 1613.

[15] Olsen M G, Adrian R J. Out-of-foucus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids. 2000, (S): 166 – 174.

[16] Luo R, Sun Y F. Pattern matching for three-dimensional tracking of sub-micron fluorescent particles [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(13): 045402.

(丛 敏 编辑)

新技术、新产品

M501 简单循环动力装置的发展

据《Gas Turbine World》2012 年度手册报道，依据相关的机组设计和运行经验，通过采用创新技术，借助于提高燃气初温、压比和质量流量来提高动力装置的性能，大约每 10 年，MHI(三菱重工)就推出新的燃气轮机系列。

用天然气作为燃料，M501 简单循环燃气轮机的额定负荷性能包含了进口和出口损失。

型号	推出年份	基本负荷净输出功率/kW	热耗率 /kJ·(kWh)$^{-1}$	效率 /%	压比	燃气初温 /℃	排气流量 /kg·s^{-1}	排气温度 /℃
M501DA	1980	113950	10318	34.9	14.0	1250	346	543
M501F3	1989	185400	9738	37.0	16.0	1400	459	613
M501G1	1997	267500	9210	39.1	20.0	1500	599	601
M501GAC	2011	272000	9073	39.7	20.0	1500	599	614
M501J	2011	327000	8783	41.0	23.0	1600	599	636

(吉桂明 摘译)

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

brings about an increase of the resistance to the flow inside. Through a multivariable linear regression, a statistical correlation formula for *Nu* and *f* of a tube with a twisted tape was formulated through a fitting, offering a theoretical basis for design and modification of a heat exchanger. **Key words:** twisted tape, spiral coil, Nusselt Number, resistance factor, heat transfer

CO_2单管池沸腾换热实验研究 = Experimental Study of the Boiling-based Heat Exchange of Carbon Dioxide in a Pool Equipped with a Single Tube [刊,汉] QU Hong-wei, LI Min-xia, MA Yi-tai, JU Cheng-cheng (Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). -439 ~ 441

In the boiling-based test section of a filling pool of a CO_2 trans-critical water-water heat pump test stand, tested was the boiling-based heat exchange of carbon dioxide in the pool with the test data being processed by using the Wilson analytic method. The test results show that the boiling-based heat exchange effectiveness in the CO_2 pool is superior to that in the tube. In the meantime, on the basis of the test data, the correlation formulae for the boiling-based heat exchange coefficient, heat flux density and contrast pressure of the CO_2 pool at the saturation pressure 3.2 MPa and 3.4 MPa were obtained through a fitting. **Key words:** carbon dioxide, boiling-based heat exchange in a pool, predicative correlation formula

Micro-PIV 三维测量图像处理及优化研究 = Study of the Processing and Optimization of Micro-PIV-based Three-dimensional Measurement Images [刊,汉] WANG Ling, LUO Rui, WANG Bu-xuan (Laboratory on Phase Change and Interface Transfer Phenomena, Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). -442 ~ 448

Micro-PIV is an important micro-scale flow velocity measurement technology, capable of acquiring the speed of tracer particles and plotting a flow field of the fluid. On the basis of the currently available microscopic measurement technologies in the laboratory, the authors developed a Micro-PIV three-dimensional measurement image processing technology and conducted an optimization and corrected optimization of the image processing. The key to the precision of the two-dimensional coordinates of the particle image centers lies in the matter how to identify and locate the particles according to the main characteristics of the image centers. A three-dimensional identification of fluorescent particles is based on the diffraction images of the particles, which change with the defocus distance, and a Micro-PIV

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

three-dimensional measurement is realized through a matching of the test images to be measured and the numerical template. The defocus distance of a numerical image is that of the test image. On the basis of an analysis of the test images and the numerical template, the test images were pretreated and the numerical template was corrected respectively, resulting in a better matching effectiveness of the test fluorescent particle images and the numerical template. **Key words:** micro-fluid, Micro-PIV, three-dimensional measurement, image processing

流化床 O_2/CO_2 燃烧(Ⅲ)-氧浓度对粒径的影响 = O_2/CO_2 Combustion in a Fluidized Bed(III)-Influence of the Oxygen Concentration on Particle Diameters [刊,汉] ZHAO Ke, TAN Li, DUAN Cui-jiu, LU Qing-gang (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). -449 ~ 454

To study the influence of the oxygen concentration on particle diameters of fuel, a combustion test was performed at different oxygen concentrations, fuels and particle diameters in a 15 kW and 0.15 MW circulating fluidized bed test system respectively. The test results show that when coal with a high volatile content is burned, the oxygen concentration has a relatively big influence on the thermal fragmentation of fuel and subsequently affects the particle diameters of fuel. During the combustion at an oxygen concentration of about 50%, for fuel with a high volatile content, the average particle diameter will increase by about 35% when compared with the conventional air combustion. During the combustion process, the thermal fragmentation of Shenmu-originated semi-coke with a low volatile content is relatively weak and the oxygen concentration has no big influence on the thermal fragmentation characteristics and the particle diameters have no obvious difference to those under the condition of air combustion. **Key words:** fluidized bed, O_2/CO_2, combustion, thermal fragmentation, oxygen concentration, particle diameter

440 t/h CFB 锅炉掺烧石油焦二氧化硫排放特性研究 = Study of the SO_2 Emission Characteristics of a 440 t/h Circulating Fluidized Bed Boiler Burning Coal Mixed and Diluted With Petroleum Coke [刊,汉] ZHANG Zhong-lin (Engineering Center for Electric Power Simulation and Control, Nanjing Engineering College, Nanjing, China, Post Code: 210013), CHEN Xiao-ping (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 455 ~ 458

In a 440 t/h large-sized circulating fluidized bed boiler, an experimental study of its sulfur dioxide emission charac-

994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net