http://pmse.scu.edu.cn

玄武岩纤维表面硅烷偶联剂接枝率对环氧树脂复合材料界面强度及力学性能的影响

张圣昌，钟天皓月，许启彬，宿泽熙，姜猛进，刘鹏清
（四川大学 高分子科学与工程学院，四川 成都 610065）

摘要：为提高玄武岩纤维（BF）增强环氧树脂（EP）复合材料的力学性能，本文通过接枝硅烷偶联剂 KH550 来提升 BF 与 EP 之间的界面强度。采用衰减全反射红外光谱、X 射线光电子能谱仪、原子力显微镜、扫描电子显微镜、界面剪切强度测试和拉伸测试研究 BF 表面 KH550 的接枝率对复合材料界面粗糙度、界面强度以及拉伸强度的影响。结果表明，KH550 的成功接枝可以增加 BF 的表面粗糙度以及复合材料的界面强度；随着 KH550 接枝率的增加，BF 表面形貌呈现“光滑-粗糙-光滑-粗糙”的变化过程，复合材料的界面强度及力学性能也呈现先增大后减小的趋势。当 KH550 接枝率达到 5%~6%时，KH550-BF 表面均匀光滑，复合材料的界面强度和拉伸强度达到最大，分别为 48 MPa 和 298 MPa。当接枝率超过 6%，过量的 KH550 在 BF 表面的不均匀分布形成结构缺陷和应力集中，进而导致复合材料界面强度和力学性能的降低。

关键词：玄武岩纤维；环氧树脂；化学接枝；界面强度；硅烷偶联剂；力学性能

玄武岩纤维（BF）是以天然的火山喷出岩作为原料，将其破碎后加入熔窑中，在 1450~1500 ℃熔融后，通过铂铑合金漏板经拉丝制成的纤维，主要成分是 SiO_2，Fe_2O_3 和 Al_2O_3[1]。BF 纤维的拉伸强度高于 E-玻璃纤维比 S-玻璃纤维略低，与普通碳纤维性能相近，且由于其来源广泛，生成成本要远低于碳纤维[2]。同时，相较于其他高性能纤维在生产过程中释放的有毒物质、腐蚀物和污染物这一缺点，BF 纤维的生产过程中没有污染物产生，被认为是绿色无污染的高性能纤维。此外，BF 纤维还具良好的耐腐蚀性、优异的耐高温、化学稳定性、电绝缘性等诸多优点，是综合性能优异、性价比极高的无机纤维；被广泛用于增强环氧树脂（EP）基复合材料[3, 4]。

但是，由于 BF 与 EP 基体之间相对较弱的界面强度，无法匹配 BF 和 EP 基体自身的力学强度，从而界面处成为结构缺陷和应力集中点，最终造成复合材料的力学性能降低，无法最大程度发挥纤维对聚合物基体的增强效应[5]。因此，众多科研工作者对 BF 进行各种表面处理，提升 BF 与 EP 基体之间的界面强度，进行提升复合材料的力学性能。常用方法有表面处理（等离子、辐照、酸、碱刻蚀处理）、引入无机纳米颗粒和引入有机分子链段[6-8]。

在 BF 表面接枝有机分子链段被证明是改善其与 EP 基体界面强度行之有效的方法。Yu 等通过 4 种不同接枝方法将 KH550 接枝在 BF 表面，发现先使用丙酮预处理后再用 KH550 对 BF 进行接枝，最终使 EP 复合材料的抗拉强度和冲击强度分别提高了 15.2%和 27.8%[9]。Arslan 等使用 3 种硅烷偶联剂对 BF 进行表面改性，并实现了对 ABS 复合材料的抗弯强度和模量的提升[10]。Yu 等研究了硅烷偶联剂上氨基数和脂肪链长对 BF 界面的影响，研究结果表明，长链氨基硅烷对 BF 和 PA66 之间的界面强化效果最好[11]。尽管化学接枝硅烷偶联剂用于增强 BF 与 EP 之间的界面强度与复合材料力学性能已经被广泛研究，然而硅烷偶联剂的接枝率对

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0042
收稿日期：2021-07-19
基金项目：四川省重大科技专项项目（2019ZDZX0023）；四川省重点研发项目（2022YFG0272）
通讯联系人：刘鹏清，主要从事高性能纤维的开发和纤维增强树脂基复合材料的研究，E-mail：liupq@scu.edu.cn

复合材料的界面粗糙度、界面强度以及力学性能的影响仍旧鲜有报道。同时，BF 表面接枝硅烷偶联剂对复合材料力学性能的增强机理仍缺乏系统的研究。

本文通过改变硅烷偶联剂/乙醇溶液的浓度，制备了一系列 KH550 接枝率不同的 BF；经过浸渍和热压成型工艺，得到相应的 HK550 改性 BF/EP 复合材料。通过扫描电子显微镜与原子力显微镜表征纤维改性前后粗糙度的变化，界面剪切强度测试和力学性能表征复合材料的界面强度和力学性能。最终，分析得到不同 KH550 接枝率对复合材料界面粗糙度、界面强度以及力学性能的影响规律，总结出 KH550 增强 BF/EP 复合材料机理。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

玄武岩纤维平纹织物：225 g/m^2，四川省玻纤集团有限公司；新型有机-无机杂化树脂（OIHR）：环氧值 32，实验室自制；甲基四氢邻苯二甲酸酐（MeTHPA）：工业级，济宁华凯树脂有限公司；二甲基咪唑、3-氨丙基三乙氧基硅烷（KH550）：分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；丙酮、无水乙醇：分析纯，成都科龙化工试剂厂。

1.2 实验过程

1.2.1 硅烷偶联剂对 BF 的表面改性：进行表面处理前，BF 纤维在丙酮中多次超声洗涤除去表面的上浆剂，得到 P-BF。首先，将不同质量的 KH550 加入至去离子水与无水乙醇质量比 1∶1 的混合溶剂中，得到质量分数分别为 1%，2%，3%，4%，5%及 6%的 KH550 溶液。再将 BF 纤维浸渍于 KH550 溶液 30 min，取出后，于 110 ℃下加热处理 2 h，使 KH550 水解产生的硅羟基和玄武岩纤维表面水解产生的硅羟基在形成氢键的基础上充分缩合，其反应过程如 Fig.1 所示。最后，将表面处理后的 BF 在丙酮中超声洗涤，除去未接枝的 KH550。所得表面改性的 BF 用“x%-KH550-BF”表示，其中，x 表示预处理 KH550 溶液的质量分数。

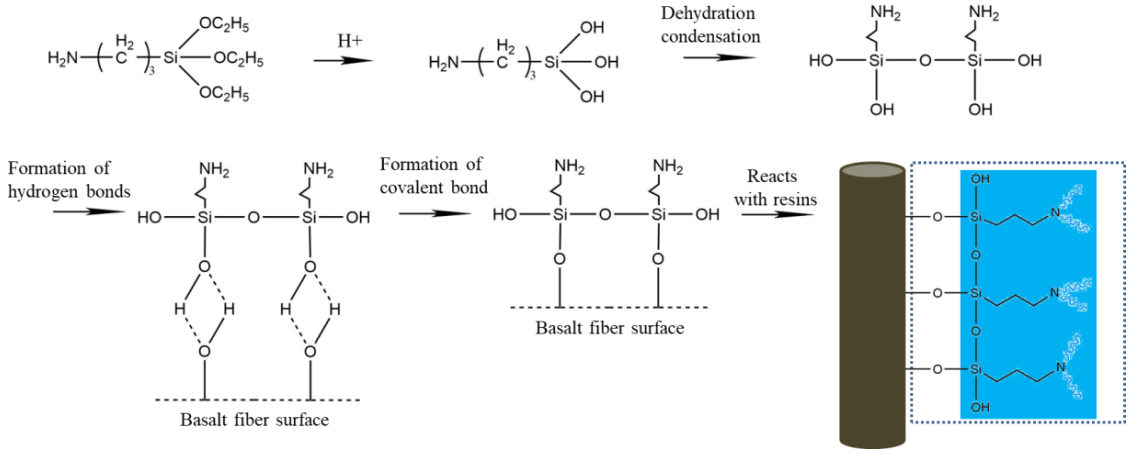

Fig.1 Reaction mechanism between BF and KH550

1.2.2 x%-KH550-BF/EP 复合材料的制备：首先，按 100∶60∶1 的质量比称取树脂 OIHR、固化剂 MeTHPA 和促进剂二甲基咪唑。先将促进剂与固化剂混合，加热至 80 ℃；再加入树脂，混合均匀得到环氧树脂基体液。使用线棒（120um-DMY-XB，广州德满亿仪器有限公司）将计量好的基体液涂在聚酯离型膜上，上方平铺单层 BF 平纹织物，织物上方再放置 1 层聚酯离型膜；进入覆膜机进行多次辊压，形成 BF/EP 预浸料。计算树脂与 BF 的质量比，控制在 25:75～30:70 之间。对预浸料进行排气处理之后，揭去离型膜，将 BF/EP 预浸料整齐地叠为 10 层，放入热压机的 2 块钢板中进行热压成型处理。先将平板硫化机升温至 90 ℃，在不施加压力的条件下预固化 0.5 h；之后将压力升至 1 MPa，然后将温

度升至 120 ℃，固化 1 h；再将压力升至 3 MPa，温度升为 150 ℃，固化 1 h；最后将压力调整为 5 MPa，固化 1 h。

1.3 测试与表征

1.3.1 红外光谱分析：采用傅里叶变换红外光谱仪（Nicolet 6700 型，美国 Nicolet 公司）测试改性前后 BF 织物表面的衰减全反射红外光谱(ATR)，测试波长范围为 400～4000 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}。

1.3.2 X 射线光电子能谱分析：使用 X 射线光电子能谱仪（AXI Sultra DLD，日本岛津公司）对改性前后 BF 织物表面官能团组成和元素的相对含量进行测试，以 Al 为阳极靶进行测试。

1.3.3 接枝率测试：采用称重法测试 BF 织物改性前后，经洗涤烘干后，质量的变化率作为 KH550-BF 的接枝率（GY），并由式（1）计算

$$GY=(M_1-M_2)/M_2 \quad (1)$$

式中：M_1为接枝 KH550 后 BF 织物的烘干质量；M_2为接枝前 BF 织物的烘干质量。

1.3.4 扫描电子显微镜表征：采用扫描电子显微镜（SEM，Inspect F，FEI 公司）对一系列复合材料的断面进行观察。测试前对试样进行喷金处理，加速电压为 20 kV。

1.3.5 原子力显微镜表征：使用原子力显微镜（AFM，Smart SPM，AIST-N 公司）对改性前后 BF 织物表面进行观测，并通过 AFM 配套软件（aist-3.3.112）绘制出区域内的三维形貌图，并计算出取样区域内的均方根粗糙度（Rms）。

1.3.6 界面剪切强度测试：使用复合材料界面显微测试仪（北京富有马科技有限责任公司），通过微滴脱黏法对改性前后 BF 和环氧树脂之间的界面剪切强度进行测试。

1.3.7 力学性能测试：采用深圳万测公司的 ETM-104C 万能试验机，参考标准 GB/T 1447-2005，测试复合材料的拉伸强度。将复合板材切割为 150 mm×10 mm×2 mm 的条形试样，拉伸速度为 5 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 化学结构分析

Fig.2 为改性前后 BF 织物的红外光谱图。对于未改性的 BF，3450 cm^{-1}处的特征峰为表面的羟基的伸缩振动峰，1082 cm^{-1}处的特征峰为 Si-O 键的伸缩振动峰。接枝 KH550 改性之后，出现了 2 处新的变化；在 2850 cm^{-1}和 2920 cm^{-1}处出现的 2 个吸收峰分别对应了 KH550 上烷基的伸缩振动峰，在 1115～1623 cm^{-1}一系列吸收峰对应质子化胺的对称和非对称变形振动。由于测试前，BF 表面物理吸附的 KH550 已被去除，氨基和烷基的存在初步证明了 KH550 被成功接枝 BF 织物表面[11]。

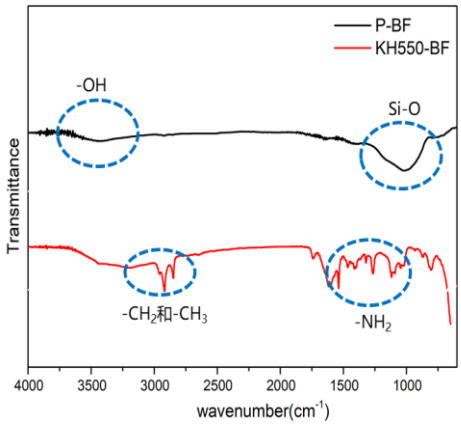

Fig.2 ATR-FT-IR spectra of P-BF and KH550-BF

BF 织物表面改性前后的化学结构变化被 XPS 进一步表征，结果如 Fig.3 所示。与改性前的 BF 织物相比（Fig.3a），改性后的 BF 织物表面检测到了氮元素的存在，这与表面接枝的 KH550 中的氨基有关（Fig.3a'）。进一步结果从改性前后 BF 织物表面的 C（1s）谱（Fig.3b 和 Fig.3b'）和 N（1s）谱（Fig.3c 和 Fig.3c'）的变化分析得到。在 C（1s）谱中，特征峰 283.7 eV，285.1 eV 和 286.4 eV 分别对应烷基、乙氧基（或羟基）和羰基；改性后新出现的 284.1 eV 特征峰与 KH550 中的 C-N 键有关。同时，改性前的 BF 织物的 N（1s）谱（Fig.3c）信号很弱，基本没有相关含氮基团；改性后的 BF 织物的 N（1s）谱（Fig.3c'）出现 2 个新的特征峰，其中在高结合能下的为质子化氨基，在低结合能下的为非质子化氨基[12]。质子化氨基的形成是由于 KH550 中的 NH/NH2 极性基团与 BF 表面或其他硅烷分子中的羟基发生了反应，从而产生 $NH+/NH^{2+}$。综合红外光谱与 XPS 能谱的结果，明确 KH550 被成功接枝在 BF 织物表面[11]。

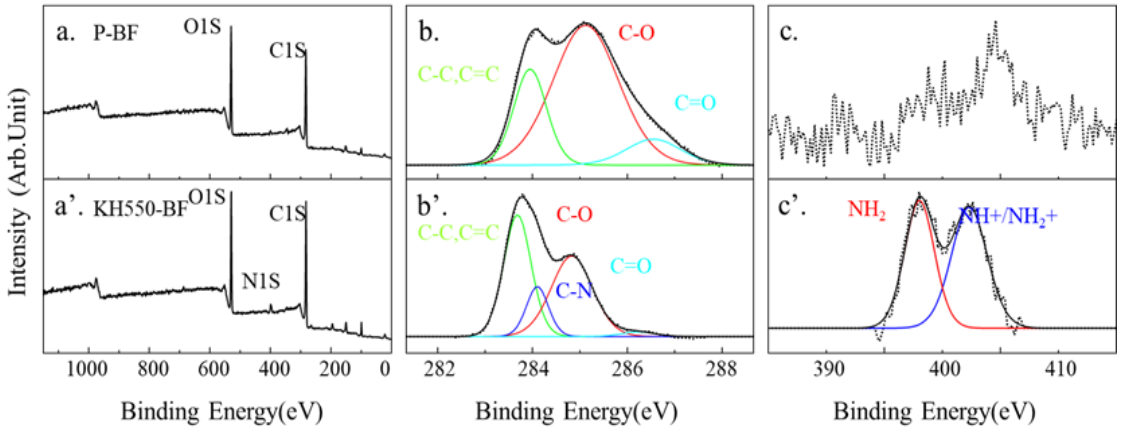

Fig.3 XPS spectra of P-BF（a：broad；b：C1s；c：N1s）and KH550-BF（a'：broad；b'：C1s；c'：N1s）

2.2 织物表面分析

BF 织物表面的 KH550 接枝率随 KH550 溶液浓度的升高逐渐上升（Fig.4）。同时，随着 KH550 溶液浓度的升高，接枝率的增长速度逐渐放缓；这是由于随着表面接枝的 KH550 数量的增多，会形成一定程度的空间位阻作用，阻碍游离的 KH550 分子的靠近反应。另一方面，BF 织物表面接枝 KH550 之后产生的 $NH+/NH^{2+}$ 质子化基团，使 KH550 末端产生电荷排斥效应，同样抑制了游离的 KH550 分子向 KH550-BF 织物的进一步靠近。

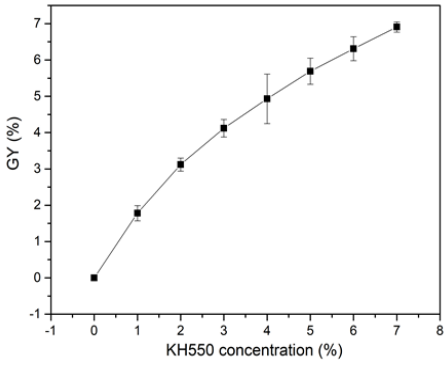

Fig.4 Relationship between KH550 concentration and grafting yield (GY) of KH550 on the surface of BF

改性前后的 BF 织物表面粗糙度变化直接由 AFM 进行观察，如 Fig.5 所示。未改性的 BF 织物呈现一个光滑、均匀无沟壑的表面（Fig.5a）；随着表面接枝 KH550 含量逐渐增多，BF 织物表面开始变得粗糙且不均匀（Fig.5b～d）。然而，随着接枝率的进一步提高，BF 织物表面逐渐变为均匀且光滑（Fig.5e 和 Fig.5f）。最后，随着接枝率的增多，BF 织物的形貌变得粗糙且不均匀（Fig.5g 和 Fig.5h）。这是因为，当 KH550 接枝率较低的时候，其随机接枝在 BF 织物的表面，因此织物表面会变得粗糙；随着 KH550 的接枝率进一步提升，接枝的 KH550 逐渐布满整个织物表面，KH550 像一层外壳一样，均匀地包裹织物表面，因此织物表面开始转变为均匀且光滑；随后，KH550 的接枝率进一步升高，其又开始进一步在织物表面（或接枝的 KH550 层上）随机分布，织物表面又转变为粗糙且不均匀表面。

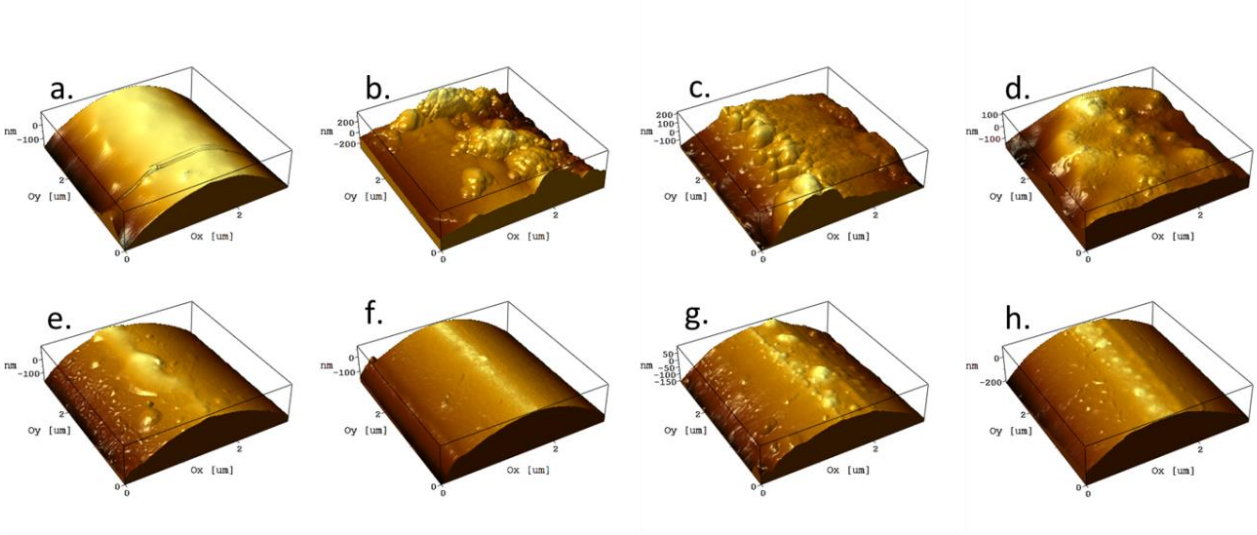

Fig.5 AFM images of KH550-BF

a:p-BF;b:1%-KH550-BF;c:2%-KH550-BF;d:3%-KH550-BF;e:4%-KH550-BF;f:5%-KH550-BF;g:6%-KH550-BF;h:7%-KH550-BF

BF 织物接枝改性前后的表面粗糙度由各个样品的 AFM 图像计算出试样表面的均方根粗糙度（Rms）来表示，由 Fig.6 所示。从整体变化趋势来看，织物表面的粗糙度随着表面接枝的 KH550 的增多，呈现“光滑-粗糙-光滑-粗糙”的变化趋势，与 AFM 图像呈现的信息完全一致。当 KH550 处理溶液的质量分数为 1%和 2%时，此时 BF 织物的表面粗糙度达到最大；随着处理浓度的进一步提升，KH550 逐渐布满整个织物表面，表面逐渐变得光滑均匀；在处理溶液的质量分数为 5%时，表面粗糙度达到最低；之后进一步增大 KH550 处理浓度，织物表面的粗糙度出现增大，原因在于 KH550 继续在光滑均匀的表面进行接枝，引入了新的不均匀性。

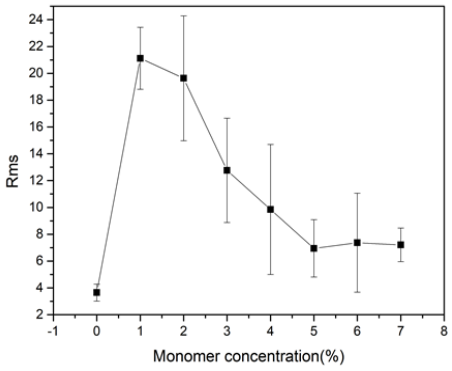

Fig.6 Relationship between Rsm of x%-KH550-BF and the concentration of KH550 solutions

2.3 界面强度

改性前后 BF 织物与环氧树脂之间的界面强度由微滴脱黏法进行表征，结果由 Tab. 1 所示。P-BF 与 EP 之间的界面强度为 43.3 MPa；在 KH550 接枝在 BF 表面之后，1-KH550-BF 与 EP 之间的界面强度上升至 44.5；随着表面接枝的 KH550 含量逐渐增多，织物与树脂基体的界面强度逐渐增大；当 KH550 处理溶液的质量分数达到 5%时，5-KH550-BF 与 EP 之间的界面强度达到最大值。这是因为，表面接枝的 KH550 能够提供织物与基体之间更强的界面相互作用力，当接枝率较低时，由于 KH550 随机分布在织物表面，这种强的界面粘接仍是不均匀的，更多的是以提供机械啮合的效应来增强织物与基体之间的界面强度；随着接枝率的提高，KH550 均匀地分布在织物界面上，整个织物被 KH550 所包覆，此时的界面相互作用力的均匀的，也是更强的，这种强且均匀的界面粘接能力最大程度地提升了织物与基体之间界面强度。随着接枝率的进一步增大，表面又开始变得粗糙，这种新引入的界面粗糙，成为了原来被增强界面的薄弱点或是结构缺陷，因此织物与基体之间界面强度出现一定程度的降低。

Tab. 1 Interfacial strength between BF before or after grafted with KH550 and EP

Sample	IFSS (MPa)	Sample	IFSS (MPa)
P-BF	43.3±8.1	4%-KH550-BF	47.3±6.4
1%-KH550-BF	44.5±7.3	5%-KH550-BF	48.0±2.1
2%-KH550-BF	45.0±5.6	6%-KH550-BF	46.6±3.9
3%-KH550-BF	46.4±5.8	7%-KH550-BF	45.6±4.6

织物与基体之间的界面强度还可以通过复合材料的拉断界面来观察分析，结果如 Fig.7 所示。对于 P-BF/EP 复合材料，其断口的纤维均处于分离状态，纤维上几乎没有树脂残留，表现出很明显的纤维拔出现象。这说明了未改性的 BF 对树脂基体的黏附能力很差。随着 KH550 浓度的逐渐增大，可以看到纤维上黏附的树脂越来越多，如 Fig.7b～e，这说明改性 BF 与 EP 之间的界面黏附作用越来越大。从 Fig.7f 中可以看到，5%-KH550-BFRP 组试样的断口平整，纤维拔出现象消失，说明 KH550 的加入使了纤维和树脂之间产生化学键合作用，通过化学键连接的纤维和树脂黏附十分牢固，在试样受到应力的过程中，纤维可以通过界面把应力传递给增强纤维，减少了应力集中，从而提高了复合材料整体的强度。当 KH550 进一步增加，造成界面出现结构缺陷，应力集中点导致界面强度降低，因此断口处又逐渐出现纤维拔出现象。

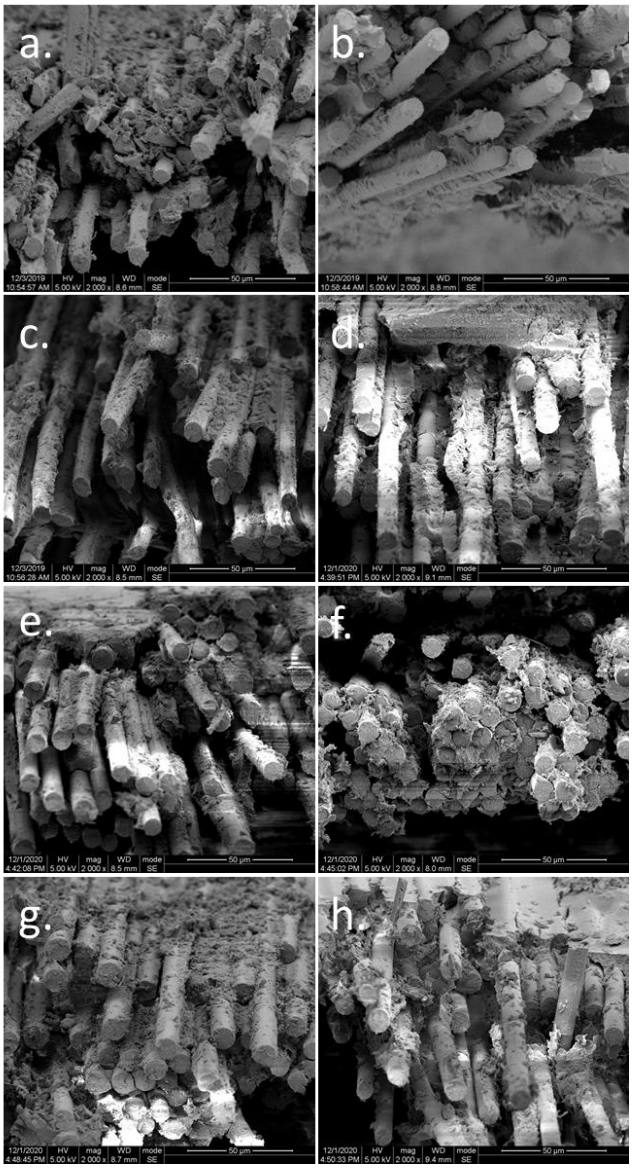

Fig.7 Cross-section SEM images of P-BF/EP composite and KH550-BF/EP composites

a:P-BF/EP composite; b:1%-KH550-BF/EP composite;c:2%-KH550-BF/EP composite;d:3%-KH550-BF/EP composite; e:4%-KH550-BF/EP composite; f:5%-KH550-BF/EP composite;g:6%-KH550-BF/EP composite;h:7%-KH550-BF/EP composite

2.4 力学性能

引入 KH550 前后对对 BF/EP 复合材料的拉伸强度的影响，如 Tab.2 所示；相对应的应力-应变曲线如 Fig.8 所示。对于 P-BF/EP 复合材料而言，其拉伸强度为 250 MPa；在 BF 织物表面接枝了 KH550 之后，复合材料的拉伸强度逐渐升高，这与 KH550 提供了更强的界面粘接能力和界面机械啮合效应增强了树脂与基体之间的界面强度有关。随着织物表面的偶联剂层的逐渐增加和完善,纤维和基体之间产生化学键合作用的范围越来越大，纤维和树脂之间的界面强度不断增加，纤维和树脂之间的化学键合逐渐补足了较为光滑的无机玄武岩纤维和有机树脂之间结合力低下的问题。当 KH550 溶液浓度在 5%时，复合材料的拉伸强度最高，为 298 MPa，相比未处理的 P-BF/EP 复合材料增加了 18.7 %。随

着 KH550 接枝率的进一步提高，界面的均匀结构被破坏，结构的不均匀性破坏了原有的强的界面粘接，因此复合材料的拉伸性能出现了降低。此外，随着 BF 纤维表面 KH550 接枝量的增加，复合材料的断裂伸长率呈现先降低后增加的趋势。

Tab. 2 Tensile strength of P-BP/EP composite and KH550-BP/EP composites

Sample	Tensile Strength (MPa)	Sample	Tensile Strength (MPa)
P-BF	251±10	4%-KH550-BF	293±14
1%-KH550-BF	263±25	5%-KH550-BF	298±11
2%-KH550-BF	272±21	6%-KH550-BF	285±4
3%-KH550-BF	284±6	7%-KH550-BF	284±1

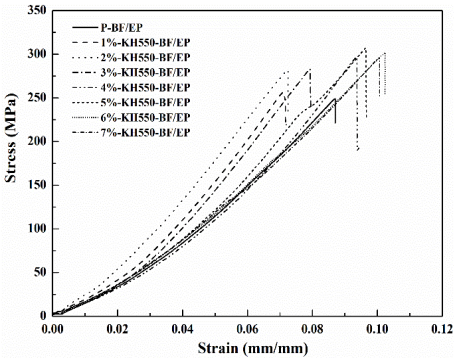

Fig.8 Stress-strain curves of P-BF/EP composite and a series of x%-KH550-BF/EP composites with different KH550 grafting degrees

3 结论

通过研究 BF 织物表面 KH550 的接枝率对 EP 与 BF 之间界面粗糙度和界面强度的影响，得到了硅烷偶联剂改性 BF 织物增强 EP 复合材料的增强机理。KH550 的引入，为 BF 与 EP 之间的界面提供一种粘接力和机械啮合效应，复合材料拉伸强度得到提升；随着其接枝率的提升，这种粘接力均匀分布在树脂与纤维之间的界面，得到一个更均匀且更强的界面；因此当 KH550 溶液的质量分数为 5%时，织物表面均匀，界面强度和拉伸强度达到最大。然而，随着接枝率的进一步提升，原本界面均匀性被破坏，产生的结构缺陷和应力集中使得原先增强的界面被一定程度的削弱，因此复合材料的界面强度和拉伸强度出现降低。因此，采用 KH550 改性纤维和树脂基体之间的界面强度时，寻求合适的接枝率来实现均匀无缺陷的增强界面才是提升复合材料力学性能的关键。

参考文献：

[1] Fiore V, Scalici T, Di Bella G, et al. A review on basalt fibre and its composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 74: 74-94.

[2] Vivek D, Garima M, Kyong Y R, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166-180.

[3] Karvanis K, Rusnáková S, Krejčí O, et al. Preparation, thermal analysis, and mechanical properties of basalt fiber/epoxy composites [J]. Polymers, 2020, 12:1785-1802.

[4] Jamshaid H, Mishra R. A green material from rock: basalt fiber-a review [J]. The Journal of The Textile Institute, 2016, 107: 923-937.

[5] Manoharan M P, Sharma A, Desai A V, et al. The interfacial strength of carbon nanofiber epoxy composite using single fiber pullout experiments [J]. Nanotechnology, 2009, 20: 295701.
[6] Khandelwal S, Rhee K Y. Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 192: 108011.
[7] Qiu Y, Zhang C, Hwang Y J, et al. The effect of atmospheric pressure helium plasma treatment on the surface and mechanical properties of ultrahigh-modulus polyethylene fibers [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2002, 16: 99-107.
[8] Manikandan V, Jappes J T W, Kumar S M S, et al. Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites [J]. Composite Part B: Engineering, 2012, 43: 812-818.
[9] Guo Y, Zhou M, Yin G Z, et al. Basalt fiber-based flame retardant epoxy composites: preparation, thermal properties, and flame retardancy [J]. Materials, 2021, 14:902.
[10] Arslan C, Dogan M. The effects of fiber silane modification on the mechanical performance of chopped basalt fiber/ABS composites [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2020, 33: 1449-1465.
[11] Yu S, Oh K H, Hwang J Y, et al. The effect of amino-silane coupling agents having different molecular structures on the mechanical properties of basalt fiber-reinforced polyamide 6,6 composites [J]. Composite Part B: Engineering, 2019, 163: 511-521.
[12] Zhang S, Liu P, Zhao X, et al. Preparation of poly(vinyl alcohol)-grafted graphene oxide/poly(vinyl alcohol) nanocomposites via in-situ low-temperature emulsion polymerization and their thermal and mechanical characterization [J]. Applied Surface Science, 2017, 396: 1098-1107.

Effects of Silane Coupling Agent Grafted on the Surface of Basalt Fiber on the Interfacial Strength and Tensile Strength of Fiber-Reinforced Epoxy Composites

Shengchang Zhang, Tianhaoyue Zhong, Qibin Xu, Zexi Su, Mengjin Jiang, Pengqing Liu
(College of Polymer Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: In order to improve the tensile strength of basalt fiber/epoxy (BF/EP) composites, silane coupling agent KH550 was grafted on the surface of BF for enhancing the interfacial strength between BF and EP matrix. The effects of KH550 grafting degree on the surface roughness of BF, the interfacial adhesion between BF and EP matrix and the tensile strength of composites were investigated by attenuated total reflection infrared spectroscopy, X-ray photoelectron spectrometer, atomic force microscopy, scanning electron microscopy, droplet microdebond test and tensile test. Experimental results show that grafting KH550 on the surface of BF reinforces the interface roughness and interfacial strength of KH550-BF/EP composites. With the increase of KH550 grafting degree, the surface morphologies of BF change from smooth to rough, then to smooth, final to rough. Meanwhile, the interfacial strength and tensile strength of composites are also increased firstly, and then reduced. When the KH550 grafting degree reaches about 5%～6%, the surface of BF is smooth, uniform and non-aggregated.

And the interfacial strength and tensile strength reach the maximum values of 48 MPa and 298 MPa, respectively. When the KH550 grafting degree exceeds 6%, the surface morphology of KH550-BF becomes non-uniform. Excessive KH550 brings structural defects and stress concentration to the interface, which deteriorates the interface strength as well as the tensile strength of composites.

Keywords: basalt fiber; epoxy resin; chemical grafting; interfacial strength; silane coupling agent; mechanical property