复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第35卷 第6期 6月 2018年
Vol. 35 No. 6 Jun 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.006

# 芳纶纤维表面改性及其对芳纶/橡胶复合材料黏合性能的影响

汪伦合[1]，宋明根[3]，张斌[1,2]，苏娟娟[1,2]，韩建*[1,2]

（1. 浙江理工大学 材料与纺织学院，杭州 310018；2. 浙江理工大学 浙江省产业用纺织材料制备技术重点实验室，杭州 310018；3. 浙江尤夫高新纤维股份有限公司 湖州 313017）

**摘　要：** 以原位乳液聚合方法合成水性聚氨酯预聚体（WPUP）包覆纳米ZnO粒子（ZnO@WPUP），将KOH预处理后的芳纶纤维浸渍在改性ZnO乳液中进行二次处理，进一步与天然橡胶硫化，得到ZnO@WPUP改性芳纶/橡胶复合材料，并通过FTIR、SEM和H抽出实验等测试分析ZnO@WPUP对芳纶/橡胶复合材料黏合性能的影响。结果表明：WPUP能有效提高ZnO分散性，随着WPUP含量增加，ZnO@WPUP在芳纶纤维表面分散更加均匀，纤维表面粗糙度增大，改善了芳纶纤维表面橡胶的黏附量，从而大幅度提高芳纶/橡胶复合材料的黏结强度。

**关键词：** 芳纶纤维；ZnO；聚氨酯；改性；黏结强度；复合材料

**中图分类号：** TB332　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2018)06-1421-07

## Surface modification of aramid fibers and its effect on adhesion property of aramid/rubber composites

WANG Lunhe[1], SONG Minggen[3], ZHANG Bin[1,2], SU Juanjuan[1,2], HAN Jian*[1,2]

(1. School of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Provincial Key Lab. of Industrial Textile Materials & Manufacturing Tech, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. Zhejiang Unifull Industrial Fiber Co. Ltd., Huzhou 313017, China)

**Abstract:** The waterborne polyurethane prepolymer (WPUP) encapsulated ZnO particles (ZnO@WPUP) were synthesized by using in-situ emulsion polymerization method. The aramid fibers pretreated by KOH were then secondly treated by modified ZnO emulsion. In addition, aramid/rubber composites modified by ZnO@WPUP were obtained by the vulcanization between aramid fiber and nature rubber. Meanwhile, the influence of ZnO@WPUP on the adhesion property of aramid/rubber composites was analyzed by FTIR, SEM and cord-H-pull test. The results show that WPUP can effectively enhance the dispersing property of ZnO. The roughness and dispersing property of ZnO@WPUP on the surface of aramid fibers increase obviously as the content of WPUP increasing. Thereby the modified ZnO can effectively improve the amount of adhesive rubber on the aramid fibers surface, and the adhesion strength of aramid/rubber composites is enhanced significantly.

**Keywords:** aramid fibers; ZnO; polyurethane; modified; adhesion strength; composites

芳纶纤维具有高强度、高模量和耐疲劳等优良的性能。近年来已被广泛应用于运输、机械、采矿、化工和冶金等领域，但芳纶纤维呈明显的皮芯结构，表面晶格致密，具有高度结晶的分子链结构和较大的位阻效应[1]，导致纤维与橡胶黏结性较差，大大限制了芳纶纤维在轮胎帘子线和输送带领

**收稿日期：** 2017-05-19；**录用日期：** 2017-07-27；**网络出版时间：** 2017-08-21 19:28
**网络出版地址：** https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.006
**基金项目：** 浙江省重点研发计划(2017C01097)
**通讯作者：** 韩建，博士，教授，博士生导师，研究方向为产业用纺织材料　E-mail：hanjian8@zstu.edu.cn
**引用格式：** 汪伦合，宋明根，张斌，等. 芳纶纤维表面改性及其对芳纶/橡胶复合材料黏合性能的影响[J]. 复合材料学报，2018，35(6)：1421-1427.
WANG Lunhe, SONG Minggen, ZHANG Bin, et al. Surface modification of aramid fibers and its effect on adhesion property of aramid/rubber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1421-1427 (in Chinese).

域的应用。因此，对芳纶纤维表面改性，以改善与橡胶基体的黏合强度显得尤为重要[2-3]。

目前，国内外主要是通过表面刻蚀、电化学改性、铬酸氧化-表面涂覆复合处理、接枝处理和等离子体处理等一系列表面物理化学改性的方法来改善芳纶纤维表面的活性，以提高纤维与基体间的界面强度[4-7]。其中研究较多的是利用一浴浸胶和间苯二酚-甲醛胶乳(RFL)二浴浸胶工艺，以改善纤维与橡胶基体的黏结强度，但一浴胶液和二浴 RFL 胶液中氨水、甲醛和苯酚含量过高，对环境污染大，威胁人们健康安全，因此该处理方法对工业生产相对有限[8]。

为了替代传统的一浴胶液和二浴 RFL 胶液，本研究先采用 KOH 对芳纶纤维表面进行预处理，再用水性聚氨酯预聚体(WPUP)改性的 ZnO 对其进行二次处理，使芳纶纤维表面的粗糙度和化学活性大幅度增加，从而提高纤维与橡胶基体间的黏合强度。另外，通过调控 ZnO 和异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)的配比，得到不同含量的 WPUP 改性的 ZnO 粒子，以研究上述方法改性 ZnO 对芳纶纤维力学性能及其与天然橡胶黏合强度的影响。

## 1　实验方法

### 1.1　原材料

芳纶纤维(Kevlar 29，1667dtex×2，美国杜邦公司)；天然橡胶(NR，粒径 30 nm，上海景营有限公司)；ZnO(粒径 50 nm)、聚乙烯醇-1799(平均分子量1 700，醇解度 99%)、聚乙二醇(PEG，分子量 2 000)、乙二醇(扩链剂)均为上海阿拉丁试剂有限公司提供；吐温-80(Tween-80)(乳化剂)、异佛尔酮二异氰酸酯($C_{12}H_{18}N_2O_2$，IPDI)、三乙烯二胺(催化剂)均为上海麦克林生化科技有限公司提供；硬脂酸(SA)、硫黄(S)和促进剂(CZ)均为市售橡胶工业制品常用原材料。

### 1.2　试样制备

#### 1.2.1　ZnO@WPUP 制备

采用 ZnO 为芯材，以IPDI为硬段，加入 PEG 和三乙烯二胺后，发生界面聚合反应，随着温度的升高，半透明乳液逐渐转变为黏稠状的乳白色。通过添加乙二醇扩链剂使产物进一步扩链，最终形成 WPUP 为壁材的微胶囊 ZnO@WPUP[9]，其制备流程图如图 1 所示。

称取 2.5 g 聚乙烯醇倾入三口烧瓶中，热水(80 mL 去离子水)溶解，加入 2.5 g Tween-80 搅拌乳化，再加入 2 g ZnO，搅拌 30 min，缓慢滴加(0 g、2 g、4 g、6 g 和 8 g) IPDI，然后将 9.0 g PEG 和 0.06 g 三乙烯二胺加入上述溶液中，15℃下反应 30 min，再升温至 75℃，加入 5 mL 扩链剂乙二醇，反应 1 h，然后冷却至室温，过滤、洗涤、干燥和研磨。ZnO@WPUP 的配比如表 1 所示。

#### 1.2.2　改性芳纶纤维试样制备

先将芳纶纤维用丙酮超声清洗 20 min，再用无水乙醇清洗表面，80℃下烘干待用；然后将其浸渍于 0.5%的 KOH 水溶液(总量为 100 g)中，超声浸渍 1 h 后取出，80℃下烘干待用；再将其浸渍于改性 ZnO 乳液中，60℃下超声浸渍 30 min 后取出，

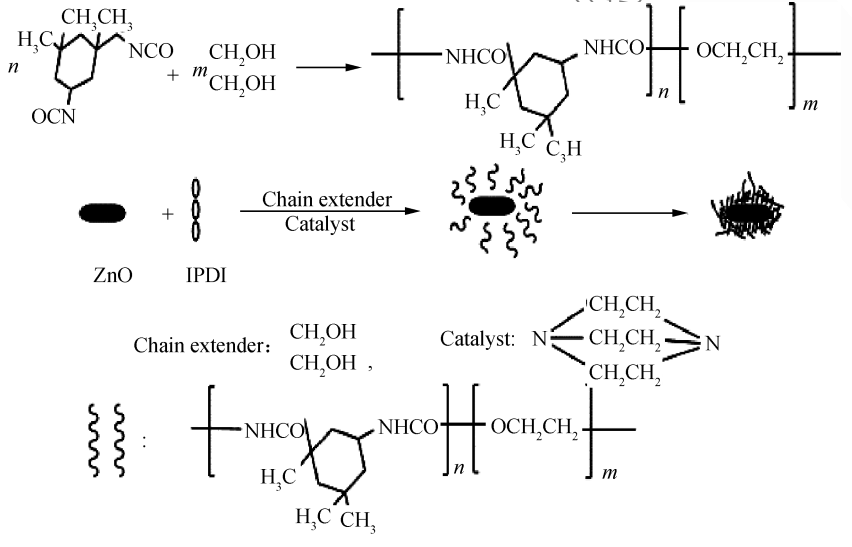



图 1　水性聚氨酯预聚体(WPUP)改性 ZnO 流程图

Fig. 1　Schematic of modified ZnO by waterborne polyurethane prepolymer (WPUP)

http://fhclxb.buaa.edu.cn

表 1 ZnO@WPUP 的配比

Table 1 Experimental proportion of ZnO@WPUP

| No. | ZnO/g | IPDI/g |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 0 |
| 3 | 2 | 2 |
| 4 | 2 | 4 |
| 5 | 2 | 6 |
| 6 | 2 | 8 |

Note: IPDI—Isophoronediisocyanate.

洗涤、干燥，得到改性的芳纶纤维。

1.2.3 芳纶/橡胶复合材料制备

将天然橡胶（NR）在开炼机上塑炼 15～20 min，放置 8 h 以消除内应力。将 NR 在开炼机上共混、薄通和出片，停胶 8 h，在 160℃、3 MPa 压力条件下与芳纶纤维硫化 15 min，压片，制得芳纶/橡胶复合材料。

基本配方：NR，100 g；ZnO，5 g；SA，2 g；S，2 g；CZ，2 g。

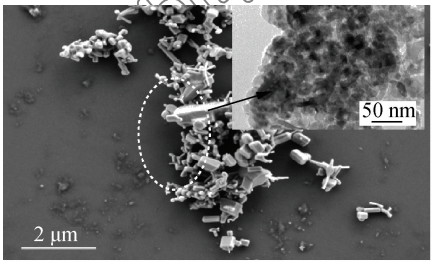
### 1.3 表征方法

采用热重分析仪（TG，PYRIS1 型，美国柏金-埃尔默公司）对所制备的样品在 $N_2$ 气氛下进行测试，升温速率为 20℃/min，测试温度范围为 25～800℃；采用扫描电子显微镜（FE-SEM，JSM-5610LV 型，日本电子公司）和透射电子显微镜（TEM，JEM-2010 型，日本电子株式会社）对样品进行观察；采用傅里叶红外光谱仪（FTIR，5700 型，美国 Nicolet 公司）对所制备的样品进行测试，扫描范围为4 000～600 $cm^{-1}$；利用 X 射线能量色散光谱（EDX，S-4100 型，日本 HITACHI 公司）测试样品表面元素的能谱，放大倍数1 000；利用电子强力机（Instron3369 型，英斯特朗上海试验设备贸易有限公司）对所制备的样品进行力学性能测试，测试按照标准 GB/T 30311—2013[10] 的方法进行；利用 Instron3369 型电子强力机对所制备的样品进行 H 型抽出测试，测试按照标准 GB/T 2942—2010[11] 的方法进行。

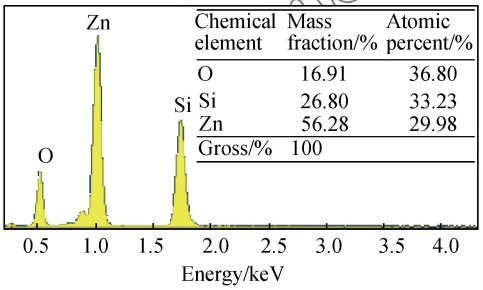
## 2 结果分析与讨论

### 2.1 改性前后 ZnO 的微观形貌或微观结构

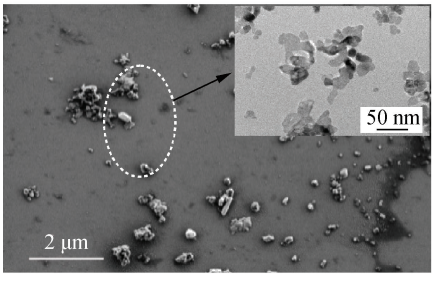
图 2(a)和图 2(b)分别为改性前后 ZnO 的 SEM 图像。在图 2(a)中，改性前 ZnO 出现大量团聚体，平均粒径较大，为 1～2 μm，呈近似规则立方结构。在图 2(b)中的改性后 ZnO 团聚量较少，平均粒径约为 50～60 nm，分散均匀。图 2(c)和 2(d)分别为改性前后 ZnO 的 EDX 图谱。从图 2(c)可以看出，未改性 ZnO 能谱图中，Zn 和 O 元素含量较高，元素质量分数分别为 56.28wt% 和 16.91wt%，Si 元素质量分数为 26.80wt%（为导电硅片基体元素），样品纯度高。从图 2(d)可以看出，改性后 ZnO 表面不仅有 Zn 和 O 元素，还出现 C 和 N 元素，且含量较高。由于经 WPUP 改性 ZnO 后在其表面引入大量有机基团，使 ZnO 在水溶液中



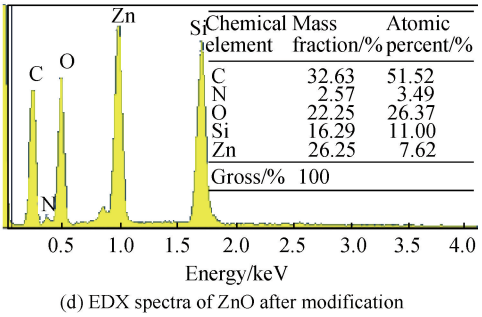

(a) SEM image of ZnO before modification




(c) EDX spectra of ZnO before modification




(b) SEM images of ZnO after modification




(d) EDX spectra of ZnO after modification

图 2 改性前后 ZnO 的 SEM 图像和 EDX 图谱

Fig. 2 SEM images and EDX spectra of ZnO before and after modification

与水分子间形成“屏障”，粒子的絮凝被阻止，形成“空间位阻稳定作用”[12-13]。因此，通过 WPUP 改性 ZnO 后，改善 ZnO 在水溶液中的均匀分散性。

图 3 为改性前后 ZnO 的 FTIR 图谱。未改性的 ZnO 在 3 430 $cm^{-1}$ 和 1 620 $cm^{-1}$ 处出现较强的—OH 基团和 O—H($H_2O$)的弯曲振动峰[13]，这些羟基官能团的存在为异氰酸酯包覆改性提供了反应活性位点。改性后的 ZnO 在 2 925 $cm^{-1}$ 处出现了亚甲基的 C—H 键的伸缩振动峰，在 2 360 $cm^{-1}$ 处出现了—NCO 的反对称伸缩振动峰，而在1 560 $cm^{-1}$ 和 1 650 $cm^{-1}$ 处出现酰胺基(—NHCOO)的特征振动峰，1 250 $cm^{-1}$ 处出现 C═O 键伸缩振动峰，1 107 $cm^{-1}$ 处出现 C—O—C 键伸缩振动峰。以上分析说明 IPDI 硬段在 ZnO 表面已经扩链生成 WPUP[14]。

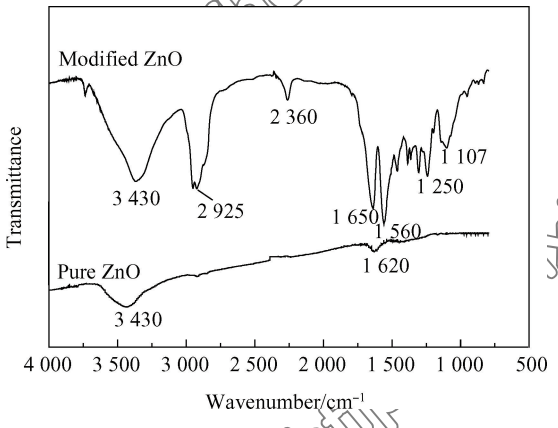



图 3　改性前后 ZnO 的 FTIR 图谱

Fig. 3　FTIR spectra of ZnO before and after modification

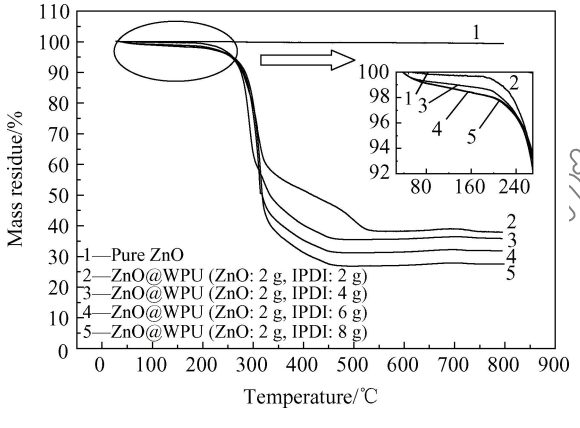



图 4　改性前后 ZnO 的 TG 曲线

Fig. 4　TG curves of ZnO before and after modification

## 2.2　改性前后 ZnO 的热稳定性

图 4 是改性前后 ZnO 的 TG 曲线。可以看出，改性前 ZnO 有一个较小的热失重，对应于 ZnO 表面羟基和自由水，质量损失率约为 3%；改性后 ZnO 有两个热失重，其在低于 300℃样品的质量损失可归于 ZnO 表面吸附水和残余的 IPDI 挥发，因为 ZnO 表面含有一定数量的羟基，所以使其具有亲水性，即使 ZnO 干燥后，表面也存在一定数量的羟基。300～500℃温度区间范围内发生 ZnO@WPUP 表面聚氨酯预聚物结构的分解，随 IPDI 量增大，残余量越小，且从局部放大图中曲线显示 ZnO 表面形成的预聚物分解温度降低。根据以上 EDX、TEM、SEM、FTIR 和 TG 的分析结果，表明 ZnO 表面已经扩链生成 WPUP。

## 2.3　ZnO@WPUP 改性芳纶纤维的结构和形貌

图 5 为改性前后芳纶纤维的 FTIR 图谱。可见，未改性的芳纶纤维在 3 320 $cm^{-1}$ 处出现较强的—NH—伸缩振动峰，在1 640 $cm^{-1}$ 处出现较强的 C═O 伸缩振动的特征峰。经 KOH 处理芳纶纤维后，在3 430 $cm^{-1}$ 出现较强且较宽的—OH 基团的振动吸收峰，这是由于来自芳纶纤维水解得到的—OH 伸缩振动特征峰[15]。由此表明，KOH 可以使芳纶纤维部分水解，其表面引进活性基团(—OH)。经 ZnO 改性芳纶纤维后在 2 360 $cm^{-1}$ 处出现—NCO 的反对称伸缩振动峰，在 1 630 $cm^{-1}$ 处出现脲基(—NHCONH—)的特征峰。表明水性聚氨酯中的—NCO 基团与芳纶纤维表面胺基发生反应，生成脲基[16]。

图 6 为芳纶纤维经 ZnO@ WPUP 处理前后的 SEM 图像。图 6(a)中未改性的芳纶纤维表面平滑；图 6(b)中芳纶纤维经未改性 ZnO 处理后纤维表面沉积较多微米级团聚颗粒，且与纤维贴合不紧密，容易脱落。ZnO@WPUP 处理芳纶纤维后的表

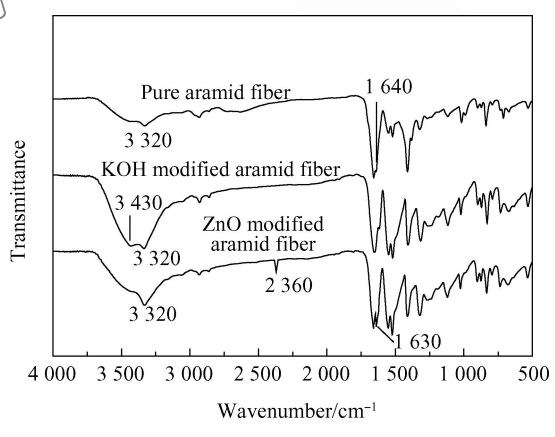



图 5　改性前后芳纶纤维的 FTIR 图谱

Fig. 5　FTIR spectra of aramid fiber before and after modification

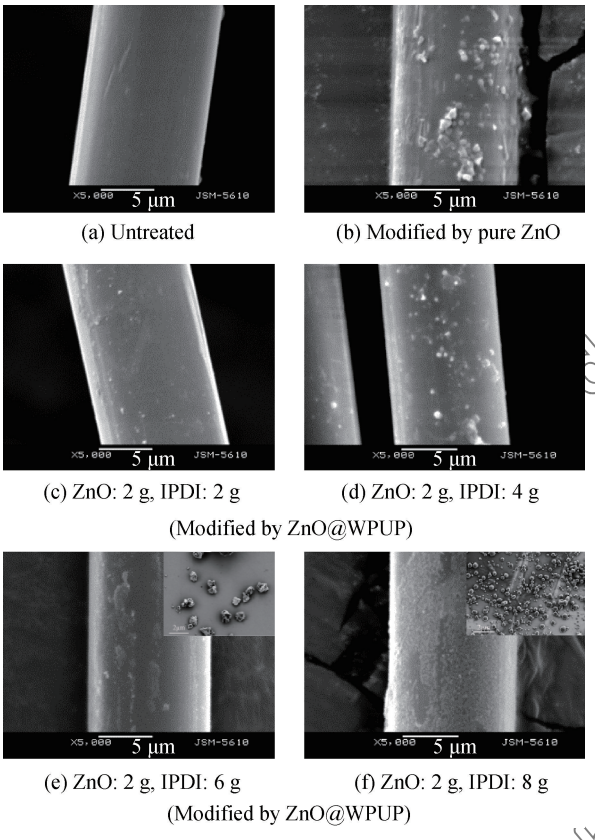



图 6 ZnO@WPUP 改性前后芳纶纤维的 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of aramid fibers before and after modified by ZnO@WPUP

面形貌如图 6(c)～6(f)所示，随着配方中 IPDI 添加量增加，芳纶纤维表面沉积的 ZnO@WPUP 粒子分散更加均匀，团聚粒径越小，纤维表面粗糙度和比表面积逐渐增大。这说明 IPDI 的引入可以在 ZnO 表面形成聚氨酯预聚物，且 IPDI 的量越大，ZnO 在纤维表面分散均匀性越优异，即可有效增加芳纶纤维表面粗糙度，从而减少因团聚造成的应力集中区域，增强芳纶与橡胶基体的界面黏合力[17]，为后续芳纶/橡胶复合材料力学性能的改善提供了可能和依据。

## 2.4 ZnO@WPUP 改性芳纶纤维的力学性能

图 7 为 ZnO@WPUP 改性前后芳纶纤维的断裂强度和伸长率。可以看出，未改性的芳纶纤维断裂强度最小(17.40cN/dtex)，断裂伸长率最大(1.51%)，未改性的 ZnO 附着纤维表面对纤维的断裂强度与伸长率几乎没有影响。随着 ZnO@WPUP 中 IPDI 的量增加，纤维的断裂强度增大，断裂伸长率降低，当 ZnO@WPUP 中 ZnO 为 2 g、IPDI 为 8 g 时，断裂强度最大(17.86cN/dtex)，较

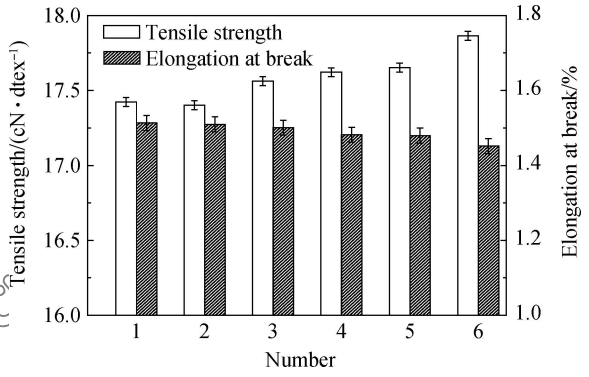



图 7 ZnO@WPUP 改性前后芳纶纤维的断裂强度和伸长率

Fig. 7 Tensile strength and elongation of aramid fiber before and after modified by ZnO@WPUP

未改性的纤维提高了 2.6%，断裂伸长率最小(1.45%)，较未改性的纤维降低了 3.9%。说明 ZnO@WPUP 在纤维表面形成一层致密的覆盖层，将纤维束中的单纤维变为整体，为其中的连续相，起到应力传递的作用，从而提高纤维断裂强度，但此致密的覆盖层会使原纤维韧性降低，从而导致断裂伸长率下降[18]。另外，ZnO@WPUP 在纤维表面形成的覆盖层越致密，断裂强度越高。

## 2.5 ZnO@WPUP 改性芳纶/橡胶的黏合性能

图 8 为 ZnO@WPUP 改性前后芳纶/橡胶复合材料的 H 型抽出力。可以看出，未改性的芳纶/橡胶复合材料抽出力为 64 N/cm，未改性的 ZnO 加入，使纤维与橡胶基体的黏附强度有所降低，但随着 ZnO@WPUP 中 IPDI 的量增加，纤维的抽出力大幅度增大，当 ZnO@WPUP 中 ZnO 为2 g、IPDI 为 8 g 时，抽出力最大(125 N/cm)。结合图 6 改性的芳纶纤维表面形貌可知，未改性芳纶纤维光滑，纤维表面活性差。ZnO 改性芳纶纤维后，使芳纶纤维表面粗糙度增加，有助于提高橡胶在硫化的过程

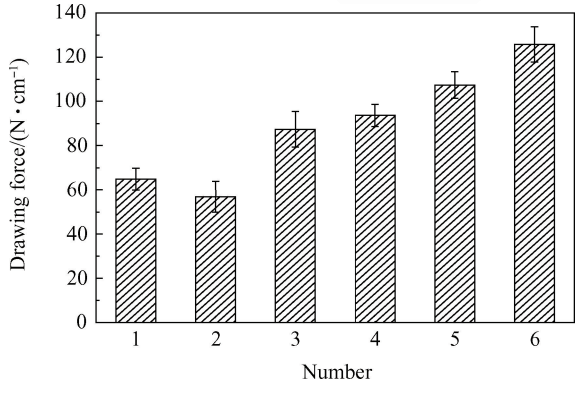



图 8 芳纶/橡胶复合材料的抽出力

Fig. 8 Drawing force of aramid/rubber composites

http://fhclxb.buaa.edu.cn

中与纤维黏合。从 Lancaster 等[19]研究的增强剂承载理论可知，改性 ZnO 在纤维表面分散均匀性优异，不仅可提高纤维表面粗糙度，而且可有效承载基体传递来的载荷，摩擦和磨损性能得到很大的改善，起到“弥散增强作用”。纤维与天然橡胶黏合强度的提高可能是由于改性的 ZnO 在纤维表面形成一层致密的覆盖层，此覆盖层中含有大量聚氨酯预聚物，从而使分子链中的活性官能团直接与纤维表面的胺基和羧基反应，在纤维表面形成大量化学键[20]。

### 2.6　芳纶/橡胶复合材料 H 型抽出后表面形貌

图 9 为 ZnO@WPUP 改性的芳纶/橡胶复合材料经 H 型抽出后的 SEM 图像。可知，未改性的芳纶/天然橡胶复合材料抽拔后，纤维表面相对光滑，界面黏附的橡胶颗粒较少。随着 ZnO@WPUP 中 IPDI 的质量增加，纤维经 H 型抽出后，纤维表面黏附的橡胶颗粒越多，当 ZnO@WPUP 中 ZnO 为 2 g、IPDI 为 8 g 时，纤维表面黏附的橡胶颗粒较多，且黏附的橡胶颗粒分散均匀，纤维与橡胶形成了很强的黏附作用。因为改性的 ZnO 在纤维表面形成一层致密的覆盖层，所以纤维表面粗糙度增加，从而大幅度提高芳纶纤维与天然橡胶黏合强度。最后经 H 型抽出后，大量橡胶颗粒紧密黏附在纤维表面[21-22]，说明改性的 ZnO 使芳纶纤维表面的粗糙度和化学活性大幅度增加，从而大幅度提高纤维与天然橡胶黏合强度。

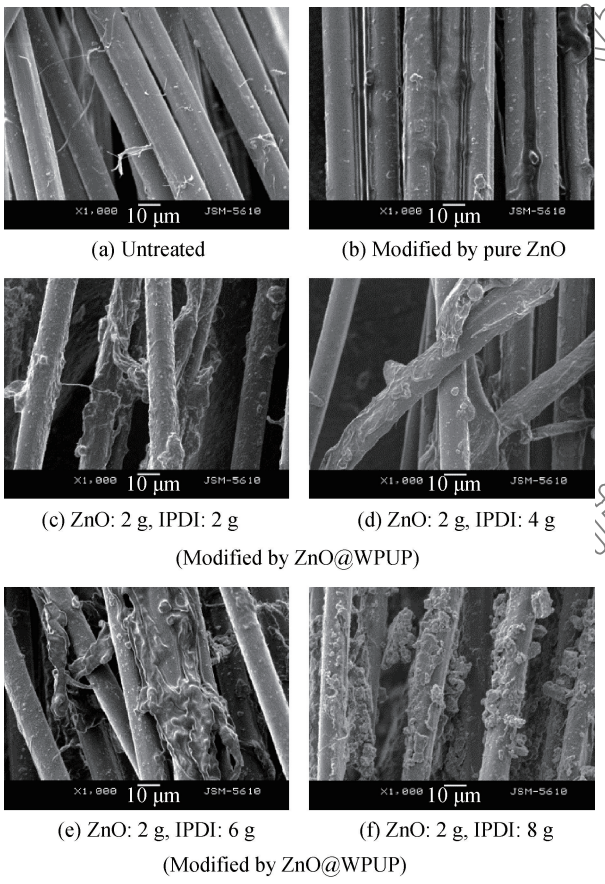



图 9　芳纶/橡胶复合材料抽出后的 SEM 图像

Fig. 9　SEM images of aramid/rubber composites after drawing

## 3　结　论

(1) 水性聚氨酯(WPUP)改性 ZnO(ZnO@WPUP)后，使 ZnO 颗粒在水溶液中的均匀分散性提高，稳定性改善。

(2) ZnO@WPUP 表面改性芳纶纤维，不仅增加纤维表面粗糙度和黏附橡胶量，而且也提高纤维表面化学活性。

(3) 未改性的芳纶/橡胶复合材料抽出力为 64 N/cm，ZnO@WPUP 改性的芳纶/橡胶复合材料随着 ZnO@WPUP 中 IPDI 的量增加，纤维的抽出力大幅度增大，芳纶纤维表面被涂覆一层均匀致密的 ZnO@WPUP 粒子，其中 ZnO 为 2 g、IPDI 为 8 g 时，纤维抽出力最大(125 N/cm)。

## 参考文献：

[1] MERCER B, ZYWICZ E, PAPADOPOULOS P. Molecular dynamics modeling of PPTA crystallite mechanical properties in the presence of defects[J]. Polymer, 2017, 114: 329-347.

[2] PARK B Y, KIM S C, JUNG B. Interlaminar fracture toughness of carbon fiber/epoxy composites using short kevlar fiber and/or Nylon-6 powder reinforcement[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2015, 8(6): 371-377.

[3] ALBERT MANERO I I, GIBSON J, FREIHOFER G, et al. Evaluating the effect of nano-particle additives in Kevlar®; 29 impact resistant composites[J]. Composites Science & Technology, 2015, 116: 41-49.

[4] LUO L, WU P, CHENG Z, et al. Direct fluorination of para-aramid fibers 1: Fluorination reaction process of PPTA fiber[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2016, 186: 12-18.

[5] TAMARGO-MARTINEZ K, MARTINEZ-ALONSO A, MONTES-MORAN M A, et al. Effect of oxygen plasma treatment of PPTA and PBO fibers on the interfacial properties of single fiber/epoxy composites studied by Raman spectroscopy[J]. Composites Science & Technology, 2011, 71(6): 784-790.

[6] SRIVASTAVA A, MAJUMDAR A, BUTOLA B S. Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 529(1): 224-229.

[7] SINGH T J. Characterization of Kevlar fiber and its compo-

sites: A review[J]. Materials Today Proceedings, 2015, 2(4-5): 1381-1387.

[8] CEN H, KANG Y, LEI Z, et al. Micromechanics analysis of Kevlar-29 aramid, fiber and epoxy resin microdroplet composite by micro-Raman spectroscopy[J]. Composite Structures, 2006, 75(1-4): 532-538.

[9] 董利敏，邵建中，柴丽琴，等. 基于界面聚合法的橄榄油聚氨酯微胶囊制备[J]. 纺织学报，2009，30(8)：73-78.
DONG Limin, SHAO Jianzhong, ZHAI Liqin, et al. Preparation of olive oil-polyurethane microcapsules by interfacial polymerization[J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(8): 73-78 (in Chinese).

[10] 中国国家标准化管理委员会. 浸胶芳纶纱线、线绳和帘线拉伸性能的试验方法：GB/T 30311—2013[S]. 北京：中国标准出版社，2013.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for tensile properties of dipped aramid yarns and cords: GB/T 30311—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013 (in Chinese).

[11] 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶与纤维帘线静态黏合强度的测定——H 抽出法：GB/T 2942—2010[S]. 北京：中国标准出版社，2010.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber, vulcanized—Determination of static adhesion to textile cord—H-pull test: GB/T 2942—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010 (in Chinese).

[12] HWANG H S, MALAKOOTI M H, PATTERSON B A, et al. Increased interyarn friction through ZnO nanowire arrays grown on aramid fabric[J]. Composites Science & Technology, 2015, 107: 75-81.

[13] PATTERSON B A, SODANO H A. Enhanced interfacial strength and uv shielding of aramid fiber composites through ZnO nanoparticle sizing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(49): 33963.

[14] HWANG H S, MALAKOOTI M H, SODANO H A. Tailored interyarn friction in aramid fabrics through morphology control of surface grown ZnO nanowires[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2015, 76: 326-333.

[15] 王杨，李鹏，于运花，等. 芳纶纤维的磷酸表面处理及其树脂基复合材料界面性能[J]. 复合材料学报，2007，24(3)：7-12.
WANG Yang, LI Peng, YU Yunhua, et al. Interfacial properties of phosphorous acid modified Kevlar fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(3): 7-12 (in Chinese).

[16] 浦鸿汀，刘泰，杨正龙，等. 聚脲的合成与应用[J]. 高分子材料科学与工程，2008，24(7)：1-5.
PU Hongting, LIU Tai, YANG Zhenglong, et al. The synthesis and application of polyuria[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(7): 1-5 (in Chinese).

[17] 王翔，郑玉婴，曹宁宁，等. 马来酸酐刻蚀芳纶纤维/尼龙 6 复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报，2016，33(8)：1638-1644.
WANG Xiang, ZHENG Yuying, CAO Ningning, et al. Preparation and properties of aramid fibers/nylon 6 composties corroded by maleic anhydride[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(8): 1638-1644 (in Chinese).

[18] 艾涛，王汝敏，邓杰. Kevlar 缝线表面处理对炭纤维/双马来酰亚胺树脂缝合复合材料界面性能的影响[J]. 复合材料学报，2007，24(1)：34-39.
AI Tao, WANG Rumin, DENG Jie, et al. Effect of surface modification of Kevlar stitch threads on mechanical interfacial properties of carbon fiber/bismaleimide stitched composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 34-39 (in Chinese).

[19] LANCASTER J K. The effect of carbon fiber reinforcement on the friction and wear of polymers[J]. British Journal of Applied Physics, 1968, 1(5): 549-559.

[20] HWANG H S, PATTERSON B A, MALAKOOTI M H, et al. Modification of pullout behavior of Kevlar fabric by zinc oxide nanowire reinforcement [J]. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V009T10A012.

[21] 王君，李诚，郑强，等. LiCl 处理对芳纶纤维表面结构与性能的影响[J]. 复合材料学报，2016，33(4)：704-713.
WANG Jun, LI Cheng, ZHENG Qiang, et al. Effects of LiCl treatment on surface structure and properties of Kevlar fibers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4): 704-713 (in Chinese).

[22] 刘冬冬，扈艳红，张芳芳，等. 叠氮苯并咪唑偶联剂增强国产芳纶Ⅲ/聚三唑树脂复合材料界面[J]. 复合材料学报，2017，34(2)：336-344.
LIU Dongdong, HU Yanhong, ZHANG Fangfang, et al. Interfacial reinforcement of domestic aramid fiber Ⅲ/PTA composites using azide-containing benzimidazole coupling agent[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2): 336-344 (in Chinese).

http://hclxb.buaa.edu.cn