

发动机橡胶悬置疲劳寿命的研究进展

刘泰凯, 刘梦岩

(广州汽车集团股份有限公司 汽车工程研究院, 广东 广州 511434)

摘要: 针对橡胶悬置疲劳寿命预测的研究, 综述国内外橡胶材料及橡胶元件疲劳寿命预测方法及其发展。橡胶悬置疲劳寿命的预测方法主要分为裂纹萌生法和裂纹扩展法。裂纹萌生法中, 相对于应变和应变能密度, 等效应力为损伤参量建立的橡胶疲劳寿命预测模型更适用于橡胶悬置疲劳寿命预测; 应用裂纹扩展法建立的橡胶疲劳寿命预测模型能较好地预测橡胶悬置疲劳寿命; 与裂纹萌生法相比, 裂纹扩展法可预测橡胶悬置的裂纹方向, 对工程实际有更好的指导意义。

关键词: 发动机橡胶悬置; 疲劳寿命; 裂纹萌生法; 裂纹扩展法; 预测模型; 等效应力

中图分类号: TQ336.4; TQ330.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)06-0475-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.06.0475



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

发动机悬置系统是发动机动力总成与车架之间的弹性连接系统, 可以对动力总成与车架之间的振动进行双向隔离。因此, 发动机悬置的设计直接影响发动机的振动向车体的传递, 从而影响整车的噪声、振动和声振粗糙度性能^[1]。

按照隔振器材料分类, 发动机悬置可分为橡胶悬置和液压悬置^[2]。橡胶悬置由于结构紧凑、价格低、便于维护和使用寿命长等优点而得到广泛应用^[2]。从工作环境和承载状况看, 橡胶悬置大部分时间处于较大的静载荷或长时间连续交变载荷环境下, 其容易因疲劳而失去原有的性能。因此, 防止或减少橡胶悬置发生疲劳损坏是其设计的关键问题, 也是整个车辆系统安全工作的保障。为确保橡胶悬置的安全性和可靠性, 对其进行正确的疲劳分析与评估尤为重要。

近年来, 国内外学者提出了多种橡胶材料疲劳寿命预测模型及相应的试验方法^[3-4], 疲劳试验方法主要分为裂纹萌生法和裂纹扩展法。橡胶材料疲劳过程由裂纹萌生阶段和裂纹扩展阶段组成, 裂纹萌生阶段是指橡胶材料固有的不可见的微小裂纹逐渐长大(萌生)和聚集成为可见裂纹; 裂纹扩展阶段是指可见裂纹不断增长直至橡胶材

料破坏^[3]。相应的橡胶疲劳寿命也可分为裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命。由此, 基于连续介质力学和断裂力学理论分别演绎出裂纹萌生法和裂纹扩展法^[5]两种橡胶材料疲劳寿命预测方法。

橡胶悬置的工作承载状况较为复杂, 属于多轴循环载荷^[5], 何种寿命模型更适用于橡胶悬置疲劳寿命预测是一个难题。本文综述国内外橡胶材料及橡胶元件疲劳寿命研究情况, 以帮助建立合理的橡胶悬置疲劳寿命预测模型。

1 裂纹萌生法

裂纹萌生法认为橡胶材料的寿命由应力或应变历程决定, 因此可通过加载工况得到橡胶材料各点的应力应变历程, 进而预测其疲劳寿命^[5]。裂纹萌生法通过损伤参量衡量橡胶材料某一点的疲劳损伤, 损伤参量能否适当体现载荷历程对橡胶材料造成的疲劳损伤是裂纹萌生法准确预测橡胶材料疲劳寿命的关键。损伤参量的常用变量有最大主应变、八面体剪切应变和应变能密度, 根据损伤参量的不同, 裂纹萌生法可细分为等效应变法、等效应力法和能量法。

裂纹萌生法直观地把损伤参量与橡胶材料疲劳寿命相联系, 可方便地考察多轴加载对橡胶材料疲劳寿命的影响。裂纹萌生法最早由 A. Wohler^[6]在对金属铁道轴的疲劳研究中提出。类似的分析方法在20世纪40年代由 S. M. Cadwell

作者简介: 刘泰凯(1988—), 男, 广东茂名, 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院工程师, 硕士, 主要研究方向为橡胶材料及橡胶隔振器的开发。

E-mail: liutaikai@gacrnd.com

等^[7]引入到橡胶材料疲劳研究领域。其后, B. L. Lee等^[8-9]应用裂纹萌生法针对加载方式和加载频率等对橡胶材料疲劳性能的影响进行了大量的试验研究。之后, N. Saintier等^[10-12]开展了更加深入的研究,进一步分析了裂纹萌生法的特点。W. B. Shangguan^[13]将裂纹萌生法应用于橡胶悬置的疲劳寿命预测,对比了等效应变法(以最大主工程应变、最大主对数应变、最大主格林-拉格朗日应变和八面体切应变为损伤参量)、能量法(以应变能密度为损伤参量)以及等效应力法(以等效应力和等效应力为损伤参量),指出等效应变法和能量法预测得到的橡胶悬置寿命在实测寿命的4倍分散线内,预测效果较差;等效应力法能更准确地预测橡胶悬置的疲劳寿命,预测寿命可在实测寿命的2倍分散线内。

1.1 等效应变法

橡胶材料为大变形材料,在对橡胶材料进行疲劳性能测试时常以位移作为加载量和测量量,由位移量转换得到的应变量为常用的损伤参量。常用的应变量为最大主应变、最大正应变、最大主格林-拉格朗日应变和八面体剪切应变等^[13],以这些应变量为损伤参量建立橡胶材料疲劳寿命预测模型的方法称为等效应变法。

20世纪以来, Moon Seong-In等^[14]基于哑铃形试样疲劳试验结果,应用最大主格林-拉格朗日应变为损伤参量建立了橡胶材料疲劳寿命预测模型,并应用该模型预测了某变速箱橡胶悬置及某橡胶衬套的疲劳寿命。研究表明,以最大主格林-拉格朗日应变作为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命模型的预测效果较好。

W. V. Mars等^[11]和R. Harbour等^[15]以天然橡胶和丁苯橡胶为研究对象,开展了多组单轴和多轴疲劳试验,以最大主应变峰值、最大正应变峰值、最大正应变幅值和八面体剪切应变作为损伤参量建立了橡胶材料疲劳寿命预测模型。对比结果表明,以最大主应变峰值作为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型的预测效果最好,以最大正应变峰值和八面体剪切应变作为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型的预测效果稍差,以最大正应变幅值作为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型的预测效果最差。另外,

W. V. Mars等^[11]指出,在多轴疲劳加载工况下,基于应变的上述几种损伤参量虽然可以较准确地预测橡胶材料疲劳寿命,但存在以下3个问题:(1)在等损伤参量条件下,不能解释单轴拉伸与等双轴拉伸疲劳寿命的差异;(2)没有考虑裂纹闭合效应,即无法考察对称作用力与脉冲作用力下疲劳寿命的差异性;(3)在静水压力下,由于橡胶材料的不可压缩性,以应变为损伤参量可预测得到无限寿命。

以上研究结果表明,应变可作为损伤参量建立橡胶悬置疲劳寿命预测模型,但是由于橡胶材料应变本身的局限性,对于橡胶悬置及载荷较复杂的橡胶元件的疲劳寿命预测准确性较低。

1.2 等效应力法

应力较少用作橡胶材料疲劳寿命预测模型的损伤参量^[16],这与橡胶材料的应力难以准确测定有关^[3]。以应力作为损伤参量建立橡胶材料疲劳寿命预测模型的方法称为等效应力法。

R. K. Luo等^[17-18]基于3个主柯西应力提出了等效应力的概念,并以等效应力作为损伤参量建立了橡胶材料疲劳寿命预测模型,并预测了两个不同橡胶减振弹簧的疲劳寿命。试验结果表明,以等效应力作为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型的预测效果较好。R. K. Luo等^[17]提出的等效应力(σ_f)是基于以下假设:第一、第二、第三主应力(分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)中只有大于零的主应力对橡胶材料造成疲劳损伤。

根据以上假设,当 $\sigma_1 \leq 0$ 时, $\sigma_f = 0$; 当 $\sigma_1 > 0$ 时, σ_f 定义如下:

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_1^2 + A\sigma_2^2 + B\sigma_3^2} \quad (1)$$

式中, A 和 B 为加权系数,表示为

$$A = \begin{cases} 0 & \sigma_2 \leq 0 \\ 1 & \sigma_2 > 0 \end{cases} \quad B = \begin{cases} 0 & \sigma_3 \leq 0 \\ 1 & \sigma_3 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

N. Saintier等^[19]分析了天然橡胶硫化胶在大应变下的应力分布,基于应力均值与应力幅值提出了等效应力的概念,并以等效应力为损伤参量建立了橡胶材料疲劳寿命预测模型,该模型有4个材料参数需要通过橡胶材料的疲劳试验结果确定。N. Saintier基于最小二乘法,应用遗传算法工具箱对试验数据进行处理,最后得到合适的材料参数。以该模型对哑铃形橡胶试样疲劳寿命进行

预测,预测寿命在实测寿命的2倍分散线之内,预测效果较好。以该等效应力为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型虽可较好地预测多轴载荷下的橡胶材料疲劳寿命,但该模型形式比较复杂,需确定的参数较多,难以广泛应用。

W. B. Shanguan^[13]分别以R. K. Luo提出的等效应力模型与N. Saintier提出的等效应力模型建立橡胶悬置疲劳寿命预测模型,预测寿命均在实测寿命的2倍分散线内,说明以两种等效应力作为损伤参量均能较好地预测橡胶悬置的疲劳寿命。对比两种等效应力模型,R. K. Luo提出的等效应力公式所需确定的参数较少,更易于工程应用。

1.3 能量法

R. S. Rivlin等^[20]首先提出一种用于预测撕裂能的应变能密度模型,该模型被应用于预测橡胶材料的裂纹扩展行为。20世纪60年代后,应变能密度开始用于分析橡胶材料疲劳裂纹萌生行为^[21]。W. V. Mars^[5]在研究中指出,相同应变能密度下,橡胶材料等双轴拉伸疲劳寿命约为单轴拉伸疲劳寿命的4倍。而W. V. Mars等^[12]和R. Harbour等^[15]的试验数据表明:相比于以工程应变为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型,以应变能密度为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型的预测效果较差。W. V. Mars等^[12]认为,在多轴加载情况下,只有部分应变能在裂纹萌生或扩展的过程中产生作用,因此使用应变能作为损伤参量是不恰当的。由此,引入了开裂应变能密度的概念,开裂应变能密度代表的仅仅是裂纹扩展面上消耗的应变能,相比于应变能密度,其可更好地描述橡胶材料的疲劳损伤,且根据开裂应变能密度的大小可预测裂纹开裂的方向。

此外,A. Zine等^[22]基于应变能密度进行了一系列疲劳试验及研究,总结了以应变能密度作为损伤参量建立橡胶材料疲劳寿命预测模型的局限性:(1)能量法是标量,不能反映裂纹扩展的方向;(2)在多轴加载情况下,只有部分能量用于裂纹萌生过程;(3)应变能密度恒为正值,因此不能考虑裂纹闭合效应带来的影响。而开裂应变能密度物理意义明确,且没有上述局限性,能较好地预测橡胶材料的疲劳寿命,适合用作裂纹萌生法建立橡胶材料疲劳寿命预测模型的损伤参量。

Moon Seong-In等^[14]基于哑铃形试样的疲劳试验结果,再次以应变能密度为损伤参量建立了橡胶材料疲劳寿命预测模型,预测了某橡胶衬套的疲劳寿命。研究结果也证明,以应变能密度为损伤参量建立的橡胶疲劳寿命预测模型的预测效果较差,预测寿命过于保守。

2 裂纹扩展法

裂纹扩展法是基于断裂力学,在给定特定裂纹的初始几何形状和能量释放率历程的条件下,预测特定裂纹的扩展。针对简单橡胶试样进行疲劳试验时,只需要试样上的初始裂纹扩展一定尺寸(可被测量仪器读取),即可完成某一加载工况的疲劳试验。因此,采用裂纹扩展法进行简单试样的疲劳试验时,可大大节省试验时间和成本。

裂纹扩展法的理念最早由C. E. Inglis^[23]和A. A. Griffith^[24]提出。A. A. Griffith基于能量平衡理论提出一种断裂准则,该断裂准则描述了裂纹扩展过程中,橡胶材料的机械能向裂纹表面相关能量转化的过程。A. A. Griffith的研究表明,转化的能量总量与裂纹增长的长度有关。

G. J. Lake等^[25]对有单边初始裂纹的简单拉伸试样进行了撕裂能比(加载循环中最小撕裂能与最大撕裂能之比)为零的裂纹扩展试验(臭氧环境),得到了完整的裂纹扩展速率与撕裂能之间的关系曲线。3种不同配方硫化胶的裂纹扩展速率与撕裂能之间的关系曲线如图1所示,其中 dc/dn 为裂纹扩展速率, T 为撕裂能。

由图1可见,3条曲线有类似的规律:(1)在撕

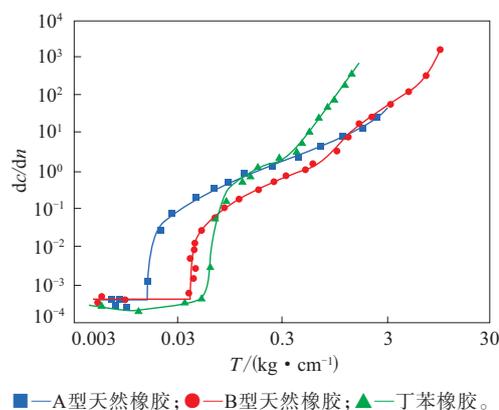


图1 硫化胶裂纹扩展速率与撕裂能之间的关系曲线

裂能较小时,裂纹扩展缓慢,此时裂纹扩展速率主要由臭氧对试样的氧化速率决定,由于试验中臭氧浓度一定,3种试样的裂纹扩展速率非常接近;

(2)当撕裂能大于某阈值(T_0),撕裂能与裂纹扩展速率成一次函数关系;(3)当撕裂能较大时,撕裂能与裂纹扩展速率成幂函数关系,直至撕裂能达到临界撕裂能(T_c);(4)当撕裂能大于临界撕裂能后,试样发生断裂。总结得出上述4阶段裂纹扩展模型,即每阶段撕裂能与裂纹扩展寿命之间的关系如下:

$$\begin{cases} dc/dn = r & T < T_0 \\ dc/dn = A_0(T - T_0) + r & T_0 \leq T < T_c \\ dc/dn = B_0 T^p & T_c \leq T < T_c \\ dc/dn = \infty & T = T_c \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_0 、 T_c 、 T_c 为各阶段的临界撕裂能, r 为臭氧氧化造成的裂纹扩展速率, A_0 和 B_0 为系数。

R. Harbour等^[26-27]创造性地将裂纹萌生法与裂纹扩展法相结合,提出了一种新的综合研究方法。在裂纹扩展的4个阶段中,幂函数阶段所占的比例最大,因此假设裂纹扩展的过程遵循幂法则函数关系,根据裂纹萌生试验得到的结果及裂纹扩展试验得到的裂纹扩展速率-撕裂能关系,进一步推导得出橡胶材料中的初始固有裂纹尺寸。此初始裂纹尺寸可用于预测橡胶材料的裂纹萌生寿命。对于多轴载荷下的橡胶材料,基于开裂应变能密度提出了多轴载荷下撕裂能的计算公式,拓宽了裂纹扩展法的应用范围。

近年来,X. L. Wang等^[28]基于裂纹扩展法,建立了橡胶悬置的疲劳寿命预测模型,预测寿命分布在实测寿命的2倍分散线之内,且绝大部分寿命都分布在实测寿命1.5倍分散线之内,满足工程橡胶元件疲劳寿命预测的要求。同时预测的开裂位置和开裂方向与实测结果较为一致。该橡胶悬置疲劳寿命预测模型可用于分析橡胶悬置开裂方向,提供橡胶悬置结构优化方向,提高橡胶悬置开发效率。

3 结论

(1)国内外的研究表明,裂纹萌生法与裂纹扩展法均可用于橡胶悬置的疲劳寿命预测,但由于橡胶悬置的载荷复杂性,裂纹萌生法是否可

准确地预测橡胶悬置疲劳寿命取决于选用何种损伤参量来建立橡胶疲劳寿命预测模型。

(2)使用裂纹萌生法建立橡胶悬置疲劳寿命预测模型,等效应变法和能量法预测得到的橡胶悬置疲劳寿命均在实测寿命的4倍分散线内,等效应力法预测橡胶悬置疲劳寿命在实测寿命的2倍分散线内,预测结果更准确。

(3)应用裂纹萌生法、以等效应力作为损伤参量建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型及应用裂纹扩展法建立的橡胶材料疲劳寿命预测模型对橡胶悬置疲劳寿命的预测结果表明,橡胶悬置预测疲劳寿命均在实测寿命的2倍分散线内。与裂纹萌生法相比,裂纹扩展法预测的橡胶悬置寿命大部分在实测寿命的1.5倍分散线内,预测结果更准确,且裂纹扩展法可预测裂纹开裂方向,对工程实际有更好的指导意义。

参考文献:

- [1] 翟晶. 汽车动力总成悬置系统隔振性能分析与优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [2] 梁天也, 史文库, 唐明祥. 发动机悬置系统的研究综述[J]. 噪声与振动控制, 2007(1): 6-10.
- [3] Mars W V, Fatemi A A. Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 949-961.
- [4] 何志刚, 周孔亢, 应世洲, 等. 轮胎疲劳失效研究综述[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 76-83.
- [5] Mars W V. Multiaxial Fatigue of Rubber[D]. Toledo: The University of Toledo, 2001.
- [6] Wohler A. Wohler's Experiments on the Strength of Metals[J]. Engineering, 1867, 2: 160.
- [7] Cadwell S M, Merrill R A, Sloman C M, et al. Dynamic Fatigue Life of Rubber[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1940(12): 19-23.
- [8] Lee B L, Ku B H, Liu D S. Fatigue of Cord-Rubber Composites (II): Strain-based Fatigue Failure Criteria[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1998, 71: 866-888.
- [9] Sun C, Gent A, Marteny P. Effect of Fatigue Step Loading Sequence on Residual Strength[J]. Tire Science and Technology, 1996, 28: 196-208.
- [10] Saintier N, Cailletaud G, Piques R. Crack Initiation and Propagation under Multiaxial Fatigue in a Natural Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 61-71.
- [11] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial Fatigue of Rubber. Part I: Quivalence Criteria and Theoretical Aspects[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28: 515-522.

- [12] 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: 523–538.
- [13] Shangguan W B. Study on the Effect of Different Damage Parameters on the Predicting Fatigue Life of Rubber Isolators[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52 (2) : 116.
- [14] Seong-In Moon, Il-Je Cho, Chang-Su Woo, et al. Study on Determination of Durability Analysis Process and Fatigue Damage Parameter for Rubber Component[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25: 1159–1165.
- [15] Harbour R, Fatemi A, Mars W V. Fatigue Life Analysis and Predictions for NR and SBR under Variable Amplitude and Multiaxial Loading Conditions[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30: 1231–1247.
- [16] Andre N, Cailletaud G, Piques R. High Diagram for Fatigue Crack Initiation Prediction of Natural Rubber Components[J]. *Kautschuk und Gummi Kunststoffe*, 1999, 52: 120–123.
- [17] Luo R K, Wu W X. Fatigue Failure Analysis of Anti-vibration Rubber Spring[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13: 110–116.
- [18] Luo R K, Mortel W J, Wu X P. Fatigue Failure Investigation on Anti-vibration Springs[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16: 1366–1378.
- [19] Saintier N, Cailletaud G, Piques R. Multiaxial Fatigue Life Prediction for a Natural Rubber[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28: 530–539.
- [20] Rivlin R S, Thomas A G. Rupture of Rubber. I. Characteristic Energy for Tearing[J]. *Journal of Polymer Science*, 1952 (3) : 291–318.
- [21] Beatty J R. Fatigue of Rubber[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1964, 37: 1341–1364.
- [22] Zine A, Benseddi Q N, Abdelaziz M, et al. Prediction of Rubber Fatigue Life under Multiaxial Loading[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2006, 29: 267–278.
- [23] Inglis C E. Stress in a Plate due to the Presence of Cracks and Sharp Corners[J]. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 1913, 55: 219–230.
- [24] Griffith A A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A*, 1920, 221: 163–198.
- [25] Lake G J, Lindley P B. The Mechanical Fatigue Limit for Rubber[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1965 (9) : 1233–1251.
- [26] Harbour R, Fatemi A, Mars W V. Fatigue Crack Orientation in NR and SBR under Variable Amplitude and Multiaxial Loading Conditions[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43: 1783–1794.
- [27] Mars W V, Fatemi A. Novel Specimen for Investigating the Mechanical Behavior of Elastomers under Multiaxial Loading Conditions[J]. *Society for Experimental Mechanics*, 2004 (2) : 136–146.
- [28] Wang X L, Shangguan W B, Subhash Rakhaja, et al. A Method to Develop a Unified Fatigue Life Prediction Model for Filled Natural Rubbers under Uniaxial Loads[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, 37: 50–61.

收稿日期: 2020-03-11

Research Progress of Fatigue Life of Rubber Engine Mount

LIU Taikai, LIU Mengyan

(GAC Automotive Research & Development Center, Guangzhou 511434, China)

Abstract: In this paper, for the research of fatigue life prediction, the methods of fatigue life prediction of rubber materials and rubber components at home and abroad were reviewed. The methods of fatigue life prediction of rubber mount were mainly divided into crack initiation approach and crack propagation approach. In the crack initiation approach, the rubber fatigue life prediction model which used the equivalent stress as the damage parameter was more suitable for the prediction of the fatigue life of rubber mount, compared with the one using strain and strain energy density as parameters. It was found that the rubber fatigue life prediction model established by crack propagation approach could well predict the fatigue life of rubber mount. Compared with the crack initiation approach, the crack propagation approach could predict the crack direction of rubber mount, which had a better guiding significance for engineering.

Key words: rubber engine mount; fatigue life; crack initiation approach; crack propagation approach; prediction model; equivalent stress