

# 不同补强体系胶料疲劳断裂性能的研究

肖建斌, 国继红\*, 邹志德\*, 王飞\*, 傅政  
(青岛化工学院 橡胶工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 应用断裂力学理论定性和定量地研究了 NR 和 BR/NR(并用比为 70/30)胶料在添加不同炭黑补强体系(HAF, ISAF 和 SAF)时的动态疲劳过程。用分子论观点描述了胶料的动态疲劳过程, 结合断裂特征参数  $\beta$  和  $C_0$  对  $S-N$  曲线进行了分析比较。结果表明, 在添加 HAF, ISAF 和 SAF 这 3 种补强体系的胶料中, 随着补强体系粒径的减小, 其抗裂纹扩展性变差, 但胶料内部潜在缺陷减少。

关键词: NR; BR; 动态疲劳; 断裂特性; 炭黑补强体系; 裂纹

中图分类号: T Q330. 1+5      文献标识码: A      文章编号: 1000-890X(2000)10-0584-04

随着高分子材料在工程中应用的日益广泛, 对粘弹性固体材料疲劳破坏的研究和预测也逐渐引起人们的重视。所谓疲劳破坏, 就是指材料中的潜在缺陷在疲劳过程中由于应力集中产生微量增长而形成裂纹, 裂纹再逐渐扩展直至材料破坏的现象<sup>[1]</sup>。

胶料的疲劳破坏特性与胶料配方和疲劳破坏条件有关。材料在动态变形条件下及长期使用过程中必然产生结构和物理性能上的变化, 这些变化对由裂纹扩展而导致的疲劳破坏产生决定性的影响。轮胎、胶带等多种橡胶制品都是在动态变形条件下使用的, 其所用材料疲劳断裂性能往往决定着制品的使用寿命。为了了解橡胶制品在疲劳过程中结构和性能上的变化, 保证橡胶制品使用中的安全性和可靠性, 对橡胶材料的动态疲劳性能进行研究和预测具有极为重要的意义。

应用断裂力学的方法预测和解析高分子材料疲劳破坏寿命国内已有报道<sup>[2~3]</sup>。本工作仅对几种不同补强体系对胶料疲劳性能的影响进行研究。

\*青岛化工学院橡胶工程学院 1998 届毕业生  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59573002)  
作者简介: 肖建斌(1972-)男, 山西阳曲县人, 青岛化工学院橡胶工程学院工程师, 学士, 主要从事橡胶制品配方设计与加工方面的研究。

## 1 实验

### 1.1 原材料

NR, 国产 1 号标准胶; BR, 牌号 9000, 齐鲁石化公司产品; 高耐磨炉黑(HAF), 牌号 N339, 中超耐磨炭黑(ISAF), 牌号 N234, 超耐磨炭黑(SAF), 牌号 N110, 均为青岛德国萨化学有限公司产品; 其它助剂均为常用工业品。

### 1.2 基本配方

分别针对 NR 和 BR/NR 胶料安排两组试验配方。每组的几个胶料配方除了补强体系外, 其它组分均相同。

(1)第 1 组试验配方: NR 100; 氧化锌 5.0; 硬脂酸 3.0; 石蜡 1.0, 防老剂 4010NA 1.5; 促进剂 DM 1.0; 硫黄 2.25; 补强体系见表 1。

| 表 1 NR 胶料配方中的补强体系 份 |      |    |    |
|---------------------|------|----|----|
| 组 分                 | 配方编号 |    |    |
|                     | 1    | 2  | 3  |
| HAF                 | 50   | 0  | 0  |
| ISAF                | 0    | 50 | 0  |
| SAF                 | 0    | 0  | 50 |

(2)第 2 组试验配方: NR 30; BR 70; 氧化锌 5.0; 硬脂酸 3.0; 石蜡 1.0, 防老剂 4010NA 1.5; 促进剂 DM 1.0; 促进剂 NOBS 1.0; 10<sup>#</sup> 机油 2.0; 硫黄 1.3; 补强体系见表 2。

| 表 2 BR/NR 胶料配方中的补强体系 份 |      |    |    |
|------------------------|------|----|----|
| 组 分                    | 配方编号 |    |    |
|                        | 4    | 5  | 6  |
| HAF                    | 50   | 0  | 0  |
| ISAF                   | 0    | 50 | 0  |
| SAF                    | 0    | 0  | 50 |

1.3 试样制备与测试

先将生胶在开炼机上塑炼均匀后,包辊,加小料,炭黑和软化剂分批加入,混炼均匀后再加入硫黄,薄通 6 次下片,停放备用。用 25 t 平板硫化机硫化,硫化条件为 150 ℃,15 MPa,硫化时间根据用 LH-II 型硫化仪测定的正硫化时间确定。

将硫化好的胶片用裁刀裁成哑铃形试样,然后在自制模具上切割出锐利的单边切口。试样切口深度通过读数显微镜测定,本测试中为 0.7 和 1.0 mm。在拉伸疲劳试验机上对试样进行拉伸疲劳试验,记录疲劳寿命。

2 结果与讨论

2.1 动态疲劳断裂的分子历程及 S-N 曲线

高分子弹性材料宏观上可视为均质,但其内部必然具有分布于各处的不同形状和大小的缺陷,如杂质、气泡和弱键等。当材料整体受力时,位于缺陷端部的材料的局部应力可能增大到平均应力的许多倍。

唯象论认为,材料破坏是由于其内部损伤(缺陷和微裂纹)引发的裂纹不断传播和扩展而导致的。其传播方式和扩展速度由材料的粘弹性所决定,表现出强烈的时间-温度效应。按分子论的观点,动态疲劳归因于化学键的断裂,即试样在周期性应变过程中,应力不断集中于弱键处而产生微裂纹,进一步产生裂纹并随时间而扩展。裂纹发展是一个随时间而发展并涉及分子链连续断裂的粘弹性非平衡过程。这一微观过程的宏观表现是在动态疲劳过程中裂纹穿过试样不断扩展直至断裂和与之所伴随的热效应。

动态疲劳过程大致可分为 3 个阶段:第 1 阶段,应力发生急剧变化,出现应力软化现象;第 2 阶段,应力变化缓慢,材料表面或内部产生损伤(破坏核);第 3 阶段,损伤引发裂纹并连续

扩展,直至断裂破坏,这是材料疲劳破坏的关键阶段。

深崛美英<sup>[1]</sup>根据粘弹性行为的迭加原理,以断裂力学为基础提出了一种只需进行简单迭加便可求得高应变至低应变宽广区域内应变-疲劳寿命曲线(S-N 曲线)的方法。本工作中也依此方法得出 S-N 曲线。具体做法是:先做出具有不同预加伤痕和无预加伤痕试样的一系列试样的 λ-lg N 曲线(λ 为伸长比)。伤痕长度只对绝对疲劳寿命有影响,而与 S-N 曲线形状无关,则可有预加伤痕试样的 λ-lg N 曲线沿其疲劳寿命轴平行移动,迭加到未预加伤痕试样的 λ-lg N 曲线上,便可得出 S-N 曲线。这样就可可在短期内测定包括低应变在内的宽广变形区域的 S-N 曲线(图 1)。

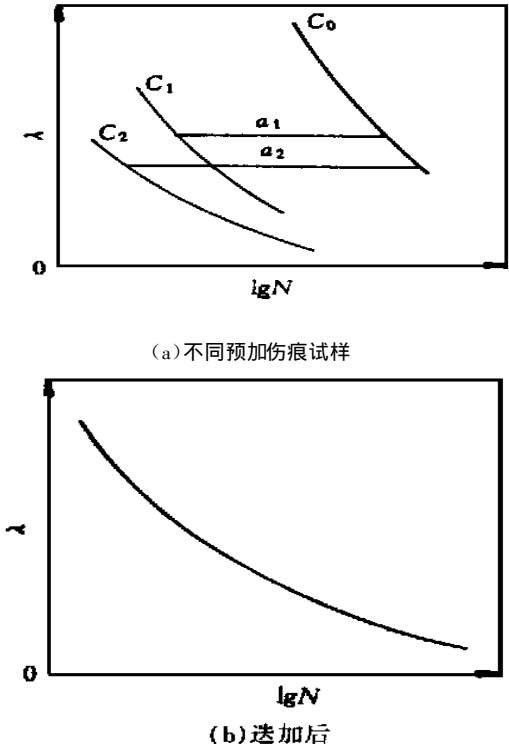


图 1 S-N 曲线的迭加模式  
 $C_0$ —与试样中潜在缺陷等价的微裂纹尺寸;  $C_1$  和  $C_2$ —预加伤痕长度;  $a_1$  和  $a_2$ —平移量

共进行了两组 6 个配方的胶料的测试,按上述方法得出具有不同预加伤痕试样的 S-N 曲线。为了便于分析比较,将 3 种炭黑补强的 NR 胶料的 3 条迭合曲线放在一个图中(图 2),同时将此胶料具有 1.0 mm 单边切口试样的 3

条  $S-N$  曲线也放在此图中。同样方法处理 BR/NR 胶料(见图 3)。

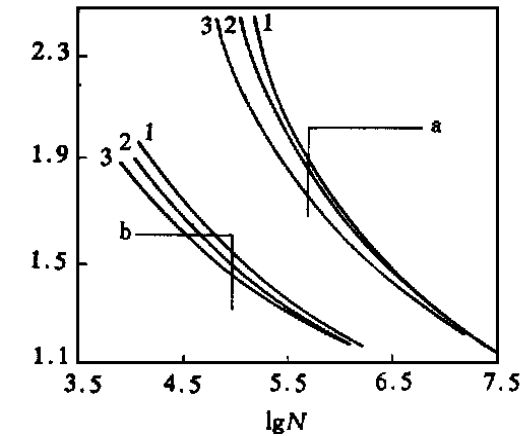


图 2 不同补强体系 NR 胶料的  $S-N$  曲线  
a—未切口试样; b—1.0 mm 单边切口试样

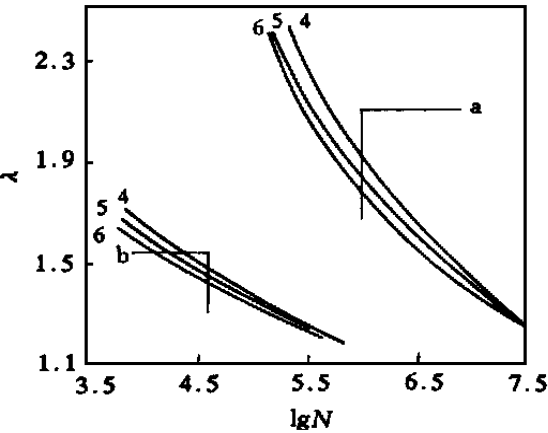


图 3 不同补强体系 BR/ NR(并用比为 70/30)  
胶料的  $S-N$  曲线  
注同图 2

由图 2 和 3 可见, 按 HAF, ISAF 和 SAF 的顺序, 曲线移向低  $\lg N$  方向。这说明 HAF 对疲劳过程的 3 个阶段都有较明显的贡献, 用 HAF 补强的胶料抗裂纹扩展性好, 胶料的疲劳寿命长。

表 3 和 4 是伸长比  $\lambda$  为 1.5 时各配方胶料的动态疲劳寿命, 反映了上述分析的规律性。

表 3 NR 胶料的动态疲劳寿命

| 配方编号 | $\lg N$ |       |
|------|---------|-------|
|      | 有切口试样   | 无切口试样 |
| 1    | 5. 11   | 6. 52 |
| 2    | 5. 00   | 6. 43 |
| 3    | 4. 92   | 6. 32 |

表 4 BR/NR 胶料的动态疲劳寿命

| 配方编号 | $\lg N$ |       |
|------|---------|-------|
|      | 有切口试样   | 无切口试样 |
| 4    | 4. 54   | 6. 68 |
| 5    | 4. 48   | 6. 63 |
| 6    | 4. 40   | 6. 57 |

2. 2 疲劳断裂的特征参数  $\beta$  和  $C_0$

由平移量求得的  $\beta$ (无量纲)和  $C_0$  可定量表征胶料的疲劳断裂特性。参数  $\beta$  决定了  $S-N$  曲线的形状,  $\beta$  值越大, 意味着随伸长比  $\lambda$  增大, 裂纹增长的速度越快。参数  $C_0$  是指与材料中潜在缺陷等价的微裂纹尺寸,  $C_0$  值越大, 胶料内部潜在的缺陷尺寸也越大, 其耐疲劳性越差。表 5 和 6 示出了各种补强体系胶料的疲劳断裂特征参数。

表 5 NR 胶料的特征参数

| 配方编号 | 补强体系 | $\beta$ | $C_0$  |
|------|------|---------|--------|
| 1    | HAF  | 2. 37   | 0. 150 |
| 2    | ISAF | 2. 41   | 0. 145 |
| 3    | SAF  | 2. 60   | 0. 137 |

和结构都居中。

不同炭黑对相同胶料的生热影响也不相同。表 7 和 8 所示为 3 种炭黑补强 NR 和 BR/NR 胶料的压缩升温。

表 7 不同补强体系对 NR 胶料压缩生热的影响

| 配方编号 | 补强体系 | 压缩升温/℃ |
|------|------|--------|
| 1    | HAF  | 43.2   |
| 2    | ISAF | 45.0   |
| 3    | SAF  | 47.0   |

注：压缩量 20%，温度 38℃。

表 8 不同补强体系对 BR/NR 胶料压缩生热的影响

| 配方编号 | 补强体系 | 压缩升温/℃ |
|------|------|--------|
| 4    | HAF  | 40.0   |
| 5    | ISAF | 41.8   |
| 6    | SAF  | 44.0   |

注：同表 7。

由表 7 和 8 可见，本研究中试验的胶料生热较大，胶料在反复变形过程中的生热使之产生热老化，致使使用寿命降低。热老化使胶料的结构和物性发生了相当大的变化，这些变化对伤痕的增长造成微妙的影响。也就是说，伤

痕的增长与结构、物性的变化经常是同步的，而彼此又不能分开。以断裂力学理论推导出的特征参数  $\beta$  和  $C_0$  同时也包括了动态疲劳过程中结构和物性的变化。

3 结论

应用断裂力学理论解析了用 HAF, ISAF 和 SAF 这 3 种炭黑补强的 NR 和 BR/NR 胶料的疲劳破坏寿命和断裂特征参数。认为 HAF 补强胶料的潜在缺陷较大，但裂纹增长速度较慢；SAF 补强胶料的潜在缺陷较小，但裂纹增长速度较快；ISAF 补强胶料的潜在缺陷和裂纹增长速度均居中。

参考文献:

[ 1 ] 深堀美英. 弹性体疲劳寿命预测[ J ]. 日本ゴム協会誌, 1985, 58(10): 625.

[ 2 ] 傅政, 谷恒勤, 朱东兵, 等. 天然橡胶/顺丁橡胶共混物的动态疲劳与断裂特征[ J ]. 橡胶工业, 1992, 39(2): 107.

[ 3 ] 肖建斌, 姜爱民, 傅政, 等. 天然橡胶/丁苯橡胶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.

收稿日期: 2000-04-29

Dynamic fatigue and failure characteristics of rubber compounds with different reinforcing fillers

XIAO Jian-bin, GUO Ji-hong, ZOU Zhi-de, WANG Fei, FU Zheng  
(Qingdao Institute of Chemical Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** The dynamic fatigue process of NR and BR/NR (70/30) compounds with different carbon blacks was qualitatively and quantitatively investigated by using the rupture mechanism. The dynamic fatigue process of rubber compounds was described based on the molecular theory, and the *S-N* curves were analysed and compared combining with the rupture characteristic parameters  $\beta$  and  $C_0$ . The results showed that for three different rubber compounds reinforced with HAF, ISAF and SAF respectively, the crack growth resistance deteriorated, but the potential defects in rubber compound decreased as the particle size of carbon black reduced.

**Keywords:** NR; BR; dynamic fatigue; rupture characteristics; carbon black; crack