

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220826-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220826

基于开裂能密度的柔性接头摆动疲劳寿命预测

张金尧^{1,2}, 任军学¹, 薛牧遥³, 童悦³, 郑庆³, 汤海滨¹

- (1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;
2. 西安航天动力技术研究所, 西安 710025;
3. 上海航天动力技术研究所, 上海 200125)

摘 要: 为准确预测柔性接头的摆动疲劳寿命, 将开裂能密度作为驱动弹性件疲劳裂纹扩展的损伤参量, 借助材料的疲劳裂纹扩展试验和单轴拉伸疲劳试验建立了柔性接头的摆动疲劳寿命预测模型, 并用有限元分析结果计算了柔性接头在 12.3 MPa、6° 摆角工况下的开裂能密度, 进而对柔性接头的摆动疲劳寿命进行预测。结果表明: 预测试验工况下柔性接头的摆动疲劳寿命为 107 次, 实测寿命为 120 次, 两者较为一致, 且预测的裂纹位置和开裂平面与实际试验的失效位置较为吻合。模型预测柔性接头的摆动疲劳寿命与实测疲劳寿命之比为 1/1.12, 分布在 2 倍分散因子之内, 满足工程疲劳寿命的预测要求。

关 键 词: 疲劳寿命预测; 柔性接头; 开裂能密度; 裂纹扩展; 有限元分析; 固体火箭发动机
中图分类号: V431 **文献标志码:** A

Prediction of the swing fatigue life of flexible joint based on cracking energy density

ZHANG Jinyao^{1,2}, REN Junxue¹, XUE Muyao³, TONG Yue³,
ZHENG Qing³, TANG Haibin¹

- (1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Xi'an Aerospace Solid Propulsion Technology Institute, Xi'an 710025, China;
3. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 200125, China)

Abstract: In order to accurately predict the swing fatigue life of flexible joint, the cracking energy density (CED) was used as the damage parameter to drive the fatigue crack growth of elastomers. The swing fatigue life prediction model of flexible joint was established by means of fatigue crack growth test and uniaxial tensile fatigue test. The CED of flexible joint under 12.3 MPa and 6° swing angle was calculated by using the finite element analysis results, and then the swing fatigue life of flexible joint was predicted. The results showed that the predicted swing fatigue life of the flexible joint under the test condition was 107 cycles, which was consistent with the measured fatigue life of 120 cycles, and the predicted crack location and crack plane were in good agreement with the failure position of test. The ratio of predicted life to measured life was 1/1.12 within the double dispersion factor, which was acceptable in engineering.

Keywords: fatigue life prediction; flexible joint; cracking energy density; crack propagation; finite element analysis; solid rocket motor

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 基础加强计划技术领域基金(2020JCQJ014)

作者简介: 张金尧(1997—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

通信作者: 任军学(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。E-mail: rjx_buaa@163.com

引用格式: 张金尧, 任军学, 薛牧遥, 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): 20220826. ZHANG Jinyao, REN Junxue, XUE Muyao, et al. Prediction of the swing fatigue life of flexible joint based on cracking energy density[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220826.

柔性喷管因其响应迅速、推力损失小、可靠性高而广泛应用于火箭发动机推力矢量控制系统中。试验表明,喷管的柔性接头在高压的严酷环境下持续摆动,其橡胶弹性件极易产生疲劳破坏,影响接头的使用寿命^[1-2]。

对于诸如柔性接头一类橡胶制品的疲劳寿命预测,常用的方法主要有 $S-N$ (应力-寿命)曲线法^[3]、裂纹形核法^[4]以及裂纹扩展法^[5]。 $S-N$ 曲线法采用实际产品疲劳试验的方式,主要应用于已做出试验件的研发后期,易产生疲劳设计风险。裂纹形核法与裂纹扩展法均基于断裂力学理论,认为橡胶疲劳过程首先是微裂纹形核,其次是微裂纹扩展到破裂失效两个阶段,传统意义上的橡胶疲劳全寿命为形核寿命与扩展寿命之和。裂纹形核法关注橡胶光滑表面形成特定大小裂纹所需的循环数,但需要大量的材料试验数据支撑。裂纹扩展法关注橡胶上预先存在的固有裂纹扩展至破裂所需的循环数,需要已知材料的固有裂纹长度。而传统意义的裂纹形核可看作是毛坯材料微小瑕疵的扩展,所以将毛坯瑕疵尺寸当作橡胶的固有裂纹长度时即可用裂纹扩展法进行全寿命预测^[6]。将开裂能密度作为驱动材料疲劳裂纹扩展的损伤参量能更好地预测橡胶制品的疲劳寿命,且可以预测裂纹的开裂平面方位^[6-9]。

针对柔性接头的疲劳寿命问题,内蒙古工业大学李太安建立了柔性接头弹性件的时温加速老化模型,采用 Ncode-designlife 软件计算了接头疲劳老化时的贮存寿命^[1],但没有进一步研究接头工作时的摆动疲劳寿命。西安航天动力技术研究所的万诺等人将橡胶材料的 $S-N$ 曲线与有限元分析法相结合,预测了某柔性接头在不同容压下的摆动疲劳寿命^[2],但其弹性件材料疲劳试验数据仅限于 Abaqus/Fe-Safe 模块中所包含的材料 $S-N$ 曲线,模块中未包含的材料仍需开展大量试验获取 $S-N$ 曲线。

在开裂能密度研究方面, Mars 于 2002 年首次提出了开裂能密度(cracking energy density, CED)的概念,将其作为损伤参量来解释橡胶材料多轴疲劳时的裂纹扩展现象,对橡胶件在多轴状态下的疲劳寿命预测取得了很好的效果^[7]。此后,基于开裂能密度的橡胶疲劳理论逐渐应用于橡胶隔振器、减振支座等橡胶制品的疲劳寿命分析当中^[6,10]。Pan 等人用 4 种疲劳寿命预测模型研究不同应变幅值和加载路径下氧化铈对硫化天然橡胶

多轴疲劳寿命的影响,发现将开裂能密度作为损伤参量具有更好的预测精度和物理意义^[9]。王小莉等人利用开裂能密度及橡胶材料裂纹扩展特性参数成功预测了汽车橡胶隔振器的疲劳寿命^[6]。相比于橡胶隔振器等结构主要由于拉压应力引起的疲劳失效,柔性接头主要受摆动力矩和高压载荷的作用,受力状态更为复杂,在此领域还未采用开裂能密度理论开展疲劳寿命研究。

本文认为柔性接头弹性件的细小瑕疵为材料的固有裂纹,用裂纹扩展法进行柔性接头的全寿命预测。将可预测裂纹扩展方位的开裂能密度作为驱动弹性件疲劳裂纹扩展的损伤参量,引入有限元仿真、疲劳裂纹扩展试验等研究手段,为柔性接头的摆动疲劳寿命建立一种预测模型,可有效预测柔性接头的摆动疲劳寿命、开裂位置和开裂平面方位。

1 开裂能密度理论与柔性接头摆动疲劳寿命预测模型

1.1 有限应变和非线性弹性下开裂能密度的计算

橡胶疲劳裂纹受力状态如图 1 所示,其中 n 表示变形构形下橡胶中某一点裂纹开裂平面的单位法向量, σ 、 $d\epsilon$ 分别是合应力矢量以及对应合应变矢量的增量, λ_1 、 λ_2 分别为第一主伸长率和第二主伸长率; θ 为裂纹平面方位角。开裂能密度可看作是驱动橡胶疲劳裂纹扩展的损伤参量,其增量 dW_c 可定义为合应力矢量 σ 以及对应合应变矢量的增量 $d\epsilon$ 之间的点积^[7]:

$$dW_c = \sigma \cdot d\epsilon \quad (1)$$

dW_c 是材料某一点裂纹开裂平面的法向量 n

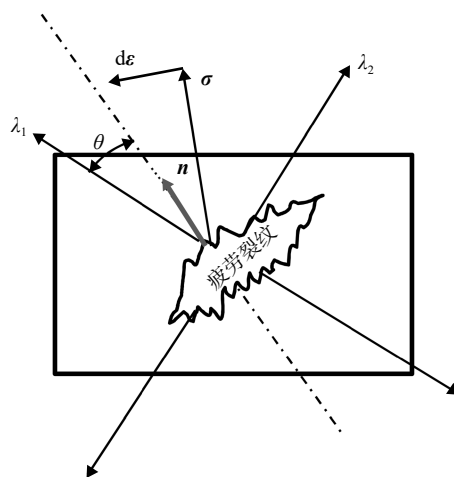


图 1 橡胶疲劳裂纹受力状态示意图

Fig. 1 Stress state of rubber fatigue crack

上应力所做的微功, 对于该点不同方向平面的开裂能密度亦不相同, 所以开裂能密度可以表征开裂平面的方向。此外, 任一点的合应力矢量 σ 同时存在切向应力、法向应力的作用, 所以 dW_c 表达式适用于复杂的三维应力状态。而柔性接头在摆动时其弹性件主要受剪应力, 同时也受到高压强的作用, 弹性件的受载情况是三维应力状态, 其疲劳问题属于多轴疲劳范畴。因此 dW_c 可应用到柔性接头的疲劳分析中。

有限应变和非线弹性条件下, 可由式(1)得到未变形构形的开裂能密度增量表达式为^[8,11]

$$dW_c = J^{-1} \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{S} d\mathbf{E} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{V}}{\mathbf{V}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{V}} \quad (2)$$

式中 J 表示微元体前后的弹性体积比, $\mathbf{V}$ 表示未变形构形下材料开裂面在参考坐标系(Lagrange 坐标系)下的单位法向量, $\mathbf{V}^T = (\cos \theta, \sin \theta, 0)$ 且 $|\mathbf{V}| = 1$, $\mathbf{S}$ 为第二 Piola-Kirchhoff 应力张量, $\mathbf{E}$ 为 Green-Lagrange 应变张量, $\mathbf{C}$ 为右 Cauchy-Green 应变张量, $d\mathbf{E}$ 表示 Green-Lagrange 应变张量的增量。 $\mathbf{S}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{C}$ 均可被第一、第二和第三主伸长率 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 表示^[8]。

柔性接头弹性件所用的硅橡胶为不可压缩材料, 弹性体积比 $J=1$, 橡胶变形过程中主伸长率满足关系 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$, 同时引入参数双轴因子 $b = \lambda_2 / \lambda_1$, 则可以对第一主伸长率 λ_1 进行数值积分获得 $-\pi \leq \theta \leq \pi$ 的开裂能密度, 如式(3)所示。积分起点为无变形状态($\lambda_1 = 1, b = 1$), 积分终点为橡胶当前的变形状态($\lambda_1, b = \lambda_2 / \lambda_1$)。

$$W_c = \int_{\lambda_{1,b}} \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{S} d\mathbf{E} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{V}}{\mathbf{V}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{V}} d\lambda \quad (3)$$

1.2 柔性接头摆动疲劳寿命预测模型

橡胶疲劳裂纹扩展法根据断裂力学理论, 通过试验掌握材料的裂纹扩展特性(特性参数为裂纹扩展速率 dc/dN 与撕裂能 T), 进而预测材料的疲劳寿命。如果已知固有裂纹长度和许用裂纹长度分别是 c_0 、 c_f , 则橡胶材料的疲劳寿命为^[12-13]

$$N_f = \int_{c_0}^{c_f} \frac{1}{f[T(c, t)]} dc \quad (4)$$

式中 $f[T(c, t)]$ 为裂纹扩展模型, 是撕裂能 T 的函数, 且 $f[T(c, t)] = dc/dN$ 。 $T(c, t)$ 表示撕裂能 T 为裂纹长度 c 和加载时间 t 的函数。加载时间 t 可通过加载频率与循环次数 N 相关联。

定义载荷比 R 为撕裂能 T 的最小值和最大值

之比, 根据 R 取值的不同, 可以将与时间无关的橡胶裂纹扩展模型划分为非脉动($0 < R < 1$)和脉动($R=0$)循环疲劳裂纹扩展模型。

当载荷比 $R=0$ 时, 通常用 Thomas 模型来表示撕裂能 T 和裂纹扩展速率 dc/dN 的关系, 该模型认为只要材料受到载荷作用便会引起裂纹扩展, 裂纹扩展是无限的, 其具体形式如式(5)所示^[14]。Thomas 模型应用效果较好, 且易于同 $R \neq 0$ 的模型相结合。

$$\frac{dc}{dN} = f[T(c, t)] = \begin{cases} r_c \left(\frac{T_{\max, R=0}}{T_c} \right)^{F_0} & T_{\max, R=0} \leq T_c \\ \infty & T_{\max, R=0} > T_c \end{cases} \quad (5)$$

式中 $T_{\max, R=0}$ 、 T_c 分别是最大撕裂能和临界撕裂能, F_0 代表幂指数, r_c 代表临界扩展速率。

当载荷比 $R \neq 0$ 时, 因为柔性接头弹性件材料属于非应变结晶类橡胶, 可以用 Lindley 模型描述疲劳裂纹的扩展过程。Lindley 模型只关注裂纹扩展过程中的撕裂能峰值, 可将其等效为 $R=0$ 的撕裂能 $T_{eq, R=0}$ ^[15]:

$$T_{eq, R=0} = T_{\max, R \neq 0} (1 - R) \quad (6)$$

综合式(5)和式(6), 即可得到柔性接头弹性件材料的疲劳裂纹扩展统一模型为

$$f[T(c, t)] = r_c \left[\frac{(1 - R) T_{\max, R \neq 0}}{T_c} \right]^{F_0} \quad (7)$$

当材料满足固有裂纹尺寸较小, 并且裂纹扩展符合自相似性的要求时, 其撕裂能 T 可被开裂能密度 W_c 和裂纹长度 c 表示^[7]:

$$T = - \frac{\partial U}{\partial A} = K W_c c \quad (8)$$

式中 U 为材料储存的弹性应变能, A 为裂纹的断裂表面面积, 对于微小裂纹有 $K = 2\pi$ 。

将式(7)和式(8)代入式(4)并积分可得到柔性接头弹性件材料的多轴疲劳寿命 N_f 的计算公式为

$$N_f = \frac{r_c^{-1}}{1 - F_0} \cdot \frac{T_c^{F_0}}{[2\pi(1 - R) W_{c, \max}]^{F_0}} (c_f^{1-F_0} - c_0^{1-F_0}) \quad (9)$$

由式(9)可知, 以开裂能密度峰值 $W_{c, \max}$ 作为疲劳损伤参量来预测柔性接头的摆动疲劳寿命, 需要得到弹性件材料的临界撕裂能 T_c 、临界扩展速率 r_c 、幂指数 F_0 与等效固有裂纹长度 c_0 。材料的裂纹扩展许用裂纹长度 c_f 远大于其固有裂纹

长度 c_0 , 通常在实际橡胶制品疲劳寿命预测中取 $c_0=1\text{ mm}$ ^[11,16], 此时柔性接头的摆动次数为其摆动疲劳寿命。

2 柔性接头弹性件材料疲劳裂纹扩展参数的确定

2.1 材料疲劳裂纹扩展模型的确立

本文中柔性接头弹性件材料采用 SE2035 硅橡胶。通过疲劳裂纹扩展试验来确定弹性件材料的临界撕裂能 T_c 、临界扩展速率 r_c 、幂指数 F_0 , 一般选用单边预制裂纹长度为 c_0 、厚度 $e=2\text{ mm}$ 的纯剪试件进行试验, 如图 2 所示。 l 为试件的宽度, h_0 为标距, m 为装夹位置到宽边的距离, 试验中取 $l=125\text{ mm}$, $m=5\text{ mm}$ 。

取 3 种标距 h_0 各不相同的纯剪试件(编号 a1~a3)进行准静态拉伸, 测定其临界撕裂能如表 1 所示, 最后结果取中位数^[11,17]。则接头弹性

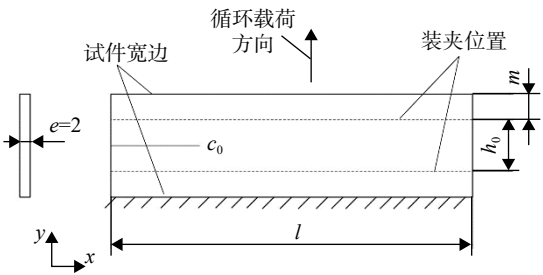


图 2 单边预制裂纹的纯剪试件

Fig. 2 Pure shear specimen with unilateral prefabricated crack

件材料的临界撕裂能为 $3.113\ 6\text{ kJ/m}^2$ 。在电磁动态疲劳试验系统(如图 3 所示)开展载荷比 $R=0$ 的疲劳裂纹扩展试验, 载荷加载形式是一种应变峰值随循环次数线性增长的变幅正弦加载, 如图 4 所示。为减少疲劳裂纹扩展试验周期, 加载频率设定为 3 Hz , 应变峰值上限为拉断应变的 75% , 标距 h_0 取 7 mm , 进行两次重复试验, 编号分别为 a4 和 a5。

表 1 纯剪试件静强度试验结果

Table 1 Static strength test results of pure shear specimens

试件编号	拉断应变 $\varepsilon_{sb}/\%$	拉断应力 σ_{st}/MPa	拉断应变能密度 W_b/MPa	临界撕裂能 $T_c/(\text{kJ/m}^2)$
a1($h_0=7.06\text{ mm}$)	87.57	0.510 3	0.441 0	3.113 6
a2($h_0=7.45\text{ mm}$)	95.64	0.501 5	0.466 6	3.475 9
a3($h_0=6.51\text{ mm}$)	85.23	0.510 8	0.433 3	2.820 6

最终测得的裂纹扩展速率 dc/dN 随撕裂能峰值 $T_{\max}$ 的变化关系如图 5 所示, 可以看出裂纹扩展速率 dc/dN 随着撕裂能峰值 $T_{\max}$ 的增大而增大。当 $T_{\max} > 500\text{ J/m}^2$ 时, 两个试件的裂纹扩展均保持了较高的增速, 且试件 a4 在 $T_{\max}=525\text{ J/m}^2$ 时出现阶跃变化, 此时循环数已超过 21 万次, 可能是试件装夹出现松弛的原因造成的, 属于偶然情况。为避免 a4 试件数据阶跃变化对曲线拟合的影响,

这里试件 a4、a5 均使用 $T_{\max} < 500\text{ J/m}^2$ 的部分数据进行研究, 在双对数坐标系下拟合为线性函数, 如图 6 所示, 进而转换为幂函数表达式如式(10)所示, 拟合相关系数 r^2 接近于 1, 拟合效果较好。

$$\frac{dc}{dN} = 8.340\ 84 \times 10^{-8} (T_{\max})^{1.241\ 16} \quad r^2 = 0.948\ 25$$

(10)

弹性件材料纯剪试件的临界撕裂能为 $T_c=3.113\ 6\text{ kJ/m}^2$, 幂指数 $F_0=1.241\ 16$, 由此可以根据

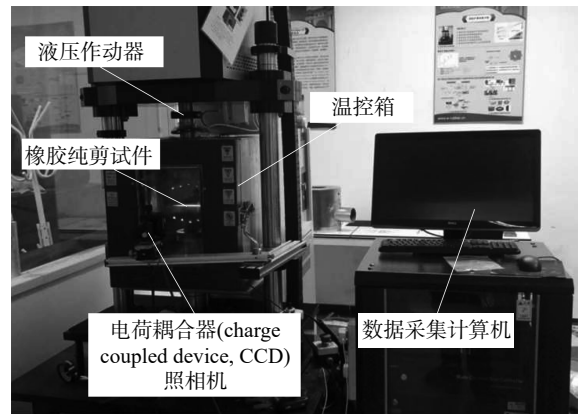


图 3 电磁动态疲劳试验系统

Fig. 3 Electromagnetic dynamic fatigue test system

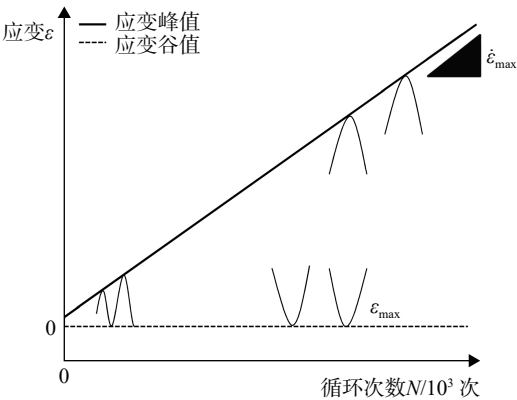


图 4 疲劳裂纹扩展试验变幅加载形式

Fig. 4 Variable amplitude loading of fatigue crack growth test

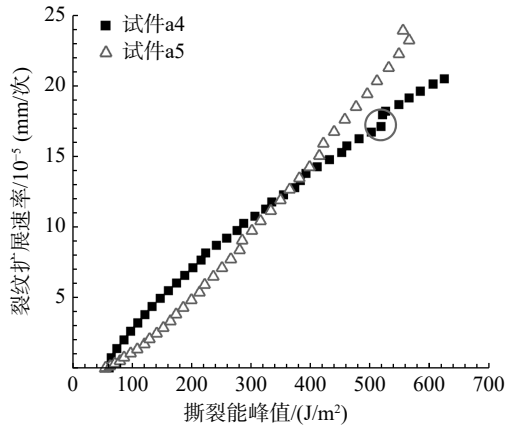


图 5 裂纹扩展速率随撕裂能峰值的变化关系

Fig. 5 Relationship between crack growth rate and tear energy maximum

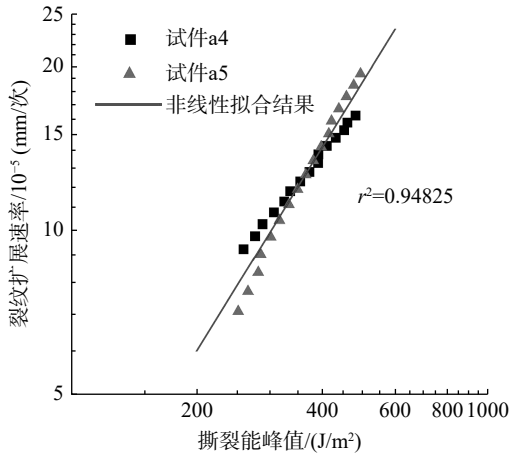


图 6 双对数坐标系下裂纹扩展速率随撕裂能峰值的拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between crack growth rate and tear energy maximum in double logarithmic coordinate

式(5)计算材料的临界裂纹扩展速率 r_c 。

$$r_c = 8.34084 \times 10^{-8} T_c^{F_0} = 1.8068 \times 10^{-6} \text{ m/次} \quad (11)$$

2.2 材料等效固有裂纹长度 c_0 的确定

柔性接头的弹性件材料其实际制出的成品并不是完美无缺的, 必然会有细小的固有裂纹。根据橡胶材料在单轴拉伸条件下其开裂能密度 W_c 与应变能密度 W 相等的特点^[8], 可通过橡胶单轴拉伸疲劳试验确定材料的等效固有裂纹长度 c_0 。对于存在固有裂纹的哑铃形试件, 其撕裂能 T 与开裂能密度 W_c 和裂纹长度 c 之积成正比^[7,11,18]:

$$T = 2kW_c c \quad (12)$$

式中 k 是一个与材料类型和远离裂纹尖端的应变水平相关的系数, 可用最大主应变 $\varepsilon_{\max}$ 根据以下

经验公式近似计算^[11,19]:

$$k = \frac{2.95 - 0.08\varepsilon_{\max}}{(1 + \varepsilon_{\max})^{0.5}} \quad (13)$$

单轴拉伸(uniaxial tension, UT)条件下, 橡胶材料的载荷比 $R=0$, 取裂纹扩展许用裂纹长度 $c_f=1 \text{ mm}$, 记单轴拉伸橡胶疲劳断裂的疲劳寿命为 $N_{f,ut}$, 可由式(4)、式(5)、式(12)及 $W_c=W$ 得到材料固有裂纹长度 c_0 的计算式为

$$c_0 = \left[1 - \frac{N_{f,ut} (1 - F_0) (2kW_{\max})^{F_0}}{r_c^{-1} T_c^{F_0}} \right]^{\frac{1}{1-F_0}} \quad (14)$$

在开展材料单轴拉伸疲劳试验前, 先测定了哑铃形试件的拉断应变 $\varepsilon_{sb}=670.7\%$, 同时测量试件经过 6 次不同应变峰值循环后的应力-应变迟滞环曲线, 以其卸载段的应力-应变曲线(如图 7 所示)来获得应变能密度峰值 $W_{\max}$, 并拟合 $W_{\max}$ 与应变峰值 $\varepsilon_{\max}$ 之间关系如下:

$$W_{\max} = 0.15431 (\varepsilon_{\max})^{2.05364} \quad r^2 = 0.99674 \quad (15)$$

一共开展 5 种不同应变峰值的单轴拉伸疲劳试验, 每种工况同时测试 5 个试件, 最后的试验结果如表 2 所示。将最大实测寿命 $N_{f,\max}$ 、最小实测

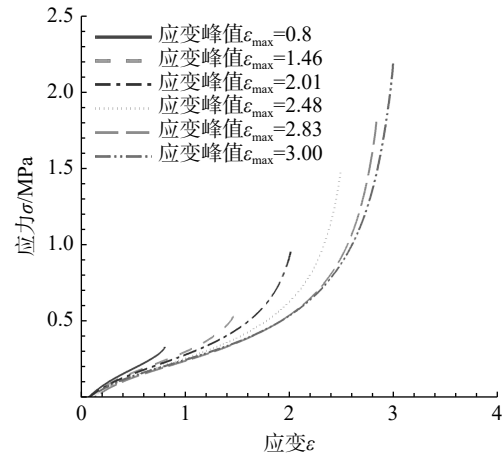


图 7 哑铃形试件卸载段的应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves in unloading section of dumbbell specimen

表 2 硅橡胶单轴拉伸疲劳试验结果

Table 2 Results of uniaxial tensile fatigue test of silicone rubber

编号	$\varepsilon_{\max}/\%$	$\varepsilon_{\min}/\%$	$N_{f,\max}/\text{cycles}$	$N_{f,\min}/\text{cycles}$	$N_{f,\text{avg}}/\text{cycles}$
1	200	0	4 536	3 657	4 088
2	250	0	3 065	2 435	2 776
3	300	0	1 923	1 437	1 660
4	350	0	1 593	1 177	1 349
5	400	0	1 108	786	963

寿命 $N_{f,min}$ 和平均实测寿命 $N_{f,avg}$ 一并代入式(14)计算出相应的固有裂纹长度的最小值 $c_{0,min}$ 、最大值 $c_{0,max}$ 和平均值 $c_{0,avg}$ 。最后对所有的固有裂纹长度求算术平均值,得到柔性接头弹性件所用硅橡胶材料的等效固有裂纹长度 $c_0=5.233\,4\times 10^{-5}\,\text{m}$ 。

将等效固有裂纹长度 $c_0=5.233\,4\times 10^{-5}\,\text{m}$ 代回式(14)计算应变峰值从 200% 到 400% 的单轴疲劳寿命,并与实测的疲劳寿命作对比,对比结果在双对数坐标系下如图 8 所示,计算所得单轴拉伸疲劳寿命与实测疲劳寿命一致性良好,所有实测寿命均分布二倍分散线之内,满足工程上疲劳寿命预测的要求。又知常见橡胶材料的原始缺陷尺寸一般分布在 $2\times 10^{-5}\sim 6\times 10^{-5}\,\text{m}$ 之间^[11,20]。所以,上述计算所得到的等效固有裂纹长度 $c_0=5.233\,4\times 10^{-5}\,\text{m}$ 是合理的。

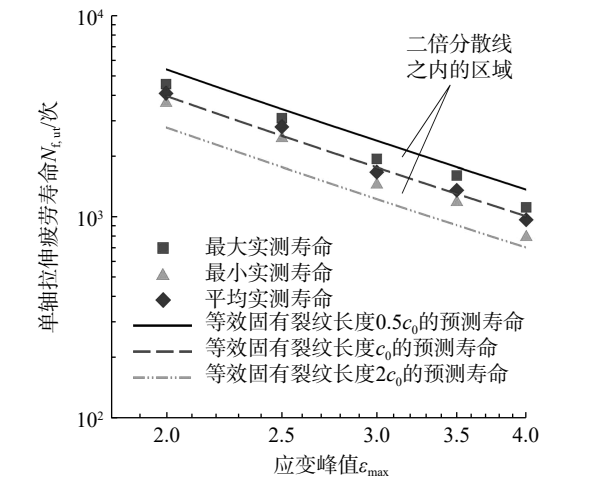


图 8 双对数坐标系下不同应变峰值的单轴拉伸疲劳预测寿命与计算寿命的比较

Fig. 8 Comparisons of the predicted uniaxial tensile fatigue life and calculated uniaxial tensile fatigue life with different strain maximum in double logarithmic coordinate

3 柔性接头摆动疲劳寿命预测

3.1 柔性接头摆动疲劳寿命试验

试验所用的柔性接头摆动装置如图 9 所示,将高压氮气充入压力容器内,然后通过电液伺服机构的驱动器形成特定频率、振幅的正弦激励信号,以驱动作动器为柔性接头提供摆动力矩实现指定摆角的承压摆动,力传感器沿轴线安装在作动器上用来测量作动力,两个水平安装的位移传感器(linear variable differential transducer, LVDT)用来测定接头的摆角。柔性接头摆动疲劳寿命试验工况信息如表 3 所示。

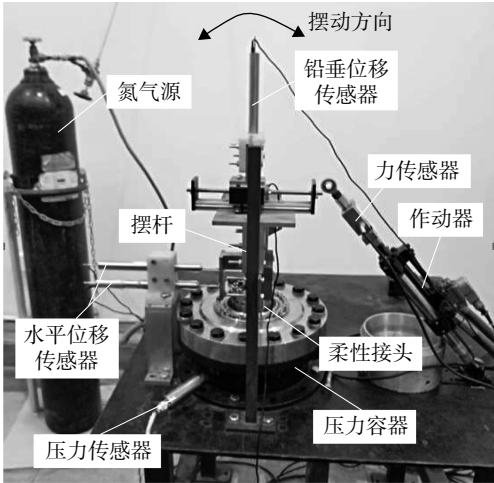


图 9 柔性接头摆动试验装置
Fig. 9 Swing test device for flexible joint

表 3 柔性接头摆动疲劳寿命试验工况信息

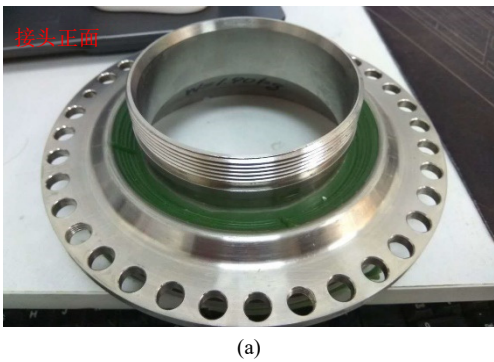
Table 3 Condition of swing fatigue life test of flexible joint

环境温度/℃	试验压强/MPa	摆动频率/Hz	摆角幅值/(°)
23±2	12.3	1	±6

将某柔性接头试验件^[21]安装在试验装置上进行摆动疲劳寿命试验,用计算机数据采集系统记录柔性接头的水平位移-摆动时间数据,当实测位移数据出现突变时立刻停止作动,此时柔性接头的摆动次数(摆动 1 次是指从 0°摆到 +6°,再从 +6°摆到 -6°最后回到 0°位置的过程)可认为是其摆动疲劳寿命。测得柔性接头在表 3 工况下摆动寿命是 120 次,其最外层弹性件底部的对称两侧发生局部被剪断现象并存在明显裂纹,而接头正面弹性件无明显损伤,如图 10 所示。

3.2 柔性接头摆动有限元仿真

采用 Ansys 有限元软件对柔性接头高压环境下的摆动过程进行仿真计算。柔性接头为回转体,可在球坐标系下建模,同时考虑其平面对称性可简化为 1/2 模型,如图 11 所示。有限元模型选用六面体八节点的 SOLID-185 实体单元,通过黏结



(a)

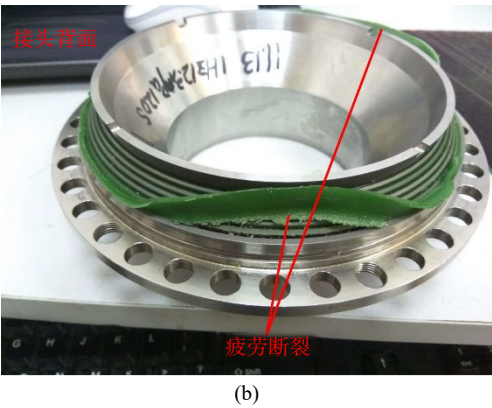


图 10 摆动疲劳寿命试验后的柔性接头
Fig. 10 Flexible joint after swing fatigue life test

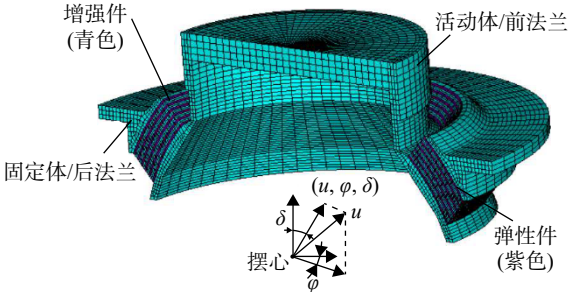


图 11 柔性接头有限元模型
Fig. 11 Finite element model of flexible joint

(glue)命令将柔性接头的活动体、固定体、金属增强件和橡胶弹性件黏结为一个连续的整体。弹性件、增强件的网格划分在径向(u)、周向($0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$)和角向($45^\circ \leq \delta \leq 65^\circ$)分别均分为 2 份、40 份和 20 份。

按实际试验情况建立的带摆杆的柔性接头有限元模型及设置的约束条件如图 12 所示,摆杆材质与接头增强件保持一致,在接头固定体外侧的面上施加固定约束,活动体内表面及底部表面施加压力均布载荷,在对称截面($\varphi=0^\circ$ 和 180°)施加对称边界条件。驱动力载荷采用单轴矢量力加载,将其施加在摆杆顶端的一侧的关键点上,逐步增大载荷以达到不同的摆角。

活动体、固定体和增强件的材料为 30CrMnSiA 合金钢,其泊松比为 0.29、弹性模量为 196 GPa,弹性件的本构关系可用 Ogden 2 阶模型来描述,利用弹性件材料的简单切应力应变曲线进行本构参数拟合,拟合结果如表 4 所示。

3.3 柔性接头摆动疲劳寿命预测结果分析

对摆动疲劳寿命试验工况下的柔性接头受力进行仿真计算,根据计算所得应变结果确定该工况的双轴因子 b 和载荷比 R 。柔性接头弹性件的

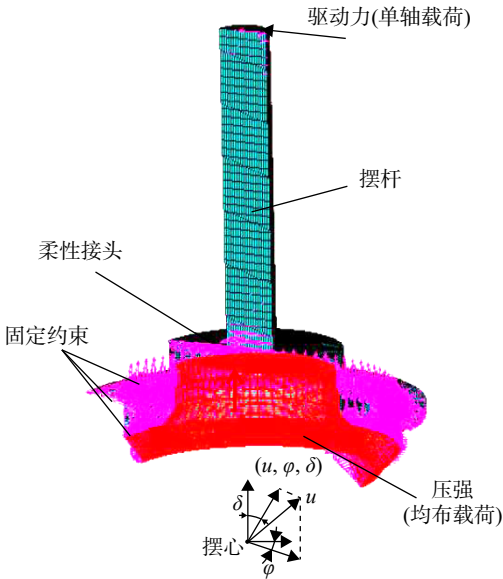


图 12 实际加载下的柔性接头有限元模型
Fig. 12 Finite element model of flexible joint in fatigue test

表 4 弹性件材料本构模型拟合参数
Table 4 Constitutive parameter of elastomer

本构参数	$\mu_1/10^{-5}$	α_1	μ_2	α_2
拟合值	1.836 63	10.303	21.539	0.026 59

第一主伸长率 λ_1 在直角坐标系下的分布云图及第一主伸长率峰值的方向如图 13 所示。第一主伸长率峰值位于最外层弹性件靠底部中间位置, $\lambda_{1,\max}=4.064$, 其在直角坐标系下的方向向量为 $(-0.121\ 74, 1.682\ 3, 1.657\ 01)$, 方向向量与 x 轴的夹角为 -2.95° (逆时针旋转为正), 与 y 轴的夹角为 45.36° , 与 z 轴的夹角为 44.49° 。第一主伸长率峰值出现在 7505 号单元, 此处可认为是弹性件承压摆动时易发生疲劳失效的危险位置。

导出危险位置的有限元仿真结果作为输入代入式(3)求解积分获得 $W_{c,\max}$, 和弹性件材料的疲劳裂纹扩展特性参数(r_c 、 T_c 、 F_0 和 c_0)一并代入式(9)计算出柔性接头的预测疲劳寿命如表 5 所示。通过疲劳寿命预测模型计算得到的柔性接头寿命 $N_{f,\text{pre}}=107$ 次, 而接头在 12.3 MPa、6°摆角幅值工况的实测寿命 $N_{f,\text{test}}=120$ 次, 预测寿命与实测寿命之比 $N_{f,\text{pre}}/N_{f,\text{test}}$ 为 1/1.12, $1/2 < N_{f,\text{pre}}/N_{f,\text{test}} < 2$, 即预测寿命在实测寿命的二倍分散因子之内, 满足工程疲劳寿命预测的要求。 $W_{c,\max}$ 出现在 $\theta=0$ 和 $\pm\pi$ 的方位面上, 即开裂面方位与 $\lambda_{1,\max}$ 的方向垂直。

预测的疲劳开裂位置和开裂面方位与接头弹性件上实际的疲劳开裂位置和裂纹方向对比如

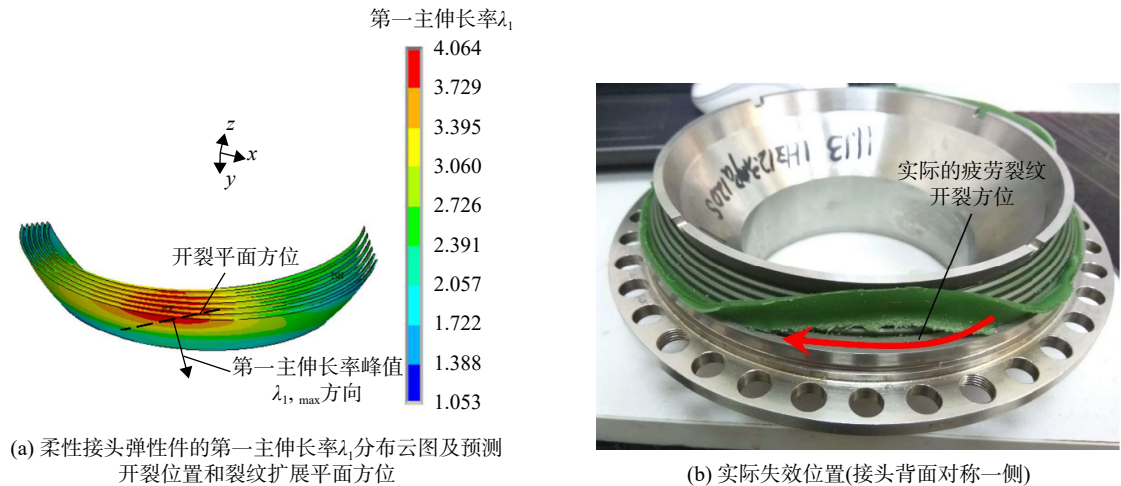


图 13 柔性接头疲劳寿命试验实际失效位置与预测开裂位置结果对比

Fig. 13 Comparison between actual failure position and predicted failure position in fatigue life test of flexible joint

表 5 柔性接头预测疲劳寿命与实测寿命对比

Table 5 Comparison between predicted fatigue life and measured fatigue life of flexible joint

预测开裂单元	开裂能密度峰值 $W_{c,max}/\text{MPa}$	开裂方位角 θ/rad	预测寿命 $N_{f,pre}/\text{cycles}$	实测寿命 $N_{f,test}/\text{cycles}$	$N_{f,pre}/N_{f,test}$
No.7505	5.585	$\theta=0, \pm\pi$	107	120	1/1.12

图 13 所示。预测结果与实际失效位置较为吻合,与固定体(后法兰)黏结的最外层弹性件底部上侧出现开裂,裂纹在开裂面上沿环向不断扩展,导致最外层弹性件被局部剪断并挤出。

此外,有限元模型考虑了平面对称性简化为 1/2 模型,所以预测的失效位置实际上为对称面的两侧,这与实际试验的开裂情况相符。上述结果说明以开裂能密度作为损伤参量的疲劳寿命预测模型能较好预测柔性接头的摆动疲劳寿命以及开裂平面方位,可为柔性接头的疲劳分析和结构可靠性设计提供参考。

4 结 论

1) 相较于 $S-N$ 曲线疲劳分析方法,本文基于开裂能密度理论建立的柔性接头摆动疲劳寿命预测模型,用弹性件材料的疲劳裂纹扩展特性参数和开裂能密度来预测柔性接头的摆动疲劳寿命和开裂位置,避免了因缺乏成品试验件或材料 $S-N$ 曲线数据而无法进行寿命预测的不足,并可进一步预测柔性接头疲劳失效时的开裂平面方位。

2) 以开裂能密度作为柔性接头弹性件疲劳开裂的损伤参量,将橡胶疲劳裂纹扩展法与有限元分析结合建立的模型,在预测寿命、开裂位置、

开裂面方位等方面与试验结果一致性良好,预测寿命在实测寿命的二倍分散因子内,满足工程疲劳寿命预测的要求,可为柔性接头的摆动疲劳寿命分析及结构可靠性设计提供参考。

参考文献:

[1] 李太安. 固体火箭发动机柔性喷管使用性能分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2015.
LI Taian. Performance analysis of flexible nozzles for solid rocket motor[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2015. (in Chinese)

[2] 万诺, 史宏斌, 屈转利, 等. 柔性接头疲劳摆动寿命分析研究[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 269-277.
WAN Nuo, SHI Hongbin, QU Zhuanli, et al. Analysis of fatigue properties and vectoring life of flexible joint[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(5): 269-277. (in Chinese)

[3] RAVI CHANDRAN K S. Mechanical fatigue of polymers: a new approach to characterize the SN behavior on the basis of macroscopic crack growth mechanism[J]. Polymer, 2016, 91: 222-238.

[4] TEE Y L, LOO M S, ANDRIYANA A. Recent advances on fatigue of rubber after the literature survey by Mars and Fatemi in 2002 and 2004[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 110: 115-129.

[5] MARCO Y, HUNEAU B, MASQUELIER I, et al. Prediction of fatigue properties of natural rubber based on the descriptions of the cracks population and of the dissipated energy[J]. Polymer Testing, 2017, 59: 67-74.

[6] 王小莉, 上官文斌, 曾祥坤, 等. 基于开裂能密度及裂纹扩展特性的橡胶隔振器疲劳特性预测[J]. 振动与冲击, 2016, 35(6): 70-74.
WANG Xiaoli, SHANGGUAN Wenbin, ZENG Xiangkun, et al. A method to predict fatigue performances of rubber isolator based on

- the cracking energy density and the fatigue crack growth characteristic of rubber material[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(6): 70-74. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] BELKHIRIA S, HAMDI A, FATHALLAH R. Cracking energy density for rubber materials: computation and implementation in multiaxial fatigue design[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(9): 2190-2203.
- [9] PAN Zheng, LAI Yaling, WANG Yanping, et al. Fatigue life prediction and effects of cerium oxide-filled vulcanized natural rubber on fatigue life under multiaxial loading[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, 44(12): 3349-3362.
- [10] 金状兵. 基于开裂能的橡胶动态疲劳寿命预报[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学, 2014.
- JIN Zhuangbing. Fatigue life evaluation of rubber material based on crack energy density and dynamical mechanical analysis[D]. Xiangtan Hunan: Xiangtan University, 2014. (in Chinese)
- [11] 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 Xiaoli. Studies on life prediction of multiaxial fatigue for rubber isolators[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] LAKE G J, LINDLEY P B. Cut growth and fatigue of rubbers II: experiments on a noncrystallizing rubber[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1965, 38(2): 301-313.
- [13] 王昊, 危银涛. 橡胶疲劳研究综述[J]. *轮胎工业*, 2015, 35(10): 579-585.
- WANG Hao, WEI Yintao. Summary of rubber fatigue research[J]. *Tire Industry*, 2015, 35(10): 579-585. (in Chinese)
- [14] THOMAS A G. Rupture of rubber V cut growth in natural rubber vulcanizates[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1959, 32(2): 477-489.
- [15] LINDLEY P B. Non-relaxing crack growth and fatigue in a non-crystallizing rubber[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1974, 47(5): 1253-1264.
- [16] MARS W V, FATEMI A. Fatigue crack nucleation and growth in filled natural rubber[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, 26(9): 779-789.
- [17] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for rubber property-extension cycling fatigue: D4482-11[S]. West Conshohocken, US: ASTM, 2021: 4-5.
- [18] AÏT-BACHIR 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.
- [19] GREENSMITH H W. Rupture of rubber X: the change in stored energy on making a small cut in a test piece held in simple extension[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1963, 7(3): 993-1002.
- [20] MARS W V, FATEMI A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(9): 949-961.
- [21] 张金尧. 基于开裂能的柔性接头摆动疲劳寿命预测[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2022.
- ZHANG Jinyao. Prediction of the swing fatigue life of flexible joint based on cracking energy density[D]. Beijing: Beihang University, 2022. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)