

文章编号: 1000-8055(2008)03-0448-06

静态封严篦齿内部流动与换热的数值计算

刘振侠¹, 赵海刚¹, 张丽芬¹, 吴毅¹, 王小峰²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘 要: 建立二维篦齿模型, 运用数值方法, 从分析齿腔内流场和篦齿顶板换热的角度研究了篦齿的封严特性. 通过多种工况的计算, 探讨了雷诺数、齿顶宽和齿隙之比对篦齿腔内流动、压降损失以及齿腔顶板换热系数之间的关系. 计算数据和实验数据进行比较, 发现变化规律一致, 误差较小. 研究表明: 雷诺数、齿顶宽和齿隙之比影响着齿腔内部流动和换热的状态, 是最终成为决定篦齿封严效果的重要因素.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 直通式封严篦齿; 雷诺数; 换热系数

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Numerical analyses of flow field and heat transfer in cavity of straight labyrinth seal at static state

LIU Zhenxia¹, ZHAO Haigang¹, ZHANG Lifen¹,
WU Dingyi¹, WANG Xiaofeng²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072, China;

2. Chinese Flight Test Establishment Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to investigate the performance of straight sealing labyrinth at static state in aero engine, a model of straight sealing labyrinth was established and applied to compute the flow characteristics and heat transfer in the straight sealing labyrinth. With the result of numerical simulation, the effects of Reynolds numbers and T/C on flow field, pressure loss, and coefficient of heat transfer were studied. By comparing some group results of numerical simulation and experiments data, it is found that the numerical results are in agreement with experimental data and the error can be acceptable. The results show that the Reynolds number and T/C affect the flow characteristics and heat transfer in the straight sealing labyrinth and thus are important factors in deciding the sealing performance of straight labyrinth.

Key words: aerospace propulsion system; straight sealing labyrinth; Reynolds number; heat transfer coefficient

在现代动力装置中, 封严篦齿作为重要的密封元件得到了非常广泛的应用. 其密封性能也极大的影响着发动机的性能^[1]. 目前已有大量的文献分别从静态旋转、热边界、以及结构等角度来研究关于封严篦齿的密封机理^[1-5].

本文将数值模拟和实验研究相结合, 从雷诺数、齿顶宽与齿隙之比影响腔内流动状态和篦齿顶板换热的角度, 对齿腔中流动规律和特点以及篦齿齿腔换热特性进行深入的探讨和研究, 通过多种工况的计算分析, 得到雷诺数以及齿顶宽与

收稿日期: 2007-03-27; 修订日期: 2007-06-25

作者简介: 刘振侠(1963), 男, 陕西西安人, 教授, 主要从事飞机发动机流场及换热计算研究.

齿隙比对篦齿性能影响的规律, 并得出几点有工程价值的结论.

1 实验装置设计与测量方法

实验采用吸气式风洞来完成, 整个实验装置分为进口段、均匀段、实验段、恢复段和收缩段 5 个部分. 风洞实验雷诺数范围 5 000~ 100 000.

风洞实验 T/C 范围 3~ 0.5. 其中实验段示意图如图 1 所示: 由尺寸放大 30 倍的 5 个直通齿和 4 个齿腔组成. 齿高 H 为 200 mm, 齿距 B 为 200 mm, 齿顶宽 T 为 20 mm, 齿顶间隙 C 可调.

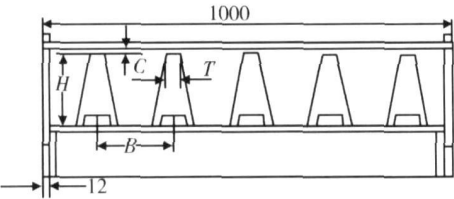


图 1 实验段直通篦齿分布图 (单位: mm)
Fig. 1 Location of straight labyrinth in experiment section (Unit: mm)

实验中采用圆柱三孔针旋转法来测量流场中的压力, 通过测量的总压、静压以及速度偏转角计算出 x, y 方向的速度分量. 在进行篦齿腔顶板换热实验时, 将篦齿封严顶板覆盖加热带, 通电使其表面形成等热流密度的边界条件. 由电流和电压可求出电加热率, 根据加热带面积即可得到加热的热流密度 q . 由热流密度和热电偶测得的壁面温度数据便可以计算出壁面换热系数的分布. 换热系数计算公式为: $h = q / (t_w - t_f)$, t_w 为壁面温度, t_f 为气流的平均温度. 由于实验中气流温度不容易测得, 取进口温度 t_0 来代替, 即 $h = q / (t_w - t_0)$.

2 数值计算方法

作二维计算模型. 如图 2 所示, 模型主要由 5 个直通篦齿和 4 个齿腔组成, 左端为进口, 右端为出口.

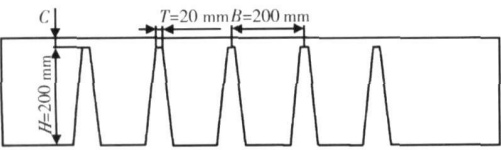


图 2 二维模型示意图
Fig. 2 Sketch of 2-D model

进出口边界条件: 采用压力进口和压力出口

条件, 进出口总温取 300 K 常温.
固体壁面: 采用标准壁面函数来处理. 在腔内流场模拟时, 壁面设为绝热条件, 在换热模拟时, 取模型上壁面部分为热边界条件.

采用标准 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型、非结构化网格和 SIMPLE 算法, 来模拟篦齿腔内流动和换热的特性.

计算中解的收敛判断标准: 变量残余小于 1×10^{-4} , 进出口流量不平衡率控制在 0.5%.

以雷诺数、 T/C 的变化作为模拟工况来进行篦齿内部流动的速度场、压力场、压降损失以及换热系数的计算. 其中雷诺数定义为

$$Re = \rho V_{\text{隙}} 2C / \mu$$

式中 $2C$ 为间隙的 2 倍, $V_{\text{隙}}$ 为齿隙处的平均流速.

3 结果分析

3.1 篦齿腔典型流场分析

根据实际应用, $Re = 40\,000$, $T/C = 1$ ($C = 20$ mm), 工况下模拟的流场分布最具有代表性. 图 3 和图 4 分别为这一工况下主齿腔 (第一齿腔, 以下同) 内的速度矢量图和压力等值线图 (压力单位为 Pa).

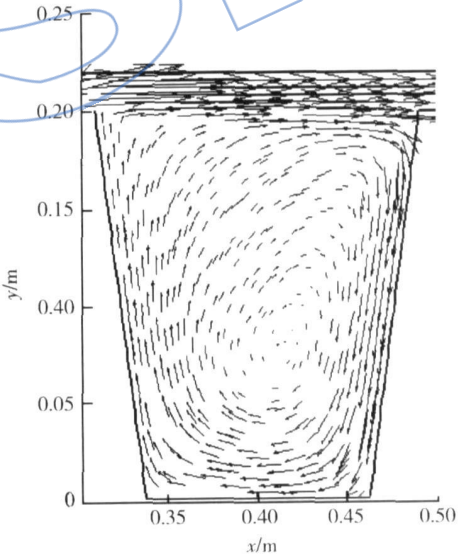


图 3 主齿腔内速度矢量图 ($Re = 40\,000$, $C = 20$ mm)
Fig. 3 Velocity vector of first cavity in sealing labyrinth ($Re = 40\,000$, $C = 20$ mm)

从图 3 中可以看出齿腔中的流动大体可分为两个区: 射流区和涡流区. 射流区: 分布在顶板的下部, 流体以较高的速度射向下一个齿腔. 回流区, 也就是涡流区, 此区位于齿腔中部, 流体的速度方向和大小都发生了明显的变化. 原图可以看出, 回流区的形成, 是由于气流流过齿隙后, 在射流区速度较大, 经过齿腔时带动腔内的流体做旋

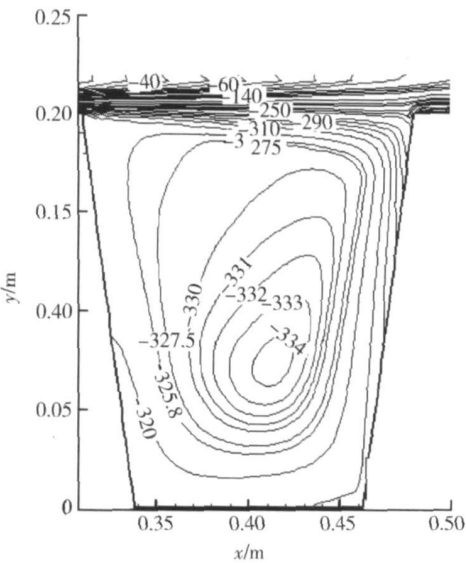


图 4 主齿腔内压力等值线图
($Re=40\,000$, $C=20\text{ mm}$)

Fig.4 Pressure contours of first cavity in sealing labyrinth ($Re=40\,000$, $C=20\text{ mm}$)

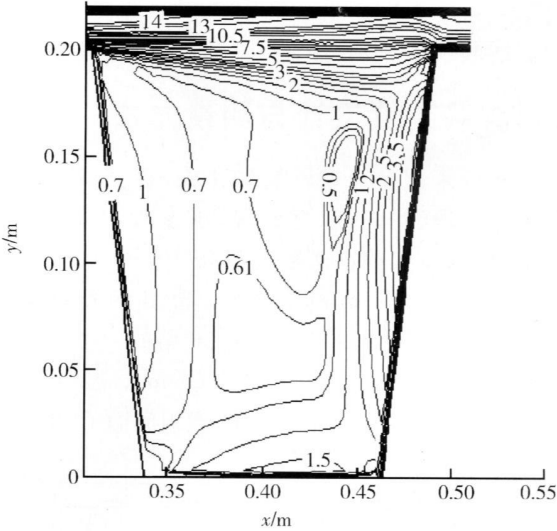
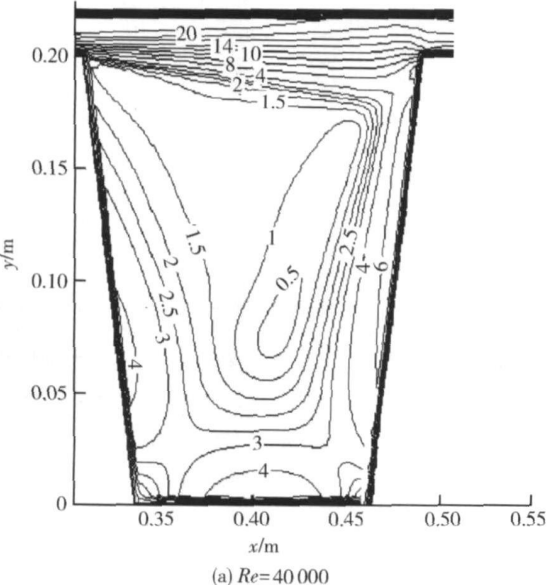
涡运动所形成的。

从图 4 看出在大涡区涡心压力值最小,越靠近涡的边缘,压力逐渐增大(由于是吸气式风洞,所以压力呈现负值,压力的绝对值越小,表明压力越大)。在射流区,压力值较大,且沿着流动的方向,射流区的压力值在减小。

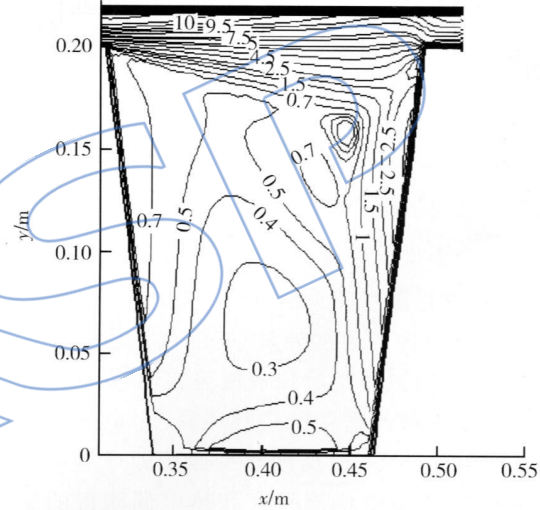
3.2 雷诺数对流动和换热的影响

取 Re 分别为 $40\,000$, $30\,000$, $20\,000$, $15\,000$, $T/C=1$ ($C=20\text{ mm}$),来模拟篦齿主齿腔的流动和换热。

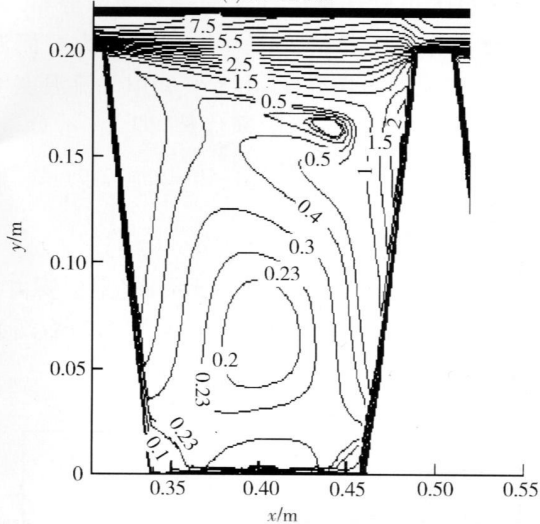
图 5 是不同雷诺数下篦齿主齿腔中的速度等值线图。



(b) $Re=30\,000$



(c) $Re=20\,000$



(d) $Re=15\,000$

图 5 不同 Re 下篦齿主齿腔中的速度等值线分布图
($C=20\text{ mm}$)

Fig.5 Velocity contours of first cavity in seaing labyrinth with different Reynolds numbers ($C=20\text{ mm}$)

从图 5 中曲线分布可以看出, 在相同 T/C 下, 随着雷诺数的减小, 射流区的速度明显减小, 同时由于射流区对于涡流区引射作用的减弱, 导致涡区的转速减小, 速度等值线分布紊乱程度增加. 由分析可知, 齿腔内流动能力的减弱, 降低了流体在腔中的流动损失, 不利于整个篦齿的封严节流.

图 6 是不同雷诺数下封严篦齿压降的变化情况(1, 2, 3, 4, 5 点分别表示 5 个篦齿齿顶的中心位置). 从压降图可知, 整个试验段中的压降随着雷诺数的增大而增加. 此外, 可以看出第一、二齿腔的压降在整个试验段中占有很大的份额. 取 $Re=20\,000$, $T/C=1$ 的工况下的压降分布进行列表分析, 如表 1 所示, Δp_i 为第 i 个齿腔的压降, Δp 为试验段总的压力损失, 其中 $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i (i = 1, 2, 3, 4)$. 由表 1 看出, 前两个齿腔的压降约占整个篦齿腔压降的 73.2%, 其中第一个齿腔占 45%, 而后两个齿腔总的压降约占 27%. 因此, 从整体上看, 在 4 个齿腔的封严篦齿中, 起主要封严作用的是前两个齿腔, 当流体流经后两个齿腔时, 流动已趋于稳定. 可见, 封严篦齿靠近高压端的齿腔在封严中有重要作用.

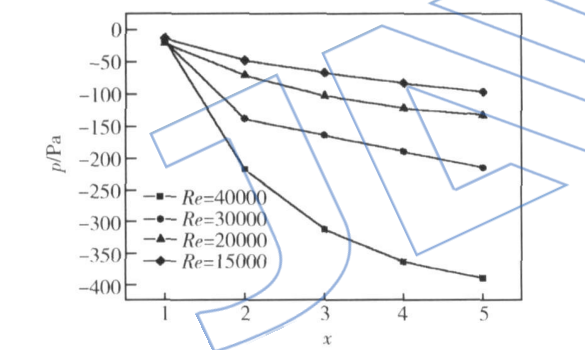


图 6 不同 Re 下封严篦齿压降图 ($T/C=1$)
Fig. 6 Pressure loss in five positions of sealing labyrinth with different Reynolds numbers ($T/C=1$)

表 1 $Re=20\,000$, $T/C=1$ 时各齿腔的压力损失
Table 1 Pressure loss of different seaing labyrinth cavity in $Re=20\,000$, $T/C=1$

	Δp_1	Δp_2	Δp_3	Δp_4	$\sum \Delta p_i$
压降损失/ Pa	50.58	31.72	18.9	11.3	112.5
压降损失百分比/ %	45.0	28.2	16.8	10.0	100

图 7 是 $T/C=1$, 雷诺数分别为 40 000, 30 000, 12 500 时篦齿顶板局部换热系数的计算和实验结果.

图 7 反映不同雷诺数下篦齿顶板局部换热系数的分布曲线, 可以看出: 首先, 随着雷诺数的增

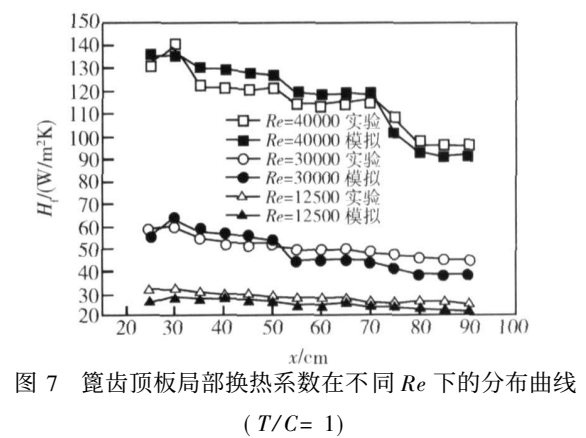


图 7 篦齿顶板局部换热系数在不同 Re 下的分布曲线 ($T/C=1$)
Fig. 7 Coefficient of heat transfer in upper plate of sealing labyrinth with different Reynolds number ($T/C=1$)

大, 换热系数呈上升的趋势. 分析可知, 当雷诺数增大时, 篦齿腔中气体流动的速度在增大, 从而加大了对篦齿顶板的换热效果, 同时也使气流得到更多的热量而膨胀, 促使了气流内部摩擦, 气流间的质量交换增加, 这些作用提高了篦齿的密封性能, 减少泄漏. 其次, 顶板的换热系数从前到后逐渐下降, 而且雷诺数越大下降趋势越明显. 因为随着流动过程中的能量损失, 顶板下部对换热起主要作用的射流区速度逐渐减小, 从而换热系数减小. 图中的模拟结果与实验结果相比, 变化趋势一致, 低雷诺数下误差较小, 而高雷诺数下误差较大, 这和 $k-\epsilon$ 湍流模型本身缺陷有关. 但不影响文中模拟结果的工程应用性.

3.3 齿顶宽与齿隙之比(T/C)对流动和换热的影响

取 $Re=40\,000$, T/C 分别为 2, 1.3, 1, 0.5 ($C=10, 15, 20, 40\text{ mm}$) 的工况, 来模拟齿顶宽与齿隙之比(T/C)对于篦齿主齿腔的流动和换热.

图 8 分别是不同 T/C 下主齿腔中速度等值线图.

从图 8 可以看出, 随着 T/C 变小, 即密封间隙的增大时, 气体流速减小, 节流效应在减弱, 射流区与腔内涡流区的质量、能量交换减少, 旋涡的转速变慢. 整个齿腔内流动能力的减弱, 导致封严性能降低.

图 9 是不同 T/C 下封严篦齿压降的变化情况(其 x 轴点的表示位置同图 6)从图中可以发现, 在相同的雷诺数下, 随着 T/C 的增大, 即间隙的减小, 封严篦齿压降明显增大, 说明篦齿的节流封严效果在增强. 同样发现前两个齿腔的压降在整个篦齿段压降中占有很大的比例, 对于节流封严起主要的作用.

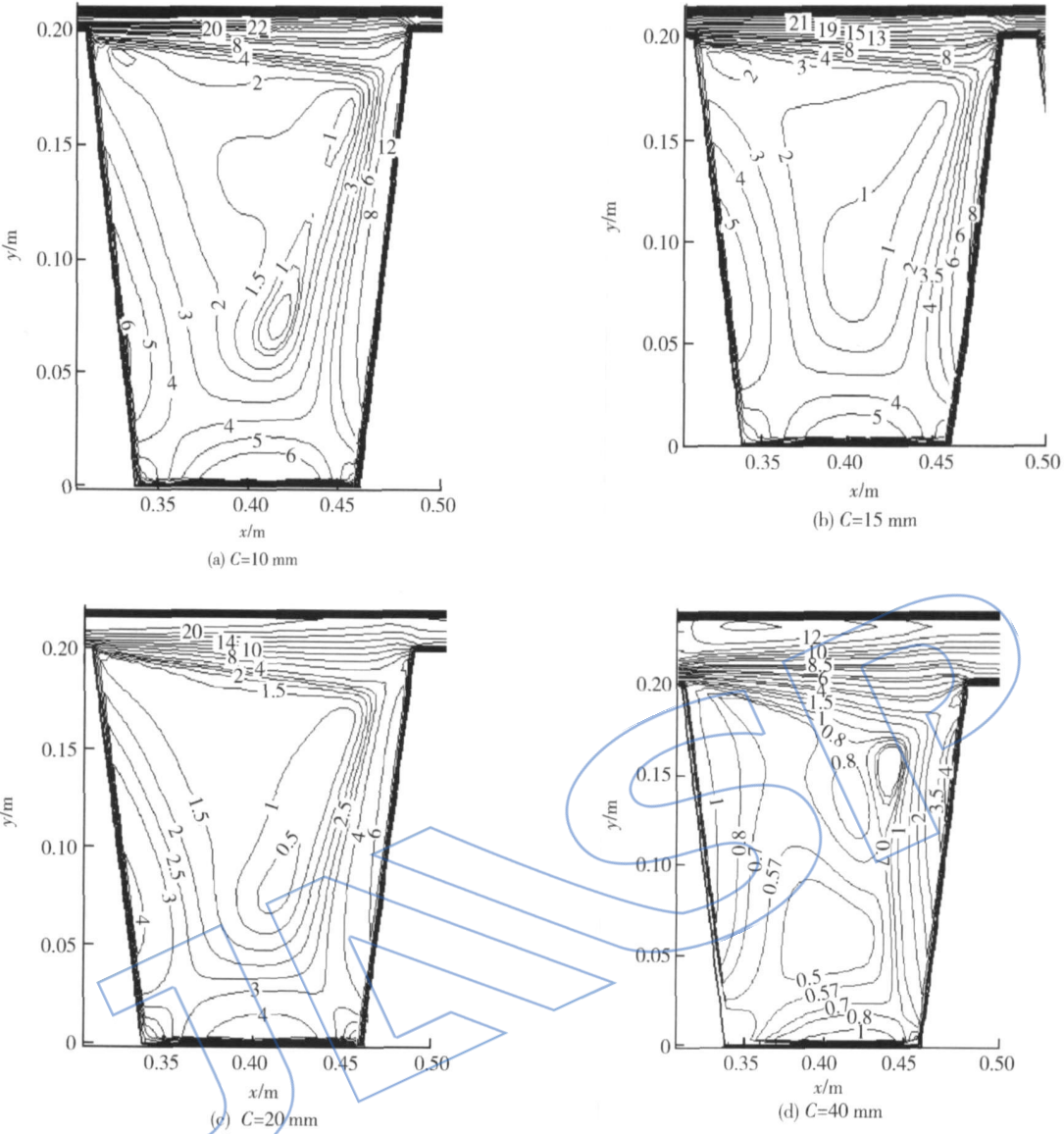


图 8 不同 T/C 下主齿腔中速度等值线图 ($Re=40\ 000$)

Fig. 8 Velocity contours of first cavity in sealing labyrinth with different T/C ($Re=40\ 000$)

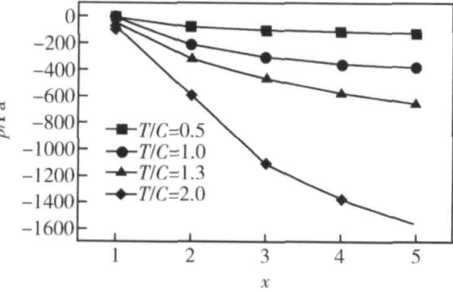


图 9 不同 T/C 下篦齿压降图 ($Re=40\ 000$)

Fig. 9 Pressure loss in five positions of sealing labyrinth with different T/C ($Re=40\ 000$)

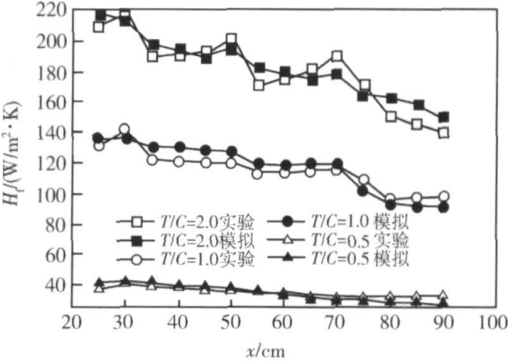


图 10 篦齿顶板局部换热系数在不同 T/C 下的分布曲线 ($Re=40\ 000$)

Fig. 10 Coefficient of heat transfer in upper plate of sealing labyrinth with different T/C

($Re=40\ 000$)

图 10 是 $Re=40\ 000$, T/C 分别为 2, 1, 0.5 时篦齿顶板局部换热系数的计算和实验结果。从图 10 中可以得出以下结论: 首先, 随着 $T/$

C 的增大, 即间隙的减小, 换热系数明显呈上升趋势。分析可知当间隙的减小时, 齿腔中气流的速度在增大, 加强了气流对于篦齿顶板的换热量, 同时也使流体得到了更多的热量而受热膨胀, 加大了流体内部摩擦使流体间的质量交换增加, 从而提高了篦齿的密封性能, 减少了泄漏。其次, 顶板的换热系数从前到后逐渐下降, 而且随着 T/C 的增大下降趋势越明显。模拟结果与实验结果相比, 其变化规律一致, 数据吻合基本较好。同样, 在高速流下, 即 T/C 较大时, 误差较大的原因主要是 $k-\epsilon$ 湍流模型在模拟腔室流动时有一定的缺陷, 但不影响本文模拟结果在实际篦齿设计和分析中的应用性。

4 结 论

本文对封严篦齿中的流场的流动规律、特点以及对篦齿齿腔换热特性进行深入的探讨和研究, 通过多种工况的计算分析, 获得雷诺数和齿顶宽与齿隙比对篦齿性能影响的规律。

(1) 雷诺数、齿顶宽与齿隙比的增大, 提高了腔内涡流的速度和射流速度, 使得封严篦齿腔内流动损失增大, 压降加大, 有利于篦齿节流封严。

(2) 雷诺数以及齿顶宽与齿隙比的增大, 提高了篦齿顶板的换热量, 使气体得到更多的热量, 加强了篦齿的封严效果。

(3) 随着流动过程中的能量损失, 顶板下部对换热起主要作用的射流区速度逐渐减小, 换热系数有下降的趋势。

(4) 在 4 个齿腔的封严篦齿中, 起主要节流封严作用的是前两个齿腔, 当流体流经后两个齿腔时, 流动已趋于稳定, 节流封严效果相对较弱。

参考文献:

- [1] 黄晓光. 封严篦齿内部流动与换热的试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1997.
HUANG Xiaoguang. The investigation of flow field and heat transfer in cavity of labyrinth seal[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1997.
- [2] 尚显峰. 封严篦齿内流动和换热的实验研究和数据模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 1998.
SHANG Xianfeng. The numerical analyses and experimental investigations of flow field and heat transfer in cavity of labyrinth seal[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1998.
- [3] Yucel U, Kazakia J Y. Analytical prediction techniques for axisymmetric flow in gas labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123: 255-257.
- [4] Willenborg K. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123: 815-822.
- [5] 王锁芳, 吕海峰. 转静态封严篦齿流场的数值分析和封严特性的实验研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 444-449.
WANG Suofang, LU Haifeng. Numerical analysis of flow and experimental investigation of labyrinth sealing characteristics at rotational and static states[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 444-449.