

考虑磨损效应的指尖密封瞬态泄漏特性分析^{*}

王 强¹, 吉洪湖¹, 胡娅萍¹, 杜春华²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 接触式指尖密封在工作过程中不可避免地会发生磨损, 而磨损又会改变其泄漏特性进而影响旋转机械的效率。为了揭示磨损对指尖密封泄漏特性的影响规律, 在指尖密封多孔介质流动分析模型的基础之上, 建立了考虑转子离心膨胀和磨损效应的指尖密封瞬态泄漏特性数值分析模型, 数值研究了转速和安装过盈量对指尖密封磨损及其对应的泄漏特性的影响规律。结果表明: 考虑磨损效应时, 指尖密封泄漏量随磨损时间的增加呈现出先减小后增大的趋势; 转子转速越低, 泄漏量降低至最小值所需的磨损时间越长, 但最小泄漏量及其所对应的瞬态配合过盈量始终一致; 安装过盈量越小, 泄漏量降低至最小值所需的磨损时间越短, 但最小泄漏量所对应的瞬态配合过盈量始终一致; 此外, 在任意磨损时刻, 密封上下游压差越大泄漏量也越大。

关键词: 接触式指尖密封; 磨损; 多孔介质模型; 瞬态泄漏特性; 旋转机械

中图分类号: TB42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 12-2815-12

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190352

Transient Leakage Characteristics Analysis of Finger Seal Considering Wear Effects

WANG Qiang¹, JI Hong-hu¹, HU Ya-ping¹, DU Chun-hua²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Contacting finger seal is inevitably worn during the working process. Then wear will affect the leakage characteristics of the seal and the efficiency of the rotating machinery. In order to study the effects of wear on the leakage characteristics of finger seal, the authors proposed a transient leakage characteristics analysis model of finger seal based on the porous medium leakage analysis model while the centrifugal expansion of rotor and wear effect are considered, and the effects of rotating speed and initial assembly interference on wear and its corresponding leakage characteristics of finger seal are also numerically simulated. Results indicated that the leakage characteristics of finger seal decrease at first and then increase with runtime while wear effect is considered. The lower the rotating speed is, the longer the runtime required to reach the minimum leakage of finger seal, however, the minimum leakages and their corresponding transient fit interferences are the same at each rotating speed. The smaller the initial assembly interference is, the shorter the runtime required to reach the minimum leakage of finger seal, however, the transient fit interferences corresponding to the minimum leakages are the

^{*} 收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-08-01。

基金项目: 国家自然科学基金 (51106072); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (KYLX16_0398); 中央高校基本科研业务费专项资金资助。

通讯作者: 王 强, 博士生, 研究领域为航空发动机先进密封装置流动传热等。E-mail: wangqiang_nuaa@126.com

引用格式: 王 强, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 考虑磨损效应的指尖密封瞬态泄漏特性分析[J]. 推进技术, 2020, 41(12):2815-2826. (WANG Qiang, JI Hong-hu, HU Ya-ping, et al. Transient Leakage Characteristics Analysis of Finger Seal Considering Wear Effects[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(12):2815-2826.)

same at each initial assembly interference. In addition, the larger the pressure difference across the seal is, the larger the leakage of finger seal at arbitrary runtime.

Key words: Contacting finger seal; Wear; Porous media model; Transient leakage characteristics; Rotating machinery

1 引 言

指尖密封是一种具有广泛应用前景的柔性密封技术,可承担叶片叶尖、压气机及涡轮级间和轴承腔等部位的密封任务。试验研究表明指尖密封的泄漏量较传统的篦齿密封低 20%~70%;而与之密封性能相近的刷式密封其制造成本约为指尖密封的两倍^[1]。此外,指尖密封具有的柔性使其能够适应转子的径向跳动和离心膨胀但不破坏其完整性,避免了传统篦齿密封的刚性磨损问题,因而具有更长的寿命。因此,指尖密封技术是一个有着巨大潜力的领域,具有投资小收益高的特点。

指尖密封通常在航空发动机内高温、高压差和高转速的条件下工作,转子微小的间隙或过盈配合状态以及转子的跳动、离心和热膨胀等因素将导致密封不可避免的发生磨损。此外,指尖密封特有的指缝结构结合磨损与变形等问题使得其结构内部的流动异常复杂。因此,自指尖密封被提出以来,国内外学者已经针对其磨损和泄漏流动特性进行了诸多研究。在磨损特性方面,Arora 等^[1]通过试验研究首次验证了指尖密封磨损速率随时间逐渐降低的规律,并且发现磨损一定时间后密封与转子将达到零间隙配合的稳定运行状态。Proctor 等^[2]通过试验研究发现指尖密封超过 70% 的磨损是发生在初始性能试验阶段。杜春华等^[3-4]分别对过盈、过渡和间隙三种不同配合状态的指尖密封进行了泄漏、磨损及磨损对泄漏特性影响的试验研究。结果表明:间隙配合时密封发生局部磨损,且磨损对泄漏的影响主要表现在试验初始阶段;过盈配合时密封整体发生磨损且其对泄漏的影响表现在整个试验阶段,此外配合过盈量越大,磨损对泄漏的影响也越大。Li 等^[5]对冷、热态下指尖密封的磨损特性进行了试验研究,发现绝大部分磨损发生在试验初始阶段且热态下磨损要明显大于冷态。苏华^[6]首次分析了指尖密封的磨损机理,发现粘着磨损为其主要磨损形式。之后,宗兆科等^[7]和 Zhang 等^[8]均利用 Archard 粘着磨损模型分析了指尖密封的磨损特性,结果表明磨损率与摩擦副之间的接触压力和转子表面线速度成正比,与密封材料硬度成反比。在泄漏特性方面,Arora 等^[1]

试验验证了随着压差的增大和转速的下降指尖密封泄漏量逐渐增大的规律。Proctor 等^[2,9]对指尖密封进行了静态、性能和耐久性的泄漏特性试验,发现其泄漏特性要略优于刷式密封。白花蕾等^[10]试验验证了随着指梁间隙的增大和密封片层数的减少,指尖密封泄漏量逐渐增大的规律。Braun 等^[11]采用流固耦合的方法首次对指尖密封进行了泄漏流动和压力分布的数值模拟,迈出了对指尖密封实体结构泄漏特性数值计算的第一步。张延超等^[12-14],Chen 等^[15-16],Wang 等^[17-18],Zhao 等^[19]和 Su 等^[20]则假设指尖密封与转子之间存在泄漏间隙并利用偏心圆环间隙泄漏流计算公式来计算泄漏量,实现了指尖密封泄漏特性的快速估算。白花蕾等^[21-22]和王强等^[23]将指尖密封处理为多孔介质,结合其结构特点提出了适用于指尖密封泄漏特性计算的多孔介质模型,该模型能够较为精确地计算指尖密封结构的泄漏特性。

综上所述,尽管对指尖密封磨损和泄漏特性的研究已经较为详尽。但是事实上磨损效应对指尖密封的泄漏特性有着重要影响,例如磨损导致的配合过盈量变化将直接改变泄漏量。然而在此方面,作者查阅已发表文献发现目前仅有 Li 等^[5]通过试验测量了多个运行时间下的泄漏量来反映磨损对泄漏特性的影响,却缺乏完整运行时间段内泄漏特性的连续变化规律。因此,建立考虑磨损效应的指尖密封泄漏特性计算模型是非常有必要的。

本文在指尖密封多孔介质流动分析模型的基础之上,首先建立了考虑磨损效应的泄漏特性数值分析模型。该模型将配合过盈量与磨损效应对泄漏特性的影响附加于孔隙率与流动阻力系数之中,且其中磨损量是通过解析以 Archard 粘着磨损模型为原型并针对指尖密封结构推导的一阶线性非齐次微分方程得到的。其次,利用上述模型对比分析了考虑磨损效应与否时,指尖密封的泄漏特性。最后,数值分析了给定结构和工况参数指尖密封的瞬态泄漏特性。

2 考虑磨损效应的指尖密封泄漏特性分析模型

考虑磨损效应的指尖密封泄漏特性分析模型是

在已有多孔介质流动计算模型的基础之上建立的。这就需要首先将磨损对密封结构的影响体现为多孔介质特征参数的变化,进而表现为动量方程中阻力源项的变化。其次需要分析求解在转子转速、初始安装过盈量等参数影响下磨损随运行时间的变化规律。

2.1 物理模型

指尖密封结构由前挡板、隔片、若干层指尖密封片和后挡板通过铆钉联接而成,其中指尖密封片由沿周向均匀排布的柔性指梁构成,指梁的自由端称为指尖靴,如图1所示。指尖靴通常与转子圆周面形成微小的间隙或过盈配合从而起到密封作用。此外,由于指尖密封片交错布置,使得指梁之间的间隙被相邻密封片上的指梁所遮挡,从而可以减少泄漏。本文采用的指尖密封结构与文献[22]所述一致,包含4层具有圆弧型线指梁的指尖密封片,其材料为65Mn钢。具体的结构参数如图1和表1所示,包括指单元周向圆心角 α 、指尖靴周向圆心角 α' 、自由状态下指尖靴周向圆心角 α'_0 、指梁之间间隙宽度 I_s 、自由状态下指梁之间间隙宽度 I_{s0} 、指梁宽度 I_b 、指梁弧长 L_{st} 、密封内径 D_i 、密封片层数 Z 、单层密封片厚度 b 、指梁圆弧基圆直径 D_{cc} 、指梁圆弧半径 R_s 、指尖靴上端部直径 D_f 、指梁根圆直径 D_b 和单层密封片指单元个数 N 。

2.2 多孔介质指尖密封区域流动控制方程

指尖密封片沿周向是周期性循环排列的指单元

Table 1 Structure parameters of the finger seal

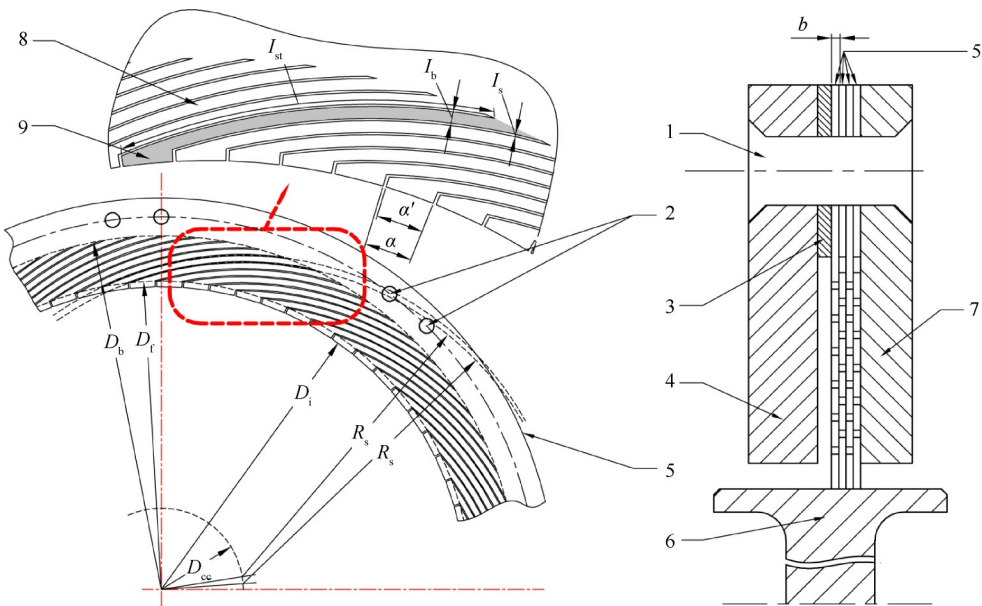
Parameters	Value
Seal inner diameter D_i /mm	160
Numbers of finger laminates Z	4
Laminate thickness b /mm	0.3
Finger beam arcs' centers diameter D_{cc} /mm	43
Finger beam arc radius R_s /mm	85
Finger foot upper diameter D_f /mm	163
Finger base diameter D_b /mm	187
Finger foot repeat angle for free state $\alpha'_0/(\circ)$	4.7
Finger interstice width for free state I_{s0} /mm	0.4
Number of fingers for each laminate N	72

结构,相邻指单元之间存在相同间隙,而且沿轴向相邻的密封片规则地交错布置。鉴于此,将图1所示指尖密封结构中指梁和指尖靴区域处理为多孔介质,采用多孔介质模型来模拟其泄漏流动特性,并假设泄漏气体为理想可压缩空气。考虑到磨损是一个瞬态过程,因此指尖密封多孔介质区域的泄漏流动计算采用以下瞬态控制方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\frac{2}{3} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) + \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_j \quad j = 1, 2, 3$$



1) Rivet; 2) Indexing and rivet holes; 3) Spacer; 4) Forward cover plate; 5) Finger seal laminates; 6) Rotating shaft; 7) Aft cover plate; 8) Finger beam; 9) Finger foot

Fig. 1 Contacting finger seal structure

$$p = \rho R_g T \quad (3)$$

式中 ρ 为空气密度; U_i 为 i 方向的表观速度; p 为压力; μ 为流体动力黏度; R_g 为空气的气体常数; T 为气流温度; S_j 为 j 方向上由指梁或指尖靴结构对流体阻碍作用引起的在多孔介质流动计算方程中附加的动量损失源项, 其包含黏性损失项和惯性损失项两部分, 即

$$S_j = -\left(C_1 \mu U_j + \frac{1}{2} C_2 \rho |U| U_j\right) \quad j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中 C_1 和 C_2 分别为多孔介质黏性损失项和惯性损失项系数。白花蕾等^[22]采用试验修正的方法得到如下式所示系数, 计算结果表明其能够较好地模拟指尖密封对流体的阻力特性。

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\Omega^2}{2\phi^3} \\ C_2 = \frac{\Omega}{4\phi^3} \left(0.03343 + \frac{0.0155}{3.0136\Delta p} \exp\left(-\left(\ln \frac{\Delta p}{0.1728}\right)^2\right) \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中 Ω 为比面; ϕ 为多孔介质孔隙率; Δp 为密封上下游压差, 其单位为 MPa。

孔隙率与比面是多孔介质的两个基本特征参数, 孔隙率的定义为多孔介质中孔隙所占比例, 而比面的定义为单位体积的润湿表面积。二者的取值受指尖密封结构特征与配合过盈量的影响, 而受磨损效应的影响配合过盈量又随着运行时间而变化。因此, 建立考虑磨损效应的指尖密封瞬态泄漏特性分析模型的关键在于求解过盈配合状态下的孔隙率与比面及考虑磨损效应的瞬态配合过盈量。

2.3 过盈配合状态下的孔隙率与比面

本文采用宏观水平方法研究多孔介质指尖密封区域的特征参数, 这就需要首先选取合适的表征体元。根据文献[24]所述原则, 选取指尖密封多孔介质区域的表征体元并计算孔隙率与比面。需要说明的是由于指梁和指尖靴的设计方法不同, 因此在选取表征体元时将两者分开来考虑。

图2所示为依据指梁结构特征选取的指梁区域表征体元, 其尺寸沿指梁型线切线方向(ξ)取微元量 $d\xi$, 沿垂直于指梁型线切线方向(η)取 I_b 与 I_s 之和, 沿轴向(x)取2层指尖密封片厚度之和。根据定义可得指梁区域的孔隙率和比面为

$$\begin{cases} \phi_{fb} = \frac{I_s \cdot Z \cdot b \cdot d\xi}{(I_s + I_b) \cdot Z \cdot b \cdot d\xi} = \frac{I_s}{I_s + I_b} \\ \Omega_{fb} = \frac{Z(2I_b \cdot d\xi + 2b \cdot d\xi)}{(I_s + I_b) \cdot Z \cdot b \cdot d\xi} \times 10^3 = \frac{2I_b + 2b}{(I_s + I_b) \cdot b} \times 10^3 \end{cases} \quad (6)$$

式中 I_b 可根据几何结构关系得到

$$\begin{aligned} I_b &= D_{cc} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \beta_r + \\ &D_{cc} \sin \frac{\alpha}{4} \sqrt{\frac{R_s^2}{D_{cc}^2 \sin^2 \frac{\alpha}{4}} - \cos^2 \left(\frac{\alpha}{4} + \beta_r \right)} - \\ &D_{cc} \sin \frac{\alpha}{4} \sqrt{\frac{R_s^2}{D_{cc}^2 \sin^2 \frac{\alpha}{4}} - \cos^2 \left(\frac{\alpha}{4} - \beta_r \right)} - I_{s0} \\ \beta_r &= \arccos \frac{4R_s^2 + D_{cc}^2 - 4r^2}{4R_s D_{cc}} \end{aligned} \quad (7) \quad (8)$$

式中 r 为任意位置的半径。

事实上, 受磨损和转子变形效应的影响, 指尖密封发生径向变形时指梁之间的间隙会发生变化, 如图3所示, 这又会改变孔隙率和动量损失源项阻力系数从而影响泄漏特性。指尖密封径向变形与配合过盈量相等, 由于其值相对较小且发生变形时指梁根部间隙不发生变化而指梁端部间隙变化最大, 为简化计算本文将指单元近似为悬臂梁结构, 利用其挠

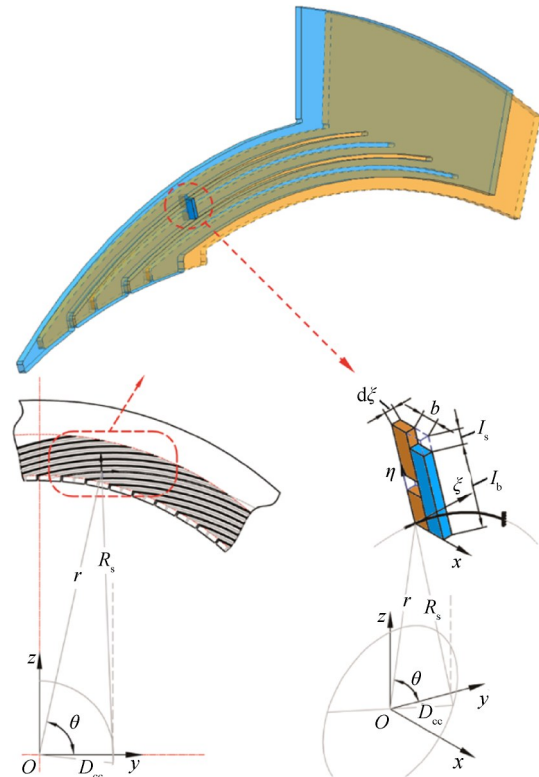


Fig. 2 Representative macro volume of finger beam field

度计算公式分析获得由过盈配合引起的指梁之间间隙的变化规律。

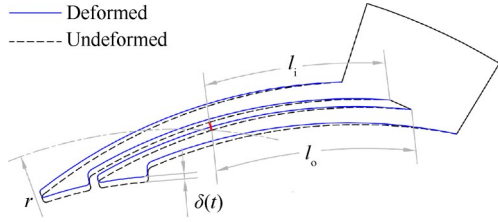


Fig. 3 Deformation of a finger caused by interference

根据图3所示几何关系,可知任意半径处指梁之间间隙的变化量 ΔI_s ,等于该半径处指梁外圆挠度与相邻指梁内圆挠度之差,即

$$\Delta I_s = \frac{F_\gamma l_o^2}{6EI_z} (3L_{st} - l_o) - \frac{F_\gamma l_i^2}{6EI_z} (3L_{st} - l_i) \quad (9)$$

式中 E 为指尖密封材料弹性模量; I_z 为指梁截面对弯曲中性轴的惯性矩; F_γ 为指尖密封与转子表面接触力,在垂直于指梁型线切线方向的分量; L_{st} 为指梁圆弧长度; l_o 和 l_i 分别为由指梁根部到指定半径处的指梁外圆弧和相邻指梁内圆弧弧长,且

$$L_{st} = R_s (\beta_b - \beta_f) \quad (10)$$

$$l_o = R_s (\beta_b - \beta_r) \quad (11)$$

$$l_i = R_s (\beta_b - \beta_r') \quad (12)$$

式中 β_b, β_f 和 β_r' 均为中间变量,可通过分析几何关系得到

$$\beta_b = \arccos \frac{D_{cc}^2 + 4R_s^2 - D_b^2}{4D_{cc}R_s}$$

$$\beta_f = \arccos \frac{D_{cc}^2 + 4R_s^2 - D_f^2}{4D_{cc}R_s}$$

$$\beta_r' = \arccos \frac{D_{cc}(R_s + I_{s0}) \cos \beta_r - I_{s0}^2 - 2R_s I_{s0}}{R_s D_{cc}}$$

此外分析指单元端部挠度及受力情况可得

$$F_\gamma = k_e \delta(t) \cos \gamma \quad (13)$$

$$EI_z = \frac{k_e L_{st}^3 \cos^2 \gamma}{3} \quad (14)$$

式中 $\delta(t)$ 为考虑磨损效应的瞬态配合过盈量; k_e 为单个指单元的径向刚度,其值可通过对指单元建模并利用有限元法分析得到,如图4所示,图中 F_n 为指尖密封与转子表面接触力,针对本文研究的指尖密封结构,其值为0.5207N/mm; γ 为 F_γ 与 F_n 的夹角,且

$$\cos \gamma = \frac{4R_s^2 + D_f^2 - D_{cc}^2}{4R_s D_f}$$

将式(10)~(14)代入式(9)并与自由状态下指梁

之间间隙对比可得

$$I_s = I_{s0} - \frac{\delta(t) (\beta_r' - \beta_r) [3\beta_b^2 - 6\beta_b \beta_f - \beta_r^2 + (\beta_r' + \beta_r)(3\beta_f - \beta_r')]}{2(\beta_b - \beta_f)^3 \cos \gamma} \quad (15)$$

与指梁区域类似,指尖靴区域的表征体元如图5所示,其尺寸沿半径方向(r)取微元量 dr ,沿圆周方向(φ)取一个指单元所占的周向角 α ,并忽略指尖靴弧长沿径向的变化,沿轴向(x)取2层指尖密封片的厚度之和。根据定义可得指尖靴区域的孔隙率和比面为

$$\begin{cases} \phi_{ff} = \frac{\frac{(\alpha - \alpha') \pi D_i}{\alpha N} Z \cdot b \cdot dr}{\frac{\alpha \pi D_i}{\alpha N} Z \cdot b \cdot dr} = 1 - \frac{\alpha'}{\alpha} \\ \Omega_{ff} = \frac{2Z \left(\frac{2\alpha' \pi r}{\alpha N} dr + b \cdot dr \right)}{\frac{2\alpha \pi r}{\alpha N} Z \cdot b \cdot dr \times 10^{-3}} = \frac{\alpha b N + 2\pi \alpha' r}{\pi \alpha b r} \times 10^3 \end{cases} \quad (16)$$

此外,受磨损和转子变形效应的影响,指尖密封发生径向变形时指尖靴周向圆心角同样也会发生变化,即

$$\alpha' = \frac{\alpha'_0 D_i}{D_i + 2\delta(t)} \quad (17)$$

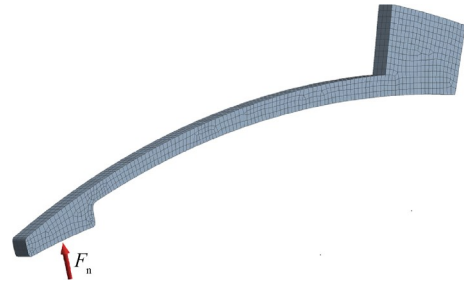


Fig. 4 Finite element analysis model of a single finger

2.4 考虑磨损效应的瞬态配合过盈量

在实际工作中,指尖密封的磨损受到摩擦副材料物性、摩擦表面状态及线速度、接触方式以及转子的膨胀、偏心和跳动等多方面因素的耦合影响,真实的磨损状态异常复杂。为实现指尖密封磨损特性的理论计算,本文做出如下简化假设:

(1) 由于与指尖密封配合的转子表面通常会涂覆耐磨涂层,其耐磨性远高于指尖密封片所用材料,因此本文假设在运行过程中只有指尖密封发生磨损。

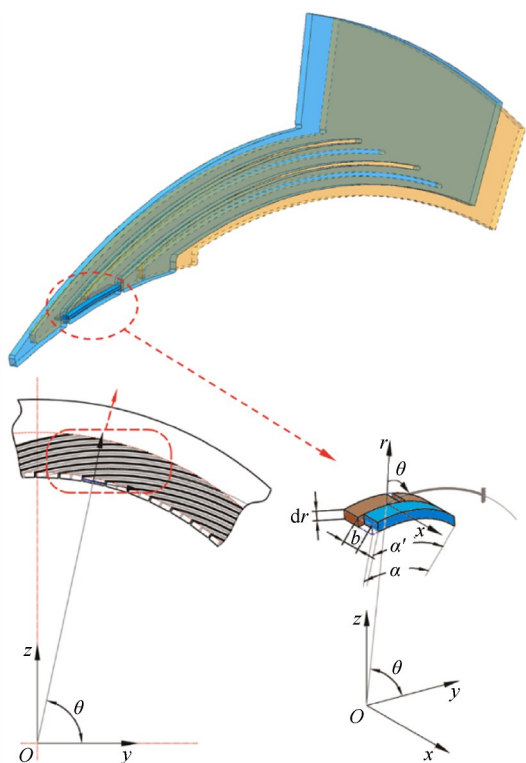


Fig. 5 Representative macro volume of finger foot field

(2) 尽管在实际运转过程中转子的偏心与跳动会导致指尖密封与转子之间的配合过盈量沿周向分布不均。但杜春华等^[3]通过试验证明对于常用尺寸的转子而言其偏心量远小于配合过盈量,且考虑到转子跳动具有的不确定性,本文假设指尖密封与转子之间的瞬态配合过盈量沿周向一致。

(3) 将指尖密封指单元结构近似为悬臂梁并分析可知指尖靴与转子表面的接触方式为微小的面面接触,但随着磨损的进行其接触面积会逐渐增大至整个指尖靴的底面积,为简化计算本文假设二者始终为紧密贴合的面面接触且接触面积不受磨损影响。

由此,考虑磨损效应的瞬态配合过盈量如下

$$\delta(t) = \delta_0 - \frac{V_s}{ZNA_e} \quad (18)$$

式中 V_s 为 $0 \sim t$ 时间段内密封累积磨损量; A_e 为单个指尖靴与转子接触表面积; δ_0 为初始时刻配合过盈量。

由于苏华^[6]通过分析指尖密封磨损机理发现其主要磨损形式为粘着磨损,因此可基于 Archard 粘着磨损模型推导得到适用于指尖密封磨损量计算的模型。如下式所示为 Archard 粘着磨损模型的一种形式

$$\Delta V_s = K_s F_n v \Delta t \quad (19)$$

式中 ΔV_s 为微小时间段 Δt 内的累积磨损体积; K_s 为密封材料磨损系数,需要通过材料磨损试验测定,对于 65Mn 钢材料其值为 $2.12 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ^[25]; v 为转子表面线速度; F_n 为密封与转子接触表面接触力,其与瞬态配合过盈量成正比,即

$$F_n = K_r \delta(t) = ZNk_c \delta(t) \quad (20)$$

式中 K_r 为指尖密封综合径向刚度,其取值受到密封结构参数、材料物性、磨损、密封上下游压差、指尖密封片与片以及片与后挡板摩擦力等因素的耦合影响而难以求解。因此,为简化计算本文忽略上述因素的影响,同时考虑到指尖密封为循环对称结构,假设综合径向刚度为所有指单元刚度叠加之和。

由于时间段 Δt 非常小,因此在该时间段内配合过盈量的变化可忽略。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,通过耦合式(18)~(20)可得到适用于指尖密封累积磨损量计算的一阶线性非齐次微分方程

$$\frac{dV_s}{dt} + \frac{K_s k_c v}{A_e} \cdot V_s = K_s ZNk_c v \delta_0 \quad (21)$$

上式有如下初始条件

$$\begin{cases} V_s|_{t=0} = 0 \\ \delta_0 = \delta_a + \delta_\omega + \delta_E \end{cases} \quad (22)$$

式中 δ_a 为安装过盈量; δ_E 为转子和密封的热膨胀失配量、转子偏心和跳动等引起过盈量之和,其与材料物性、工况参数、装配环境以及试验件加工和装配精度等都有较为复杂的关系,因此本文暂不考虑该因素的影响; δ_ω 转子单边离心膨胀量,其可通过对转子建模并采用有限元方法分析得到。本文针对文献[21]中与指尖密封配合的转子建立如图6所示计算模型,给定转子内孔圆柱支撑边界并限定转子端面的轴向位移,之后利用有限元法分析可得特定转速下的转子离心膨胀量。由此,转子单边离心膨胀量可拟合为转速的函数

$$\delta_\omega = (2.798n^2 + 4.690n - 17750) \times 10^{-11} \quad (23)$$

式中 n 为转子转速,单位为 r/min。

将式(22)代入式(21)可获得指尖密封累积磨损量的解析解

$$V_s = ZNA_e (\delta_a + \delta_\omega + \delta_E) \left(1 - \exp\left(-\frac{K_s k_c v}{A_e} t\right) \right) \quad (24)$$

综上所述,将式(24)代入式(18)可得考虑磨损效应的指尖密封与转子瞬态配合过盈量为

$$\delta(t) = (\delta_a + \delta_\omega + \delta_E) \exp\left(-\frac{K_s k_c v}{A_e} t\right) \quad (25)$$

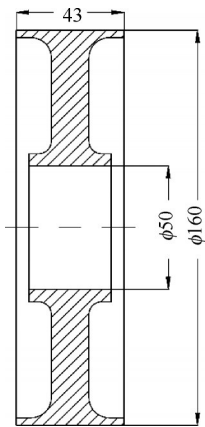


Fig. 6 Computational model of centrifugal expansion of the rotor (mm)

2.5 分析模型的验证

需要说明的是,尽管 Li 等^[5]进行了磨损对泄漏特性影响的试验研究,但是未给出本文计算指尖密封磨损及泄漏特性所必需的关键参数。仅有的试验结果也无法用来直接验证本文所建立的考虑磨损效应的泄漏特性数值分析模型的准确性。因此,本文拟通过对指尖密封多孔介质流动计算和磨损计算两个模型的可靠性分别予以验证,来间接说明上述分析模型的准确性。就多孔介质流动计算模型而言,白花蕾等^[22]已经试验验证其计算的可靠性,此处不再赘述。

就磨损模型的验证而言, Li 等^[5]给出了其 No.3 指尖密封试验件的部分参数,如表 2 所示,由此可以计算得到转子表面线速度 v 和单个指尖靴与转子接触表面积 A_c 。而通过分析试验数据可知耦合安装过盈量与转子离心、偏心量的指尖密封配合过盈量为 0.078 mm。此外, Li 等^[5]所使用指尖密封材料的磨损系数为 $2.0386 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ^[26]。由于缺乏计算指单元刚度的结构参数,本文提出四个假设值并将上述参数代入式(25)可得指尖密封的磨损特性,如图 7 所示。由图可知,尽管指单元刚度是一系列假设值,本文建立的指尖密封磨损计算模型能够较好地与试验数据吻合。

Table 2 Parameters of the No.3 finger seal in reference [5]

Parameters	Value
Seal inner diameter D_i/mm	152
Laminate thickness b/mm	1.2
Finger interstice width for free state I_{s0}/mm	0.21
Rotor rotating speed $n/(\text{r/min})$	4550
Number of fingers for each laminate N	62

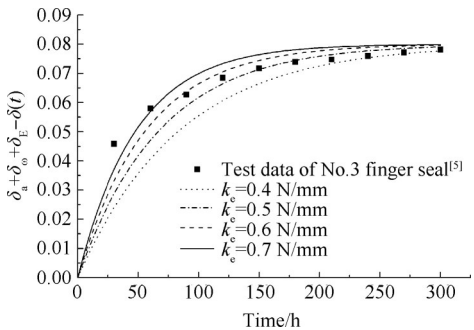


Fig. 7 Wear characteristics of the No.3 finger seal in reference [5]

3 考虑磨损效应的指尖密封泄漏特性数值分析

3.1 计算域与边界条件

由于本文将指尖密封结构处理为多孔介质,因此泄漏流动计算模型中不包含指尖密封的实体结构。考虑到指尖密封具有的周期循环对称性,根据其装配环境选取如图 8 所示二维计算域用于数值模拟其流场特性。该计算域包括多孔介质指梁和指尖靴区域以及密封上下游流场区域。此外,计算域的底面为转子表面,其尺寸为转子半径与初始时刻配合过盈量之和。

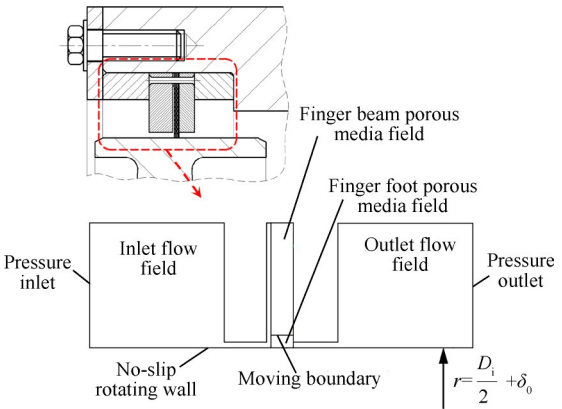


Fig. 8 Leakage computational model

针对图 8 所示计算模型的边界条件设置如下:转子表面设定为无滑移旋转表面,且转速根据工况给定,而其它表面设定为无滑移固定表面;计算域进口表面设定为压力入口边界并根据密封上下游压差给定压力;计算域出口表面设定为压力出口边界并给定压力为 0.1 MPa;指梁与指尖靴区域分界面设定为移动边界,由于在磨损过程中只有指尖靴发生磨损,导致该界面随着磨损时间的推移逐渐向转子表面趋近,在数值计算过程中可利用动网格技术实现该边

界的移动。

3.2 网格划分及独立性验证

采用 GAMBIT 软件对计算域进行结构化网格的划分,并在流场进出口、壁面附近和多孔介质指尖密封区域进行适当的网格加密,如图 9 所示。

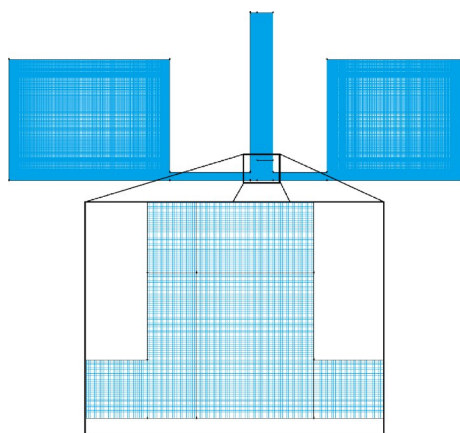


Fig. 9 Grid of leakage computational model

本文选取泄漏量作为参考量来验证计算时网格的独立性,并假设网格数量变化引起的泄漏量相对变化量小于 0.05% 时满足独立性验证要求。本文采用的验证算例其工况为密封上下

游压差 0.2MPa、安装过盈量 0.9mm、转子转速为 3000r/min、运行时间 5h。泄漏量随网格数量的变化规律如表 3 所示。由表可知,当网格数量超过 31.14 万时泄漏量满足独立性验证要求,这表明当网格数量超过 31.14 万时计算结果将不再受网格密度的影响。本文对其它安装过盈量下的计算模型均进行了类似的网格独立性验证。

Table 3 Grid independence study of the computational model

Grids	#1	#2	#3	#4	#5
Size	57500	135600	226000	311400	398500
Leakage/(g/s)	24.879	24.940	24.977	24.989	24.993
Error/%	—	0.245	0.148	0.048	0.016

3.3 数值计算方法

本文利用商业软件 Fluent 来数值模拟考虑磨损效应的指尖密封泄漏流动特性。在计算过程中,第 2 节所述的考虑磨损的指尖密封孔隙率及流动阻力系数(式(6)和(16))是利用 Fluent 的用户自定义函数(User-Defined Functions,简称 UDF)功能实现的。其中磨损模型(式(25))的嵌入包含两个方面:其一是将考虑磨损的瞬态配合过盈量编写到孔隙率与流动

阻力系数的 UDF 程序中,从而实现磨损对流动阻力的改变;其二是将磨损的过盈量单独编写成 UDF 程序并利用动网格技术实现指梁与指尖靴区域分界面在计算过程中的移动。

3.4 计算结果与分析

在密封上下游压差为 0.2MPa、安装过盈量为 0.9mm、转子转速为 3000r/min 的条件下,本文分析了表 1 所示指尖密封结构考虑磨损效应与否对泄漏特性的影响,如图 10 所示。由图可知,在不考虑磨损效应的情况下指尖密封的泄漏特性不随时间发生变化。当考虑磨损效应时,指尖密封泄漏量随时间呈现出先减小后增大的趋势。分析其原因是由于在磨损初期指梁区域与指尖靴区域的分界面直径大于后挡板内径,使得流体主要通过指尖靴区域泄漏,而结合式(16)和式(17)可知随着配合过盈量的磨损指尖靴区域的孔隙率减小且比面增大,这使得该区域阻力系数增大而泄漏量减小;当磨损进行到一定程度时,指梁区域与指尖靴区域分界面直径的减小使得指梁区域的泄漏占据主导位置,而结合式(6)和式(15)可知随着配合过盈量的磨损指梁区域的孔隙率增大,这使得该区域阻力系数降低而泄漏量增大。

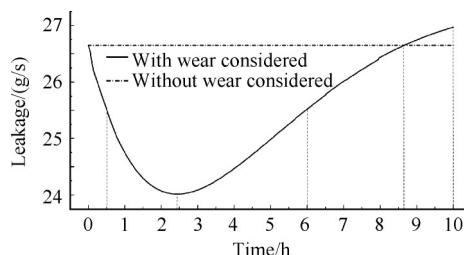


Fig. 10 Transient leakage characteristics of finger seal simulated with and without wear considered

图 11 所示为上述计算条件下未考虑磨损效应与考虑磨损效应且磨损时间分别为 0.5h, 2.45h, 6h, 8.66h 和 10h 时的压力分布图和速度矢量图。需要说明的是未考虑磨损效应的计算结果即为考虑磨损效应 0 时的计算结果,而考虑磨损效应时,各时间点分别对应泄漏量下降阶段、泄漏量最低值、泄漏量上升阶段,考虑磨损效应与否泄漏量相等点和计算结束时刻,如图 10 所示。由图 11 所示压力场云图可以看出,前挡板保护高度区域、隔片下部区域以及指梁区域的压力保持几乎与设定的进口压力一致,后挡板保护高度区域则保持几乎与设定的出口压力一致,压力的剧烈变化仅局限于指尖靴区域,所以指尖密封的承压部分主要为后挡板保护高度以下的部分。

由图 11 中所示速度矢量图可以看出,流体在前挡板保护高度区域内流动比较均匀;在隔片下部区域,由于流道突扩导致速度减小并在前挡板后拐点附近形成漩涡;当流体进入指尖密封区域时,由于流动阻力较大,所以指梁上部区域流动相对稳定,而流体的泄漏主要通过指梁下部和指尖靴区域;在进入后挡板保护高度区域后,由于压力下降及流道突缩,流体流速突然增大并在后挡板的前拐角处达到最大值。对比压力场云图和速度矢量图发现,由于压力与速度的剧烈变化发生在指尖靴区域,使得前挡板后拐点区域及指梁区域虽然有速度变化但从图 11 中无法观察到压力变化。为此,本文以未考虑磨损效应时的压力场云图为例,通过调整色标范围突出显示指梁区域与前挡板后拐点附近区域的压力变化,如图 12 所示。由图可以看出,压力发生变化的区域,速度也会相应的产生变化。

此外,由图 11 可以看出在磨损的作用下指梁区域与指尖靴区域分界面的直径随着时间的推移逐渐减小,但压降始终集中在指尖靴区域。此外对比不同磨损时刻的速度矢量分布图可知,在磨损时刻 2.45h 之前指梁区域的速度略微增大而指尖靴区域的速度明显减小,在磨损时刻 2.45h 之后指尖靴区域的速度继续减小但指梁区域的速度显著增大,这与图

10 所示泄漏量随磨损时间的变化规律一致。

图 13 所示为三种转速条件下考虑磨损效应的指尖密封瞬态配合过盈量与泄漏量随时间变化情况,其中密封上下游压差为 0.2MPa、安装过盈量为 0.9mm。由图可以看出指尖密封与转子之间的配合过盈量随磨损时间的增加而逐渐降低,且转子转速越大过盈量下降速率也越大,这是由于转子表面线速度越大,单位时间的磨损路程也越长导致的。此外,在各转速下泄漏量随着时间的推移均呈现出先减小后增大的趋势,不同的是转速越低泄漏量达到最低值所需的时间越长,但各转速下泄漏量最低值及其对应的瞬态配合过盈量均一致。这是由于配合过盈量一定时,转速对孔隙率和流动阻力系数无影响,而转速越低磨损速率越慢导致磨损到泄漏量最低值所对应配合过盈量所需的时间越长。需要说明的是,本文所研究的转子其离心膨胀量非常小,因而对泄漏特性的影响不明显。由此可知对于本文计算所采用的接触式指尖密封结构而言,若以泄漏量最小作为性能评价指标其最佳配合过盈量为 0.26mm。

图 14 所示为三种压差条件下考虑磨损效应的指尖密封瞬态配合过盈量与泄漏量随时间变化情况,其中转子转速为 3000r/min、安装过盈量为 0.9mm。由图可以看出,密封上下游压差对瞬态配合过盈量

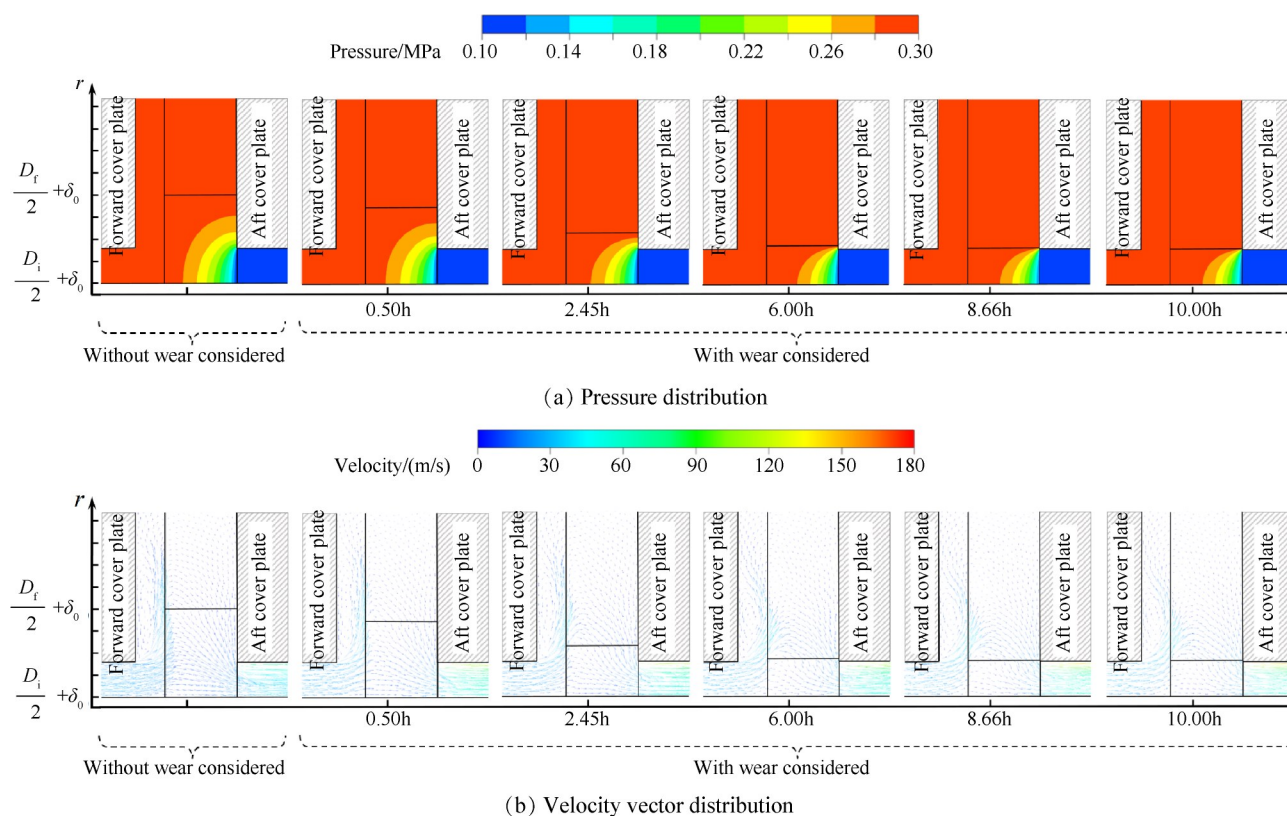


Fig. 11 Pressure and coupled axial and radial velocity vector distribution simulated with and without wear considered

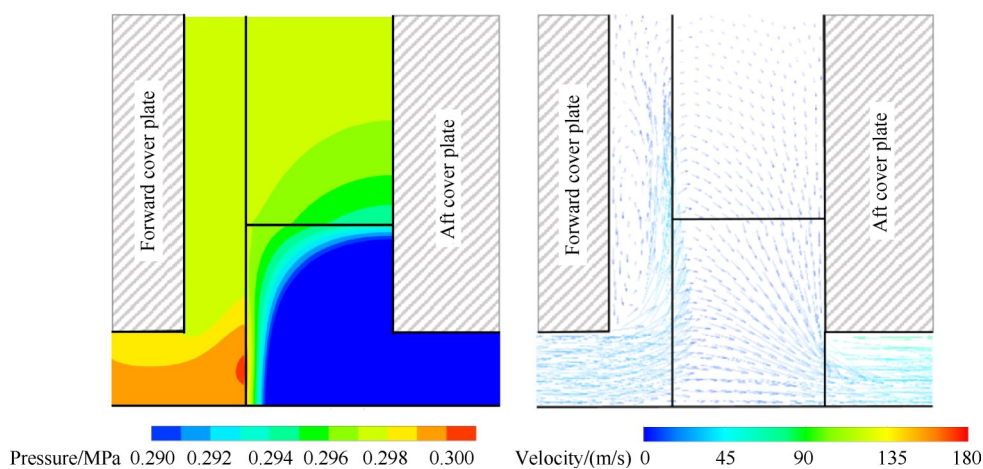


Fig. 12 Pressure and coupled axial and radial velocity vector distribution simulated without wear considered

没有影响,这是由于忽略了由压差引起的指尖密封径向刚度的变化。此外,在各压差下泄漏量随着时间的推移均呈现出先减小后增大的趋势,且各压差下泄漏量达到最低值所需的时间及泄漏量最低值对应的瞬态配合过盈量均一致。但是,压差越大泄漏量也越大。

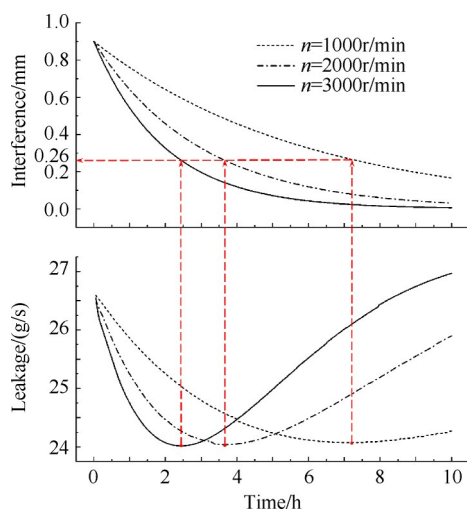


Fig. 13 Transient interference and leakage characteristics of finger seal for various rotating speeds

图 15 所示为三种安装过盈量下考虑磨损效应的指尖密封瞬态配合过盈量与泄漏量随时间变化情况,其中密封上下游压差为 0.2MPa、转子转速为 3000r/min。由图可以看出,安装过盈量越大,瞬态配合过盈量下降的速率也越大,这是因为安装过盈量越大,指尖密封与转子表面接触力也越大,从而加剧磨损,该结论也可以通过式(25)求导得以说明。此外,在各安装过盈量下泄漏量随着时间的推移均呈现出先减小后增大的趋势,不同的是安装过盈量越小,泄漏量降低至最小值所需的磨损时间越短,但

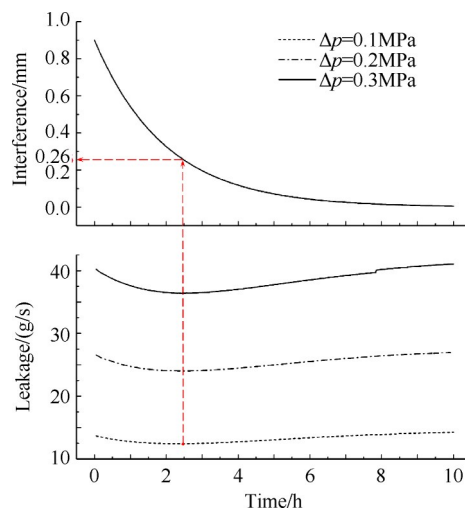


Fig. 14 Transient interference and leakage characteristics of finger seal for various pressure difference

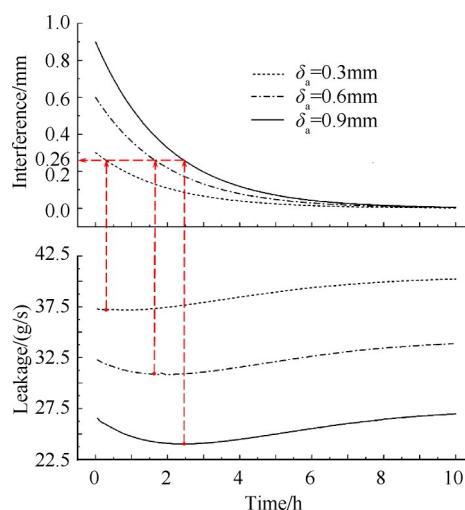


Fig. 15 Transient interference and leakage characteristics of finger seal for various assembly interferences

最小泄漏量所对应的瞬态配合过盈量始终一致。这是由于在磨损速率一定的情况下,安装过盈量越小

则磨损到泄漏量最低值对应的配合过盈量所需的时间越短。此外,在任意时刻安装过盈量越小泄漏量越大,这是由于安装过盈量越小使得转子表面与前、后挡板形成的泄漏通道截面积越大。

4 结 论

本文针对接触式指尖密封,建立了考虑磨损的泄漏特性分析模型并对给定结构和工况参数的指尖密封进行了数值分析。主要研究结论如下:

(1)考虑磨损效应的影响时,指梁区域的流动阻力随时间推移逐渐减小,指尖靴区域则相反。二者分界面的直径随时间的推移逐渐减小,使得磨损前期以指尖靴区域的泄漏为主,而磨损后期则以指梁区域的泄漏为主。因此,指尖密封泄漏量随磨损时间呈现出先减小后增大的趋势。

(2)转子转速越低,泄漏量降低至最小值所需的磨损时间越长,但最小泄漏量及其所对应的瞬态配合过盈量始终一致。

(3)安装过盈量越小,泄漏量降低至最小值所需的磨损时间越短,但最小泄漏量所对应的瞬态配合过盈量始终一致。

(4)对于本文计算所采用的接触式指尖密封结构而言,若以泄漏量最小作为性能评价标准,则其最佳配合过盈量为0.26mm。

致 谢:感谢国家自然科学基金、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目、中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

参考文献

- [1] Arora G K, Proctor M P, Steinetz B M, et al. Pressure Balanced, Low Hysteresis, Finger Seal Test Results[R]. AIAA 99-2686.
- [2] Proctor M P, Kumar A, Delgado I R. High-Speed, High-Temperature Finger Seal Test Results[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(2): 312-318.
- [3] 杜春华, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 指尖封严的转子轴心轨迹与泄漏特性的试验[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(11): 2575-2584.
- [4] 杜春华, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 指尖封严磨损特性及其对泄漏影响的试验[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(1): 53-59.
- [5] Li G Q, Zhang Q, Guo L, et al. Leakage and Wear Characteristics of Finger Seal in Hot/Cold State for Aeroengine[J]. *Tribology International*, 2018, 127: 209-218.
- [6] 苏 华. 指尖密封结构和性能的设计分析与试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [7] 宗兆科, 苏 华. 圆弧型指尖密封的几何构型特征及结构优化[J]. *航空学报*, 2010, 32(2): 393-399.
- [8] Zhang Y C, Liu K, Cui Y H, et al. The Performances Optimization of Finger Seal Based on Fuzzy Game Theory[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 3450-3455.
- [9] Proctor M P, Delgado I R. Leakage and Power Loss Test Results for Competing Turbine Engine Seals[R]. *ASME GT-2004-53935*.
- [10] 白花蕾, 吉洪湖, 纪国剑, 等. 指式密封泄漏特性的实验研究[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(3): 532-536.
- [11] Braun M J, Kudriavtsev V V, Steinetz B M, et al. Two- and Three-Dimensional Numerical Experiments Representing Two Limiting Cases of an In-Line Pair of Finger Seal Components[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2003, 9(3): 171-179.
- [12] 张延超, 陈国定, 申晓龙. 指尖密封动态性能分析与泄漏量计算[J]. *航空学报*, 2009, 30(11): 2193-2199.
- [13] 张延超, 刘 凯, 周连杰, 等. 基于系统响应特征的指尖密封泄漏特性分析[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(1): 205-210.
- [14] 张延超, 刘 凯, 胡海涛, 等. 基于有限元仿真的指尖密封准动态性能分析方法[J]. *推进技术*, 2016, 37(12): 2352-2358. (ZHANG Yan-chao, LIU Kai, HU Hai-tao, et al. Quasi-Dynamic Performances Analysis of Finger Seal Based on Finite Element Simulation[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(12): 2352-2358.)
- [15] Chen G D, Lu F, Yu Q P, et al. Dynamic Analysis of Finger Seal Using Equivalent Model Based on Distributed Mass Method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 228(16): 2992-3005.
- [16] Chen G D, Wang L N, Yu Q P, et al. Dynamic Analysis of C/C Composite Finger Seal[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(3): 745-758.
- [17] Wang L N, Chen G D, Su H, et al. Effect of Temperature on the Dynamic Performance of C/C Composite Finger Seal[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(12): 2249-2264.
- [18] Wang L N, Chen G D, Su H, et al. Effect of Work Status on Leakage and Contact Pressure of C/C Composite Finger Seal[J]. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(5): 925-940.

- [19] Zhao H L, Chen G D, Wang L N, et al. Dynamic Performance of a C/C Composite Finger Seal in a Tilting Model [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30 (4) : 1603-1614.
- [20] Su H, Wang L. Study on 2.5D C/C Composite Finger Seal Integrate Optimization Combined with Microstructural Parameters of Material and Macro Geometry of Finger Seal[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(9): 1599-1608.
- [21] 白花蕾. 指式封严泄漏特性的实验研究和数值模拟 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [22] 白花蕾, 王伟, 张振生, 等. 基于多孔介质模型的指尖密封泄漏流动分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31 (6): 1303-1308.
- [23] 王 强, 胡娅萍, 吉洪湖. 基于多孔介质的指尖密封各向异性传热模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32 (11): 2585-2595.
- [24] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [25] 王宏立, 张 伟, 申玉军, 等. 激光淬火 65Mn 钢表面摩擦磨损性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(6): 652-656.
- [26] 路 菲, 陈国定, 苏 华, 等. 指尖密封用炭-炭复合材料摩擦磨损性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1): 184-188.

(编辑:张 贺)