

风沙流中气固两相速度场的 PIV-PLIF 测量

杨斌, 王元, 张洋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 结合粒子图像测速技术与平面激光诱导荧光法, 对风沙流中气固两相的速度场同时进行了测量. 实验采用罗丹明 B 溶液作荧光剂, 通过超声雾化方式产生平均直径为 $2\ \mu\text{m}$ 的气相荧光示踪粒子. 使用两组滤镜分别过滤荧光(橙色)与激光(绿色), 通过两个 CCD 相机分别获得气固两相示踪粒子图像对. 采用互相关算法及相应的图像处理方法进行后处理, 从而获得两相的速度场. 结果显示: 风沙流两相的速度廓线在上部均满足对数分布; 随着高度的降低, 在床面附近风速梯度单调递减, 风速廓线下凹, 而沙粒与风场不断交换动量, 相应地沙粒相速度廓线也会出现向下的偏离; 6 组沙样的速度廓线发生偏离的高度基本一致; 沙粒粒径不仅影响沙粒本身的运动速度, 同时对气相风场也有一定的影响.

关键词: 风沙流; 粒子图像测速技术; 激光诱导荧光法; 荧光示踪粒子; 粒径; 风速廓线

中图分类号: O359; X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0101-04

Simultaneous Velocity Measurements of Gas-Solid Phases in Eolian Sediment Transport by Particle Image Velocimetry-Planar Laser Induced Fluorescence

YANG Bin, WANG Yuan, ZHANG Yang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this study, a new method was presented to determine simultaneously the velocity fields of gas-solid phases in the eolian sediment transport by means of PIV and PLIF. The fluorescent seed particles were micro particles atomized from rhodamine B solution. The specific optical filters and the two CCD cameras were employed in the measurement. The cross correlation algorithm and the corresponding image processing technology were used in the processing of the resulting vector plots. The samples at the south edge of Taklimakan Desert were measured. The velocity fields of the two phases were obtained. The results show that the horizontal velocities of the both phases had approximate logarithm distributions in vertical direction at the upper part of the inferior boundary layer of airflow. With the decrease of height, the gradient of the wind speed near the bed surface decreased monotonically and there was a pit in each velocity profile curve of both phases. The deviations occurred at approximately uniform height for all samples. In addition, the horizontal velocities of both phases would change with the sand grain size.

Keywords: eolian sediment transport; PIV; PLIF; fluorescent particle; grain size; velocity profile

沙粒在风的作用下发生迁移从而形成风沙流. 当地风场不仅仅决定了沙粒的运动轨迹, 而且整个风沙流的输沙通量乃至风沙流结构也由其确定. 另一方面, “沙粒明显地改变了风的状态”^[1], 由于风场

不断被沙粒从中提取动量, 风场强度随之变化, 风沙两相之间的动量、能量交换贯穿风沙迁移过程始终. 两相间相互作用的研究是风沙动力学的核心内容. 一直以来, 在野外实验中多使用转杯式风速计测量

风速廓线^[2],风洞实验中则使用毕托管^[3]或热力学风速计^[4].沙粒相的测量由于实验手段的限制,更多地集中于输沙量及其沿高度分布的结果,通常使用集沙仪实现相关的测量^[5].因此,风沙流相间作用研究的重心集中于风速廓线与输沙通量(或输沙率)及其沿高度分布间的关系上.但是,上述的函数关系只能间接地说明风沙两相间的相互作用,进一步深入研究两相间的动量、能量交换更需要同时得到两相的速度场信息.

近年来,粒子图像测速技术(PIV)发展迅速,已逐步从单相流动测量扩展到两相或多相流动^[6].在两相 PIV 测量中使不同相的示踪粒子在一幅图像上成像,通过应用相分离识别技术,从而获得两相的流动信息.然而,两相 PIV 测量的图像数字处理技术比单相困难得多,相分离识别效果在很大程度上受示踪粒子浓度、形状以及照明光源的限制^[7].风沙流中沙粒相的浓度较高,且沙粒形状不规则,因此识别技术要求较高,且在识别过程中必然会损失图像信息.基于平面激光诱导荧光法(PLIF)的原理^[8-9],利用激光激发荧光物质,由于激发和发射之间存在着一定的能量损失,使荧光光谱中存在着斯托克斯位移,即荧光的波长总是大于激发光波长.利用这个特性,使用特定的滤镜可以将激发光和荧光分开.本文采用 PIV 与 PLIF 结合的方法,以荧光粒子作为气相的示踪粒子,利用特制的光学滤镜,使荧光粒子和沙粒分别在两台 CCD 相机上成像,进而获得风沙流两相的流动信息,为研究相间的相互作用提供了可能性.

1 实验方案与设备

实验在一个小型直流吸入式风洞(见图 1)中进行,测试段长度为 550 mm,宽度为 100 mm,高度为 70 mm.沙床全长 600 mm,铺设厚度为 15~20 mm.

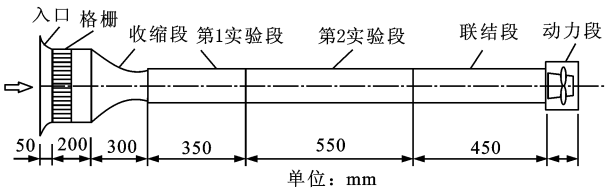


图 1 风洞示意图

采用 NEWAVE 公司的 Mini-YAG 激光器,最大能量为 120 MJ,频率为 15 Hz,发射波长为 532 nm 的绿光.通过同步器控制两台 TSI 公司的

10-30 型 CCD 相机获取示踪粒子图像.两台相机在风洞两侧正对摆放,通过在激光照明区域放置标靶,保证二者拍摄区域相同.

荧光剂的选择需要配合激光波长.荧光剂发射光谱的峰值应尽可能接近激光的波长,才能有效地激发荧光.以 Mini-YAG 激光器的发射波长为标准,实验选择了罗丹明 B 乙醇溶液作为荧光剂,其具有强荧光性,受激发后发射橙色荧光^[10](见图 2).图中 I 为罗丹明 B 乙醇溶液的吸、发射光谱相对光强, λ 表示光的波长.应用超声雾化的方式,荧光粒子的平均直径为 $2\text{ }\mu\text{m}$,可以完全跟随空气流动.

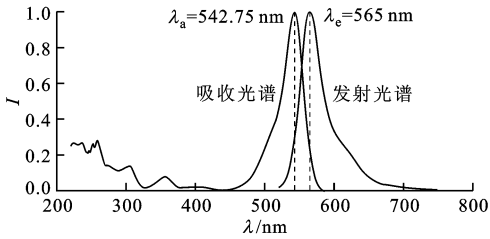


图 2 罗丹明 B 乙醇溶液吸收/发射光谱

实验采用橙色截止型光学玻璃(CB550)制作的滤色镜过滤 532 nm 波长的绿光,确保在该滤镜所配置的相机上仅有荧光粒子成像.该玻璃的透射光谱如图 3 所示,透射率 T 在 532 nm 波长处近似为 0.在另一台获取沙粒图像的相机上则使用一个镀膜单通滤镜(仅允许 532 nm 波长绿光通过),以阻止荧光成像.532 nm 波长绿光在激发荧光的同时,在荧光粒子表面还存在散射,这一现象会造成图像噪声.由于荧光粒子的粒径远小于沙粒,且沙粒表面粗糙,荧光粒子表面的散射光强远小于沙粒,因此在该相机上附加一个中性灰度镜,通过降低入射光强,去除荧光粒子表面的散射光噪声.

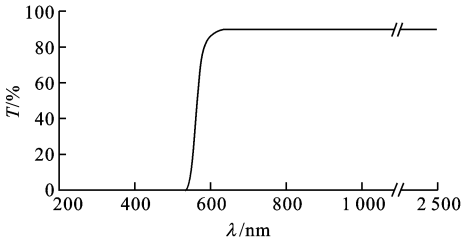


图 3 橙色光学玻璃的透射光谱

实验沙样采自塔克拉玛干沙漠南缘,密度为 $2.702\text{ }8\times10^3\text{ kg/m}^3$,按粒径分组列于表 1.根据下式,可知混合沙样的平均粒径

$$d_m = \sum_{i=1}^5 p_i d_{mi} = 105.9\text{ }\mu\text{m} \tag{1}$$

式中: p_i 为不同粒径范围的沙粒组分百分比; d_{mi} 为沙粒组分的平均粒径

表 1 混合沙的粒径分布

$d/\mu\text{m}$	63~80	80~100	100~125	125~160	160~200	63~200
$d_{mi}/\mu\text{m}$	71.5	90.0	112.5	142.5	180.0	131.5
$p/\%$	29.43	18.07	25.07	23.99	3.45	

2 数据处理及分析

某一时刻风沙流气固两相粒子图像如图 4 所示. 由于荧光光强较弱且不稳定, 荧光粒子像的灰度与图像背景接近, 尽管已经适当地增强了气相粒子图像的亮度与对比度, 但直观仍很难识别. 在数据处理过程中, 通过设定合适的光强最小值及信噪比值, 采用互相关算法, 可以获得较满意的气相速度场. 沙粒相在靠近沙床的区域浓度较高, 参考 BICC 方法 (binary image cross-correlation method), 采用基于互相关算法的多程回归方法 (见图 5) 获得沙粒相的速度场, 如图 6 所示.

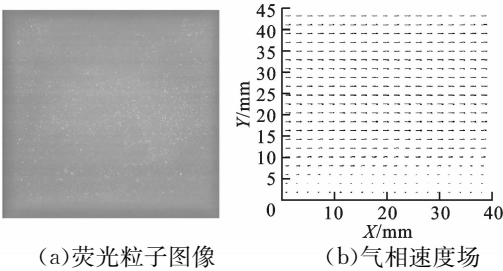


图 4 荧光粒子图像及相应的气相速度场

图 7 给出了 $100\sim125\ \mu\text{m}$ 沙粒随风运动的两相时均速度场. 图中仅保留了风洞内气流下边界层内的流动信息, 沙粒相则保留速度矢量连续分布的区域. X 轴指向风沙流的主流方向, Y 轴为距沙床面的高度. 由图 7 可知, 风沙流两相间的相互作用主要表现为风沙两相水平动量的交换. 由于风沙流中沙粒不断地跳起和下落, 在沙粒相的时均速度场中, 速度矢量方向接近水平仅说明了风沙流在测量期间处于平衡状态, 起跳的沙粒近似等于下落的沙粒, 因此分析速度变化对研究风沙两相间的作用更有意义.

对风沙流两相的水平速度 u 进行时-空联合平均, 在时间平均的基础上, 对时均速度场内同高度的速度矢量进行空间平均, 最终得到观测域内风沙流气固两相水平速度随高度的分布 (即速度廓线). 从物理意义上说, 沙粒相的水平速度廓线即是风沙流平衡状态下沙床上方不同高度处运动沙粒的水平速

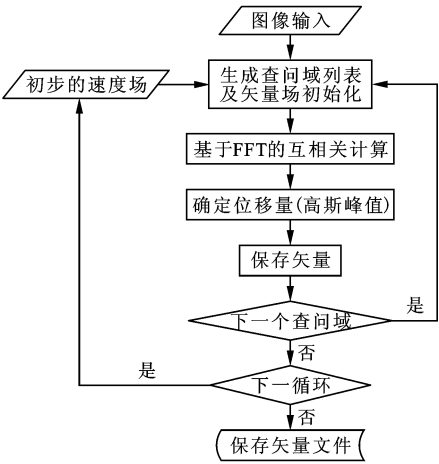


图 5 多程回归方法的处理流程图

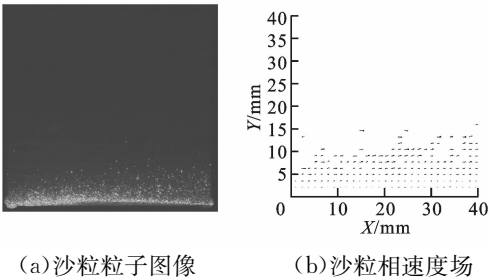


图 6 沙粒粒子图像及相应的沙粒相速度场

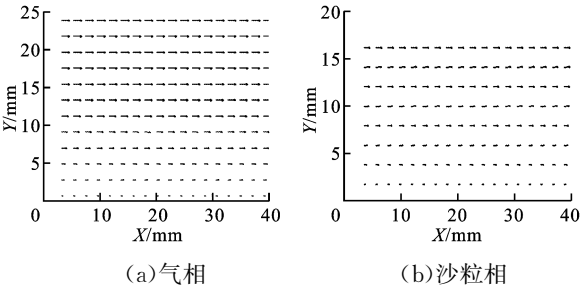


图 7 风沙流两相的时均速度场

度均值. 图 8 给出了在 6 组不同粒径组成的沙床上方风沙两相流的水平速度廓线图, h 为离床面的高度.

由图 8 可知, 在上部风沙流两相的水平速度廓线均接近对数分布, 随着高度的降低, 水平速度廓线开始发生偏离. 这是因为在存在较大密度梯度的跃移层内, 颗粒运动对风场存在较强的阻滞作用, 而且这种阻滞作用越靠近床面越强烈, 所以在床面附近风速梯度单调递减, 风速廓线下凹^[10-11]. 沙粒相与风场不断交换动量, 沙粒的向前动量完全来自于气流的作用, 其速度廓线相应地也会出现向下的偏离. 偏离发生的高度约为 2 mm, 6 组沙样获得的结果基本

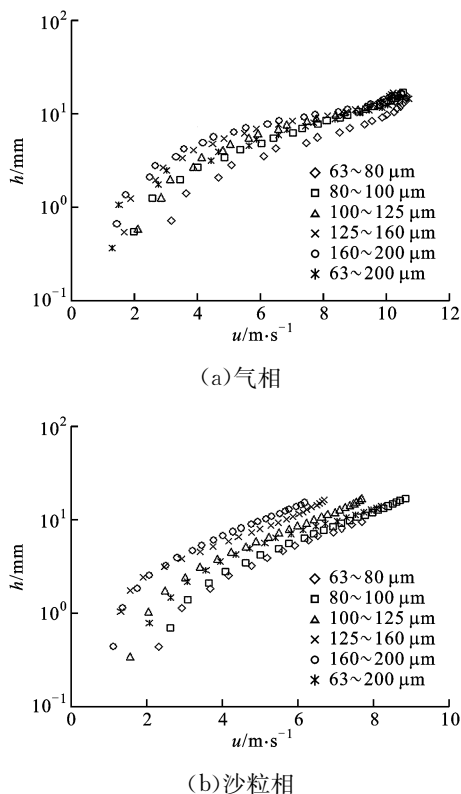


图8 风沙流两相的水平速度廓线

一致. 设 δ 为风洞中气流下壁边界层的厚度, 则相对偏离高度约为 0.12δ . 风沙两相的水平速度随高度增加而增大, 风速随高度的变化要明显大于沙粒水平速度随高度的变化. 风沙流两相的水平速度廓线随粒径增大而向左偏移, 沙粒粒径不仅影响沙粒本身的运动速度, 同时对气相风场也有一定的影响. 当实验沙粒的平均粒径 $d_m \leq 142.5 \mu\text{m}$ 时, 速度廓线偏移幅度随粒径的增大而增加. 当 $d_m \geq 142.5 \mu\text{m}$ 时, 粒径变化对风沙两相水平速度的影响幅度不大.

3 结 论

本文应用 PIV-PLIF 技术, 实现了风沙流两相速度场的同时测量. 作为非接触式光学测速技术在风沙流研究中的新应用, 实验不仅同时获得了两相整场的流动信息, 同时避免了常规风沙流实验中测量仪器对风沙流场的干扰. 实验获得的结果表明: 在近床面, 风沙流两相的速度廓线在上部均满足对数分布; 随着高度的降低, 在床面附近风速梯度单调递减, 风速廓线下凹, 相应地沙粒相廓线也会出现向下的偏离; 6 组沙样速度廓线发生偏离的高度基本一致, 约为 0.12δ ; 风沙流两相的水平速度廓线随粒径增大而向左偏移; 沙粒粒径不仅影响沙粒本身的运动速度, 同时对气相风场也有一定的影响.

参考文献:

- [1] 拜格诺 R A. 风沙和荒漠沙丘物理学 [M]. 钱宁, 林秉南, 译. 北京: 科学出版社, 1959: 53.
- [2] RASMUSSEN, K R, SORENSEN, M. Aeolian mass transport near the saltation threshold [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 413-422.
- [3] DONG Zhibao, WANG Xunming, ZHAO Aiguo, et al. Aerodynamic roughness of fixed sandy beds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(6): 11001-11011.
- [4] BAUER B O, YI J, NAMIKAS S L, et al. Event detection and conditional averaging in unsteady aeolian systems [J]. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39(3): 345-375.
- [5] 董治宝, 孙宏义, 赵爱国. WITSEG 集沙仪: 风洞用多路集沙仪 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 714-720.
- [6] DONG Zhibao, SUN Hongyi, ZHAO Aiguo. WITSEG sampler: a segmented sand sampler for wind tunnel test [J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(6): 714-720.
- [7] MERZKIRCH W, GUI L, HILGERS S, et al. PIV in multiphase flow [C]// *Proceedings of the Second International Workshop on PIV'97*. Fukui, Japan: Fukui University. The Center for Cooperative Research in Science and Technology, 1997: 165-171.
- [8] 杨斌, 王元, 王大伟. 风沙两相流测量技术研究进展 [J]. *力学进展*, 2006, 36(4): 580-590.
- [9] YANG Bin, WANG Yuan, WANG Dawei. Development of wind-sand flow measurement technique [J]. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(4): 580-590.
- [10] HISHIDA K, SAKAKIBARA J. Combined planar laser-induced fluorescence-particle image velocimetry technique for velocity and temperature field [J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 29(7): 129-140.
- [11] KOOCHESFAHANI M, COHN R, MACKINNON C. Simultaneous whole-field measurements of velocity and concentration fields using a combination of MTV and LIF [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11(9): 1289-1300.
- [12] 倪晋仁, 李振山. 近床面区挟沙气流流速垂线分布特征 [J]. *泥沙研究*, 2001(3): 16-24.
- [13] NI Jinren, LI Zhenshan. Near-bed velocity profiles in blown-sand flow [J]. *Journal of Sediment Research*, 2001(3): 16-24.
- [14] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 27-30.

(编辑 王焕雪)