不同激励形式对脉动气膜冷却特性影响的数值研究 *

陈佳伟，蔡 乐，王松涛

（哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘 要：为了探究不同激励形式对脉动气膜冷却特性的影响，在35°倾角平板射流模型中，采用非定常数值模拟方法进行相关研究。挑选常用的方波和正弦波作为冷气激励，无量纲激励频率斯特劳哈尔数*St*=0.019，0.047，0.093，0.263，0.441，重点对冷气附着和高温主流入侵现象进行了对比研究。结果表明：正弦激励下的冷气对壁面有更强的附着和更高的冷却效率；方波激励下的冷气穿透能力较强但对壁面附着相对较弱。此外，方波激励下存在主流入侵，会烧蚀气膜孔及局部壁面；而正弦激励使得冷气连续变化，能明显抑制主流入侵。更进一步，提高脉动周期内的最低吹风比不是抑制主流入侵的最佳方式，因为主流入侵主要是因为冷气量变化过于剧烈。针对正弦激励，冷气的无量纲激励频率*St*>0.263后也会导致主流入侵。考虑冷却效果和避免主流入侵，建议在实际应用中选用较低频连续波形作为激励。

关键词：非定常数值模拟；脉动气膜冷却；方波；正弦波；冷却效率；主流入侵；连续性

中图分类号：V235.113 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2020）04-0860-08

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 190318

Numerical Study on Effects of Different Excitation Forms on Forced Film Cooling Characteristics

CHEN Jia-wei，CAI Le，WANG Song-tao

（School of Energy Science and Engineering，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China）

Abstract：In order to study the effects of different excitation forms on forced film cooling characteristics，relevant investigation was performed in a 35° inclined jet-in-crossflow model by unsteady numerical simulation method. The commonly used waves，square wave and sinusoidal wave were selected as excitations to the coolant and the nondimensional forcing frequencies of Strouhal numbers are 0.019，0.047，0.093，0.263 and 0.441. This paper mainly compared the attachment of the coolant as well as the ingestion of the hot mainstream. The results show that coolant with sinusoidal excitation has stronger attachment to the wall and higher cooling effectiveness，whereas coolant with square excitations has stronger penetration but relatively weaker attachment. Besides，ingestion of hot mainstream exists under square excitation，which can cause ablation to the holes and parts of the wall. However，sinusoidal excitation makes the coolant change gradually，which significantly restrains the ingestion. Further，improving the lowest blowing ratio is not the best way to restrain the ingestion，since the ingestion is mainly caused by the excessively changed amount of coolant. As for sinusoidal excitation，the coolant with Strouhal numbers higher than 0.263 also results in the ingestion of mainstream. Considering cooling effectiveness and restraining ingestion，continuous wave with relatively low frequency is recommended for practical use.

* **收稿日期**：2019-05-17；**修订日期**：2019-07-22。

作者简介：陈佳伟，硕士生，研究领域为叶轮机械气动与冷却研究。E-mail：chen_jiawei@163.com

通讯作者：蔡 乐，博士，助理研究员，研究领域为叶轮机械分离与非定常流动控制。E-mail：caile_lele@163.com

引用格式：陈佳伟，蔡 乐，王松涛. 不同激励形式对脉动气膜冷却特性影响的数值研究[J]. 推进技术，2020，41(4)：860-867.（CHEN Jia-wei，CAI Le，WANG Song-tao. Numerical Study on Effects of Different Excitation Forms on Forced Film Cooling Characteristics[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2020，41(4)：860-867.）

Key words: Unsteady numerical simulation; Forced film cooling; Square wave; Sinusoidal wave; Cooling effectiveness; Ingestion of crossflow; Continuity

1 引　言

航空发动机涡轮高温部件必须冷却，而气膜冷却是最常用的冷却技术[1]。为了提高冷却效果，通过优化气膜孔形状来优化气膜冷却系统。但是，这种被动方式缺少对主流不稳定性的适应能力[2-5]。

国内外学者曾对脉动气膜冷却进行过一段时间的研究，希望能够对传统的气膜冷却方式进行改善。脉动气膜冷却，就是通过给冷气施加一种激励，使冷气震荡喷出。除了实现冷却作用外，脉动的冷气还将自身激励属性引入流场，从而有希望对涡轮中复杂流场进行主动控制。为了简化问题并对机理进行研究，相关研究主要在平板射流模型中进行。最早对脉动射流及声学激励射流进行过实验研究，但并未涉及冷却性能，实验中发现在某些激励条件下混合效果及冷气穿透能力都得到增强[6-8]。其中，M'Closkey等[6]发现通过优化激励参数，能够形成穿透能力强的涡结构从而增强冷气穿透和扩散。Johari等[7]研究了脉动频率，占空比和速度比对脉动射流的影响。在他们的研究中，掺混率最大可增加50%。Eroglu等[8]对不同激励频率造成的旋涡结构和穿透能力差异进行研究，其中冷气穿透能力最大可增加70%。关于冷却性能，Ekkad等[9]的研究发现，将恒定射流的吹风比作为脉动射流每个周期内的最大吹风比时，脉动射流冷却效果提高。Bidan等[10]的研究也获得相似的结论，即脉动气膜冷却有减少冷气消耗但同时提高冷却效率的潜力。关于射流角度，Frank等[11]还研究了垂直脉动射流，发现此时的脉动射流同样能够有效控制冷气穿透和与主流的混合。关于其它影响因素，Vermeulen等[12]和Narayanan等[13]在研究中，发现掺混效果的提升与平均射流速度及冷气输运管的直径有关。但是，近年并无脉动气膜冷却相关研究，这很大原因是考虑到脉动冷气在工程上的实际来源问题。

最近几年，关于压气机内主动控制研究取得新进展，尤其是蔡乐[14]提出的"非定常抽吸"概念。"非定常抽吸"是在定常抽吸基础上施加脉动而实现脉动抽气，它能显著控制流动分离、改善气动性能[15-17]。在涡轮中，气膜冷却所需冷气是从压气机中抽取然后通过涡轮叶片表面气膜孔喷出[18]。所以，压气机中"非定常抽吸"获取的连续脉动冷气恰恰解决了涡轮中脉动气膜冷却的冷气来源问题，这是哈尔滨工业大学发动机气动研究中心基于整体提出的新研究视角，所以脉动气膜冷却应该重新获得重视。

为保证脉动冷气的获取（压气机中"非定常抽吸"）和利用（涡轮中脉动气膜冷却）一致性，脉动形式需要统一。目前，已有的压气机"非定常抽吸"研究中采用的都是正弦激励。但是关于脉动气膜冷却的研究中，却大量采用的是方波激励，所以对不同波形激励的基础研究是必要的。本文采用数值模拟方法，对方波和正弦波两种常用激励波形进行对比研究。综合冷却效率和流场结果，希望能为接下来涡轮中脉动冷却，以及压气机"非定常抽吸"相关研究的学者提供参考。

2 物理模型和计算方法

2.1 研究对象

本文的研究对象如图1所示，该几何模型取自Bidan等[10]。该几何模型由一个长方体和一个冷气输运管组成。冷气输运管直径（即气膜孔直径）为D，长度为$12D$。其实，冷气输运管长度的选取对实验结果有显著影响。目前关于冷气输运管长径比的选取已经有诸多研究[19-21]，结果发现长径比较大时冷却效率也较高。并且Lutum等[21]还发现长径比>7时，冷气输运管内的冷气可以得到充分发展。本文研究模型中的其他几何长度均为无量纲尺寸。长方体沿X方向长度为$18D$，沿Y方向为$8D$，沿Z方向为$6D$。此外，主流进口位于冷气孔出口中心位置的上游$6D$位置。

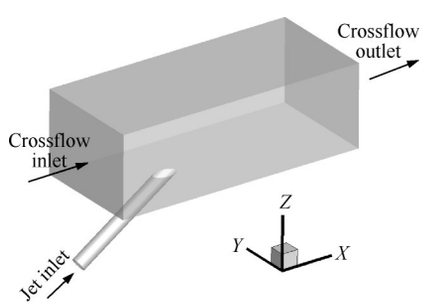
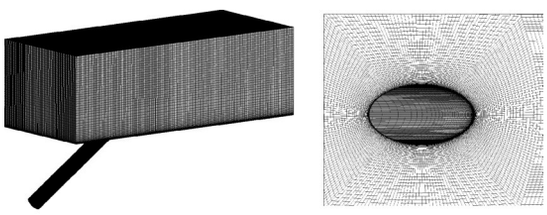


Fig. 1　Geometrical model

2.2 计算域网格及边界条件

网格划分采用商业软件ANSYS ICEM CFD 17.2，整体的网格划分和冷气孔出口附近网格划分如图2所示。所有的网格都为结构化网格，对冷气输运管

内壁面及平板壁面附近网格都进行加密处理，以达到捕捉近壁面传热和流动特性的目的。



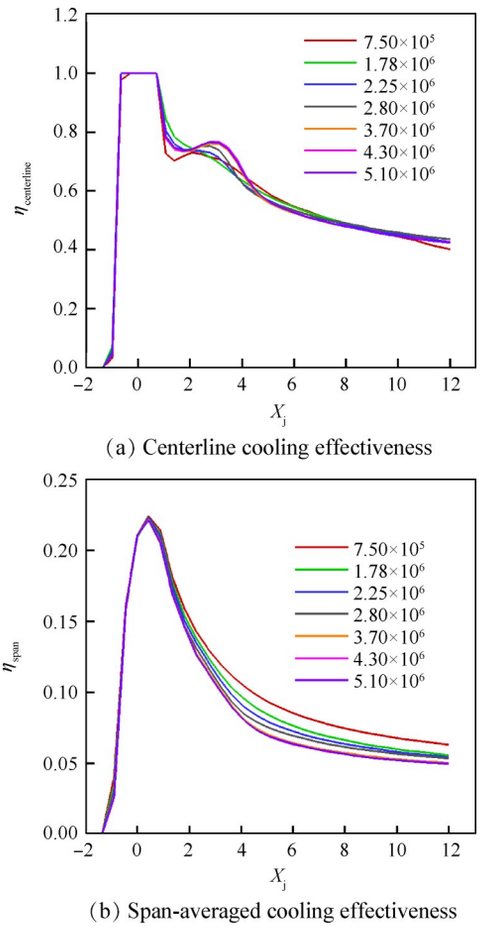
(a) Overall mesh (b) Mesh near the hole

Fig. 2 Mesh for the computational domain

为了验证网格无关性，采取了一系列网格方案进行验证。图3展示了不同网格情况下计算得到的中心线绝热气膜冷却效率和展向平均气膜冷却效率对比。本文的流向位置X_j，是采用气膜孔直径D进行无量纲化的$X_j=X/D$。图3(a)中，网格数为75万和178万时，无法捕捉到紧靠气膜孔出口下游中心线气膜冷却效率的突然降低和再次提高。并且，对更为下游气膜的中心线冷却效率预测偏高。随着网格数增加到370万，已经能够捕捉到冷却效率的急剧降低和升高。网格数继续增加，中心线气膜冷却效率分布无明显差异。图3(b)中，随着网格数增加到370万，展向平均气膜冷却效率逐渐没有差异。网格设置需足够密以捕捉近壁面流动、传热，同时为了节省计算资源，本文下面的计算采用370万网格进行计算。

本文的数值模拟是通过商业软件CFX 17.2进行的，求解采用其自带的求解器。由于脉动射流的引入，流场具有较强的湍流特性和非定常性，所以本文采用非定常计算方法。针对平板气膜冷却模型，国内外学者普遍采用$k-\varepsilon$湍流模型进行研究[22-24]。李蕾等[25]曾采用$k-\varepsilon$湍流模型对流速比VR=0.5，1，2，4的定常、主流脉动以及主流射流都有脉动的横向射流进行数值模拟分析。诸多研究已经证明$k-\varepsilon$湍流模型能够准确预测平板气膜冷却模型的流场及传热特性，所以本文选用$k-\varepsilon$湍流模型对N-S方程进行求解。

边界条件的设定如下。对长方体计算域的两侧面，给定周期性边界条件。对长方体计算域下表面和冷气输运管表面，给定绝热无滑移壁面。对长方体计算域上表面，给定对称边界条件。主流入口，根据实验给定速度值。根据实验中测量的的边界层特性(见表1)，在主流入口给定速度边界层。其中，δ代表边界层厚度，δ*代表边界层位移厚度，θ代表边界层动量厚度，H代表边界层形状因子。为了研究气膜冷却及传热特性，主流和冷气设置恒定温差。高温主流温度保持为定值330K，冷气温度保持为定值300K。



(a) Centerline cooling effectiveness

(b) Span-averaged cooling effectiveness

Fig. 3 Cooling effectiveness for BR=0.5 with different grids

Table 1 Boundary layer characteristics

Parameter	Value
U_∞/(m/s)	21.4
δ/D	0.630
δ^*/D	0.172
θ/D	0.077
H	2.23

本文对吹风比为0.5的恒定射流情况进行脉动，脉动过程吹风比变化幅值为0.2，如示意图4所示。为了研究流场在一个激励周期内的变化，选取1/4T，1/2T，3/4T和T四个瞬时进行研究。本文对比较常用的方波和正弦波激励形式进行对比研究。冷气脉动过程中，激励频率f为200Hz，500Hz，1000Hz，2810Hz和4720Hz，分别对应的无量纲斯特劳哈尔数$St=fD/U_\infty$为0.019，0.047，0.093，0.263，0.441。

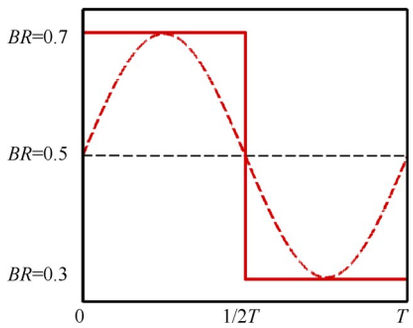


Fig. 4　Blowing ratio schematic during a pulsing cycle

2.3　数值方法有效性

为了验证数值方法的有效性，将数值模拟结果与 Bidan 等[10]实验结果进行对比。图 5 展示的是中心线上沿流向不同位置 X/D=0，2，5 的时间平均速度型。吹风比 BR=0.15 情况（图 5(a)，(b)，(c)）下，数值模拟方法能较为准确地预测速度变化趋势和数值。吹风比 BR=1.0 情况（图 5(d)，(e)，(f)）下，数值方法能较为准确地预测速度变化趋势，但是在 X/D=2，5 位置，数值方法在局部位置预测的速度值偏小。可以看出，数值方法结果能够与实验结果保持较好的一致性。

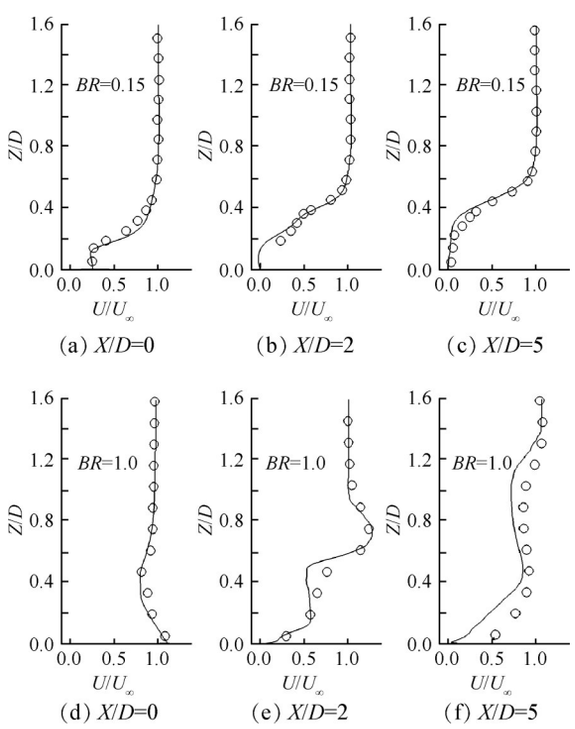


Fig. 5　Comparison between the numerical (solid line) and experimental (symbols) results at X/D=0, 2, 5

吹风比定义为

$$BR = \frac{\rho_c v_c}{\rho_\infty v_\infty} \tag{1}$$

式中 ρ_c 代表冷气密度，v_c 代表冷气速度。ρ_∞ 代表主流密度，v_∞ 代表主流速度。气膜冷却效率定义为

$$\eta = \frac{\left(T_{aw} - T_\infty\right)}{\left(T_c - T_\infty\right)} \tag{2}$$

式中下标 aw 代表壁面，c 代表冷气，∞代表主流。

3　结果分析与讨论

3.1　不同波形时均冷却效率定量对比

关于脉动冷气喷射与恒定冷气喷射之间冷却效率的对比，已经进行过诸多研究，所以这里不再进行研究。

图 6 针对不同激励形式作用下的时均结果，展示了展向平均气膜冷却效率。整体来看，除了 St=0.263 激励情况的局部区域，基本所有正弦激励作用下的展向平均冷却效率都比方波激励高。并且，这种冷却效率的提高在较低激励频率 St=0.019，0.047 和 0.093 时更为明显。这是因为流场的响应速度有限，对输入的较低频激励能够依据输入波形保真响应，但是对高频激励进行差异化响应能力下降。具体的，方波激励下，在 X/D<5.4 区域，展向平均冷却效率随着 St 的增加先呈现不断增加的趋势，并在 St=0.263 时达到最大值。但是，当 St=0.441 时，展向平均冷却效率急剧降低。对于较远的下游 X/D>5.4 区域，展向平均冷却效率随着 St 的增加先减小后增加，转折点对应 St 值为 0.019。正弦激励下，紧靠气膜孔出口的下游区域，展向平均冷却效率随着 St 的增加不断减小。更下游区域，展向平均冷却效率随着 St 的变化较为复杂，其中 St=0.093 展向冷却效果最好。

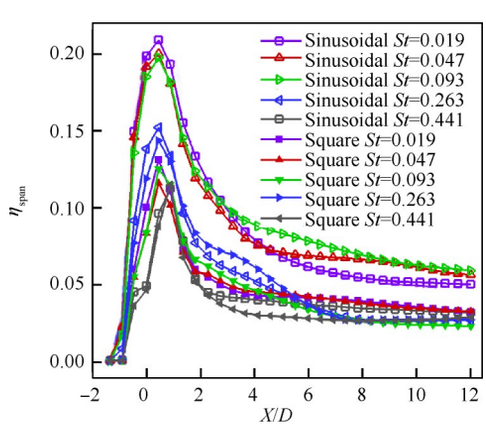


Fig. 6　Comparison of span-averaged cooling effectiveness between square excitations and sinusoidal excitations

图 7 展示了不同激励形式作用下时均结果的中心线冷却效率分布，与图 6 中展向平均冷却效率结果类似，即所有正弦激励作用下的冷却效率均明显比方波激励的高。

具体的，所有采用方波激励作用的情况，气膜孔出口位置的中心线冷却效率都明显小于1.0，并且大致随激励频率升高而加剧（除St=0.263情况）。具体机理，将会在本文下面深入研究。靠近气膜孔出口的下游位置，方波激励下的中心线冷却效率下降后未出现明显的上升，这说明抬离后的冷气再附较弱。采用正弦激励之后，气膜孔出口的中心线冷却效率明显提高。对于较低频激励St=0.019，0.047和0.093情况，气膜孔出口的中心线冷却效率仍能保持为1.0，说明未出现主流入侵。此外，正弦激励的中心线上冷却效率大约在X/D=1.5位置后出现明显提高。这说明冷气出现明显再附，这将会大幅提高下游壁面冷却效率。这种现象在低频激励St=0.019和St=0.047下尤其明显，在图7中的局部放大图中就是仅对这两种激励情况下的中心线冷却效率再度升高变化进行的展示。

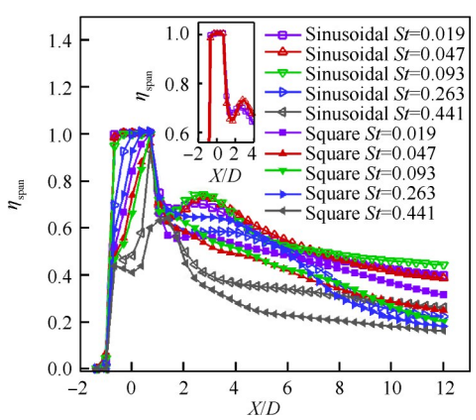


Fig. 7 Comparison of centerline cooling effectiveness between square excitations and sinusoidal excitations

3.2 冷气穿透及附着能力的流场对比

图8展示的是St=0.047（500Hz）方波激励作用下，Y=0截面的瞬时温度云图。每个方波周期内，冷气有1/2T的时间处于0.7吹风比，此时的冷气穿透主流能力强。所以对比图8和图9可以看出，方波激励下，冷气在Z轴方向输运效果显著。但对于冷气，获得更强的穿透能力却意味着对壁面的附着变差，所以方波的展向平均冷却效率和中心线冷却效率都不如正弦波激励情况。在另外的1/2T时间内，冷气吹风比维持在0.3。突然减少的冷气量容易被高温主流穿透，所以喷出的冷气形状为不太连续的团状。实际上，此时动量较小的冷气才是真正对壁面冷却有帮助的。总体来看，方波激励下的冷气一部分增强了与主流的掺混，另一部分用于壁面冷却。

图9中展示的是St=0.047（500Hz）正弦激励作用

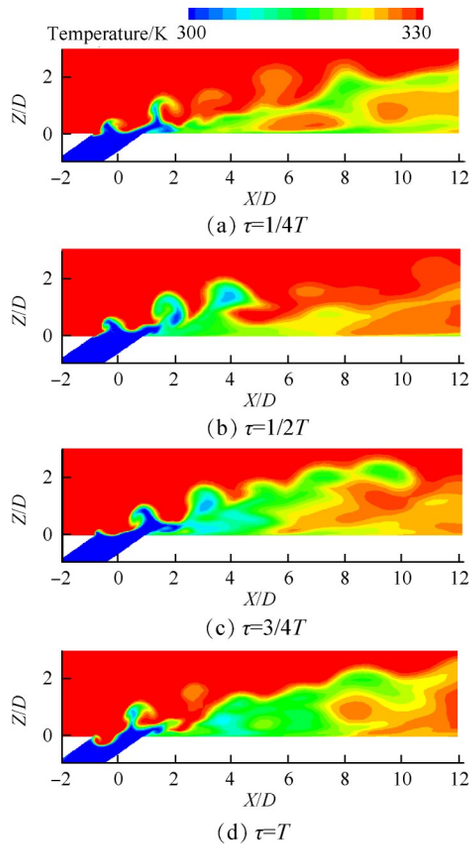


Fig. 8 Instantaneous temperature contours during a forcing cycle with 500Hz square excitation

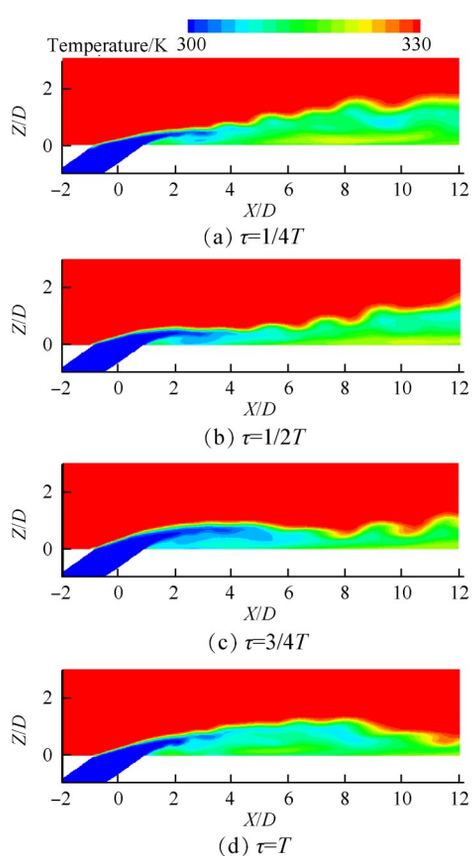


Fig. 9 Instantaneous temperature contours during a forcing cycle with 500Hz sinusoidal excitation

下，Y=0 截面的瞬时温度云图。冷气在 Z 方向的输运不如图 8 中方波激励情况，原因可以通过图 4 中关于激励波形的示意图看出。在 0~1/2T 时间内，方波一直是 0.7 吹风比，而正弦波只有一个时间点达到 0.7 吹风比，这就是其 Z 方向输运较差的原因。恰恰是因为冷气最大动量较低，所以这部分冷气能在主流的压制作用下逐渐再附着到壁面上，因而 0~1/2T 这部分冷气对冷却的贡献是优于方波激励。在另外的 1/2T 时间内，冷气吹风比仅在一个时间点能够低至 0.3，所以实际上这部分冷气对冷却的贡献不如方波激励。此外，根据图 6 和图 7 的结果判定，0~1/2T 这部分冷气对冷却性能的提高发挥更大作用，所以最终正弦激励冷却效果优于方波激励。

3.3　主流入侵机理研究

实际涡轮环境中，如果高温主流入侵到气膜孔，会导致冷气通道或者叶片局部温度过高甚至烧蚀，因此应该防止该现象发生。由于 Bidan 等[10]的方波激励研究中有高温主流入侵气膜孔现象，所以本文研究中已经将脉动周期内的最低吹风比全部由 0.15 提高到了 0.3，希望能够消除主流入侵。但是，气膜孔出口前缘还是观察到了主流入侵，表明采用提高脉动周期内最低吹风比并不是遏制主流入侵现象的最佳手段。注意，本文脉动幅值小（仅 0.2 吹风比）且脉动最小吹风比已经得到提高，所以主流入侵经过弱化。但是放在涡轮真实环境中，主流入侵将非常明显。

为了更清楚地展示该现象，图 10 和图 11 是对 St=0.093 激励下气膜孔出口附近流线进行局部放大研究。图中 1/4T，1/2T，3/4T，T 四个瞬时，分别对应吹风比 0.7，0.7 转 0.3，0.3，0.3 转 0.7，如前面图 3 所示。在图 10 方波激励作用下，可以看到，τ=1/4T（吹风比 0.7）时刻，冷气动量较大，主流无法入侵。τ=1/2T（吹风比 0.7 转 0.3）时刻，冷气动量突然减小使得主流入侵冷气输运管开始发生。τ=3/4T（吹风比 0.3）时刻，在冷气输运管内，由于入侵的主流与冷气相互对抗，产生两个明显的旋涡。此时的吹风比虽小，但是连续的冷气供应仍能制止主流的进一步入侵。随后 τ=T（吹风比 0.3 转 0.7）时刻，冷气输运管内无漩涡，这是因为冷气动量突然增强，入侵的主流无力对抗。可以预见，主流入侵将马上消失，下一个循环重新开始。与图 10 形成对比，图 11 显示的正弦激励情况下，高温主流一直无法入侵冷气管。这是因为正弦激励下的冷气流量连续变化，可抑制主流入侵的发生。

本质上，不同波形激励对主流入侵的影响可以用统一的解释：对于给定的波形，波形上点的斜率对

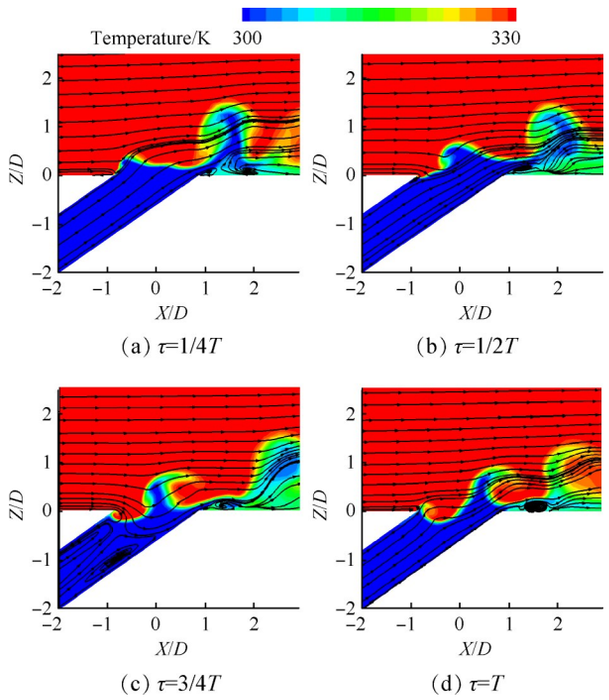


Fig. 10　2-D streamlines and instantaneous temperature contours with 1000Hz square excitation

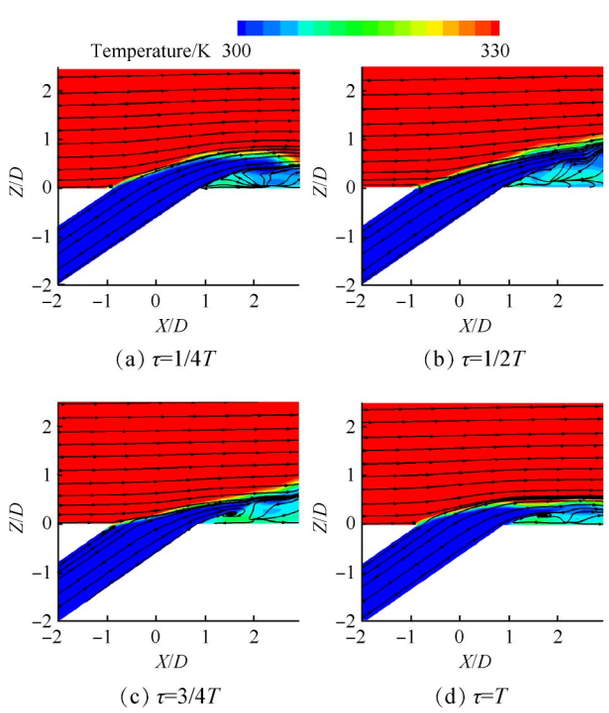


Fig. 11　2-D streamlines and instantaneous temperature contours with 1000Hz sinusoidal excitation

应脉动冷气量变化快慢，变化过于剧烈就会出现主流入侵现象。首先需要有一个认识，即阶跃波形是连续波形的一种特殊情况，因为阶跃变化可视为连续变化的一种极限情况。具体到本文中研究的正弦波，正弦波形上点的斜率随着频率的增加而增加（下

面的公式将进行推导证明),对应脉动冷气量的变化也加快,当冷气量变化过于剧烈就会出现主流入侵气膜孔;具体到本文中研究的方波,对于方波波形上的点,波形固有的阶跃(90°)变化特征对应冷气变化也极端,所以主流入侵必然发生。频率的影响体现为,增加频率还会使得相同时间内的主流入侵次数增多,从而加剧入侵现象。

上面提到,正弦波形上点的斜率随着频率的增加而增加,这里给出推导证明。本文图4采用正弦激励后,脉动冷气的质量流率及其导数可表示为

$$m_0 = m_b + m_a \sin 2\pi f_0 t \tag{3}$$

$$\frac{\partial m_0}{\partial t} = 2\pi f_0 \cos 2\pi f_0 t \tag{4}$$

式中平均质量流量 m_b 为0.3kg/s,质量流量变化幅值 m_a 为0.2kg/s,f_0 为激励频率。若此时将激励频率增加至 n 倍,则新的质量流率及其导数可表示为

$$m = m_b + m_a \sin 2n\pi f_0 t \tag{5}$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 2n\pi f_0 \cos 2n\pi f_0 t \tag{6}$$

定义波形斜率比 r 为变化后与变化前波形上同一点(如图4中标示)的导数比值,即

$$r = \frac{\dfrac{\partial m}{\partial t}}{\dfrac{\partial m_0}{\partial t}} = \frac{2n\pi f_0 \cos\left(2n\pi f_0 \dfrac{t}{n}\right)}{2\pi f_0 \cos 2\pi f_0 t} = n(\text{除极值点}) \tag{7}$$

实际上,波形斜率比 r 代表冷气量瞬时变化的快慢。而上面的推导结果表明,对于正弦激励这类连续脉动,频率增加 n 倍后,每个点的瞬时冷气变化加快 n 倍。当冷气量变化过快时,就会出现主流入侵。

4 结 论

经过本文的平板射流模型研究,得到如下结论:

(1)方波激励特点,冷气在最高吹风比和最低吹风比之间阶跃变化,连续处于最高吹风比那部分冷气穿透能力强但对壁面再附差;正弦波激励特点,冷气在最高吹风比和最低吹风比之间连续变化,冷气仅有一个时间点处于最大吹风比,故穿透能力相对变弱,容易对壁面再附。最终体现为,在本文所有无量纲激励频率 St=0.019,0.047,0.093,0.263,0.441 作用下,正弦激励下冷气对壁面冷却效率都高于方波激励。

(2)采用提高脉动周期内最低吹风比并不是遏制主流入侵现象的最佳手段,主流入侵现象发生的主要原因是冷气量变化过程过于剧烈。所以,方波激励下均出现主流入侵,但采用正弦激励后 St=0.019,0.047,0.093激励情况主流入侵基本被消除,St>0.263的高频激励情况主流入侵也被明显抑制。采用较低频率正弦激励后的冷气变化温和,能够消除主流入侵,建议在实际中采用。

本文是在低速工况下进行研究,关于真实涡轮工况下流速可能带来的影响仍需进一步研究。

参考文献

[1] Frank Muldoon, Sumanta Acharya. DNS Study of Pulsed Film Cooling for Enhanced Cooling Effectiveness[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(13-14): 3118-3127.

[2] Bell C M, Ligrani P M, Hull W A, et al. Film Cooling Subject to Bulk Flow Pulsations: Effects of Blowing Ratio, Freestream Velocity, and Pulsation Frequency[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(23): 4333-4344.

[3] Ligrani P M, Gong R, Cuthrell J M, et al. Bulk Flow Pulsations and Film Cooling-II. Flow Structure and Film Effectiveness[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, 39(11): 2283-2292.

[4] Ligrani P M, Gong R, Cuthrell J M, et al. Bulk Flow Pulsations and Film Cooling-I. Injectant Behavior[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, 39(11): 2271-2282.

[5] Womack K M, Volino R J, Schultz M P. Measurements in Film Cooling Flows with Periodic Wakes[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2008, 130(4).

[6] M'Closkey R T, King J M, Cortelezzi L, et al. The Actively Controlled Jet in Crossflow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 452: 325-335.

[7] Johari H, Pacheco-Tougas M, Hermanson J C. Penetration and Mixing of Fully Modulated Turbulent Jets in Crossflow[J]. *AIAA Journal*, 1999, 37(7): 842-850.

[8] Eroglu A, Breidenthal R E. Structure, Penetration, and Mixing of Pulsed Jets in Crossflow[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(3): 417-423.

[9] Ekkad S, Ou S, Rivir R B. Effect of Jet Pulsation and Duty Cycle on Film Cooling from a Single Jet on a Leading Edge Model[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2006, 128: 564-571.

[10] Bidan G, Vezier C, Nikitopoulos D E. Study of Unforced and Modulated Film-Cooling Jets Using Proper Orthogonal Decomposition, Part II: Forced Jets[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(2).

[11] Frank Muldoon, Sumanta Acharya. Direct Numerical Simulation of Pulsed Jets-in-Crossflow[J]. *Computers & Fluids*, 2010, 39(10): 1745-1773.

[12] Vermeulen P J, Grabinski P, Ramesh V. Mixing of an

Acoustically Excited Air Jet with a Confined Hot Crossflow[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114: 46-54.

[13] Narayanan S, Barooah P, Cohen J M. Dynamics and Control of an Isolated Jet in Crossflow[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(12): 2316-2330.

[14] 蔡　乐. 超高负荷扩压叶栅分离结构及其定常与非定常控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.

[15] 张洪鑫, 陈绍文, 巩　赟, 等. 孔式非定常脉动抽吸控制高负荷压气机叶栅内流动分离的参数研究[J]. 推进技术, 2019, 40(3): 552-560. (ZHANG Hong-xin, CHEN Shao-wen, GONG Yun, et al. Parametric Investigations of Unsteady Holed Pulsed Suction to Control Flow Separations in a Highly Loaded Compressor Cascade[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(3): 552-560.)

[16] 张洪鑫, 陈绍文, 李伟航, 等. 变攻角下端壁非定常脉动抽吸对高负荷压气机叶栅性能的影响[J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2206-2215. (ZHANG Hong-xin, CHEN Shao-wen, LI Wei-hang, et al. Effects of Endwall Unsteady Pulsed Suction on a Highly Loaded Compressor Cascade under Different Incidence Angles[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10): 2206-2215.)

[17] 张洪鑫, 陈绍文, 王松涛, 等. 定常抽吸与非定常脉动抽吸对高负荷压气机叶栅性能的影响[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(4): 92-98.

[18] Hessam Babaee, Sumanta Acharya, Xiaoliang Wan. Optimization of Forcing Parameters of Film Cooling Effectiveness[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(6).

[19] Burd S W, Kaszeta R W, Simon T W. Measurements in Film Cooling Flows: Hole L/D and Turbulence Intensity Effects[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(4): 791-798.

[20] Goldstein R J, Eckert E R G, Burggraf F. Effects of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film Cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1974, 17(5): 595-607.

[21] Lutum E, Johnson B V. Influence of the Hole Length-to-Diameter Ratio on Film Cooling with Cylindrical Holes[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(2): 209-216.

[22] Sarkar S, Ranakoti G. Effect of Vortex Generators on Film Cooling Effectiveness[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(6).

[23] An B T, Liu J J, Zhou S J. Effects of Inclination Angle, Orientation Angle, and Hole Length on Film Cooling Effectiveness of Rectangular Diffusion Holes[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(7).

[24] An B T, Liu J J. Numerical Investigation on Diffusion Slot Hole with Various Cross-Sectional End Shapes[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2017, 139(9).

[25] 李　蕾, 吴海玲, 彭晓峰. 脉动横向射流特性[C]. 吉林:2004年中国工程热物理学会学术会议, 2004.

(编辑:史亚红)