

基于开裂能理论的橡胶动态疲劳分析*

金状兵, 罗文波

(湘潭大学土木工程与力学学院, 湘潭 411105)

5 **摘要:** 基于开裂能理论, 提出了一种橡胶制品动态疲劳评估的数值-实验混合方法。该方法不仅能有效预测复杂多轴载荷作用下橡胶构件的疲劳寿命, 还能准确预测裂纹开裂方向。该方法的另外一个优点是能大幅减少橡胶疲劳表征的时间和成本。以空气弹簧橡胶支座的疲劳分析和优化为例, 说明了该方法分析结果与实验吻合良好。

10 **关键词:** 橡胶疲劳分析; 开裂能; 多轴加载; 数值-实验分析; 开裂方向
中图分类号: U461; TB942

DYNAMICAL FATIGUE CHARACTERIZATION OF RUBBER BASED ON CRACK ENERGY DENSITY THEORY

JIN Zhuangbing, LUO Wenbo

(College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

15 **Abstract:** Based on CED (Crack Energy Density) theory, a new numerical-experimental analysis approach is proposed to evaluate the fatigue life of rubber structure under the cyclic multi-axial loading. By using the proposed method, the fatigue life and the cracking orientation can be predicted accurately. One advantage of the proposed method is that the time and cost of characterizing the rubber fatigue property can be saved dramatically. As an example, the method is applied to analyze and optimize an air spring shear pad. It can be found that the simulated results agree well with the experiment data

20 **Key words:** rubber fatigue analysis; crack energy density; multi-axial loading; numerical-experimental analysis; the cracking orientation

0 引言

橡胶结构的疲劳寿命评估一直是橡胶产品设计棘手的难题, 目前工程应用最广泛也最成功的方法是基于断裂力学的疲劳裂纹扩展方法^[1-6]和疲劳寿命 S-N 曲线法^[7-8]。S-N 曲线法是一种基于产品的物理实验来了解材料疲劳特性的方法, 该方法能有效地预测橡胶产品的疲劳寿命, 但需要建立庞大的疲劳实验数据库, 实验非常耗时耗资, 且只能在产品开发的后期进行, 产品疲劳设计风险系数颇高。因此国内外学者均试图从理论上对橡胶材料的疲劳评估提供保障^[9-16]。近年来针对橡胶制品处于多轴周期载荷作用的疲劳估算方法出现了许多新的分析模型, 但由于橡胶大变形引发的应力应变复杂性, 加之结构形状、环境及材料等众多因素的影响, 尚未形成统一的疲劳估算理论。目前使用比较广泛的疲劳估算理论主要有等效应力法、能量法、等效应力法和临界面法。橡胶疲劳分析的开裂能量法(Cracking Energy Density-CED)^[9]是 Mars 提出一种新的橡胶疲劳分析与预测理论, 该理论能够解析橡胶的多轴疲劳规律, 有效结合断裂力学方法和 S-N 曲线方法的优点, 减少了疲劳表征的困难和工

30 作量, 且因具有临界面的特征, 可同时预测疲劳寿命和裂纹萌生方向, 为快速进行橡胶构件

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172256); 湖南省教育厅重点项目(13A098); 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放课题(KF14012)

作者简介: 金状兵(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事橡胶结构的力学性能和寿命研究

通信联系人: 罗文波(1969-), 男, 教授, 博士, 博导, 主要从事固体流变学、黏弹性理论与应用. E-mail: luowenbo@xtu.edu.cn

的疲劳设计和评估提供了一种有效的途径。本文基于 CED 理论^[9], 提出一种橡胶制品动态疲劳评估的数值-实验混合方法。并将该方法应用于囊式空气弹簧橡胶支座的疲劳寿命评估和结构优化。

1 裂纹形核-生长模型及理论

45 裂纹形核-生长模型基于断裂力学观点, 预置初始裂纹, 应用断裂力学的理论^[1]对裂纹形核至失稳扩展过程近似描述。将橡胶的疲劳破坏过程分为两个阶段: 第一阶段是裂纹形核至可见裂纹阶段; 第二阶段是形核裂纹生长至失稳破坏阶段。为保证橡胶构件工作的可靠性, 工程应用中通常只关注疲劳裂纹的形核寿命。定义材料从虚拟微裂纹 c_0 成形发展至特定长度 c_f 所经历循环的次数为裂纹的形核寿命, 表示为

$$50 \quad N = \int_{c_0}^{c_f} 1/f(T(c,t))dc \quad (1)$$

式中 $f(T(c,t))$ 是一个以能量释放率为变量的函数。 $T(c,t)$ 则表示能量释放率随时间 t 及裂纹长度 c 而变。目前应用广泛的橡胶动态疲劳裂纹形核-生长模型主要有 Thomas 模型^[10], Lake-Lindly 模型^[13], Paris 模型和 Mars-Fatemi 模型^[14]及基于试验数据查表模型^[15]。 R 是疲劳周期中的载荷比, 可用疲劳周期中撕裂能的最小值与最大值的比值表示, 根据 R 的取值
55 可以将这些模型分成两类, 即脉动循环疲劳裂纹形核-生长模型 ($R=0$) 和非脉动循环疲劳裂纹形核-生长模型 ($0<R<1$)。

1.1 脉动循环疲劳裂纹形核-生长模型

$R=0$ 时的疲劳裂纹形核-生长模型主要包括 Thomas 模型和 Lake-Lindly 以及基于试验数据查表模型, 在疲劳试验数据缺乏时常使用 Thomas 模型和 Lake-Lindly 模型。这两种模型
60 对非应变结晶橡胶疲劳裂纹增长描述简单可靠。本文使用 Thomas 模型表征橡胶疲劳寿命。该模型认为橡胶疲劳裂纹生长无阈值, 有载荷便有增长。

$$\frac{dc}{dN} = \begin{cases} r_c \left(\frac{T_{\max}}{T_c} \right)^F, & T_{\max} \leq T_c \\ \infty, & T_{\max} \geq T_c \end{cases} \quad (2)$$

式中 F 是幂指数, T_{\max} 是一个载荷周期中出现的撕裂能峰值, T_c 为裂纹失稳扩展前的临界撕裂能, r_c 是裂纹失稳扩展前的临界生长速率。Thomas 模型参数易确定, 可以与 $R \neq 0$ 时
65 的模型结合以描述应变结晶橡胶裂纹形核与生长。

1.2 非脉动循环疲劳裂纹形核-生长模型

当 $0<R<1$ 时, 通常是采用 $R=0$ 的模型, 将模型中的 T_{\max} 以等效撕裂能 T_{eq} 替代, 如 Paris 模型, Mars-Fatemi 模型。Paris 模型的等效撕裂能表示如下:

$$T_{eq} = \Delta T = T_{\max} - T_{\min} = T_{\max}(1-R) \quad (3)$$

70 Paris 模型可以和 $R=0$ 的所有模型结合, 但它只能用于描述非应变结晶类橡胶材料疲劳裂纹扩展速度和撕裂能之间关系。

而本文所选用的 Mars-Fatemi 模型, 其等效撕裂能表征如式(4):

$$\begin{cases} T_{eq} = T_{max} \frac{F(R)}{F(0)} T_c (1 - \frac{F(R)}{F(0)}) \\ F(R) = F_0 e^{F_{exp} R} + F_1 R + F_2 R^2 + F_3 R^3 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $F_0, F_1, F_2, F_3, F_{exp}$ 均为材料常数, 函数 $F(R)$ 确定了 R 对裂纹增长率影响。Mars-Fatemi 模型能更准确地确定应变结晶类橡胶的疲劳裂纹增长速度与撕裂能的关系。

2 CED 疲劳理论

开裂能方法最先由 Mars 和 Fatemi 用于橡胶疲劳分析中。如图 1 中 \vec{n} 代表橡胶内任意一点所指定的裂纹平面的单位法向矢量, $\vec{\sigma}$ 是该平面上的全应力矢量, $d\vec{\varepsilon}$ 对应于该平面上的应变增量。开裂能的增量定义如下:

$$dW_c = \vec{\sigma} d\vec{\varepsilon} \quad (5)$$

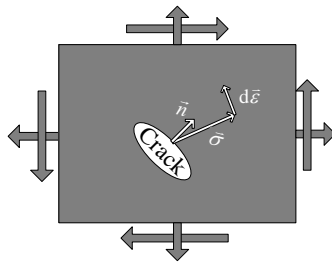


图 1 疲劳裂纹及其受力状态示意图

Fig.1 Schematic of fatigue crack under traction

W_c 通过其增量在开裂平面的整个变形历史积分得到。从开裂能的定义可知, 对任意给定点的应力状态, 全应力矢量同时包含了法向和切向应力的作用, 因此对于任意三维复杂应力状态 CED 方法仍然适用。同时开裂平面的法向矢量 \vec{n} 指定了裂纹平面的方位。当裂纹足够小且在裂纹扩展过程中满足自相似, 则无论是单轴还是多轴复杂加载, 橡胶材料裂纹扩展过程的能量释放率 T 只与裂纹的长度 c 和开裂能 W_c 有关。

$$T = -\frac{dU}{dA} = KW_c c \quad (6)$$

2.1 小应变条件下 W_c 的计算

小应变条件下, 橡胶材料可以视为理想线弹性体, Mars^[9] 通过引入多轴因子 β , 建立了开裂能 W_c 和应变能密度 W 的关系:

$$\frac{W_c}{W} = \frac{[\beta\nu + 1]\cos^2 \theta + [\beta(\beta\nu + 1)]\sin^2 \theta}{[\beta\nu + 1] + [\beta(\beta + \nu)]} \quad (7)$$

式中 λ_1, λ_2 为主伸长率, $\beta = \log \lambda_1 / \log \lambda_2$, 表征了裂纹平面所处的应力状态; ν 是材料的泊松比, 而 θ 则指定了裂纹平面方位角。Mars 详细讨论了 β 和 θ 对 W_c/W 的影响^[12]。

2.2 有限应变条件 W_c 的计算

在有限应变条件下^[12,16], 开裂能的计算必须考虑材料变形的影响, 开裂能的增量 dW_c 为:

$$dW_c = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\vec{R}^T \vec{C} \vec{S} d\vec{E} \vec{R}}{\vec{R}^T \vec{C} \vec{R}} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\vec{R}^T (2\vec{E} + \vec{I}) \vec{S} d\vec{E} \vec{R}}{\vec{R}^T (2\vec{E} + \vec{I}) \vec{R}} \quad (8)$$

100 式中 ρ / ρ_0 为变形后与变形前的质量密度比, $\bar{\mathbf{R}}$ 为变形前材料平面的法向矢量。 $\bar{\mathbf{S}}$ 为第二类 Piola-Kirchhoff 应力张量。 $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} = 2\mathbf{E} + \mathbf{I}$, \mathbf{E} 为 Green-Lagrange 应变张量。对不可压缩橡胶, 材料变形过程中主伸长率满足关系 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$, 仿照橡胶应变能密度的表示方法以主伸长率表示开裂能增量 dW_c , 对式(8)积分, 结果如下:

$$W_c = G \int_1^{\lambda_1} \frac{\cos^2 \theta (\lambda^3 - \beta^{-2} \lambda^{-3}) + \frac{1}{2} \sin^2 \theta \frac{\partial}{\partial \lambda} (\beta^2 \lambda^2 - 1)}{\lambda^2 (\cos^2 \theta + \beta^2 \sin^2 \theta)} d\lambda + G \int_1^{\lambda_2} \frac{(\beta^2 \lambda^2 - \beta^{-2} \lambda^{-4})}{\lambda^2 (\cos^2 \theta + \beta^2 \sin^2 \theta)} d\lambda \quad (9)$$

105 G 为剪切模量, β 为多轴向因子, $\beta = \lambda_1 / \lambda_2$, λ_1 、 λ_2 为主伸长率。

2.3 裂纹闭合处理

前文所述理论并未考虑裂纹平面发生闭合^[12]的情况。忽略裂纹表面摩擦力作用, 当裂纹表面的法向应力分量为压应力时, 则可能出现裂纹闭合。设置由于法向压应力作用引起的开裂能为 0, 而只考察裂纹表面切应力引起的开裂能对裂纹开裂的影响。开裂能的计算方法
110 仍与前述理论相同。当裂纹表面无切向应力分量时, 则裂纹的开裂能始终为 0, 该平面上裂纹始终不扩展。

3 基于 CED 理论的橡胶动态疲劳分析基本流程

基于 CED 理论的橡胶动态疲劳分析流程主要分为三大模块, 包括材料试验模块, 有限元仿真模块, 开裂能和疲劳寿命计算模块。

3.1 橡胶材料试验模块

材料试验模块包括超弹性本构模型试验和动态疲劳试验, 主要用于确定材料特性参数, 如材料的超弹性本构参数, 等效初始裂纹长度, 临界撕裂能强度, 撕裂能阈值, 临界裂纹扩展速率及应变结晶对疲劳裂纹增长的影响参数等。

3.1.1 超弹性本构实验

120 超弹性本构试验^[17,18]包括单轴拉伸(ST)、平面拉伸(PT) 和等双轴拉伸(ET)等三类基本变形实验。用于确定橡胶材料的超弹性本构参数。此外还可通过准静态循环实验考查材料的 MULLINS 应力软化效应。

3.1.2 撕裂强度试验

撕裂强度试验^[19]的目的是确定材料的临界撕裂能 T_c 。有三种试验方法, 包括裤型撕裂、
125 简单拉伸撕裂和平面拉伸撕裂, 如图 2 所示, 不同实验条件下撕裂能计算方法见表 1。

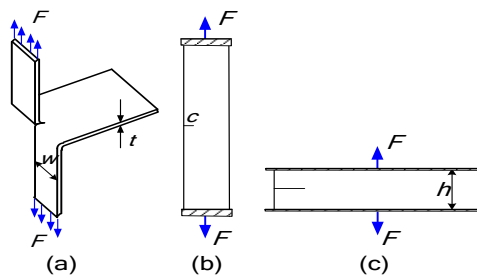


图2 三种橡胶撕裂强度试验试样: (a)裤型撕裂试样, (b)简单拉伸撕裂试样, (c)平面拉伸撕裂试样

Fig.2 Three kinds of tear test pieces: (a) trousers test piece, (b) tensile strip, (c) plane tensile strip

130

表1 不同类型撕裂试验撕裂能计算方法

Tab.1 Tear energy computation for different tear tests

裤型撕裂试验	平面拉伸撕裂试验	简单拉伸撕裂试验
$T = 2\lambda F / t - wW$	$T = Wh$	$T = 2KWc$ $K = (2.95 - 0.08\varepsilon) / (1 + \varepsilon)^{1/2}$

注：表中 λ 为伸长率， F 表示力， w 为应变能密度， c 为裂纹长， ε 为应变，其他几何参数见图2。

3.1.3 动态疲劳试验

135 动态疲劳试验^[19,20]包括单轴拉伸疲劳和平面拉伸疲劳试验。单轴拉伸疲劳试验是为表征在 $R=0$ 条件下初始裂纹对应变峰值和疲劳寿命关系的影响，可由此获得材料等效初始裂纹大小（虚拟初始裂纹长度）。单轴拉伸疲劳试验采用无缺口蝶形试样(图 3)，而平面拉伸疲劳试验采用带缺口矩形试样(图 2c)。两种疲劳试验的试验条件及载荷控制模式分别见表 2 和图 4。

140

表2 动态拉伸疲劳试验控制参数

Tab.2 The control condition of dynamic fatigue tests

试验类型	几何尺寸	频率	环境温度
单轴拉伸动态疲劳试验	100mm×5mm×1mm	1Hz	23℃
平面拉伸动态疲劳试验	150mm×10mm×1mm	10Hz	23℃

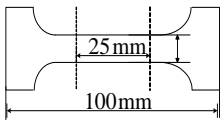


图3 单轴拉伸疲劳试样

145

Fig.3 Specimen for uniaxial tensile fatigue test

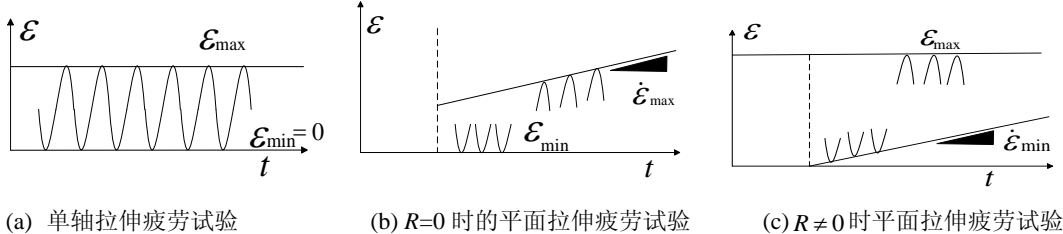


图4 疲劳试验的应变控制模式

Fig.4 Strain loading modes of fatigue test

150 3.2 橡胶结构有限元分析模块

对橡胶结构进行有限元分析的主要目的是获取橡胶构件经历的应变历史。分析软件选用商业软件 ABAQUS。有限元分析结束后，从 ODB 结果文件中提取所有单元中心的名义应变历史来计算材料的开裂能。由于疲劳分析是基于有限元分析结果数据，因此有限元分析的结果直接决定着疲劳寿命预报的精度。

155 3.3 疲劳分析模块

3.3.1 开裂能和撕裂能的计算

开裂能不仅与材料点的应变状态有关且与所选取的裂纹平面有关。以球坐标表示裂纹平面所处的方位，选取变形前的各单元中心所在局部坐标系作为参考坐标系。由 CED 理论计

算每个单元中心所有可能开裂平面在应变峰值点的开裂能，并通过雨流计数法^[21]统计分类各平面所经历开裂能历史。开裂能历史将被划分成 m 段。利用式(6)计算每个小段的撕裂能峰值，式(6)中的裂纹长度指的是当前载荷周期开始前裂纹的长度。

3.3.2 结构疲劳寿命计算

提取上述每个分段单元中心所有可能开裂平面上的撕裂能峰值 T_i ，计算裂纹增长速度

$\frac{dc}{dN}(T_{\max,i}, R_i)$ 和 m 个分段造成的裂纹增长 Δc_i ，通过线性累计法叠加即得单个周期的裂纹增

长：

$$\Delta c = \sum_{i=1}^m \frac{dc}{dN}(T_{\max,i}, R_i) \quad (10)$$

结合式(1)即可求得单元中心所有可能开裂平面上的疲劳寿命。疲劳寿命最短的平面将作为该单元的开裂平面^[9]，且所有单元中疲劳寿命最短的平面作为橡胶结构中最先扩展的裂纹所在平面。疲劳分析的总流程如图 5 所示。

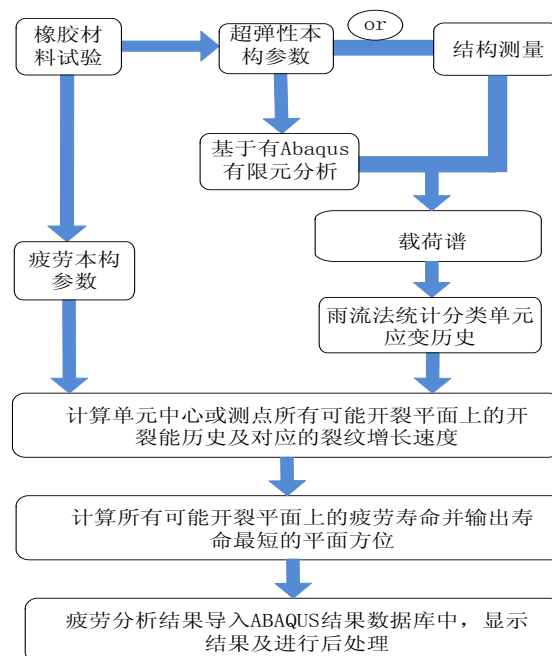


图5 疲劳分析流程图

Fig.5 The flow chart of fatigue analysis

4 机车空气弹簧橡胶支座疲劳分析

橡胶支座是机车空气弹簧附属配件。以一实际橡胶支座为例，该橡胶支座在疲劳测试中未达到预期使用寿命即出现严重的疲劳裂纹。按照前文所述分析流程对该橡胶支座进行疲劳分析，并改进其结构，提高疲劳寿命以满足产品使用要求。

4.1 橡胶疲劳特性

依照前文试验方法，本文分别进行了橡胶材料的撕裂试验和动态疲劳试验,试验结果见表 3 和图 6。

表3 裤型试样在不同加载速率下的临界撕裂强度和撕裂能

Tab.3 The critical tear energy and tear strength of trouser test piece under different loading rates

夹头位移速率(mm/s)	试验宽度(mm)	厚度(mm)	临界撕裂强度 F/t (N/mm)	应变	撕裂时存储的应变能密度(J/mm ³)	临界撕裂能 T_c (N/mm)
8	19.7	2.18	12.86	0.3147	0.137	32.11
0.8	19.72.18	2.28	20.83	0.679	0.3819	62.42
0.08	19.7	2.24	22.12	0.899	0.605	72.10

从图 6(a,b)及表 3 可知该类橡胶的临界撕裂强度约为 12.86 N/mm,临界撕裂能大小约为 32.11N/mm。橡胶支座材料为天然填充橡胶,选用 Thomas^[10]模型来拟合裂纹在 $R=0$ 时的增长速率,如图 6(c),等效初始裂纹为 0.18mm (图 6d)拟合所得模型参数见表 4。

表 4 $R=0$ 时基于 Thomas 模型的疲劳试验所确定的疲劳参数

Tab.4 The fatigue parameters determined by fatigue tests based on Thomas model

初始裂纹长度 c_0 (m)	裂纹失稳扩展临界长度 c_f (m)	裂纹失稳扩展临界撕裂能 T_c (J/m ²)	裂纹失稳扩展临界扩展速率 R_c (m/cycle)	$R=0$ 时幂指数 F_0
180×10^{-6}	1×10^{-3}	32110	4.48763×10^{-6}	2.717

填充天然橡胶具有应变结晶特性,须确定载荷比 R 对材料裂纹扩展的影响。利用 Mars-Fatami 模型拟合不同载荷比作用下橡胶疲劳数据,得到 R 对幂指数参数的影响,结果见图 6(e,f)。

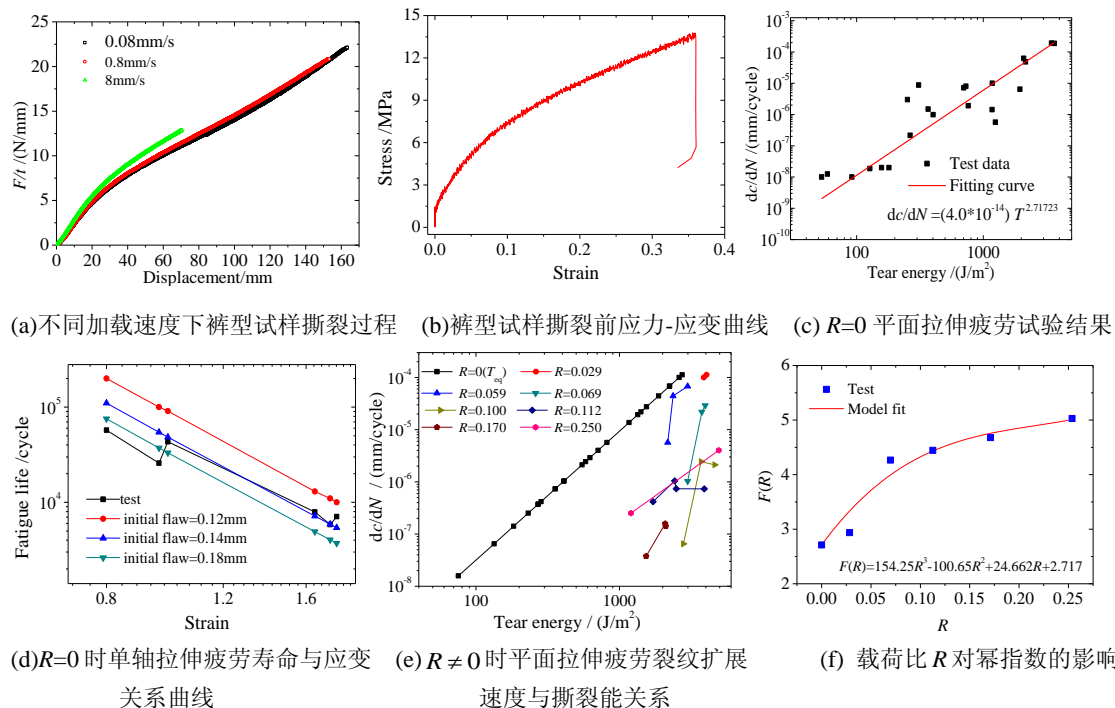


图6 裤型样品撕裂试验与疲劳试验结果

Fig.6 Results of fatigue tests and the results of tear test conducted on trousers piece

4.2 橡胶支座的有限元分析和疲劳分析

基于开裂能量理论的橡胶动态疲劳分析方法需要获取橡胶支座所经历的名义应变历史。疲劳实验过程橡胶支座承受载荷工况如图 7 和图 8(a)所示。 F_z 是预压缩空气弹簧至其工作高度所施加的垂向力,大小为等于 84kN。 F_y 为水平方向施加的幅值为 9.5kN,频率为 2Hz 的正弦载荷,此外橡胶支座还承受与 F_y 同相,幅值为 $1.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 扭摆力矩。橡胶支座结构完全失效时的寿命约为 3.5 万次,疲劳裂纹位置见图 8(b),而出现 1mm 可见裂纹经历的载荷循

环大约为 2.8 万次。



图 7 橡胶支座的疲劳试验

Fig.7 Fatigue test of the shear pad

本文考虑不同结构形式对橡胶疲劳寿命的影响，测得试验过程材料升温并不显著，因此有限元分析以静态加载橡胶支座达到位移幅值时的应变状态作为橡胶疲劳分析的应变峰值。利用 ABAQUS 建立实体模型如图 8(c)所示，橡胶超弹性材料参数见表 5。有限元分析结果见图 8(d,e)，其中支座的

表5 超弹性模型参数

Tab.5 Hyperelastic model parameters

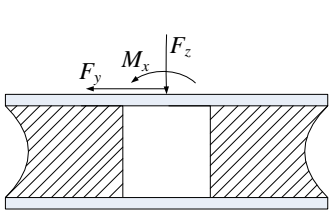
材料类型	单元类型	超弹性本构模型	材料参数
橡胶	C3D8H	Mooney-Rivlin	$C_{10}=0.6511\text{MPa}$, $C_{01}=0.18\text{MPa}$, $D_1=0.000001$

按照前述分析流程计算橡胶支座疲劳寿命分布如图 8(f)所示，以寿命作为破坏准则可知其疲劳危险位置集中在下盖板边沿处，与实测相符（见图 8(b)），且危险点的最短疲劳寿命为 2.31 万次，与试验所测 2.8 万次接近。橡胶支座疲劳裂纹位置与疲劳寿命的准确预报说明了基于 CED 理论的疲劳分析方法的有效性。表 6 给出了橡胶支座的疲劳寿命、裂纹位置、裂纹方位以及危险裂纹平面经历的最大和最小开裂能。此外，从危险点所经历的开裂能历史可知疲劳寿命最短的裂纹平面并没有出现在具有最大 CED 的平面上。事实上橡胶的疲劳寿命不仅与最大开裂能有关，与最小开裂能也有重要的关系。因此橡胶结构中出现最大应变能的区域并非一定是疲劳最危险位置，验证了 Mars 所提出的应以疲劳寿命最短的平面作为开裂平面的观点^[9]。

表 6 优化前橡胶支座的疲劳和有限元分析结果

Tab.6 The FEA and fatigue analysis results of the un-optimized shear pad

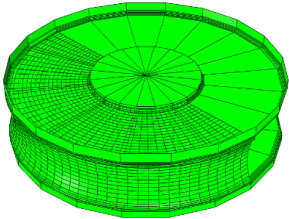
疲劳危险单元编号	579	最大开裂能 (J/m ²)	2.289×10 ⁶
疲劳寿命	2.307×10 ⁴	最小开裂能 (J/m ²)	1.63×10 ³
裂纹平面法向	-0.667, -0.7245, 0.17365	裂纹平面方位	227.37,12



(a) 支座承载工况



(b) 支座真实疲劳裂纹位置



(c) 支座有限元模型

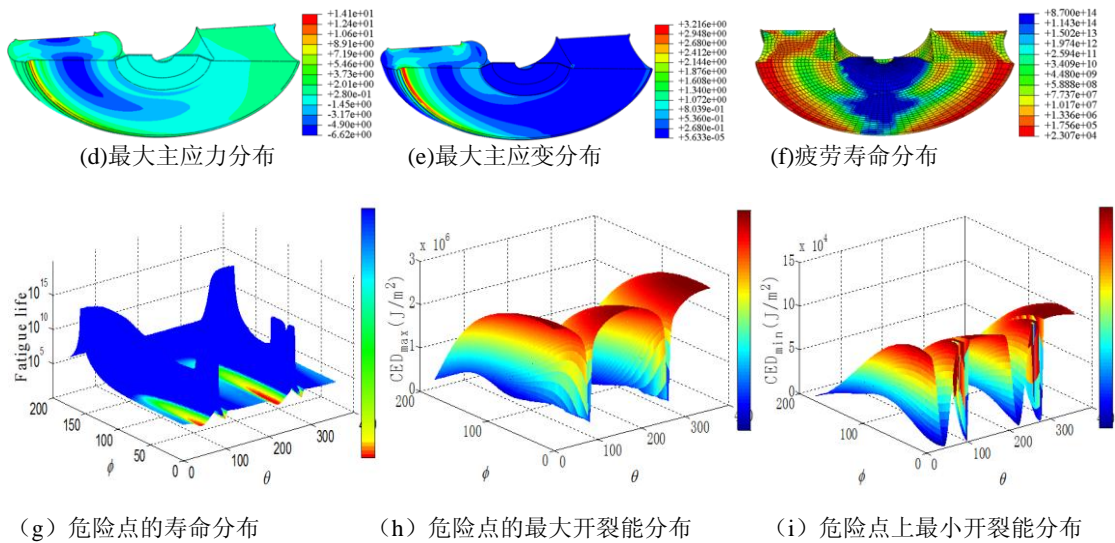


图 8 改进前橡胶支座有限元分析和疲劳分析结果
Fig.8 The FEA and fatigue analysis results of the un-optimized shear pad

4.3 橡胶支座的结构改进与疲劳分析

从前文分析结果可知，橡胶支座出现疲劳裂纹的主要原因是橡胶支座与下底板接触面上存在显著的应力集中。鉴于此，本文对橡胶支座的结构进行了改进（如图 9(a)），建立了改进后橡胶结构有限元模型（图 9(b, c)）。仿照前文分析流程，获得了新型橡胶支座的最大主应力，最大主应变和疲劳寿命分布，如图 9(d-g)。对比原橡胶支座，从图 9(d,e)可知改进后橡胶支座的应力集中现象得到明显的改善，最大主应力减少至 4.453MPa，而最大主应变减少至 1.370。循环中危险截面所经历的开裂能峰值也显著减小，其疲劳寿命上升至近 23 万次（见图 9(f)）。图 9(h,i)分别显示了危险点所有可能开裂平面上的最大和最小开裂能，与图 8(h)相比，改进后橡胶支座危险点所经历的的最大开裂能显著降低，这是疲劳寿命提高的主要原因。但是对应变结晶橡胶，疲劳寿命也受到最小开裂能的影响。如图 9(j-l)所示，危险点上 θ 为 132° 的平面上所经历的最大开裂能远小于 51° 平面上的最大开裂能，但由于各平面所经历的载荷比 R （即最小 CED）不同，前者疲劳寿命明显低于后者。事实上由于天然橡胶的应变诱导结晶特性，适当提高结构所经历的周期应变历史中的最小应变（最小开裂能），可以显著提升结构的疲劳寿命。

表7 优化后橡胶支座的疲劳和有限元分析结果
Tab.7 The FEA and fatigue analysis results of the optimized shear pad

疲劳危险单元编号	58	最大开裂能 (J/m ²)	9.865×10 ⁵
疲劳寿命(cycle)	2.295×10 ⁵	最小开裂能 (J/m ²)	608.048
裂纹平面法向坐标	0.677,0.736,0	裂纹平面方位(deg)	227.37,0

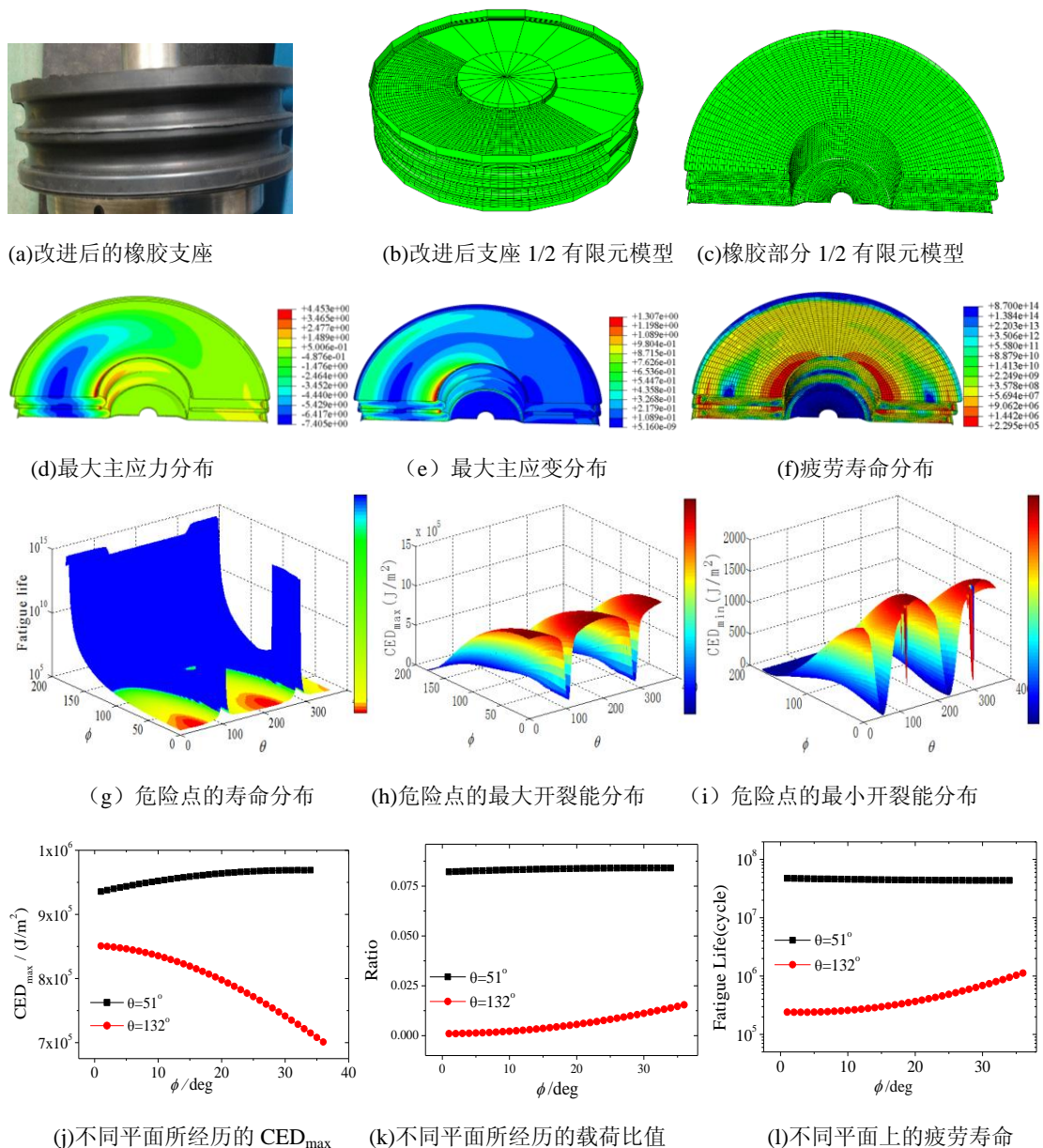


图 9 改进后橡胶支座有限元分析和疲劳分析结果

Fig.9 The FEA and fatigue analysis results of the optimized shear pad

5 结论

本文基于 CED 理论,提出了一种新的橡胶结构动态疲劳寿命预报方法。并应用该方法对空气弹簧的橡胶支座进行了疲劳分析,不仅准确地预测出在复杂多轴载荷作用下支座的疲劳寿命,同时给出了其疲劳裂纹的开裂方位,且分析结果与试验结果吻合良好。疲劳分析结果表明,处于复杂应力状态下的橡胶结构,其疲劳裂纹萌生和扩展过程中,裂纹开裂方向和疲劳寿命并非只与最大开裂能有关,与最小开裂能也有着密切的联系,因此具有最大开裂能的平面并非一定是裂纹开裂平面,验证了 Mars 提出的以疲劳寿命最短的平面作为临界开裂平面的观点。而对于结晶性橡胶,适当提高最小开裂能值可以显著提升结构的疲劳寿命。

参考文献

- [1] 胡传忻. 断裂力学及其工程应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1989.
- [2] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial stress effects on fatigue behavior of filled natural rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(56): 521-529.
- [3] Saintier N, Cailletaud G, Piques R. Crack initiation and propagation under multiaxial fatigue in a natural rubber

- [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(1): 61-72.
- 275 [4] Mars W V, Fatemi A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2002, (24): 949-961.
- [5] 朱炜垚, 许希武. 复合材料层合板低速冲击后压压疲劳试验研究及寿命预报[J]. 工程力学, 2013, 3(30): 410-423.
- [6] 危银涛, 杨挺青, 万志敏. 改进的虚裂纹闭合技术及其在复合材料脱层分析中的应用[J]. 计算力学学报, 2000, 17(3): 308-312.
- 280 [7] 赵永翔, 高庆. 估计三种常用应力-寿命模型概率设计 S-N 曲线的统一方法[J]. 核动力工程, 2001, 22(1): 42-52.
- [8] 沈海军, 郭万林. 疲劳 S-N 曲线预测的三维断裂力学方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(3): 216-220.
- 285 [9] Mars W V. Cracking energy density as a predictor of fatigue life under multiaxial conditions [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2002, 75(1): 1-17.
- [10] Rivlin R S, Thomas A G. Rupture characteristic of rubber for tearing energy[J]. Polymer Science, 1953, 3: 291-318.
- [11] Thomas A G. Rupture of rubber .V. Cut growth in natural rubber vulcanizates [J]. Journal of Polymer Science, 1958, 31: 467-480.
- 290 [12] Mars W V. Multiaxial fatigue of rubber[D]. 2001. The University of Toledo.
- [13] Lake G J, Lindley P B. The mechanical fatigue limit for rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1965, 9(4): 1233-1251.
- [14] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial fatigue of rubber: Part I: equivalence criteria and theoretical aspects[J].
- 295 Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28(6): 515-522.
- [15] Mars W V. Endurica User Manuals v2[Z]. USA: ENDURICA, 2012.
- [16] 余伟伟. 橡胶材料多轴疲劳寿命研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [17] 龚科家, 危银涛. 填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 193-198.
- [18] 胡小玲, 刘秀, 李明. 炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策略[J]. 工程力学, 2014: 0-0.
- 300 [19] Lindley P B. Relation between hysteresis and the dynamic crack growth resistance of natural rubber[J]. International Journal of Fracture, 1973, 9(4): 449-462.
- [20] 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.
- [21] 王宏伟, 邢波, 骆红云. 雨流计数法及其在疲劳寿命估算中的应用[J]. 矿山机械, 2006, (03): 95-97.
- 305