

文章编号: 1000-3851(2004) 02-0060-05

# [ ± 20 ° ] 钢丝 / 橡胶复合材料的疲劳损伤累积

田振辉, 谭惠丰, 张幸红, 杜星文

(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 对 [ ± 20 ° ] 钢丝帘线增强的橡胶复合材料在拉伸循环载荷下的疲劳损伤累积进行了研究。结果表明: 在载荷控制的疲劳过程中, 材料的周期最大应变发展曲线呈现明显的三阶段规律。帘线端头处基体裂纹的出现是宏观疲劳损伤的初始, 损伤的累积表现为裂纹数量增加、帘线 / 基体脱粘和层间裂纹的扩展。以动蠕变为参量建立了线性疲劳损伤累积模型, 该模型能够较好地预报两级加载条件下材料的第二级疲劳寿命。

**关键词:** 橡胶复合材料; 疲劳; 动蠕变; 损伤累积

**中图分类号:** TB332; V255.3 **文献标识码:** A

## FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION OF [ ± 20 ° ] STEEL/ RUBBER COMPOSITE

TIAN Zhenhui, TAN Huifeng, ZHANG Xinghong, DU Xingwen

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The fatigue damage accumulation of [ ± 20 ° ] laminated steel-cord reinforced rubber composite under T-T loading is studied in this paper. The results indicate that the increase in the maximum strain exhibits a three-stage tendency in the process of fatigue. The macroscopic fatigue damage initiates from the ends of steel cords in the form of a cylindrical crack. Damage propagates along with the increase of crack numbers, the cord / matrix debonding and the growth of interply cracks. By using dynamic creep as the parameter, a linear dynamic creep fatigue damage accumulation model is established. This model can be used in the two-step loading condition to estimate the residual fatigue life of the specimen.

**Key words:** rubber composite; fatigue; dynamic creep; damage accumulation

橡胶复合材料结构在工作条件下主要承受循环载荷作用, 材料的疲劳特性与结构寿命密切相关。帘线橡胶复合材料具有明显不同于其它复合材料的特性, 如粘弹性、大变形、高模量比(可高达 3 个 ~ 4 个数量级) 以及循环载荷下强烈的热-力耦合等特性<sup>[1, 2]</sup>, 为疲劳研究造成了实验手段和理论分析上的困难。近年来, 刘宇艳等人<sup>[3, 4]</sup>对单层橡胶复合材料疲劳特性的研究取得了一定进展。但是对于层合板, 由于存在层间应力应变问题, 疲劳特性同单层材料存在本质的差异, 其主要疲劳破坏机理是: 循环载荷下, 裂纹在层间产生, 此层间裂纹穿过复合材料结构扩展, 导致脱层破坏<sup>[5]</sup>。

本文作者以 [ ± 20 ° ] 双层钢丝帘线 / 橡胶复合材料为研究对象, 通过试验研究了材料在拉伸循环载荷下的疲劳损伤演化和累积规律。建立了以动蠕变为参数的线性疲劳寿命预报模型, 利用该模型考核了两级加载条件下的疲劳损伤累积。

### 1 试件及实验条件

所用试件为 130 mm × 28 mm × 2.7 mm 矩形 [ ± 20 ° ] 钢丝帘线 / 橡胶复合材料。用子午线轮胎实际使用的压延帘布模压成型, 基体为碳黑填充的天然橡胶, 挂胶的钢丝帘线为 ± 20 反对称角铺设, 每根帘线由四根单丝加捻而成, 单丝直径 d =

收稿日期: 2003-01-13; 收修改稿日期: 2003-04-14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(AO309)

通讯作者: 田振辉, 讲师, 从事柔性复合材料疲劳损伤、空间充气结构材料的研究。 E-mail: duxw@ hit. edu. cn; kjcjgb@ hit. edu. cn

0.22 mm。

疲劳试验在 MTS810 液压伺服试验机上进行, 轴向位移及其它动态数据由计算机跟踪记录, 控制加载方式为正弦拉-拉形式。固定载荷比为  $R = P_{\min}/P_{\max} = 0.2$ , 加载频率分别为 5 Hz 和 8 Hz。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

在常幅载荷下, 试件的周期最大应变随循环周次的变化(如图 1)表现为 3 个阶段的发展历程。

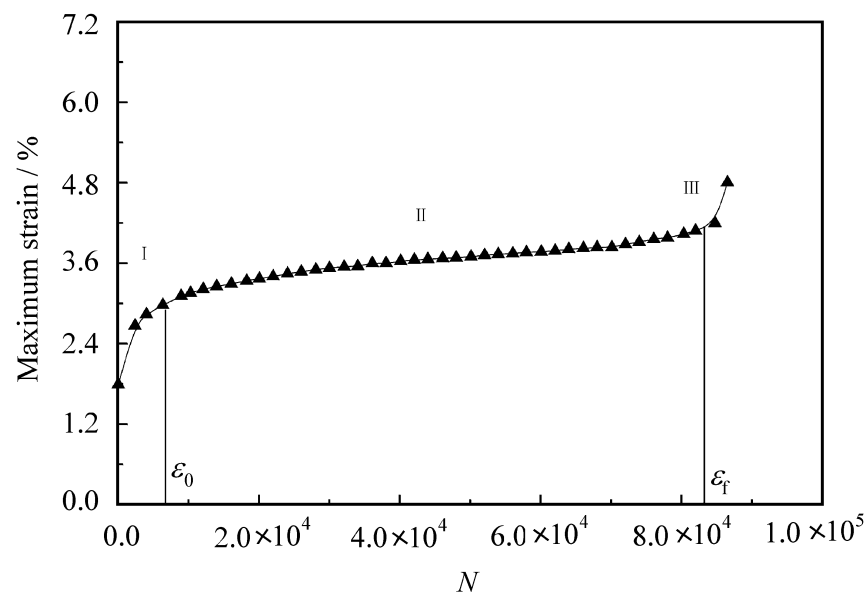


图 1 最大应变随循环周次的变化曲线

Fig. 1 Increase of maximum strain vs loading cycle

第一阶段, 周期应变发展较快但速率逐渐降低。在试件边缘钢丝帘线端头处可观察到微小的圆孔裂纹, 说明在疲劳加载过程的早期有初始损伤形成, 损伤形式为钢丝帘线在端部与基体橡胶的脱粘。第二阶段, 变形发展速率基本保持定值, 最大应变随循环周次线性增长。试件边缘产生更多的圆孔裂纹, 部分裂纹沿载荷方向扩展并穿过层间橡胶汇合为较大的纵向裂纹; 在第二阶段末期, 纵向裂纹的长度已占据了试件边缘的大部分。第三阶段, 变形速率急剧增加, 裂纹平行于载荷方向向试件中部扩展, 导致试件脱层破坏, 疲劳断裂后的试件照片如图 2 所示。断口处的橡胶边缘平行于帘线角度, 呈规则的燕尾状。在疲劳加载过程中, 未见钢丝帘线的破坏, 表明这一层合结构的疲劳破坏为基体控制。这样的三阶段规律很稳定, 特别是占疲劳寿命绝大部分的第二阶段, 其最大应变基本呈线性发展, 起点和终点一般在寿命比为 0.05 和 0.95 处, 并且不受应力和加载频率的

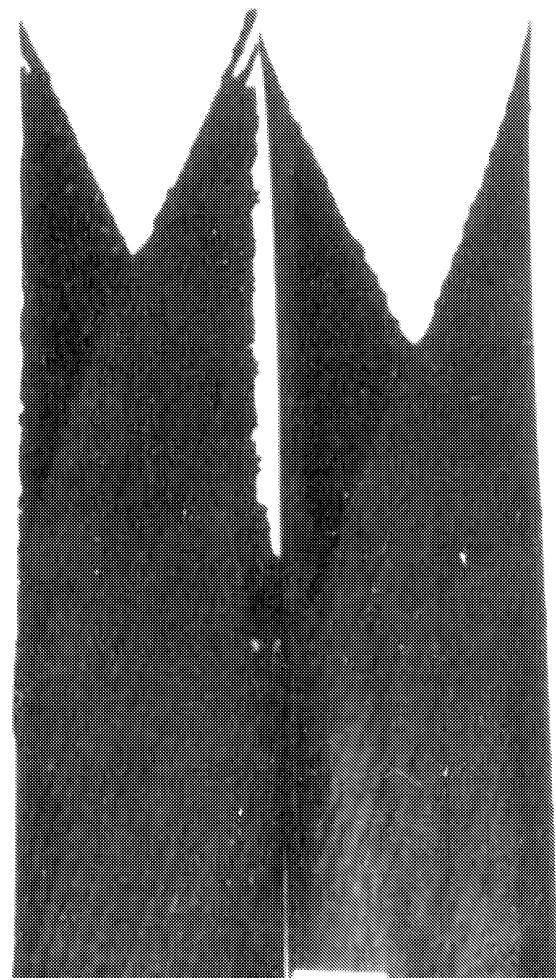


图 2 疲劳断裂后的试件照片

Fig. 2 Photos of specimen after failure

影响。由于载荷比固定, 最小应变也表现出相同的规律。

### 2.2 两级加载条件下材料的疲劳损伤累积

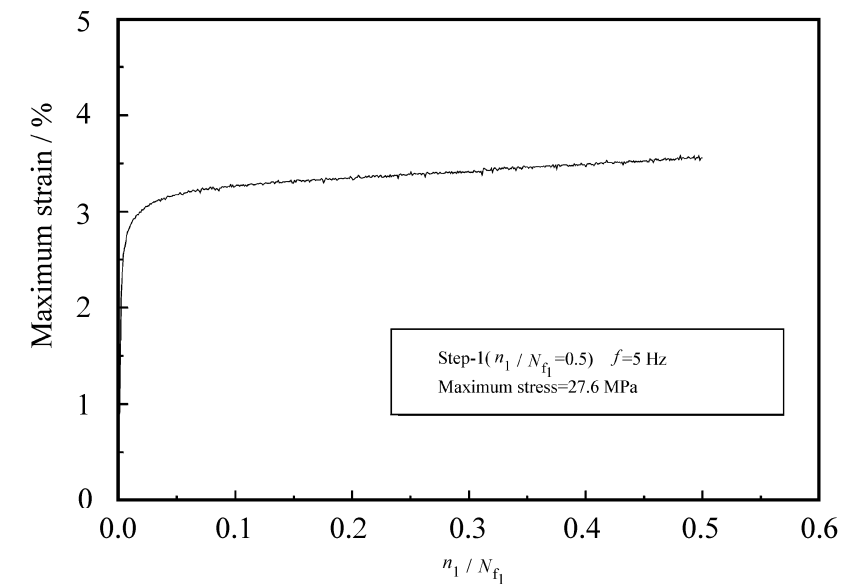
图 3 和图 4 是两级加载条件下周期最大应变随循环周次变化的归一化曲线。图中,  $N_{f1}$  和  $n_1$  分别代表第一级载荷条件对应的疲劳寿命和在第一级载荷条件下设定的循环周次,  $N_{f2}$  和  $n_2$  分别代表第二级载荷条件对应的疲劳寿命和在第二级载荷条件下至材料寿命终点的循环周次。

图 3 对应载荷序列 27.6 MPa & 31.6 MPa(先小后大), 图 4 对应载荷序列 31.6 MPa & 27.6 MPa(先大后小)。图中疲劳寿命值的确定是根据下式计算得到的<sup>[6, 7]</sup>。

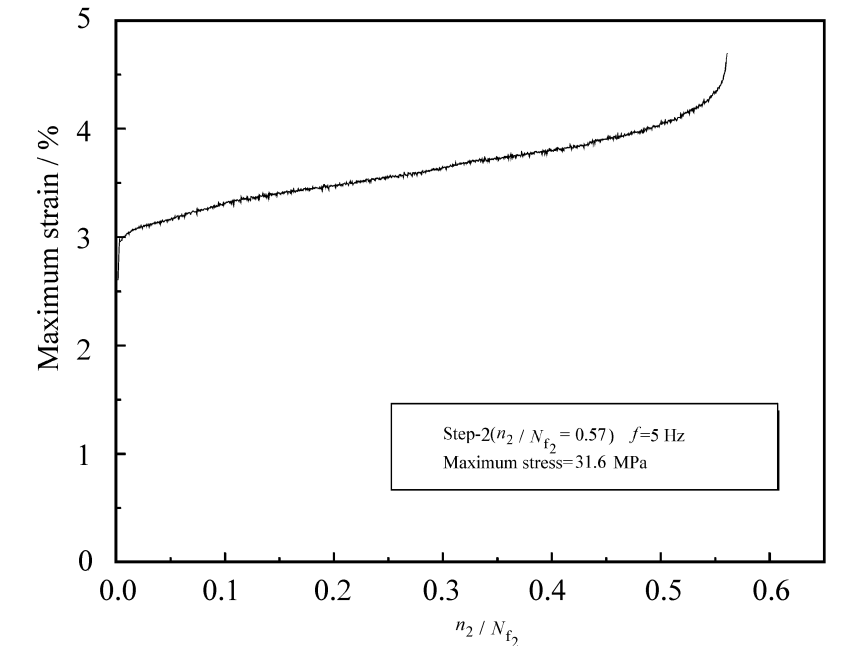
$$\lg N_f = \frac{1}{b} e_{\max} - \frac{a}{b} \quad (1)$$

式中:  $e_{\max}$ ——加载的最大应力;  $a, b$ ——模型参数, 与材料性能和加载频率有关。

从两图中第二级加载所得曲线可以发现: 其最大应变的发展类似于单级加载条件, 仍然遵循三阶段的规律。而且第二阶段也呈现稳定的线性。但是, 它的第一阶段不再对应初始损伤的萌生, 而是消耗试件因卸载而部分恢复的抵抗疲劳破坏能力的阶



(a) Step-1 loading (at 27.6 MPa)



(b) Step-2 loading (at 31.6 MPa)

图 3 两级加载条件下周期最大应变随循环周次的变化 (27.6 MPa & 31.6 MPa)  
Fig. 3 Variation of maximum strain in two-step loading(27.6 MPa & 31.6 MPa)

段。

2.3 疲劳损伤累积的预报模型

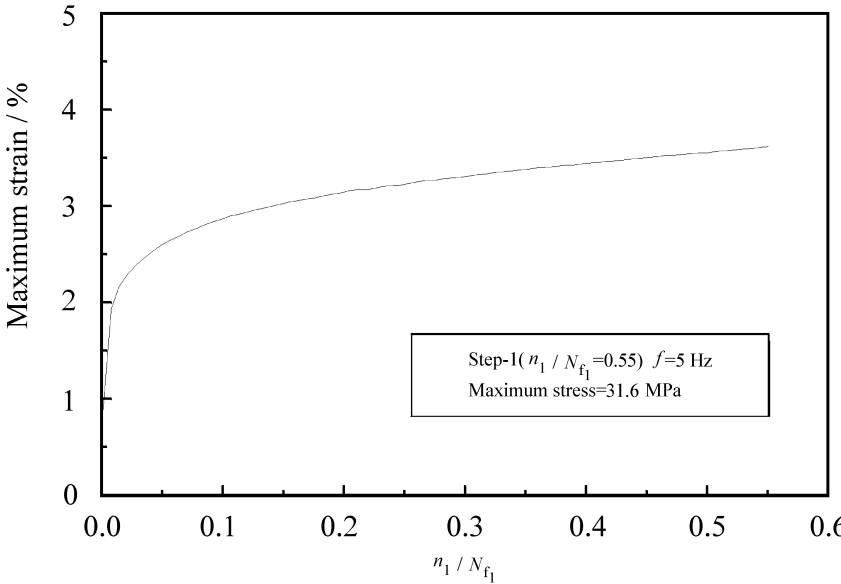
定义循环应变超过材料初始变形的增量为动蠕变,同时定义单位时间(或循环周次)内动蠕变的增加为动蠕变速率。对应某一周次的动蠕变表示为

$$X= X- X \tag{2}$$

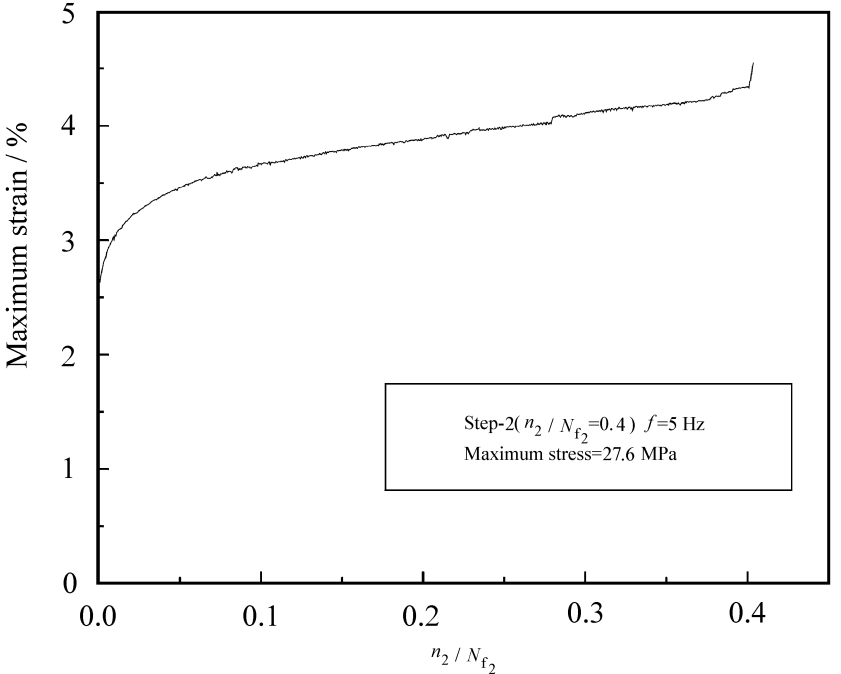
式中: X为当前周次对应的最大应变值; X 为最大初始应变,它是通过试验获得的最大应变发展曲线(如图 1)的第 阶段外推得到的。

定义最大应变发展曲线第二阶段结束,第三阶段起始处对应的循环周次为试件的有效寿命,并判定循环周次大于有效寿命时,试件开始发生大范围脱层,材料的承载能力迅速丧失。同时,对应有效寿命处的动蠕变值定义为总动蠕变。

研究发现,对于单级加载,某一频率和载荷条件下,试件的总动蠕变数据分散性很小。而且,不同加载条件下各试件的总动蠕变值也比较接近。如表1



(a) Step-1 loading (at 31.6 MPa)



(b) Step-2 loading (at 27.6 MPa)

图 4 两级加载条件下周期最大应变随循环周次的变化 (31.6 MPa & 27.6 MPa)  
Fig. 4 Variation of maximum strain in two-step loading(31.6 MPa & 27.6 MPa)

表 1 总动蠕变值

Table 1 Total dynamic creep value

Maximum stress/ MPa	38.3	31.6	27.6	17.6	17.3	
Dynamic creep / %	at 5 Hz	0.79	0.74	0.67	0.81	-
	at 8 Hz	0.86	0.65	0.64	-	0.67

所示。

由表 1 可见,改变加载条件对试件的总动蠕变影响很小。这一结论可以用来评价加载条件对疲劳寿命的影响。可以认为,如果在不同加载条件下试件的总动蠕变是一个定值,那么,增大载荷和频率只不过是增大了动蠕变速率,缩短了试件达到寿命终点的时间,从而导致疲劳寿命缩短。

这一结果的意义在于,动蠕变除反映了试件疲劳过程中的损伤扩展之外,还可以作为疲劳破坏的不变量来预报试件的损伤累积和疲劳寿命。由于最大应变随循环周次的增长是线性的,所以动蠕变的

增加也是线性的, 如果能够测定试验过程中处于应变发展曲线线性段上某一时刻的动蠕变值, 并由此外推得到初始应变, 那么, 就可以根据表 1 中的总动蠕变值推知试件的疲劳寿命, 同时也可以推知试件当前循环周次占总寿命的比值。

由此, 本文作者以动蠕变为参数, 参照 Palmgren-Minner 线性损伤累积法则<sup>[8]</sup>的形式并对其加以改进, 定义 [±20] 钢丝帘线橡胶复合材料试件在单级载荷下的疲劳损伤为

$$k = \frac{X}{X} \quad (3)$$

式中:  $X$  是给定应力幅值下材料的动蠕变;  $X$  是总动蠕变。对于两级加载, 有

$$k = \frac{X}{X_1} + \frac{X}{X_2} \quad (4)$$

式中:  $X$  和  $X$  是第一级和第二级载荷下的动蠕变量;  $X_1$  和  $X_2$  是两级载荷单独作用下试件的总动蠕变。

该模型可用来估算第一级载荷作用后, 试件在第二级载荷作用下的疲劳寿命。本文中两级加载条件下试件经第二级载荷作用达到疲劳破坏, 因此可以设定此时损伤值为  $k=1$ 。式(4)写为

$$\frac{X}{X_2} = 1 - \frac{X}{X_1} \quad (5)$$

利用该模型计算疲劳损伤累积时, 要求第一级加载的动蠕变必须进入应变发展曲线的第二阶段才可以施加第二级载荷, 否则动蠕变还没有进入线性段, 无法通过外推得到初始应变值  $X_0$ 。

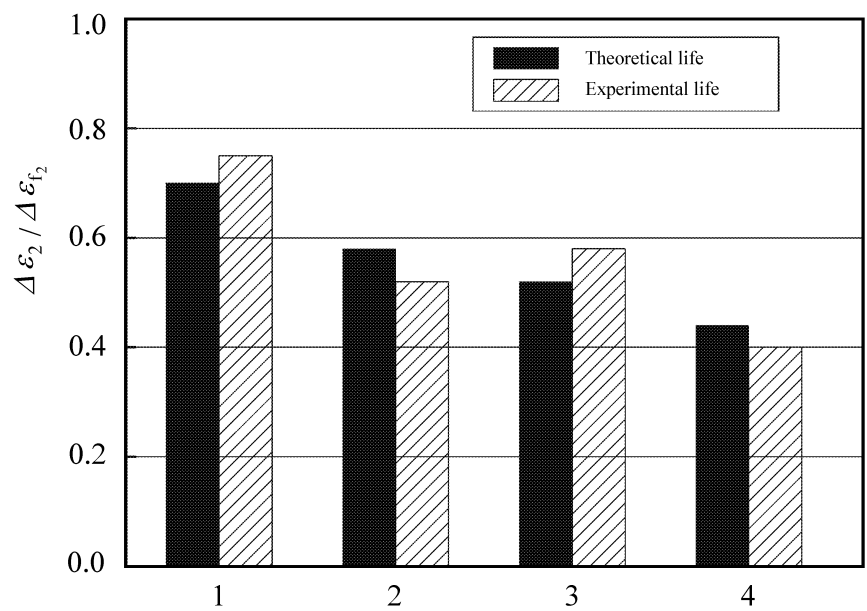
图 5 是频率为 5 Hz 条件下, 模型计算的第二级寿命与试验得到的第二级寿命的比较。

这是一个基于动蠕变的单参数线性损伤累积模型, 循环过程中应变总的增量即动蠕变是损伤累积的唯一指标。从其形式来看, 该模型有两方面的含义: 其一是无论循环周次如何增加, 只要动蠕变没有变化, 材料的疲劳损伤就没有累积。其二, 材料至整体破坏时动蠕变的临界值与应力和频率无关。

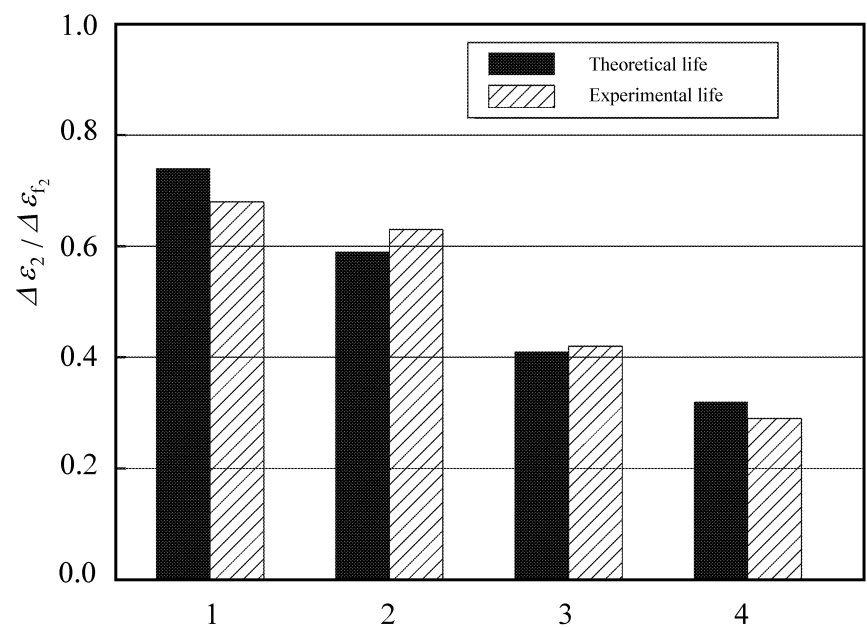
### 3 结 论

(1) [±20] 钢丝帘线橡胶复合材料在载荷控制的疲劳过程中呈现三阶段规律, 这一规律同样适用于两级加载条件。

(2) 试验过程中帘线端头处基体裂纹的出现是宏观疲劳损伤的初始, 损伤的累积表现为裂纹数量



(a) 27.6 MPa & 31.6 MPa



(b) 31.6 MPa & 27.6 MPa

图 5 用动蠕变模型预报的第二级寿命与试验结果的比较

Fig. 5 Comparison of step-2 fatigue life from dynamic creep model and experimental result

增加、帘线/基体脱粘和层间裂纹扩展, 试件疲劳破坏为基体控制。

(3) 以动蠕变为参数的线性疲劳损伤累积模型, 能够较好地预报两级加载条件下试件的第二级疲劳寿命。

### 参考文献:

- [1] Crosch K. Rolling resistance and fatigue life of tires [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1988, 61(1): 42- 63.
- [2] 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. 10- 12.
- [3] 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.
- [4] 田振辉, 刘宇艳, 万志敏, 杜星文. 聚酯增强橡胶疲劳破坏试验研究 [J]. 材料工程, 2000, (4): 34- 37.
- [5] Huang Y S, Yeoh O H. Crack initiation and propagation in model cord-rubber composites [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1998, 71(1): 1- 10.

Technology, 1989, 62(4): 709- 714.

[ 6]   T ian Zhenhui, Song Hongwei, Wan Zhimin, et al. Fatigue properties of steel cord-rubber composite [ J]. Journal of E-lastomers & Plastics, 2001, 33(4): 283- 296.

[ 7]   田 振辉, 苗常青, 万志敏, 杜星文. 双层橡胶复合材料的疲劳损伤 [J]. 合成橡胶工业, 2001, 24(3): 34- 37.

[ 8]   Miner M A. Cumulative damage in fatigue [ J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, (9): A 159-A 164.