

文章编号: 1000-8055(2023)07-1734-06

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230091

几何参数对涡轮榫连接微动疲劳寿命的影响: 仿真

蒋康河¹, 鄢 林², 陈竞炜¹, 徐鲁兵¹, 毛建兴^{3, 4, 5}, 胡殿印^{3, 4, 5}, 王荣桥^{2, 4, 5}

- (1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412000;
2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191;
4. 中小型航空发动机联合研究中心, 北京 100191;
5. 北京航空航天大学 航空发动机结构强度北京市重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 基于涡轮榫连接结构高低周疲劳试验结果, 确定微动疲劳损伤控制参量并建立寿命预测模型。建立涡轮榫连接结构的参数化模型, 开展有限元计算, 结合试验数据分析了等效应力、接触压力、摩擦力、滑移量等多种损伤参量与微动疲劳寿命的相关性, 发现综合考虑疲劳和磨损的 FFD(fretting fatigue damage)参量与寿命的相关性最高, 相关系数达 97%。基于幂函数形式拟合了 FFD 参量与微动疲劳寿命的关系式, 榫连接结构的微动疲劳寿命预测误差在 1.5 倍分散带内。开展了 FFD 参数对几何参数的敏感性分析, 从数值仿真角度获取不同几何参数对微动疲劳寿命的影响规律: 微动疲劳寿命对压力角最敏感, 且呈现负相关性。

关 键 词: 榫连接结构; 微动疲劳; 高低周载荷; 几何参数; 微动损伤参量

中图分类号: V231.95

文献标志码: A

Effect of geometric parameters on fretting fatigue life of turbine attachment: numerical simulation

JIANG Kanghe¹, YAN Lin², CHEN Jingwei¹, XU Lubing¹, MAO Jianxing^{3, 4, 5},
HU Dianyin^{3, 4, 5}, WANG Rongqiao^{2, 4, 5}

- (1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412000, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;
4. United Research Center of Mid-Small Aero-Engine, Beijing 100191, China;
5. Beijing Key Laboratory of Aero-Engine Structure and Strength, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the high and low cycle fatigue test results of turbine attachment, the fretting fatigue damage control parameters were determined and the life prediction model was established. Parametric model of turbine attachment was established. The correlation between various damage parameters such as equivalent stress, contact pressure, friction stress, related slip distance and the fretting fatigue life was further analyzed by finite element analysis, finding that the FFD (fretting fatigue damage)

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51875020, 51905020, 52022007); 国家科技重大专项(J2019-IV-0009-0077)

作者简介: 蒋康河(1989—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事中小型涡轴发动机涡轮结构设计方面的研究。

通信作者: 毛建兴(1989—), 男, 副研究员、博士生导师, 博士, 主要从事结构强度可靠性方面的研究。E-mail: maojx@buaa.edu.cn

引用格式: 蒋康河, 鄢林, 陈竞炜, 等. 几何参数对涡轮榫连接微动疲劳寿命的影响: 仿真[J]. 航空动力学报, 2023, 38(7): 1734-1739. JIANG Kanghe, YAN Lin, CHEN Jingwei, et al. Effect of geometric parameters on fretting fatigue life of turbine attachment: numerical simulation[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(7): 1734-1739.

parameters with integrated consideration of fatigue and wear had the highest correlation with the life, and the correlation coefficient could reach 97%. Based on the power function, the relationship between the FFD parameters and the fretting fatigue life was fitted, and the predicted fretting fatigue life of the turbine attachment was within 1.5 times scatter band. The sensitivity analysis of FFD parameters to geometric parameters was carried out, and the effects of different geometric parameters on fretting fatigue life were obtained from the perspective of numerical simulation: the fretting fatigue life was most sensitive to the pressure angle, which showed a negative correlation.

Keywords: attachment; fretting fatigue; high and low cycle loads; geometric parameter; fretting fatigue damage parameter

涡轮盘和涡轮叶片之间的枞树形榫连接结构具有结构与载荷的双重复杂性。在离心载荷、气动载荷和热载荷的综合作用下, 涡轮榫连接结构接触表面存在法向压力, 并叠加小幅相对滑移, 易发生微动疲劳失效^[1-3]。微动疲劳在应力水平低于常规疲劳强度 20%~30% 时即可引起裂纹成核^[4], 严重削弱结构的疲劳性能。早期的榫连接结构疲劳寿命研究主要以常规的低周疲劳损伤为主。随着高推质比、低油耗的现代先进航空发动机的发展, 榫连接结构微动疲劳失效问题日益突出。因此, 清晰理解涡轮榫连接结构的微动疲劳损伤机理并提供有效的评估方法, 就成为先进航空发动机研制中亟须解决的重要问题。

围绕榫连接结构微动疲劳问题, 国内外学者开展了大量研究。由于微动疲劳属于多轴疲劳问题的范畴, 临界平面法被广泛用于微动疲劳的寿命预测中, 典型的有: SWT(Smith-Watson-Topper 参量)^[5]、FS(Fatemi-Socie 参量)^[6]、SSR(最大切应力差)^[7]、MSSR(修正的 SSR 参量)^[8], 其中基于拉伸模式的 SWT 参量对榫连接结构的适用性更好^[9-10]。此外, 连续损伤理论(CDM)^[11]经过多年的发展也被引入微动疲劳问题^[12-13], 并在榫连接结构中得到应用^[14-15]。在此基础上, 由于微动疲劳是疲劳和磨损的综合作用, 为了表征磨损损伤, 学者们将滑移量^[16]、摩擦功^[17-19]等修正到寿命模型中, 结果显示更优异的预测精度。

然而, 目前的研究仍存在以下局限: 一是大部分研究主要针对钛合金压气机榫连接结构, 对于镍基高温合金的涡轮榫连接结构的研究较少; 二是上述微动损伤参量大多是针对特定结构, 或为单卡头式、桥式等简化结构, 或为燕尾形榫连接结构, 当结构尺寸和形式变化时, 损伤参量能否适用尚存疑问; 三是针对的工况较为单一, 一般为低周载荷, 各类微动损伤参量在复杂载荷下的

适用性尚不明确。要实现涡轮榫连接结构微动疲劳性能的准确评估, 上述局限是亟须克服的问题。因此, 本文在高低周载荷下开展了多种构型的涡轮榫连接结构微动疲劳试验, 结合有限元仿真手段, 探究能够准确表征榫连接结构微动疲劳损伤的参量。

1 参数化建模及有限元分析

1.1 榫连接结构参数化建模

为了研究不同结构几何参数下的榫连接结构的微动疲劳行为, 以某型发动机涡轮榫连接结构原始构型为基础, 参照 HB 5965-2002《枞树形榫头、榫槽尺寸标注与技术要求》定义, 如图 1 所示, 开展榫连接结构参数化建模。本文重点研究压力角 β 、齿形角 γ 和齿距 t 等关键尺寸参数对微动疲劳的影响, 取值范围如表 1 所示。

1.2 榫连接结构有限元模型

本文采用 ABAQUS 开展榫连接结构应力分布的有限元模拟。依据试验件及夹具设计方案,

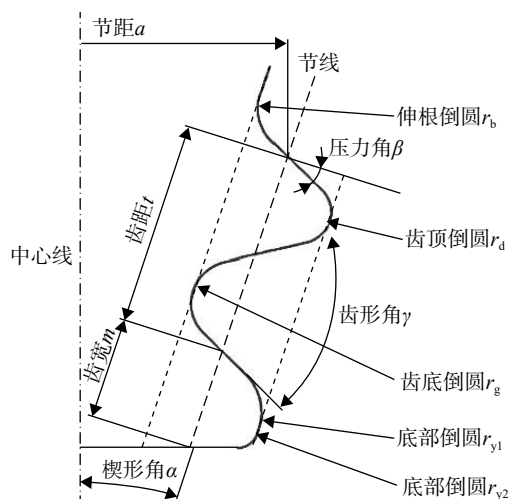


图 1 枞树型榫连接结构几何参数示意图

Fig. 1 Geometric parameters of fir-type attachment

表 1 榫连接结构关键尺寸参数取值范围

Table 1 Value range of key dimensional parameters for attachment

尺寸参数	取值范围
压力角 $\beta/(\circ)$	22.5~32.5
齿形角 $\gamma/(\circ)$	55~65
齿距 t/mm	4.797~5.297

采用平面应变 CPE4 单元建立包含榫头试验件、榫槽试验件和榫槽夹具的二维有限元模型,如图 2 所示,其中榫头与榫槽模拟件、榫槽模拟件与固定夹具之间设置为摩擦接触,摩擦因数设为 0.2;榫槽、榫头接触区域的网格尺寸为 0.02 mm;榫槽夹具底部约束所有自由度的位移,榫头顶部施加集中力,其值对应试验载荷的最大值(即低周载荷最大值与高周载荷幅值之和)。

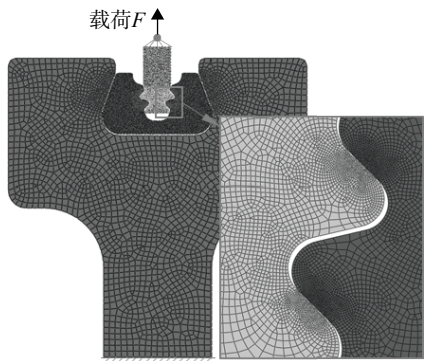


图 2 榫连接结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of attachment

2 微动疲劳损伤参量的选取

2.1 传统疲劳损伤控制参量

为了寻找表征微动疲劳损伤机制的参量,需要在上述有限元模型的基础上开展考虑接触行为的有限元分析。

初始构型的计算结果如图 3 所示,榫头 von Mises 等效应力 $\sigma_{\text{von Mises}}$ 的最大值为 1 071 MPa,位于第 2 齿接触面上边缘,与试验观测到的裂纹萌生位置相符;榫槽 von Mises 等效应力的最大值为 1 200 MPa,位于第 1 齿接触面下边缘,尽管榫槽的最大应力高于榫头,但在 630 °C 考核条件下, GH4720Li 的抗疲劳性能优于 DD412,因此试验中榫头的寿命仍短于榫槽。

由于榫头第 2 齿的应力水平较高且裂纹均在第 2 齿先萌生,故提取第 2 齿接触面上 von Mises 等效应力、接触压力、摩擦力和相对滑移的最大

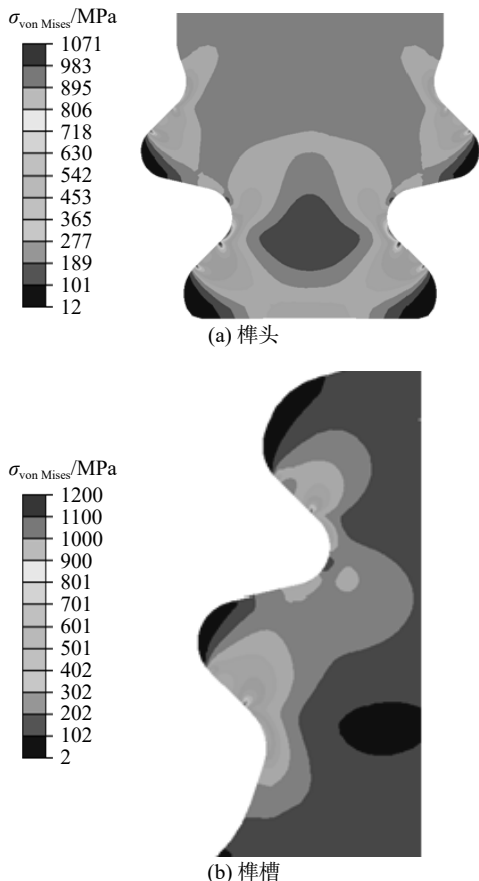
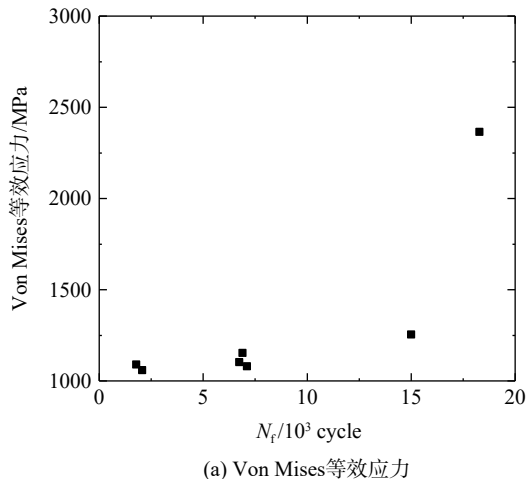


图 3 试验载荷下榫连接结构 von Mises 等效应力分布

Fig. 3 Von Mises stress distribution of attachment under test load

值,分析与微动疲劳寿命(N_f)的相关性,如图 4 所示。微动疲劳与 von Mises 等效应力(图 4(a))、接触压力(图 4(b))和摩擦力(图 4(c))总体呈现正相关的趋势,与一般的应力-寿命存在负相关的认识相悖。因此,上述 3 种参数均不能直接表征微动疲劳性能。类似地,可以看出,滑移距离与微动疲劳寿命大体呈现负相关趋势(图 4(d))。如以常用的幂函数形式拟合该关系,相关系数 R^2



(a) Von Mises 等效应力

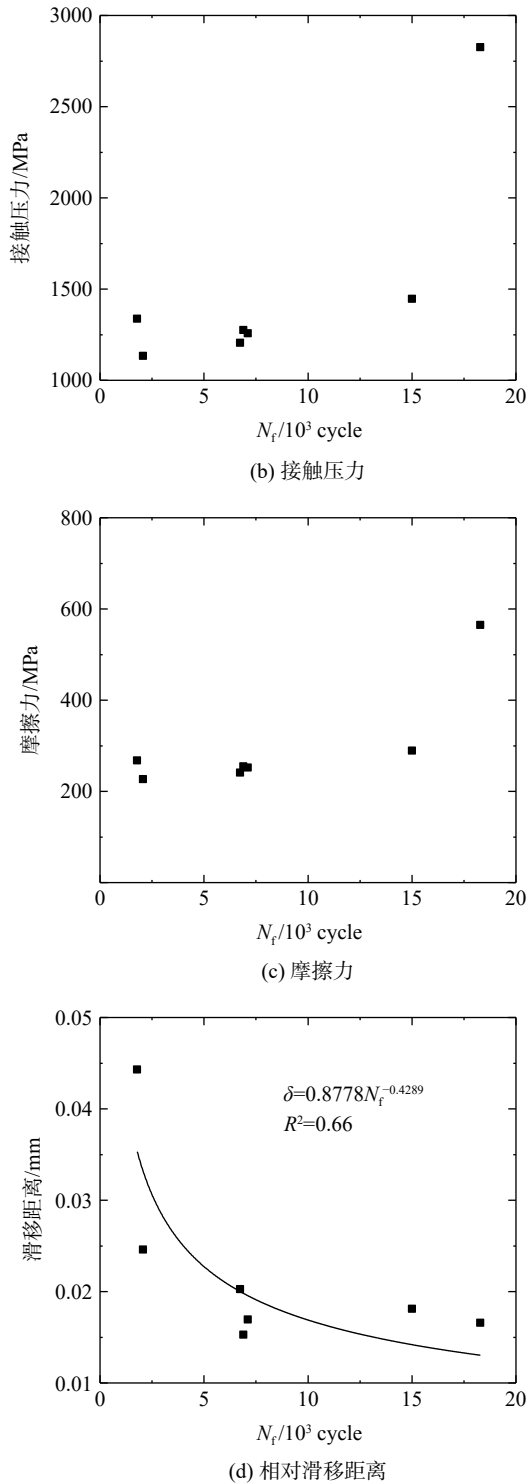


图 4 损伤参量与微动疲劳寿命的相关性
Fig. 4 Correlation between damage parameters and fretting fatigue life

仅为 0.66, 相关性较低, 难以准确表征微动疲劳性能。综上所述, 很难建立单一参数与微动疲劳寿命的关系。注意到微动疲劳是循环应力和磨损共同作用的结果, 需要进一步采用新的损伤控制参量实现榫连接结构微动疲劳寿命的精准量化。

2.2 微动疲劳损伤控制参量

Ruiz 等^[17] 根据试验观察提出了结合滑移振幅和应力分量的损伤控制参量。具体为, 采用类似摩擦功的形式($\tau\delta$)表征磨损的影响, 进一步考虑到拉伸应力会影响疲劳裂纹的萌生, 采用 FFD(fretting fatigue damage, 记为 D_{ff}) 参量确定微动疲劳裂纹萌生的位置。

$$D_{ff} = \sigma\tau\delta \quad (1)$$

式中 τ 为表面的摩擦力, δ 为相对滑移距离, σ 为垂直于接触面法向的正应力。

结合前述有限元分析结果, 计算不同结构接触面上的 FFD 参量分布如图 5(a) 所示, 其中接触面归一化距离定义为节点到接触下边缘的距离与接触长度的比值。各构型最大值的位置略有差异, 但均在接触面上边缘附近。FFD 参量最大值($D_{ff,max}$)与疲劳寿命的关系如图 5(b) 所示, 采用式 (2) 所示的幂函数表达式拟合该关系, 相关系数 R^2 为 0.97, 可见 FFD 参量可以准确地反映出微动

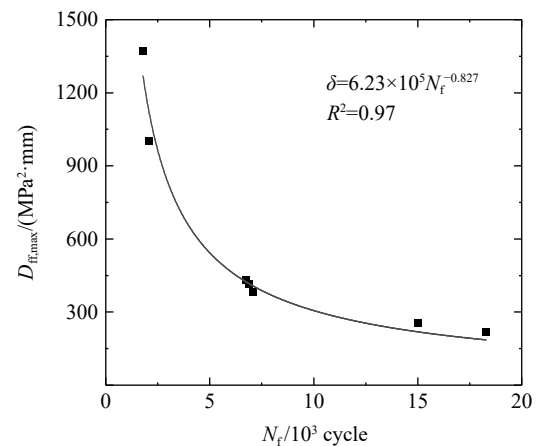
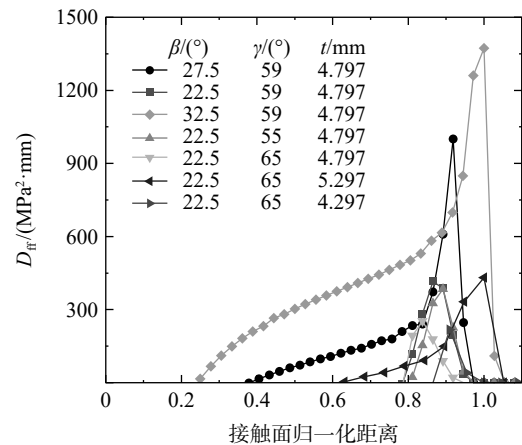


图 5 榫连接结构 FFD 参量计算结果

Fig. 5 Calculation of FFD parameters for attachment

疲劳性能的高低。

$$D_{ff} = AN_f^B \quad (2)$$

式中 N_f 为微动疲劳寿命, A 、 B 为模型参数, 由试验数据拟合得到, 分别为 6.23×10^5 、 -0.827 。

进一步利用式(2)来计算榫连接结构的微动疲劳寿命, 预测结果如图 6 所示, 所有结果均在 1.5 倍分散带内, 证明 FFD 参量表征榫连接结构微动疲劳损伤的合理性。

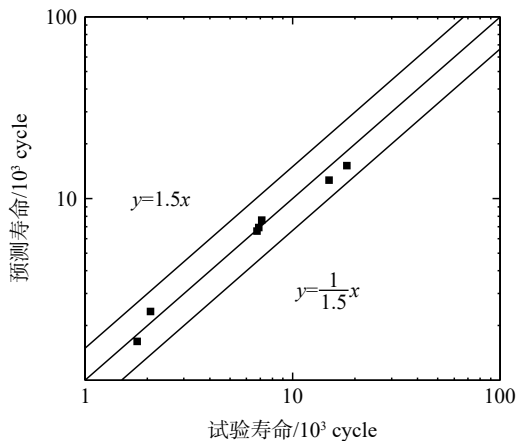


图 6 榫连接结构微动疲劳寿命预测结果

Fig. 6 Prediction results of fretting fatigue life of attachment

3 微动疲劳寿命的几何敏感性分析

3.1 面向微动疲劳损伤的几何敏感性分析

基于涡轮榫连接参数化模型及静强度分析模型, 量化微动疲劳损伤控制参量 FFD 随关键几何尺寸(压力角 β 、齿形角 γ 和齿距 t)的变化规律, 如图 7 所示。据此量化参量 FFD 对关键几何尺寸变化的敏感度, 结果如图 8 所示。其中, 敏感度表示为

$$S = \max_{i=1}^n \left(\frac{\Delta Y_i}{Y_i} / \frac{\Delta X_i}{X_i} \right) \quad (3)$$

式中 Y 为因变量, 即 FFD 参量; X 为自变量, 即关键几何尺寸; $i=1, \dots, n$, n 为数据点总数。

可以看出, FFD 参量与压力角 β 、齿距 t 呈正相关性, 与齿形角 γ 呈负相关, 受压力角 β 影响最为显著, 其次是齿距 t , 齿形角 γ 影响最小。

3.2 面向微动疲劳寿命的几何敏感性分析

在 FFD 参量基础上, 进一步结合微动疲劳寿命模型, 量化微动疲劳寿命随关键几何尺寸(压力角 β 、齿形角 γ 和齿距 t)的变化规律, 如图 9 所示。

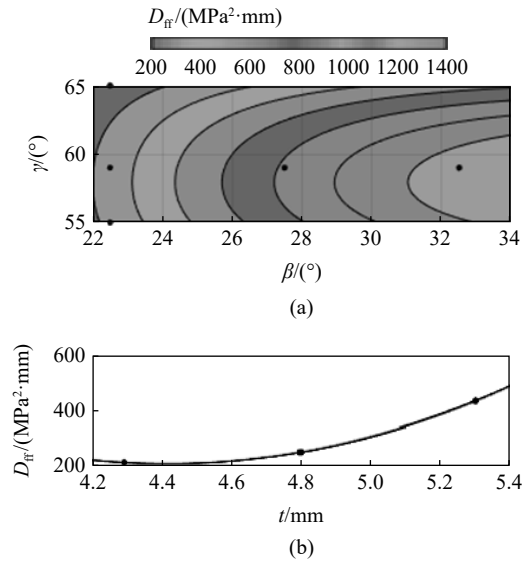


图 7 FFD 参量随关键几何尺寸的变化规律

Fig. 7 Variance of FFD on key dimensional parameters

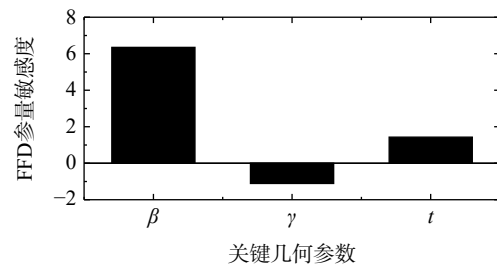


图 8 FFD 参量对关键几何尺寸的敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of FFD on key dimensional parameters

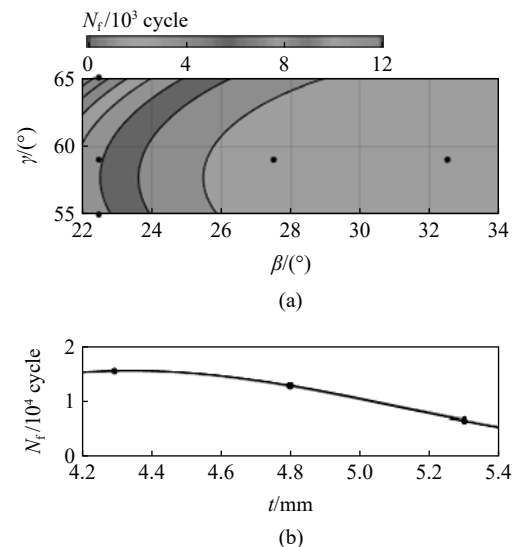


图 9 微动疲劳寿命随关键几何尺寸的变化规律

Fig. 9 Variance of fretting fatigue life on key dimensional parameters

同样采用式(3)量化微动疲劳寿命对关键几何尺寸变化的敏感度, 结果如图 10 所示。可以看出,

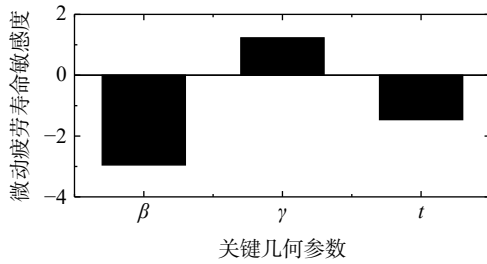


图10 微动疲劳寿命对关键几何尺寸的敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of fretting fatigue life on key dimensional parameters

微动疲劳寿命与压力角 β 、齿距 t 呈负相关性,与齿形角 γ 呈正相关,受压力角 β 影响最为显著,其次是齿距 t ,齿形角 γ 影响最小。

4 结 论

本文基于高低周载荷下的榫连接结构微动疲劳试验结果,结合有限元模拟,提取并验证了表征榫连接结构微动疲劳损伤的参量,相关结果可为高低周疲劳载荷下榫连接结构寿命的精准预测提供理论及方法支撑。主要结论如下:

1) 通过多种参数的对比发现,FFD参量与微动疲劳寿命相关性好,相关系数 R^2 可达97%,能较好地反映榫连接部位的微动疲劳性能,可为榫连接结构的优化设计提供理论依据。

2) 基于FFD参量,采用幂函数的形式建立微动疲劳寿命模型,预测寿命均在1.5倍分散带内,满足榫连接结构微动疲劳寿命预测精度要求,可以用于设计阶段的榫连接结构微动疲劳寿命评估。

3) FFD参量、微动疲劳寿命与压力角 β 和齿距 t 分别呈现正相关性、负相关性,而齿形角 γ 与之相反,同时两者受压力角 β 影响最为显著,其次是齿距 t ,齿形角 γ 影响最小。

参考文献:

- [1] 周仲荣. 微动磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 何明鉴. 机械构件的微动疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [3] WATERHOUSE R B. Fretting fatigue[J]. Materials Science and Engineering, 1976, 37(1): 77-98.
- [4] BHATTI N A, WAHAB M A. A numerical investigation on critical plane orientation and initiation lifetimes in fretting fatigue under out of phase loading conditions[J]. Tribology International, 2017,

- 115(11): 307-318.
- [5] SZOLWINSKI M P, FARRIS T N. Mechanics of fretting fatigue crack formation[J]. Wear, 1996, 198(1/2): 93-107.
- [6] LYKINS C. An evaluation of parameters for predicting fretting fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(8): 703-716.
- [7] LYKINS C D, MALL S, JAIN V. A shear stress-based parameter for fretting fatigue crack initiation[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001, 24(7): 461-473.
- [8] NAMJOSHI S A, MALL S, JAIN V K, et al. Fretting fatigue crack initiation mechanism in Ti-6Al-4V[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2002, 25(10): 955-964.
- [9] 徐友良, 崔海涛, 陈伟. 基于临界面法的燕尾榫连接结构微动疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 489-493.
XU Youliang, CUI Haitao, CHEN Wei. Fretting fatigue life prediction based on critical plane approach for dovetail joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 489-493. (in Chinese)
- [10] HU C, WEI D, WANG Y, et al. Experimental and numerical study of fretting fatigue in dovetail assembly using a total life prediction model[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 205: 301-318.
- [11] LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer, 1992.
- [12] ZHANG T, MCHUGH P E, LEEN S B. Finite element implementation of multiaxial continuum damage mechanics for plain and fretting fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44(2): 260-272.
- [13] HOJJATI-TALEMI R, WAHAB M A, GINER E, et al. Numerical estimation of fretting fatigue lifetime using damage and fracture mechanics[J]. Tribology Letters, 2013, 52(1): 11-25.
- [14] 李奇璇. 圆弧榫连接结构微动疲劳寿命预测模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
LI Qixuan. Research on fretting fatigue life prediction of dovetailed joint with arc contact surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [15] 邢泽宇, 张宏建, 于子强, 等. ZSGH4169榫连接结构微动疲劳试验[J]. 航空动力学报, 2021, 36(11): 2410-2417.
XING Zeyu, ZHANG Hongjian, YU Ziqiang, et al. Fretting fatigue test of ZSGH4169 dovetail structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(11): 2410-2417. (in Chinese)
- [16] 石炜, 温卫东, 崔海涛. 榫连接结构微动疲劳寿命研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(1): 104-110.
SHI Wei, WEN Weidong, CUI Haitao. Research on fretting fatigue life of dovetail joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(1): 104-110. (in Chinese)
- [17] RUIZ C, BODDINGTON P, CHEN K C. An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint[J]. Experimental Mechanics, 1984, 24(3): 208-217.
- [18] DING J, SUM W S, SABESAN R, et al. Fretting fatigue predictions in a complex coupling[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(7): 1229-1244.
- [19] 古远兴, 温卫东, 崔海涛. 高低周载荷作用下燕尾榫结构的微动疲劳寿命预测[J]. 推进技术, 2008, 158(2): 240-243.
GU Yuanxing, WEN Weidong, CUI Haitao. Prediction of fretting fatigue life of dovetail joint under high-cycle and low-cycle load[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 158(2): 240-243. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)