

综述

橡胶隔振器寿命预测及加速试验研究进展

孙伟星¹, 刘山尖¹, 欧阳昕¹, 董兴建²

(1. 中船重工集团第704研究所, 上海 200031; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 介绍了橡胶材料的疲劳失效形式及影响橡胶材料抗疲劳性能的因素,总结了基于撕裂能和基于 $S-N$ 曲线的橡胶材料疲劳寿命预测方法,阐明了橡胶隔振器加速试验研究的现状,展望了未来值得研究的方向。

关键词: 橡胶; 隔振器; 疲劳; 加速试验

中图分类号: TQ330; O346.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)01-0057-04

Advances in Fatigue Life Prediction and Accelerated Test of Rubber Vibration Isolator

SUN Wei-xing¹, LIU Shan-jian¹, OUYANG Xin¹, DONG Xing-jian²

(1. Shanghai Marine Equipment Research Institute of CSIC, Shanghai 200031, China;

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The failure modes of rubber vibration isolator and the factors influencing its fatigue life were introduced. The fatigue life prediction method for rubber materials based on fracture energy and $S-N$ curve approaches were summarized. The recent research on fatigue life accelerated test for rubber vibration isolator was presented and the current development trends in rubber fatigue life prediction were prospected.

Key words: rubber; vibration isolator; fatigue; accelerated test

金属-橡胶隔振器长期受机械载荷和温度应力作用,表现出复杂的疲劳失效行为和材料性能退化机理。合理地预测橡胶隔振器的疲劳寿命,有助于为在役橡胶隔振器制定合理的检修和维护周期,进而提高隔振器的可靠性和经济性。橡胶隔振器的疲劳可靠性最终要通过疲劳试验来检验,而疲劳试验不可能采用与橡胶隔振器实际使用情况完全相同的载荷条件。为缩短研发周期、节省设计成本,有必要

研究在疲劳试验中如何强化试验参数、如何加速橡胶隔振器的失效而又不改变其失效形式。

1 橡胶隔振器的失效及影响因素

1.1 橡胶隔振器的失效形式

通过硫化工艺和粘结工艺,橡胶和金属之间形成

收稿日期: 2012-08-30

基金项目: 国家重点实验室开放项目(MSV201103)

作者简介: 孙伟星(1977—),男,上海人,工程师,主要研究方向为环境与可靠性试验技术。

的粘合层粘合强度一般高于橡胶本身的强度,因此在机械载荷作用下,隔振器的失效通常不是由于橡胶和金属之间的撕裂破坏,而是由于橡胶材料发生疲劳破坏而出现功能性失效,使得隔振器无法满足机械动力设备隔振的需要。综合相关文献报导^[1],橡胶隔振器的失效可归结为刚度失效、应力松弛及蠕变失效。

由于疲劳或老化等原因,橡胶隔振器的刚度将发生变化,并且不再具有设计的动力学性能和承载能力。若橡胶隔振器的刚度变化超过50%,便认为发生了刚度失效。为避免橡胶隔振器发生刚度失效,应优化结构设计,改良橡胶配方,提高橡胶材料的抗老化性能,使橡胶材料在使用过程中不会出现过高的温升。

应力松弛和蠕变的力学本质相同,均属于静态粘弹性力学过程^[2]。橡胶隔振器在服役期间,橡胶材料不断增加的蠕变会使结构的高度发生变化,甚至影响隔振器与其它部件的连接,从而导致蠕变失效。为确保隔振器在承载过程中不发生应力松弛或蠕变失效,可优化石墨、抗氧化剂的混合比以改善橡胶材料的抗蠕变性能。在工程实践中,也可调整垫片来弥补隔振器高度的下降。

1.2 橡胶疲劳和老化寿命的影响因素

影响橡胶寿命的主要因素有机械载荷(载荷幅值、载荷比 R 和加载频率)、热、空气氛围(氧、臭氧和水蒸气等)、橡胶配方及性质(橡胶类型、填料)等。由于橡胶寿命的影响因素较多,全面描述橡胶疲劳性能,并精确预测橡胶隔振器的寿命仍然是一项技术难题。

一般来说,循环载荷幅值的增加导致疲劳过程中化学反应的活化能降低,使得氧化反应更易于进行,降低了橡胶材料的疲劳寿命。对于应变结晶型橡胶,疲劳寿命随载荷比 R 的增加而提高,而且在恒定动态应变变幅条件下,疲劳寿命随最小拉伸应变的增加而增大^[3],对于非应变结晶型橡胶则不尽然^[4-5]。由于橡胶的导热性较差,高频载荷使得橡胶产生温升并发生热老化降解,另外有研究表明^[6],若载荷频率的变化区间为0.001~5 Hz,橡胶材料不会产生大幅温度变化,载荷频率对裂纹扩展行为的影响很小。

由于温升使橡胶材料发生热老化降解,导致疲劳寿命降低^[7]。文献[8]采用Arrhenius指数规律描述

老化速率常数与温度的关系,再结合永久变形率与老化时间的关系,建立了橡胶老化寿命预测公式。文献[9]研究了氧气对哑铃状橡胶试件疲劳裂纹扩展速率的影响,结果表明,氧能加快疲劳裂纹扩展速率,降低临界撕裂能,从而缩短疲劳寿命。

橡胶类型、硫化体系和补强体系对橡胶的疲劳特性也有一定的影响。应变结晶型橡胶在中等或较高应变状态下的应变结晶对裂纹的扩展有阻碍作用,在一定程度上提高了材料的疲劳寿命^[10-11]。硫化橡胶的疲劳性能决定于交联密度与交联键类型。文献[12]的研究表明,硫化橡胶的交联密度取某一特定数值时疲劳寿命最大。文献[13]和[14]的研究表明,对于无预制裂纹试样,普通硫化体系的硫化橡胶疲劳寿命最长;对于有预制裂纹的样品,普通硫化体系的硫化橡胶寿命小于有效和半有效硫化体系的硫化橡胶寿命。在橡胶中加入炭黑可降低裂纹扩展速率,降低幅度取决于炭黑类型。另外,通过对炭黑进行改性,可增强炭黑与橡胶大分子的结合力,改善硫化橡胶的耐疲劳破坏性能^[15-16]。

2 橡胶疲劳寿命预测方法

2.1 基于断裂力学的橡胶疲劳寿命预测方法

基于裂纹扩展速率与撕裂能之间的关系式和撕裂能与裂纹尺寸之间的关系式可建立橡胶材料的疲劳裂纹扩展寿命预测模型。橡胶材料中不可避免地存在裂纹或缺陷,因此一般研究由初始缺陷所引起的裂纹扩展。Griffith断裂理论指出,裂纹扩展所需的表面能由材料中的应变势能转化而来。Rivlin^[17]基于Griffith断裂理论研究了橡胶材料的静态裂纹扩展,以撕裂能 G (能量释放率)表征橡胶材料的能量破坏准则:当能量释放率高于某一与试件的几何形状无关的门槛值时,裂纹开始扩展。

能量释放率为裂纹扩展单位面积所吸收的能量,亦称之为撕裂能,定义见式(1)^[18]。

$$G = - \frac{\partial U}{\partial A} = 2ka_0W_0 \quad (1)$$

式中: U 为试件中的总弹性应变能; A 为裂纹的一个断裂表面的面积; k 为材料常数; W_0 为裂纹尖端的应变能密度; a_0 为裂纹尖端的有效直径。在中等

撕裂能范围内(即工程疲劳区域),裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 与撕裂能 G 之间存在指数关系,见式(2)^[19]。

$$\frac{da}{dN} = BG^\beta \quad (2)$$

式中: B 为某一常数; β 为裂纹扩展参数。将式(1)代入式(2),并对式(2)积分即得到裂纹从 a_0 扩展至 a 的寿命,见式(3)。

$$N = \frac{1}{(\beta-1)B(2kW_0)^\beta} \left(\frac{1}{a_0^{\beta-1}} - \frac{1}{a^{\beta-1}} \right) \quad (3)$$

式(1)表达了撕裂能与裂纹尺寸之间的关系,式(2)表达了裂纹扩展速率与撕裂能之间的关系,只要知道这两个关系式,便可以建立橡胶材料的疲劳裂纹扩展寿命预测模型。

2.2 基于 $S-N$ 曲线的橡胶疲劳寿命预测方法

橡胶材料的疲劳循环次数可达 10^8 ,获得 $S-N$ 曲线的试验成本较高,而且对于没有预制割口的试样,其疲劳寿命的分散性很大,故基于 $S-N$ 曲线预测橡胶的疲劳寿命尚存在一些困难。深堀美英^[20]根据粘弹性行为的叠加原理提出了Demattia等加速试验方法。首先通过试验得到不同预制割口试样的 $\lambda - \lg N$ (λ 为伸长率, N 为疲劳寿命)曲线,然后沿着疲劳寿命轴平移这些 $\lambda - \lg N$ 曲线,且与未预制割口试样的 $\lambda - \lg N$ 曲线叠加,从而得到宽广应变区域内的 $\lambda - \lg N$ 曲线。应用断裂力学结果有:

$$W_0 = \frac{G_0}{2} \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \quad (4)$$

式中: G_0 为剪切模量; λ 为拉伸比。将式(4)代入式(3),并对两边取对数,见式(5)。

$$\lg N = -\beta \left[\lg k + \lg \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \right] - [\lg B + \lg(\beta-1) + (\beta-1)\lg a_0 + \beta \lg G_0] \quad (5)$$

考虑两种不同裂纹长度 a_0 和 a_1 的试样,可得到两者之间的寿命差,见式(6)。

$$\lg N_0 - \lg N_1 = (\beta-1)(\lg a_1 - \lg a_0) \quad (6)$$

3 基于加速试验评估隔振器寿命

3.1 频率和振幅参数的强化模型

橡胶隔振器的使用寿命通常在5 a以上,其疲劳

和老化失效的周期较长,因此不可能在橡胶隔振器的疲劳试验中模拟与其实际使用工况完全相同的条件。通过强化试验参数,采用加速试验方法进行橡胶隔振器的寿命评估研究,是一种切实可行的方法。

当试验载荷的频率 $f \leq 5$ Hz时,橡胶材料表面的温度和环境温度一致,在此频率范围内提高振动频率,可显著加快橡胶隔振器的试验周期^[6]。文献[21]基于等损伤原则给出了一种强化振动频率和幅值的加速试验模型,见式(7)。

$$\ddot{X}_1^K N_1 = \ddot{X}_2^K N_2 \quad (7)$$

式中: X_1 和 N_1 为正常工况下的振动位移幅值和循环次数; X_2 和 N_2 为强化试验工况下的振动位移幅值和循环次数; K 为 $S-N$ 曲线的斜率参数,一般取 $K=5$ 。考虑到:

$$N_1 = t_1 f_1 \quad N_2 = t_2 f_2 \quad (8)$$

式中: t_1 和 f_1 为正常工况下的振动时间和振动频率; t_2 和 f_2 为强化试验工况下的振动时间和振动频率。联立式(7)和式(8)可得:

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{f_2^2 X_1}{f_1^2 X_2} \right)^K \frac{f_1}{f_2} \quad (9)$$

3.2 温度强化模型

橡胶隔振器在机械循环应力作用下产生的温升加速橡胶热氧老化,影响材料的抗疲劳性能,因此在预测橡胶隔振器使用寿命时,应考虑热老化效应对疲劳寿命的影响。文献[22]研究了橡胶热氧老化过程中材料机械性能的变化规律,联立性能变化动力学方程和Arrhenius方程,建立了老化性能、老化时间与老化热力学温度的三元数学模型。文献[23]研究了橡胶加速老化试验及寿命预测方法,提出了时间、温度叠加的寿命预测模型和扩散限制氧化模型,初步解释了橡胶老化变质的机理。

4 结语

橡胶材料的耐疲劳、破坏性能决定了橡胶隔振器的使用寿命,然而影响橡胶材料疲劳性能的因素众多,要更准确地预测橡胶隔振器的疲劳寿命仍是一项富有挑战的课题。

1) 温升对橡胶材料疲劳寿命的影响非常显著,

然而国内外相关的研究没有考虑橡胶材料的温升效应与其机械载荷之间的耦合作用。为此,有必要基于断裂力学方法,研究温升导致的橡胶材料性能退化机制,并将退化后的材料模型引入裂纹扩展寿命计算方法中,这样有可能建立更准确的疲劳寿命预测方法。

2) 当前的大部分工作主要针对单轴疲劳,事实上橡胶材料通常处于复杂应力状态下,传统意义上的等效应变法不能反映多轴载荷的作用,并不是真正的多轴疲劳研究方法,不能反映材料在破坏面上的损伤累积及扩展。多轴疲劳的研究对于准确预测橡胶隔振器的起裂位置和开裂方向具有重要意义。

3) 橡胶材料的疲劳寿命受众多因素影响,疲劳失效的机理复杂,有必要基于正交试验方法规划加速试验,科学地挑选试验条件,从而可以用较少的试验次数,确定各因素对试验结果的影响,按其影响大小,找出主次关系并确定最佳的试验方案。

参考文献:

- [1] 张生鹏,李晓钢. 某橡胶减振垫加速贮存老化试验及寿命预测[J]. 装备环境工程,2010,7(5):24—28.
- [2] 庞承强,杨鄂川,欧健,等. 橡胶隔振器弹性特性分析及结构优化[J]. 四川兵工学报,2011,32(5):62—65.
- [3] LEGORJU-JAGO K, BATHIAS C. Fatigue Initiation and Propagation in Natural and Synthetic Rubbers[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(4): 85—92.
- [4] MARS W V, FATEMI A. Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber: A Literature Survey[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2004, 77(3): 391—412.
- [5] ABRAHAMA F, ALSHUTHA T, JERRAM S. The Effect of Minimum Stress and Stress Amplitude on the Fatigue Life of Non-Strain Crystallising Elastomers[J]. Materials & Design, 2005, 26(3): 239—245.
- [6] LAKE G J. Fatigue and Fracture of Elastomers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1995, 68(2): 435—460.
- [7] LAKE G J. Mechanical Fatigue of Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1972, 45(1): 307—328.
- [8] 周堃,胡滨,王津梅,等. 阿伦尼乌斯公式在弹箭贮存寿命评估中的应用[J]. 装备环境工程,2011,8(4):1—4.
- [9] 谢基龙. 环境对橡胶材料应变疲劳寿命的影响[J]. 橡胶工业,1996,43(3):135—137.
- [10] 李艳红,陈宏书. 高分子材料疲劳行为的研究[J]. 化学推进剂与高分子材料,2008,6(2):54—57.
- [11] LAKE G J, LINDLEY P B. Fatigue of Rubber at Low Strains[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1966, 10(2): 343—351.
- [12] 王进文. 改性炭黑对SBR拉伸性能和屈挠性能的影响[J]. 世界橡胶工业,2000,27(4):4—6.
- [13] YANYO L C. Effect of Crosslink Type on the Fracture of Natural Rubber Vulcanizates[J]. International Journal of Fracture, 1989, 39(1): 103—110.
- [14] 裘泽明,傅政. 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.
- [15] KIM J H, JEONG H Y. A Study on the Material Properties and Fatigue Life of Natural Rubber with Different Carbon Blacks[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(3): 263—272.
- [16] 贾红兵. 填充剂表面改性剂对硫化胶疲劳性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2002,18(1):119—122.
- [17] RIVLIN R S, THOMAS A G. Rupture of Rubber I Characteristic Energy for Tearing[J]. Journal of Polymer Science, 1953, 10(3): 291—318.
- [18] THOMAS A G. The Development of Fracture Mechanics for Elastomers[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1994, 67: 50—60.
- [19] LAKE G J, LINDLEY P B, THOMAS A G. Cut Growth and Fatigue of Rubber I: The Relationship between Cut Growth and Fatigue[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1965, 38(4): 292—300.
- [20] 深堀美英. 弹性体疲劳寿命的预测[J]. 橡胶译丛,1986(4):67—76.
- [21] 丁家松,张欢,童宗鹏,等. 船用橡胶隔振器寿命评估方法研究[J]. 振动与冲击,2010(12):230—233.
- [22] 李咏今. 硫化橡胶热氧老化时的物理机械性能变质规律的研究[J]. 特种橡胶制品,1996,18(1):42—51.
- [23] 胡文军,刘占军,陈勇梅. 橡胶的热氧化加速老化试验及寿命预测方法[J]. 橡胶工业,2004,51(10):620—624.