

协同处理对湿热环境下木粉/聚乙烯复合材料  
表面性质演变的影响

侯玉双<sup>1, 2</sup>, 郭笑<sup>1</sup>, 闫霜<sup>1</sup>, 郎明伟<sup>\*1</sup>

(1. 东北林业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 齐齐哈尔大学 材料科学与工程学院, 齐齐哈尔 161006)

**摘 要:** 采用硅烷偶联剂涂覆与等离子体放电协同处理的方法处理木粉/聚乙烯(WP/PE)复合材料表面, 以改善其胶接性能。利用胶接强度测试、FTIR 和 X 射线光电子能谱研究了硅烷偶联剂涂覆和等离子体放电的协同表面处理对 WP/PE 湿热环境下表面性质演变的影响, 探究协同处理的 WP/PE 胶接接头湿热环境下的胶接耐久性。结果表明, 协同处理后, WP/PE 表面有含氧极性基团生成, 且在偶联剂与材料表面之间形成了化学键接, 胶接性能大为改善。湿热环境下, 虽然处理试样的表面没有新的化学基团产生, 但表面元素的化学环境发生了改变。WP/PE 表面在湿热环境下的性质演变会直接影响其胶接接头的耐久性。协同表面处理能够降低湿热环境下 WP/PE 表面性质的改变程度, 从而提高 WP/PE 的胶接性能, 尤其是湿热环境下的胶接耐久性能。

**关键词:** 木粉/聚乙烯复合材料; 表面处理; 表面性质; 湿热老化; 协同效应

**中图分类号:** TQ321.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3861(2017)11-2414-07

Effect of combination treatment on evolvement of surface properties for  
wood powder/polyethylene composites under hygrothermal environment

HOU Yushuang<sup>1, 2</sup>, GUO Xiao<sup>1</sup>, YAN Shuang<sup>1</sup>, DI Mingwei<sup>\*1</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. College of Material Science and Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** The surface of wood powder/polyethylene (WP/PE) composites was treated by a combined treatment of sanding then coating with a silane coupling agent and plasma discharge to improve its adhesion properties. To explore the durability of adhesive joint in hot and humid environment, the bonding strength tests and the analysis of FTIR and XPS were used to study the effect of combination treatment on the surface properties changes of WP/PE under boiling environment. The results show that, there are oxygen polar groups generated on the surface of WP/PE after combination treatment, and the chemical bonds between silane coupling agent and composite surface are formed, which improves the bonding performances tremendously. There is no new chemical group generated on the surface of WP/PE with the increase of boiling time, but the chemical environment for the element on the surface changes. The change on surface properties of WP/PE under hot and humid environment will affect the durability of adhesive joint directly. The change degree of surface properties for WP/PE is retarded by combination treatment, and the bonding properties are improved consequently, especially for the water resistance of adhesive joint.

**Keywords:** wood powder/polyethylene composites; surface treatment; surface property; hygrothermal aging; synergistic effect

收稿日期: 2016-11-16; 录用日期: 2016-12-27; 网络出版时间: 2017-01-13 14:28  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170113.1428.002.html>  
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2572015EB01); 国家自然科学基金(31670567)  
通讯作者: 郎明伟, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物质复合材料、胶黏剂与胶接 E-mail: dimingwei@126.com  
引用格式: 侯玉双, 郭笑, 闫霜, 等. 协同处理对湿热环境下木粉/聚乙烯复合材料表面性质演变的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2414-2420.  
HOU Yushuang, GUO Xiao, YAN Shuang, et al. Effect of combination treatment on evolvement of surface properties for wood powder/polyethylene composites under hygrothermal environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(11): 2414-2420 (in Chinese).

木粉/聚乙烯复合材料(WP/PE)是木粉与聚乙烯通过熔融挤出复合而成的一种复合材料,在许多领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。由于制造工艺的限制,WP/PE制品的形状简单单一,故而实际应用中多靠机械连接方式进行组装;但在有些应用场合下则需要无缝连接,如木塑门窗型材之间的连接,此时唯有采用胶黏剂进行胶接才能实现无缝连接。然而,WP/PE的低表面能致使这类材料难以胶接,只有在表面处理的前提下才能实现材料之间的胶合连接。表面处理是改善WP/PE粘接性能的有效手段<sup>[2-6]</sup>,且不同的表面处理方法对其胶接性能的影响机制也各不相同<sup>[7-11]</sup>。研究表明<sup>[12]</sup>,利用偶联剂涂覆和等离子体放电的协同处理方法对WP/PE表面进行处理,不但可以大幅提高胶接强度,同时对胶接接头的耐水性能也有极大地改善。胶接过程发生在材料的表面,故而被粘材料的表面性质是影响材料胶接强度及其耐久性的主要因素<sup>[11]</sup>。为探究协同处理的WP/PE胶接接头保持优异胶接耐水性的原因,本文采用极端的水煮试验,研究了协同表面处理对WP/PE湿热环境下表面性质演变的影响,从而为实现WP/PE的无缝连接提供试验依据。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 材料

木粉/聚乙烯(WP/PE)复合材料试样,由杨木粉(粒径为380~830  $\mu\text{m}$ )、高密度聚乙烯和相容剂(马来酸酐接枝聚乙烯)采用挤出成型方法自制,其中WP的质量分数为60%,PE的质量分数为30%,其余为相容剂。 $\gamma$ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(硅烷偶联剂KH560),市售工业品,用无水乙醇配成质量分数为5%的溶液备用。

### 1.2 表面处理与湿热老化试验

用80  $\mu\text{m}$ 的砂纸打磨WP/PE(尺寸为40 mm $\times$ 25 mm $\times$ 4 mm)表面,去除其表面的PE成分<sup>[9]</sup>,打磨面积为25 mm $\times$ 20 mm;用适量的KH-560乙醇溶液涂覆在打磨后的WP/PE表面,待乙醇溶剂挥发后,再用GSL-1100X-PJF-A型射流等离子体处理机(沈阳科晶自动化设备有限公司生产)对材料表面进行等离子体处理,处理气氛为空气,气流喷射口与试样表面的距离为30 mm,处理时间为30 s。将协同处理后的WP/PE试样置于100℃的沸水中分别浸泡不同时间,取出后于30℃下恒温干燥至恒

重后备用。

### 1.3 胶接试验

分别选取未处理、打磨处理、等离子体处理、打磨后再等离子体处理(喷射口距试样30 mm,时间30 s)和协同表面处理的试样进行搭接形式的胶接试验,所用胶黏剂为双组份环氧树脂胶黏剂,固化工艺为50℃/4 h。另取部分粘接好的试样分别在25℃和100℃水中浸泡一定时间后取出,室温晾干至干燥后测试胶接剪切强度。

### 1.4 测试与表征

CMT-5504型万能力学试验机,深圳新三思公司生产,参照国家标准GB/T 17517—1998<sup>[13]</sup>测试胶接试样的压缩剪切强度。Magna-IR 560型傅里叶变换红外光谱仪,美国Nicolet公司生产,采用表面衰减全反射模式。K-Alpha型X射线光电子能谱仪,美国Thermo Fisher Scientific Co., Ltd生产;使用Avantage 4.67软件利用Gaussian-Lorentzian函数对XPS谱图进行数值拟合分峰处理,其中Lorentzian函数所占比例不多于20%;按污染碳C1s峰的结合能(285.00 eV)对测试数据进行荷电校正。

## 2 结果与讨论

### 2.1 WP/PE的胶接性能

图1为不同表面处理方法对WP/PE胶接接头25℃和100℃水浸不同时间后胶接强度的影响。可知,未处理的WP/PE胶接强度和胶接耐水性都很差;打磨后的WP/PE胶接强度有所增加,但耐水性提高不大,与打磨处理相比,不论直接进行等离子体处理还是打磨后再进行等离子体处理,WP/PE的胶接强度都有所增加,且耐水性也有提高,但这些处理方法得到的胶接接头耐水煮的性能依然很差。相比之下,采用偶联剂涂覆和等离子体协同处理的WP/PE胶接强度进一步提高,更值得注意的是,其耐水性能有了很大改善,尤其是耐水煮的性能。与单一表面处理方法相比,协同表面处理表现出了表面处理的协同效应,使WP/PE的胶接性能大为改善。

### 2.2 WP/PE的表面结构

图2为不同方法处理的WP/PE试样以及协同处理的WP/PE试样沸水浸泡不同时间后的表面红外光谱图。从图2中的曲线1可以看出,未处理试样的表面特征峰较少,主要是 $-\text{CH}_2$ 的特征吸收

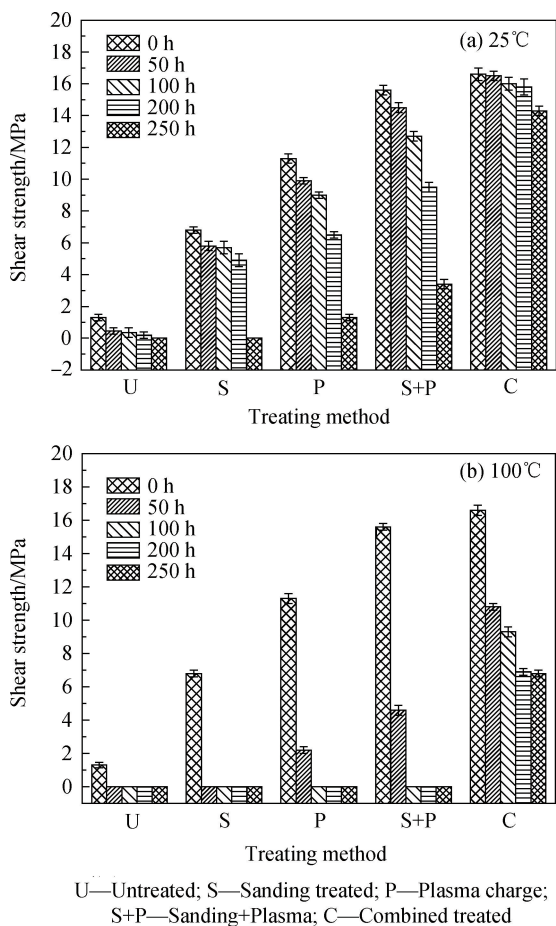


图1 不同表面处理对 WP/PE 胶接头 25℃ 和 100℃ 水浸不同时间后胶接强度的影响  
Fig.1 Effect of various treatments on the bonding strength of WP/PE soaked for various lengths of time under temperature of 25℃ and 100℃

峰,如 2 914.2  $\text{cm}^{-1}$  处的对称伸缩振动吸收峰、2 847.2  $\text{cm}^{-1}$  处的反对称伸缩振动吸收峰、1 471.2  $\text{cm}^{-1}$  处的面内弯曲振动吸收峰和 716.6  $\text{cm}^{-1}$  处的面内摇摆振动吸收峰,可见 WP/PE 的表面成分几乎全部为 PE<sup>[14]</sup>。与曲线 1 相比,曲线 2 的红外光谱上官能团明显增多,如 1 538.2  $\text{cm}^{-1}$ 、1 471.2  $\text{cm}^{-1}$  和 1 236.1  $\text{cm}^{-1}$  处苯环 C 骨架及—O—的振动吸收峰,1 051.6  $\text{cm}^{-1}$  和 1 019.5  $\text{cm}^{-1}$  处 C—O 的伸缩振动吸收峰以及 3 335.3  $\text{cm}^{-1}$  处—OH 的伸缩振动吸收峰等。这是复合材料表面的 PE 层被打磨去掉,露出内部的木质成分所致<sup>[15]</sup>。

协同表面处理,尽管 WP/PE 表面环氧基团的吸收峰(894.7  $\text{cm}^{-1}$ )不明显,但结合硅烷偶联剂涂覆处理 WP/PE 的前期研究结果<sup>[11]</sup> 以及协同表面处理后的胶接试验结果可知,在等离子体放电作用下,带有环氧基团的硅烷偶联剂与木粉中羟基发

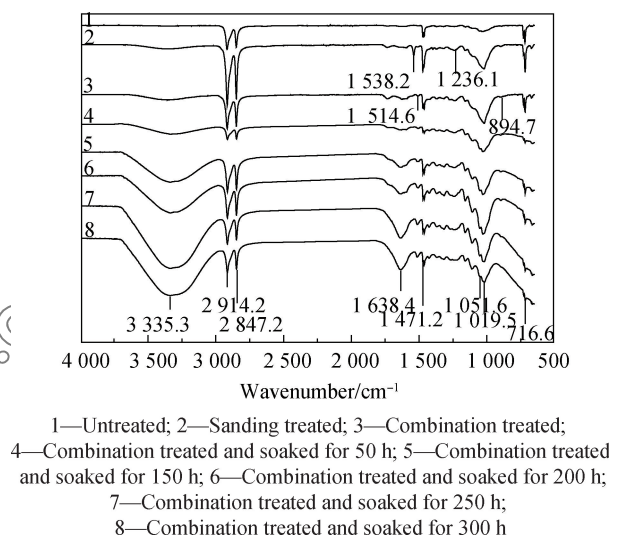


图2 不同方法处理的 WP/PE 沸水中浸泡不同时间后的表面红外光谱图  
Fig.2 Infrared spectra of the surface for WP/PE treated with different methods and immersed in boiling water for various lengths of time

生反应形成共价键 Si—O—C<sup>[16]</sup>;此外,在等离子体放电作用下,C—O 吸收峰(1 019.5  $\text{cm}^{-1}$ )和—C=O 吸收峰(1 638.4  $\text{cm}^{-1}$ )峰强增大;同时,尽管偶联剂会与材料表面的—OH 发生反应而造成羟基减少,但在等离子体放电的氧化作用下,—OH 的吸收峰(3 335.3  $\text{cm}^{-1}$ )峰强还是略有增加<sup>[17]</sup>。由此可以看出,WP/PE 经偶联剂涂覆和等离子体放电的协同处理后,在材料表面与硅烷偶联剂之间形成了化学链接,且材料表面极性基团的含量增加;表面极性基团的引入以及硅烷偶联剂的化学链接都对提高 WP/PE 的粘接性能起着重要作用。材料表面性质的变化不但影响材料的胶接性能,而且对其胶接耐久性也有重要影响。曲线 4~8 列出了协同处理的 WP/PE 试样在沸水中浸泡不同时间后的表面红外光谱。比较这几条曲线可以看出,协同表面处理后的 WP/PE 在沸水中浸泡不同时间后,其表面并没有生成新的化学基团,只是原有个别化学基团所对应的峰强有所改变。随着沸水浸泡时间的延长,材料表面 3 335.3  $\text{cm}^{-1}$  处的—OH 吸收峰和 1 638.4  $\text{cm}^{-1}$  处的 C=O 吸收峰明显增强,C—O 吸收峰(1 019.5  $\text{cm}^{-1}$ )和木质素中苯环氧键的吸收峰(1 514.6  $\text{cm}^{-1}$  和 1 471.2  $\text{cm}^{-1}$ )也逐渐增强。究其原因,可能是 WP/PE 中的 WP 在沸水中长时间浸泡下吸湿膨胀,使 WP/PE 表面产生裂纹,从而导致其内部的 WP(主要含有纤维素、半纤维素和



木质素等成分) 不同程度地暴露到材料表面所致<sup>[11, 14]</sup>。

### 2.3 WP/PE 的表面元素

#### 2.3.1 表面元素含量

对协同处理前后的试样以及协同处理后在沸水中浸泡不同时间的试样表面元素含量进行分析, 结果列于表 1。可知, 未处理的 WP/PE 表面绝大部分为 C 元素(质量分数为 92.71%), 只有少部分的 O 元素(质量分数为 7.29%)存在, 说明 WP/PE 表面几乎为 PE 成分, 而少量 O 元素的出现则是由于材料挤出成型和存放过程中的部分氧化所致。WP/PE 表面经过协同处理后, C 元素含量降低(质量分数为 70.49%), O 元素含量增加(质量分数为 25.97%), O/C 增大, 同时出现少量的 Si 元素(质量分数为 3.54%), 这说明经偶联剂和等离子体的协同表面处理后, WP/PE 表面有大量的极性含氧基团产生, 同时形成 Si—O—C 的共价键接, 从而验证了前述红外光谱的分析结果。

表 1 未处理和协同处理的 WP/PE 沸水浸泡不同时间后的表面元素含量

Table 1 Contents of the surface element for untreated and combination surface treated WP/PE immersed in boiling water for various lengths of time

Soaked time/h	Mass fraction/%			O/C
	C	O	Si	
Untreated	92.71	7.29	—	0.079
Combination treated	70.49	25.97	3.54	0.368
50 h	73.11	23.45	3.44	0.321
150 h	75.10	22.41	2.49	0.298
200 h	76.83	22.66	0.51	0.295
250 h	77.75	22.12	0.13	0.285
300 h	75.13	22.46	2.41	0.299

如 2.2 节所述, 协同处理的 WP/PE 长时间沸水浸泡后, 表面并没有产生新的化学基团, 只是原有个别基团的峰强有所改变, 表面元素的分析结果验证了这一结论。由表 1 可以看出, 协同处理的 WP/PE 经不同时间的沸水浸泡后, 材料表面的元素含量发生了变化。随着浸泡时间的延长, 试样表面 C 元素的相对含量逐渐增加, O 元素的相对含量逐渐降低, 且 C、O 元素含量的变化最终都趋于平缓, O/C 值逐渐降低且趋于稳定; 同时, 随着浸泡时间的延长, 试样表面 Si 元素的相对含量逐渐下降。这是由于长时间的沸水浸泡造成 WP/PE 表面硅氧共价键的水解, 导致 O 元素和 Si 元素的含量

降低; 同时在热和水的双重作用下, 材料中的 WP 吸水膨胀, 导致其表面出现裂纹, 露出材料的内部成分, 因此, C、O 元素的相对含量趋于稳定。沸水浸泡 300 h 后, WP 吸水膨胀造成材料表面破坏严重, 此时的元素含量已不能再体现材料表面的实际状况。WP/PE 表面元素含量的变化表明材料的表面性质在水和热的双重作用下发生了改变, 从而直接影响其胶接耐久性。

#### 2.3.2 表面 C 元素

图 3 为协同处理前后 WP/PE 表面 C 谱的 XPS 分析结果。由图 3(a) 可见, 未处理试样表面的 C 元素化学环境有三种情况(C1sA、C1sB 和 C1sC), 分别对应 C—C 或 C—H (285.00 eV)、C—O (286.61 eV) 以及 C=O 或 O—C—O (288.40 eV)<sup>[18]</sup>, 进一步验证了未处理试样的表面成分以 PE 为主。由图 3(b) 可以看出, 协同处理后, 试样表面的 C 元素变为五种化学环境(C1sA、C1sB、C1sC、C1sD 和 C1sE), 分别对应 C—C 或 C—H (285.00 eV)、C—O (285.67 eV)、C—O—Si (286.79 eV)、C=O 或 O—C—O (287.91 eV)、C=O (289.39 eV)。

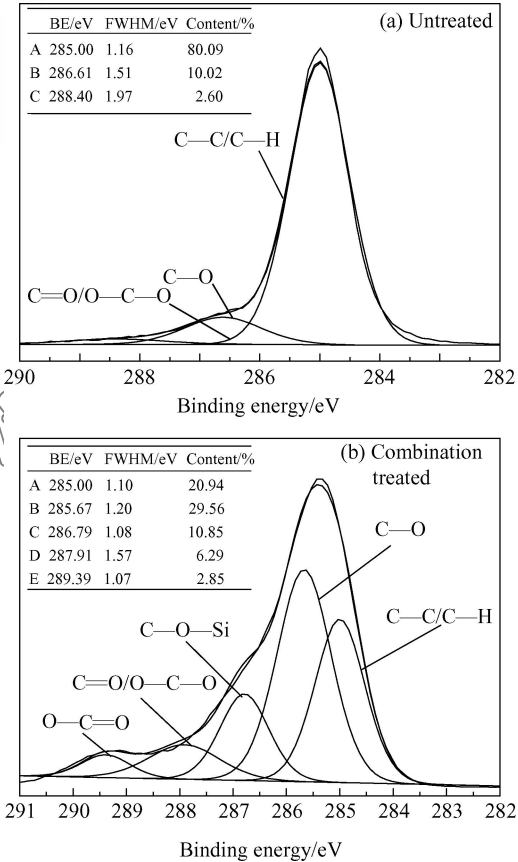


图 3 未处理和协同处理的 WP/PE 的表面 C 谱  
Fig. 3 C spectrum of the surface for untreated and combination treated WP/PE



或 O—C—O(287.91 eV)和 O—C=O(289.39 eV)。其中 O—C=O 的产生缘于材料内部的 WP 经打磨后暴露出来以及等离子体处理的氧化所致, C—O—Si 的产生是由于硅烷偶联剂与材料表面形成的化学键接。XPS 分析进一步验证了 2.2 节中协同处理后 WP/PE 表面基团变化的分析结果。

图 4 为协同处理的 WP/PE 沸水浸泡不同时间后的表面 C 谱分析。可见, 协同处理的 WP/PE 表面 C 元素的化学环境没有因沸水浸泡而改变, 但每个 C 元素化学环境所对应的相对含量却发生了变化。由此可以看出, 长时间沸水浸泡并没有在材料表面引入新的化学基团, 这与前述红外光谱分析的结果一致; 但每个 C 元素化学环境所对应的相对含量发生了变化, 表明 WP/PE 的表面在水和热的共同作用下发生了改变。材料表面性质的改变会直接影响材料表面与胶黏剂的胶接状态, 从而引起胶接性能的变化, 进而影响材料的胶接耐久性。

2.4 WP/PE 胶接接头的耐水失效机制

WP/PE 的表面成分几乎全部为 PE, 表面极性

差, 表面能低, 胶黏剂难以润湿和粘接。通过对其表面进行处理改变表面性质, 即可改善其胶接性能。前期研究结果表明, 硅烷偶联剂与 WP/PE 中木粉的羟基结合, 在减少其表面羟基含量的同时, 能与与胶黏剂形成化学键接的基团如环氧基团引入到材料表面, 从而改善胶接性能; 此外, 与水相比, 偶联剂与材料表面羟基的反应能力更强, 因而胶接界面水解产生的游离 Si—OH 又会重新与材料表面的一OH 形成化学键合, 从而在材料表面产生化学键的形成与断裂的动态平衡, 这种键的形成-断裂-形成的动态结合状态使硅烷偶联剂始终分别与材料表面及胶黏剂保持一定的连接状态, 也是采用硅烷偶联剂对 WP/PE 表面涂覆处理后使其胶接耐水性提高的主要原因<sup>[11, 19]</sup>。然而, WP/PE 的硅烷偶联剂涂覆处理主要针对材料内部的木质成分, 对 PE 成分却没有作用<sup>[20]</sup>, 因而相比之下, 胶黏剂与 PE 成分之间的粘接界面成为整个胶接接头中的薄弱环节, 长时间的水环境浸泡下, 胶接接头的胶接强度仍然会逐渐降低, 直至丧失胶接强度<sup>[21]</sup>。

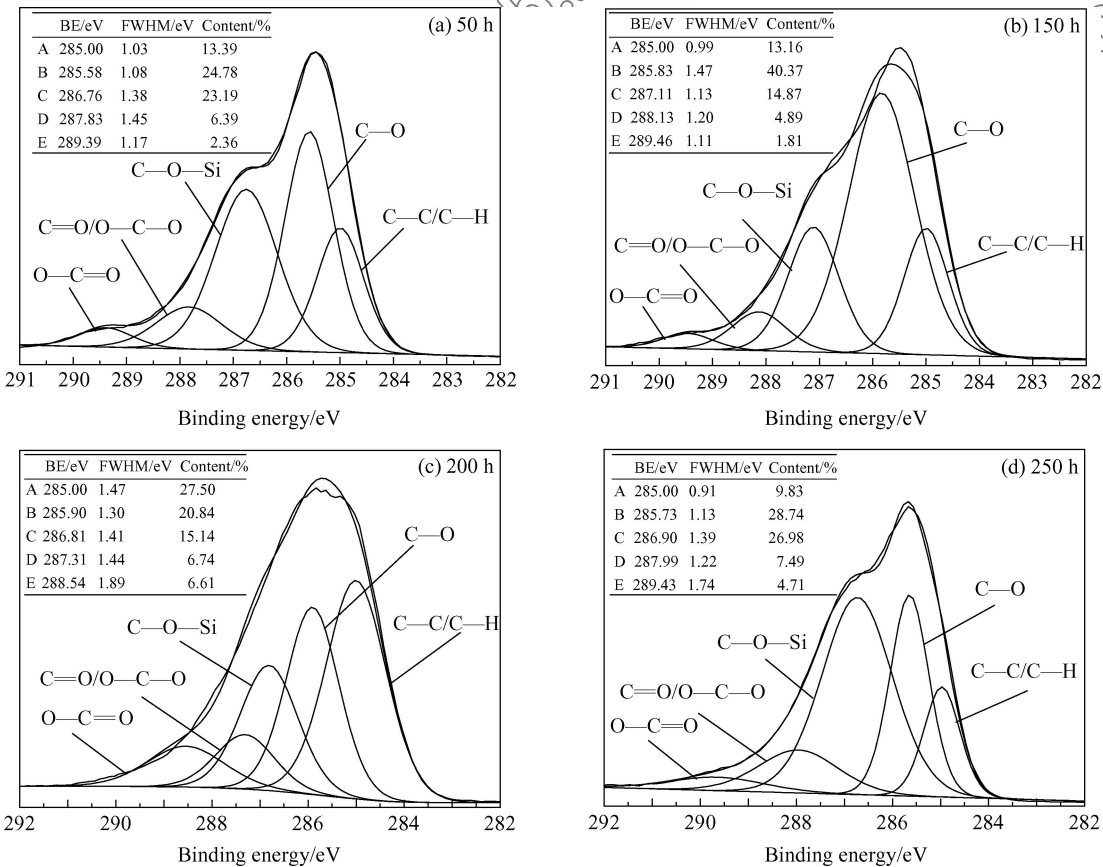


图 4 协同处理的 WP/PE 沸水浸泡不同时间后的表面 C 谱

Fig. 4 C spectrum of the surface for combination treated WP/PE immersed in boiling water for various lengths of time

本文采用的协同表面处理方法,除了利用等离子体放电处理 PE 成分外,还利用硅烷偶联剂在等离子体放电作用下与木质成分的羟基进行反应,从而对 WP/PE 中的 PE 成分和 WP 成分同时进行处理,既保证了胶接性能,又使胶接接头的耐水性能大幅提高。尽管长时间沸水浸泡下材料表面的一 Si—O—C 键发生水解,使部分偶联剂脱离材料表面,但上述硅氧键的形成-断裂-形成的动态结合状态以及等离子体处理导致的 PE 黏附性能的提高使胶接接头的耐水和耐热性均优于单一的硅烷偶联剂处理。随着浸泡时间的延长,WP/PE 中的 WP 吸水发生膨胀,造成其表面性质的进一步改变,这种变化会加剧破坏胶黏剂与材料表面的结合程度,从而引起胶接接头粘接性能的下降。可以看出,对于水环境下 WP/PE 的胶接耐久性而言,材料内部的 WP 吸水膨胀是影响其胶接接头强度下降的主要原因;再加上热的作用,更加剧了胶接接头的破坏程度。尽管在实际应用中,这种沸水浸泡的湿热环境很少触及,但文中采用的这种以沸水浸泡进行的耐湿热极端试验结果,依然可用于解释 WP/PE 胶接接头在湿热环境下的胶接耐久行为,同时也为改善 WP/PE 胶接接头的耐久性提供试验依据。

值得注意的是,单一偶联剂涂覆处理的 WP/PE 水环境下的表面性质演变试验是在室温的水浸环境下进行的<sup>[11]</sup>,而本文中协同处理试样表面性质的改变却是在沸水浸泡环境下,其处于水和热的双重作用之下,可以看出,与单一的偶联剂涂覆表面处理相比,协同处理试样的表面性质在水环境下的变化更小,这也是协同处理能够保持优异胶接耐久性的重要原因。

### 3 结 论

(1) 木粉/聚乙烯复合材料(WP/PE)的表面成分几乎全部为 PE,经硅烷偶联剂涂覆和等离子体放电的协同处理后,材料表面出现含氧极性基团,且偶联剂通过和复合材料中 WP 的羟基反应,与材料表面形成化学键接。

(2) 协同处理的 WP/PE 经沸水浸泡后,尽管表面没有生成新的化学基团,但原有化学基团的相对含量发生了变化,从而造成其表面性质的改变。

(3) 沸水浸泡环境下,WP/PE 中 WP 的吸水膨胀不断加剧,改变了复合材料的表面性质,进而影响材料胶接接头的耐久性。

(4) 与单一表面处理方法相比,硅烷偶联剂和等离子体放电的协同处理使 WP/PE 水环境下表面性质的改变更小,这种处理的协同效应极大地改善了 WP/PE 胶接接头的胶接强度和胶接耐水性。

### 参考文献:

- [1] PERISIĆ M, RADOJEVIĆ V, USKOKOVIĆ P S, et al. Wood-thermoplastic composites based on industrial waste and virgin high density polyethylene (HDPE)[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2009, 24(10-11): 1207-1213.
- [2] GRAMLICH W M, GARDNER D J, NEIVANDT D J. Surface treatment of wood-plastic composites (WPCs) to improve adhesion[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2006, 20(16): 1873-1887.
- [3] LIU Y, TAO Y, LV X Y, et al. Study on the surface properties of wood/polyethylene composites treated under plasma[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 257(3): 1112-1118.
- [4] WOLKENHAUER A, AVRAMIDIS G, HAUSWALD E, et al. Plasma treatment of wood-plastic composites to enhance their adhesion properties[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008, 22(16): 2025-2037.
- [5] OPORTO G S, GARDNER D J, BERNHARDT G, et al. Characterizing the mechanism of improved adhesion of modified wood plastic composite (WPC) surfaces[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007, 21(11): 1097-1116.
- [6] MOGHADAMZADEH H, RAHIMI H, ASADOLLAHZADEH M, et al. Surface treatment of wood polymer composites for adhesive bonding[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, 31(8): 816-821.
- [7] GUPTA B S, LABORIE M P G. Surface activation and adhesion properties of wood-fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *The Journal of Adhesion*, 2007, 83(11): 939-955.
- [8] 陈志博,滕晓磊,张彦华,等. 聚乙烯/木粉复合材料的液相化学氧化表面处理[J]. *高分子材料科学与工程*, 2011, 27(11): 49-52.
- [9] CHEN Z B, TENG X L, ZHANG Y H, et al. Liquidoid chemical oxidation surface treatment of polyethylene/wood composites[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2011, 27(11): 49-52 (in Chinese).
- [9] 王辉,邸明伟. 磷酸酯偶联剂涂覆对聚乙烯木塑复合材料粘接性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2013, 29(5): 58-62.
- [9] WANG H, DI M W. Effect of surface coating treatment by phosphate ester coupling agent on bonding properties of wood/polyethylene composites[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2013, 29(5): 58-62 (in Chinese).
- [10] LABORIE M P G, GUPTA B. Oxyfluorination of wood-fiber

- reinforced thermoplastic composites to improve adhesion[J]. *The Journal of Adhesion*, 2008, 84(10): 830-846.
- [11] 邸明伟, 王辉. 水环境下偶联剂处理聚乙烯木塑复合材料表面性质的演变[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(3): 475-480.
- DI M W, WANG H. Evolvement of surface properties for wood/polyethylene composites treated by silane coupling agent under water immersion[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(3): 475-480 (in Chinese).
- [12] 李晓磊, 窦维维, 李学平, 等. 偶联剂与等离子体协同表面处理对聚乙烯木塑复合材胶接性能的影响[J]. *化学与黏合*, 2014, 36(1): 1-4.
- LI X L, DOU W W, LI X P, et al. Effect of synergetic surface treatment with coupling agent coating and plasma discharge on the bonding properties of polyethylene-wood plastics composites[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2014, 36(1): 1-4 (in Chinese).
- [13] 国家质量技术监督局. 胶粘剂压缩剪切强度试验方法: 木材与木材: GB/T 17517—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Adhesives-wood to wood adhesive bonds: Determination of shear strength by compression loading: GB/T 17517—1998[S]. Beijing: China Standards Press, 1998 (in Chinese).
- [14] 陶岩, 王辉, 邸明伟. 水环境下等离子体处理聚乙烯木塑复合材料表面性质的演变[J]. *材料工程*, 2012(10): 94-98.
- TAO Y, WANG H, DI M W. Evolution of surface properties for plasma treated wood/polyethylene composites under water soaking[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(10): 94-98 (in Chinese).
- [15] PANDEY K K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 71(12): 1969-1975.
- [16] NAKATANI H, IWAKURA K, MIYAZAKI K. et al. Effect of chemical structure of silane coupling agent on interface adhesion properties of syndiotactic polypropylene/cellulose composite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 119(3): 1732-1741.
- [17] 刘杨, 吕新颖, 陶岩, 等. 聚乙烯木塑复合材料的等离子体表面处理-等离子体处理时间对复合材料表面特性的影响[J]. *高分子学报*, 2010(6): 781-787.
- LIU Y, LV X Y, TAO Y, et al. Plasma surface treatment of wood powder/polyethylene composites-Effect of treatment time on surface characteristics of the composites[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2010(6): 781-787 (in Chinese).
- [18] NICOLE M S, LAURENT M M. Surface chemistry changes of weathered HDPE/wood-flour composites studied by XPS and FTIR spectroscopy[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2004, 86(1): 1-9.
- [19] DEMIR H, ATIKLER U, BALKÖSE D, et al. The effect of fiber surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene-luffa fiber composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(3): 447-456.
- [20] 王辉, 杨伟军, 邸明伟, 等. 偶联剂处理对木塑复合材料胶接性能的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(4): 112-115.
- WANG H, YANG W J, DI M W, et al. Effect of surface treated by silane coupling agent on bonding properties for wood/polyethylene composites[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(4): 112-115 (in Chinese).
- [21] 王辉, 邸明伟. 硅烷偶联剂处理木塑复合材胶接接头的耐水性[J]. *粘接*, 2012(5): 42-45.
- WANG H, DI M W. On water-resistance for bonding joints of wood/PE composites treated with silane coupling agent[J]. *Adhesion*, 2012(5): 42-45 (in Chinese).