

橡胶构件疲劳寿命的研究方法概述

杜秀华*, 韩佳轩, 叶卫东

(东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:概述橡胶构件的疲劳寿命研究方法, 主要分为裂纹成核法、裂纹扩展法和 S-N 曲线法。从疲劳角度对橡胶构件的寿命研究方法进行总结, 给出各种研究方法的选择依据。应根据橡胶构件的使用条件和疲劳失效评价准则的不同选用合适的设计计算方法, 以达到疲劳寿命预测相对准确且简化计算的目的。另外, 还总结了近阶段有限元法在橡胶疲劳寿命分析上的应用和新进展。

关键词:橡胶构件; 疲劳寿命; 裂纹成核; 裂纹扩展

中图分类号: TQ336.2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-890X(2014)02-0121-05

橡胶构件通常在周期性应力状态下工作, 橡胶材料的疲劳断裂性能往往决定构件的疲劳寿命, 为了保证橡胶构件使用时的安全性和可靠性, 研究橡胶材料的疲劳特性具有重要意义。

橡胶构件的疲劳寿命主要分为 2 个阶段: 第 1 阶段是微裂纹萌生前的寿命, 即裂纹成核寿命; 第 2 阶段是微小裂纹扩展到材料破坏失效时的裂纹寿命。然而, 对于不同用途的橡胶构件, 其失效评价准则也出于安全等方面的考虑会有所不同。有的橡胶构件裂纹成核即认为失效, 而有的橡胶构件裂纹成核到裂纹扩展到失效尺寸仍然具有一定使用寿命, 因此橡胶构件疲劳寿命的研究方法通常包括裂纹成核法、裂纹扩展法和 S-N 曲线(交变应力或应变-寿命曲线, 即疲劳寿命图)法。

1 裂纹成核法

裂纹成核法是基于连续介质力学理论, 在给定某些量(例如应变和应力)的时间历程下, 预测成核寿命, 可定义为裂纹达到一定尺寸所需的循环周次。由于这种方法是用应力和应变形式表述的, 因此使用起来比较方便。当在很大程度上初始裂纹决定产品的最终寿命且初始裂纹比产品尺寸小好几个数量级, 或者研究产品疲劳寿命的空

间分布时, 就应分析产品的疲劳裂纹萌生寿命^[1]。

两个广泛用于橡胶裂纹成核法的疲劳寿命参数是最大主应变(或主伸长比)和应变能密度, 因为应变可以通过位移直接获得, 而橡胶的位移测定较容易; 应变能密度可用橡胶材料本构方程计算得到, 而本构方程可完全由应变定义。橡胶疲劳试验一般采用位移控制, 由于很难确定试样的精确应力值, 因此很少采用应力作为疲劳寿命参数。

W. V. Mars 等^[2]用简单拉伸试样研究了橡胶的裂纹成核寿命。结果表明, 最小应变对裂纹成核寿命影响较大, 基于最大主应变的裂纹萌生的寿命预测模型与基于应变能密度的寿命预测模型相似。

裂纹成核法的优点还表现在可以方便地考察多轴加载对疲劳的影响。通常橡胶件在使用中要承受压缩载荷, 一个方向上的压缩载荷通常伴随着其他方向的剪切和(或)拉伸载荷。N. Saintier 等^[3]研究了天然橡胶(NR)在多轴载荷作用下的疲劳裂纹成核的微观机理, 通过非比例多轴疲劳载荷作用下裂纹萌生方向的研究发现, 如果正确考虑大应变下材料平面的旋转, 裂纹萌生的方向也可以通过一个周期中第一主应力的方向来确定, 裂纹萌生方向不仅与载荷类型(拉伸、扭转等)有关, 还与最大载荷水平有关。

W. V. Mars 等^[4-5]研究了多轴载荷作用下橡胶疲劳裂纹萌生的研究方法, 包括最大主应变、应

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11551014)

作者简介:杜秀华(1964—), 女, 黑龙江大庆人, 东北石油大学教授, 博士, 主要从事油气田地面工程研究工作。

* 通信联系人

变能密度、八面体剪切应变和裂纹能密度准则。基于裂纹路径发生在主伸长空间中,最大主应变与裂纹能密度准则预测的疲劳寿命最接近。通过橡胶的轴向扭转疲劳试验发现,裂纹能密度准则最适合预测疲劳裂纹的成核寿命。

Seong In Moon 等^[6]提出一种从橡胶材料数据库获取本构模型的材料参数后通过基础实验和有限元综合分析得到疲劳寿命与疲劳破坏参数关系的方法,并从橡胶成核寿命考虑,以车辆悬挂系统中橡胶减震弹簧为例,测试了计算公式的适用性。

该研究通过对哑铃形试样进行疲劳试验,得到平均位移和振幅与疲劳寿命的关系,然后利用 Abaqus 软件对试样的变形行为进行三维有限元分析。通过对疲劳试验和有限元计算结果综合分析得到裂纹成核疲劳寿命计算公式。对于该橡胶减震弹簧,裂纹萌生即定义为失效。

$$N_f = 190\,546 S_E^{-2.063} \quad (1)$$

$$\text{或} \quad N_f = 21\,314 \epsilon^{-4.521} \quad (2)$$

式中, N_f 为寿命, S_E 为应变能密度, ϵ 为应变。

利用上式对车辆悬挂系统中橡胶减震弹簧进行分析,将通过应变能密度和最大主应变计算出的疲劳寿命与疲劳试验结果相比较发现,计算分别低估了正常寿命的 33% 和 52%。低估寿命是由于剪切变形所致,应变能密度是标量,不能预测裂纹在某个特定方向成核,因此用应变能密度评价橡胶构件的疲劳寿命是不合适的。为了准确预测疲劳寿命,无论是正应变还是剪切应变都应给予考虑。

2 裂纹扩展法

裂纹扩展法是基于断裂力学理论,在给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寿命。研究橡胶材料断裂问题主要有两种方法^[7],其一是由 R. S. Rivlin 等^[8]提出的撕裂能法,其判据为:当含裂纹橡胶板内的弹性势能释放率达到其撕裂能的临界值时,裂纹则开始扩展,这里的临界撕裂能为材料常数^[9]。其二是由 J. R. Rice^[10]提出的 J 积分法,其判据为:当含裂纹橡胶板绕裂尖围线 J 积分达到其临界值时,裂纹开始扩展,这里的临界值仍然是材料

常数。尽管这两种方法都是基于能量的观点,但是撕裂能与裂纹尖端 J 积分的计算方法是不同的。

2.1 撕裂能法

撕裂能也称为应变能释放率,即裂纹扩展单位面积时储存在含裂纹橡胶体内弹性总势能的下陷率。橡胶材料由于裂纹的前端区域有大变形和明显的滞后损失,具有典型的非线性粘弹性行为^[11],因此在线弹性断裂的基础上进行修正,提出非线性弹性断裂的能量释放率作为其断裂力学参数。

断裂实质上是固体内产生新的自由表面的过程,通过裂纹扩展产生,因此为了使裂纹扩展,必须向裂尖端部提供足够的能量。裂纹扩展时,外力做功的增量一方面使系统内势能增加,另一方面使裂纹扩展而消耗,应变能释放率以及材料的断裂判据可以表示为^[12]

$$G = \frac{\partial}{\partial a}(U - U_e) \geq G_c \quad (3)$$

式中, G 为应变能释放率, B 为试样厚度, a 为裂纹长度, U 为能量, U_e 为势能, G_c 为临界应变能释放率。

G_c 包括整个断裂面上的键发生断裂所消耗的能量和因滞后损失所消耗的能量。通常认为 G_c 是常数,但实际上 G_c 还与裂纹扩展速率、温度和总应变有关,可以通过试验确定^[12]。

R. S. Rivlin 等^[8]通过对 3 种不同几何形状试样能量释放率的研究发现,裂纹扩展始于一定的能量释放率值(门槛值),且能量释放率与试样的几何形状无关,并认为临界能量释放率是表征材料断裂属性的参数。周期裂纹扩展速率只与载荷周期内最大应变能释放率有关,橡胶材料疲劳裂纹扩展速率可以通过应变能释放率唯一确定^[3-4]。

W. V. Mars 等^[2]研究了 NR 在周期载荷作用下裂纹的成核、扩展及最终失效,并且分析了不同载荷比(R)下裂纹扩展率与能量释放率的关系及裂纹扩展与循环次数的关系,总结出单轴载荷条件下的裂纹扩展寿命与应变能密度的函数关系式:

$$N_f = \frac{a_0}{r_c F(R) - 1} \left[\frac{k(\epsilon) W}{k(\epsilon_c) W_c} \right]^{-F(R)} \quad (4)$$

式中, a_0 为初始缺陷尺寸, r_c 为最大疲劳裂纹增长率, $F(R)$ 为 R 的指数函数, k 为应力集中系数, ϵ_c 为致使断裂的极限应变值, W 为外力做功。

从疲劳裂纹扩展特性曲线可以预测 $S-N$ 曲线。A. N. Gent 等^[13] 用该方法研究带单边预制切口拉伸试样的裂纹扩展率与撕裂能和疲劳的关系。

陶华^[14] 应用金属疲劳和断裂力学的理论和方法研究橡胶材料的疲劳、断裂性能, 用柔度法测试了 NR 16 个配方材料的撕裂能及其临界值等。通过 NR 的疲劳试验发现: 在交变载荷下, 裂纹扩展门槛值不存在; 而当 $R=0.5$ 时, 撕裂能达不到临界值, 裂纹不扩展, 达到临界值时裂纹失稳, 试样断裂。因此橡胶等高弹性材料的疲劳断裂研究比金属材料更为复杂和困难, 不能简单直接引用金属疲劳和断裂力学的理论方法, 必须按照其特性进行研究。

P. B. Lindley^[15] 首先采用限元法计算橡胶材料的撕裂能, 模拟分析了几种常用试样以及简单剪切粘结橡胶块的撕裂能与裂纹尺寸的关系。

2.2 J 积分法

J 积分是控制裂纹开始扩展的断裂特征参量, 其表征向裂纹区域的能量输入, 是一种广义能量力, 也称为断裂韧性。在线弹性或小范围屈服情况下, J 积分值即是能量释放率, 可以通过具有不同预制裂纹的多个试样的断裂试验得到, 或通过有限元分析软件模拟求得。

G. Song 等^[16] 研究了传动带的加强筋尖端弹性体的断裂特性, 采用 Abaqus 软件模拟了橡胶材料的裂纹尖端特性, 对传动带局部结构断裂特征进行了 J 积分运算, 从而为传动带寿命预测提供理论参考。

史守峡等^[17] 对平面应力 I 型橡胶材料单边裂纹试样的裂纹尖端附近进行 J 积分计算, 证明对大变形橡胶材料进行 J 积分可以预测其失稳破坏, 还讨论了不同积分路径对 J 积分结果的影响。相比撕裂能方法, J 积分结果分散性小。为获得精确值, 裂纹长度与试样长度比应大些, 但在应力应变行为强烈依赖于时间的情况下, J 积分并不能唯一表示局部裂纹尖端特征。

危银涛等^[18] 提出了改进的虚裂纹闭合技术 (VCCT), 李晓芳等^[19] 用有限元法模拟了简单剪切橡胶件粘结处裂纹扩展时撕裂能与裂纹尺寸的关系。这些都是有限元法在橡胶材料疲劳与断裂分析中的应用。

3 $S-N$ 曲线法

疲劳寿命是指试样在循环应力或应变作用下试样发生断裂所需的循环次数。疲劳寿命随应力幅度增大而降低, 当应力幅度低于某一数值时, 试样不再断裂, 据此提出了 $S-N$ 图和疲劳极限的概念。

$S-N$ 曲线法在金属材料研究中已经得到广泛应用, 但在橡胶材料研究中应用较少, 因为橡胶材料的疲劳循环次数一般高达 $10^6 \sim 10^8$, 获得 $S-N$ 曲线需要相当长时间。同时由于裂纹是由试样中的一些缺陷引发, 因此没有预先割口试样的疲劳寿命参差不齐, 试验需要许多试样, 费时费力。

根据橡胶粘弹行为叠加原理提出的德墨西亚等加速试验方法能简单得到橡胶材料从高应变至低应变宽广区域的 $S-N$ 曲线。主要步骤是先做出具有不同预制割口 a 的一系列 $\lambda-\lg N$ 曲线 (λ 为伸长比), 然后使这些曲线沿着疲劳寿命轴平行移动, 且与没有割口 ($a=a_0$) 的多个试样的 $\lambda-\lg N$ 曲线重叠, 从而获得较精确的 $S-N$ 曲线, 如图 1 所示。从平移量 (c) 可求出疲劳断裂的基本参数 β 和 a_0 , β 为 $S-N$ 曲线的斜率, 决定 $S-N$ 曲线的形状, β 值愈大, 意味着随着 λ 增大, 裂纹的扩展速度也愈快, a_0 实质是潜在缺陷的微裂纹尺寸。

橡胶材料由内部初始裂纹 a_0 扩展到 a 时所

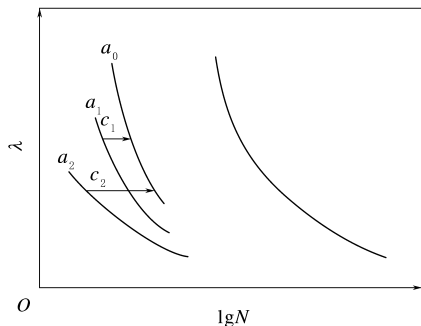


图 1 加速疲劳 $S-N$ 曲线

需疲劳循环次数(N)与基本参数 β 和 a_0 的函数关系式为

$$\lg N = -\beta[\lg k(\lambda) + \lg(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3)] - [\lg B + \lg(\beta - 1) + (\beta - 1)\lg a_0 + \beta \lg E] \quad (5)$$

式中, β 和 B 为有关裂纹扩展的材料常数, E 为剪切模量。

傅政等^[20-26]用等加速疲劳试验法研究了不同配方橡胶的疲劳断裂性能特征,为橡胶的改性研究提供了理论依据。

R. K. Luo 等^[27-29]曾采用综合疲劳评估程序和橡胶材料的 $S-N$ 曲线对轨道车辆悬挂系统中的橡胶减震弹簧进行疲劳寿命设计。根据橡胶减震弹簧在实际运行中的受力状况,将3个主应力值表示的等效应力作为预测疲劳失效寿命的参数,通过有限元软件模拟出橡胶减震弹簧的等效应力分布,并根据橡胶材料的 $S-N$ 曲线找出与最大等效应力值对应的疲劳循环次数,作为橡胶弹簧的疲劳寿命及其寿命设计的依据。

右田哲彦^[30]曾以 $S-N$ 曲线为基础,研究硫化橡胶在多应力条件下 Miner 疲劳累积法则的适用性,发现先进行交变应力为拉伸强度20%的轻缓条件下的疲劳试验,然后进行交变应力为拉伸强度90%的苛刻条件下的疲劳试验,Miner 法则成立;反之,Miner 法则不成立。

$S-N$ 曲线法在橡胶产品寿命设计中是一种比较可靠的研究方法,有限元方法和加速试验技术使该方法在预测橡胶产品的疲劳寿命中应用更加广泛。该方法将动态疲劳过程视为简单的粘弹性物理过程,不考虑动态形变产生热量的影响。

刘建勋等^[31]提出了一种基于 Abaqus 软件的橡胶疲劳寿命预测方法,以一种锥型橡胶弹簧为研究实例,利用 Abaqus 软件计算产品在疲劳试验各载荷工况下的应力场分布,将应力场分布结果和通过 Matlab 拟合的 $S-N$ 曲线导入到 Fe-safe 中进行疲劳寿命分析计算,最后再将计算的疲劳寿命结果导入到 Abaqus 中进行后处理,查看橡胶产品的疲劳寿命情况。

4 结语

对橡胶产品进行疲劳寿命研究为产品使用提

供了安全性和可靠性保证。对疲劳寿命进行估算的方法很多,设计时应该根据使用条件和产品评价准则选用合适的计算方法,以达到相对准确且简化计算的目的。

目前,用有限元方法研究橡胶构件疲劳寿命问题取得了较大进展,随着有限元理论的逐步完善,多种有限元软件在研究橡胶疲劳断裂方面已得到广泛应用,成为许多研究机构进行产品设计及性能评价的重要手段。

参考文献:

- [1] Mars W V, Fatemi A. A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(4): 949-961.
- [2] Mars W V, Fatemi A. Fatigue Crack Nucleation and Growth in Filled Natural Rubber[J]. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 2003, 26(7): 779-789.
- [3] Saintier N, Cailletaud G, Piques R. Multiaxial Fatigue Life Prediction for a Natural Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(10): 530-539.
- [4] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial Fatigue of Rubber. Part I. Equivalence Criteria and Theoretical Aspects[J]. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 2005, 28(3): 515-522.
- [5] Mars W V, Fatemi A. Multiaxial Fatigue of Rubber. Part II. Experimental Observations and Life Predictions[J]. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 2005, 28(3): 523-538.
- [6] Seong In Moon, Il Je Cho. Study on Determination of Durability Analysis Process and Fatigue Damage Parameter for Rubber Component[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(5): 1159-1165.
- [7] 杨晓翔. 非线性橡胶材料的有限单元法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 36-41.
- [8] Rivlin R S, Thomas A G. Rupture of Rubber. I. Characteristic Energy for Tearing[J]. J. Polym. Sci., 1953(10): 291-318.
- [9] Pidaparti R M V, Pontula G. Maximum Tearing Energy Computation for 3D Rubber Fracture[J]. Eng. Fracture Mech., 1994, 49(2): 309-316.
- [10] Rice J R. Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture[M]. New York: Academic Press, 1968: 191-311.
- [11] Gent A. Engineering with Rubber, How to Design Rubber Components[M]. Munich: Carl Hanser Verlag, 1992: chapter 6.
- [12] Pidaparti R M V. Finite Element Analysis of Interface Cracks in Rubber Materials[J]. Eng. Fracture Mech., 1994, 47(3): 309-316.
- [13] Gent A N, Lindley P B, Thomas A G. Cut Growth and Fatigue of Rubbers. I. The Relationship between Cut Growth and Fatigue[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1965,

- 38(4):292-300.
- [14] 陶华. 天然橡胶撕裂能和疲劳裂纹扩展速率研究[M]. 西安:西北工业大学学报,1998,16(1):138-141.
- [15] Lindley P B. Energy for Crack Growth in Model Rubber Component[J]. Journal of Strain Analysis, 1972, 26(7): 132-140.
- [16] Song G, Chandrashekhara K, Breig W F, et al. J-integral Analysis of Cord-Rubber Serpentine Belt Using Neural-network-based Material Modeling[J]. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 2005, 28(4):847-860.
- [17] 史守峡, 刘建百. 有限元分析平面应力非线性橡胶材料的积分[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1998, 19(2):7-12.
- [18] 危银涛, 杨挺青, 万志敏, 等. 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.
- [19] 李晓芳, 杨晓翔, 郭红峰, 等. 简单剪切橡胶件断裂的有限元分析[J]. 特种橡胶制品, 2006, 27(6):37-39.
- [20] 傅政, 谷恒勤, 朱东兵, 等. BR 胶料的疲劳断裂特性[J]. 合成橡胶工业, 1992, 15(4):235-237.
- [21] 肖建斌, 江爱民, 焦清锋, 等. NR/SBR 共混物的动态疲劳与断裂特征[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, 15(2):136-139.
- [22] 傅政, 谷恒勤, 郑弘志, 等. NR 胶料疲劳破坏寿命的断裂力学描述[J]. 青岛化工学院学报, 1992, 3(1):1-7.
- [23] 肖建斌, 国继红, 邹志德, 等. 不同补强体系胶料疲劳断裂性能的研究[J]. 橡胶工业, 2000, 47(10):584-587.
- [24] 裴恽明, 傅政, 姬新生, 等. 不同硫化体系橡胶的疲劳断裂性能[J]. 合成橡胶工业, 2000, 23(2):111-114.
- [25] 裴恽明, 傅政, 刘旭阳, 等. 多项式回归方法拟合 NR/BR 共混胶料疲劳断裂曲线[J]. 橡胶工业, 1998, 45(3):137-139.
- [26] 郭景学, 刘毓真, 范新刚, 等. 几种防老剂的 BR/NR 并用胶疲劳破坏和断裂参数及寿命预测[J]. 橡胶工业, 2000, 47(1):3-8.
- [27] Luo R K, Cook P W, Wu W X, et al. Fatigue Design of Rubber Springs Used in Rail Vehicle Suspensions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2003, 217(Part F):237-240.
- [28] Luo R K, Wu W X, Cook P W, et al. An Approach to Evaluate the Service Life of Rubber Springs Used in Rail Vehicle Suspensions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2004, 218(Part F):173-177.
- [29] Luo R K, Wu W X. Fatigue Failure Analysis of Anti-vibration Rubber Spring[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(6):110-116.
- [30] 右田哲彦. 橡胶的疲劳与破坏——关于机理与配方设计[J]. 江伟, 译. 橡胶译丛, 1981, 16(2):1-19.
- [31] 刘建勋, 黄友剑, 刘栢兵, 等. 一种橡胶弹性元件疲劳寿命预测方法的研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(3):12-14.

收稿日期:2013-08-21

氢化丁腈橡胶规模化制备技术

取得重大突破

中图分类号:TQ333.7 文献标志码:D

2013 年 11 月 21 日,道恩集团与北京化工大学有机无机复合材料国家重点实验室共同攻关完成的氢化丁腈橡胶(HNBR)规模化制备技术取得重大突破。该技术实现产业化后,将使我国成为全球第 3 个独立掌握生产 HNBR 技术的国家。

此前,“HNBR 规模化制备技术”已经通过了由中国石油和化学工业联合会主持的成果鉴定。专家鉴定认为,该项目打破了国外公司对 HNBR 的技术垄断,填补了国内空白,整体技术达到国际先进水平。

HNBR 规模化制备技术的重大突破主要集中在催化剂的回收再利用和溶剂零排放。该项目使用自主合成的新型催化剂,在生产过程中可通过萃取再活化等方法,提高 HNBR 催化剂的回收利用率。目前催化剂的回收率可达 90%,大大降低了 HNBR 的生产成本。该催化剂的特点是活性高、选择性高、价格低,并且在工业上易实施,

打破了国际上在催化剂使用方面的专利壁垒。

另一方面,该项目通过设计创新化产业技术流程,在生产上可做到溶剂零排放。产品生产过程中体系中的溶剂可循环再利用,在很大程度上减小了加氢过程中溶剂对环境的污染,真正做到了资源的循环再利用。目前,该项目所生产的通用规格 HNBR 的性能可以达到国际先进水平,产品氢化度最高可达 99.5%。

HNBR 是可与氟橡胶媲美,具有抗氧化、热稳定性、耐臭氧性、耐热老化性、耐油性、耐化学品腐蚀等优异的综合性能,且价格远低于氟橡胶,被广泛用于大型飞机、石油、钻探等领域。目前世界上只有德国朗盛公司和日本瑞翁公司拥有 HNBR 规模化生产技术,国内只有少数实验室成果。道恩集团自 2008 年起与北京化工大学开展了联合技术攻关,历经 5 年终于在规模化制备关键技术上实现了突破。

道恩集团将于 2014 年年初建设千吨级 HNBR 生产线,实现这一高科技成果的产业化。

(摘自《中国化工报》,2013-11-22)