

应用粒子图像测试技术测量球床多孔介质单相流动的流场

贾宇鹏 王景甫 郑坤灿 张兵 潘刚 龚志军 武文斐

Measurement of single phase flow in porous media using PIV technique

Jia Yu-Peng Wang Jing-Fu Zheng Kun-Can Zhang Bing Pan Gang Gong Zhi-Jun Wu Wen-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 106701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.106701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.106701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用粒子图像测试技术测量球床多孔介质 单相流动的流场*

贾宇鹏¹⁾²⁾ 王景甫^{3)†} 郑坤灿^{1)2)‡} 张兵¹⁾ 潘刚¹⁾ 龚志军¹⁾ 武文斐¹⁾²⁾

1) (内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010)

2) (内蒙古科技大学, 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室: 省部共建国家重点实验室培养基地, 包头 014010)

3) (北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

(2015年10月8日收到; 2016年3月9日收到修改稿)

多孔介质在生产生活以及科技发展中的应用十分广泛, 随着能源、化工、冶金和原子能等领域技术的发展, 以及近代工农业生产技术的进步, 大量多孔介质的传热传质问题逐渐出现, 进一步促进了多孔介质学科的形成和发展, 使其成为当今科学技术中令人瞩目的研究热点之一. 通过实验获得准确的实验图像和数据, 并使用相应软件对实验所得数据和流体流动图像进行深度分析, 这样既有真实可靠的实际数据, 又有直观的理论的支持, 使对多孔介质的研究更为完善. 实验结合粒子图像测试技术和折射率匹配技术对叉排排列玻璃球多孔介质填充床内的流体流动转变过程进行流场测试, 并提取数据, 采用 Tecplot 软件对提取数据进行处理, 得出流体流动机理的转变过程. 实验固相为由直径 25 mm 水晶玻璃球叉排堆积而成的填充床, 液相为 65% 苯甲醇和 35% 无水乙醇配制的匹配液. 液相与固相的折射率都为 1.477, 成功消除由于折射率不匹配引起的激光光线偏折. 实验得到雷诺数为 $4.7 \leq Re \leq 1000$ 时球床内流场图, 对比不同雷诺数时流场和流线变化得出: 随着雷诺数的增加, 流线变得越来越紊乱; 当雷诺数在 220 以上时, 球床内漩涡在尺寸变化上出现突跃, 在位置和形态变化表现出随机特征, 预示进入了稳定的湍流.

关键词: 粒子图像测试技术, 折射率匹配, 流场测量, 多孔介质

PACS: 67.25.dk, 67.25.bf, 67.30.hb, 67.25.dj

DOI: 10.7498/aps.65.106701

1 引言

多孔介质涉及很多工业过程和自然过程, 例如传热、干燥、催化反应、燃烧和过滤系统等. 其中, 球形颗粒填充床是一种广泛应用的多孔介质, 被应用于球床反应堆、球床气冷堆和固化床等. 因此, 对球床多孔介质内部流动的研究有巨大的学术研究和应用价值.

对多孔介质内部流场的研究, 早期是由 Bear^[1] 和 Scheidegger^[2] 提出多孔介质内部流动的特征参

数及其关系式的. 之后, 很多学者在此基础上进行了大量实验研究. 目前, 已有很多国内外学者对多孔介质的流动特性进行研究, 比如 Yarlagaadda 和 Yoganathan^[3] 用激光多普勒风速仪 (LDA) 测试多孔介质模型内流体在不同设置角度的玻璃棒作用下的流态特性和动力学特征. Moroni 等^[4] 采用 3D-PTV 技术对多孔介质流动图像进行俘获来得到多孔介质内的流场分布规律, 并采用欧拉法和拉格朗日法来描述多孔介质内的流场分布, 为描述多孔介质内的流场提供了有效的方法. Hassan 和 Dominguez-Ontiveros^[5] 用粒子图像测试 (PIV) 技

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB720402)、国家自然科学基金 (批准号: 51166010)、内蒙古科技大学创新基金项目 (批准号: 2011NCL001)、内蒙古应用技术与开发资金计划 (批准号: 20130310) 和内蒙古高校创新团队研究计划 (批准号: NMGIRT1406) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jfwang@bjut.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhengkuncan@hotmail.com

术获得多孔介质内流动特征并分析不同孔隙尺寸的多孔介质对流态的影响, 实验表明, 随着孔隙尺寸的增加, 涡旋的数量和尺寸也随之增加, 并且在边界处涡旋更加明显.

非侵入性测速技术如PIV技术、粒子追踪测速法(PTV)、激光多普勒测速法(LDA)和核磁共振图像显示法(MRI)等常被用于测量其内部流场流态^[6], PIV与其他测量技术相比具有实时、动态、三维等优点, 在测量多孔介质内部流场方面有明显的优势.

在本文中, 通过实验获得实验图像和数据, 并使用相应软件对实验所得数据和流体流动图像进行深度分析, 这样既有真实可靠的实际数据, 又有直观的理论的支持, 使对多孔介质的研究更为完善.

2 测量技术原理

2.1 PIV技术

PIV是20世纪80年代发展起来的一种瞬态、多点、无接触^[7]的流体力学测速方法. 它突破了传统测试技术的局限, 能够在不干扰流场的情况下, 实现对流场瞬时和全局测试. 国外不少学者都曾采用PIV技术测量多孔介质内的流场^[8]. 现在, PIV技术已经成为一种成熟、直观、有效和精确的测试技术, 极大地促进了流体动力学及多孔介质学科的研究发展^[9-15].

PIV技术测量流场的原理比较简单, 预先在流体中放入示踪粒子, 以激光光源照射流场中的一个1—2 mm厚度的截面, 用CCD相机记录两次或多次曝光下示踪粒子位置, 再用图像分析技术得到各个示踪粒子的位移矢量, 由位移矢量除以曝光时间便可得到粒子的流速矢量, 以示踪粒子速度代表该位置处流体的速度, 最后得出流场矢量图. 然而,

由于多孔介质固相和液相的折射率不同以及固壁边界不规则等因素, 会引起激光光束的偏折, 因此, 必须采用相应折射率匹配措施消除这种干扰.

2.2 折射率匹配技术

应用PIV技术测量球床多孔介质的流场时, 因为试验段固相和液相的折射率不同, 会引起粒子成像位置误差、光通量减少、图像示踪剂数量减少等, 使试验结果产生较大误差. 因此, 必须采用折射率匹配技术使固相和液相的折射率相同, 使光线通过试验段不发生偏折, 保证实验的准确性. 折射率匹配技术的最大难点在于实验材料的选择. Wiederseiner等^[16]系统地阐述了各种折射率匹配材料以及折射率匹配技术的方法和应用. 选择合适的材料直接关系到实验的成功与否. 实验参照了水晶玻璃球透光性良好、折射率中等、成本低廉等优点, 决定采用水晶玻璃球颗粒作为固相. 而液相的选取应考虑诸多因素, 例如毒性、可燃性、稳定性和黏性等. Zhang等^[17]将苯甲醇和无水乙醇混合调配出与石英玻璃相同的折射率. 苯甲醇和无水乙醇混合液无毒、稳定、黏性小和成本合理. 因此, 本文选用苯甲醇和无水乙醇作为液相材料. 经测定苯甲醇与无水乙醇所占比例分别为65%和35%时, 混合液折射率才能与固相相同. 苯甲醇室温下折射率为1.540, 无水乙醇为1.362, 匹配液折射率计算可按照公式

$$n_0 = \frac{n_1 V_1 + n_2 V_2}{V_1 + V_2}, \quad (1)$$

式中, n 为混合液的折射率; n_1 为组分1的折射率; n_2 为组分2的折射率; V_1 为组分1的体积; V_2 为组分2的体积. 经计算得匹配液的折射率为1.477, 密度为 950 kg/m^3 , 黏度为 $3.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. 图1为折射率匹配的对比图.

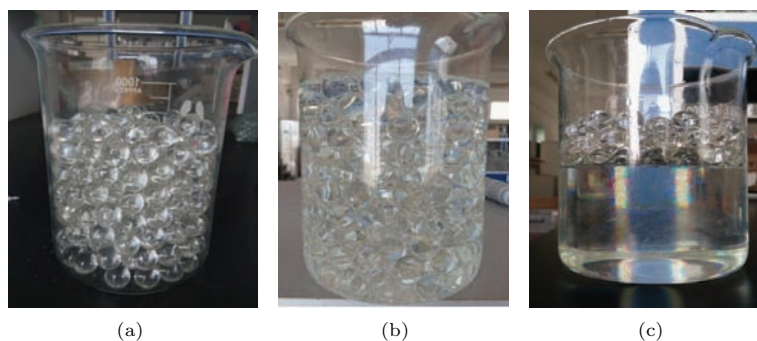


图1 不同流体多孔介质折射效果对比 (a) 空气; (b) 水; (c) 苯甲醇和乙醇

Fig. 1. The refraction effect of porous media with different fluid: (a) Air; (b) water; (c) benzene methanol and ethanol.

3 实 验

如图2所示, 实验台整体主要由回路循环系统和主试验段组成. 循环系统主要由水箱、泵、流量计和阀门等连接而成. 回路系统分为大回路和小回路, 大回路经过泵、流量计、水箱、试验段和泵形成循环; 小回路是从泵的出口到泵的入口连接的小循环. 试验段由外径110 mm, 内径100 mm, 高250 mm的石英玻璃管和法兰组成. 石英玻璃管内部填充直径25 mm的水晶玻璃球. PIV对实验材料光学透明度要求高. 水晶玻璃球透光度好

而且折射率较低, 价格适中. 另外, 球形颗粒孔隙分布均匀, 便于研究, 玻璃球不宜过小, 玻璃球越小, 引起光线偏折越明显, 实验误差会随之增加. 所以石英玻璃管内部填充物选择直径25 mm的水晶玻璃球(如图3). 主试验段上下法兰装有压力计, 用于测量试验段的压力变化. 此外, 为了避免进口效应和出口效应, 石英玻璃管上下分别装有缓流网. 试验时, PIV仪器发射激光照亮试验段的中心截面, CCD相机在与截面垂直的位置拍摄140 mm × 120 mm的区域. 为了保证拍摄的流场足够准确, 需要实验装置运行5 min以上, 待流动稳定后再获取数据.

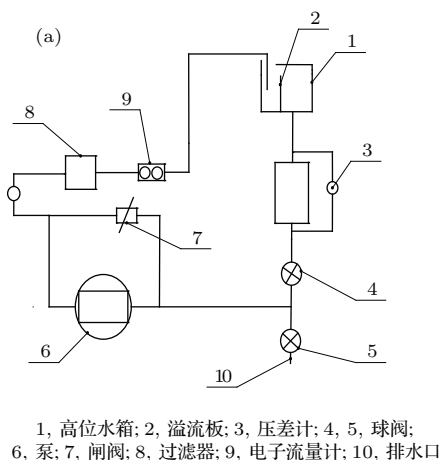


图2 实验系统和实物图 (a) 实验系统; (b) 实验台实拍

Fig. 2. The experimental system and its practical photo: (a) The experiment system; (b) the photo of the experiment system.



图3 主试验段实拍

Fig. 3. The main test section.

本次实验采用美国TSI公司生产的PIV系统, 激光器为美国Net Wave公司生产的Solo系列Nd:YAG激光器; CCD相机为Power View自相关/互相关摄像机. 实验泵为自吸式不锈钢泵, 额定流量

为3 m³/h, 流量计为HPLWGY-DN15防爆型电子涡轮流量计, 计量范围为0.06—6 m³/h. 此外, 本次实验所采用示踪粒子为15 μm 镀银空心玻璃微球, 该示踪剂密度适中, 反光性良好. 实验时通过调节实验段的流速来改变雷诺数, 实验雷诺数范围为100 < Re < 1000, 雷诺数计算方法为

$$Re = \frac{U_p d_p \rho}{\mu}, \quad (2)$$

其中, U_p 为多孔介质内部流速; d_p 为多孔介质内部孔隙当量直径; ρ 为流体密度; μ 为流体的动力学黏度; 实验段的孔隙率为0.5923.

4 实验过程及结果

图像采集分析软件为Insight-5S软件, 该软件对CCD相机采集到的图像进行处理, 能够实时显

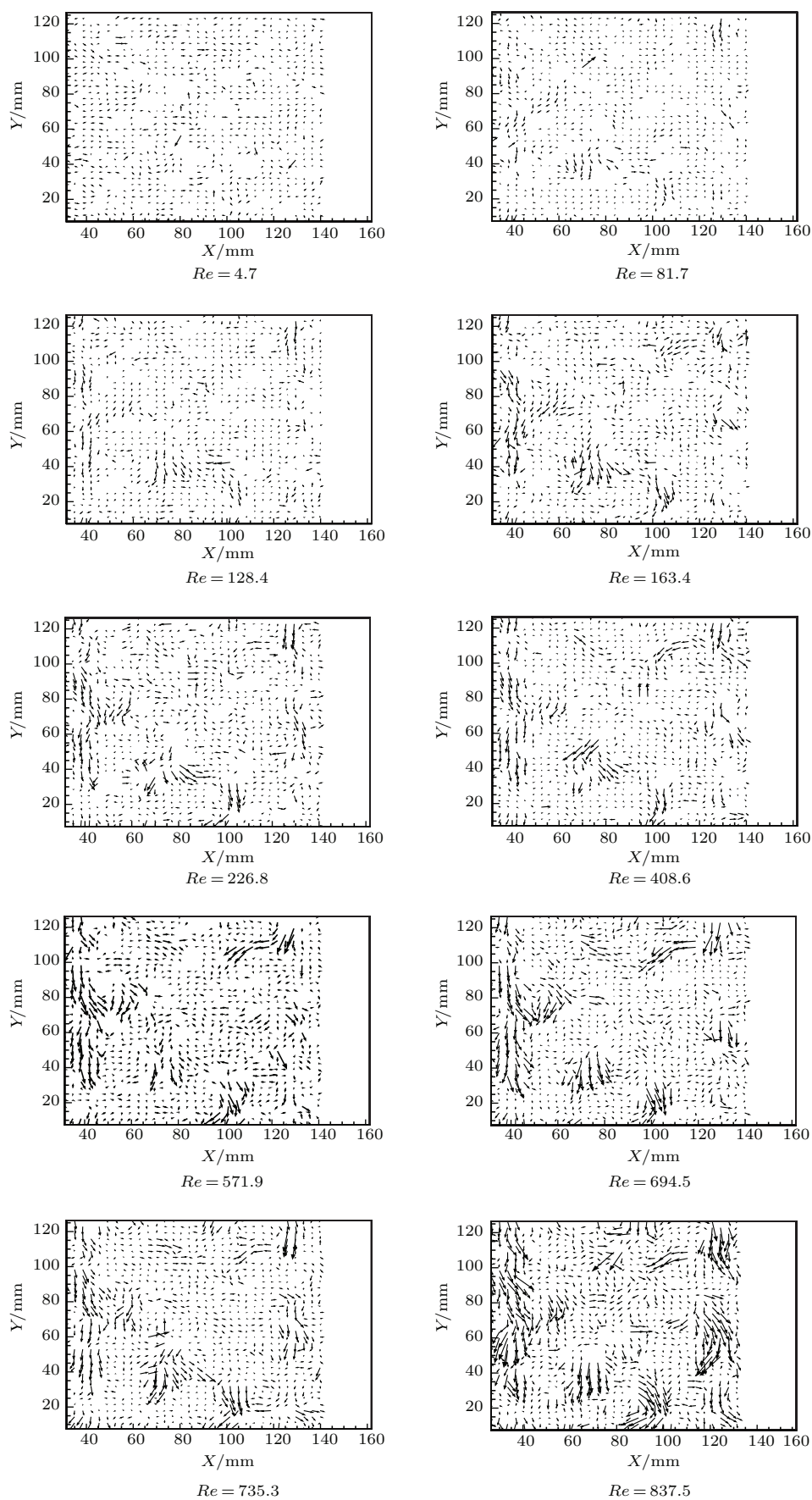


图4 不同 Re 下的流场矢量图

Fig. 4. Different Reynolds numbers of the flow field.

示流动矢量场。后期处理则主要采用 Tecplot 流场分析绘图软件。实验在 4.7—1000 的雷诺数范围内由大到小选择 25 个区间雷诺数值, 每一个区间雷诺数检测一次, 每次拍摄 20 帧, 再从 20 帧中选取最合适的作为代表。(因篇幅限制, 只选取部分雷诺数的流场图像为代表。)

对比不同雷诺数时的流场数据(如图 4)得出, 在低雷诺数时, 矢量方向在孔隙中心处沿主流方向, 而在孔隙边缘处则沿多孔介质边界层形状改变; 在高雷诺数($Re > 220$)时, 随着雷诺数的增加, 矢量方向的规律性逐渐被打破。

在低雷诺数下, 流体流动因为黏性力起主导作用, 流体在黏性力的束缚下处于层流状态; 而随着雷诺数的增加, 惯性力逐渐超过黏性力, 流体在惯

性力的作用下脱离黏性力的束缚, 使流动矢量方向逐渐变得无规律, 流体流态也逐渐由层流过渡到湍流, 流态发生变化。

对球床多孔介质内部单相流动流线(如图 5)进行分析研究得出: 当 $Re \leq 130$ 时, 球床多孔介质内部处于层流且流线之间互不影响, 流线方向随孔隙形状和边壁形状发生变化; 当雷诺数处于 $130 < Re < 220$ 时, 多孔介质内流线开始互相干扰, 流线在某些点处开始密集, 并逐渐发展成为小漩涡; 当 $Re > 220$ 时, 流线密集点或者小漩涡处进一步发展成稳定的大漩涡, 且漩涡数量基本稳定, 所以, 以成熟的漩涡状流动作为进入湍流的标志是比较客观的。

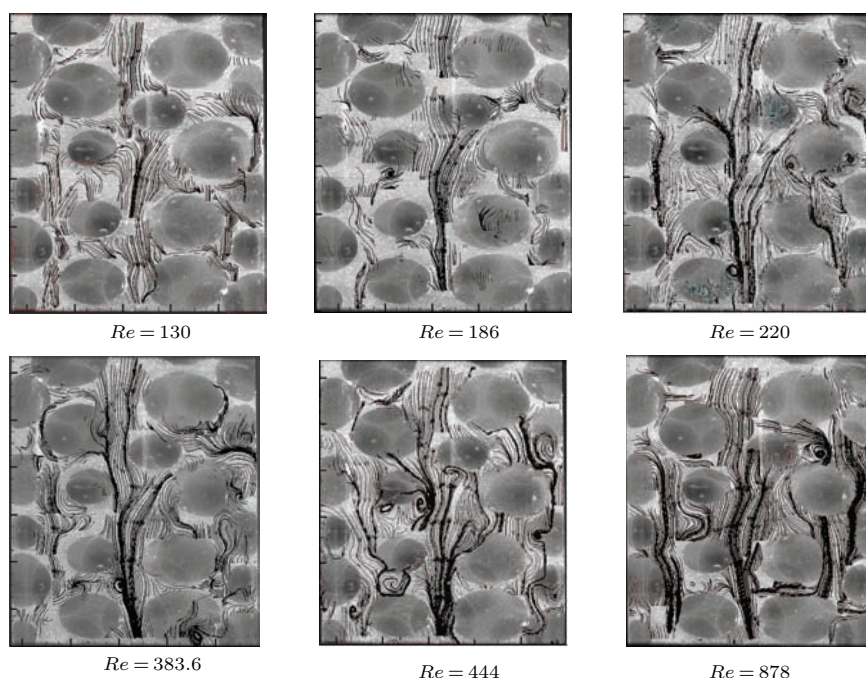


图 5 不同 Re 下的流场流线图

Fig. 5. Different Reynolds numbers of streamlines.

从漩涡数量方面分析, 当雷诺数在 130 左右的时候, 流场内形成微小的涡点旋转流动; 当 $130 < Re < 220$ 时, 随着雷诺数的增加, 漩涡尺寸逐渐增大, 数量也逐渐增加; 当雷诺数 $Re > 220$ 时, 漩涡数量不再随着雷诺数的增加而增加, 尺寸也基本稳定。因此可以推测, 当雷诺数 $130 < Re < 220$ 时, 漩涡状流动仍处于成长阶段; 当雷诺数 $Re > 220$ 后, 漩涡在尺寸上开始有了大的增长并趋于稳定, 但在位置和形态上随不同雷诺数表现出随机性, 这正是湍流的基本特征。另外, 漩涡的位置多出现在孔隙边缘处。这一现象与边界

层分离有关, 随着雷诺数的增加, 当边界层外沿流动方向的压力增加的足够快时, 与流动方向相反的压差作用力和黏性阻力使边界层内流体动量减少, 从发生边界层分离, 形成回流区或漩涡。

5 结 论

本文选用由直径 25 mm 的水晶玻璃球随机堆积而成多孔介质填充床, 孔隙率为 0.45, 迂曲度为 1.33。并应用折射率匹配技术(选用 65% 苯甲醇和 35% 无水乙醇调制出与多孔介质固相折射率相同,

密度为0.95 g/mL, 折射率为1.477的混合液). 实验发现在低雷诺数 ($Re < 130$) 时, 流动主要受黏性力的影响, 比较有规律性, 在孔隙中心处, 速度沿从上到下的主流方向; 而在孔隙边缘处, 矢量方向沿多孔介质内的空隙形状发生改变, 这是由于流动边界层引起. 在高雷诺数时 ($Re > 220$), 在惯性力的影响占主导作用, 流体内部流动开始紊乱, 矢量方向变得无规则. 从流线分布看, 当雷诺数 $Re < 130$ 时, 流线随孔隙结构平稳分布, 流线之间互不影响; 当雷诺数 $130 < Re < 220$ 时, 流线在某些点处开始密集并逐渐发展成小漩涡; 当雷诺数 $Re > 220$ 时, 漩涡尺寸上发生了大的变化并趋于稳定, 但位置和形态随雷诺数随机变化, 推断流体进入了湍流. 根据流线特征和漩涡流动特征, 推测 $Re = 220$ 是该多孔介质内流体从层流到湍流转变的临界点.

参考文献

- [1] Bear J (translated by Li J S, Chen C X) 1983 *Dynamics of Fluids in Porous Media* (Beijing: China Building Industry Press) p789 (in Chinese) [比尔·J·著 (李竞生, 陈崇希 译) 1983 多孔介质流体动力学 (北京: 中国建筑工业出版社) 第 789 页]
- [2] Scheidegger A E 1974 *Soil Sci.* **46** 259
- [3] Yarlagadda A P, Yoganathan A P 2010 *Experiments in Fluids* **8** 59
- [4] Moroni M, Cushman J H, Cenedese A 2009 *Transp. Porous Med.* **79** 43
- [5] Hassan Y A, Dominguez-Ontiveros E E 2008 *Nuclear Engineering and Design* **238** 3080
- [6] Patil V A, Liberty J A 2012 *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting(FEDSM)* Rio Grande, Puerto Rico, July 8–12, 2012 p1001
- [7] Patil V A, Liberty J A 2012 *Exp. Fluids* **53** 1453
- [8] Sen D, Nobes D S, Mitra S K 2012 *Microfluid. Nanofluid.* **12** 189
- [9] Iida T, Taneo A, Kaneda M and Suga K 2014 *XXI Fluid Mechanics Conference: Journal of Physics Conference Series* **530** 012058
- [10] Yip R, James D F, Currie I G 2011 *Exp. Fluids* **51** 801
- [11] Keramaris E, Pechlivanidis G 2013 *J. Porous Media* **16** 21
- [12] Häfeli R, Altheimer M, Butscher D, von Rohr P R 2014 *Exp. Fluids* **55** 17
- [13] Arthur J K, Ruth D W, Tachie M F 2013 *Transport Porous Med.* **97** 5
- [14] Cai J C, Yu B M 2012 *Progress in Mechanics* **42** 735 (in Chinese) [蔡建超, 郁伯铭 2012 力学进展 **42** 735]
- [15] Xu L F, Chen G, Li J Z 2003 *J. Mech.* **33** 533 (in Chinese) [徐联锋, 陈刚, 李建中 2003 力学进展 **33** 533]
- [16] Wiederseiner S, Andreini N, Epely-Chauvin G 2011 *Exp. Fluids* **50** 1183
- [17] Zhang C J, Zhang M Y, Lu Y 2002 *Journal of Xi'an Jiao Tong University* **36** 1125 (in Chinese) [张超杰, 张鸣远, 卢勇 2002 西安交通大学学报 **36** 1125]

Measurement of single phase flow in porous media using PIV technique*

Jia Yu-Peng¹⁾²⁾ Wang Jing-Fu^{3)†} Zheng Kun-Can^{1)2)‡} Zhang Bing¹⁾
Pan Gang¹⁾ Gong Zhi-Jun¹⁾ Wu Wen-Fei¹⁾²⁾

1) (Institute of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

2) (Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Bayan Obo Multi-Metallic Resources: Elected State Key Laboratory, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

3) (College of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 8 October 2015; revised manuscript received 9 March 2016)

Abstract

Porous media are widely used in the production and living, and also in science and technology. With the development of energy, chemical industry, metallurgy, atomic energy and also with the progress of the modern industrial and agricultural production technology, a large number of heat and mass transfer problems in porous media gradually appear. Further promoting the development of the discipline about the formation and development of porous media becomes one of hot research points in the modern science and technology. It is expected that the accurate experimental picture and data can be obtained through the experiment, and the fluid flow picture and experimental data are analyzed in depth by using the corresponding software, so that the reliable data are obtained and the theory is supported intuitively, making the research of porous media more perfect. The experiment combined with particle image velocimetry technology and refractive index matching technique is conducted to test the transformation process of liquid flow in a random ball porous medium filled bed, and to extract the data. The extracted data are processed by using Tecplot software, and the transformation process of liquid flow mechanism is obtained. Experimental solid phase is a 25 mm-diameter crystal glass ball stacked bed, and liquid phase is the matching liquid prepared with the mixture of the 65% benzyl alcohol and 35% anhydrous ethanol. The refractive indexes of liquid phase and solid phase are both 1.477, which can successfully eliminate the laser light bending caused by the mismatching of refractive indexes. The flow field diagram in the pebble bed with Reynolds number Re in a range $4.7 \leq Re \leq 1000$ is obtained experimentally. The comparisons of variations of flow field and flow lines among the different Reynolds numbers reveal that with the increase of Reynolds number, flow lines become more and more disorder: When the Reynolds number Re exceeds 220, stable swirl flow inside the bed changes suddenly, and manifests a random feature in location and configuration, which forebodes its entrance into stable turbulence phase.

Keywords: particle image velocimetry, the refractive index matching, flow field measurement, porous media

PACS: 67.25.dk, 67.25.bf, 67.30.hb, 67.25.dj

DOI: 10.7498/aps.65.106701

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB720402), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51166010), the Innovation Project of Inner Mongolia University of Science and Technology, China (Grant No. 2011NCL001), the Application Technology Research and Development Funds Plan in Inner Mongolia, China (Grant No. 20130310), and the Inner Mongolia University Innovation Team Research Plan, China (Grant No. NMGIRT1406).

† Corresponding author. E-mail: jfwang@bjut.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhengkuncan@hotmail.com