

文章编号: 1000-8055(2023)12-2837-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220051

基于 MRV 的菱形肋柱冷却通道 三维全流场分析

张 科^{1,2}, 段敬添^{1,2}, 雷 蒋^{1,2}, 王子瑞^{1,2}, 冀文涛³, 武俊梅^{1,2}

- (1. 西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049;
2. 西安交通大学 航天航空学院 陕西省先进飞行器服役环境与控制重点实验室, 西安 710049;
3. 西安交通大学 能源与动力工程学院 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 在研究核磁共振成像测速(MRV)技术测速核心方法的基础上,成功实现了在 10 min 内对大宽高比肋柱通道 $200 \times 100 \times 25$ 个空间点上三维全场速度的测量,并对流场结构进行了深入的解析。将 MRV 测得的通道中心截面速度分布与粒子成像测速(PIV)的实验结果进行了对比,两者吻合良好。利用 MRV 测得的空间三维速度分布解析了菱形肋柱与端壁附近复杂的三维流场与涡量场,发现端壁附近流体靠近肋柱时,先向下冲击端壁,仅在肋柱前缘两侧形成马蹄涡,随后绕过肋柱两侧尖角处向上抬升,端壁边界层内的涡,迅速演变为肋柱两侧尖角附近以及下游的剪切层涡。

关 键 词: 核磁共振成像测速; 三维流场测量; 内部冷却; 肋柱冷却通道; 强化换热流动机理
中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Analysis on 3D full flow field in a cooling channel with diamond pin fins based on MRV

ZHANG Ke^{1,2}, DUAN Jingtian^{1,2}, LEI Jiang^{1,2}, WANG Zirui^{1,2},
JI Wentao³, WU Junmei^{1,2}

- (1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures,
School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Environment and Control for Flight Vehicle,
School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education,
School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the study of core method of magnetic resonance imaging velocimetry (MRV), the 3D velocity field of $200 \times 100 \times 25$ spatial points in a large aspect ratio channel with pin fins was obtained in 10 min successfully, and the flow field was resolved deeply. The velocity distribution in the mid-plane of channel measured by MRV was compared with the experimental results of particle imaging velocimetry (PIV), which were in good agreement. The 3D velocity distribution measured by MRV presented the complex 3D flow field and vorticity field distribution around diamond pin fin and end wall. It was found that when the fluid near the end wall approached to pin fin, it impinged the end wall firstly

收稿日期: 2022-01-30

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0003-0027); 中核集团领创科研项目(J202210014-09)

作者简介: 张科(1980—),女,讲师,博士,主要从事流场测量、叶轮机械气动热力学研究。

通信作者: 武俊梅(1966—),女,教授,博士,主要从事强化传热传质、发动机涡轮叶片先进冷却技术研究。E-mail: wjmxjtu@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 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 Ke, DUAN Jingtian, LEI Jiang, 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.

and horseshoe vortex only occurred on both sides of the leading point. Then fluid climbs up around the sharp corners on both sides of the pin fin, and the vortex in the end wall boundary layer rapidly evolved into shear layer vortex near the sharp corners on both sides of the pin fin and downstream section.

Keywords: magnetic resonance velocimetry; three-dimensional flow field measurement; internal cooling; cooling channel with pin fins; flow mechanism driving heat transfer enhancement

燃气涡轮是航空发动机和地面燃气轮机的核心部件,其效率和功率的提高很大程度上依赖于涡轮前燃气温度的增加。据测算,涡轮前燃气温度每提高 55 ℃,航空发动机的推力和地面重型燃机的效率可分别提高 10% 和 1%^[1-4]。目前涡轮前燃气温度远远高于叶片材料的耐热极限,复杂精细的叶片冷却结构可以提高叶片的冷却效率,是提高涡轮前燃气温度、延长叶片寿命的关键核心技术。涡轮叶片外表面由气膜冷却进行热防护,叶片内部采用空心结构,前缘常采用射流冲击、中弦段常采用多流程带肋通道、后缘常采用肋柱等冷却结构来强化内部通道的对流换热。复杂冷却结构导致的复杂局部流动细节直接决定了通道内的传热强化效果、冷却均匀性和流动阻力。要在冷却气流量较低的条件下实现传热效率高、叶片表面温度分布均匀、压降不能太大的设计目标,必须对冷却结构引起的流场细微特征有充分的了解。

目前常用的基于激光技术的粒子成像测速(PIV)和激光多普勒测速(LDV)等方法,由于实验方法、材料透光性及光学系统的复杂性,它们往往局限于简单冷却通道、部分截面上的流场测量。即使是先进的光场成像 PIV 技术,采用稠密射线追踪重构技术,虽然可以高效准确地获得三维流场分布,但由于光线遮挡等限制,也只能测量简单通道内的三维流场^[5]。

此外,Qu 等^[6]建立了光谱吸收度与速度分布关系的数学模型,进而提出了激光吸收光谱层析成像技术。通过对比水分子在双模态超燃冲压发动机燃烧室截面上速度分布的仿真结果和实验结果,验证了该方法的有效性。激光吸收光谱层析成像技术不需要添加额外的示踪粒子,但是只能获得二维速度分布。Zhang 等^[7]优化了声波层析成像方法,该方法在测量信息稀疏的情况下具有较好的抗噪声能力,并可实现温度场和速度场的实时可视化。不过该方法目前也只能用于二维速度场的测量,难以获得全场三维流场数据。

涡轮叶片复杂冷却通道内的三维全流场测量难度大、测量与数据处理耗时巨大。基于核磁共振成像(MRI)的测速技术(MRV)无需粒子浸入、不受光学条件限制,利用流体介质本身在磁场中的电磁特性,能够快速测量复杂结构内部三维三分量(3D3C)速度分布。MRV 在 1 h 内可成功采集空间两百多万点的三维速度分量,空间分辨率已经达到 0.5 mm 以下。

20 世纪 80 年代, MRI 技术开始应用在医学领域,主要用来对人体组织结构进行成像分析^[8-10], 目前已成为复杂疾病临床诊断的重要依据。Bogren 等^[11]利用 MRV 成功测出人体心脏血管内的复杂三维速度场,研究胸主动脉的正常血流模式。发现,血液以右螺旋的形式从升主动脉流向主动脉弓;降主动脉呈直流式或左旋螺旋式,深刻揭示了人体血液流动的细微特征。20 世纪末, MRV 被用来研究石油、天然气在岩层等多孔介质中的流动特性^[12],为 MRV 技术用于工程流体流场分析拉开了序幕。大连理工大学的研究团队利用 MRV 研究了 CO₂ 和水在多孔介质中的流动特性。其中,蒋兰兰^[13]利用 MRV 测得了多孔介质内 CO₂ 和水以及 CO₂ 和癸烷驱替过程中的速度分布。Xue 等^[14]利用 MRV 测得了水合物在多孔介质中分解过程的瞬时流场分布。但人体内血液流动、石油天然气在岩层中的流动均属于小雷诺数低流速,而工程上多数流动问题都处于高雷诺数条件,这个需求也促进了核磁共振测速技术的不断发展。2003 年,Elkins 等^[15]将 MRV 应用于高雷诺数湍流流场测量,对雷诺数为 6 400 的圆管内速度分布进行了测量,MRV 结果与 LDV 结果吻合良好,MRV 测量不确定度在±3%之内。随后,MRV 在流体机械复杂结构内湍流流场测量的应用越来越广泛。Ryan 等^[16]利用 MRV 测量了垂直旋转风力涡轮周围的三维流场。Freudenhammer 等^[17]借助 MRV 研究了气缸盖几何形状变化对进气体积流量的影响。Hoffman 等^[18]利用 MRV 得到离心叶轮间的流场分布。

近年基于 MRI 的多种测量技术也在涡轮叶片内外冷却通道速度与温度场的全场测量方面获得了应用。美国斯坦福大学的研究团队还发展了核磁共振温度测量技术(MRT)和核磁共振浓度测量技术(MRC),实现了对气膜冷却全场三维速度场、温度场和粒子浓度场的测量,研究了圆形孔、扇形孔等多种孔型在不同流动条件和几何条件下的流场特性和传热特性^[19-21]。Issakhanian 等^[21]测量了平板气膜冷却圆形孔、扇形孔、椭圆形孔等多种孔形附近的流场和温度场分布,得到了一种冷却效率优于扇形孔的非扩散椭圆形气膜孔。通过对三维流场分析,发现椭圆形孔下游的肾形涡(CVP)更贴近壁面,影响范围较小,对冷却射流的抬升作用弱于扇形孔。因此,椭圆形孔相较于扇形孔,在下游的位置,仍能保持较好的气膜覆盖。冲击冷却通道结构复杂,基于光学方法的三维流场测量较难开展,MRV 在该结构的三维流场测量有明显优势。Benson 等^[22]利用 MRV 和稳态红外技术分别测得了 $Re=10\,000$ 时,一级静叶前部插件内部的三维速度分布和表面 Nu 分布。发现射流速度的分布和表面 Nu 的分布一致,即冲击孔周围速度较大, Nu 也较大。可见三维速度场的揭示为传热强化机理分析提供了重要依据。

Elkins 等^[23]借助 MRV 研究了涡轮叶片中弦段内部多流程弯道内的三维流场特性,获得了弯道部分的详细速度分布,显示出弯道过后存在一个强的冲击区域。Tsuru 等^[24]利用 MRV 获得了涡流矩阵内部通道内复杂的三维流场分布,发现上下层质量和动量掺混不仅发生在转弯区域,还在中间菱形连接区域。2019 年,美国陆军军官学院(西点军校)和斯坦福大学、韩国汉阳大学、德国罗斯托克大学、梅奥医学中心四个团队分别基于 MRV 测量同一 U 形弯道内的湍流流场^[25]。每个团队的硬件及参数设置不同,但得到的实验结果非常相似,仅在速度梯度最高的流动区域偏差稍大,这充分说明了 MRV 测量技术在叶片冷却通道复杂三维流场测量的可靠性。Ching 等^[26-27]利用 MRV 研究非轴对称凸起周围流场和下游的随机涡特性。他们不仅利用 MRV 得到三维时均速度分布,同时利用 MRV 获得了三维脉动速度分布。发现凸起尾迹存在一个分离泡,分离泡内部是一个反向旋转的涡对,两个涡之间的流动方向远离壁面,称为共上涡对,而下游则存在一个弱的共下涡对。此外,凸起偏角越大,尾迹区的

脉动强度越大,从凸起后缘脱落的涡减弱,而从前缘脱落的涡强度保持不变,这说明 MRV 技术可以用于复杂流场内涡系结构的解析。Siekman 等^[28]以 MRV 圆柱阵列测量结果为参考,验证雷诺平均数值模拟方法(RANS)和非稳态雷诺平均数值模拟方法(URANS)的准确性,结果显示 URANS 预测精度更高。可以预见,基于 MRV 技术得到的三维速度分布将为数值模拟方法及模型的验证提供重要的基准实验数据。

综上所述,MRV 凭借其在复杂结构内部三维流场测量方面的独特优势,已经成为全流场精确测量的前沿技术,但目前国内在该方面的应用研究还未曾报道。本文基于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研究平台,以大宽高比肋柱通道为对象,对 MRV 应用于复杂通道全场三维速度测量进行初步探索。

肋柱结构常用于叶片尾缘内部通道的强化换热。研究表明^[29-31],肋柱通道中,一方面肋柱扰动通道端壁边界层的发展,另一方面来流对肋柱前缘产生冲击,肋柱前缘和端壁交界区域形成马蹄涡并绕四周发展,肋柱尾迹卡门涡脱落,并与下游肋柱相互干扰。这些流动结构被限制在通道上下端面之间,相互干扰发展,具有显著的三维特征。而目前对肋柱通道流动特征的实验研究大多局限在局部区域,对肋柱阵列影响下的通道全场三维流动特征,特别是对近壁面附近流场特征的详尽实验研究还比较欠缺,对肋柱强化传热机理的理解也有欠全面。本研究将利用 MRV 得到肋柱通道内复杂的全场三维流场分布,分析肋柱通道三维流场的局部细节特征,为进一步理解肋柱强化换热机理及肋柱冷却优化设计提供参考。

1 MRV 基本原理

核磁共振成像(MRI)主要利用氢(H)原子核在磁场中的电磁特性进行成像。由于氢原子核带电荷会产生随机自旋,在外界静态强磁场 B_0 (为叙述方便,本文假设 B_0 沿 Z 轴正方向)中受到磁场力的作用,H 原子核绕 B_0 以频率 $\omega=\gamma B_0$ 进动,其中 ω 为拉莫尔频率, γ 为原子核旋磁比。由于单个 H 原子核的进动磁场相位不同,大量 H 原子核的磁场合成后,在和 B_0 相垂直的方向即 XY 平面内的磁化矢量分量为零,和 B_0 一致方向即 Z 向产生有剩余磁化矢量 M_0 ,处于宏观平衡状态。此时,短暂施加频率也为 ω 的射频激励(RF)磁场,

H 原子核将产生核磁共振现象, 进动磁场偏离平衡态, 净磁化矢量从 M_0 变为 M , 大小和方向均发生了变化。进动的 M 在 XY 平面内产生横向磁化矢量 M_{XY} 。短暂射频激励停止后, M 将逐渐回复到 M_0 , M_{XY} 逐渐减小, 该过程中 XY 平面内的变化磁场 M_{XY} 在外置的接受线圈上产生电流, 输出的电压值即为核磁共振仪输出信号 MR。

从 RF 激励作用结束到接收回波信号这段时间称为回波时间 TE, 相邻两次射频激励之间的时间间隔称为脉冲重复时间 TR。

核磁共振仪可以输出扫描区内所有原子核产生的 MR 信号, MR 信号所对应的空间位置信息用不同的编码(如频率编码, 相位编码等)来区别。如在 Z 方向施加静态截面选择梯度磁场 G_{SS} , 其拉莫尔频率在 Z 方向成线性梯度变化, 即同一 Z 截面上拉莫尔频率相同。此时, 频率一定的射频激励仅能激发拉莫尔频率与该频率相同的 Z 截面上的 H 原子核, 以实现扫描 Z 截面的选择。同一截面上 X 和 Y 方向的位置信息用频率和相位编码来识别。具体来说, 在施加 Z 向截面选择梯度磁场和 RF 激励后, Y 方向再施加相位梯度磁场 G_{PE} , 使得不同 Y 位置原子核进动相位不同, 短暂施加 G_{PE} 之后不同 Y 位置原子核进动相位成线性变化, MR 信号中不同相位对应不同 Y 位置坐标。产生回波信号时在 X 方向也施加频率梯度磁场 G_{FE} , 使不同 X 位置的原子核以不同频率进动, MR 信号中不同频率即对应不同 X 位置坐标。每一次施加 RF 激励和截面选择梯度磁场 G_{SS} 、相位梯度磁场 G_{PE} 与频率梯度磁场 G_{FE} , 就会产生一组 MR 回波信号, 多次重复产生多组 MR 信号, 经过二维傅里叶变换处理可得到扫描区域 MR 信号幅值和相位信息, 组成截面内信号强度和相位灰度图片。以上为获得三维空间分布常用的二维扫描方法(见图 1(a))。

本文采用先进的三维扫描方法(见图 1(b)), 与二维扫描方法不同, 三维扫描序列 RF 每次激励一定的层厚(包含多个层面), 然后在 $t_4 \sim t_5$ 层面选择方向(Z 方向)施加相位梯度磁场, 使不同 Z 位置处的核进动相位呈线性分布。利用该方法采集得到的是三维空间的 MR 信号, 经过三维傅里叶变换处理可得到扫描区域 MR 信号幅值和相位信息。该方法同步测量空间多个平面内的信息, 显著提高了测量精度。

根据前述核磁共振成像原理, MRI 技术用于测量流场速度时, 若流体介质密度均匀分布, 则

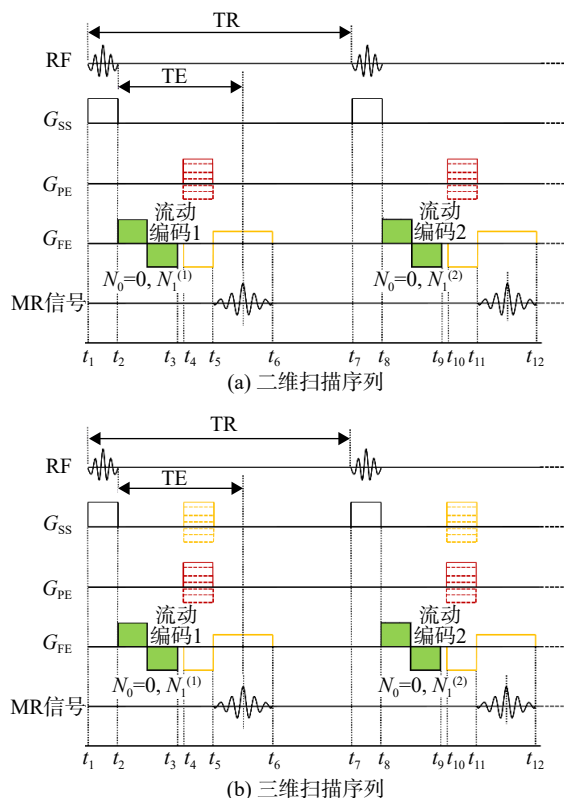


图 1 单方向速度编码扫描序列

Fig. 1 Scanning sequence with single direction velocity encoding

流场中 MR 信号强度分布均匀, 但 MR 信号的相位与 H 原子核运动速度相关。例如, 在 X 向梯度磁场 $G(t)$ 中沿 X 方向以宏观速度 u 运动的 H 原子核, 其当地拉莫尔频率 ω_1 可表述如下:

$$\omega_1(x, t) = \gamma [B_0 + G(t) \cdot x(t)] \quad (1)$$

其中 $x(t) = x_0 + u(t - t_0)$, x_0 为初始时刻 t_0 的位置。

由此, H 原子核进动的相位随梯度磁场和原子核宏观运动速度发生变化, 可表述如下:

$$\Phi(x, \tau) = \Phi_0 + \gamma x_0 \cdot \int_0^\tau G(t) dt + \gamma u \int_0^\tau G(t) t dt + O(t^n) \quad (2)$$

其中 Φ_0 为初始相位, 右侧第 2 项积分 N_0 反映梯度磁场对静止 H 原子核进动相位的影响, 第 3 项反映 H 原子核运动速度 u 对进动相位的影响。为去除梯度磁场对相位的影响(即右侧第 2 项变为 0), 只考虑运动速度带来的相位变化, 可对运动 H 原子核施加一次正负双向频率梯度磁场 G_k (即流动编码), 如图 2 所示。正负双向梯度磁场带来的静止 H 原子核相位变化为 0, 即式(2)右侧第 2 项变为 0; 由 H 原子核宏观运动速度带来的相位变化 Φ_1 (即仅考虑右边第 3 项), 可表述如下:

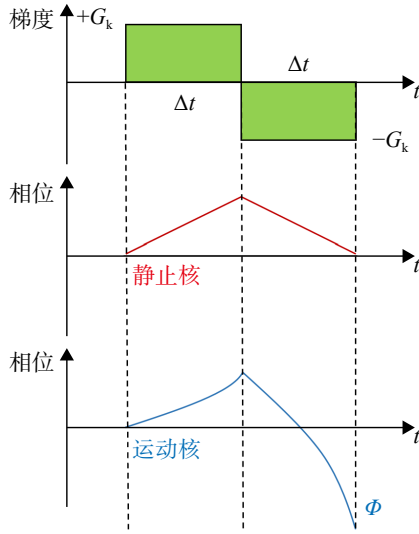


图 2 流动编码

Fig. 2 Flow encoding

$$\begin{cases} \Phi_1 = -\gamma u N_1 \\ N_1 = G_k \Delta t^2 \end{cases} \quad (3)$$

因此, MRV 进行速度测量时(参见图 2), 在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内施加 Z 向截面选择梯度磁场 G_{SS} 和 RF 激励后, 在 $t_4 \sim t_5$ 进行相位编码与 $t_4 \sim t_6$ 进行频率编码前, 先在 $t_2 \sim t_3$ 进行一次流动编码, 使式(2)右侧第 2 项为 0。图 1 为在 X 方向进行流动编码, 测量 X 方向速度 u 三维空间分布的 MRV 扫描序列示意图。为去除式(2)中初始相位 Φ_0 的影响(即右侧第 1 项变为 0), $t_7 \sim t_{12}$ 内施加第 2 次流动编码重复 $t_1 \sim t_6$ 的过程, 两次流动编码的初始相位 Φ_0 相同。因此, 两次流动编码引起的进动相位差可表示为

$$\Delta\Phi = \Phi_1^{(2)} - \Phi_1^{(1)} = \gamma u (N_1^{(1)} - N_1^{(2)}) = \gamma u \Delta N_1 \quad (4)$$

由此计算得到该 X 方向速度为

$$\begin{cases} u = \frac{\Delta\Phi}{\pi} \sigma \\ \sigma = \frac{\pi}{\gamma \Delta N_1} \end{cases} \quad (5)$$

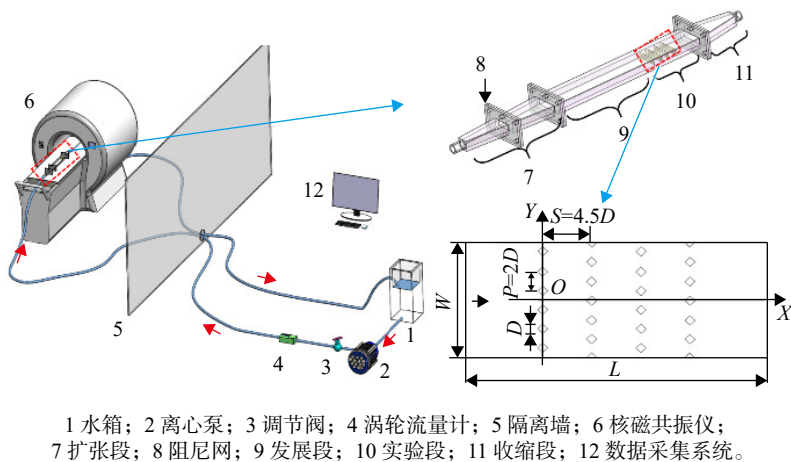
式(5)中, σ 反映流动编码磁场强度引起的相位变化程度, 因为 $\Delta\Phi$ 在 $-\pi \sim \pi$ 之间变化, 所以, σ 表征测量的最大速度, 实验时设定 σ , 系统根据所设定的 σ , 即所测最大流速值, 计算所需的流动编码磁场强度。

上述扫描序列所得 MR 信号经过三维傅里叶变换, 获得不同 X、Y、Z 位置 MR 信号的幅值与相位分布信息, 由相位分布根据式(5)计算得到该空间内 X 方向的时均速度分布 $u(X, Y, Z)$ 。

利用同样的原理, 改变流动编码方向, 即可得到整个三维扫描区域的 Y 方向时均速度 v 和 Z 方向时均速度 w 分布。

2 实验装置

西安交通大学生物医学与健康工程研究院拥有一台西门子生产的新一代数字化磁共振成像设备 MAGNETOM Spectra 3.0T, 用于科学研究。该设备具备聚能腔 Direct RF 内置射频技术, 在获得高质量影像的同时保持较低的特异吸收率; 它采用第 4 代 Tim 全景矩阵技术和 Tim TX TureForm 适形技术, 可以获得优异的信噪比与均匀度, 十分符合科学研究的要求。基于该设备安装情况和舱内参数, 设计了如图 3 所示的实验系统, 实验通道采用有机玻璃制作, 包括扩张段、发展段、实验段和收缩段 4 部分, 各部分之间采用法兰和尼龙螺栓连接, 置于核磁共振成像设备的测试舱内。



1 水箱; 2 离心泵; 3 调节阀; 4 涡轮流量计; 5 隔离墙; 6 核磁共振仪; 7 扩张段; 8 阻尼网; 9 发展段; 10 实验段; 11 收缩段; 12 数据采集系统。

图 3 大宽高比肋柱冷却通道流动测量实验系统示意图

Fig. 3 Illustration of flow measurement experiment system for large aspect ratio channel with pin fins

流体介质为常温水,置于核磁共振设备房间之外的离心水泵,经软管将水输送,流过调节阀和涡轮体积流量计,穿过隔离墙进入在MRI房间之内的实验通道,之后经软管流回至水箱。图4为实验现场照片。实验段为一大宽高比矩形通道,横截面尺寸为 $100\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ (即宽高比为4:1),通道的水利直径 $D_h=40\text{ mm}$ 。实验过程中,通过调节阀控制体积流量计示数 A ,保证来流雷诺数 $Re=u_b D_h/\nu=10\,000$,其中 ν 为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 水的运动黏度, $\nu=1.004 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$,则 $u_b=0.251\,0\text{ m/s}$ 。实验过程中,通过调节阀控制体积流量计示数,保证来流雷诺数为 $10\,000$,建立恒定流动。



图4 实物图

Fig. 4 Real illustration

实验段矩形通道内布置了4排交错分布的菱形肋柱,如图3右下角所示。本课题组Xu等^[32]的传热实验发现,在圆形、方形、水滴形等9种肋柱形状中,菱形肋柱传热强化效果最优。因此,本文选择传热效果最优的菱形肋柱作为研究对象,希望通过MRV解析通道内的三维流动特性,揭示其传热强化的流动机理,为肋柱冷却方式的进一步优化提供参考。本实验通道的几何参数和内部肋柱的排布与Xu等^[32]相同。肋柱高度和矩形通道高度相等,为 25 mm ,特征长度 $D=8\text{ mm}$ 。第1和第3排分别布置了6个完整的肋柱,第2和第4排包括5个完整肋柱和2个半肋柱,流向间距 $S=4.5D$,横向间距 $P=2D$ 。

根据PIV实验结果(后文第4部分将提到)得知肋柱通道3个方向最大流动速度不超过 1.8 m/s ,因此 X 、 Y 、 Z 方向的 σ 均设为 1.8 m/s ,考虑到所测空间的大小和采集时间效率,本实验初步选择空间分辨率为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。MRV测量的回波时间TE和脉冲重复时间TR影响信噪比和

扫描时间。如图2所示,从RF激励结束到接受回波信号之间要完成流动编码、相位与频率编码。TE过短,编码无法完成,TE过长,不仅增加扫描时间,同时MR信号衰减过多。若相邻两次射频脉冲的时间间隔TR过短,第1次激励产生的MR信号还未完全衰减,将干扰第2次激励产生的MR信号;TR过长则延长扫描时间。同时,不同介质所需的编码时间和信号衰减时间也有差异^[33]。参考Elkins等^[23]和Benson等^[25]的实验工作,本研究也对TE和TR的设定范围进行了摸索,发现在将两参数设置如下:TE为 4.76 ms 、TR为 8.40 ms 后,可以在适宜时间内获得较低噪声的测试结果。设置扫描参数后,启动扫描程序,10 min内扫描得到肋柱通道内 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 空间范围内的MR信号。由MR信号的相位计算得到三维速度分布。通过实验通道以及内部肋柱分布的几何参数进行标准基准图像的定位和校正。

3 误差分析

Elkins等^[15]指出MRV测得的 i 方向(i 代指 X 、 Y 、 Z)速度不确定度 $\tilde{u}_i$ 通过该方向上的 σ 和所采信号的信噪比 R_{SN} 结合式(6)计算得到。

$$\tilde{u}_i = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\sigma_i}{R_{\text{SN}}} \quad (6)$$

其中,信噪比不仅和空间分辨率、扫描时间相关,还与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,激励的次数增加,信噪比提高;流速低的区域(如肋柱尾迹区),MR信号较弱,当地的信噪比较低,速度测量不确定度较大。

根据式(6)得出本次测量来流 X/D 在 $-5 \sim -4$ 区域3个方向的速度不确定度均小于 $6 \times 10^{-3}\text{ m/s}$,与Elkins等^[15]的结果十分接近,验证了该实验结果的可靠性。

4 结果与讨论

4.1 可靠性验证

如图5所示为基于MRV得到的肋柱通道测量区域内合速度大小的空间分布,其中 X 、 Y 、 Z 分别指流向、通道宽度方向和通道高度方向, $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 和 $\bar{w}$ 分别为3个方向的时均速度。 U_0 为 $X/D=-5$ 截面的 X 向平均速度,实验测得 $U_0=0.253\,7\text{ m/s}$,与利用体积流量计示数计算得到的 u_b 之间的误差仅为 1.08% ,说明了MRV测量结果的可靠性。此外,从图5可以直观看到菱形肋柱两侧的高速区

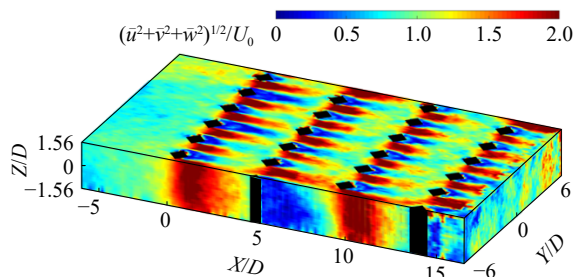


图 5 大宽高比菱形肋柱通道三维速度大小分布云图

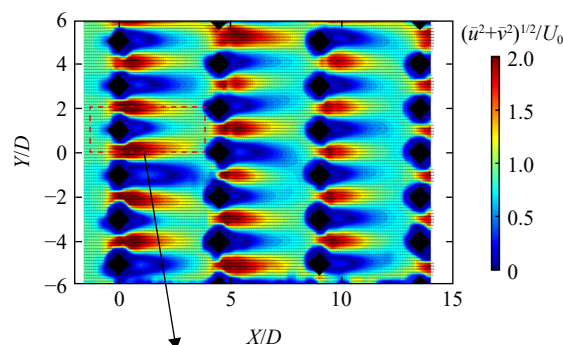
Fig. 5 Distribution of 3D velocity magnitude in a large aspect ratio channel with diamond pin fins

与肋柱下游的低速区。

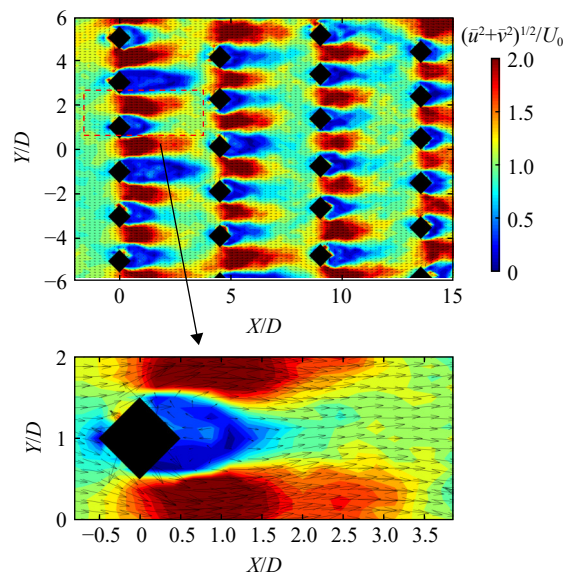
为了验证 MRV 实验系统和测量方法的可靠性, 本文针对同一实验段, 利用 PIV 测量了肋柱通道中间截面(即 $Z/D=0$)上的二维速度分布, PIV 实验的采样频率为 1 000 Hz, 采样数为 2 500 对, 一对的时间间隔为 400 μs ; 后处理设定的判读区域为 16 像素 $\times$ 16 像素, 计算步长为 4 像素, 重叠率为 50%, 测量系统和方法的详细情况可参阅本文作者之前的研究工作^[34]。

图 6(a)和图 6(b)给出了基于 PIV 和 MRV 测得的通道 $Z/D=0$ 截面上无量纲的速度大小分布云图。对比两图可以看到, 利用两种技术所测平面内的速度分布基本一致。可以发现在菱形肋柱前缘尖角附近形成了明显的滞止区, 两侧尖角附近形成了加速区, 在肋柱的正后方形成了回流区。值得一提的是, PIV 结果 X 、 Y 两个方向的分辨率为 0.81 mm $\times$ 1.07 mm, MRV 结果 X 、 Y 、 Z 方向的分辨率为 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 1 mm, 因此 PIV 速度云图 X 方向速度矢量分布更密。MRV 测量的分辨率可以进一步提高, 但是提高 MRV 测量分辨率会降低测量结果的信噪比。为获得可靠的测量结果, 如何平衡地设置分辨率、信噪比、扫描时间等参数也是正在开展的工作。图 6 也给出了 $X/D=0$ 、 $Y/D=1$ 肋柱周围的细节流场分布对比。可以看到, PIV 结果肋柱周边的低速区比 MRV 结果的低速区大。因为肋柱附近和回流区, 受光线和粒子数量的影响, PIV 图片的粒子质量不好, 所得速度误差可能偏大。而 MRV 测量精度不受光线和粒子质量的影响, 在肋柱壁面附近、回流区等 PIV 粒子质量差的区域, MRV 测量更具优势。

同时, PIV 测量各点的速度由周围计算区域内示踪粒子的位置信息计算得到, 所得测量点速度代表计算区域内粒子速度的平均值。若相机的空间分辨率较低, 在速度梯度大的区域, PIV 测量



(a) PIV结果



(b) MRV结果

图 6 PIV 和 MRV 中间截面速度分布对比

Fig. 6 Comparison of velocity distribution in the mid-plane of PIV and MRV

误差增大。因此, 图 6(a)中 PIV 测得的低速区较图 6(b) MRV 测得的低速区范围大。可以看到, 图 6(a)中肋柱壁面周围、肋柱上下尖角附近、回流区及回流区两侧这些速度变化比较剧烈的区域, PIV 测得的速度分布更加均匀。而 MRV 利用 H 原子核的电磁特性, 其测量结果由扫描点 H 原子核的进动相位决定, 不受周围 H 原子核影响。MRV 在上述速度梯度大的区域和回流区内, 所测各点的速度值比 PIV 高。MRV 测量结果不对称主要是因为肋柱安装偏差, 此外, 肋柱尾迹区部分区域流速极低, 当地 MR 信号的信噪比较低, 速度测量不确定度较大, 这也是图 6(b) MRV 测量

结果局部噪声较大的原因, 后续仍需优化 MRV 实验过程中的参数设置, 通过多次(3~4次)扫描, 并对结果进行平均以提高测量结果的信噪比。

总体而言, MRV 测量不受粒子质量的影响, 所测各点速度无相关影响, 在滞止点、壁面附近、回流区等区域测量结果较 PIV 可信度更高。

图 7 对比了基于 MRV 和 PIV 所测得的肋柱下游 $X/D=1.1$ 处 u/U_0 沿 Y 方向的变化, 可见, MRV 和 PIV 测量结果基本一致, 除了在 $Y/D=-6$ 附近。这是因为 $Y/D=-6$ 靠近通道侧壁, 是 PIV 相机拍摄的边缘, 该处光线差, 图片粒子质量较差, PIV 误差因而也较大。除了在 $Y/D=-6$ 附近区域外, 其他区域 MRV 和 PIV 实验结果偏差在 15% 之内, 参见图 7 标注。图 6 和图 7 验证了 MRV 实验的可靠性及其优势。

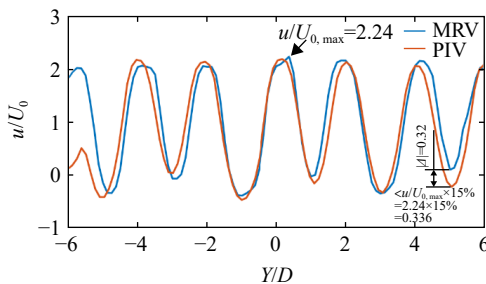


图 7 $X/D=1.1$ 处流向速度分布曲线对比

Fig. 7 Comparison of streamwise velocity distribution curves at $X/D=1.1$

图 8 展示了 $X/D<-2$ 区域边界层内 $\bar{u}^+$ 随 Z^+ 变化曲线, 与普朗特混合长度理论提供的理论解基本吻合, 进一步验证了 MRV 测量的可靠性。不过, 本研究为了保证较高的信噪比, 分辨率难以进一步提高, 没有测得近壁面层流底层内 $\bar{u}^+$ 的分布。

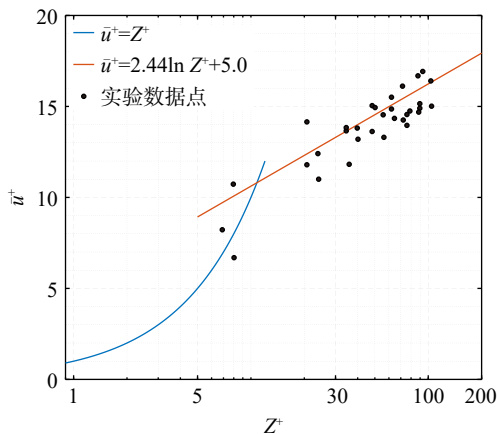
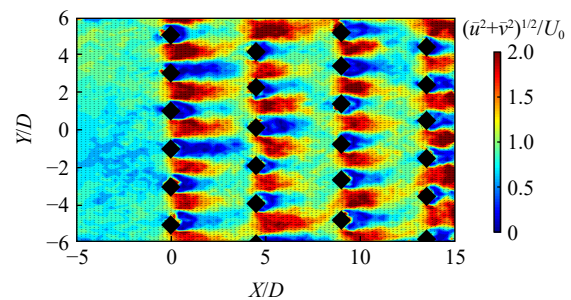


图 8 $X/D<-2$ 区域 $\bar{u}^+$ 随 Z^+ 变化曲线

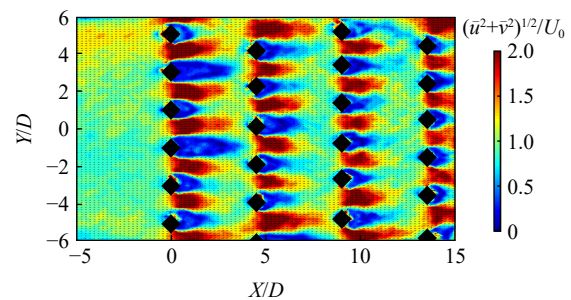
Fig. 8 $\bar{u}^+$ versus Z^+ in the region of $X/D<-2$

4.2 菱形肋柱通道三维速度场分析

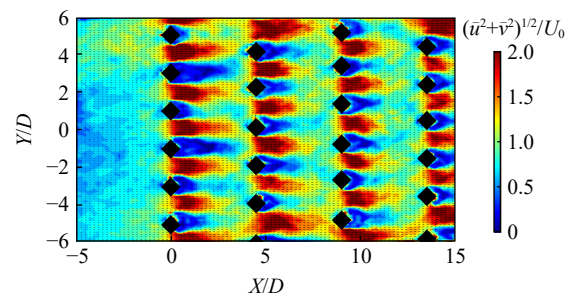
图 9 为 MRV 测得的 Z 方向 3 个不同截面上的平面速度大小分布。通过对比发现, Z 方向不同截面上速度分布趋势一致, 但相对于 $Z/D=0$ 对应的中心面而言, $Z/D=\pm 1.25$ 两个截面靠近端壁, 受端壁边界层的影响主流速度变小, 这与 Otto 等^[35]的结论一致。特别是在肋柱上游 $X/D<0$ 处, 边界层的影响更显著。但在布置有肋柱的区域, 因为肋柱的扰动, 边界层发展被破坏, 流场发展均匀化, 所以肋柱区域不同截面速度分布差异不太明显。从图 9 还可以看到, 肋柱尾迹区长度从第 1 排到第 3 排逐渐减小, 第 3 排和第 4 排相差不大, 说明流动在第 3 排之后趋于充分发展。肋柱后的速度呈周期性分布, 即肋柱正后方尾迹区速度较小, 横向相邻两个肋柱的尖角之间, 速度较大。速度较大与较小两个区域过渡的地方存在较大的速度梯度, 会引起流体强烈的剪切脉动, 可强化



(a) $Z/D=-1.25$



(b) $Z/D=0$



(c) $Z/D=1.25$

图 9 不同 Z/D 处 XY 截面上的速度分布

Fig. 9 Velocity distribution in XY plane at different Z/D

当地换热。

MRV 测量的优势在于能够提供空间三维速度分布, 为研究复杂的三维流动结构提供方便。肋柱通道内肋柱和端壁交汇处流动结构复杂, 对肋柱强化端壁上对流换热能力有决定性影响, 肋柱结构不同, 该处流场分布也不同。图 10 给出第 1 排 $X/D=0, Y/D=1$ 处肋柱和端壁交界区域的局部流线分布, 从图中可以看到, 流体在肋柱前缘附近分成两支, 在肋柱两侧向下冲击端壁, 增强当地换热, 之后螺旋绕过两侧尖角抬升。可以推断该区域端壁边界层内的涡与肋柱相遇后将变为复杂的三维马蹄涡, 可能是当地传热强化的主要原因。

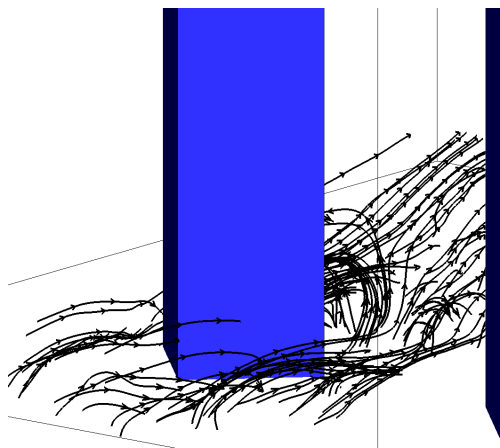


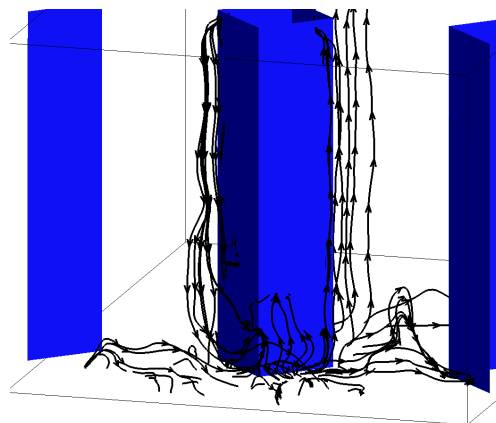
图 10 $X/D=0, Y/D=1$ 处肋柱周围部分流线分布

Fig. 10 Streamlines distribution around pin fin located at $X/D=0$ and $Y/D=1$

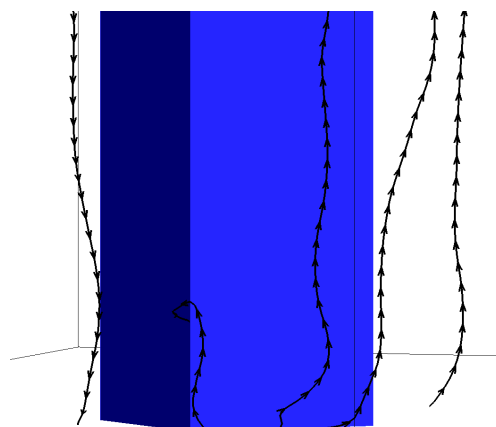
4.3 菱形肋柱通道三维涡量场及传热强化流动机理分析

为了进一步了解菱形肋柱对通道流场的影响, 基于 MRV 所测的通道内的三维速度场, 计算出了通道内的涡量场, 图 11 给出肋柱和端壁交界区域的部分三维涡线分布, 从图 11(a) 可以明显看到主流在端壁附近的涡线沿 Y 方向, 说明在端壁边界层内形成横向的涡。边界层涡遇到肋柱后向两侧卷起, 变为马蹄涡。由于肋柱贯穿整个通道高度, 可以看到在肋柱前缘, 马蹄涡沿着肋柱两侧一边向上抬升, 一边向肋柱两侧迁移, 演变为沿通道高度方向的剪切层涡。从图 11(b) 可以看到肋柱两侧的剪切层涡沿 Z 轴方向相反。

在掌握了肋柱和端壁交汇区域流场中的涡量分布特征后, 现在了解一下通道内局部截面上的涡量分布。图 12 给出端壁附近 $Z/D=-1.25$ 截面上 3 个方向的涡量分布云图。对比发现, 总体上



(a) 概貌图



(b) 肋柱前缘附近细节

图 11 $X/D=0, Y/D=1$ 处肋柱周围涡线分布

Fig. 11 Vortexlines distribution around pin fin located at $X/D=0$ and $Y/D=1$

讲 X 方向的涡(纵向涡)较弱; $X/D < -1.0$ 的区域 Y 方向的涡量最强(图中红色框区域), 如图 11 所呈现的, 为边界层涡; 在肋柱前缘和后缘两侧 Z 方向涡量大。结合图 11 的结果, 说明由于菱形肋柱前缘两侧面的影响, 边界层内的涡遇到肋柱后并没有沿 X 方向向下游延展, 而是沿肋柱爬升迅速演变为肋柱两侧沿 Z 方向的剪切层涡, 而马蹄涡仅存在于肋柱前缘两侧。菱形肋柱周围涡系的分布和演化特征可能是由其独特的形状结构所致。Xu 等^[32] 的传热结果表明, 菱形肋柱前缘两侧壁面换热强化极大, 两侧尖角下游换热强化仍然较强。从上述涡量分布特征可以看到, 这两个区域的换热强化机理有所差别。从端壁与肋柱交汇附近的三维流线与涡线可以看到, 菱形肋柱前缘两侧马蹄涡对端壁传热强化起重要作用, 而菱形肋柱两侧尖角下游马蹄涡已经不明显, 剪切层内的涡可能是驱动当地换热强化的主要因素。

值得再次强调的是, 复杂空间内三维流线与

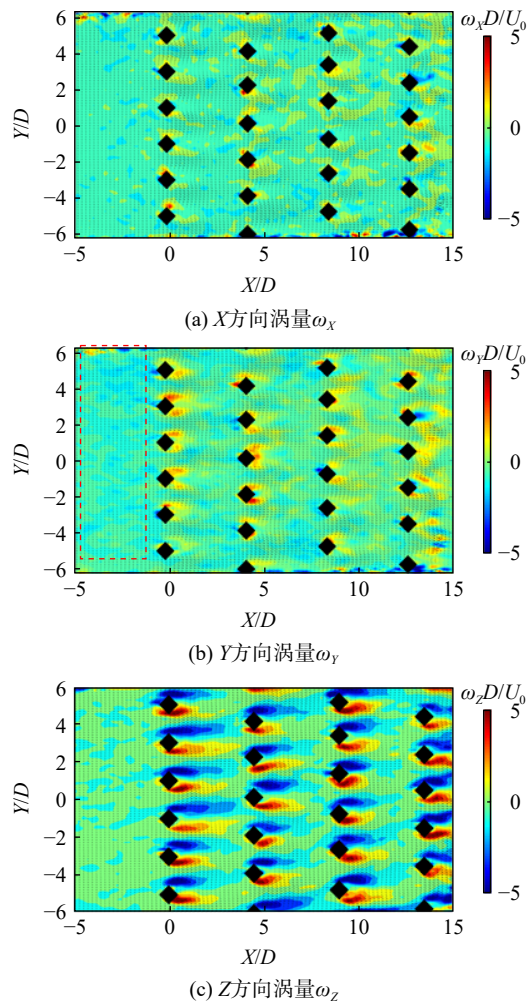


图12 $Z/D=-1.25$ 平面不同方向涡量云图和二维速度矢量分布

Fig. 12 Vorticity contours in different directions and 2D velocity vector distribution in $Z/D=-1.25$ plane

涡量分布基于传统的流场测量技术很难获得,但MRV可以实现全场三维速度的高精度、高分辨率测量,为掌握复杂结构内的三维流场细节特征,揭示对流换热内在机理提供重要方法。

5 结 论

作为第一步,本文实现了MRV用于菱形肋柱通道内全场三维速度的测量,将菱形肋柱通道内MRV实验结果与PIV实验结果进行了对比,验证了MRV实验系统及方法的可靠性;并对菱形肋柱通道内的流场特性进行了解析,得到的结论如下:

- 1) 在实验技术方面,发现在速度变化剧烈的区域,MRV相较于PIV具有更高的测量精度。
- 2) 在菱形肋柱通道速度分布特征方面,发现端壁附近流体靠近肋柱时,先向下冲击端壁,绕

过肋柱两侧尖角处向上抬升。

3) 在菱形肋柱周围涡量分布特征方面,发现端壁边界层内的涡遇到肋柱之后,沿肋柱两个侧面爬升,迅速演变为肋柱两侧尖角附近以及下游的剪切层涡,马蹄涡仅仅存在肋柱前缘两侧。

4) MRV解析的肋柱通道全场三维速度分布特征及肋柱与端壁交汇处复杂的三维涡结构演化特征可以为肋柱强化传热机理研究提供重要参考。

值得一提的是,在实验过程中,设置过不同的参数值,发现流动编码的时间、TE、TR、 σ 等参数对MRV信噪比和测量精度有重要影响。将进一步研究不同参数对MRV测量误差的影响规律,为MRV实验技术的推广应用提供指导。

致 谢:

特别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老师团队提供的MRI设备和实验指导。

参考文献:

- [1] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. New York, US: CRC Press, 2012.
- [2] 刘松龄, 陶智. 燃气涡轮发动机的传热和空气系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018.
- [3] 朱惠人, 张丽, 郭涛. 高温透平叶片的传热与冷却[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2017.
- [4] 曹玉璋, 陶智, 徐国强, 等. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [5] SHI Shengxian, DING Junfei, NEW T H, et al. Light-field camera-based 3D volumetric particle image velocimetry with dense ray tracing reconstruction technique[J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(7): 1-16.
- [6] QU Qianwei, CAO Zhang, XU Lijun, et al. Reconstruction of two-dimensional velocity distribution in scramjet by laser absorption spectroscopy tomography[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(1): 205-212.
- [7] ZHANG Juqi, QI Hong, REN Yatao, et al. Acoustic tomography of temperature and velocity fields by using the radial basis function and alternating direction method of multipliers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188: 122660.
- [8] MORAN P R. A flow velocity zeugmatographic interlace for NMR imaging in humans[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 1982, 1(4): 197-203.
- [9] KU D N, BIANCHERI C L, PETTIGREW R I, et al. Evaluation of magnetic resonance velocimetry for steady flow[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 1990, 112(4): 464-472.
- [10] OSHINSKI J N, KU D N, PETTIGREW R I. Turbulent fluctuation velocity: the most significant determinant of signal loss in stenotic vessels[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1995, 33(2): 193-199.
- [11] BOGREN H G, BUONOCORE M H. 4D magnetic resonance velocity mapping of blood flow patterns in the aorta in young vs. elderly normal subjects[J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 1999, 10(5): 861-869.

- [12] PHILIP CHANG C T, WATSON A T. NMR imaging of flow velocity in porous media[J]. *AIChE Journal*, 1999, 45(3): 437-444.
- [13] 蒋兰兰. 多孔介质内多相流动的核磁共振成像实验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2010.
JIANG Lanlan. Experimental study on multiphase fluid flow in porous media by magnetic resonance imaging[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] XUE Kaihua, YANG Lei, ZHAO Jiafei, et al. The study of flow characteristics during the decomposition process in hydrate-bearing porous media using magnetic resonance imaging[J]. *Energies*, 2019, 12(9): 1736.
- [15] 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.
- [16] RYAN K J, COLETTI F, DABIRI J O, et al. Three-dimensional velocity measurements around and downstream of a rotating vertical axis wind turbine[R]. ASME GT2014-26285, 2014.
- [17] 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.
- [18] HOFFMAN D W, VILLAFANE 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.
- [19] ISSAKHANIAN E. 3D velocity and scalar field measurements of discrete hole film cooling flows[D]. Stanford, US: Stanford University, 2012.
- [20] ISSAKHANIAN E, ELKINS C J, EATON J K. In-hole and main-flow velocity measurements of low-momentum jets in crossflow emanating from short holes[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(6): 1765-1778.
- [21] ISSAKHANIAN E, ELKINS C J, EATON J K. Film cooling effectiveness improvements using a nondiffusing oval hole[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2016, 138(4): 041004.
- [22] BENSON M J, BINDON D, COOPER M, et al. Detailed velocity and heat transfer measurements in an advanced gas turbine vane insert using MRV and IR thermometry[R]. ASME GT2020-14984, 2020.
- [23] ELKINS C J, MARKL M, IYENGAR A, et al. Full-field velocity and temperature measurements using magnetic resonance imaging in turbulent complex internal flows[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004, 25(5): 702-710.
- [24] TSURU T, ISHIDA K, FUJITA J, et al. Three-dimensional visualization of flow characteristic using a magnetic resonance imaging (MRI) in a lattice cooling channel [R]. ASME GT2018-76409, 2018.
- [25] BENSON M J, BANKO A J, ELKINS C J, et al. The 2019 MRV challenge: turbulent flow through a U-bend[J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(6): 1-17.
- [26] CHING D S, ELKINS C J, EATON J K. Investigation of geometric sensitivity of a non-axisymmetric bump: 3D mean velocity measurements[J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(9): 1-14.
- [27] CHING D S, ELKINS C J, ALLEY M T, et al. Unsteady vortex structures in the wake of nonaxisymmetric bumps using spiral MRV [J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(10): 1-17.
- [28] SIEKMAN M, HELMER D, HWANG W, et al. A combined CFD/MRV study of flow through a pin bank[R]. ASME GT2014-25350, 2014.
- [29] GOLDSTEIN R J, KARNI J. The effect of a wall boundary layer on local mass transfer from a cylinder in crossflow[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1984, 106(2): 260-267.
- [30] CHYU M K, HSING Y C, NATARAJAN V. Convective heat transfer of cubic fin arrays in a narrow channel[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(2): 362-367.
- [31] WON S Y, MAHMOOD G I, LIGRANI P M. Spatially-resolved heat transfer and flow structure in a rectangular channel with pin fins[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(8/9): 1731-1743.
- [32] XU Jin, ZHANG Ke, DUAN Jingtian, et al. Systematic comparison on convective heat transfer characteristics of several pin fins for turbine cooling[J]. *Crystals*, 2021, 11(8): 977.
- [33] 熊国欣, 李立本. 核磁共振成像原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [34] 段敬添, 张科, 徐进, 等. 圆形肋柱通道强化换热流动机理实验研究[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(4): 10-18.
DUAN Jingtian, ZHANG Ke, XU Jin, et al. Experimental investigation on flow mechanism driving heat transfer enhancement in a channel with circular pin fins[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(4): 10-18. (in Chinese)
- [35] OTTO M, GUPTA G, TRAN P K, et al. Investigation of endwall heat transfer in staggered pin fin arrays[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2021, 143(2): 021009.

(编辑: 秦理曼)