

文章编号: 1000-8055(2005)06-01005-05

热边界对封严篦齿性能影响的数值计算

王锁芳, 吕海峰

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了解热边界对封严篦齿的流动特性的影响, 本文采用标准 $k-\epsilon$ 模型 QUICK 格式、非结构化网格和 SIMPLE 算法, 数值模拟了模化的热态封严篦齿的流动特性。求解了速度场、温度场和压力场, 分析了流场特性。计算结果表明: 不同压比下, 热边界热流增加泄漏减小, 增强了封严效果。热流密度对泄漏系数的影响规律基本呈线性变化关系。热量传递的不均匀性会导致篦齿腔内出现小旋涡, 也增强了封严效果。小旋涡出现位置和旋涡大小与热边界端面的传热量和封严段前后压比有关。

关键词: 航空、航天推进系统; 热边界; 篦齿; 泄漏; 湍流

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

Numerical Analysis of Heating Boundary Effect on the Characteristics of Rotational Sealing Labyrinth

WANG Suo-fang, LU Hai-feng

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The standard $k-\epsilon$ turbulence model, QUICK schemes, non-uniform grid and SIMPLE method were applied to the calculations of flow field characteristics for the modeled sealing labyrinth with heating boundaries. It is aimed at investigating the effect of heating boundary. The velocity, temperature and pressure fields were obtained and the flow characteristics were discussed. The computational results state that the leakage goes down as heat flux of the heating boundary rises, and thus the sealing effectiveness under different pressure ratios is enhanced. The results also show that the sealing effect and the heat flux are linearly related. The uneven distribution of the heat transfer causes to produce small eddy at the cavity of the labyrinth and an increase in the sealing effectiveness. The location and size of the small eddy depend on the heat flux on the wall of the heating boundary and the pressure ratio.

Key words: aerospace propulsion system; heating boundary; labyrinth; leakage; turbulence

高温会引起金属变形, 机械强度下降, 产生热应力, 对于篦齿会改变齿间隙大小。因此要使封严篦齿稳定工作, 必须了解封严篦齿的换热特性。国外开始进行了篦齿内部流动的换热研究工

作^[1~3], 国内以西北工业大学吴丁毅教授为代表的研究者对某型航空发动机篦齿封严进行了热态试验研究^[4,5], 他们将篦齿封严顶板覆盖加热带, 改变加热电流, 通过埋设在篦齿顶板上的热电偶,

收稿日期: 2004- 11- 24; 修订日期: 2005- 04- 15

作者简介: 王锁芳(1963-), 男, 江苏金坛人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 主要从事发动机流动与传热研究

采集温度数据。但是因为试验手段的限制, 所得到的热态流场有很大的局限性。本文依据文献[5]中所提出的篦齿研究方向, 利用 FLUENT 商业软件, 用数值模拟的方法对篦齿腔中的流动和换热作深入的探讨。对整个篦齿齿面上的换热进行研究, 获得热流边界条件的变化对篦齿封严的影响。本文对直通式篦齿进行了模型设计和数值模拟研究。为发动机的改进改型提供重要的理论分析方

法。

1 计算方法

数值计算是基于斯托克斯假设来模拟节流元件中的湍流运动, 流体在节流元件中流动时, 假定流动是稳态的, 适用于本文数值模拟的基本控制方程^[6]如下:

$$\frac{\partial(\rho u \varphi)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho w \varphi) =$$
$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\Gamma}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) + S$$

1

广义扩散系数 Γ 见表1。

表1 变量中的广义扩散系数

Table 1

φ	u, v, w	k	ϵ	T
Γ	$\eta_{ff} = \eta_{\tau} \eta$	$\eta_{\tau} \frac{\eta}{\alpha_k}$	$\eta_{\tau} \frac{\eta}{\alpha_{\epsilon}}$	$\frac{\eta}{Pr} + \frac{\eta}{\sigma_T}$

源项:

$$u \cdot S = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_{ff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta_{ff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\eta_{ff} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

2

$$v \cdot S = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_{ff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta_{ff} \frac{\partial v}{\partial r} \right) +$$
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\eta_{ff} \frac{r \partial(w/r)}{\partial r} \right] - \frac{2 \eta_{ff}}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \right) + \frac{\rho w^2}{r}$$

3

$$w \cdot S = - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_{ff} \frac{\partial u}{r \partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \eta_{ff} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \right) \right] - \frac{\rho v w}{r} +$$
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\eta_{ff} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{2v}{r} \right) \right] + \frac{\eta_{ff}}{r} \left[r \frac{\partial(w/r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right]$$

4

$$k \cdot S = \rho G_k - \rho \epsilon$$

5

$$\epsilon \cdot S = \frac{\epsilon}{k} (c_1 \rho G_k - c_2 \rho \epsilon)$$

6

依据物理模型尺寸, 进行结构化或非结构化网格划分。除针对壁面区域采取了较细的网格以外, 各个模型考虑了较稀疏和较密集的网格, 结果表明, 不同网格计算得到的特征无量纲变量相差非常小, 参数的等值线图也非常相似, 因此, 可以确定最终所选定的网格具有足够的精度, 基本保证了解不受网格变化而有太大的变化。

边界条件:

(1) 入口边界: 给定总压, 总温300 K。进口处 k 值无实验值可以参考, 依据文献[7], 取来流平

均速度平方的3%, 入口截面上的 ϵ 的取值按文献[6]计算。从本文的计算结果中可以发现, 入口截面上的 k, ϵ 值对计算结果影响不大, 这与文献[7, 8]是一致的。

(2) 出口边界: 静压为环境大气压力。

(3) 固体壁面: 应用壁面函数法^[6]处理。

计算中解的收敛判断标准: 温度变量残差为 1×10^{-6} , 其余变量残差小于 1×10^{-3} , 进出口流量不平衡率控制在0.5%。

2 热流场的计算与分析

计算主要研究了篦齿前后的总压力比 π (P_1^*/P_2^*) 对封严性能的影响, 整理成泄漏系数随压比的变化规律, Φ 的定义为^[9]:

$$\Phi = \frac{W}{P_1^* A} \sqrt{T^*} \tag{7}$$

其中: W 为篦齿的泄漏量, A 为篦齿漏气面积, T^* , P_1^* 分别为篦齿前总温、总压。

2.1 热边界计算模型

为了综合考虑实际结构和通用性, 热态流场研究选取模型的齿型同文献[10], 采用的模型长度 60 mm, 第一个齿尖距入口边界 11 mm, 上下为固体区域, 金属铝材料, 如图 1 所示(图中单位: mm)。

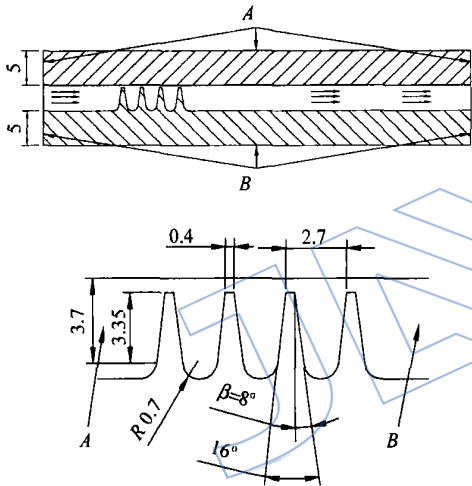


图1 模型示意图

Fig 1 Sketch of model

数值模拟中边界条件取为压力进口、压力出口, A 和 B 面边界条件为定热流密度, 中间固壁交界面采用流固耦合边界条件, 包括流体与固体之间的换热条件。采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, QUICK 格式和 SIMPLE 算法来模拟这一流动问题, 计算中, 压比分别为 1.5, 2.5, 3.5, 4.5; 热流密度分别为 50 000, 100 000, 250 000, 400 000 W/m^2 。篦齿封严模型齿顶板固体区域采用结构化网格, 流体、篦齿及其端部固体区域采用非结构化网格, 网格数总共为 157 602。

2.2 篦齿腔中典型的热流场

以压比为 2.5, 热流密度为 25 000 W/m^2 的温度场、速度场(图 2, 图 3)为例, 分析说明篦齿换

热的基本特点。空气通过封严篦齿流动时, 热量由壁面传递给篦齿空腔内流体。由温度场云图可以看出全场的温度分布, 入口气流温度为 300 K, 经过封严篦齿顶板和篦齿端部的壁面换热, 气流温度逐步升高, 通过篦齿空腔后, 气流温度明显上升。最后一个齿背面气流温度约为 600 K, 这是由于通过最后一个齿后, 气流在通道内形成一个大的旋涡, 齿背面为气流死区, 与主流流体质量交换较少, 因此接受下端壁面传热量较大, 温度上升较高。可以看出, 随着封严段上下壁面的传热, 通道越长, 气流温度越高, 但因为没有篦齿的阻塞, 篦齿腔的涡流所带来的强化换热效果, 温度上升幅度不高。

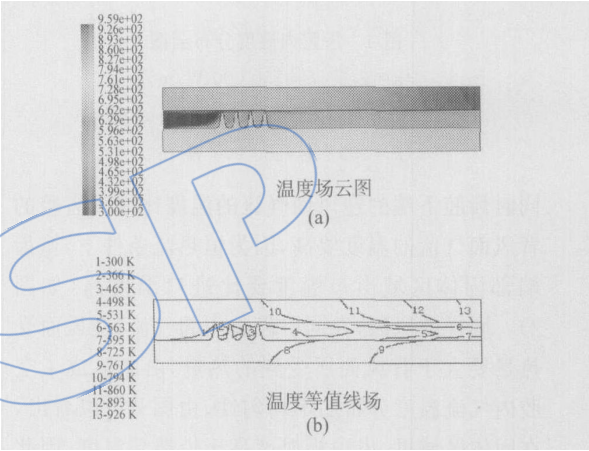


图2 ($\pi=2.5$ $q=250\,000\,\text{W}/\text{m}^2$)

Fig 2 Contours of temperature
($\pi=2.5$ $q=250\,000\,\text{W}/\text{m}^2$)

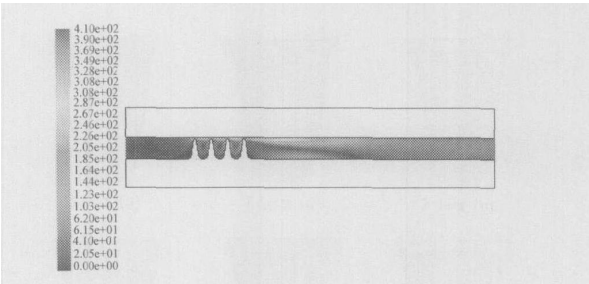


图3 速度场云图($\pi=2.5$ $q=250\,000\,\text{W}/\text{m}^2$)

Fig 3 Contours of velocity
($\pi=2.5$ $q=250\,000\,\text{W}/\text{m}^2$)

从压比为 2.5; 热流密度为 250 000 W/m^2 工况(图 4)的齿腔内部温度分布云图可以看出, 各个篦齿腔内气流温度逐步上升, 这是由于每经过一个封严篦齿腔, 气流不仅受到壁面传热, 而且在每个齿腔内涡流碰撞损失, 气体动能转化为热能。

在每个齿腔中, 可以看出齿腔下端的气流温

度明显高于上端气流温度, 这表明了下端空气接受齿面传热量较大, 这是由于齿腔下端空气经过上端传热后, 气流温度明显升高, 其次是齿根的固面温度比齿尖固面温度高, 这就类似散热肋片的肋基温度比肋顶温度高, 因为齿根更靠近热源。

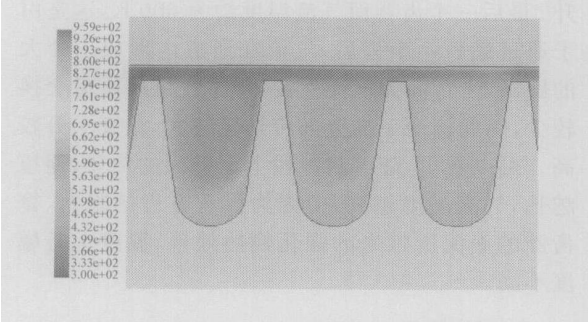


图4 齿腔内温度分布云图

($\pi=2.5$ $q=250\,000\text{ W/m}^2$)

Fig 4 Contours of temperature in labyrinth

($\pi=2.5$ $q=250\,000\text{ W/m}^2$)

同时齿腔下端的迎风面气流温度比同一齿腔的背风面气流的温度要高, 因为恒热流条件下, 篦齿端部固体区域出口温度要比进口温度高(如图2)。同样的原因, 在同一齿腔内的气流, 迎风面受热量要大于背风面所受到的热量, 由此造成了空腔内气流温度分布的不均匀性。由图2可以看出, 在固体区域里, 齿顶板温度高于齿端部温度, 因此我们在工程实际设计中对封严段顶板的金属材料可以选用耐高温、热膨胀小的材料, 以最大程度保证篦齿间隙。

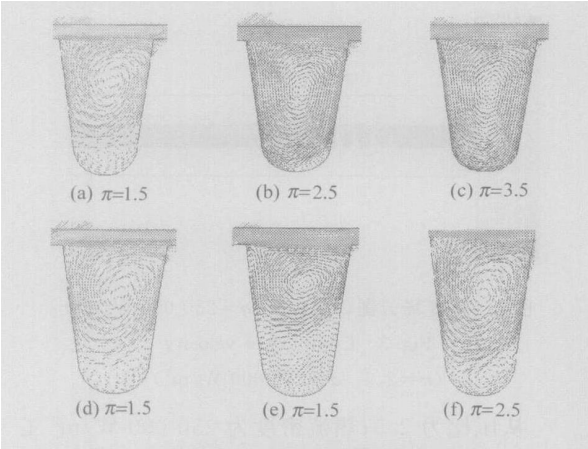


图5 封严篦齿第一道齿腔内速度矢量图

Fig 5 Contours of velocity vector of first cavity in sealing labyrinth

图5(a)~ 图5(c) 热流密度为 $100\,000\text{ W/m}^2$, 图5(d)~ 图5(f) 热流密度分别为 $50\,000$, $400\,000$,

$250\,000\text{ W/m}^2$ 的封严篦齿第一道齿腔内速度矢量图。可以看出在齿腔下端, 有一个与主流旋涡相反的小旋涡。由上面分析可以知道: 由于篦齿与端壁之间间隙小, 气流速度大, 经过齿腔时在腔内产生旋涡运动, 旋涡的大小受到热壁面的影响较大。由于热量传递的不均匀性, 齿根部及齿背部(气流迎面相对的齿面) 篦齿端部温度高, 气流受热膨胀大, 压力升高, 促使主旋涡变小。主旋涡变小后, 腔底部的几何空间变大。由前所述齿背面和底部换热量变少, 壁面温度高, 促使主旋涡诱发气流在腔底部产生流动方向相反的小旋涡。同时腔室底端受热不均匀导致旋涡偏心发展。

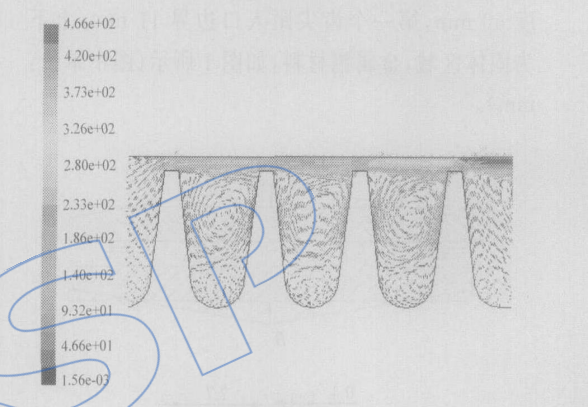


图6 $\pi=2.5$, $q=400\,000\text{ W/m}^2$ 速度矢量图

Fig 6 Contours of velocity vector

($\pi=2.5$ $q=400\,000\text{ W/m}^2$)

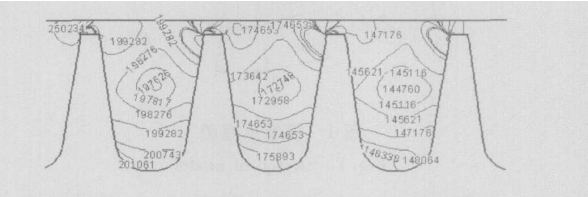


图7 $\pi=2.5$, $q=100\,000\text{ W/m}^2$ 压力分布图

Fig 7 Contours of pressure

($\pi=2.5$ $q=100\,000\text{ W/m}^2$)

分析图5中(a)~ 图5(c) 的速度矢量图, 可以看出热流密度一定时, 随压比升高, 小旋涡区域范围逐步减小。表明热流边界条件相同时, 受热膨胀的影响作用相同, 主流对齿腔内流体起主导作用, 促使小涡范围变小。对比图5中(a)~ 图5(f) 的速度矢量图, 可以看出压比一定, 随热流密度增大, 小旋涡范围区域逐步扩大。这是由于小旋涡区域的大小受到主流影响程度相同, 受热膨胀的影响不同。热流密度增大, 热膨胀加剧, 促使小旋涡区域扩大。压比为2.5时, 温度云图(图4)和压力分布图(图7), 同样可以看出各腔室旋涡的分布和发

展。由此可见,在受热状态下,小旋涡大小是由主流的作用和受热膨胀的作用两者综合因素所决定。

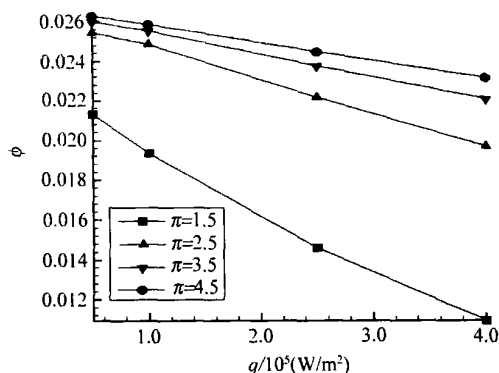


图8 不同压比时泄漏系数随热流密度的变化关系

Fig 8 Relation of leakage coefficient to heat flux at different ratio of pressure

2.3 热流边界对封严效果的影响

图8反映不同压比时,热流密度对泄漏系数的影响。可以看出:随着热流密度的增加,泄漏系数逐渐下降。这是因为热量由固体壁面向封严锯齿段的气流传递,气流受热膨胀,小旋涡范围扩大,尺度均匀,加大了流体间摩擦,使流体间质量交换增加,这些作用提高了锯齿密封性能,使泄漏系数降低^[9]。在同一压比下,热流密度对泄漏系数的影响基本呈线性变化规律,其斜率的绝对值随着压比的降低,而逐渐增大,表明低压比工况下,热流边界的影响更为显著。随压比的上升,热流边界的影响逐渐降低,这是因为压比的上升,造成通过封严锯齿的空气泄漏速度上升,主流惯性力占主导作用,使泄漏系数的增大。

3 结 论

采用数值模拟的方法对锯齿腔中的流动作了深入的探讨,侧重于锯齿齿顶和齿端部固体表面上的换热以及锯齿腔内热态流场的分析研究。通过多种工况的计算分析,获得了恒热流边界条件的变化和压比对锯齿封严的影响规律。

(1) 热流边界的变化对封严效果的影响不可忽略,不同压比下,热流增加,泄漏系数减小,增强了锯齿封严效果。同一压比,热流密度对泄漏系数

的影响规律基本呈线性变化关系。

(2) 热量传递的不均匀性会导致锯齿腔内出现小旋涡,增强锯齿的封严效果。

(3) 小旋涡出现位置和旋涡大小与端面传热大小和封严段前后压比大小有关。热流一定时,压比越大,小旋涡范围越小;压比一定时,端面热流越大,小旋涡范围越大,泄漏系数越小,有利于封严。

参考文献

- [1] Ozturk H K, Turner A B, Childs P R N. The Effect of Labyrinth Seal Clearance on Stator Well Flow and W Indage Heating[J]. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 2002, 19: 219~231.
- [2] Millward J A, Edwards M F. W Indage Heating of Air Passing Through Labyrinth Seals[R]. *ASME Paper No 94-GT-56*.
- [3] 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.
- [4] 黄晓光, 吴丁毅. 封严锯齿腔内流动及旋涡分布和顶板换热特性的实验研究[J]. *流体力学实验与测量*, 2000, 12(4): 20~25.
Huang Xiao-guang, Wu Ding-yi. The Investigation of Flow Field and Heat Transfer in Cavity of Labyrinth Seal[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2000, 12(4): 20~25.
- [5] 黄晓光. 封严锯齿内部流动和换热的实验研究[D]. 陕西西安: 西北工业大学, 1997.
- [6] 陶文铨. 数值传热学(第二版)[M]. 陕西西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [7] Rhode D L, Hibbs R I. A New Efficient Model For The Computation of Flow Over Shear-Layer-Driven Cavities Part II: A ssessment for Labyrinth Seal Leakage[R]. *IAA-89-2807*, PP: 1~6.
- [8] 尚显峰. 封严锯齿内流动和换热的实验研究和数据模拟[D]. 陕西西安: 西北工业大学, 1998.
- [9] 吴丁毅. 直通式锯齿密封内部流场显示研究[J]. *流体机械*, 1997, 12(2): 11~14.
Wu Ding-yi. Investigation of Visualization for Flow Field in Straight Labyrinth Seal[J]. *Fluid Machinery*, 1997, 12(2): 11~14.
- [10] 吕海峰. 航空发动机空气系统节流元件的特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.