

芳纶纤维对炭黑/丁苯橡胶复合材料疲劳行为的影响

周宗涛^{1, 2}, 罗筑^{*1, 2}, 钟金成^{1, 2}, 刘春利^{1, 2}, 李鹏^{1, 2}

(1. 贵州大学 材料与冶金学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省橡胶复合材料工程实验室, 贵阳 550025)

摘 要: 使用短芳纶纤维(AF)增强炭黑/丁苯橡胶(CB/SBR)复合材料, 研究 AF 对复合材料疲劳行为的影响。在应力控制条件下, 少量 AF 的加入使缺口试样的疲劳寿命提高了 25.5 倍; 疲劳使试样的储能模量(G')降低, AF 的加入使疲劳后试样的 Payne 效应降低, G_0'/G_{100}' 值降低 10.5%; 复数模量随疲劳周期增加而降低, 但少量纤维能使复合材料的复数模量保持在较高的水平, 30 000 周疲劳下 AF-CB/SBR 的复数模量仍为 CB/SBR 的 1.73 倍; 疲劳后 AF-CB/SBR 复合材料的 100% 和 300% 定伸应力随疲劳变形量的增加而先增大后降低, 断裂伸长率有所下降。试样疲劳后相对于拉伸变形量, 纤维的增强作用产生滞后效应, 相对界面滑脱能随疲劳应变幅度的增加而降低; SEM 结果显示, 疲劳后橡胶基体出现一定的剥离, 纤维与橡胶界面受到损伤。

关键词: 芳纶纤维; 丁苯橡胶; 疲劳; 滑脱能; 界面

中图分类号: TQ333.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2018)08-2177-08

Influence of aramid fiber on the fatigue performance of carbon black/styrene butadiene rubber composites

ZHOU Zongtao^{1, 2}, LUO Zhu^{*1, 2}, ZHONG Jincheng^{1, 2}, LIU Chunli^{1, 2}, LI Peng^{1, 2}

(1. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Province Engineering Laboratory for Rubber Composite, Guiyang 550025, China)

Abstract: The influences of aramid fiber (AF) on the fatigue behavior of AF reinforced styrene butadiene rubber filled with carbon black composites (AF-CB/SBR) were researched. Under the stress control condition, the fatigue life of notched specimens can be improved 25.5 times with the help of the addition of a small amount of AF. The storage modulus of the rubber samples decreases after the fatigue process and AF in this system can decrease the ratio of G_0' and G_{100}' (G_0'/G_{100}') to 10.5%, indicating lower Payne effect compared with the one without AF. The complex modulus decreases with the increase of fatigue cycles, while higher complex modulus can be remained in the composites which contain a small amount of AF than the one without AF. The complex modulus of AF-CB/SBR composite was 1.73 times as that of CB/SBR system even if the fatigue cycles have reached to 30000. The stretching stress at 100% and 300% of fatigued sample increases first and then reduces with the increasing of fatigue progress, while the elongation at break decreases. Relative to the deformation, fiber reinforcement has a hysteresis effect, and the relative interfacial slip energy decreases with the increase of fatigue strain amplitude; SEM photos exhibit a certain extent stripping of the rubber matrix and the interface between fiber and rubber is destroyed after the fatigue process.

Keywords: aramid fiber; styrene butadiene rubber; fatigue; detachment energy; interface

丁苯橡胶(SBR)的力学性能、加工性能和制品的使用性能接近天然橡胶(NR), 其耐磨性、耐热

性和耐老化性优于天然橡胶, 使 SBR 在轮胎与轮胎制品、鞋类、胶管、胶带、汽车零部件、电线电缆

收稿日期: 2017-07-24; 录用日期: 2017-09-20; 网络出版时间: 2017-10-23 17:54

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171023.001>

基金项目: 黔科合重大专项(2013—2016); 国家自然科学基金(51761004)

通讯作者: 罗筑, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料共混改性 E-mail: luozhu2000@sina.com

引用格式: 周宗涛, 罗筑, 钟金成, 等. 芳纶纤维对炭黑/丁苯橡胶复合材料疲劳行为的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2177-2184.

ZHOU Zongtao, LUO Zhu, ZHONG Jincheng, et al. Influence of aramid fiber on the fatigue performance of carbon black/styrene butadiene rubber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2177-2184 (in Chinese).

及其他多种工业橡胶制品生产中具有广泛的应用^[1]。但由于没有应变诱导结晶, SBR 的抗疲劳性能较差。

橡胶疲劳是橡胶承受长期交变循环应力或应变作用而引起的性能变化, 轮胎制品通常是在周期性应力状态下使用的, 轮胎的失效与橡胶材料的疲劳有直接关联^[2], 橡胶材料的切割和撕裂破坏与交变应力(疲劳)的服役条件下材料的力学性能下降密切相关。影响疲劳性能的因素很多, 增强体作为橡胶制品中重要的组成部分是主要的影响因素之一。芳纶短纤维(AF)增强方式的增强效果远高于炭黑(CB)和白炭黑等^[3], 纤维类增强体的加入会导致裂纹偏转而受到阻滞^[4-5], 并引起材料的模量及滞后现象的变化, 如在载重轮胎胎面胶中掺用 1.5 份芳纶短纤维, 耐久性提高了 30%^[6-8]。研究短纤维/橡胶复合材料在苛刻服役条件下的抗疲劳性能和疲劳过程中材料力学性能的变化十分重要, 但对疲劳过程中橡胶复合材料力学性能变化的研究很少。以往短纤维/橡胶复合材料疲劳行为的研究主要集中于应变控制方式, 而在载荷恒定的环境下, 应力控制的疲劳方式占有更大的比重^[9]。本文分别采用应变控制和应力控制的方式研究少量 AF 的加入对炭黑/丁苯橡胶(CB/SBR)复合材料疲劳行为的影响。

1 实验

1.1 原材料

丁苯橡胶(SBR): 型号 1500, 东莞市环亚橡胶有限公司; 芳纶纤维(AF): AF-1000, 1500D, 韩国 ALKEX 公司, 接收状态下使用; 炭黑(CB): N330, 武汉探新炭黑科技开发有限公司, 接收状态下使用。

1.2 实验方案

母炼胶基本配方(g): 66.67 g SBR; 33.33 g CB; 4 g AF。

混炼胶: 0[#]: 100 g CB+200 g SBR; 1[#]: 4 g AF+100 g CB+200 g SBR(AF 切成 10 mm 短切纤维使用)。

配合剂配方: 增塑剂氧化锌(ZnO) 10 g; 塑化剂硬脂酸(SA) 8 g; 促进剂二苯胍(D) 1 g; 防老剂 N-(1,3-二甲基)丁基-N'-苯基对苯二胺(CPPD) 3 g; 促进剂 2-硫醇基苯骈噻唑(M) 4.42 g; 促进剂 2、2'-二硫代二苯并噻唑(DM) 3.92 g; 硫化剂四甲基秋兰姆(TMTD) 0.64 g; 硫化剂硫磺(S) 3.42 g; 配合剂均为工业级, 由贵州轮胎股份有限公司

提供。

1.3 AF-CB/SBR 复合材料的制备

1.3.1 母炼胶的制备

将 AF 及试验所需 CB/SBR 橡胶 100 g 缓慢交替加入转矩流变仪(XSS-300, 上海科创橡塑机械设备有限公司)进行加工, 加工条件为: 转速 80 r/min; 温度 130℃; 时间 7 min, 将制备得到的母炼胶剪成小块, 备用。

1.3.2 混炼胶的制备

称取剩余的实验所用 200 g CB/SBR 橡胶在双辊开炼机(XK-160-A, 福建省永春轻工机械厂)上先塑炼, 待塑炼 3 min 后加入母炼胶和橡胶配合剂, 配合剂添加顺序: ZnO、SA、D、CPPD、M、DM、TMTD、S。在开炼机上混炼 10 min, 左右均匀缓慢地调宽辊距, 使混炼胶以一定的厚度(2.0 mm 左右)出片。

1.3.3 硫化胶的制备

在混炼胶片上空压制样, 将得到的小圆饼状样品放入无转子硫化仪(M2000FAN 型, 台湾高铁科技股份有限公司)中测试 AF-CB/SBR 复合材料的正硫化时间。再将片状混炼胶裁剪成合适模具模腔大小的样片, 放入平板硫化机(XLB 型, 江都市明珠实验机械厂)中硫化。接着使用拉伸样条和直角撕裂样条模具通过空压机将硫化样片制成待测性能的拉伸试样和直角撕裂样条。

1.4 AF-CB/SBR 性能分析测试

1.4.1 静态力学性能测试

在室温, 拉伸速率为 500 mm/min 的条件下, 使用万能试验机(WdW-10C 型, 上海华龙测试仪器有限公司)对橡胶复合材料直角撕裂强度按照标准 GB/T 529—2008^[10]进行测试, 对其拉伸强度性能按照标准 GB/T 1688—2008^[11]进行测定。

1.4.2 动态力学性能测试

橡胶复合材料的动态力学性能用橡胶加工分析仪(RPA2000, 美国 Alpha 科技有限公司)测定, 混炼胶的应变扫描在 60℃、1 Hz 条件下, 应变范围为 0.1%~450%; 硫化胶的应变扫描在 60℃、1 Hz 条件下, 应变范围为 0.1%~80%。

1.4.3 SEM 观测

将溶解混炼胶得到的纤维及橡胶复合材料疲劳拉伸试样断面, 经喷金处理后通过扫描电子显微镜(KYKY-2800B 型, 北京中科科仪发展有限责任公司)观察试样疲劳前后拉伸断面形貌。

1.4.4 疲劳测试

硫化胶通过自制裁刀制备如图 1 所示样条, 将制备好的样条放于材料动态疲劳试验机(DF-8000-5 型, 高铁检测仪器东莞有限公司)上, 通过行程控制, 正弦波加载, 在应变控制状态下, 拉伸变形量分别为 10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm, 幅度为±3 mm, 调节频率为 5 Hz, 检测不同应变下疲劳后橡胶性能的变化; 在应力控制状态下(40 N, 振幅为±20 N, 频率 5 Hz)检测 2 mm 预制缺口试样的疲劳寿命。

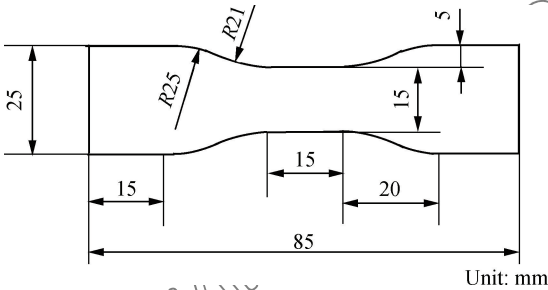


图 1 短芳纶纤维增强炭黑/丁苯橡胶(AF-CB/SBR)复合材料疲劳试样形状及尺寸示意图

Fig. 1 Shape and size schematic diagram of aramid fiber reinforced styrene butadiene rubber filled with carbon black composites (AF-CB/SBR) fatigue specimens

2 结果与讨论

2.1 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 力学性能

表 1 为 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料的力学性能数据。可以看出, 加入少量 AF 后, 使 AF-CB/SBR 复合材料的 100% 和 300% 定伸应力大幅度提高, 断裂伸长率有所降低, 拉伸强度有所提高, 而撕裂强度稍有提高。前期研究表明^[12], AF 的加入能够与 CB 产生协同作用, 不影响 CB 与橡胶基体的相容性及增强效果。

表 1 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 的力学性能

Property	CB/SBR	AF-CB/SBR
Tensile strength/MPa	16.06	17.61
100% modulus/MPa	2.96	4.71
300% modulus/MPa	9.78	12.22
Elongation at break/%	447	425
MD tear strength/(kN·m ⁻²)	45.81	46.47

Note: MD—Machine direction.

2.2 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 疲劳性能

2.2.1 缺口试样疲劳寿命分析

图 2 为复合材料 2 mm 的缺口试样在应力控制条件下(40 N, 振幅 20 N, 频率 5 Hz)最大形变随

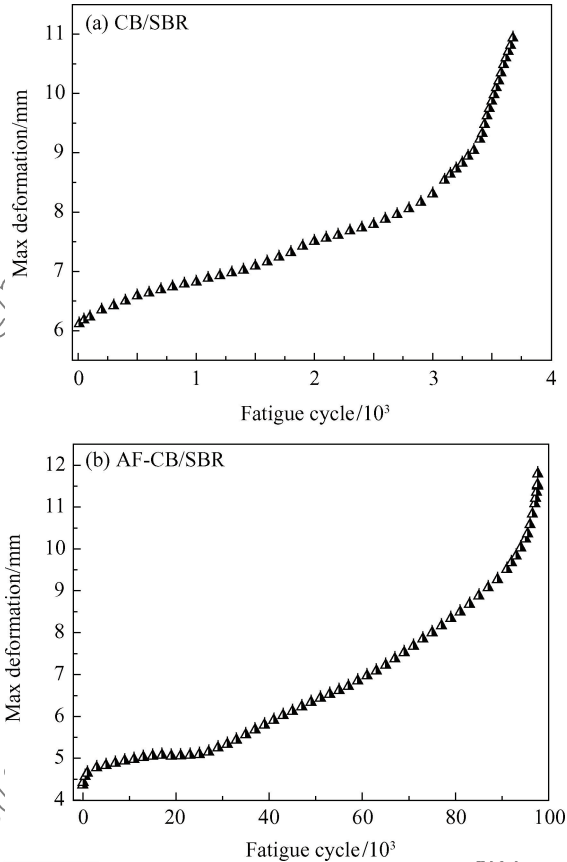


图 2 应力控制下 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料缺口试样最大形变随疲劳周期变化曲线

Fig. 2 Maximum deformation of CB/SBR and AF-CB/SBR versus fatigue cycle curves of composite notched specimens under stress control

疲劳周次的变化曲线。加入少量纤维将应力控制的疲劳寿命提高 25.5 倍。从图 2(a)中曲线规律可以看出, 不含纤维的橡胶复合材料疲劳破坏过程分为三个阶段: 首先是损伤萌发, 其次是稳定扩展阶段, 最后是加速扩展直到断裂^[13-16]。而从图 2(b)可以看到, 在稳定扩展阶段又分为两个阶段: 前一段类似于平台区, 形变增大的速度较小; 而后一段变化趋势与图 2(a)相似, 纤维的存在使稳定扩展阶段变长。图 3 是缺口试样疲劳破坏过程的照片。可以看出, 纤维的加入对裂纹的搭接、钝化作用使复合材料缺口更难发展, 破坏所需疲劳周期增多, 当破坏到一定程度后, 出现迅速断裂。纤维的加入能明显延长疲劳稳定扩展阶段的时间, 增强了橡胶复合材料的耐疲劳性能。

2.2.2 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 疲劳前后的 RPA 测试分析

图 4 为 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料未疲

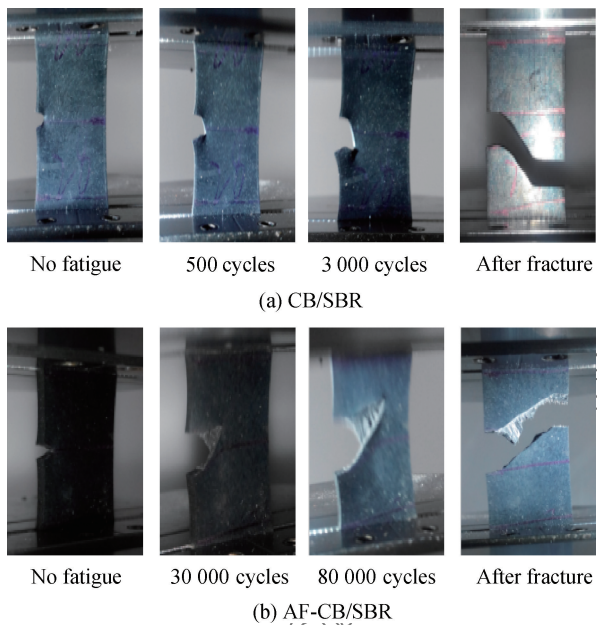


图 3 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料疲劳断裂过程照片
Fig. 3 Fatigue fracture process pictures of CB/SBR and AF-CB/SBR composite

劳和疲劳(应变控制下, 拉伸形变量为 25 mm, 振幅为 3 mm, 频率为 5 Hz, 疲劳周期为 30 000 周)后的 RPA 应变扫描图。Payne 等^[17]研究发现, CB 等填料在橡胶中形成三维网络结构, 当复合材料承受一定形变时, CB 的网络结构被破坏, 表现为储能模量下降, 一般采用 0% 应变与 100% 应变下储能模量的比值(G_0'/G_{100}')来反映 Payne 效应的大小。对比疲劳前后储能模量的变化(图 4(a)), AF-CB/SBR 复合材料疲劳后储能模量下降, 疲劳后 G_0'/G_{100}' 值为 8.30, 比未疲劳试样的 5.76 有所增高; CB/SBR 复合材料在低应变下疲劳后的模量高于疲劳前的模量, 而在高应变下模量迅速下降, 疲劳后 G_0'/G_{100}' 值为 9.27, 较未疲劳的 4.78 明显增高, 说明 AF 的加入减小了 AF-CB/SBR 复合材料疲劳后的 Payne 效应, G_0'/G_{100}' 值降低了 10.5%。硫化胶的损伤是橡胶分子共价键断裂产生微孔、微孔汇集产生孔穴进而产生微裂纹的不可逆过程, 疲劳损伤的发展伴随橡胶孔隙率的升高^[18-20]而导致橡胶基体的模量降低, 因此在承受较大循环应变使 CB 网络破坏时, 疲劳试样呈现出更明显的 Payne 效应。

如图 4(b)所示, AF-CB/SBR 和 CB/SBR 的损耗因子相差不大; 而疲劳后纤维、CB 与基体发生脱粘和滑移^[21], 且交联密度降低, 减少了对 SBR

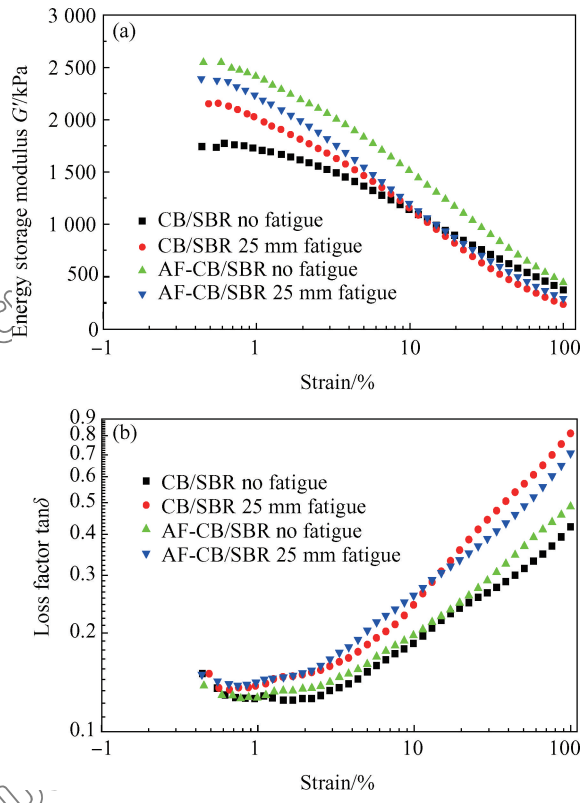


图 4 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 疲劳前后的应变扫描结果
Fig. 4 Strain vulcanizate scanning results of CB/SBR and AF-CB/SBR before and after fatigue

大分子链段运动的约束, 使大分子链段运动过程中的内摩擦增大, 即损耗模量增大, 损耗因子 $\tan\delta$ 是损耗模量与储能模量的比值, 疲劳后复合材料的损耗模量增加, 储能模量降低, 使疲劳后复合材料的损耗因子明显提高。

2.2.3 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料疲劳过程

图 5 为复合材料疲劳(应变控制下, 拉伸应变量为 25 mm, 振幅为 3 mm, 频率为 5 Hz)滞后环及复数模量随疲劳周次的变化。拉伸复数模量是黏弹性材料受正弦负荷下应力应变之比, 可用下式求出:

$$E^* = \sqrt{E'^2 + E''^2} \tag{1}$$

式中: E' 为储能模量; E'' 为损耗模量。

图 5(a)和图 5(b)反映了疲劳滞后环随疲劳周次增加而向下移动, 疲劳初期的滞后环快速下降, 随后趋于一个平稳下降的状态。

从图 5(c)可以看出, 初期复数模量迅速下降, 体现出 Mullins 效应^[22], 随后趋于一个平稳下降的状态, 两条试验曲线基本处于平行状态, 少量纤维

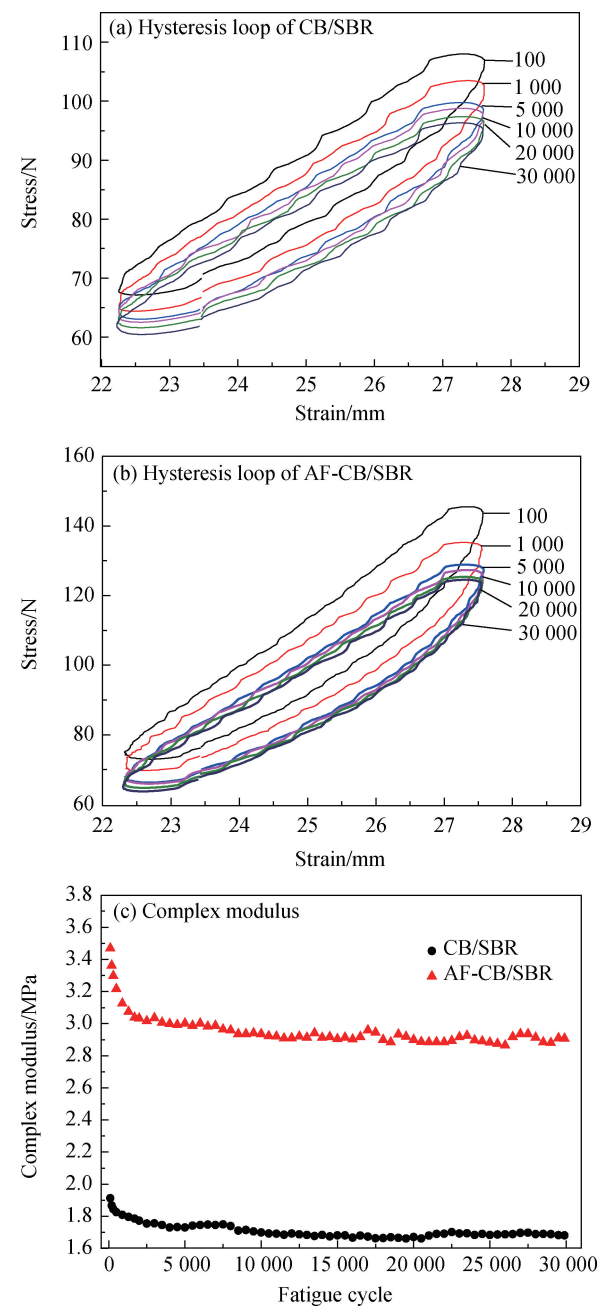


图5 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料疲劳过程及复数模量变化
Fig. 5 Fatigue process and change of complex modulus of the CB/SBR and AF-CB/SBR composites

使复合材料的复数模量保持在较高的水平, 30 000 周疲劳下 AF-CB/SBR 的复数模量仍为 CB/SBR 的 1.73 倍, 体现出动态应力应变的试验条件下对橡胶复合材料的增强优势。

2.2.4 疲劳前后 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料的应力-应变曲线

图 6 为 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料未疲劳及疲劳后(应变控制下, 拉伸形变量分别为

10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm, 振幅为 3 mm, 频率为 5 Hz, 疲劳周期为 30 000 周)应力-应变曲线。如图 6(a)所示, CB/SBR 的应力-应变曲线形态未发生明显变化, 从图 6(b)可以看出, 与未疲劳的试样相比, AF-CB/SBR 疲劳后应力-应变曲线在低应变区域偏离直线, 且随应变幅值的增大更加明显。试样未经疲劳过程的应力-应变曲线如图 6(c)所示, 与 CB/SBR 相比, AF-CB/SBR 的纤维增强作用与变形同步, 产生变形的同时即产生增强作用。如图 6(d)所示, 在低应变区域, AF-CB/SBR 疲劳后应力-应变曲线与 CB/SBR 疲劳后应力-应变曲线重合, 纤维未起到任何增强效果, 随变形量的进一步提高才产生明显的增强作用, 即纤维的增强作用产生滞后效应。疲劳过程产生反复的取向和松弛^[23], 导致变形量超过一定的值后纤维才能产生增强作用, 随着应变的进一步增大出现转折点(拐点), 对应着纤维与橡胶基体的完全脱粘。纤维脱粘后, 橡胶与纤维的摩擦作用仍能对橡胶起到增强效果^[24]。

吴卫东等^[25]使用界面滑脱能(RISE 数值)来反映纤维与橡胶基体界面粘合状况, RISE 数值等于应力-应变曲线拐点、零点及横坐标所围成类似三角形的面积。如上所述, AF-CB/SBR 疲劳后应力-应变曲线明显偏离直线, 当应变超过一定的值后, 纤维才能产生增强作用(并非从零点开始), 脱粘时产生的拐点也相应滞后, 因此采用脱粘的拐点、零点及横坐标所围成的面积减去 CB/SBR 疲劳后应力-应变曲线对应的面积来表征纤维的相对界面滑脱能(即图 6(c)和图 6(d)中阴影部分面积)。通过 Origin 软件积分计算出阴影部分面积分别为 1.58 (未疲劳)、1.41 (10 mm)、1.32 (15 mm)、1.14 (20 mm)和 1.08 (25 mm), 随疲劳拉伸应变变量的增大, 相对界面滑脱能逐渐减小, 说明界面破坏是逐渐增加的。

2.2.5 疲劳前后 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料的力学性能

图 7 为 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料疲劳后定伸应力及断裂伸长率随疲劳拉伸形变量的变化。从图中 7(a)和图 7(b)可以看出, 100% 和 300% 定伸应力都随疲劳行程的增大而先增大后减小, 在行程为 15 mm 附近达到最大值, 与变形较小时疲劳试验后大分子的残留取向有关, 含 AF 的复合材料这一趋势最为明显, 增强体对橡胶大分子链

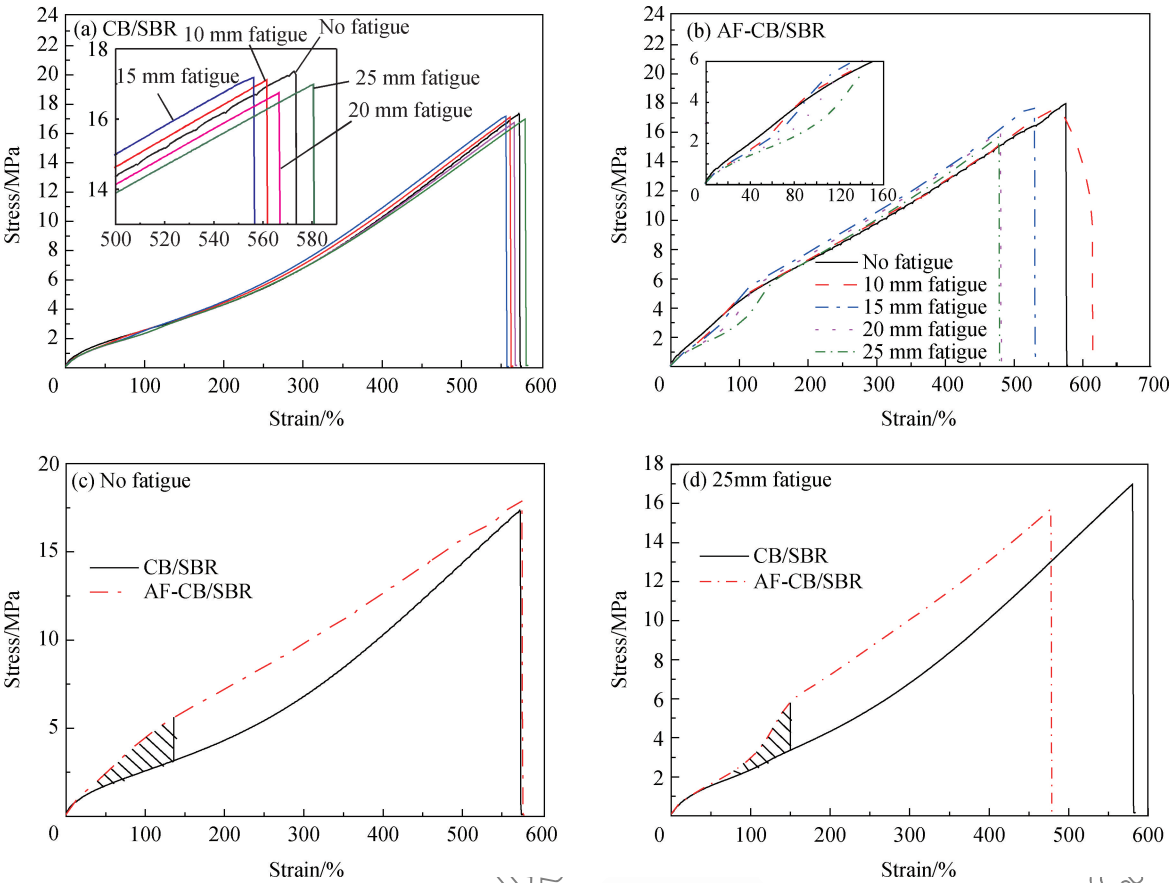


图 6 疲劳前后 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of CB/SBR and AF-CB/SBR composites before and after fatigue

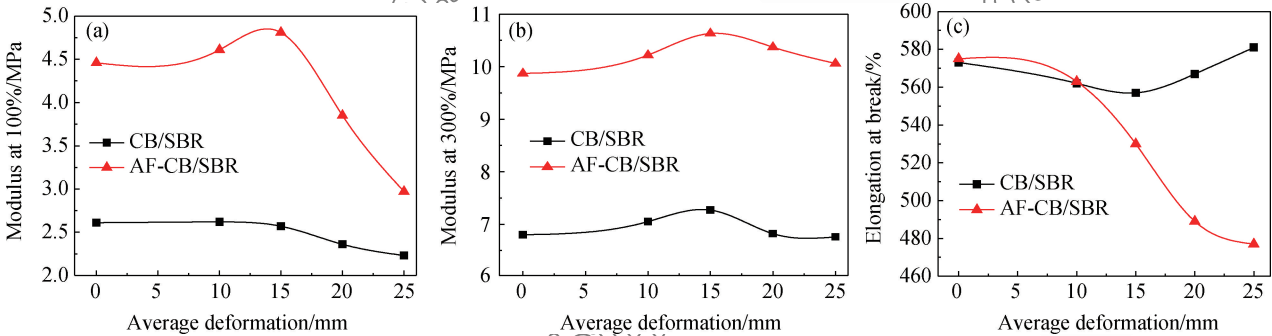


图 7 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料定伸应力及断裂伸长率随疲劳形变量的变化

Fig. 7 Variation of the modulus and elongation of CB/SBR and AF-CB/SBR at break with the deformation of fatigue

段运动的约束增大, 可导致大分子的残留取向增大, 100%定伸应力反映了橡胶与纤维的粘接状况, AF-CB/SBR 的 100%定伸应力在形变量超过 15 mm 的大量周次疲劳后迅速下降, 表明纤维与基体界面开始产生破坏。由于较大变形量下的大量周次应变导致橡胶基体的模量降低, 使 CB/SBR 的 300%定伸应力降低, 但 AF-CB/SBR 的 300%定伸应力保持在较高的水平。从图 7(c)可

以看出, CB/SBR 的断裂伸长率随疲劳拉伸形变的增大变化不大; 而 AF-CB/SBR 的断裂伸长率随疲劳拉伸形变的增大而降低, 小形变疲劳后下降不明显, 大形变疲劳后迅速下降, 由于纤维的脱粘使纤维与橡胶基体之间的界面处存在缺陷, 容易应力集中, 使复合材料提前断裂, 而小应变疲劳时, 由于界面保持完好, 使断裂伸长率下降不明显。

2.2.6 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料疲劳后拉伸断面形貌

图 8 为疲劳前和疲劳后(行程控制,ABS 定位 25 mm,振幅 3 mm,频率 5 Hz,疲劳周期 30 000 周)复合材料的拉伸断面形貌。对比图 9(a)和 9(b)可以看出,未疲劳的橡胶复合材料的拉伸断面较为平整,而疲劳后的橡胶复合材料的拉伸断面由于疲劳损伤而产生大量的剥离痕迹;从图 9(c)和图 9(d)可以看到,未疲劳的试样,拉伸断面平整,纤维损伤较严重,表明在拉伸断裂过程中纤维与基体产生了良好的粘结,而疲劳后的试样断面出现因疲劳损伤产生的较多孔洞,纤维表面损伤程度较低,表明在疲劳过程中纤维与橡胶基体粘结降低,在拉伸断裂过程中纤维以拔出为主。

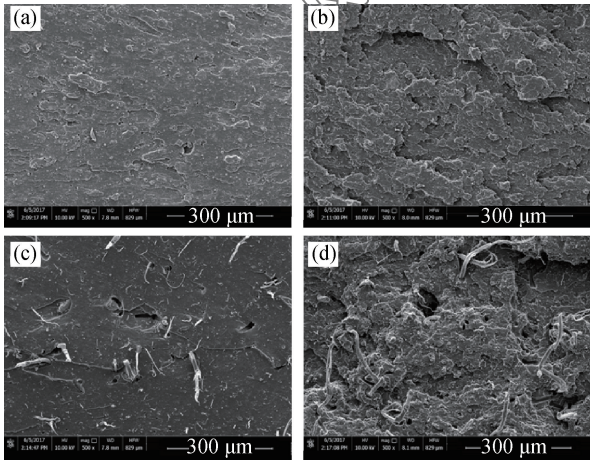


图 8 疲劳前后 CB/SBR 和 AF-CB/SBR 复合材料的拉伸断面形貌

Fig.8 Tensile cross-section morphologies of CB/SBR and

AF-CB/SBR composites before and after fatigue

((a)CB/SBR no fatigue; (b) CB/SBR 25 mm fatigue;

(c) AF-CB/SBR no fatigue; (d) AF-CB/SBR 25 mm fatigue)

3 结 论

(1) 芳纶纤维(AF)的加入,使炭黑/丁苯橡胶复合材料(CB/SBR)的力学性能明显提高。

(2) 应力控制下,对复合材料缺口试样进行疲劳寿命测试,AF-CB/SBR 试样破坏过程分为破坏萌生阶段、纤维脱粘阶段、复合材料稳定破坏阶段及加速破坏阶段,与未加 AF 的试样相比,其疲劳寿命大幅度增加。应变控制下,疲劳后试样的定伸应力随应变的增加而先增加后降低,疲劳后 AF-CB/SBR 保持高模量,断裂伸长率有所下降。

(3) 疲劳后,CB/SBR 复合材料的 Payne 效应更明显,而 AF 的加入使疲劳后的 Payne 效应

减弱。

(4) AF-CB/SBR 经一定周次的疲劳后,应变超过一定的值后纤维才能产生增强作用,通过复合材料的应力-应变曲线计算出相对界面滑脱能,AF-CB/SBR 的相对界面滑脱能随疲劳应变量的增大而减小,说明随疲劳应变幅度的增大,纤维与橡胶基体的界面逐渐被破坏。

参考文献:

[1] 郭义,赵玉中. 丁苯橡胶市场现状及技术发展趋势[J]. 弹性体, 2008, 18(1): 74-78.
GUO Yi, ZHAO Yuzhong. Market status and technological development trend of styrene butadiene rubber[J]. Elastomer, 2008, 18(1): 74-78 (in Chinese).
[2] 王昊,危银涛. 基于疲劳裂纹扩展理论的轮胎橡胶疲劳寿命预测[J]. 轮胎工业, 2016, 36(5): 259-266.
WANG Hao, WEI Yintao. Fatigue life prediction of tire rubber based on fatigue crack growth theory[J]. Tire Industry, 2016, 36(5): 259-266 (in Chinese).
[3] LIU G, ZHANG C, WANG Y, et al. Interface correlation and toughness matching of phosphoric acid functionalized Kevlar fiber and epoxy matrix for filament winding composites[J]. Composites Science & Technology, 2008, 68(15): 3208-3214.
[4] FRÖHLICH J, NIEDERMEIER W, LUGINSLAND H D. The effect of filler-filler and filler-elastomer interaction on rubber reinforcement[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2005, 36(4): 449-460.
[5] 刘宇艳,万志敏,杜星文. 周期载荷下聚酯/橡胶复合材料和人造丝/橡胶复合材料的热生成对疲劳行为的影响[J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 103-107.
LIU Yuyan, WAN Zhimin, DU Xingwen. Effect of heat generation on fatigue behavior of polyester/rubber composites and rayon/rubber composites under cyclic loading[J]. Journal of Composite Materials, 2002, 19(2): 103-107 (in Chinese).
[6] DATTA R, PARKER S, MADE M V D, et al. Increasing fuel economy and durability in truck tires[J]. Rubber World, 2008, 238(6): 29.
[7] 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.
[8] CHAKRABORTY S K, SETUA D K, DE S K. Short jute fiber reinforced carboxylated nitrile rubber [J]. Rubber Chemistry & Technology, 1982, 55(5): 1286-1307.
[9] MANJUNATHA C M, TAYLOR A C, KINLOCH A J, et al. The tensile fatigue behavior of a GFRP composite with rubber particle modified epoxy matrix[J]. Journal of Rein-

- forced Plastics & Composites, 2010, 29(14): 2170-2183.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶撕裂强度的测定(裤形, 直角形和新月形试样): GB/T 529—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- China National Standardization Administration. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tear strength (Trouser, angle and crescent test pieces): GB/T 529—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶伸张疲劳的测定: GB/T 1688—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- China National Standardization Administration. Rubber, vulcanized-Determination of tension fatigue: GB/T 1688—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [12] LUO Z, CHEN W, JIN Z, et al. Epoxy resin modified maleic anhydride-grafted-liquid polybutadiene on the properties of short aramid fiber reinforced natural rubber composite[J]. Polymer Composites, 2017, DOI: 10.1002/pc.24397
- [13] 田振辉, 谭惠丰, 谢礼立. 橡胶复合材料疲劳破坏特性[J]. 复合材料学报, 2005, 22(1): 32-35.
- TIAN Zhenhui, TAN Huifeng, XIE Lili. Fatigue damage properties of rubber composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(1): 32-35 (in Chinese).
- [14] 田振辉, 谭惠丰, 杜星文. 两类橡胶复合材料的疲劳特性[J]. 材料工程, 2008(6): 13-15.
- TIAN Zhenhui, TAN Huifeng, DU Xingwen. Fatigue properties of two kinds of rubber composites[J]. Materials Engineering, 2008(6): 13-15 (in Chinese).
- [15] SCHUBEL P M, GDOUTOS E E, DANIEL I M. Fatigue characterization of tire rubber[J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2004, 42(2): 119-154.
- [16] DONG B, LIU C, WU Y P. Fracture and fatigue of silica/carbon black/natural rubber composites[J]. Polymer Testing, 2014, 38: 40-45.
- [17] PAYNE A R, WHITTAKER R E, SMITH J F. Effect of vulcanization on the low-strain dynamic properties of filled rubbers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 16(5): 1191-1212.
- [18] MELNIKOV A Y, LEONOV A I. Damage of unfilled crosslinked rubbers as the scission of polymer chains: Modeling and tensile experiments[J]. Polymer Engineering & Science, 2012, 52(10): 2206-2216.
- [19] PING Z, SHI X, LI J, et al. The structure change of dynamically fatigued unfilled natural rubber vulcanizates[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 115(6): 3535-3541.
- [20] CRUANES C, LACROIX F, BERTON G, et al. Study of the fatigue behavior of a synthetic rubber undergoing cumulative damage tests[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 91: 322-327.
- [21] TIAN M, SU L, CAI W, et al. Mechanical properties and reinforcement mechanisms of hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber composites containing fibrillar silicate nanofibers and short aramid microfibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(3): 1439-1447.
- [22] MULLINS L. Softening of rubber by deformation[J]. Rubber Chemistry & Technology, 2012, 42(1): 339-362.
- [23] КУЧЕРСКИЙ А М, 郭辉. 用拉伸永久变形测定橡胶的松弛性能[J]. 橡胶参考资料, 1983(12): 40-41.
- КУЧЕРСКИЙ А М, GUO Hui. Determination of the relaxation properties of rubber by tensile permanent deformation. [J]. Rubber Reference Materials, 1983(12): 40-41 (in Chinese).
- [24] TIAN M, YIN S, ZOU H, et al. Static and dynamic mechanical properties and fracture morphology of EPDM composites containing silicate nanofibers and short PA-66 microfibers[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(7): 1937-1944.
- [25] 吴卫东, 许涛, 哈德尔别克, 等. 芳纶短纤维与三元乙丙橡胶界面粘合水平评估研究[J]. 橡胶工业, 2012, 59(9): 533-536.
- WU Weidong, XU Tao, BUICK Hardell, et al. Aramid fiber and three EPDM interfacial adhesion level evaluation of[J]. Rubber Industry, 2012, 59(9): 533-536 (in Chinese).