

# 激光散斑法测量定向纳米流体中纳米粒子速度

钱 明<sup>1,2</sup> 严 琴<sup>3</sup> 倪晓武<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院深圳先进技术研究院生物医学与健康工程研究所, 保罗·C·劳特伯生物医学成像研究中心, 广东 深圳 518067)  
<sup>2</sup> 中国科学院生物医学信息与健康工程重点实验室, 广东 深圳 518067; <sup>3</sup> 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 纳米流体导热特性优异, 其中纳米粒子的运动是纳米流体导热系数显著提高的主要因素。利用激光散斑测速法测量定向纳米流体中纳米粒子的运动。针对纳米粒子的光学特性, 对传统的激光散斑测速 (LSV) 系统进行了改进, 使之可测试流体中纳米粒子的运动, 且利用实验、数值模拟证实了激光照射纳米流体确能形成散斑。根据改进的实验装置建立了层流物理模型, 基于散斑的统计特性, 通过数学推导得到: 在 Fresnel 衍射区域, 纳米粒子的运动速度等于接收屏上散斑的运动速度。进而构建了定向纳米流体实验装置, 获得了时间间隔很短的序列散斑图。最后对相邻两幅散斑图进行图象处理和信息提取, 得到了纳米粒子运动矢量图。

**关键词** 测量; 激光散斑测速法; 纳米流体; 纳米粒子

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0290

## Measurement of the Velocities of Nanoparticles in Oriented Nanofluids with Laser Speckle Velocimetry

Qian Ming<sup>1,2</sup> Yan Qin<sup>3</sup> Ni Xiaowu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Paul C. Lauterbur Research Center for Biomedical Imaging, Institute of Biomedical and Health Engineering, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518067, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Biomedical Informatics and Health Engineering, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518067, China

<sup>3</sup> School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** The movement of nanoparticles in fluids is one of the main factors that result in the remarkable thermal conductivity of nanofluids. In this paper, Laser speckle velocimetry (LSV) is proposed to measure the velocities of nanoparticles in nanofluids, and traditional LSV system is modified in order to be competent for detecting the movements of nanoparticles. It is verified that speckles can indeed be formed by illuminating laser beam on nanofluids by the means of experiments and numerical simulations. According to the modified experimental setup, a physical model is established. Based on statistical properties of speckles, the relationship between the movements of nanoparticles and the movements of speckles on the screen is studied by formula deduction. A conclusion is drawn that the velocities of nanoparticles is identical to the velocities of speckles in Fresnel region. Thereafter, the experimental system is set up, and speckle patterns sequences are recorded with high speed CCD camera. Two consecutive speckle patterns are processed with computer programs to obtain the motion vector diagram of speckles, thereby the motion of nanoparticles.

**Key words** measurement; laser speckle velocimetry; nanofluids; nanoparticles

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50436020)和博士点基金(20050288025)资助课题。

**作者简介:** 钱 明(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事声光双模流体测速方面的研究。

E-mail: qianming82@hotmail.com

**导师简介:** 倪晓武(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光物理与生物医学光子学等方面的研究。

E-mail: jsnjnxw@gmail.com(通信联系人)

## 1 引言

1995年美国Argonne国家实验室的Choi<sup>[1]</sup>在国际上首次提出了纳米流体的概念。纳米流体是指把金属或非金属纳米粉体分散到水、醇、油等传统换热介质中,制备成均匀、稳定、高导热的新型换热介质。纳米流体克服了大粒子悬浮液的缺点:由于布朗运动,悬浮液内纳米粒子不易沉降<sup>[2]</sup>,从而有利于形成稳定的悬浮液;纳米尺度的粒子也很容易通过微流道,这为工业应用提供了基础;由于纳米材料具有大的比表面积和高的比热,因而纳米流体具有良好的换热能力,其导热系数要比一般的大粒子固-液混合物高许多。

人们对纳米流体导热系数进行了大量的实验研究。早在1993年,日本Tohoku大学的Masuda<sup>[3]</sup>等在水中添加4.5%体积百分比、平均粒径为13 nm的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,形成的悬浮液的导热系数比水大近30%,这是首例关于纳米流体强化传热研究的文献报道。1997年,J. A. Eastman<sup>[4]</sup>和Choi等通过实验证明当CuO的体积浓度为5%时,CuO-水纳米流体的导热系数能提高60%。1999年,S. Lee以大约4%的体积分数在乙二醇中添加氧化铜纳米粒子,形成的纳米流体热导率比乙二醇提高20%以上<sup>[5]</sup>。2001年,J. A. Eastman等<sup>[6]</sup>测试了含有直径约为10 nm的铜纳米粒子的纳米流体的导热系数,结果显示,仅仅以0.3%的体积比在乙二醇(EG)中添加铜纳米粒子,形成的纳米流体导热系数比乙二醇提高40%以上。2001年,Choi<sup>[7]</sup>将平均直径为25 nm、平均长度为50  $\mu\text{m}$ 的多层碳纳米管(Multiwall Nanotubes, MWNTs),均匀分散在合成油中,制成纳米流体。发现当体积浓度为1%时,导热系数超过了基液的250%。2001年,谢华清等<sup>[8]</sup>将粒径为25 nm的SiC纳米粒子分散于水中制备成了SiC-水纳米流体,发现当纳米粒子的体积百分比为4.2%时导热系数提高15.9%。2003年,Das等<sup>[9]</sup>观察到在水中添加1%~4%体积百分比的纳米铝粒子能将导热系数提高25%。2004年,Kumar等<sup>[10]</sup>报道在水中添加体积百分比为0.00013%的纳米金粒子能够将导热系数提高20%。由以上实验可以发现纳米流体的一个很重要的特点就是其导热系数要比一般的大粒子固-液混合物高很多,这也是纳米流体近年来引起广泛关注的原因。

纳米流体的导热系数比原介质流体有很大幅度提高,这在实验中得到了较多的证明,但在理论上的分析还不透彻<sup>[11]</sup>。许多学者,如Maxwell<sup>[12]</sup>、

Hamilton和Crosser<sup>[13]</sup>、Davis<sup>[14]</sup>等提出了一些计算导热系数的模型,但实验研究表明,以上传统理论模型不适用于纳米流体。国内外的科学工作者展开了大量的研究,提出了各种物理模型试图解释纳米流体的传热机理。例如Jang和Choi等<sup>[15]</sup>提出了一个基于对流的模型。Koo和Kleinstreuer<sup>[16]</sup>考虑了由纳米粒子布朗运动引起的运动能。Prasher研究团队<sup>[17, 18]</sup>建立了一个基于布朗运动的对流传热模型,并认为由纳米粒子布朗运动引起的对流是引起纳米流体导热系数显著提高的主要因素。宣益民、李强<sup>[19]</sup>分析了纳米粒子和其携带的流体的输运过程,同样总结出由纳米粒子布朗运动引起的微对流是导致纳米流体优异导热性能的重要因素。Chon等<sup>[20, 21]</sup>在实验上证明了纳米粒子的运动是决定纳米流体导热性能的主要因素。

考虑到纳米粒子的运动在提高流体导热系数中起到的重要作用,研究一套测试系统来探测纳米粒子在纳米流体中的运动状态具有重要意义。本文利用激光散斑测速法测量定向纳米流体中纳米粒子的运动,得到了理想的结果。

## 2 测量纳米流体中纳米粒子运动的激光散斑测速系统组成

纳米粒子的一个重要的光学特性就是纳米粒子对可见光的吸收特别强,对可见光的反射率极低。另外,纳米粒子的粒径可与光波长相比拟,甚至小于光的波长,因此激光照射到单个纳米粒子上时,发生的散射是Rayleigh散射,而不是Mie散射。Rayleigh散射光的强度与粒子体积的平方成正比,与入射光的波长的四次方成反比,因此纳米粒子的散射光很微弱。

激光散斑测速技术(Laser speckle velocimetry, LSV)是由探测粒子被光照射后形成的散斑图得到粒子的运动速度,进而得到流场的速度分布。当纳米粒子达到一定浓度之后,纳米粒子之间的距离很短,从而纳米粒子散射光可同时满足时间相干性和空间相干性。因而在入射光的照射下,多个纳米粒子的散射光相互干涉形成散斑<sup>[23~27]</sup>。因为在很短的时间内纳米粒子运动的位移是很小的。可认为在很小的区域内,若干个纳米粒子的相对位置没有发生变化,根据该区域的纳米粒子和散斑图像上的某些散斑间这一确定的对应关系,可得到粒子的二维速度矢量分布图,进而得到纳米粒子的运动速度与

流体速度的差异。

针对纳米粒子独特的光学特性,对传统的 LSV 系统中光源的照射方式和记录的接收方式进行改进,改进后的测速系统如图 1 所示<sup>[22]</sup>,即由激光光源、透镜  $L_1$  和  $L_2$  组成的扩束透镜组、纳米流体透明管道和 CCD 记录装置组成。考虑到蓝绿光在水中的衰减最小<sup>[24]</sup>,因此在对以水为基液的纳米流体使用波长为 532 nm 的绿光作为照射光源。系统采用的激光光源是波长为 532 nm 的 LD 抽运 Nd:YAG 倍频绿光激光器,输出功率可调;扩束透镜组中的透镜  $L_1$  和  $L_2$  的焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ ,其焦距可根据具体的扩束倍数要求选定,扩束倍数为  $f_2/f_1$ 。

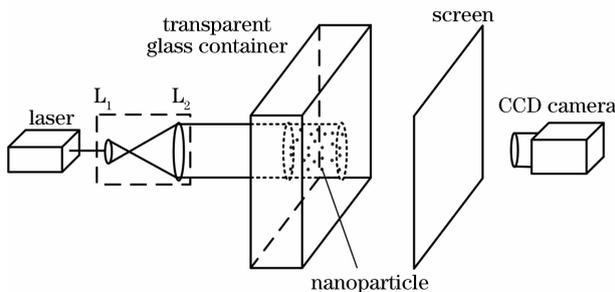


图 1 用于测试纳米流体中纳米粒子运动的激光散斑测速系统

Fig. 1 Laser speckle velocimetry system for measuring the velocities of nanoparticles in nanofluids

与传统的激光散斑测试系统结构比较,图 1 给出的系统中对光源的照射方式和记录装置的接收方式进行了改进:1)采用平行面光源照射;2)用扩束过的面光源照射装有纳米流体的透明管道,这样在激光束经过的路径上,将大量的纳米粒子照亮,这些纳米粒子的瑞利散射光进行干涉叠加,形成了清晰可见的散斑图像;3)记录前向散射光形成的散斑。对散斑图像的记录方式进行了改进。纳米粒子在形成瑞利散射时,前向散射光最强,而垂直于入射光方向的散射光强度几乎为零<sup>[22]</sup>。因而改进后的系统将记录装置设置在纳米流体透明管道另一侧正对入射光方向,当纳米流体沿着管道流动时,记录装置就可以得到粒子的前向散射光,从而记录下时间间隔很短的相邻两幅散斑图像,通过对两幅图像进行图像相关处理,得到两幅图中对应散斑的位移量,进而得到纳米粒子的速度及其分布。

### 3 层流纳米流体中纳米粒子与散斑运动的对应关系

激光散斑测速技术的基本思想就是用激光照射

流体中的粒子产生散斑,根据散斑运动和粒子运动之间的关系获得粒子的运动,从而得到流场的速度场分布。由于本文涉及的测试装置进行了改变,因而要从理论上证明纳米粒子的运动和散斑运动之间确有对应关系。

根据图 1 可知:纳米流体在方形管道中沿定向流动,透镜  $L_1$  和  $L_2$  组成了一个扩束透镜组,激光束经过透镜组被扩束为平行面光源垂直入射透明管道,在管道后放置接收屏和记录用高速 CCD,当纳米流体中纳米粒子的体积百分比合适的时候,就可以观察到清晰的散斑图像。要研究散斑的运动和纳米粒子的运动之间存在的关系,首先必须研究管道中纳米流体的流动状态。根据流体的黏度和管道的尺寸适当地控制流速,可以使流体以层流的状态在管道中流动。因此,可以将图 1 所示的实验装置演变为图 2。激光束经扩束透镜组二维扩束为平行面光源垂直入射透明方形管道,由于流体以层流的状态在管道内流动,因此可以将管道看作如图 2 所示由很多的薄片状流层组成,这些薄片流层都与入射激光束垂直。由于流体作层流运动时,相邻流层间不相互混杂,所以可认为纳米粒子都在各自的薄流层内流动,而极少因切向的运动而进入相邻的层流。每一个薄层都可以看作是由基液和纳米粒子组成的衍射屏,当该衍射屏被激光束照射下,就将在后方的接收屏上形成散斑。所有散斑的叠加就将形成一个总的散斑图。

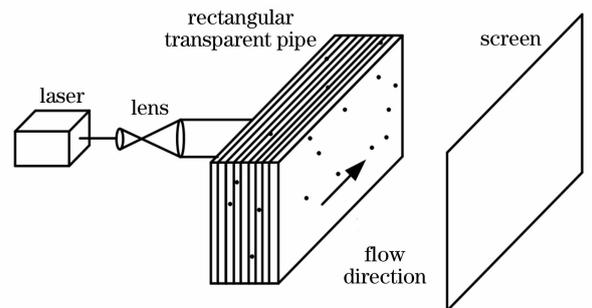


图 2 纳米流体在管道中层流流动

Fig. 2 Laminar nanofluids in pipe

而在菲涅尔衍射区域,任意选定的一个衍射屏上的纳米粒子的运动速度等于该衍射屏产生的散斑的移动速度。若每一个衍射屏上纳米粒子运动的速度一致,则我们可以得知,纳米粒子的运动速度与接收屏上散斑的运动速度呈正相关<sup>[28]</sup>。通过这个结论,我们就可以利用测量激光照射纳米流体时产生的散斑的速度,进而间接得到纳米粒子的运动速度,因此这是利用激光散斑测速法测量纳米流体中纳米

粒子运动速度的理论基础。

#### 4 定向纳米流体实验和散斑图像处理

利用图 1 给出的实验装置,实验使用的纳米流体由水和平均粒径为 20 nm 的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子组成。流动装置的主体部分是一个方形透明玻璃管,

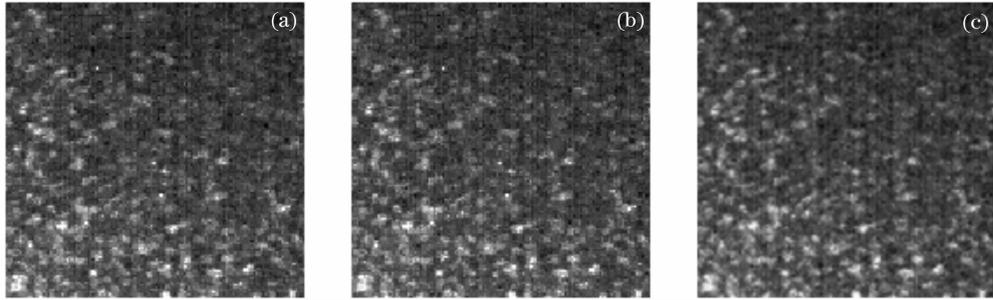


图 3 CCD 记录时间间隔为 7 ms 的序列散斑图

Fig. 3 Speckle pattern sequences recorded by CCD camera, the time interval between consecutive speckle patterns is 7 ms

针对实验获得的纳米流体沿管道做定向流动时激光散斑的动态序列图像,利用 Matlab 编制的图像处理软件对散斑图进行处理:进行同态滤波和二值化处理,以及图象相关处理经过计算后得到运动矢量图;引入了亚像素算法以提高精度,利用曲面插值拟合方法使精度可以达到 0.1 pixel,最终得到了散斑运动矢量图在图 4 给出。实验结果表明激光散斑法可以反映纳米粒子在纳米流体中的运动规律。

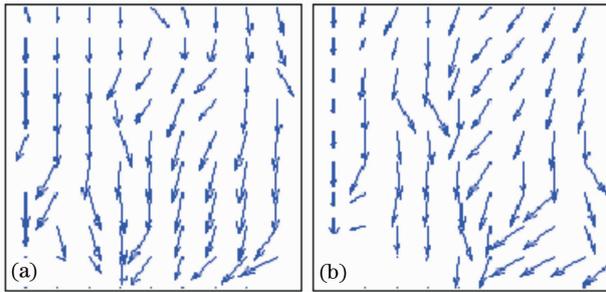


图 4 散斑运动矢量图

Fig. 4 Motion vectors of speckles

#### 5 结 论

提出了利用激光散斑测速法测量层流纳米流体中纳米粒子运动速度,从理论、实验、数值模拟三个方面证实了这种方法的可行性。在分析了纳米粒子的光学特性的基础上,论证了激光散斑测速法可以用来测量纳米流体中纳米粒子运动,并且对传统的激光散斑测速系统进行了改进,使之具备了测试纳米流体中纳米粒子运动的特性。从实验和激光数值模拟两个方面,对激光照射纳米流体形成散斑的机

纳米流体在其中从上向下流动,且可以通过阀门调节流体的流速。激光束垂直照射装有纳米流体的透明玻璃管,在接收屏上形成散斑图象。实验得到的连续三幅时间间隔为 7 ms, 128 pixel  $\times$  128 pixel 的序列散斑图在图 3 中给出,此时根据流量和时间测算出流体流动速度为 1 cm/s。

理进行了系统的研究和解释;根据实验装置建立了层状物理模型,推导并得到了纳米粒子运动速度和散斑运动速度之间关系。通过实验获取了散斑图并利用自行编制的程序对散斑图进行了处理从而获得了运动矢量图。

#### 参 考 文 献

- 1 U. S. Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. *Asme. Fed.*, 1995, **231**: 99~103
- 2 Zhang Lide, Mu Jimei. Nanostructured Materials Science[M]. Liaoning: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1994. 106~140  
张立德,牟季美. 纳米材料科学[M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 1994. 106~140
- 3 H. Ebata Masuda *et al.*. Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  ultra-fine particles) [J]. *Netsu Bussei* 1993, **4**: 227~233
- 4 J. A. Eastman, U. S. Choi, S. Li *et al.*. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids [J]. *Nanophase and Nanocomposite Materials II MRS*, Pittsburgh, 1997, **457**: 3~11
- 5 S. Lee, U. S. Choi, S. Li *et al.*. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles[J]. *J. Heat Transfer*, 1999, **121**(2): 280~289
- 6 J. A. Eastman, U. S. Choi, S. Li *et al.*. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(6): 718~720
- 7 U. S. Choi, Z. G. Zhang *et al.*. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(14): 2252~2254
- 8 Xie Huaqing, Wang Jinchang *et al.*. Study on the thermal conductivity of SiC nanofluids[J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2001, **29**(4): 361~364  
谢华清,王锦昌等. SiC 纳米粉体悬浮液导热系数研究[J]. 硅酸盐学报, 2001, **29**(4): 361~364
- 9 S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen *et al.*. Temperature

- dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids [J]. *J. Heat Transfer*, 2003, **125**(4): 567~574
- 10 D. H. Kumar, H. E. Patel *et al.*. Model for heat conduction in nanofluids[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(14): 144301
- 11 Zhang Qiaohui, Zhu Hua *et al.*. The investigations and applications of nanofluids [J]. *Energy Engineering*, 2006, **2**: 52~54  
张巧慧, 朱 华. 新型传热工质纳米流体的研究与应用[J]. 能源工程, 2006, **2**: 52~54
- 12 J. C. Maxwell. A treatise on electricity and magnetism[M]. 2nd edition, United Kingdom: Clarendon Press, 1881
- 13 R. L. Hamilton, O. K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1962, **1**(3): 187
- 14 R. H. Davis. The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions [J]. *Int. J. Thermophys.*, 1986, **7**(3): 609~620
- 15 S. P. Jang, S. U. S. Choi. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(21): 4316~4318
- 16 J. Koo, C. Kleinstreuer. A new thermal conductivity model for nanofluids [J]. *J. Nanopart. Res.*, 2004, **6**(6): 577~588
- 17 R. Prasher, P. Bhattacharya, P. E. Phelan. Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids) [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(2): 025901
- 18 R. Prasher, P. Bhattacharya, P. E. Phelan. Brownian-motion-based convective-conductive model for the effective thermal conductivity of nanofluids [J]. *J. Heat Transfer*, 2006, **128**(6): 588~595
- 19 Y. Xuan, Q. Li. Stochastic thermal transport of nanoparticle suspensions [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(4): 043507
- 20 C. H. Chon, K. D. Kihm. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) thermal conductivity enhancement [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(15): 153107
- 21 C. H. Chon, K. D. Kihm. Thermal conductivity enhancement of nanofluids by Brownian motion [J]. *J. Heat Transfer*, 2005, **127**(8): 810
- 22 Ming Qian, Xiaowu Ni *et al.*. Key issues in measuring the velocities of nanoparticles in nanofluids [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, **364~366**: 1111~1116
- 23 Ming Qian, Jun Liu, Mingsheng Yan *et al.*. Investigation on utilizing laser speckle velocimetry to measure the velocities of nanoparticles in nanofluids [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17): 7559~7566
- 24 Ming Qian, Zhonghua Shen, Jian Lu *et al.*. Investigation on the laser transmission properties of nanofluids [C]. *SPIE*, 2007, **6831**: 68310J
- 25 Ming Qian, Zhonghua Shen, Jian Lu *et al.*. Numerical simulations on the formation of laser speckles with nanofluids [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**(6): 461~468
- 26 Ming Qian, Yan Qin *et al.*. Monte Carlo simulations of the formation of speckles with nanofluids [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2008, **46**(6): 461~468
- 27 Qian Ming *et al.*. Numerical simulations on the formation of speckles when illuminating nanofluids with laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(suppl.): 367~369  
钱 明 等. 激光照射纳米流体形成散斑的数值模拟研究 [J]. 光电子 • 激光, 2006, **17**(增刊): 367~369
- 28 Ming Qian, Jun Liu *et al.*. Measurement of the velocities of nanoparticles in nanofluids with laser speckle velocimetry [J]. *Lasers in Engineering*,