

冠齿脉冲射流冲击平直靶板对流换热实验

吕元伟^{1,3}, 赵韞铎¹, 张靖周², 单 勇², 孙文静², 张镜洋¹, 罗欣洋³

- (1. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
3. 中国航空工业集团有限公司 金城南京机电液压工程研究中心, 南京 210006)

摘 要: 采用红外热像测试技术对占空比(DC)恒定为0.5的冠齿脉冲射流冲击平直靶面,在不同雷诺数(5 000~20 000)、无量纲冲击间距(2~8)和工作频率(10~25 Hz)下进行了对流换热实验研究。结果表明:在小射流冲击间距下,冠齿脉冲射流冲击局部努塞尔数云图在射流驻点附近呈现较为明显波瓣状分布;冠齿喷管在脉冲射流冲击中依然体现出强化对流换热的作用机制,雷诺数和工作频率分别为10 000和15 Hz工况下,射流冲击驻点附近的表面传热系数相对圆形脉冲射流提高幅度在20%~30%之间;在冠齿脉冲射流中,脉冲主动激励和冠齿被动诱导激励之间存在着内在的相干机制,导致其对流换热特性与冠齿连续射流和圆形脉冲射流有较大的差异。

关 键 词: 射流冲击; 冠齿喷管; 脉冲射流; 平直靶板; 对流换热

中图分类号: V235

文献标志码: A

Experiment on convective heat transfer of pulsed chevron jet impingement on flat plate

LÜ Yuanwei^{1,3}, ZHAO Yunduo¹, ZHANG Jingzhou², SHAN Yong²,
SUN Wenjing², ZHANG Jingyang¹, LUO Xinyang³

- (1. College of Astronautics,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems,
Aviation Industry Corporation of China, Limited, Nanjing 210006, China)

Abstract: An experimental investigation was performed to study the convective heat transfer characteristics of pulsed chevron jet impingement on a flat plate, by using infrared imaging technique. The pulsed jet was fixed at a specific duty cycle (DC) of 0.5, the experiments were conducted under Reynolds number of 5 000—20 000, Dimensionless impingement spacing of 2—8 and working frequency of 10—25 Hz. Results indicated that the local Nusselt number distribution in the vicinity of jet stagnation presented a lobed pattern resembling the shape of the configuration. The pulsed chevron jet was confirmed to be capable of enhancing the jet impingement heat transfer related to the pulsed round jet. Under Reynolds number of 10 000 and working frequency of 15 Hz, the convective heat transfer in the vicinity of

收稿日期: 2021-09-25

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20210303); 国家自然科学基金(52206091)

作者简介: 吕元伟(1990—),男,讲师,博士,主要从事航天器传热传质研究。E-mail: lyuanwei@nuaa.edu.cn

引用格式: 吕元伟, 赵韞铎, 张靖周, 等. 冠齿脉冲射流冲击平直靶板对流换热实验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 787-794. LÜ Yuanwei, ZHAO Yunduo, ZHANG Jingzhou, et al. Experiment on convective heat transfer of pulsed chevron jet impingement on flat plate[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(4): 787-794.

jet stagnation could be increased by 20%—30% with the use of pulsed chevron jet, when compared with the pulsed round jet. In general, the heat transfer characteristics in the pulsed chevron jet impingement were found somewhat distinct from that in the steady chevron jet impingement as well as the pulsed round jet impingement, due to the inherent interaction of active excitation by the pulsation and passive excitation induced by chevron nozzle.

Keywords: jet impingement; chevron nozzle; pulsed jet; flat plate; convective heat transfer

射流冲击是一种有效的传热传质强化方式,广泛应用于高强度冷却、加热和干燥等工程实际场合,在航空动力装置中,它也是进口部件高效热气防冰、热端部件强化冷却和涡轮机匣主动间隙控制的重要手段^[1-3]。为适应不断增长的传热强化需求,发展高效的射流冲击强化策略是国内外研究人员长期关注的热点课题^[4]。

喷管形状是影响射流剪切层流动结构和靶面对流换热的一个重要因素。在早期的研究中射流孔形状的改变相对简单^[5-7],近年来,基于旋流或流向涡诱导的射流流动激励喷管正得到越来越广泛的重视^[8-11]。其中,在喷管出口采用周向锯齿修型而改进的冠齿喷管能够在射流的发展中诱导出阵列流向涡对,Violato等^[12-13]的研究表明冠齿射流发展中存在显著的条带状涡环干结构,破坏了圆形喷管射流固有的环状剪切涡结构,增强了湍流涡团的脉动和趋近靶面射流的湍流强度; Vinze等^[14]实验研究了冠齿射流冲击光滑平直靶面的对流换热,分析了锯齿数、安装角和伸入深度等结构参数对射流冲击对流换热的影响,与圆射流相比,冠齿射流冲击的靶板局部努塞尔数增加26%~38%; Guan等^[15-16]将冠齿喷管应用于发动机进气整流锥的热气防冰结构,通过数值计算和模型实验研究,分析了冠齿喷管相对于常规喷管射流冲击锥形凹壁所带来的壁面加热效果提高幅度。

利用射流脉冲激励在特定的条件下也可以作为强化传热的一种主动措施,与连续稳定射流相比,非连续射流固有的脉动特征周期性地扰动射流发展及其边界层结构,进而影响射流冲击换热。譬如, Zumbrunnen和Aziz^[17]采用旋转叶片间断阻隔生成脉冲射流方式,实验研究了脉冲自由射流冲击换热,发现在一定的激励频率下脉冲射流可以获得优于连续射流的换热效果; Hofmann等^[18]采用高速电磁阀生成脉冲射流方式,实验研究了脉冲激励参数(频率和幅度)对射流冲击换热的影响,研究表明脉冲射流在小冲击间距-高脉冲

频率下具有传热增强的效果;周静伟等^[19]利用质量流量控制装置生成波形和频率可调的脉冲射流,实验研究表明脉冲波形对射流冲击换热影响显著,阶跃变化的矩形方波射流冲击换热明显优于正弦和三角形脉冲波形; Persoons等^[20]通过系统的实验研究,指出相对于连续射流,脉冲对于冲击射流对流换热的影响不仅依赖于反映脉冲射流特征的斯托罗哈数 $Sr = fd/u_m$ (f 为脉冲频率, d 为喷管直径, u_m 为射流周期平均速度),而且与射流冲击间距 H 密切相关,由于提出利用修正的斯托罗哈数 $Sr \cdot (H/d)$ 作为脉冲射流和连续射流冲击换热能力之间的关联判据,这一关联在 Lü等^[21]的研究中也得到了有效验证。为改善脉冲射流冲击换热,唐婵等^[22]提出了一种附加集气腔结构,利用集气腔喷口的射流紧缩效应提高脉冲值班阶段的射流趋近靶面速度,同时在非值班阶段能够形成一定的流动惯性效应。

尽管上述研究分别在脉冲主动激励和冠齿被动诱导激励做了大量工作,但冠齿脉冲射流冲击平直靶板时两者之间相干机制十分复杂,相关研究仍较为缺乏。鉴于此,本文在前期针对平直靶面所开展的冠齿连续射流和圆形脉冲射流冲击换热研究基础上^[21, 23],在典型的射流雷诺数和冲击间距下开展单股冠齿脉冲射流的冲击对流换热实验研究,以期揭示两者之间相干机制及其对靶板表面对流换热的影响。

1 实验过程简介

1.1 实验装置

本文采用的脉冲射流冲击实验装置与文献^[23]一致,如图1所示。脉冲射流由电磁阀激励形成,通过信号发生器对电磁阀两端的电压占空比进行控制,在本文实验中,脉冲射流占空比(DC)恒定为0.5、脉冲频率 f 为10~25 Hz;电磁阀出口连接的射流管直径 d 为10 mm、长度 l 为120 mm。射流冲击靶面为固定在铜棒上的加热膜片(厚度为

0.05 mm), 采用直流稳压电源对膜片进行加热, 输入的电加热功率由施加于铜棒两端的电压和电流确定。射流冲击靶面温度采用工作波段为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外热像仪测试, 预先将测试表面均匀地喷涂高发射率(约为 0.96)黑漆。齿喷管采用 6-冠齿周向均布的结构布局, 如图 1(a) 所示, 冠齿设计为平行于喷管轴线的平直弧状 V 齿, 冠齿根部对应的弧长 W 为 $\pi d/6$ 、顶长 a 为 6 mm。对加热膜施加承载力 F 使其保持平整, 电源在加热膜两端施加的电压和电流分别为 U 和 I 。冠齿

在靶面上的投影关系见图 1(b) 和图 1(c) 所示, 冠齿齿尖的投影点坐落于 X 轴上, 冠齿齿谷的投影点坐落于 Y 轴上。其中 R 为靶板表面任意一点至滞止中心的距离。依据已有的研究, 射流冲击间距 H 定义为冠齿根部至冲击靶面的距离。

1.2 数据处理

脉冲射流雷诺数以周期平均速度定义, 即

$$Re = \frac{u_m d}{\nu} \quad (1)$$

式中 ν 为射流的运动黏度。

就非稳定射流冲击换热的真实物理过程而言, 靶面对流换热呈现出周期性的变化规律, 鉴于非连续射流的特点, 采用同步器控制红外热像仪的采样时间与脉冲控制信号的同步性, 当对流换热过程经历一定的周期达到“准”稳定状态后, 触动红外热像仪采样, 在 1 min 的采样时间内捕获 1 800 帧的热像, 再从这些图像中进行平均化处理, 进而获得时均温度分布。以图 2 所示为例(纵横坐标表示 X 和 Y 方向无量纲坐标), 在典型相位下的冲击靶面瞬时努塞尔数分布存在显著的差异, 在 $t=0.1T$ 和 $t=0.9T$ 时刻(T 为周期), 靶板的瞬态对流换热低, 这是因为上述时刻处于脉冲射流开启起始和闭合终了阶段; 而在 $t=0.5T$ 相位附近的瞬态对流换热最高, 在脉冲射流关闭后的前期, 对流换热依赖于前序射流冲击的作用依然维系一定的强度; 通过进行平均化处理, 获得如图 2(f) 所示的时均表面传热系数分布。

射流冲击局部表面传热系数即通过建立加热膜片单元体的局部热量平衡确定。鉴于加热膜片很薄, 其毕渥数远小于 1, 因此平直靶板前侧温度 T_w^{front} 与后侧温度 T_w^{rear} 相同, 且壁面两侧的温度可以视为相等且切向导热可以忽略, 因此电加热输入热流密度(q_{joule})主要由加热膜背侧(相对于射流冲击侧)表面与环境的散热热流密度 $q_{\text{loss}}^{\text{rear}}$; 加热膜冲击侧的射流对流换热 q_c^{front} 以及表面对环境的辐射换热产生的热流密度 q_r^{front} 等 3 部分热流所平衡, 如图 3 所示。由此, 射流冲击的局部表面传热系数和努塞尔数确定为

$$h = \frac{q_c^{\text{front}}}{T_w - T_j} = \frac{q_{\text{joule}} - q_{\text{loss}}^{\text{rear}} - q_r^{\text{front}}}{T_w - T_j} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (3)$$

式中 T_j 为冲击射流温度, k 为射流的导热系数。

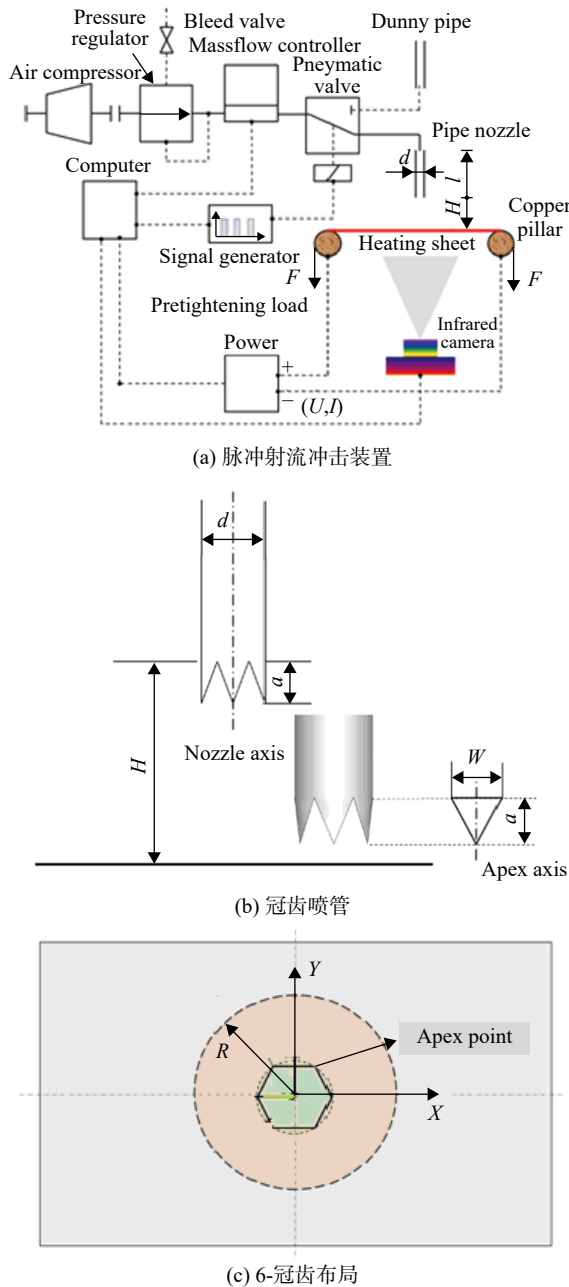


图 1 射流冲击实验系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of jet impingement experiment system

为获得射流温度 T_j , 在喷管出口上游 20 倍直径位置插入热电偶, 其尺寸远小于喷管直径且远离喷管出口, 因此热电偶对喷管出口流场没有影响。值得注意的是, 为聚焦冠齿脉冲射流冲击平直靶板的物理机制和规律, 本文仅呈现了基于时间平

均的努塞尔数, 它表征了冠齿脉冲射流冲击平直靶板表面对流换热的综合效果。

具体的数据处理方法可参见文献 [23], 在此不再赘述。依据文献 [23], 射流雷诺数和靶板表面努塞尔数的实验测试误差分别为 7.5% 和 5.5%。本文的主要实验参数归纳于表 1。

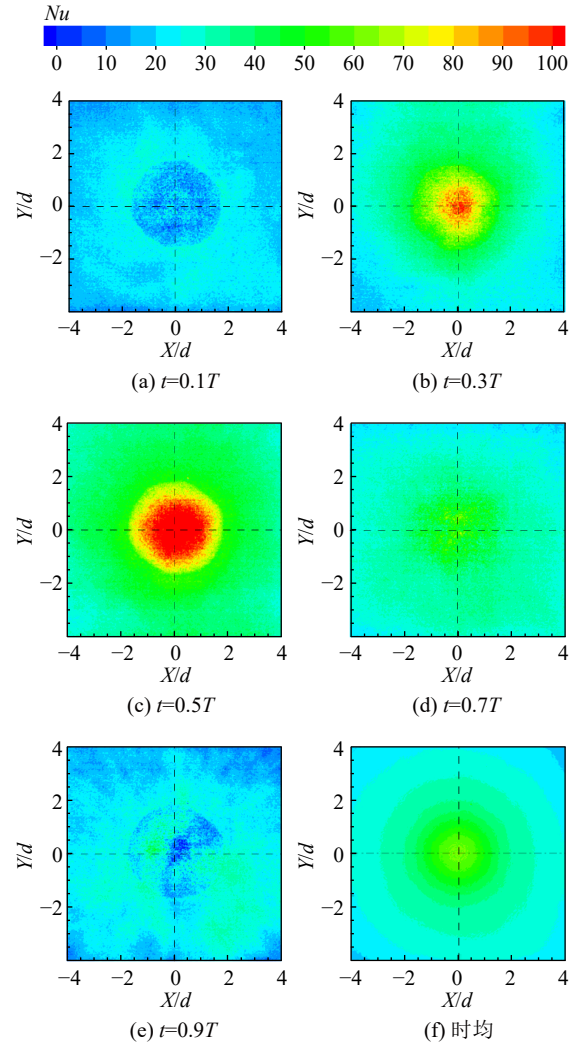


图 2 瞬时努塞尔数云图和时均处理

Fig. 2 Instantaneous Nusselt number contours and time-averaged treatment

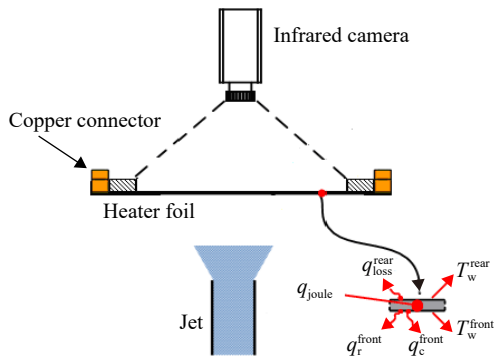


图 3 加热膜局部热流平衡分析

Fig. 3 Local thermal balance analysis on heater foil

表 1 主要实验参数

Table 1 Main experimental parameters

类别	参数	数值
冠齿喷管	喷管直径 d/mm	10
	喷管长度 l/mm	120
	冠齿长度 a/mm	6
	冠齿数 n	6
脉冲射流	频率 f/Hz	10~25
	占空比	50
	射流雷诺数 Re	5 000~20 000
射流冲击距	无量纲距离 H/d	2, 4, 6, 8

2 实验结果与分析

2.1 冠齿与圆形脉冲射流冲击换热对比

图 4 为 $Re=10\,000$ 、 $f=15\,\text{Hz}$ 时, 不同冲击间距 H/d 下圆形脉冲射流和冠齿脉冲射流冲击平直靶面的努塞尔数分布云图。在小的射流冲击间距下, 圆形脉冲射流冲击形成局部努塞尔数沿驻点径向的双峰分布, 如图 4(a) 所示; 冠齿脉冲射流则在射流驻点附近(大约 1.5 倍喷管直径附近)形成较为明显的“波瓣状”分布, 如图 4(b) 所示, 波瓣的周向位置对应于冠齿喷管的齿谷, 这是由于相邻齿尖流向涡的流出在齿谷间形成聚合的缘故^[24], 伴生着流向涡的发展, 在对应于齿谷的靶面上形成局部对流换热强化; 在距离射流驻点中心约 2 倍喷管直径处, 齿谷处局部对流换热分布的波瓣前缘渐呈棒槌状并在周向形成连接; 在沿着射流驻点进一步径向向外的壁面射流区, 对应于齿尖的周向位置上的努塞尔数分布云图略有外凸, 表明此处的壁面射流有更高的聚流效应。随着射流冲击间距的增加, 冠齿脉冲射流冲击在驻点附近周向上的局部对流换热差异趋于消失, 整体呈现出常规圆射流冲击的环状分布特征。与冠齿连续射流冲击对流换热对比(见文献 [23]), 冠齿脉冲射流冲击具有相同的基本特征, 说明了平板表面的努塞尔数分布于冠齿性喷嘴几何形状紧密相关。

图 5 为 $Re=10\,000$ 、 $f=15\,\text{Hz}$ 时, 冠齿脉冲射

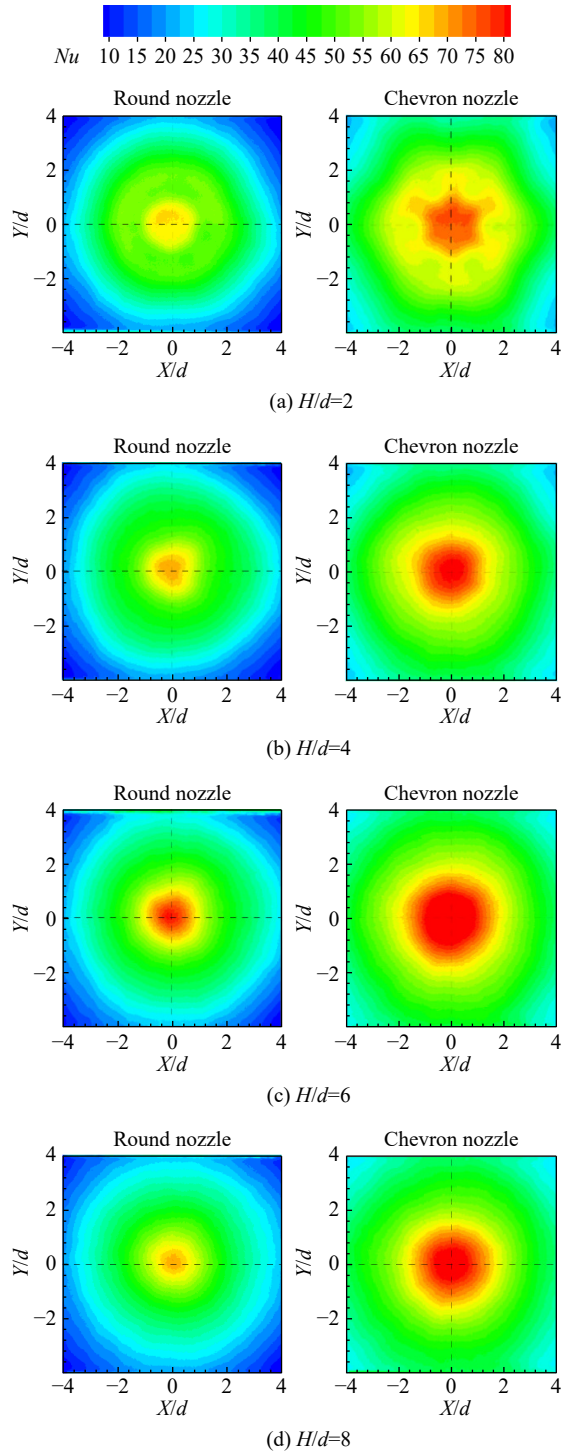
图4 脉冲射流冲击局部努塞尔数分布($Re=10\,000$, $f=15\text{ Hz}$)

Fig. 4 Local Nusselt number distributions by pulsed jet impingement ($Re=10\,000$, $f=15\text{ Hz}$)

流和圆形脉冲射流周向平均努塞尔数(量符号记为 $Nu_{\text{line_average}}$)沿射流驻点径向的分布对比,可见,冠齿激励流向涡在脉冲射流冲击中依然体现出强化对流换热的作用机制,在该脉冲射流操作参数下,环绕射流冲击驻点2倍喷嘴直径($R=2d$)区域内的表面传热系数相对圆形脉冲射流提高幅度

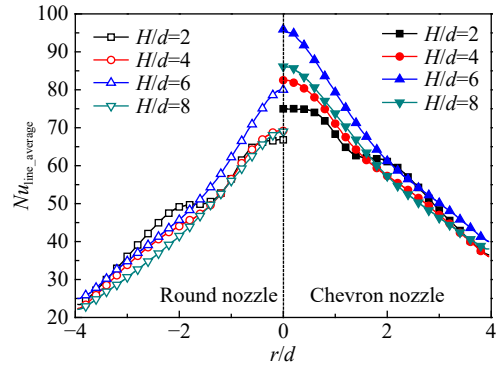


图5 周向平均努塞尔数径向分布对比

($Re=10\,000$, $f=15\text{ Hz}$)

Fig. 5 Comparison of circumferentially-averaged Nusselt number along radial direction ($Re=10\,000$, $f=15\text{ Hz}$)

在20%~30%之间。注意到在 $H/d=2$ 时,冠齿射流冲击的周向平均努塞尔数沿射流驻点径向分布在 $r/d \approx 2$ 时也出现较为明显的双峰现象,其起因在于齿谷处波瓣状局部对流换热分布的前缘棒槌能够在周向形成连接(见图4(b)),因此它的出现机制不同于圆形射流冲击中壁面射流边界层转换的形成机制。

2.2 冠齿脉冲射流冲击换热的参数影响分析

脉冲射流对靶板表面的对流换热与工作频率 f 、雷诺数 Re 和冲击间距 H/d 紧密相关,本节对冠齿脉冲射流冲击换热的参数影响分析。图6为 $f=15\text{ Hz}$ 时,不同冲击间距比 H/d 下,冠齿脉冲射流冲击平直靶面区域的周向平均努塞尔数(量符号记为 $Nu_{\text{line_average}}$)沿射流驻点径向的分布。从图中可见,在所研究的四个射流雷诺数下,最优的无量纲冲击距离均为 $H/d=6$ 。与冠齿连续射流相比,冠齿-脉冲射流冲击的对流换热基本特征未发生明显的改变,但依然存在着某些规律上的差异,譬如,与文献[23]中的冠齿连续射流冲击换热相比,在 $Re=5\,000$ 时,冠齿脉冲射流在 $H/d=8$ 时的驻点对流换热略高于 $H/d=2$ 的情形;在 $Re=10\,000$ 时,冠齿脉冲射流在 $H/d=8$ 时的驻点对流换热仅次于 $H/d=6$,上述变化与冠齿连续射流驻点对流换热随 H/d 增大而降低($H/d>4$ 时)的规律并不一致。

图7为 $Re=10\,000$ 时,不同工作频率 f 下,冠齿脉冲射流冲击平直靶面区域周向平均努塞尔数沿射流驻点径向的分布,图中冠齿连续射流冲击换热的数据来自于文献[23]。与冠齿连续射流冲击相比,在小射流冲击间距下,冠齿脉冲射流冲击的对流换热有一定的降低,而在大射流冲击间

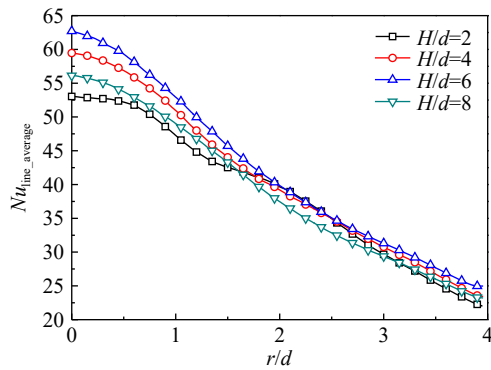
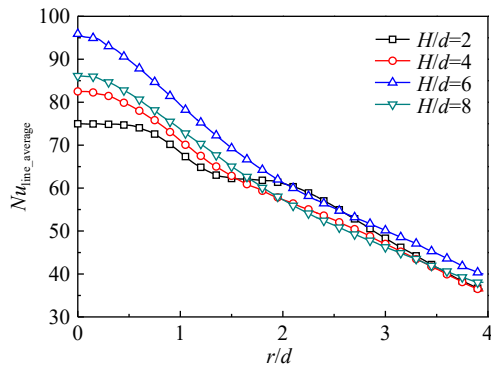
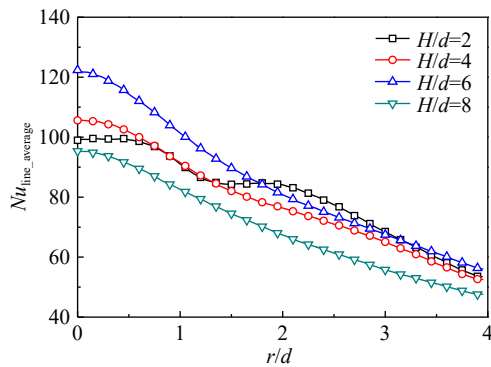
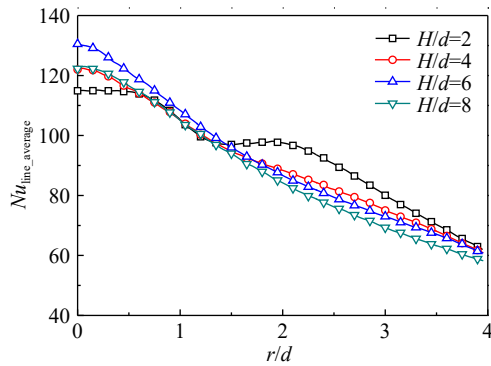
(a) $Re=5\ 000$ (b) $Re=10\ 000$ (c) $Re=15\ 000$ (d) $Re=20\ 000$

图 6 不同冲击间距下冠齿脉冲射流冲击周向平均努塞尔数分布($f=15\text{ Hz}$)

Fig. 6 Circumferentially-averaged Nusselt number distributions at different nozzle-to-surface distances for chevron-pulsed jet impingement ($f=15\text{ Hz}$)

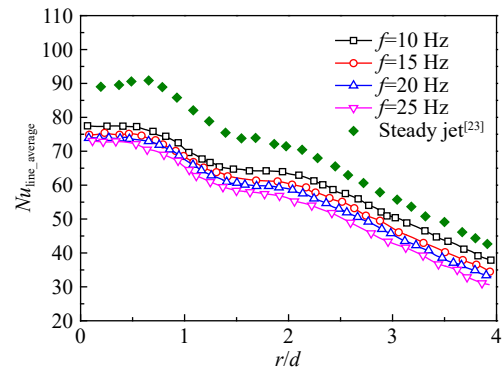
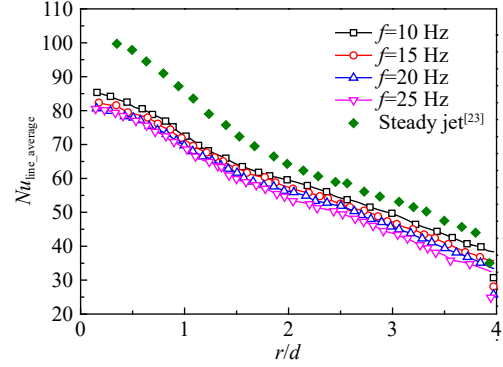
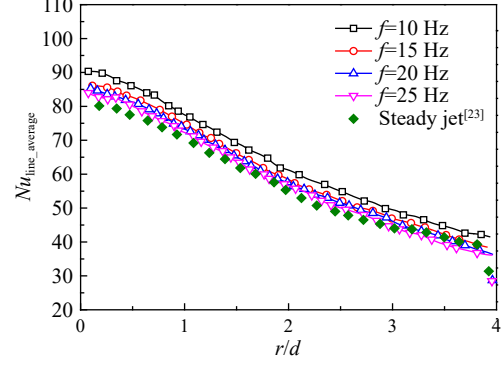
(a) $H/d=2$ (b) $H/d=4$ (c) $H/d=8$

图 7 不同工作频率下冠齿脉冲射流冲击周向平均努塞尔数分布($Re=10\ 000$)

Fig. 7 Circumferentially-averaged Nusselt number distributions at different operational frequencies for chevron-pulsed jet impingement ($Re=10\ 000$)

距下则有一定的增强。另一个值得关注的现象是,当工作频率由 10 Hz 增加到 25 Hz,冠齿脉冲射流驻点区的靶板努塞尔数呈现小幅的降低趋势,分别减少了约 5%(对应 $H/d=2$ 和 $H/d=4$ 工况)和 7.8%(对应 $H/d=8$ 工况)。上述结果表明,在本文的研究参数范围内,脉冲频率增加对冠齿射流冲击对流换热一般具有弱化的影响,这一规律与圆形脉冲射流冲击呈现相反的趋势^[22]。

在冠齿脉冲射流冲击中,射流发展及其边界

层结构存在两者方式的激励作用。首先,脉冲射流是一种主动施加于射流发展及其边界层结构的主动激励,导致射流与周围流体掺混加剧;其次异形冠齿喷嘴激励射流的核心机制在于诱导流向涡而影响射流发展及其边界层结构。因此,冠齿脉冲射流冲击对流换热取决于这上述主动和被动激励机制下射流冲击换热时两者的相谐性以及主导性。从图7的实验结果中可以分析得出,脉冲频率的增加会因其主动激励加剧掺混而导致流向涡的加速耗散,进而削弱流向涡的作用效果,因此使得冠齿脉冲射流冲击对流换热随着脉冲频率增加而呈现小幅的降低;反之,对于圆形脉冲射流而言,脉冲频率的增加有利于破坏存在于射流中的相对稳定的环状剪切涡结构,通过增强射流非定常脉动而导致对流换热的提高。值得注意的是,冠齿脉冲射流冲击靶板时的规律与圆形射流一致,但是其优化的冲击间距更大。

在小射流冲击间距下,冠齿诱导的流向涡在连续射流中的强化机制显著,在脉冲射流中,这一强化主导机制受到脉冲间断的影响而受到削弱,因此相对于冠齿连续射流,冠齿脉冲射流冲击的对流换热有一定程度的降低;而在大射流冲击间距下,由于趋近靶面的流向涡衰减,冠齿激励的流向涡强化机制较小射流冲击间距有较大的衰减,此时脉冲激励与冠齿激励能体现出有机的结合,从而使得冠齿脉冲射流冲击的对流换热要高于冠齿连续射流。与连续射流冲击相比,非稳定脉冲射流冲击换热机制和影响因素更为复杂,对于其强化方式及其影响机制的研究仍有待更深入的研究。

3 结 论

本文对占空比(DC)恒定为0.5的冠齿脉冲射流在典型的雷诺数($Re=5\,000\sim 20\,000$)和无因次冲击距离($H/d=2\sim 8$)工况下冲击平直靶面的对流换热进行了实验测量,主要研究结论如下:

1) 在小射流冲击间距下,冠齿脉冲射流冲击局部努塞尔数云图在射流驻点附近呈现较为明显波瓣状分布,波瓣状顶端沿射流驻点径向形成周向连接,导致周向平均努塞尔数在 $r/d\approx 2$ 时出现外环峰值。

2) 冠齿喷管在脉冲射流冲击中依然体现出强化对流换热的作用机制,在 $Re=10\,000$ 和 $f=15\text{ Hz}$ 下,围绕射流冲击驻点2倍喷管直径($R=2d$)区域

内的表面传热系数相对圆形脉冲射流提高幅度在20%~30%之间。

3) 在本文的研究参数范围内,脉冲频率增加对冠齿射流冲击对流换热大多具有弱化的影响,当工作频率由10 Hz增加到25 Hz,射流驻点区的靶板努塞尔数分别减少了约5%(对应 $H/d=2$ 和 $H/d=4$)和8%(对应 $H/d=8$)。

4) 相对于冠齿连续射流,在小射流冲击间距下冠齿脉冲射流冲击的对流换热有一定程度的降低,而在大射流冲击间距下则有一定的增强。非稳定脉冲射流冲击换热机制和影响因素更为复杂,仍有待更深入的研究。

参考文献:

- [1] WRIGHT L S, HAN J C. Heat transfer enhancement for turbine blade internal cooling[J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2014, 21(2): 111-140.
- [2] 张井山, 毛军逵, 李毅, 等. 高压涡轮主动间隙控制机匣内部换热特性实验[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(2): 298-304. ZHANG Jingshan, MAO Junkui, LI Yi, et al. Experiment on heat transfer characteristics inside the casing of high pressure turbine with active clearance control[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(2): 298-304. (in Chinese)
- [3] 柯鹏, 杨慧赟, 王俊凯, 等. 航空发动机机罩热气膜防冰的加热特性[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(3): 530-539. KE Peng, YANG Huiyun, WANG Junkai, et al. Heating characteristics of aero-engine nose cone with film-heating anti-icing system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(3): 530-539. (in Chinese)
- [4] CARLOMAGNO G M, IANIRO A. Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: a review[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 58(1): 15-35.
- [5] COLUCCI D W, VISKANTA R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, 13(1): 71-80.
- [6] BRIGNONI L A, GARIMELLA S V. Effects of nozzle inlet chamfering on pressure drop and heat transfer in confined air jet impingement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(1): 1133-1139.
- [7] LEE J H, LEE S J. The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(1): 3497-3509.
- [8] YU Y Z, ZHANG J Z, XU H S. Convective heat transfer by a row of confined air jets from round holes equipped with triangular tabs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72(1): 222-233.
- [9] TRINH X T, FENOT M, DORIGNAC E. Flow and heat transfer of hot impinging jets issuing from lobed nozzles[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, 67(1): 185-201.
- [10] HE C X, LIU Y Z. Large-eddy simulation of jet impingement heat transfer using a lobed nozzle[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 125: 828-844.
- [11] 徐亮, 任德祖, 马永浩, 等. 不同形状喷嘴的旋流冲击射流

- 压力损失和传热特性研究[J]. 航空动力学报, 2018, 33(11): 2678-2686.
- XU Liang, REN Dezu, MA Yonghao, et al. Pressure loss and heat transfer characteristics experiment of swirling impinging jet with different shape nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(11): 2678-2686. (in Chinese)
- [12] VIOLATO D, SCARANO F. Three-dimensional evolution of flow structures in transitional circular and chevron jets[J]. Physics of Fluids, 2011, 23(12): 1-25.
- [13] VIOLATO D, IANIRO A, CARDONE G, et al. Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 37(1): 22-36.
- [14] VINZE R, CHANDEL S, LIMAYE M D, et al. Local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging incompressible air jet from a chevron nozzle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 78(1): 124-136.
- [15] GUAN T, ZHANG J Z, SHAN Y, et al. Conjugate heat transfer on leading edge of a conical wall subjected to external cold flow and internal hot jet impingement from chevron nozzle: Part 1 experimental analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 106(1): 329-338.
- [16] GUAN T, ZHANG J, SHAN Y. Conjugate heat transfer on leading edge of a conical wall subjected to external cold flow and internal hot jet impingement from chevron nozzle: Part 2 numerical analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 106(1): 339-355.
- [17] ZUMBRUNNEN D A, AZIZ M. Convective heat transfer enhancement due to intermittency in an impinging jet[J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115(1): 91-98.
- [18] HOFMANN H M, MOVILEANU D L, KIND M, et al. Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(1): 3638-3648.
- [19] 周静伟, 杨兴贤, 耿丽萍, 等. 非稳态冲击射流强化传热试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 144-148.
- ZHOU Jingwei, YANG Xingxian, GENG Liping, et al. Experimental investigation on heat transfer augmentation with unsteady impinging jet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 144-148. (in Chinese)
- [20] PERSONS T, BALGAZINA K, BROWN K, et al. Scaling of convective heat transfer enhancement due to flow pulsation in an axisymmetric impinging jet[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(11): 803-816.
- [21] LÜ Y W, ZHANG J Z, SHAN Y, et al. The experimental investigation of impinging heat transfer of pulsation jet on the flat plate[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2018, 140(1): 1-11.
- [22] 唐婵, 张靖周, 谭晓茗, 等. 带集气腔的脉冲射流冲击换热实验和数值研究[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1334-1343.
- TANG Chan, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming, et al. Experimental and numerical study on pulsed-jet impingement heat transfer with an additional collection chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1334-1343. (in Chinese)
- [23] 吕元伟, 张靖周, 王博瀚, 等. 冠齿喷嘴射流冲击平直靶面对流换热实验[J]. 航空学报, 2018, 39(3): 94-100.
- LÜ Yuanwei, ZHANG Jingzhou, WANG Boyan, et al. Experimental of chevron nozzle jet impingement heat transfer on flat targeting surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(3): 94-100. (in Chinese)
- [24] XIA H, TUCKER P G, EASTWOOD S. Large-eddy simulations of chevron jet flows with noise predictions[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(1): 1067-1079.

(编辑: 王碧琚)