第 15 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol 15 No. 4
1998 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1998

单向聚酯帘线增强橡胶材料疲劳特性研究

刘宇艳 万志敏 田振辉 杜星文
(哈尔滨工业大学应用化学系410#, 150001)

摘 要 利用自行建立的试验系统, 首次对单向聚酯帘线增强橡胶材料进行了疲劳测试, 研究了应变、频率和温度对疲劳损伤累积的影响, 并给出了疲劳寿命预报方程, 为评价轮胎的疲劳特性、预报轮胎的疲劳寿命提供了有效的手段。

关键词 聚酯帘线/橡胶复合材料, 疲劳特性
中图分类号 TB332, V255.3

作为各种车辆和飞机的关键部件, 轮胎在工作状态下主要承受周期变化的载荷作用, 其强度和寿命主要取决于其组分材料的疲劳特性[1]。因此, 研究橡胶基复合材料在长期机械载荷作用下的疲劳行为, 不仅为轮胎疲劳寿命的预报提供研究基础, 而且可以为其结构的优化设计提供理论指导。另一方面, 在轮胎安全问题成为重要问题的今天, 弄清轮胎的疲劳机理, 防止由于热和疲劳引起的轮胎损伤(如脱层、帘线断裂、爆破、花纹沟裂口、崩花掉块等), 已成为轮胎科技人员非常关注的问题[2,3]。

橡胶基复合材料是一种特殊的柔性复合材料, 不仅大变形, 而且具有不可忽视的粘弹滞后性能[4,5], 因此疲劳试验在试件夹持、载荷施加、数据跟踪记录等方面存在许多困难。加上疲劳试验周期长、试验数据分散性大的特点, 使得橡胶复合材料的疲劳研究进展迟缓, 国内外已发表的研究成果甚少[6]。

本文中利用自行建立的试验系统, 首次得到了单向聚酯帘线增强橡胶材料的疲劳寿命曲线, 研究了应变、频率和温度对疲劳断裂机理的影响, 给出了疲劳寿命预报方程。并采用增强的软 X 射线无损探伤技术研究了其在疲劳过程中的累积损伤特性。

1 试件制备与测试系统

1.1 试件制备

试件材料为碳黑填充的天然橡胶基体、单向聚酯帘线增强材料, $V_f = 13.4\%$, 是三角牌斜交胎的标准胎体材料。试件几何形状和尺寸见图1。试件经模压成型, 由山东轮胎厂提供。

1.2 疲劳试验测试系统

聚酯帘线橡胶基复合材料疲劳测试系统由以下五部分组成(图2):

夹具部分: 采用较软的石墨冶金的平板状夹具, 为防止试件滑脱, 夹具表面加工出特殊的花纹。

收修改稿、初稿日期: 1997-07-28, 1997-03-21。黑龙江省自然科学基金资助项目

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

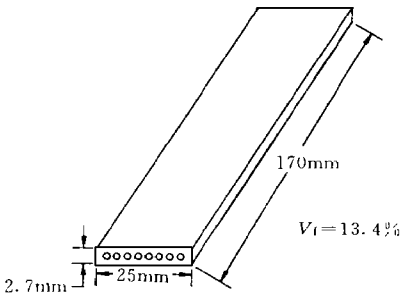

图1 试件示意图

Fig. 1 Sketch of specimen

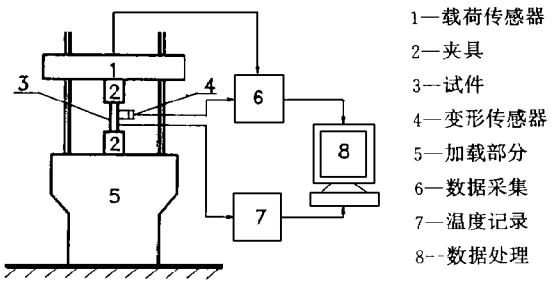

图2 橡胶复合材料疲劳性能测试系统

Fig. 2 A fatigue testing system for rubber composites

加载部分: 由MTS NEW 810液压伺服试验机(频率范围1～5Hz, 应变范围-15%～15%)施加交变疲劳应变。

温度记录部分: 采用PT-3L型非接触式红外测温仪(测温范围: 20～400℃, 精度±1℃)监测疲劳试验过程中试件表面温度。

数据采集部分: 用HP-8562A动态信号分析仪实时跟踪记录、贮存试件载荷变化规律。

数据处理部分: 由微机和相应软件组成。

1.3 试验条件

为模拟实际轮胎复杂载荷的一个分量, 试验条件为单轴拉-拉正弦波形型应变。试验频率分别为1Hz、3Hz、5Hz, 应变比 $R = e_{min}/e_{max} = 0.2$。

1.4 软X射线无损检测

应用国产DGX-6型软X射线机进行无损检测。

软X射线的照射条件为: 电压 $U = 35$kV, 电流 $I = 5$mA, 曝光时间 $T = 21$s, 发射头与试件间距 $L = 22$cm。为增强对比度, 选用溴仿($CHBr_3$)作渗透剂。对于不同疲劳阶段的试件, 可以清晰地得到材料的损伤形貌。

2 结果与分析

2.1 疲劳损伤累积与疲劳寿命的定义

在疲劳过程中试件的最大应力 σ_{max} 随应变循环次数 N 变化的典型曲线见图3。从该曲线可以看出, 试件最大应力 σ_{max} 的变化经历了陡然下降, 缓慢下降, 再次陡然下降三个阶段, 这与一般的脆性复合材料(如碳纤维/环氧复合材料)有明显不同[7]。损伤形貌分析表明: 第一阶段, σ_{max} 陡然降低, 主要是由于组分材料的应力松弛产生的。可以证实(图4(a)), 试件并无损伤。第二阶段, σ_{max} 缓慢下降, 试件外观并没有明显变化。从图4(b)可以推断, 损伤累积主要是纤维-基体界面脱粘和基体裂纹微观损伤的累积过程。当微观损伤累积到一定程度, 帘线突然连续断裂, 进入第三阶段, σ_{max} 再次陡然下降, 试件破坏(图4(c))。根据试验研究结果和使用要求, 定义第二阶段

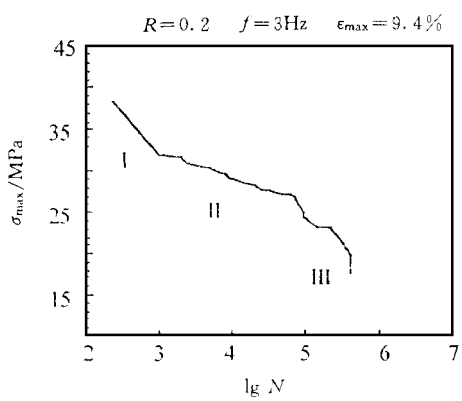

图3 疲劳过程中试件的 σ_{max} 随应变循环次数 N 的变化

Fig. 3 Specimen maximum stress vs strain cycle index

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结束, 第三阶段起始处对应的循环次数 N 为疲劳寿命。因为此时帘线开始断裂, 承载能力迅速下降, 已不安全。

(a) 第Ⅰ阶段　　(b) 第Ⅱ阶段　　(c) 第Ⅲ阶段

图4　试件在不同疲劳阶段的软X射线照片 (R = 0.2, f = 3Hz, ε_{max} = 9.4%)

Fig. 4　Soft X-Radiographs of specimen during different fatigue phases

2.2　疲劳寿命曲线

单向聚酯帘线增强橡胶材料在应变比为0.2、频率为5Hz时的疲劳寿命曲线如图5所示。可以看出, 最大应变与对数疲劳寿命呈线性关系, 利用函数 $\varepsilon_{max} = d - m\lg N_f$ 进行拟合, 可得拟合方程为

$$\varepsilon_{max} = 11.4 - 0.49\lg N_f \tag{1}$$

式中 ε_{max} 为最大应变, N_f 为疲劳破坏次数。

根据方程(1), 即可预报当 R = 0.2, f = 5Hz 条件下给定最大应变的聚酯帘线橡胶基材料的疲劳寿命。疲劳特性参数 d、m 不仅与组分材料的性能、体积比有关, 而且还受应变循环的频率 f、应变比 R 的影响。

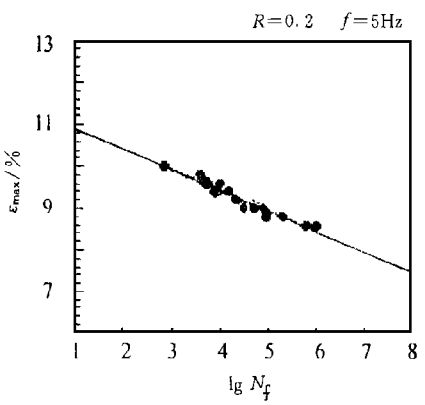

图5　单向聚酯帘线/橡胶复合材料的疲劳寿命曲线

Fig. 5　Fatigue-life diagram of unidirectional polyester cord reinforced rubber composite

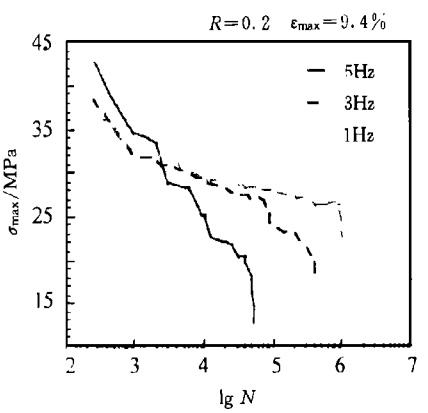

图6　试件在不同频率时的 σ_{max} 随疲劳次数 N 的变化

Fig. 6　Influence of cycle frequency on maximum stress of specimen

2.3　频率对疲劳寿命的影响

图6为试件在不同频率下的 σ_{max}-N 曲线。可以看出, 随着频率提高, 疲劳损伤过程的三个阶段区分不再明显, 试件的疲劳寿命缩短。

试件在较高频率下疲劳寿命缩短的主要原因是组分材料的粘弹滞后发热速率随频率提高

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

而提高。在控制应变条件下, 材料每单位体积产生热量的速率为

$$\dot{U} = \dot{N}\ \pi\epsilon_0^2 \cdot E' \cdot \tan\delta \tag{2}$$

其中$\dot{N}$为频率, ϵ_0为应变, E'为储存模量, $\tan\delta$为损耗因子。从公式(2)可以看出, 当$\dot{N}$、ϵ_0增大时, 材料粘弹发热速率增加, 试件表面温升提高。如图7、8所示, 当频率为1Hz时, 试件表面温度变化较小, 当频率为5Hz时, 试件表面温度可高达100℃。并且, 最大施加应变增大时, 试件表面温升提高。由图7、8还可以看出, 应变和频率较低时, 试件温度变化很快达到稳态, 其原因是材料粘弹发热和周围的环境迅速达到平衡。而频率提高到5Hz时, 材料粘弹发热速率提高, 而橡胶的导热性又差, 热量不易散失, 导致橡胶基体的降解, 其结果是基体变硬, 纤维-基体间的界面粘接强度降低, 进而导致疲劳寿命降低。

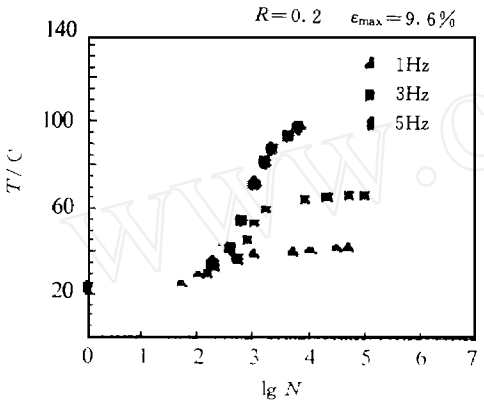

图7 试件在不同频率时表面温度随疲劳次数N的变化

Fig. 7 Influence of cycle frequency on the surface temperature of specimen

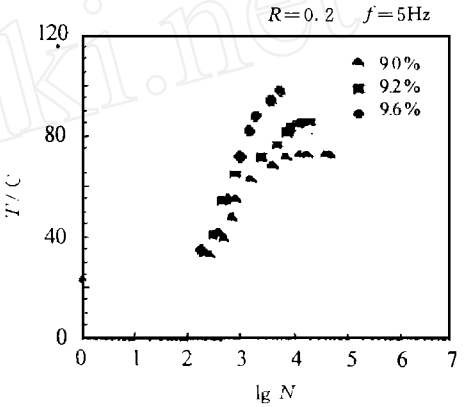

图8 试件在不同应变时表面温度随疲劳次数N的变化

Fig. 8 Influence of maximum strain on the surface temperature of specimen

试验结果表明, 在疲劳过程中, 如果试件表面温度一直呈上升趋势, 则试件很快破坏; 若试件表面温度升高到某一值后出现稳态平台, 那么试件的疲劳寿命会很长, 甚至试件不会破坏。

从上述研究结果可以看出: 在疲劳过程中, 试件的破坏机制可分为二类: 第一类是由于交变应变作用产生的, 基体裂纹的增长、纤维-基体界面脱粘以及帘线断裂导致疲劳破坏; 第二类是由于温度升高而导致组分材料性能的劣化, 不可逆的组分材料结构损伤和化学降解形成的。进一步研究二者之间的关系以及它们各自对橡胶复合材料疲劳寿命的定量影响, 将是本研究继续努力的方向。

3 结 论

(1) 利用自行建立的试验系统, 首次对单向聚酯帘线增强橡胶材料进行了疲劳测试, 为评价轮胎的疲劳特性提供了有效的手段。

(2) 橡胶复合材料的疲劳损伤过程可分为三个阶段, 各阶段的损伤机理不同。

(3) 橡胶复合材料的疲劳寿命曲线可由线性函数进行拟合, 根据拟合方程可对其疲劳寿命进行预报, 在试验范围内预报值与试验值符合完好。

(4) 频率对橡胶复合材料的疲劳寿命具有很大影响, 其原因是组分材料在较高频率下的粘弹发热所致。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献

1 Grosch K, Rolling resistance and fatigue life of tires. Rubber Chemistery and Technology, 1988, 61(1): 42～63

2 梁守智, 谢逆志. 充气轮胎理论基础. 化工工业部北京橡胶工业研究设计院, 1990. 579～583

3 村上伸兹. 日本橡胶协会志, 1976, 49(10): 761～764

4 Wilhelm Flugge. Viscoelasticity. New York: Springer-Verlag, 1975

5 Kwon Y D, Beringer C W, Feldstein M A, *et al*. Fatigue endurance and viscoelastic hysteresis of short fiber/rubber composites. Rubber World, 1990, 5: 29～33

6 刘宇艳, 谭惠丰, 杜星文. 橡胶复合材料疲劳性能研究进展. 纤维复合材料, 1997, 14(1): 20～25

7 Curtis P T. The fatigue behavior of fibrous composite materials. Journal of Strain Analysis, 1989, 24(4): 235～244

STUDY ON FATIGUE BEHAVIOR OF UNIDIRECTONAL POLYESTER CORD/RUBBER COMPOSITES

Liu Yuyan　Wan Zhimin　Tian Zhenhui　Du Xingwen

(Department of Applied Chemistry 410, Harbin Institute of Technology, 150001)

Abstract　A fatigue testing system for polyester cord/rubber composites was established in this paper. Based on this system, the fatigue properties of unidirectional polyester cord/rubber composites under cyclic loading were assessed and the fatigue-life prediction equation of rubber composites was given. The study also examined the effect of strain, frequency and temperature on the damage accumulation process of rubber composites. The results indicated that fatigue lifetime and damage accumulation of rubber composites were strongly influenced by cyclic frequency because of hysteretic loss of the materials. This paper offers a method available for evaluating the fatigue behavior of tires and predicting the fatigue lifetime of tires.

Key words　rubber composites, fatigue

简明实践 FRP 成型

本刊讯: 二年前, 在国内翻译出版了日本田中勤先生所著《FRP 成型工艺技术及应用》一书, 大受同行的欢迎。今年初日本新出版了后藤卒士民著的《简明实践 FRP 成型》, 本刊编辑部通过 EPJ (日本塑料资材产业新闻) 社长高桥仪德先生的帮助, 从出版者日本工业调查会《塑料》编辑部新井保主编处得到赠书。日本昭和高分子株式会社的安藤幸正在《增强塑料》杂志6月号上发表了书评, 对该书内容和特点作了介绍。

本书是工业调查会出版发行的"现场塑料成型加工系列丛书"之一。

作者以丰富的经验和信息为基础, 面向 FRP 成型现扬的技术人员, 在选择适合的材料、设备和成型方法方面提供参考, 并面向设计人员, 向他们提供具体的成型技术信息, 以便设计更好的 FRP 制品。此外, 不仅在技术方面, 而且在经济性侧面上也重点加以解说, 这也是特点之一。

详述了 FRP 生产中有必要了解的问题, 是一本直接为现场实践写的书。

1. FRP 的制作方法及其选择

HLU (手铺) 法、SU (喷射) 法、真空袋法、加压袋法、RTM 法、压缩成型法、FW (纤维缠绕) 法、PL (拉挤) 法等, 从成型方法的概要情况, 介绍到成型的实际问题和设计上的注意事项等。

2. 原材料的选择

有关树脂、增强材料、填料、固化剂、促进剂等的选定注意事项。

3. 必要的设备和机械及其功能

• 设备: 涂装室、旋转工作台、粉尘用小间等

• 机械: 喷射机、树脂注入机、混料机、捏合机、FW 机等

(下转第127页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net