

基于 Archard 模型的刷式密封单边磨损特性

董书娜¹, 杜春华¹, 崔亚辉¹, 张延超¹, 吉洪湖²

- (1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为揭示刷式密封磨损规律,针对其结构特点构建了刷丝磨损量关于时间的一阶线性非齐次微分方程,求解得到刷丝磨损量、磨损率计算的数学模型。在此基础上数值研究了结构和工况参数对磨损量和磨损率的影响规律,并分析了结构参数对刷式密封磨损特性影响的灵敏度。结果显示:采用文中磨损计算结果进行的刷式密封考虑磨损效应的泄漏量计算结果与试验最大误差是 7.78%,证明了计算模型的合理性。最终磨损量随刷丝直径、角度的增加而增大,刷丝高度、刷环内径对其没有影响。磨损率系数随刷丝直径、刷环内径的增加而增大,随刷丝高度、刷丝角度的增加而减小。结构参数对磨损总量影响的灵敏度由大到小依次为刷丝直径、刷丝角度、刷丝高度和刷环内径。

关 键 词: 刷式密封; 磨损特性; 单边磨损; 黏着磨损; Archard 模型

中图分类号: V231; TB42 **文献标志码:** A

Unilateral wear characteristics of brush seal based on Archard model

DONG Shuna¹, DU Chunhua¹, CUI Yahui¹,
ZHANG Yanchao¹, JI Honghu²

- (1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The first order linear non-homogeneous differential equation of brush wire wear with respect to time was constructed to explain the wear law of brush seals, and the mathematical model for calculating brush wire wear and wear rate was obtained. The effects of structure and operating condition parameters on wear and wear rate were numerically simulated, and the sensitivity of structure parameters to the influence of brush seal wear characteristics was also analyzed. The results showed that the maximum error between the experimental results and the calculation results of the brush seal considering wear effect leakage amount was 7.78% by the wear calculation result, proving the rationality of the calculation

收稿日期:2020-01-03

基金项目: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项目(19JC030); 国家自然科学基金青年基金(51305343)

作者简介:董书娜(1992—),女,硕士生,主要从事密封技术研究。

引用格式:董书娜,杜春华,崔亚辉,等. 基于 Archard 模型的刷式密封单边磨损特性[J]. 航空动力学报,2020,35(7):1437-1446.
DONG Shuna, DU Chunhua, CUI Yahui, et al. Unilateral wear characteristics of brush seal based on Archard model[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7): 1437-1446.

model. The final wear increased with the increase of brush wire diameter and angle, and the brush wire height and brush ring diameter had no effect on it. The initial wear rate increased with the increase of brush wire diameter and brush ring diameter, and decreased with the increase of brush wire height and brush wire angle. The sensitivity of the structure parameters to the total amount of wear was subject to brush wire diameter, brush wire angle, brush wire height and brush ring diameter.

Key words: brush seal; wear characteristics; unilateral wear; adhesive wear; Archard model

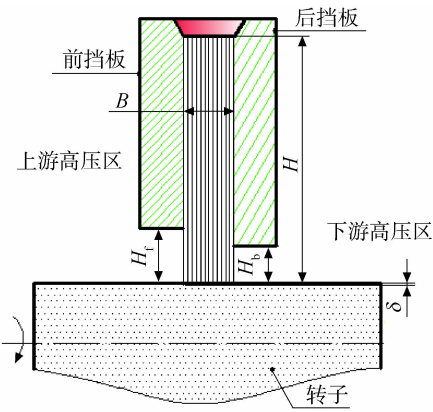
刷式密封作为一种新型的接触式动密封是确保透平机械稳定、高效运转的重要组成部分^[1-4]。由于刷丝束和转子表面的直接接触,转子高速运转时,刷丝束在接触力作用下不可避免地会发生磨损,从而直接影响刷式密封的密封性能。因此,对刷式密封开展单边磨损特性的研究具有理论和现实意义。

目前刷式密封的研究主要分为如下几方面,如泄漏特性研究、传热特性研究、迟滞特性研究以及磨损特性研究等。泄漏特性作为衡量透平机械工作效率的主要方面,常用的研究方法为数值模拟和试验研究。数值研究方面,如张元桥、柴保桐、马登骞等^[5-8]建立多孔介质模型对刷式密封的泄漏特性进行研究。孙丹等^[9]建立了流固耦合理论模型,研究刷式密封的结构参数及工况条件对泄漏性的影响。试验研究方面,如杜春华等^[10]搭建试验台,测量了三种配合状态下刷式密封的泄漏量。相比刷式密封的泄漏特性,有关刷式密封磨损特性的研究较少。试验研究方面,如胡广阳等^[11]对刷丝和转子展开了 30 h 的磨损试验,得到刷丝和转子的磨损主要发生在磨损初期。杜春华等^[12]通过旋转试验台,测量了不同工况下三种配合试验件的泄漏量和磨损量,分析了磨损特性对刷式密封泄漏的影响。数值研究方面主要是基于刷丝和转子间相互接触的作用力的研究^[13-15],基于 Archard 模型^[16]对刷丝的单边磨损进行研究。如桂长林^[17]阐述了磨损设计计算的重要性,提出了磨损设计计算的定义,全面、系统地介绍了 Archard 磨损设计计算模型及其应用方法。孙晓萍^[18]在模拟发动机工作条件下,对刷丝和涂层的磨损进行 340 h 研究,结果表明 0~10 h 内刷丝和涂层磨损严重,50 h 后,磨损性能逐渐稳定。袁伟^[19]从 Archard 模型中推导了计算刷式密封磨损寿命理论公式,分析了影响刷式密封寿命的因素。

目前有关刷式密封磨损的研究已经取得部分进展,在理论研究方面,已有学者采用 Archard 模型对刷式密封磨损进行数值研究,但尚未建立精确预测刷式密封磨损的数学模型。本文根据刷式密封的结构特点,建立刷丝与转子跑道间磨损量(文中的磨损量均指体积磨损量)计算的一阶线性非齐次微分方程,求解得到刷式密封磨损量计算的数学模型。在此数学模型的基础上,理论分析了刷式密封结构参数和工况参数对刷式密封单边磨损特性的影响并且对刷式密封的结构参数进行灵敏度分析,这对刷式密封结构参数的优化设计具有实际意义。

1 刷式密封结构

刷式密封结构由前挡板、刷丝束和后挡板通过焊接而成,其中前挡板位于流体高压侧,后挡板位于流体低压侧,刷束通常由沿周向且与转子成一定角度排列的刷丝构成,利用随机排列的刷丝将上下游流体隔开,上游气流通过刷丝束流向下游时,刷丝对气流流动产生一定的阻碍作用,从而达到密封效果。其结构如图 1 所示,各结构参数的具体取值如表 1 所示。本文采用的刷丝为金属刷丝,材料为镍基高温合金 GH4169。



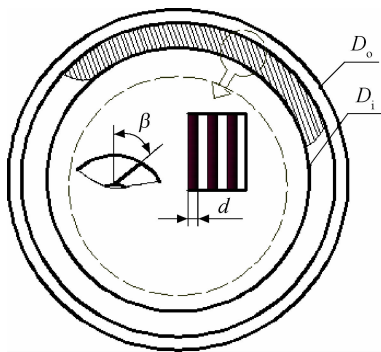


图 1 刷式密封结构
Fig.1 Structure of brush seal

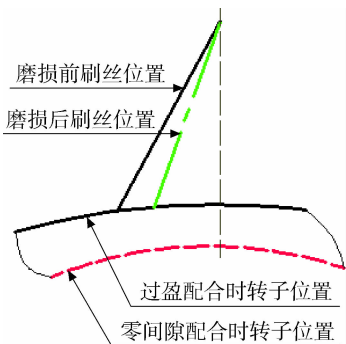


图 2 刷丝磨损过程分析
Fig.2 Analysis of brush wire wear process

表 1 刷式密封结构参数

Table 1 Structure parameters of brush seal

参数	数值
刷环外径 D_o /mm	170
刷环内径 D_i /mm	150
刷丝直径 d /mm	0.076
刷丝高度 H /mm	10
前挡板保护高度 H_f /mm	1
后挡板保护高度 H_b /mm	0.8
刷丝排列角 β ($^{\circ}$)	45 $^{\circ}$
初始过盈量 δ /mm	0.053
刷束厚度 B /mm	2.8
刷丝抗弯刚度 k_{ai} /(N/m)	2.024
刷丝与转子接触面积 $S_w/10^{-9} \text{ m}^2$	6.4
相对滑动速度 v /(m/s)	117.89

力逐渐减小并最终趋零。从而,可知刷丝与转子之间的磨损逐渐减缓,最终趋于零。

刷式密封主要用于高压气体的密封,在上游高压气体的作用下,磨损产生的磨屑会被吹离磨损面,在进行磨损计算分析时不考虑磨料磨损。另外由于刷式密封用于气体密封,气体腐蚀磨损在磨损中占比很小,在磨损计算分析时也不考虑腐蚀磨损。因此,在刷式密封磨损计算时只考虑刷丝与转子间的黏着磨损。

刷式密封是接触式密封,其磨损发生在刷丝和转子表面。转子材料为不锈钢,但转子表面镀有耐磨涂层,其硬度高,具有较好的耐磨性。而刷丝材料为高温合金钢,其耐磨性相对于转子耐磨涂层较差,刷丝和转子磨损过程中其磨损程度远大于耐磨涂层。因此,在刷式密封磨损计算中仅考虑耐磨性较差的刷丝的磨损,忽略转子涂层的磨损,这种仅考虑刷丝一侧磨损类型称为刷式密封单边磨损。

在高压气体作用下,刷束中的刷丝之间、刷丝与后挡板之间存在摩擦力,这些摩擦力对刷丝与转子间磨损的影响较为复杂,本文磨损计算模型中暂不考虑,因此在磨损计算过程中暂不考虑刷丝间、刷丝与后挡板间的摩擦力作用。刷丝与转子摩擦会产生热量,从而会使接触表面的温度发生变化,接触表面温度的变化会引起磨损系数和磨损率的变化;另外,摩擦热还会引起刷束区域的温度场分布,改变刷丝弹性模量,从而影响刷丝刚度对磨损产生影响。摩擦热对磨损影响比较复杂,又因高压气流会从刷束带走大部分的摩擦热,因此在刷式密封磨损计算中不考虑摩擦热引起的磨损变化。

综上所述,在刷式密封磨损计算时进行了如下基本假设:

1) 假设刷丝与转子之间的磨损类型为黏着

2 刷式密封单边磨损计算模型

2.1 磨损分析及基本假设

刷式密封是接触式密封,刷束与转子过盈装配时,其位置如图 2 中磨损前刷丝位置所示。此时,刷丝由于过盈量的存在而发生径向变形,刷丝与转子之间存在一定的接触压力,转子高速旋转,刷丝与转子之间产生相对滑动,刷丝与转子间产生摩擦磨损。当磨损发生时,刷丝变短,刷丝的径向变形减小,其位置如图 2 中磨损后刷丝位置所示。此时,刷丝与转子之间的正压力也随之减小,从而使刷丝和转子间的磨损率减小;随着刷丝与转子间磨损的进行,刷丝与转子之间的过盈量逐渐减小最终趋于零,刷丝的径向变形量随之逐渐减小并趋于零,从而使得刷丝与转子间的接触压

磨损,其他类型的磨损不考虑;

2) 假设磨损仅发生在刷丝上,转子涂层不磨损;

3) 不考虑刷丝之间、刷丝与后挡板之间的摩擦力作用;

4) 不考虑温度变化对磨损系数和材料硬度的影响。

2.2 刷丝磨损计算模型

Archard 模型是 1953 年 Archard 在 Holm 模型基础上建立起来的,其表达式如下:

$$\Delta V = K \frac{FL}{H_{\text{material}}} \tag{1}$$

式中 ΔV 表示微凸体磨损量; F 表示作用在微凸体上的正压力; H_{material} 表示两接触体中较软材料的硬度; L 表示微凸体的滑动距离; K 表示黏着磨损系数。

依据刷式密封的结构和刷丝与转子磨损过程的分析可知,刷式密封磨损量的计算可以使用 Archard 模型进行计算。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刷丝上。因此,刷式密封的磨损量 V_{olw} 仅为刷丝的磨损量。

刷丝与转子之间相对滑动距离为 ΔL_s ,将其代入式(1)可得相对滑动距离 ΔL_s 内刷丝磨损量 ΔV_{olw} 为

$$\Delta V_{\text{olw}} = K_w \frac{F_n \Delta L_s}{H_{\text{material}}} \tag{2}$$

式中 K_w 表示摩擦副材料的磨损系数,取值为 10^{-5} ; F_n 表示刷丝与转子表面之间的接触正压力; H_{material} 表示摩擦副较软材料的硬度,取值为 330 MPa。

刷丝与转子之间的接触正压力与过盈量呈正比,其表达式为

$$F_n = C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} \delta(t) \tag{3}$$

式中 C_{ei} 表示考虑刷丝之间、刷丝与后挡板之间的摩擦力作用时抗弯刚度修正系数,本文暂不考虑刷丝之间、刷丝与后挡板之间的摩擦力,即 $C_{\text{ei}} = 1$; k_{ei} 为刷丝的抗弯刚度; $\delta(t)$ 为刷丝与转子间的过盈量,是随磨损时间变化的量。

假设转子旋转是匀速的,因此刷丝与转子之间的相对滑动距离可以用速度乘以时间来表示,即 $\Delta L_s = v \Delta t$,其中 v 为刷丝与转子的相对滑动线速度, Δt 为相对滑动的时间。

假设接触表面温度对磨损系数和刷丝材料的硬度没有影响,因此磨损系数、材料硬度是常数,

不随温度变化而变化。由于时间 Δt 很小,在时间 Δt 内封严的过盈量变化很小,因此可以假设在时间 t 到 $t + \Delta t$ 之内的过盈量不变,其值为 $\delta(t)$ 。将式 $\Delta L_s = v \Delta t$ 代入式(2),可得到 Δt 时间段内刷丝平均磨损量为

$$\frac{\Delta V_{\text{olw}}}{\Delta t} = K_w \frac{C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} \delta(t) v}{H_{\text{material}}} \tag{4}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,式(4)变为微分形式:

$$\frac{dV_{\text{olw}}}{dt} = \frac{K_w C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} v}{H_{\text{material}}} \delta(t) \tag{5}$$

根据几何关系可以确定,在 Δt 时间段内刷丝磨损量等于过盈量的变化量与接触面积的乘积,表达式为

$$\Delta V_{\text{olw}} = -[\delta(t + \Delta t) - \delta(t)] S_w \tag{6}$$

其中 $\delta(t + \Delta t)$ 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 时间段内的过盈量的增量; S_w 为刷丝与转子接触面积,忽略其随磨损而产生的变化。式(6)可整理为

$$\frac{\Delta V_{\text{olw}}}{[\delta(t + \Delta t) - \delta(t)]} = \frac{\Delta V_{\text{olw}}}{\Delta \delta} = -S_w \tag{7}$$

当 $\Delta \delta \rightarrow 0$ 时,式(7)可变为微分形式

$$\frac{dV_{\text{olw}}}{d\delta} = -S_w \tag{8}$$

对式(8)进行积分,整理可得

$$\delta(t) = \delta(0) - \frac{1}{S_w} V_{\text{olw}} \tag{9}$$

式中 $\delta(0) = \delta_0$,将式(9)代入式(5),整理可得

$$\frac{dV_{\text{olw}}}{dt} + \frac{K_w C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} v}{H_{\text{material}} S_w} V_{\text{olw}} = \frac{K_w C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} v}{H_{\text{material}}} \delta_0 \tag{10}$$

式(10)为刷丝磨损量 V_{olw} 关于时间 t 的一阶非齐次常微分方程。

初始条件为 $t = 0$ 时, $V_{\text{olw}} = 0 \text{ m}^3$ 。在该初始条件下方程(10)的解为

$$V_{\text{olw}} = \delta_0 S_w \left[1 - \exp\left(-\frac{K_w C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} v}{H_{\text{material}} S_w} t\right) \right] \tag{11}$$

式(11)为刷式密封刷丝磨损量计算的数学模型。为了更直观地反映刷丝磨损的快慢,本文通过对式(11)求导得到刷丝磨损率,即单位时间内的磨损量:

$$\frac{dV_{\text{olw}}}{dt} = \frac{K_w C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} v \delta_0}{H_{\text{material}}} \exp\left(-\frac{K_w C_{\text{ei}} k_{\text{ei}} v}{H_{\text{material}} S_w} t\right) \tag{12}$$

磨损率是时间的函数,刷式密封耐磨性越好,其磨损量随时间变化越慢;反之,耐磨性越差,其磨损量随时间变化越快。因此,本文提出刷丝磨损量随时间变化快慢来表征刷式密封磨损性能的

好坏。根据刷式密封磨损量和磨损率数学计算模型特点,本文提出采用磨损量系数、磨损时间系数、磨损率系数三个参数来描述刷式密封的磨损随时间变化快慢,其表达式分别为 $C_{vol} = \delta_0 S_w, C_t = K_w C_{ei} k_{ei} v / (H_{material} S_w), C_\phi = K_w C_{ei} k_{ei} v \delta_0 / H_{material}$ 。其中磨损量系数反映了刷丝的最终磨损量;磨损时间系数反映了刷丝磨损量和磨损率变化快慢;磨损率系数反映了刷丝在开始磨损时刷丝磨损的快慢。

2.3 接触面积、刷丝刚度和速度确定方法

刷丝具有一定抗弯刚度,使得刷丝在与转子接触产生变形时能够恢复,将刷丝简化成悬臂梁的形式,则刷丝的抗弯刚度表达式为

$$k_{ei} = \frac{3EI_z}{H_s^3} \tag{13}$$

式中 H_s 为刷丝跨度; E 为弹性模量; I_z 为结构截面对弯曲中性轴的惯性矩。于是可得刷丝的抗弯刚度计算表达式为

$$k_{ei} = \frac{Ed^4}{6790H_s^3 \sin^2 \beta} \tag{14}$$

刷丝与转子的接触面积 S_w 由于受刷丝排列角度的影响,计算表达式如下:

$$S_w = \frac{\pi d^2}{4 \cos \beta} \tag{15}$$

刷丝与转子接触面的相对滑动线速度 v , 表达式如下:

$$v = \frac{2\pi N}{120} \cdot D \tag{16}$$

式中 D 为转子直径,其中 $D = D_i + 2\delta_0$, D_i 为刷环内径, δ_0 为初始过盈量; N 为转子转速。

2.4 计算数学模型的试验验证

由于刷丝的磨损量很小,采用称质量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刷式密封,每次拆装又会引起很大误差。为了验证本文计算模型,采用刷式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[10]中过盈量为 0.053 mm 的刷式密封试验数据进行验证。

图 3 是刷式密封泄漏量随转子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之间误差很大,最大误差达到 28.64%;考虑磨损时数值计算结果能够很好地与试验结果吻合,其最大误差为 7.78%。从而证明了本文磨损计算的合理性。

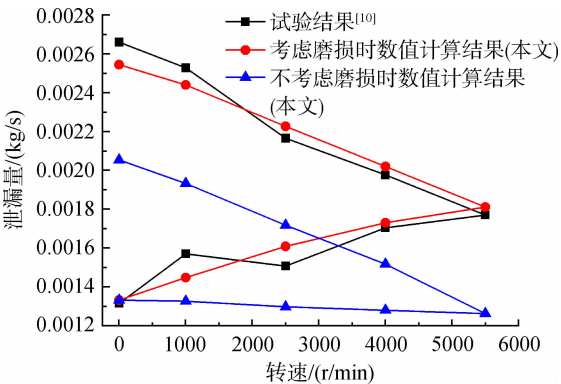


图 3 刷式密封泄漏量的数值计算与试验结果
Fig. 3 Numerical calculation and experiment leakage of brush seal

3 计算结果与讨论

3.1 刷式密封单边磨损特性

在研究刷式密封磨损特性时,仅对刷丝磨损特性进行分析,具有高温耐磨涂层的刷环磨损极小,文中不考虑其对刷式密封磨损特性影响。

图 4 是刷式密封磨损量和磨损率随时间变化趋势图。图中显示:刷式密封的磨损量随着时间的增加呈指数曲线增加,磨损初期,刷式密封的磨损量增大较快,随着磨损时间的增加磨损量逐渐变化缓慢,最后趋于平稳状态;刷式密封的磨损率随着时间的增加呈指数减小,磨损初期,刷式密封的磨损率减小速度较快,随着磨损时间的增加磨损率减小速度缓慢,最后趋于平稳状态。这是因为磨损初期刷式密封的过盈量较大,刷丝变形大,刷丝与转子之间的接触压力大,因此刷式密封剧烈磨损,其磨损量增大;随着磨损时间的增加,刷式密封的过盈量减小,刷丝变形减小,刷丝与转子间的接触压力也逐渐降低并最终趋于零,进而磨损量

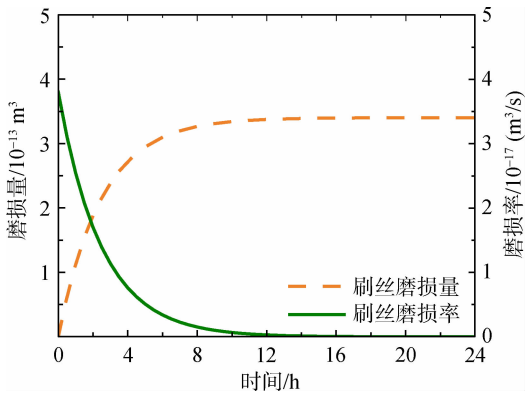


图 4 刷式密封单边磨损特性
Fig. 4 Unilateral wear characteristics of brush seal

的增量也逐渐降低为零。因此,刷式密封的磨损量最终趋于某一稳定状态。

3.2 结构参数对刷式密封单边磨损特性的影响

3.2.1 结构参数对磨损量随时间变化影响

图 5 为结构参数对刷式密封磨损量随时间变化的影响规律。结果显示:不同结构参数的刷式密封的磨损量随时间的变化规律与文中第 3.1 节相同,不再赘述;最终磨损总量随刷丝直径、刷丝排列角度的增加而增加;刷丝高度、刷环内径对最终磨损总量没有影响。另外,图中显示刷环内径对磨损量变化影响很小,但也会产生一定影响,是影响其磨损特性的重要结构参数,且刷环内径对磨损特性影响的讨论可以为刷式密封结构优化过程中刷环内径的选择提供理论依据,因此本文依然将刷环内径作为影响刷式密封磨损的结构参数来分析。

分析以上现象产生的主要原因如下:结构参数主要是通过刷丝的抗弯刚度来对刷式密封磨损产生影响。刷丝抗弯刚度的大小取决于几何尺寸和材料,在刷丝材料确定后,其抗弯刚度是由刷丝的几何尺寸决定的。因此,图 5(a)中刷丝直径越大,刷丝的抗弯刚度越大,刷丝与转子的接触压力越大,另外刷丝与转子的接触面积也越大,进而刷丝的磨损量越大。由于刷丝过盈量随时间逐渐减小,刷丝变形减小,刷丝与转子的接触压力随之降低直至为零,此时刷丝的磨损量曲线不再随时间的变化而趋于某一定值。图 5(b)中初始阶段磨损量随刷丝高度的增大而减小。由于刷丝排列角度增加,刷丝的抗弯刚度减小,刷丝与转子的接触压力降低,刷丝磨损量增加较慢,因此在初始阶段,即在一定的过盈量变化范围内,刷丝的磨损量随刷丝排列角增加而减小。随着磨损的进行,刷丝排列角越大,其磨损量增加速度衰减越小,达到一定磨损时间后,其磨损量增加速度会随着排列角增加而增大。因此出现图 5(c)中磨损量初始阶段随刷丝排列角增大而减小,最终随刷丝排列角增大而增大的现象。刷丝高度、刷环内径与接触面积及过盈量没有直接关系,不会改变刷式密封的最终磨损总量,但刷环内径与刷丝与转子接触面的线速度有关,刷环内径越大,刷丝与转子的线速度越快,刷丝的磨损加剧,从而影响刷式密封磨损总量的增加速度。

综上所述,在满足工况条件和密封性能的前提下,选择小直径刷丝及较小初始过盈量是降低

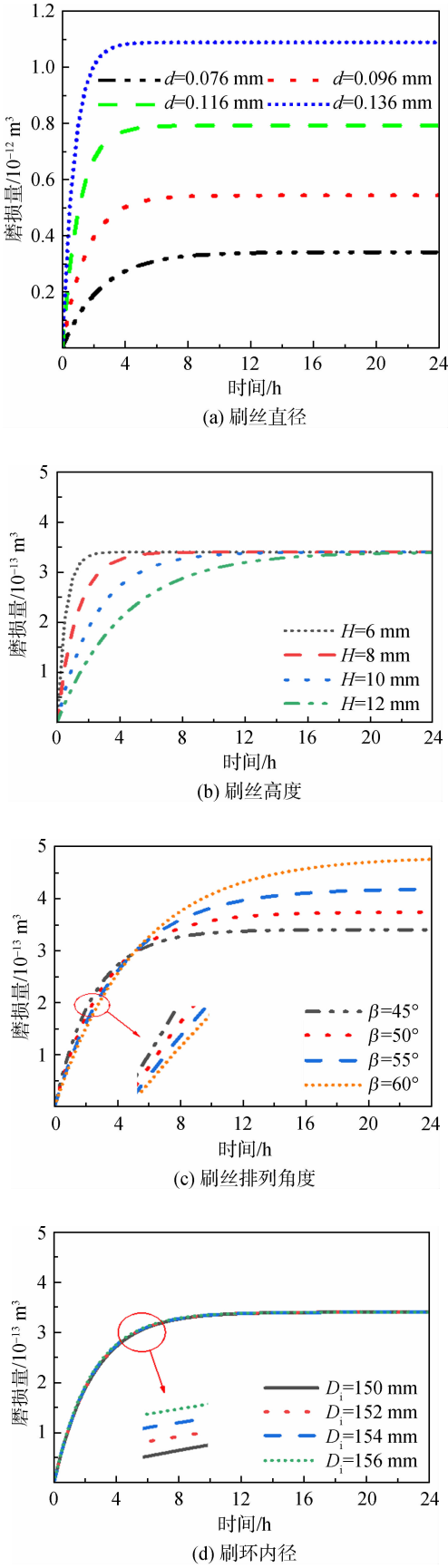


图 5 结构参数对磨损量随时间变化影响

Fig. 5 Change of brush seal wear with time under structural parameters

刷丝磨损、提高使用寿命的有效途径。

3.2.2 结构参数对磨损率随时间变化影响

图 6 为刷式密封结构参数对磨损率随磨损时间变化的影响规律。图中结果显示:不同结构参数的刷式密封的磨损率随时间的变化规律都与文中第 3.1 节相同,不再赘述;刷式密封的磨损率系数随刷丝直径、刷环内径的增加而增大,随刷丝高度、刷丝排列角度的增加而减小。

分析以上现象产生的主要原因如下:刷式密封的结构参数主要是通过刷丝的抗弯刚度来对磨损产生影响。刷丝抗弯刚度的大小取决于零件的几何形状和材料种类(即材料的弹性模量)即在刷丝的弹性模量确定后可知:刷丝直径越大,刷丝的抗弯刚度越大,刷丝与转子的接触压力越大,进而刷丝与转子的磨损率越大;磨损初期,刷丝排列角

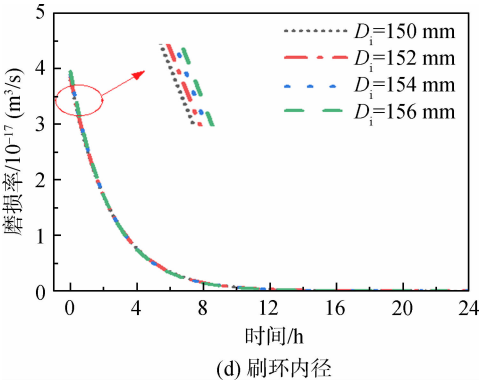


图 6 结构参数对磨损率随时间变化影响
Fig. 6 Change of brush seal wear rate with time under structural parameters

越大,刷丝的抗弯刚度越小,进而刷式密封的磨损率系数越小;刷环内径越大,刷丝与转子相对滑动的线速度越大,其刷式密封的磨损率系数越大;随着刷丝高度的增加,刷丝的抗弯刚度逐渐减小,刷丝与转子的接触压力降低,磨损率系数也会减小。

综上所述,在满足工况要求和密封性能的前提下,降低刷丝高度和刷丝排列角度可以有效减小刷式密封的磨损率系数,提高其使用寿命。

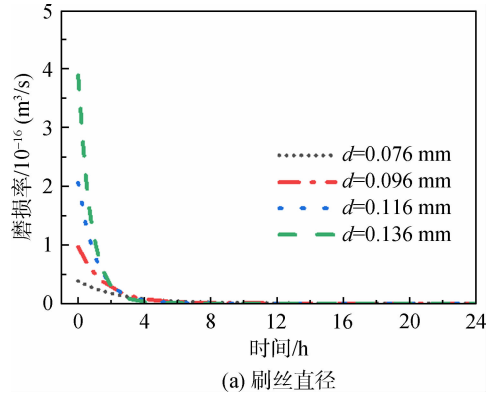
3.3 结构参数对磨损特性影响的灵敏度分析

为了更好地分析结构参数对刷式密封磨损特性的影响,本文引入三个量:磨损量系数、磨损率系数、磨损时间系数来描述刷式密封的磨损性能。其中,磨损量系数能够反映刷式密封最终磨损量大小;磨损率系数能够反映初始阶段的磨损率大小;磨损时间系数反映了磨损量和磨损率变化的快慢,其值越大,变化速率越大。由于结构参数取值范围不同,不宜在同一水平下进行较,为了更好地比较各参数对其影响大小,下面将结构参数进行无量纲化,其中无量纲化结构参数 C 的表达式如下:

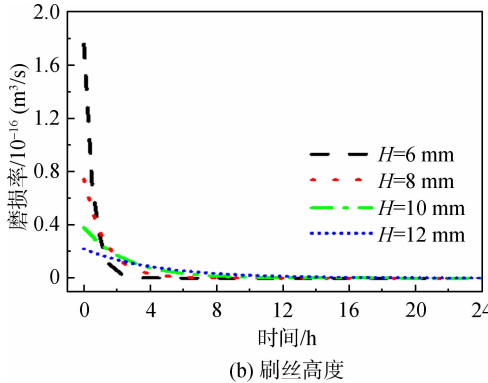
$$C = \frac{V_r - V_{rmin}}{V_{rmax} - V_{rmin}} \tag{17}$$

式中 V_r 表示结构参数取值, V_{rmin} 、 V_{rmax} 分别表示结构参数取值的最小值和最大值。

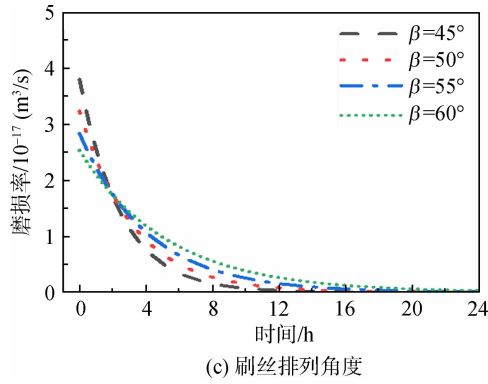
图 7 是指刷式密封磨损量系数随刷式密封结构参数的变化。图中显示:刷式密封最终磨损总量随刷丝直径、刷丝排列角的增大而增大,刷丝高度和刷环内径对其没有影响,这与文中第 3.2.1 节结果一致。表 2 是单位参数变化量下刷式密封磨损量系数的变化量。根据图 7 和表 2 数据可知,刷式密封结构参数对磨损量系数影响的灵敏度由大到小依次为刷丝直径、刷丝排列角度、刷丝高度和刷环内径。



(a) 刷丝直径



(b) 刷丝高度



(c) 刷丝排列角度

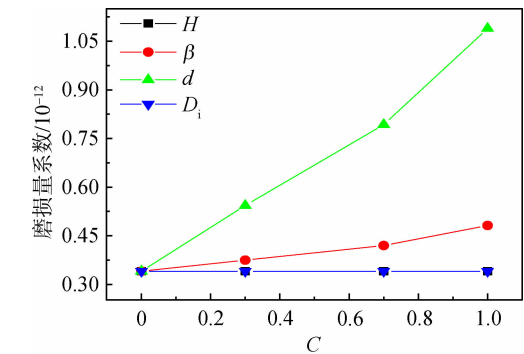


图 7 磨损量系数随结构参数变化

Fig. 7 Change of wear coefficient with structural parameters

表 2 单位结构参数变化量下磨损量系数的变化量

Table 2 Change of wear coefficient with per unit structural parameters variation

参数	磨损量系数变化量/ 10^{-13}
H	0
β	0.09
d	12.7
D_i	0

图 8 是刷式密封磨损率系数随刷式密封结构参数的变化规律。图中显示：刷式密封磨损率系数随刷丝直径、刷环内径的增大而增大，随刷丝高度、刷丝排列角度的增加而减小，这一结果与文中第 3.2.2 中结果一致。表 3 是单位参数变化量下刷式密封磨损率系数的变化量。根据图 8 和表 3 数据可知，刷式密封的结构参数对磨损率系数影响的灵敏度由大到小依次为刷丝直径、刷丝高度、刷丝排列角、刷环内径。

图 9 是刷式密封磨损时间系数随刷式密封结构参数的变化规律。图中显示：刷式密封磨损时

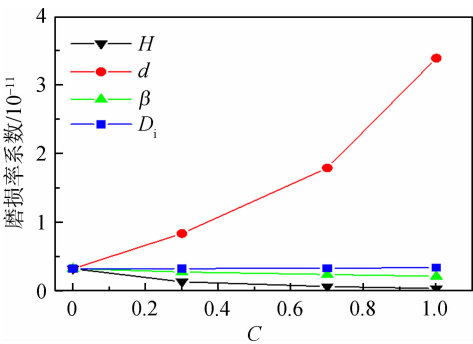


图 8 磨损率系数随结构参数变化

Fig. 8 Change of wear rate coefficient with structural parameters

表 3 单位参数变化量下磨损率系数的变化量

Table 3 Change of wear rate coefficient with per unit structural parameters variation

参数	磨损率系数变化量/ 10^{-12}
H	0.48
β	0.07
d	512
D_i	0.02

间系数随刷丝直径、刷环内径的增大而增大，随刷丝高度、刷丝排列角度的增加而减小。表 4 是单位参数变化量下刷式密封磨损时间系数的变化量。根据图 9 和表 4 数据可知，刷式密封的结构参数对磨损率系数影响的灵敏度由大到小依次为刷丝直径、刷丝高度、刷丝排列角、刷环内径。分析原因如下：刷丝直径越大，刷丝的抗弯刚度越大，刷丝与转子的接触压力越大，磨损时间系数随刷丝直径的增加而增大；刷环内径越大，刷丝与转子的相对滑动速度越大，进而刷式密封的磨损时间系数越大；刷丝高度、刷丝排列角度越大，刷丝的抗弯刚度越小，磨损时间系数越小。

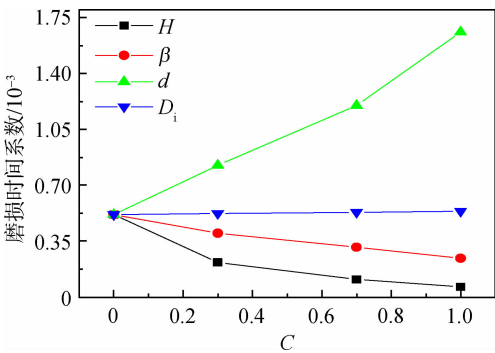


图 9 磨损时间系数随结构参数变化

Fig. 9 Change of wear time coefficient with per unit structural parameters

表 4 单位结构参数变化量下磨损时间系数的变化量

Table 4 Change of wear time coefficient with per unit structural parameters variation

参数	磨损时间系数变化量/ 10^{-4}
H	0.75
β	0.18
d	197
D_i	0.035

3.4 转速和初始过盈量对磨损特性的影响分析

3.4.1 初始过盈量对刷式密封磨损特性的影响

图 10 是结构参数为表 1 中参数的刷式密封在转速为 15 000 r/min 时,不同初始过盈量下的磨损量随磨损时间的变化规律。图中显示:不同初始过盈量的刷式密封的磨损量随时间的变化规律与文中第 3.1 节相同,不再赘述;初始过盈量越大,刷式密封的最终磨损总量越大。这是因为初始过盈量越大,刷丝磨损掉的长度增加,在其他参数不变的情况下,其最终磨损总量会随之增加。

减小初始初始过盈量是降低刷式密封磨损量的有效方法,在设计刷式密封时,综合考虑泄漏特性传热特性等情况下,适当减小刷丝与转子间的初始过盈量可以降低刷式密封磨损。

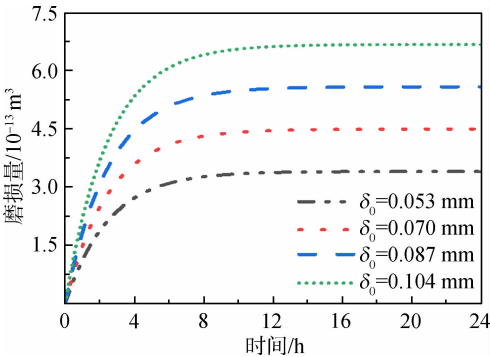


图 10 不同初始过盈量下磨损量随时间变化规律
Fig. 10 Change of wear with time under different initial interference quantities

3.4.2 转速对刷式密封磨损特性的影响

图 11 是结构参数为表 1 中参数的刷式密封在初始过盈量为 0.053 mm 时,不同转速(N)下的磨损量随磨损时间的变化规律。图中显示:不同

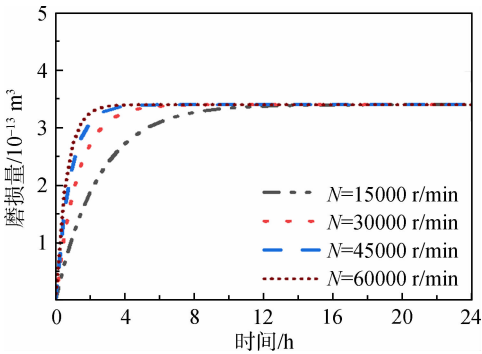


图 11 不同转速下磨损量随时间变化规律
Fig. 11 Change of wear with time under different rotating speeds

转速的刷式密封的磨损量随时间的变化规律都与文中第 3.1 节相同,不再赘述;刷式密封的最终磨损量不受转子转速的影响;但是转子转速对磨损速度影响很大,转速越大磨损越快。

根据以上分析,结构参数不变,在满足使用工况要求的情况下,降低转子转速可以有效降低刷式密封的磨损。

4 结 论

本文针对刷式密封结构特点,建立了刷丝磨损量关于时间的一阶线性非齐次微分方程,求解得刷丝磨损量、磨损率计算的数学模型并对刷式密封的结构和工况参数进行数值研究。主要研究结论如下:

1) 采用文中磨损计算结果获得的刷式密封泄漏量的数值计算结果与试验结果能够很好的吻合,其最大误差是 7.78%,证明了本文磨损计算结果的合理性。

2) 刷式密封的磨损量随时间呈指数趋势增加;磨损初期,刷式密封的磨损量加速度快,随着磨损进行其增加速度逐渐减小,最后趋于平稳状态。刷式密封的磨损率随时间呈指数趋势减小;磨损初期,磨损率的减小速度快,随着磨损进行磨损率减小速度减慢,最后趋于平稳状态。

3) 刷式密封的结构参数对磨损量系数影响的灵敏度由大到小依次为刷丝直径、刷丝排列角度、刷丝高度和刷环内径;对磨损率系数影响的灵敏度由大到小依次为刷丝直径、刷丝高度、刷丝排列角、刷环内径;对磨损时间系数影响的灵敏度由大到小依次为刷丝直径、刷丝高度、刷丝排列角、刷环内径。

4) 刷式密封最终磨损总量随刷丝直径、刷丝排列角度的增加而增加,刷丝高度、刷环内径对最终磨损总量没有影响;刷式密封的磨损率系数随刷丝直径、刷环内径的增加而增大,随刷丝高度、刷丝排列角度的增加而减小。

参考文献:

[1] ASLAN-ZADAF E, MAMMADOV V A, DOHNAL F, et al. Brush seals and labyrinth seals in gas turbine applications[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2013, 227(2): 216-230.
[2] CONNER K J, CHILDS D W. Rotordynamic coefficient test results for a four-stage brush seal[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 9(3): 462-465.
[3] 李军, 李志刚, 张元桥, 等. 刷式密封技术的研究进展[J].

航空发动机,2019,45(2):74-84.

LI Jun, LI Zhigang, ZHANG Yuanqiao, et al. Research progress of brush seal technology[J]. Aeroengine, 2019, 45 (2): 74-84. (in Chinese)

[4] KANG Yuchi, LIU Meihong, WALTER S K, et al. Predicting aerodynamic resistance of brush seals using computational fluid dynamics and a 2-D tube banks model[J]. Tribology International, 2018, 126: 9-15.

[5] 张元桥,王研. 刷式密封流动及传热特性的研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(3): 482-489.

ZHANG Yuanqiao, WANG Yan. Investigations on the leakage and heat transfer characteristics of brush seal[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3): 482-489. (in Chinese)

[6] 柴保桐,傅行军. 刷式密封流场和温度场数值模拟[J]. 润滑与密封, 2016, 38(3): 482-489.

CHAI Baotong, FU Xingjun. Numerical simulation on flow and temperature distributions of brush seals[J]. Lubrication Engineering, 2016, 38(3): 482-489. (in Chinese)

[7] 柴保桐,赵玉柱. 刷式密封泄漏流动特性数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(2): 482-489.

CHAI Baotong, ZHAO Yuzhu. Numerical simulation of leakage flow characteristics of brush seals[J]. Turbine Technology, 2019, 61(2): 482-489. (in Chinese)

[8] 马登骞,张元桥,李军,等. 考虑刷丝变形的后夹板结构对刷式密封泄漏和传热特性影响的研究[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 15-25.

MA Dengqian, ZHANG Yuanqiao, LI Jun, et al. Effects of backing plate structure on leakage and heat transfer characteristics of brush seals considering bristle pack deformation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 15-25. (in Chinese)

[9] 孙丹,丁海洋. 基于流固耦合的刷式密封泄漏特性理论与试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(7): 1519-1529.

SUN Dan, DING Haiyang. Theory and experiment on the leakage characteristics of brush seals based on fluid-structure interaction[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34 (7): 1519-1529. (in Chinese)

[10] 杜春华,吉洪湖,胡娅萍,等. 低前挡板型小尺寸刷式封严泄漏特性的试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 298-305.

DU Chunhua, JI Honghu, HU Yaping, et al. Experimental investigation on leakage characteristics of small size brush seal with low front plate[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 298-305. (in Chinese)

[11] 胡广阳,孙丹. 刷式密封泄漏及磨损特性试验研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(2): 1-5.

HU Guangyang, SUN Dan. Experimental study on the performance of leakage and wear of brush seals[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016, 33(2): 1-5. (in Chinese)

[12] 杜春华,吉洪湖. 刷式封严磨损特性及其对其泄漏影响的试验研究[J]. 推进技术, 2017, 38(11): 202-210.

DU Chunhua, JI Honghu. Experimental investigation on wearing characteristics and effects on leakage of brush seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(11): 202-210. (in Chinese)

[13] 陈春新,李军,丰镇平,等. 刷式密封刷丝束与转子接触力的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 23-27.

CHEN Chunxin, LI Jun, FENG Zhenping, et al. Numerical investigation into bristle-rotor contact force brush seals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 23-27. (in Chinese)

[14] 谢晓俊,康宁. 低泄漏高寿命刷式封严的数值计算[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 824-826.

XIE Xiaojun, KANG Ning. Numerical computation of low-leakage and high endurance brush seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 824-826. (in Chinese)

[15] ZHAO H, STANGO R J. Role of distributed interbristle friction force on brush seal hysteresis[J]. Journal of Tribology, 2007, 129(1): 199-204.

[16] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.

[17] 桂长林. Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法[J]. 润滑与密封, 1990(1): 12-21.

GUI Changlin. The Archard design calculation model and its application methods[J]. Lubrication Engineering, 1990 (1): 12-21. (in Chinese)

[18] 孙晓萍. 刷式密封性能和耐久性试验研究[J]. 航空发动机, 2002(3): 37-41.

SUN Xiaoping. Experimental investigation of performance and durability of brush seal[J]. Aeroengine, 2002(3): 37-41. (in Chinese)

[19] 袁伟. 刷式封严接触分析及磨损特性的研究[D]. 西安:西北工业大学, 2004.

YUAN Wei. Investigation of contact analysis and wear characteristics of brush seal[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

(编辑:叶 青、陈 越)