

文章编号: 1000-8055(2008)08-1403-06

直通篦齿静止衬套上磨损槽对泄漏特性影响的数值研究

纪国剑, 吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 对静止耐磨衬套环面上矩形磨损槽的直通篦齿封严结构的泄漏特性进行了数值研究, 分析了磨损槽的结构尺寸和篦齿相对位置(轴向和径向)的影响. 与普通无槽直通篦齿结构相比, 齿尖磨损槽的存在改变了节流后射流的运动方向, 降低了透气效应, 而且磨损槽结构尺寸和相对位置的变化直接影响到齿尖节流位置和节流面积的变化, 对篦齿封严性能影响较大.

关 键 词: 直通篦齿; 泄漏系数; 磨损槽; 耐磨衬套

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical investigation of effect of static bush with rub-grooves on the straight through labyrinth seal leakage

Ji Guo-jian, Ji Hong-hu

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: A numerical investigation of influence of rub-grooves in the inner surface of static adradable bush on the leakage of a straight through labyrinth seal was conducted, while the shape of rub-grooves and relative axial/radial locations of labyrinth teeth tips and the groove were studied. The results show that the rub-grooves not only change the flow direction of the jet and decrease the residual energy, but also affect the change of throttle location and the throttle area of the teeth tips, presenting great influence on the sealing performance of the labyrinth seal.

Key words: straight-through labyrinth seal; leakage coefficient; rub-grooves; abradable bush

篦齿封严是航空发动机广泛使用的一种非接触式封严结构, 如在压气机和涡轮级间常采用此结构阻止气体泄漏, 国内外学者对其泄漏特性和密封机理作了大量的研究^[1-2].

篦齿封严结构一般由旋转的篦齿盘和静止的耐磨衬套组成, 篦齿盘外圆面上加工有篦齿, 齿尖与衬套之间的小间隙起到节流封严作用, 但由于在运行过程中部件温度的变化, 篦齿盘和衬套的

热变形率不同以及篦齿盘与衬套的相对轴向和径向位移, 往往会造成篦齿与衬套的摩擦, 并在衬套内环面上形成了一道道磨损槽, 磨损槽形状的变化与篦齿的形状、篦齿盘和衬套轴向和径向相对位移量有关, 磨损槽与篦齿的组合关系的变化对篦齿封严性能影响很大. Stocker^[3]等人实验研究了磨损槽与篦齿的相对轴向位置对密封性能的影响, Denecke^[4]分析了不同密封间隙下具有磨损槽

收稿日期: 2007-08-06; 修订日期: 2007-10-09

作者简介: 纪国剑(1980-), 男, 江苏镇江人, 博士生, 主要从事飞机发动机封严技术的研究.

的台阶篦齿的内部流动特性, Rhode^[56] 等人通过流场可视化手段观察了齿尖磨损槽对台阶篦齿内部流场的影响, 发现衬套上的磨损槽改变了节流后射流运动方向, 同时也大大降低了齿尖节流效果, 使得篦齿封严性能明显降低.

本文以某航空发动机篦齿结构为原型, 通过数值模拟研究了不同形状的齿尖磨损槽宽度和深度对齿尖节流特性以及节流后射流的扩散特性的影响, 在此基础上, 分析了篦齿与磨损槽的相对位置(轴向和径向)变化对内部流场和篦齿封严性能的影响.

1 物理模型

图 1 为篦齿与衬套环面相对位置示意图, 在实际工作状态下由于篦齿相对衬套存在着轴向和径向位移, 移动范围如图 1 中矩形 ABCD 内所示, 这样就在衬套环面上开出一道磨损槽^[56], 这种结构上的变化也进一步影响到篦齿的封严性能.

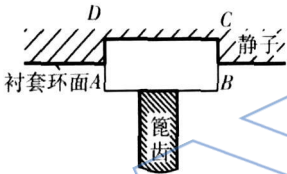


图 1 篦齿与衬套相对位置示意图

Fig. 1 Relatively location of labyrinth teeth tips and adjustable lands

忽略转静子偏心作用的影响, 认为磨损槽沿圆周方向相同, 图 2 为根据图 1 所示物理模型建立的二维轴对称计算模型. 篦齿结构主要由节流间隙宽度 c , 节流间隙长度(齿厚) t , 齿高 H , 齿腔宽度 B , 齿数 N , 磨损槽宽度 a 、深度 b 等参数决定, 篦齿与衬套相对位置则由参数 Δx 和 Δy 给出. 此外图中 p_0 、 T_0 分别代表篦齿缝隙进口总压和总温, p_n 代表篦齿后腔静压.

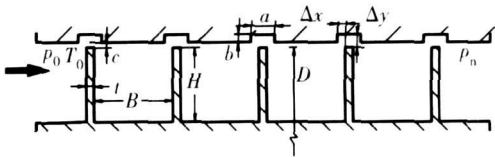


图 2 篦齿封严结构尺寸

Fig. 2 Structure of the labyrinth seal

本文从两方面研究了衬套上磨损槽对直通篦齿泄漏特性的影响, 一方面固定篦齿与衬套相对位置即固定 c 和 Δx , 使得篦齿正对着磨损槽, 研究不同槽宽 a 和槽深 b 的影响, 另一方面固定磨损槽尺寸 a 和 b , 研究篦齿与磨损槽相对轴向 Δx 和径向位置 Δy 的影响, 为此共设计了 4 组模型. 模型的篦齿基本参数和磨损槽结构尺寸参考文献[6]并结合某几种发动机涡轮盘腔内篦齿衬套环磨损情况确定, 取 $t=0.3\text{ mm}$, $D=103\text{ mm}$, 齿数为 5. 篦齿与磨损槽组合结构参数见表 1, 对于第 4 组模型, 篦齿盘直径 D 会随着篦齿径向位置改变略有改变.

计算时采用结构化网格, 如图 3 所示, 壁面及节流间隙处进行了网格加密处理, 网格数量满足独立性要求. 湍流模型采用重整化群 RNG $k-\epsilon$ 模型, 近壁处理采用标准壁面函数(近壁区第一节点的 y^+ 在 20 附近). 由于压气机级间增压比和涡轮级间落压比一般小于 4, 为模拟此应用状况下的压比, 设置边界条件时, 固定出口压力(0.1 MPa), 调节进口压力, 使得进出口压比在 1.1 到 4.0 之间变化. 计算中介质选用空气(视为理想气体).

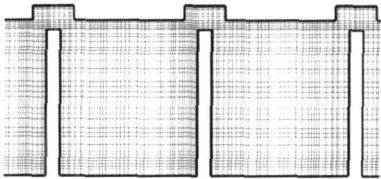


图 3 局部网格示意

Fig. 3 Part of mesh of the model

表 1 篦齿与磨损槽组合结构参数

Table 1 Parameters of labyrinth and rub grooves

模型	a/t	b/t	$\Delta x/t$	$\Delta y/t$	其 它
第 1 组	1, 2, 3	1	1	1.67	
第 2 组	2	0.5, 1, 2	1	1.67	$H/t=10$
第 3 组	3	1	0, 0.5, 1, 1.5, 2	1.67	$B/t=10$
第 4 组	3	1	1	0.33, 0.67, 1, 1.67	

2 结果分析

本文采用泄漏系数 φ 作为评价密封效果优劣的主要参数, 其定义式如下:

$$\varphi = \dot{m} \sqrt{p_0} / (p_0 \cdot A)$$

其中 $\dot{m}$ 为宽齿缝隙的泄漏量 (kg/s), A 为齿尖处气流流通面积 (m^2), $A = c\pi D$.

2.1 磨损槽宽度和深度的影响

通过表 1 中第 1 组和第 2 组计算模型研究了磨损槽宽度和深度的影响. 图 4 给出了第 1 组模型的计算结果, 即在 $b/t = 1$ 时, 磨损槽宽度对宽齿封严特性的影响. 由图可见, 相比于无槽结构 ($a/t = 0, b/t = 0$), 有磨损槽时, 当 $a/t = 1$ 即宽齿与衬套不存在轴向位移时, 其泄漏系数略低于无槽结构, 当 $a/t = 2$ 时, 泄漏系数较无槽结构有所增加, 进一步增加磨损槽宽度使得 $a/t = 3$ 时, 泄漏系数显著增加, 故此类情况在实际设计使用时应当避免.

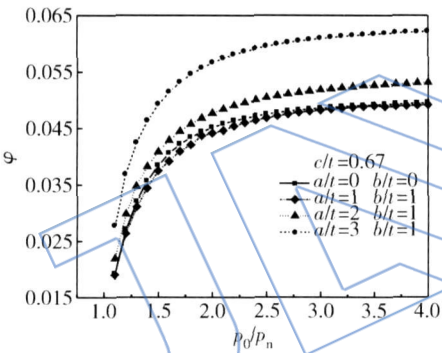


图 4 磨损槽宽度对宽齿封严特性的影响
Fig. 4 Influence of rub grooves width on leakage

对以上磨损槽宽度的分析可知, 槽宽过大将不利于封严, 同时考虑到宽齿与衬套轴向位移的存在, 槽宽一般大于齿厚, 为此在选择第 2 组模型时, 选取槽宽为 2 倍的齿厚, 图 5 给出了该组模型的计算结果, 即磨损槽深度对宽齿封严特性的影响. 与无槽结构相比, 有槽时泄漏系数均略高于无槽结构, 增加磨损槽深度, 泄漏系数先增大后减小, 但总体改变不大.

图 6 给出了图 4 中 $a/t = 3, b/t = 1$ 时的算例与无磨损槽 ($a/t = 0, b/t = 0$) 算例的第一个齿腔内的流线分布图. 当衬套上无磨损槽时, 如图 6 (a) 所示, 流体经节流后形成的射流沿壁面以较小的扩散角向下游流动, 大部分流体以较高的速度进入下一节宽齿, 透气效应严重; 当齿尖存在磨损槽时, 如图 6(b) 所示, 由于磨损槽的影响, 节流

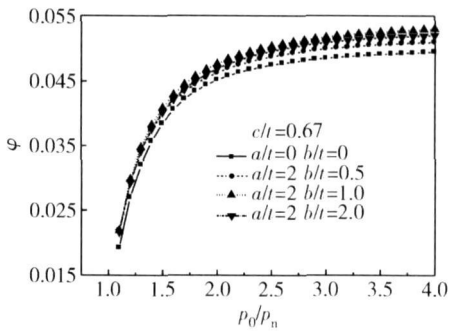


图 5 磨损槽深度对宽齿封严特性的影响
Fig. 5 Influence of rub grooves depth on leakage

间隙相对于无槽结构有所增加, 节流效果明显降低, 但节流后射流朝齿腔内偏转较大, 同时在磨损槽左上角及磨损槽后端壁面附近均存在一个逆时针旋转的漩涡, 在齿尖存在一个顺时针旋转的漩涡, 这些在很大程度上降低了透气效应.

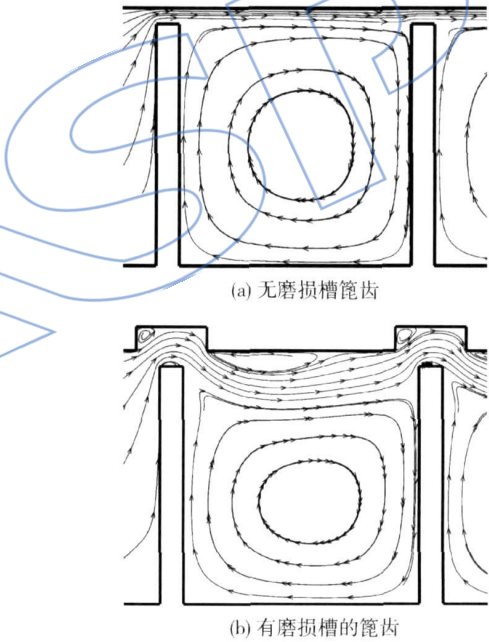


图 6 齿尖磨损槽对齿腔内流线分布的影响
Fig. 6 Streamline distribute with rub grooves of the labyrinth seal

图 7 给出了图 4 中 $a/t = 2$ 和 $a/t = 1$ 两个算例的第一个齿腔内流线分布. 由图 6(b) 和图 7 可见, 磨损槽宽度对齿尖处流体流动方向影响很大, 减小磨损槽宽度, 齿尖处流线向槽内偏转较小, 齿尖节流作用增强, 但流体流过宽齿后运动方向沿轴向改变减小.

磨损槽深度改变对齿腔内流动影响不大, 如图 8 所示, 磨损槽深度较小时, 齿腔内流动和无槽结构相近, 增加磨损槽深度, 开始在磨损槽内左上

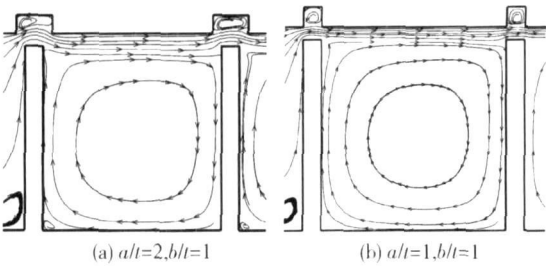


图 7 开口槽宽度对齿腔 流线分布的影响
Fig. 7 Influence of rub grooves width on the streamline of the labyrinth h seal

角形成一逆时针旋转的漩涡, 进一步增加槽深, 漩涡增大到整个凹槽内, 这些对齿尖节流作用有一定的影响, 但对齿腔内流动几乎没有影响.

2.2 轴向相对位置的影响

通过表 1 第 3 组计算模型研究了篦齿和磨损槽的轴向相对位置对泄漏特性的影响. 图 9 给出了两种压比条件下不同 $\Delta x/t$ 的计算结果. 图中两个十字直线的交点分别为对应压比下无磨损槽结构时的泄漏曲线(同一线型代表同一压比). 由图可见, 同一压比下, 改变磨损槽轴向位置, 相比

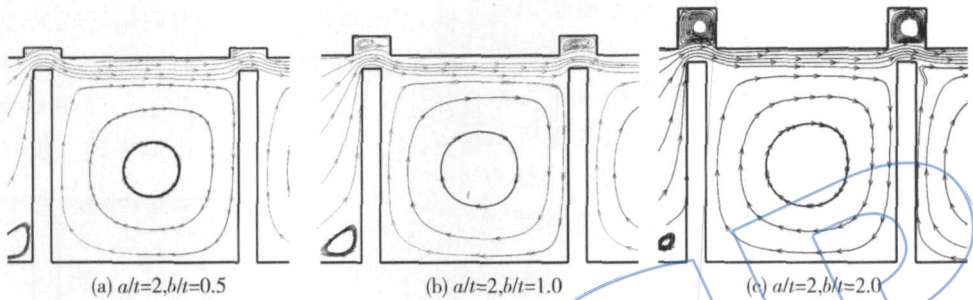


图 8 开口槽深度对齿腔 流线分布的影响
Fig. 8 Influence of rub grooves depth on the streamline of the labyrinth seal

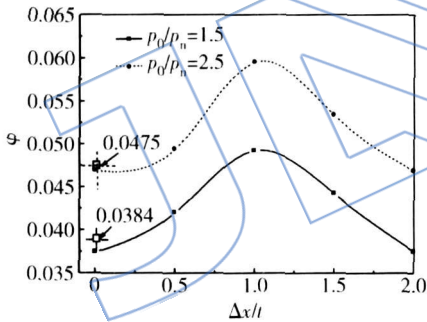


图 9 轴向相对位置对密封性能的影响
Fig. 9 Influence of relative axial location of the rub grooves on leakage

才基本上与无槽结构齐平或略低. 篦齿沿轴向由左向右移动时, 泄漏系数先增加后减小, 篦齿位于磨损槽中间时 ($\Delta x/t = 1$) 泄漏系数最大, 密封性能最差, 篦齿位于磨损槽两侧时泄漏特性相差不多, 基本上关于磨损槽中线呈对称分布.

图 10 给出了不同轴向位置下齿腔内的流线分布. 由图可见, 当篦齿位于磨损槽最左端时, 如图 10 (a), 最小流通截面由磨损槽前端面和齿尖的间隙决定, 节流后的射流基本沿轴向贴近壁面流向下一级, 同时在磨损槽和齿腔内各形成一个漩涡, 篦齿相对磨损槽由左向右移动时, 如图 10 (b) ~ (d) 节流间隙和射流偏转角度发生改变, 节流效果和透气效应都是先减小后增大的.

于无槽结构, 齿尖开槽的泄漏系数都比较高, 只有当篦齿位于磨损槽最左端和最右端时, 泄漏系数

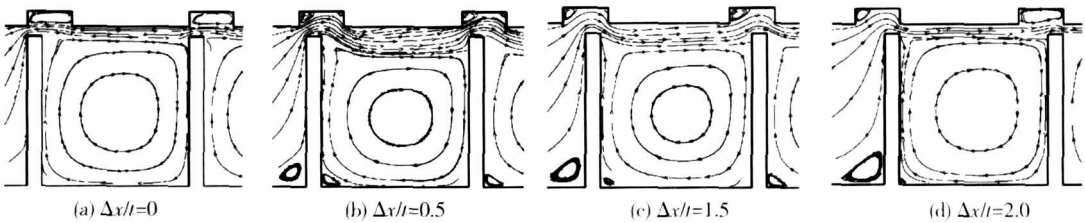


图 10 不同轴向位置下齿腔内流线分布
Fig. 10 Distribute of streamline with different axial location

2.3 径向相对位置的影响

通过表 1 中第 4 组模型研究了篦齿与磨损槽的径向相对位置对泄漏特性的影响,图 11 为两种压比下,不同 $\Delta y/t$ 的计算结果,图中十字直线的交点为对应压比下无磨损槽结构时的泄漏曲线(同一线型代表同一压比).由图可见,篦齿与无槽结构相比,当篦齿未切入磨损槽时泄漏系数较大,当篦齿与磨损槽开口端面齐平时,即 $\Delta y/t=1$,泄

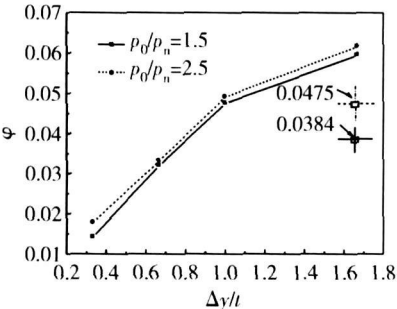


图 11 不同径向位置对篦齿封严性能的影响
Fig. 11 Influence of relatively radial location of the rub grooves on leakage

漏系数略大于无槽结构,当篦齿切入磨损槽时 ($\Delta y < 1$),泄漏系数明显低于无槽结构.这表明在发动机某些过渡工作状态,篦齿切入静子衬套磨损槽内部时,篦齿密封性能是提高了.

图 12 给出了不同径向位置下齿腔内流线分布 (Δy 为 0.5 mm 时,流线分布如图 6 (b) 所示).篦齿沿径向切入静子衬套时,节流间隙宽度减小,节流通道为曲折形通道,通道长度也相对增加,齿尖节流效果显著增强,同时节流后的射流偏转角度大于 90° ,流体几乎贴着篦齿壁面进入和离开齿腔,透气效应大大减弱.

结合以上的分析可见,磨损槽结构尺寸和相对位置决定了齿尖节流通道的形状,进而影响到齿尖节流和节流后射流的扩散效果.图 13 给出了节流通道的三种形式,其中定义为通道最小节流间隙.由图可见,节流通道的结构和尺寸决定了最小节流间隙的位置和大小,其位置可能位于齿尖顶部,如图 13(a) 所示,也可能位于齿尖前端和后端,如图 13(b) 和 (c),这一点与 Denecke^[4] 的研究获得了很好的吻合.

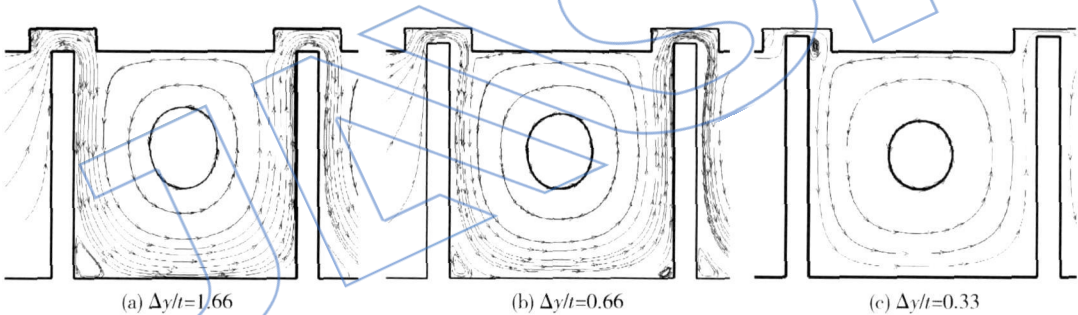


图 12 不同径向位置下齿腔内流线分布
Fig. 12 Distribute of streamline with different radial location

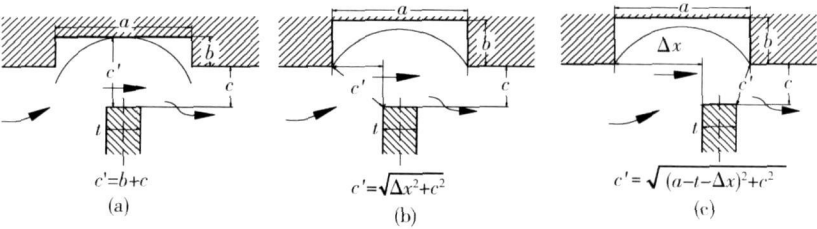


图 13 节流通道与磨损槽结构关系
Fig. 13 Relation of the throttle passage and rub-grooves

3 结 论

1) 对直通篦齿而言,由于齿尖磨损槽的存在,节流后的射流运动和扩散方向发生改变,透气效应减弱,磨损槽相对位置和结构尺寸决定了最

小节流间隙的位置和大小,对篦齿封严性能影响很大.

2) 磨损槽结构尺寸对齿尖节流通道有很大影响,磨损槽宽度减小,封严性能上升;磨损槽深度的改变则对封严性能基本没有影响.

- 3) 篦齿与磨损槽轴向位置改变时, 其泄漏曲线关于磨损槽中心位置成对称分布, 篦齿与磨损槽正对时, 密封性能最低, 篦齿相对磨损槽左右移动, 密封性能有所提高, 但整体上比无槽结构低.
- 4) 篦齿切入磨损槽时(篦齿与磨损槽径向相对位置减小), 节流作用增强, 透气效应大大降低. 与无槽结构相比, 其密封性能显著提高.

参考文献:

[1] 塔鲁达纳夫斯基. 非接触密封[M]. 李均卿, 刁元康, 译. 北京: 机械工业出版社, 1986: 155-160.

[2] Vermes G. A fluid mechanics approach to the labyrinth seal leakage problem[J]. Journal of Engineering for Pow-

er, 1961: 164-169.

[3] Stocker H L, Cox D M. Aerodynamic performance of solid smooth, abradable, and honeycomb lands[R]. NASA, CR-135307, 1977.

[4] Denecke J. Influence of rub grooves on labyrinth seal leakage[R]. GT-2002-30244.

[5] Rhode D L. Measurement and visualization of leakage effects of rounded teeth tips and rub grooves on stepped labyrinths[J]. Transaction of the ASME, 2001, 123: 604-611.

[6] Rhode D L. Rub groove width and depth effects on flow predictions for straight through labyrinth seals[J]. Journal of Tribology, Transaction of the ASME, 2004, 126: 781-787.

