

基于增量裂纹扩展与开裂能密度的橡胶结构 疲劳寿命预测

黄志强¹, 陈彦甫², 杨自豪²

(1. 空军工程大学基础部, 西安, 710051; 2. 西北工业大学空天领域复杂性科学教育部重点实验室, 西安, 710072)

摘要 为解决现有裂纹萌生法和裂纹扩展法在橡胶疲劳寿命预测方面存在的不足, 提出了基于增量裂纹扩展与开裂能密度的橡胶多轴疲劳寿命预测新方法。首先, 介绍了有限应变假设下开裂能密度的数学模型; 其次, 假设开裂能密度随裂纹扩展而发生变化, 建立了能量释放率与更新开裂能密度的函数关系; 最后, 建立了基于增量裂纹扩展下的橡胶结构多轴疲劳寿命预测模型。该模型可同时实现疲劳寿命的预测与裂纹的显式扩展, 数值算例验证了所提方法的有效性。结果表明, 在高应变情况下, 基于增量裂纹扩展的疲劳寿命预测方法优于经典开裂能密度方法, 预测精度提高约1倍。

关键词 橡胶结构; 开裂能密度; 疲劳寿命; 增量裂纹扩展

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.04.002

中图分类号 V215.5; O346.2 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)04-0011-08

A Fatigue Life Prediction Method of Rubber Structures Based on Incremental Crack Propagation and Cracking Energy Density

HUANG Zhiqiang¹, CHEN Yanfu², YANG Zihao²

(1. Fundamentals Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Key Laboratory of Complexity Science in Aerospace Field, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract At present, existing crack initiation methods and crack propagation methods which can be used to predict rubber fatigue life are not enough, a new method for rubber multi-axis fatigue life prediction based on incremental crack propagation and cracking energy density is proposed. First, a mathematical model of cracking energy density under the finite strain assumption is introduced. Second, assuming that the cracking energy density changes with crack propagation, a functional relationship between the energy release rate and the renewal cracking energy density is established. Finally, a multi-axis fatigue life prediction model of rubber structure based on incremental crack propagation is established. This model can simultaneously achieve prediction of fatigue life and explicit expansion of cracks. The effectiveness of the proposed method is verified by the numerical examples. The results indicate that the fatigue life prediction

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDC06030101)

作者简介: 黄志强(1978—), 男, 山西大同人, 副教授, 博士, 研究方向为生物力学建模及数值计算。E-mail: huangzq4245@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 杨自豪(1987—), 男, 河南漯河人, 教授, 博士生导师, 研究方向为多尺度方法、时空并行算法、不确定性量化与智能计算。E-mail: yangzihao@nwpu.edu.cn

引用格式: 黄志强, 陈彦甫, 杨自豪. 基于增量裂纹扩展与开裂能密度的橡胶结构疲劳寿命预测[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(4): 11-18.
HUANG Zhiqiang, CHEN Yanfu, YANG Zihao. A Fatigue Life Prediction Method of Rubber Structures Based on Incremental Crack Propagation and Cracking Energy Density[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(4): 11-18.

model based on incremental crack propagation is good in prediction accuracy in consideration of high-strain conditions, and the prediction accuracy increases by about twice as compared with the classical crack energy density life prediction model.

Key words rubber structure; cracking energy density; fatigue life; incremental crack propagation

橡胶凭借其优异的耐磨性、减振降噪性、密封性以及大变形承受能力,被广泛应用于航空轮胎^[1]、发动机^[2]、船舶设备^[3]、液压气压^[4]、汽车悬架系统^[5]等军工和民用领域。橡胶结构的疲劳寿命分析在许多领域具有重要意义^[6-8],疲劳裂纹一旦形成,极可能导致密封失效、结构松脱或控制精度下降,进而危及设备的完整性与运行安全。因此,需要发展有效的数值仿真手段预测橡胶材料的疲劳寿命,从而为空空领域内橡胶元件的可靠性分析提供技术支持。

研究橡胶疲劳性能的方法可分为两类:裂纹扩展法和裂纹萌生法^[9]。裂纹扩展法基于断裂力学理论,将疲劳寿命定义为初始裂纹扩展到临界尺寸所需的循环加载次数,其核心在于能量释放率与裂纹扩展速率的精确描述。文献[10]使用 J-积分理论计算了裂尖能量,结合全局-局部有限元方法分析了轮胎带束层的疲劳失效。文献[11]在变幅载荷下对单缺口撕裂橡胶试件进行了裂纹扩展试验,给出了裂纹扩展公式与对应的疲劳寿命预测模型。文献[12]基于 J-积分理论,建立了不同裂纹尺寸的局部模型,实现了全钢子午线轮胎的疲劳寿命预测。文献[13]推导了撕裂能与疲劳裂纹扩展速率的函数关系式,预测了密封圈的疲劳寿命。尽管裂纹扩展法的物理机制较为清晰,但其必须在裂尖区域布置细密且结构化的网格,并结合 J-积分理论等断裂力学方法以精确评估裂尖能量,建模与计算复杂度较高。裂纹萌生法基于连续介质力学理论,假设疲劳寿命由材料局部的受力或变形状态决定,通过建立物理参量与疲劳寿命之间的函数关系实现寿命预测,这导致了裂纹萌生法无法考虑材料内部的微观缺陷,在描述真实疲劳损伤方面存在局限。常见的疲劳物理参量包括应变、应力和能量密度。已有学者基于单轴疲劳试验开展了部分研究^[14-16],证明了应变作为疲劳参量的有效性。然而,单轴疲劳试验不能代表橡胶元件的实际负荷。文献[17]研究了多轴加载下丁苯橡胶的疲劳寿命,发现最大主应变不能兼顾单轴和多轴下的寿命预测。此外,应力类疲劳参量在多轴加载下的表现也不理想。文献[18]比较了氯丁橡胶的单轴和多轴疲劳试验,发现第一主应力无法准确地实现寿命预测。文献[19]也指出,应力标准在不同加载下适用性有限,并且难以准确描述橡胶疲劳寿命的强化效应。常见的能量密度类疲劳参量包括应变能密度和开裂能密度。文献[20]提出开裂能密度,其本质是应变能量密度中随着裂纹扩展而释

放的部分。该参量可分析任意给定开裂面的疲劳裂纹,并能够在复杂的应变历史下进行计算,因而在量化多轴疲劳损伤方面具有优势。文献[19]开展了多轴载荷下的疲劳寿命研究,发现开裂能密度优于应变能量密度,文献[21]得到了相同的结论。文献[22]基于连续损伤力学与开裂能密度导出了一种新的多轴疲劳预测方法,对于不同的加载路径,模型预测结果和实验数据具有较好的一致性。文献[23]考虑了拉伸和扭转下的疲劳加载,表明开裂能密度是描述橡胶多轴疲劳寿命的最有效的指标。文献[24~25]分别对超大型轮胎部件与发动机衬套的疲劳寿命开展研究,探究了开裂能密度方法在工程实际的应用价值。尽管开裂能密度方法在疲劳寿命预测中表现出一定的有效性,但该方法始终采用初始状态下的开裂能密度评估能量释放率,未能充分考虑疲劳裂纹扩展对能量的影响,限制了寿命预测精度。

为此,本文针对橡胶材料,提出了考虑裂纹扩展影响的能量释放率表征方法,通过将显式裂纹建模与开裂能密度方法相结合,建立了基于增量裂纹扩展的橡胶多轴疲劳寿命预测模型。最后,通过实验数据对比分析,验证了本文所提方法在橡胶疲劳寿命预测精度方面的优势。

1 有限应变下开裂能密度模型

根据有限变形理论,建立橡胶结构在多轴应力情况下的控制方程:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0}, & \text{in } B \\ \mathbf{u} = \mathbf{0}, & \text{on } \partial B_1 \\ \mathbf{t} = \mathbf{f}, & \text{on } \partial B_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力; $\mathbf{b}$ 为体力密度向量; $\mathbf{u}$ 为边界上的位移向量; $\mathbf{t}$ 为边界上的应力向量; B 为橡胶结构区域; ∂B_1 为位移边界条件区域; ∂B_2 为多轴应力边界条件区域; $\mathbf{f}$ 为施加给橡胶结构的多轴应力向量。橡胶材料的应力应变关系是非线性的,对应的本构方程由应变能函数唯一决定。本文选取 Mooney-Rivlin 本构模型表征橡胶材料力学行为,应变能函数 U 与柯西应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 的具体形式为:

$$\begin{cases} U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D}(J^{\text{el}} - 1)^2 \\ \boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J^{\text{el}}} \mathbf{F} \frac{\partial U}{\partial \mathbf{C}} \mathbf{F}^{\text{T}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{10} 、 C_{01} 、 D 为材料参数; J^{el} 为弹性体积应变,

应变能函数 U 中包含 D 的第3项体现了橡胶材料的压缩性质; F 为变形梯度张量; C 为右柯西-格林变形张量; $C = F^T F$; I_1, I_2 分别为 C 的第一和第二张量不变量。

使用有限元方法求解控制方程(1),即可得到橡胶结构中各点的应力应变历史,求解能量需要的物理量就可被表征:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma \cdot n \\ d\epsilon = \epsilon \cdot n \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 和 $d\epsilon$ 分别为受载荷作用后开裂面上的柯西牵引力矢量与应变矢量增量; n 为开裂面外法向向量,具体分布如图1所示。

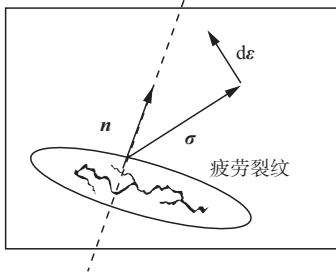


图1 疲劳裂纹应力应变状态

Fig.1 Fatigue crack stress-strain state

根据应力应变状态,橡胶结构各点处的开裂能密度增量 dW_c 可表示为^[20]:

$$dW_c = \sigma \cdot d\epsilon = \sigma \cdot D dt a =$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} a^T F S dE F^{-1} a \quad (4)$$

式中: D 为变形率张量; a 为受载荷作用后开裂面外法线方向单位向量; dt 为时间增量; ρ/ρ_0 为变形构型与初始构型的密度之比; S 为第2类 P-K 应力张量; E 为格林-拉格朗日应变张量。

根据受载荷作用后变形面元 ds 外法线方向向量 a , 与未受加载面元 ds_0 外法线方向向量 A 的关系式^[19]:

$$a ds = \frac{\rho_0}{\rho} F^{-T} A ds_0 \quad (5)$$

可得仅由未受加载面元外法线向量 A 、应力张量 S 、变形描述量 E 和 C 表征的开裂能密度增量^[26]。

$$dW_c = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{A^T S dE (F^T F^{-1}) A}{A^T (F^T F^{-1}) A} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{A^T S dE C^{-1} A}{A^T C^{-1} A} \quad (6)$$

式中: dE 为格林-拉格朗日应变张量增量。

2 基于增量裂纹扩展的疲劳寿命预测模型

裂纹尺寸较小时,能量释放率 T 可表示为^[27]:

$$T = K W_c c \quad (7)$$

式中: W_c 为开裂能密度; c 为裂纹长度; $K = 2\pi$ ^[28]。

在本研究中,橡胶材料的裂纹扩展定律使用 Mars-Fatemi 模型^[29] 表征。裂纹扩展定律建立了橡胶材料裂纹扩展速率 dc/dN 与一个循环载荷周期内裂纹尖端能量释放率 T 之间的关系。

将 Mars-Fatemi 模型离散处理,可得:

$$\left(\frac{dc}{dN} \right)_{\text{离散}} = \frac{\Delta c}{\Delta N} = \begin{cases} r_c \left(\frac{T_{\text{eq}}}{T_c} \right)^{F(R)}, & T_{\text{max}} \leq T_c \\ \infty, & T_{\text{max}} \geq T_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δc 为裂纹长度增量; ΔN 为规定的循环加载次数; r_c 为裂纹失稳扩展临界速率; T_c 为裂纹失稳扩展临界能量释放率; T_{eq} 为等效裂纹驱动力。 $F(R)$ 由三次多项式函数表示:

$$F(R) = F_0 + F_1 R + F_2 R^2 + F_3 R^3 \quad (9)$$

式中: R 为能量释放率之比, $R = T_{\text{min}}/T_{\text{max}}$, T_{min} 和 T_{max} 分别是一个循环载荷周期内能量释放率的最小值和最大值。

当 $R=0$ 时,考虑橡胶结构在时刻 i 的裂纹长度增量 Δc_i ,建立能量释放率 T_{max}^i 与更新开裂能密度 $(\max_{x \in B} W_c(x))_i$ 的函数关系:

$$\begin{cases} \Delta c_i = c_{i+1} - c_i \\ T_{\text{max}}^i = 2\pi (\max_{x \in B} W_c(x))_i c_i \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)得到:

$$c_{i+1} = c_i + P (2\pi (\max_{x \in B} W_c(x))_i c_i)^{F(0)} \Delta N \quad (11)$$

式中: c_i 为经过 i 段 ($i=0, 1, 2, \dots$) 循环后构件疲劳裂纹长度; $P = r_c / (T_c)^{F(0)}$ 。当 c_{i+1} 大于临界裂纹长度 c_f 时,停止施加疲劳加载。

对 ΔN_i 关于 i 求和,可得疲劳寿命 N_f :

$$N_f = \sum_i \Delta N_i \quad (12)$$

本节建立了基于增量裂纹扩展的橡胶多轴疲劳寿命预测模型。通过计算固定加载次数后裂纹长度的变化量,对疲劳裂纹宏观建模并更新能量释放率,最终得到裂纹扩展速率与疲劳寿命结果,具体计算流程如图2所示。

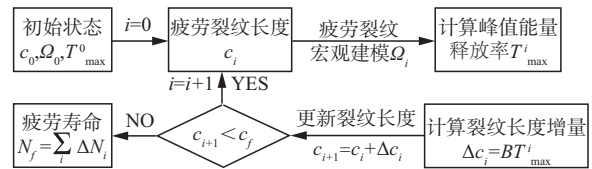


图2 基于增量裂纹扩展的多轴疲劳寿命预测流程

Fig.2 Multi-axial fatigue life prediction methodology based on incremental crack propagation

3 数值算例

为验证本文所提方法的有效性,选取哑铃型和

沙漏型两种典型橡胶结构开展数值算例验证。在哑铃型试件数值算例中,通过与经典开裂能密度方法预测结果及实验结果对比,验证所提方法在精度上的优势。沙漏型减振结构数值算例用以验证所提方法在实际工程结构上的适用性。

3.1 哑铃型试件疲劳寿命预测

哑铃型试件的几何形状,如图 3 所示,总长度 115 mm,端部宽度 25 mm,狭窄部分长度 33 mm,狭窄部分宽度 6 mm。采用 Abaqus 有限元软件对哑铃型试件单轴拉伸过程进行仿真计算,有限元模型采用六面体 8 节点实体单元剖分。

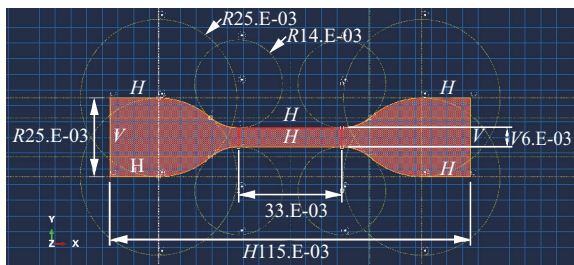


图 3 哑铃型试件几何模型

Fig. 3 Dumbbell-shaped specimen geometry

试件的材料为合成异戊橡胶(硫化空白胶),其本构关系为 Mooney-Rivlin 模型。为了消除橡胶应力软化影响^[30]并准确捕捉非耗散部分的响应,利用 5 000 个循环后的应力-应变滞回环中的撤回曲线进行本构参数拟合,拟合结果如表 1 所示。材料的裂纹扩展定律使用上述的离散 Mars-Fatemi 模型描述,具体参数如表 2 所示。

表 1 Mooney-Rivlin 模型参数

Tab. 1 Mooney-Rivlin model parameters

参数	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa	D/MPa^{-1}
拟合值	0.166 1	0.01	0.000 1

表 2 离散 Mars-Fatemi 模型参数

Tab. 2 Discrete Mars-Fatemi model parameters

疲劳参数	参数值
裂纹临界长度 c_f/mm	4.00
裂纹临界撕裂能 $T_c/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	1.00
裂纹临界扩展速率 $r_c/(\text{mm} \cdot \text{cycle}^{-1})$	9.70×10^{-5}
$R=0$ 时幂指数 F_0	1.78

为了验证所提方法的有效性,开展了针对哑铃型试件的疲劳寿命实验。实验采用应变疲劳加载方式,以标距段应变为标准施加载荷,在应变为 127.4%~189.1% 的范围内开展了 5 种工况下的疲劳实验,每种工况下分别测试 6 个样片。以每组实验结果的几何平均寿命作为实测疲劳寿命。

依据实验观测结果,在试件中部边缘处预置切

口,并将其视作初始裂纹,如图 4 所示。对整个疲劳加载过程进行离散化处理,在施加固定次数的疲劳载荷后重新计算开裂能密度,并更新裂纹长度,如果裂纹长度超过临界长度则循环终止。

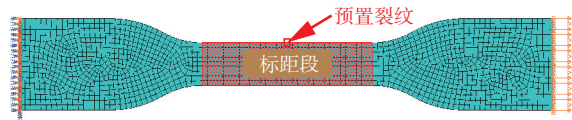
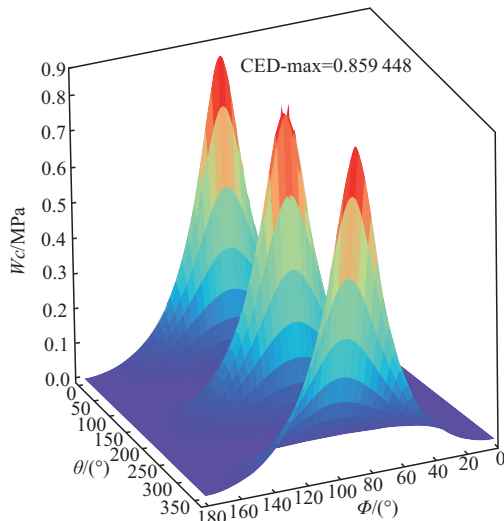


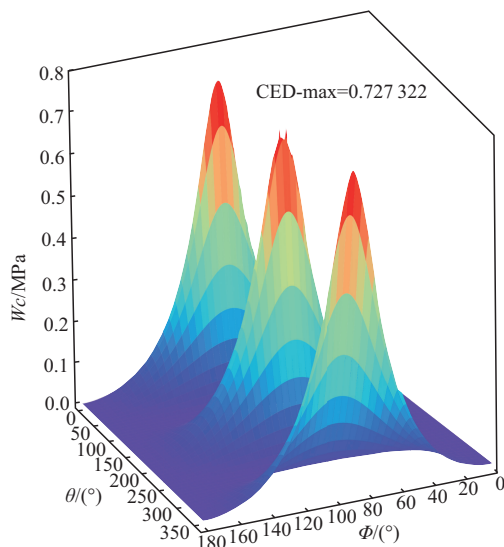
图 4 哑铃型试件有限元模型

Fig. 4 Finite element model of a dumbbell-shaped specimen

开展疲劳寿命预测时,规定每完成 1 000 次疲劳加载后,对裂纹长度与开裂能密度进行更新。边界条件为 155.5% 裂纹扩展过程中的开裂能分布,如图 5 所示,具体裂纹扩展过程如图 6 所示。



(a) 初始状态



(b) 临界状态

图 5 边界条件为 155.5% 裂纹扩展过程中的开裂能分布

Fig. 5 Distribution of cracking energy during the crack propagation process of 155.5% boundary conditions

将初始裂纹长度设置为 0.01 mm,结合表 1 和表 2 中的材料参数计算哑铃型试件的疲劳寿命,预测结果如表 3 所示。与经典开裂能密度方法相比,本文提出的增量裂纹扩展法的预测效果更好。定义预测寿命与实测寿命之比为指标 r ,增量裂纹扩展法与开裂能密度方法各自的指标均符合 $0.5 < r < 2$,满足工程疲劳寿命预测的要求。随

着工程应变不断升高,增量裂纹扩展方法的预测结果愈加趋于实测寿命,能够更加准确地衡量材料的疲劳特性,而开裂能密度方法的预测结果虽满足工程要求,但相较于实测寿命过于保守,低估了材料的疲劳性能。上述结果说明,增量裂纹扩展方法可以更为准确地预测哑铃型试件的疲劳寿命。

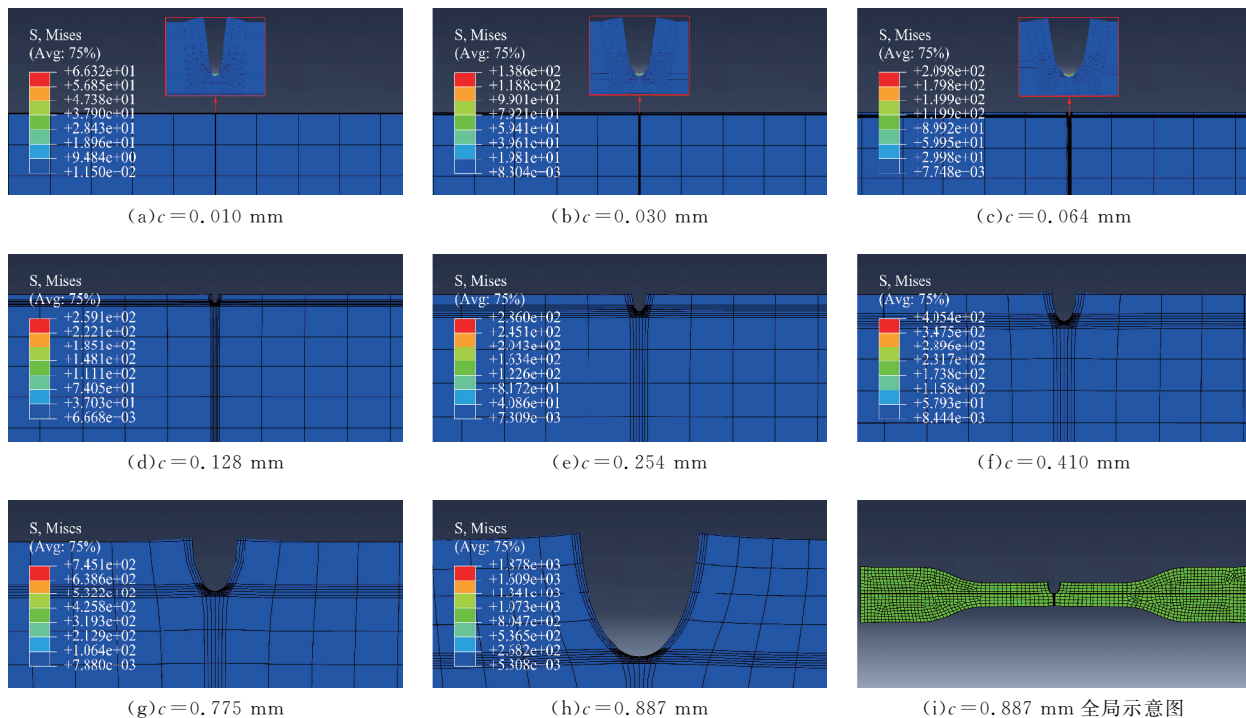


图 6 哑铃型试件裂纹扩展过程

Fig. 6 Crack propagation process of dumbbell-shaped specimen

表 3 哑铃型试件寿命预测结果比较

Tab. 3 Comparison of dumbbell-shaped specimen life prediction results

标距段工程应变范围	0%~127.4%	0%~134.4%	0%~155.5%	0%~160.0%	0%~189.1%
实测寿命 N^E	82 808.00	61 971.00	39 822.00	33 580.00	26 639.00
增量裂纹扩展法预测寿命 N^I	50 000.00	43 000.00	29 000.00	27 000.00	26 000.00
指标 $r_I = N^I / N^E$	0.60	0.69	0.73	0.80	0.98
经典开裂能密度方法预测寿命 N^C	49 090.00	41 780.00	26 300.00	23 660.00	13 090.00
指标 $r_C = N^C / N^E$	0.59	0.67	0.66	0.70	0.49

3.2 沙漏型减振结构疲劳寿命预测

沙漏型减振结构的几何模型如图 7 所示,整体呈轴对称结构,总高度为 18 mm。其中,中部狭窄部分的高度为 4 mm,上下两端的厚度均为 2 mm,底部半径为 8 mm。该结构具备应力集中特征,易于在狭窄部位形成裂纹。本文采用 Abaqus 有限元软件对其进行数值模拟分析,模型几何区域采用三维八节点六面体实体混合单元进行剖分离散。同时,在试件中部边缘处预置初始裂纹,如图 8 所示。

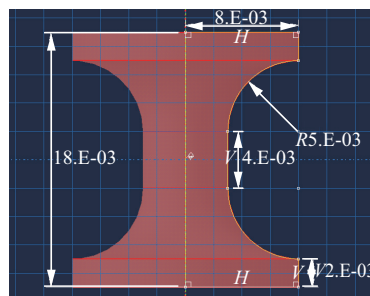


图 7 沙漏型减振结构几何模型

Fig. 7 Geometric model of hourglass-shaped vibration damping structure

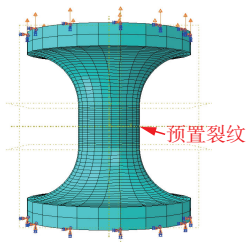


图 8 沙漏型减振结构有限元模型

Fig. 8 Finite element model of hourglass-shaped vibration damping structure

材料本构关系使用 Mooney-Rivlin 模型表征, 本构模型参数如表 4 所示。裂纹扩展定律使用离散 Mars-Fatemi 模型描述, 参数如表 2 所示。规定每完成 10 000 次疲劳加载后, 对裂纹长度进行更新。

表 4 Mooney-Rivlin 模型参数

Tab. 4 Mooney-Rivlin model parameters			
参数	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa	D/MPa^{-1}
拟合值	166.1	10	0.000 1

将初始裂纹长度分别设置为 0.01 mm, 0.02 mm 和 0.03 mm, 位移载荷分别取 5 mm, 10 mm, 15 mm 和 20 mm, 结合表 4 和表 2 中的材料参数计算了减振结构的疲劳寿命, 验证了本文所提方法在沙漏型橡胶减振结构上的适用性。疲劳寿命预测结果如表 5 所示, 裂纹扩展过程如图 9 所示。

表 5 沙漏型减振结构寿命预测结果

Tab. 5 Life prediction results of hourglass-shaped damping structure

初始裂纹 c_0/mm	位移载荷范围/mm			
	0~5.0	0~10.0	0~15.0	0~20.0
0.01	1.38E+06	2.60E+05	1.10E+05	4.00E+04
0.02	8.50E+05	1.80E+05	8.00E+04	3.00E+04
0.03	6.40E+05	1.40E+05	6.00E+04	2.00E+04

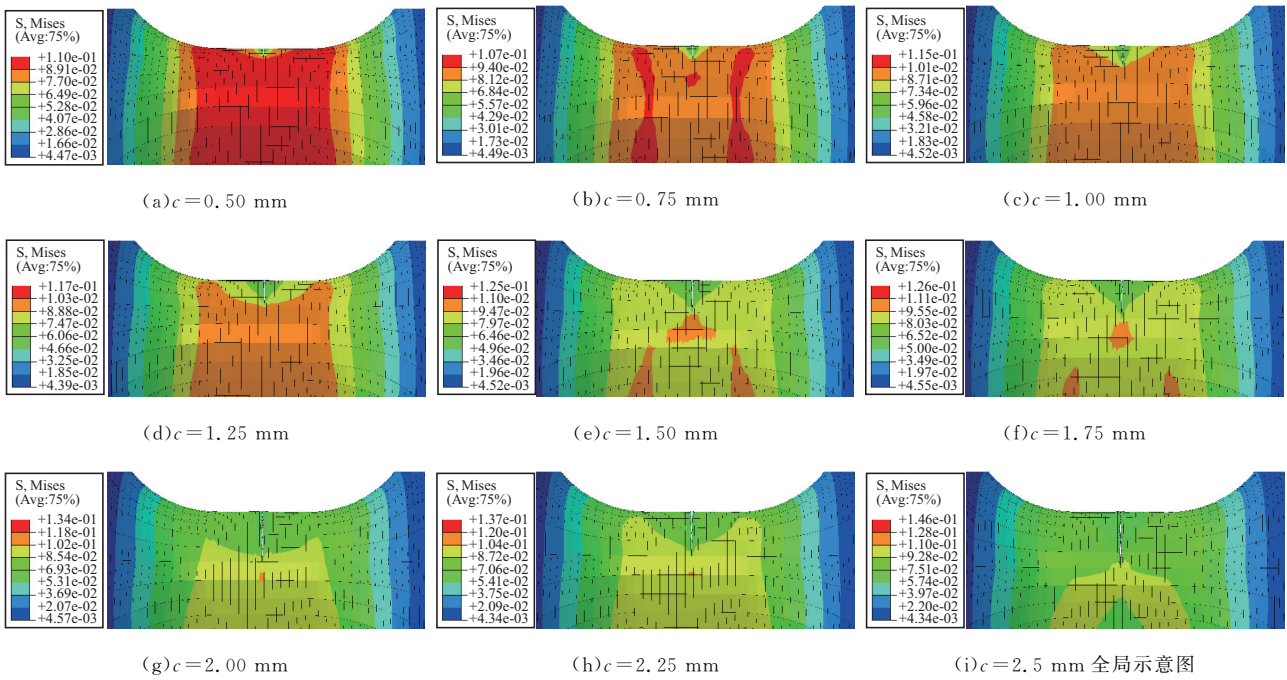


图 9 沙漏型减振结构裂纹扩展过程

Fig. 9 Crack propagation process in hourglass-shaped damping structure

4 结论

本文针对橡胶构件的疲劳寿命问题, 提出了基于增量裂纹扩展的疲劳寿命预测模型, 主要结论如下:

1) 提出了疲劳加载过程中开裂能密度的更新算法, 给出了更为准确表征裂纹扩展的能量释放率计算公式。

2) 根据开裂能密度, 建立了一种支持裂纹显式扩展的新的疲劳寿命预测模型。

3) 数值算例表明, 本文提出的方法相比于传统开裂能密度方法寿命预测结果更为准确, 在高应变加载下预测精度提高尤为显著。

本文提出的增量裂纹扩展法在密封圈、隔振衬套、航空轮胎等橡胶结构的疲劳寿命预测中具有潜在应用价值。

参考文献

- [1] 周宝珍,孙涛,刘峰,等. 国产高性能天然橡胶在航空轮胎胎面胶中的应用[J]. 轮胎工业, 2022, 42(10): 599-601.
ZHOU B Z, SUN T, LIU F, et al. Application of Domestic High Performance Natural Rubber in Tread Compound of Aircraft Tire[J]. Tire Industry, 2022, 42(10): 599-601. (in Chinese)
- [2] 黄鑫,张娟,喻岚,等. 航空发动机燃油附件用橡胶密封圈的表面损伤分析[J]. 失效分析与预防, 2023, 18(2): 131-136.
HUANG X, ZHANG J, YU L, et al. Analysis of Surface Damage of Rubber Seal Ring Used in Aircraft Engine Fuel Accessories[J]. Failure Analysis and Prevention, 2023, 18(2): 131-136. (in Chinese)
- [3] 温华兵,张坤,刘伟,等. 惯容-橡胶复合隔振器动力学建模及参数识别[J]. 振动测试与诊断, 2022, 42(4): 644-648, 821.
WEN H B, ZHANG K, LIU W, et al. Dynamic Mechanical Modeling and Parameter Identification of Inerter-Rubber Vibration Isolator[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 644-648, 821. (in Chinese)
- [4] 杨敏,曾良才,湛从昌. 液压缸组合密封性能仿真与参数优化研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(16): 8-12, 32.
YANG M, ZENG L C, ZHAN C C. Research on Performance Simulation and Parameter Optimization of Hydraulic Cylinder Combination Seal [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(16): 8-12, 32. (in Chinese)
- [5] KUMAR K S, BABU J M, PRAKASH P J, et al. Modal Analysis of Natural Rubber Enhanced Suspension System for Vibration Reduction[C]//Iwosp 2021, International Workshop on Statistical Physics. Antofagasta, Chile: AIP Publishing, 2023: 020019.
- [6] 韩流. 极端条件下航空密封件的制备与寿命预测[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
HAN L. Preparation and Life-Prediction of Aerospace Seals under Extreme Conditions[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [7] 张金尧,任军学,薛韬遥,等. 基于开裂能密度的柔性接头摆动疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 57-65.
ZHANG J Y, REN J X, XUE M Y, et al. Prediction of the Swing Fatigue Life of Flexible Joint Based on Cracking Energy Density [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 57-65. (in Chinese)
- [8] 尚现伟,张强,金平,等. 超弹性橡胶膜片疲劳寿命及可靠性分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(3): 47-52.
SHANG X W, ZHANG Q, JIN P, et al. Fatigue Life and Reliability Analysis of Superelastic Rubber Diaphragm[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(3): 47-52. (in Chinese)
- [9] WANG Z B. Research on Fatigue Failure Mode and Failure Theory of Rubber[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021(1): 012079.
- [10] LEE D, KIM S, SUNG K, et al. A Study on the Fatigue Life Prediction of Tire Belt-Layers Using Probabilistic Method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(3): 673-678.
- [11] SHANGGUAN W B. Fatigue Crack Growth Experiment and Modeling for Rubbers Used in Isolators under Variable Amplitude Loads[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 50.
- [12] 姜明磊. 全钢子午线轮胎疲劳寿命仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
JIANG M L. Numerical Simulation on the Fatigue Life of All-Steel Radial Tire [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 裴硕,林天豪,王世杰. 基于断裂力学的 DAS 组合密封圈疲劳寿命预测[J]. 润滑与密封, 2020, 45(5): 119-123.
PEI S, LIN T H, WANG S J. Fatigue Life Prediction of DAS Combined Seals Based on Fracture Mechanics [J]. Lubrication and Sealing, 2020, 45(5): 119-123. (in Chinese)
- [14] SHANGGUAN W B, WANG X L, DENG J X, et al. Experiment and Modeling of Uniaxial Tension Fatigue Performances for Filled Natural Rubbers[J]. Materials & Design, 2014, 58: 65-73.
- [15] BELKHIRIA S, HAMDI A, FATHALLAH R. Strain-Based Criterion for Uniaxial Fatigue Life Prediction for an SBR Rubber: Comparative Study and Development [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2020, 234(7): 897-909.
- [16] YIN F, FAN R L, FENG C C, et al. Prediction of Multiaxial Load Fatigue Life for Rubber Bushing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(3): 700-707.
- [17] AYOUB G, NAITABDELAZIZ M, ZAIRI F. Multiaxial Fatigue Life Predictors for Rubbers: Application of Recent Developments to a Carbon-Filled SBR[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 66: 168-176.
- [18] POISSON J L, LACROIX F, MEO S, et al. Biaxial Fatigue Behavior of a Polychloroprene Rubber[J]. In-

- ternational Journal of Fatigue, 2011, 33(8): 1151-1157.
- [19] ZINE A, BENSEDDIQ N, ABDELAZIZ M N. Rubber Fatigue Life under Multiaxial Loading: Numerical and Experimental Investigations[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(10): 1360-1368.
- [20] MARS W V. Critical Plane Analysis of Rubber[J]. Fatigue Crack Growth in Rubber Materials: Experiments and Modelling, 2020: 85-107.
- [21] PENG Y, LIU G, QUAN Y, et al. Cracking Energy Density Calculation of Hyperelastic Constitutive Model and its Application in Rubber Fatigue Life Estimations[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133: 1-7.
- [22] AYOUB G, NAIT-ABDELAZIZ M, ZAIRI F, et al. Fatigue Life Prediction of Rubber-Like Materials under Multiaxial Loading Using a Continuum Damage Mechanics Approach: Effects of Two-Blocks Loading and R Ratio[J]. Mechanics of Materials, 2012, 52: 87-102.
- [23] BELKHIRIA F R. Cracking Energy Density for Rubber Materials: Computation and Implementation in Multiaxial Fatigue Design[J]. Polymer Engineering and Science, 2020, 60(9): 2190-2203.
- [24] NYAABA W, FRIMPONG S, ANANI A. Fatigue Damage Investigation of Ultra-Large Tire Components[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 119: 247-260.
- [25] ELANGO C, PANDI S K, MAHADULE R N, et al. Fatigue Life Prediction and Correlation of Engine Mount Elastomeric Bushing Using a Crack Growth Approach[R]. India: FCA Engineering India Pvt, Ltd, 2022.
- [26] 王小莉. 橡胶隔振器多轴疲劳寿命预测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- WANG X L. Studies on Life Prediction of Multiaxial Fatigue for Rubber Isolators[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [27] AITBACHIR M, MARS W V, VERRON E. Energy Release Rate of Small Cracks in Hyperelastic Materials[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, 47(4): 22-29.
- [28] MARS W V, FATEMI A. Multiaxial Fatigue of Rubber: Part II Experimental Observations and Life Predictions[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28(6): 523-538.
- [29] MARS W V, FATEMI A. A Phenomenological Model for the Effect of R Ratio on Fatigue of Strain Crystallizing Rubbers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2003, 76(5): 1241-1258.
- [30] GEHLING T, SCHIEPPATI J, BALASOORIYA W, et al. Fatigue Behavior of Elastomeric Components: A Review of the Key Factors of Rubber Formulation, Manufacturing, and Service Conditions[J]. Polymer Reviews, 2023, 63(3): 763-804.

(编辑: 陈斐)