DOI: 10.3901/JME.2020.09.154

车辆传动系统密封环局部高温 热点的热失稳建模研究*

官 燃¹ 占 超¹ 徐 宜² 张 鹤²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013;

2. 中国北方车辆研究所 北京 100072)

摘要: 根据车辆传动系统密封环的服役特征, 提出了一种密封环局部高温热点的热失稳有限元建模方法, 可以用来计算密封环发生局部高温热点的临界速度。构建了密封温度存在扰动形式的表达式, 基于伽辽金有限元算法, 建立密封环局部高温热点的热失稳有限元模型, 处理密封系统的热结构耦合关系, 形成了密封环局部高温热点临界速度的计算方法。以铜基粉末冶金和灰铸铁密封环为例, 计算了不同摩擦因数条件下发生高温热点的临界速度, 并考察了临界速度与材料弹性模量、热导率、比热容、热膨胀系数的定量关系。利用自主开发设计的密封性能试验台进行密封热失稳试验研究, 设计了密封环热失稳的试验方法, 观测了两种密封材料温升及其扰动迁移情况, 试验结果与模拟计算结果具有一致性, 表明了密封环局部高温热点模拟方法的有效性。

关键词: 密封环; 高温热点; 有限元法; 临界速度

中图分类号: TH117

Thermal Instability Modeling Research on Hot Spots of Sealing Ring in Transmission of Vehicle

GONG Ran¹ ZHAN Chao¹ XU Yi² ZHANG He²

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072)

Abstract: According to the characteristics of the sealing rings in the transmission of a vehicle, a finite element method of thermal instability is presented for determining the critical speeds of local hot spots on the sealing rings. The temperature perturbation of the sealing ring is expressed. The finite element model of the thermal instability for hot spots is constructed based on the Galerkin finite element algorithm. The solution of thermal structure coupled problem is completed, and an algorithm for calculating the critical speeds of hot spots on the sealing ring is developed. Taking copper-based powder metallurgy and gray cast iron sealing materials as examples, the critical speeds of local hot spots are calculated at the different frictional coefficients. The effects of sealing material properties on the critical speed, such as elastic modulus, thermal conductivity, specific heat capacity, and thermal expansion coefficient, are determined. Experimental investigations are performed using a seal test rig. A test method of the thermal instability is proposed, which is applied to observe the perturbation and migration of the sealing ring temperature for two sealing materials, allowing for a comparison of the calculated and experimental critical speed results to enable an assessment of the accuracy level. The numerical and experimental results indicated the effectiveness of the finite element model in simulating hot spots of the sealing rings.

Key words: sealing ring; hot spot; finite element method; critical speed

0 前言

涨圈密封环属于端面动密封, 主要应用在旋转

轴上, 多数为分割式结构。在车辆工程领域, 它主要应用在先进传动系统中。在履带特种车辆中, 密封环主要布置在综合传动系统的湿式离合器中。随着履带车辆使用要求和工作条件的提高, 密封环需要在高压(压力 $P \geq 3.0$ MPa)、高速(转速 $v \geq 5\,000$ r/min)、高温(油温 $T \geq 100$ °C)工况下运行。在满足大功率传动需求的新型车辆研发和试验过程

* 国家自然科学基金(51675238)和江苏大学科技项目青年扶持基金(FCJJ005)资助项目。20190526 收到初稿, 20191201 收到修改稿

中,发现密封环无法达到预期服役寿命,对传动系统性能造成不利影响。其中一个失效现象就是热致磨损,其主要原因是密封摩擦副出现热失稳现象。所以,需要深入掌握密封环在传动系统服役工况下密封热失稳机理及其影响因素。

在大功率传动系统中,密封环较易形成局部高温热点和热带^[1],直接引起密封表面损伤。在密封摩擦副失效前,可能由于某些因素使摩擦力随温度升高而增大,导致温度不断上升,当摩擦副的转速超过某个转速值即临界速度时,密封将会产生热不稳定状态^[2-3],接触压力和温度出现扰动,从而引发摩擦副不均匀变形,在一定的摩擦时间内将会形成局部高温区域^[4-5],这类现象即为热失稳现象。从研究现状来看,摩擦副相对运动接触过程中的不稳定因素直接导致局部高温的发生^[6-8]。对于重载车辆传动装置这样的不稳定系统来说,在热结构变形、接触压力变化与摩擦热之间的相互作用和不断循环反馈过程是研究热失稳过程中值得探讨的关键点。

国内外学者对于摩擦副局部高温热点形成以及温度场的非均匀分布问题,主要是以热弹性不稳定理论为基础的^[9-11]。从目前研究现状来看,在对局部高温热点的热失稳研究过程中,主要通过理论模型、仿真计算和性能试验的研究手段来研究不同对象的热失稳现象^[12-15]。例如,在理论建模研究中,SAMANTA 等^[16]提出了一种闭形解析公式来预测箔轴承发生高温热点的临界速度值,同时考虑了尺寸与工况参数的影响,并通过相关试验进行对比验证了计算方法的正确性。AFFERRANTE 等^[17]建立了二维有限厚度的模型,考虑了温度和压力扰动的特性,研究了多片离合器的热失稳现象。同时,有学者通过数值仿真的手段考察热失稳特性,可以对多种结构形式的摩擦副进行数值建模,如 LEE 等^[18]通过有限元仿真的方式研究功能梯度材料的热失稳问题,以优化其结构。试验是观察热失稳现象的直观研究手段,如 HONNER 等^[19]在制动器上布置热电偶传感器,观察温升及其变化情况,判断局部高温热点的发生发展情况。由研究现状可知,现有的局部高温热点的热失稳研究主要集中在制动器、离合器、轴承等旋转部件上^[20-22],对于密封来说此方面研究甚少,而实际情况是密封环的不同材料属性对局部高温热点的出现及其临界速度有显著影响。

所以,本文以车辆综合传动系统密封环为研究对象,构建密封热失稳的有限元计算模型,及其热结构耦合关系,以两种典型材料铜基粉末冶金和灰铸铁材料为对象,研究不同材料密封环的热失稳特性,从而考察这两种材料出现局部高温热点的临界

转速及其影响因素,为降低密封环热失稳的发生提供依据。

1 密封环高温热点的热失稳模型

车辆传动系统中的密封环,装配在旋转轴凹槽中,配油套是静止的,其密封原理如图 1 所示。在油压 p_0 作用下,密封环一侧端面 AB 与旋转轴凹槽一侧紧密贴合并相对转动,构成主要密封面,局部高温的热失稳现象出现在主要密封面 AB 上。

图1 密封系统结构与原理图

在柱坐标系 (r, θ, z) 下,密封系统的瞬态温度场 $T(t)$ 表达为

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \omega \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

式中, λ 为材料的热导率; ρ 为材料密度; C_p 为材料比热容; ω 为旋转角速度。

在密封系统工作过程中,有几种因素可以导致接触压力和温度场产生扰动,如系统初始安装误差、外界传递来的振动等,在热失稳出现时,其温度场 $T(t)$ 存在随着时间 t 呈指数增长的扰动^[6],可用下式表示

$$T(r, \theta, z, t) = T_0(r, \theta, z) + \operatorname{Re} \{ \exp(bt + in\theta) \Theta_T(r, \theta, z) \} \quad (2)$$

式中, T_0 为稳态温度; n 为发生局部高温热点的个数; b 为扰动增长系数; Θ_T 为温度扰动值; Re 表示复数取实部, $i = \sqrt{-1}$ 。

密封环可看做是轴对称结构,把式(2)代入到式(1)中,有

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 \Theta_T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta_T}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Theta_T}{\partial z^2} - \frac{n^2 \Theta_T}{r^2} \right) - \rho C_p \Theta_T (b + in\omega) = 0 \quad (3)$$

为得到热失稳问题的有限元方程,式(3)乘以一随机函数 $H_j(r, z)$,即权函数,并且在密封接触域 Ω

内进行二重积分,可以得到

$$\iint_{\Omega_m} \left\{ \lambda \left(\frac{\partial^2 \Theta_T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta_T}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Theta_T}{\partial z^2} - \frac{n^2 \Theta_T}{r^2} \right) - \rho C_p \Theta_T (b + i\omega) \right\} H_j d\Omega_m = 0 \quad (4)$$

式中, $m=1$ 和 2, 分别代表密封环和旋转轴。

温度的扰动量可以写成如下离散形式

$$\Theta_T(r, z) = \sum_{i=1}^N \Theta_{Ti} H_i(r, z) \quad (5)$$

式中, $H_i(r, z)$ 表示形函数; N 表示密封副离散后的节点数。

基于伽辽金有限元法, 将式(5)代入到式(4)中, 整理后得到

$$\lambda \iint_{\Omega_m} \sum_{i=1}^N \Theta_{Ti} \left(\frac{\partial H_j}{\partial r} \frac{\partial H_i}{\partial r} + \frac{H_i}{r} \frac{\partial H_j}{\partial r} + \frac{\partial H_j}{\partial z} \frac{\partial H_i}{\partial z} \right) d\Omega_m + \iint_{\Omega_m} \sum_{i=1}^N \Theta_{Ti} \left[\frac{\lambda n^2}{r^2} + \rho C_p (b + i\omega) \right] H_j H_i d\Omega_m + \int_S H_j q_m dS = 0 \quad (6)$$

式中, q 为密封接触面的热流密度; S 表示密封接触面。

为了便于求解计算, 把式(6)转换成矩阵形式, 表示为:

$$(A + bB + C)\Theta + Q = 0 \quad (7)$$

$$A = \iint \lambda \left(\frac{\partial H}{\partial r} \frac{\partial H^T}{\partial r} - \frac{H}{r} \frac{\partial H^T}{\partial r} + \frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial H^T}{\partial z} \right) d\Omega \quad (8)$$

$$B = \iint \rho C_p H H^T d\Omega \quad (9)$$

$$C = \iint \left(\frac{\lambda n^2}{r^2} + i\omega n \rho C_p \right) H H^T d\Omega \quad (10)$$

式中, H 表示形函数的矩阵形式; H^T 表示权函数的矩阵形式, 即为形函数的转置, 在伽辽金有限元方法中, 形函数与权函数相同; Θ 为节点温度矢量; Q 为节点的热流密度矢量。

在密封副运行过程中, 在主密封面会产生摩擦热, 忽略流体带来的热量, 这样, 热流密度矢量表示为

$$Q = fPv \quad (11)$$

式中, f 为密封副的摩擦因数; P 为接触压力矢量; v 为密封副的相对线速度, 可换算成

$$v = \omega r \quad (12)$$

式中, r 为摩擦半径。

密封系统的热弹性接触计算是求解热-结构耦合问题的关键, 主要是获取节点压力 P 与节点温度

Θ 的关系^[12], 其相互关系可以描述成

$$p_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \Theta_j, \quad i=1, 2, \dots, N_c \quad (13)$$

式中, A_{ij} 为关系矩阵; N_c 为密封接触面上接触节点的数目。

对于热弹性接触问题, 应力矢量

$$\sigma = \{\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta z}, \sigma_{zr}\}^T$$

可通过下式定义

$$\sigma = Ke - LT \quad (14)$$

$$L = \frac{E\alpha}{1-2\mu} [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$K = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\mu \end{bmatrix}$$

式中, E 为弹性模量; μ 为泊松比; α 为热膨胀系数; e 为应变矢量, 表示为

$$e = WU \quad (15)$$

式中, W 表示与形函数相关的变换矩阵; U 为节点位移矢量。

当密封变形存在扰动时, 可以得出如下矩阵方程

$$MU - N\Theta = \Phi P \quad (16)$$

$$M = \iiint_{\Omega} W^T K W r dr d\theta dz \quad (17)$$

$$N = \iiint_{\Omega} W^T L H r dr d\theta dz \quad (18)$$

这里 Φ 定义为 $[I \ 0]^T$, 是一个 $N_c \times N_c$ 的单位矩阵。

由式(16)可以获得矩阵 A 的具体数值, 那么式(11)就可以写成

$$Q = fA\Theta v \quad (19)$$

将式(19)代入到式(7)中, 得到

$$(A + bB + C + fvA)\Theta = 0 \quad (20)$$

对式(20)进行格式简化, 有

$$G\Theta = b\Theta \quad (21)$$

其中矩阵 G 为

$$G = -B^{-1}(A + C + fvA) \quad (22)$$

对于特定的密封系统参数, 利用特征值法求解 G 矩阵就可以获得扰动增长系数和节点温度。通过

有限元计算获取 G 矩阵的特征值 b_i , 当扰动增长系数为零时对应的转速, 即为密封摩擦副发生局部高温热点的临界转速。

2 结果与讨论

2.1 计算结果分析

以车辆传动系统密封环为例, 研究灰铸铁材料、铜基粉末冶金材料的密封环发生局部高温热点的临界速度, 及其影响规律。密封环的结构参数为: 外径 125 mm, 径向宽度为 2.9 mm, 轴向厚度为 2.6 mm。两种密封材料和旋转轴材料参数如表 1 所示。对密封副进行离散单元的划分, 建立有限元模型, 通过网格无关性验证后, 共计划分 3 420 个单元, 5 805 个节点。

表 1 计算所用材料参数

材料参数	铜基粉末冶金材料	灰铸铁	38CrSi 旋转轴
弹性模量/GPa	29.2	120	206
密度/(kg/m ³)	6 120	7 200	7 850
泊松比	0.29	0.30	0.26
比热容/(J/kg·K)	580	590	465
热导率/(W/m·K)	10.5	48	30.6
热膨胀系数/K	1.4×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.1×10^{-5}

根据密封环性能试验的结果^[23], 在全工况范围内密封摩擦副的摩擦因数在 0.02~0.09 之间。在考虑不同密封材料的高温热点的临界速度时, 以摩擦因数 0.07 为例, 依据第 1 节建立的密封高温热点的热失稳计算模型, 获得了灰铸铁、铜基粉末冶金两种密封材料出现不同个数热点的临界速度值, 计算结果如图 2 所示。

图 2 不同材料热点的临界速度值

对于发生 1 个高温热点的临界速度, 灰铸铁材料、铜基粉末冶金材料差别不大, 分别为 724 r/min

和 425 r/min。随着转速的提高, 两种材料发生热点的个数区别较大, 由图可知, 灰铸铁密封材料在较低的转速下, 就可以发生热失稳现象, 随着转速升高, 热点个数显著增长, 发生 10 个高温热点的临界速度为 1 702 r/min。相比之下, 铜基粉末冶金材料在同样的转速下发生局部高温热点个数相对较少, 在转速 1 702 r/min 以下, 发生热点的个数仅为 2 个。而铜基粉末冶金材料发生 10 个高温热点的临界速度值为 5 787 r/min。

图 3 所示为不同的密封材料在热失稳状态下的密封面温度分布情况。图 3a 所示为铜基粉末冶金密封材料在产生局部高温热点时, 其密封面温度分布情况, 计算转速为 3 000 r/min。由图 3 可知, 在密封环主密封面出现了局部高温区域即高温热点, 在其周围区域温度呈逐渐下降的分布状态。密封面局部高温区域周期性间隔出现, 符合热失稳现象中出现非均匀温度场的结论。在整个密封面上一共有 6 个

(a) 铜基粉末冶金

(b) 灰铸铁

图 3 不同密封材料的局部高温分布情况

高温热点,与图2的计算结果一致。图3b所示为灰铸铁密封材料在2 000 r/min转速下出现12个局部高温热点时,密封面的温度分布情况。由图可知,在密封表面明显出现了局部高温集中分布,这是热失稳状态的显著特点。

为进一步考察不同摩擦状态下的热点临界速度值,以灰铸铁密封材料为例,计算不同摩擦因数情况下,发生热点的临界速度,如图4所示。在发生热点个数相同的情况下,摩擦因数越小,发生局部高温热点的临界速度越高,即越难发生高温热点,在摩擦因数小于0.05时,这种情况更加明显。在摩擦因数为0.02、0.04、0.06和0.08时,发生2个热点的临界速度分别为4 358 r/min、1 268 r/min、657 r/min和425 r/min,可见差异显著。在摩擦因数较小时,密封表面所处的润滑状态比较良好,在此状态下接触压力相对较低。高摩擦因数表明密封摩擦副可能处于边界润滑甚至干摩擦状态,导致表面热流密度大,更易产生局部高温。

图4 不同摩擦因数下发生热点的临界速度值

两种材料在同样的工况条件下,发生热点的临界速度值有很大差异,表明密封材料对热失稳及其局部高温热点的临界速度有很大影响。所以,本文以灰铸铁为基础材料,依次变换弹性模量、热导率、比热容和热膨胀系数的数值,其他材料参数保持不变,以此考察不同的弹性模量、热导率、比热容和热膨胀系数的情况下,发生高温热点的临界速度值。计算是在摩擦因数0.07的工况下进行的。

图5所示为密封材料的弹性模量对发生局部高温热点临界速度的影响,由图5可知,随着弹性模量的增加,发生热点的临界速度明显减小。特别在弹性模量从70 GPa增大到140 GPa时,临界速度降幅更为显著,在材料弹性模量为70 GPa时,发生8个高温热点的临界速度为2 716 r/min、在140 GPa时临界速度为1 178 r/min、在210 GPa时

临界速度为761 r/min。在同样的应变下,弹性模量越大,在密封副表面产生更大的接触应力,越容易导致非均匀的应力场,密封系统的稳定性相应减弱。

图5 弹性模量对热点临界速度的影响

密封材料的比热容对局部高温热点临界速度的影响,如图6所示。比热容在400~600 J/kg·K变化时,发生热点的临界速度值差别不大。由图发现,比热容越小的密封材料,发生热点的临界速度值越小,即越容易发生高温热点。密封材料的比热容越大,那么在相同质量和温升时需要更多热能,相比比热容小的材料,更容易实现热稳定性。

图6 比热容对热点临界速度的影响

密封材料热导率对局部高温热点临界速度的影响如图7所示。随着热导率的增大,密封环发生局部高温热点的临界速度随之增加,即越不容易发生热失稳。以发生8个热点的临界速度为例,在热导率分别为20 W/m·K、40 W/m·K和60 W/m·K时,临界速度分别为1 015 r/min、1 254 r/min和1 612 r/min。在热导率增大一倍时,在发生热点的扰动激励下,临界速度增长了23.5%。密封材料的热导率越大,密封各处的温差越小,缓解了温度场非均匀性分布,有利于保持密封系统的热稳定性。

图8所示为密封材料热膨胀系数对高温热点临界

速度的影响。在本文所研究的热膨胀系数为 $0.8 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-5} / \text{K}$, 材料的热膨胀系数越大, 发生局部高温热点的临界速度越小, 即越容易发生热失稳。在热膨胀系数为 $0.8 \times 10^{-5} / \text{K}$ 时, 发生 8 个热点的临界速度为 1 671 r/min, 在热膨胀系数 $1.6 \times 10^{-5} / \text{K}$ 时, 发生同样热点个数的临界速度则为 880 r/min, 临界速度降低了 47.3%, 降幅较大。在相同的温升下, 热膨胀系数越大, 那么在密封摩擦副接触面会产生更大的热变形, 产生更大的接触应力, 影响温度场的均匀分布, 密封系统的热稳定性降低。

图 7 热导率对热点临界速度的影响

图 8 热膨胀系数对热点临界速度的影响

2.2 试验分析与讨论

为了进一步考察密封环高温热点的形成规律, 以及验证计算模型的可靠性, 开展相应的试验研究。利用自主设计的密封综合性能试验台进行试验, 试验原理如图 9 所示, 电动机通过同步带驱动旋转轴, 密封环安装在旋转轴的凹槽内, 旋转轴贯穿试验腔, 液压系统为试验腔内供油, 转速传感器与旋转轴合为一体, 测控旋转轴转速, 试验台完全模拟传动系统的实际运行状态。在密封面上沿着周向布置 8 个温度传感器, 用以测量密封面温度及其变化情况,

其中在 90° 密封面内每隔 45° 布置一个温度传感器, 以最大程度地满足在密封环周向范围内高、低温度点的测量要求, 传感器布置情况如图 10 所示, 按照顺时针方向依次标号为 1、2 和 3。

图 9 密封性能试验台原理图

图 10 密封温度传感器布置图

由于通过试验无法直接测得密封发生热失稳的具体临界速度值, 所以需要通过间接的试验方法进行验证。根据第 1 节的计算模型可知, 在热失稳现象发生时, 密封面温度会存在扰动, 且扰动沿着周向传播。根据 LEE 等的经验^[24], 设计如下试验方法: 根据局部高温热点的热失稳模拟计算结果, 选择一试验转速, 在此速度下, 进行试验, 观察相邻温度传感器的数值及其扰动迁移情况, 其主要依据是当密封摩擦副处于热失稳状态时, 扰动增长系数大于零, 温度场的扰动随时间增长。通过温度传感器测量某些转速下的密封面温度及其变化情况, 以温度场的波动情况判断热失稳现象的发生。为了与模拟计算的工况相一致, 根据以往试验获得的 $f-pv$ 曲线^[23], 选择与摩擦因数相对应的速度和压力, 这样保证试验工况与模拟工况相一致。

图 11 所示为铜基粉末冶金材料密封环热失稳试验结果。试验是在 2 500 r/min 转速下进行的, 油压为 2.0 MPa。温度数据分别为图 10 所示的三个温度传感器的测量数据。在前 100 s 试验内, 三个位置的温度基本一致, 呈缓慢上升的趋势, 在 100 s 以后, 三个位置的温度逐步出现差异, 位置 1 和位置 3 的温度开始出现扰动, 随时间都出现有规律的

变化,而且两个位置的温度变化波形呈现一定的时移,同时位置2的温度没有显著的波动。根据第1节的模型可知,在密封系统出现热失稳现象时,密封温度会出现扰动且沿着密封面传播。由试验结果表明,在此试验转速下密封系统出现局部高温的热失稳现象,图2的计算结果显示在2500 r/min转速下,铜基粉末冶金材料密封环会出现局部高温热点的热失稳现象,与试验结论一致。

图11 铜基粉末冶金材料密封环热失稳试验结果

图12所示为灰铸铁材料密封环在转速2500 r/min工况下的热失稳试验结果,试验油压为2.0 MPa。与图11类似,试验开始后密封温度缓慢上升,在100 s后温度基本保持在一波动区间内,整体温度没有明显的升高。三个位置的温度均有显著的波动,且呈现一定的规律性,同时由试验结果发现,三个位置温度扰动不是同步变化,有一定的时间延迟,这符合热失稳发生时温度扰动且迁移的特征,由此可以推断在此转速下密封系统发生热失稳现象,这与图2所示的计算结论是一致的。

图12 灰铸铁材料密封环热失稳试验的结果

3 结论

(1) 根据履带车辆传动系统密封环工作特点,提出了密封局部高温热点的热失稳有限元模拟方法。设置温度扰动的表达式,基于伽辽金有限元方法,构建了密封环局部高温热点热失稳的有限元模型,开展热结构耦合计算,形成了一种密封环局部高温热点临界速度的计算方法。

(2) 实现了两种不同密封环材料的局部高温热点的热失稳建模计算,即铜基粉末冶金材料和灰铸铁材料,铜基粉末冶金材料在同样的转速下发生局部高温热点个数相对较少。在发生热点个数相同的情况下,摩擦因数越小,发生局部高温热点的临界速度越高。随着密封材料弹性模量的增加,发生热点的临界速度明显减小。比热容在400~600 J/kg·K变化时,发生热点的临界速度值差别不大。随着密封材料热导率的增大,密封环发生局部高温热点的临界速度随之增加,即越不容易发生热失稳。密封材料的热膨胀系数越大,发生局部高温热点的临界速度越小,即越容易发生热失稳。

(3) 为验证计算模型,开展了密封环热失稳的试验研究,设计了密封环热失稳试验方法,获得了两种密封材料的密封面温度的扰动规律,与计算结果对比,计算和试验具有一致规律,表明了密封热失稳有限元模型计算密封局部高温热点临界速度的有效性。

参考文献

- [1] GONG R, WAN X J, ZHANG X R. Tribological properties and failure analysis of PTFE composites used for seals in the transmission unit[J]. Journal of Wuhan University of Technology- Material Science, 2013, 28(1): 26-30.
 - [2] MENG X K, BAI S X, PENG X D. Lubrication film flow control by oriented dimples for liquid lubricated mechanical seals[J]. Tribology International, 2014, 77(9): 132-141.
 - [3] 胡琼, 孙见君, 马晨波, 等. 基于微凸体侧接触模型的机械密封端面混合摩擦热理论预测[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 102-108.
- HU Qiong, SUN Jianjun, MA Chenbo, et al. Theoretical prediction of mixed frictional heat of mechanical seals based on shoulder-shoulder contact model of asperities[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 102-108.

- [4] BLASIAK S, PAWINSKA A. Direct and inverse heat transfer in non-contacting face seals[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90(11): 710-718.
- [5] 杨丹丹, 郝木明, 张元, 等. 高温泵用液膜密封流热固耦合分析[J]. *应用数学和力学*, 2015, 36(3): 274-284. YANG Dandan, HAO Muming, ZHANG Yuan, et al. Fluid-solid-heat coupling study on liquid film seal for high temperature oil pumps[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, 36(3): 274-284.
- [6] ZAGRODZKI P. Thermoelastic instability in friction clutches and brakes-transient modal analysis revealing mechanisms of excitation of unstable modes[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 45(11-12): 2463-2476.
- [7] MAO J J, KE L L, YANG J, et al. Thermoelastic instability of functionally graded materials with interaction of frictional heat and contact resistance[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2018, 46(2): 139-156.
- [8] OSTERMEYER G P, BODE K. A comprehensive approach for the simulation of heat and heat-induced phenomena in friction materials[J]. *Wear*, 2014, 311(1-2): 47-56.
- [9] ABDULLAH M A S. Transient behavior of initial perturbation in multidisk clutch system[J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(6): 1164-1171.
- [10] YEVTUSHENKO A A, GRZESA P. The FEM-modeling of the frictional heating phenomenon in the pad/disc tribosystem (a review)[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2010, 58(3): 207-226.
- [11] MAO J J, KE L L, YANG J, et al. Thermoelastic instability of functionally graded coating with arbitrarily varying properties considering contact resistance and frictional heat[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 43(3): 521-537.
- [12] YI Y B, BENDAWI A. Effect of convective cooling on frictionally excited thermoelastic instability[J]. *Wear*, 2012, 296(1-2): 583-589.
- [13] ABBASI S, TEIMOURIMANESH S, VERNERSSON T, et al. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material[J]. *Wear*, 2014, 314(1-2): 171-180.
- [14] VOLDŘICH J. Frictionally excited thermoelastic instability in disc brakes-Transient problem in the full contact regime[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49(2): 129-137.
- [15] CAPRIOLI S, VERNERSSON T, HANDA K, et al. Thermal cracking of railway wheels: Towards experimental validation[J]. *Tribology International*, 2016, 94(2): 409-420.
- [16] SAMANTA P, KHONSARI M M. On the thermoelastic instability of foil bearings[J]. *Tribology International*, 2018, 121(5): 10-20.
- [17] AFFERRANTE L, CIAVARELLA M, DECUZZI P, et al. Transient analysis of frictionally excited thermoelastic instability in multi-disk clutches and brakes[J]. *Wear*, 2003, 254(1-2): 136-146.
- [18] LEE C Y, KIM J H. Aero-thermoelastic stability and nonlinear flutter analysis of functionally graded panels[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 47(18): 2257-2264.
- [19] HONNER M, ŠROUB J, ŠVANTNER M, et al. Frictionally excited thermoelastic instability and the suppression of its exponential rise in disc brakes[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2010, 33(5): 427-440.
- [20] CRISTOL-BULTHÉ, A L, YANNICK D, GÉRARD D. Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking[J]. *Wear*, 2007, 263(7): 1230-1242.
- [21] HAN C F, CHU H Y, KUO P C, et al. Tribological behavior and thermoelastic instability demonstrated in ball-bearing-like specimens operating in dry contacts and with grease lubrication[J]. *Tribology International*, 2016, 110(6): 358-369.
- [22] GEIJSELAERS H J M, KONING A J E. Finite element analysis of thermoelastic instability with intermittent contact[J]. *Journal of Tribology*, 2017, 122(1): 42-46.
- [23] GONG R, LIU M, ZHANG H, et al. Experimental investigation on frictional behavior and sealing performance of different composites for seal application [J]. *Wear*, 2015, 342-343: 334-339.
- [24] LEE K, BARBER J R. An experimental investigation of frictionally-excited thermoelastic instability in automotive disk brakes under a drag brake application[J]. *Journal of Tribology*, 1994, 116(3): 409-414.

作者简介: 宫燃, 男, 1978 年生, 博士, 教授。主要从事车辆摩擦、密封领域相关研究。

E-mail: gongran@ujs.edu.cn