

航空花键振动磨损预测与实验

赵 广¹, 李盛翔¹, 郭 梅², 孙 红², 孙绪聪¹, 韩清凯¹

- (1. 大连理工大学 辽宁重大装备制造协同创新中心, 辽宁 大连 116024;
2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 基于 Archard 经典磨损理论, 推导振动条件下航空花键的键齿之间的相对运动位移, 考虑实验花键模拟工况循环和振动位移, 对实验花键的磨损进行了预测, 并搭建了航空花键磨损实验台, 开展磨损实验测试。理论预测表明: 磨损量随着磨损系数、传递扭矩的增加而线性增加, 随着齿数、硬度增加而线性减小, 而随着振动量的增大而非线性增大。实验与仿真结果定性一致, 在磨损初期存在一定波动, 磨损后期存在一定的偏差, 这是由于花键制造和安装偏差、理论模型简化以及难以考虑的花键复杂工况等所致。振动对花键磨损具有决定性影响, 因此应合理控制内、外花键所在转子的振幅、提高花键转子设计动平衡等级可以有效延缓花键磨损。

关 键 词: 航空花键; 磨损; 振动; Archard 模型; 转子动力学
中图分类号: V21; TH13 **文献标志码:** A

Prediction and experiment of vibration wear of aviation spline

ZHAO Guang¹, LI Shengxiang¹, GUO Mei², SUN Hong²,
SUN Xucong¹, HAN Qingkai¹

- (1. Collaborative Innovation Center of Major Machine Manufacturing in Liaoning,
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
2. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The relative motion displacement between the teeth of aviation spline under vibration condition was deduced based on the Archard wear theory. The wear of experimental spline was predicted with consideration of the cycle of working conditions and the vibration displacement, and the aviation spline wear experiment rig was set up. Theoretical prediction indicated that wearing capacity linearly increased with the wear coefficient and transmitted torque, decreased with the tooth number and hardness, and nonlinearly increased with the vibration. The experimental results were in good agreement with the simulation results, but the results had a certain fluctuation at the wear initial stage and a certain deviation at the wear later stage, owing to the deviation of spline manufacturing and installation, simplification of theoretical model and the complex working conditions of spline. Vibration has a decisive influence on spline wear, so it is necessary to control the rotor amplitude of internal and external spline and improve the dynamic balance level of spline rotor design, which can

收稿日期: 2017-09-13
基金项目: 国家自然科学基金(11672053, 11472068)
作者简介: 赵广(1981—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事转子动力学研究。

引用格式: 赵广, 李盛翔, 郭梅, 等. 航空花键振动磨损预测与实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2958-2964. ZHAO Guang, LI Shengxiang, GUO Mei, et al. Prediction and experiment of vibration wear of aviation spline[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2958-2964.

effectively reduce spline wear.

Key words: aviation spline; wear; vibration; Archard model; rotor dynamics

在航空器中,为了减轻质量,提高推质比,提高传动安全性和可靠性,要求联轴器具有质量轻、低悬臂力矩、高速、高平衡潜力,以及良好的不对中补偿能力等特点。目前只有花键满足这种苛刻的要求,航空花键结构紧凑、易于安装、应力集中小,对轴和毂的强度削弱小,且更容易补偿安装误差和不对中,单位质量可以传输更多的功率,即使在失效时也不会导致碎片脱落,至今为止还没有任何一种比花键更优越的联轴器能得到军工标准的如此认可^[1]。与地面燃机花键相比,航空花键具有质量轻、传递转速高,运行工况及环境载荷复杂等特点。此外,由于航空花键承受离心力、恒定扭矩、周期性扭矩、附加循环扭力、短暂峰值扭矩、冲击扭矩、不对中负载、共振等机械载荷,导致航空花键的磨损问题广泛存在^[2-3]。

航空发动机转子系统的振动将导致花键产生微动磨损,从而影响整个航空发动机的疲劳寿命。花键常常被视为复杂组件微动损伤的代表,花键的振动与磨损密不可分。很多学者研究了实际负载条件下花键引起的微动磨损、微动损伤、常规疲劳等^[4]。微动作用可以引入损坏磨损和接触有关的裂纹萌生,微动磨损和微动疲劳是微动损伤的主要机制,通常共存于同一接触中^[5]。Madge^[6]针对航空花键的磨损问题,提出一种微动疲劳寿命的预测方法,能够预测一些实验观察到的关键现象,如裂纹的发生等。针对航空发动机中花键疲劳磨损测试实验的高成本、高难度特点,Leen 和 Sum 等^[7-8]简化了花键联轴器的开发和应用的接触测试配置,提出了评估螺旋花键连接摩擦接触的宏观变量的三维研究方法。并通过模拟航空发动机花键的工作条件,分析研究微动导致的磨损问题。刘鸿雁等^[9]的研究表明,可以通过提高花键轴的加工精度、减少花键连接的配合间隙等方式来减小冲击力造成的磨损,以提高花键寿命。磨损状态预测是研究花键磨损特性的重点,Ratsimba 等^[10]提出一种预测复杂花键微动磨损的方法,在已知摩擦因数和速度时预测联轴器受到复杂负载下的磨损情况,并利用 Archard 模型计算了磨损深度。

由于花键及其联接转子工作状态的复杂性,在理论建模时存在诸多假设,通过磨损实验可以检验理论模型假设的合理性和磨损预测结果的正

确性。纵观现有公开文献,花键磨损及动力参数实验多采用如下五类实验方法。对于花键的疲劳测试,Houghton 和 Wavish 等^[11-12]采用一种花键疲劳循环测试装置,测试通过主要和次要循环加载的组合模拟飞行载荷,实现了单个花键的微动加载进行磨损实验,但无法从花键整体的角度掌握综合磨损规律。Weatherford 和 Ku^[13-14]开发了花键磨损测量实验台,可以测量花键倾角不对中、工作温度、不同润滑方式和花键参数等对花键磨损的影响。针对航空花键的微动磨损,Cuffaro 等^[15-16]开展实验和理论研究,实验测试了四个不对中和不同润滑花键的磨损特性,对实验台进行了较大的创新设计,并研究了花键各齿表面压力测量和监测的实验方法。花键磨损与花键啮合刚度密切相关,Robins 等^[17]开发了花键扭转刚度实验装置,获得了加载和卸载过程中花键扭转刚度的迟滞现象。Ku 等^[18]通过模拟涡轮泵传动花键,发现花键转角刚度随着激振力和转速频率的增加而减小。由于航空花键的工况、工作环境与载荷特点,开展实验研究具有很高的挑战性,实验台也难以完全涉及各种状态。所以,应该开发更为专业的实验台,对花键磨损影响因素进行深入的实验研究。

王永亮和孙绪聪等^[19-20]对航空花键的磨损、润滑与振动等进行总结和回顾。经典的 Archard 磨损模型由于物理概念清晰,能够简洁体现影响磨损的主要因素,依然得到较为广泛的应用,如何结合花键转子的实际工况,获得准确的花键工作状态时理论预测的重点。而理论和实验结合,将实验状态与理论预测模型结合起来,可以较为准确的弥补 Archard 磨损模型中参数假设和简化的不足。以此为基础,基于 Archard 经典磨损理论,推导振动条件下花键齿之间的相对运动位移,考虑实验花键模拟工况循环和实验花键振动位移,对实验花键的磨损进行了预测,并搭建了花键磨损实验台,开展磨损实验测试,对理论预测和实验测试结果进行分析和讨论。

1 航空花键磨损分析

在高速、重载工况下,花键键齿表面上啮合接触承受的载荷很大,在传递扭矩过程中,产生很高的温度,这种啮合表面产生的磨损称为黏着磨损。

本章基于 Archard 提出的黏着磨损模型,对航空花键总体磨损量进行了推导,为花键磨损量预测提供了方法。

1.1 基于 Archard 磨损模型的花键磨损分析

Archard 于 1953 年提出的黏着磨损公式为

$$\frac{dV}{ds} = k_s \frac{W}{3\sigma_s} \tag{1}$$

式中 V 为磨损体积, s 为相对位移, W 为啮合点法向接触载荷, σ_s 为材料屈服强度, k_s 为黏着磨损系数。

由于材料屈服强度与硬度有关,因此

$$\frac{dV}{ds} = k \frac{W}{H} \tag{2}$$

式中 k 为无量纲的磨损系数, H 为材料硬度。

设花键啮合点到轴心半径为 r , 扭矩为 T , 花键所有键齿啮合状态相同, 则啮合点法向接触载荷为

$$W = \frac{T}{zr \cos \alpha} \tag{3}$$

那么单个键齿磨损体积公式为

$$V_i = \frac{kWs_i}{H} = \frac{kTs_i}{zrH \cos \alpha} \tag{4}$$

1.2 花键磨损量推导

设花键齿数 z , 压力角 α , 节圆直径 d , 每一个键齿的相对位移为 s_{ij} ($i=1, 2, 3, \dots, z$), 键齿啮合点与圆心的连线与 x 轴的夹角记为 ψ_i , 如图 1 所示。

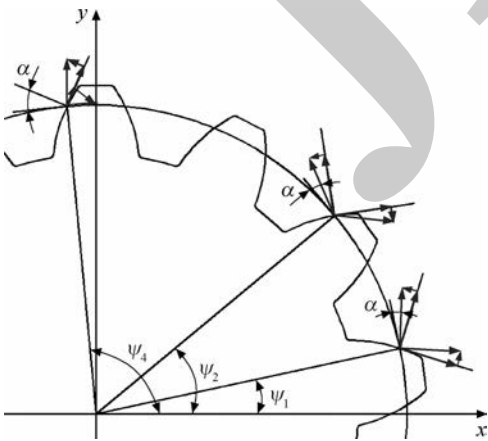


图 1 花键示意图(第一象限)

Fig. 1 Schematic diagram of spline (first quadrant)

根据花键转子系统动力学分析, 不失一般性, 假设某一转速频率 ω_j 时, 内、外花键的相对振动位移

$$x_j = x_{0j} \sin(\omega_j t + \theta_{0j}) \tag{5}$$

$$y_j = y_{0j} \cos(\omega_j t + \theta_{0j}) \tag{6}$$

式中 x_{0j} 、 y_{0j} 为振幅; θ_{0j} 为初始相位角。

花键啮合存在间隙, 假设键齿在顺时针方向与前接触面发生接触, 而后接触面存在间隙没有接触。键齿沿接触面切线方向上的运动位移 a_{ij} 可表示为

$$a_{ij} = x_j \cos(\psi_i - \alpha) + y_j \sin(\psi_i - \alpha) = \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \sin(\psi_i - \phi) \tag{7}$$

式中

$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_1 + \frac{2\pi}{z}(i-1) \\ i &= 1, 2, \dots, z \end{aligned} \tag{8}$$

$$\tan \phi = \frac{y_j}{x_j} \tag{9}$$

将式(5)和式(6)代入式(7)得

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \sqrt{x_{0j}^2 \sin^2(\omega_j t + \theta_{0j}) + y_{0j}^2 \sin^2(\omega_j t + \theta_{0j})} \\ &\quad \sin(\psi_i - \alpha - \phi) = \\ &\quad A_{ij} \sin(\psi_i - \alpha - \phi) \end{aligned} \tag{10}$$

$$A_{ij} = \sqrt{x_{0j}^2 \sin^2(\omega_j t + \theta_{0j}) + y_{0j}^2 \sin^2(\omega_j t + \theta_{0j})} \tag{11}$$

$$\tan \phi = \frac{y_{0j}}{x_{0j}} \tan(\omega_j t + \theta_{0j}) \tag{12}$$

参考航空花键实际运行工况, 对其进行必要的简化, 制定航空花键运行的循环周期, 如图 2 所示。每个大周期运行时间为 70min, 其中 1h 为运行, 10min 为停机冷却。

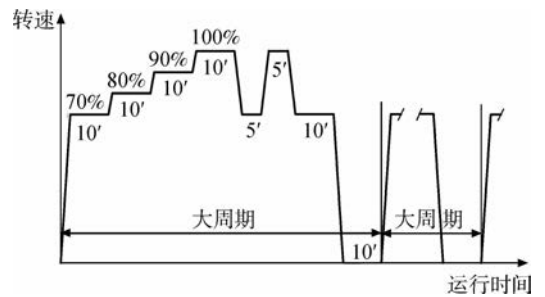


图 2 花键磨损运行循环周期

Fig. 2 Running cycle of spline wear

针对上述转速频率 ω_j , 若其运行时间为 t_j , 则振动周期为

$$n_j = t_j / (2\pi / \omega_j) \tag{13}$$

由于花键在运行过程中时间很长, 周期数很大, 可以认为 n_j 为整数, 而不影响最终结果的精度。因此键齿相对位移可表示为

$$s_{ij} = 4A_{ij}n_j = 2A_{ij}t_j\omega_j / \pi \tag{14}$$

考虑上述公式(4), 某一个齿 i 在振动频率编

号为 j 时磨损量为

$$V_{ij} = \frac{kTs_{ij}}{zrH\cos\alpha} = \frac{2kTt_jA_{ij}\omega_j}{zrH\pi\cos\alpha} \tag{15}$$

考虑一个循环,对不同的振动频率求和,可以得到编号为 i 的齿发生的磨损

$$V_{iT} = \sum_{j=1}^n \frac{2kTt_jA_{ij}\omega_j}{zrH\pi\cos\alpha} \tag{16}$$

而对于整圈键齿,一个循环内总体磨损量为

$$V_T = \sum_{i=1}^z V_{iT} = \sum_{i=1}^z \left(\sum_{j=1}^n \frac{2kTt_jA_{ij}\omega_j}{zrH\pi\cos\alpha} \right) \tag{17}$$

2 航空花键振动磨损预测

表 1 为某航空花键参数,其中,磨损系数比较难以确定,参考文献[21]确定花键磨损系数的范围,实验花键没有润滑,实验前用丙酮清洗晾干。

采用上述花键磨损模型对其磨损量进行预测,额定转速 $N=3\,000\text{ r/min}$,该实验花键运行过程采用循环加载方式,结合实际运行工况,制定循环加载参数,如表 2 所示。其中转速工况为额定工况的百分比,花键振幅为实验测定结果。

表 1 实验花键参数

Table 1 Experiment spline parameters

齿数 z	压力角 a/rad	分度圆直径 d/mm	扭矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$	硬度 H/MPa	磨损系数 $k/\%$
18	$\pi/6$	18	33	1500	0.05~0.5

表 2 花键工作参数

Table 2 Operating parameters of spline

编号	转速工况/ $\%$	运行时间/min	振动频率/Hz	x 向振幅/ μm	y 向振幅/ μm
1	70	10	28	1.75	1.75
2	80	10	32	2.8	2.8
3	90	10	36	3.5	3.5
4	100	10	40	4.2	4.2
5	70	5	28	1.75	1.75
6	100	5	40	4.2	4.2
7	70	10	28	1.75	1.75
8	0	10	0	0	0

每个工况之间切换相对较快,忽略该时间内的磨损量,因而一个循环内,运行时间约为 1 h,中间停止冷却 10 min。计算 320 个循环的花键磨损量,如图 3 所示。图中分别取磨损系数 k 分别为

0.05、0.13 和 0.50,花键磨损随磨损系数线性增大。随着磨损时间持续,花键磨损总量线性增加,在 330 h 循环时,当磨损系数为 0.13 时,花键总磨损量约为 4.48 mm^3 。

将表 1 中花键参数带入公式(17),即可得到各齿在一个循环内总体磨损量分布情况。在全部 330 h 循环运行时间内,花键各齿磨损量分布如图 4 所示。

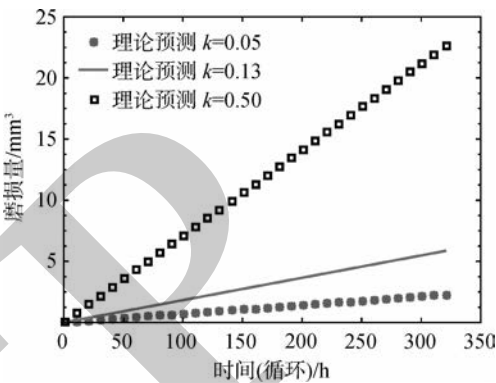


图 3 花键磨损量随运行循环变化规律

Fig. 3 Change rule of spline wear extent with the running cycle

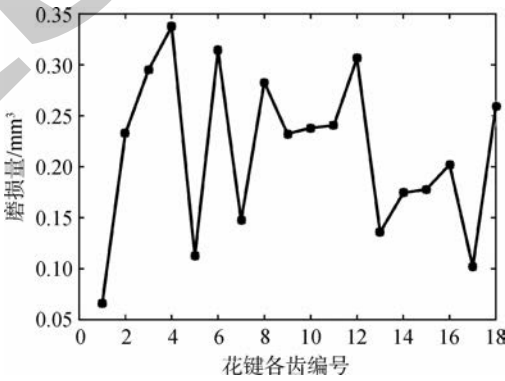


图 4 花键各齿的磨损量分布

Fig. 4 Wear extent distribution of each tooth of spline

图 4 结果表明:由于花键各齿位置不同,其传递的扭矩和压力不同,考虑振动量的影响,因而其磨损量分布不是规则的曲线。以表 2 中 y 向振幅为基准,对其基本振动量等比例放大,随着振动放大系数的不同,花键磨损量变化规律如图 5 所示。

图 5 所示结果表明,随着振动量等比例增大,磨损随之非线性增加,振动量越大,磨损增幅越明显,参考理论模型,磨损量近似与花键振幅的平方成正比关系。

综合以上分析,参考理论模型,花键磨损量随磨损系数、传递扭矩等线性增加,而随齿数、硬度、

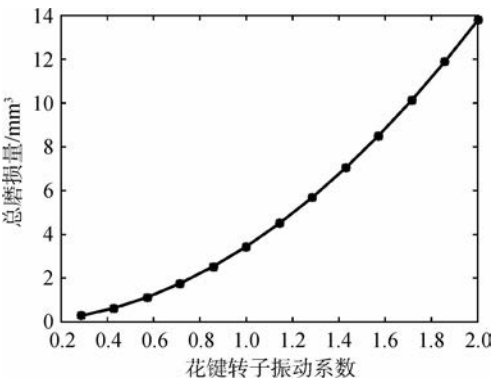


图 5 总磨损量与 y 向振幅的关系

Fig. 5 Relationship between total wear extent and vibration amplitude of y direction

压力角等减小;花键磨损量随振动系数呈近似指数关系增加,随运行循环时间线性增加。因而,要想控制磨损量,首先应尽可能控制花键的振幅,因而在设计时应考虑控制与花键相连接转子的动平衡等级或残余不平衡质量。

3 航空花键振动磨损实验

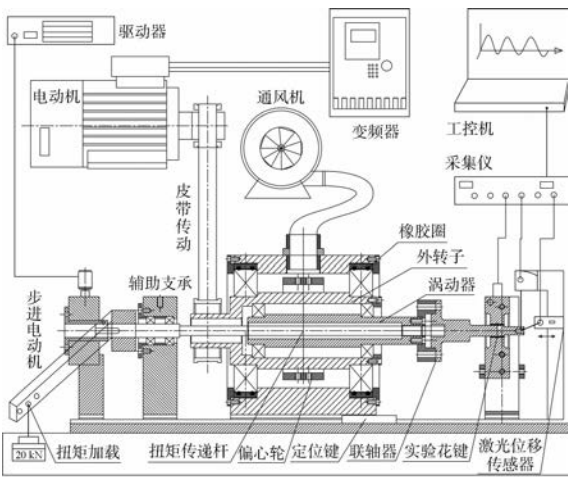
航空花键振动磨损实验器原理框图及实物图如图 6(a)和图 6(b)所示,实验器由驱动系统、扭矩加载系统、磨损测试与振动监测系统、涡动发生系统、主支撑系统、实验件等几部分组成。

实验件花键发生啮合,其啮合扭矩由重力砝码通过扭矩传动杆施加,当花键磨损发生过程中,重力砝码力臂(杆)会旋转一个微小角度,通过精确测量力臂移动的位移,可以在不中断磨损实验的情况下,线性、实时准确获得磨损量。文献[13-14]也已证实,花键磨损体积、磨损量与力臂转动的位移/角度完全吻合。

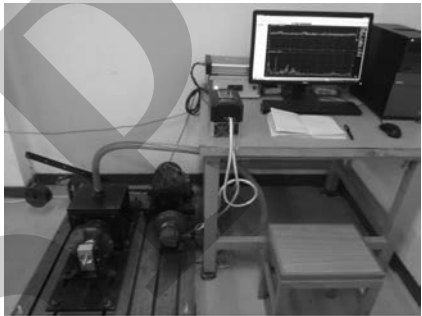
花键振动的施加通过不旋转而涡动/振动的涡动器实现,涡动器在带有偏心轮盘的外转子激励下涡动/振动。通过调节变频电动机,可以控制外转子的振动频率,从而改变花键的振动频率。外转子的每个刚性轴承外侧安装分别安装两列橡胶圈,以放大外转子的振幅,其振幅通过调节偏心轮的偏心量实现。

当实验器调试完成后,先对实验件进行一定时间的磨合实验,待磨损量随时间变化比较稳定以后,正式开始磨损实验测试。

参考上述表 2 所示的仿真工况,设定变频器,实现转速工况的全自动切换,并采用激光位移传感器测试花键两端转轴的水平和垂直向振动,将其稳态振动位移、相位读取分析记录在表 2 中。



(a) 原理框图



(b) 实物图

图 6 航空花键振动磨损实验器

Fig. 6 Vibration wear tester of aviation spline

根据记录的扭矩加载杆的转角计算花键总磨损量,统计花键各工况的磨损结果,绘制磨损曲线,并与理论结果对比,如图 7 所示。图示结果表明,随着工作循环延续,磨损量总体增加。在 0~40 h 时,磨损量增势较快,磨损系数约为 0.14;在 40~70 h 时,增加趋势放缓,磨损系数约为 0.09;在 70~180 h 时,磨损量有一定波动,整体磨损系数约为 0.12;在 180~330 h 时,磨损量呈现下降趋势,磨损系数约为 0.05。对比理论预测,花键磨损量实验结果与理论预测(磨损系数采用 $k=0.13$)曲线吻合较好,由于实验持续时间长,中间停机时间不定,导致个别时刻花键磨损测量变化出现波动。但总体趋势保持一致,在磨损初期存在一定波动,在磨损后期存在一定的偏差;当磨损系数在 0.05~0.30 之间时,磨损预测结果涵盖了实验磨损结果。

花键磨损是一个复杂的曲面接触、摩擦磨损过程,理论磨损模型没有考虑实际实验中的温度、湿度和润滑环境,接触应力分布不均等情况,是理论预测与实验存在差别的原因之一;此外,磨损系数与材料、相对摩擦速度、正压力等有一定联系,

并受复杂实验工况影响,实际中并非一个常数,导致理论预测的误差;由于花键本身不断磨损,其键齿型线也发生一定的变化,因而 Archard 模型的适用性会存在一定的局限性;实验过程中,花键振动随着磨损也发生一定的变化,再加上停机、环境温度变化、测试误差等,也导致实验结果存在一定的偏差^[21]。

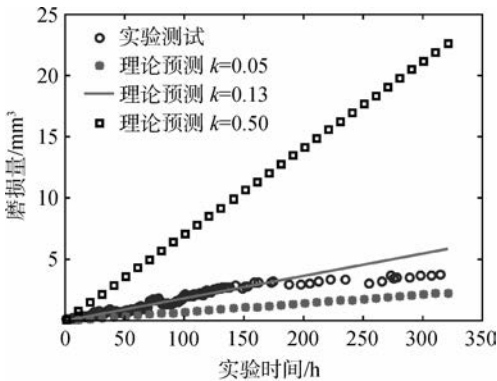


图 7 花键磨损量随实验时间变化曲线
Fig. 7 Spline wear extent change with the runtime

经过约 300 多循环的磨损后,花键磨损后的实物图,如图 8 所示。可以看出,内花键磨损相对较少,相对均匀,而外花键磨损较多,且各齿磨损结果不太均匀。这可能源于安装的不对中、制造偏差等。

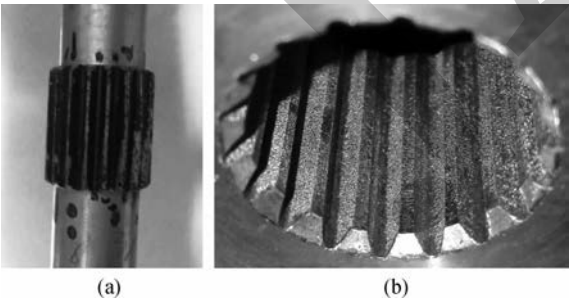


图 8 花键磨损实物图
Fig. 8 Diagram of actual spline wear

4 结 论

基于 Archard 经典磨损理论,推导振动条件下花键齿之间的相对运动位移,考虑实验花键模拟工况循环和实验花键振动位移,对实验花键的磨损进行了预测,并搭建了花键磨损实验台,开展磨损实验测试,对理论预测和实验测试结果进行分析和讨论,主要结论如下:

- 1) 随着磨损系数、传递扭矩增加,磨损量线性增加,而随着齿数、硬度增加,磨损量线性减小,而随着振动量的增大,磨损量随之成平方关系急剧增大。
- 2) 实验结果总体磨损趋势与理论预测结果定性基本一致,在磨损初期存在一定波动,在磨损后期存在一定的偏差;理论与实验误差主要源于实验花键制造和安装偏差、理论模型中的过度简化、难以考虑花键复杂的工作环境等,此外,花键磨损系数可能是一个受实际工况影响而变化的量,Archard 模型在花键型线磨损的适用性等也是导致误差的原因。
- 3) 花键振动量对于花键的磨损影响剧烈,因此,合理控制内外花键所在转子的相对振动、提高花键转子设计动平衡精度等可以有效延缓花键磨损。
- 4) 花键高速运行中,实际磨损受振动、载荷空间分布、工作环境、润滑状态、制造与安装误差等有关,此外,还与花键设计与结构参数有关。花键理论预测模型改进、实验过程中的变量控制等还需要开展更为深入的研究工作。

参考文献:

[1] BROWN H W. A reliable spline coupling[J]. Journal of Engineering for Industry,1979,101(4):421-426.

[2] BOYCE M P. The gas turbine engineering handbook[M]. 3rd ed. Boston: Gulf Professional Publishing, 2006: 521-525.

[3] 陈聪慧. 航空发动机机械系统常见故障[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 55-79.

[4] LEEN S B, MCCOLL I R, RATSIMBA C H H, et al. Fatigue life prediction for a barrelled spline coupling under torque overload[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2003, 217(3): 123-142.

[5] WATERHOUSE R B. Fretting wear[J]. Wear, 1984, 100(1): 107-118.

[6] MADGE J J. Numerical modelling of the effect of fretting wear on fretting fatigue[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2009.

[7] LEEN S B, RICHARDSON I J, MCCOLL I R, et al. Macroscopic fretting variables in a splined coupling under combined torque and axial load[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2001, 36(5): 481-497.

[8] SUM W S, LEEN S B, WILLIAMS E J, et al. Efficient finite element modelling for complex shaft couplings under non-symmetric loading[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, 40(7): 655-675.

[9] 刘鸿雁, 田永红, 付加庆, 等. 试析配合间隙对花键联结失败的影响[J]. 长春大学学报, 2008, 18(2): 41-43.

LIU Hongyan, TIAN Yonghong, FU Jiaqin, et al. Influence of spline matching clearance on spline coupling failure [J]. Journal of Changchun University, 2008, 18(2): 41-43. (in Chinese)

[10] RATSIMBA C H H, LEEN S B, MCCOLL I R, et al. Effect of the coefficient of friction on the fatigue life of splines[J]. Fatigue Damage of Materials, 2003, 40(1): 35-44.

[11] HOUGHTON D, WAVISH P M, WILLIAMS E J, et al. Multiaxial fretting fatigue testing and prediction for splined couplings[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11): 1805-1815.

[12] WAVISH P M, HOUGHTON D, DING J, et al. A multiaxial fretting fatigue test for spline coupling contact[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2009, 32(4): 325-345.

[13] WEATHERFORD W D, VALTIERRA M L, KU P M. Mechanisms of wear in misaligned splines[J]. Journal of Tribology, 1968, 90(1): 42-48.

[14] KU P M, VALTIERRA M L. Spline wear-effects of design and lubrication[J]. Journal of Engineering for Industry, 1975, 97(4): 1257-1263.

[15] CUFFARO V, CURA F, MURA A. Analysis of the pressure distribution in spline couplings[J]. Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 (Vol. 203-210), 2012, 226(12): 2852-2859.

[16] CUFFARO V. Prediction method for the surface damage in splined couplings[D]. Turin: Polytechnic University of Turin, 2013.

[17] ROBIN S, ROBERT R. Tooth engagement evaluation of involute spline couplings[D]. Provo: Brigham Young University, 2008.

[18] KU C P R, WALTON J F J, LUND J W. Dynamic coefficients of axial spline couplings in high-speed rotating machinery[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116: 3(3): 250-256.

[19] 王永亮, 赵广, 孙绪聪, 等. 航空花键研究综述[J]. 航空制造技术, 2017, 522(3): 91-100.

WANG Yongliang, ZHAO Guang, SUN Xucong, et al. Review on research of aviation spline [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 522(3): 91-100. (in Chinese)

[20] 孙绪聪. 航空花键振动磨损仿真与实验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2016.

SUN Xucong. Simulation and experiment study on vibration and wear of aircraft spline[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

[21] 王超, 胡亚辉, 谭雁清, 等. 基于 Archard 磨损理论的滑动导轨磨损率预测模型研究[J]. 润滑与密封, 2014, 39(8): 73-76.

WANG Chao, HU Yahui, TAN Yanqing, et al. Study on wear rate prediction model of slide guides based on archard wear model[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(8): 73-76. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)