复合材料学报 第20卷 第4期 8月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 4 August 2003

文章编号: 1000-3851(2003)04-0117-05

纵向拉伸对尼龙帘线-橡胶复合材料横向拉伸力学性能影响的实验研究

张丰发, 万志敏, 杜星文
(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用十字形试件,在双轴拉伸条件下研究了尼龙帘线-橡胶复合材料单层板纵向定载荷对横向力学性能的影响和横向定载荷对纵向力学性能的影响。实验结果表明:纵向拉伸载荷对尼龙帘线-橡胶复合材料的横向拉伸力学性能有很大的影响。随着纵向拉伸载荷的增加,横向应力应变关系发生了很大的变化;横向拉伸强度先上升然后又下降;而其断裂变形和变形能却逐渐减小。横向拉伸载荷对尼龙帘线-橡胶复合材料的纵向拉伸力学性能影响却很小。这可能与材料纵向和横线拉伸性能差异太大有关。

关键词: 尼龙帘线-橡胶复合材料; 十字形试件; 双轴拉伸
中图分类号: TB33 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECTS OF LONGITUDINAL TENSION ON TRANSVERSE TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF NYLON CORD-RUBBER COMPOSITE

ZHANG Fengfa, WAN Zhimin, DU Xingwen
(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The effects of longitudinal constant tensile loads on transverse behaviors and transverse loads on longitudinal behaviors of a single ply of nylon cord-rubber composite are studied respectively under biaxial tensile condition with cruciform specimens in this paper. Experiment results indicate that the effects of longitudinal constant tensile loads on transverse tensile behaviors are obvious. Transverse stress-strain behaviors change largely compared with uniaxial transverse tensile behavior; transverse tensile strength increases first and then decreases; fracture strain and deformation energy decrease by increasing of longitudinal tensile loads; the results are induced by common actions of rigidification and damnification caused by longitudinal tensile loads. However, the effects of transverse constant tensile load on longitudinal tensile mechanical behavior are not distinctive. It can be ascribed to large discrepancy between longitudinal and transverse properties of nylon cord-rubber composite.

Key words: nylon cord-rubber composite; cruciform specimen; biaxial tensile condition

作为一种弹性复合材料,橡胶复合材料在轮胎等工程结构中已经得到广泛应用。与一般的复合材料如金属基复合材料、陶瓷基复合材料和塑性基复合材料等不同,橡胶复合材料在拉伸时产生的超大变形给橡胶复合材料双向拉伸变形的测量和双向拉伸性能的研究带来了很多困难。以前对橡胶复合材料的研究主要集中在对其单向静态力学性能和动态疲劳性能上[1],而对橡胶复合材料的静态双向力学性能的研究却未见相关的报道。由于单向实验常常无法精确地描述材料在实际使用时的复杂受力状态,因此为了较准确地建立橡胶基复合材料宏观失效准则,对其双向力学性能的研究就显得很有必要。人们对塑性基复合材料双向力学性能进行了研究,关于正交载荷对塑性基复合材料力学性能的影响也

收稿日期: 2002-02-21; 收修改稿日期: 2002-05-08
作者介绍: 张丰发(1968-),男,博士,主要从事复合材料方面的研究。
通讯作者: 杜星文, E-mail: Duxw@hit.edu.cn

进行了较深入的探讨[2~6]，并建立了一整套评价塑性基复合材料的失效准则[7,8]。Kim 和 Crasto 采用夹心试件研究了石墨/环氧复合材料纵向拉伸和压缩载荷与横向压缩载荷之间的相互作用；Swanson 等采用管状试件也进行了类似的研究。研究表明：纵向与横向载荷之间的相互作用与材料的失效机理有关系。当材料是纤维断裂失效，纵向与横向断裂载荷之间几乎没有相互作用；当材料是基体断裂失效时，纵向与横向断裂载荷之间有很强的相互作用。在双轴载荷条件下，十字形试件是研究结构材料力学性能最常见的一种试件。和其它类型的试件相比，十字形试件一方面可以在实验区域产生均匀的应力和应变场，另一方面可以根据实验的要求改变双轴的载荷比。十字形试件最早运用于金属材料的双轴实验[9]；以后逐渐扩展到复合材料领域，Bert et al.[10] 最早采用这种试件研究了玻璃纤维纺织布增强环氧树脂复合材料层板的双轴力学性能。现在十字形试件已经广泛应用在复合材料双轴拉伸实验中[11,12]。为了保证实验区域均匀应力和应变场的产生，实验中对试件工作区域以外的四个加载臂，进行了增强处理。实验使用的双轴拉伸实验装置是由岛津实验机与一个独立的横向液压驱动加载装置组成。笔者通过十字形尼龙 6-橡胶复合材料的单向单层板的双轴加载实验，研究了正交载荷对尼龙 6-橡胶复合材料力学性能的影响，讨论了在正交载荷的作用时橡胶基复合材料的应力-应变关系、断裂强度及其断裂应变能的变化规律。

1　实　验

1.1　试件的准备

试件为尼龙 6 帘线增强橡胶复合材料的单向单层板，其厚度是 1.0 mm，帘线的直径 D= 0.75 mm，工作区域 20 mm×20 mm。如图 1 所示

原材料是由桦林轮胎股份有限公司提供。试件的成型采用热压成型方法。成型温度 137 ℃，成型压力 4.0 MPa，成型时间 30 min。为了防止尼龙帘线在热成型过程中收缩而使材料变形，在试样成型时施加一定的预张力。试件组成材料的基本参数如表 1 所示。

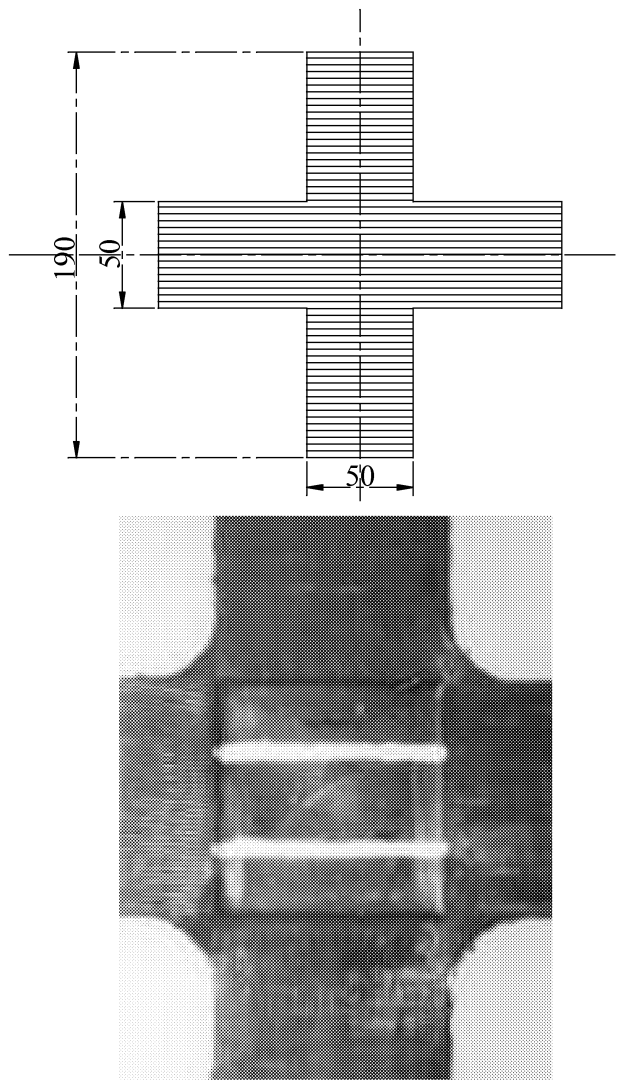

图 1　尼龙 6 帘线增强橡胶复合材料十字型试件

Fig. 1　Cruciform specimen of nylon6 cord reinforced rubber composite

表 1　尼龙 6 和橡胶材料的基本参数

Table 1　Basic mechanical parameter of nylon6 and rubber

材料	杨氏模量/MPa	剪切模量/MPa	泊松比
尼龙 6	2000	19.0	0.01
天然橡胶	3.5	1.20	0.35

由于试件有效工作区域的厚度和其相应的长度相比很小，而且双轴拉力作用在工作平面内，因此可假定试件是处于平面应力状态。通过 MSC. Marc 软件对双轴拉伸时的试件进行分析，结果表明：在双轴拉伸时，试件有效工作区应力分布均匀。

1.2　大变形的测定和数据的采集与处理

橡胶复合材料单向层板的双向拉伸试件在实验中会产生超过 50% 的大应变，为了测量在双轴拉伸条件下的大变形，笔者在变形测量中采用了新型 CCD 非接触式变形测量系统。它包括光学系统、线阵 CCD 及其驱动系统、同步数据采集系统和数据处理软件。为了同时测定在试件两个方向的变形，实验时在试件相对的两个侧面分别画两条间隔 2 mm 的白色平行标记线，两侧面的平行标记线相互垂直，两个 CCD 传感器可以随时监测在双向拉伸过程中两条白色标记线之间的位移变化，从而可确定试件在

两个受力方向上的变形。拉伸载荷数据由两个独立的载荷传感器获得。

由于橡胶复合材料的拉伸变形较大, 为了较准确的表征材料的应力应变关系, 在数据处理时采用 Green-Lagrange 应变和第二 Piola-Kirchhoff 应力。假定每一个工作截面拉伸应变都是常数。如实验前两标记线的距离是 L_0 = 20 mm, t 时刻材料两个标记线之间的距离分别是 L(mm), 由于伸长比 $\lambda = \frac{L}{L_0}$, 相应的 Green-Lagrange 应变为 E_t 可表示为

$$E_t = \frac{1}{2}[\lambda^2 - 1] = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{L_0}\right)^2 - 1 \qquad (1)$$

则与 Green-Lagrange 应变相对应的第二 Piola-Kirchhoff 应力 S_t 可表示为

$$S_t = F/A(L_0/L)^2 \qquad (2)$$

实验中假设其复合材料也是不可压缩的, 则试件在双轴拉伸过程中有效体积 V_0 = 20 mm × 20 mm × 1.0 mm 保持不变, 拉力沿拉伸截面也均匀分布。如果 t 时刻作用在起始截面 50 mm × 1.0 mm 上的拉力为 F_t(KN), 则在 t 时刻作用在起始有效截面为 20 mm × 1.0 mm 上的拉力 $F_t^e = 2/5 \times F_t$; 在 t 时刻作用的横截面面积为 $A_t^e = V_0/L$, 第二 Piola-Kirchhoff 应力 S_t 又可以表示为

$$S_t = F_t^e/A_t^e(L_0/L)^2 \qquad (3)$$

将 F_t^e, A_t^e, V_0 和 L_0 代入公式(3), 则可以得到 t 时刻的应力表达式

$$S_t = \frac{2}{5} \cdot F_t \cdot \frac{L}{V_0} \cdot \left(\frac{L_0}{L}\right)^2 = 400F_t/L \qquad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 纵向载荷对横向拉伸性能的影响

为了研究纵向载荷对横向拉伸性能的影响, 笔者选择了五组不同的纵向载荷, 实验时先固定纵向载荷, 然后连续横向拉伸, 直至试件断裂破坏为止。通过 CCD 变形测量系统和载荷传感器将拉伸变形和载荷记录下来, 通过数据处理, 就可以得到拉伸变形时实验区域横向应力、应变和应变能。纵向载荷对横向拉伸应力-应变关系的影响如图 2 所示。

实验结果表明纵向载荷对横向拉伸应力-应变关系影响很大。随着纵向载荷的增加, 横向拉伸应力-应变曲线逐渐向纵轴靠近, 横向刚度逐渐增加。这可能由于纵向拉伸载荷的存在, 使试件在垂直于纤维方向发生硬化作用, 随着纵向载荷的提高, 这种作用增强, 横向模量也逐渐增大。

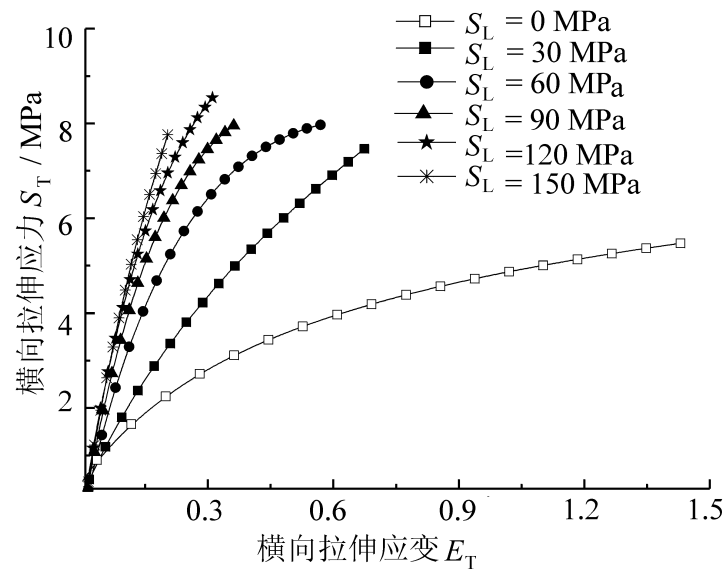

图 2 纵向拉伸载荷对尼龙/橡胶复合材料横向应力-应变曲线的影响

Fig. 2 Effects of longitudinal tensile loads on transverse stress-strain curves of nylon/rubber composite

由于纵向拉伸载荷的影响, 材料横向拉伸强度和断裂应变也发生了显著的变化。纵向拉伸载荷对材料横向拉伸强度和断裂应变的影响如图 3 和图 4 所示。

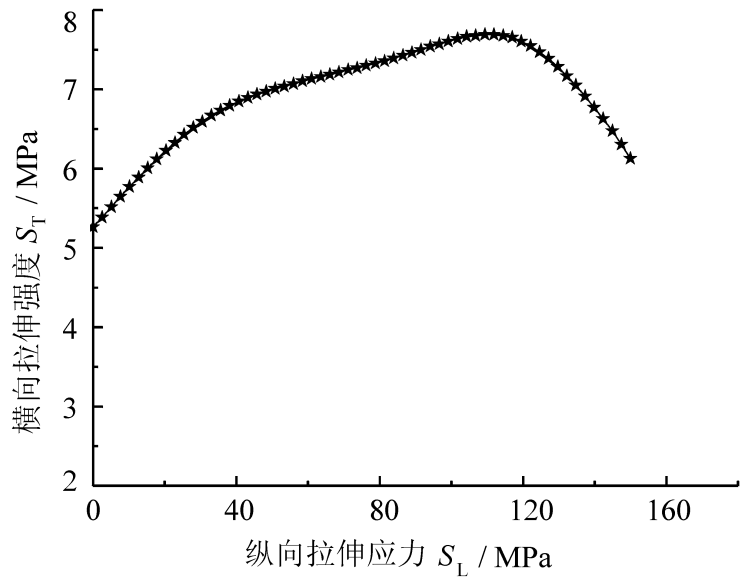

图 3 纵向拉伸载荷对尼龙/橡胶复合材料横向拉伸强度的影响

Fig. 3 Effects of longitudinal tensile loads on transverse tensile strength of nylon/rubber composite

从图 3 中可以看出: 当材料的纵向拉伸应力小于 120 MPa 时, 随着纵向拉伸载荷的增加, 材料在垂直于纤维方向的拉伸强度逐渐升高, 然后在纵向拉伸应力大于 120 MPa 时, 其横向拉伸强度却迅速下降; 从图 4 中可以看出: 横向断裂应变在实验范围内, 随着纵向拉伸载荷的增加, 都逐渐减小。

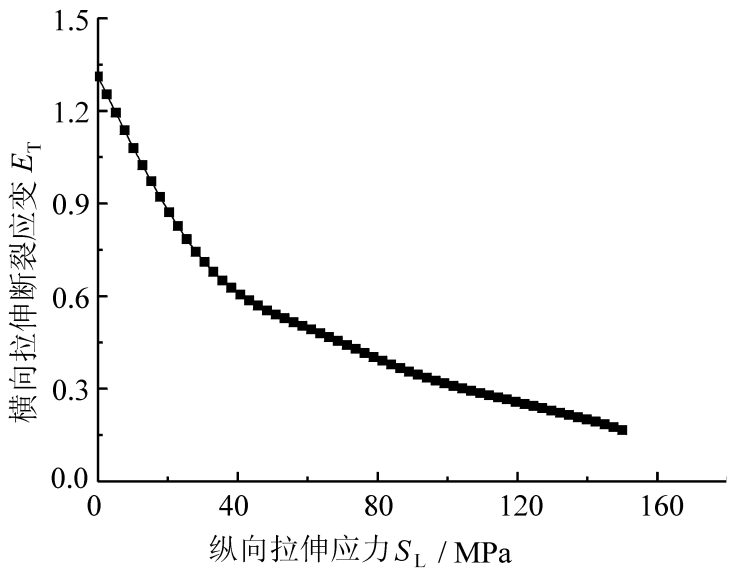

图 4　纵向拉伸载荷对尼龙/橡胶复合材料横向断裂应变的影响

Fig. 4　Effects of longitudinal tensile loads on transverse break strain of nylon/ rubber composite

影响横向拉伸强度的因素主要有: 纵向拉伸对垂直于纤维方向的增强作用和由于纵向拉伸而使纤维和橡胶界面产生的损伤作用。纵向拉伸载荷的作用使试件横向产生压缩作用, 相当于增加了材料的抗拉伸作用, 可以提高材料的强度; 而纵向拉伸也使材料中的纤维与橡胶界面发生损伤作用, 因而又可以降低材料的横向拉伸强度。所以在考虑纵向拉伸对材料横向拉伸强度的影响时, 应该综合考虑这两种作用。实验中, 当材料的纵向拉伸应力小于 120 MPa 时, 随着纵向拉伸载荷逐渐增大, 纵向拉伸载荷对材料的增强作用起主要作用。由于纵向拉伸作用, 使横向发生压缩增强作用, 而且纵向拉伸载荷越大, 则对横向的增强作用就越大, 横向强度在逐渐增加; 在纵向拉伸载荷大于 120 MPa 时, 纵向拉伸载荷对材料的损伤作用起主要作用。由于纵向拉伸作用, 使本来比较完善的截面发生很严重的损伤, 其损伤作用大于纵向载荷对横向的增强作用。因此当纵向拉伸载荷大于 120 MPa 时, 相应的横向拉伸强度又逐渐减小。

纵向的拉伸作用对材料的横向产生很强的压缩作用, 使材料横向拉伸的应力-应变曲线逐渐向纵轴靠近, 横向模量也逐渐增大, 相同的拉伸应力产生的应变显著减少。所以随着纵向拉伸载荷逐渐增大, 材料在垂直于纤维方向的拉伸断裂应变明显下降。纵向拉伸载荷对横向断裂变形能的影响如图 5 所示。

从图 5 中可以看出: 纵向拉伸载荷的存在降低了橡胶复合材料的横向断裂变形能, 而且随着纵向拉伸应力的增加, 其横向断裂能是逐渐降低的。这是由于纵向拉伸载荷使橡胶复合材料产生了一定的损

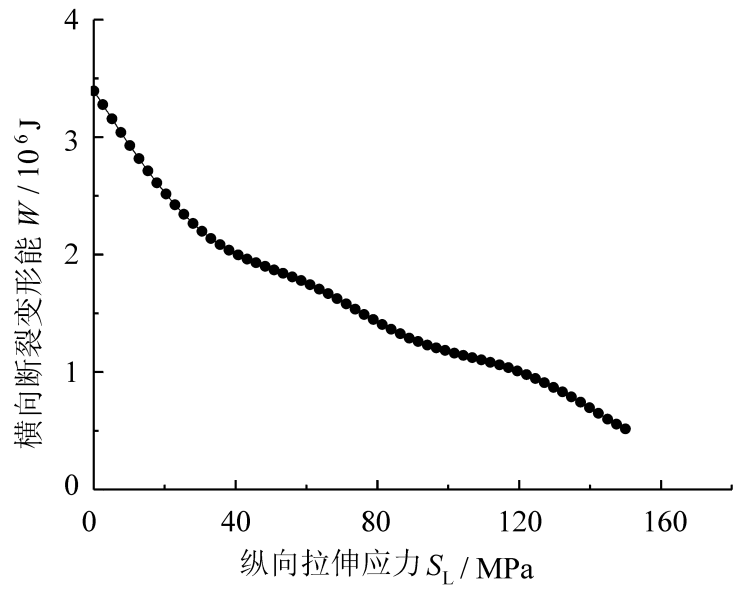

图 5　纵向拉伸载荷对尼龙/橡胶复合材料横向断裂变形能的影响

Fig. 5　Effects of longitudinal tensile loads on transverse strain energy of nylon/ rubber composite

伤, 从而使材料发生失效的断裂变形能显著减低。这与材料的纵向拉伸载荷对橡胶复合材料的横向拉伸断裂应变的影响是相符的。

2. 2　横向拉伸载荷对纵向应力-应变关系的影响

为了研究横向加载对材料纵向力学性能的影响, 实验中选择了四组不同的横向定载荷, 实验时首先横向加载至预定载荷, 然后再纵向连续拉伸, 直至拉伸断裂失效为止。横向拉伸载荷对纵向应力-应变关系的影响如图 6 所示。

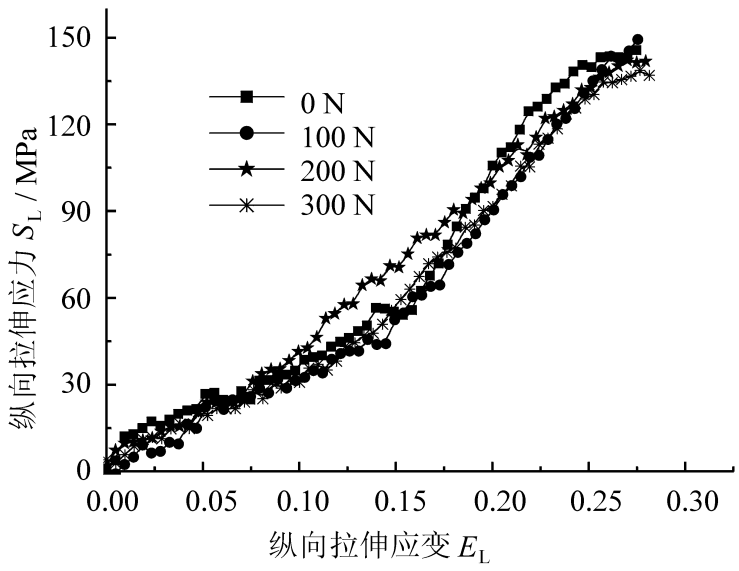

图 6　横向拉伸载荷对尼龙/橡胶复合材料纵向应力-应变曲线的影响

Fig. 6　Effects of transverse tensile loads on longitudinal stress-strain curves of nylon/ rubber composite

从图 6 中可以看出: 横向拉伸载荷对材料纵向应力-应变关系的影响很小。有横向拉伸载荷的纵向应力-应变关系曲线与没有横向拉伸载何的曲线几乎没有什么区别。垂直于纤维方向的拉伸载荷使纤维发生屈曲, 对尼龙/橡胶复合材料纤维方向的拉伸

力学性能应该会产生影响。但对橡胶复合材料来说, 由于材料纵向和横向拉伸性能相差很大, 致使横向拉伸应力对纵向性能影响很小。所以横向拉伸载荷对材料纵向应力-应变关系的影响很小。相类似, 横向拉伸载荷对橡胶-复合材料纵向拉伸强度和断裂变形影响很小, 几乎看不出有显著的变化。

3 结 论

笔者通过对尼龙/橡胶复合材料的双轴拉伸实验, 对正交拉伸载荷对材料拉伸性能的影响进行了研究。得到如下结论。

(1) 对尼龙/橡胶复合材料来说, 纵向拉伸载荷对材料横向拉伸性能有很大的影响。它使材料的横向拉伸应力-应变曲线逐渐向纵轴靠近, 横向刚度逐渐增加。这是纵向拉伸而使材料产生的横向增强作用和损伤作用共同作用的结果。与没有纵向拉伸载荷的材料相比, 随着纵向拉伸载荷的增加, 材料横向拉伸强度先上升然后又下降; 在垂直于纤维方向的断裂变形能和断裂应变都逐渐减小。这与橡胶复合材料由于纵向拉伸而使横向产生的增强作用和损伤作用有关。

(2) 横向拉伸载荷对尼龙/橡胶复合材料的纵向拉伸应力-应变关系、纵向拉伸强度和断裂变形的影响都很小。这是由于材料纵向和横向拉伸性能相差很大, 致使横向拉伸应力对纵向性能影响很小而引起的。

通过研究, 一方面加深了对尼龙/橡胶复合材料的双轴拉伸性能的理解, 另一方面也为建立尼龙/橡胶复合材料失效预报模型打下了一定的基础。

参考文献:

[1] 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- 269.

[2] Kim R Y, Crasto A S. Failure of carbon fiber-reinforced epoxy composites under combined loading [A]. In: Miravete A, ed. Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials (ICCM IX), Vol V, Composites Behavior [C]. England: Woodhead Publishing Limited, 1993. 15- 22.

[3] Kim R Y, Crasto A S. An improved test specimen to determine composite compression strength [A]. In: Miravete A, ed. Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials (ICCM IX), Vol V, Composites Properties and Applications [C]. England: Woodhead Publishing Limited, 1993. 621- 630.

[4] Swanson S R, Christoforou A P. Response of quasi-isotropic carbon/epoxy laminates to biaxial stress [J]. Journal of Composite Materials, 1986, 2: 457- 471.

[5] Swanson S R, Christoforou A P, Colvin G E. Biaxial testing of fiber composites using tubular specimens [J]. Experiments Mechanics, 1987, 28: 238- 243.

[6] Swanson S R. Biaxial failure criteria for toughened resin carbon/epoxy laminates [A]. In: Proceedings of the American Society for Composites Seventh Technical Conference [C]. Lancaster: Technomic Publishing Company Inc, 1992. 175- 183.

[7] Ellyin F, Carroll M, Chiu A S. The behavior of multidirectional filament wound fiber glass/epoxy tubular under biaxial loading [J]. Composites Part A, 1997, 28(9- 10): 781- 790.

[8] Holger T. A review of biaxial strength of fiber-reinforced plastic [J]. Composites Part A, 1998, 29A: 869- 886.

[9] Brown M W, Miller K J. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions [A]. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Vol 187, No 65) [C]. 1973. 745- 755.

[10] Bert C W, B L, Ray J D. Behavior of fiber-reinforced plastic laminate under biaxial loading [J]. STP, 1969(460): 362- 380.

[11] Tandon G P, Kim R Y; Bechel, V. T. Evaluation of interfacial normal strength in a SCS-/epoxy composite with cruciform specimens [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(12- 13): 2281- 2295.

[12] Gundel D B, Warrier S G, Miracle D B. The transverse tensile behavior of SiC-fiber/Ti-6Al-4V composites 2. Stress distribution and interface failure [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(7): 187- 196.