

棒束燃料组件横流的远心PIV测量方法

吴增辉 职 政 曲文海 陈仕龙 熊进标

(上海交通大学 核科学与工程学院 上海 200240)

摘要 压水堆棒束燃料组件通常在定位格架上设有搅混翼片,以促进横向搅混。因而,定位格架下游的横流是评判格架性能的重要依据。针对定位格架下游横流可视化测量的挑战,为粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)系统设计了远心光路,有效地降低了图像的畸变。此外,针对粒子图像测速对光强均匀度的要求,在测量区域采用了氟化乙烯丙烯共聚物(Fluorinated Ethylene Propylene, FEP)管作为实验工质水的折射率补偿材料,消除了由于固体材料折射率过大导致的类似凸透镜的聚光效果。通过标定实验及流场测量实验证明,该测量方法能够获取5×5棒束格架下游完整截面的横向流速及漩涡结构。实验观测发现:在 $5D_h$ 位置翼片搅混导致的横向流场依然很强烈,其强度会随着距离的增加而逐渐减弱。

关键词 粒子图像测速法, 远心光路, 折射率补偿, 定位格架, 横向流动

中图分类号 TL99, TL332

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080603

Telecentric PIV measurement of lateral flow in rod-bundle fuel assembly

WU Zenghui ZHI Zheng QU Wenhai CHEN Shilong XIONG Jinbiao

(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract [Background] Mixing vanes are set on the spacer grids of bundle fuel assembly to promote the lateral mixing of pressurized water reactors (PWRs). Hence, the lateral flow downstream of the spacer grids is an important element to measure its thermal-hydraulic performance. [Purpose] The study aims to tackle the challenge of measuring lateral flow using visualization method. [Methods] A telecentric optical system was employed in the particle image velocimetry (PIV) measurement to efficiently reduce the distortion of the image. In addition, the fluorinated ethylene propylene (FEP) tube was utilized as the matched-refractive-index material of the work fluid in the measurement area to minimize the focusing effect after the transparent rods and realize the uniform illumination of the whole section of the rod bundle. Calibration and lateral flow measurement were conducted to evaluate its performance. [Results] Experimental results show that the lateral flow and vortices can be well obtained on the whole cross section of the 5×5 rod bundle by PIV telecentric measurement. [Conclusions] The measured flow fields indicates that the dominant effect of the mixing vanes on the lateral flow $5D_h$ downstream and its effect decays further downstream.

Key words Particle image velocimetry, Telecentric optical system, Matched index of refraction, Spacer grid, Lateral flow

国家自然科学基金(No.51676120)资助

第一作者: 吴增辉, 男, 1993年出生, 2017年毕业于上海交通大学, 现为硕士研究生, 主要从事反应堆热工水力研究

通信作者: 熊进标, E-mail: xiongjinbiao@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2018-05-29, 修回日期: 2019-02-28

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51676120)

First author: WU Zenghui, male, born in 1993, graduated from Shanghai Jiao Tong University in 2017, master student, focusing on study of reactor thermo-hydraulic

Corresponding author: XIONG Jinbiao, E-mail: xiongjinbiao@sjtu.edu.cn

Received date: 2018-05-29, revised date: 2019-02-28

压水堆棒束型燃料组件高度方向上安装有若干定位格架。定位格架上有搅混翼片以促进棒束间的横向交混,增强换热效率,因此,定位格架下游横向流场分布是核反应堆流动传热研究的关键问题。由于数值模拟无法准确预测流场分布^[1-2],必须采用实验方法测量定位格架下游流场。目前常用于棒束流场的测量方法主要包括激光多普勒测速(Laser Doppler Velocimetry, LDV)和粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV)。由于棒束几何结构的限制,LDV难以测量得到全流场信息^[3-4],且LDV为单点测量,实验周期较长。PIV测量周期短,且可实时记录流场瞬时速度。McClusky等^[5]使用PIV测量得到典型子通道内横向流场信息,但由于实验中使用了探入式的内窥镜,影响了通道内流场分布,且内窥镜本身具有较大视角误差^[6],故结果存在较大误差。周梦君等^[7]使用PIV研究2×2棒束定位格架下游横向流场随搅混叶片弯折角的变化,仍未消除CCD相机的视角效应。Hille等^[8]在PIV中引入远心镜头,有效地降低了CCD相机的视角效应,测得三种类型定位格架下游不同轴向位置处横向全流场分布,但使用的棒束为有机玻璃材质,与水的折射率差异较大,导致激光在测量截面上分布不均匀,造成较大的不规则图像噪声,故测量结果存在较大误差。

选用与工质折射率相近的透明材料制造棒束,可有效消除PIV流场测量中折射率差异效应造成的不规则图像噪声。因此,本实验采用氟化乙烯丙烯共聚物(Fluorinated Ethylene Propylene, FEP)管^[9]作为与水进行折射率补偿的材料,引入远心镜头,定量评估了视角效应的改善程度,实现了远心PIV测量定位格架下游 $5D_h$ 和 $10D_h$ 处横向全流场。

1 实验装置

5×5棒束实验装置如图1所示,装置水平放置。实验中,水箱中的实验工质(含示踪粒子的去离子水)经主泵输出,流经压力表和流量计进入实验段后,返回水箱。实验段由有机玻璃通道和FEP管状棒束组成,FEP材料的折射率为1.338(25℃),水的折射率为1.333(25℃),两者折射率匹配效果较好。实验使用的单棒直径为9.5 mm,棒束间距为12.6 mm,子通道水力直径(D_h)为11.78 mm。FEP管长300 mm,可覆盖定位格架搅混翼片顶端下游0~ $25D_h$ 测量范围,管的两端通过不锈钢短棒与上下游支撑板固定连接。

Dantec-PIV系统包含激光器、电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机、

DynamicStudio软件平台和高精度同步器等。激光器为Nd:YAG双脉冲激光器,脉冲能量为135 mJ,重复频率范围为1~15 Hz。FlowSense EO 4M-32型CCD相机,分辨率为2 072×2 072像素,单像素尺寸(d_t)为7.4 μm ,最高全幅单帧频率为32 Hz, Tokina AT-X M100 PRO D型的相机镜头焦距(f)为100 mm。DynamicStudio软件平台可长时间连续采集图像,且含强大的图像处理库。高精度同步器可保证计算机、CCD相机和激光器高精度(7×10^{-21} s)同步工作。实验采用Dantec Rhodamine B荧光示踪粒子,粒子的平均直径10 μm ,密度为1.5 g·mL⁻¹,激发波长为530 nm,荧光波长为607 nm。为降低相机镜头的视角效应,在实验段和相机之间安装AR127L型远心镜头,镜头直径为127 mm,焦距为1 200 mm,远心度小于0.1°,理论畸变系数小于1%。

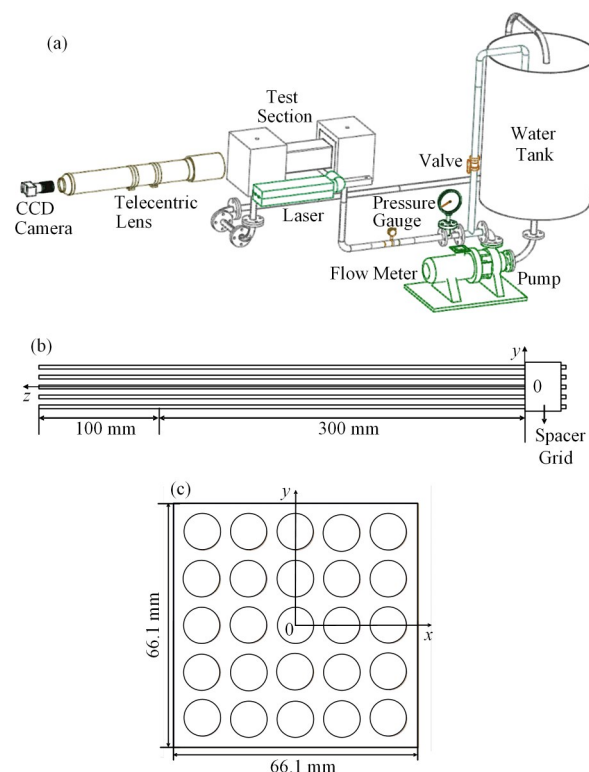


图1 实验装置示意图

(a) 实验装置, (b) 棒束侧视图, (c) 实验段正视图

Fig.1 Schematic of experiment apparatus

(a) Experiment facility, (b) Side view of rod bundle, (c) Front view of test section

2 远心光路的标定

远心镜头具有高分辨率、低畸变性和特殊平行光路设计等特性,可分为物方远心镜头(消除物方由

于调焦不准引入的误差)、像方远心镜头(消除像方由于调焦不准引入的误差)和两侧远心镜头,两侧远心镜头具有双重作用。实验中,将CCD相机和远心镜头水平同轴放置,组成两侧远心光路。可有效消除物像两方调焦不准引入的测量误差,保证在一定物距范围内,相机稳定清晰成像,且其特有的平行光路可有效地消除相机的视角效应,维持图像放大倍数恒定。图2为普通光路与远心光路的成像对比,物体 AB (A_1B_1)移动时,普通光路成像 $A'B'$ ($A_1'B_1'$)尺寸随之改变,而远心光路成像 $A''B''$ ($A_1''B_1''$)尺寸始终保持不变。

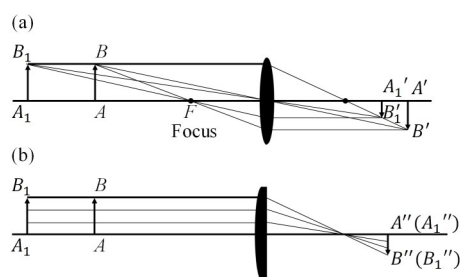


图2 普通镜头与远心镜头对比 (a) 普通镜头, (b) 远心镜头
Fig.2 Comparison between ordinary lens and telecentric lens
(a) Ordinary lens, (b) Telecentric lens

使用高精度(加工精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$)的 9×9 点阵标定板标定光路系统,标定板如图3所示,两点间距为 6 mm 。标定位置分别为搅混翼片顶端下游 $3D_h$ 、 $5D_h$ 、 $10D_h$ 、 $15D_h$ 、 $20D_h$ 处,使用线性转换模型^[10]对远心光路系统和无远心镜头光路进行分析。

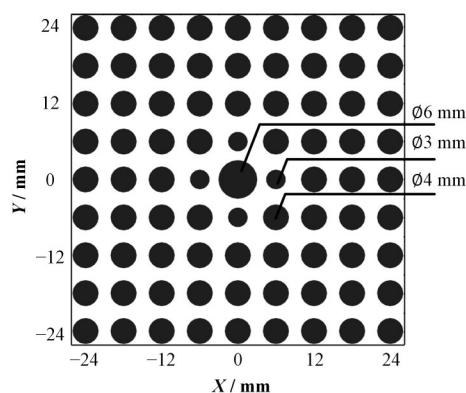


图3 标定板
Fig.3 Calibration target

标定结果主要由图像放大倍数(M)和再投影误差(σ)组成。如图4所示,无远心镜头时,放大系数与物距呈线性关系,符合高斯成像原理。而远心光路的放大系数在测量范围内($3D_h\sim 20D_h$)基本保持不变,放大系数平均值为 0.084 ,方差为 $0.000\ 23$ 。

再投影误差表征某标定点成像到相机底片上的像素偏移距离,误差值越小,匹配越精确,镜头畸变

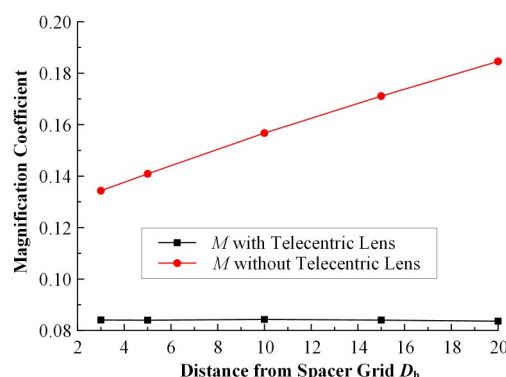


图4 不同横截面放大系数
Fig.4 Magnification ratio at different cross sections

和图像失真程度越低。

$$\sigma = \sqrt{(M_x x_i - X_i)^2 + (M_y y_i - Y_i)^2} / d_r \quad (1)$$

式中: (x_i, y_i) 为标定点在标定板上坐标, mm ; (X_i, Y_i) 为标定点在图像上坐标, mm 。

由式(1)计算得到 $5D_h$ 位置处 $X=0$ 上再投影误差分布如图5所示。由于相机视角效应,无远心镜头时,再投影误差分布呈凹型,所以拍摄图像存在明显径向畸变。而远心光路的再投影误差分布均匀,平均值为 0.12 像素,明显小于相机底片的空间分辨能力(1像素),有效地消除了相机镜头视角效应。

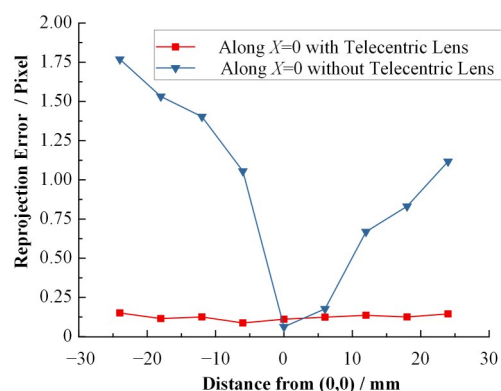


图5 $X=0$ 再投影误差分布
Fig.5 Reprojection error distribution along $X=0$

3 实验结果

为降低原始图像中环境噪声,实验在暗室中进行,测量 $5D_h$ 和 $10D_h$ 位置处横向流场。压力为 0.20 MPa 、温度为 $(25.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、流量为 $(14.10 \pm 0.05)\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、轴向平均速度为 $1.50\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、雷诺数为 $19\ 400$ 。

3.1 不确定性分析

提取 $5D_h$ 截面上点(12.6 mm , 6.3 mm)处瞬时速

度信息,统计分布如图6所示,拟合后整体趋于正态分布。

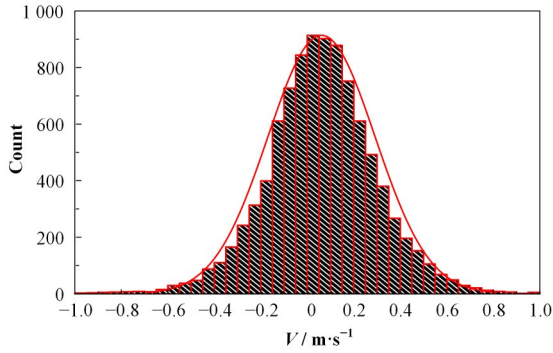


图6 瞬时速度分布

Fig.6 Instantaneous distribution of velocity

平均速度测量结果的不确定性主要由采样数量和视角误差决定。满足正态分布的数据,有限的采样数量引入的标准不确定性^[11]为:

$$\varepsilon_{U,N} = \frac{u'_{\text{rms}}}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

$$\text{其中: } u'_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - U)^2}{N}} \quad (3)$$

$$U = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} \quad (4)$$

式中: u'_{rms} 为波动速度; u_i 为测量得到的第*i*个瞬时速度样本; U 为*N*个瞬时速度的算术平均值。

结果处理时,使用*N*=10 000的采样数量进行计算,得到最大波动速度为0.20 m·s⁻¹,故采样数量引起的横流平均速度最大标准不确定性为2.0 mm·s⁻¹。

定义平均速度的相对不确定性:

$$\varepsilon_{\varphi}^N = \frac{\varphi^N - \varphi^{10000}}{\varphi^{10000}} \quad (5)$$

式中: φ^N 为采样数量为*N*时的平均速度。

以点5*D_h*截面上(12.6 mm, 6.3 mm)为例,平均速度的相对不确定性随采样数量的变化如图7所示,相对不确定性随采样数量的增加趋近于0。与式(2)一致。

视角误差由光学系统的视角效应引起,横流平均速度视角误差^[12]可定义为:

$$\varepsilon_{\text{pers}} = W \tan \theta \quad (6)$$

式中: W 为主流平均速度; θ 为光学系统的视角。

由图4可知,使用远心镜头时,放大倍数*M*为0.084,标定板上标定点距离中心标定点最远距离为34 mm,主流平均速度为1.50 m·s⁻¹。所以,对应无远心镜头时最大视角误差为:

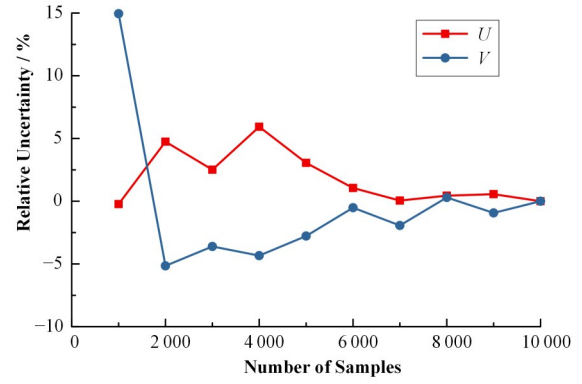


图7 平均速度的相对不确定性与采样数量的关系

Fig.7 Relative uncertainty of measured mean velocity versus the sample number

$$\varepsilon_{\text{pers}} = W \tan(\theta_{\text{max}}) = W \cdot \frac{x_{\text{max}}}{f(1 + 1/M)} \quad (7)$$

此时,最大视角误差为39.5 mm·s⁻¹。

AR127L型远心镜头视角约0.1°,代入式(6),得到远心光路视角误差为2.6 mm·s⁻¹。远心镜头使光路视角误差降低了一个数量级,达到采样数量引起的随机误差水平。

综上,平均速度总的最大标准不确定性^[13]为:

$$\varepsilon_{U,t} = \sqrt{\varepsilon_N^2 + \varepsilon_{\text{pers}}^2} \quad (8)$$

95%置信度的平均速度扩展不确定性为:

$$\varepsilon_{U,ex} = 2\varepsilon_t \quad (9)$$

故本实验中,平均速度最大标准不确定性和95%置信度扩展不确定性分别为:3.3 mm·s⁻¹和6.6 mm·s⁻¹。平均速度最大标准不确定性和95%扩展不确定性相对于主流平均速度的相对不确定性分别为:0.22%和0.44%。

3.2 实验结果分析

对采样数量10 000的原始图像去噪声处理后进行互相关计算,获取5*D_h*和10*D_h*处横向流场分布如图8所示。流场分布与搅混翼片导向一致,横向流场呈对角线对称分布,通道中窄缝区平均速度明显大于中心区平均速度。说明定位格架有效地加强了子通道间的横向搅混,子通道内的一对朝向相反的搅混翼片产生了剪切流动,增强了子通道内的搅混。同时,定位格架对下游流场的影响随距离的增加而减弱。

5*D_h*截面子通道中心线*X*=6.3 mm平均速度分布如图9所示。在不同子通道内,搅混翼片交替朝向*X*或*Y*方向,使得横向速度分量*U*和*V*的变化规律明显不同。*V*速度峰值出现在窄缝区,说明搅混翼片增强了相邻子通道之间的横向搅混。且*V*速度明显大于*U*速度,说明*V*速度为横流速度的主要分量。

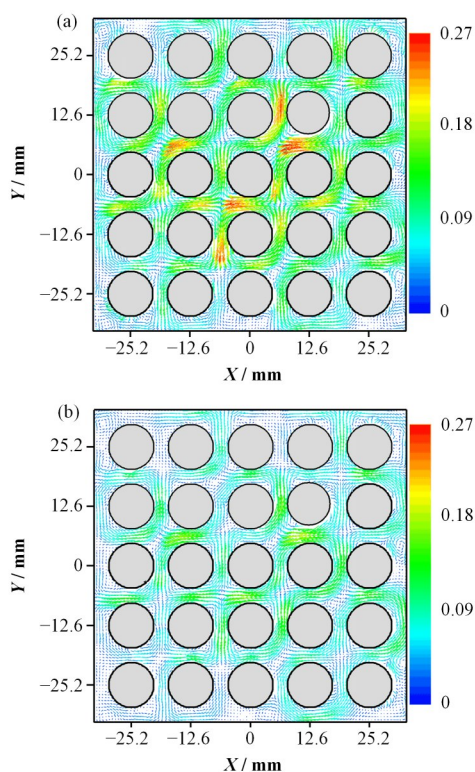


图8 定位格架下游 $5D_h$ (a) 和 $10D_h$ (b)流场分布
Fig.8 Lateral flow at $5D_h$ (a) and $10D_h$ (b) downstream the spacer grid

由图9知,最大横流平均速度为 $0.27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,是主流平均速度的18%。

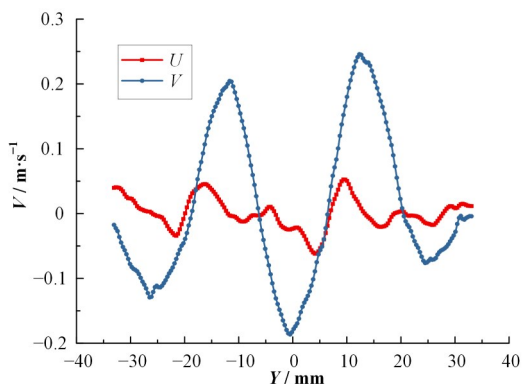


图9 $X=6.3 \text{ mm}$ 平均速度分布
Fig.9 Mean velocity distribution along $X=6.3 \text{ mm}$

4 结语

1) 本实验使用折射率补偿技术,有效地消除了棒束和实验工质折射率不同造成的不规则图像噪声。采用远心镜头有效降低了相机镜头视角效应,远心光路放大倍数在测量范围内恒定为0.084,再投影误差明显小于1像素且分布均匀。

2) 使用远心PIV测量得到 $5D_h$ 和 $10D_h$ 处横向流

场分布,测量面各点平均速度的相对不确定性随采样数量的增加趋于0,与无远心镜头相比,视角误差降低了一个数量级,达到与采样数量相同的量级。测量结果的相对不确定性为0.22%,95%置信度的相对扩展不确定性为0.44%。

3) 测量结果表明:定位格架下游流场分布由搅混翼片决定,定位格架对横向流场的影响随定位格架下游距离的增加而减弱。

参考文献

- 1 Tian R F, Mao X H, Gao P Z, *et al.* Numerical research on 3-D flow field in 5×5 rod bundles with spacer grids[R]. Xi'an, China, 2010. DOI: 10.1115/ICONE18-29210.
- 2 Gandhir A, Hassan Y A. RANS modeling for flow in nuclear fuel bundle in pressurized water reactors (PWR) [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, **241**: 4404–4408. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.08.084.
- 3 Han S Y, Seo J S, Park M S, *et al.* Measurements of the flow characteristics of the lateral flow in the 6×6 rod bundles with tandem arrangement vanes[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**: 2728–2736. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.09.026.
- 4 Xiong J B, Yu N, Yu Y, *et al.* Experimental investigation on anisotropic turbulent flow in a 6×6 rod bundle with LDV[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, **278**: 333–343. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.08.004.
- 5 McClusky H L, Holloway M V, Conover T A, *et al.* Mapping of the lateral flow field in typical subchannels of a support grid with vanes[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, **125**: 987–996. DOI: 10.1115/1.1625688.
- 6 朱铮涛, 黎绍发. 镜头畸变及其校正技术[J]. 光学技术, 2005, **31**(1): 136–141. DOI: 10.3321/j. issn: 1002-1582. 2005.01.021.
ZHU Zhentao, LI Shaofa. Lens distortion and proofreading technology[J]. Optical Technique, 2005, **31** (1): 136–141. DOI: 10.3321/j. issn: 1002-1582.2005. 01.021.
- 7 周梦君, 毛辉辉, 封亚, 等. 2×2 棒束通道格架搅混翼横向流场PIV实验研究[J]. 核动力工程, 2016, **37**(4): 133–137.
ZHOU Mengjun, MAO Huihui, FENG Ya, *et al.* PIV experiment research of lateral flow field in 2×2 rod bundles channel with mixing vane grids[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, **37**(4): 133–137.
- 8 Hille D, Schrodell B, Ganzmann I, *et al.* PIV (Particle

- Image Velocimetry) measurements for detection of the cross flow distribution downstream of 5×5 test spacer grids[R]. Pisa, Italy, 2013.
- 9 Li X, Mi Z P, Tan S C, *et al.* PIV study of velocity distribution and turbulence statistics in a rod bundle[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, **117**: 305–317. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.03.036.
- 10 Dantec Dynamics A/S. Dynamic studio user's guide[M]. Copenhagen: Dantec Dynamics A/S, 2014: 341–343, 353–354.
- 11 Prasad A K. Stereoscopic particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2000, **29**: 103–116. DOI: 10.1007/s003480000143.
- 12 Sciacchitano A, Wieneke B. PIV uncertainty propagation [J]. Measurement Science & Technology, 2016, **27**(8): 1–16. DOI: 10.1088/0957-0233/27/8/084006.
- 13 ASME PTC 19.1-2005(Revision of ASME PTC 19.1-1998). Test uncertainty[S]. US: The American Society of Mechanical Engineers, 2006.