DOI: 10.3901/JME.2019.09.055

旋转密封两种热失稳现象的表征建模与特性研究*

官 燃¹ 程志高¹ 徐 宜² 张玉东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: 在车辆传动系统中的密封环, 热失稳现象明显, 为掌握热失稳的形成规律和影响机制, 针对不同材料的密封环, 进行热失稳建模计算与试验研究。根据密封环热失稳现象的特点, 分别对局部高温热带和高温热点两种热失稳现象进行建模, 基于伽辽金有限元方法, 构建热-结构的耦合模型, 把非均匀分布物理场及其扰动问题, 转换为矩阵行列式进行求解, 获得了不同密封材料发生热失稳的临界速度值。随着摩擦因数的增大, 密封材料热失稳的临界速度值有下降的趋势。利用自主设计的密封环试验台进行试验分析和模型验证, 设计了密封环局部高温热带和热点的试验验证方法, 考察了聚酰亚胺和铜基粉末冶金材料密封环的热失稳试验过程, 试验与计算结果具有一致性。对试验后的密封环, 通过扫描电子显微镜观察密封表面形貌, 符合局部高温热带和热点的特征, 表明了密封环热失稳建模计算的有效性。

关键词: 热失稳; 密封环; 高温热带; 高温热点

中图分类号: TH117

Modeling Research on Characteristics of Two Types of Thermal Instability for Rotary Seal

GONG Ran¹ CHENG Zhigao¹ XU Yi² ZHANG Yudong² ZHANG He²

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

2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072)

Abstract: Thermal instability phenomenon on the sealing ring in the transmission of vehicle is obvious. In order to obtain the formation rules and influence mechanisms of the thermal instability, the modeling calculations and experiments are conducted for different sealing materials. According to the thermal instability characteristics of the sealing ring, the models of local hot bandings and hot spots are built respectively. Based on the Galerkin finite element method, the thermal-structural coupling model is built, and the equations of non-uniform physical fields and their perturbations are transformed into the determinants of matrixes and calculated. The critical speeds of the thermal instability are obtained. The critical speeds of the thermal instability decrease with the increase of the frictional coefficient. Experimental investigations are performed in the sealing performance test rig. A test verification method for local hot banding and hot spot is proposed to investigate the thermal instability for the polyimide and copper-base powder metallurgy sealing materials. The test results are consistent with the calculated results. The scanning electron microscopy is utilized to examine the surface morphology of the sealing rings after the tests, which agrees well with the characteristics of hot bandings and hot spots. The numerical and experimental results indicate the effectiveness of the thermal instability model of sealing rings.

Key words: thermal instability; sealing ring; hot banding; hot spot

0 前言

浮动密封环是属于流体动密封的一类部件, 它主要应用在工程车辆、军用车辆、冶金机械、航空

航天器等需要密封的装置中^[1-2], 如动力换挡变速箱、液力变矩器、涡轮增压器等, 对防止泄漏、维持设备的正常工作起到关键作用。在特种重载车辆中, 密封环主要布置在综合传动装置的湿式离合器中, 保证结合油压的建立, 是评价总体传动性能的一个重要指标^[3]。

随着使用要求和工作条件的提高, 密封环需要在高速、高压、高温工况下运行。在新产品开发过

* 国家自然科学基金(51675238)、中国博士后科学基金 (2017M610301)和江苏大学科技项目青年扶持基金(FCJJ005) 资助项目。20180520 收到初稿, 20180916 收到修改稿

程中,发现密封环出现了提早失效的现象,这直接影响到整个传动装置的使用性能。其中,热失稳现象较为突出,影响密封性能。热失稳现象描述两固体发生滑动摩擦时,接触压力的非均匀分布会导致摩擦热的非均匀分布,从而导致材料热膨胀的非均匀分布,非均匀的热膨胀会导致局部高压区的出现,当系统处于不稳定状态时,摩擦热将会向高压区集中,形成热点或热带。密封环在高能量密度作用下容易产生局部高温,导致密封表面局部烧蚀,直接引起表面损伤。

国内外学者对于摩擦副局部高温形成以及温度场的非均匀分布问题,主要以 BARBER 提出的热弹性不稳定理论为基础的^[4-7]。LEE 等^[8]通过理论模型,研究了有限厚度的功能梯度材料与半无限平面滑动的热失稳问题。DU 等^[9]采用了数值仿真的方法研究制动器的瞬态热弹性问题,获得了制动器发生局部高温的临界速度值。KASEM 等^[10]进行了制动台架试验,从热、结构影响的角度考察了在制动过程中制动器的局部高温热点问题。可见,热失稳现象可以通过理论建模^[11-12]、数值仿真^[13-14]和性能试验^[15-16]的研究角度,分析热失稳的特性、影响规律及其发生热失稳的临界速度。

密封材料对密封环性能有显著影响^[17-18]。目前,使用的密封材料多样,包括有纯金属材料,诸如铸铁、青铜等;非金属材料,诸如橡胶、石墨等;复合材料,诸如聚酰亚胺(PI)复合材料,粉末冶金材料等。不同密封材料所体现出来的热失稳现象及其临界速度,也不会相同。所以,本文以车辆综合传动装置中两种典型密封材料,铜基粉末冶金材料和 PI 复合材料为例,构建局部高温热点和热带的热失稳有限元模型,区分不同密封材料表现出来的热失稳现象,获得热失稳的临界速度值,为密封材料的精确选择提供依据。

1 热失稳有限元模型的建立

热失稳发生时产生的局部高温,分为热点和热带两类,而局部高温热点和热带的计算模型存在着显著区别。对于密封环热失稳模型来说,热点是沿着圆周方向形成了周期性的局部高温点,而热带是沿着径向形成非均匀分布的、在某个径向位置存在的局部高温带。所以,对于密封环局部高温热带来说,周期性或非均匀的温度分布只存在于径向,而在圆周方向保持恒定。对于密封环局部高温热点来说,可以认为周期性的温度分布只存在于周向,而在径向保持恒定。对于不同密封材料,在其工作范

围内可能仅出现局部高温热带,或者有可能出现局部高温热点,所以需要两种不同热失稳类型分别进行建模研究。

在车辆传动装置中,在压力作用下,密封环主密封面与旋转轴紧密贴合,并相对转动。根据密封环的工作条件,建立密封系统的柱坐标系 (r, θ, z) 。对热点和热带分别建模,截取密封系统的一段区域,如图 1 所示,图中 R 表示密封环的内外径之差即径向宽度, v 表示旋转轴的速度。对于局部高温热点的计算模型,由于在径向 r 向温度保持不变,建立如图 1a 所示的坐标系。对于局部高温热带的计算模型,由于在圆周方向即 θ 向温度保持不变,建立如图 1b 所示的坐标系。

(a) 局部高温热点模型

(b) 局部高温热带模型

图 1 密封环热失稳计算模型

假设密封摩擦副完全接触,密封瞬态温度场 $T(t)$ 在柱坐标 (r, θ, z) 下,可以表达为

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

$$K = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2)$$

式中, ω 为旋转角速度; λ 为导热系数; ρ 为密度; C_p 为比热容, t 表示时间。

在密封工作过程中, 有几个因素可以引起接触压力和温度场的扰动, 例如安装误差, 由地面传递到传动装置的振动等。假设温度场 $T(t)$ 存在余弦形式的扰动^[13], 扰动随着时间指数增长, 根据局部高温热点和热带的计算模型, 可分别表达成式(3)和式(4)

$$T(\theta, z, t) = T_0(\theta, z) + \operatorname{Re}\{\exp(bt + in\theta)\Theta(\theta, z)\} \quad (3)$$

$$T(r, z, t) = T_0(r, z) + \exp(bt)\Theta(r, z) \quad (4)$$

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

将式(3)、(4)的温度场扰动式, 分别代入到式(1)中, 可以获得

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} - n^2 \Theta - \frac{\Theta}{K}(b + in\omega) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} - \frac{b}{K} \Theta = 0 \quad (6)$$

温度场的扰动量可以列写成离散形式, 表达为

$$\Theta = \sum_{i=1}^N \Theta_i H_i \quad (7)$$

式中, Θ_i 为划分单元内节点的温度量值; N 为密封系统离散后划分的节点数; H_i 表示形函数。

对式(3)、(4)同乘以一权函数 H_j , 然后把式(7)代入, 根据伽辽金有限元方法, 可以推导出局部高温热点和热带的有限元计算公式, 在密封接触域 Ω 进行积分, 分别表达为

$$\lambda \iint_{\Omega_m} \sum_{i=1}^N \Theta_i \left(\frac{\partial H_j}{\partial z} \frac{\partial H_i}{\partial z} \right) d\Omega_m + \iint_{\Omega_m} \sum_{i=1}^N [\lambda n^2 + \rho C_p (b + i\omega n)] \Theta_i H_j H_i d\Omega_m + \int_S H_j q_m dS = 0 \quad (8)$$

$$\lambda \iint_{\Omega_m} \sum_{i=1}^N \Theta_i \left(\frac{\partial H_j}{\partial r} \frac{\partial H_i}{\partial r} + \frac{H_i}{r} \frac{\partial H_j}{\partial r} + \frac{\partial H_j}{\partial z} \frac{\partial H_i}{\partial z} \right) d\Omega_m + \rho C_p b \iint_{\Omega_m} \sum_{i=1}^N \Theta_i H_j H_i d\Omega_m + \int_S H_j q_m dS = 0 \quad (9)$$

式中, q 为密封接触面上的热流密度, 下标 $m=1, 2$, 分别代表密封环和旋转轴; S 表示密封接触面。

把式(8)和式(9)分别转换成局部高温热点和热带模型的矩阵方程, 得到如下表达式

$$(A_1 + bB + C)\Theta + Q = 0 \quad (10)$$

$$(A_2 + bB)\Theta + Q = 0 \quad (11)$$

$$A_1 = \iint \lambda \left(\frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial H^T}{\partial z} \right) d\Omega \quad (12)$$

$$B = \rho C_p \iint HH^T d\Omega \quad (13)$$

$$C = \iint (\lambda n^2 + i\rho C_p \omega n) HH^T d\Omega \quad (14)$$

$$A_2 = \iint \lambda \left(\frac{\partial H}{\partial r} \frac{\partial H^T}{\partial r} - \frac{H}{r} \frac{\partial H^T}{\partial r} + \frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial H^T}{\partial z} \right) d\Omega \quad (15)$$

式中, H 和 H^T 分别表示形函数和权函数; Q 为热流密度矢量。

对于密封结构来说, 密封接触副由于摩擦生热, 在接触面产生热量, 表达成矢量方程为

$$Q = fPv \quad (16)$$

式中, f 为摩擦因数; P 为接触压力矢量; v 数值上等于旋转轴角速度 ω 与摩擦半径的乘积。

为求解密封系统的热弹性接触问题, 需要描述节点压力 P 与节点温度 Θ 的关系, 可以写成

$$p_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \Theta_j \quad i=1, 2, \dots, N_c \quad (17)$$

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。

根据热弹性应力与变形的关系^[19], 决定矩阵 A 中各个元素 A_{ij} 的数值。获得了矩阵 A 的具体数值后, 就可以获得如下计算式

$$Q = fA\Theta v \quad (18)$$

将式(18)分别代入到式(10)、(11)中, 得到

$$(A_1 + bB + C + fvA)\Theta = 0 \quad (19)$$

$$(A_2 + bB + fvA)\Theta = 0 \quad (20)$$

对式(19)、(20)进行格式化简, 有

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

其中, 对于局部高温热点模型, 矩阵 G 为

$$G = -B^{-1}(A_1 + C + fvA) \quad (22)$$

对于局部高温热带模型, 矩阵 G 为

$$G = -B^{-1}(A_2 + fvA) \quad (23)$$

给定特定的密封系统参数, 通过求解 G 矩阵就可以获得扰动增长系数。通过有限元计算, 可以获取 G 矩阵的特征值 b_i , 当扰动增长系数为零时, 对应的密封摩擦副的转速即为发生热失稳的临界转速。工作转速如果在临界转速之上, 则密封会发生热失稳现象。

2 结果与讨论

为考察不同密封材料的热失稳特性及其临界速度,选取铜基粉末冶金密封材料和PI复合材料为例进行模拟计算,旋转轴材料为38CrSi,三种材料参数如表1所示。选择的密封环尺寸,径向宽度 R 为2.9 mm,轴向厚度 L 为2.6 mm。

表1 计算所用材料参数

材料参数	铜基粉末 冶金材料	PI 密封材料	38CrSi 旋转轴
弹性模量/GPa	29.2	4.21	206
密度/(kg/m ³)	6120	2360	7850
泊松比	0.29	0.32	0.26
比热容/(J/kg·K)	580	1220	465
热导率/(W/m·K)	10.5	0.92	30.6
热膨胀系数/(K ⁻¹)	1.4×10^{-5}	5.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}

密封环在工作过程中,可能会处于边界润滑、混合润滑、流体润滑的不同润滑阶段。根据前期的试验测试,密封摩擦副的摩擦因数处于0.02~0.09之间^[3]。在其常用的使用工况下,摩擦因数一般处于0.04~0.08之间。在考察不同密封材料的局部高温热点和热带的临界速度时,以摩擦因数0.07为例,按照第1节建立的局部高温热点和热带的热失稳有限元模型,进行模拟计算,结果如表2所示。

表2 热点和热带发生的临界速度(r/min)

热带和热点的 临界速度	铜基粉末 冶金材料	PI 密封材料
热带的临界速度	485	1 062
发生1个热点的临界速度	957	6 117
发生2个热点的临界速度	1 612	12 089
发生3个热点的临界速度	2 239	—
发生8个热点的临界速度	5 134	—
发生9个热点的临界速度	5 671	—
发生10个热点的临界速度	6 208	—

由表2可知,PI密封材料发生局部高温热带的临界速度较高,为1 062 r/min。发生1个局部高温热点的临界速度为6 117 r/min,这样的速度已经超过本文传动装置的最高转速6 000 r/min,所以对于PI复合材料的密封环来说,在本文研究的车辆传动装置中不会出现局部高温热点,只可能出现局部高温热带。而对于铜基粉末冶金密封材料,发生局部高温热带的临界速度较PI密封材料要低很多,即更容易发生高温热带。而发生1个局部高温热点的临界速度同样较低,为957 r/min。从表2列出的计算结果来看(发生4~7个热点的临界速度值省略),铜

基粉末冶金材料的密封环,在传动装置的最高转速之内,可以出现9个高温热点,此时对应的临界速度为5 671 r/min。

由于密封环所处的摩擦状态不同,密封热负荷与热失稳也会存在不同的特征。图2和图3分别表示两种不同的密封材料热失稳临界速度与摩擦因数的关系。由于PI密封材料在本文研究的车辆传动装置中只会出现局部高温热带,所以图2所示为PI密封材料局部高温热带的临界速度与摩擦因数的关系。

图2 PI密封材料的热失稳临界速度与摩擦因数的关系

图3 铜基粉末冶金密封材料的热失稳临界速度与摩擦因数的关系

由图2、3可知,随着摩擦因数的增大,发生局部高温热带的临界速度呈现减小的趋势,即越容易发生局部高温热带。特别是在摩擦因数小于0.03的工况下,临界速度的下降趋势最为显著。摩擦因数越小,表面局部接触压力越小,需要较高的旋转速度,才能导致热负荷增大,发生热失稳现象,从而产生局部高温。在摩擦因数达到0.1时,发生局部高温热带的临界速度值达到最小,为755 r/min。

铜基粉末冶金密封材料的热失稳情况与PI密封材料有所不同,铜基粉末冶金密封材料既可以发生局部高温热带,又可以发生局部高温热点。在不

同的摩擦因数下, 发生局部高温热带的临界速度值随着摩擦因数增大而逐渐减小, 如图 3 所示, 即发生热点个数为 0 的位置, 表示发生热带的临界速度值。在摩擦因数为 0.02 的情况下, 铜基粉末冶金密封环发生 1 个高温热点的临界速度为 7 163 r/min, 这个速度已经超过了本文传动装置的最高转速。对于摩擦因数 0.04 的情况下, 发生 3 个高温热点的临界速度为 4 775 r/min, 发生 4 个高温热点的临界速度为 6 088 r/min, 达到了本文传动装置最高转速。由图可知, 随着摩擦因数的增大, 在传动装置的最高转速下, 发生高温热点的个数相应增多。在不同的摩擦状态下, 临界速度曲线基本呈现线性增长。在摩擦因数较大的情况下, 密封摩擦副所处的润滑状态越恶劣, 导致密封接触面的热量增大, 更容易发生热失稳现象。

在密封材料不改变的情况下, 密封结构尺寸是影响热失稳的显著因素。图 4 和图 5 表示密封环尺寸对不同材料热失稳的影响。本文改变密封环径向宽度 R 和轴向厚度 L , 来考察尺寸对热失稳的影响。图 4 所示为径向宽度的变化对发生局部高温热带临界速度的影响。由图可知, 随着径向宽度的增加,

发生高温热带的临界速度随之减小, 在径向宽度从 1 mm 增加到 3 mm 时, 临界速度由 3 692 r/min 下降到 830 r/min, 降幅较为显著, 此时内外径的速度差值逐渐增大, 引起内外径的热流密度的差值增大, 导致热不稳定性增强。而从径向宽度 3 至 5.5 mm 区间内, 密封副接触面积增大, 提高了温度的稳定性, 由此临界速度的降幅会显著减小。

图 5 所示为密封轴向厚度 L 对铜基粉末冶金密封材料热失稳的影响。由图可知, 轴向厚度的变化对铜基粉末冶金密封材料发生局部高温热带(图中热点个数为 0 的位置)和发生高温热点的临界速度影响较为有限。在厚度从 1 mm 增加到 5 mm 时, 热带临界速度由 485 r/min 提高到 836 r/min。发生局部高温热点的临界速度随着轴向厚度的增大而增大, 发生 4 个热点的临界速度, 在厚度从 1 mm 增加到 5 mm 时, 热点临界速度由 2 114 r/min 提高到 2 725 r/min。密封环厚度增加, 有利于温度的传导, 可以缓解温度的非均匀性分布, 提高了密封系统的热稳定性。

3 试验分析

通过有限元方法对热失稳的两种现象进行了建模, 并对不同密封材料出现局部高温热带和热点的临界速度进行了结果分析。为了进一步验证密封热失稳现象及其临界速度值, 并考察有限元模型的有效性, 开展密封温升试验研究。试验是在自主开发设计的密封环综合性能试验台上进行的, 密封环安装在旋转轴上, 旋转轴通过同步带与变频电动机相连。密封温度测试方案如图 6 所示。为了更准确考察热失稳发生状态, 在密封环周向布置 8 个温度传感器, 在周向 90°区间内布置 3 个, 如图 6b 所示。温度传感器的测量范围-30~250℃, 测量误差为全量程的 1%。

由于通过试验方法无法直接测得发生热失稳的临界速度值, 需要通过间接的方法来验证。当密封摩擦副处于热失稳状态时, 温度场的扰动会随着时间的增长。本文依据这样的原则, 并按照 LEE 等^[20]实施的试验规程, 进行密封环的热失稳试验。对于局部高温热带试验, 根据建模计算结果选取两种不同的试验速度, 观察在此速度工况下密封环的温度扰动情况并记录相应的温度数据。对于局部高温热点试验, 根据计算结果选择一种工况进行试验, 记录密封周向三个紧邻温度传感器的试验数据, 观察密封温度扰动且扰动迁移情况, 以此验证热失稳现象及其局部高温热点的临界速度值。选择摩擦因数

图4 密封环尺寸对 PI 材料热失稳的影响

图5 密封环尺寸对铜基粉末冶金材料热失稳的影响

(a) 传感器安装与结构图

(b) 传感器测量位置

图6 温度测试方案

0.07的工况进行试验。根据前期进行的摩擦因数 f - p 值关系的试验结果^[3], 确定试验速度后选择对应的供油压力。密封环试件的材料为PI复合材料和铜基粉末冶金材料, 材料参数、结构尺寸与建模计算的参数保持一致。

对于PI密封材料, 选择两个试验速度进行试验, 记录密封温升值随时间的变化情况, 试验结果如图7所示。由第2节的计算结果可知, 在本文的试验工况条件下, PI材料仅可能出现局部高温热带, 所以选择1个温度传感器的温度数据。由图可知, 在试验转速1 000 r/min时, PI材料的密封环温度随着试验时间逐渐增长, 同时伴随着轻微的温度扰动。而当试验转速提高到1 200 r/min时, 温度的扰动程度增大, 特别在200 s以后出现较为剧烈的扰动, 而且呈现较为规则的周期性, 表明在此速度下, 密

图7 PI密封材料的试验结果

封环出现了热失稳现象。由试验结果可知, PI材料密封环出现热失稳的临界速度值在1 000~1 200 r/min之间。通过计算结果(表2)可知, PI材料密封环出现局部高温热带的临界速度值为1 062 r/min, 处于试验获取的临界速度的区间之内。

对于铜基粉末冶金密封材料, 试验设定恒定转速2 500 r/min, 记录密封面三个相邻位置的温度及其变化情况, 试验结果如图8所示。温度传感器的布置位置如图6b所示, 沿着顺时针方向从上到下依次编号为传感器位置1、2和3。在初始时刻, 密封面三个位置的温度随着试验时间逐渐增大, 温度值基本没有差异。在150 s之后, 位置3的温度值首先出现了轻微波动, 随后200 s时, 位置1的温度同样出现了波动。位置2的温度随着时间逐渐增长, 但未见明显波动。在200 s以后, 位置1的温度最高, 位置3的温度次之, 位置2的温度最低。特别地, 位置1和位置3的温度值出现扰动, 呈现一定的规律性, 两者波形有相似性, 而且位置1和3的波峰有一定的时间差, 由此表明温度存在一定扰动和迁移现象, 密封环在圆周方向存在着非均匀分布, 有局部高温区域出现, 在此转速下出现了热失稳现象, 与建模计算的结论一致。

图8 铜基粉末冶金密封材料的试验结果

为进一步验证密封环的热失稳现象, 对试验后的两种材料的密封试件通过扫描电子显微镜(SEM)进行形貌分析, 如图9所示。图9a为PI密封材料的表面形貌, 由图可知, 在密封面处有明显的带状划痕, 与滑动方向平行, 并且划痕有一定的宽度。由计算结果(表2)和试验结果(图7)可知, PI材料密封表面出现了局部高温热带现象, 在热带处温度较其他部位高, 容易造成摩擦损伤。图9b为铜基粉末冶金密封材料的表面形貌, 由图发现有一明显的圆斑, 在此之上有明显的划痕, 并且有细小的裂纹, 圆斑及其附近有表层剥离的痕迹。由计算结果可知,

在试验速度 2 500 r/min 工况下, 会有局部高温热点产生, 从铜基粉末冶金密封材料的 SEM 分析推断, 表面圆斑是较为典型的高温热点。同时由密封表面形貌分析可知, 密封热失稳现象是导致密封表面磨损的一个主要因素。

(a) PI 密封材料

(b) 铜基粉末冶金密封材料

图9 密封表面形貌

4 结论

(1) 根据密封环热失稳两种现象的特征, 对局部高温热带和热点这两种热失稳现象分别建立求解模型, 基于伽辽金有限元方法, 构建应力场和温度场的耦合模型, 设置温度场的扰动方程, 把热-结构物理场的非均匀分布问题, 转换为矩阵行列式进行求解, 获得发生热失稳的临界速度。

(2) 以密封环的两种典型材料, 即 PI 复合材料和铜基粉末冶金材料为研究对象, 通过热失稳求解模型, 获得了两种不同材料发生热失稳的特征和规律。在本文研究传动装置中, 对 PI 复合材料, 只能出现局部高温热带, 对于铜基粉末冶金材料, 在不同转速下会出现局部高温热带和热点。随着径向宽度的增大, 热带的临界速度随之减小, 随着轴向厚度的增大, 热点的临界速度有增大的趋势。

(3) 通过自主研发的密封环综合性能试验台, 分别对不同密封材料的热失稳现象开展相应的试验研究, 设计热失稳试验方法, 并通过 SEM 进行密封表面形貌分析。试验与模拟结果具有较高的吻合度, 表明通过有限元建模求解, 可以有效模拟和分析密封环不同材料的热失稳现象及其特征, 为掌握不同密封材料的热失稳现象提供了有效模拟手段。

参 考 文 献

- [1] GRONITZKI M, POLL G W G. Optimization of the tribological performance of rectangular seals in automotive transmissions[J]. Proc. IMech. E. Part J: Journal of Engineering Tribology, 2007, 221(3): 259-270.
- [2] 赵一民, 胡纪滨, 吴维, 等. 螺旋槽旋转密封环润滑状态转变预测[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 75-80.
ZHAO Yimin, HU Jibing, WU Wei, et al. Prediction of lubrication condition transition for spiral groove rotary seal rings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 75-80.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 孟德建, 张立军, 阮丞, 等. 摩擦引起的制动器热点问题综述[J]. 同济大学学报, 2014, 42(8): 1203-1210.
MENG Dejian, ZHANG Lijun, RUAN Cheng, et al. Literature survey of friction-induced hot spots in brakes[J]. Journal of Tongji University, 2014, 42(8): 1203-1210.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LEE S W, JANG Y H. Frictionally excited thermoelastic instability in a thin layer of functionally graded material sliding between two half-planes[J]. Wear, 2009, 267(9): 1715-1722.
- [9] DU S Q, ZAGRODZKI P, BARBER J R, et al. Finite element analysis of frictionally-excited thermoelastic

- instability[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 1997, 20(2): 185-201.
- [10] KASEM H, BRUNEL J F, DUFRÉNOY P, et al. Thermal levels and subsurface damage induced by the occurrence of hot spots during high-energy braking[J]. *Wear*, 2013, 270(5): 355-364.
- [11] 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.
- [12] ABDULLAH M A S. Transient behavior of initial perturbation in multidisk clutch system[J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(6): 1164-1171.
- [13] ZAGRODZKI P. Thermoelastic instability in friction clutches and brakes-Transient modal analysis revealing mechanisms of excitation of unstable modes[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2009, 46(11): 2463-2476.
- [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] 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.
- [17] THAKARE M R, MASON J F, OWEN A K, et al. Effect of sliding speed and counterface properties on the tribo-oxidation of brush seal material under dry sliding conditions[J]. *Tribology International*, 2016, 96(4): 373-381.
- [18] 董峰, 沈明学, 彭旭东, 等. 乏油环境下橡胶密封材料在粗糙表面上的摩擦磨损行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(6): 687-694.
- DONG Feng, SHEN Xueming, PENG Xudong, et al. Friction and wear behaviors of rubber sealing material against rough surface under starved-oil condition[J]. *Tribology*, 2016, 36(6): 687-694.
- [19] YEO T, BARBER J R. Finite element analysis of the stability of static thermoelastic contact[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 1996, 19(2): 169-184.
- [20] 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