

缺口件疲劳寿命预测研究现状与展望

柳欣, 王望, 孔德琼

西安石油大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065

DOI:10.61369/ME.2025100030

摘要 : 对缺口件的五种常规预测方法进行了介绍, 重点对各种寿命预测方法的原理、流程、最新研究现状及成果进行了综述, 并分析了各种预测方法的优缺点。最后根据当前研究成果, 对这些寿命预测方法的发展方向进行了展望。

关键词 : 疲劳; 缺口件; 寿命预测

Research Status and Prospects of Fatigue Life Prediction for Notched Components

Liu Xin, Wang Wang, Kong Deqiong

School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract : This paper provides an overview of five conventional prediction methods for notched components, with a focus on reviewing the principles, procedures, latest research progress, and key findings of various life prediction approaches. It also analyzes the pros and cons of each prediction method. Finally, based on current research outcomes, future directions for the development of these life prediction methods are discussed.

Keywords : fatigue; notched specimen; life prediction

引言

工程领域上疲劳破坏是常见的一种失效形式。工件在持续的循环应力 / 应变载荷条件下, 通常在工件的缺口、台肩或划痕处等截面产生较大变化而形成应力集中的部位萌生疲劳裂纹, 随着交变载荷的重复下裂纹逐渐扩展, 当裂纹达到临界尺寸时构件剩余截面无法承受载荷从而发生快速断裂。在实际服役环境中由于结构设计的需要、工件运转过程中收到冲击而产生损伤等原因, 往往存在许多含缺口的构件, 而这些缺口件极易在高频振动疲劳载荷条件下发生疲劳失效。因此笔者对近年来国内外缺口件疲劳寿命预测方法研究现状进行了介绍, 最后对疲劳寿命预测发展方向进行了展望。

一、疲劳寿命预测方法研究现状

目前国内外学者对于缺口件的疲劳寿命预测方法主要集中在以下五种方法: 名义应力建模法、局部应力应变法、应力场强法、临界距离法和应力梯度法。

(一) 名义应力建模法

名义应力建模法 (NSA) 是一种早期发展起来的抗疲劳设计方法, 它基于材料或部件的 S-N 曲线数据, 通过对比测试样品或结构易受疲劳影响部位的应力集中系数以及名义应力, 并与疲劳损伤累积理论相结合来评估疲劳强度的高低或预测疲劳寿命。

如图 1 所示, 同种材料下三个缺口构件几何形状不同, 但其应力集中系数 K_T 相同, 假设其在相同的载荷 σ_{nom} 下工作, 则这三个构件具有相同的疲劳寿命^[1]。

名义应力建模法因其方法简便而在工程领域获得广泛应用, 但仍存在以下局限性: 首先, 该方法认为疲劳寿命仅与缺口根部的最

大应力相关, 而与应力分布无关。但实际情况是即使构件具有相同的应力集中系数, 若缺口根部的应力场分布不同, 则构件的疲劳寿命也会不同^[2]。其次, 名义应力建模法基于弹性假设, 未计入循环载荷下的局部塑性变形, 这使得该方法的预测结果偏保守。因此, 在后来的发展中出现了多种改进方法, 包括应力严重系数法、有效应力建模法、细节额定系数法等。这些方法旨在克服传统方法的不足, 提高疲劳寿命预测的准确性和适用性。

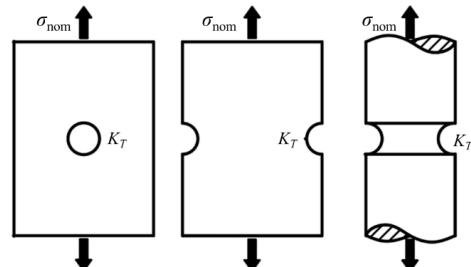


图 1 名义应力建模法原理示意图

(二) 局部应力应变法

局部应力应变法 (LSSA) 是一种工程上常用的缺口件低周疲劳寿命预测方法，该方法以材料的循环应力 – 应变曲线为基础，借助弹塑性有限元分析或近似计算（如 Neuber 法）等方法确定局部应力应变历程，将缺口所承受的名义应力谱转化为危险区域的局部应力应变谱，再结合疲劳累计损伤理论对缺口件进行寿命估算。

如图2所示， S_N 为缺口试件的名义应力， σ 和 ϵ 既是缺口试件的局部应力和局部应变，也是光滑试件的名义应力和名义应变。若构件危险部位的局部应力 – 应变历程与同材料的光滑试件相同，则二者的疲劳寿命相同，这一假设是局部应力应变法的基础。

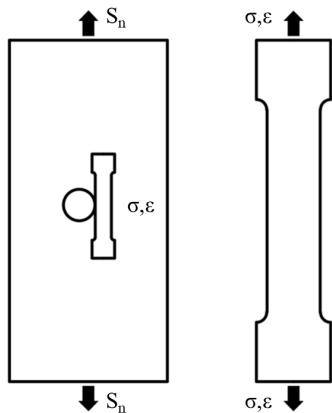


图2 局部应力应变法原理示意图

局部应力应变法以危险处的应力应变峰值为控制参数开展疲劳分析，计算过程简单，使用也比较广泛，但仍存在以下局限性：首先，局部应力应变法忽略了应力梯度、多轴应力和尺寸因素的影响，导致高周疲劳误差大；其次，对于复杂连接件或多零件系统，难以进行精确的应力应变分析；另外，局部应力应变法仅估算裂纹形成寿命，必须结合断裂力学估算裂纹扩展寿命，两者之和为总寿命。这增加了分析的复杂性和不确定性^[3]。

(三) 应力应变场强法

应力应变场强法 (SFIA) 是一种快速发展并得到广泛认可的疲劳裂纹形成寿命预测方法。该方法基于材料的循环应力 – 应变曲线，通过弹塑性有限元分析计算缺口件的应力场强度 – 时间历程或应变场强度 – 时间历程，然后根据材料的应力寿命曲线或应变寿命曲线，结合累计疲劳损伤理论，估算缺口件的疲劳寿命。

如图3所示， σ_{FI} 、 ϵ_{FI} 分别表示缺口应力场强度和应变场强度， Ω 为疲劳缺口破坏区，P 为缺口处应力峰值点，Q 为破坏区范围内一随机点。对于相同材料的光滑试件或缺口试件，若危险部位的应力应变场强历程相同，则疲劳寿命相同^[4]。

申杰斌等^[5]对传统场强法中疲劳损伤区域内各点对疲劳热点的破坏具有积极作用这一观点提出了质疑，并对权函数及疲劳损伤区域的划分标准进行适当修正，提高了疲劳寿命的预测精度；杜小龙等^[6]研究发现不同应力集中系数和应力水平对疲劳破坏区场强半径具有明显的影响，并对原始的场强半径求解方法进行了改进。

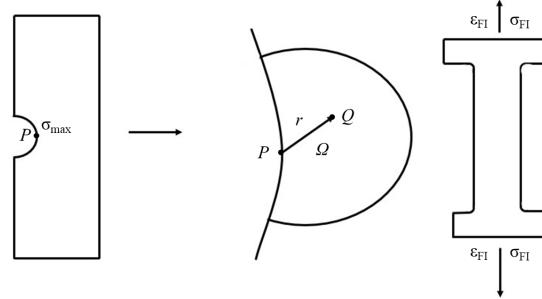


图3 应力应变场强法原理示意图

(四) 临界距离法

临界距离法 (CDM) 是由 Taylor 基于 Neuber 和 Peterson 的线弹性断裂力学理论的基础上提出的。临界距离法因其形式简单、数据获取方便、寿命预测误差小而被广泛应用于工程实际。

临界距离法的基本假设为在构件缺口危险点附近一定范围内的应力都会对该危险点的应力产生影响，当该危险范围内的平均应力超过材料的疲劳强度时，构件便发生疲劳失效，其中将某一特定的线段、面积或体积定义为临界区域，而临界距离则是临界线段的长度或者临界面域、体域的半径^[7]。临界距离法后来经演变发展形成了点法 (PM)、线法 (LM)、面法 (AM) 和体法 (VM) 四种常用的方法。

临界距离法是在疲劳损伤区的理论基础上提出的，将给定临界区域内的平均应力代替了危险点处的峰值应力作为疲劳损伤参数，弱化了危险点峰值应力的作用，具有较高的疲劳寿命预测精度，是工程界常用的一种预测方法。但仍存在以下局限性：首先，临界距离法的计算过程繁琐，且临界距离可能受到材料特性、所受载荷性质及缺口尺寸等因素的影响，如今仍没有统一的计算规范；其次临界距离法只考虑了临界区域内最大主应力对疲劳寿命的影响，当构件处于多轴应力状态时其预测结果精度有限。

吴志荣^[8]首次提出损伤梯度的理论并用损伤梯度对临界距离法中的点法、线法进行了修正，提出了一种新型变幅多轴载荷下的疲劳寿命预测方法；周思柱等^[9]采用相关数值方法结合了临界距离法中的点法、线法两种计算模型，提出了一种新型的临界平面模型 – 临界距离法耦合的缺口件多轴疲劳寿命预测方法。

(五) 应力梯度法

应力梯度法 (SGA) 是 Siebel 基于缺口根部周围晶粒间彼此相互作用，且相对应力梯度与缺口半径紧密相关的假设基础上进而提出的一种疲劳寿命预测方法。如图4所示，该方法认为缺口根部区域的应力随着离危险点的距离发生变化，缺口表面处应力水平较高，而缺口内部应力水平较低，内部低应力水平的组织对裂纹的扩展起到阻碍作用，其大小由危险点周围的相对应力梯度决定。

应力梯度法通过量化缺口附近应力非均匀性，显著提升了疲劳寿命预测的精度和机理合理性，尤其适用于含缺口结构的复杂工况。然而其参数标定依赖性强、计算成本较高及微观机理阐释不足等问题，仍是当前研究的瓶颈。

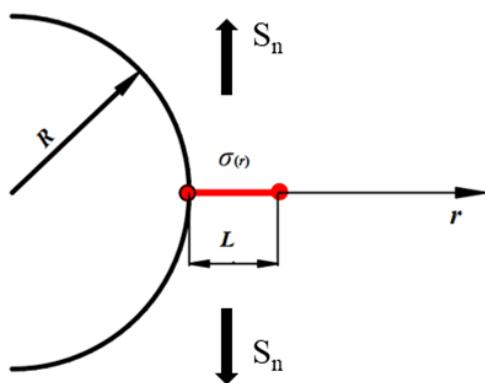


图4 临界距离法原理示意图

Taylor 等^[10]通过试验发现材料疲劳危险点处的应力梯度水平对疲劳寿命具有显著的影响，且其寿命既与危险点的应力峰值有关，又与危险点附近区域的平均应力大小有关；刘俭辉等^[11]综合考虑了应力梯度效应、几何尺寸效应以及非比例附加强化效应对缺口件疲劳寿命的影响，建立了一种新型的多因素耦合影响的缺口件疲劳寿命预测模型。刘长明^[12]采用了应变差、距离差代替了应变梯度参数对原始的应变梯度法计算模型进行了改进，极大地降低了缺口件疲劳寿命预测计算成本。

二、展望

随着近百年来国内外学者的大量试验研究，缺口件疲劳寿命

预测方法取得了重大成果，极大地推动了各领域疲劳部件设计制造技术的进步，为保障工件的安全有效运行发挥了重要作用。但随着先进技术的推广以及更加严苛复杂的服役环境要求，各疲劳寿命预测模型的适用性及准确性面临严峻的挑战。为减小缺口构件发生疲劳失效的概率，应在以下几个方面加强研究：

1. 缺口件疲劳寿命预测结果受材料表面状态、载荷条件和尺寸大小等因素的综合影响，从而具有较高的离散性，为了提高疲劳寿命预测结果的精度，应加强缺口件疲劳寿命预测可靠性方面的研究；

2. 缺口件在作业过程中通常是连续作业几百甚至几千小时，而构件所承受的载荷会发生变化，其疲劳损伤程度也随之发生变化，为了更加准确掌握构件的疲劳损伤情况，应加强缺口件疲劳寿命实时追踪系统方面的研究；

3. 随着新型高性能材料的推广应用，现有缺口件疲劳寿命预测模型难以进行新材料的匹配，应大力研究建立多材料、多缺口类型的疲劳寿命预测模型数据库，推动预测模型的快速匹配，提高工程适用性。

参考文献

- [1] 潘雪梅. 考虑缺口效应的多轴疲劳寿命预估方法研究 [D]. 兰州理工大学, 2021.
- [2] 刘雪松, 郭少飞. 船舶工程焊接接头完整性评估与疲劳寿命预测技术综述 [J]. 材料开发与应用, 2023, 38(05): 75–85.
- [3] 资锐. 考虑应力梯度及附加强化效应的缺口件多轴疲劳寿命预测方法 [D]. 兰州理工大学, 2022.
- [4] 蒋寒斌. 一种用于复合材料开孔层合板疲劳寿命预测的应力场强法 [D]. 江苏科技大学, 2024.
- [5] 申杰斌, 唐东林. 应力场强法中场径参数的研究 [J]. 工程设计学报, 2016, 23(01): 22–27.
- [6] 杜小龙, 段金辉, 马帅, 等. 基于应力场强法的场强半径规律研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(04): 124–128.
- [7] 廖鼎, 朱顺鹏, 高杰维, 等. 耦合临界界面—临界距离理论的缺口结构疲劳寿命预测 [J]. 机械强度, 2023, 45(02): 454–461.
- [8] 吴志荣. 钛合金多轴疲劳寿命预测方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [9] 周思柱, 李林, 曾云. 基于损伤参量梯度的缺口件多轴疲劳寿命预测 [J]. 机械设计与研究, 2024, 40(05): 44–49.
- [10] Taylor D, Bologna P, Knani B K. Prediction of fatigue failure location on a component using a critical distance method [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(9): 735–742.
- [11] 刘俭辉, 高凯丽. 耦合应力梯度及尺寸效应的缺口件疲劳寿命预测模型 [J]. 机械设计与研究, 2025, 41(03): 231–237.
- [12] 刘长明. 考虑温度及缺口支撑效应下应变梯度法的改进与应用研究 [D]. 大连理工大学, 2024.