

芳纶纤维的表面处理及其在橡胶工业中的应用

严志云, 刘安华, 贾德民

(华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:介绍了芳纶纤维的种类、性能、表面改性及其在橡胶制品中的应用。芳纶纤维高模量、高强度、低密度、耐氧化、耐腐蚀的性能使其在轮胎、软管、胶布等橡胶基体复合材料领域作为增强材料有着广泛的应用前景。由于表面的惰性限制了芳纶纤维的应用, 因而其表面处理尤为重要, 硝化/还原、氯磺化等化学改性和等离子体、电子束等物理改性均可改善芳纶纤维表面的物理和化学状态, 提高其与基体间的粘合性能。

关键词:芳纶纤维; 结构; 表面改性; 骨架材料; 橡胶

中图分类号: TQ330.38⁺9; TQ342⁺.7 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-890X(2004)01-0056-05

芳纶纤维具有无机纤维的物理性能和有机纤维的加工性能, 其密度与聚酯纤维接近, 强度是聚酯纤维的2倍、玻璃纤维的3倍、钢丝的6倍, 模量远大于玻璃纤维和钢丝, 还具有极好的耐热、耐腐蚀、耐疲劳性能和尺寸稳定性。芳纶纤维是一种轻质的增强材料, 是橡胶基复合材料理想的骨架材料^[1,2], 现已广泛应用于高级轮胎帘线、高压软管、V带、胶布、绳缆和密封垫等橡胶工业制品中。本文介绍芳纶纤维的种类、结构、性能、表面处理及其在橡胶基复合材料中的应用研究情况。

1 芳纶纤维的结构与性能

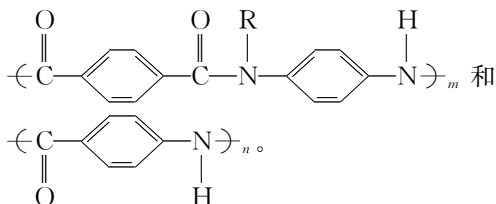
1.1 芳纶纤维的发展^[3]

20世纪70年代, 杜邦公司开发了高强度、高模量、耐高温的高性能芳纶纤维 Kevlar, 它是一种新型的芳香族聚酰胺纤维。芳香族聚酰胺纤维分为邻位、间位及对位3种, 邻位类无商业化价值; 间位芳香族聚酰胺商品化的产品有 Nomex (杜邦) 和 Teijinconex (Teijin); 对位有 Kevlar (杜邦)、Technora (Teijin) 和 Twaron (原 Akzo Nobel, 现并入 Teijin)。1986年荷兰 Akzo 公司相同结构的 Twaron、1987年日本 Teijin 公司类似结构的 Technora 以及俄罗斯的 Apmoc 纤维打破了

杜邦 Kevlar 的一统天下。目前, Kevlar 产量约为 3 万 t · a⁻¹, Twaron 为 1.3 万 t · a⁻¹, Technora 为 1 400 t · a⁻¹。

1.2 芳纶纤维的结构与性能

新型的芳香族聚酰胺纤维, 即 PPTA (para-phenylene terephthalamide) 纤维, 简称聚芳酰胺。为了与其它聚酰胺类高分子聚合物区别, 美国联邦商务部将芳香族聚酰胺定义为: 构成纤维的材料是一种长链合成聚酰胺, 其中 85% 的酰胺键直接连在两个芳香环上^[4]。关于 PPTA 纤维的结构有多种说法^[5~8], 各种模型均有其不足, 不过 PPTA 纤维存在厚度为 0.1~1 μm 的高取向性结构是可以肯定的。由于生产工艺不同, 芳纶纤维品种、结构及性能也有所不同。以 Kevlar 为例, 该纤维有 Kevlar-29 和 Kevlar-49 两类^[1], 其中, Kevlar-29 是由聚对苯二甲酸与对苯二胺合成的聚对亚苯基对苯酰胺; 而 Kevlar-49 是由对氨基苯甲酸或对苯二酰氯与对苯二胺反应制得。Kevlar-29 有 3 种型号, 分别为 T-960, T-961 和 T-964。Kevlar-49 有 4 种型号, 分别为 T-968, T-969A, T-968B 和 T-967C, 它们主要的分子结构为



由于酰胺基团被芳环分离且与苯环形成 π 共

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59933060);“十五”国家科技攻关计划重点项目(2002BA314B06)

作者简介:严志云(1963-),男,湖北荆州人,华南理工大学副教授,博士,主要从事高分子材料的合成制备与改性工作。

轭效应,内旋位能相当高,分子链节呈平面刚性伸直状,使芳纶纤维具有极高的拉伸强度(仅次于石墨纤维和聚苯并咪唑纤维)和优异的耐热性及韧性。芳纶是一种耐高温(最高使用温度为 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_g > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 分解温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高模量、高强度、密度为钢丝 $1/4$ 的纤维材料,其强度超过了钢丝^[9]。芳纶纤维比其它合成纤维更耐氧化、氨化和醇解等化学侵蚀,同时具有良好的耐强碱性、耐有机溶剂和耐漂白剂性能以及抗虫蛀和抗霉变能力。尽管开发芳纶的初衷是用于航天领域,但它已广泛应用于消费纺织品和产业用纺织品^[4],芳纶纤维增强橡胶基复合材料以其独特的耐高温性能成为各国研究的热点。

2 芳纶纤维的表面处理

芳纶是一种由高度取向结晶微区组成的材料,具有一些缺陷和空隙,但没有无定形区。由于分子链段中庞大苯环的位阻作用,酰胺基团较难与其它原子或基团发生反应,具有化学惰性,因而芳纶纤维同基体的粘合性很差^[2,10],必须进行一定的工艺处理使纤维表面取向降低或增加一定数量的活性基团,如 $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$ 和 $-\text{NH}_2$ 等,这些基团可与基体间形成反应性共价键结合,从而提高复合材料的界面剪切强度和剥离强度。

芳纶纤维表面改性方法主要有物理改性和化学改性两种^[11]。物理改性方法是通过等离子体、电子束等物理技术对纤维表面进行刻蚀和清洗,并在纤维表面引入羟基、羰基等极性或活性基团;还可以在纤维表面形成一些活性中心,进而引发接枝反应,通过刻蚀、清洗、活化和接枝的综合作用改善纤维表面的物理和化学状态,进而加强纤维与基体之间的相互作用。化学改性则是通过硝化/还原、氯磺化等化学反应在纤维表面引入氨基、羟基、羧基等活性或极性基团,通过化学键合或极性作用提高纤维与基体之间的粘合强度。在上述改性方法中,等离子体改性是应用最为广泛的一种。

2.1 物理改性

用氮气、氧气等气体对 Kevlar-49 进行等离

子体处理后,纤维/树脂界面剪切强度可提高 $43\% \sim 83\%$,而纤维强度仅下降 10% ^[12]。Kevlar 纤维表面经等离子体引发界面缩聚形成锦纶 66 薄层改性处理^[13],也可提高纤维与基体的粘合强度。

用四氯化碳/氧气、空气/水^[14]、氮气、空气^[15]等进行等离子体处理并结合浸渍处理技术,可显著提高芳纶帘线与橡胶的粘合性,同时具有操作简便、不污染环境的特点,可进行连续工业化生产。

Janca J 等^[16]用氮气和干燥空气对聚酯和芳纶纤维进行等离子体处理分两步进行:第一步是用等离子体除去纤维表面的防护油层;第二步是用氮气和干燥空气对聚酯或芳纶纤维进行等离子体处理,这才是真正意义上的纤维表面改性。该方法有效地提高了复合帘线与橡胶的粘合强度。用电子自旋光谱对纤维表面进行的观察发现,纤维表面的防护油层是表面改性的主要技术难点。栅极放电的操作频率对粘合性有很大影响,低频放电时,纤维表面的性质无明显变化;而在高频放电(提高至 100 kHz)时,能显著提高帘线与橡胶的粘合强度。

在稳定磁场下,用热磁处理芳纶纤维填充塑料,剥离强度较热固化的纤维提高 $20\% \sim 25\%$ ^[17]。

Rahel J 等^[18]用常压氮气脉冲表面电子放电法处理聚酯单纤丝,发现其与环氧树脂基质的粘合强度较未处理的聚酯单纤丝提高 8 倍以上,而对聚酯单纤丝的物理性能没有任何损害。因此认为,粘合强度的提高应归因于极性基团的相互作用,而不是表面积的增加。

Shijian L 等^[19]用等离子体聚合工艺将单体吡咯或乙炔在芳纶帘线或纤维的表面进行等离子体聚合,产生 $100 \sim 200\text{ nm}$ 的薄膜,橡胶与等离子体聚合膜之间的互穿网络作用显著提高了芳纶纤维与橡胶之间的剥离强度。

刘丽等^[20]采用超声波强迫浸润技术处理环氧树脂体系,使基质内产生空化效应,释放出巨大的空化能,降低了树脂体系的粘度和表面张力,也促进了树脂对芳纶纤维的浸润性和粘合性。

邱军等^[21]针对芳纶纤维横向拉伸性能较差的特点,利用一定剂量的 γ -射线对芳纶 Apmoc 纤维的表面及内部进行处理,发现 Apmoc 微纤之间发生了辐照交联反应,结构发生了变化,复丝拉

伸强度随辐照剂量的增大,先逐渐增大后减小,较未辐照 Apmoc 增强复合材料的横向拉伸强度提高 16.1%。此方法具有常温处理、操作简便和可连续生产的特点。

2.2 化学改性

雷渭媛等^[22]将芳纶 Kevlar-49 表面接枝环氧化合物,发现其表面较未处理纤维粗糙,表面结构由 PPTA 变为 PPTA-g-Epoxy,失去了分子链的规整性和刚性,表层聚集态结构由结晶结构变为非晶结构,与聚合物基质的粘合性能显著提高。

1985 年杜邦公司用缩合酚醛和环氧树脂的稀水乳液混合物浸渍芳纶复丝,经热处理后使其在纤维表面形成不完全固化膜,从而改善了纤维表面与基体的粘合性。加捻后的芳纶纤维浸渍一次间苯二酚甲醛胶乳(RFL)与 NR 的剥离强度可达 $7.3 \sim 9.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

采用两次浸渍工艺,先将芳纶纤维浸入环氧乳液或环氧与封闭异氰酸酯乳液,或由异氰酸酯、聚乙烯亚胺、三羟甲基酚和叠氮类化合物溶液作底涂,然后再浸 RFL 作为表涂,也可显著提高芳纶与基体的粘合强度。

用改性的 RFL 一次浸渍是在 RFL 中分别添加对氯苯酚-甲醛(Vulcabond E)树脂、封闭异氰酸酯分散体系等。封闭异氰酸酯的粒径是影响粘合性的关键因素,热处理温度由于与封闭异氰酸酯解封闭反应有关,因此也是重要因素。在 $218 \sim 232 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,粒径为 $2 \sim 3 \text{ }\mu\text{m}$ 时,用改性 RFL 一次浸渍过的芳纶帘线的剥离强度比用 RFL 浸渍过的经粘合活化的芳纶帘线提高 24%。

从流变学的观点看,胶料硫化前流动性好,与纤维包覆状态好,有利于胶料与纤维的粘合。硫化体系对粘合性能有影响,硫黄含量过大的胶料与芳纶的粘合性能降低。胶料中配合剂及其反应产物对粘合性能也有很大影响。芳纶的胺解比聚酯弱,但乙二醇类的化学药品会引起侵蚀。此外,间-甲-白增粘体系(沉淀法白炭黑加入含有六亚甲基四胺和间苯二酚的胶料中形成的粘合体系)对胶料与芳纶有增粘效果,若与浸渍过 RFL 体系的帘线结合效果更好。

宋月贤等^[23]用不含有机溶剂的水溶性高活性改性环氧树脂(SJR-2)活化液和由预缩合间苯

二酚-甲醛树脂(SJR-1)配制的 RFL 浸渍液处理芳纶帘线,获得了令人满意的粘合活化效果。此活性剂不含有机溶剂,工艺简单,可以避免纤维表面未固化的环氧树脂对人体的侵害。芳纶带束层航空轮胎中芳纶帘线与胶料的粘合性能优于全锦纶轮胎。

Lin T K 等^[24]将 Kevlar-49 用氯磺酸磺化后,发现与双马来酰亚胺复合材料的层间剪切强度和 T 型剥离强度均显著提高,且纤维增强的复合材料加工流动性和浸润能力好;但随氯磺酸浓度的增大和作用时间的延长,剪切强度和 T 型剥离强度有所下降。这是由于氯磺酸对纤维有很强的渗透能力,对其内部结构产生了较大的破坏作用,因此有一个最适宜的浓度和处理时间的控制问题。

用溴蚀刻^[25,26] Kevlar,再用溴代乙酸接枝,使其表面变粗糙,拉伸强度随溴化处理时间延长而略有下降,与基质间的层间剪切强度可达 28.45 MPa,较未处理的 Kevlar 增大 12%。用二甲基亚砷和氢化钠处理 Kevlar 表面,再接枝溴代乙酸,Kevlar 纤维与环氧树脂间的层间剪切强度可提高 12%^[27]。

将 NBR 和 Kevlar 用硅烷偶联剂处理后^[28~31],材料表现出优异的强伸性能,且硅烷偶联剂用量在 0.5~2 份时,即可显著提高橡胶与 Kevlar 的粘合力。

Sunan S 等^[32]将 Kevlar pulp 用聚丙烯接枝马来酸酐(PP-g-MA)反应性相容剂处理,提高了 Kevlar 浆粕与聚合物基质的粘合强度,显著提高了复合材料的模量、拉伸强度和扯断伸长率。

3 芳纶纤维在橡胶基质中的应用

3.1 芳纶在轮胎中的应用

由于芳纶具有高强度、高模量、低滞后损失、耐高温性能好和低密度等特点,用它作高性能轿车子午线轮胎的带束层骨架材料,不仅可以提高轮胎吸收地面冲击的能力,改善舒适性,而且可以降低噪声^[33]。研究^[34,35]结果表明,以芳纶作为带束层骨架材料的轮胎滚动阻力较使用钢丝的轮胎减小 5%~7%,采用包边带束层的轮胎滚动阻力比采用露边带束层的更低。芳纶用于载重轮胎,胎体质量可减小 3~5 kg,燃油经济性提高 1.25%。由于减少了胎体帘布层数,对轮胎轻量

化和降低生热均有利,同时有利于提高高生热行驶时帘布层的耐久性。芳纶用于航空子午线轮胎的带束层,在飞机起飞、着陆滑行时,能表现出优异的耐磨性能。此外,芳纶用于工程机械轮胎胎体外侧增强层,可以使其获得良好的耐切割性能。

从技术角度考虑,芳纶可用作轮胎任何部位的骨架材料,甚至可与树脂结合取代钢丝制造轮胎胎圈,大大减小轮胎的质量^[35]。

3.2 芳纶纤维在胶管中的应用

芳纶纤维也是胶管增强材料的最佳选择^[36]。胶管所采用的传统增强材料有钢丝、锦纶、聚酯、人造丝等。由于要求胶管承受很高的压力和温度,并能适应苛刻的工作环境,因此要求其增强层不仅耐高温、高压,而且具有优异的综合性能。Kevlar 纤维是胶管增强材料的最佳选择。目前,越来越多的汽车胶管、化学工业用胶管、石油工业用胶管、航空工业用各种液压胶管以及海洋用胶管采用 Kevlar 纤维作增强材料。

在新型汽车中,发动机和废气排放系统的使用温度达到 150 ℃,一般纤维增强胶管很难满足其要求。美国 Chrysler 公司和 Gates 公司则采用 Kevlar 纤维作为汽车冷却装置胶管的增强材料。

美国 Gates 公司为巴西近海采油项目制作了一种大口径的胶管,采用 Kevlar 纤维和钢丝作增强层。这种胶管的内径为 25.4 cm,每根长为 12 m,设计工作压力为 5.49 MPa,弯曲半径为 1.5 m,胶管的外层胶为 CR。美国 Gates 公司还采用 Kevlar 纤维制作大口径输泥浆胶管,工作压力为 3.43 MPa。美国 Goodall 公司也采用 Kevlar 纤维作胶管增强材料,生产用于输送石油等介质的的大口径胶管。此外,芳纶在农用胶管、航空工业胶管中都有广泛的应用。

3.3 芳纶在胶布制品中的应用^[37]

用芳纶纤维制成的胶布制品强力大、撕裂强度高,伸长率比锦纶、聚酯小得多,质量和厚度也有所减小,且有耐穿刺、耐紫外线、耐燃性好的特点。芳纶胶布还用于制作防护服和防弹背心,主体基材采用 Kevlar 纤维织物,在基材上罩一层由 Teflon, Nomex 和 Kevlar 混合织物层构成的防热复合盖层和 4 层由聚酯构成的防射线层。由一层 CR/锦纶胶布和一层 PU 气囊层制作的防护服质

量可减小 50%,其强度高,防护能力强。

3.4 芳纶浆粕补强橡胶

近年来发展的芳纶浆粕(PPTA-Pulp)密度为 $1.41 \sim 1.42 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,比 PPTA 长纤维略小,表面呈毛绒状,微纤丛生,毛羽丰富,粗糙度如木材浆粕,纤维轴向尾端原纤化成针尖状,使其表面积达 $7 \sim 12 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,是长纤维的 10 倍以上^[38]。浆粕纤维的长度和直径呈一定的规律分布,平均长度为 2~4 mm,长径比为 60~120,其表面氨基含量也是长纤维的 10 倍以上,从而使其与酰胺类的复合树脂有很好的亲和性,也可在浆粕的界面与基体形成氢键,增强复合效果。芳纶浆粕是芳纶纤维高度原纤化的品种,与橡胶基质有较高的机械嵌合力^[39]。芳纶浆粕的另一个显著优于碳纤维及玻璃纤维的特点是分散混合性能良好,而且具有很好的韧性,因此无论在如何强烈的混合加工过程中都不会发生断裂,也不会降低复合纤维的长径比,这一直是碳纤维和其它矿物纤维难以解决的问题。

此外,芳纶纤维还在宇航材料、体育器材和土木建筑等领域有着广泛的应用。

4 结语

目前,芳纶纤维的应用研究主要集中在对芳纶纤维的表面处理,表面处理虽然提高了芳纶与基质的粘合性,但或多或少地对纤维的强度有所损害。为了增强芳纶纤维与基体的粘合,对其进行表面处理固然重要,但对塑料或橡胶等基体或基体表面的改性,如橡胶基体增粘方面的研究也应引起人们的重视。相信随着研究的不断深入,芳纶纤维的应用范围将越来越广。

参考文献:

- [1] Fold A P. Reinforcement of rubber through short individual filaments[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1976, 49 (2): 379.
- [2] Yue C Y, Padmanabhan K. Interfacial studies on surface modified Kevlar fibre/epoxy matrix composites[J]. Composites: Part B, 1999, 30(2): 205-217.
- [3] 马晓光,刘越. 高性能纤维的发展及其在先进复合材料中的应用[J]. 纤维复合材料, 2000, 17(4): 14-18.
- [4] 赵钰,吴文隆. 对位芳香聚酰胺纤维的性质、裁剪加工及应用(1)[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(1): 22-27.
- [5] Rao Y, Waddon A J, Farris R J. The evolution of structure and properties in poly(p-phenylene terephthalamide) fibers

- [J]. *Polymers*, 2001, 42(13): 5 925-5 935.
- [6] Hindeleh A M, Abdo S M. Relationship between crystalline structure and mechanical properties in Kevlar 49 fibres[J]. *Polymer Communications*, 1989, 30(6): 184-186.
- [7] Northolt M G, Aartsen J J V. On the crystal and molecular structure of poly-(p-phenylene terephthalamide)[J]. *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition*, 1973, 11(5): 333-337.
- [8] Dobb M G, Johnson D J, Saville B P. Supramolecular structure of a high-modulus polyaromatic fiber (Kevlar 49)[J]. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 1977, 15(12): 2 201-2 211.
- [9] 赵克熙. 原苏联芳纶复合材料研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 1995, 25(5): 8-19.
- [10] Lee S P, Chian K S, Mullarky R H. Effects of bromination and hydrolysis treatments on the morphology and the tensile properties of Kevlar-29 fibres[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1994, 13(3): 305-309.
- [11] 董卫国. 高性能纤维表面处理技术[J]. *山东纺织科技*, 2001, 11(6): 44-46.
- [12] Sen G S. Plasma surface modification of advanced organic fibres[J]. *Composites Science and Technology*, 1994, 52(4): 20-27.
- [13] Salehi M H, Ait K A, Brisson J. Improvement of mechanical properties of composites through polyamide grafting onto Kevlar fibers[J]. *Polymer Engineering Science*, 1996, 36(6): 778-785.
- [14] Dane K P, Massillon J, Derck S, *et al.* Process to produce reinforced tire cords with plasma treated fibers incorporated into a rubber/blocked isocyanate composition[P]. USA: USP 5 501 880. 1996-03-26.
- [15] Derck S, Munroe F, Syed K M, *et al.* Process for the surface treatment of polymers for reinforcement-to-rubber adhesion[P]. USA: USP 5 053 246. 1991-10-01.
- [16] Janca J, Stahel P, Buchta J, *et al.* A plasma surface treatment textile fabrics used for reinforcement of car tires[J]. *Plasmas and Polymers*, 2001, 6(1/2): 15-26.
- [17] Manko T A, Dzhur E A, Sanin F P, *et al.* Effect of magnetic treatment on the structure and properties of aramid-fiber-reinforced epoxy plastics[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2001, 37(2): 171-174.
- [18] Rahel J, Cernak M, Hudec I, *et al.* Surface modification of polyester monofilaments by atmospheric-pressure nitrogen plasma[J]. *Plasma and Polymers*, 2000, 5(3/4): 119-127.
- [19] Shijian L, Wim J, Van O. Surface modification of textile tire cords by plasma polymerization for improvement of rubber adhesion[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2000, 73(1): 121-137.
- [20] 刘 丽, 张志谦, 黄玉东, 等. 超声作用对芳纶/环氧浸润行为的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2002, 10(1): 69-72.
- [21] 邱 军, 张志谦. 芳纶 Apmoc 纤维辐照处理研究[J]. *合成纤维*, 2001, 30(1): 25-27.
- [22] 雷渭媛, 高柳素夫. N-接枝环氧化合物的表面特性[J]. *宇航材料工艺*, 1995, 25(5): 37-40.
- [23] 宋月贤, 袁安国, 王有道. 芳纶帘线与 NR 的粘合性能研究[J]. *橡胶工业*, 1998, 45(11): 660-662.
- [24] Lin T K, Wu S J, Lai J G, *et al.* The effect of chemical treatment on reinforcement/matrix interaction in Kevlar-fiber/bismaleimide composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(9): 1 873-1 878.
- [25] Lewin M, Guttmann H. Method of improving the sorption capacity of polymers[P]. USA: USP 4 066 387. 1978-01-03.
- [26] Breznick M, Banbaji J, Baklagina Y G, *et al.* Surface treatment technique for aramid fibres[J]. *Polymer Communications*, 1987, 28(1): 55-60.
- [27] Lin Jeng-Shyong. Effect of surface modification by bromination and metalation on Kevlar fibre-epoxy adhesion[J]. *European Polymer Journal*, 2002, 38(1): 79-86.
- [28] Oh T S, Lee Y J. Manufacture of Kevlar-containing nitrile butadiene rubber using silane coupling agent[J]. *Synthetic Elastomers and Natural Rubber*, 2000, 15(1): 115-126.
- [29] Benrashid R, Tesoro G C. Effect of surface-limited reactions on the properties of Kevlar fibres[J]. *Textile Research Journal*, 1990, 60(6): 334-344.
- [30] Wu S R, Sheu G S, Shyu S S. Kevlar fiber-epoxy adhesion and its effect on composite mechanical and fracture properties by plasma and chemical treatment[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, 62(11): 1 347-1 360.
- [31] Lin T K, Kuo B H, Shyu S S, *et al.* Improvement of the adhesion of the fibre to bismaleimide resin by surface chemical modification[J]. *Journal of Adhesion Science Technology*, 1999, 13(5): 545-560.
- [32] Sunan S, Taweechai A. Kevlar reinforcement of polyolefine-based thermoplastic elastomer[J]. *Polymer*, 1999, 40(23): 6 437-6 442.
- [33] 郑元锁, 宋月贤, 王有道. 芳纶短纤维增强橡胶基复合材料的研 究及应用现状[J]. *化工新型材料*, 1997, 25(12): 7.
- [34] 周梦玲. 芳族聚酰胺纤维在轮胎中的应用[J]. *轮胎工业*, 1996, 16(6): 335-337.
- [35] Liz W. Aramid: where is it in tyres? [J]. *European Rubber Journal*, 1998, 180(3): 24.
- [36] Liz W. EPDM compounds for coolant hose under scrutiny [J]. *European Rubber Journal*, 2000, 182(11): 22-29.
- [37] 张国滨. 芳纶纤维在胶管胶布制品中的应用[J]. *沈阳化工*, 1997, 13(1): 41-43.
- [38] Merriaman E A. Aramid pulp processing and properties for industrial papers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1984, 67(8): 66-68.
- [39] 尤秀兰, 刘兆峰. 芳纶浆粕纤维在橡胶制品中的应用[J]. *特种橡胶制品*, 2002, 23(2): 17-20.