文章编号: 1672-9897(2026)01-0088-11 doi: 10.11729/syltlx20230167

核磁共振测速技术在燃料组件冷却剂通道流场实验研究的应用

王子瑞[1, 2, 3], 张科[1, 2, 3, *], 段敬添[1, 2, 3], 武俊梅[1, 2, 3], 兰治科[4]

1. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049
2. 西安交通大学 复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 西安 710049
3. 西安交通大学 陕西省先进飞行器服役环境与控制重点实验室, 西安 710049
4. 中国核动力研究设计院, 成都 610213

摘要: 核磁共振成像测速(Magnetic Resonance Velocimetry, MRV)技术作为复杂结构内三维全流场测量的前沿技术, 是流场可视化研究、流动换热机理分析和数值模型验证的重要手段。近年来, MRV 技术也被应用于核反应堆堆芯燃料组件冷却剂通道流场实验研究中, 为堆芯热工水力性能研究和安全分析提供基础数据。本文整理了 MRV 技术在堆芯燃料组件冷却剂通道流场实验中的研究进展, 在雷诺数 12 500 和 25 000 工况下, 利用 MRV 技术对 2 × 2 简单棒束燃料组件冷却剂通道内的全空间三维流场进行了测量, 并与文献中相同模型的 PIV 测量结果进行了定量对比, 分析了影响 MRV 测量精度的关键参数。研究结果表明: MRV 技术可以精确解析棒束通道的全空间三维流场, 本文棒束通道内无量纲轴向速度的 MRV 测量结果与文献中 PIV 测量结果的最大误差为 5.05%。

关键词: 核磁共振测速; 实验技术; 棒束通道; 三维流场测量

中图分类号: TL339; V211.7 **文献标识码:** A

Application of MRV in experimental investigation of flow field characteristics in a coolant channel within a fuel assembly

WANG Zirui[1, 2, 3], ZHANG Ke[1, 2, 3, *], DUAN Jingtian[1, 2, 3], WU Junmei[1, 2, 3], LAN Zhike[4]

1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
2. State Key Laboratory for Strength and Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Environment and Control for Flight Vehicle, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
4. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

Abstract: Magnetic Resonance Velocimetry (MRV) is becoming a crucial experimental technology for flow field visualization, flow heat transfer mechanism investigating, and numerical model validation. In recent years, the MRV technology has been employed in experimental investigations of coolant channel flow fields in nuclear reactor core fuel assemblies, providing fundamental data for core thermal hydraulic characteristics research and safety analysis. A literature overview of the research progress using MRV technology in experimental studies on the flow field of reactor core fuel assembly channels is presented in this paper. The three-dimensional coolant flow field within a 2 × 2 simplified rod bundle channel was measured using MRV, and quantitative comparisons were conducted with PIV measurement results from previous literature

收稿日期: 2023-12-28; **修回日期:** 2024-03-25; **录用日期:** 2024-04-03
基金项目: 中核集团领创科研项目(J202210014-09)
* 通信作者 E-mail: kezhang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 王子瑞, 张科, 段敬添, 等. 核磁共振测速技术在燃料组件冷却剂通道流场实验研究的应用 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(1): 88-98.
WANG Z R, ZHANG K, DUAN J T, et al. Application of MRV in experimental investigation of flow field characteristics in a coolant channel within a fuel assembly[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(1): 88-98.

to investigate the key parameters influencing the measurement accuracy of MRV. In this study, MRV tests were performed under two conditions of Re = 12500 and 25000, respectively. The results indicate that the axial velocity from MRV within the investigated channel has a maximum discrepancy of 5.05% compared to the PIV data reported in the literature.

Keywords: Magnetic Resonance Velocimetry (MRV); experimental technology; rod bundle; full field flow measurement

0　引　言

可移动小堆具有小型紧凑、功率密度大、机动灵活、可靠性高等优点，是目前核推进技术领域的研究前沿。堆芯的高效能量转换是实现可移动小堆预定功能目标的关键，而堆芯燃料组件构型及冷却剂通道内的流动、换热性能则是堆芯热工性能的决定因素。因此，针对燃料组件内冷却剂流动特性开展相关研究至关重要。

将易裂变材料以小颗粒形式弥散于辐照稳定性强的非裂变基体中构成燃料芯体，并与外围金属包壳冶金结合制成弥散型燃料元件；将元件按照一定方式排列即可构成核燃料组件。目前，大型核电站压水堆中棒状燃料组件的研究和应用较为成熟，但在小堆紧凑性要求下，板状和环形燃料组件在小堆堆芯方案中更具优势。板状燃料元件发热面积大、冷却剂通道宽度小（窄缝通道宽度通常为 1～3 mm），容易导致冷却剂流量分布不均、板内温度梯度过大，使板结构起泡、变形甚至破裂，进而增大通道阻力，使冷却剂流动产生局部不稳定性，引发燃料板流致振动。研究者还提出了一种带中心孔的双面冷却环形燃料芯块设计方案，旨在显著降低芯块最高温度、提高冷却均匀性，进而提高堆芯安全性和热工性能。这种结构涉及内外双通道流动，流动特性更加复杂。为优化燃料组件设计方案，提高燃料组件的热工水力性能与安全性，需要进一步揭示其三维流场分布、边界层效应、流量分配和几何参数影响。

燃料组件内冷却剂的三维流动特性是影响堆芯传热效率和安全性的重要因素。堆芯内冷却剂通道结构复杂、尺寸微小，给相关实验技术研究带来了巨大的挑战。近年来，有研究者尝试将核磁共振成像技术应用于微小复杂通道内的三维流场测量，即核磁共振成像测速（Magnetic Resonance Velocimetry, MRV）[1]。与激光多普勒测速（LDV）[2]、粒子成像测速（PIV）[3] 等传统流场测量技术相比，核磁共振成像测速技术无粒子浸入、不受光学条件限制，能够快速解析微小复杂结构内部全空间三维三分量（3D3C）速度分布，精确捕捉涡旋的三维空间结构，是研究微小复杂通道内全场流动特性的前沿实验技术[4]。此外，研究者也已开始将 MRV 技术应用于气、固、液等多相流动的复杂流场测量，显示出巨大的应用潜力。

基于核磁共振成像原理的流动测量并不是一个新概念，它已被广泛应用于医学领域（如生物活体中的层流研究等），但在工程湍流测量方面的研究相对较少[5]。2003 年，Elkins 等[6] 首次将 MRV 技术应用于高速湍流测量，认为 MRV 技术在湍流测量方面具有较高的可靠性和准确度。之后，Ryan 等[7] 利用 MRV 技术测量了垂直旋转风涡轮的三维流场，Benson 等[8] 借助 MRV 技术研究了涡轮叶片气膜冷却形成的三维混合流，Freudenhammer 等[9] 利用 MRV 技术研究了气缸盖几何形状变化对进气体积流量的影响，Borup 等[10] 借助 MRV 技术对粒子分离器内的三维流动特性进行了研究，Hoffman 等[11] 利用 MRV 技术得到了离心叶轮间的流场分布。

目前，MRV 技术在燃料组件通道空间流场测量方面的应用较少。本文整理了 MRV 技术在堆芯燃料组件通道流场实验研究中的进展，利用 MRV 技术对 2 × 2 简单棒束燃料组件冷却剂通道（后文或简称“棒束通道”）内的全空间三维流场进行测量，并与公开文献中相同模型的 PIV 测量结果进行定量对比，分析影响 MRV 测量精度的关键参数。

1　MRV 技术在燃料组件内冷却剂流场测量中的应用

部分研究者已将 MRV 技术应用于燃料组件冷却剂通道内流场测量实验研究。Piro 等[12] 采用激光烧结 3D 打印技术，制造了以 CANDU 燃料棒束通道为原型并按 2/3 比例缩放简化后的 8 单元棒束通道模型，采用 MRV 技术对其内部流场特性开展了实验研究，得到的不同轴向位置的轴向速度与 CFD 模拟结果吻合良好。Piro 等[13] 还制作了等比例 37 单元棒束通道模型，在雷诺数 12500 工况下，MRV 测量

结果与CFD模拟结果基本一致；将燃料棒束截面细分为4个子通道环，通过分析不同轴向位置截面的径向分速度和角速度，研究了4个子通道间的流量掺混特性。此外，该研究还发现MRV技术能够检测出棒束通道中卡住的材料碎片，并能够量化这些碎片对局部流动的影响。综上所述，MRV技术适用于微小复杂结构的测量，使得多单元棒束通道内的全空间三维流场测量成为可能。

以上述研究作为基础，Bruschewski等[14]将燃料组件通道压力管内径扩大6%，得到了发生蠕变老化的棒束通道模型，利用MRV技术测量了雷诺数$Re=11550$工况下的三维流场数据，得到的轴向速度与采用LDV技术测得的局部轴向速度十分吻合。此外，Bruschewski等[14]还指出，在径向蠕变的棒束通道中，通过旁路区域（该旁路区域的相对几何面积为25%）的流量在下游端板附近稳定在总流量的35%左右，且旁路区域的相对速度稳定在主流速度的1.9倍左右。Oliveira等[15]在$Re=1936$工况下，利用MRV技术分别测量了7×7棒束的法国压水堆常规模型、以及模拟失水事故（Loss Of Coolant Accident, LOCA）下堵塞率为90%的通道模型的流场特性，分析了“上游过渡区–堵塞区–下游过渡区”的流量重分配现象，指出从堵塞通道偏离出去的流量主要由几何堵塞率决定，同时证明了带搅混翼的定位格架能够很好地弱化堵塞区对流动的影响。基于上述研究，Oliveira等[16]在$Re=1936$、4671、7223和9599工况下测试了6个棒束通道模型（分为堵塞区共面和非共面2种情况），其中共面堵塞的4个模型最终堵塞率分别为61%、80%、90%、90%，对应堵塞长度分别为100、100、100、240 mm（前3个模型为一组，用于对比讨论堵塞率对流动的影响；后2个模型为一组，用于对比讨论堵塞长度对流动的影响）；非共面堵塞的2个模型最终堵塞率均为80%。研究表明：堵塞率对下游流场影响更大（堵塞率越大，堵塞区内轴向速度越低，其下游的流量重分配越强烈）；流量掺混特性对堵塞长度不敏感；随着流量增大，堵塞区下游过渡区流动介质的轴向速度下降更为明显。在相同工况下，非共面堵塞情况下发生的流量重分配强度较弱，而下游堵塞区可能会影响上游堵塞区引起的流量重分配效应。此外，在不同堵塞区几何形状和不同实验流率工况下，上下游2个带搅混翼的定位格架均能有效地将堵塞效应限制在两者之间的区域（即能使流动通过格架后均匀化）。由此可见，MRV技术可用于研究复杂结构内几何形状的微小变化对局部与全空间三维流场的影响。

MRV技术在测量高雷诺数湍流流场方面也取得了重大进展。近期，Bruschewski等[17]采用MRV技术对$Re=20300$工况下5×5方形排布压水堆燃料组件模型（通道以透明有机玻璃制作；燃料棒束模型和定位格架按照实际压水堆燃料组件放大1.26倍，以聚甲醛树脂制作；格架采用了一种法马通设计构型）内部的三维速度场进行了测量分析，测量结果与CFD模拟结果吻合良好。此外，在丘陵状通道模型中进行了二维MRV湍流测量，获得了通道中第12个和第13个“山丘”之间的雷诺应力分布，除流动存在轻微不对称及一些系统误差外，MRV可得到出色的数据质量。

本文将MRV技术用于棒束通道全空间流场测量。目前，采用非MRV技术对棒束通道流场分布开展的实验研究相对较多，其中一些公认的实验结果可作为验证MRV技术实验方法和可靠性的基准。本文的研究模型为2×2简单棒束燃料组件冷却剂通道模型，参考了Hosokawa等[18]的文献。通过将本文MRV测量结果与文献[18]中的PIV测量结果进行对比分析，系统研究影响MRV测量精度的系统参数。

2 MRV原理介绍

关于MRV的基本原理详见文献[4]，本文仅作简要介绍。将原子核系统置于均匀强外磁场B_0中（下文均默认B_0方向沿z轴正向），原子核受磁力矩作用绕B_0方向发生拉莫尔进动（进动频率$\omega=\gamma B_0$，其中γ为原子核的旋磁比，仅由原子核种类决定），并在宏观上产生纵向磁化。此时若再向系统施加频率恰为ω的射频（RF）磁场，系统将对射频脉冲能量产生强烈的吸收，发生核磁共振。脉冲结束后，系统趋于恢复至最低能态，因此纵向磁化趋于恢复，横向磁化矢量在Oxy平面内绕B_0方向旋转、变化。由法拉第电磁感应定律可知，固定位置的接收线圈内磁通量不断发生变化，线圈内将会产生感应电流，此感应电流即为核磁共振信号（MR信号）。

在磁共振扫描中，线圈接收的是全场氢质子的MR信号，其位置信息通过各方向的编码来区分。例如，向质子系统施加一个平行于z轴的梯度磁场G_{SS}，则z方向上不同位置核的拉莫尔进动频率呈线

性变化，经过 z 方向上某位置的 Oxy 截面内的核仅能被一种频率的脉冲激励，如此便实现了 z 方向上不同位置截面的选择。x 和 y 方向的位置选择也通过施加相应梯度磁场来实现。如图 1 所示，在一个重复时间（图中的 TR）内施加 RF 激励、层面选择梯度磁场 G_{SS}、相位编码梯度磁场 G_{PE}、频率编码梯度场 G_{FE}，可接收到一组 MR 信号；重复此过程，即可通过二维傅里叶变换重建信号灰度图[19]。

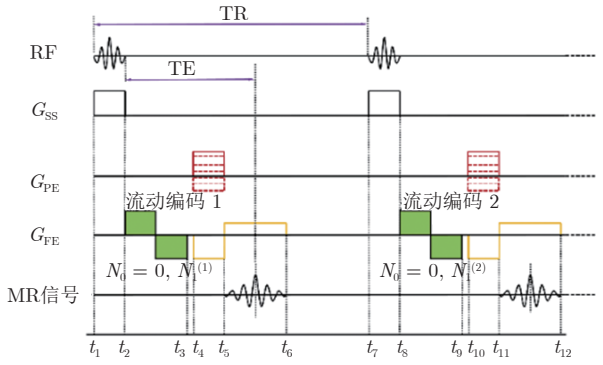


图 1　单方向速度编码扫描序列

Fig. 1　MRV sequences for velocity encoding

下面简述 MRV 中的速度编码方法。以 x 方向为例，将沿 x 方向施加的梯度磁场记为 $\vec{G}(t)$，则在该磁场中以速度 $\vec{u}$ 运动的当地氢核拉莫尔进动频率 ω_L 可表示为：

$$\omega_L\left(\vec{x},t\right)=\gamma\left[B_0+\vec{G}(t)\cdot\vec{x}(t)\right] \tag{1}$$

式中，$\vec{x}(t)=\vec{x_0}+\vec{u}(t-t_0)$，$\vec{x_0}$ 表示质子在初始时刻 t_0 的位置，代入式(1)可得 τ 时刻的相位 Φ 为：

$$\Phi\left(\vec{x},\tau\right)=\Phi_0+\gamma\vec{x_0}\int_0^{\tau}\vec{G}(t)\,\mathrm{d}t+\gamma\vec{u}\int_0^{\tau}\vec{G}(t)\,t\mathrm{d}t+O\left(t^n\right) \tag{2}$$

式中，等号右侧前 3 项分别反映初始相位、梯度磁场对静止氢核进动相位的影响、氢核运动速度 $\vec{u}$ 对进动相位的影响。如图 1 所示，在 t_2～t_3 期间，对运动氢核施加正负双向梯度磁场 G_{k}（即图 1 中绿色矩形表示的流动编码中所用到的梯度磁场），可消除仅施加单向梯度磁场带来的氢核进动相位变化，则式(2)等号右侧第 3 项相位变化 Φ_1 可表示为：

$$\Phi_1=-\gamma\overline{u}N_1 \tag{3}$$

式中，$N_1=G_{\mathrm{k}}\Delta t^2$。因此，采用 MRV 技术进行测量时，在 t_1～t_2 期间施加层面选择梯度 G_{ss} 激发一定层面后，先进行一次流动编码，即可使式(2)等号右侧第 2 项为 0。初始相位 Φ_0 则通过重复编码消除，如图 1 所示，在 t_7～t_{12} 期间施加第 2 次重复编码，2 次编码的初始相位 Φ_0 相同，2 次编码后的相位差 $\Delta\Phi=\Phi_1^{(2)}-\Phi_1^{(1)}$，整理得：

$$\Delta\Phi=\gamma\overline{u}\left(N_1^{(1)}-N_1^{(2)}\right)=\gamma\overline{u}\Delta N_1 \tag{4}$$

根据式(4)，当地 x 方向氢核宏观运动的速度 $\overline{u}$ 可表示为：

$$\overline{u}=E_{\mathrm{v}}\Delta\Phi/\pi \tag{5}$$

式中，速度编码（velocity encoding）$E_{\mathrm{v}}=\pi/\gamma\Delta N_1$，反映了流动编码磁场强度引起的相位变化程度：由于 $\Delta\Phi$ 的取值范围为 $[-\pi,\pi]$，因此式(5)中的速度编码表征了该次测量中出现的最大流速。在 MRV 实验时，系统根据事先设定的速度编码（即所测最大流速）计算所需的流动编码磁场强度。

通过上述系列编码，接收线圈获得 MR 信号，再经三维傅里叶变换，获得不同位置 MR 信号中的幅值与相位信息，并存储于核磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging, MRI）设备中。提取 MR 信号中的相位信息，结合式(5)，可计算得到扫描区域内各体素（MRV 扫描的最小空间单元）中氢核沿 x 方向的速度分布 $\overline{u}(x,y,z)$。MRV 信号为体素内所有氢核共同产生，因此所测速度即为体素内的平均速度。将相位信息转换为速度信息并对空间流场进行分析的过程，由自主开发的 Matlab 程序完成。

3　MRV 实验装置

本实验在西安交通大学生物医学与健康工程研究院的核磁共振成像仪（西门子 MAGNETOM Spectra 3.0T）上开展，其先进的 Tim 4G 技术具有优异的信噪比和均匀度，有利于减少误差和伪影。考虑到该设备的实际安装情况、舱内参数和使用要求，设计了如图 2 所示的棒束燃料组件冷却剂通道 MRV 全场流动测量实验平台。为避免核磁共振成像仪中的强磁体吸引器材或零件，影响信号接收甚至危及人身安全，须严格确保核磁共振仪周围 5 m 范围内无铁磁性物质。因此，将核磁共振成像仪和棒束燃料组件冷却剂通道实验段（由非金属材料制成）置于专用放射室内，其余设备均置于放射室外，研究人员在放射室外的计算机上进行操作。

实验中，冷却剂从冷却剂箱出发，沿塑料软管流经离心泵、调节阀、涡轮流量计等，流入实验段中的沉降室，再从沉降室进入燃料组件冷却剂通道，从冷却剂通道中流出后，经软管流回冷却剂箱，构成冷却

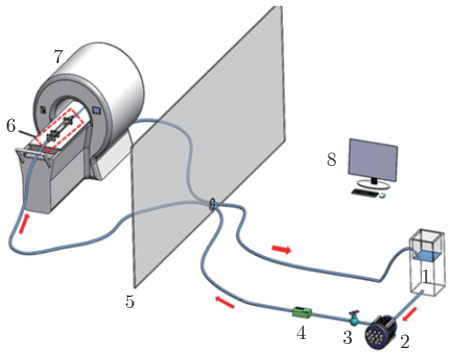


图 2 棒束燃料组件冷却剂通道 MRV 全场流动测量实验平台

Fig. 2 MRV full-field flow measurement platform for coolant channel of rod bundle

剂循环系统。冷却剂通道内的流量通过调节阀和流量计进行调节和控制，可满足 Re 在 $0\sim4\times10^4$ 范围的实验需求。

置于核磁共振成像仪中的实验段由有机玻璃制成，部件之间通过法兰与尼龙螺栓连接，连接管道为塑料软管。离心泵中的金属部件以 304 不锈钢制成，可防止锈蚀引入杂质而影响测试结果。

核磁共振成像仪舱室洞口截面直径约 80 cm，因此实验段尺寸不能过大，需兼顾测量空间分辨率要求；实验模型尺寸也不能过小，以保证能够在冷却剂流场内布置足够的数据采集点。简单棒束燃料组件冷却剂通道流场测量实验的目的是验证 MRV 技术的可靠性和精度，因此，将棒束通道设计为简单结构（主要参数来自 Hosokawa 等[18]发表的 PIV 测量文献，本文 MRV 测量结果将与该文献中的 PIV 测量结果进行对比），如图 3 所示。棒束通道横截面（垂直来流方向的截面）尺寸为 50 mm × 50 mm，通道内对称布置 2 × 2 个单元棒，棒直径为 20 mm。棒之间冷却剂通道最窄处的宽度为 5.0 mm，棒与通道壁面之间最窄处的宽度为 2.5 mm。

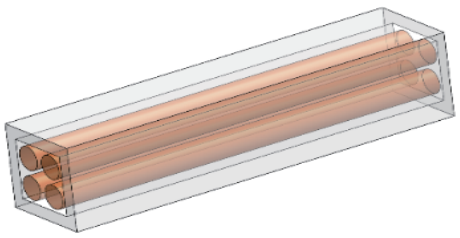


图 3 棒束燃料组件冷却剂通道模型结构

Fig. 3 Diagram of coolant channel in rod bundle

棒束燃料组件冷却剂通道实验段（如图 4 所示）由沉降室、发展段、测试段和出口段等组成，置于核磁共振成像仪舱室内。其中，沉降室为正方体腔室（100 mm × 100 mm × 100 mm），能够改善来流稳定性并沉降可能出现的杂质。沉降室后连接棒束燃料组件冷却剂通道，通道内的燃料棒束由 3 个定位格架支撑。定位格架通过 12 个螺栓连接孔与通道壁面法兰固定。单个棒束通道尺寸为 50 mm × 50 mm，通道 4 个壁面布置有宽 2.0 mm、高 2.5 mm 或 1.5 mm 的突起，用于支撑并固定圆柱形棒束，如图 5 所示（图中以黑色实心圆形表示棒束）。测试区域位于第 2 个定位格架下游，以保证来流充分发展。实验模型（指图 4 中的所有部件，包括插于实验通道内部、图中未显示的棒束）均采用有机玻璃加工制成。

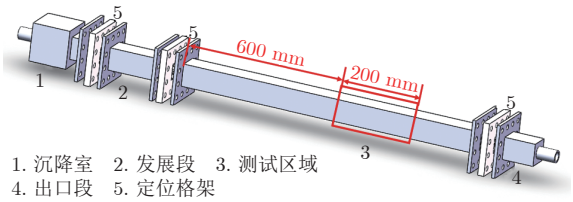


图 4 棒束燃料组件冷却剂通道实验段

Fig. 4 Coolant channel model of rod bundle

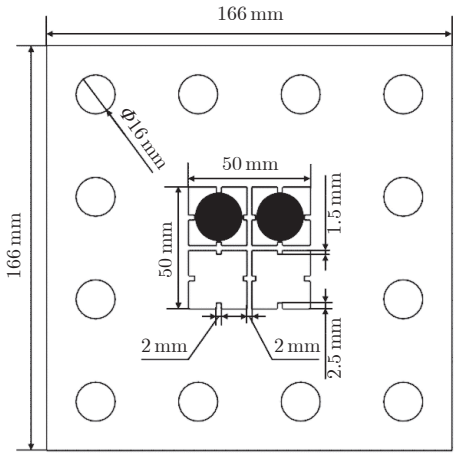


图 5 定位格架右视图及主要几何参数

Fig. 5 Right elevation of spacer grid and geometric parameters

在雷诺数 Re = 12500、25000 工况下进行了 MRV 测试（$Re=\rho u_{\mathrm{b}}D_{\mathrm{h}}/\mu$，其中，通道水力直径 D_{h}= 11 mm；ρ 为冷却剂密度，单位 kg/m^3；u_{b} 为冷却剂主流流速，单位 m/s；μ 为冷却剂动力黏度，单位 Pa·s）。实验中，x、y、z这 3 个方向的速度编码值相同，即 $E_{\mathrm{v},x}=E_{\mathrm{v},y}=E_{\mathrm{v},z}$。对于 Re = 12500 工况，$E_{\mathrm{v},x}=E_{\mathrm{v},y}=E_{\mathrm{v},z}$ = 4.0 m/s，对于 Re = 25000 工况，$E_{\mathrm{v},x}=E_{\mathrm{v},y}=E_{\mathrm{v},z}$ = 4.5 m/s。经过多次实验对比，综合考虑所测空间大小及采集效率，在空间分辨率为 1.0 mm × 0.4 mm × 0.4 mm、0.7 mm × 0.7 mm × 0.7 mm 和 1.0 mm × 0.7 mm × 0.7 mm 的

条件下进行了测试。在第 2 个定位格架下游 600 mm 处、约 200.0 mm × 230.2 mm × 224.0 mm 的空间区域内，单次流动扫描约 8 min 即可测量超过 8 × 10^6 个空间点在 3 个方向的速度场。为提高信噪比，在水中加入 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 粉末，制成摩尔浓度为 0.06 mol/L 的 $CuSO_4$ 溶液作为冷却剂。每个工况至少进行了 6 次流动扫描，以减小随机误差的影响。

4　测量结果与对比讨论

4.1　精度分析和误差估计

当 Re = 12500 时，6 次流动扫描测得的平均主流流速标准差为 0.005 m/s。主流总平均流速 $\overline{u}_b$ = 0.9276 m/s，与基于流量计示数计算所得平均流速仅相差 4.1%。MRV 测得的速度不确定度 $\widetilde{u}_i$ 可通过既定方向上的速度编码值 E_v 和所采集信号的信噪比 R_{sn} 计算[6]：

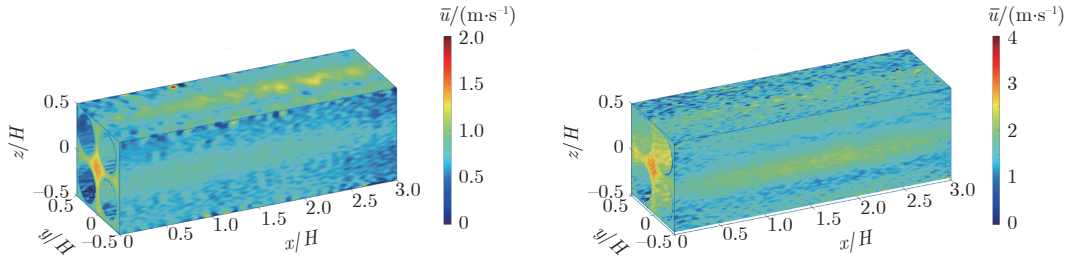
$$\widetilde{u}_i = \left(\sqrt{2}/\pi\right) E_v / R_{sn} \tag{6}$$

式中，i 表示 x、y或 z方向。多次实验结果对比表明，信噪比与空间分辨率、扫描时间及扫描区流速大小有关：空间分辨率越高，信噪比越低；扫描时间延长，信噪比相对升高；流速较低的区域 MR 信号较弱，则该区域信噪比较低，测量不确定度较大。

在各次 MRV 实验中，Re = 12500 时信噪比最高，空间分辨率为 1.0 mm × 0.7 mm × 0.7 mm，设定 x 方向速度编码 $E_{v,x}$ = 4.0 m/s，由 MRV 结果计算得出 $R_{sn,x}$ = 49.69，将 $E_{v,x}$、$R_{sn,x}$ 代入式(6)，得到本次实验 x 方向速度不确定度 $\widetilde{u}_x$ = 0.0362 m/s，仅为通道中心最大速度的 2.4%，与文献 [14] 得到的精度水平相当(该文献中得到的速度不确定度约为子通道中心处最大速度的 3.0%)，验证了 MRV 实验结果的可靠性。

4.2　2 × 2 棒束通道全空间三维速度分布特征

在 Re = 12500 与 25000 条件下，对棒束通道进行了多次不同扫描序列和参数设置下的 MRV 速度测量实验。图 6 为通过实验测得的棒束通道扫描区域内的全空间轴向速度分布云图，空间分辨率分别为 1.0 mm × 0.7 mm × 0.7 mm 和 1.0 mm × 0.4 mm × 0.4 mm，图中 H 为冷却剂通道横截面边长。对比可见，空间分辨率减小会导致信噪比降低和速度云图平滑性下降。从图中可以看到：云图中棒束所在位置未显示速度数据；单元棒之间区域冷却剂速度较高，而单元棒和壁面之间冷却剂速度较低，最高流速出现在通道中心。可以看出，MRV 全空间速度测量使复杂结构流动的全场可视化解析成为可能，是研究复杂结构流场全空间分布特征的有力工具。



(a) Re = 12500　　(b) Re = 25000

图 6　棒束通道扫描区域内轴向速度三维分布云图

Fig. 6　3D contour of axial velocity distribution in the scanning area

在全空间三维速度分布云图中，任意截取二维截面、一维线和单点数据，可以提取二维截面、一维线及单点的三维速度分布数据，研究空间细节流场分布特征。图 7 为图 6(a)扫描区域最上游(x/H = 0 处)横截面轴向速度分布云图，可以更清晰地看到：通道截面中心轴向速度最高；速度分布沿 z 方向对称性较好，沿 y 方向对称性较差，y/H = 0.5 处壁面附近冷却剂速度相对 y/H = −0.5 处壁面附近较小。分析发现，沿 y 方向速度分布的非对称性可能是由棒束变形产生的几何结构非对称所引起，更换棒束后，该非对称性发生改变。MRI 图像表明，沿流向不同位置横截面上的棒束圆心位置有所偏移，证实棒束沿通道发生了变形。

图 8 为图 6(a)通道高度方向中心位置(z/H = 0 处)的 Oxy 截面速度分布云图和速度矢量图。同样可以看出：速度分布沿 z 方向对称性较好，沿 y 方向对称性较差；y 和 z 方向的速度分量相对于主流可忽略不计。

图 9 为扫描区域最上游(x/H = 0 处)横截面轴向速度分布云图(Re = 25000)。从图中可见，通道

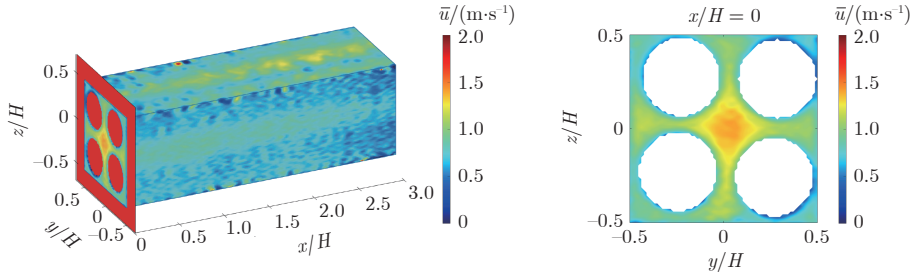


图 7 *Re* = 12500 时 *x*/*H* = 0 处截面轴向速度分布二维云图

Fig. 7 2D contour of axial velocity distribution in cross section at *x*/*H* = 0 for *Re* = 12500

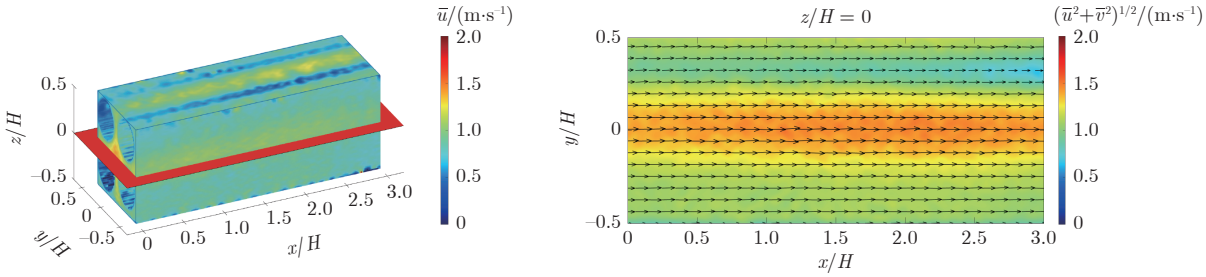


图 8 *Re* = 12500 时 *z*/*H* = 0 处 *Oxy* 截面速度云图和速度矢量图

Fig. 8 2D contour of *Oxy* velocity distribution and velocity vector diagram in coronal plane at *z*/*H* = 0 for *Re* = 12500

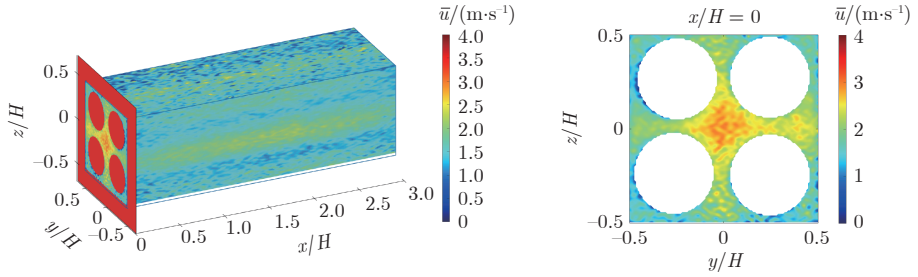


图 9 *Re* = 25000 时 *x*/*H* = 0 处截面轴向速度分布二维云图

Fig. 9 2D contour of axial velocity distribution in cross section at *x*/*H* = 0 for *Re* = 25000

内速度沿 y 方向存在非对称性，y 轴正向一侧轴向速度比 y 轴负向一侧更高，与 $Re = 12500$ 时正好相反。在多次实验中，将棒束更换位置重新安装后，棒束变形引起的几何结构非对称性发生了改变。因此，不同雷诺数下流场非对称性的变化可能是由棒束变形所致。由此可见，棒束通道中细微的几何变形就可能导致流场分布不对称，而 MRV 技术能够清晰解析几何结构改变引起的流场变化特征。

图 10 为 $Re = 25000$ 时 $z/H = 0$ 处 Oxy 截面的速度分布云图和速度矢量图。同样，当 $Re = 25000$ 时，在下游远离定位格架的棒束通道中，流场未出现明显的二次流，而沿 y 方向与 $Re = 12500$ 时相反的不对称现象进一步说明流场的非对称性可能由棒束变形所致。

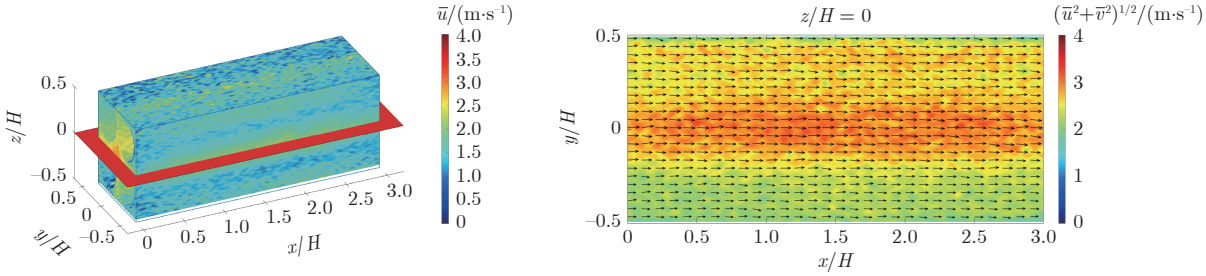


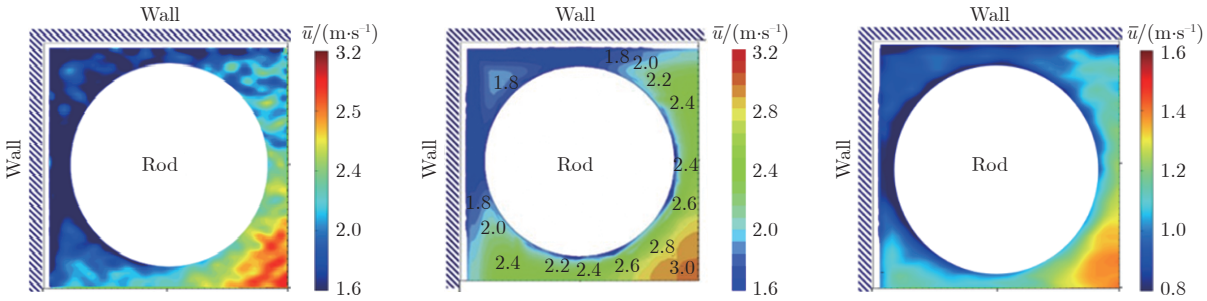
图 10 *Re* = 25000 时 *z*/*H* = 0 处的 *Oxy* 截面速度云图和速度矢量图

Fig. 10 2D contour of *Oxy* velocity distribution and velocity vector in coronal plane at *z*/*H* = 0 for *Re* = 25000

4.3　MRV 测量结果与文献结果对比

本文测量的棒束通道在几何参数上与文献 [18] 一致。将 MRV 测量结果与文献中的 PIV 测量结果进行对比分析，以验证 MRV 技术的精确性，并讨论 MRV 系统参数设置等对测量结果的影响。

图 11(a)为 Re = 25 000 时棒束通道垂直来流的横截面左上角单元棒周围区域速度分布云图。图 11(b)为文献中 PIV 测量结果。从图中可以看到，MRV 测得的横截面速度分布特征及速度大小与 PIV 测量结果基本一致，但该次 MRV 测量结果的信噪比和空间分辨率较低。图 11(c)为 Re = 12 500 时的 MRV 测量结果，其信噪比较图 11(a)明显提升，除因雷诺数差异造成的绝对速度大小不同外，速度分布特征更接近 PIV 测量结果。由于文献 [18] 未展示 Re = 12 500 时同一位置的速度分布云图，本文未定性对比该工况下的 MRV 与 PIV 测量结果。下文将对不同雷诺数下特定区域的速度开展 MRV 与 PIV 测量结果的定量对比。



（a）MRV 轴向速度分布云图（Re = 25 000）　（b）PIV 测量结果[18]　（c）MRV 轴向速度分布云图（Re = 12 500）

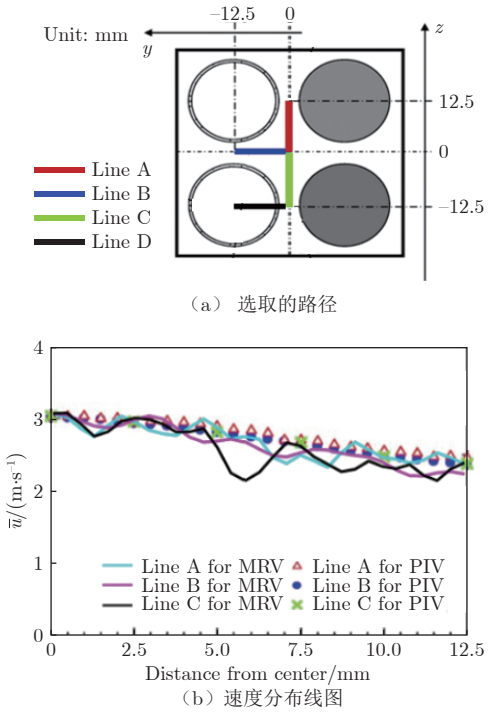
图 11　Re = 25 000 和 12 500 时横截面左上角 1/4 区域内 MRV 轴向速度分布云图与 PIV 测量结果对比

Fig. 11　Contrast for contour of axial velocity distribution in 1/4 cross section at x/H = 0 for Re = 25 000 and 12 500

在 x/H = 0 处的横截面上，选取 3 条路径：Line A(红色)、Line B(蓝色)、Line C(绿色)，如图 12(a)所示。沿这 3 条路径提取轴向速度数据，得到如图 12(b)所示的速度分布线图，并与文献中给出的 PIV 测量结果对比(图中散点数据为文献中的 PIV 测量结果，线数据为 MRV 测量结果；为与 PIV 数据进行区分，将 MRV 点数据拟合为线数据)。除信噪比较低外，MRV 测量结果的整体趋势与 PIV 测量结果吻合良好。

从图 7 的 x/H = 0 横截面内轴向速度分布云图中，提取 z/H = 0 和 z/H = −0.25 处的 Line B(蓝色)、Line D(黑色)路径的轴向速度进行无量纲化，与文献中不同雷诺数下的 PIV 测量结果进行对比，如图 13 所示。无量纲轴向速度 $\overline{U_0} = \bar{u}/\overline{u_0}$，其中 $\overline{u_0}$ 为测量区域入口截面平均轴向速度。从图中可以看到，针对相同几何模型，MRV 测量得到的无量纲速度分布与文献 PIV 测量结果完全吻合。图 13 给出的 MRV 测量结果与文献中 PIV 测量结果的最大误差约为 5.05%。

以上测量和对比结果表明，目前掌握的 MRV 技术在简单棒束通道内冷却剂全场速度测量方面结果精确可靠，为后续开展更复杂的燃料组件冷却剂通道全空间流场测量分析打下了基础。



（a）选取的路径

（b）速度分布线图

图 12　Re = 25 000 时通道不同位置速度分布线图

Fig. 12　Line map of axial velocity distribution at different positions for Re = 25 000

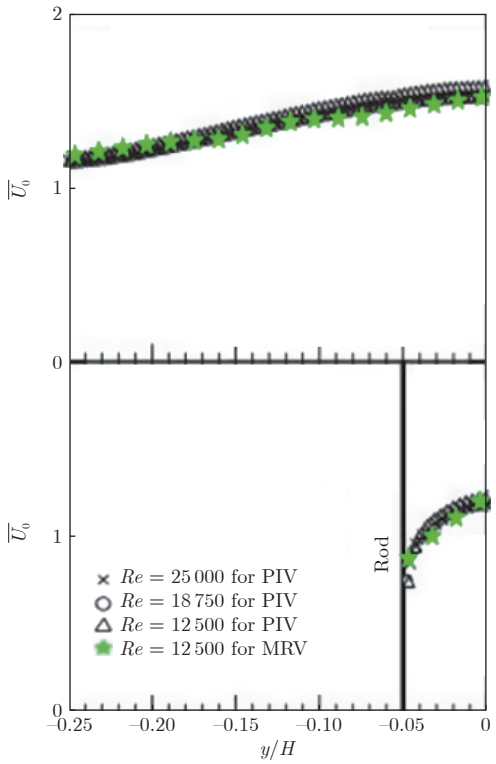


图 13 不同位置无量纲轴向速度分布线图（上方图对应沿图 12 路径 B 的轴向速度，下方图对应沿图 12 路径 D 的轴向速度）

Fig. 13 Non-dimensional axial velocity linemap at different positions (the upper figure corresponds to the axial velocity along path B in figure 12, and the lower figure corresponds to the axial velocity along path D in figure 12)

4.4 影响 MRV 速度测量精度的关键系统参数分析

在空间分辨率影响方面，分别研究了 3 种不同空间分辨率（高分辨率：1.0 mm × 0.4 mm × 0.4 mm；中分辨率：0.7 mm × 0.7 mm × 0.7 mm；低分辨率：1.0 mm × 0.7 mm × 0.7 mm）对棒束通道速度测量的影响。图 14 为不同空间分辨率下的棒束通道横截面速度分布对比，从左至右空间分辨率依次降低。从图中可以看到：随着空间分辨率降低，MRV 速度测量结果的信噪比显著增大。这是因为随着空间分辨率降低，磁扫描单位体素内流体体积变大，MR 信号的信噪比增大，导致速度测量的不确定度降低。在最低分辨率（1.0 mm × 0.7 mm × 0.7 mm）下，速度测量不确定度为 0.0362 m/s，相对主流最大速度为 2.4%，对应信噪比为 49.69；在最高分辨率（1.0 mm × 0.4 mm × 0.4 mm）下，速度测量不确定度为 0.1479 m/s，相对主流最大速度为 4.9%，对应信噪比为 12.18。从最低分辨率提高至最高分辨率，信噪比降低了 75.5%。

将 $x/H = 0$ 处横截面内、Line B 路径（$z/H = 0$）上的速度数据除以该横截面上平均流速，得到如图 15 所示的无量纲轴向速度沿 y 方向的分布曲线。从图中可以明显看到：随着空间分辨率降低，分布曲线更加光滑，说明速度测量信噪比提高、不确定度降低。影响速度测量不确定度的因素还包括速度编码和信噪比。当空间分辨率降低、单位体素内所含流体体积变大时，信号增强，信噪比增大，速度测量不确定度降低。速度编码越小，速度测量不确定度越低。图 14(a)的速度编码为 4.5 m/s，图 14(b)和(c)的速度编码为 4.0 m/s。因此，图 14 中速度测量不确定度的降低同时受到了速度编码减小的影响。此外，图 14(a)对应实验 Re = 25 000，图 14(b)和(c)对应 Re = 12 500，实验雷诺数降低引起流场中速度脉动减弱，也是速度测量信噪比增大的一个不可忽视的原因。

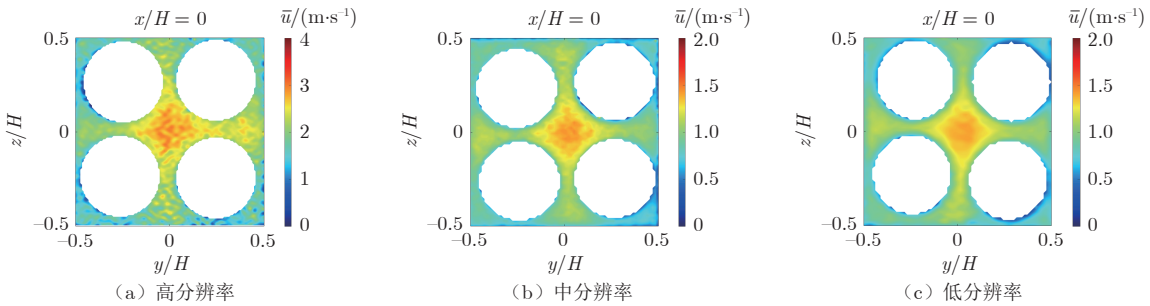


图 14 不同空间分辨率下棒束通道截面速度分布云图对比

Fig. 14 Comparison of velocity distribution for different spatial resolutions

在梯度磁场方向影响方面，图 14(b)和(c)分别对应 2 种不同的梯度磁场方向。图 14(b)测量截面选择沿通道主流方向，图 14(c)测量截面选择垂直通道主流方向。从图中可以看出，不同截面选择即不同测量梯度磁场方向对测量结果影响不大。从图 14(b)到(c)，测量信噪比的增大主要由空间分辨

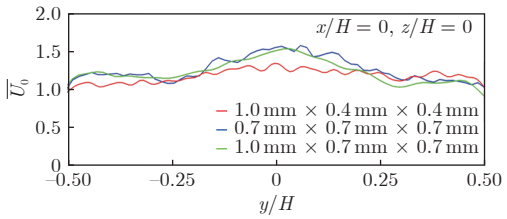


图 15　不同空间分辨率下 $z/H = 0$ 处无量纲轴向速度沿 y 方向的分布曲线

Fig. 15　Distribution of dimensionless velocity along y direction at $z/H = 0$ for different spatial resolutions

率的不确定度引起。但是，当测量截面垂直主流方向时，由于截面内流体所占区域较小，固体（棒束截面）区域较大，在固体边界会出现因截断导致的边缘信号振荡（已在数据处理过程中将振荡部分剔除），该现象在分辨率较高的图 14(a)中不明显。

5　结　论

本文利用 MRV 技术实现了对 2 × 2 棒束通道内冷却剂全场三维流场信息的解析，并与公开文献中的 PIV 测量结果进行了定量对比。

1）在远离定位格架的通道下游区域，2 × 2 简单棒束通道内冷却剂流场中未出现明显的二次流。

2）在相同几何结构与相同雷诺数下，MRV 测得的无量纲轴向速度分布与文献中相应的 PIV 测量结果最大误差为 5.05%，验证了 MRV 在棒束通道内进行全空间三维三分量速度测量的准确度和可靠性。

3）在影响 MRV 速度测量精度的关键系统参数方面：空间分辨率越小，信噪比越低；速度编码值越小，速度不确定度越低；MRV 测量梯度磁场方向对测量结果影响不大。

致谢：感谢西安交通大学生物医学与健康工程研究院健康与康复科学研究所王珏教授团队为本文研究工作提供 MRI 设备和实验指导。

参考文献：

[1] MORAN P R. A flow velocity zeugmatographic interlace for NMR imaging in humans[J]. Magnetic Resonance Imaging, 1982, 1(4): 197-203.
doi: 10.1016/0730-725x(82)90170-9

[2] GEORGE W K Jr. An analysis of the laser-doppler velocimetry and its application to the measurement of turbulence[D]. Washington D C: Johns Hopkins University, 1971.

[3] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid-mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23: 261-304.
doi: 10.1146/annurev.fl.23.010191.001401

[4] 张科, 段敬添, 雷蒋, 等. 基于 MRV 的菱形肋柱冷却通道三维全流场分析[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2837-2847.
ZHANG K, DUAN J T, LEI J, et al. Analysis on 3D full flow field in a cooling channel with diamond pin fins based on MRV[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 2837-2847.
doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220051

[5] ELKINS C J, ALLEY M T. Magnetic resonance velocimetry: applications of magnetic resonance imaging in the measurement of fluid motion[J]. Experiments in Fluids, 2007, 43(6): 823-858.
doi: 10.1007/s00348-007-0383-2

[6] ELKINS C J, MARKL M, PELC N, et al. 4D Magnetic resonance velocimetry for mean velocity measurements in complex turbulent flows[J]. Experiments in Fluids, 2003, 34(4): 494-503.
doi: 10.1007/s00348-003-0587-z

[7] RYAN K J, COLETTI F, ELKINS C J, et al. Three-dimensional flow field around and downstream of a subscale model rotating vertical axis wind turbine[J]. Experiments in Fluids, 2016, 57(3): 38.
doi: 10.1007/s00348-016-2122-z

[8] BENSON M J, ELKINS C J, EATON J K. Measurements of 3D velocity and scalar field for a film-cooled airfoil trailing edge[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(2): 443-455.
doi: 10.1007/s00348-011-1062-x

[9] FREUDENHAMMER D, PETERSON B, DING C P, et al. The influence of cylinder head geometry variations on the volumetric intake flow captured by magnetic resonance velocimetry[J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(4): 1826-1836.
doi: 10.4271/2015-01-1697

[10] BORUP D D, ELKINS C J, EATON J K. Experimental analysis of a particle separator design with full-field 3D measurements[R]. ASME Paper GT2019-90400, 2019.
doi: 10.1115/GT2019-90400

[11] HOFFMAN D W, VILLAFAÑE L, ELKINS C J, et al. Experimental study of flow inside a centrifugal fan using magnetic resonance velocimetry[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(4): 041019.
doi: 10.1115/1.4045064

[12] PIRO M H A, WASSERMANN F, GRUNDMANN S, et al. Progress in on-going experimental and computational fluid dynamic investigations within a CANDU fuel channel[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 299: 184-200.
doi: 10.1016/j.nucengdes.2015.07.009

[13] PIRO M H A, WASSERMANN F, GRUNDMANN S, et al. Fluid flow investigations within a 37 element CANDU fuel bundle supported by magnetic resonance velocimetry and computational fluid dynamics[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2017, 66: 27-42.
doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.04.010

[14] BRUSCHEWSKI M, PIRO M H A, TROPEA C, et al. Fluid flow in a diametrally expanded CANDU fuel channel – Part 1: experimental study[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 357: 110371.
doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.110371

[15] OLIVEIRA A V S, STEMMELEN D, LECLERC S, et al. Velocity field and flow redistribution in a ballooned 7 × 7 fuel bundle measured by magnetic resonance velocimetry[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 369: 110828. doi: 10.1016/j.nucengdes.2020.110828

[16] OLIVEIRA A V S, STEMMELEN D, LECLERC S, et al. Parametric effects on the flow redistribution in ballooned bundles evaluated by magnetic resonance velocimetry[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 125: 110383. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110383

[17] BRUSCHEWSKI M, JOHN K, WÜSTENHAGEN C, et al. Commissioning of an MRI test facility for CFD-grade flow experiments in replicas of nuclear fuel assemblies and other reactor components[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 375: 111080. doi: 10.1016/j.nucengdes.2021.111080

[18] HOSOKAWA S, YAMAMOTO T, OKAJIMA J, et al. Measurements of turbulent flows in a 2 × 2 rod bundle[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 249: 2-13. doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.11.035

[19] 熊国欣, 李立本. 核磁共振成像原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.



作者简介:

王子瑞(1998—),男,陕西安康人,硕士研究生。研究方向:MRV 流动测试技术。

E-mail: 15309153589@163.com

(编辑:秦虹)