

带集气腔的脉冲射流冲击换热实验和数值研究

唐 婵^{1,2}, 张靖周¹, 谭晓茗¹, 吕元伟¹

- (1. 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;
2. 南京工程学院 能源与动力工程学院, 南京 211167)

摘 要: 实验和数值研究了带集气腔的单股脉冲射流冲击平直靶面对流换热特性。实验测试的脉冲频率(f)为5~40 Hz,射流雷诺数(Re)为5 000~15 000,脉冲占空比(R)为0.2~0.8,射流冲击间距比(H/d)为2~10;相对于实验测试,数值计算的参数范围有所拓宽,即 $5\text{ Hz} \leq f \leq 200\text{ Hz}$, $5\,000 \leq Re \leq 20\,000$, $0.2 \leq R \leq 1.0$ 。研究结果表明,与无集气腔脉冲射流相比,带集气腔的脉冲射流能够增强对流换热,在驻点附近的努塞尔数大约有8%~19%的提高;集气腔的存在,在射流出口处形成紧缩效应而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。在研究的参数范围内,存在特定的、相对较优的脉冲参数,如 $f=80\text{ Hz}$, $R=0.8$,对于受限空间的脉冲射流冲击, $H/d=4$ 是相对较优的射流冲击间距比。

关 键 词: 射流冲击; 脉冲射流; 集气腔; 射流孔; 对流换热

中图分类号: V235

文献标志码: A

Experimental and numerical study on pulsed-jet impingement heat transfer with an additional collection chamber

TANG Chan^{1,2}, ZHANG Jingzhou¹, TAN Xiaoming¹, LÜ Yuanwei¹

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. School of Energy and Power Engineering,
Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: An experimental and numerical study was performed to study the impingement heat transfer on the flat target surface produced by a pulsed-jet with an additional collection chamber. The current test was conducted under the following conditions, such as pulse frequency (f) ranged from 5 Hz to 40 Hz, jet Reynolds number (Re) ranged from 5 000 to 15 000, pulsation duty cycle (R) ranged from 0.2 to 0.8, jet-to-surface distance (H/d) ranged from 2 to 10. In the numerical simulations, the above parameter ranges were relatively extended, for example, $5\text{ Hz} \leq f \leq 200\text{ Hz}$, $5\,000 \leq Re \leq 20\,000$ and $0.2 \leq R \leq 1.0$. With respect to the pulsed-jet impingement without collection chamber, the pulsed-jet with an additional collection chamber was found to enhance the convective heat transfer, with a 8%—19% increase of the stagnation Nusselt number. Due to the additional collection chamber,

收稿日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51776097); 江苏省航空动力系统重点实验室开放基金(APS2017002)

作者简介: 唐婵(1982—),女,副教授,硕士,主要从事传热传质研究。

引用格式: 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.

the vena contracta effect near the jet orifice increased the approaching velocity towarded the target surface at the jet-on process. At the jet-off process the inertia role inside the additional collection chamber behaved. Among the current research conditions, the relatively optimal pulsation parameters such as $f=80\text{ Hz}$ and $R=0.8$ were demonstrated. For the pulsed-jet impingement on a confined target, $H/d=4$ was a relatively optimal jet-to-surface distance.

Key words: jet impingement; pulsed-jet; additional collection chamber; jet hole; convective heat transfer

射流冲击不仅是一种广泛应用于航空动力装置热端部件强化冷却的主要方式,同时它在进口部件高效热气防冰、涡轮机匣主动间隙控制设计中也是一个十分重要的技术手段^[1-4]。在进口部件热气防冰和涡轮机匣叶尖间隙控制结构中,通过导管将压气机引气输运至需要加热或温控的部位,采用射流冲击方式强化表面的对流换热。为减少压缩空气的引气用量,发展高效的射流冲击强化策略是一项重要的研究课题。

长期以来,射流冲击传热强化的被动策略是研究者关注的主要技术,譬如异型喷嘴^[5-6]、处理靶面^[7-8]和涡激励等^[9-10]。近年来,面对日益增长的高效传热需求,研究人员对射流冲击的传热强化主动策略给予了高度关注^[11],其中脉冲射流是典型的主动强化方式之一。Zumbrunnen 和 Aziz^[12]借助旋转叶片将流体间断地喷射到靶面,对脉冲自由液体射流冲击换热进行了实验研究。研究表明在一定的激励频率下脉冲射流相对于连续稳定射流可以起到增强换热的效果。Sheriff 和 Zumbrunnen^[13]通过进一步实验研究,指出脉冲射流冲击在较高的斯特劳哈尔数($Sr=f d/u_{\text{avg}}$, f 为脉冲频率, d 为喷嘴直径, u_{avg} 为射流平均速度)下相对连续射流的对流换热有所增强。随着流动控制技术的发展, Hofmann 等人^[14]利用高速电磁阀脉冲激励方式研究了不同射流雷诺数和冲击间距下的脉冲频率以及幅度对射流冲击换热的影响,研究表明在小冲击间距-高脉冲频率下,脉冲射流相对稳定连续射流具有传热增强的效果。Middelberg 和 Herwig^[15]、Zhou 等人^[16]利用质量流量控制装置(mass flow rate control system, MfRCS)对脉冲射流的波形进行了对比研究。研究指出,具有阶跃变化特征的矩形方波冲击射流的强化换热效果最为显著,它可以使射流产生强烈脉动和冲击扰动机制。Persoons 等人^[17]通过系统的实验研究,指出当 $Sr(H/d)>0.1$ (H 为射流冲击间距)时脉冲射流相对于连续射流具有更

强的对流换热能力。吕元伟等人^[18]实验研究了脉冲频率 $f=10\text{ Hz}$ 、脉冲占空比 $R=0.5$ 的脉冲射流冲击对流换热,脉冲射流冲击和连续性射流冲击相比,在射流驻点和壁面射流区的相对关系与射流雷诺数和冲击间距等因素密切相关。

现有脉冲射流冲击研究大多以单管、非受限空间为研究对象,在实际应用中,压缩气体往往经过引气管路导入集气腔后再通过喷嘴形成射流冲击。因此,在集气腔进口脉冲激励器和射流喷嘴之间存在一个特定的容腔结构,该容腔的存在将影响脉冲射流出口的流动,进而对脉冲射流对流换热特性形成影响。对此,本文针对典型的圆形射流,开展带集气腔脉冲射流冲击换热的实验和数值研究,以获得带集气腔脉冲射流换热特性并揭示集气腔对脉冲射流冲击换热的影响机制。

1 实验方法简介

采用与吕元伟等人^[18]实验研究相同的脉冲射流冲击平板对流换热实验系统,如图 1(a)所示,小型空气压缩机提供的压缩空气经过调节阀和流量控制器进入脉冲射流激励装置,该脉冲射流激励装置为高速电磁阀,通过信号发生器对电磁阀两端的电压占空比进行控制,进而得到按照特定规律周期性变化的脉冲出流。本文实验过程中,脉冲射流雷诺数(Re)范围为 $5000\sim15000$;脉冲频率(f)范围为 $5\sim40\text{ Hz}$;脉冲射流的占空比(或空度比,记为 R)范围为 $0.2\sim0.8$ 。

脉冲射流雷诺数定义为

$$Re = \frac{u_{\text{avg}} d}{\nu} \tag{1}$$

式中 ν 为射流运动黏度。

本文在电磁阀导流管和冲击靶面之间设计了一个集气腔结构,由电磁阀导流管进入的脉冲气流经集气腔后再从射流孔喷嘴喷出,如图 1(b)所示,该集气腔直径为 D_c ,高度为 H_c ,喷嘴直径与电磁阀导流管直径相同,均为 $d=15\text{ mm}$;选取集气腔的几何参数为 $H_c/D_c=1$, $D_c/d=4$,记为

Case-1;对应的无集气腔基准记为 Case-0。

射流冲击换热实验中,采用厚度为 0.05 mm 的加热膜作为冲击靶面,该加热膜两端由铜棒固定,引入直流电提供均匀的表面加热热流。冲击靶板固定于位移机构上,藉此调节射流冲击间距 (H/d) 在 2~10 范围内。加热膜粘贴在敷设红外玻璃(红外透过率接近 0.97)的热绝缘平板上,表面温度由红外热像仪测量,测试方法(标定、修正和数据处理)与文献[18]一致,在此不再赘述。

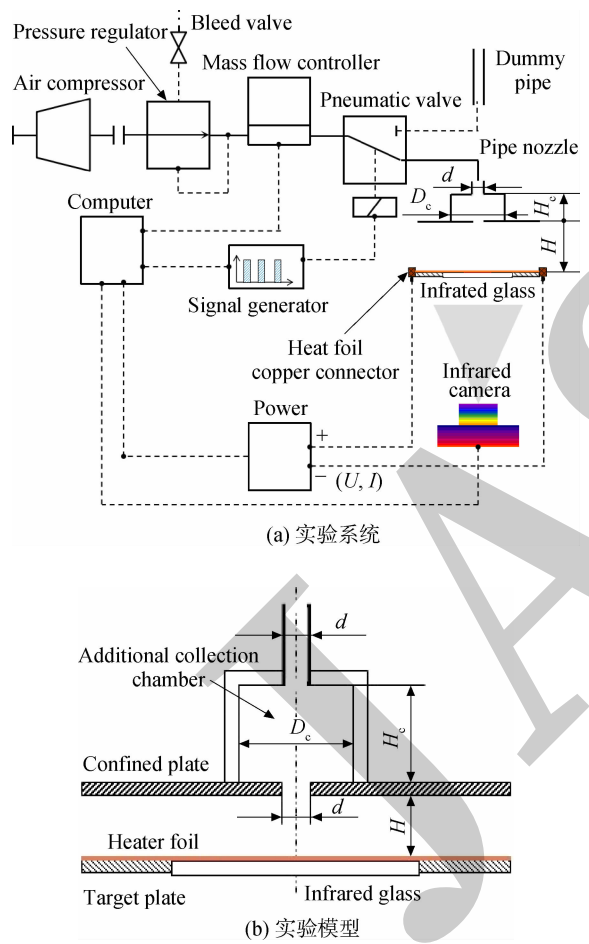


图 1 脉冲射流冲击实验系统示意图
Fig. 1 Schematic test setup of pulsed-jet impingement

理论上,脉冲射流冲击诱导出周期性的壁面温度变化规律,但是在测试过程中很难捕获到一个周期内的瞬时温度分布变化,当经历了一定的周期后壁面上的温度趋于准稳定状态。因此本文实验获得的局部表面传热系数或努塞尔数应视为一定周期内的时均努塞尔数 Nu_{avg} ,即

$$h_{avg} = \frac{q_c^{front}}{T_w - T_j} = \frac{q_{joule} - q_{loss}^{rear}}{T_w - T_j} \tag{2}$$

$$Nu_{avg} = \frac{h_{avg} d}{\kappa} \tag{3}$$

式中 h_{avg} 表示时均表面传热系数, q 表示热流密度, q_c^{front} 为加热膜正面的对流换热, q_{joule} 为电加热输入热流密度, q_{loss}^{rear} 为加热膜背面的散热损失, T_w 和 T_j 分别为加热膜表面温度和射流温度, κ 为射流的导热系数。

实验测试中,所有实验数据的重复度约为 2.5%。各独立测试量的不确定度如表 1 所示。根据误差分析方法^[19],射流速度和射流雷诺数的误差在 4% 以内,靶板表面的努塞尔数误差在 7% 以内。

表 1 测试量的不确定度

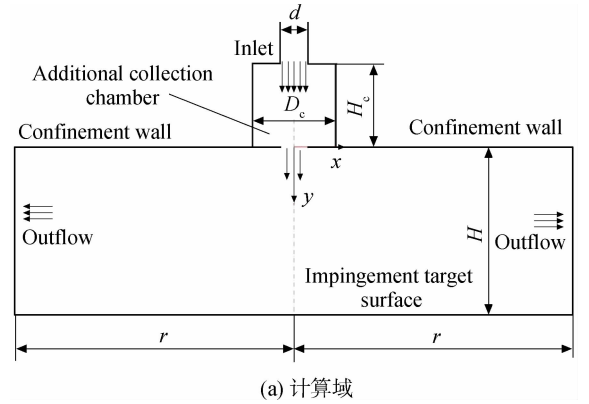
Table 1 Uncertainties of testes variables

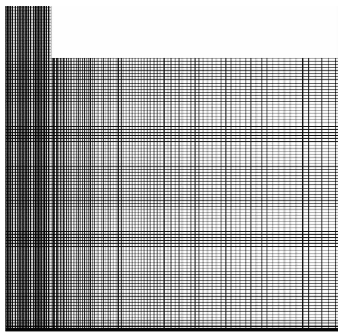
独立测试量	不确定度 / %
质量流量 $\dot{m}/(\text{kg/s})$	0.5~3.3
热流密度 $q/(\text{W/m}^2)$	1.5~4.2
射流孔直径 d/m	4.1
射流温度 T_j/K	1.5~5.8
环境温度 T_∞/K	1.5~5.8
热膜表面温度 T_w/K	2.5~7.6

2 计算方法

根据实验模型建立包含集气腔、受限壁和冲击靶面在内的计算域,如图 2(a)所示。鉴于物理模型的轴对称性特征以及射流马赫数 $Ma < 0.3$,选取二维圆柱坐标系下的不可压缩流体流动传热控制方程组进行数值求解。在计算域径向(x 方向)选取冲击板中心到边缘的距离与射流孔直径之比(r/d)为 20。

网格划分时采用结构化的网格系统,在射流孔和冲击板附近加密网格,如图 2(b)所示。对不同结构参数的集气腔均进行了网格独立性验证并选取相应的计算网格数,根据集气腔和冲击间距





(b) 局部网格

图 2 计算域和局部网格

Fig. 2 Computational region and local grids

的变化,计算网格数在 32 000~36 000 之间,所有计算网格均保证 $y^+ \approx 1$ 。

计算域相应的流动和热边界条件规定如下:脉冲气流进口边界条件如式(4)定义,射流温度为 300 K;计算域环形出口采用无反射边界条件;固体壁面采用无滑移壁面边界条件,集气腔和受限壁面处理为绝热边界,冲击靶面给定恒热流密度 $q=420\text{ W/m}^2$;初始条件($t=0\text{ s}$): $u=v=0\text{ m/s}$ (u 为 y 方向速度, v 为 x 方向速度),压力 $p=p_\infty$, $T_j=T_\infty$,下标 ∞ 表征环境参数。

$$u = \begin{cases} u_{\text{on}} = u_{\text{avg}}/R & (n-1)t_c \leq t < (n-1)t_c + t_{\text{on}} \\ u_{\text{off}} = 0 & (n-1)t_c + t_{\text{on}} \leq t < nt_c \end{cases} \quad (n=1,2,3,\cdots) \quad (4)$$

式中 u_{on} 和 u_{off} 分别为方波射流值班周期和非值班周期的喷射速度; n 为周期数, t_{on} 为射流进气值班时间, t_c 为单个脉冲周期时间,占空比 R 定义为 t_{on}/t_c 。

与实验相比,数值模拟时主要参数的变化范围有所拓展, $5\text{ Hz} \leq f \leq 200\text{ Hz}$, $5\,000 \leq Re \leq 20\,000$, $0.2 \leq R \leq 1.0$ 。

借鉴已有的射流冲击换热数值研究,本文采用 RNG(renormalization group) $k-\epsilon$ 湍流模型,该湍流模型已被众多研究者应用于脉冲射流冲击换热的数值研究^[20-21],在近壁区选用增强壁面函数进行数值模拟。

应用 Fluent 的分离隐式求解器对射流冲击流动与传热进行非稳态数值计算。计算中动量方程、湍流动能方程、耗散率方程及能量方程均采用 QUICK 格式进行离散,压力-速度耦合采用 SIMPLEC(semi-implicit method for pressure linked equations consistent)算法,数值结果收敛残差标准低于 10^{-6} 。非稳态计算的时间步长取为

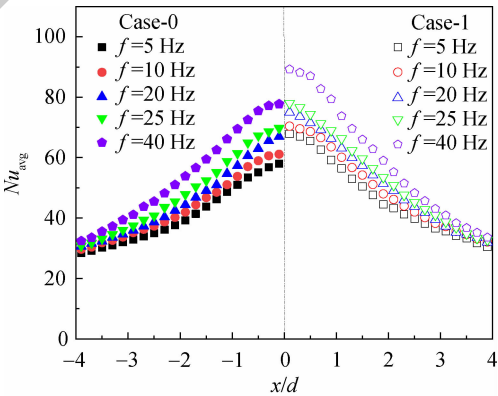
10^{-4} s ,直到周期重复计算的数据稳定。
在非稳态流动换热中,通过一定时间间隔内(Δt)的积分平均获得平均努塞尔数,即

$$Nu_{\text{avg}}(x) = \int_0^t \frac{1}{\Delta t} Nu(x,t) dt \quad (5)$$

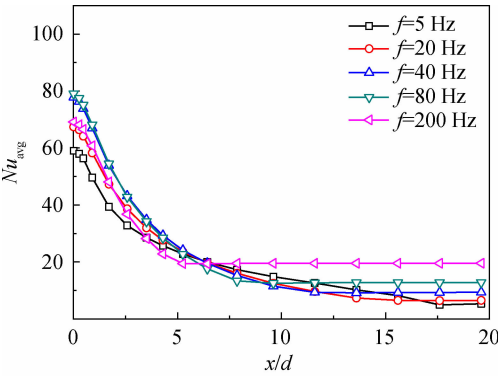
3 结果与分析

3.1 脉冲频率的影响

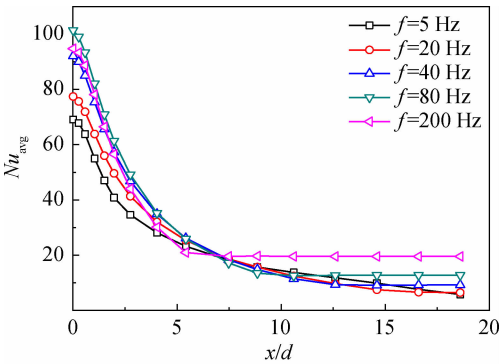
图 3 为 $Re=10\,000$, $H/d=6$, $R=0.5$ 时,不同脉冲频率的射流冲击靶面周向平均努塞尔数(Nu_{avg})沿径向(x 方向)的分布规律。从图 3(a)的实验结果可以看出,在 $5\text{ Hz} \leq f \leq 40\text{ Hz}$ 范围内,无论是对于无集气腔情况 Case-0,还是带集气腔情况 Case-1,脉冲射流冲击靶面的对流换热均随着脉冲频率的提高而得到有效增强,这一趋势在数值模拟结果中也得到反映。随着射流脉冲频率的进一步增加,从数值模拟的结果可以发现,在 $f=80\text{ Hz}$ (或 $Sr=0.12$)时射流驻点周向平均努塞尔数达到最大,这一结果与 Pakhomov 和 Terekhov^[22-23]的研究结论($Sr=0.11$)一致。对于无集气腔 Case-0 情形,如图 3(b)所示, $f=200\text{ Hz}$ 的脉冲射流冲击驻点附近的努塞尔数要低于 $f=40\text{ Hz}$ 的脉冲射流,但在离开射流冲击驻点的



(a) 实验结果



(b) Case-0计算结果



(c) Case-1计算结果

图 3 不同脉冲频率下周向平均努塞尔数分布
($Re=10\,000$, $H/d=6$, $R=0.5$)

Fig. 3 Distribution of circumferentially-averaged Nusselt number under different pulsation frequencies
($Re=10\,000$, $H/d=6$, $R=0.5$)

下游($x/d \geq 10$), 高频脉冲射流的对流换热能力有明显的增强。对于带集气腔 Case-1 情形, 如图 3(c) 所示, $f=200\text{ Hz}$ 的脉冲射流冲击驻点附近的周向平均努塞尔数要略高于 $f=40\text{ Hz}$ 的脉冲射流, 同样, 在离开射流冲击驻点的下游, 高频脉冲射流的对流换热能力更强。值得关注的是, 与无集气腔 Case-0 情形相比, 带集气腔的脉冲射流冲击可以获得更高的对流换热能力。

图 4 为 $Re=10\,000$, $H/d=6$, $R=0.5$ 时, 不同脉冲频率下的射流冲击驻点周向平均努塞尔数计算结果对比。可以直观地看出, 加入集气腔结构, 脉冲射流在驻点附近的努塞尔数可以相对无集气腔提高 $8\% \sim 16\%$ 。随着脉冲频率提高, 带集气腔 Case-1 相比无集气腔 Case-0 在驻点附近

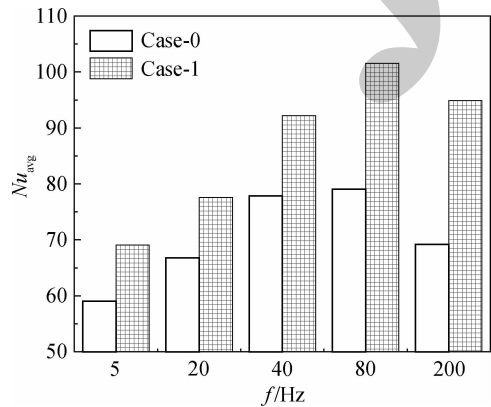


图 4 不同脉冲频率下驻点努塞尔数计算结果的对比
($Re=10\,000$, $H/d=6$, $R=0.5$)

Fig. 4 Comparison of stagnation Nusselt number for computed results under different pulsation frequencies
($Re=10\,000$, $H/d=6$, $R=0.5$)

的强化换热效果改善幅度越为显著。

图 5 和图 6 分别为 Case-0 和 Case-1 在一个周期内三个典型时刻的瞬时无量纲速度 (u/u_{avg}) 分布, 纵坐标 y/d 为射流轴向流动方向的无量纲距离。

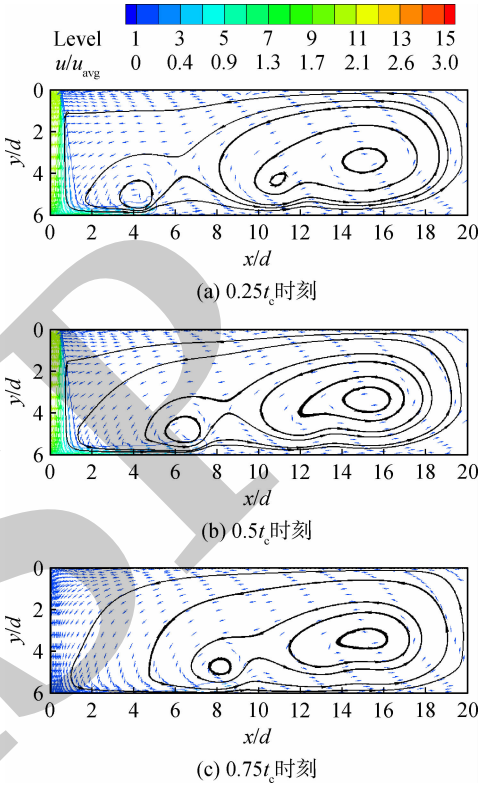


图 5 Case-0 瞬时流场计算结果

Fig. 5 Computed instantaneous flow field for Case-0

在脉冲射流值班阶段, 对比图 5(a) 和图 6(a) 可以发现, 带集气腔的脉冲射流, 其射流出口瞬时峰值速度相比 Case-0 具有明显的提升, 这是由于以脉冲方式进入集气腔的射流从薄壁开孔喷射所产生的射流紧缩 (vena contracta) 效应^[24], 进而影响射流邻近孔出口下游的速度剖面。而在非值班阶段, 由于集气腔内的流动惯性效应, 射流孔中心附近的气流相对 Case-0 有相对较强的维持能力, 在射流孔边缘, 则缘于集气腔内部的环流结构而对外部气流起到微弱的卷吸作用。由此两方面的效应, 导致带集气腔的脉冲射流冲击增强。同时, 从图中也可发现, 在受限的靶腔内冲击射流诱导出复杂的涡系结构, 位于壁面射流区前段剪切诱导的涡随时间过程逐渐向下游推移, 并且在射流非值班周期也能得以维系; 同时也注意到在脉冲射流的值班周期, 远离射流驻点的壁面射流速度沿径向急剧减小, 在环形射流腔开口射流腔邻近

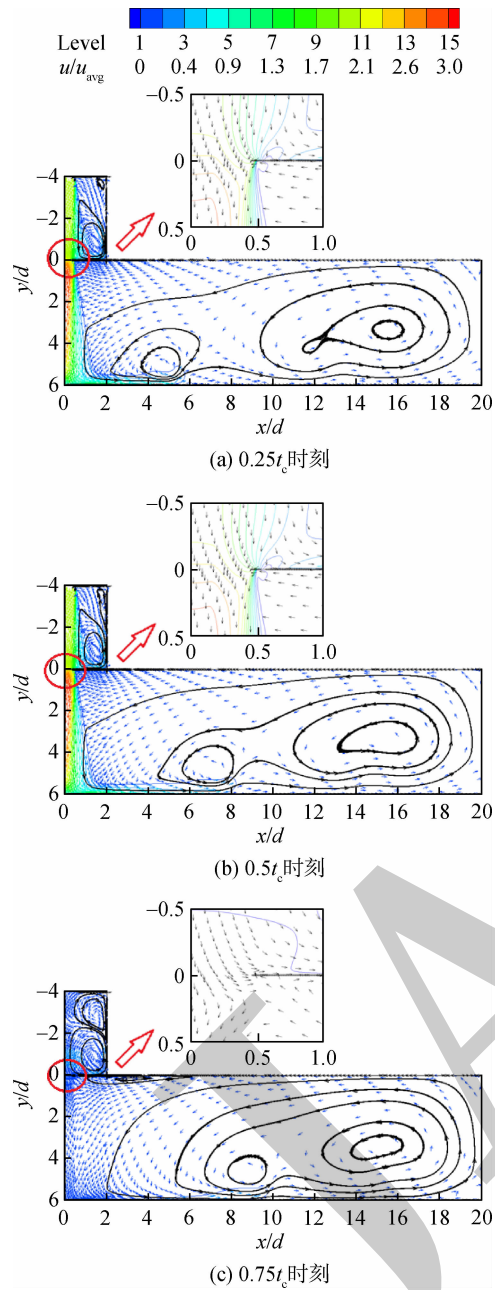


图 6 Case-1 瞬时流场计算结果

Fig. 6 Computed instantaneous flow field of for Case-1

出口区域也出现了一个影响范围较大的回流涡,显然这是受限空腔的卷吸效应所致,这一现象在受限稳定射流冲击中也存在^[25-26],但是,这个大尺度回流涡的涡量却非常微弱(涡量 Ω 为流体速度矢量的旋度),见图 7 所示,同时剪切诱导的涡在射流非值班周期(如 $0.75t_c$ 时刻)的涡量相较射流值班周期也有很大的衰减。正是由于在高频脉冲条件下壁面射流区的涡系结构演变更趋显著,表面的热边界层周期性地被破坏,从而导致离开射流冲击驻点的下游,高频脉冲射流的对流换热能力更强。

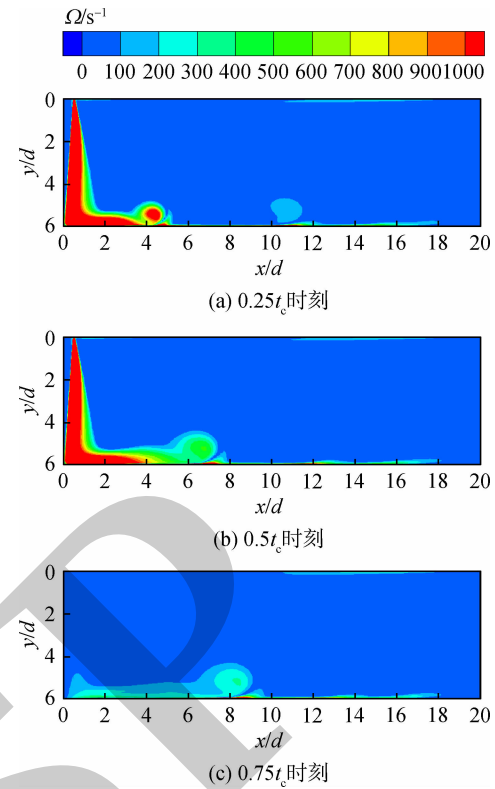
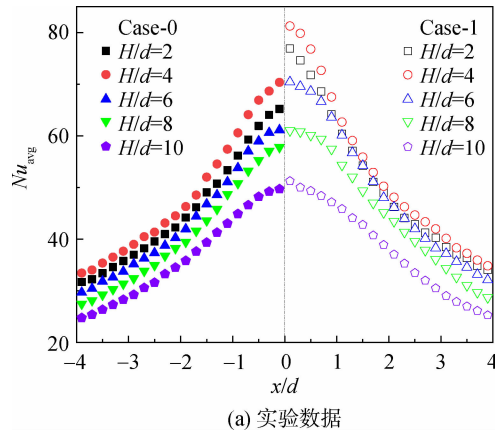


图 7 Case-0 瞬时涡量场计算结果

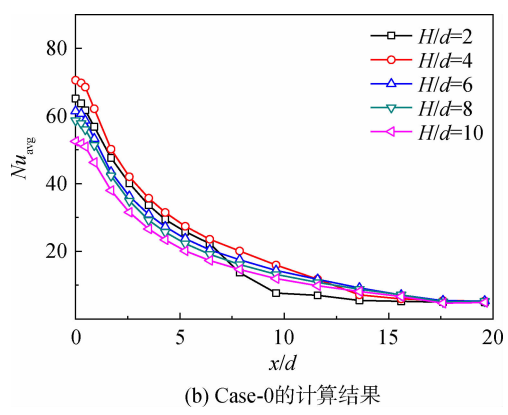
Fig. 7 Computed instantaneous vorticity field for Case-0

3.2 射流冲击间距的影响

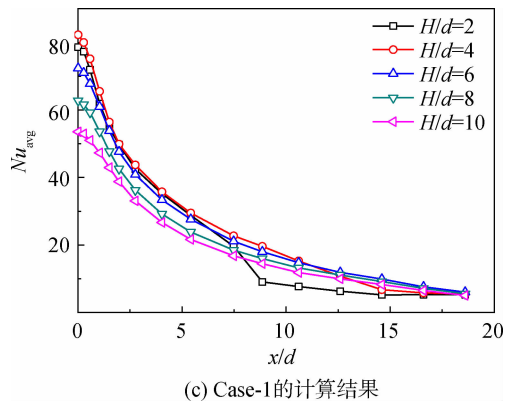
图 8 为 $Re=10\,000$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$ 时,脉冲射流在不同的射流冲击间距比下靶面周向平均努塞尔数沿径向的分布规律。可以看出,对于脉冲射流冲击,无论是 Case-0 还是 Case-1,在受限靶面驻点区的对流换热在 $H/d=4$ 时最大,这一趋势与连续射流冲击的结果一致^[11]。由于射流受限的缘故,在冲击靶腔内形成复杂的涡系结构,在小的射流冲击间距比下 ($H/d=2$) 能够得到较好的射流冲击换热效果;在射流冲击间距比大于 4 后,随着射流冲击间距比的增加,脉冲射流冲击的对流换热能力逐渐衰减,注意到 Case-1 相对于



(a) 实验数据



(b) Case-0的计算结果



(c) Case-1的计算结果

图 8 不同射流冲击间距下的周向平均努塞尔数分布
($Re=10\,000$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$)

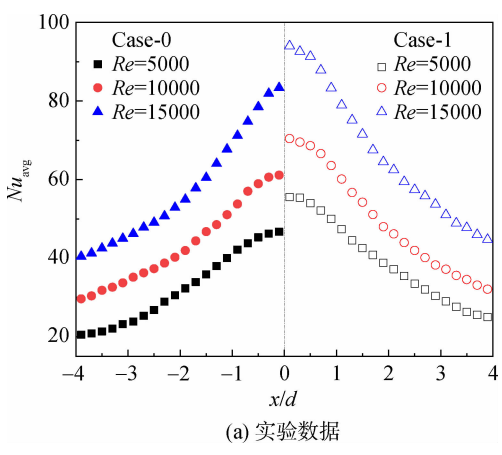
Fig. 8 Distribution of circumferentially-averaged Nusselt number under different jet-to-surface distances
($Re=10\,000$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$)

Case-0 情形在驻点附近的对流换热改善效果在小射流冲击间距下体现更为显著。这是由于在小射流冲击间距下,射流趋近靶面的速度高,周期性脉动和冲击扰动机制表现得充分;而在大射流冲击间距比下,由于射流在趋近靶面的过程中与周围环境流体的卷吸掺混而使得法向冲击速度衰减,此时射流的脉动和冲击扰动机制有所削弱。

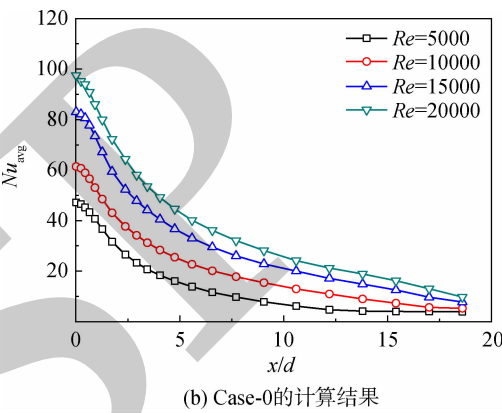
3.3 射流雷诺数的影响

图 9 给出了在 $H/d=6$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$ 时,Case-0 和 Case-1 情形下冲击靶面上周向平均努塞尔数随射流雷诺数变化的情况。可见,在不同的射流雷诺数下,Case-1 比 Case-0 的周向平均努塞尔数可以相对提高 $11\%\sim 19\%$ 。

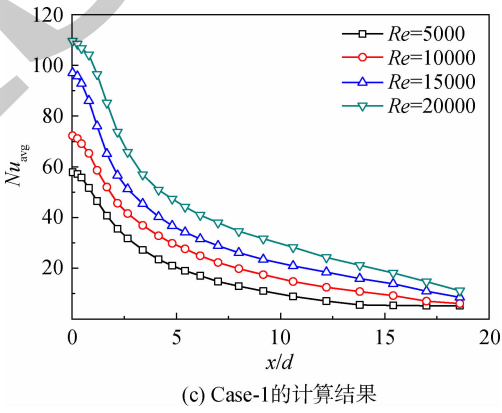
图 10 给出了不同射流雷诺数下典型时刻的瞬时努塞尔数分布,在脉冲值班周期 ($0.5t_c$ 时刻),在 $x/d\leq 7$ 区域内的瞬时努塞尔数随射流雷诺数增加,距离射流驻点 $x/d\leq 10$ 区域内的瞬时努塞尔数增加幅度显著,而在 $x/d>10$ 区域内的瞬时努塞尔数增加幅度则较为微弱,显然这是脉冲值班周期内的射流趋近速度



(a) 实验数据



(b) Case-0的计算结果



(c) Case-1的计算结果

图 9 不同射流雷诺数下的周向平均努塞尔数分布
($H/d=6$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$)

Fig. 9 Distribution of circumferentially-averaged Nusselt number under different jet Reynolds numbers
($H/d=6$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$)

大幅提升的缘故,对射流驻点形成强烈的冲击效果,远离射流驻点的下游,射流雷诺数对壁面射流区的换热影响则较小;在非脉冲值班周期 (t_c 时刻),在 $x/d\leq 7$ 区域内的瞬时努塞尔数随射流雷诺数增加的变化幅度较弱且低射流雷诺数下的努塞尔数略高,但在远离射流驻点的下游,瞬时努塞尔数变化幅度则较为显著,且高射流雷诺数下的努塞尔数较大,前者是因为低射流雷诺数下的斯

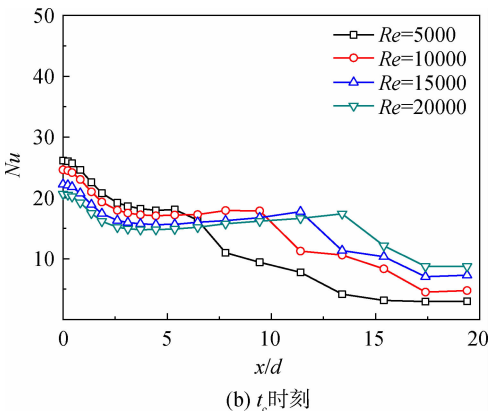
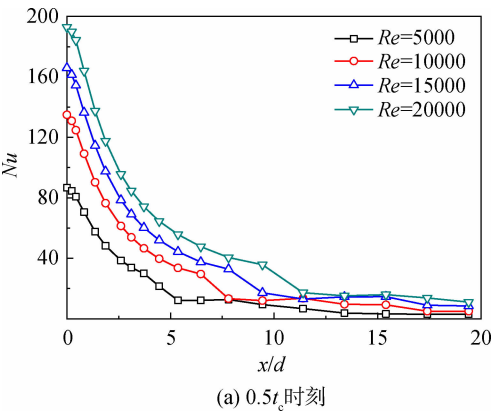


图 10 不同射流雷诺数下瞬时努塞尔数分布计算结果
($H/d=6$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$)

Fig. 10 Computed instantaneous Nusslet number distribution under different Reynolds numbers
($H/d=6$, $f=10\text{ Hz}$, $R=0.5$)

特劳哈尔数大,其温度变化的热惯性较弱所致,后者则是因为高射流雷诺数下的壁面射流区涡系结构演变更趋显著所致。

3.4 脉冲占空比的影响

图 11 给出了在 $Re=10\,000$ 、 $f=10\text{ Hz}$ 、 $H/d=6$ 时,不同脉冲占空比下(包含连续性射流,即 $R=1$)的 Case-0 和 Case-1 情形在冲击靶面上周向平均努塞尔数分布。可以看出,相比 Case-0, Case-1 在滞止区域努塞尔数可以相对提高 $10\%\sim18\%$ 。从实验结果看,当脉冲占空比从 0.2 提高至 0.8 时,脉冲射流冲击换热的效果可以得到改善。从数值模拟的结果也可以看出, $R=0.8$ 时冲击靶面的射流驻点区域换热相对较优,继续增加到 $R=0.9$,努塞尔数在射流驻点区有所下降。

图 12 给出了不同脉冲占空比下的射流冲击驻点周向平均努塞尔数计算结果的直接对比,相对于连续性射流冲击,脉冲射流可以起到换热强化的作用。

小脉冲占空比(譬如, $R=0.2$)的脉冲射流峰值速度最大,虽然因其具备的高射流趋近速度和强脉动特征而有利于取得很高的瞬时局部对流换热峰值,但由于在一个周期内的值班时间最短,因间歇时间较长而导致其难以维系在整个脉冲周期;大脉冲占空比(譬如, $R=0.9, 1.0$)的脉冲射流在值班周期内的射流作用维系能力强,但脉冲射流峰值速度小且脉动效应趋于丧失; $R=0.8$ 的

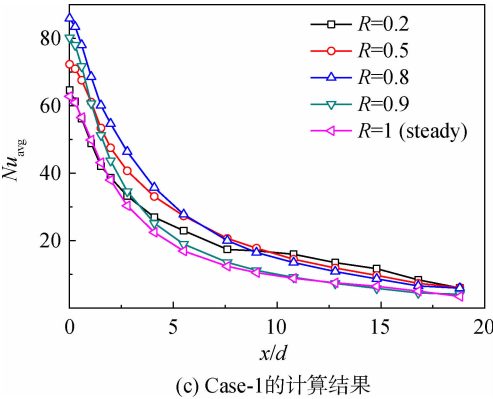
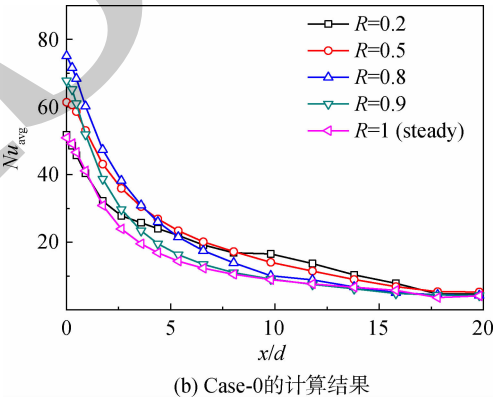
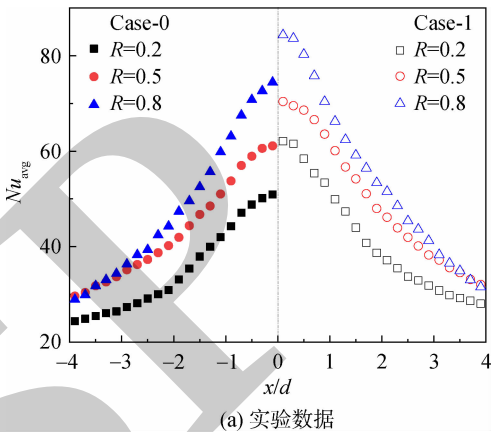


图 11 不同脉冲占空比下的周向平均努塞尔数分布
($Re=10\,000$, $f=10\text{ Hz}$, $H/d=6$)

Fig. 11 Distribution of circumferentially-averaged Nusslet number under different pulsation duty cycles ($Re=10\,000$, $f=10\text{ Hz}$, $H/d=6$)

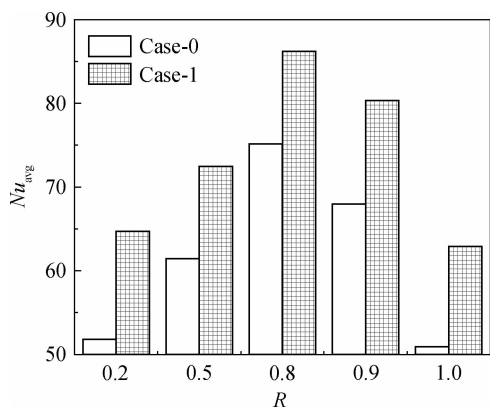


图12 不同脉冲占空比下驻点周向平均努塞尔数计算结果的对比($Re=10\,000$, $f=10\text{ Hz}$, $H/d=6$)

Fig. 12 Comparison of stagnation circumferentially-averaged Nusslet number for computed results under different pulsation duty cycles ($Re=10\,000$, $f=10\text{ Hz}$, $H/d=6$)

脉冲射流虽然脉冲射流峰值速度较小,但射流冲击维系能力较强且同时也具有一定的脉动作用,因而可以获得较优的综合效果。

4 结 论

本文实验研究了脉冲射流在脉冲频率为 $5\sim 40\text{ Hz}$ 、射流雷诺数为 $5\,000\sim 15\,000$ 、占空比为 $0.2\sim 0.8$ 、射流冲击间距比为 $2\sim 10$ 范围内的对流换热特性,同时在更宽的范围内进行了数值研究,主要研究结论如下:

1) 与无集气腔的脉冲射流冲击相比,带集气腔的脉冲射流在驻点附近的对流换热能力有 $8\%\sim 19\%$ 的提高,取决于脉冲频率、脉冲占空比、射流雷诺数和射流冲击间距。

2) 在集气腔内射流出口处形成脉冲值班阶段的射流喷射紧缩效应,增强射流孔出口下游的趋近靶面速度;在非值班阶段,集气腔内的流动惯性效应使得射流孔中心附近的气流有相对较强的维持能力。

3) 在所研究的参数范围内,存在特定的、相对较优的脉冲参数,譬如, $f=80\text{ Hz}$, $R=0.8$; 对于受限空间的脉冲射流冲击, $H/d=4$ 是相对较优的射流冲击间距比。

参考文献:

[1] 朱永峰,方玉峰,封文春. 某型飞机发动机短舱防冰系统设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1326-1331.
ZHU Yongfeng, FANG Yufeng, FENG Wenchun. Design and calculation of aircraft nacelle anti-icing system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1326-1331. (in

Chinese)

- [2] 柯鹏,杨慧赞,王俊凯,等. 航空发动机帽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)
- [3] 张书华,张丽,朱惠人,等. 涡轮机匣换热实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1011-1016.
ZHANG Shuhua, ZHANG Li, ZHU Hui ren, et al. Experimental investigation of heat transfer characteristics in turbine casing[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1011-1016. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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(18): 3497-3509.
- [6] 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)
- [7] HANSEN L G, WEBB B W. Air jet impingement heat transfer from modified surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(4): 989-997.
- [8] 陈鹏,饶宇,万超一. 具有微小 W 型肋的结构化表面冲击冷却实验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(9): 2110-2117.
CHEN Peng, RAO Yu, WAN Chaoyi. Impingement cooling experiment of structured surface with micro-W-shaped ribs[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2110-2117. (in Chinese)
- [9] 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: 22-36.
- [10] 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: 329-338.
- [11] 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,2014,58:15-35.

[12] 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.

[13] SHERIFF H S,ZUMBRUNNEN D A. Effect of flow pulsations on the cooling effectiveness of an impinging jet[J]. Journal of Heat Transfer,1994,116(4):886-895.

[14] 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(17/18):3638-3648.

[15] MIDDELBERG G,HERWIG H. Convective heat transfer under unsteady impinging jets; the effect of the shape of the unsteadiness[J]. Heat and Mass Transfer,2009,45(12):1519-1532.

[16] ZHOU J W,WANG Y G,MIDDELBERG G,et al. Unsteady jet impingement;heat transfer on smooth and non-smooth surfaces[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2009,36(2):103-110.

[17] PERSOONS 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.

[18] 吕元伟,张靖周,唐婵,等. 脉冲射流冲击平直表面的对流换热实验[J]. 航空学报,2018,39(4):119-127.

LÜ Yuanwei,ZHANG Jingzhou,TANG Chan,et al. Experimental of convective heat transfer of pulsed jet impingement on a flat surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2018,39(4):119-127. (in Chinese)

[19] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,1988,1(1):3-17.

[20] XU P,QIU S,YU M Z,et al. A study on the heat and mass transfer properties of multiple pulsating impinging jets[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2012,39(3):378-382.

[21] MOHAMMADPOUR J,ZOLFAGHARIAN M M,MUJUMDAR A S,et al. Heat transfer under composite arrangement of pulsed and steady turbulent submerged multiple jets impinging on a flat surface[J]. International Journal of Thermal Sciences,2014,86:139-147.

[22] PAKHOMOV M A,TEREKHOV V I. Effect of pulse frequency on heat transfer at the stagnation point of an impinging turbulent jet[J]. High Temperature,2013,51(2):256-261.

[23] PAKHOMOV M A,TEREKHOV V I. Numerical study of fluid flow and heat transfer characteristics in an intermittent turbulent impinging round jet[J]. International Journal of Thermal Sciences,2015,87:85-93.

[24] SCHETZ J A,FUHS A E. Fundamentals of fluid mechanics[M]. New York:John Wiley & Sons,1999.

[25] BAYDAR E,OZMEN Y. An experimental investigation on flow structures of confined and unconfined impinging air jets[J]. Heat and Mass Transfer,2006,42(4):338-346.

[26] SAN J Y,CHEN J J. Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2014,71:8-17.

(编辑:陈 越)