

燕尾榫微动磨损对裂纹萌生影响的有限元研究

陈丽华¹, 黄柯文², 秘京川², 李浩群²

(1. 北京工业大学 数学统计学与力学学院, 北京 100124;

2. 北京工业大学 机械与能源工程学院, 北京 100124)

摘 要: 研究了燕尾榫连接结构微动磨损对裂纹萌生的影响。基于球/平面模型, 通过与已有文献对比验证了有限元微动磨损模拟和 Smith-Watson-Topper (SWT) 参数值计算的正确性。建立燕尾榫连接结构二维有限元分析模型, 计算接触表面的 SWT 参数值, 通过对比发现: 随着循环次数的增加磨损加剧导致 SWT 参数值下降, 即微动磨损降低了裂纹萌生的风险; 同时还发现未发生磨损时, SWT 参数最大值出现在接触表面上边缘, 磨损后由于上边缘磨损量远大于下边缘, SWT 最大值转移到下边缘, 即燕尾榫裂纹萌生的位置从未磨损时的上边缘转移到磨损后的下边缘。考虑微动磨损的影响, 讨论了摩擦因数、底角和离心力对燕尾榫 SWT 参数值的影响规律, 研究发现: 随着摩擦因数的减小表面接触状态从部分滑移变成完全滑移, 表面磨损量逐渐增加, SWT 参数值会不断减小; 45°的燕尾榫底角与其他角度时相比, SWT 参数值最小且结构最可靠; 随着离心力增加接触表面变形和应力都会增大, 所以 SWT 参数值会逐渐增加。

关 键 词: 燕尾榫; 微动磨损; 微动疲劳; 有限元分析; 裂纹萌生

中图分类号: V263.5; TH117

文献标志码: A

Finite element study on effect of fretting wear on crack initiation of dovetail

Chen Lihua¹, Huang Kewen², Mi Jingchuan², Li Haoqun²

(1. School of Mathematics, Statistics and Mechanics,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The influence of fretting wear on crack initiation of dovetail joint structure was studied. The ball/plane finite element model was established, and the method of the fretting wear simulation and Smith-Watson-Topper (SWT) parameter calculation was given and verified by comparing with existing literature. A two-dimensional finite element analysis model of dovetail structure was established, and SWT parameter values of contact surface were calculated. It was found that fretting wear made stress distribution uniform and the SWT parameter values decline, so the risk of crack initiation was reduced. Because the wear on the upper edge was much greater than that on the lower edge, the location of SWT maximum value transferred from the upper edge of initial stage (no wear) to the lower edge, then, fretting wear made crack initiate on the lower edge. Considering fretting wear, the influences of friction coefficient, base angle and centrifugal force on SWT parameters of dovetail were discussed, and the fretting behavior between contact surfaces of dovetail structure was studied. The results showed that with the decrease of

收稿日期: 2025-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(12332001)

作者简介: 陈丽华(1971—), 女, 教授, 博士, 研究方向为表面技术、非线性振动。E-mail: chenlihua@bjut.edu.cn

通信作者: 李浩群(1973—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为微动磨损、表面技术。E-mail: lihaoqun@bjut.edu.cn

引用格式: 陈丽华, 黄柯文, 秘京川, 等. 燕尾榫微动磨损对裂纹萌生影响的有限元研究[J]. 航空动力学报, 2026, 41(9): 20250151. Chen Lihua, Huang Kewen, Mi Jingchuan, et al. Finite element study on effect of fretting wear on crack initiation of dovetail[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(9): 20250151.

friction coefficient, the surface contact state changed from partial slip to complete slip, and the increase of surface wear resulted in the decline of SWT parameter. When the dovetail angle was 45° , the SWT parameters value was the smallest and the structure was the most reliable. With the enlargement of centrifugal force, the contact surface deformation and stress increased, so the SWT parameter could gradually augment.

Keywords: dovetail; fretting wear; fretting fatigue; finite element analysis; crack initiation

燕尾榫连接结构(叶片根部加榫盘)因其具有良好的稳定性和可靠性广泛应用于航空发动机中。据统计,在航空发动机结构性故障中有高达 20% 的事故是由燕尾榫连接结构失效引起的^[1]。因结构长期受到往复离心力和气动载荷的影响,叶片根部和榫盘会发生微动而产生微动损伤^[2],包括微动磨损和微动疲劳。随着微动损伤的加剧,最终会导致燕尾榫连接结构失效,因此研究燕尾榫连接结构的微动磨损行为和微动疲劳性能尤为重要。

随着航空工业的高速发展,航空发动机中燕尾榫连接结构发生的微动损伤现象引起了国内外学者们的关注,尤其是微动疲劳带来的裂纹萌生和疲劳寿命减小问题被广泛研究。Hu 等^[3]采用实验和有限元方法对燕尾榫组件的微动疲劳进行了研究,结果表明试件叶片根部上下两侧均存在裂纹,裂纹将在接触区上侧附近开始萌生,方向几乎垂直于接触面。Shi 等^[4]根据实验和有限元结果预测了裂纹萌生位置和微动疲劳破坏的循环次数,并且发现裂纹由切向拉应力控制。Zhou 等^[5]通过有限元模拟分析了影响燕尾榫连接结构微动疲劳寿命的敏感因素,发现微动疲劳对接触区宽度和接触形式最为敏感,在节省成本和满足结构强度要求的前提下,摩擦因数应尽可能小。一些学者在研究燕尾榫连接结构的微动疲劳性能时,还观察到燕尾榫接触表面存在着微动磨损现象。Yang 等^[6]通过对燕尾榫头试件进行疲劳实验,发现接触表面存在着微动磨损现象。Qu 等^[7]研究了燕尾榫试样的微动疲劳行为,发现微动磨损引起的断裂主要发生在接触表面的上边缘,靠近上边缘的接触面磨损较为严重。

由于实际工程中燕尾榫部件接触太过复杂,为了便于进行实验和观察结果,学者们通常将接触部件和工作条件进行简化,使用简化模型来研究燕尾榫微动磨损行为。Fouvry 等^[8]通过圆柱/平面接触和更像叶片根部/涡轮盘结构的销/平面接触,研究了 Ti-6Al-4V/Ti-6Al-4V 接触的微动磨

损行为,结果表明能量磨损率随着接触尺寸的增加而降低。Heredia 等^[9]通过圆柱/平面接触实验研究了 Ti-6Al-4V 钛合金的微动磨损行为。Wang 等^[10]将燕尾榫部件简化为球/平面模型研究了不同载荷和位移条件下 Ti-6Al-4V 钛合金的微动磨损行为,发现随着法向力的增加,微动区域从完全滑移区域(GSR)转变为部分滑动区域(PSR)。近年来已有学者针对实际榫连接结构展开了微动磨损的研究。Zhang 等^[11]建立了三维二齿的榫连接结构有限元模型。考虑了微动方向、载荷大小和气动载荷等因素对微动磨损的影响。Szolwinski 等^[12]基于有限元法和能量模型,建立了二维燕尾接触(叶片根部/盘界面)微动磨损有限元模型,研究底角、摩擦因数、离心力及温度对微动磨损的影响,结果表明微动磨损主要发生在接触区域的边缘,随着摩擦因数的降低,运行状态从部分滑移状态变为整体滑移状态,下边缘的磨损逐渐增加,并超过上边缘的磨损。Song 等^[13]建立了三齿榫连接结构的有限元模型,对复合载荷下异种材料接触对的微动磨损问题进行了数值研究,结果表明最大磨损发生在第一齿的接触表面上,并且在不同的载荷循环中,表面将显示不同的局部滑移状态,滑移区域总是从两个接触边缘延伸到内部,第二齿和第三齿有少量磨损,在整个磨损过程中基本上处于黏滞状态。

在微动过程中,磨损会导致接触面的应力重新分布,使微动疲劳裂纹起裂位置和起始时刻发生变化。考虑磨损效应下的疲劳断裂过程可以更准确地预测结构疲劳寿命^[14]。Zou 等^[15]考虑了弹性、弹塑性和微动磨损行为对铁路车轴微动疲劳的影响,模拟和实验结果的比较表明:微动疤痕的轮廓演变主要是由微动磨损引起的,与弹性疲劳和弹塑性疲劳方法相比,磨损疲劳方法可以更好地预测微动划痕宽度和裂纹起始位置。Xue 等^[16]建立了航空发动机渐开线花键联轴器的微动损伤预测模型。通过有限元仿真和实验验证了微动损伤机理。结果表明航空发动机渐开线花键联轴器

的微动损伤失效模式以微动磨损为主, 微动疲劳与微动磨损相互竞争、相互影响。Llavori 等^[17]建立了球/平面有限元模型, 提出了超高强度钢微动疲劳寿命估算的磨损疲劳联合数值方法, 结果表明裂纹萌生和裂纹扩展下的寿命百分比取决于平均应力。Poon 等^[18]建立有限元圆柱体-平板模型, 用于海底电缆导体的多轴微动疲劳和磨损模拟, 研究表明在铜导体材料微动疲劳寿命预测中忽略微动磨损的影响会导致寿命预测显著降低。

通过实验和数值模拟的方法, 已有文献研究了球/平面、车轴等结构微动磨损对微动疲劳的影响, 但是针对燕尾榫连接结构, 球平面模型^[19]无法揭示实际损伤位置。考虑叶片根部/榫盘(面/面)接触模型的微动磨损作用下微动疲劳性能研究仍很少见。本文使用有限元软件 ABAQUS 中的用户自定义子程序 Umeshmotion, 同时结合网格自适应技术实现模拟接触表面磨损过程并使用能量磨损公式来计算磨损量, 将磨损结果与 Smith-Watson-Topper(SWT)疲劳损伤准则相结合分析 SWT 值。讨论了考虑磨损情况下燕尾榫摩擦因数、底角和离心力对燕尾榫微动疲劳行为的影响规律, 用于预测燕尾榫连接结构接触面间的微动行为。

1 模型和方法

1.1 能量磨损模型

基于磨损量与摩擦界面之间消耗能量成正比的假设提出了能量磨损模型^[20], 耗散的能量磨损模型能够考虑摩擦因数的变化, 其描述如下:

$$V = K_e E_d \quad (1)$$

其中 V 为磨损量, K_e 为能量磨损系数, E_d 为摩擦耗散能, E_d 可表示为:

$$E_d = \int Q ds \quad (2)$$

其中 Q 为摩擦剪切力, S 为位移幅值。在时刻 t 、位置 x 处的局部磨损深度 Δh 由以下表达式给出:

$$\Delta h(x, t) = K_e q(x, t) \Delta s(x, t) \quad (3)$$

其中 $q(x, t)$ 和 $\Delta s(x, t)$ 是在时刻 t 、位置 x 处的摩擦切应力和相对滑移距离增量。本文中定义 X 、 Y 为模型整体的坐标系, x 、 y 为接触区域的坐标系。

1.2 SWT 多轴疲劳损伤准则

Szolwinski 和 Farris^[21]修正的 SWT 多轴疲劳损伤准则认为应力应变状态会共同影响疲劳破坏。该准则是用来确定裂纹萌生位置常用的方法

之一, 适用于低周和高周条件下。设点 M 为接触区内的任意一点, 该位置处的裂纹萌生风险被量化为 SWT 参数值 Γ , Γ 为最大法向应力 $\sigma_{\max}(\theta, M)$ 和法向应变 $\Delta \varepsilon(\theta, M)$ 乘积的最大值, 如式(4)所示:

$$\Gamma(M) = \max_{\theta} \left[\sigma_{\max}(\theta, M) \times \frac{\Delta \varepsilon(\theta, M)}{2} \right] \quad (4)$$

其中 θ 为裂纹萌生与接触面夹角。

材料任意平面上的应力应变状态可以使用式(5)变换方程得到:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2(\theta) + \tau_{xy} \sin(2\theta) \\ \varepsilon_{\theta} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos(2\theta) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin(2\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 σ 和 ε 为法向应力和法向应变, τ 和 γ 为切应力和切应变。 θ 取 $0^\circ \sim 180^\circ$, 按照 $\Delta\theta=1^\circ$ 的步长计算平面内的应力与应变数值。将具有最大法向应力的平面设定为临界平面, 相应的角度 θ 确定为裂纹萌生的方向, 代入式(4)即可求得 SWT 参数值 Γ 。SWT 参数最大值所在点的位置就是裂纹萌生位置, 点与接触面的夹角就是裂纹萌生角度。

1.3 考虑微动磨损的 SWT 参数值计算流程

如图 1 所示, 给出了预测微动磨损和 SWT 参数值的计算流程。左侧是接触区磨损深度的计算,

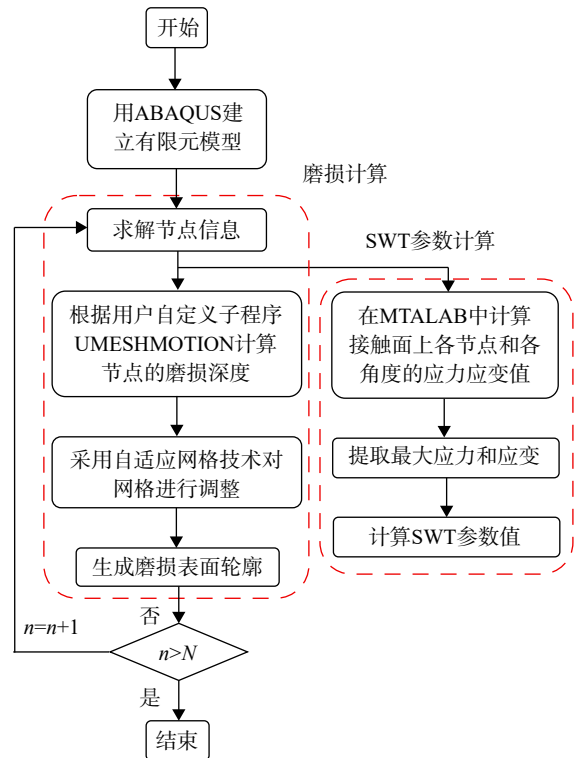


图 1 磨损深度和 SWT 参数值计算流程

Fig. 1 Wear depth and SWT parameter value calculation process

右侧是 SWT 参数值的计算。在 ABAQUS 软件中计算考虑磨损的每个增量步节点坐标、网格、应力和应变值等信息,传输到 MATLAB 软件中计算 SWT 参数值。

2 模型和方法的验证

2.1 微动磨损模型和 SWT 参数值计算验证

为了验证本文给出的考虑微动磨损 SWT 参数值计算方法的正确性,基于二维球/平面模型分别计算磨损深度和考虑微动磨损的 SWT 参数值,并分别与文献 [22] 的磨损实验结果和文献 [23] 的 SWT 参数值对比。如图 2 所示,材料为 Ti-6Al-4V 合金,接触区域网格细化,单元类型为四结点双线性平面应变四边形单元(CPE4),最小网格尺寸为 0.04 mm,其他区域采用粗化三角形网格,网格类型为三结点线性平面应变三角形单元(CPE3)。图 1 中 n 为当前的循环次数, N 为总的目标循环次数。材料参数、几何尺寸、边界和载荷条件分别与文献 [22] 和文献 [23] 相同,这里就不再赘述。

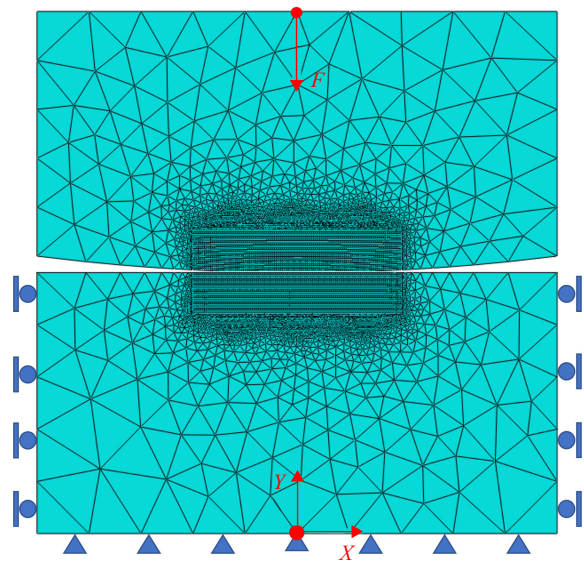


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

如图 3 所示,本文磨损深度结果与文献 [22] 的结果非常接近,最大误差是 5%,表明本文的微动磨损有限元计算程序是可靠的。考虑微动磨损的 SWT 参数值计算结果如图 4 右侧所示,其数值和趋势都与左侧文献 [23] 结果一致,这说明本文微动磨损计算和考虑微动磨损的 SWT 参数值计算方法和程序是正确的。

2.2 燕尾榫模型的建立与验证

如图 5 所示,航空发动机涡轮中的燕尾榫联

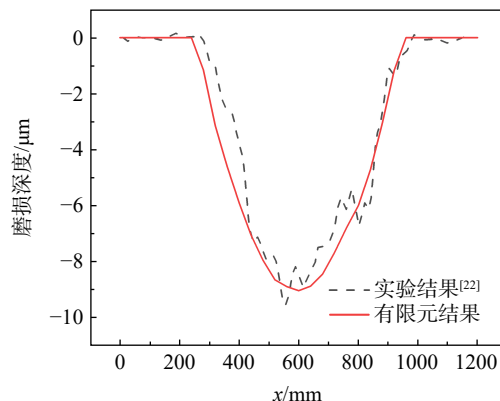


图 3 微动磨损计算结果

Fig. 3 Fretting wear calculation results

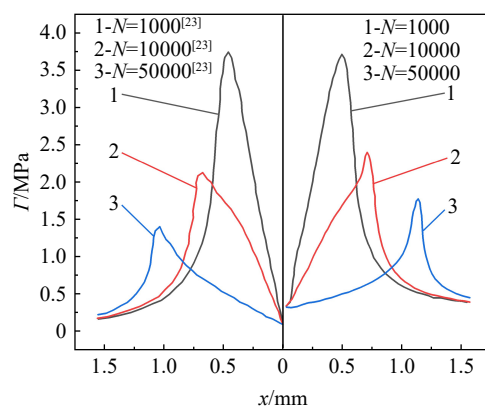


图 4 SWT 参数值结果

Fig. 4 SWT parameter results

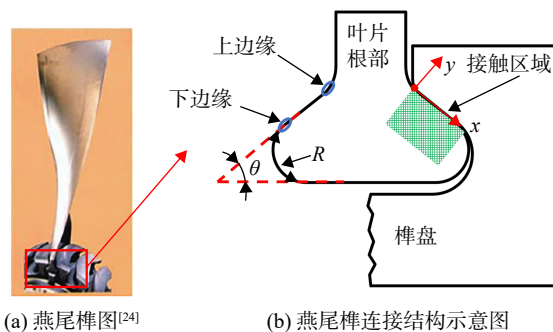


图 5 燕尾榫图和燕尾榫连接结构示意图

Fig. 5 Dovetail tenon and schematic of dovetail joint structure

接结构因为离心力的作用,使得叶片根部与涡轮盘接触区域产生循环的法向力载荷和相对滑移,进而产生微动磨损行为。本文假设叶片根部和涡轮盘上的每个燕尾榫联接结构都是完全相同且独立的,根据对称性仅对一个燕尾榫连接结构进行研究。叶片根部材料为钴基合金 HS25,涡轮盘材料为氧化铝,因为氧化铝材料耐磨性比钴基合金好^[12],所以有限元只计算了叶片根部的磨损。基于微动磨损有限元计算方法,建立了二维燕尾榫(叶

片根部/涡轮盘接触)微动磨损有限元模型。如图6所示。接触区域网格单元类型为四结点热耦合平面应变四边形单元(CPE4T), 最小网格尺寸为0.005 mm。材料参数、几何尺寸、边界和载荷条件与文献[12]相同, 载荷历程如图7所示, 载荷循环计算得到燕尾榫接触表面的磨损深度图。通过与文献[12]中的结果对比, 验证了本文建立的燕尾榫有限元微动磨损模型的正确性。如图8所示。

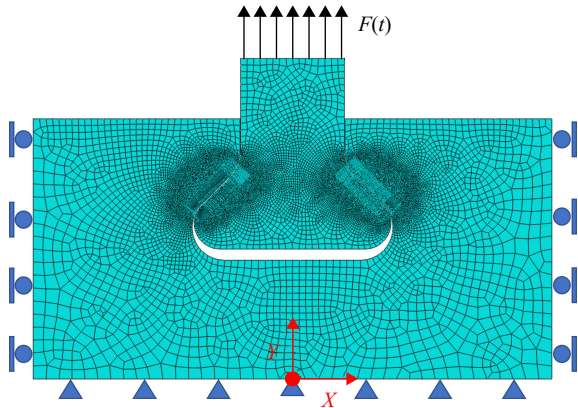


图6 二维燕尾榫有限元模型

Fig. 6 Two-dimensional dovetail finite element model

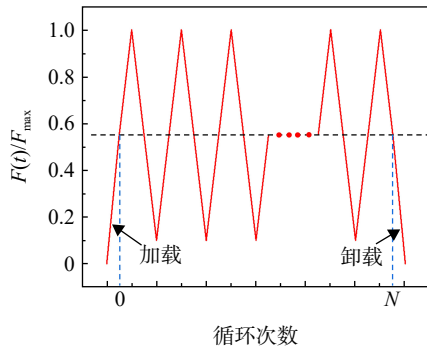


图7 载荷历程示意图

Fig. 7 Load history diagram

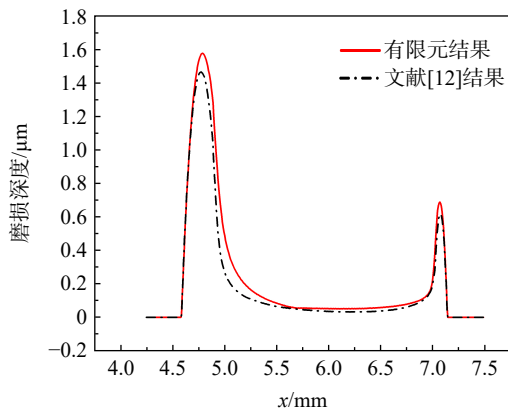


图8 载荷历程示意图

Fig. 8 Load history diagram

3 结果与讨论

由于微动磨损会带来材料的去除, 导致燕尾榫接触区域的表面轮廓、应力分布、接触压力和摩擦切应力都会发生显著变化, 进而影响叶片根部微动疲劳裂纹的萌生。基于前面验证的燕尾榫微动磨损有限元模型以及 SWT 参数值计算方法, 针对燕尾榫连接结构, 对比分析微动磨损对 Mises 应力分布状态和 SWT 参数值的影响。同时讨论考虑磨损情况下燕尾榫底角、摩擦因数和法向力对燕尾榫微动疲劳行为的影响规律。

3.1 裂纹萌生表面分析与确定

由于燕尾榫连接结构和微动载荷设置的对称性, 叶片根部左右两侧受力相同, 计算得出应力、应变、SWT 参数值等结果也相同, 所以论文只展示叶片根部右半侧的结果图。为了确定裂纹萌生临界平面, 对叶片根部接触区域下如图5中阴影区域内所有节点的 SWT 参数值进行计算, 得到该区域的 SWT 分布云图(图9)。

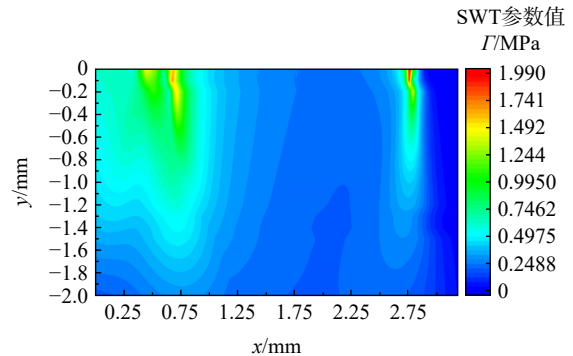


图9 SWT 参数值分布

Fig. 9 SWT parameter distribution

如图9所示, 当 $F=550$ MPa, 底角 $\theta=45^\circ$ 时, SWT 参数最大值为 1.990 MPa 出现在叶片根部下边缘位置, 并且 SWT 参数值随垂直于叶片根部接触表面的深度增加而逐渐减小, 所以叶片根部接触表面即为临界平面, 微动疲劳裂纹会在叶片根部的接触表面萌生。并且如图10所示次表面 SWT 参数值较表面会大幅下降, 这与文献[25]所得出的 SWT 参数值沿着垂直接触表面方向上的分布趋势相同, 所以后续仅对叶片根部接触表面的 SWT 分布情况进行分析。

3.2 微动磨损对 SWT 参数值的影响

由于微动磨损会带来材料的去除, 叶片根部/盘接触表面会不断变化, 会引起燕尾榫接触区域 Mises 应力和 SWT 值的变化。图11和图12展示

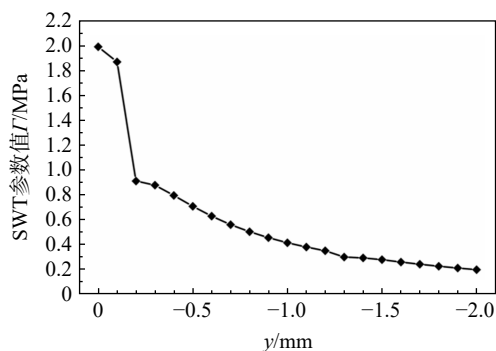


图 10 SWT 参数值变化趋势

Fig. 10 Variation trend of SWT parameters

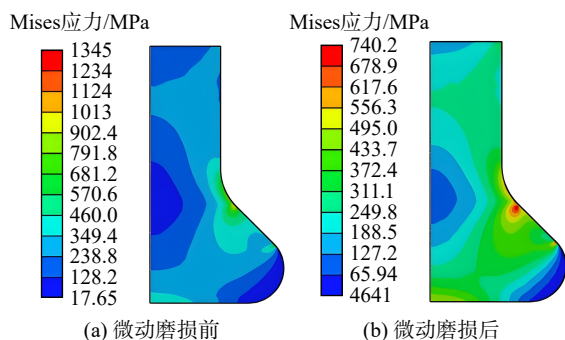


图 11 Mises 应力分布

Fig. 11 Mises stress distribution

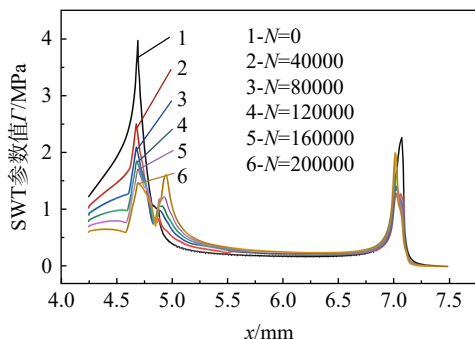


图 12 磨损前后 SWT 参数值

Fig. 12 SWT parameters before and after wear

了在离心力 $F=550$ MPa, 底角 $\theta=45^\circ$ 时, 磨损前后应力分布及 SWT 参数值图。 $N=2 \times 10^5$ 次微动循环后的 Mises 应力小于微动损伤前 ($N=0$ 时) 的 Mises 应力, 这是因为燕尾榫叶片根部/盘的接触界面发生了微动磨损, 使接触界面变得更加平缓, 增大了叶片根部的受力面积, 最终使得叶片根部的 Mises 应力值减小, 接触界面的 Mises 分布也变得更加平缓, 中心区域 Mises 应力与上下边缘的差值减小。并且由于上边缘的磨损较下边缘更严重, 使得 Mises 应力最大值在经历 2×10^5 次微动循环后转移到了下边缘, 所以磨损导致 Mises 应

力的大小和分布都发生了变化。

图 12 展示了微动损伤过程中 SWT 参数值的变化, 摩擦因数取 0.5。由于应力集中的影响, 在整个微动过程中, SWT 参数值在叶片根部/盘接触面的上下边缘出现了极值。未发生磨损时 ($N=0$), SWT 参数最大值出现在上边缘且只有一个峰值, 随着微动循环次数的增加, 磨损逐渐增加, SWT 参数最大值会减少且转移到下边缘。从微动磨损的结果图 13 来看, 在同样条件下叶片根部上边缘的磨损深度远大于下边缘, 中心区域则几乎没有磨损, 处于黏着状态, 下面分别对 3 个区域即上边缘、中间和下边缘区域进行讨论。

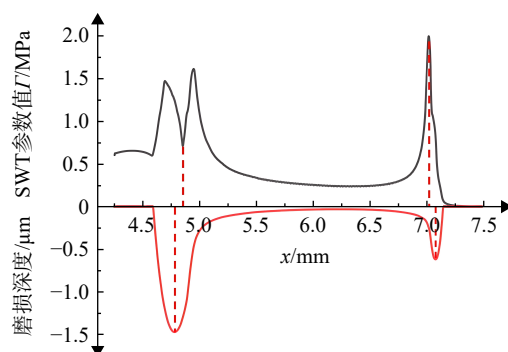


图 13 磨损后的磨损深度图和 SWT 参数值分布

Fig. 13 Wear depth map and SWT parameter distribution after wear

在叶片根部上边缘, 随着微动循环次数的增加, 其磨损深度会快速增加, 降低了该区域的应力值, 进而导致 SWT 参数值不断降低, 并且在滑移区与黏着区的交界区域出现了第二峰值, 第二峰值 SWT 参数值会随微动循环次数的增加而不断升高直至超过第一峰值。如图 13 所示, 峰值中间的低谷与磨损深度最大值位置基本重合, 这与文献 [22] 中的 SWT 参数值分布相似。

在叶片根部接触区中心区域, 随着微动循环次数的增加, SWT 参数值略有增加, 但由于其受到的应力应变都非常小, 所以 SWT 参数值也非常小, 裂纹不会在此处萌生, 所以下文将不再讨论中心区域情况。

叶片根部的下边缘也会发生磨损, 随着微动循环次数的增加, 应力值和 SWT 参数值也会逐渐降低。但是由于上边缘磨损深度远大于下边缘, 使得上边缘的应力值和 SWT 参数值下降速率大于下边缘, 所以经过 20 万次微动循环后如图 14 所示, 下边缘 SWT 参数极值超过了上边缘。

综合来看, 微动磨损带来的材料去除增大了

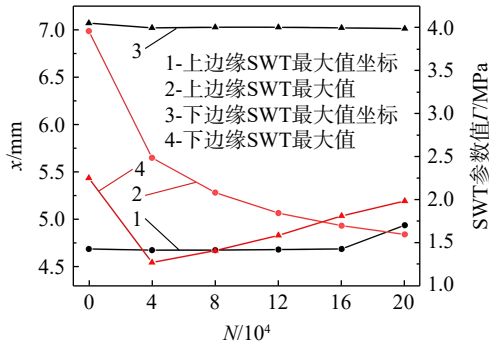


图 14 不同磨损次数后的 SWT 最大值和最大值坐标

Fig. 14 SWT maximum value and maximum coordinates after different wear times

叶片根部的受力面积,使得叶片根部的 Mises 应力值和 SWT 参数值减小,微动磨损和微动疲劳之间存在竞争关系。因为上边缘磨损量远大于下边缘,所以 Mises 应力最大值和 SWT 参数最大值会随微动循环次数的增加由上边缘向下边缘转移。并且还发现上下边缘 SWT 参数的峰值有向中心区域转移的趋势。

3.3 燕尾榫摩擦因数对 SWT 参数值分布的影响

保持底角 $\theta=45^\circ$, 法向载荷 $F=550$ MPa, $N=2 \times 10^5$ 不变,摩擦因数分别取 0.1、0.5、0.9 的情况下,研究不同摩擦因数对燕尾榫微动疲劳裂纹萌生的影响。如图 15 所示,表面接触状态随着摩擦因数的改变发生变化,用摩擦切应力除以摩擦因

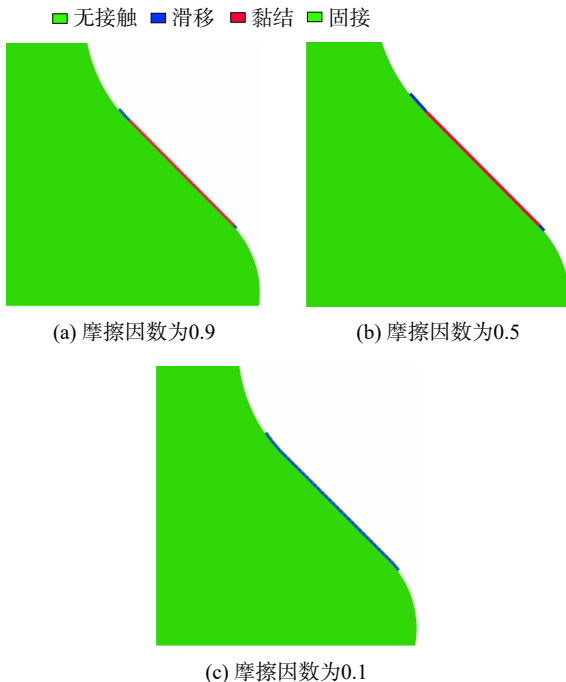


图 15 接触状态变化

Fig. 15 Contact state change

数和接触压力的乘积(所得结果记为 W)可以得到接触区域各节点接触状态分布,如图 16 所示。摩擦因数为 0.9 时接触表面的磨损状态为部分滑移,如图 17 和图 18 所示,磨损量很小且主要发生在上下边缘部分,中心区域几乎没有磨损。摩擦因数为 0.5 时,表面磨损状态也是部分滑移,相比摩擦因数为 0.9 情况上下边缘滑移区增加,磨损深度加剧。在摩擦因数为 0.1 时,磨损状态发生改变,由部分滑移状态转变为完全滑移状态,磨损深度大幅度增加,下边缘磨损深度超越上边缘,并且接触中心区域也会发生严重磨损。

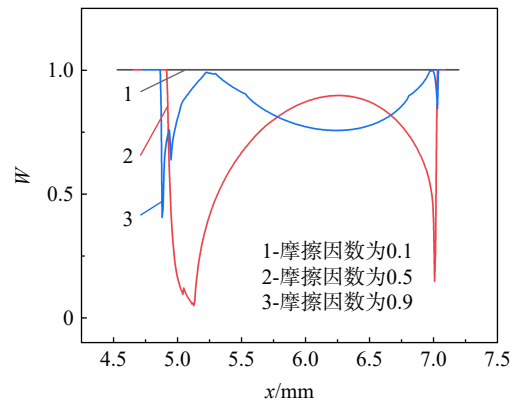


图 16 接触区域各节点接触状态分布

Fig. 16 Contact state distribution of nodes in the contact area

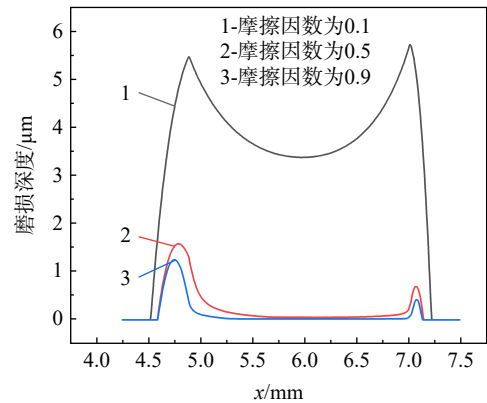


图 17 不同摩擦因数下的磨损深度

Fig. 17 Wear depth under different friction coefficients

图 19、图 20 和表 1 展示了摩擦因数的变化对 SWT 参数值的影响,可以发现:随着摩擦因数的减小叶片根部的磨损加剧,SWT 参数值会不断减小,但由于磨损状态和磨损深度的不同,SWT 最大值出现的位置即裂纹萌生位置有较大差异。大的摩擦因数(0.9)带来大的摩擦切应力,使得接触区域大部分处于黏着状态,磨损量很小,与无磨损时的应力分布状态接近,所以 SWT 最大值位

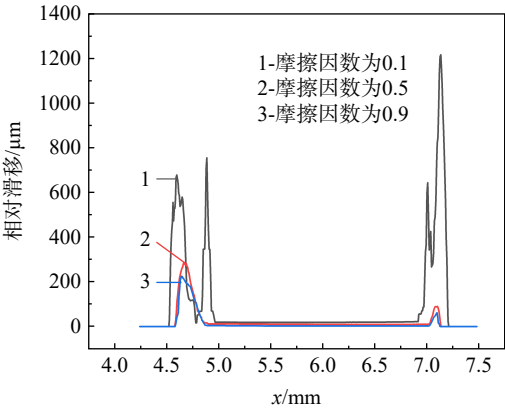


图 18 不同摩擦因数下的相对滑移图

Fig. 18 Relative slip diagram for different friction coefficients

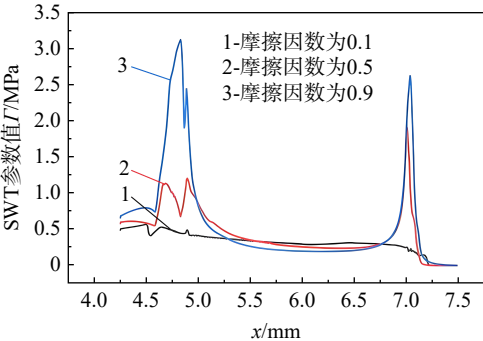


图 19 不同摩擦因数下的 SWT 参数值分布

Fig. 19 SWT parameter distribution under different friction coefficients

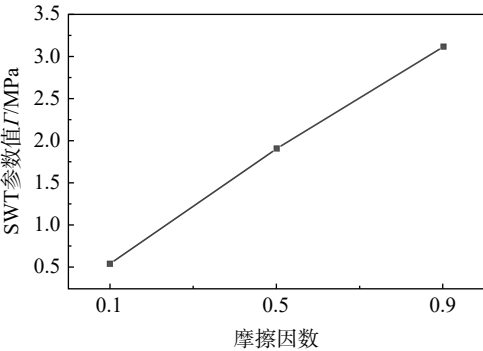


图 20 不同摩擦因数下的 SWT 最大值

Fig. 20 SWT maximum value under different friction coefficients

置也与无磨损时一样在上边缘。当摩擦因数为 0.5 时接触区仍然处于部分滑移状态,但磨损量增加且上边缘磨损深度大于下边缘,导致应力分布和 SWT 参数值分布发生变化,最大值逐渐向下边缘转移。在摩擦因数为 0.1 时,磨损状态变为完全滑移,接触区中间区域也发生了较大的微动磨损,使整个接触区域受力变得更加均匀,上下边缘不会出现 SWT 参数的峰值, SWT 参数值急剧

表 1 不同摩擦因数下磨损深度和 SWT 参数值
Table 1 Wear depth and SWT parameter values under different friction coefficients

摩擦因数	最大磨损深度/ μm	SWT 最大值/ MPa	裂纹起裂位置
0.9	1.24	3.10	上边缘
0.5	1.57	1.89	下边缘
0.1	5.46	0.56	上边缘

降低且趋于平缓,所以最大值位置在上边缘。
通过图 17、图 19、图 20 以及表 1 可以发现在部分滑移状态下,微动磨损量很低, SWT 参数值较大,微动疲劳作用占主导;而在完全滑移状态下, SWT 参数值非常小,急剧降低了裂纹萌生的风险,所以微动损伤以微动磨损为主,摩擦因数是影响微动磨损和微动疲劳的重要因素。

3.4 燕尾榫底角对 SWT 参数值分布的影响

分别针对底角 θ 为 30° 、 45° 、 60° 和 70° 的结构,在 $N=2 \times 10^5$ 后研究了燕尾榫考虑微动磨损情况下的接触表面 SWT 参数值,如图 21 和图 22 所示:随着燕尾榫底角的增大, SWT 参数最大值会先减小后增加,由 30° 时的 4.43 MPa 逐渐减小到 45° 时的 1.99 MPa 再逐渐增加到 70° 时的 6.01 MPa。这表明在 45° 时 SWT 参数值最小其疲劳寿命最长,并且微动疲劳裂纹会首先萌生在叶片根部接触表面的下边缘。由于在 $\theta=45^\circ$ 时,接触界面的法向力和切向力相同,对两个方向的影响相对均衡,不会出现某一方向载荷过大导致应力更加集中的现象,所以底角设计为 45° 会使燕尾榫连接结构有更好的可靠性和稳定性。

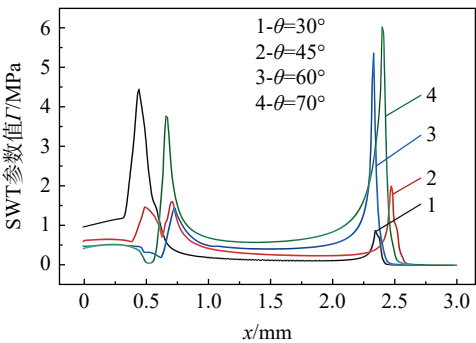


图 21 不同底角的 SWT 参数值分布

Fig. 21 SWT parameter distribution with different base angles

3.5 离心力对 SWT 参数值分布的影响

飞行时燕尾榫会承受巨大的离心载荷,不同工况和转速产生不同的离心力,从而影响叶片根部的 SWT 参数值分布和大小。在底角 $\theta=45^\circ$, 摩

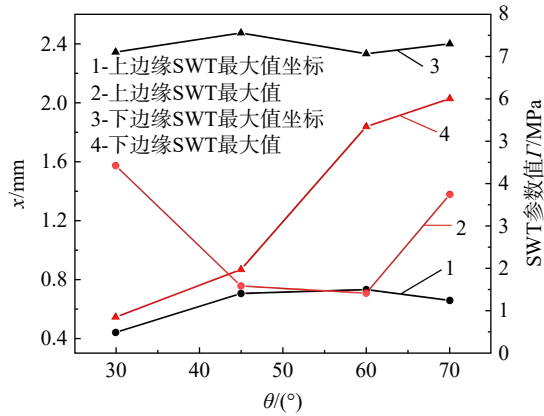


图22 不同底角的 SWT 最大值和最大值坐标

Fig. 22 SWT parameter distribution with different base angles

擦因数恒定为 0.6, $N=2 \times 10^5$, 法向载荷 $F(t)$ 的最大幅值 F 分别取 450、550、650、750、850、950 MPa, 研究离心力对燕尾榫 SWT 参数值的影响。

图 23 和图 24 展示了离心力的变化对 SWT 参数值的影响情况。随着离心力的增加, 叶片根部的应力和变形增大, SWT 参数值逐渐增加。由

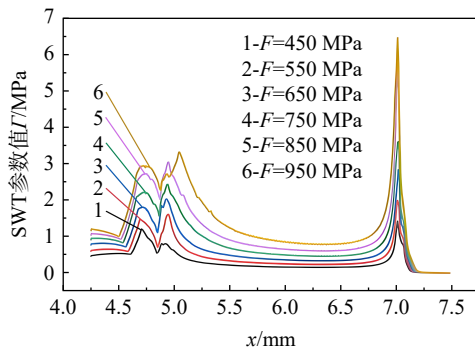


图23 不同离心力下的 SWT 参数值分布

Fig. 23 SWT parameter distribution under different centrifugal forces

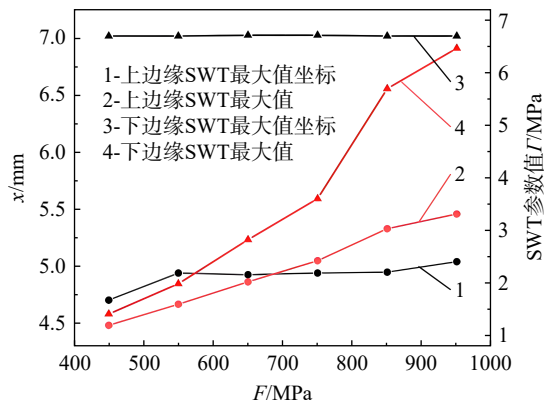


图24 不同离心力下的 SWT 参数值分布

Fig. 24 SWT maximum and maximum coordinates under different centrifugal forces

于微动磨损的出现, 在叶片根部上边缘 SWT 参数会有两个峰值出现。在离心力较小时第一峰值 SWT 参数值较大, 随着离心力的增加第二峰值 SWT 参数值逐渐超过第一峰值, 两者差值逐渐增大, 这也使得 SWT 参数最大值会向中心区域转移。

4 结论与讨论

本文将 SWT 多轴疲劳损伤准则与能量磨损模型相结合, 建立了燕尾榫连接结构的微动磨损和裂纹萌生预测模型。在考虑微动磨损的情况下, 研究了燕尾榫底角、摩擦因数和离心力对叶片根部 SWT 参数值的影响, 得出的主要结论如下:

1) 论文建立了燕尾榫二维叶片根部/榫盘连接结构有限元模型, 给出了微动磨损和 SWT 参数值计算方法和流程, 并通过对比验证了模型和方法的正确性。

2) 研究发现微动疲劳裂纹萌生在叶片根部接触表面, 即为临界平面, 且裂纹萌生在叶片根部接触表面上下边缘的峰值位置。

3) 微动磨损带来的材料去除增大了叶片根部的受力面积, 降低了裂纹萌生的风险, 微动磨损和微动疲劳存在竞争关系, 且随微动循环次数的增加, 微动磨损使得裂纹萌生位置从上边缘转移到下边缘。

4) 通过参数影响研究发现: ①当摩擦因数较低(0.1)时微动磨损状态是完全滑移, 整个接触区都发生了较大的磨损, SWT 参数的峰值消失, 揭示了在完全滑移状态下, 燕尾榫微动损伤的主要形式是微动磨损; 而在部分滑移状态下, 燕尾榫微动疲劳作用占主导。②与 θ 为 30°、60°和 70°相比, 燕尾榫底角 $\theta=45^\circ$ 时 SWT 参数值最小, 这是因为接触界面的法向力和切向力相同, 对两个方向的影响相对均衡, 燕尾榫连接结构最可靠。③在相同条件下, 随着离心力的增加, 结构变形和应力增大导致 SWT 参数值会逐渐增大, 增加了裂纹萌生的风险。

本文建立了燕尾榫叶片根部/榫盘(面/面)接触结构的微动磨损和裂纹萌生预测模型, 并研究了磨损循环 2×10^5 次数下不同摩擦因数、底角和离心力对 SWT 参数值的影响, 但是考虑残余应力, 以及裂纹开裂和裂纹扩展行为对燕尾榫连接结构微动磨损或微动疲劳损伤的影响, 在接下来的工作中会进一步研究。

参考文献:

- [1] 余嘉伟, 甘阳, 杨旭峰, 等. 枞树形榫结构参数对应力的影响[J]. 失效分析与预防, 2024, 19(3): 158-165.
Yu Jiawei, Gan Yang, Yang Xufeng, et al. Effects of structure parameters on fir-tree tenon-mortise stress[J]. Failure Analysis and Prevention, 2024, 19(3): 158-165. (in Chinese)
- [2] Lu Tao, Wu Xin, Wang Yigang, et al. Finite element analysis and experimental study on fretting wear of different contact surfaces of fir-tree joint[J]. Tribology International, 2025, 207: 110631.
- [3] Hu Chen, Wei Dasheng, Wang Yanrong, 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.
- [4] Shi Liang, Wei Dasheng, Wang Yanrong. Experimental and numerical investigation of circular arc dovetail attachments under fatigue loading[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 541/542: 564-568.
- [5] Zhou Jianjun, Yang Bowen, Li Shuaiyuan, et al. Fretting fatigue life prediction of dovetail structure based on plastic effect and sensitivity analysis of influencing factors[J]. Materials, 2023, 16(9): 3521.
- [6] Yang Qi, Zhou Wenlong, Zhong Yining, et al. Effect of shot-peening on the fretting wear and crack initiation behavior of Ti-6Al-4V dovetail joint specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 107: 83-95.
- [7] Qu Zhen, Liu Kaicheng, Wang Baizhi, et al. Fretting fatigue experiment and finite element analysis for dovetail specimen at high temperature[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 9913.
- [8] Fouvry S, Paulin C, Deyber S. Impact of contact size and complex gross-partial slip conditions on Ti-6Al-4V/Ti-6Al-4V fretting wear[J]. Tribology International, 2009, 42(3): 461-474.
- [9] Heredia S, Fouvry S. Introduction of a new sliding regime criterion to quantify partial, mixed and gross slip fretting regimes: Correlation with wear and cracking processes[J]. Wear, 2010, 269(7/8): 515-524.
- [10] Wang J, Duan D, Xue W, et al. Ti-6Al-4V fretting wear and a quantitative indicator for fretting regime evaluation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2021, 235(2): 423-433.
- [11] Zhang Z, Zhao G, Yuan Y, et al. Finite element simulation and fretting wear prediction of a tenon connection structure[J]. Lubricants, 2023, 11(10): 421.
- [12] Szolwinski M P, Farris T N. Mechanics of fretting fatigue crack formation[J]. Wear, 1996, 198(1/2): 93-107.
- [13] Song Laicong, Shi Zhenyu, Zhang Chengpeng, et al. Numerical study on fretting wear of DZ125/FGH99 tenon-mortise joint structure[J]. Metals, 2024, 14(7): 830.
- [14] Dong Yihui, Zeng Dongfang, Wu Pingbo, et al. Numerical prediction of fretting fatigue crack growth in scaled railway axles considering fretting wear evolution[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 181: 108150.
- [15] Zou Lang, Zeng Dongfang, Wang Jing, et al. Effect of plastic deformation and fretting wear on the fretting fatigue of scaled railway axles[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105371.
- [16] Xue Xiangzhen, Li Yifan, Sui Liqi, et al. Mechanism and prediction method of fretting damage in involute spline couplings of aero-engine[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 148: 107200.
- [17] Llavori I, Zabala A, Mendiguren J, et al. A coupled 3D wear and fatigue numerical procedure: Application to fretting problems in ultra-high strength steel wires[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143: 106012.
- [18] Poon C, O'halloran S M, Connolly A, et al. Fretting wear and fatigue in submarine power cable conductors for floating offshore wind energy[J]. Tribology International, 2023, 186: 108598.
- [19] Mohd Tobi A L, Ding J, Bandak G, et al. A study on the interaction between fretting wear and cyclic plasticity for Ti-6Al-4V[J]. Wear, 2009, 267(1/2/3/4): 270-282.
- [20] Fouvry S, Paulin C, Liskiewicz T. Application of an energy wear approach to quantify fretting contact durability: introduction of a wear energy capacity concept[J]. Tribology International, 2007, 40(10/11/12): 1428-1440.
- [21] 张孙, 陆科谷, 彭金方, 等. 残余应力对微动疲劳裂纹的影响研究[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2022, 35(5): 25-33.
Zhang Sun, Lu Kegou, Peng Jinfang, et al. Investigation into the effects of residual stress on fretting fatigue cracks[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2022, 35(5): 25-33. (in Chinese)
- [22] Tang Bin, Wu Peiqiang, Li Xiuyan, et al. Tribological behavior of plasma Mo-N surface modified Ti-6Al-4V alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 179(2/3): 333-339.
- [23] Dreano A, Fouvry S, Guillonnet G. Understanding and formalization of the fretting-wear behavior of a cobalt-based alloy at high temperature[J]. Wear, 2020, 452/453: 203297.
- [24] 彭艳, 张伟, 李如俊, 等. 金属疲劳损伤全寿命过程及工程应用综述[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(4): 117-130.
Peng Yan, Zhang Wei, Li Rujun, et al. Review of whole life process and engineering application of metal fatigue damage[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(4): 117-130. (in Chinese)
- [25] Shi Liang, Wei Dasheng, Wang Yanrong, et al. An investigation of fretting fatigue in a circular arc dovetail assembly[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 82: 226-237.

(编辑: 秦理曼)