

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.04.001

微动疲劳寿命预测方法研究综述

李 维, 杨旭峰, 李 坚, 艾 兴, 程 昊, 曾嘉迅

(中国航空发动机集团有限公司湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

摘要: 通过调研国内外相关微动疲劳研究文献, 首先介绍了微动疲劳的概念和特点, 总结了目前微动疲劳损伤机理研究的研究现状, 主要包含微动图理论的发展以及微动疲劳微观机理的研究; 其次, 总结了目前影响微动疲劳寿命预测的主要影响因素, 包括相对滑移幅值、接触压力、轴向载荷、摩擦系数、应力梯度以及温度等; 最后, 全面梳理目前被广泛研究和使用的微动疲劳寿命预测方法, 总结了微动疲劳寿命预测的发展趋势及展望。经过梳理发现, 考虑磨损-疲劳耦合损伤机制以及基于人工智能的微动疲劳寿命预测方法是当前研究的热点和未来的发展方向。

关键词: 微动疲劳; 寿命预测; 表面磨损; 磨损-疲劳耦合; 人工智能

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)04-0589-12

A Review on Fretting Fatigue Life Prediction Methods

LI Wei, YANG Xufeng, LI Jian, AI Xing, CHENG Hao, ZENG Jiaxun

(Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Through a review of relevant domestic and international literatures on fretting fatigue research, this paper first introduces the concept and characteristics of fretting fatigue. It summarizes the current research status regarding the mechanisms of fretting map theory and investigations into the microscopic mechanisms of fretting fatigue. Secondly, the main factors influencing fretting fatigue life prediction are summarized, including relative slip amplitude, contact pressure, axial load, coefficient of friction, stress gradient, and temperature. Finally, the widely studied and employed methods for predicting fretting fatigue life are comprehensively reviewed. The development trends in fretting fatigue life prediction and future research prospects are summarized. Considering the wear-fatigue coupling damage mechanism and artificial intelligence (AI)-based fretting fatigue life prediction methods are identified as current research hotspots and represent key directions for future development.

Key words: fretting fatigue; life prediction; surface wear; wear-fatigue coupling; artificial intelligence (AI)

微动疲劳现象广泛存在于航空发动机榫连接、盘轴连接、端齿连接等紧固连接结构中, 是由一接触体承受外界交变疲劳应力引起变形而导致夹紧

结构部件之间的小尺度滑移引起的一种接触损伤过程^[1]。微动疲劳具有复杂性高、隐蔽性强等特点, 因微动疲劳破坏的失效构件表面通常伴有明显

基金项目: 国家科技重大专项(J2022-IV-0012-0026)。

收稿日期: 2025-07-28; **修订日期:** 2025-08-11

作者简介: 李维, 男, 中国航发 608 所总设计师、中国航发集团专职总师、博士生导师, 获“科技部中青年科技创新领军人才”荣誉, 享受国务院政府特殊津贴, 兼任国防科技工业航空发动机创新中心副主任; 主要从事第 X 代军用涡轴发动机研究和绿色通航动力研究; 获军事科技进步一等奖、国防科技进步一等奖等省部级技术奖励 8 项、中国航发科学技术特等奖等集团公司级技术奖励 15 项, 授权专利 40 余项, 发表论文近 60 篇, 获航空工业和中国航发个人一等功 1 次、个人二等功 3 次、个人三等功 1 次。

通信作者: 李坚, 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: lijiannpu@163.com。

引用格式: 李维, 杨旭峰, 李坚, 等. 微动疲劳寿命预测方法研究综述[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(4): 589-600. LI Wei, YANG Xufeng, LI Jian, et al. A review on fretting fatigue life prediction methods[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(4): 589-600.

的磨损痕迹及疲劳裂纹,其接触体的寿命受到疲劳载荷和表面磨损的交互影响,相关研究表明,微动疲劳会使得原先长寿命构件寿命降低 30% 以上^[2]。与普通疲劳相比,微动疲劳预测需要考虑接触表面相对滑移幅值、表面接触压力、表面切向应力以及接触表面摩擦系数^[3]等诸多影响因素,如何将这些因素的影响充分考虑到微动疲劳寿命预测中是一个需要解决的科学问题。可靠而精确的微动疲劳寿命预测方法是微动疲劳研究中的重要研究方向,对提升结构安全性和可靠性具有重要的理论意义和工程应用价值。

目前关于微动疲劳寿命预测方法国内外学者已做了不少的研究,本文将调研国内外相关研究成果,全面梳理有关微动疲劳寿命预测方法的研究现状,总结研究经验,分析存在问题,并提出展望。

1 微动疲劳损伤机理研究

微动疲劳损伤机理研究是微动疲劳寿命预测方法研究的基础,早期对于微动疲劳损伤机理^[4]的研究有:机械与化学共同作用理论、磨损速率变化理论、3 个阶段理论和剥层理论等。20 世纪 80 年代,Godet^[5]提出了微动第三体理论,将微动过程中产生的磨削作为第三接触体,认为磨削的产生可以看成是磨屑的形成和磨屑的演化两个连续和同时发生的过程,该理论很好地解释了微动疲劳过程中摩擦系数随循环数变化的原因。

微动图理论于 1988 年被 Vingsbo 等^[6]首次提出,并发展至今^[7]。微动图理论揭示了微动损伤规律和运行机制,如图 1 所示^[8],当微动状态处于部分滑移区基本无损伤,滑移区则以表面磨损为主,而裂纹则主要出现在混合区。根据微动图理论,周仲荣等^[9]认为,微动疲劳裂纹萌生与接触区域的微动白层有关,裂纹的萌生和早期扩展与接触表面磨损之间存在竞争关系,当表面磨损速率较大时,微裂纹会因为磨损的关系被磨掉,而在微动疲劳条件下,多数情况下接触表面处于部分滑移区和混合区,其磨损速率相对较小,裂纹的早期扩展无法避免,如图 2^[10]、图 3^[11]所示。迄今为止,微动图理论很好地解释了大部分的微动损伤情况并且已经被应用于微动防护(表面处理、涂层选择等)中去^[11-12]。

近年来,研究人员对于微动疲劳的微观机理开展了深入研究。Han 等^[13-14]研究了晶体取向对镍基单晶高温合金微动疲劳裂纹萌生和位错分布的影响。结果表明,微动接触区存在裂纹和滑移线,

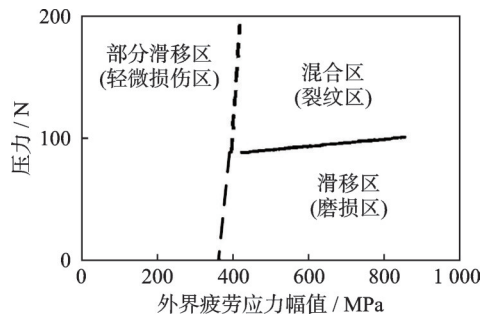


图 1 微动疲劳条件下的微动图^[8]

Fig.1 Fretting map under fretting fatigue conditions^[8]

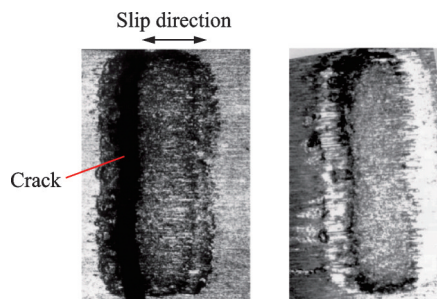


图 2 典型微动疲劳接触区域表面磨损及裂纹^[10]

Fig.2 Surface wear and crack in typical fretting fatigue contact zone^[10]

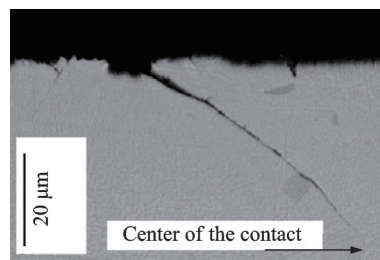


图 3 典型微动疲劳裂纹萌生与扩展^[11]

Fig.3 Typical fretting fatigue crack initiation and propagation^[11]

并且晶体存在明显的错向和取向偏差,这表明微动接触可以引起显著的塑性变形和局部再结晶;晶体取向偏差和几何位错密度的峰值位置与微动疲劳裂纹形成位置相匹配,且几何位错密度最大的滑移系方向与观测得到的裂纹萌生方向一致。Xu 等^[15]利用扫描电镜、电子探针和透射电镜对 316L 奥氏体不锈钢的扭转微动疲劳损伤区进行了详细分析,发现位错结构有两种演化形式:形变孪晶系统和胞状结构,且随着扭转应力幅值的增大,位错结构由形变孪晶系统转变为壁面和沟道结构,最终演化为胞状结构。Sun 等^[16]研究了镍基单晶高温合金在高温下的微动疲劳机理,发现接触区表面出现剥落、分层现象且认为微动磨损和晶体学滑移的共同作用是微动疲劳失效的原因。

综上所述,目前国内外对于微动疲劳机理研究

正在逐步发展,微动理论至今仍有不少学者在进行研究且成功地运用到了工程实际中去,而对微动疲劳裂纹萌生和扩展的微观机理研究也已逐渐有学者关注并研究,并且取得了不错的试验验证结果,是目前的一个重要发展方向。

2 微动疲劳寿命预测影响因素研究

由于微动疲劳问题的复杂性,影响微动疲劳寿命的因素有很多,据统计报告多达50余种^[17]。目前较为常见的进行微动疲劳试验研究的原理示意图如图4所示^[18]。图中,微动垫在法向载荷 F 作用下和试验件发生接触产生接触压力;轴向载荷 σ_{axial} 被施加在试验件上产生周期性的疲劳载荷;切向刚度 K_s 用于约束微动垫的切向位移,主要来源于夹持微动垫和试验件夹具。在法向载荷 F 、疲劳载荷 σ_{axial} 以及切向刚度 K_s 的共同相互作用下,接触表面产生相对微小滑移,其滑移量的幅值为相对滑移幅值 δ_{amp} ,表面切向力 Q 主要来源于微动垫和试验件之间的摩擦力。总结相关国内外文献,微动疲劳寿命主要与以下因素有关。

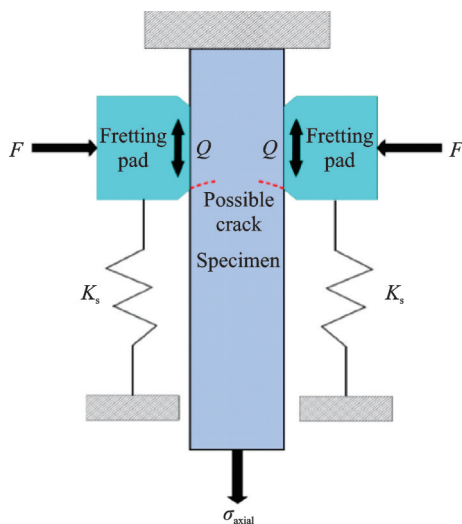


图4 典型微动疲劳试验原理图^[18]

Fig.4 Schematic diagram of typical fretting fatigue test^[18]

2.1 相对滑移幅值

相对滑移幅值是指两接触体发生微动时,局部接触表面的相对位移幅值。研究表明相对滑移幅值是影响微动疲劳裂纹萌生的一个重要因素,Vingsbo等^[6]发现在外载荷一定的情况下,当相对滑移幅值增加到一个“临界值”时,微动疲劳寿命随着相对滑移幅值的增加而减少,而当相对滑移幅值超过这个“临界值”时疲劳寿命随着滑移幅值的增加而增加,如图5所示。Jin等^[19-20]的研究也得出了类似的结论。

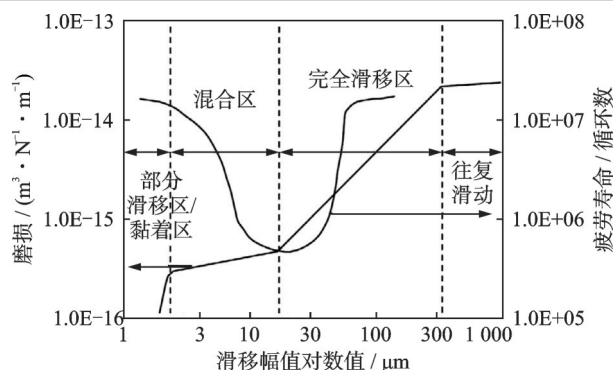


图5 相对滑移幅值对微动疲劳寿命的影响^[6]

Fig.5 Plot of relative slip amplitude vs. fretting fatigue life^[6]

2.2 接触压力

接触压力对接触表面的磨损量和表面裂纹的萌生和早期扩展起重要作用,其变化会导致接触面之间的摩擦系数和应力分布不同,从而影响微动疲劳寿命^[21]。研究表明,接触压力对寿命的影响较为复杂,在一定接触压力范围内接触压力的增加不一定会使得疲劳寿命减少,Nakazawa等^[22]发现在高循环应力下,微动疲劳寿命随着接触压力的升高而降低,而在低循环应力下微动疲劳寿命随着接触压力的增加先降低再升高最后降低到一个稳定值。Ramakrishna Naidu等^[23]的研究发现,微动疲劳寿命随着接触压力的增加先减小再上升之后继续减小。石伟等^[3,24]均发现在一定接触压力范围内时材料的微动疲劳寿命随着接触压力的上升急剧下降,但随着接触压力的进一步提高,微动疲劳寿命下降并不明显。

2.3 表面切向应力与轴向载荷

表面切向力的产生主要来源于接触表面摩擦力,在正压力一定的情况下摩擦力的大小取决于摩擦系数。Lykins等^[25]发现切向应力影响疲劳裂纹萌生位置和扩展方向,而最大切应力是疲劳裂纹萌生的重要原因,Jin等^[19]也得到了类似的结论。轴向载荷的增加会导致试验件整体应力水平的增加,在一定程度上会缩减微动疲劳寿命,研究表明^[3,26-27],轴向力的增加对微动疲劳寿命的缩减作用大于正压力对微动疲劳寿命的影响。

2.4 摩擦系数

摩擦系数在微动疲劳过程中被认为是一个变量,许多因素会引起摩擦系数的变化从而影响微动疲劳过程的进行^[23]。古远兴等^[28]发现将摩擦系数取为常数时所确定的裂纹萌生位置偏于危险;Swalla等^[29]研究发现,摩擦系数对微动疲劳寿命预测有很大的影响,合理的摩擦系数选择能更好地预测微动疲劳寿命。Heredia等^[30]发现随着接触压力的增加接触表面的摩擦系数会降低。Wang等^[31]

发现接触表面摩擦系数随接触表面状态变化而变化,并建立了接触表面摩擦系数分布模型,其认为在黏着区摩擦系数不变,而在滑移区摩擦系数呈线性变化。由于摩擦系数在接触表面的具体分布情况难以测量,该模型难以得到试验验证。

2.5 应力梯度

在针对机械构件中具有缺口或几何不连续部位特征结构(如航空发动机涡轮盘偏心孔、榫槽根部倒角等)的疲劳设计与评估的研究中发现^[32],基于最危险点的峰值应力/应变进行疲劳分析的局部应力/应变法未考虑危险区域的应力梯度效应^[33],导致预测结果通常较为保守,类似的结论目前也被广泛接受和讨论^[34]。

与缺口疲劳类似,在对微动疲劳接触区域应力场分析时发现,大多数情况下,接触区域边缘存在较大的应力集中,因此研究人员认为微动疲劳结构接触表面应力集中引起的高应力梯度也是影响微动疲劳寿命的重要因素^[35],发现微动疲劳中高应力梯度引起的寿命预测误差在某些情况下比缺口疲劳更严重,并认为如果将这个因素考虑到微动疲劳寿命预测模型中去,其相应的寿命预测模型参数和其材料级普通疲劳寿命模型可保持一致。Fou-vry 等^[36]发现,如不考虑接触边缘的高应力梯度,对微动寿命的影响会导致微动疲劳寿命预测过于保守,Nowell 等^[35,37]在相关研究中也获得了同样的结论。随着对微动疲劳寿命预测研究的深入,目前越来越多的研究在寿命预测中考虑应力梯度对微动疲劳寿命的影响。

2.6 温度

大部分研究表明,温度对微动疲劳寿命的影响不可忽视,温度的提升一方面降低材料本身的疲劳性能,另一方面更容易形成氧化层使得接触状态变差从而降低微动疲劳寿命^[38-40]。但是,在针对镍基单晶合金 DD6-粉末合金 FGH95 材料接触配副的微动疲劳研究^[41]中发现,高温微动环境下产生的氧化层可以有效阻滞微动疲劳裂纹的萌生及扩展,随着温度的升高,微动疲劳寿命呈现先增加后减少的规律。

此外,影响微动疲劳的因素还有很多,包括微动环境、接触区材料、试验频率等因素。综上所述,如何在微动疲劳寿命预测中根据实际情况考虑这些因素的影响是寿命预测的关键。

3 微动疲劳寿命预测方法研究

3.1 名义应力法

预测微动疲劳寿命最简单的方法是测定其

S-N 曲线^[42]。名义应力法从材料的微动疲劳 S-N 曲线出发,考虑各种对疲劳寿命的影响因素,得出构件的微动疲劳 S-N 曲线,并根据该 S-N 曲线预测微动疲劳寿命。何明鉴等^[43]针对该问题提出附加应力法,引入附加应力系数对结构应力进行修正,利用材料的 S-N 曲线进行微动疲劳寿命预测。古远兴等^[44]通过引入摩擦功因子,考虑了摩擦对微动疲劳寿命的影响,形成了基于摩擦功的微动疲劳寿命预测方法,如式(1)所示。

$$\begin{cases} N = N_s - kW^n \\ W = 0.5\mu(\sigma_{N_{\max}} - \sigma_{N_{\min}})(\delta_{\max} - \delta_{\min}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 为微动疲劳寿命, N_s 为疲劳载荷单独作用时结构的疲劳寿命, W 为摩擦功, $\sigma_{N_{\max}}$ 和 $\sigma_{N_{\min}}$ 分别为接触压力的最大值和最小值, $\delta_{\max}$ 和 $\delta_{\min}$ 分别为相对滑移距离的最大值和最小值。通过引入摩擦功因子,寿命预测的误差可减少 15%。

名义应力法的优点在于形式简单,便于工程应用,但也存在对微动疲劳机理探究不深入,工程使用需要大量真实构件试验数据支持、适用范围有限等问题。

3.2 基于多轴疲劳理论的临界平面法

现有研究表明,基于多轴疲劳理论的临界平面法被广泛用于微动疲劳寿命预测^[45]。临界平面法通过计算不同角度的临界平面上的应力应变参量,并将其以某种关系组合来作为临界平面参量,通过寻求构件中该临界平面参量的最大值,以及最大值相应的临界平面角度来确定其破坏面和疲劳寿命。用于微动疲劳寿命预测的临界平面参量较多,常用的有 Smith-Watson-Topper(SWT)参量^[46-48]、Fatemi-Socie(FS)参量^[49]、Maximum shear stress-range(MSSR)参量^[50]等。研究人员需要根据构件微动疲劳裂纹萌生的主导因素不同,选择合适临界平面参量去预测微动疲劳寿命,以 SWT 临界参量为例,其表达式为

$$SWT = \sigma_{n_{\max}} \frac{\Delta\epsilon}{2} \quad (2)$$

式中: $\Delta\epsilon$ 为临界平面法向最大应变和最小应变之差, $\sigma_{n_{\max}}$ 为临界平面法向最大应力。SWT 与微动疲劳寿命的关系为^[37]

$$SWT = \sigma_{n_{\max}} \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{c+b} \quad (3)$$

式中: σ'_f 为疲劳应力系数, b 为疲劳强度指数, σ'_f 为疲劳延性系数, c 为疲劳延性指数, E 为弹性模量,均为材料常数且可由试验数据获得。

研究发现,接触区域的高应力梯度会导致当以一个“危险点”的疲劳损伤来预测微动疲劳寿命会使得预测寿命偏小。因此,研究人员通常在“临界

平面法”的基础上,考虑危险点附近疲劳影响区域应力梯度对寿命的影响。Arujo等^[37,51]均采用了基于过程区域(Process volume approach)的微动疲劳寿命预测方法,该方法利用疲劳影响区内各个节点的平均临界平面参量值(SWT,FS等)代替危险点预测寿命。Nowell等^[35,52-54]将缺口件缺口周围的应力场和微动接触区域应力场联系起来并作对比,发现应力梯度对缺口疲劳和微动疲劳的影响可能会存在某种联系。

近年来,研究人员对微动疲劳和缺口疲劳之间的等效关系做了更为深入的研究,采用临界平面法结合临界距离理论预测微动疲劳寿命已经成为研究热点,在临界距离路径、长度的确定以及临界平面参量的选择等关键问题上进行了大量的研究和发展^[55-57]。临界距离理论认为:应力集中仅对缺口部位一定范围内的材料产生影响,当且仅当某个临界距离内平均应力超过材料的疲劳强度时,缺口构件才会发生失效。典型的寿命预测流程如图6所示^[58],当临界距离被确定后,可通过临界距离范围内的应力场计算结构的疲劳寿命,以临界距离理论的“点”法为例,通过采用临界距离 L 处点的临界平面参量代替危险点处参量的方法来预测微动疲劳寿命。Said等^[58]结合临界距离理论以及SWT临界平面参量对微动疲劳寿命进行了预测,预测结果如图7所示,临界距离长度为 $360\text{ }\mu\text{m}$,寿命预测误差基本在2倍分散带以内。

3.3 基于断裂力学的微动疲劳寿命预测方法

研究表明,接触表面的微动载荷对裂纹萌生位置、萌生角度以及其形成有至关重要的作用,而对后续的疲劳裂纹扩展的影响不大^[1,21,42]。但对于某些构件微动疲劳扩展寿命在总寿命中所占比重很大,且扩展寿命可近似认为是构件的微动疲劳总寿命的情况,相关研究人员可以考虑利用断裂力学的方法对微动疲劳寿命进行预测^[59-61]。Naboulsi等^[61-62]采用裂纹类比法将微动接触模型等效为无

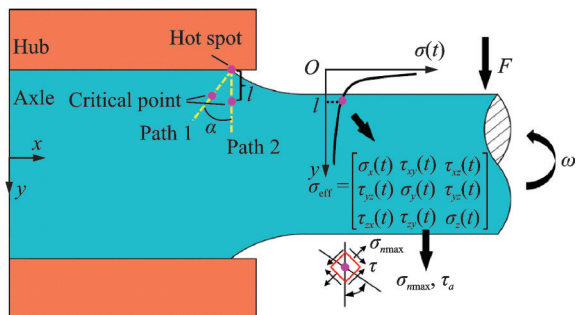


图6 典型考虑临界距离理论的微动疲劳寿命预测示意图^[58]

Fig.6 Schematic diagram of typical fretting fatigue life prediction based on critical distance theory^[58]

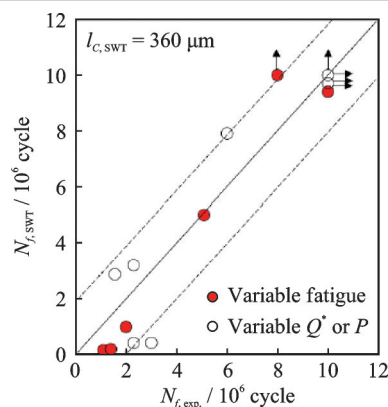


图7 结合临界距离理论及SWT参量微动疲劳寿命预测精度图^[58]

Fig.7 Accuracy plot for fretting fatigue life prediction combining critical distance theory and the SWT parameter^[58]

限大平面上裂纹扩展的情形,通过计算应力强度因子来计算微动疲劳寿命。近年来,扩展有限元方法(Extended finite element method, XFEM)得到了快速发展,该方法无需对裂纹尖端网格进行重新划分,可以借助一系列材料退化模型对微动疲劳寿命进行预测^[63-65]。综合而言,基于断裂力学的微动疲劳寿命预测方法可以获取裂纹扩展路径并对裂纹扩展寿命做出较为准确的预测,但对裂纹萌生阶段的寿命只是一个估算,预测精度存疑,使用条件有限。

3.4 基于损伤力学的方法

疲劳损伤是材料在循环载荷作用下其性能不断劣化的过程,疲劳损伤过程包括微裂纹的形成、扩展及不同的应力或应变幅之间的相互作用等效应。根据疲劳损伤的这些特点人们提出了损伤累积理论。早期损伤力学方法在微动疲劳寿命预测领域应用相对较少,但近二十年来该方法逐渐被研究人员用于微动疲劳寿命的预测中。目前较为常用的损伤模型主要包括 Bhattacharya-Ellingwood 模型^[66]、Chaboche 损伤模型^[67]以及 Lemaitre 损伤模型^[68],后续发展的损伤描述方法多是对上述模型的修正及扩展。其中,Chaboche 非线性连续累积损伤(Non-linear-continuous-damage, NLCD)模型如下

$$dD = [1 - (1 - D)^{\beta+1}]^{\alpha(\sigma_{\max}, \sigma_m)} \cdot \left[\frac{\sigma_{\max} - \sigma_m}{M(\sigma_m)(1 - D)} \right]^{\beta} dN \quad (4)$$

式中: D 为材料的损伤参量, $\sigma_{\max}$ 为最大应力, σ_m 为平均应力, $M(\sigma_m)$ 为平均应力的函数, β 为材料常数, α 为与应力状态有关的函数。李爱民等^[69]在 Chaboche NLCD 损伤模型的基础上引入了临界等

效塑性应变幅的概念,考虑了剪应变和正应变对寿命的影响,对模型进行了如下改进

$$dD = [1 - (1 - D)^{\beta+1}]^{\alpha(\sigma_{\max}, \sigma_m)} \cdot \left[\frac{\sigma_{\max} - \sigma_m}{M(\sigma_m)(1 - D)} \right]^{\beta} \cdot \left[\frac{(\Delta \epsilon_{eq}^{cr})_p}{2} \right]^{-w} dN \quad (5)$$

式中: $(\Delta \epsilon_{eq}^{cr})_p$ 表示临界等效塑性应变幅, w 为材料常数。该模型对于 TC11 钛合金的常幅微动疲劳寿命预测结果如图 8 所示,相对未考虑等效塑性应变幅的情况,该寿命预测方法的预测精度有所提升。Quraishi 等^[70]提出一种基于连续介质损伤力学的方法预测了微动疲劳寿命,该模型优点在于其是基于热动力学所推导,具有明显的物理意义,可以解释微动疲劳失效特征。Zhang 等^[71]利用 Chaboche 损伤演化方程的增量形式,以材料的弹性模量下降表征接触表面的损伤,对微动疲劳寿命进行了预测,由于需要反复更新模型的弹性模量,因此计算成本较高。Hojjati-Talemi 等^[72]以 Lemaitre 热力学耗散势函数为基础,建立了基于损伤力学的微动疲劳损伤模型,同时该模型也考虑了尺寸效应对寿命的影响。Li 等^[39]以 Chaboche 损伤演化方程为基础建立了考虑温度、硬度影响的微动疲劳寿命预测模型。Hu 等^[73]考虑到应力梯度对微动疲劳寿命的影响,建立了临界距离理论和损伤力学理论的微动疲劳寿命预测模型。Lin 等^[74]考虑到基于连续损伤力学的模型中很少考虑摩擦磨损的影响,在传统的微动疲劳损伤累积模型中引入磨损耗散能因子,如图 9 所示,引入磨损耗散能因子后的微动疲劳寿命预测模型与原始模型相比,微动疲劳寿命预测精度有所提升。

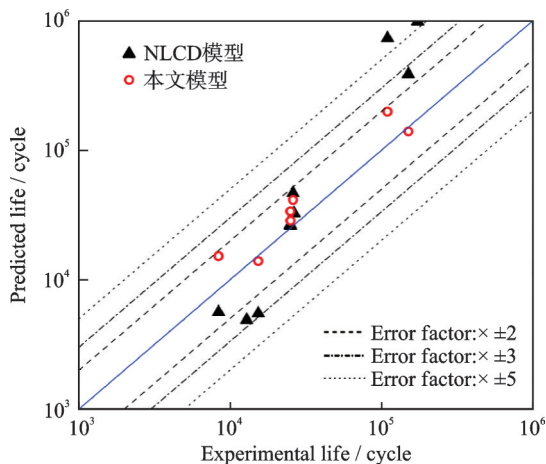


图 8 改进前后的 Chaboche NLCD 损伤模型寿命预测精度对比^[69]

Fig.8 Comparison of life prediction accuracy for the Chaboche NLCD damage model before and after improvement^[69]

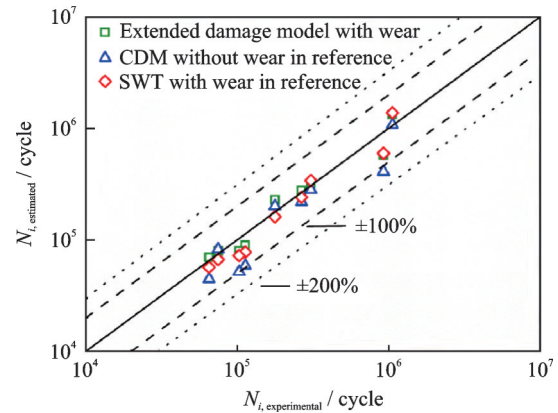


图 9 磨损耗散能对微动疲劳寿命预测精度影响对比^[74]

Fig.9 Effect of wear dissipation energy on the accuracy of fretting fatigue life prediction diagram^[74]

3.5 考虑表面磨损演化的微动疲劳寿命预测方法

从微动疲劳机理出发,表面磨损会影响构件的表面状况从而影响裂纹萌生和早期扩展,早期的微动疲劳寿命预测模型很少考虑磨损的影响,近年来研究者结合磨损模型及疲劳模型发展了考虑表面磨损的微动疲劳寿命预测方法,研究了微动疲劳过程中表面磨损和裂纹萌生之间的交互影响关系。

霍永忠等^[75]结合 Archard 磨损公式和基于临界平面理论(SWT 参量)的寿命预测方法,利用自适应网格技术更新在一定循环数 n 后由表面磨损引起的接触区域形貌以及表面应力的重新分布情况(图 10),结合线性累积损伤法则计算该 n 个循环产生的疲劳损伤,随着循环数的增加,当疲劳损伤累积到疲劳破坏的临界值时,确定结构的微动疲劳寿命,预测结果如图 11 所示。由图可知,当表面磨损较大时,初始损伤较严重的材料会被磨掉,而当该位置的裂纹萌生速率大于磨损速率时,裂纹由此萌生并扩展,表面磨损和疲劳裂纹存在竞争关系,符合微动图理论的研究结果。Pinto 等^[76-77]与霍永

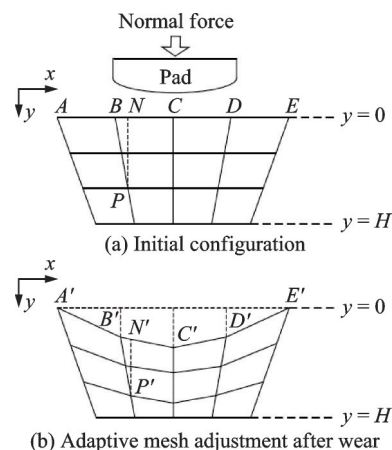


图 10 初始构型及磨损后自适应网格调整^[75]

Fig.10 Initial configuration and adaptive mesh adjustment after wear^[75]

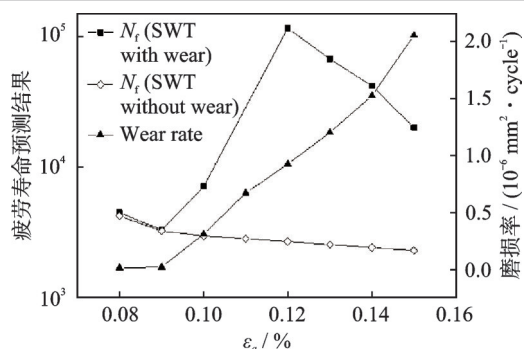
图11 有无考虑磨损对微动疲劳寿命预测结果影响对比^[75]

Fig.11 Comparison of fretting fatigue life prediction results with and without wear consideration^[75]

忠等^[75]的研究思路相似,但在考虑磨损演化对微动疲劳寿命影响的基础上,进一步考虑应力梯度的影响,结合临界距离理论,提升寿命预测的精度。

Shen等^[78]建立了基于能耗法磨损公式和连续介质损伤力学的微动疲劳寿命预测方法,以增量的形式根据Chaboche NLCD模型建立循环数与损伤参量的非线性关系,预测结果如图12所示。由图可知,在局部滑移区和混合区内微动疲劳寿命随相对滑移幅值的增加而减少,在完全滑移区时微动疲劳寿命随相对滑移幅值的增加而增加,这与图5的试验结果吻合。Shen等^[79]在连续损伤力学和微动磨损结合的基础上,进一步考虑磨损屑层对寿命的影响,建立了考虑磨损屑层演化的微动疲劳寿命预测方法。Xu等^[80]在考虑磨损演化对微动疲劳寿命影响的基础上,进一步结合损伤力学及临界距离理论考虑应力梯度对损伤的影响。

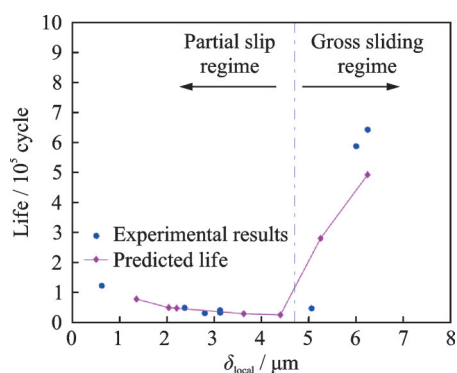
图12 耦合表面磨损演化及Chaboche NLCD寿命预测模型的微动疲劳寿命预测结果^[78]

Fig.12 Fretting fatigue life prediction results from a model coupling surface wear evolution and Chaboche NLCD^[78]

综上所述,考虑磨损与疲劳耦合效应的寿命预测方法在一定程度上符合微动图的基本理论,是目前的研究热点,但该方法涉及大量的模型迭代以及网格修正,计算成本高,在目前的仿真技术水平下

评估时间过长,不利于工程应用。

3.6 基于人工智能的微动疲劳寿命预测方法

随着数据科学时代的到来,基于机器学习等人工智能手段预测微动疲劳行为已经成为近几年的发展趋势和研究热点,人工神经网络(Artificial neural network, ANN)^[81]、长短期记忆网络(Long short-term memory network)^[82]、分层机制驱动神经网络(Hierarchical mechanism-informed neural network, HMNN)^[83]等机器学习技术已被研究人员用于微动疲劳寿命预测。Han等^[84]提出一种改进的ANN技术用于预测微动疲劳寿命,其示意图如图13所示,输入参数主要为轴向载荷、切向力、接触半宽度以及黏着区半宽度。如图14所示,通过和传统的基于临界平面法的微动疲劳寿命预测模型以及基于损伤力学的微动疲劳寿命预测模型的预测结果进行对比,发现传统的基于损伤力学及临界平面法的微动疲劳寿命预测精度在3倍分散带左右,而基于机器学习的微动疲劳寿命预测方法预测精度在2倍分散带以内,传统预测方法的寿命预测计算时间为15~25 min,而基于机器学习的寿命预测方法计算时间在5 min以内。结合Li等^[85-86]的研究发现,在寿命预测精度以及速度上基于ANN等机器学习的微动疲劳寿命预测方法具有明显的优势。此外,Han等^[87]形成了基于深度前馈神经网络技术(Deep feedforward neural network)的微动疲劳裂纹萌生位置预测方法,该方法在具有不错的预测精度的同时,相较于传统的预测方法预测速度至少提升30%。

目前,已有研究人员结合传统微动疲劳寿命预测模型和人工智能技术预测微动疲劳寿命,Wang等^[88]利用ANN技术形成了临界距离尺寸最优计算方法,如图15所示,采用经过ANN优化后的临界距离预测微动疲劳寿命相对传统的方法预测误差由3倍分散带减少至2倍分散带。Han等^[89]形成了基于深度神经网络技术(Deep neural network, DNN)和Findley parameter(FP)临界平面参量的微动疲劳寿命预测方法,以FP参量中的剪应力幅

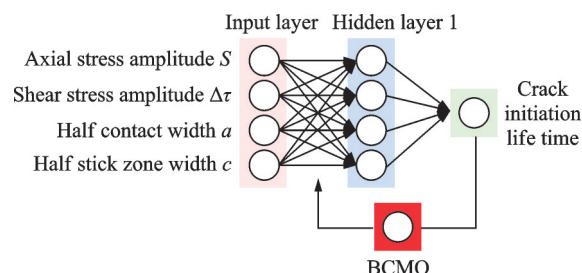
图13 用于微动疲劳寿命预测的ANN示意图^[84]

Fig.13 Schematic diagram of the ANN for fretting fatigue life prediction^[84]

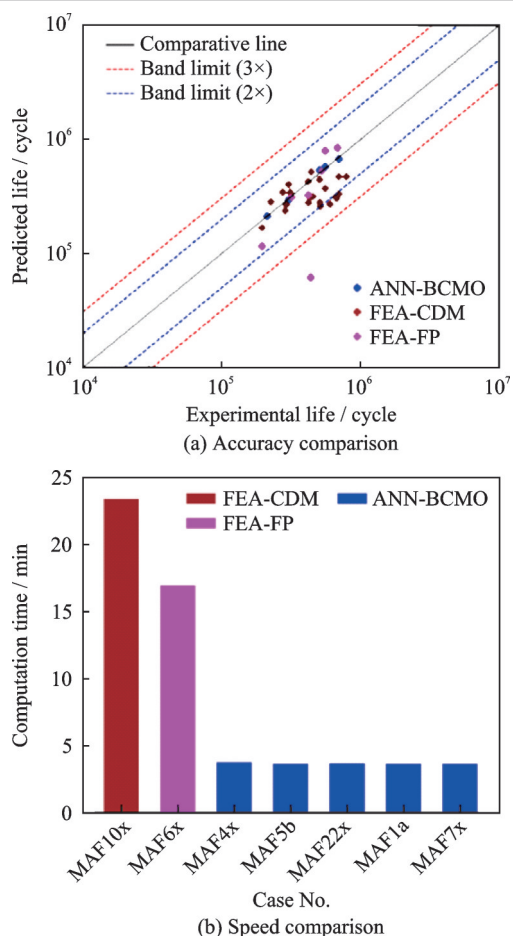


图 14 基于机器学习的微动疲劳寿命预测方法与传统方法预测对比^[85]

Fig.14 Comparison between machine learning-based and traditional methods for fretting fatigue life prediction^[85]

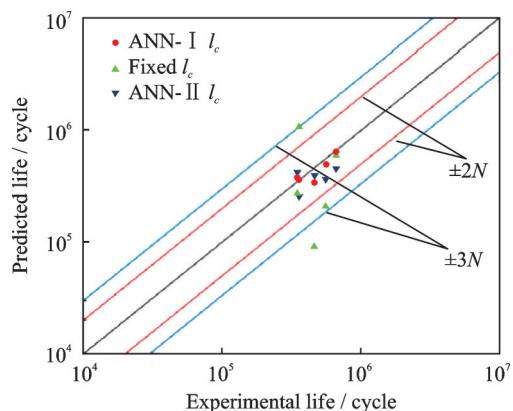


图 15 基于 ANN 技术优化后的临界距离理论和传统临界距离理论微动疲劳寿命预测精度对比^[88]

Fig.15 Accuracy comparison of fretting fatigue life prediction between ANN-optimized critical distance theory and traditional critical distance theory^[88]

和最大正应力作为输入参数提升了微动疲劳寿命预测的精度;Liu 等^[83]利用 HMNN 技术结合微动疲劳的损伤机理,根据已有传统微动疲劳寿命预测

模型,考虑了多轴疲劳特征、应力梯度以及相对滑移幅值对微动疲劳寿命的影响,提升了微动疲劳寿命预测的稳定性和可推广性。

可见,利用 ANN 等人工智能技术预测微动疲劳寿命的关键在于输入试验数据的质量以及微动疲劳影响因素是否考虑全面,数据驱动和微动疲劳损伤机制相结合的微动疲劳寿命预测方法可能是提升寿命预测的精度和稳定性的有效手段及发展方向。

4 结 论

本文通过调研国内外微动疲劳寿命预测方法研究历程,得到以下结论。

(1) 微动疲劳是一个非常复杂的物理化学过程,影响微动疲劳的因素有很多,在微动疲劳寿命预测中需要重点考虑相对滑移幅值、接触压力、轴向载荷、摩擦系数、应力梯度以及温度等因素的影响。

(2) 目前,研究人员建立了多种微动疲劳寿命预测方法,其中名义应力法、基于多轴疲劳理论的临界平面法、基于断裂力学的方法、基于损伤力学的方法是从微动疲劳的疲劳特征出发,从疲劳力学学科的角度,探究微动疲劳寿命演化规律,是预测微动疲劳寿命的重要手段。但这些方法具有局限性,无法完全解释微动疲劳过程中裂纹萌生以及表面磨损之间耦合损伤关系,有一定使用限制。近年来,研究者在这些方法的基础上,结合自适应网格等模型更新技术,考虑微动过程中磨损引起的接触表面几何形貌的变化,研究磨损和疲劳之间的耦合损伤机制,形成考虑表面磨损的微动疲劳寿命方法,其仿真结果在一定程度上符合微动图的基本理论,具有良好的发展前景,但也存在仿真时间过长、不利于工程应用等问题,因此高效率考虑疲劳-磨损耦合的微动疲劳寿命预测方法是未来的一个具有重要科学和工程意义的研究方向。

(3) 随着近年来人工智能技术的发展,ANN、DNN、HMNN 等机器学习技术也开始被应用于微动疲劳寿命预测,其在寿命预测精度以及效率上均具有较大的优势,而如何将微动疲劳损伤机理和数据驱动相结合可能是提升微动疲劳寿命预测精度和稳定性的有效手段及发展方向。

参考文献:

- [1] 朱旻昊,蔡振兵,周仲荣.微动磨损理论[M].北京:科学出版社,2021.
ZHU Minhao, CAI Zhenbing, ZHOU Zhongrong. Fretting wear theory[M]. Beijing: Science Press,

- 2021.
- [2] 何明鉴.机械构件的微动疲劳[M].北京:国防工业出版社,1994.
HE Mingjian. Fretting fatigue of mechanical components[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994.
- [3] 石炜.航空发动机榫连接结构微动疲劳寿命研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
SHI Wei. Research on fretting fatigue life of dovetail joint in aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [4] 周靖.超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层复合微动磨损行为研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
ZHOU Jing. Composite fretting wear performance of HVOF sprayed WC-CoCr coatings[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [5] GODET M. Third-bodies in tribology[J]. Wear, 1990, 136: 29-48.
- [6] VINGSBO O, SODERBERG S. On fretting map[J]. Wear, 1988, 126(1): 131-147.
- [7] ZHOU Z R, VINCENT L. Mixed fretting regime [M]. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [8] 周仲荣.关于微动磨损与微动疲劳的研究[J].中国机械工程,2000(10): 1146-1150.
ZHOU Zhongrong. On fretting wear and fretting fatigue[J]. China Mechanical Engineering, 2000(10): 1146-1150.
- [9] 周仲荣,朱旻昊.复合微动磨损[M].上海:上海交通大学出版社,2004.
ZHOU Zhongrong, ZHU Minhao. Composite fretting wear[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004.
- [10] WANG Y, ZHENG Y Q. Simulation of damage evolution and study of multi-fatigue source fracture of steel wire in bridge cables under the action of pre-corrosion and fatigue[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2019, 120(2): 375-419.
- [11] PROUDHON H, FOUVRY S. A fretting crack initiation prediction taking into account the surface roughness and crack nucleation process volume[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27: 569-579.
- [12] HANGER C H, SANDERS J H, SHARMA S. Characterization of mixed and gross slip fretting wear regimes in Ti-6Al-4V interfaces at room temperature [J]. Wear, 2004, 257(1): 67-80.
- [13] HAN Q N, RUI S S, QIU W H, et al. Crystal orientation effect on fretting fatigue induced geometrically necessary dislocation distribution in Ni-based single-crystal superalloys[J]. Acta Materialia, 2019, 179: 129-141.
- [14] HAN Q N, QIU W H, HE Z W, et al. The effect of crystal orientation on fretting fatigue crack formation in Ni-based single-crystal superalloys: In-situ SEM observation and crystal plasticity finite element simulation [J]. Tribology International, 2018, 125: 209-219.
- [15] XU Z B, PENG J F, LIU J H, et al. Microstructure evolution and torsional fretting fatigue damage mechanism of 316L austenitic stainless steel at different torques[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2018, 232(7): 809-822.
- [16] SUN S Y, LI L, HE K, et al. Fretting fatigue damage mechanism of nickel-based single crystal superalloys at high temperature[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 186: 105894.
- [17] LI X, ZUO Z X, QIN W J. A fretting related damage parameter for fretting fatigue life prediction[J]. International Journal of Fatigue, 2015(73): 110-118.
- [18] HOJJATI-TALEMI R, ABDEL-WAHAB M, DE PAUW J, et al. Prediction of fretting fatigue crack initiation and propagation lifetime for cylindrical contact configuration[J]. Tribology International, 2014, 76: 73-91.
- [19] JIN O, MALL S. Effects of independent pad displacement on fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V[J]. Wear, 2003(253): 585-596.
- [20] JIN O, MALL S. Effects of slip on fretting behavior: Experiments and analyses[J]. Wear, 2004, 256(7): 671-684.
- [21] 沈明学,彭金方,郑健峰.微动疲劳研究进展[J].材料工程,2010,12: 86-91.
SHEN Mingxue, PENG Jinfang, ZHENG Jianfeng. Study and development of fretting fatigue[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 12: 86-91.
- [22] NAKAZAWA K, MARUYAMA N, HANAWA T. Effect of contact pressure on fretting fatigue of austenitic stainless steel[J]. Tribology International, 2003 (36): 79-85.
- [23] RAMAKRISHNA NAIDU N K, GANESH SUNDARA RAMAN N K. Effect of contact pressure on fretting fatigue behavior of Al-Mg-Si alloy AA6061 [J]. International Journal of Fatigue, 2005(27): 283-291.
- [24] WU G Q, LIU X L, LI H H, et al. Effect of contact pressure on fretting fatigue behavior of Ti-1023[J]. Wear, 2015, 326(327): 20-27.
- [25] LYKINS C D, MALL S B, JAIN V C. A shear stress-based parameter for fretting fatigue crack initiation[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2001, 24(7): 461-473.
- [26] 董磊.摩擦状态对链接结构微动疲劳寿命的影响研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.

- DONG Lei. Research on effect of friction state on fretting fatigue life of connecting structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [27] 文长龙. 激光冲击强化对微动疲劳寿命的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- WEN Changlong. Research on laser shock peening on fretting fatigue life[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [28] 古远兴, 温卫东. 摩擦系数对燕尾榫微动疲劳特性的影响[J]. 宇航材料工艺, 2007(4): 78-81.
- GU Yuanxing, WEN Weidong. Effect of friction coefficient on fretting fatigue performance of dovetail joint [J]. Aerospace Materials & Technology, 2007(4): 78-81.
- [29] SWALLA D R, NEU R W. Influence of coefficient of friction on fretting fatigue crack nucleation prediction [J]. Tribology International, 2001(34): 493-503.
- [30] HEREDIA S, FOUVRY S, BERTHEL B, et al. A non-local fatigue approach to quantify Ti-10V-2Fe-3Al fretting cracking process: Application to grinding and shot peening[J]. Tribology International, 2011 (44): 1518-1525.
- [31] WANG R H, JAIN V K, MALL S. A non-uniform friction distribution model for partial slip fretting contact[J]. Wear, 2007(262): 607-616.
- [32] 何金超, 朱顺鹏, 牛晓鹏, 等. 缺口-尺寸效应下疲劳寿命预测: 考虑应力梯度的临界距离理论[J]. 机械工程学报, 2023, 59(16): 90-106.
- HE Jinchao, ZHU Shunpeng, NIU Xiaopeng, et al. Notch fatigue life prediction under size effect: Stress gradient-based theory of critical distance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(16): 90-106.
- [33] 钟波, 王延荣, 魏大盛. 考虑应力梯度影响的多轴缺口疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2018, 33(11): 2602-2610.
- ZHONG Bo, WANG Yanrong, WEI Dasheng. Multi-axial notch fatigue life prediction based on stress gradient effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33 (11): 2602-2610.
- [34] HE J C, ZHU S P, TADDESSE A T, et al. Evaluation of critical distance, highly stressed volume, and weakest-link methods in notch fatigue analysis[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162: 106950.
- [35] NOWELL D, DINI D, HILLS D A. Recent developments in the understanding of fretting fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73: 207-222.
- [36] FOUVRY S, KAPSA P, VINCENT L. A multiaxial fatigue analysis of fretting contact taking into account the size effect[J]. ASTM Special Technical Publication, 1998, 2000(1367): 16.
- [37] ARUJO J A, NOWELL D, VIVACQUA R C. The use of multiaxial fatigue models to predict fretting fatigue life of components subjected to different contact stress fields[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2004(27): 967-978.
- [38] DEBIN S, JUNZHOU H, HAO C, et al. Experimental study of fretting fatigue in dovetail assembly considering temperature effect based on damage mechanics method[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131: 105812.
- [39] LI S M, ZHANG H J, XING Z Y, et al. A study of fretting fatigue in a contact pair of DZ125/GH4169: Its mechanical behavior and life prediction[J]. Tribology International, 2024, 196: 109707.
- [40] JINGCHEN W, YUKUI G. Numerical and experimental investigations on fretting fatigue properties of GH4169 superalloy at the elevated temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 149: 106274.
- [41] 孙守义. 镍基单晶叶片弧形榫头高温微动疲劳表及优化设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
- SUN Shouyi. Fretting fatigue characterization and optimization design of arc-shaped tenon in nickel-based single crystal blade at high temperature[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.
- [42] WATER HOUSE R B. 微动磨损与微动疲劳[M]. 周仲荣, 金雪岩, 朱旻昊, 等译. 成都: 西南交通大学出版社, 1999.
- WATER HOUSE R B. Fretting wear and fretting fatigue[M]. Translated by ZHOU Zhongrong, JIN Xueyan, ZHU Minhao, et al. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999.
- [43] 何明鉴, 张德志. 确定微动疲劳寿命的附加应力法[J]. 航空发动机, 2003(3): 27-29.
- HE Mingjian, ZHANG Dezhi. The method of attached stress for determining fretting fatigue life[J]. Aeroengine, 2003(3): 27-29.
- [44] 古远兴, 温卫东, 崔海涛. 燕尾榫连接结构低周微动疲劳寿命预测[J]. 应用科学学报, 2007, 25(5): 531-534.
- GU Yuanxing, WEN Weidong, CUI Haitao. Prediction of fretting fatigue life of dovetail joint under LCF [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(5): 531-534.
- [45] BHATTI N A, ABDEL WAHAB M. Fretting fatigue crack nucleation: A review[J]. Tribology International, 2018, 121: 121-138.
- [46] SZOLWINSKI M P, FARRIS T N. Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy[J]. Wear, 1998, 221(1): 24-36.
- [47] MOKHLES M, LIU G, SHISHAVAN B H, et al. New insights on the deformation mechanism of fretting

- fatigue in Ti-6Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2025, 291: 120998.
- [48] CROCHA P H, LANGLOIS S, LALONDE S, et al. A general life estimation method for overhead conductors based on fretting fatigue behavior of wires[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103443.
- [49] NAVARRO C, VÁZQUEZ J, DOMÍNGUEZ J. Nucleation and early crack path in fretting fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 100: 602-610.
- [50] 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.
- [51] NABOULSI S, MALL S. Fretting fatigue crack initiation behavior using process volume approach and finite element analysis[J]. *Tribology International*, 2003, 36: 121-131.
- [52] ARUJO J A, CASTRO F C, POMMIER S, et al. Equivalent configurations for notch and fretting[J]. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2015, 33: 427-433.
- [53] CASTRO F C, ARUJO J A, PIRES M S T, et al. Estimation of fretting fatigue life using a multiaxial stress-based critical distance methodology[J]. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2015, 33: 444-450.
- [54] FERRE R, FOUVRY S, BERTHEL B, et al. Stress gradient effect on the crack nucleation process of a Ti-6Al-4V titanium alloy under fretting loading: Comparison between non-local fatigue approaches[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 54: 56-67.
- [55] MEN H J, ZHOU W L, HUANG H. Study of the point method for fretting fatigue life prediction[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 275: 109297.
- [56] ZHANG X Y, WEI D S, YAN S. Fretting fatigue in dovetail assembly and bridge-flat model: Verification of a life prediction model based on stress gradient[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 188: 108500.
- [57] RANGEL D, ERENA D, VÁZQUEZ J. Prediction of initiation and total life in fretting fatigue considering kinked cracks[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 199: 103345.
- [58] SAID J, FOUVRY S, CAILLETAUD G, et al. A global-local approach to predict the fretting-fatigue failure of clamped aluminum powerline conductors: From mono-contact crossed wires to full conductor vibrational tests[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 146: 107073.
- [59] GOLDEN P J, GRANDT A F. Fracture mechanics based fretting fatigue life Ti-6Al-4V[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71(15): 2229-2243.
- [60] MUTOH Y, XU J Q. Fracture mechanics approach to fretting fatigue and problems to be solved[J]. *Tribology International*, 2003, 36(2): 99-107.
- [61] NABOULSI S. Applications of crack analogy to fretting fatigue[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, 72(10): 1610-1623.
- [62] RENGARAJ B, BABA S, OKAZAKI M. Role of tangential force coefficient on fretting fatigue life estimation of a single crystal Ni-base superalloy[J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2017, 4(5): 17-00187.
- [63] BAIETTO M C, PIERRES E, GRAVOUIL A, et al. Fretting fatigue crack growth simulation based on a combined experimental and XFEM strategy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 47: 31-43.
- [64] GINER E, SABSABI M, RODENAS J J, et al. Direction of crack propagation in a complete contact fretting-fatigue problem[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 58: 172-180.
- [65] MARCO M, INFANTE-GARCÍA D, DÍAZ-ÁLVAREZ J, et al. Relevant factors affecting the direction of crack propagation in complete contact problems under fretting fatigue[J]. *Tribology International*, 2019, 131: 343-352.
- [66] BHATTACHARYA B, ELLINGWOOD B. Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20 (9): 631-639.
- [67] CHABOCHE J L, LESNE P M. A non-linear continuous fatigue damage model[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structures*, 1988, 11(1): 1-17.
- [68] LEMAITRE J. Evaluation of dissipation and damage in metals submitted to dynamic loading[J]. *Mechanical Behavior of Materials*, 1972, 294: 540-549.
- [69] 李爱民, 崔海涛, 温卫东. 基于非线性连续介质损伤力学方法的微动疲劳寿命预测[J]. *航空学报*, 2013, 34 (9): 2122-2129.
- LI Aimin, CUI Haitao, WEN Weidong. Prediction of fretting fatigue life based on nonlinear continuum damage mechanics[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(9): 2122-2129.
- [70] QURAIISHI S M, KHONSARI M M, BAEK D K. A thermodynamic approach for predicting fretting fatigue life[J]. *Tribology Letters*, 2005, 19(3): 169-175.
- [71] 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: 260-272.
- [72] HOJJATI-TALEMI R, WAHAB M A. Fretting fatigue crack initiation lifetime predictor tool: Using

- damage mechanics approach[J]. *Tribology International*, 2013, 60: 176-186.
- [73] HU Z, HOU Y X, WANG E Y, et al. Numerical prediction of fretting fatigue life for cold-drawn eutectoid carbon steel wire using continuum damage mechanics and effective slip amplitude[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 128: 104167.
- [74] LIN X H, XU Y Z. An equivalent damage model to fretting fatigue initiation life considering wear[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 163: 107048.
- [75] 霍永忠,尹东,赵杰江,等.微动磨损与微动疲劳寿命的计算与分析方法[J]. *力学季刊*, 2015, 36(2): 165-178.
- HUO Yongzhong, YIN Dong, ZHAO Jiejiang, et al. Calculation and analysis method of fretting wear and fretting fatigue life[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2015, 36(2): 165-178.
- [76] PINTO A L, CARDOSO R A, TALEMI R, et al. Early crack orientation prediction methods under fretting fatigue loading including wear effects[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 161: 106893.
- [77] DONG Y H, ZENG D F, WU P B, et al. Study on fretting fatigue crack initiation of scaled railway axles in consideration of fretting wear[J]. *Wear*, 2023(512/513): 204545.
- [78] SHEN F, HU W P. A damage mechanics approach to fretting life prediction with consideration of elastic-plastic damage model and wear[J]. *Tribology International*, 2015, 82: 176-190.
- [79] SHEN F, KE L L, ZHOU K. A debris layer evolution-based model for predicting both fretting wear and fretting fatigue lifetime[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 142: 105928.
- [80] XU Y Z, YUAN F, LIN X H. Numerical investigation to the effect of wear on fretting fatigue life using CDM and fracture mechanics[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 36(5): 110261.
- [81] CARDOSO R A, ARAÚJO J A, MALCHER L, et al. ANN vs. theoretical models for predicting crack path in fretting fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 199: 109075.
- [82] WANG C, XIAO Q Q, GUO Y J, et al. Fretting fatigue crack propagation lifetime estimation using long short-term memory network[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, 327(17): 111420.
- [83] LIU Y J, YUAN H. A hierarchical mechanism-informed neural network approach for assessing fretting fatigue of dovetail joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 168: 107453.
- [84] HAN S, KHATIR S, WANG C, et al. An improved artificial neural network for the direct prediction of fretting fatigue crack initiation lifetime[J]. *Tribology International*, 2023, 183: 108411.
- [85] LI X, YANG H R, YANG J W. Fretting fatigue life prediction for aluminum alloy based on particle-swarm-optimized back propagation neural network[J]. *Metals*, 2024, 14: 381.
- [86] CARDOSO R A, OLIVEIRA G A B, ALMEIDA G M J, et al. A simple linear regression strategy for fretting fatigue life estimates[J]. *Tribology International*, 2024, 198: 109852.
- [87] HAN S, KHATIR S, WAHAB M A. A deep learning approach to predict fretting fatigue crack initiation location[J]. *Tribology International*, 2023, 185: 108528.
- [88] WANG C, LI Y F, TRAN N H, et al. Artificial neural network combined with damage parameters to predict fretting fatigue crack initiation lifetime[J]. *Tribology International*, 2022, 175: 107854.
- [89] HAN S, WANG C, KHATIR S, et al. A deep neural network approach combined with Findley parameter to predict fretting fatigue crack initiation lifetime[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176: 107891.

(编辑:夏道家)