

文章编号：0258-0926(2015)03-0142-03; doi:10.13832/j.jnpe.2015.03.0142

3×3 棒束间湍流流动的 3D 激光多普勒方法 实验研究

俞 洋, 熊进标, 程 旭

上海交通大学核科学与工程学院, 上海, 200240

摘要：子通道或者子通道间的流动搅混显著影响热传递性能。采用 5 光束 3D 激光多普勒测速 (LDV) 系统对 3×3 棒束间的流动速度进行测量。棒束组件带有简单的定位格架, 格架中没有安装搅混装置。棒束的直径与棒间距根据真实燃料组件确定。测量区域选择在近出口段的位置, 此位置距离定位格架较远, 流动已是充分发展。测量窗口选择在侧边。采用 2D LDV 测量了 1/4 的子通道截面, 试验记录了测试区域中的主流速度和湍流强度。

关键词：激光多普勒测速 (LDV); 3×3 棒束; 流动测量; 湍流强度

中图分类号: TL334;O359.1 **文献标志码:**A

3D Laser Doppler Measurement on Turbulent Flows in a 3×3 Rod Bundle

Yu Yang, Xiong Jinbiao, Cheng Xu

School of Nuclear Science and Engineering of Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China

Abstract : Turbulent flows in a rod bundle are important field for the nuclear reactor fuel assembly since the flow mixing in a sub-channel or between sub-channels can significantly modify the heat transfer performance. A five beam three dimension Laser Doppler Velocimetry (LDV) system is applied to measure the flow velocities in a 3×3 rod bundle installed with the simple grid spacers and without mixing vanes. The rod diameter and spacing between rods are set according to the typical fuel assembly. The area to be measured is near the outlet of the bundle, and it is far from the space grid, so it can be treated as the developed flow condition. 2D LDV is used to measure one quart of the flow cross-section, and the main velocity and main turbulence intensity have been recorded.

Key words: Laser doppler velocimetry (LDV), 3×3 Rod bundle, Flow measurement, Turbulent intensity

0 前 言

压水堆堆芯流动冷却剂的流动情况研究对降低临界热流密度具有重要作用。在燃料组件的设计安装及堆芯安全性改进中需要了解子通道中湍流流动特性。一些学者^[1]用计算流体动力学 (CFD) 方法研究评价了带定位格架燃料棒组件

中的湍流流动模型。一些学者^[2]通过实验方法研究了空气流过棒束情况下的速度分布和湍流强度; 这些实验让我们对棒束间的湍流流动有了很重要的认识。S K Chang^[3]通过 2D 激光多普勒 (LDV) 方法测量与真实燃料组件尺寸相当的 5×5 棒束间的子通道轴向与横向速度分布、湍流

收稿日期: 2014-10-13; 修回日期: 2015-03-18

作者简介: 俞 洋 (1988—), 男, 硕士研究生, 现在从事反应堆热工水力研究工作

强度分布，研究定位格架对子通道的搅浑情况。O. Dominguez^[4]用颗粒图像速度(PIV)测量方式，获得了棒束间子通道流场的分布。Hosokawa^[5]用 PIV 测量方法测量了棒束间子通道的轴向速度分布。

本研究采用 2D LDV 方法从侧面测量棒束间子通道轴向速度分布及湍流强度分布情况。本次试验所记录的数据可以用来与流模型数值模拟法计算出的结果进行对比分析。

1 试验装置与实验方法

1.1 实验装置

实验装置(图 1)由循环泵、电加热器、开式水箱、水罐、冷却水回路以及试验段等部分组成。回路蓄水箱有开式和闭式两种；此实验工况选用开式回路，水箱表面是常压。实验工况温度设定为常温(通常试验段出口温度为 20~35)试验段流量通过旁排流量阀控制。水通过泵后流入试验段(部分从旁排流过)，从试验段流出的水排进开式回路水箱。

试验段(图 2)为 3×3 棒束，从入口至出口分别安装有整流器、定位格架和出口固定支架。整流器使得通过定位格架前流动是充分发展的。定位格架中不设置有方向导流板。测量位置选择在靠近出口附近，被测量区域与定位格架之间的

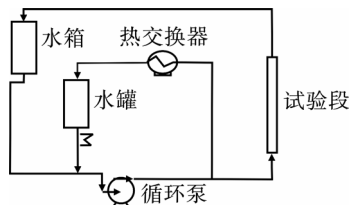


图 1 实验装置

Fig. 1 Experiment Facility

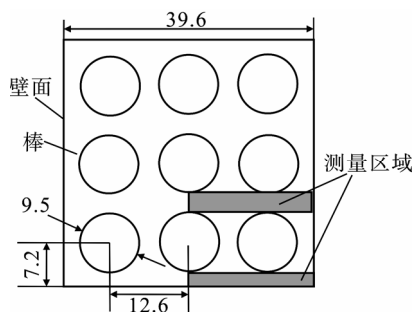


图 2 棒束组件示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Bundle Assembly

长度足以使流动达到充分发展，定位格架的影响可以忽略。棒束组件水力直径为 8.71 mm。

1.2 测试仪器

本次测试采用 Dantec 公司生产的 5 光束 3D LDV 装置，由于测量死角的原因，采用 3 光束 2D 方式进行测量。测量方式是逐点测量，测量点坐标的移动通过与 LDV 仪器配套的 3D 移动坐标架来实现；移动的精度可以达到 0.01 mm。

1.3 测量方法

因测量体的尺寸原因，在靠近壁面的区域测量不准确，所以实验时不测量此区域的速度场。考虑到在近棒束壁面中间区域散射光信号比较弱，测量区域没有选择紧贴棒束。测量区域离壁面和棒束壁面都有 0.3 mm 的间隙。在空气中，测量体的长轴与短轴长度分别是 0.82、0.05 mm。在水中，由于水的折射率的原因，测量体的长轴与短轴的尺寸为 1.46、0.066 mm。

测量时对每个测量点采集 2×10^4 个数据，如果采集数据不足则以 70 s 为最大时间。这样选择既保证了采集数据的统计性要求，又能不至于在一些点上花费太多的时间。

LDV 测量系统的误差分为随机性误差和系统误差。本次实验中，系统误差的来源有：确定转换矩阵时的对光误差，此误差直接影响速度分量按某个关系的投影，但在轴向速度的测量中此误差的作用较小，其对横向速度的测量影响较大；由于仪器本身的分辨率造成的误差，最后是其自身的测量不确定性。

在实验前，对此仪器进行了矩形通道验证实验。LDV 测量主流速度与侧向流动速度过程中总的误差大小在 4%~5% 之间。

2 结果与分析

在距离定位格架下游超过 10 倍通道边长的地方选择测量区域。这个区域一般可以认为流动已经充分发展，定位格架对其的影响相对较小。此次测量主要获取主流速度的速度分布和主流的湍流强度。测量时沿着横向与纵向的步长分别为 0.41、0.2 mm。

测量结果表明，同一高度上，在棒束之间区域速度相对偏大，靠近棒束位置速度偏小。并且峰值速度出现的区域在两棒束间的中心子通道。对比不同高度速度发现，越靠近壁面，峰值

出现的位置也越靠近中心子通道的中心。此测量区域中同一高度的速度分布趋势与近壁面测量通道相似；4个棒束都对中心子通道产生影响，其峰值速度所处的位置与中心子通道的位置基本重合。近上壁面与近下壁面高度处速度差异是由于下边界距离棒束的距离比上边界距离棒束的距离大的缘故。

根据测量区域中主流速度湍流强度强弱结果可以看出，湍流强度较大处发生在两棒束之间的通道中，尤其靠近棒束壁面的时候。从下测量区域也可以发现，近壁面处湍流强度较大。

3 结论

本文用2D LDV方法对 3×3 棒束流道进行了子通道流场的测量，研究 3×3 棒束中经过充分发展的湍流流场中速度与湍流强度的强弱分布。得到以下结论：

(1) 在角通道、边通道以及中心子通道中，中心子通道的主流速度最大，越靠近棒束壁面和通道壁面速度越小。在边界层上中速度变化梯度较大。

(2) 主流湍流强度较大处发生在近棒束壁面、通道壁面处，在两棒束之间的通道区域，湍流强度明显比其他区域偏大。

(3) 此次实验是在雷诺数 2×10^4 量级左右进行的，接下来将进行其他工况下的速度分布和湍流强度分布研究，以此对比同一点处不同雷诺数下的湍流情况。

参考文献：

- [1] Liu C, Ferng Y, Shih C. CFD evaluation of turbulence models for flow simulation of the fuel rod bundle with a spacer assembly[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 40: 389-396.
- [2] Rehme K. The structure of turbulent flow through rod bundles[J]. Nuclear Engineering and Design, 1987, 99: 141-154.
- [3] Chang S K, Moon S K, Baek W P, et al. Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices[J]. Nuclear engineering and design, 2008, 238 :600-609.
- [4] Dominguez O. Experimental benchmark data for PWR rod bundle with spacer-grids[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 259: 345-367
- [5] Hosokawa S. Measurements of turbulent flows in a 2×2 rod bundle[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 249: 213.

(责任编辑：王中强)