

传热对微型离心叶轮间隙泄漏流动影响的数值研究

孙芊蔚¹, 李秋实^{1,2}, 李志平^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 针对某微型燃气轮机的微型离心叶轮, 采用三维数值模拟方法, 将绝热壁面情况和考虑传热影响情况下的叶轮性能和内部流场进行对比研究, 重点分析壁面传热情况对微型离心叶轮间隙泄漏流动的影响。研究发现: 传热对叶轮性能的影响主要集中在其对间隙泄漏流的作用上。绝热条件下间隙泄漏流轨迹沿叶片吸力面向下游发展, 传热则使得间隙泄漏流动迹向相邻叶片压力面偏转, 增强间隙泄漏流与主流的掺混导致间隙泄漏流损失增大。与绝热情况相比, 传热虽然在一定程度上减弱了叶片通道内的压力梯度, 但由于热量的传入会导致间隙泄漏流初始堵塞增大, 最终仍会在叶片通道内造成更大的间隙泄漏流堵塞。

关 键 词: 微尺度; 离心叶轮; 非绝热边界条件; 堵塞; 间隙泄漏流

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Numerical investigation on effect of heat transfer on tip clearance flow in micro centrifugal impellers

SUN Qian-wei¹, LI Qiu-shi^{1,2}, LI Zhi-ping^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Co-Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: Three-dimensional numerical simulations were carried out on a centrifugal micro impeller under adiabatic and isothermal wall temperature boundary conditions in order to compare the impeller performance and the detailed flow features affected by heat transfer. The comparison was especially focused on the heat transfer effect on tip clearance flow in micro centrifugal impeller. It is found out that the performance of impeller is mainly attributed to the influence of heat transfer on tip clearance flow. The trajectory of tip clearance flow develops along the suction side of the blade towards impeller outlet under adiabatic condition, while the tip clearance flow is driven away from the suction side of the blade towards the pressure side of the adjacent blade when heat transfer is involved. Meanwhile, heat transfer also lead to the increase of mixing between tip clearance flow and the main flow resulted in greater loss. Although heat transfer can reduce the pressure gradient within blade passage to certain extent as compared with adiabatic condition, it eventually causes more tip blockage in impeller passage as the initial tip clearance blockage was enlarged due to heat addition.

收稿日期: 2014-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(51176005)

作者简介: 孙芊蔚(1985—), 女, 北京人, 博士生, 主要从事微尺度叶轮机械气动热力学研究。

通讯作者: 李秋实(1970—), 男, 重庆人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。

Key words: micro-scale; centrifugal impeller; non-adiabatic boundary-condition; blockage; tip clearance flow

叶轮机械的叶尖间隙流动会对性能有很大的影响,对其流动机理的充分认识将有助于改善叶轮机械的性能.对微型离心旋转机械,尤其是毫米量级的微型燃气轮机,叶片高度与常规尺度下相比有大幅的减小.同时,受限于微尺度加工和装配等客观因素,叶尖间隙并不能相应于叶高的减小等比例控制在很小的程度.因而叶尖间隙所占叶高的比例将显著增加,从而意味着间隙泄漏流将随之增强.

对于毫米量级的微型燃气轮机,由于结构布局 and 尺度,不能再将压缩系统视为绝热系统,传热的影响也成为影响微型燃气轮机性能的一个重要因素.

麻省理工学院(MIT)的 Epstein 等^[1-2]微型燃气轮机研究的发起人指出,间隙泄漏流损失在微型燃气轮机中占有很大的比重,是微型燃气轮机设计中的主要挑战之一.微型燃气轮机对间隙大小有着很高的敏感度.虽然将间隙控制得尽可能小可以减弱间隙流动强度及其损失,但低雷诺数工作条件会带来黏性阻力的增大.此外,他们还指出由于在这种很小的尺度量级很难实现有效的隔热,压缩系统受到涡轮和燃烧室传入热量的影响,将导致其流量、压比和效率均有所下降.传热的影响使得微型燃气轮机在整个特性图上相较于常规尺度燃气轮机工作于完全不同的设计空间.

斯坦福大学的研究人员^[3]以他们设计并加工的一款设计转速为 800 000 r/min,转子直径为 12 mm 的微型径流高速压气机作为研究对象,对不同的顶部间隙开展了数值模拟和实验研究.研究定量分析了间隙大小对其研究对象性能的影响,结果表明该微型径流高速压气机的轮缘功、总压比和等熵效率都将随着间隙的增大而下降.

Sirakov 等^[4]选用麻省理工学院的一个微型离心叶轮设计方案作为几何基准,通过变化边界条件的方法来剥离不同物理机理的作用,从而量化分析对叶轮性能影响最主要的损失机制.他们的研究表明,间隙泄漏流和传热带来的损失是最主要的两部分.对于所选用的研究对象,间隙流动产生的损失导致微型离心叶轮效率下降 17%,传热最高可导致微型离心叶轮效率进一步下降 25%.然而他们的研究仅限于传热对叶轮总性能影响的宏观层面,没有更进一步地剖析传热

对叶轮内部各种流动孤立的影响.

Van den Braembussche 等^[5]在自行设计的二维微型压气机上开展的关于间隙对压气机性能影响的研究表明间隙会导致压气机压比和效率的下降,但可以一定程度地拓宽压气机的堵塞和失速边界.此后,他们还对由于涡轮和压气机间的传热对微型燃气轮机转子的部件效率、输出功和燃气轮机整体循环效率的影响开展了分析研究^[6],建立了以热通量为自变量的非绝热模型用于评估传热导致的性能(输出功和循环效率)下降.

FU 等^[7]采用数值模拟方法考察了不同的间隙大小对毫米量级微型涡轮性能的影响.研究发现随着间隙的增大,在流量保持不变的情况下涡轮的输出功会大幅下降.

此外,国内外的研究人员还对小型旋转机械中间隙流动的影响进行了系列的研究工作^[8-14].

Ribaud^[15]对一超微型涡轮建立了考虑传热的热力学模型.该模型在不同情况下的应用证实了非绝热工作条件是导致性能恶化的主要原因.研究还指出需要通过对低雷诺数下不同部件传热系数的进一步研究对模型进行完善.

Gong 等^[16]将实际的非绝热压缩过程简化为气体在被压缩前先被等压加热后再被绝热压缩两个过程,并基于相应假设建立了一个传热模型.通过这一模型可以定量地评估传热对微型叶轮的总压比、等熵效率等性能参数的影响.

沈煜欣等^[17]的研究指出间隙流动的影响范围遍及全叶高,同时会对二次流形式产生影响.他们对传热影响的数值研究表明壁面传热会使流动状态改变,进而导致微型离心压气机的总压比和等熵效率降低.

上述相关研究均不同程度地表明间隙流动损失和传热是微型旋转机械中重要的损失来源.但当前对微型旋转机械的研究重点还集中在间隙泄漏流对旋转机械性能影响的评估,并主要基于绝热条件下的研究.而对传热影响的研究大多只关注传热导致的性能恶化的总体评估,没有更进一步地探索传热对实际流动产生的影响并开展损失分析.对间隙流动和传热影响的研究还是相对独立的.本文则是采用数值模拟方法,重点关注两者的内在联系,分析传热对间隙流动特性的影响,进而解释两者对微型离心叶轮性能影响的物理机制.

1 研究对象及数值模拟方法简介

1.1 研究对象

本文研究对象是一个二维直叶片结构的微型离心叶轮的基准设计方案. 该微型离心叶轮的相关参数参见表 1. 通过以叶轮进口相对速度作为特征速度、以叶轮的叶片高度作为特征尺度, 并选用叶轮进口处的相应流动特性参数估算得到的叶轮进口雷诺数在全工况范围内为 8000~10000.

表 1 微型离心叶轮设计参数

Table 1 Design parameters of micro centrifugal impeller

参数	数值
叶轮直径/mm	6.8
叶片进出口轮径比($D_{\text{exit}}/D_{\text{inlet}}$)	1.55
叶片进口角/(°)	60.4
叶片后弯角/(°)	45
叶片数	12
叶片高度/mm	0.6
间隙高度/mm	0.02
转速/(r/min)	1200000
轮缘切线速度/(m/s)	427

1.2 数值方法

本文数值模拟方法采用 ANSYS CFX 求解器, 通过有限体积法求解基于雷诺平均的三维定常 Navier-Stokes(N-S)方程. 本文研究的微型离心叶轮设计方案, 其进口雷诺数大于 8000, 因而将叶轮内部流动视为湍流. 同时考虑到叶轮进口处的流动可能较为接近层流, 故将进口湍流强度设置为 1%. 在 Gong^[16]的研究中, 通过将微型压气机原型的数值计算结果与保证雷诺数和马赫数相似的 75 倍放大实验结果进行对比, 校验了他所用数值工具在微型领域应用的准确性. 由于本文研究对象与 Gong 的研究对象具有相近的特性, 故在本文的数值模拟中沿用 RNG(renormalization group) $k-\epsilon$ 模型.

本文计算用网格由 Numeca IGG/Autogrid 网格生成器生成. 叶片通道采用 HOH 型拓扑结构, 叶尖间隙采用蝶形网格, 如图 1 和图 2 所示. 图 3 给出了在两个不同的工作点上网格求解结果: 当网格数大于 450000 时, 叶轮的总压比、等熵效率特性基本保持不变. 因此本文后续研究选用

网格的网格数为 484509, 其中沿流向 149 个网格点、周向 37 个网格点、展向 57 个网格点(间隙内网格数为 17).

数值计算中进口给定总压为 101325 Pa、总温为 288.15 K 和垂直于进口边界的速度方向, 出口给定平均静压, 通过调节静压得到相应的工况点. 微型燃气轮机最常选用的加工材料多为硅基类材料和合金类材料, 其特点是 Biot 数仅在 1% 的量

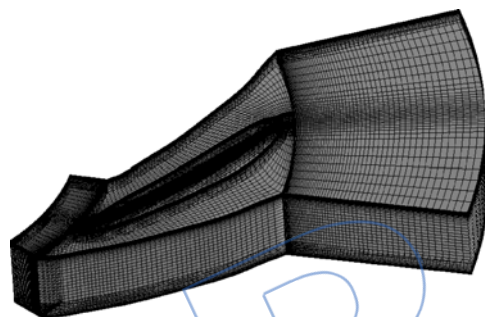


图 1 计算域三维网格示意图

Fig. 1 Schematic of three-dimensional grid for computational domain

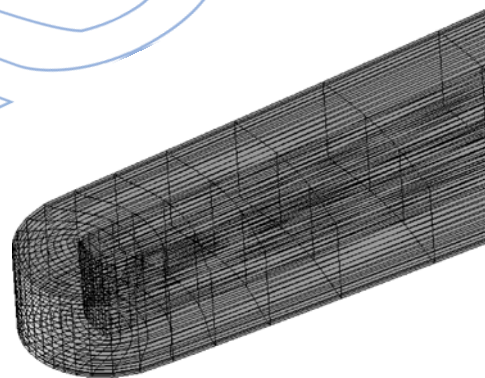
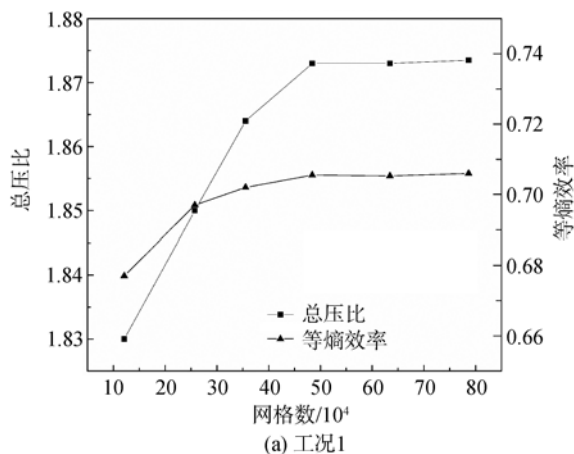


图 2 间隙蝶形网格示意图

Fig. 2 Schematic of butterfly grid for tip region



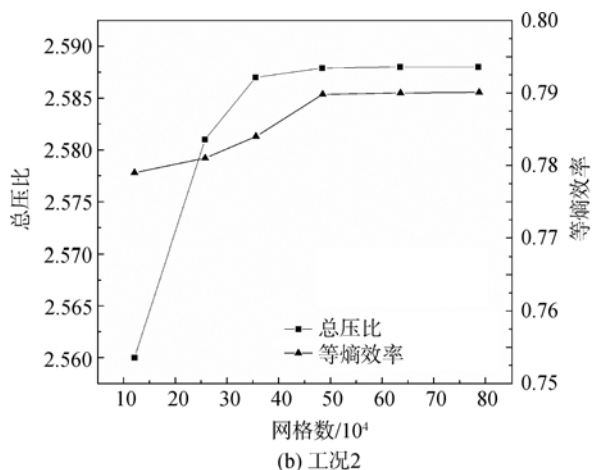


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Verification of mesh independence

级,即材料的自身导热热阻远小于表面的换热热阻.因此在考虑传热影响的数值模拟中,选用等温壁面作为固壁边界条件,壁面温度给定为600 K.

2 数值结果及分析

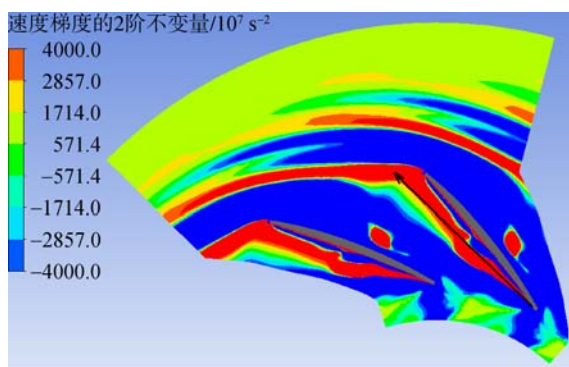
2.1 间隙泄漏流特征对比分析

对比绝热和考虑传热影响下的叶尖 Q 准则分布可以看出,传热会改变微叶轮的间隙泄漏流的运动轨迹,如图4所示.从图4(a)可以看出,在绝热条件下,微型叶轮的间隙泄漏流从叶片前缘卷起后沿叶片通道靠近吸力面一侧随着与主流的掺混流向叶轮出口.而当有热量传入叶轮的情况下,间隙泄漏流从叶片前缘卷起后在叶片通道中的运动轨迹明显向相邻叶片压力面一侧偏转,如图4(b)所示.在考虑有传热的条件下,传热会导致压气机耗功的增加,也就是叶轮增压能力将下降,即叶片压力面与吸力面之间的压差会减小,间隙泄漏流的强度会随之减弱.但传热同时会导致流体的黏性增大,从而增大了间隙泄漏流与主流的掺混损失,导致叶尖区域的堵塞增大.这也是导致间隙泄漏流轨迹偏转的主要原因.间隙泄漏流轨迹的偏转也使得间隙泄漏流在周向的影响范围增大.对叶尖区域堵塞的分析将在下一节进一步展开.

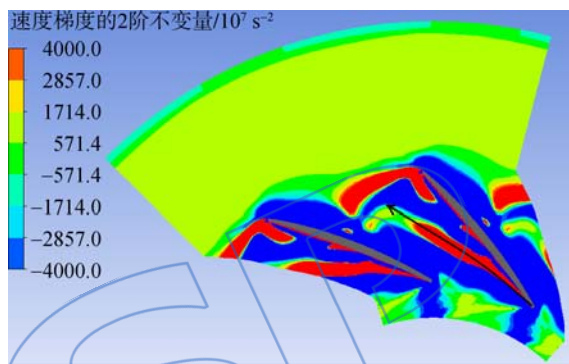
图5给出了有、无传热影响下微型离心叶轮叶片通道无量纲熵增的分布.其中无量纲熵增的定义如式(1)所示, T_0 为叶轮进口总温, s_{local} 为当地熵值, $s_{\text{avr, inlet}}$ 为叶轮进口熵值, U_1 为叶轮进口的圆周速度.

$$\bar{s} = T_0 (s_{\text{local}} - s_{\text{avr, inlet}}) / (0.5 U_1^2) \quad (1)$$

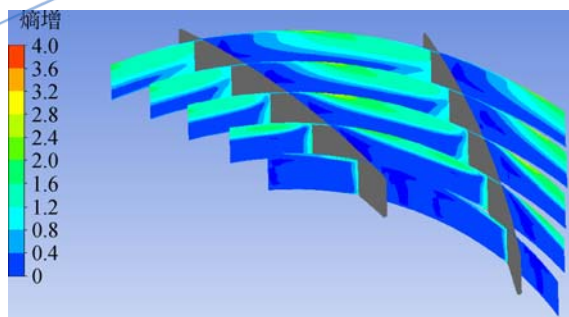
从叶轮进口到出口沿程的熵增分布进一步证



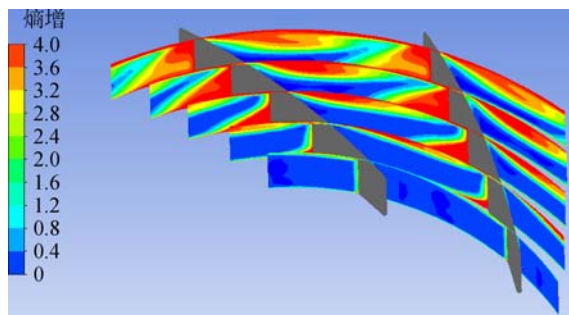
(a) 绝热壁面



(b) 600 K等温壁面

图4 95%叶高 Q 准则分布Fig. 4 Distribution of Q -criterion at 95% span

(a) 绝热壁面



(b) 600 K等温壁面

图5 叶片通道沿程各截面无量纲熵增分布

Fig. 5 Distribution of normalized entropy increment along blade passage

实了传热使得间隙泄漏流的轨迹改变,间隙泄漏流会向叶轮相邻叶片的压力面一侧迁移.此外,由于传热使得流体黏性增大,间隙泄漏流的损失也显著增大.

2.2 间隙泄漏流气动堵塞对比分析

间隙泄漏流气动堵塞是分析间隙泄漏流损失的一种最直接有效的评估方法.

Khalid 等^[18]建立的准一维气动堵塞计算模型是将间隙泄漏流简化为一个相对于主流的速度亏损在叶片通道中逆压梯度下的发展过程.因而可以将间隙泄漏流划分为2个阶段:第1个阶段是间隙泄漏流的形成阶段,通过泄漏系数 C_d 评估间隙泄漏流引起的初始堵塞量大小;第2阶段是间隙泄漏流的发展阶段,通过出口堵塞面积评估间隙泄漏流产生的总堵塞.

首先考察传热对间隙流动第1阶段的影响.从图6给出的传热对泄漏系数 C_d 的影响可知,传热会导致 C_d 减小,这意味着间隙泄漏流初始堵塞因传热量而增长.

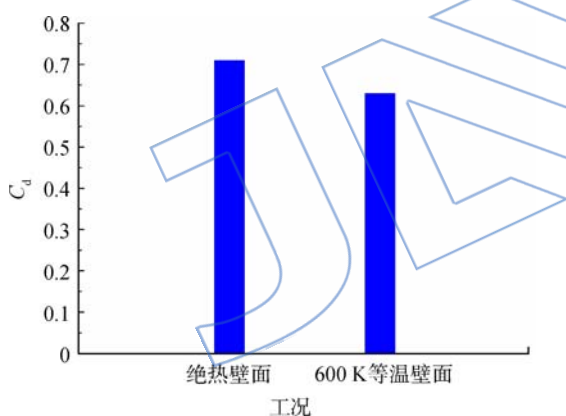


图6 传热对 C_d 的影响

Fig. 6 Heat transfer effect on C_d

接着考察传热对间隙流动第2阶段的影响.本文参考 Khalid 等^[18]建立的通过流场中密流梯度分析得到的气动堵塞评估方法,将堵塞面积为

$$A_b = \iint \left(1 - \frac{\rho v_r}{\rho_e v_e} \right) \cdot dA \quad (2)$$

其中 ρ , v_r 分别为该截面内的当地密度和当地径向速度; ρ_e , v_e 分别为判定所得速度亏损区边界处的密度和径向速度.对于绝大多数要区分速度亏损区和主流区的流动中,都存在速度亏损区速度梯度远大于主流区速度梯度的现象.本文对于速度亏损区边界主要根据各截面上沿流向和周向密流梯度的大小进行判别,选取不出现主流区的

最小的密流梯度值作为临界值,从而确定速度亏损区的边界.

采用该方法对绝热和有传热影响条件下的间隙泄漏流堵塞进行了对比分析.对于微型离心叶轮,其增压能力主要取决于离心力做功,与径向位置成正比,因此在叶片通道沿程一直保持较高的压力梯度,间隙泄漏流堵塞也持续增长.虽然传热会使得叶轮的增压能力减弱,即叶片通道中的压力梯度会略低于绝热情况,如图7所示,但由于间隙泄漏流的初始堵塞相比绝热情况有所增长,因而间隙泄漏流在叶轮叶片通道中发展形成的堵塞与绝热条件下的堵塞相比较仍有所增长(参见图8),从而导致间隙泄漏流的轨迹产生偏移.其中图8纵坐标 B 为某截面叶尖区域实际堵塞面积 A_b 与该截面面积 A_{local} 的比值,即

$$B = \frac{A_b}{A_{local}} \quad (3)$$

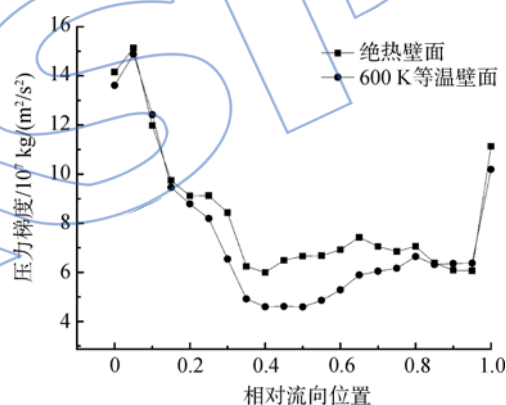


图7 流向压力梯度沿叶片通道的分布

Fig. 7 Distribution of streamwise pressure gradient along blade passage

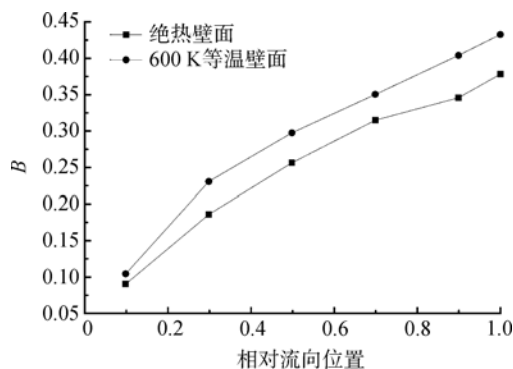


图8 间隙泄漏流堵塞在叶片通道中的发展

Fig. 8 Development of tip clearance flow blockage along blade passage

2.3 传热对叶轮性能影响的对比分析

图9给出了绝热情况和有传热情况下叶轮出口效率沿展向的分布. 叶轮出口效率定义为

$$\eta = \frac{(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1) T_{t,inlet} c_p}{\Delta h^*} \quad (4)$$

$$\pi = \frac{p_{t,outlet}}{p_{t,inlet}} \quad (5)$$

其中 $T_{t,inlet}$, $p_{t,inlet}$ 为叶轮进口总温和总压; c_p 为比定压热容; $p_{t,outlet}$ 是叶轮出口总压; Δh^* 是叶轮进出口总焓变, κ 为等熵指数.

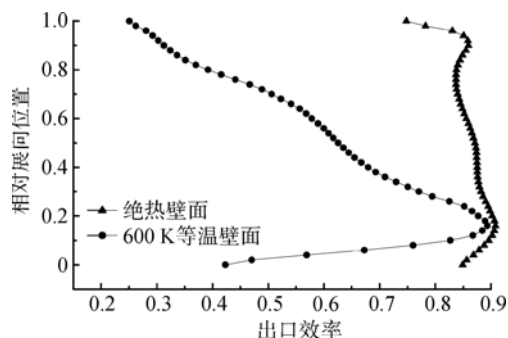


图9 叶轮出口效率沿展向分布的对比

Fig. 9 Comparison of spanwise distribution of efficiency at impeller outlet

从图9中可以看出,在绝热条件下,间隙泄漏流的影响范围主要在90%叶高以上,且间隙泄漏流带来的出口效率损失在10%左右.但在有传热影响的条件下,间隙泄漏流的影响范围显著增大,超过50%叶高,且损失急剧增长.间隙泄漏流带来的大幅出口效率下降主要是由于两方面原因.一方面,由于传热的影响使得间隙泄漏流的堵塞增大,从而导致损失增大,出口效率下降;另一方面,由于传热,流体自身的黏性增大,因而导致间隙泄漏流与主流的掺混增强,黏性损失由此增大以致效率下降.此外,由于间隙泄漏流对叶片通道上半部的堵塞作用使得流线向下半部偏转,以及接近轮毂区域壁面传热使得流线向上偏移,增大了20%叶高附近区域的流速,从而在一定程度上改善了这一区域的流动情况,使得这部分区域的出口效率并没有受传热的影响而下降.然而传热对微型离心叶轮的影响主要还是在其对间隙泄漏流的影响导致的叶轮出口效率的大幅下降.

3 结论

本文主要通过数值模拟方法,开展了传热对微型离心叶轮间隙流动影响的研究,主要结论

如下:

1) 传热会改变微型离心叶轮间隙流动特征.在绝热条件下间隙泄漏流轨迹沿叶片吸力面向下游发展;传热则使得间隙泄漏流轨迹向相邻叶片压力面偏转,周向影响范围增大.同时传热会增强间隙泄漏流与主流的掺混导致间隙泄漏流损失增大.

2) 传热会在一定程度上减弱叶片通道内的压力梯度,但由于热量的传入会导致间隙泄漏流初始堵塞增大,进而会造成叶片通道内总体的间隙泄漏流堵塞随之增大.这也是导致间隙泄漏流轨迹偏移的主要原因.

3) 通过对绝热和传热情况下叶轮性能的对比如可知,传热对叶轮性能的影响主要集中在其对间隙流动的作用上.

参考文献:

- [1] Epstein A H. Millimeter-scale MEMS gas turbine engines [R]. ASME Paper 2003-GT-38866, 2003.
- [2] Epstein A H, Jacobson S A, Protz J M, et al. Shirtbutton-sized gas turbines: the engineering challenges of micro high speed rotating machinery [C] // Proceedings of the 8th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Hawaii: [s. n.], 2000: 1-11.
- [3] Johnston J P, Kang S, Arima T, et al. Performance of a micro-scale radial-flow compressor impeller made of silicon nitride [R]. Tokyo: The International Gas Turbine Congress, 2003.
- [4] Sirakov B, Gong Y, Epstein A, et al. Design and characterization of micro-compressor impellers [R]. ASME Paper 2004-GT-53332, 2004.
- [5] Van den Braembussche R A, Islek A A, Alsalihi Z. Aero-thermal optimization of micro-gasturbine compressor including heat transfer [R]. Tokyo: The International Gas Turbine Congress, 2003.
- [6] Van den Braembussche R A, Alsalihi Z, Verstraete T. Heat and power balance in micro gasturbine rotors [R]. [S. l.]: Technical Digest, Power MEMS, 2004.
- [7] FU Lei, SHI Yan, DENG Qinghua, et al. Aerodynamic design and numerical investigation on overall performance of a microradial turbine with millimeter-scale [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(3): 1-9.
- [8] Danish S N, MA Chaochen, YANG Ce, et al. Comparison of two methods to increase the tip clearance and its effect on performance of a turbocharger centrifugal compressor stage [R]. Kajang, Malaysia: International Conference on Energy and Environment, 2006.
- [9] 殷明霞, 冀国锋, 桂幸民. 叶尖间隙流动对某微小型离心压气机性能的影响 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 565-570.

YIN Mingxia, JI Guofeng, GUI Xingmin. Influence of tip

- clearance flow on performance of one micro centrifugal compressor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(3): 565-570. (in Chinese)
- [10] 于海滨, 邓阳, 夏晨, 等. 叶尖间隙泄漏对厘米级高亚声微型轴流涡轮性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(11): 2517-2525.
- YU Haibin, DENG Yang, XIA Chen, et al. Effect of tip clearance leakage on performance of centimeter-level high subsonic micro axial flow turbine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(11): 2517-2525. (in Chinese)
- [11] 刘正先, 陈丽英. 亚声速半开式离心叶轮叶顶间隙的流动特征[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(4): 937-945.
- LIU Zhengxian, CHEN Liying. Nature of tip clearance flow in subsonic unshroud impeller of centrifugal compressor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(4): 937-945. (in Chinese)
- [12] 郭宫达, 张扬军, 徐建中, 等. 叶尖间隙分布对内燃机增压压气机性能影响[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(3): 549-556.
- GUO Gongda, ZHANG Yangjun, XU Jianzhong, et al. Research on the effect of centrifugal compressor blade tip clearance distribution on combustion engine turbocharger performance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(3): 549-556. (in Chinese)
- [13] Watanabe N, Teramoto S, Nagashima T. Numerical analysis of 2.5 dimensional geometry turbine performance[R]. Tokyo: The International Gas Turbine Congress, 2003.
- [14] 石宝龙, 岂兴明, 矫津毅, 等. 二次流与叶顶间隙损失的数值研究[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(5): 1096-1100.
- SHI Baolong, QI Xingming, JIAO Jinyi, et al. Numerical analysis of the secondary flow and tip clearance leakage loss[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(5): 1096-1100. (in Chinese)
- [15] Ribaud Y. Internal heat mixing and external heat losses in an ultra micro turbine[R]. Tokyo: The International Gas Turbine Congress, 2003.
- [16] Gong Y, Sirakov B T, Epstein A H, et al. Aerothermodynamics of micro-turbomachinery[R]. ASME Paper 2004-GT-53877, 2004.
- [17] 沈煜欣, 刘建军. 考虑热传导的微型离心压气机设计与数值分析[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(4): 897-901.
- SHEN Yuxin, LIU Jianjun. Design and numerical simulation of the effect of heat transfer on the micro centrifugal compressor performance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(4): 897-901. (in Chinese)
- [18] Khalid S A, Khalsa A S, Waitz I A, et al. Endwall blockage in axial compressor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(3): 499-509.