

圆弧型指尖密封磨损计算方法及其特性研究^{*}

杜春华^{1,2}, 严豪宇¹, 崔亚辉¹, 张延超¹, 吉洪湖³

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 江苏苏州迈为科技股份有限公司, 江苏 苏州 215200;

3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为揭示圆弧型指尖密封磨损规律, 获得结构参数对其磨损特性影响规律, 通过分析指尖密封的磨损过程, 构建了指尖密封体积磨损量关于时间的一阶线性非齐次微分方程, 求解得到指尖密封中磨损量和磨损率计算的数学计算模型, 并采用所建立的数学计算模型研究了结构参数对指尖密封磨损的影响。结果表明: 采用文中磨损计算结果进行泄漏特性数值计算与文献中试验结果误差小于5%, 证明本文磨损计算的合理性; 首次提出了磨损总量系数、磨损率系数和磨损时间系数的概念, 用这三个参数表述指尖密封的磨损特性, 并获得了磨损率系数、磨损时间系数随指尖片结构变化规律; 指尖密封的体积磨损量和磨损率随磨损时间呈指数趋势变化; 对指尖密封磨损快慢影响程度由大到小依次是: 指梁厚度、指梁根圆、指梁顶圆、指梁基圆、指梁型线圆、周向角、指梁间隙。

关键词: 指尖密封; 接触式密封; 磨损量; 磨损率; 结构参数

中图分类号: TB42

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2021) 08-1839-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190896

Calculation Method and Characteristics of Wear of Arc-Shaped Finger Seal

DU Chun-hua^{1,2}, YAN Hao-yu¹, CUI Ya-hui¹, ZHANG Yan-chao¹, JI Hong-hu³

(1. School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Suzhou Maxwell Technology Co., Ltd., Suzhou 215200, China;

3. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to reveal the wear law and obtain structural parameters affecting the wear characteristics of the arc-shaped finger seal, the text constructed a first-order linear non-homogeneous differential equation of the volume wear of the finger seal with respect to time, through analyzing the wear process of the finger seal. A mathematical calculation model for the calculation of the amount of wear and wear rate was obtained by solving the a first-order linear non-homogeneous differential equation. And the influence of structural parameters on the wear of finger seals was studied through using the mathematical calculation model established in this paper. The results show that, the error between the leakage characteristic numerical calculation using the calculation results of wear in this paper and the experimental results in the literature is less than 5%, which proves the rationality of the wear calculation in this paper. The concepts of total wear coefficient, wear rate coefficient and wear time coef-

^{*} 收稿日期: 2019-12-28; 修订日期: 2020-03-13。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51305343); 陕西省科技成果转移与推广计划 (2018XNCG-G-11); 陕西省教育厅服务地方专项计划 (19JC030)。

通讯作者: 杜春华, 博士, 讲师, 研究领域为润滑与密封技术、传质与传热。E-mail: duchunhua555@163.com

引用格式: 杜春华, 严豪宇, 崔亚辉, 等. 圆弧型指尖密封磨损计算方法及其特性研究[J]. 推进技术, 2021, 42(8):1839-1847. (DU Chun-hua, YAN Hao-yu, CUI Ya-hui, et al. Calculation Method and Characteristics of Wear of Arc-Shaped Finger Seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(8):1839-1847.)

ficient are put forward for the first time. The three parameters are used to describe the wear characteristics of finger seal. The wear rate coefficient and wear time coefficient change with the structure of finger slice. The volume wear and wear rate of finger seal trend change exponentially with the wear time. The degree of influence on the wear and tear of the finger seal is in descending order: finger beam thickness, finger beam root circle, finger beam top circle, finger beam base circle, finger beam line circle, circumferential angle, and finger beam clearance.

Key words: Finger seal; Contact seal; Wear volume; Wear interference; Structural parameters

1 引 言

指尖密封作为一种新型的密封技术,国外试验结果表明^[1],指尖密封的泄漏量为4齿篦齿密封的1/10~1/5;而随着现代航空工业的飞速发展,对于航空发动机在推重比、燃油效率、可靠性和运行成本等方面的要求逐渐提高。指尖密封按照密封件与转子的接触形式可分为接触式密封和非接触式密封,接触式密封是指尖密封件与其相配合的转子之间间隙为零,其泄漏主要通过密封件中的微小缝隙进行的,因此其泄漏非常小,密封效果也非常好,但密封件与转子之间是接触配合的,它们之间会产生磨损,且其磨损较为严重,所以接触式密封适用于线速度较低场合^[2]。因此对于指尖密封的磨损特性研究很有必要。

指尖密封泄漏和磨损做为其性能评价的两个重要指标^[3],国内外针对其泄漏特性和磨损特性已经做了大量较为完善的研究。Braun等^[4]首次对带有浮升力垫片的指尖密封泄漏进行了数值计算。白花蕾^[5]构建了指尖密封的多孔介质模型参数确定方法,并根据试验结果和指尖密封的结构参数特点确定了多孔介质中的常数,实现了多孔介质模型在指尖密封数值计算中的应用。张延超等^[6]构建了指尖密封系统的动态计算模型,依据指尖密封的系统响应特征研究其泄漏间隙的获取办法,进而基于泄漏间隙特征建立了指尖密封动态泄漏量计算方法。周坤等^[7]对比了指尖密封和刷式密封的泄漏特性。Wang等^[8],Zhao等^[9]针对碳/碳复合材料指尖密封,利用偏心圆环间隙泄漏计算公式,实现泄漏特性快速估算。郎达学等^[10]分析了不同工况和织构结构条件下表面织构靴底流体动压指尖密封的泄漏等特征。王强等^[11]在指尖密封多孔介质模型基础上,建立了考虑转子离心膨胀和磨损效应的指尖密封泄漏特性数值分析模型。胡廷勋等^[12]在CFD多孔介质数值计算模型基础上,研究了指尖密封不同压差和转速下的泄漏特性。摩擦磨损特性研究方面,苏华^[13]指出,指尖

密封的磨损得数值计算可以按粘着磨损来计算;张延超等^[14]采用磨损量和磨损率作为磨损性能指标,应用灰色关联技术分析各结构特征参数对指尖密封磨损性能影响的主次关系和影响的灵敏度;杜春华等^[15]对指尖密封三种不同配合形式下的磨损特性进行了试验研究;张延超等^[16]构建了指尖密封系统的热结构耦合分析模型,研究热效应对指尖密封/转子配副接触强度的影响规律,并进行了物理试验验证。

本文根据圆弧型指尖密封的结构特点及其磨损过程分析,构建圆弧型指尖密封磨损量随时间变化的一阶非齐次微分方程,并得到圆弧型指尖密封磨损量计算的数学模型。根据所建立的磨损量计算的数学模型,开展了圆弧型指尖密封磨损特性及结构参数对其影响的研究,获得了结构参数对圆弧型指尖密封磨损特性影响规律。

2 物理模型和计算方法

2.1 物理模型

指尖封严的基本结构由前挡板、隔片、指尖片和后挡板通铆钉联接组成,如图1所示。指尖片是在一个薄片上按照一定规律排列加工出一组指尖曲梁,指尖密封交替叠置出一组指尖曲梁,指尖片交替叠置,相邻的指尖片互相覆盖指尖的间隙,指尖靴与转子形成间隙或过盈配合,从而形成封严效果。具体的结构参数如图1和表1所示,包括周向角 θ ,指尖靴间隙周向角 θ' ,指梁跨度 L_{sp} ,指梁间隙 CL ,外圆直径 D_o ,内圆直径 D_i ,指梁顶圆直径 D_t ,指梁根圆直径 D_b ,指梁型线圆半径 R_s ,指梁型线基圆半径 R_c ,指封片厚度 b ,截面高度 h ,单层指尖片指单元个数 Z 。

本文仅对指尖密封磨损特性进行了研究分析,指尖密封的泄漏特性及磨损对其泄漏的影响不是本文的研究对象,文中只采用考虑磨损时的泄漏特性对磨损计算方法进行了验证。由于安装会使转子产生偏心,转子高速旋转会产生振动,从而使指尖密封在整个圆周上的磨损不均匀,各个位置的磨损情况不同。而指尖密封在周向是周期性结构,各指尖磨

损情况仅与指尖的径向变形有关,即与转子径向位移相关,周向各个位置的磨损情况虽不同,但可以采用具有代表性的一个指尖的磨损特性来表征。因此,本文采用具有代表性的一个指尖作为研究对象,进行磨损特性的研究。

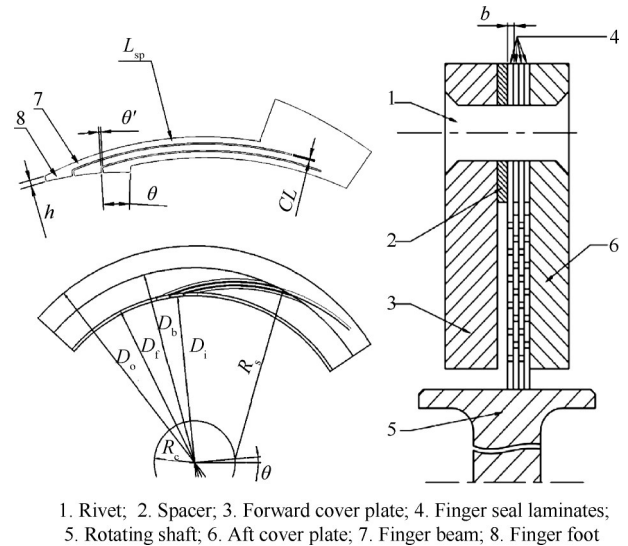


Fig. 1 Structure of finger seal

Table 1 Structure parameters of the finger seal

Parameter	Value
Seal outer diameter D_o /mm	466
Seal inner diameter D_i /mm	432
Finger foot upper diameter D_f /mm	434
Finger base diameter D_b /mm	453
Finger beam base arc radius R_c /mm	40.25
Finger beam arc radius R_s /mm	231.5
Circumferential angle $\theta/(^\circ)$	4.5
Finger beam clearance CL /mm	0.35
Number of fingers for each laminate Z	80
Sealing film thickness b /mm	0.3

2.2 计算方法

2.2.1 基本假设

指尖片与转子装配过盈时,指尖片由于过盈量的存在而发生径向变形。转子旋转,指尖密封与转子之间就会存在相对滑动,因此转子和密封片就会出现磨损。根据指尖密封结构和磨损特点分析,理论上指尖密封磨损形式包括粘着磨损、磨料磨损和腐蚀磨损。由于指尖密封属于气体密封,气体腐蚀磨损占比很小,故不考虑腐蚀磨损,同时高压气体将磨掉的磨屑吹离磨损表面,故不考虑磨料磨损。因此,在指尖密封磨损计算时假设磨损只有粘着磨损。

转子材料为不锈钢,转子表面镀有耐磨涂层,其硬度高、耐磨性好,指尖片材料是不锈钢,相对于转子耐磨涂层来说,较容易磨损;指尖片之间和指尖片与后挡板之间存在摩擦力的作用,该摩擦力对磨损的影响较为复杂,在磨损计算模型中不便于考虑;指尖片与转子摩擦会产生热量,接触表面温度的变化会引起磨损系数和磨损率的变化,这种变化比较复杂,在磨损计算中不便于进行考虑;指尖片与转子之间的相对滑动距离与转子旋转速度和旋转时间相关,可假设转速为匀速的,这样相对滑动距离与时间呈线性关系。由于指尖片一般采用摩擦系数较小的材料或者具有自润滑性能的材料以减小其迟滞特性,所以在气流作用下指尖片之间和指尖片与后挡板之间的摩擦力很小,其对磨损影响较小,因此本文不考虑指尖片之间和指尖片与后挡板之间的摩擦力作用,即不考虑气流对磨损的影响。综上所述,进行指尖密封磨损计算时做如下假设:(1)假设指尖片与转子之间的磨损类型为粘着磨损,其他类型的磨损不考虑。(2)假设磨损仅发生在指尖片上,转子不磨损。(3)假设指尖片之间和指尖片与后挡板之间的摩擦力很小,忽略不计。(4)假设接触面的温度变化对磨损系数和材料硬度没有影响。(5)假设转子旋转为匀速的。

2.2.2 磨损量和磨损率计算数学模型

指尖密封磨损量的计算可以使用粘着磨损计算模型,另外由于转子表面一般镀有耐磨涂层,其磨损较小,所以假设磨损仅发生在指尖片上。因此,指尖密封的磨损量的计算仅为指尖片磨损量的计算。

$$\Delta V_w = K_w \cdot \frac{F_n \cdot \Delta L_s}{H} \quad (1)$$

式中 K_w 表示摩擦副材料的磨损系数,本文 K_w 取值为 10^{-5} ; F_n 表示指尖片与转子表面之间的接触面正压力; H 表示摩擦副较软材料的硬度。

在相对滑动距离 ΔL_s 内时它们均为常数。

$$F_n = C_k k_{ei} \cdot \delta(t) \quad (2)$$

式中 C_k 表示考虑指尖片之间和指尖片与后挡板之间的摩擦力作用时抗弯刚度修正系数,本文修正系数 C_k 取值为 1; k_{ei} 为指梁的抗弯强度; $\delta(t)$ 为指尖片与转子的过盈量,是随磨损时间变化的量。

$$\Delta L_s = v \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中 v 为指尖片与转子的相对滑动线速度, Δt 为相对滑动的时间。

将式(2)和 $\Delta L_s = v \cdot \Delta t$ 代入式(1),可得到时间 Δt 段内指尖密封平均磨损量,并当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,变为微分

形式,即

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{K_w \cdot C_{ei} \cdot k_{ei} \cdot v}{H} \cdot \delta(t) \quad (4)$$

根据几何关系,可以确定在 Δt 时间段内指尖密封磨损量等于过盈量的变化量与接触面积的乘积,表达式为

$$\frac{\Delta V_w}{[\delta(t + \Delta t) - \delta(t)]} = \frac{\Delta V_w}{\Delta \delta} = -S_w \quad (5)$$

式中 $\delta(t + \Delta t)$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的过盈量; $\delta(t)$ 为 t 时刻的过盈量; $\Delta \delta$ 是在 Δt 时间段内过盈量的增量; S_w 为指尖片与转子接触面积,忽略其随磨损而产生的变化。

当 $\Delta \delta \rightarrow 0$ 时,式(5)可变为微分形式,即

$$\delta(t) = \delta(0) - \frac{1}{S_w} \cdot V_w \quad (6)$$

式中 $\delta(0) = \delta_0$ 。

将式(6)代入式(4),整理可得

$$\frac{dV_w}{dt} + \frac{K_w \cdot C_{ei} \cdot k_{ei} \cdot v}{H \cdot S_w} \cdot V_w = \frac{K_w \cdot C_{ei} \cdot k_{ei} \cdot v}{H} \cdot \delta_0 \quad (7)$$

初始条件为 $t=0$ 时, $V_w=0$ 。在该初始条件下方程的解为

$$V_w = \delta_0 \cdot S_w \cdot \left(1 - e^{-\frac{K_w C_{ei} k_{ei} v}{H \cdot S_w} t} \right) \quad (8)$$

式(8)即为指尖密封磨损量计算的数学模型,式中 $\delta_0 \cdot S_w$ 定义为磨损总量系数,反映了指尖片最终磨损的体积,用 C_{vol} 表示; $K_w C_{ei} k_{ei} v / H S_w$ 定义为磨损时间系数,反映了指尖片磨损量变化快慢,即磨损的剧烈程度,用 C_t 表示。

对磨损量求导得到指尖密封磨损率计算的数学模型,即

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{K_w C_{ei} k_{ei} v \delta_0}{H} \cdot e^{-\frac{K_w C_{ei} k_{ei} v}{H \cdot S_w} t} \quad (9)$$

式中 $K_w C_{ei} k_{ei} v \delta_0 / H$ 定义为磨损率系数,反映了指尖片初始阶段磨损剧烈程度,用 C_ψ 表示。

指梁具有一定抗弯刚度,使得指尖靴在与转子接触产生变形时能够恢复,将指梁简化成悬臂梁的形式,则指梁的抗弯刚度表达式为

$$k_{ei} = \frac{3EI_z}{L_{sp}^2} \quad (10)$$

式中 E 为弹性模量, I_z 为结构截面对弯曲中性轴的惯性矩, L_{sp} 表示指梁跨度。

指梁横截面为矩形,如图2所示,图中宽为封严片厚度 b ,截面高为 h_z 。指梁截面高度沿指梁方向是变化的,但是这种变化很小,取其平均值作为截面高度,则其对弯曲中性轴的惯性矩为

$$I_z = \frac{bh_z^3}{12} \quad (11)$$

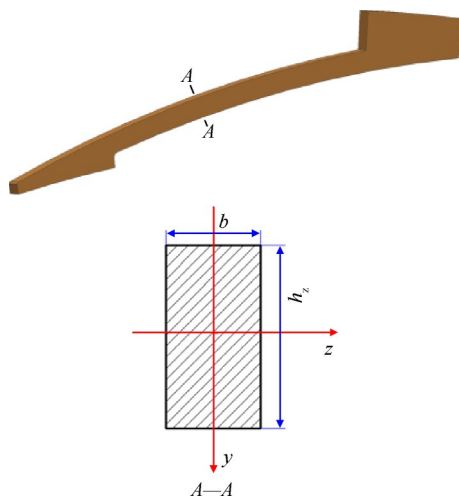


Fig. 2 Cross section of finger beam

指尖片与转子接触部分是指尖靴,指尖靴与转子接触面是一圆弧曲面,单个指尖片与转子接触面计算公式为

$$S_w = \frac{\pi D_i b}{4} \cdot \frac{\theta - \theta'}{\theta} \quad (12)$$

式中 D_i 为指尖片内直径, θ 为周向角, θ' 为指尖靴间隙周向角。

磨损量和磨损率计算公式(式(8),(9))中指梁抗弯刚度 k_{ei} 的大小取决于指梁的结构参数。其中,厚度增加会使指梁截面宽增加;周向角增加会使指梁增宽,指梁截面高度增加;指梁间隙增加会减小指梁宽度,使指梁截面高度减小;指梁顶圆增加会使指梁跨度 L_{sp} 增加,而基圆和型线圆的增加会使指梁跨度 L_{sp} 减小。指梁截面宽和高增加,会使指梁抗弯刚度增加;而指梁跨度增加会减小指梁抗弯刚度。

2.2.3 计算数学模型的试验验证

由于指尖片的体积磨损量很小,采用称重法和内径测量法进行测量都会产生较大的误差,并且每次测量都需要拆卸指尖密封,每次拆装又会引起很大误差。为了验证本文计算模型,采用指尖密封磨损过程中泄漏量的变化来试验验证。本文的试验数据采用文献[17]中过盈量为 0.068mm 的指尖密封试验数据进行验证。

图3是指尖密封泄漏量随转速升降循环变化的数值计算结果与试验结果对比。图中结果显示,在不考虑磨损时数值计算结果与试验结果差距较大;考虑磨损时数值计算结果能够很好地与试验结果吻合,其误差均小于 5%。从而证明了本文磨损计算的合理性。

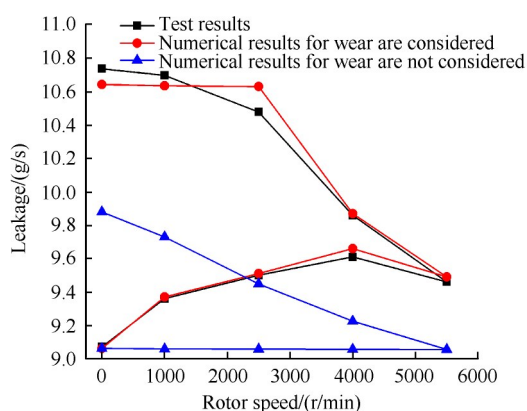


Fig. 3 Numerical calculation and experiment leakage of finger seal

3 计算结果与分析

3.1 单一结构参数对磨损量和磨损率随时间变化影响

本文在初始安装过盈量为 0.1mm, 转子转速为 1×10^4 r/min 的条件下, 分析了各单一结构参数对磨损量和磨损率随时间变化的影响。

图 4 为单一结构参数对指尖密封磨损量随时间变化影响图。图 4 结果显示, 指尖片体积磨损量总量随时间呈指数增加趋势, 在初始阶段磨损总量剧烈增加, 随着磨损时间的增加其增速逐渐减慢, 最终趋于一定值。最终体积磨损总量随指梁厚度、周向角的增加而增加, 随指梁间隙增加而减小。指梁顶圆、指梁型线圆、指梁基圆、指梁根圆等结构参数对最终体积磨损总量没有影响, 但会影响磨损总量增加的快慢。分析产生以上现象的主要原因是: 由于指尖密封存在一定的过盈量, 指尖靴与转子之间会因指梁变形而产生一定的接触压力, 从而使指尖靴在转子旋转后产生磨损。在初始阶段, 过盈量较大, 指梁变形大, 指尖靴与转子接触压力也较大, 从而使指尖靴磨损较快, 磨损总量也增加较快; 随着磨损的进行, 指尖密封的过盈量减小, 指尖靴与转子之间接触压力减小, 指尖靴的磨损速度减慢, 磨损总量增加速度减慢; 最终随着磨损进行, 指尖密封的过盈量趋于零, 指尖靴与转子之间接触压力也趋于零, 指尖靴的磨损速度也随之减小趋于零, 指尖靴的最终磨损总量不再增加, 趋于一定值。指尖靴的最终磨损总量仅与指尖靴与转子接触面积和初始过盈量有关, 因此在其他结构参数不变情况下, 指梁厚度和周向角的增加, 会使指尖靴与转子接触面积增加, 从而导致指尖靴最终磨损总量随之增加; 而指梁顶圆、指梁根

圆、指梁型线圆、指梁基圆等结构参数的增加, 不能改变指尖靴与转子之间的接触面积, 因此不会不影响其最终磨损总量, 但会影响指尖靴与转子之间的接触压力, 从而影响磨损总量的增加速度。

图 5 为单一结构参数对指尖密封磨损率随时间变化影响图。图 5 结果显示: (1) 指尖靴磨损率随磨损时间增加而呈指数趋势减小; (2) 初始阶段磨损率很大, 随着磨损的进行逐渐减小最后趋于零; (3) 初始磨损率随指梁厚度、周向角、指梁顶圆、指梁基圆的增加而增大, 随指梁间隙、指梁根圆、指梁型线圆的增加而减小。指尖密封在初始阶段过盈量大, 其磨损速度快, 因此磨损率也大; 随着磨损的进行, 指尖密封的过盈量逐渐减小且减小趋势呈指数形式, 其磨损速度也呈指数趋势下降, 所以磨损率呈指数趋势下降; 最终指尖密封过盈量趋于零, 其磨损速度也趋于零, 即磨损率趋于零。其他参数不变情况下, 指梁厚度增加, 指梁的截面宽度会增加, 从而指梁截面对弯曲中性轴的惯性矩 I_z 增加, 其抗弯刚度增加, 导致指尖靴与转子接触压力增加, 因此其磨损速度会随之增加即磨损率增大; 周向角增大会使指梁截面高度增加, 指梁截面对弯曲中性轴的惯性矩 I_z 会随之增加, 增强指梁的抗弯刚度, 使磨损率增大; 反之, 指梁间隙增加会使指梁截面高度减小, 使 I_z 减小, 使指梁抗弯刚度减小磨损率降低。其他结构参数不变的情况下, 指梁顶圆、指梁基圆越大, 指梁跨度越小, 指梁抗弯刚度也越大, 所以磨损率也就越大。而指梁根圆、指梁型线圆的增加会使指梁跨度增加, 使磨损率减小。

3.2 指尖片结构参数对磨损特性影响的灵敏度分析

为了更好地分析指尖密封结构参数对指尖密封磨损性能的影响, 文中引入磨损总量、磨损率系数、磨损时间系数三个量来描述和反映磨损性能。其中, 磨损总量反映了指尖密封的磨损程度的大小; 磨损率系数反映了初始阶段磨损率的大小即初始阶段磨损快慢; 磨损时间系数反映了磨损率和磨损量变化的快慢, 磨损时间系数越大, 指尖密封磨损量和磨损率随时间变化越快。文中引入了无量纲参数变化系数 C , 表达式为

$$C = \frac{p_{\text{var}} - p_{\text{var}, \min}}{p_{\text{var}, \max} - p_{\text{var}, \min}} \quad (13)$$

式中 p_{var} 表示变量取值, $p_{\text{var}, \min}$ 表示变量取值的下限, $p_{\text{var}, \max}$ 表示变量取值的上限。 C 的取值范围是 0~1。

图 6(a) 是磨损总量系数随指尖片结构参数的变化。图中显示: 最终体积磨损总量系数随指梁厚度、

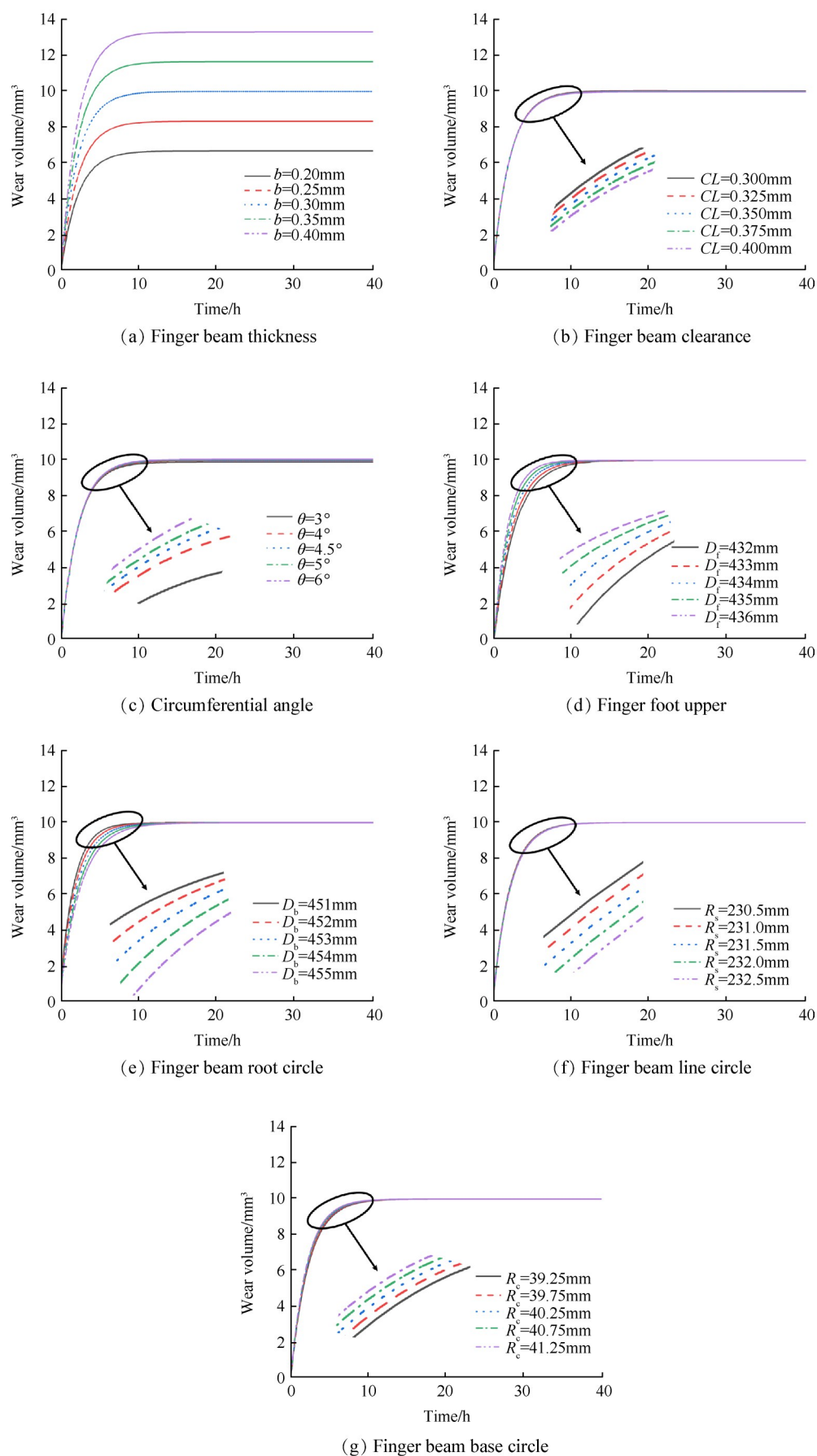


Fig. 4 Variation of finger seal wear over time with different structural parameters

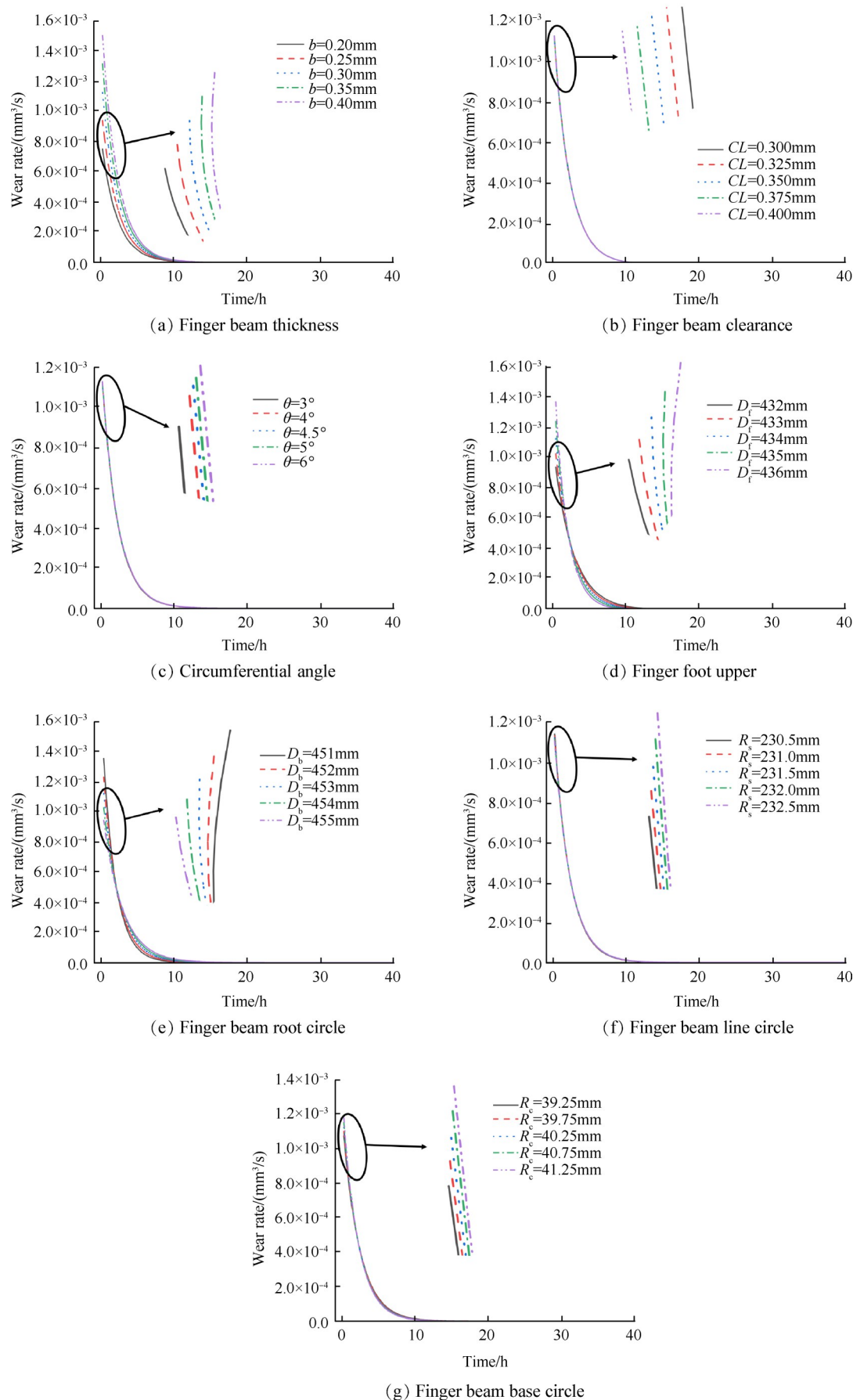


Fig. 5 Change of finger seal wear rate with time under different structural parameters

周向角等的增加而增大,随指梁间隙的增加而减小,指梁顶圆、指梁根圆、指梁型线圆和指梁基圆等对其没有影响,因此在图 6(a)中这几条线呈现为重合的水平线;各参数对最终体积磨损总量的影响的灵敏度由大到小依次是指梁厚度、周向角、指梁间隙。表 2 是单位参数变化量下指尖密封磨损参数变化量。表中体积磨损总量数据结果与图 6(a)结果一致。图 6(b)是指尖密封磨损率系数随指尖片结构参数的变化,图中结果显示:磨损率系数随指梁厚度、指梁顶圆、指梁基圆、周向角等结构参数的增加而增大,随指梁根圆、指梁型线圆、指梁间隙等结构参数的增加而减小。根据 6(b)和表 2 中磨损率系数数据结果分

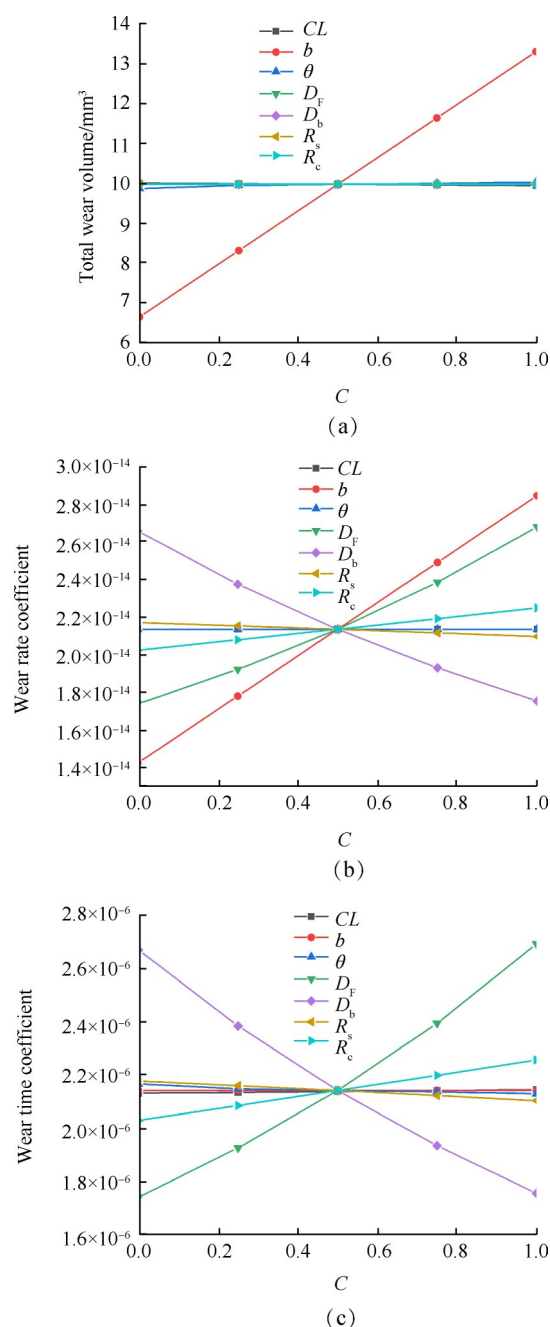


Fig. 6 Wear parameters varies with C

析可得:指尖片结构参数对磨损率系数影响的灵敏度从大到小依次是指梁根圆、指梁厚度、周向角、指梁基圆、指梁顶圆、指梁型线圆、指梁间隙。分析原因是:磨损率系数反映了指尖密封在初始阶段的磨损快慢,磨损率系数越大初始阶段磨损越快。前文中分析可知指梁厚度、指梁顶圆、指梁基圆、周向角的增大,都会使指梁的抗弯刚度增加,而初始阶段的指尖密封的过盈量相同,因此在初始阶段指尖密封磨损更快,磨损率更大。而指梁根圆、指梁型线圆、指梁间隙的增大,使得指梁抗弯刚度减小,从而使初始阶段磨损率减小。图 6(c)是指尖密封磨损时间系数随指尖片结构参数的变化,图中显示:指尖密封的磨损时间系数随指梁间隙、指梁基圆、指梁顶圆等结构参数的增加而增大,随指梁根圆、指梁型线圆、周向角等结构参数的增加而减小,指梁厚度对其没有影响。根据图 8 和表 2 中磨损时间系数数据结果分析可得:指尖片结构参数对磨损时间系数影响的灵敏度从大到小依次是指梁顶圆、指梁根圆、指梁间隙、指梁基圆、指梁型线圆、周向角。分析原因:磨损时间系数反映了磨损量和磨损率随时间变化的快慢。由于磨损时间不仅与指梁抗弯刚度有关,还受指尖靴与转子间接触面的影响。指梁基圆、指梁顶圆增大会增加指梁抗弯刚度,不改变指尖靴与转子的接触面积,因此会使磨损时间系数增大;而指梁间隙增大,虽然会使指梁抗弯刚度减小,但也会减小指尖靴与转子间的接触面积,其中接触面积的减小对磨损影响更大,因此磨损时间系数会增加。指梁根圆、指梁型线圆增加会降低指梁的抗弯刚度,但不改变接触面积,因此磨损时间系数会减小;但周向角的增加在降低指梁抗弯刚度的同时也减小了接触面积,且接触面积的减小影响更大,因此磨损时间系数会减小。指梁厚度增加,指梁抗弯刚度和接触面积都会增加,且两者对磨损时间系数的影响程度相同,相抵消,因此指梁厚度对磨损时间系数没有影响。

Table 2 Wear parameters change under unit parameter change

Parameter	C_{Vol}/mm	C_{Ψ}	C_t
b	33200	4.26×10^{-9}	0
θ	3.34	3.9×10^{-13}	6.76×10^{-7}
CL	0.597	2.23×10^{-13}	7.68×10^{-6}
D_t	0	1.41×10^{-10}	1.42×10^{-5}
D_b	0	1.36×10^{-10}	1.4×10^{-5}
R_s	0	2.2×10^{-11}	2.21×10^{-6}
R_c	0	6.74×10^{-11}	6.76×10^{-6}

4 结 论

通过本文研究,得到的主要结论如下:

(1)采用本文磨损计算结果,进行考虑磨损泄漏特性数值计算与文献中试验结果对比,其误差均低于5%,证明了本文磨损计算的合理性。

(2)指尖片的体积损总量和磨损率随时间呈指数趋势变化。初始阶段,磨损总量的增速和磨损率都较大;随着磨损的进行,磨损总量增速和磨损率均逐渐减小;磨损总量最终趋于定值,而磨损率最终趋于零。

(3)指尖密封的体积磨损量和磨损率随磨损时间呈指数趋势变化。初始阶段磨损率随指梁厚度、指梁顶圆、指梁基圆、周向角等参数的增加而增大,随指梁根圆、指梁型线圆、指梁间隙等参数的增加而减小。

(4)各结构参数对磨损率系数影响程度从大到小依次是指梁根圆、指梁厚度、周向角、指梁基圆、指梁顶圆、指梁型线圆、指梁间隙;对磨损时间系数影响程度从大到小依次是指梁顶圆、指梁根圆、指梁间隙、指梁基圆、指梁型线圆、周向角。

致 谢:感谢国家自然科学基金青年基金的资助;感谢陕西省科技成果转移与推广计划、陕西省教育厅服务地方专项计划的资助。

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]. NASA/TM-1999-209191.
- [2] 黄志坚. 密封原理、应用与维护 [J]. 热能动力工程, 2013, 28(5).
- [3] 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). (ZHANG Yan-chao, LIU Kai, HU Hai-tao, et al. Quasi-Dynamic Performences Analysis of Finger Seal Based on Finite Element Simulation [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(12).)
- [4] Braun M J, Pier H M, Deng D. Thermo-Fluids Considerations and the Dynamic Behavior of a Finger Seal Assembly [J]. *Tribology Transactions*, 2005, 48: 531-547.
- [5] 白花蕾. 指尖密封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, 2008.
- [6] 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.
- [7] 周 坤, 力 宁, 郭 徽, 等. 低滞后刷式密封泄漏特性试验研究 [J]. 润滑与密封, 2017, 42(4).
- [8] Wang L N, Chen G D, SU H, et al. Effort 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.
- [9] Zhao H L, Chen G D, Wang L N, et al. Dynamic Performance of a C/C Composite Seal in a Tilting Model [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(4).
- [10] 郎达学, 苏 华, LANG D X, 等. 表面织物靴底流体动压指尖密封的性能分析 [J]. 航空学报, 2012, 33(8): 1540-1546.
- [11] 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). (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).)
- [12] 胡廷勋, 周 坤, 力 宁, 等. 指尖密封泄漏特性数值计算与试验研究 [J]. 推进技术, 2020, 41(5): 1089-1096. (HU Ting-xun, ZHOU Kun, LI Ning, et al. Numerical Calculation and Experimental Study on Leakage Characteristic of Finger Seal [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(5): 1089-1096.)
- [13] 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.
- [14] 张延超, 陈国定, 杨美玲, 等. 指尖密封结构参数与泄漏量和磨损性能的灰关联分析 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(18): 2147-2151.
- [15] 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.
- [16] 张延超, 焦丹丹, 吴鲁纪, 等. 考虑热效应影响的指尖密封接触强度分析 [J]. 机械强度, 2019, 41(2).
- [17] 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.

(编辑:张 贺)