http://pmse.scu.edu.cn

芳纶纤维复合材料界面性能研究进展

耿 闻, 王 静, 李 闯, 杨 爽, 何文政, 任 荣, 熊需海
(沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要:芳纶纤维凭借其卓越的耐高温性能、高比强度及高比模量的优点,近年来,已成为纤维增强复合材料领域举足轻重的增强材料,广泛应用于医疗科技、军事国防等领域。然而,芳纶纤维表面固有的光滑性及表面官能团的惰性特征,限制了其应用范围的进一步拓展,因此,对芳纶纤维进行有效地改性处理变得尤为重要。文中回顾了近年来芳纶纤维的等离子体、纳米填料、涂层、辐照、超声波、接枝及氟化等改性策略,并通过红外光谱、动态力学热分析、扫描电镜、原子力显微镜及界面剪切强度等表征手段对比分析了各类改性方法的优劣,在此基础上深度分析了当前存在的技术瓶颈与挑战,最后展望了芳纶纤维改性技术未来的发展趋势。

关键词:芳纶纤维;复合材料;界面性能;改性技术
中图分类号:TQ342^{+}.72 **文献识别码**:A **文章编号**:1000-7555(2026)02-0170-10

芳纶纤维(AF)作为一种新开发的高性能纤维,在其分子结构中的 2 个苯环之间含有 85% 的酰胺键,具有高比强、高比模、耐高温、耐化学腐蚀等突出性能,广泛用作航空航天、国防军工、交通运输等多功能复合材料的增强材料[1,2]。

然而,AF 本身具有高的化学惰性、高结晶度及表面光滑等特性,成为制约复合材料黏结性能提升的关键。复合材料界面性能决定了纤维的应力传递效率,直接关系到复合材料在使用过程中的安全性和使用寿命[3]。

复合材料的界面强度是由基体与增强体之间的化学键合能力与机械互锁程度决定的,为了增强 AF 与基体之间的结合性能,一般需要对其表面进行改性处理[4~6]。表面处理可通过改变纤维表面的化学成分来增加纤维的表面能,从而使纤维拥有更好的表面润湿性;同时羧基、羟基等活性官能团可以与基体材料发生反应,在纤维与基体之间形成牢固的共价键以增强界面性能[7]。另一方面,改性纤维的表面粗糙度得到了进一步的提高,使纤维与树脂之间的机械互锁强度进一步提高。然而,许多处理方法所需的恶劣条件往往会使纤维表面恶化到足以对其力学性能产生影响,纤维处理产生的凹坑和其他表面缺陷的引入会导致增强纤维的拉伸强度降低,因此,掌握处理条件的平衡点至关重要。本文总结整理了近年来改性芳纶纤维复合材料的研究进展,对不同改性方法进行分类总结,一方面梳理当前研究者对芳纶纤维的改性工作,另一方面突出各方法的优缺点,为进一步研究提供思路。

1 物理改性

1.1 等离子体改性

等离子体处理芳纶纤维是一种有效的表面改性方法,可提高纤维表面粗糙度和增加表面活性官能团含量,进而改善芳纶纤维的表面性能,提高其与基体材料间的黏结性能。

Song 等[8]采用等离子体处理凯夫拉芳纶编织织

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0024
收稿日期: 2025-01-13
基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2025-MS-127)
通讯联系人: 王静, 主要从事先进树脂基复合材料研究, E-mail: jingwang_1217@126.com

物/环氧树脂(EP)复合层压板,等离子体处理层合板示意图如 Fig.1(a)所示。界面剪切强度(IFSS)显著提升,较未处理芳纶纤维复合材料增强了 52.7%,实验结果如 Fig.1(b)所示。

Zhou 等[9]采用氩/氮双等离子体处理不同层压顺序的对芳纶纤维/环氧树脂复合材料。功率为 200 W,时间为 120 s,气体流量为 12 mL/min 是其最佳工作参数,实验结果如 Fig.1(c, d)所示,该研究证明了等离子体改性后的性能提升,且斜纹织物的改性效果显著[9]。

等离子体处理还促使芳纶表面粗糙度得以提升,进一步优化了其与基体间的机械锁合效果,提升了整体结合性能。笔者课题组开展了一项研究[10],探究等离子体处理在不同温度及时间条件下对单一芳纶纤维的改性效果。利用 AFM 观察发现,短时间的等离子体处理会使纤维表面粗糙度增大,且在 10 min 时达到最大值 58.7 nm 和 70.4 nm,动态接触角测量显示,在处理时间为 10 min 时动态接触角最小,为 20.5°,另外,随着实验温度的提高 IFSS 出现同步变化,当测试温度达到 120 ℃时,经等离子体处理的样品的 IFSS 值提高了 52%。

在等离子体技术应用于纤维处理的过程中,纤维表层分子链被活性成分撞击,能在芳纶纤维表面成功引入活性官能团,显著增强芳纶纤维与基体材料间的化学键结合力[11]。陈烁等[12]将低温等离子体处理与接枝 2,4-甲苯二异氰酸酯(TDI)相结合对芳纶纤维表面进行改性,纤维表面活性官能团含量得到提高的同时,复合材料的 IFSS 剪切强度提高了 14.83%。

根据对芳纶纤维处理条件不同,将芳纶纤维增强树脂基复合材料所得到的界面剪切性能整理在 Tab.1 中。基于上述研究,等离子体处理技术作为一种改性效果显著的方法,增强了芳纶纤维的表面活性,使芳纶复合材料整体力学性能得到提升。然而,值得注意的是,尽管改性效果显著,但等离子体的刻蚀作用在改善纤维表面惰性的同时,也不可避免地对纤维本身的强度造成了一定程度的损伤。未来,随着技术的不断进步和成本的逐步降低,等离子体处理技术在芳纶复合材料等其他高端材料制造领域的应用潜力仍有待进一步挖掘和探索。

1.2　纳米填料增强改性

纳米填料是粒径在纳米级别的填料,其具有高比表面积、高活性等优点。在复合材料中,纳米填料可以增加纤维与基体间的物理吸附与化学键合,减

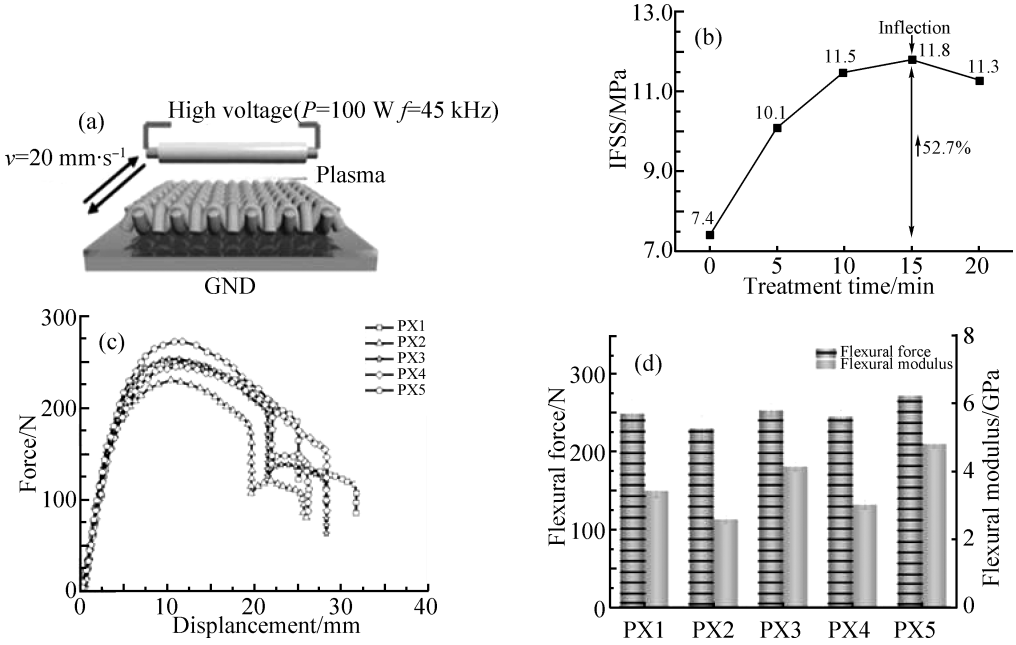


Fig. 1　(a) Schematic diagram of glow discharge plasma brush[8]; (b) IFSS at different plasma treatment time[8]; (c) displacement-load curves of 5 composites[9]; (d) relationship between peak load and bending[9]

Tab. 1 Interface bonding properties of AF/EP composites treated by different plasmas

Gases used in plasma	Base material	Optimum treatment technology	ILSS/MPa	Ref
Ar+N_2	EP	10 m·min^{-1}, 500 W	48	[13]
Air	EP	10 min, 400 W, atmospheric pressure	68.1	[14]
Ar	EP	2 L·min^{-1}, 2 min	58.93	[15]
Air	EP	10 min, 300 W, atmospheric pressure	55.8	[16]

少应力集中,提高界面强度。多壁碳纳米管是一种具有特殊结构的碳纳米材料,被誉为未来的材料之一,近些年多用于多尺度复合材料的制备,及复合材料改性中。

Sharma 等[17]将多壁碳纳米管桥接到芳纶纤维/环氧树脂复合材料上,制备流程示意图如 Fig.2(a)所示。使用动态力学热分析(DMA)研究了不同 CNT 质量分数对复合材料界面性能的影响,其中 0.3% CNT 复合材料的动态力学性能(储能模量)得到了显著改善,为 5.8 GPa,提高了约 139%。为了进一步增强改性效果,Sharma[18] 等在其之前的研究成果上[17]采用 MWCNTs(多壁碳纳米管)和氧化石墨烯(GO)制备了杂化 GCNT 纳米填料增强芳纶纤维/聚碳酸酯复合材料,分散的 GO 和 MWCNTs 通过架桥作用增强复合材料界面的示意图如 Fig.2(b)所示,桥接效应与多尺度复合材料韧性的增加有关,通过测试发现,0.1% GCNT 的韧性提高了 70%。

研究者将碳纳米管进行预处理以充分发挥其作用,Kausar 等[19] 将多壁碳纳米管采用羧酸(MWCNTCOOH)和聚(乙二醇)甲醚(MWCNT-PEGME)功能化,然后使用电泳法将 MWCNT-PEGME 的均匀分散体涂覆到芳纶纤维上,沉积碳纳米管示意图与 MWCNT 涂层芳纶纤维和环氧树脂复合材料示意图如 Fig.2(c, d)所示。40% 的纤维负载环氧树脂/芳纶-MWCNT-PEGME 复合材料的拉伸强度提高到了 1198 MPa。

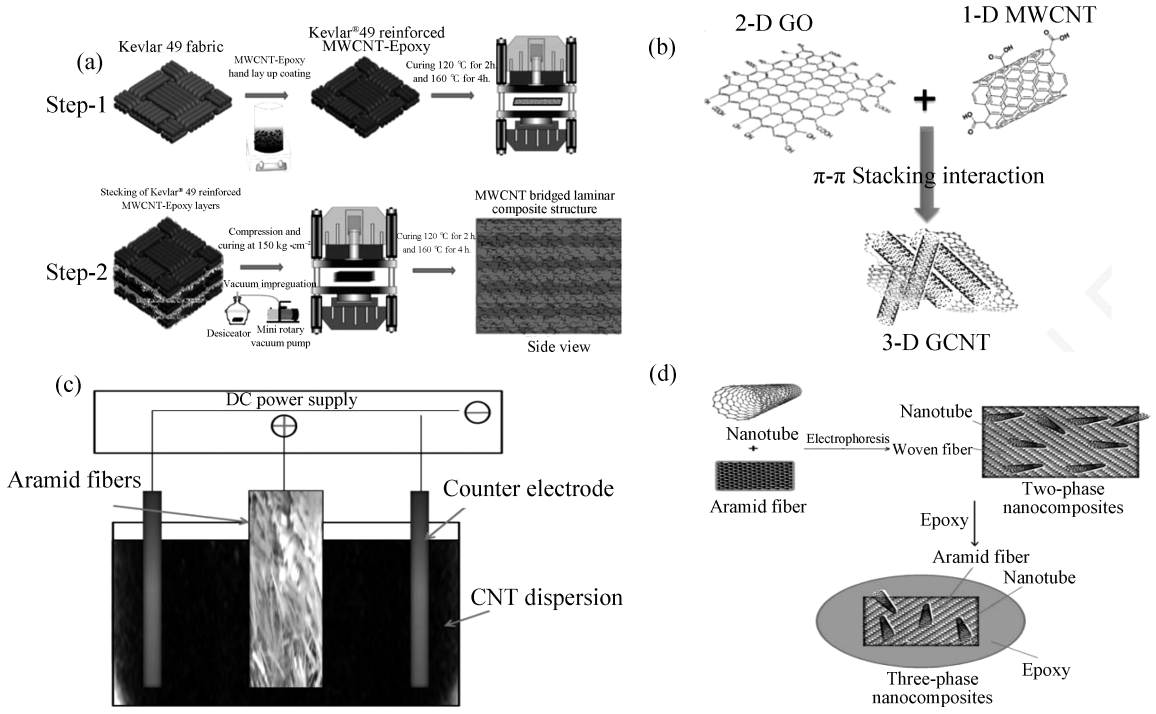


Fig. 2 (a) Kevlar-MWCNT-epoxy composite prepared[17]; (b) schematic diagram of bridging mechanism[18]; (c) electrodeposition of carbon nanotubes[19]; (d) MWCNT coated aramid fiber and epoxy resin composite[19]

多壁碳纳米管作为纳米填充材料显著增强了复合材料的界面强度,同时保留了纤维的原始强度,然而,尽管其潜力巨大,高昂的成本与对实验设备高精度的需求,在一定程度上限制了对其的深入研究。为避免纳米填料成本高、工艺复杂等问题,涂层改性这一传统且便捷的表面处理工艺也被广泛采用。

1.3　涂层改性

涂层改性技术是一种传统的改性工艺,通过在芳纶纤维表面均匀涂一层指定材料,激活纤维表面的化学活性,解锁更多化学反应位点,从而增强复合材料界面强度。其中,多巴胺(PDA)因具有氧化自聚合的特性以及可以提供丰富的反应活性位点被广泛运用在涂层改性之中。

芳纶纤维表面呈惰性,导致树脂难以与其结合良好,Huang 等[20]设计并制备了一种氧化石墨烯增强环氧树脂基环保型芳纶纤维浸渍液(MGL),示意图如 Fig.3(a, b)所示。新型 MGL 浸提体系处理 AF/NR 复合材料的 H-pull force 和疲劳寿命分别达到(180.8 ± 15.3)N 和 25232 次,AF-GO1.5-PEI/NR 复合材料的疲劳寿命提高了 60.7%。Song 等[21]制备了 PC-ANF 涂层,改性后的芳纶纤维接触角由 82.9°(未处理的 AF)降至 68.9°,2.0% ANF 改性效果最好,ILSS 提高了 49.5%。

Zhang 等[22]设计研究了可水分散的石墨烯(G)/ANF 杂化材料,并采用浸涂法将其涂覆在 AF 表面。与 AF-TP-G 相比,AF-TP-G/ANF0.8 的 H 拉拔力增加了 60.1%。Patterson 等[23]通过浸渍涂层将氧化锌纳米颗粒上浆到芳纶纤维,改性后的复合材料界面强度提高了 18.9%,对纤维进行氢氧化钠功能化处理后,界面强度提高了 33.3%。

Kim 等[24]对芳纶纤维进行不同浓度多巴胺涂层和三(羟甲基)氨基甲烷(TRIS)处理,当 TRIS 浓度为 40 mmol/L 时,随着 PDA 浓度的升高,弯曲强度也随之提升,当 PDA 浓度为 1.5 g/L,AFRP 复合材料拉伸强度提高至 425 MPa,同时界面剪切强度得以提高,Fig.4(a, b)展示了拉伸试验后 AFRP 复合材料的断裂面,Fig.4(a)的界面较为干净,树脂残留少。然而,Fig.4(b)所示的样品表面附着了一些树脂后被破坏,说明在 Fig.4(b)所示的条件下,复合材料的界面粘接强度更强。

Gong 等[25]在多巴胺修饰的芳纶纤维上接枝氨基化氧化石墨烯,制备工艺如 Fig.4(c)所示。反应温度为 60 ℃时,复合材料的 IFSS 为 35.21 MPa,提高了 34%。Chen 等[26]采用介质阻挡放电(DBD)等离子体预处理技术,对芳纶纤维的表层进行活化处理,并将多巴胺均匀涂覆于活化的纤维表面上,芳纶纤维表面改性工艺示意图如 Fig.4(d)所示。当多巴胺浓度为 2 g/L 时,芳纶纤维/环氧树脂复合材料的 ILSS 提高了 121.02%。李晓雨等[27]利用碳纳米管掺杂多巴胺对芳纶纤维进行改性,当 CNT 的质量分数为 0.03%,多巴胺涂层改性芳纶纤维的接触角最小为 69°,AF/EP 复合材料 IFSS 增加了 20.2%。

涂层改性显著地强化了纤维与基体材料之间的界面黏结能力,全方位地提升复合材料的综合性能。然而,该方法仍存在涂层厚度难以控制、工艺可操作性和重复性差等缺点,需进一步的改进与创新[28]。

1.4　辐照改性

射线能够同步激发芳纶纤维及其接枝物至高能

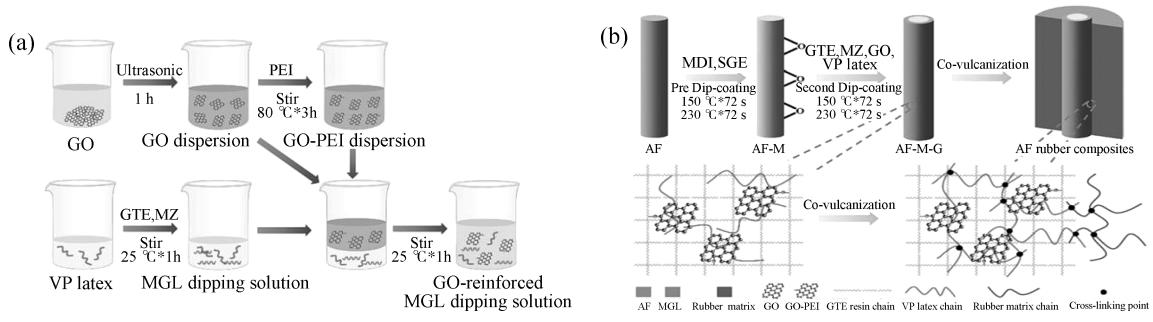


Fig. 3　(a) Schematic diagram of the preparation of PEI modified GO and GO enhanced MGL dip solution; (b) schematic diagram of AF dip treatment and AF/ rubber composite[20]

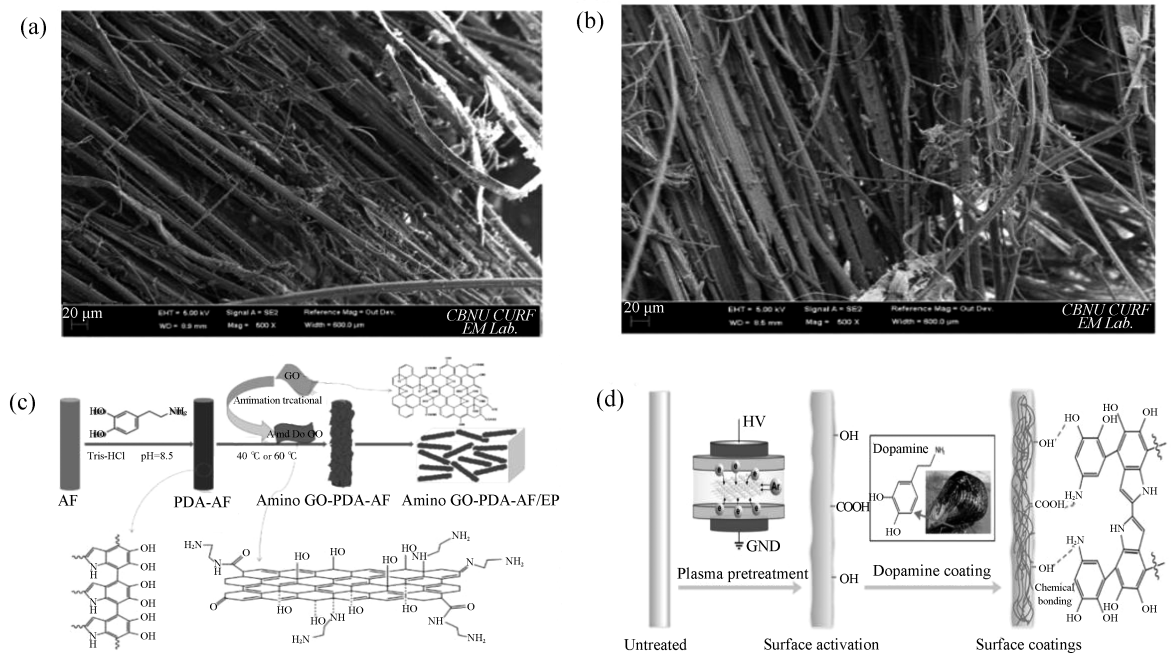


Fig. 4 (a) TRIS 10 mmol/L, PDA 1.5 g/L[24]; (b) TRIS 40 mmol/L, PDA 1.5 g/L[24]; (c) preparation process diagram of amino GO-PDA-AF/EP[25]; (d) schematic diagram of surface modification process of aramid fiber[26]

激发态,这一过程在纤维表面催生了自由基,这些活跃的自由基随即与接枝物发生化学反应,从而在纤维表层诱导出接枝聚合反应。

与涂覆改性通过外部试剂激发纤维表面的化学位点不同,辐照改性激发纤维本身的化学位点能很好地简化实验步骤,Jia[29]和谢非等[30]采用 γ 射线辐照技术对芳纶纤维进行了处理,Xing 等[31]将钴-60 作为高能辐照源对芳纶纤维进行了辐照改性处理。

Xing 等[32]对其之前的研究方法进行改进,在高能伽马射线的辅助作用下,实施了互辐照接枝技术,该技术实现了二环氧氯丙烷(ECH)与乙醇胺(DEA)在芳纶纤维-3(IAF3)表面的同步辐照与接枝反应,经过互辐照接枝处理后,IAF3-DEA 与 IAF3-ECH 的总表面能实现了显著提升,分别达到 41.04 mJ/m^2,提高了 4.40% 和 42.30 mJ/m^2,提高了 7.61%。IAF3/EP 复合材料的界面剪切强度提升到了 86.5 MPa,增加了约 31.3%。ILSS 可达到 60.13 MPa,增加了 25.01%。Deng 等[33]用微波辐照辅助稀硫酸对芳纶纤维进行改性,通过 SEM 图像可以看出,纤维表面出现轻微刻蚀,增强了界面机械互锁能力,可有效使硫酸磺化芳纶纤维,当硫酸浓度为 30.0 g/L 时,芳纶纤维的断裂强度保持在原始值的 90.7% 的同时,改性也得到最佳效果。

射线改性机制显著激活了纤维表面的化学活性,在促进芳纶纤维与树脂基体之间形成牢固的紧密结合的同时,还通过机械啮合效应的强化,极大地增强了两者间的连接强度。射线具有非常强的穿透力,因此射线辐照特别适用于体积较大的产品,可以批量处理纤维,另外,在合理参数的情况下,纤维的力学性能在实质上不会降低。

1.5 超声波改性

超声波改性芳纶纤维是一种有效的纤维改性技术,超声波的空化作用可以释放出巨大能量,可以使改性剂均匀地浸润在芳纶纤维表面,从而达到改性目的。

Wang 等[36]利用 600 W 超声波处理芳纶Ⅲ纤维 5 min,纤维的拉伸强度得到有效保持的同时,AF/EP 复合材料拉伸强度较未处理前提高了 12.5%,同时 NOL-ILSS 增加了 15.2%。梁启睿等[37]利用超声波浸渍处理芳纶纤维不同时间,发现在 20 min 时纤维表面出现明显沟壑,界面剪切强度达到了最大值。

超声波处理过程中,由于液体介质中的超声空化效应,即微观气泡的生长和爆炸崩塌。这些气泡的突发爆炸性崩溃会产生“热点”,导致局部产生高

温高压冲击波,以及能够破坏化学键的剪切力,从而增加了界面粗糙度并提高了芳纶纤维表面活性。然而,由于其单独使用时改性效果有限,目前超声波常作为辅助手段与其他改性方法联用[38,39]。

2　化学改性

2.1　接枝改性

接枝改性通过在纤维表面引入极性基团的同时改变表面粗糙度,令纤维与基体之间的界面结合强度得到显著提高。

Wang 等[40]在芳纶纤维表面构建了聚邻苯二酚-多胺(PCPA)涂层。随后,通过引入硅烷偶联剂实现聚碳酸酯在纤维表面的接枝改性,改性流程如 Fig.5(a)所示。芳纶纤维与橡胶复合材料的 IFSS 提升了 41.5%。Li 等[41]利用 Cu 离子的络合作用,在芳纶纤维与聚乙烯亚胺(PEI)之间构建起一座“金属离子桥梁”,改性机理如 Fig.5(b)所示。处理后经过 SEM 观察发现,纤维表面被 PEI 完全包裹,AF/EP 复合材料的 IFSS 由 36.0 MPa 提高到 53.6 MPa,提高了 48.8%。

Li 等[42]采用超临界二氧化碳($scCO_2$)辅助聚酰胺酸(PAA)接枝的方法处理芳纶纤维,改性示意图及机理图如 Fig.5(c, d)所示。表面结晶度的提高导致其表面粗糙度提高,单丝的拉伸强度提高到 26.1 MPa,IFSS 提高到 24.22 MPa,增加了 50.15%。Jia 等[43]采用超临界二氧化碳($scCO_2$)辅助 1,4-二氯丁烷接枝的方法处理芳纶纤维,AF/EP 复合材料的 IFSS 由 51.29 MPa 提高到 63.91 MPa,提高了 24.3%。

Li 等[44]将缩水甘油多面体倍半硅氧烷(POSSs)接枝到 AFs 上,其改性示意图如 Fig.6(a)所示,结晶度有所上升,导致单丝强度提高了 9.6%,5% 缩水甘油 POSS 改性效果最佳,复合材料的 IFSS 达到 26.22 MPa,增加了 62.55%。李杨等[45]通过超临界 CO_2 辅助溶液浸渍法,以 PAA 和缩水甘油多面体倍半硅氧烷(POSS)改性芳纶纤维,超临界 CO_2 辅助大分子 PAA 改性前后,复合材料界面滑脱能值分别达到 6.07 和 6.94,相对于原丝分别增加了 23.8% 和 41.6%。可以看出,采用大分子 PAA 进行表面包覆改性在增强复合材料界面性能方面具有更显著的优势。

Du 等[46]将空气 DBD 等离子体技术与 TDI 表面接枝相结合改性芳纶纤维,连续改性过程如 Fig.6(b)所示,经过 73 W,15 s 等离子体处理和 1% TDI

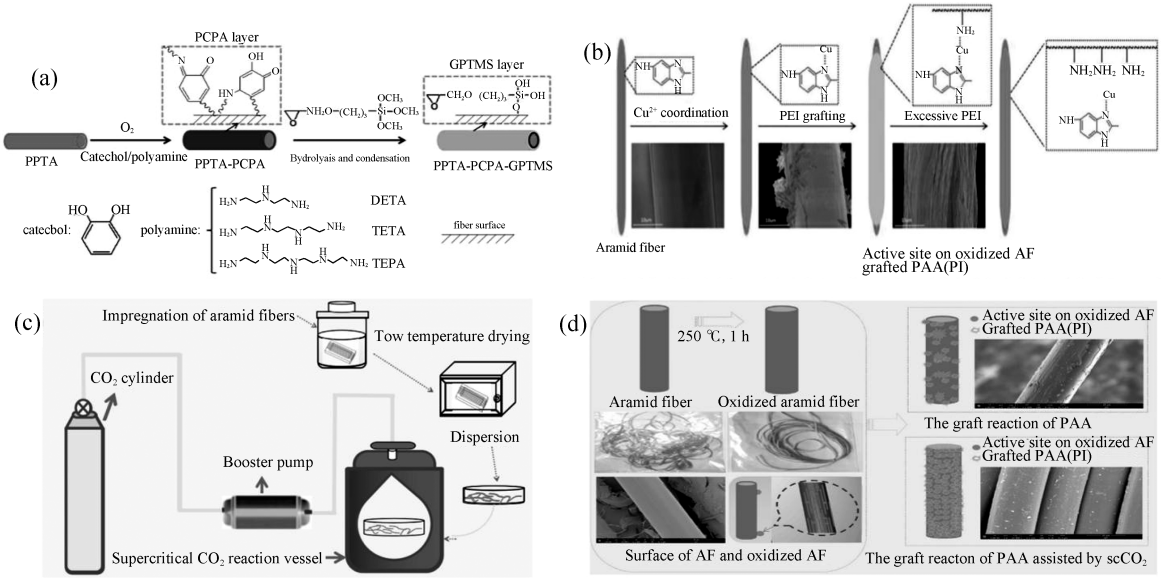


Fig. 5　(a) Schematic diagram of aramid fiber surface modification process[40]; (b) schematic diagram of modification mechanism[41]; (c) schematic diagram of $scCO_2$-assisted grafting modification[42]; (d) reaction mechanism of $scCO_2$-assisted grafting modification of PAA[42]

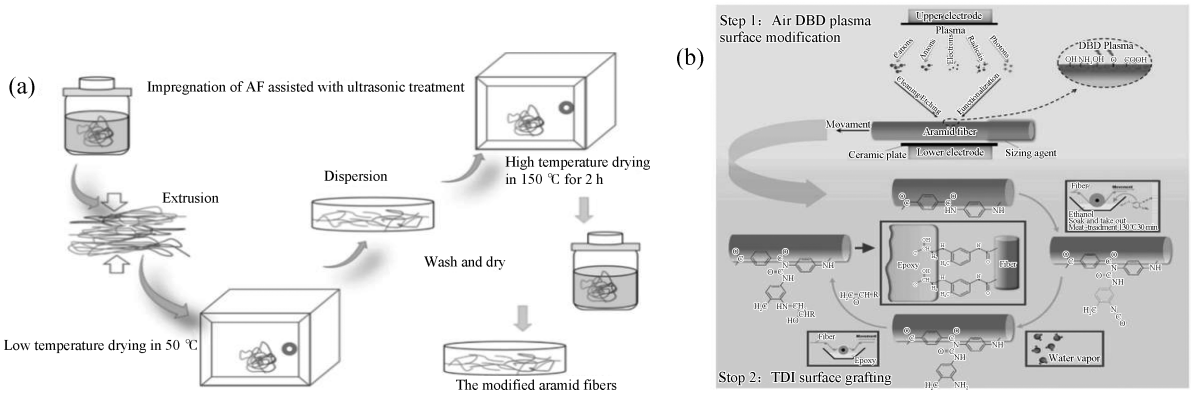


Fig. 6 （a）Schematic diagram of POSS graft modification of glycidyl ester[44]；（b）process diagram of continuous surface modification of aramid fiber grafted with TDI after plasma treatment[46]

修饰的 AF，IFSS 和 ILSS 分别增加了 32.8% 和 20.2%，同时，还很好地保护了纤维自身的性能。Du 等[47]通过 DBD 等离子体预处理活化芳纶纤维表面，并在处理后接枝 PEI，发现最佳处理浓度为 6 g/L，在此条件下，抗剪切强度为 63.7 MPa，提高了 115.9%。

接枝改性是目前比较理想的改性方法，它不仅可以改善表面粗糙度、提高表面活性官能团含量，还可以极大地保留芳纶纤维自身强度，然而，这种方法存在操作复杂、材料难以完全接枝在纤维表面等缺点，因此还需继续深入研究。

2.2 氟化改性

氟化改性主要是利用氟元素与芳纶纤维表面的活性基团发生化学反应，从而在纤维表面引入氟原子或氟化物官能团。这些官能团能够提高浸润性、降低表面能等，进而改善纤维与基体材料之间的界面结合性能。

Cheng 等[48]通过直接氟化、接枝 Si/OH 作为端基、胺和环氧官能化 3 个步骤对 PBIA 芳纶纤维进行改性，改性全过程示意图如 Fig.7(a)所示，该改性工艺未对 PBIA 纤维本身造成过多损害，步骤 3 中 PBIA-A-A 水接触角达到最小，为 96.8°，IFSS 值提高了 46.7%。Lü 等[49]采用一种新型的自由基引发的芳纶纤维表面共聚方法，共价键合大量 PAA/DVB 后接枝碳纳米管，改性过程如 Fig.7(b, c)所示，AF-PAA/DVB-CNT 纤维的表面粗糙度增加了 105.2%，促使复合材料的 IFSS 值升至 54.9 MPa，增加了 69.1%。

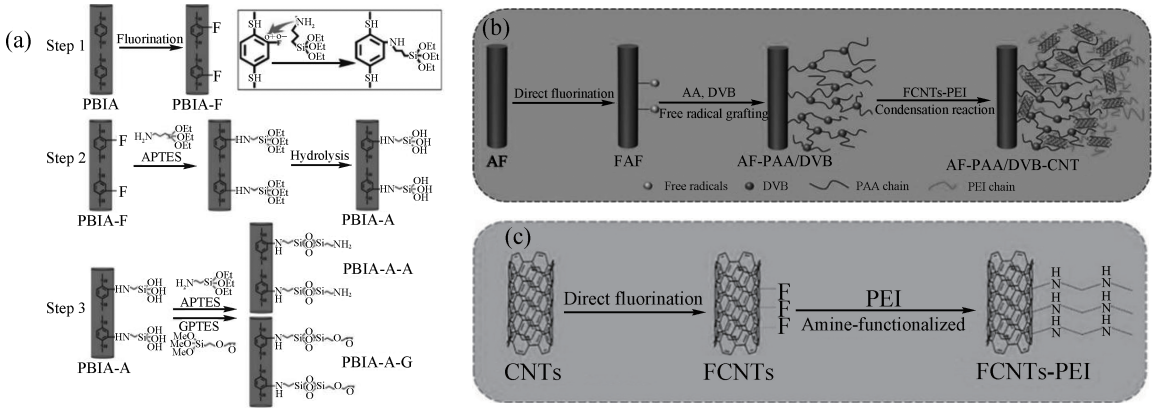


Fig. 7 （a）Whole process of PBIA fiber modification; the first step is direct fluorination; in the second step, graft Si/OH as end group; the third step, amine and epoxy functionalization; substitution of aromatic C/F bonds schematic diagram of modification process[48]. （b）Preparation of AF-PAA/DVB and AF-PAA/DVB-CNT[49]. （c）Preparation of FCNTs and FCNT-PEI[49]

3　结语

芳纶纤维是一种具有优异性能的新兴纤维,但由于其表面光滑且呈惰性,芳纶纤维增强树脂复合材料的优异性能难以完全发挥。等离子体、纳米颗粒、涂层、辐照、超声波、接枝、氟化等改性对芳纶复合材料的界面剪切性能的增强发挥了一定的作用,但大多数改性方法会不同程度地损伤纤维的强度,对复合材料的综合性能造成负面影响。基于目前的研究现状,进一步研究探索绿色环保、安全高效、成本低廉且不破坏芳纶纤维的表面改性方法是未来研究的重点方向,此外,采用分子动力学及有限元仿真软件对复合材料界面进行模拟测试和性能预测,对于深入理解复合材料界面增强机理和破坏过程具有重要帮助。

参考文献:

[1] Lin J, Wang L, Liu L, *et al*. Two-stage interface enhancement of aramid fiber composites: establishment of hierarchical interphase with waterborne polyurethane sizing and oxazolidone-containing epoxy matrix[J]. Composites Science and Technology, 2020, 193: 108114.

[2] 陈虹, 虎龙, 吴中伟, 等. 芳纶防弹材料阻燃性能的开发[J]. 高科技纤维与应用, 2019, 44(5): 61-64.
Chen H, Hu L, Wu Z W, *et al*. Development of flame retardant properties of aramid bulletproof material[J]. Hitech Fiber Application, 2019, 44(5): 61-64.

[3] 刘柳薪, 卢晓英, 吴颖, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料界面改性及应用进展[J]. 材料工程, 2024, 52(9): 70-81.
Liu L X, Lu X Y, Wu Y, *et al*. Progress in interface modification and application of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering 2024, 52(9): 70-81.

[4] Chen J, Zhu Y, Ni Q, *et al*. Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating[J]. Applied Surface Science, 2014, 321: 103-108.

[5] Zhang B, Jia L, Tian M, *et al*. Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: a review[J]. European Polymer Journal, 2021, 147: 110352.

[6] Lu Z, Dang W, Zhao Y, *et al*. Toward high-performance poly (para-phenylene terephthalamide) (PPTA)-based composite paper via hot-pressing: the key role of partial fibrillation and surface activation[J]. RSC Advances, 2017, 7: 7293-7302.

[7] Palola S, Javanshour F, Kolahgar A S, *et al*. One surface treatment, multiple possibilities: broadening the use-potential of para-aramid fibers with mechanical adhesion[J]. Polymers, 2021, 13: 3114.

[8] Song J, Lv F, Ruan H, *et al*. Effect and mechanism analysis of plasma treatment on electrical and mechanical properties of aramid fiber-epoxy resin interface[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51: 3655-3666.

[9] Zhou Y, Jia L, Chen Z, *et al*. Interface failure identification of argon/nitrogen double plasma modified hybrid laminated para-aramid composites[J]. Polymer Composites, 2023, 45: 1316-1328.

[10] Wang J, Yang S, Xu S, *et al*. Characterization and mechanism analysis of interfacial shear strength between individual aramid fiber and epoxy by oxygen plasma treatment at elevated temperatures: experiment and simulation[J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109914.

[11] 李杉杉, 尚诗杰, 王娜娜, 等. 对位芳纶纤维界面改性技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, 42(3): 1192-1206.
Li S S, Shang S J, Wang N N, *et al*. Research progress on interfacial modification technology of para-aramid fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(3): 1192-1206.

[12] 陈铄, 杜怡君, 全晓曦, 等. 低温等离子体刻蚀和接枝对芳纶纤维/环氧复合材料力学性能的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(12): 69-77.
Chen S, Du Y J, Quan X X, *et al*. Effect of low temperature plasma etching and grafting on mechanical properties of aramid/epoxy composites[J]. Insulating Materials, 2023, 56(12): 69-77.

[13] Wang F D, Lv Y L, Wei X, *et al*. Surface modification of aramid fiber III by the atmospheric-pressure air plasma treatment[J]. Materials Science Forum, 2017, 893: 318-322.

[14] Xu T, Qi Z, Yim Q, *et al*. Effects of air plasma modification on aramid fiber surface and its composite interface and mechanical properties[J]. Polymers, 2022, 14: 4892.

[15] Du B, Xue R, Kong X, *et al*. DBD plasma treatment of aramid fiber to improve dielectric property of fiber-reinforced composites for GIS insulation rod[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31: 128-315.

[16] 余荣禄, 张藕生. 对位芳纶表面改性及其复合材料性能研究[J]. 合成纤维工业, 2022, 45(3): 45-49.
Yu R L, Zhang O S. Surface modification of para-aramid fiber and properties of composites thereof[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2022, 45(3): 45-49.

[17] Sharma S, Pathak A K, Singh V N, *et al*. Excellent mechanical properties of long multiwalled carbon nanotube bridged Kevlar fabric[J]. Carbon, 2018, 137: 104-117.

[18] Sharma S, Rawal J, Dhakate S R, *et al*. Synergistic bridging effects of graphene oxide and carbon nanotube on mechanical

properties of aramid fiber reinforced polycarbonate composite tape[J]. Composites Science and Technology, 2020, 199: 108370.

[19] Kausar A, Siddiq M. Epoxy composites reinforced with multi-walled carbon nanotube/poly (ethylene glycol) methylether-coated aramid fiber[J]. Journal of Polymer Engineering, 2016, 36: 465-471.

[20] Huang W, Tian C, Zhao H, *et al*. Largely improved interfacial adhesion and fatigue life of aramid fiber/polymer composites by developing GO enhanced eco-friendly dip-coating system[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 175: 107813.

[21] Song J, Chen C, Du X, *et al*. Aramid fiber coated with aramid nanofiber coating to improve its interfacial properties with polycarbonate[J]. Polymer Composites, 2023, 44: 2557-2568.

[22] Zhang B, Lian T, Shao X, *et al*. Surface coating of aramid fiber by a graphene/aramid nanofiber hybrid material to enhance interfacial adhesion with rubber matrix[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60: 2472-2480.

[23] 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: 33963-33971.

[24] Kim H J, Song J H. Improvement in the mechanical properties of carbon and aramid composites by fiber surface modification using polydopamine[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 160: 31-36.

[25] Gong X, Liu Y, Wang Y, *et al*. Amino graphene oxide/dopamine modified aramid fibers: preparation, epoxy nanocomposites and property analysis[J]. Polymer, 2019, 168: 131-137.

[26] Chen Y, Du B, Xue R, *et al*. Polydopamine-enabled surface modification to improve the dielectric property of aramid fiber/epoxy composites for insulation rod[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6: 7524-7531.

[27] 李晓雨, 李翠玉, 苏瑞. 多巴胺掺杂碳纳米管对芳纶纤维界面性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1562-1566.
Li X Y, Li C Y, Su R. Effects of dopamine-doped carbon nanotubes on the interfacial properties of aramid fiber[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1562-1566.

[28] Palola S, Vuorinen J, Noordermeer J W M, *et al*. Development in additive methods in Aramid fiber surface modification to increase fiber-matrix adhesion: a review[J]. Coatings, 2020, 10: 556.

[29] Jia C, Zhang R, Yuan C, *et al*. Surface modification of aramid fibers by amino functionalized silane grafting to improve interfacial property of aramid fibers reinforced composite[J]. Polymer Composites, 2020, 41: 2046-2053.

[30] 谢非, 刘丽, 贾楚源, 等. γ 射线辐照处理对芳纶纤维 F-3A 结构和性能的影响[J]. 化学与黏合, 2018, 40(5): 311-314.
Xie F, Liu L, Jia C Y, *et al*. Effect of irradiation with γ-ray on the structure and properties of aramid fiber F-3A[J]. Chemistry and Adhesion, 2018, 40(5): 311-314.

[31] Xing L, Liu L, Huang Y, *et al*. Enhanced interfacial properties of domestic aramid fiber-12 via high energy gamma ray irradiation[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 69: 50-57.

[32] Xing L, Liu L, Xie F, *et al*. Mutual irradiation grafting on indigenous aramid fiber-3 in diethanolamine and epichlorohydrin and its effect on interfacially reinforced epoxy composite[J]. Applied Surface Science, 2016, 375: 65-73.

[33] Deng T, Zhang G, Dai F, *et al*. Mild surface modification of para-aramid fiber by dilute sulfuric acid under microwave irradiation[J]. Textile Research Journal, 2017, 87: 799-806.

[34] Zhang Y, Huang Y, Liu L, *et al*. Surface modification of aramid fibers with γ-ray radiation for improving interfacial bonding strength with epoxy resin[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 106: 2251-2262.

[35] 谢非. γ-射线辐照强化 F-3A 芳纶纤维及表面活化改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Xie F. Study on strengthening and surface modification of F-3A aramid fibers by γ-Ray irradiation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[36] Wang F D, Lv Y L, Wei X, *et al*. Surface modification of aramid fiber-III by ultrasonic vibration[C]//Materials science and engineering. Guangzhou: Proceedings of the 2nd Annual 2016 International Workshop on Materials Science and Engineering (IWMSE 2016), 2017: 1017-1022.

[37] 梁起睿, 叶金蕊, 颜丙越, 等. 芳纶纤维与树脂基体改性对复合材料剪切性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(2): 91-100.
Liang Q R, Ye J R, Ran B Y, *et al*. Effect of modification of aramid fiber and resin matrix on shear properties of composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(2): 91-100.

[38] Liu L, Huang Y D, Zhang Z Q, *et al*. Ultrasonic treatment of aramid fiber surface and its effect on the interface of aramid/epoxy composites[J]. Applied Surface Science, 2008, 254: 2594-2599.

[39] 刘清清, 郭荣辉. 芳纶纤维的改性研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37(3): 86-93.
Liu Q Q, Guo R H. Research progress of modification of aramid fiber[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2020, 37(3): 86-93.

[40] Wang L, Shi Y, Sa R, *et al*. Surface modification of aramid fibers by catechol/polyamine codeposition followed by silane grafting for enhanced interfacial adhesion to rubber matrix[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55: 12547-12556.

[41] Li T, Wang Z, Yu J, *et al*. Cu (II) coordination modification of aramid fiber and effect on interfacial adhesion of composites[J]. High Performance Polymers, 2018, 31: 1054-1061.

[42] Li Y, Xie G, Li R, *et al*. Supercritical carbon dioxide assisted impregnation and graft of polyamide acid into aramid fiber for formation of polar interface[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 1-11.

[43] Jia C, Yuan C, Ma Z, *et al*. Improving the mechanical and surface properties of aramid fiber by grafting with 1, 4-dichlorobutane under supercritical carbon dioxide[J]. Materials, 2019, 12: 2766.

[44] Li Y, Shi C, Pan X, *et al*. Construction of an interfacial layer of aramid fibers grafted with glycidyl POSS assisted by heat treatment and evaluation of interfacial adhesion properties with epoxy resin[J]. ACS Omega, 2024, 9: 24489-24499.

[45] 李杨, 肖臻, 史才雯, 等. 接枝处理对芳纶纤维/炭黑/丁苯橡胶复合材料性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(3): 67-71.
Li Y, Xiao Z, Shi C W, *et al*. Effect of grafting treatment on properties of aramid fiber/carbon black/styrene-butadiene rubber composites[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(3): 67-71.

[46] Du Y, Chen S, Li P, *et al*. Surface modification of aramid fiber by cascade process with atmospheric plasma and TDI grafting[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56: 475205.

[47] Du B, Xue R, Kong X, *et al*. Improved dielectric and mechanical properties of aramid fiber reinforced epoxy resin composites by polyethyleneimine grafting[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56: 465501.

[48] Cheng Z, Li B, Huang J, *et al*. Covalent modification of Aramid fibers' surface via direct fluorination to enhance composite interfacial properties[J]. Materials & Design, 2016, 106: 216-225.

[49] Lü J, 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.

Progress on Research of Interface Properties of Aramid Fiber Composite

Wen Geng, Jing Wang, Chuang Li, Shuang Yang, Wenzheng He, Rong Ren, Xuhai Xiong
(*School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China*)

ABSTRACT: In recent years, due to its outstanding high-temperature resistance, high specific strength and high specific modulus, aramid fiber has become a significant reinforcing material in the field of fiber-reinforced composites, and is widely used in advanced fields such as medical technology and military defense. However, the inherent smoothness of the aramid fiber surface and the inertness of surface functional groups limit its further application scope. Therefore, effective modification treatment of aramid fibers has become particularly important. This paper reviewed various modification strategies implemented for aramid fibers in recent years such plasma, nano-fillers, coatings, irradiation, ultrasonic waves, grafting and fluorination *etc.*, compared and analyzed the advantages and disadvantages of various methods by FT-IR, DMA, SEM, AFM and IFSS, deeply analyzed the current technical bottlenecks and challenges, and looked forward to the future development trend of aramid fiber modification technology.

Keywords: aramid fiber; composite materials; interface performance; modification technology