

两类橡胶复合材料的疲劳特性

Fatigue Properties of Two Kinds of Rubber Composites

田振辉, 谭惠丰, 杜星文

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

TIAN Zher hui, TAN Huir feng, DU Xing-wen

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 以 $[0^\circ]$ 单层和 $[\pm 20^\circ]$ 双层橡胶复合材料为研究对象, 对其在拉伸载荷下的疲劳损伤进行了研究。研究表明, 疲劳载荷作用下, 两类材料的周期最大应变随循环周次的变化均遵循三阶段规律, 应变的变化对应着疲劳损伤从萌生、稳定扩展到加速扩展直至整体破坏的过程。单层和双层材料的疲劳破坏分别为帘线控制和基体控制。数据分析表明, 用加载最大应力表征的疲劳寿命与循环周次的对数近似成线性关系。疲劳过程中材料的滞后损失基本保持不变。滞后损失和导热系数的差异是造成不同种类试件表面温升差异的主要原因。

关键词: 橡胶复合材料; 帘线; 疲劳; 破坏机理

中图分类号: TB332; V255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)06-0013-03

Abstract: The fatigue damage properties of $[0^\circ]$ single ply and $[\pm 20^\circ]$ double ply rubber composite under tension to tension loading were studied. The results show that the variation of the cycle strain of both kinds of material in the fatigue process under fatigue loading exhibits three stages which are corresponding to damage initiation, steady damage propagation and catastrophic failure respectively. The fatigue damage for the single ply rubber composites is controlled by cord properties and for the double ply rubber composite by matrix properties. The logarithmic fatigue life expressed by maximum stress follows a linear trend. The hysteretic loss keeps constant until the end of the fatigue life. The differences on hysteretic loss and the thermoconductivity result in differences on the surface temperature of different specimen.

Key words: rubber composite; cord; fatigue; damage mechanism

作为轮胎等结构的重要组成材料, 橡胶复合材料的疲劳特性近年来一直受到关注^[1-6]。橡胶复合材料是以帘线(聚酯、尼龙、人造丝、钢丝等)为增强相、橡胶为基体的复合材料, 除具有一般复合材料的特点外, 还具有粘弹性、大变形、高模量比(可高达3到4个数量级)等特性^[7, 8], 是柔性复合材料的典型代表。橡胶复合材料结构在工作条件下主要承受循环载荷作用, 其疲劳特性与结构寿命和安全性密切相关。尽管多年来很多研究工作试图从帘线和橡胶单组分的角度预报疲劳特性^[9-14], 但遗憾的是, 至今未能为材料抗疲劳设计和寿命预报提供足够的信息。而且, 由于基体材料具有明显的粘弹滞后特性, 导致了橡胶复合材料破坏机理的复杂性。理论上的困难和实验技术上的障碍使得橡胶复合材料的疲劳研究进展迟缓。

本工作分别以聚酯帘线增强的单层材料和钢丝帘线增强的双层材料为研究对象, 通过实验研究了拉伸循环载荷下材料疲劳损伤扩展的基本规律, 得到了两

类材料的疲劳寿命图和线性疲劳寿命预报方程, 分析了疲劳损伤过程中的滞后损失及生热特性。

1 试件及实验条件

试件分为A、B两类。A类试件: 基体为碳黑填充的天然橡胶, 增强相为1500D/2聚酯帘线, 单层 0° 轴向铺设, 试件形状为哑铃型, 有效工作段尺寸为 $60\text{mm} \times 25\text{mm} \times 2.7\text{mm}$; B类试件: 基体为碳黑填充的天然橡胶, 增强相为钢丝帘线, 双层(20° 反对称角铺设, 试件为矩形, 尺寸为 $130\text{mm} \times 28\text{mm} \times 2.7\text{mm}$ 。

疲劳试验在INSTRON8501液压伺服试验机上进行, 轴向位移及其它动态数据由HP-3562A动态信号分析仪和计算机跟踪记录, PT-3L非接触式测温仪监测试件表面温度变化。控制加载方式为正弦拉-拉形式, 载荷比为 $R = P_{\min}/P_{\max} = 0.2$ 。试验在室温、空气中进行。

2 实验结果与讨论

2.1 疲劳损伤扩展的阶段性的

由于疲劳实验为最大载荷控制, 因此只要确定了最大载荷和载荷比, 沿载荷方向的最大最小应力和平

均应力以及应力幅值就都可以获得。

两类试件的周期最大应变随循环周次的变化均表现为三个阶段的发展历程, 如图 1a 所示。若对数据进行归一化处理, 则两类试件的相似性特征就更为明显, 如图 1b 所示。

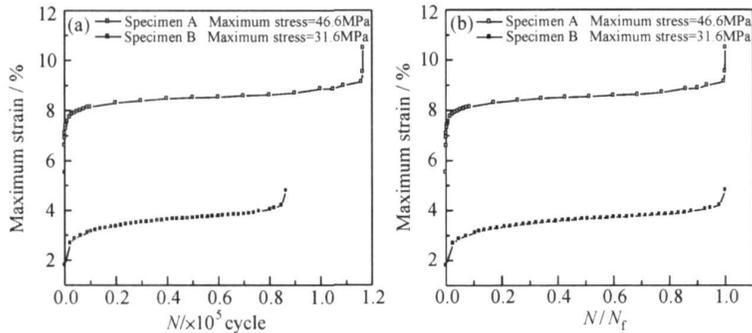


图 1 最大应变随循环周次的变化曲线

(a) 最大应变-周次曲线; (b) 最大应变-周次归一化曲线

Fig. 1 Increase of maximum strain vs loading cycle

(a) maximum strain vs loading cycle; (b) normalization of maximum strain increase

对应最大应变发展的三阶段规律, 疲劳损伤的扩展可以划分为损伤萌生、稳定扩展和加速扩展直至破坏的过程。

对于单层试件 A, 损伤的萌生主要表现为试件内部帘线/橡胶界面脱粘, 对于层合试件 B, 则表现为试件边缘的帘线端头处出现基体裂纹。单层试件在损伤稳定扩展阶段的主要损伤形式为界面脱粘尺寸的增大、基体裂纹的出现和帘线纤维损伤。层合试件在这一阶段除了基体裂纹数量逐渐增加之外, 边缘逐渐出现纵向开裂并向试件中部扩展, 形成层间裂纹。损伤加速扩展阶段, 单层试件从第一根帘线断裂到试件整体破坏的时间很短, 多数情况下, 帘线的断裂是连续的。断裂后的软 X 照片如图 2a 所示。此阶段层合试件的层间裂纹面积增大并失稳扩展, 最终试件脱层破坏。破坏后的试件照片如图 2b 所示。

从以上分析可知, 单层试件 A 的疲劳破坏为帘线控制, 而层合试件 B 的疲劳破坏为基体控制。尽管如此, 图 1 中两者所体现的最大应变发展规律却存在极大的相似性, 尤其第二阶段, 最大应变随循环周次的变化均基本为线性。对本研究所涉及的不同材料和不同加载条件而言, 疲劳损伤过程的三阶段都是必然经历的, 仅在损伤模式和宏观力学性能劣化的量上存在不同。

2.2 疲劳寿命

两类试件在 5Hz 频率条件下的疲劳寿命曲线如

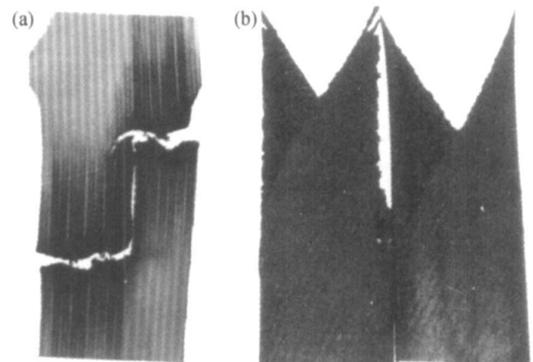


图 2 疲劳断裂后的试件照片 (a) 试件 A; (b) 试件 B

Fig. 2 Photos of specimen after failure

(a) specimen A; (b) specimen B

图 3 所示。实验表明, 用加载最大应力表示的疲劳寿命与循环周次的对数近似有线性关系:

$$S_{\max} = a + b \lg N_f \quad (1)$$

其中: S_{\max} 为最大应力; N_f 为寿命。系数 a, b 是与材料特性和加载频率相关的量。在 5Hz 频率条件下, 95% 置信区间的各类材料的疲劳寿命分别表示为:

$$\text{A 类试件: } S_{\max} = 39.4 - 2.29 \lg N_f$$

$$\text{B 类试件: } S_{\max} = 53.8 - 7.24 \lg N_f$$

2.3 滞后损失和温升

在循环加载过程中, 外载输入的能量一部分用于损伤的萌生和扩展, 另一部分被基体材料的滞后生热

所消耗。橡胶复合材料的导热性差,试件表面温升较明显。图 4a 是疲劳过程中滞后损失随循环周次的变化曲线,在整个疲劳加载过程中,滞后损失基本保持定值,在达到破坏点时,单层试件 A 表现出一个明显的突跃。曾有研究认为^[15],疲劳过程中的滞后损失变化反映了材料的微观损伤,但本研究未发现二者有明显的对应关系。

实验过程中所测得的试件表面温升如图 4b 所示。热稳定状态下试件表面温度与导热系数和滞后损失有关^[16]:

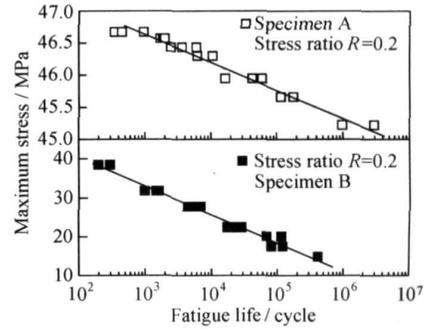


图 3 疲劳寿命图

Fig 3 Fatigue damage life diagram

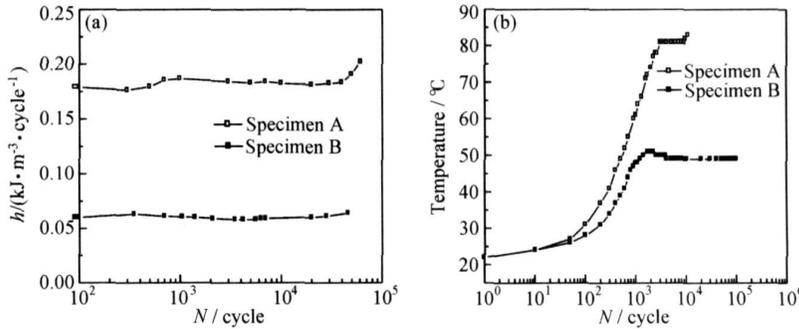


图 4 滞后损失和试件表面温度随循环周次的变化

(a) 滞后损失随循环周次的变化; (b) 表面温度随循环周次的变化

Fig 4 Variation of hysteretic loss and surface temperature with loading cycles

(a) variation of hysteretic loss; (b) variation of surface temperature

$$T_m = T_0 + \frac{kf h}{\lambda} \quad (2)$$

式中: T_m 为热稳定温度; T_0 为环境温度; k 为校正系数; f 为加载频率; h 为滞后损失; λ 为导热系数。

从式(2)推知,由于 A 类试件滞后损失远大于 B 类试件,故其表面温度较高。而且由于 B 类试件的帘线为钢丝,试件本身的导热系数高于单层材料,故表面温度较低。

3 结论

(1) 载荷控制的橡胶复合材料的疲劳损伤扩展具有明显的三阶段特性,分别对应损伤的萌生、稳定扩展和失稳破坏过程。

(2) 单层材料的疲劳破坏为帘线控制,角铺设的双层材料的疲劳破坏为基体控制。

(3) 用最大应力表征的疲劳寿命与循环周次的对数成线性关系。

(4) 疲劳过程中材料的滞后损失基本保持不变,但由于滞后损失和导热系数的差异,聚酯帘线增强的单层试件表面温升明显高于钢丝帘线增强的双层材料。

参考文献

- [1] HUANG Y S, YEOH O H. Crack initiation and propagation in model cord rubber composites[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1989, 62(4): 709- 714.
- [2] LEE B L, LIU D S. Cumulative damage of fiber reinforced elastomer composite under fatigue loading[J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(13): 1261- 1286.
- [3] LEE B L, KU B H, LIU D S, et al. Fatigue of cord rubber composites: II strain based fatigue failure criteria[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1998, 71(2): 866- 888.
- [4] KU B H, LIU D S, LEE B L. Fatigue of cord rubber composites: III minimum stress effect[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1998, 71(2): 889- 1009.
- [5] 刘宇艳, 万志敏, 田振辉, 等. 单向聚酯帘线增强橡胶材料疲劳特性研究[J]. 复合材料学报, 1998, 15(4): 97- 101.
- [6] 田振辉, 刘宇艳, 万志敏, 等. 聚酯增强橡胶疲劳破坏试验研究[J]. 材料工程, 2000, (4): 34- 37.
- [7] CROSCHE K. Rolling resistance and fatigue life of tires[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1988, 61(1): 42- 63.
- [8] 谭惠丰. 柔性复合材料双重非线性层合理论[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997. 4- 5.
- [9] LAKE G J. Mechanical fatigue of rubber[J]. Rubber Chemistry

与目标温度保持一致;当目标温度发生阶跃变化时,如图 8b 所示,合金温度需要经过一定时间才能达到目标温度,此时合金的变温速率是本实验条件下的极限变温速率。显然,当目标温度的变化速率小于该极限变温速率,智能温控材料系统能够对目标温度的变化形成很好的跟随。

4 结论

(1) 与采用强迫风冷相比,水冷时智能温控材料系统的温控范围更大,但两种散热方式下铝合金片的降温速率基本一致,即在散热能力满足需求的条件下使用风冷可以达到相同的变温能力。

(2) 采用 PID 控制不能充分发挥 TEC 的制冷能力,特别是当 TEC 冷端温度与目标温度接近时这种问题更为突出,采用引入阈值的改进的 PID 控制算法可以显著地降低智能温控材料达到目标温度的响应时间。

(3) 工作电流对温控效果影响较大,工作电流越大,合金能达到的最低温度越小,系统响应时间越小,但随着电流的增加可达到的最低温度和响应时间变化的幅度逐渐变小,当电流增大到一定程度后温控范围和响应时间基本不变,继续增大电流反而增加功耗,降低系统制冷效率。

(4) 智能温控材料系统的最大变温速率由系统硬件组成、算法和工作条件决定,当目标温度的变化速率小于系统的最大变温速率时,智能温控材料可以根据目标温度的复杂变化做出快速响应,使合金温度与目标温度始终保持一致。

参考文献

- [1] 王小群,杜善义. 热电制冷技术在航空航天领域的应用[J]. 中国航天, 2006, 10: 22- 24.
- [2] 王宏鹏,王小群,王振清. 表面自适应变温材料系统中的控制设计[J]. 微计算机信息, 2007, 19: 1- 4.
- [3] DISALVO F J. Thermoelectric cooling and power generation[J]. Science, 1999, 285(5428): 703- 706.
- [4] 李腾,刘静. 芯片冷却技术的最新研究进展及评价[J]. 制冷学报, 2004, (3): 22- 32.
- [5] CHEN Reiyu, HU ANG Guar ming. Thermoelectric cooler application in electronic cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 2207- 2217.
- [6] ZU Tie zhu, QI Ya qing, ZHANG Jiar zhong, et al. Thermoelectric cooler for space microgravity experiment[A]. 18th International Conference on Thermoelectrics[C]. Baltimore: IEEE, 1999. 325- 327.
- [7] 徐德胜. 半导体致冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [8] 郑永明, 方方, 徐建一, 等. 半导体致冷原理及其应用系统设计研究[J]. 中国测试技术, 2006, 32(2): 49- 52.
- [9] 李雪梅, 王红飞. 智能控制在模具温控成形中的应用[J]. 机械设计与制造, 2007, (1): 173- 174.
- [10] 徐惠彬, 仲伟虹, 田蔚. 智能复合材料的发展现状与应用现状[J]. 航空精密制造技术, 1997, 33(4): 11- 14.
- [11] BHATTACHARYYA A, LAGOUDAS D C, WANG Y, et al. On the role of thermoelectric heat transfer in the design of SMA actuators: theoretical modeling and experiment[J]. Smart Materials and Structures, 1995, (4): 252- 263.
- [12] BENZAOU I, LEXCELLENT C, CHAILLET N, et al. Experimental study and modeling of a TiNi shape memory alloy wire actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1997, 8(7): 619- 629.
- [13] 苏景芳, 杨君友, 朱文, 等. 热电激励形状记忆智能材料研究进展[J]. 材料导报, 2004, 18(7): 37- 41.
- [14] 王小群, 杜善义. 热电制冷技术在航空航天领域的应用[J]. 中国航天, 2006, 10: 22- 24.
- [15] ANDREAS T E, BJORN E, LEIF B. Lifetime and Young's modulus changes of glass/phenolic and glass/polyester composites under fatigue[J]. Composites, 1995, 26(1): 10- 16.
- [16] TIAN Z H, SONG H W, WAN Z M, et al. Fatigue properties of steel cord rubber composite[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2001, 33(4): 283- 296.

收稿日期: 2007-07-25; 修订日期: 2007-12-05

作者简介: 廖芳平(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事功能材料与器件的研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学材料学院复合材料实验室(100083)。E-mail: liaofp@yahoo.com

(上接第 15 页)

- and Technology, 1972, 45(1): 307- 328. [10] YOUNG D G. Fatigue and fracture of elastomeric materials[J]. Rubber World, 1991, (3): 30- 34.
- [11] HAMED G R. Molecular aspects of the fatigue and fracture of rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1994, 67(3): 529- 535.
- [12] FORSTER M J, PERTTYMAN L B. A new improved tirecord fatigue tester[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1969, 42(4): 1000- 1008.
- [13] CAUSA A G. Fatigue testing of polymeric reinforcing cords[J]. Tire Technology International, 1996, 22(4): 1101- 1103.
- [14] POKLUDA I. Fatigue of steel cords[J]. Kautsch Gummi Kurestoffst, 1989, 42(5): 410- 414.

基金项目: 哈尔滨市科技攻关计划项目(2005AA5CG044); 黑龙江省博士后科研启动基金项目

收稿日期: 2007-05-08; 修订日期: 2007-12-06

作者简介: 田振辉(1973—), 男, 博士, 副研究员, 从事柔性复合材料、空间充气结构研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学行政楼 168 信箱(150001)。E-mail: tianzh@hit.edu.cn