

DOI: 10.7652/xjtuxb201711004

弯曲通道中凸、凹表面水膜流动特性的数值研究

王杰枫^{1,3}, 范小军^{1,3}, 李森², 张翔², 李亮^{1,3}

(1. 西安交通大学叶轮机研究所, 710049, 西安; 2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 200241, 上海;
3. 陕西省叶轮机及动力装备工程实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对航空发动机吸雨的问题,建立了气流与壁面水膜双向耦合作用的数值分析方法,对弯曲通道中凸、凹表面水膜流动特性进行了数值研究。结果表明:弯曲通道中二次流的作用引起凹面水膜向凸面迁移,在凸面沿垂流方向两端形成水膜的聚集区,在凹面的两端则出现水膜厚度减小的现象;来流马赫数与凸、凹表面水膜厚度成负相关关系,水膜流量与凸、凹表面水膜厚度成正相关关系;进口气流角增大导致凸面水膜厚度增大、凹面水膜厚度减小;通道曲率增大引起凸面水膜沿流动方向加剧收缩;相界面处压力波动是引起水膜波动的原因,水膜厚度的波动幅度与来流马赫数和进口气流角成正相关关系。该结果可为改善航空发动机吸雨引起的气动特性恶化问题研究提供参考。

关键词: 凸、凹面;水膜特性;耦合流动;数值研究

中图分类号: TK263.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0022-07

Numerical Investigation for Wall Film Flow Behaviors on Convex and Concave Surfaces of Curved Channel

WANG Jiefeng^{1,3}, FAN Xiaojun^{1,3}, LI Sen², ZHANG Xiang², LI Liang^{1,3}

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. AECC Commercial Aircraft Engine Company Limited, Shanghai 200241, China;
3. Shaanxi Engineering Laboratory of Turbomachinery and Power Equipment, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing the problem that running aero-engine absorbs rain droplets, a numerical algorithm is proposed to reveal the coupling flow behavior between gas flow and wall film. The air flow and wall film coupling behavior on convex/concave surfaces are numerically investigated. It is concluded that the wall film migrates from the concave surface to the convex surface because the quadratic flow militates in curved channel. There is a wall film accumulation area on both side of the convex surface along the flow direction, and the thickness of the wall film on both side of the concave surface decreases. The flow Mach number has negative effect on the thickness of the wall film on the convex and concave surfaces. The wall film mass flux has positive effect on the thickness of the wall film on the convex and concave surfaces. The increasing inlet flow angle increases the wall film thickness on the convex surface and decreases the thickness on the concave surface. The wall film on the convex surface contracts along the flowing direction more obviously with the increasing wall-curvature. The wall film fluctuates due to the pressure fluctuation on the phase interface. The flow Mach number and inlet flow angle have positive effect on the intensity of fluctuation of wall film.

Keywords: convex/concave surface; wall film behavior; coupling flow; numerical study

航空发动机运行过程中受雨水入侵会在叶栅表面产生水膜^[1],诱发发动机喘振、失速甚至熄火^[2],从而导致飞机失去动力。分析叶片表面水膜的行为特征及其对叶栅气动特性的影响,对航空发动机吸雨问题的研究至关重要。

Neupert 等人实验研究了跨声速压气机叶片表面的水膜流动现象^[3]。Day 等研究了空气中携带的水滴在叶片表面沉积形成的水膜流动^[4-5]。然而,受到测量技术的限制,目前还无法对叶栅表面的水膜厚度进行精确测量。

Kirillov 将叶片简化为平板,最早建立了平板叶片表面水膜运动的方程,并计算了不同安装角下平板叶片表面水膜的运动轨迹^[6]。Nikolaidis 等基于三维计算流体动力学(CFD)气动计算结果发展了压气机叶片表面水膜特性的计算程序^[7]。Fendler 等发展了基于子午通流面的计算结果的水膜特性计算程序^[8]。这些计算程序只考虑了气相流动对水膜的影响,属于单向耦合方式,还不能反映气流和水膜之间复杂的相互作用。范小军等发展了考虑水膜和气流相互作用的双向耦合计算方法^[9],但还未就曲率对水膜的影响给出明确的分析结果。

本文在文献[9]的基础上,以叶片吸力面和压力面的水膜流动为背景,对凸凹表面水膜的厚度分布规律、影响因素和影响机理进行了分析,以期对航空发动机吸雨问题的研究提供参考。

1 数值方法及其验证

1.1 数值方法

叶轮机械中高速气流作用下壁面的水膜厚度远小于壁面的曲率半径,因此可以不考虑水膜沿壁面的法向运动,认为水膜在叶片和端壁等三维曲面表面进行二维流动。另外,假设水膜与主流之间仅存在动量和能量交换,而无质量交换。这样,水膜运动的控制方程可写为^[9]

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla_s \cdot [\mathbf{B}] = \mathbf{S}_f + k \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = [h, h\mathbf{V}_f, hT_f]^T$$

$$\mathbf{B} = [h\mathbf{V}_f, h\mathbf{V}_f \cdot \mathbf{V}_f, h\mathbf{V}_f T_f]^T$$

式中: h 为水膜厚度; $\mathbf{V}_f$ 为水膜速度; T_f 为水膜平均温度; ∇_s 为壁面梯度算子; $\mathbf{A}$ 为虚拟时间推进项; $\mathbf{B}$ 为平均通量项; $\mathbf{S}_f$ 为源项; k 为内部黏性项,表达式见文献[9]。

气相的控制方程采用 Navier-Stokes 方程。笛卡尔坐标系下的三维黏性流动表达式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \mathbf{F} + \mathbf{S}_v \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \rho_v \mathbf{U} \\ \rho_v \mathbf{U} \mathbf{U} \\ E_v \mathbf{U} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ -p + \Pi \\ -p\mathbf{U} + \Pi \mathbf{U} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{S}_v = -\rho_f \mathbf{S}_f$$

式中: p 、 ρ_v 、 $\mathbf{U}$ 、 E_v 分别为气相的压力、密度、速度和总焓; Π 为应力张量; $\mathbf{F}$ 为黏性项; $\mathbf{S}_v$ 为气相源项。气相主流与壁面水膜之间的动量和能量交换通过源项 $\mathbf{S}_v$ 和 $\mathbf{S}_f$ 实现。

由式(1)、(2)加上状态方程就构成了求解气流与水膜双向耦合流动的控制方程,求解时需要给定气相主流的进、出口边界条件及液相水膜的进口边界条件。

需要说明的是,目前上述数值模型只能对表面连续水膜与气流构成的两相系统进行分析,对于连续水膜失稳破碎为溪流的情形还不适用。从原理上看,连续水膜或溪流形态的水膜与气流之间的相互作用力是相同的,而上述模型对溪流形态水膜无效的原因是,还没有溪流形态水膜的数值计算方法。

1.2 数值方法验证

Friedrich 等对平板表面的水膜进行了实验研究,其实验段如图 1 所示,实验测量段横截面为 20 mm×100 mm 的长方形,测量装置安装在光学平台上^[10]。液态水通过进口段的多孔介质区域进入测量段,水膜厚度由激光器测量。

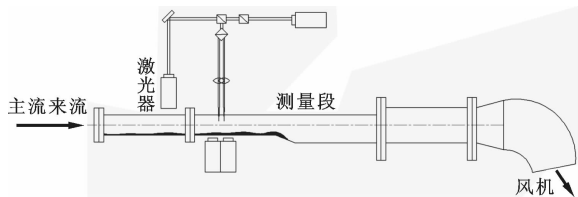
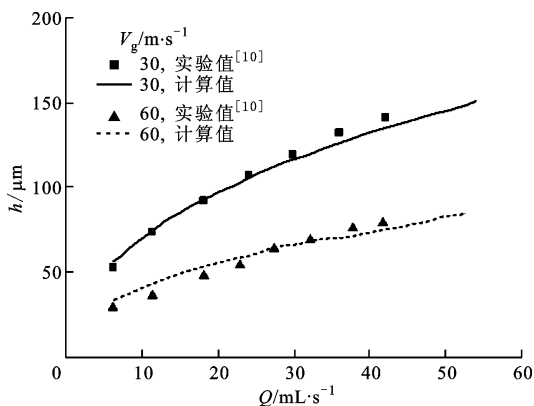
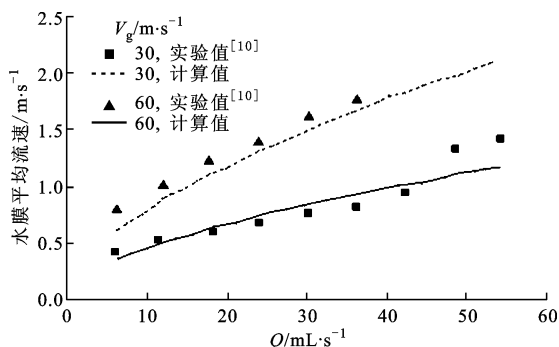


图 1 平板表面水膜实验

按照文献[10]中实验段的参数,本文建立了用于数值模拟的矩形通道模型。通道流动截面为 20 mm×100 mm,流向长度 $c=230$ mm,通道底面前缘设置了宽度为 1 mm 的注水槽。保持来流空气温度 $T_{0a}=298$ K、注水温度 $T_{0f}=298$ K 以及来流总压 $P_0=10$ kPa 不变,在气流速度 $V_g=30$ m/s 时通过改变出口背压对水膜厚度随水膜流量 Q 的变化进行了计算,并与文献[10]中的实验结果进行了比较,结果如图 2 所示。



(a) 水膜厚度的实验值和计算值比较



(b) 水膜平均流速的实验值和计算值比较

图2 表面水膜参数分布

水膜的流量为 5~55 mL/s、平均流速为 0.5~2 m/s、厚度为 30~150 μm 时,本文数值计算的结果与实验测量结果基本一致,但在 V_g 为 30 m/s、水膜流量大于 46 mL/s 时出现了较为明显的偏离,原因分析如下:2 种不同流体相对运动,其剪切面处必然存在流动的稳定性问题,可以采用 Kelvin-Helmholtz 不稳定性原理来解释;对于存在密度差的 2 种流体,如果密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 , ρ_1 小于 ρ_2 ,考虑流体黏性及表面张力的影响,根据小扰动理论,当相对流速满足^[11]

$$U_1 - U_2 > \left(\frac{2(\rho_1 + \rho_2)}{\rho_1 \rho_2} (\sigma g (\rho_1 + \rho_2))^{1/2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

相界面将不再保持稳定的流动,且产生波动。

总体上看,在一定的误差范围内,本文的数值方法所预测的表面水膜厚度以及水膜流速与实验值基本吻合。

2 弯曲表面水膜流动的分析

2.1 计算模型和边界条件

图 3 给出了弯曲表面水膜流动的几何模型示意。弯曲流道由同轴的凸面、凹面和 2 个平直的侧壁构成,凸面半径 $R_i = 745 \text{ mm}$ (曲率 $K = 1.342$),

凹面半径 $R_o = 845 \text{ mm}$ (曲率 $K = -1.183$),特征半径取自某压气机叶栅。弯曲流道的横截面尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,进口和出口沿切线方向各延伸 70 mm。在进口延伸段前沿上、下各布置了 2 个注水缝隙,尺寸均为 $100 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,缝隙中的水进入通道后在气流力作用下沿凹面和凸面铺展为水膜。

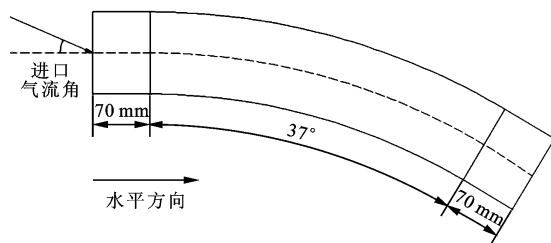


图3 弯曲表面水膜流动的几何模型

计算网格采用 ANSYS ICEM 软件生成,经过网格无关性验证,最终确定网格数为 138 万。主流场采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,求解采用基于压力的全隐耦合方法,水膜流动求解采用自适应时间步长,给定初始时间步长为 $1 \times 10^{-8} \text{ s}$,最大库郎(CFL)数为 0.2,子时间迭代最大步数为 10,子时间步计算的收敛标准为 1×10^{-3} 。计算时边界条件为:主流空气进口马赫数为 0.5,进口气流温度为 300 K,出口背压为 0.1 MPa;凸面和凹面进口水膜雷诺数均为 94,水温为 300 K。进口水膜雷诺数定义为

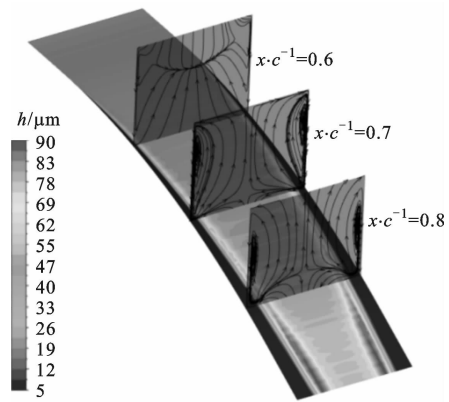
$$Re = \rho_l u d / \mu_l = Q / \mu_l \quad (4)$$

式中: u 为注水缝隙出口处水膜的速度; d 为注水缝隙的宽度; μ_l 为水的运动黏性系数。

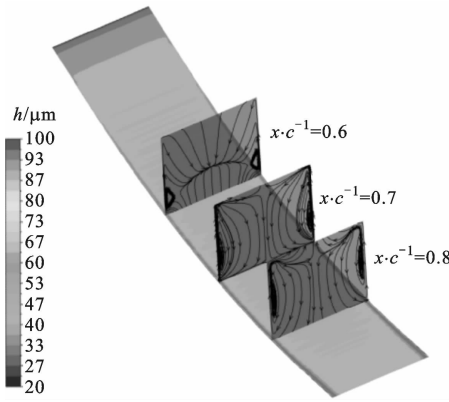
2.2 弯曲通道内曲面水膜的分布特性

图 4 给出了进口水膜雷诺数为 94 时凸、凹表面水膜的厚度及通道二次流分布的计算结果。在进口平直延伸段,凸、凹表面水膜的分布与平板情况基本相似。当水膜进入到弯曲通道时,凸、凹表面水膜的分布发生改变:凸面水膜沿流动方向向通道中心收缩,并在宽度方向距两端一定位置处聚集;凹面水膜分布比较均匀,但沿宽度方向两端水膜厚度明显减小。

凸、凹表面水膜厚度分布的差异与主流区的二次流动有关。如图 5 所示,根据简单径向平衡方程,侧壁边界层气流受到的离心力不足,使得通道的径向压力梯度增大;靠近弯曲通道两侧壁的气流将由凹面向凸面迁移运动,并带动水膜经侧壁从凹面向凸面迁移,从而形成图 4 中的水膜厚度分布。由此可见,弯曲通道中气流二次流的作用会导致水膜厚度重新分布。



(a)凸面



(b)凹面

图 4 凸、凹表面水膜厚度及通道二次流分布

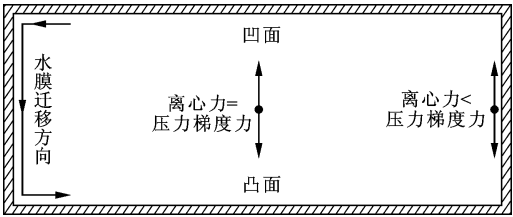


图 5 弯曲通道中的水膜迁移示意

图 6 给出了弯曲通道部分侧壁的水膜厚度分布情况,可以看到,从凹面至凸面,侧壁上的水膜厚度呈上升趋势,并发生了转移。

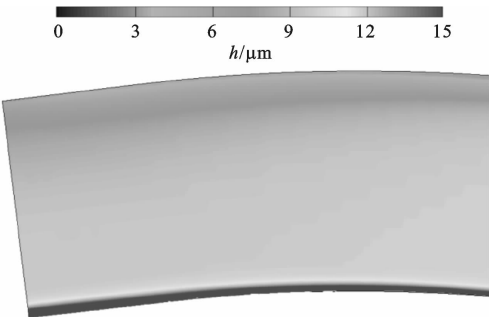


图 6 弯曲通道部分侧壁的水膜厚度分布示意

图 7 给出了弯曲通道中部截面的气流速度分布和侧壁水膜厚度分布示意,该截面垂直于凸、凹面。从贴近侧壁的气流流线可以看到,气流沿侧壁出现了迁移现象,同时由该截面与侧壁交线处的水膜厚度分布可以看出,气流的迁移带动水膜由凹面向凸面迁移。

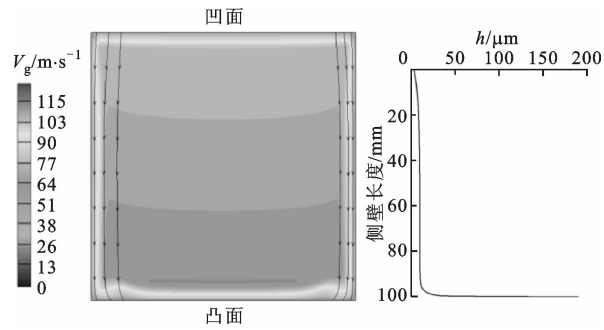


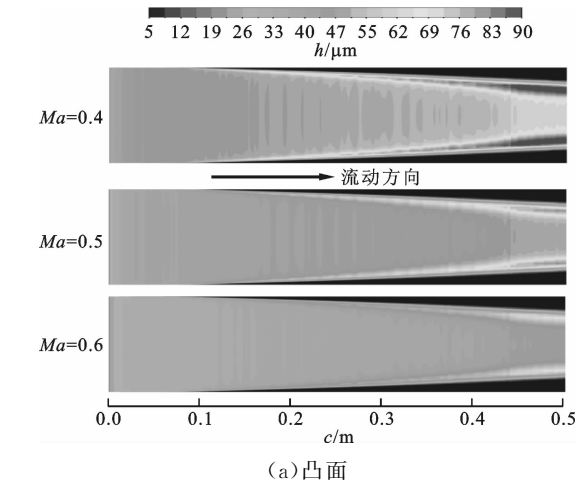
图 7 弯曲通道中部截面气流速度及水膜厚度分布示意

2.3 进口气流马赫数和水膜雷诺数的影响

保持出口压力、主流温度和水膜温度不变,对进口气流马赫数 Ma 和水膜雷诺数 Re 的影响进行了分析。气流马赫数分别为 0.4、0.5、0.6,水膜雷诺数分别为 33、63、94,共有 9 个计算工况点。

图 8 给出了进口水膜雷诺数为 63 时,不同进口气流马赫数下凸、凹表面水膜厚度的分布。从图 8 可以看出,随着进口气流马赫数的增加,凸、凹表面水膜厚度整体呈减小的趋势,但水膜从凹面向凸面迁移而形成的水膜厚度分布特征不变。此外,还可看到,当气流马赫数逐渐增加时,凸、凹表面水膜厚度均出现了波动,这种现象在马赫数达到 0.6 时最为明显,该流动机理将在 2.6 节进行分析。

图 9 给出了进口气流马赫数为 0.4 时,不同进口水膜雷诺数(不同水膜流量条件)下凸、凹表面水膜厚度的分布。从图 9 可以看出,随着水膜流量的



(a)凸面

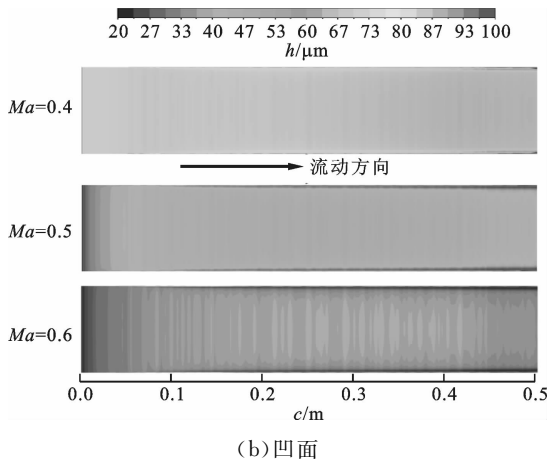


图 8 不同马赫数下凸、凹表面水膜厚度的分布

增加,水膜厚度增大,但凸、凹表面水膜所呈现的流动特征依然相似。

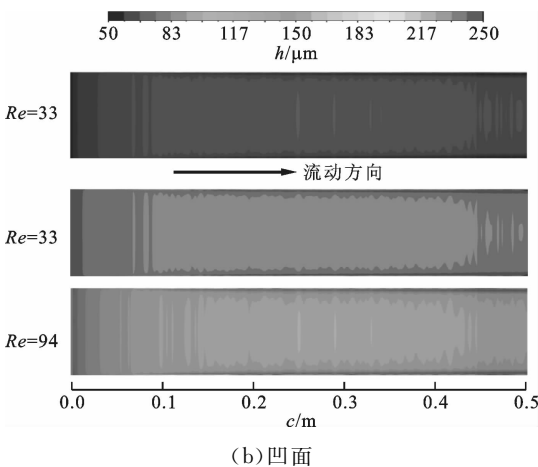
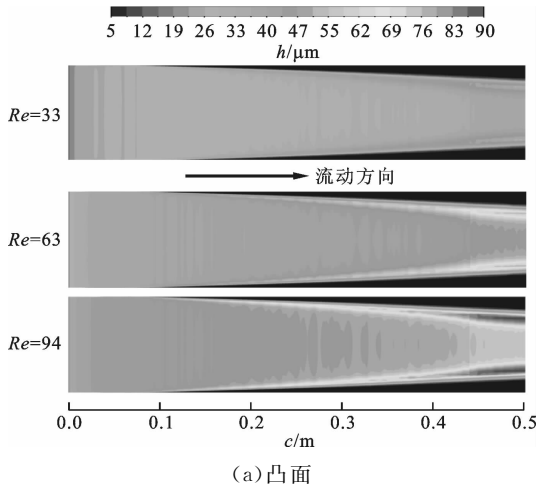


图 9 不同进口水膜雷诺数下凸、凹表面水膜厚度的分布

2.4 进口气流角的影响

如图 1 所示,定义进口气流角 β 为气流速度与水平方向的夹角。保持出口压力、进口水膜雷诺数和水膜温度不变,对进口气流马赫数为 0.5, β 分别

为 8° 、 10° 、 14° 、 17° 和 20° 时的工况进行了计算。

图 10 给出了进口气流角为 10° 、 14° 和 20° 时凸、凹表面水膜厚度的分布。从图 10 可以看出:不同进口气流角下水膜的整体分布形态比较相似;随着进口气流角的增大,凸面水膜平均厚度逐渐增大,凹面水膜平均厚度逐渐减小。此外,进口气流角增大对凸、凹面垂直流动方向的两端水膜流动特征影响不大,其原因是进口气流角对通道二次流强度的影响有限。另一方面,进口气流角增大引起了凸面显著的水膜波动特征。

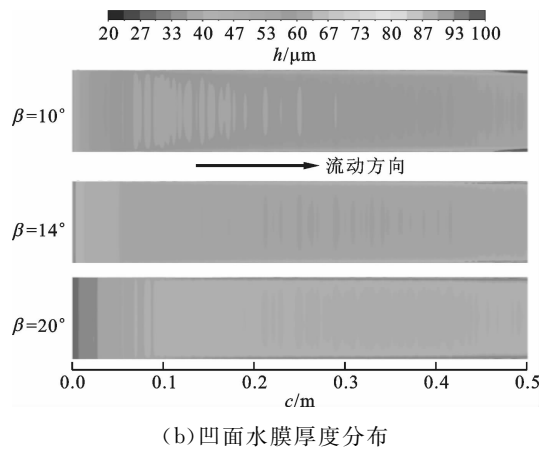
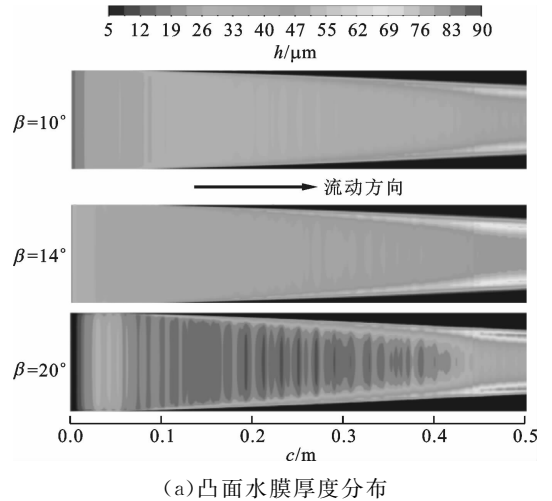


图 10 不同进口气流角下凸、凹表面水膜厚度的分布

2.5 表面曲率的影响

保持出口压力、进口水膜雷诺数和水膜温度不变,分析凸、凹表面曲率变化的影响。对于同轴的凸、凹表面,当凸面曲率为 0.872、1.000、1.342 时,凹面曲率分别为 -0.637 、 -0.909 、 -1.183 。

图 11 给出了 3 种曲率弯曲通道内水膜厚度的分布。从图 11 可以看出,当通道曲率增大时,通道中二次流涡对的强度增大,凸面水膜向中心收缩增强,水膜收缩区域的带状分布特征更加显著。凹面

水膜分布形态也发生了一定的改变,但相较于凸面变化并不显著。

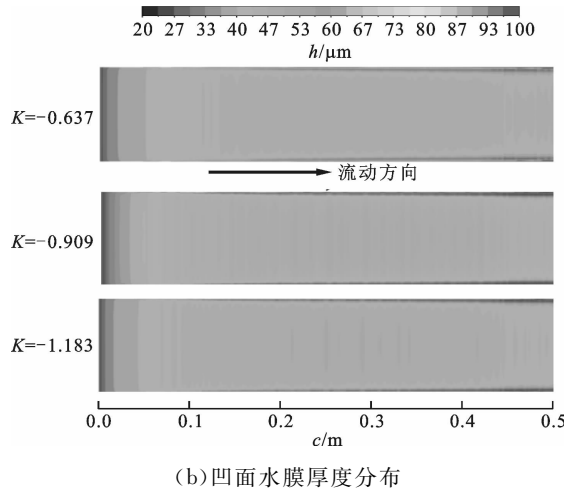
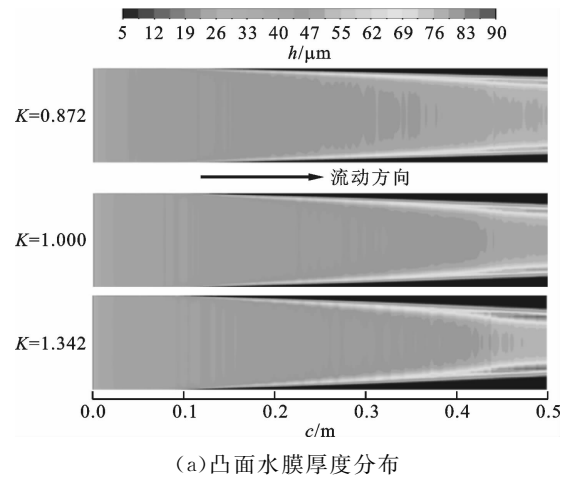


图 11 进口气流马赫数为 0.5、水膜雷诺数为 63 时在不同通道曲率下凸、凹表面水膜厚度的分布

2.6 相界面水膜波动的机理

从前文的结果中可以看到,在一定的流动条件下,凸、凹面均可能出现水膜波动现象。图 12 给出了凸面曲率为 1.342、凹面曲率为 -1.183、水膜雷诺数为 63 时,不同气流马赫数下凸、凹面中心线上的水膜厚度分布。从图 12 可以看出:各马赫数下水膜均发生了波动;随着马赫数的增加,气流对水膜的剪切作用增强,水膜厚度逐渐减小。

图 13 给出了水膜与气流之间相界面处的压力分布曲线。从图 13 可以看出,随着气流马赫数的增大,相界面处压力波动幅度增大。其他工况中相界面处的压力分布特征类似,在此不再一一给出。

综合分析图 12 和图 13 可以得到,相界面上发生压力波动是引起水膜波动的原因,从物理本质上看,相界面处的波动现象是由 Kelvin-Helmholtz 不

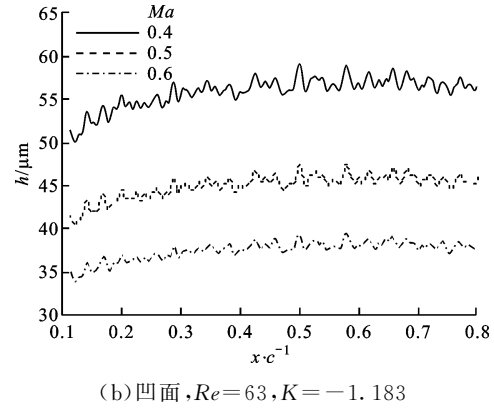
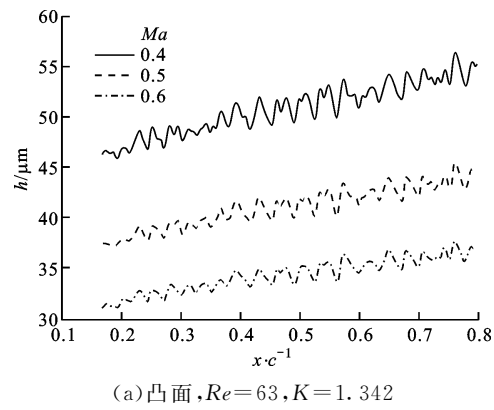


图 12 凸面和凹面中心线上水膜厚度的分布

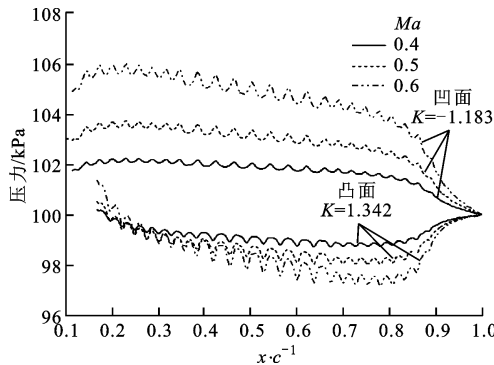


图 13 水膜雷诺数为 63 时在不同气流马赫数下相界面的压力分布

稳定性引起的。叶轮机械中的水膜-气流两相系统有其特殊性,主要表现为水膜的厚度仅为数十到一百多微米,这种情况下水膜内部黏性力可能显著地抵抗水膜运动变形。

虽然本文还无法清晰描述水膜和气流之间相界面处的相互作用,但这一问题对压气机叶片气动和颤振特性的研究具有重要意义。在单相流动中,只存在气流与固体壁面的交界面,当固体壁面作为刚性体时,边界层对气流起到了一种刚性约束作用;在气水两相流动中,在刚性壁面和气流之间的水膜是一种可以变形的弹性介质,这一特性不仅引起水膜

的波动特征,也可能对气流的流动产生影响,进而引起叶片颤振特性发生变化。

3 结 论

本文通过求解空气-水膜双向耦合流动,研究了凸、凹表面水膜的特性,以及进口气流马赫数、水膜流量、进口气流角和曲率对凸、凹表面水膜分布的影响,结论如下。

(1)弯曲通道中,通道内的二次流引起凹面水膜向凸面水膜迁移,水膜厚度重新分布。凸面水膜沿垂直流动方向在两端收缩并形成带状聚集区;凹面水膜厚度减小。

(2)来流马赫数的变化影响了凸、凹表面水膜的整体厚度,二者成负相关关系。

(3)水膜流量和凸、凹表面水膜厚度成正相关关系,但水膜厚度分布形态基本不受水膜流量的影响。

(4)随进口气流角的增大,凸面水膜厚度逐渐增大,凹面水膜厚度逐渐减小。

(5)通道表面曲率的改变使得凸面水膜向中心收缩增强,带状分布特征显著,凹面水膜形态发生变化,但相较于凸面并不显著。

(6)水膜与气流之间相界面处压力波动是引起水膜厚度波动的原因,而气水之间的耦合作用是引起相界面压力波动的原因。水膜厚度的波动幅度与气流马赫数和进口气流角成正相关关系。

参考文献:

- [1] NIKOLAIDIS T, PILIDIS P. The effect of water ingestion on an axial flow compressor performance [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 228(3): 411-423.
- [2] 刘波,曹志鹏,高嵩,等. 来流含水对航空发动机风扇/压气机特性的影响 [J]. *航空动力学报*, 2006, 20(6): 1041-1047.
LIU Bo, CAO Zhipeng, GAO Song, et al. Influence of inlet water ingestion on aero-engine fan-compressor performance [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 20(6): 1041-1047.
- [3] NEUPERT N, OBER B, JOOS F. Experimental investigation on droplet behavior in a transonic compressor cascade [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2014, 137(3): V02AT37A016.
- [4] DAY I, WILLIAMS J, FREEMAN C. Rain ingestion in axial flow compressors at part speed [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2008, 130(1): 223-235.

- [5] HAYKIN T, MURTHY S N B. Transient engine performance with water ingestion [J]. *Journal of Propulsion & Power*, 1988, 4(1): 81-88.
- [6] KIRILLOV I, IABLONIK R M. Fundamentals of the theory of turbines operating on wet steam [M]. *Lenin-grad, Russia: Mashinostroyeniye*, 1968: 78-85.
- [7] NIKOLAIDIS T, PILIDIS P. The effect of water ingestion on an axial flow compressor performance [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 228(3): 411-423.
- [8] FENDLER Y, DOREY J M, STANCIU M, et al. Developments for modeling of droplets deposition and liquid film flow in a through flow code for steam turbines: GT2012-68968 [R]. *New York, USA: ASME*, 2012.
- [9] 范小军,李亮,李森,等. 平板和静叶表面气流-水膜耦合流动特性的数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(11): 7-13.
FAN Xiaojun, LI Liang, LI Sen, et al. Numerical study on the coupling flow behavior of gas flow and wall film for a flat and a turbine stator [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(11): 7-13.
- [10] FRIEDRICH M A, LAN H, WEGENER J L, et al. A separation criterion with experimental validation for shear-driven films in separated flows [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(5): 051301.
- [11] BEALE J C, REITZ R D. Modeling spray atomization with the Kelvin-Mholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model [J]. *Atomization and Sprays*, 1999, 9(6): 623-650.

[本刊相关文献链接]

- 朱玉杰,琚亚平,戴韧,等. 叶栅气动反问题的伴随优化解法及应用. 2017, 51(9): 138-144. [doi: 10. 7652/xjtuxb201709020]
- 李劲劲,何坤,晏鑫,等. 透平叶片近前缘端壁处换热性能的研究. 2017, 51(7): 44-50. [doi: 10. 7652/xjtuxb201707007]
- 范小军,李亮,李森,等. 平板和静叶表面气流-水膜耦合流动特性的数值研究. 2016, 50(11): 7-13. [doi: 10. 7652/xjtuxb201611002]
- 谢金伟,王新军,周骏飞. 空心静叶汽膜孔排吹扫除湿的数值研究. 2015, 49(7): 61-66. [doi: 10. 7652/xjtuxb201507011]
- 李亮,薛太旭,刘启凡,等. 湿蒸汽条件下空心静叶缝隙抽吸性能的试验研究. 2014, 48(11): 1-7. [doi: 10. 7652/xjtuxb201411001]
- 王琳,裴世源,徐华. 表面织构对转子轴承系统稳定性影响的实验研究. 2014, 48(3): 84-88+114. [doi: 10. 7652/xjtuxb201403016]

(编辑 苗凌)