

文章编号:1000-8055(2011)11-2610-07

柱面气膜密封界面结构与性能分析

马 纲¹, 栗秀花¹, 沈心敏¹, 胡广阳²

- (1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;
2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 选择并针对柱面气膜密封中六种典型的螺旋槽派生界面结构, 基于有限元数值分析方法进行了气膜力学特性及密封特性的定量计算和分析比较; 建立了不同界面型式的密封特性与可压缩数、膜厚的关系曲线; 研究分析了不同界面结构密封特性变化特点和应用中的优劣势, 为密封系统研究和设计选型提供了理论基础及指导。分析中的每种密封界面结构参数均为依据有关文献选取的优化或近似优化数据, 采用的计算分析方法可拓展应用到其他结构中。

关 键 词: 柱面气膜密封; 界面结构; 有限元法; 气膜特性; 定量分析
中图分类号: V233.42 **文献标志码:** A

Analysis of performance and interface structure of cylinder gas film seal

MA Gang¹, LI Xiu-hua¹, SHEN Xin-ming¹, HU Guang-yang²

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191 China;
2. Shenyang Aeroengine Research Institute,
Aviation industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The type of interface structure obviously influences the performance and design of cylinder gas seal. The paper selected six typical interface structures derived from spiral groove, and performed quantitative analysis of mechanical properties and sealing performance of the gas-film based on finite element numerical analysis method; the relationship between sealing performance of different interfaces and compressibility number (and film thickness) was established; the sealing properties of different interface types and possible advantages and disadvantages of their application were analyzed, providing a basis for selection and design guidance of cylinder gas seal. The structural parameters of these interfaces are selected based on optimal or approximately optimal data of related literature.

Key words: cylinder gas film seal; interface structure; finite element method; film properties; quantitative analysis

航空发动机转子叶尖、压气机出口等关键位置密封性能的改善对提高整机的工作效率、降低油耗、提高相关构件的耐久性和工作寿命影响显著^[1], 气膜密封优良的密封性能为这一问题的解决

提供了有效途径^[2]。考察航空发动机流体动密封关键部位工况条件和结构要求限制, 具有浮动自适应结构的柱面气膜密封系统具有独特的优势^[3]。针对柱面气膜密封国外已经进行了一系列的研究^[4],

收稿日期:2010-12-15; 修订日期:2011-07-11

基金项目:航空基金(20080451012); 国家自然科学基金(51075018)

作者简介:马纲(1967—), 女, 副教授, 博士, 主要从事流体动密封技术、机械设计方面的研究。

国内研究主要集中在端面气膜密封上相关研究开展很少,亟待提高。柱面气膜密封系统优良密封特性的实现,首先取决于密封界面的结构型式,因此对密封界面结构形式及相应密封性能的分析研究,是柱面气膜密封系统研究的重要组成部分、是柱面气膜密封系统设计应用的基础^[5]。

柱面气膜密封与气体径向轴承工作原理类似,主要是依据润滑力学的动压-静压原理,借助密封界面的结构布局变化,在高界面滑速、高边界压差和高环境温度的工况下,保持两柱状密封界面间形成稳定的薄气膜,以实现密封的低泄漏和长寿命。

密封柱面基本结构如图 1 所示,几何结构主要包括密封坝,带有槽、孔等的升力环。其中升力环结构变化较多,对密封性能的影响最为直接。密封环结构特点多为槽与密封的高压气体相通,低压侧由密封坝截断,密封环相对旋转引起的动压效应使得气膜产生流体动压力并被进一步压缩,提高了气膜的总压力;气体越过密封坝后急剧降压膨胀,后到达低压侧作为泄漏。未开槽密封坝的节流作用在提高气膜压力的同时,限制了泄漏量。借鉴端面气膜密封界面结构特点^[6]并综合考虑径向气体轴承中螺旋槽结构有利于提高系统稳定性的特点^[7-9],本文选择了包括螺旋槽顺流型、螺旋槽逆流型等六种柱面密封界面典型结构,通过自主开发编写的柱面气膜密封设计分析软件,对其动压密封性能进行了较为全面的定量分析比较,为柱面气膜密封系统的设计和应用提供指导。

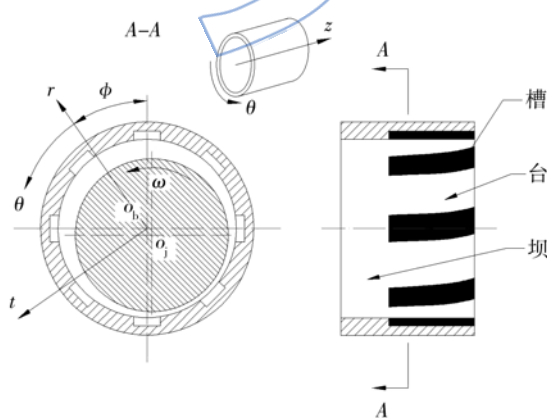


图 1 密封柱面结构简图

Fig. 1 Structure of cylindrical gas film seal

1 数值分析基础

1.1 分析方法

描述柱面密封气膜动静压效果,能计及可变

黏度、双柱面旋转、并相对进动的瞬态三维压力微分方程,即较广义的雷诺方程为^[10]

$$\frac{1}{R_1^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6(\omega_b + \omega_j - 2\Omega) \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} + 12 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \rho \tilde{\nu} \delta_i \quad (1)$$

该方程式是在积分可压缩流连续方程并在某些物理假定下运用广义黏流运动方程得到的。

在旋转坐标系中不带节流孔的稳态压力场方程为

$$\frac{1}{R_1^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6\omega \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} \quad (2)$$

采用无量纲化后的方程为

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right] + \left(\frac{R_1}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right] \right\} = 2\Lambda \frac{\partial(\bar{p} \bar{h})}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$\Lambda = 6 \left(\frac{R_1}{c} \right)^2 \frac{\eta \omega}{p_a}$$

式中 h 为气膜厚度, ω 为相对转速, c 为半径间隙, p 为气膜压力, p_a 为高压边界压力, η 为气膜黏度, L 为密封环轴向宽度, R_1 为轴颈半径, Λ 为可压缩数。 Λ 与密封系统中多参数相关,与气体轴承一致是表征气膜密封结构和运转状况的综合参量。

稳态气膜厚度方程为

$$h(r, \theta) = c + e \cos \theta + \delta_i h_g(r, \theta) \quad (4)$$

式中 e 为偏心距; δ_i 是 Kronecker 数,在有凹凸垫或槽处为 1,无凹凸垫或槽处为 0; $h_g(r, \theta)$ 表示界面凹凸垫或槽引起的稳态膜厚变化(其数值随界面槽形变化在不同位置取值不同)。

由于柱面气膜密封界面结构的复杂性,有关柱面密封气膜压力分布的计算,采用了对界面几何结构适应性较强的有限元素法^[11]。数值求解的基本思路为:基于微分方程等效积分提法的加权余量思想,使用伽勒金法对柱面气膜压力微分方程改造得到其等效积分形式,进而得到更利于使用的弱形式而建立起单元刚度矩阵,组集为整体压力场方程组;引入对应的边界条件,通过数值方法对整体压力场方程组进行迭代求解,确定压力场分布的数值解。

有关的有限元分析模型建立、数值计算过程

和数值算法及所开发程序的有效性验证,在作者之前发表的论文《柔性支撑浮环柱面气膜密封准动态特性分析》(参考文献[12])中有详细说明,因篇幅所限,本文对不同界面结构密封气膜特性的计算均以此为基础,不再详细说明.考虑密封界面结构的多样几何形状,不同界面结构建立的压力求解模型的主要差异在于界面膜厚分布的变化.

1.2 密封气膜的稳态特性

气膜反力

$$\begin{cases} F_r = \int_0^l \int_0^{2\pi} (p - p_a) R_j \cos \theta d\theta dz \\ F_t = \int_0^l \int_0^{2\pi} (p - p_a) R_j \sin \theta d\theta dz \\ F = \sqrt{F_r^2 + F_t^2} \\ K_f = p_a R_j L \end{cases} \quad (5)$$

密封泄漏

$$\begin{cases} Q_z = \int_0^{2\pi} \rho \left[-\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right] R_j d\theta dz \\ K_q = \frac{h_0^3 p_a^2 R_j}{24\eta R T L} \end{cases} \quad (6)$$

摩擦转矩

$$\begin{cases} M = \int_0^l \int_0^{2\pi} \left[\frac{\partial p}{R_j \partial \theta} \frac{h}{2} + \eta \frac{\omega R_j}{h} \right] R_j^2 d\theta dz \\ K_m = p_a L h_0 R_j \end{cases} \quad (7)$$

其中 K_f , K_q , K_m 分别是气膜稳态特性气膜反力、气膜泄漏量和摩擦转矩的无量纲因子, h_0 为平均膜厚.

2 典型界面结构与性能分析

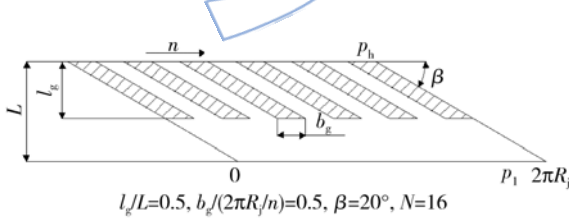
2.1 界面结构

选择六种典型界面结构型式包括:螺旋槽顺流型、逆流型、对称人字槽型、顺流人字槽型、逆流人字槽型和阶梯型结构.选型依据侧重考虑以下两方面因素:

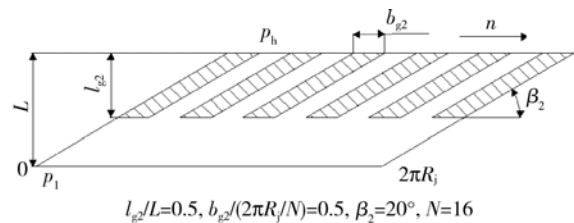
1) 参考气体径向轴承在工程实际应用中螺旋槽界面结构高速下稳定性较好^[7,13]、低速时承载力较小的特点,考虑柱面气膜密封中注重动态稳定性和对承载能力要求低的应用特点,选择螺旋槽结构作为密封界面基本形式.

2) 考虑螺旋槽布置方向和转子转动方向同时对气体流动产生影响,对比端面气膜密封研究和应用中采用的界面结构形式^[6],并综合参考文献[4]研究中的柱面气膜密封界面结构,在螺旋槽基本形式基础上,选择5种螺旋槽派生结构和阶梯型结构作为典型界面结构进行分析.

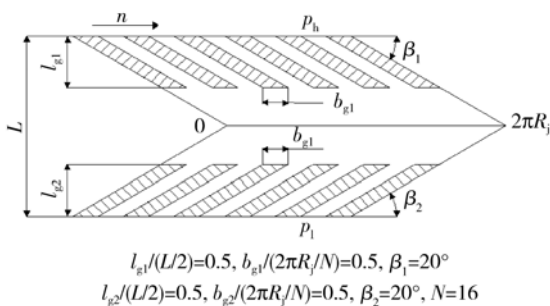
为利于比较不同结构型面特点,重点考虑动压效应和轴向两端存在压差带来的静压效应,所选结构中均不设节流孔.对每种界面结构参考文献[14-15]研究中提供的数据,选取了其优化的或接近优化的结构参数.图2为各种界面展开结构及参数图.图中 L 为密封环宽度; l_g 为槽长; b_g 为槽宽; β 为螺旋角; N 为槽数; n 为转子转速; p_h , p_l 分别为高压、低压端压力.坝宽 l_d 可以根据 l 和 l_g 计算得出.



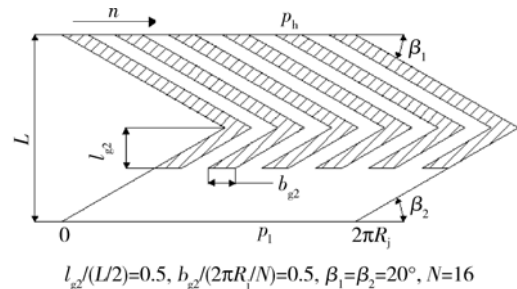
(a) 螺旋槽顺流型



(b) 螺旋槽逆流型



(c) 对称人字槽型



(d) 顺流人字槽型

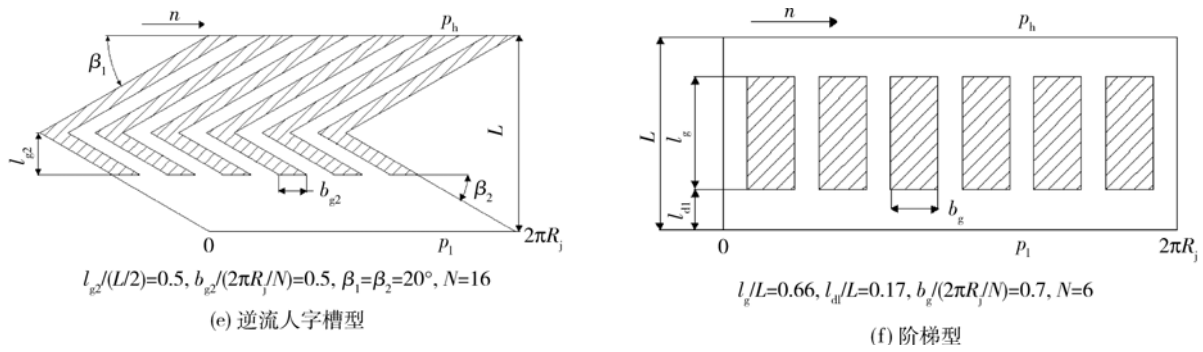


图 2 柱面气膜密封典型界面展开结构及参数

Fig. 2 Unfolded structure and parameters of cylinder gas seal's typical interfaces

2.2 性能计算

2.2.1 计算条件

在相同的密封系统几何参数和运转条件下(表 1)对各典型界面结构进行性能分析比较。

表 1 柱面气膜密封计算参数

Table 1 Calculation parameters of cylinder gas seal

参数	数值
气体温度 $t/^\circ\text{C}$	20
气体动力黏度 $\eta/10^{-5}(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.932
上游气体压力 p_h/MPa	0.6
下游气体压力 p_l/MPa	0.11
转子轴颈 $D/10^{-3}\text{m}$	156
密封宽度 $L/10^{-3}\text{m}$	156
偏心率 ϵ	0.3

2.2.2 气膜特性与可压缩数变化关系

2.2.2.1 计算结果

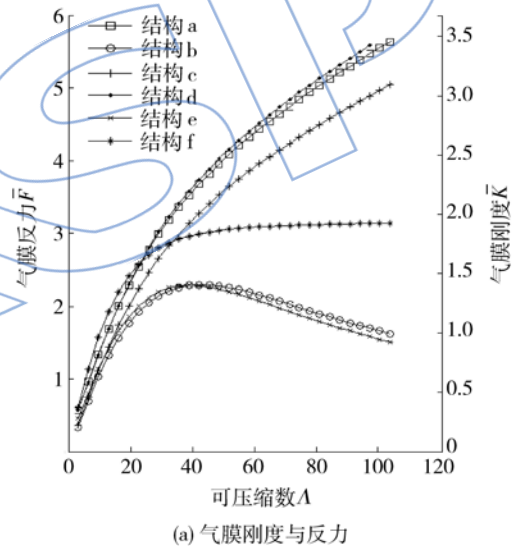
图 3 为平均膜厚 $h_0=1.5\times 10^{-5}\text{m}$ 时 6 种结构(结构(a)~(f))的无量纲气膜反力、无量纲摩擦转矩、无量纲气膜泄漏量和无量纲气膜刚度随可压缩数变化的计算曲线。

2.2.2.2 结果分析

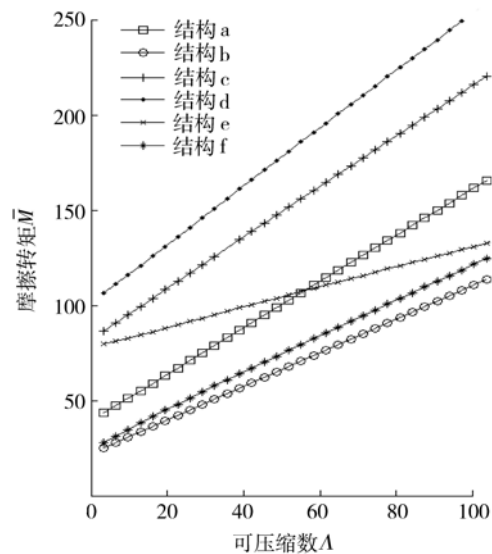
1) 气膜反力-刚度变化

各种结构动压效果差别显著:随着可压缩数的增大,顺流型、人字顺流型和人字型的无量纲气膜反力明显增大,逆流型和逆流人字型随可压缩数变化出现峰值后有减小趋势,普通阶梯型反力随可压缩数增加到一定程度不再变化。我们认为这种变化趋势的出现主要是顺流结构螺旋槽泵吸效果的影响,由于螺旋方向和旋转方向的影响,顺

流槽螺旋方向和旋转方向一致,运动过程中旋入气流至密封作用面,逆流槽螺旋方向和旋转方向相反旋出气流,从而影响了不同界面结构的压力分布。



(a) 气膜刚度与反力



(b) 摩擦转矩

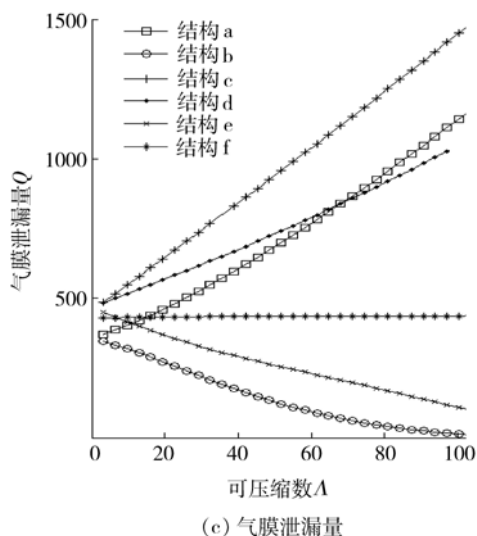


图3 密封气膜稳态性能随可压缩数变化比较

Fig. 3 Comparison of typical seal interfaces' steady-state performance with changeable compressibility number

随着可压缩数的增加,气膜反力的非线性程度明显增加,是气膜可压缩特性的表现,这一表现正与可压缩流体力学特性研究的结论一致。

随着可压缩数增加气膜刚度有极值情况出现。气膜刚度由高到低的顺序依次为:顺流型、人字顺流型、人字型、阶梯型、逆流人字型和逆流型。随可压缩数增加动压效果增加,峰值的出现反映在顺流结构中动压效果显著,逆流结构中峰值的出现可以认为动压效果减弱静压影响增强,但变化趋势说明静压效果整体影响较小,表明开小孔增加静压效果对整体气膜刚度增加影响有限,综合加工、气路设计等因素考虑,选择不带小孔的结构是合理的。

2) 泄漏量变化分析

不同结构无量纲泄漏量随可压缩数变化差异明显:顺流型、人字顺流型和人字型随可压缩数增大泄漏明显增大,这与其结构动压效果随可压缩数增大明显结论吻合;

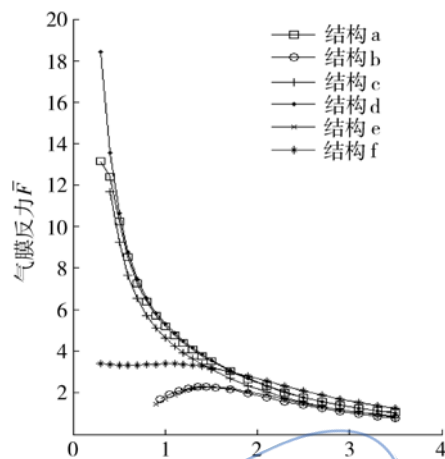
普通阶梯型泄漏变化不大,逆流型和人字逆流型随可压缩数增大减小趋势,但变化程度小于顺流型,分析认为这种特点一方面与其无量纲反力的变化吻合,另一方面也表明了逆流结构旋出气流的阻塞效果,与其物理分析结论一致。

2.2.3 气膜特性与气膜厚度变化关系

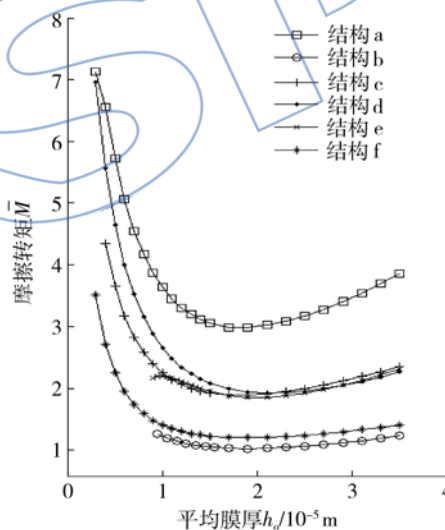
2.2.3.1 计算结果

气膜厚度是设计过程中重要的设计参数,图

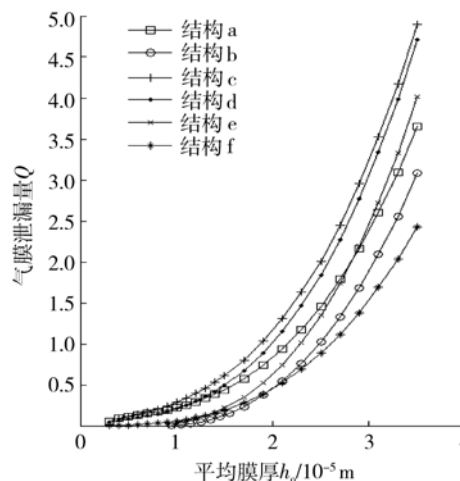
4 给出转速 $n=12000 \text{ r/min}$ 时 6 种结构的无量纲气膜反力、无量纲摩擦转矩、无量纲泄漏量、无量纲气膜刚度随平均膜厚变化的计算曲线。



(a) 气膜反力



(b) 摩擦转矩



(c) 气膜泄漏量

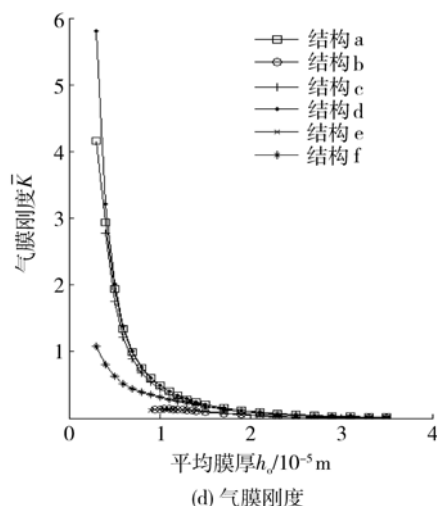


图 4 密封气膜稳态性能随平均膜厚变化比较

Fig. 4 Comparison of typical seal interfaces' steady-state performance with changeable average film thickness

2.2.3.2 结果分析

1) 气膜反力-刚度变化分析

不同界面结构的气膜刚度随膜厚变化在小膜厚时出现较大值,其变化情况与参考文献[6]中端面气膜密封相应典型结构分析结果一致,间接验证了本计算结果的合理性。

2) 泄漏量变化分析

随着膜厚的增大,各种结构泄漏量均呈现增大的趋势,但相互之间差别尤其在小膜厚时差别较小,说明膜厚对泄漏影响明显,但在小膜厚下的泄漏主要取决于密封坝处的阻塞效果。

逆流型泄漏较小,特别是在膜厚较小($h_0 < 10^{-5} \text{ m}$)时有负泄漏效应趋向,人字型结构泄漏最大,这对于不同密封应用场合的界面结构设计具有明显的指导意义。

3 结 论

密封界面结构对密封性能影响显著,通过数值仿真分析的方法对不同界面结构的密封特性进行分析研究,不仅能有效提高研究效率、为试验研究提供参考,而且为进一步的设计应用奠定了基础。

上述计算与分析结果表明:柱面气膜密封中不同密封界面结构型式在工作过程中对密封气膜性能影响各异。虽然算例是在一定的密封界面典型尺寸和密封运转条件下,但仍可通过对它们的分析比较获得如下结论:

1) 逆流型和人字逆流型结构,在小膜厚(如 $8 \mu\text{m}$ 或更小)或大可压缩数(如 100 以上)下趋近零泄漏,但是气膜反力—刚度较小,故单独的逆流型和逆流人字型结构不能保证良好的密封跟踪性,难以维持稳定的气膜厚度。但是其中逆流型结构在小膜厚时的小泄漏和负泄漏效果,对有毒有害气体流体密封具有重要应用意义。

2) 顺流型结构在大可压缩数下,气膜反力很大,泄漏量也较大;但在小膜厚下($< 10^{-5} \text{ m}$),气膜反力较大、泄漏量不大,则允许密封界面可以有较大的位移和变形,综合性能优,更易于适应航空发动机关键部位密封工况。

3) 阶梯普通阶梯型结构,除在界面形状上具有简单性以外,在气膜反力、摩擦转矩和泄漏等方面都无很明显的优势。

受几何参数和运转条件参数限制,本文所得到的分析结果在相关条件改变时可能会表现出不同变化,但可以依据本文所建立的分析方法针对变化条件或结构进行分析。

参考文献:

- [1] Mavhew E R, Bill R C, Voorhees W J. Military engine seal development: potential for dual use[R]. AIAA-94-2699, 1994.
- [2] Steinetz B M, Proctor M P, Dunlap P H. Overview of NASA glenn seal developments [R]. NASA/CP-2004-212963/VOL1, 2004.
- [3] 马纲, 沈心敏. 先进气膜密封技术研究进展与分析[J]. 航空制造技术, 2009(3): 58-61.
MA Gang, SHEN Xinmin. Development and analysis of advanced gas film sealing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(3): 58-61. (in Chinese)
- [4] Shapiro W. Numerical, analytical, experimental study of fluid dynamic forces in seals[R]. NASA/CR-2004-213199/VOL2, 2004.
- [5] 沈心敏, 刘雨川, 马纲. 航空燃气轮机摩擦学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [6] 刘雨川, 徐万孚, 沈心敏. 端面气膜密封的高性能端面结构[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 187-190.
LIU Yuchuan, XU Wanfu, SHEN Xinmin. Face configuration with high performance for gas film face seal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(2): 187-190. (in Chinese)
- [7] Anderson W J, Cunningham R E, Fleming D P. Experiments on stability of herringbone grooved gas-lubricated journal bearings to high compressibility numbers [R]. NASA-TN-D-4440, 19680401, 1968.
- [8] Jang G H, Yoon J W. Nonlinear dynamic analysis of hydrodynamic journal bearing of herringbone groove[J]. Journal of Tribology, 2002, 124(2): 297-304.

- [9] Faria M T C. An efficient finite element procedure for analysis of high-speed spiral groove gas face seals[J]. *Journal of Tribology*, 2001, 123(1): 205-210.
- [10] 沈心敏, 闻英梅, 孙希桐, 等. 摩擦学基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- [11] Bonneau D, Huitric J, Tournier B. Finite element analysis of grooved gas thrust bearings and grooved gas face seal[J]. *Journal of Tribology*, 1993, 115(3): 348-354.
- [12] 马纲, 席平, 沈心敏, 等. 柔性支撑浮环柱面气膜密封准动态特性分析[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(5): 1190-1196.
MA Gang, XI Ping, SHEN Xinmin. Analysis of quasi-dynamic characteristics of compliant floating ring gas cylinder seal[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(5): 1190-1196. (in Chinese)
- [13] Fleming D P. Externally pressurized gas-lubricated journal bearings with herringbone grooves-load capacity and stability analysis[R]. NASA-TM-X-52816, 1970.
- [14] 陈建平, 赵丕智, 王之珊. 径向圆柱型气体螺旋密封理论和实验研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2000, 26(4): 439-442.
CHEN Jianping, ZHAO Peizhi, WANG Zhishan. Study on seal of gas along cylindrical spiral groove[J]. *Journal of Beihang University*, 2000, 26(4): 439-442. (in Chinese)
- [15] Shapiro W. Numerical, analytical, experimental study of fluid dynamic forces in seals[R]. NASA/CR-2004-213199/VOL3, 2004.