

## 等离子体处理碳纤维/树脂复合材料

倪新亮<sup>1, 2</sup>, 金凡亚<sup>\*1</sup>, 沈丽如<sup>1</sup>, 童洪辉<sup>1</sup>

(1. 核工业西南物理研究院, 成都 610041; 2. 中国科学技术大学 核科学技术学院, 合肥 230026)

**摘 要:** 为了提高碳纤维/树脂复合材料的表面浸润性, 采用等离子体直接对复合材料进行表面处理, 通过接触角测试、拉伸试验、金相显微分析和红外光谱分析, 探究了等离子体处理碳纤维/树脂复合材料的最佳处理工艺、处理前后碳纤维/树脂复合材料的力学性能和表面官能团的变化。结果显示: 电流、气压和处理时间均对碳纤维/树脂复合材料表面浸润性有明显影响, 当电流为 1.0 A、气压为 1.0 Pa、处理时间为 10min 时, 表面浸润性最佳; 处理后碳纤维/树脂复合材料的拉伸强度没有减小, 反而提高了 8%。红外光谱分析显示处理后碳纤维/树脂复合材料表面酯基链发生断裂, 酯基数降低, 相应形成更多的酮基、羧基和醇羟基, 表面极性增强, 浸润性显著提高。研究解决了碳纤维/树脂复合材料表面呈惰性的问题, 为其表面功能涂层制备奠定了基础。

**关键词:** 等离子体处理; 浸润性; 表面官能团; 碳纤维/树脂复合材料; 表面能

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2015)03-0721-07

碳纤维/树脂复合材料结合了碳纤维与树脂二者的优越性能, 被广泛应用于航天航空、能源、汽车和其他工业领域<sup>[1-2]</sup>。然而随着其应用范围的不断扩大, 对碳纤维/树脂复合材料性能的要求也不断提高, 在应用中迎来一些新的挑战, 如在一些特殊应用条件下需要其具备耐腐蚀性等<sup>[3]</sup>。已有研究表明, 金属涂层可以有效提高基体的耐腐蚀性能, 然而由于树脂基体的表面活性低, 与金属涂层之间的结合强度较低, 因此需要通过一定的表面处理技术来提高碳纤维/树脂复合材料的表面极性, 使其高强度地与金属涂层结合, 从而提高自身的耐腐蚀性能<sup>[4-5]</sup>。

目前对复合材料的表面处理方式有很多种, 包括气相氧化、液相氧化及等离子体处理等, 其中等离子体处理具有操作简单、方便环保、对本体性质和强度影响较小等优点<sup>[6-8]</sup>, 是目前研究最广的方法, 取得了一些相应的研究成果。秦伟等<sup>[9-10]</sup>通过冷等离子体处理聚酯纤维, 提高了聚酯纤维/环氧复合材料的表面润湿性和横向拉伸强度。贾玲等<sup>[11]</sup>采用碳纤维表面等离子接枝技术将碳纤维/聚芳基乙炔复合材料的层间剪切强度提高了 12.4%。

姜生<sup>[12]</sup>研究了氩等离子体处理后的超高分子量聚乙烯纤维与低密度聚乙烯复合材料的性能, 结果表明等离子体处理后纤维/基体间的界面性能得到了显著的提高。然而这些研究的共同点都是先利用等离子体处理纤维, 再将处理后的纤维与基体材料固化, 而对于已经固化成型的复合材料, 其表面处理方面的研究却很少。如今, 在一些特殊应用的情况下, 对已经成型的碳纤维/树脂复合材料的表面改性需求越来越迫切, 相关的研究报道却较少。因此, 笔者采用等离子体直接对成型的碳纤维/树脂复合材料进行表面处理, 重点研究不同工艺参数对复合材料处理前后表面自由能、浸润性和力学性能的影响。提高碳纤维/树脂复合材料的表面浸润性对后续沉积各种涂层均有一定的积极作用, 等离子体处理可以按不同需求灵活应用于各种场合, 具有一定的应用前景。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料及预处理

使用碳纤维/树脂复合材料(碳纤维为日本东丽公司生产的 T700 碳纤维, 树脂基体为该院

收稿日期: 2014-05-28; 录用日期: 2014-07-25; 网络出版时间: 2014-08-27 16:03

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20140827.1603.003.html

基金项目: 国家自然科学基金(11305055); 四川省科技计划项目(2013GZX0168); ITER 计划国内配套专项(2013GB110006)

通讯作者: 金凡亚, 博士, 副研究员, 研究方向为低温等离子体应用。 E-mail: yafanjin@163.com

**引用格式:** 倪新亮, 金凡亚, 沈丽如, 等. 等离子体处理碳纤维/树脂复合材料[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 721-727. Ni X L, Jin F Y, Shen L R, et al. Carbon fiber/resin composites treated by plasma[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 721-727.

自行研制的环氧树脂)为实验原料,将其制成规格为20 mm×20 mm×4 mm的薄片,样品以蒸馏水和酒精各超声清洗10 min后,用压缩空气吹干。

1.2 等离子体处理

预处理后的样品与工件架固定,置于真空室中进行等离子体处理。采用霍尔离子源放电产生等离子体,使用纯度为99.99%的氩气为气体源,本底真空度优于 $8\times10^{-3}$  Pa。工件初始位置正对霍尔离子源,距离为120 mm,处理过程中工件自转,转速为6 r/min。为了探究不同工艺参数对等离子体处理效果的影响,工艺参数的设计如下。电流为0~2.0 A,气压为0~2.0 Pa,处理时间为0~20 min,各工艺参数的梯度分别为0.5 A、0.5 Pa和5 min。

1.3 表征与测试

分别以蒸馏水和二碘甲烷为检测液体,采用定义法测量其与碳纤维/树脂复合材料表面的接触角,再推算出碳纤维/树脂复合材料总表面能、色散分量和极性分量,并研究不同参数等离子体处理前后的变化。样品总表面能、极性分量和色散分量的计算公式<sup>[13]</sup>为

$$\gamma_L(1 + \cos \theta) = 2 \sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} + 2 \sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p}$$

$$\gamma_S = \gamma_S^d + \gamma_S^p$$

式中:  $\gamma_L$  为检测液体的表面能;  $\theta$  为接触角;  $\gamma_S^d$  和  $\gamma_S^p$  分别为样品的色散分量和极性分量;  $\gamma_L^d$  和  $\gamma_L^p$  分别

为检测液体的色散分量和极性分量;  $\gamma_S$  为样品总表面能。

采用深圳三思纵横公司的 UTM 型电子万能试验机测量等离子体处理前后碳纤维/树脂复合材料的拉伸强度。通过日本 OLYMPUS 公司的 BX-51 型金相显微镜分别观察拉断后碳纤维/树脂复合材料内表面的微观形貌。使用美国 Thermo Fisher 公司的 Nicolet 6700 型红外光谱仪分析等离子体处理前后碳纤维/树脂复合材料表面官能团的变化,检测范围为  $667\sim4\,000\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次。

2 结果与讨论

2.1 浸润性和表面能

表1为以不同工艺参数进行等离子体处理前后碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能,图1为气压为1.0 Pa、处理时间为10 min时,碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能与等离子体处理电流的关系。由表1和图1可知,当电流为1.0 A时,等离子体处理后的碳纤维/树脂复合材料与蒸馏水和二碘甲烷的接触角分别由72.12°和36.55°降至25.03°和22.89°;当电流为0.5 A时,复合材料的表面能由50.10 mJ·m<sup>-2</sup>升至66.51 mJ·m<sup>-2</sup>,其中极性分量所占比例由36.25%提高到52.20%,色散分量则由63.75%下降到47.80%。

表 1 以不同工艺参数进行等离子体处理前后碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能  
Table 1 Contact angle and surface energy of carbon fiber/resin composites before and after plasma treated with different process parameters

| Treatment condition |                 |              | Contact angle/(°) |                                | Surface energy/<br>(mJ·m <sup>-2</sup> ) | Polar component                 |         | Dispersion component            |         |
|---------------------|-----------------|--------------|-------------------|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|---------|---------------------------------|---------|
| Current/<br>A       | Pressure/<br>Pa | Time/<br>min | H <sub>2</sub> O  | CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub> |                                          | Value/<br>(mJ·m <sup>-2</sup> ) | Percent | Value/<br>(mJ·m <sup>-2</sup> ) | Percent |
| Un-treated          |                 |              | 72.12             | 36.55                          | 50.10                                    | 18.16                           | 36.25   | 35.94                           | 63.75   |
| 0.5                 | 1.0             | 10           | 34.52             | 28.72                          | 66.51                                    | 34.72                           | 52.20   | 31.79                           | 47.80   |
| 1.0                 | 1.0             | 10           | 25.03             | 22.89                          | 63.31                                    | 30.52                           | 48.21   | 32.79                           | 51.79   |
| 1.5                 | 1.0             | 10           | 32.16             | 27.01                          | 65.25                                    | 33.12                           | 50.76   | 32.13                           | 49.24   |
| 2.0                 | 1.0             | 10           | 35.54             | 27.69                          | 64.42                                    | 32.07                           | 49.78   | 32.35                           | 50.22   |
| 1.0                 | 0.5             | 10           | 28.72             | 24.32                          | 63.32                                    | 30.53                           | 48.22   | 32.79                           | 51.78   |
| 1.0                 | 1.0             | 10           | 20.12             | 19.65                          | 61.28                                    | 28.04                           | 45.76   | 33.24                           | 54.24   |
| 1.0                 | 1.5             | 10           | 24.42             | 21.32                          | 61.70                                    | 28.53                           | 46.23   | 33.17                           | 53.77   |
| 1.0                 | 2.0             | 10           | 30.33             | 23.46                          | 62.08                                    | 29.02                           | 46.75   | 33.06                           | 53.25   |
| 1.0                 | 1.0             | 5            | 25.72             | 21.04                          | 60.95                                    | 27.55                           | 45.20   | 33.4                            | 54.80   |
| 1.0                 | 1.0             | 10           | 20.44             | 18.36                          | 60.60                                    | 27.07                           | 44.67   | 33.53                           | 55.33   |
| 1.0                 | 1.0             | 15           | 22.52             | 18.72                          | 59.85                                    | 26.12                           | 43.64   | 33.73                           | 56.36   |
| 1.0                 | 1.0             | 20           | 23.68             | 19.28                          | 60.89                                    | 27.19                           | 44.65   | 33.70                           | 55.35   |

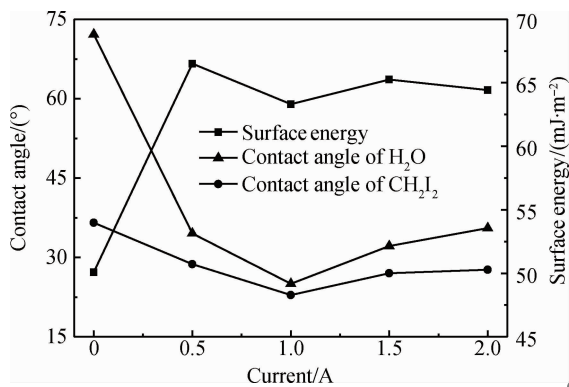


图1 碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能与等离子体处理电流的关系

Fig. 1 Relationship between contact angle and surface energy of carbon fiber/resin composites versus plasma treating current

从表1和图1中还可以看出,随着电流的增加,接触角先减小后增大,在电流为1.0 A时接触角达到极小值。这是因为电流增加使得活性离子能量增大,对基体表面的轰击作用明显,能清除基体表面的杂质颗粒,同时,高能量活性离子能打断基体表面分子链,便于形成较多的极性基团,使得基体表面整体极性增强,表面能增加,因而其浸润性提高。然而,当电流过大时,接触角却增大。这是因为能量过高的活性离子对基体形成强烈的刻蚀作用,导致树脂基体甚至碳纤维损伤,影响碳纤维/树脂复合材料的表面性能,同时高能量的活性离子也会过多地破坏树脂表面原有的极性基团,导致表面活性劣化,浸润性降低。

图2为电流为1.0 A、处理时间为10 min时,碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能与等离子体处理气压的关系。由表1和图2可知,当气压为1.0 Pa时,等离子体处理后碳纤维/树脂复合材料与蒸馏水和二碘甲烷的接触角分别降至20.12°和19.65°;当气压为0.5 Pa时,等离子体处理后碳纤维/树脂复合材料表面能升至63.32 mJ·m<sup>-2</sup>,其中极性分量所占比例增加,色散分量所占比例降低。

从表1和图2中还可以看出,随着气压的增大,接触角均先减小后增大,在气压为1.0 Pa时达到极小值。这是因为气压增大导致活性离子与气体碰撞的次数增多,能量损失增大,轰击到基体上的活性离子能量偏低,因而基体表面极性较弱,处理效果不好。当气压过小时,真空室内气体电离作用不明显,由于工件处于自转模式,使得轰击到工件上的活性离子不均匀,且相对数量减少,因此基体

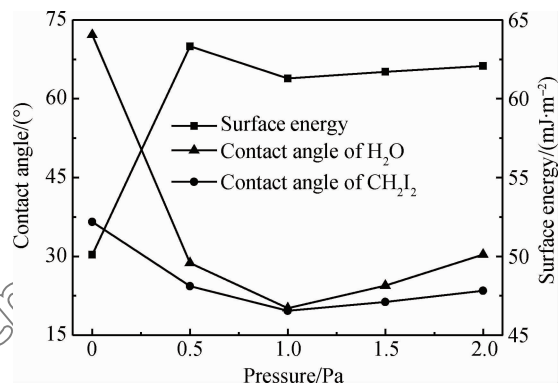


图2 碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能与等离子体处理气压的关系

Fig. 2 Relationship between contact angle and surface energy of carbon fiber/resin composites versus plasma treating pressure

表面极性也会下降,整体处理效果不明显。

图3为气压为1.0 Pa、电流为1.0 A时,碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能与等离子体处理时间的关系。由表1和图3可知,等离子体处理5 min后,碳纤维/树脂复合材料与蒸馏水和二碘甲烷的接触角分别降至25.72°和21.04°,表面能升至60.95 mJ·m<sup>-2</sup>,说明在气压和电流分别为1.0 Pa和1.0 A的条件下,短时间内即可明显改善基体表面的浸润性。随着处理时间的延长,接触角先迅速减小再趋于稳定,在处理时间为10 min时,接触角最小。

综合对比图1、图2和图3可知,图1接触角变化曲线起伏最大,其次是图2和图3。这说明在以上3个参数中,电流对等离子体处理效果的影响最大,气压和处理时间次之,这是由于等离子体处理主要是通过具有一定能量的活性离子与基体表面

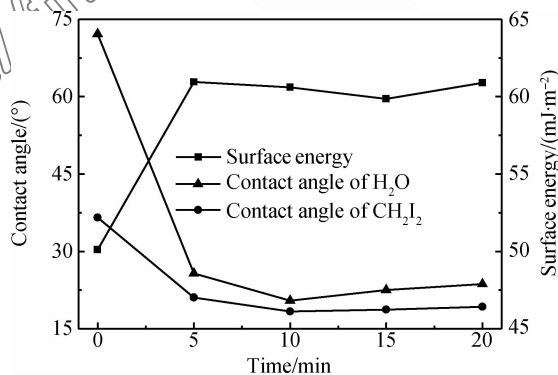


图3 碳纤维/树脂复合材料的接触角和表面能与等离子体处理时间的关系

Fig. 3 Relationship between contact angle and surface energy of carbon fiber/resin composites versus plasma treating time

发生非弹性碰撞,打断基体表面的分子链,形成更多活性基团,而该效应发生的前提是活性离子的能量大于一定阈值,因此活性离子的能量是等离子体处理效果的决定性因素。电流作为霍尔离子源参数,可直接改变活性离子的能量,气压也可通过活性离子与气体之间的碰撞间接改变其能量,而处理时间则不会改变活性离子能量。因此当电流和气压一定时,短时间的等离子体处理即可明显改善基体表面的浸润性,再延长处理时间对基体表面浸润性的影响不大,接触角趋于稳定。

2.2 力学性能

为研究采用等离子体直接对成型碳纤维/树脂复合材料进行处理是否会损伤树脂基体,导致其本体性能下降,需对等离子体处理前后的碳纤维/树脂复合材料的力学性能做出对比分析。由 2.1 节中的分析可知,等离子体处理电流对表面极性的影响较大,因此只分析以不同电流进行等离子体处理的情况。

拉伸强度是衡量碳纤维/树脂复合材料力学性能的一项重要指标,因此测试了复合材料在等离子体处理前后的拉伸强度。图 4 为气压为 1.0 Pa、处理时间为 10 min 时,碳纤维/树脂复合材料的拉伸强度和分散系数与等离子体处理电流的关系。可以看出,等离子体处理后碳纤维/树脂复合材料的拉伸强度均略大于处理前的,且先随电流的增加上升,在电流为 1.0 A 时达到极大值,上升幅度为 8%,之后随电流的增加而降低,这说明等离子体直接处理后碳纤维/树脂复合材料的拉伸强度不会降低,反而有小幅提升。分散系数则恰好相反,随电

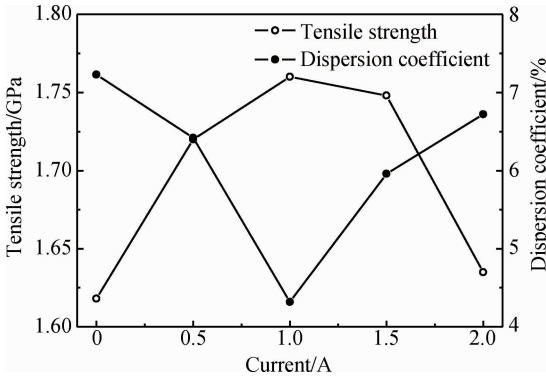


图 4 碳纤维/树脂复合材料的拉伸强度和分散系数与等离子体处理电流的关系  
Fig. 4 Relationship between tensile strength and dispersion coefficient of carbon fiber/resin composites versus plasma treating current

流增加先降低后上升,在电流为 1.0 A 时达到极小值。

将拉断后的碳纤维/树脂复合材料沿横向剥去外表面后得到内表面,图 5 为拉断后碳纤维/树脂复合材料内表面的金相显微镜照片。可以看出,未处理样品的内表面上碳纤维与基体之间的层次比较分明,碳纤维表面也不粘有树脂;而处理后样品的内表面上,部分碳纤维与树脂结合在一起,在剥离过程中树脂会随碳纤维脱出,碳纤维表面粘连了一些树脂,且粘连程度随电流的增加而增强。碳纤维与树脂间的结合强度是影响碳纤维/树脂复合材料拉伸强度的主要因素,而结合强度主要取决于碳纤维与树脂间的固化成型过程,本研究中成型碳纤维/树脂复合材料经等离子体处理后拉伸强度也有小幅度上升,且金相分析显示纤维树脂间粘连程度有所增加,这可能是由于等离子体处理增加了碳纤维/树脂复合材料的表面极性而引起的,但具体原因还需进一步研究。

2.3 表面官能团

图 6 为等离子体处理前后碳纤维/树脂复合材料的红外光谱。可见,1 733  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰强度最大,为树脂基体表面酯基<sup>[14]</sup>上 C=O 的伸缩振动峰,处理后其强度降低。图中 1 230  $\text{cm}^{-1}$  和 1 180  $\text{cm}^{-1}$  处分别为酮基上 C=O 的伸缩振动峰和羧基上 C=O 的伸缩振动峰,处理后强度增加,同时 1 508  $\text{cm}^{-1}$  处的 C=C 伸缩振动减弱,1 040  $\text{cm}^{-1}$  处醇羟基上的 O—H 和 828  $\text{cm}^{-1}$  处 C—O 的吸收峰都有所增强。分析表明,经过等离子体处理后,活性离子使得树脂基体酯基链和芳香环上的 C—C 发生断裂,相应形成酮基、羧基、醇羟基和 C=O,由于 C—O 的极性大于 C—C 的,羧基、醇羟基和酮基的极性均大于酯基的,所以等离子体处理后树脂基体表面的极性键和极性基团都增加。

等离子体直接处理碳纤维/树脂复合材料可以使树脂基体表面酯基数量减少,酮基、羧基和醇羟基数量增大,表面极性增强,金属亲和力增加,这为提高碳纤维/树脂复合材料表面金属涂层的膜基结合力奠定了基础。笔者虽只针对碳纤维/树脂复合材料进行了研究,但可以猜想所得规律对于其他已经成型的纤维/树脂复合材料同样适用,因为其纤维和树脂基体的性能以及固化成型工艺都是确定的,而等离子体处理主要是通过高能活性离子轰击基体表面,增加基体表面极性和自由能,纤维和基



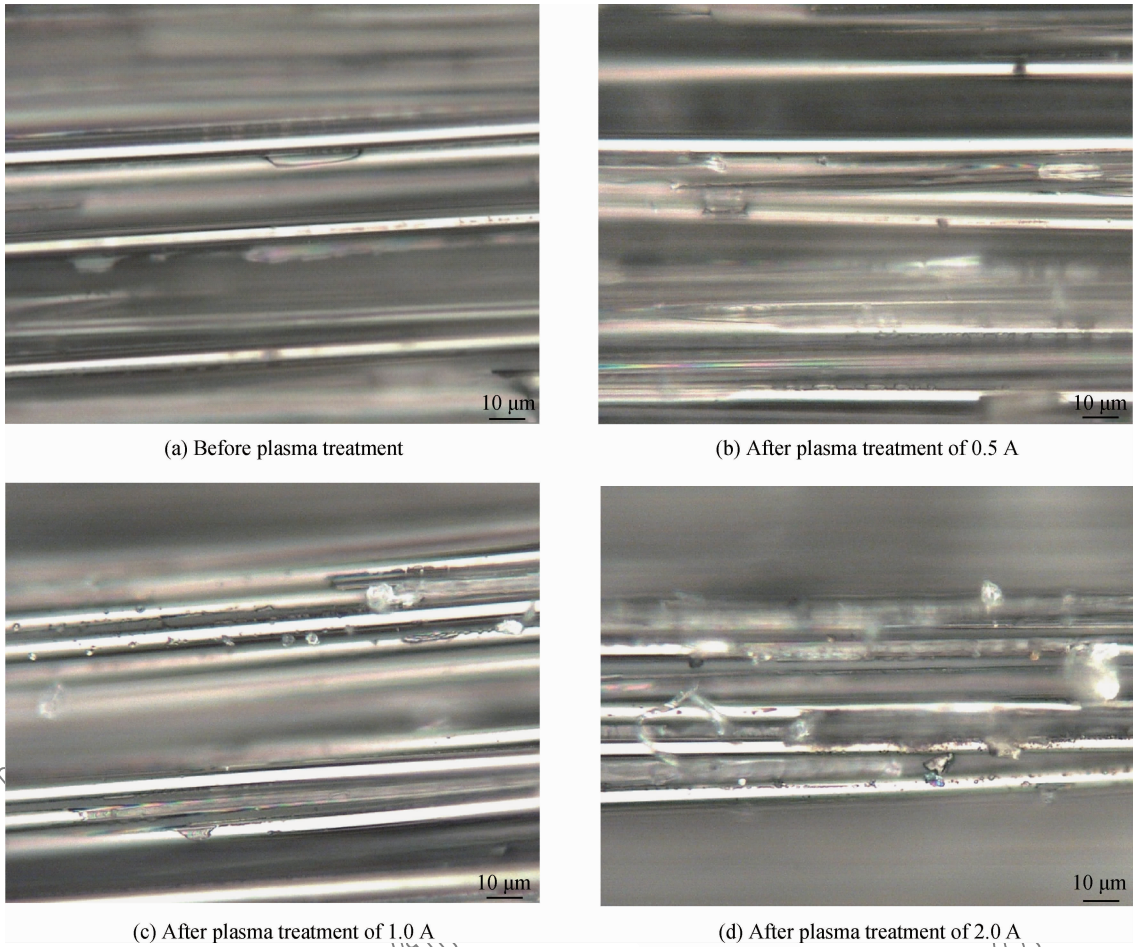


图 5 拉断后碳纤维/树脂复合材料内表面的金相显微镜照片  
Fig. 5 Metalloscope micrographs of inner surfaces of carbon fiber/resin composites after break

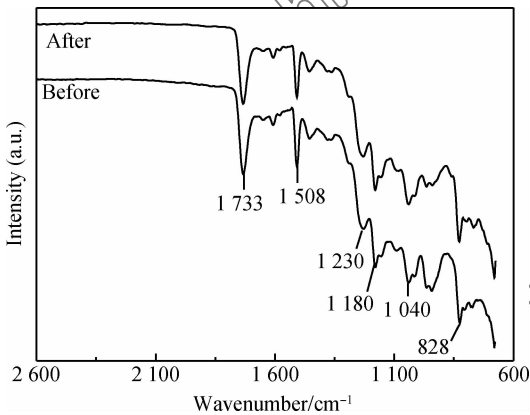


图 6 等离子体处理前后碳纤维/树脂复合材料的红外光谱  
Fig. 6 Infrared spectra of carbon fiber/resin composites before and after plasma treatment

体的不同虽可能会导致原有表面浸润性的不同，但对于等离子体处理改善表面浸润性的机制影响不大。因此，通过等离子体处理可提高纤维/树脂复合材料表面极性和浸润性，有利于特殊应用下纤

维/树脂复合材料表面涂层的沉积和表面改性，具有一定的应用前景。

### 3 结 论

采用等离子体技术处理了碳纤维/树脂复合材料，研究了不同工艺处理前后碳纤维/树脂复合材料的表面性能、力学性能以及表面官能团的变化。

(1) 电流、气压和处理时间都对碳纤维/树脂复合材料的表面浸润性有明显影响，其与蒸馏水和二碘甲烷的接触角随电流、气压的增加先降低后上升，随处理时间的延长先迅速降低后趋于稳定；当电流为 1.0 A、气压为 1.0 Pa、处理时间为 10 min 时，接触角最小，复合材料的表面浸润性最佳。

(2) 经过等离子体处理后，碳纤维/树脂复合材料的拉伸强度没有减小，反而提高了 8%，纤维与树脂间的粘连程度有所增加。

(3) 由红外光谱分析可知，等离子体处理后碳

纤维/树脂复合材料表面的酯基链发生断裂,酯基数量降低,相应形成酮基、羧基和醇羟基,表面极性增强。

## 参考文献:

- [1] Malkapuram R, Kumar V, Negi Y S. Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, 28(10): 1169-1189.
- [2] Zhang X H, Meng Y, Zhang W. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced composites[J]. *Fiber Composites*, 2004(1): 50-53 (in Chinese).  
张晓虎, 孟宇, 张伟. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. *纤维复合材料*, 2004(1): 50-53.
- [3] Zhang K, Ma Y, Yang S Q, et al. Corrosion-resisting properties of carbon fiber[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2009, 7(4): 1-4 (in Chinese).  
张凯, 马艳, 杨世全, 等. 碳纤维复合材料的耐腐蚀功能[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2009, 7(4): 1-4.
- [4] Šimor M, Fiala A, Kováčik D, et al. Corrosion protection of a thin aluminum layer deposited on polyester[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(18): 7802-7812.
- [5] Zhu L L, Zhang Z G, Li M, et al. Contact angle and action of adhesion between epoxy resin and fibers at processing temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(5): 41-46 (in Chinese).  
朱黎黎, 张佐光, 李敏, 等. 工艺温度下树脂与纤维的接触角及其粘附作用研究[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(5): 41-46.
- [6] Jia J, Chen J, Zhou H, et al. Comparative investigation on the wear and transfer behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites under dry sliding and water lubrication[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(7): 1139-1147.
- [7] Cao F W, Li M, Wang S K, et al. Wetting and adhesive interaction of the interface between carbon fiber and epoxy resin[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(4): 23-28 (in Chinese).  
曹芳维, 李敏, 王绍凯, 等. 碳纤维与环氧树脂润湿和黏附作用[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(4): 23-28.
- [8] Dilsiz N. Plasma surface modification of carbon fibers: A review[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2000, 14(7): 975-987.
- [9] Qin W, Zhang Z Q, Wang F P, et al. Effect of the cold plasma treatment on the RTM impregnation of carbon fibers braided by PET[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(5): 49-52 (in Chinese).  
秦伟, 张志谦, 王福平, 等. PET 缝编碳纤维织物冷等离子体处理对 RTM 成型浸润性的影响[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(5): 49-52.
- [10] Qin W, Zhang Z Q, Huang Y D, et al. Study on interfacial property of PET/epoxy composite treated by cold plasma[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(4): 25-28 (in Chinese).  
秦伟, 张志谦, 黄玉东, 等. 冷等离子体处理对 PET 纤维/环氧复合材料界面改性的研究[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(4): 25-28.
- [11] Jia L, Zhou L H, Xue Z Y, et al. Surface of carbon fiber grafted by plasma technology and its influence on the C/PAA composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(4): 45-49 (in Chinese).  
贾玲, 周丽绘, 薛志云, 等. 碳纤维表面等离子接枝及对碳纤维/PAA 复合材料 ILSS 的影响[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(4): 45-49.
- [12] Jiang S. Properties of plasma treated UHMWPE/LDPE composites[J]. *Journal of Textile Research*, 2007, 28(9): 57-60 (in Chinese).  
姜生. 等离子体处理后 UHMWPE 纤维与 LDPE 复合材料的性能[J]. *纺织学报*, 2007, 28(9): 57-60.
- [13] Wang H, Gu G H, Qin G Z. Evaluation of surface free energy of polymers by contact angle goniometry[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2006, 37(5): 942-947 (in Chinese).  
王晖, 顾帼华, 邱冠周. 接触角法测量高分子材料的表面能[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(5): 942-947.
- [14] Chen W M, Wang C Z, Zhou T Y, et al. High-performance resin matrix for T800 carbon fiber composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(4): 29-35 (in Chinese).  
陈伟明, 王成忠, 周同悦, 等. 高性能 T800 碳纤维复合材料树脂基体[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(4): 29-35.

## Carbon fiber/resin composites treated by plasma

NI Xinliang<sup>1, 2</sup>, JIN Fanya<sup>\*1</sup>, SHEN Liru<sup>1</sup>, TONG Honghui<sup>1</sup>

(1. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 621001, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In order to improve the surface wettability of carbon fiber/resin composites, the surfaces of composites were treated by plasma directly. By means of contact angle measurement, tensile test, metallographic microscopic analysis and infrared spectrum analysis, the best treating technology of carbon fiber/resin composites treated by plasma, mechanical properties and surface functional group changes of carbon fiber/resin composites before and after treatment were investigated. The results indicate that the current, pressure and treating time all have significant influence on the surface wettability of carbon fiber/resin composites, when current is 1.0 A, pressure is 1.0 Pa and treating time is 10 min, the surface wettability is optimal. The tensile strength of carbon fiber/resin composites does not decrease after treatment, while goes up of 8%. Infrared spectrum analysis shows that the ester group chain on treated carbon fiber/resin composite surface breaks and the quantity of ester group decreases. Accordingly, more ketone group, carboxyl group and alcoholic hydroxyl group are formed. The surface polarity is enhanced and wettability is improved significantly. The research solves the problem that the carbon fiber/resin composite surface is unreactiveness, and establishes the foundation for the surface function coating preparation.

**Keywords:** plasma treatment; wettability; surface functional group; carbon fiber/resin composites; surface energy