综论

改善纤维与聚合物界面相互作用的研究进展

周 腾[1]，占 晓[1]，杨人元[1]，徐余欢[1]，王宏伟[1]，
张道海[1*]，秦舒浩[1,2*]

（1. 贵州民族大学 化学工程学院，贵州 贵阳 550025；2. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心，贵州 贵阳 550014）

摘要：纤维增强聚合物复合材料在众多领域具有广泛的应用前景，但纤维与聚合物基体（如环氧树脂、聚醚醚酮、聚对苯二甲酸乙二醇酯等）界面的相容性差，影响其应用。等离子处理、硅烷处理和化学接枝等方法改性纤维可改善界面相容性，提高复合材料的性能。该文详细阐述了改善纤维与聚合物界面相互作用的研究进展，介绍了碳纤维、苎麻纤维和玄武岩纤维等增强聚合物复合材料界面相容性的改善方法，如竹纤维可通过等离子体处理和胶囊工艺提高界面相容性；苎麻纤维经硅烷偶联剂改性可提升其力学性能，但改性后对高温成型过程的影响需进一步研究；玄武岩纤维可通过双重改性等方法提高其与聚合物的界面相容性。阐述了碳纤维和芳纶纤维增强聚合物复合材料的研究进展，提出未来需采用新的制作技术和改性方法来实现复合材料的多功能化，以满足不同领域的应用需求。

关键词：界面相容性；纤维改性；复合材料；碳纤维；苎麻纤维；玄武岩纤维
中图分类号：TQ34 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-5214 (2025) 07-1458-08

Research progress on improvement of interfacial interaction between fibers and polymers

ZHOU Teng[1], ZHAN Xiao[1], YANG Renyuan[1], XU Yuhuan[1], WANG Hongwei[1], ZHANG Daohai[1*], QIN Shuhao[1,2*]

(1. *School of Chemical Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang* 550025, *Guizhou, China*; 2. *National Engineering Research Center of Composite Modified Polymer Materials, Guiyang* 550014, *Guizhou, China*)

Abstract: Fiber-reinforced polymer composites have wide application prospects in many fields. However, the poor interfacial compatibility between fibers and polymer matrices (such as epoxy resin, polyetheretherketone, polyethylene terephthalate, *etc*.) restricts their applications. Plasma treatment, silane treatment and chemical grafting can improve the interfacial compatibility and boost the properties of composites. Herein, the research progress in improving the interfacial interaction between fibers and polymers was elaborated in detail, and the improvement methods for interface compatibility of carbon fiber, ramie fiber, and basalt fiber-reinforced polymer composites were introduced. For example, bamboo fiber can improve interface compatibility through plasma treatment and encapsulation processes; The mechanical properties of ramie fiber modified by silane coupling agent can be improved, but the effect of modification on high temperature forming process needs further study; Basalt fiber can improve its interface compatibility with polymers through dual modification and other methods. In addition, the research progress on carbon fiber and aramid fiber-reinforced polymer composites was discussed. Finally, it was found that multi-functional composite materials should be designed and synthesized in the future, while

收稿日期：2024-05-01; **定用日期：**2024-08-12; **DOI:** 10.13550/j.jxhg.20240361
基金项目：国家自然科学基金项目（52163001）；贵州民族大学科研平台资助项目（GZMUGCZX[2021]01）；贵州省省级科技计划项目（黔科合平台人才-CXTD[2021]005、黔科合平台人才-GCC[2022]010-1）；贵阳市专家工作站项目（ZJGZZ2021-07）；中央引导地方科技发展资金项目〔黔科合中引地[2023]035、黔科合服企 2023（001）〕；贵州省高等学校绿色化学与资源环境创新团队（黔教科[2022]13号）
作者简介：周 腾（2001—），男，硕士生，E-mail：3212252650@qq.com。**联系人：**张道海（1981—），男，研究员，E-mail：zhangdaohai6235@163.com；秦舒浩（1975—），男，研究员，E-mail：qinshuhao@126.com。

new fabrication techniques and modification methods should be adopted to meet the application requirements in different fields.

Key words: interfacial compatibility; fiber modification; composites; carbon fiber; ramie fiber; basalt fiber

制造业的快速增长需要材料在强度、密度、刚度等方面进行改善，从而降低成本、提高可持续性。复合材料能满足上述需求，因而在不同领域都有很大的潜力。复合材料是由两种或两种以上化学、物理性质不同的材料组成，其中，纤维可以赋予复合材料优异的力学性能，聚合物基体能够保护纤维免受环境的影响[1-2]。利用天然纤维（NF）和合成纤维制备的复合材料具有高比强度、耐腐蚀、可修复性和抗疲劳性等特点[3-4]，已广泛应用于建筑、汽车、航空航天等领域（图 1）[5-8]。

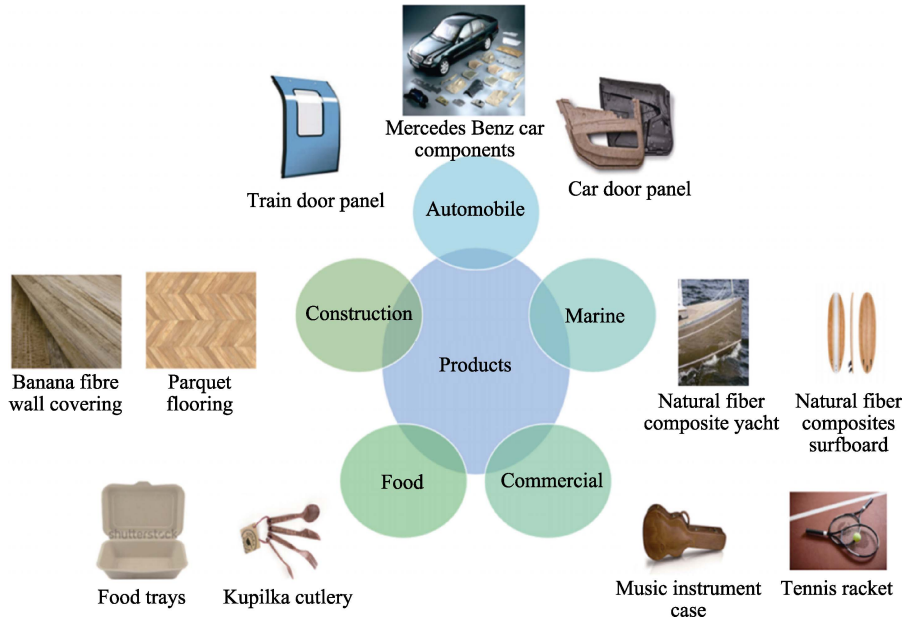


图 1　天然纤维复合材料制品应用示意图[5-8]

Fig. 1　Schematic diagram of application of natural fiber composite products[5-8]

在 NF 和合成纤维增强聚合物复合材料中，NF 容易获得，广泛存在于自然界中，具有可生物降解、单位体积低成本等特点。与合成纤维相比，由 NF 增强材料制成的复合材料具有成本低、毒性小、环境友好和可回收等特性[3,5]。石棉纤维作为 NF 中的一种，曾大量应用在建筑、化工等领域，但可能会导致严重的健康问题，如可导致石棉肺、胃癌等，并且石棉纤维在使用过程中会释放大量的纤维，对环境造成污染，许多国家现在已经禁止或限制石棉纤维的使用[9]。在北美和欧洲等发达国家，由植物纤维增强聚合物复合材料制作的汽车器件约占整车质量的 8.6%、整车体积的 50%，大大减轻了汽车的质量[10]。在国内，增强聚合物复合材料在汽车产品和化学包装等领域也得到了迅速的发展。而玄武岩纤维增强聚合物复合材料工业采用率仍比较低，主要是数据不足和产量下降所致[11]。因此，有必要进一步加快对 NF 增强聚合物复合材料的研发速度。碳纤维（CF）、芳纶纤维（AF）已广泛应用在工业领域[12-13]。在以降低 CO_2 为目标和车辆结构轻量化的推动下，全球对碳纤维增强聚合物复合材料的需求预计以 6%的速率增长，市场值预计将从 2018 年的 216 亿美元增加到 2025 年的 325 亿美元[14]。预计到 2030 年，纤维增强聚合物复合材料的市场规模将从 926.2 亿美元增加到 1551.8 亿美元[15]。可见纤维增强聚合复合材料具有庞大的市场规模和应用前景。

近年来，尽管纤维增强聚合物复合材料取得了很大的进步，但其力学性能仍需提高。纤维与基体界面处发生的脱落和降解降低了载荷从基体向纤维的传递效率，因此，如何改善纤维与基体之间的相互作用是解决这一问题的有效方法。FANG[16]将聚乙烯亚胺（PEI）改性的羟基化多壁碳纳米管（MWCNTs）涂覆在 CF 表面上，形成了 PEI-CNT-CF 网络结构，将其用于增强聚丙烯（PP），改善了 PEI-CNT-CF/PP 复合材料的界面相容性，与 PP 相比，PEI-CNT-CF/PP 复合材料的界面剪切强度提高了 24.6%，拉伸强度和弯曲强度分别提高了 16.2%和 5.3%。WU 等[17]制备了氨基化的碳纳米管（CNTs）

浆料，将其用于提高碳纤维增强不饱和聚酯（UP）复合材料的界面结合性能。结果表明，上浆后碳纤维增强 UP 复合材料的层间剪切强度和冲击韧性比纯 UP 分别提高了 32.3%和 55.2%。对纤维进行合适的改性，能够提高纤维与基体之间的界面相容性，使复合材料具有优异的力学性能，可加快纤维增强复合材料在建筑、汽车、航空航天等领域替代传统的金属材料，以实现节能减排和结构轻量化的发展。

1　改善界面相容性的方法

纤维增强聚合物复合材料的力学性能主要是由界面性能决定的，而界面性能又与界面的相互作用密切相关，纤维与聚合物之间的界面相容性是决定纤维能否发挥增强材料的关键。目前，改善界面相容性的方法主要包括氧化处理、等离子处理和表面化学接枝等[18-27]。纤维改性方法的优势和局限性见表 1。

表 1　改性方法的优缺点

Table 1　Advantages and disadvantages of modification methods

处理方法	优点	缺点
表面化学接枝	效率高、成本低、不破坏纤维的原有性质	通过物理相容性提高界面黏接性程度有限，对提高复合材料力学性能有限
氧化处理	使纤维表面产生含氧官能团，提高湿润性、增强界面结合强度、低成本、环境友好	相互作用弱、反应条件复杂、反应时间长、容易损坏纤维表面
等离子处理	提高纤维表面粗糙程度，实现更好的表面润湿和与树脂的黏附特性，处理后的复合材料在化学和物理水平上增强，不涉及溶剂和化学品，处理后保留整体特性	纤维表面经过多处理会产生降解
硅烷处理	有效耦合 NF 和聚合物基体，形成化学链接，增强界面区域的分子连续性，提高界面黏附力和机械性能	过量的硅烷偶联剂会破坏纤维与基体间的界面均匀性，会削弱界面结合能力
协同改性	满足复合材料对界面相容性的要求，实现功能结构一体化，拓展纤维增强聚合物复合材料的应用领域	材料挤压工艺较难控制，可能对纤维造成一定程度的损坏

2　NF 与聚合物界面相容性的改性

2.1　竹纤维（BBF）

中国竹类资源比较丰富，只要经过简单的技术处理就能得到 BBF[28-29]。BBF 具有很多优点，如可生物降解、质轻、强度高等[4,18,30]，但与其他材料的界面相容性较差、熔融温度较低[31-32]，需要对纤维进行表面改性来克服这一弊端。

SAWANGRAT 等[27]研究了氩气、氧气、处理次数对功率为 180 W 的介质阻挡放电等离子体改性 BBF 性能的影响（图 2），纤维增强环氧树脂（FRE）复合材料的力学性能表明，氩气等离子处理 30 min 后，等离子处理 BBF（F_{tr}）增强环氧树脂基复合材料〔F_{tr}RE-Ar(30)〕具有较高的拉伸强度（46.30 MPa）。

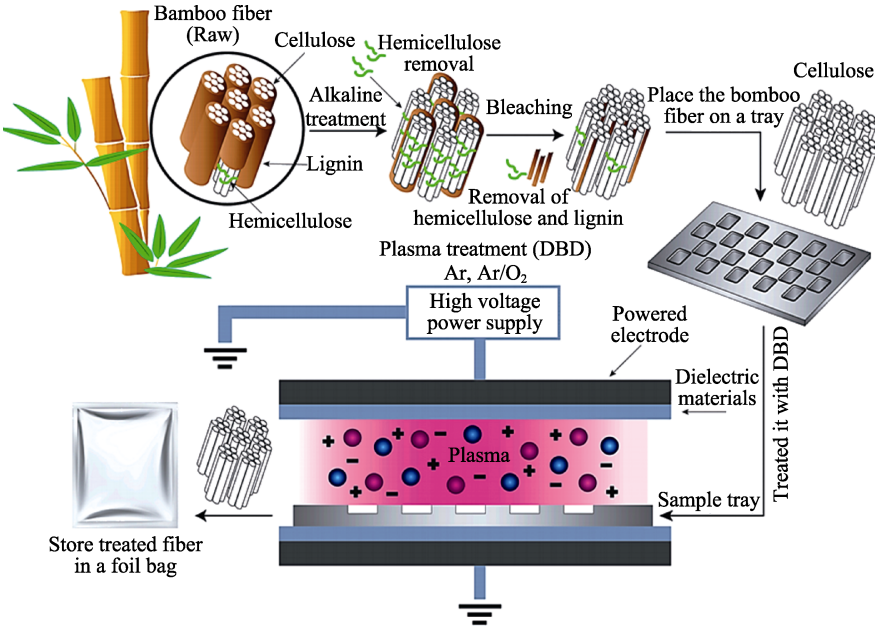


图 2　等离子体处理和常压介质阻挡放电（DBD）等离子细胞示意图[27]

Fig. 2　Schematic diagram of plasma treatment and atmospheric dielectric barrier discharge (DBD) plasma cell[27]

而氧气和氩气等离子一起处理BBF增强环氧树脂基复合材料（F_{tr}RE-Ar+O_2）样品的拉伸强度从处理 10 min 时的 45.19 MPa 减少到处理 30 min 时的 42.66 MPa，力学性能随处理时间的延长而下降。KUMAR 等[33]采用胶囊工艺成功开发了 BBF 增强的化学官能化丙烯腈-丁二烯-苯乙烯（CF-ABS）复合材料（BBF/CF-ABS），结果表明，与 CF-ABS 相比，BBF/CF-ABS 的抗弯强度最大可提高约 50%，抗弯模量提高约 417%，表明 BBF/CF-ABS 具有良好的纤维/基体黏附性。

综上，等离子体处理和胶囊工艺处理都属于对纤维的物理改性，均能够提高纤维和聚合物基体之间的相容性，使 BBF 增强聚合物复合材料具有更优异的力学性能。其中，等离子体改性设备复杂、理论和技术不成熟；胶囊工艺处理不仅能满足复合材料对力学性能的要求，还具有一定的功能性，对扩大其应用领域具有重要的现实意义。

2.2　苎麻纤维（RF）

苎麻又称为“中国草”，主要生长在中国及周边国家，中国的苎麻产量占全球总产量的 90%，居世界第一。RF 具有较高的强度和良好的生物可降解性，是生物复合材料领域中非常有潜力的增强材料之一[34-35]。高结晶度取向的分子结构和亲水基团的存在使 RF 具有优异的机械性能[36-37]。聚合物的疏水性造成其与 RF 的极性差异较大，使两者之间的界面相容性较差，导致 RF 和聚合物基体之间易发生脱落，降低了 RF 增强聚合物复合材料的力学性能，因此，需对 RF 进行相应的处理[19,22,38]。

SIVAPERUMAL 等[22]为提高 RF 与聚合物基体的界面黏结力，采用硅烷酸水解技术对 RF 进行处理，并在有机改性蒙脱土（OMMT）中添加了 RF。结果表明，处理后的 RF 具有较高的抗冲击性能。制备的环氧复合材料的防弹性能比现有的纤维-环氧复合材料提高了 3 倍。复合材料的层间抗剪切强度最高为 35 MPa。WULANDARI 等[38]添加 NaH_2PO_2•H_2O 来优化不同浓度的柠檬酸（CA）交联，对 RF 表面进行改性。当 CA 质量分数为 0.750%~1.875%时，CA/催化剂（SHP）在 110 ℃活化温度下处理，与未改性相比，改性后的聚乳酸（RF/PLA）复合材料的拉伸强度提高了 19 倍以上，达到 1290.63 MPa。LI 等[19]考察了硅烷偶联剂和 CNTs 改性 RF 对聚对苯二甲酸乙二醇酯（PETG）复合材料（RF/PETG）力学性能的影响。与未处理的 PETG 相比，添加质量分数分别为 2%硅烷偶联剂、0.5%和 1.0% CNTs 的 RF/PETG 的抗弯强度分别提高了 8.5%、16.9%和 20.5%。

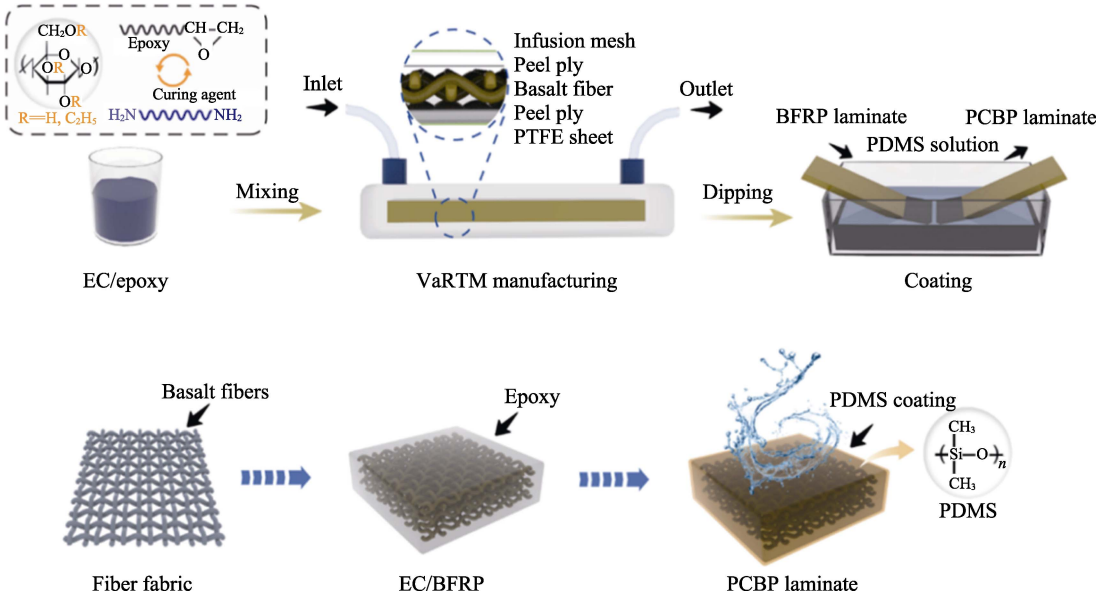
由此可见，改性后的 RF 与聚合物基体制备的复合材料的力学性能有很大的提升，特别是由 CNTs 改性的，为拓宽 RF 增强复合材料的应用和多元化发展提供了方法。但改性后纤维表面的 CNTs 是否对复合材料的高温成型过程产生影响，还需要进一步的研究。

2.3　玄武岩纤维（BF）

BF 属于矿物基 NF，是由地球表面天然存在的玄武岩中挤压而成，被视为环境友好型材料[39]，因其热性能好、强度高、耐久性好、耐酸碱、抗氧化、抗辐射等性能而备受青睐[40-43]。但纤维与基体的界面易发生脱黏和降解，导致力学性能显著下降，良好的界面相容性对具有优异力学性能和长期稳定性的 BF 增强聚合物（BFRP）具有重要的意义[21,44]。

QIAN 等[42]通过双重改性的方法（图 3），将乙基纤维素（EC）掺入到环氧树脂中，得到了复合材料 BFRP，将其浸入到稀释的聚二甲基硅氧烷（PDMS）溶液中，得到改性后的 BFRP 复合材料（PCBP）。与原始的 BFRP 相比，PCBP 的抗弯强度和抗弯模量分别提高了 23.4%和 23.5%，EC 的加入极大地增加了交联密度，并改善了热稳定性。该研究提供了一种简便且可扩展的方法来制备在腐蚀环境中具有长期稳定性的 BFRP。SUN 等[45]采用浸渍缠绕技术，制备了 2 种不同纤维直径的 BF 增强聚合物（UN-BFRP），其中，纤维直径为 13 μm 的单向 UN-BFRP 在 77 K 时的抗拉强度、抗弯强度和抗压强度分别比在室温时提高了 52.4%、52.3%和 69.1%，这归因于 BF 与环氧树脂基体在低温下具有良好的相容性。JOSHI 等[46]制备了纳米 ZnO 填充环氧树脂/BF 复合材料（BEZ），环氧树脂通过添加质量分数为 1%~5%的纳米 ZnO 进行改性，结果表明，添加质量分数为 2%纳米 ZnO 的玄武岩环氧树脂复合材料（BEZ2）的强度改进最大，与未填充的 BEZ0 相比，BEZ2 的弯曲强度和拉伸强度分别提高了 22.0%和 9.78%，层间剪切强度提高了 21.74%，表明 BF 与 ZnO 填充的环氧树脂具有良好的结合强度。

多种改性方法，如双重改性、浸渍缠绕技术和纳米 ZnO 填充等，可改善 BF 和聚合物基体的界面相容性，通过增加交联密度等来提高复合材料的力学性能，其中，浸渍缠绕技术制备的 UN-BFRP 在低温下具有良好的相容性，使材料的抗拉、抗弯和抗压强度显著提高。然而，该技术存在一些弊端，如生产工艺复杂，树脂含量难以把控，并且受材料特性与工艺参数变动的影响，最终产品可能出现质量参差不齐的情况。在实际应用中，应根据具体情况选择合适的技术，努力优化工艺。



EC 为乙基纤维素；BFRP 为玄武岩纤维增强聚合物；PDMS 为聚二甲基硅氧烷溶液；PCBP 为改性后的 BFRP 复合材料

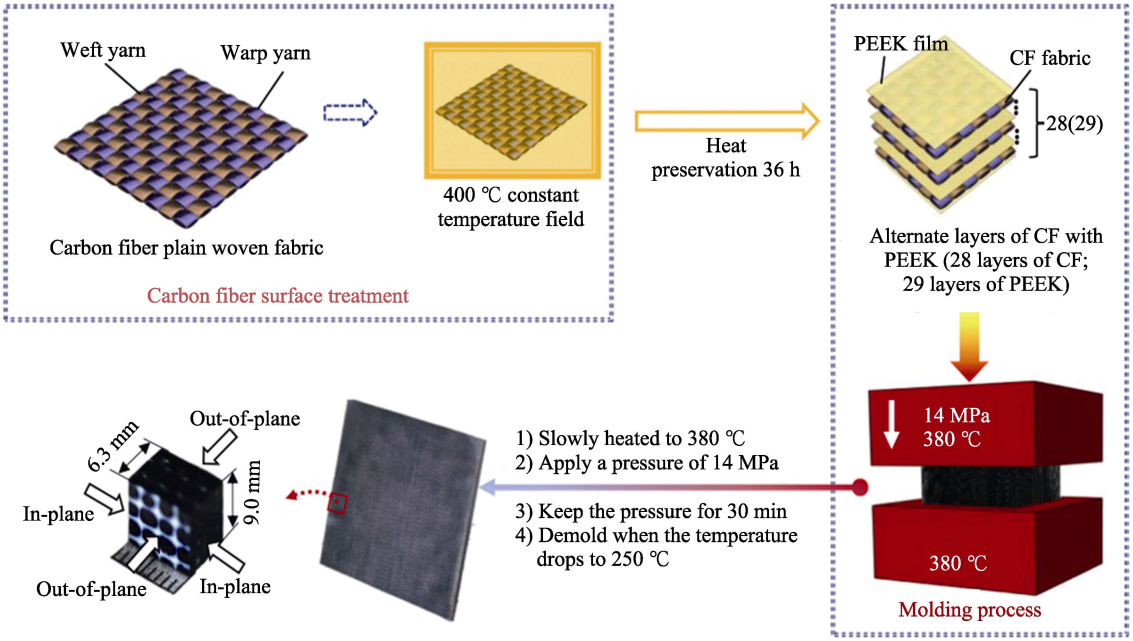
图 3　PCBP 层压板的制备工艺示意图[42]

Fig. 3　Schematic diagram of preparation process of PCBP laminate[42]

3　合成纤维与聚合物界面相容性的改性

3.1　碳纤维（CF）

碳纤维增强复合材料（CFRP）具有密度低、强度高、耐腐蚀、抗疲劳、热膨胀系数低等特点[12,47-48]，因此近年来，机器人、铁路运输、新能源汽车等工业应用对 CFRP 的需求量逐渐增加[49-50]。然而，CF 是一种无序的石墨结构，表面光滑、化学惰性高、表面能低，导致 CF 与聚合物之间存在不良的界面相容性[51-52]，对 CF 表面进行合理的改性非常必要，确保 CF 表面被充分激活，能与聚合物基体进行广泛的界面相互作用[25,53-55]。PAN 等[47]研究了 CF 增强聚醚醚酮（CF/PEEK）机织复合材料（制备过程见图 4）在玻璃态和高弹性状态下 400~4000 s^{-1} 的面外和面内压缩性能。结果表明，在 30、50、70 kPa 冲击载荷下，PEEK 在高弹性（295 ℃）时的面外破坏应变分别比在玻璃态（23 ℃）时增加了 35.34%、54.17%、67.83%，面内破坏应变分别增加



PEEK 为聚醚醚酮；CF 为碳纤维

图 4　制备平纺 CF/PEEK 复合材料示意图[47]

Fig. 4　Schematic diagram of the preparation of plain-woven CF/PEEK composites[47]

了 13.77%、17.61%、20.40%，表明热软化效应优于应变率强化效应，对低应变速率的面外冲击，损伤模式从玻璃态的界面和基体开裂转变为高弹性状态的“平行”剪切和纤维挤压。此外，LIU 等[56]以甘油三缩水甘油醚（Gte）和含亚胺的硬化剂（VA）为原料，合成了具有良好力学性能的生物基环氧玻璃聚合物（Gte-VA），结果发现，CF 增强 Gte-VA 复合材料（Gte-VA-CF）的抗拉强度和杨氏模量分别为 449 MPa 和 12.9 GPa，高于以 Gte 和 4,4'-二羟基二苯甲烷（DHM）为原料的 CF 聚合物（Gte-DHM-CF）的 429 MPa 和 11.4 GPa，表明 Gte-VA-CF 具有优异的力学性能。CAO[57]通过压缩屈曲实验，考察了碳纳米管（CNTs）浓度对 3D 打印薄壁圆柱体 CNTs/聚乳酸（PLA）/CF 复合材料的影响。与 3D 打印的薄壁圆柱形 PLA/CF 复合材料相比，当添加 CNTs 的质量分数分别为 5%、10%、15%和 20%时，CNTs/PLA/CF 复合材料的屈曲载荷分别提高了 16.7%、32.5%、40.7%和 50.1%。这种 3D 打印设计通过改变纳米填料修饰的聚合物长丝来改变聚合物涂层类型，从而增强了 3D 打印部件的强度，并可为 3D 打印部件的应用提供边界。

综上，无论是合成新型的生物基聚合物，还是采用新工艺制备复合材料，或者对 CF 表面进行接枝，都会提高 CFRP 的力学性能，表明 CF 和聚合物基体之间的界面相容性得到了改善。但在 CF 表面进行接枝也有一定的缺点，如接枝效率低等，因此，对 CF 表面进行改性的方法还有待完善。

3.2　芳纶纤维（AF）

AF 具有强度高、质量轻、耐热、耐化学品等突出的性能，已广泛应用于航空航天、汽车、体育用品等领域[58-59]。但 AF 存在化学惰性强、表面光滑等缺点[60-62]，因此，需对 AF 表面进行改性，以发挥其优异的性能。

最初，HEITKAMP 等[63]采用材料挤压（MEX）工艺，将 CF 和 AF 结合在尼龙基体的印刷复合材料部件中，对其进行拉伸、弯曲和冲击性能测试。结果表明，CF 与 AF 混合质量比为 100∶0 的尼龙基复合材料的平均抗拉强度和抗折强度分别为 297 MPa 和 554 MPa；而 CF 与 AF 混合质量比为 0∶100 的尼龙基复合材料抗拉强度和抗折强度分别为 192 MPa 和 173 MPa，比纯 CF 分别低 35%和 69%。纯 AF 的拉伸模量和弯曲模量分别为 6.42 GPa 和 7.97 GPa，比 100%碳材料低 2.4 和 5.1 倍。纯 AF 试件的冲击强度为 30.42 kJ/m^2，而纯 CF 试件的冲击强度仅为 12.60 kJ/m^2。表明增加 AF 含量可以提高材料的抗冲击强度，但会降低材料的拉伸强度、弯曲强度和刚度。SURESHA 等[64]将质量分数为 0.15%、0.30%和 0.50%的 CNTs 分别掺入到平纹织物芳纶增强环氧（AE）复合薄片（CNTs/AF/EP）中（图 5），研究了其物理力学性能的变化，含有质量分数 0.30% CNTs 的复合薄片具有最好的力学性能，与未添加 CNTs 的 AE 复合薄片相比，其拉伸强度和杨氏模量分别提高了 46%和 22.1%，抗弯强度、模量和冲击强度分别提高了 74%、54%和 31.2%。

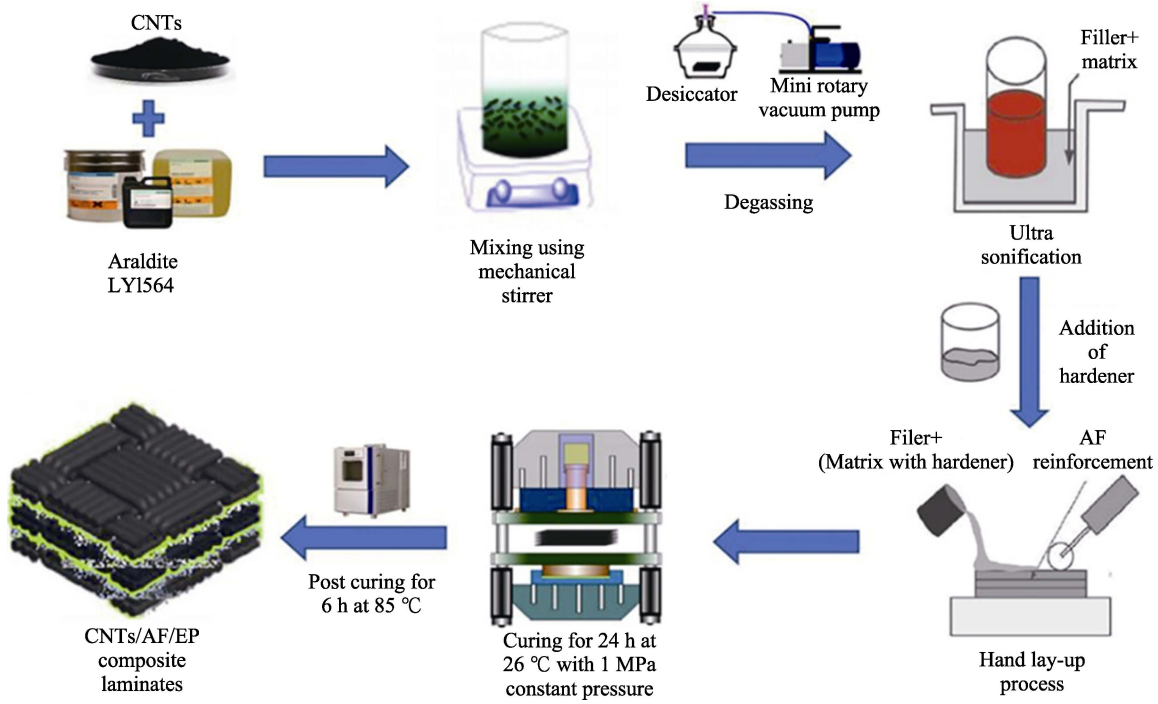


图 5　CNTs/AF/EP 复合薄片的制备过程示意图[64]

Fig. 5　Schematic diagram of fabrication procedure of CNTs/AF/EP composite laminates[64]

在此基础上，FANG 等[65]通过聚多巴胺和巯基功能化氧化石墨烯（GO）和 CNTs 杂化物协同改性 AF，以解决 AF 与橡胶基体界面黏附性差的问题。结果表明，改性使纤维的表面结构发生了较大的变化，但未产生损伤痕迹，改性后纤维束与橡胶基体之间的拉拔力提高了 110.95%，界面附着力显著提高。HUANG 等[66]设计并制备了一种环氧树脂基环保型 AF 浸渍液（MGL），结果表明，采用 MGL 浸渍体系处理的 AF/天然橡胶（NR）复合材料的拉伸力和疲劳寿命均高于采用苯二酚-甲醛胶乳（RFL）处理的复合材料；AF/NR 复合材料的拔出力、180°剥离力和疲劳寿命比 RFT 处理的 AF/NR 复合材料分别提高了 23.8%、26.7%和 60.7%。

改性方法不同，改性的效果也会有所差异。材料挤压工艺较难控制，控制不好会对 AF 造成一定程度的损坏；浸渍液刻蚀技术方法简单、成本低，但是如何降低浸渍液对 AF 的损坏是能否实现工业化生产的关键。目前，单一的改善界面相容性的方法使用较少，而是向多重协同改性的方向发展，这不仅满足了复合材料对界面相容性的要求，也实现了功能结构一体化，进而拓展 AF 增强聚合物复合材料的应用领域。

4 结束语与展望

纤维增强聚合物复合材料在众多领域具有广阔的应用前景，但纤维与聚合物基体间的界面相容性不佳，限制了其性能发挥。目前，通过等离子处理、硅烷处理、化学接枝等改性方法，在一定程度上提高了纤维与聚合物的界面相容性和复合材料的性能。在中国追求高质量发展、注重科技创新和绿色环保的趋势下，纤维增强聚合物复合材料具有广阔的发展前景。目前，一些纤维增强聚合物复合材料已经进入了工业化阶段，如 CFRP 在机器人、铁路运输、新能源汽车等工业领域的应用逐渐增加。然而，与国外相比，国内在某些高端材料和先进技术方面仍相对落后，为解决这些问题，应加大对基础研究的支持，深入探究纤维和聚合物界面相互作用的机理，探索更环保、高效的改性方法来提高复合材料的性能和可持续性，同时紧跟国家发展趋势和方针政策，不断创新和进步，为中国的科技发展和产业升级贡献力量。

参考文献：

[1] KHANDELWAL S, RHEE K Y. Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 192(1): 108011.

[2] MA C P (马长坡), ZHANG J (张健), KANG M X (亢敏霞). Preparation of composite materials from nanoparticle modified acrylate[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2020, 37(6): 1097-1106.

[3] SUTEJA J, FIRMANTO H, SOESANTI A, *et al*. Properties investigation of 3D printed continuous pineapple leaf fiber-reinforced PLA composite[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2020, 35(11): 2052-2061.

[4] JAWAID M, RANGAPPA S M, SIENGCHIN S. Bamboo fiber reinforced composites[M]. Weinheim: John Wiley & Sons, 2021: 1-13.

[5] ANDREW J J, SRINIVASAN S M, AROCKIARAJAN A, *et al*. Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review[J]. Composite Structures, 2019, 224(54): 111007.

[6] ZHUANG Y X, ZOU B, DING S L, *et al*. Shear and tensile behaviors of fiber-reinforced resin matrix composites printed by the FDM technology[J]. Coatings, 2022, 12(7): 1000-1014.

[7] YU J, CHEN T, ZHAO Y M. Study on optimization of drilling parameters for laminated composite materials[J]. Materials, 2023, 16(5): 1796-1808.

[8] JAGADEESH P, PUTTEGOWDA M, MAVINKERE R S, *et al*. A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications[J]. Polymer Composites, 2021, 42(12): 6239-6264.

[9] SALAMATIPOUR A, MOHANTY S K, PIETROFESA R A, *et al*. Asbestos fiber preparation methods affect fiber toxicity[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2016, 3(7): 270-274.

[10] ADENIYI A G, IGHALO J O, ONIFADE D V. Banana and plantain fiber-reinforced polymer composites[J]. J Polym Eng, 2019, 39(7): 597-611.

[11] CHOWDHURY I R, PEMBERTON R, SUMMERSCALES J. Developments and industrial applications of basalt fibre reinforced composite materials[J]. Journal of Composites Science, 2022, 6(12): 367-393.

[12] PAWAR T, CHAUDHARI Y, JAMADAR P, *et al*. Numerical evaluation of Knuckle joint with stainless steel material for total deformation and Von Mises analysis[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 810(1): 012062.

[13] FEGADE V, RAMACHANDRAN M, MADHU S, *et al*. A review on basalt fibre reinforced polymeric composite materials[J]. AIP Conference Proceedings, 2022, 2393(1): 20172-20179.

[14] MENG F, OLIVETTI E A, ZHAO Y Y, *et al*. Comparing life cycle energy and global warming potential of carbon fiber composite recycling technologies and waste management options[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(8): 9854-9865.

[15] ELSER I, BUCHMEISER M R. Toward sustainable fiber-reinforced polymer composites[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2024, 309(9): 2400013.

[16] FANG J P. High improvement of interfacial and mechanical properties in reinforced PP composite by grafting polyethyleneimine modified carboxylic multi-walled carbon nanotubes on short carbon fiber[J]. J Appl Polym Sci, 2022, 140(6): 53462-53474.

[17] WU Z J, CUI H Y, CHEN L, *et al*. Interfacially reinforced unsaturated polyester carbon fiber composites with a vinyl ester-carbon nanotubes sizing agent[J]. Compos Sci Technol, 2018, 164(45): 195-203.

[18] BAI T, WANG D, YAN J, *et al*. Wetting mechanism and interfacial bonding performance of bamboo fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Compos Sci Technol, 2021, 213(Supp C): 108951.

[19] LI W, DU W Q, LI W B, *et al*. Hygrothermal aging behavior and mechanical properties of modified ramie fiber reinforced polyethylene terephthalate glycol composites[J]. Cellulose, 2023, 30(5): 3061-3072.

[20] LI Z, QI X M, XU L, *et al*. Self-repairing, large linear working range shape memory carbon nanotubes/ethylene vinyl acetate fiber strain sensor for human movement monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(37): 42179-42192.

[21] ZHANG C, ZHANG X Q, LUO Y F, *et al*. Green and nondestructive method for constructing multiscale carbon fiber reinforcement *via* encapsulating chitosan and grafting carbon nanotubes[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(12): 13388-13397.

[22] SIVAPERUMAL R, JANCIRANI J, VASANTHAN B, *et al*. Study of fiber delamination on silane modified ramie fiber/OMMT nano-clay epoxy composite under low-velocity impact, shear load, and

high-speeddrilling[J]. Polymer Composites, 2022, 43(7): 4280-4287.
[23] TIAN J F, SUN T, QIU B W, *et al*. Carbon fiber reinforced polymer composites with enhanced interfacial properties based on electrostatic assembled FGO/oxidized CF[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 307(12): 2200433-2200442.
[24] PARK S J, PARK S J. Effect of ozone-treated single-walled carbon nanotubes on interfacial properties and fracture toughness of carbon fiber-reinforced epoxy composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 137(12): 105937-105944.
[25] FENG P F, SONG G J, LI X R, *et al*. Effects of different "rigid-flexible" structures of carbon fibers surface on the interfacial microstructure and mechanical properties of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 583(111): 13-23.
[26] KANTHARAJU S, VINODHINI J M G, *et al*. An investigation to enhance the mechanical property of high-performance thermoplastic composite through different plasma treatment[J]. Polymer Composites, 2022, 44(1): 178-189.
[27] SAWANGRAT C, THIPCHAI P, KAEWAPAI K, *et al*. Surface modification and mechanical properties improvement of bamboo fibers using dielectric barrier discharge plasma treatment[J]. Polymers, 2023, 15(7): 1711-1730.
[28] AYU R S, KHALINA A, HARMAEN A S, *et al*. Characterization study of empty fruit bunch (EFB) fibers reinforcement in poly(butylene)succinate (PBS)/starch/glycerol composite sheet[J]. Polymers, 2020, 12(7): 1571-1585.
[29] SAMAT N, SHAFIEE M I, SYED B S. Mechanical and morphological properties of cellulose-reinforced thermoplastic composites: Effect of recycling[J]. Eng Sci Technol, 2023, 18(1): 70-82.
[30] LIU M, HOU D Y, ZHENG K K, *et al*. Characterization of friction and wear of phenolic resin matrix composites reinforced by bamboo fibers of alkaline and $LaCl_3$ treatment[J]. Materials Today Communications, 2023, 35(37): 106361-106381.
[31] LIANG Z F, WU H W, LIU R P, *et al*. Preparation of long sisal fiber-reinforced polylactic acid biocomposites with highly improved mechanical performance[J]. Polymers, 2021, 13(7): 1124-1135.
[32] HASHMI M S J. Encyclopedia of materials: Plastics and polymers. Bangladesh[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022: 987-996.
[33] KUMAR P, PALSULE S. Bamboo fiber reinforced chemically functionalized acrylonitrile butadiene styrene composites by palsule process[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 20(1): 2150741-2150755.
[34] CHENG L F, DUAN S G, FENG X Y, *et al*. Ramie-degumming methodologies: A short review[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2020, 15(35): 1-7.
[35] ZUO Q, SALLEH K S R M, WANG C H, *et al*. Prediction and analysis of properties of ramie fiber staple yarn reinforced unsaturated polyester composite based on fiber packing density[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 237(15): 109869-109884.
[36] HUANG H, TANG Q, LIN G Y, *et al*. High-efficiency and recyclable ramie cellulose fiber degumming enabled by deep eutectic solvent[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 171(23): 113879-113889.
[37] JIANG X C, LI P, LIU Y, *et al*. Preparation and properties of APP flame-retardant ramie fabric reinforced epoxy resin composites[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 197(46): 116611-116624.
[38] WULANDARI A P, AWIS V P D, BUDIONO R, *et al*. Tensile strength improvements of ramie fiber threads through combination of citric acid and sodium hypophosphite cross-linking[J]. Materials, 2023, 16(13): 4758-4772.
[39] FEGADE V, RAMACHANDRAN M, MADHU S, *et al*. A review on basalt fibre reinforced polymeric composite materials[C]// Proceedings of the AIP Conference Proceedings, 2022: 169-237.
[40] LOPRESTO V, PAPA I, LANGELLA A. Basalt fibres in vinyl ester resin laminates under low velocity impact conditions[J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2018, 4(3): 328-335.
[41] ZHANG X, HUANG R Z. Thermal decomposition kinetics of basalt fiber-reinforced wood polymer composites[J]. Polymers, 2020, 12(10): 2283-2298.
[42] QIAN Y, ZHONG J, OU J P. Dual modification of basalt fiber-reinforced composites with ethyl cellulose and poly(dimethylsiloxane) as sustainable construction materials[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2022, 4(11): 8479-8486.
[43] ZHAO X, LI S, WANG X, *et al*. Failure mechanism of unidirectional basalt fiber-reinforced polymer composites with pretension of fiber yarns[J]. Polymer Composites, 2022, 43(10): 6926-6931.
[44] QIAN Y, ZHONG J, OU J P. Superdurable fiber-reinforced composite enabled by synergistic bridging effects of MXene and carbon nanotubes[J]. Carbon, 2022, 190(78): 104-114.
[45] SUN W T, WU Z X, HUANG C J, *et al*. Investigation on cryogenic mechanical properties of basalt fiber-reinforced epoxy composites[J]. Cryogenics, 2023, 132(56): 103684.
[46] JOSHI S, HIREMATH A, NAYAK S Y, *et al*. Hybridization effect on the mechanical properties of basalt fiber reinforced ZnO modified epoxy composites[J]. Polymer Composites, 2022, 43(8): 5704-5714.
[47] PAN Z X, YANG C C, HUANG S W, *et al*. High strain-rate compression behavior of woven CF/PEEK thermoplastic composites at the glassy state and high-elastic state[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 235(34): 107740.
[48] GUO R, LI C G, NIU Y Z, *et al*. The fatigue performances of carbon fiber reinforced polymer composites-A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21(12): 4773-4789.
[49] DING R N, SUN Y, LEE J W, *et al*. Enhancing interfacial properties of carbon fiber reinforced epoxy composites by grafting MXene sheets (Ti_2C)[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 207(12): 108580.
[50] YAVAS D Z, ZHANG Z Y, LIU Q Y, *et al*. Interlaminar shear behavior of continuous and short carbon fiber reinforced polymer composites fabricated by additive manufacturing[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 204(67): 108460.
[51] HE M, XU P, ZHANG Y J, *et al*. Phthalocyanine nanowires@GO/carbon fiber composites with enhanced interfacial properties and electromagnetic interference shielding performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 388(45): 124255-124307.
[52] WU Y D, WANG Z, XU L Y, *et al*. Preparation of silver-plated carbon nanotubes/carbon fiber hybrid fibers by combining freeze-drying deposition with a sizing process to enhance the mechanical properties of carbon fiber composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 146(Supp C): 106421.
[53] RAI R S, BAJPAI V. Improvement of interfacial adhesion of CuO nanostructured carbon fiber reinforced polymer composites[J]. Polymer Composites, 2022, 44(3): 1789-1804.
[54] HAN K N, ZHOU W, DING Z J. Progressive damage and tensile failure of open-hole carbon fiber polymer composites reinforced by carbon nanotubes[J]. J Appl Polym Sci, 2022, 139(29): 52634-52646.
[55] LI A J, ZHANG J J, ZHANG F Z, *et al*. Effects of fiber and matrix properties on the compression strength of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. New Carbon Materials, 2020, 35(6): 752-761.
[56] LIU Y Y, LIU G L, LI Y D, *et al*. Biobased high-performance epoxy vitrimer with UV shielding for recyclable carbon fiber reinforced composites[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(12): 4638-4647.
[57] CAO D. Enhanced buckling strength of the thin-walled continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic composite through dual coaxial nozzles material extrusion process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(3/4): 1305-1315.
[58] ZENG S L, ZHANG T R, NIE M, *et al*. Effect of root-like mechanical-interlocking interface in polypropylene/aramid fiber composites from experimental to numerical study[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 216(Suppl C): 108868.
[59] LI J Y, WANG C R, HAN X S, *et al*. Aramid nanofibers-reinforced rhein fibrous hydrogels as antibacterial and anti-Inflammatory burn wound dressings[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(40): 45167-45177.
[60] YANG G, PARK M, PARK S J. Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review[J]. Composites Communications, 2019, 14(10): 34-42.
[61] LYU J W, CHENG Z, WU H, *et al*. *In-situ* polymerization and covalent modification on aramid fiber surface *via* direct fluorination for interfacial enhancement[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 182: 107608.

（下转第 1478 页）