引用格式：宋承锴，王朵，白慧娟，等.多巴胺改性碳纤维增强聚合物基复合材料研究进展[J].材料工程，2025，53(12)：85-98.
SONG Chengkai，WANG Duo，BAI Huijuan，et al.Research progress in dopamine-modified carbon fiber reinforced polymer matrix composites[J].Journal of Materials Engineering，2025，53(12)：85-98.

多巴胺改性碳纤维增强聚合物基复合材料研究进展

Research progress in dopamine-modified carbon fiber reinforced polymer matrix composites

宋承锴[1]，王 朵[2*]，白慧娟[2]，乔 宇[2]，丁成成[2]，杨 超[1,2]，徐俊波[2*]
（1 北京工业大学 材料科学与工程学院，北京 100124；
2 中国科学院过程工程研究所，北京 100190）
SONG Chengkai[1]，WANG Duo[2*]，BAI Huijuan[2]，QIAO Yu[2]，
DING Chengcheng[2]，YANG Chao[1,2]，XU Junbo[2*]
（1 College of Materials Science and Engineering，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China；2 Institute of Process Engineering，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100190，China）

摘要：碳纤维增强聚合物基复合材料（carbon fiber reinforced polymer，CFRP）的界面特性对CFRP的理化性能有着重要影响，是复合材料技术领域的研究热点。受贻贝启发基于多巴胺化学的表面修饰方法是近年来新兴的一类表面界面调控手段，其在CFRP界面增强研究领域也得到应用，该方法具有简单、高效、环境友好、成本低等诸多优势，尤其是多巴胺辅助共沉积改性法具有巨大的应用潜力。本文重点介绍了多巴胺在CFRP改性方面的研究进展，其中包括对多巴胺改性碳纤维处理方式的分类讨论。最后指出多巴胺改性碳纤维聚合沉积机制仍需系统深入研究、聚合沉积速率及涂层形态结构控制因素需进一步明确是未来研究重点。

关键词：碳纤维；多巴胺；聚合物基复合材料；界面性能；改性方法
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000735 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000735
中图分类号：TB332 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2025)12-0085-14

Abstract: The interfacial properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites have an important influence on the physicochemical properties of CFRP, which is a research hotspot in the field of composites technology. Mussel-inspired surface modification method based on dopamine chemistry is an emerging class of surface interface modulation means in recent years, and it has also been applied in the field of CFRP interfacial enhancement research, which has a lot of advantages such as simplicity, high efficiency, environmentally friendly, low cost, *etc*. Especially, the dopamine-assisted co-deposition modification method has great potential for application. This paper focuses on the research progress of dopamine in CFRP modification, which includes a discussion of the classification of dopamine-modified carbon fiber treatments. Finally, it is pointed out that the polymerization deposition mechanism of dopamine-modified carbon fibers still needs systematic in-depth study, and the control factors of polymerization deposition rate and coating morphology and structure need to be further clarified as the focus of future research.

Key words: carbon fiber; dopamine; polymer matrix composite; interfacial property; modification method

碳纤维增强聚合物基复合材料（carbon fiber reinforced polymer，CFRP）是由高强度碳纤维作为骨架材料与聚合物基体（如树脂、橡胶等）复合而成的一种先进材料，具有比强度、比模量高、质量轻、优异的耐腐蚀性以及良好的耐高温性能等特性[1]，在航空航天、交通运输、机械制造等领域应用广泛[2-5]。

目前，CFRP的实际强度与理论值仍有较大差距[6]，主要与碳纤维和聚合物基体的界面相关，界面是

CFRP的一个特殊组成部分，是连接增强碳纤维和聚合物基体的“桥梁”，直接关系到载荷在基体和增强体之间的有效传递和分散[7]。CFRP界面的微观结构、成分、结合方式和强度将显著影响复合材料的整体性能，影响其综合力学性能、环境稳定性及功能表达[8]。然而碳纤维是一种无序的石墨结构，表面光滑，极性低，导致碳纤维与聚合物基体的界面结合性能差[9-10]。目前，CFRP的界面优化研究得到广泛关注，其主要原理是通过在碳纤维表面引入羧基、环氧基[11]、羟基[12]和氨基[13]等极性官能团，促进与聚合物基体的化学反应，增强碳纤维表面的浸润性能。另外，碳纤维和聚合物基体之间范德华力、氢键和静电引力[14]，也可通过增强键合作用改善界面结合性能。

迄今为止，已经研发出多种碳纤维改性方法，如氧化、微波辐射[15]、等离子刻蚀[16]、化学气相沉积[17-18]、聚合物上浆/涂层[19-21]和化学接枝[22-23]等，这些方法可以增加纤维与基体之间的浸润性、化学键合和机械互锁，并形成过渡层，有利于应力均匀传递，缓解应力集中，从而提升界面性能。上述方法同时也存在诸多局限，例如操作步骤繁琐、成本高、所需条件苛刻、毒性高或对纤维本体强度伤害大。因此，非常需要开发一种简单、高效、环保的碳纤维表面改性策略。

受贻贝等海洋生物体内足丝蛋白黏附的启发，以多巴胺(dopamine，DA)为代表的表面修饰技术引起了研究人员的广泛关注[24-25]。聚多巴胺(polydopamine，PDA)因其新型环保、应用体系广泛、附着力强等特点，成为界面及纳米材料改性研究中最流行、最具潜力的改性材料[26-27]。仿生学研究认为，贻贝黏附蛋白的超强黏附性主要与其含有大量的3，4-二羟基-L-苯丙氨酸(L-DOPA)和赖氨酸有关[28]。自然界中的小分子化合物DA同时具有L-DOPA和赖氨酸的功能，可以在温和的反应条件下自聚合是贻贝黏液蛋白多巴结构的良好替换[29]。

DA在有氧碱性条件下自发氧化自聚形成PDA[30-31]，PDA可沉积到包括聚四氟乙烯(非黏附表面)等几乎所有类型的有机和无机材料上，形成紧密黏附的PDA涂层[32]。PDA涂层含有丰富的邻苯二酚和胺基基团，使其成为改善不同材料之间界面结合的优良中间涂层。目前围绕DA表面改性的研究多集中在膜材料[33-34]、能源领域[35-37]、生物医学领域[38]和纳米材料领域[39-41]等，在纤维表面改性方面的研究相对较少。本文以CFRP的界面性能为切入点，综述DA改性碳纤维的研究进展，对比分析相关理论及方法，旨在为CFRP界面研究提供思路。

1 多巴胺沉积机制及其在碳纤维表面改性中的应用

1.1 多巴胺沉积机制

DA沉积主要包括两个步骤：氧聚合和表面黏附[42-43]，图1显示了详细的反应机理，该反应过程中，DA首先被氧化，转化为多巴胺醌，多巴胺醌通过分子内环化，生成更易氧化的亮多巴胺色素，之后亮多巴胺色素被氧化为多巴胺色素，形成5，6-二羟基吲哚

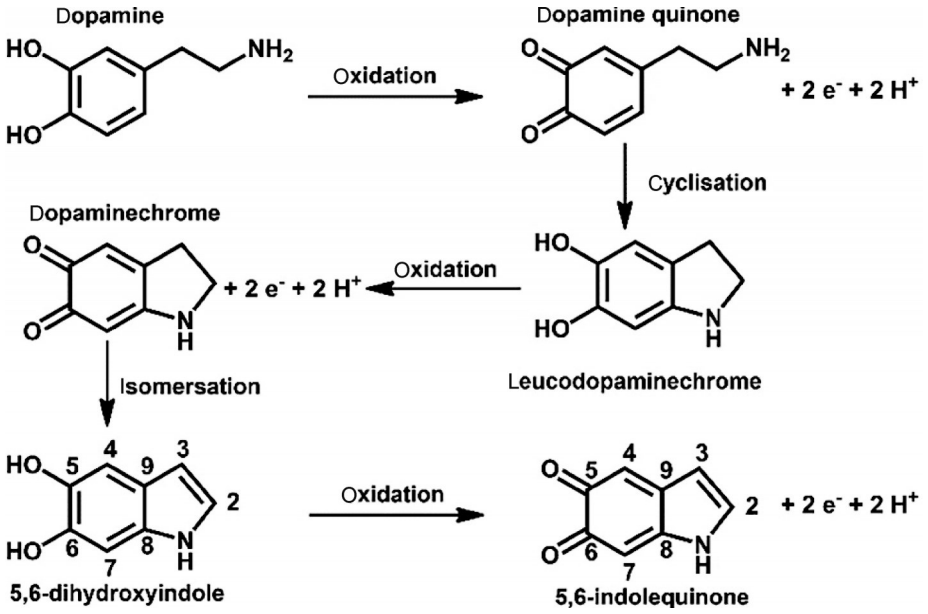


图1 多巴胺的氧化和环化[44]

Fig.1 Oxidation and cyclization of dopamine[44]

(DHI),进一步氧化为 5,6-吲哚醌[44]。

根据现有的相关文献[42, 45-48],DA 聚合机制(如图 2所示)有三种不同的观点:(1)PDA完全由DA、多巴胺醌和DHI的非共价组装而成;(2)PDA是由邻苯二酚、胺、醌和DHI,重复单元组成的杂聚体;(3)PDA是一种真黑素样物质,由DHI进一步氧化并通过2-2',2-4',2-7'或4-7'键偶联而自发产生的低聚体结构单元组成。

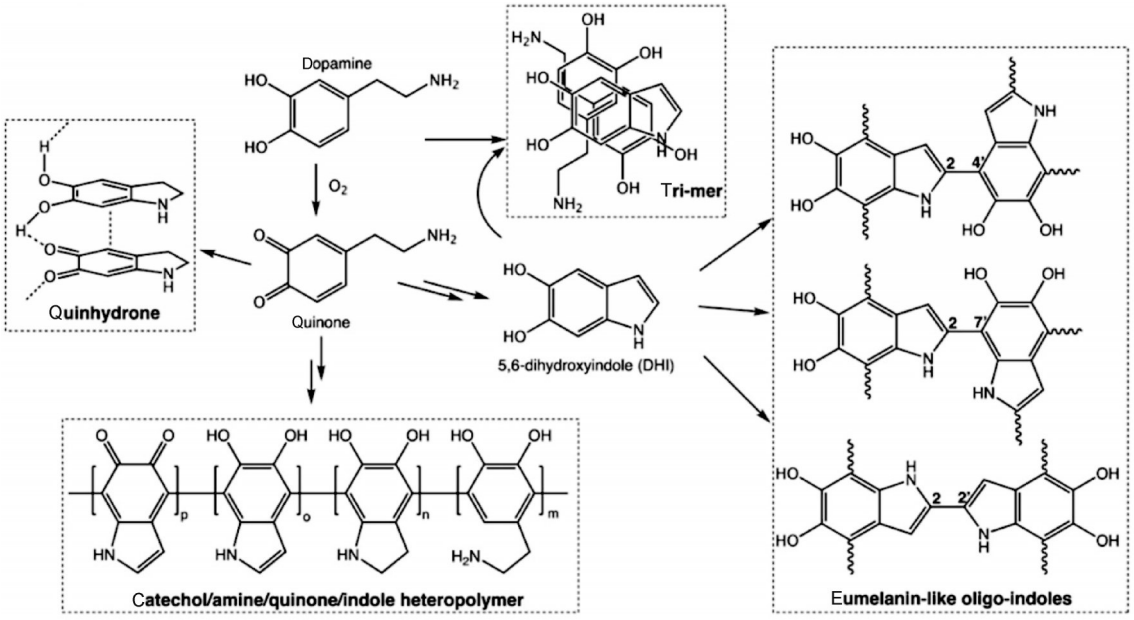


图2　多巴胺的聚合机制示意图[42]

Fig.2　Theories of polydopamine structure and formation[42]

讨论聚多巴胺的形成机制时,非共价和共价途径并不相互排斥,共价"聚合"过程与"自组装"途径均对PDA的形成起到了促进作用。这两种机制在PDA的生成中相辅相成,共同作用于整个反应体系[49]。目前,研究人员倾向于将PDA视为一种超分子聚合体,而非高分子量的共价聚合物,该观点强调了非共价键在DA沉积过程中所发挥的至关重要的作用。

对于DA的表面黏附机制,PDA上的邻苯二酚和氨基可以通过不同的相互作用与材料表面相互作用。例如,PDA通过金属原子和酚羟基之间的螯合作用沉积在金属或金属氧化物表面(如 TiO_2、Fe_2O_3 和 Al_2O_3),通过氢键与一些非金属氧化物(如 SiO_2)相互作用。PDA上的芳香结构可以通过疏水相互作用及π-π堆积黏附在疏水表面。此外,氨基和邻苯二酚基团都是氢供体,可以与氢受体聚合物如PVP形成氢键。由于氨基带正电而邻苯二酚带负电,因此带电表面也会涉及静电相互作用这些基团还可以通过迈克尔加成或席夫碱反应与表面基团(例如氨基)发生反应进而黏附在材料表面[44]。

主要有两种方法在材料表面形成PDA涂层,一是将需要改性的材料浸泡在DA碱性水溶液中一段时间如图3(a)所示,在浸泡过程中,DA会自发沉积形成涂层,这种初级涂层无需进一步处理即可作为相容介质层增强界面的结合性能,同时也可作为"平台",在其上接枝二次改性的材料。二次接枝材料的成分和特性可根据增强界面的需要进行调整,这也是PDA涂层具有极大的通用性和广泛的适用性的原因。二是采用逐层法形成PDA涂层(图3(b)),该方法涉及典型的聚合物成分的循环吸附和中间漂洗过程,通常要经过几十甚至上百次循环才能形成涂层。该方法操作步骤复杂耗时,应用有限。

1.2　多巴胺沉积对碳纤维的改性研究

Wu等[50]通过逐层沉积法在碳纤维表面交替沉积了"刚性"的PDA和"柔性"聚醚胺,构建了具有珍珠结构的多层界面。在纤维、涂层与基体之间,应力的传递与裂纹的桥接主要依靠氢键、共价键和π-π堆叠等多种协同作用机制,相间层所呈现的"刚柔"交替界面结构,能够有效地偏转裂纹路径。构筑的三层PDA/聚醚胺复合材料达到了最优的韧性和界面强度,比未经处理的纤维复合材料分别高出99.8%和39.2%。

采用溶液浸润法改性碳纤维的研究相对较多。Qin等[51]研究了DA沉积时间对碳纤维表面的影响(图4(a)),随着DA沉积时间的延长,越来越多的PDA纳

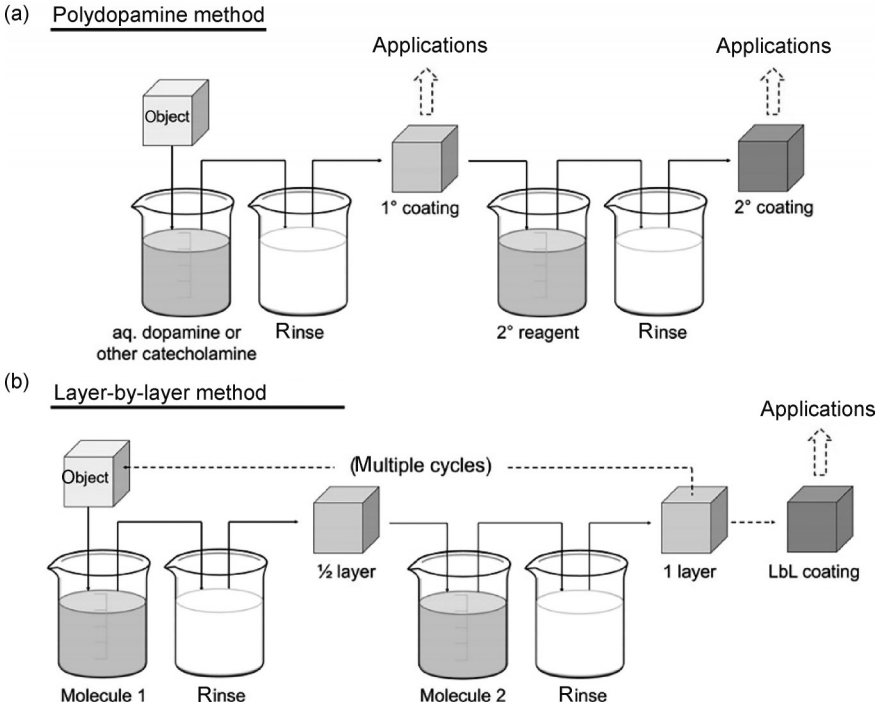


图3 多巴胺沉积方法[42]

(a)溶液浸泡沉积法;(b)多巴胺逐层沉积法

Fig.3 Dopamine deposition methods[42]

(a)alkaline solution immersion deposition method;(b)layer-by-layer deposition of dopamine

米颗粒附着在碳纤维表面,同时也发生了PDA的团聚。结果显示。与未改性的碳纤维相比,DA沉积的碳纤维拉伸强度提高了27.0%,层间剪切强度(ILSS)、弯曲强度和冲击强度分别提高了103.7%、65.6%和163.6%。Sun等[52]对DA改性碳纤维的机理以及处理条件对改性效果的影响进行了研究。结果表明,碳纤维表面的羰基和酯基能与DA或PDA中的伯胺发生亲核加成反应,即席夫碱反应,通过化学键将DA或PDA分子引入碳纤维表面。碳纤维表面—C═O官能团的存在有利于DA或PDA分子与碳纤维表面形成化学键合。碳纤维表面物理结构的差异对DA改性碳纤维没有显著影响。改性效果与DA相对浓度、氧化剂用量、改性温度和改性时间呈正相关。在最佳的改性条件下,PDA在碳纤维上的接枝率达到1.38%,碳纤维与水的接触角从85.63°降至60.13°。改性碳纤维与环氧树脂的界面剪切强度(IFSS)达到63.97 MPa,比未改性碳纤维提高43.59%。Wu等[53]研究了DA溶液浓度对纤维表面沉积过程的影响。随着DA浓度的增加,活性DA纳米球首先附着在纤维表面形成一层薄膜,之后DA自聚集体不断产生,DA薄膜厚度增长变缓慢。结果显示,DA涂层的存在引入了大量的极性基团并形成了更为粗糙的表面,大大提高了复合材料的界面结合性能,其最佳添加量为0.3 g;DA添加量过高时,会形成大尺寸的PDA纳米球导致应力集中,而对界面结合性能产生不利影响。Han等[54]发现PDA涂层可以增加断裂界面的摩擦力,减少不稳定的裂纹生长,从而提高界面断裂韧性和冲击性能,裂缝往往会通过环氧树脂基体断裂,而不是在纤维和基体界面之间断裂。Kim等[55]同样研究了DA浓度对复合材料界面结合性能的影响。结果显示,表面处理改善了碳纤维复合材料的力学性能。DA和三羟甲基氨基甲烷(TRIS)浓度分别为1.5 g/L和40 mmol/L时,复合材料的拉伸强度和刚度最高。在使用1 g/L和40 mmol/L进行表面处理时,复合材料弯曲强度最高,提高了11%。Tian等[56]将DA改性碳纤维与天然橡胶混合,成功制备出了高性能的橡胶复合材料,在此基础上进一步探讨了该改性碳纤维对天然乳胶复合材料力学性能的增强机理。实验结果显示,经过改性的短切碳纤维表面DA涂层均匀,碳纤维与橡胶基体之间界面结合性能提升明显,当DA溶液浓度为1.5 g/L、短切碳纤维改性时为6 h时,碳纤维橡胶复合材料表现出最为优异的导电性、导热性和动态力学性能,其拉伸强度比未改性样品提高10.6%。Gu等[57]通过DA氧化自聚对碳纤维进行改性如图4(b)所示,研究了DA浓度对碳纤维/硅橡胶复合材料性能的影响。横向纤维束拉伸实验(TFBT)测试结果表明经过

1.5g/L DA溶液处理的复合材料(SR/CF@PDA-1.5)界面黏结性能最好。与未改性的相比，SR/CF@PDA-1.5的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了61.7%和68.4%。PDA的黏附性能，有效改善了复合材料的界面结合性能。Sun等[58]利用超声波可在缺氧条件下快速合成聚多巴胺(PDA)的特点，在CF上快速均匀地生成PDA涂层，对复合材料的界面进行改性。结果显示，超声条件下将CF置于PDA-Tris缓冲液中浸渍处理1 h，CF表面可以形成完整的PDA涂层，CF完全被PDA涂层包覆。CF表面PDA涂层的引入有效提高了CF的润湿性。超声波的应用大大提高了PDA在CF上的涂覆效率，尤其是CF束的内层。与去浆的CF/聚酰胺6(PA6)复合材料相比，PDA改性CF/PA6复合材料的层间剪切性能提高了21.07%。

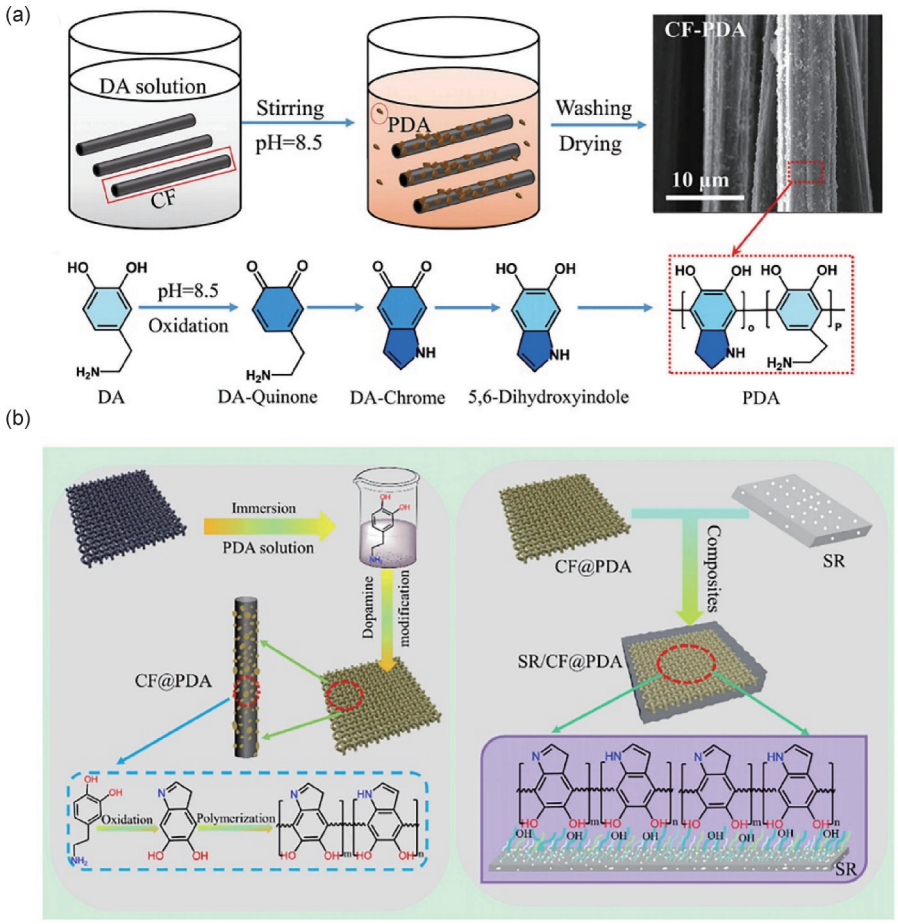


图4　PDA-改性碳纤维的制备工艺及PDA可能的形成机理(a)[51]和CF@PDA的制备工艺及SR/CF@PDA的机理(b)[57]

Fig.4　Preparation process of PDA-modified carbon fiber and possible formation mechanism of PDA(a)[51] and preparation process of CF@PDA and mechanism of SR/CF@PDA (b)[57]

DA在纤维表面修饰方面有显著的效果，PDA在碳纤维表面沉积之后可以引入酚羟基、氨基、亚氨基等极性官能团，有效改善碳纤维与聚合物基体的化学反应，其次DA沉积后会增强碳纤维表面的粗糙度，增加碳纤维与聚合物基体的机械互锁效应。DA浓度、沉积温度、沉积时间以及外加化合物等都会影响DA在碳纤维表面的沉积，例如由于多巴胺溶液浓度过高，反应条件不当等导致多巴胺分子之间发生聚集，形成较大的团聚体，这种团聚现象会改变碳纤维表面的微观结构和化学性质，影响碳纤维界面的均匀性增加缺陷和应力集中，进而影响碳纤维与聚合物基体的界面结合性能。碳纤维改性过程中应尽可能避免多巴胺团聚对界面性能的不利影响。

2　聚多巴胺涂层二次功能化改性碳纤维

PDA涂层中含有大量活性基团，可作为反应平台(platform)进行二次表面功能化改性(如图5[59]所示)，进一步提升复合材料的界面结合性能。

PDA涂层可二次表面功能化的原理主要体现在：

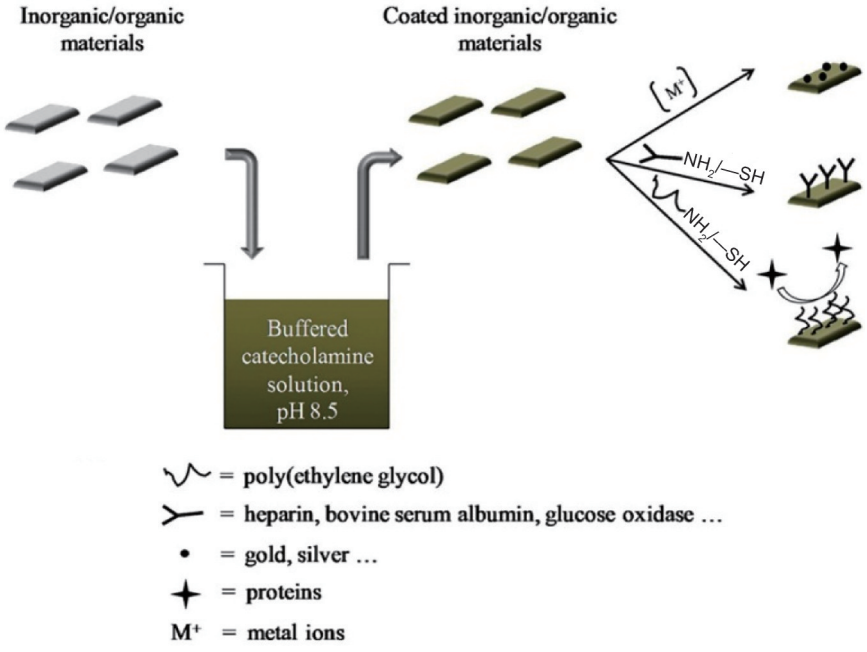


图5 PDA涂层及其衍生化示意图[59]

Fig.5 Polydopamine coating and further derivatizations[59]

吲哚及苯环结构具有π-π堆叠及疏水相互作用；酚羟基与胺基分别带负电与正电，可成为氢键的供体或给体；邻苯二酚结构可与金属离子形成配位作用；PDA具有一定的还原性，能够还原一些强氧化性物质，如$AgNO_3$等；邻苯二酚以及邻苯二酚氧化成的邻苯二醌结构能与巯基、胺基发生迈克尔加成与席夫碱反应，将功能分子引入到材料表面，实现后续功能化，进一步提升材料的界面结合性能[59-60]。PDA涂层丰富的功能性使其在材料科学研究中得到广泛的关注。目前，各种各样的二次功能化材料得以应用，包括纳米粒子、偶联剂、合成聚合物等。

Chen等[61]通过DA与硅烷偶联剂KH560、KH570、KH590协同改性碳纤维，以PDA涂层为平台，在其上接枝硅烷偶联剂来进一步改善填料与基体之间的界面结合性能，碳纤维改性工艺过程如图6(a)所示。结果表明，偶联剂能有效地接枝到PDA平台上，三种硅烷功能化改性碳纤维填充天然橡胶复合材料的热性能和力学性能均有不同程度的提高。其中，KH590填充天然橡胶接枝改性碳纤维的综合性能最好。与未填充天然橡胶相比，导热系数提高了71.3%，拉伸强度提高了73.3%。Lin等[62]首先通过浸润法在碳纤维织物上沉积PDA过渡层，之后PDA涂层表面生长接枝β-FeOOH进行二次表面功能化，以进一步提高复合材料界面结合性能。具有特殊四面体结构的β-FeOOH纳米粒子，增加了碳纤维的表面粗糙度及与聚酰亚胺(PI)基体接触的面积。实验结果显示，碳纤维经过PDA和β-FeOOH改性后，复合材料的拉伸强度和模量分别提高了46%和35%。此外，摩擦学测试也证实了界面引入PDA和β-FeOOH后复合材料获得了更好的磨损率。碳纤维的二次功能化过程以及复合材料的拉伸强度模量测试结果如图6(b)所示，经过二次功能化处理的复合材料拉伸强度最高。Gu等[63]首先将碳纤维浸泡在DA溶液中，在其表面沉积一定量的PDA粒子，得到DA改性碳纤维(m-CF)。然后，将m-CF浸泡在含有苯胺甲基三乙氧基硅烷(AMTS)的乙醇溶液中进行二次功能化改性，通过AMTS与m-CF表面的水解键合反应制得m-CF@AMTS具体工艺过程如图6(c)所示。将改性和未改性的碳纤维与硅橡胶复合，进行TFBT实验，测试结果表明，与未经处理的硅橡胶/碳纤维(SR/CF)和DA改性的硅橡胶/碳纤维(SR/m-CF)相比，SR/m-CF@AMTS的横向纤维束拉伸强度分别提高了135.5%和51.6%，断裂伸长率分别提高了177.9%和63.8%。以上结果表明，用AMTS对碳纤维进行二次功能化改性是一种成功且有效的方法。Chen等[64]在原始碳纤维织物表面沉积PDA，然后在其上接枝聚乙烯亚胺(PEI)，对碳纤维织物进行二次功能化改性，提高复合材料的界面结合性能。实验结果显示，PEI二次功能化改性的碳纤维织物/环氧树脂(CF/EP)复合材料的弯曲强度和弯曲模量分别比未改性的CF/EP复合材料提高32%和31%。PEI二次功能化CF/EP复合材料的ILSS和热膨胀系数分别为(55±2)MPa

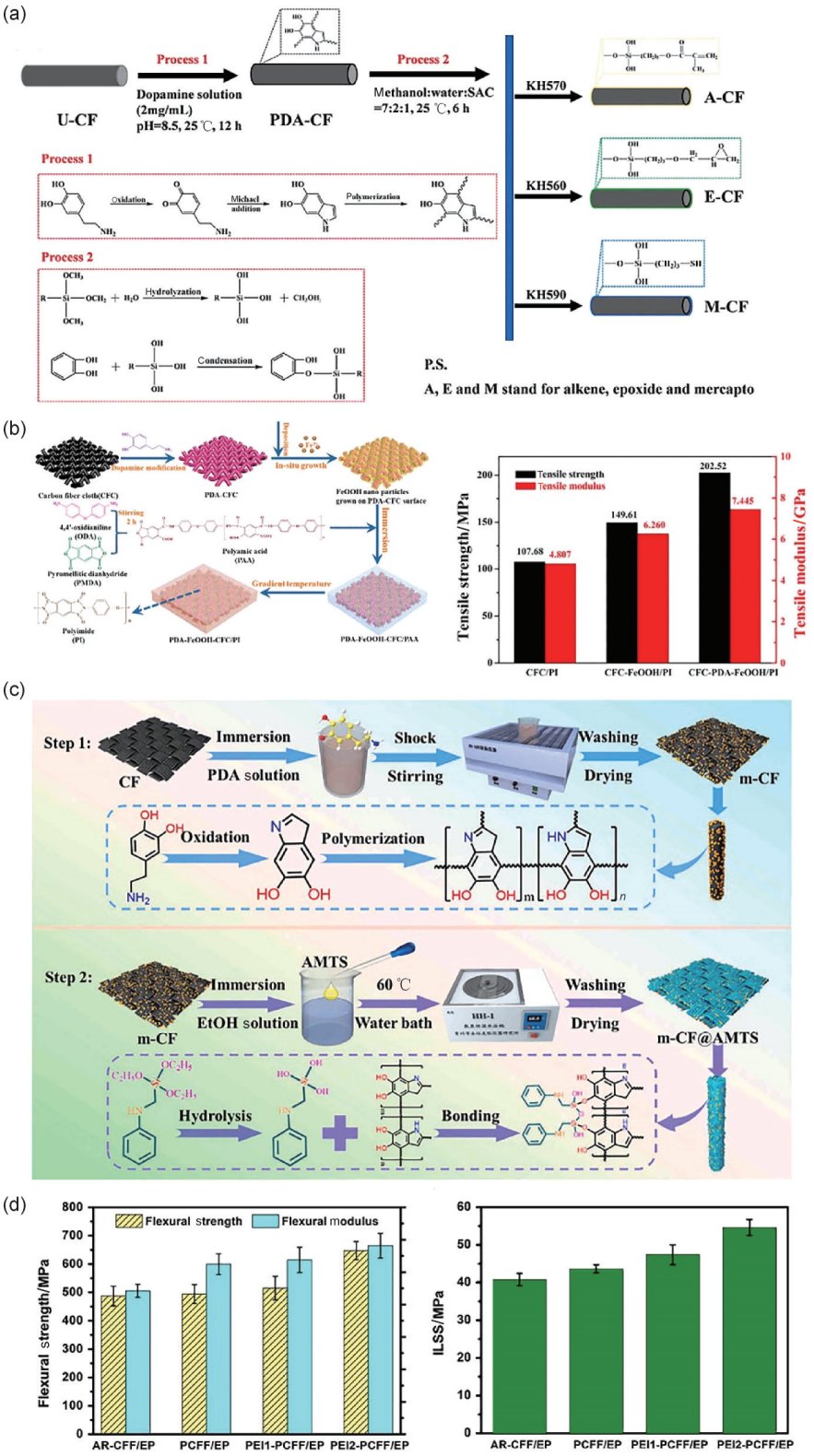


图 6　聚多巴胺二次功能化改性碳纤维示意图

(a)硅烷偶联剂二次功能化改性工艺示意图[61];(b)β-FeOOH二次功能化改性工艺及改性前后复合材料拉伸强度示意图[62];(c)AMTS二次功能化改性工艺示意图[63];(d)PEI二次功能化改性前后复合材料弯曲强度、ILSS示意图[64]

Fig.6　Schematic diagram of polydopamine secondary functionalization modified carbon fiber　(a)schematic diagram of the secondary functionalization modification process of silane coupling agent[61];(b)schematic diagram of the secondary functionalization modification process of β-FeOOH and the tensile strength of composites before and after modification[62];(c)schematic diagram of the secondary functionalization modification process of AMTS[63];(d)schematic diagrams of the composite flexural strength, and interlaminar shear strength of composites before and after the secondary functionalization modification of PEI[64]

和48.9×10^{-6} ℃$^{-1}$，比未改性的CF/EP复合材料分别提高了34%和16.8%。弯曲强度和ILSS的测试结果如图6(d)所示，经过PEI二次功能化改性后的复合材料(PEI-PCFF/EP)力学性能优于单DA改性的复合材料(PCFF/EP)。Liu等[65]为提升碳纤维/硅橡胶(CF/SR)复合材料的界面性能，在碳纤维表面构建了聚多巴胺-聚乙烯亚胺@二氧化硅(PDA-PEI@SiO_2)梯度界面结构。该结构通过在PDA涂层接枝PEI和SiO_2，形成“柔-刚”过渡层，有效调节碳纤维与硅橡胶基体间的模量匹配。结果表明，PDA-PEI@SiO_2层的“柔刚”结构不仅增强了CF/SR复合材料的力学性能，还改善了其热阻和透波性能。电镜分析表明，“柔韧-刚性”结构成功地涂覆在纤维表面，显著改善了纤维表面的粗糙度。当CF/SR复合材料承受拉伸载荷时，它在纤维和基体之间提供了有效的机械啮合。含有CF-A-E@8SiO_2的SR复合材料的拉伸强度和伸长率分别比未改性的CF复合材料高37.16%和27.46%。受生物矿化启发，Quan等[66]开发了PDA辅助羟基定向组装(pHAF)策略，通过PDA涂层基底诱导在CF表面可控生长羟基苯二胺(HAP)纳米层，以增强CF/环氧树脂复合材料的界面性能。这种仿生矿化策略在CF表面构建了软/硬有序的结构，不仅提高了CF的化学反应活性，还增加了纤维表面粗糙度，有效增强了纤维和基体之间的相互作用和负载传递。与未处理的碳纤维/环氧树脂(CF/EP)复合材料相比，所制备的复合材料的层间剪切强度、弯曲强度和界面剪切强度分别提高了45.2%、46.9%和60.5%。这归因于HAP纳米层增加了CF与基体的黏附性和机械互锁。该研究为制备高强度CF复合材料提供了一种仿生矿化的界面改性方法。

上述研究证明DA二次功能化改性处理的碳纤维复合材料界面结合性能提升明显，可以在DA改性的基础上进一步提高复合材料的界面结合性能。DA二次功能化材料具有很强的可设计性，可根据基体材料特性选择更为合适的接枝材料。然而DA二次接枝改性也有其局限性，存在沉积速率低、步骤繁琐、粗糙度不均匀的问题。

3 多巴胺辅助共沉积法改性碳纤维

在碳纤维界面增强研究中，二次表面功能化改性流程繁琐、时间长。研究人员进一步改进为共沉积改性方法，该方法允许灵活改变共沉积组分的比例及分子结构，能够便捷地实现对表面性质的调控，是该领域研究的一个创新思路。

与DA自聚合相比，共沉积组分与DA、PDA之间的相互作用和反应更为复杂，这将在很大程度上决定沉积行为和涂层的最终性能，DA分子和PDA聚集体中含有氨基、酚羟基和芳香环等一系列基团。因此，DA、PDA可以通过氢键、疏水相互作用和静电吸引等非共价相互作用与相应的共组分作用，形成非共价共沉积。如前节所述的PDA可以与巯基、胺基等不同化学基团反应生成共价键，形成共价共沉积。如DA、PDA可通过迈尔加成和席夫碱反应与氨基发生反应，如图7所示[42]。与非共价共沉积相比，共价共沉积可提供更坚固的网络结构，从而提升涂层的稳定性。在选择共沉积组分时应优先考虑可以产生共价共沉积的材料。目前，DA辅助共沉积的共沉积组分主要包括分子聚合物、纳米材料和偶联剂等。

Liu等[67]采用简便的共沉积方法，在碳纤维表面形成了聚多巴胺/聚乙烯亚胺涂层(PDA/PEI)。研究结果显示，碳纤维表面经过PDA/PEI功能化涂层处理后，获得了大量的胺基团，表面能显著提高了70.5%，这一改进有助于增强碳纤维与基体材料之间的界面结合力及浸润性能。在聚氨酯(PU)基体中加入经过共沉积改性处理的碳纤维后，所得复合材料的模量、韧性和拉伸强度均有显著提升，相较于未经处理的CFRP复合材料分别提高59.3%、28.2%和38.8%。所制备的聚氨酯/PDA-PEI-CF复合材料具有优异的拉伸和动态力学性能。主要是由于CF上的PDA/PEI涂层与PU基体之间通过氢键和π-π堆积作用增强了界面的结合性能。Shanmugam等[68]以官能化的多壁碳纳米管(MWCNT)为共沉积组分采用DA辅助共沉积法改性纤维如图8(a)所示，增强超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维与热塑性基体(Elium®)之间的界面结合强度。TFBT测试结果表明，与普通复合材料相比，以0.03%多壁碳纳米管/DA共沉积改性的纤维/基体界面可提高黏结强度约42.50%。Wu等[69]采用DA辅助共沉积法，将氨基化碳纳米管(NH_2-CNTs)和碳纤维两种惰性材料低损伤、高效率的紧密结合。PDA的超强附着力可将不同质量的NH_2-CNTs稳定、均匀地固定在碳纤维表面上(可能的反应过程如图8(b)所示)，显著提高纤维表面的极性和粗糙度。碳纤维共沉积改性处理后复合材料的界面结合性能提升明显，其中以0.05 g NH_2-CNTs共沉积改性的复合材料界面结合强度最好，相比未改性的碳纤维复合材料，IFSS和ILSS分别实现了61.03%和55.30%的增长。Zeng等[70]以氧化石墨烯(GO)为共沉积组分将其加入DA溶液进行共沉积处理，如图8(c)所示。结果显示，经过24 h共沉积处理的GO-PDA

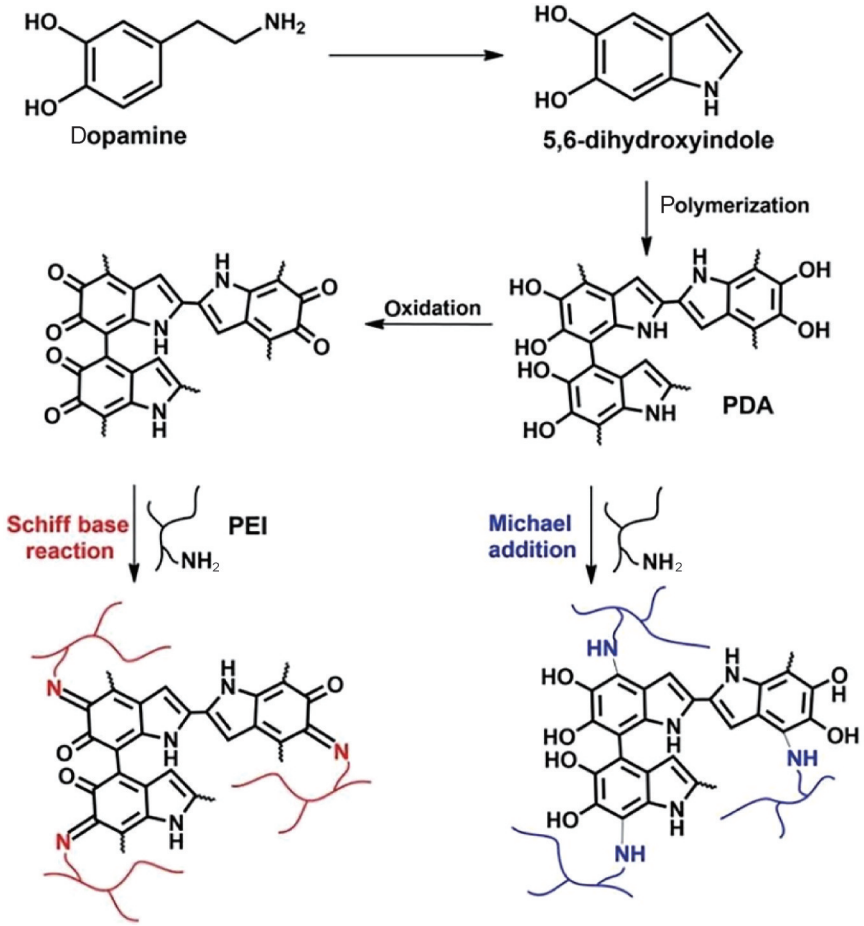


图7　PDA-PEI共沉积涂层两种可能的形成过程示意图[42]

Fig.7　Schematic diagram of two possible formation processes of PDA-PEI co-deposited coatings[42]

碳纤维，其抗拉强度和拉伸模量相较于未处理的碳纤维分别提升了82%和92.7%。同时，碳纤维与环氧树脂(EP)的IFSS也提高了约70%。这一增强效果主要归因于共沉积过程中GO与多酚之间强烈的π-π相互作用，促使GO牢固地堆积在纤维表面，形成稳定的涂层，从而显著增强纤维与基体材料的界面结合力。Wu等[71]以共沉积法将DA与GO混合后沉积在碳纤维表面，通过这种方式制备得到的CF/EP复合材料，其IFSS达到101.4 MPa，与未处理的碳纤维相比增加了64.1%，与仅使用GO进行改性的样品相比，提高了46.1%。Yang等[72]将DA与八铵多面体低聚硅倍半氧烷(POSS-NH_2)共沉积在碳纤维表面上，如图8(d)所示，制备了PDA/POSS-NH_2共沉积改性的CF/EP复合材料。结果表明，共沉积涂层能大大提高碳纤维的表面浸润性、界面相容性和界面粗糙度，并且不会降低纤维的本身强度。未改性碳纤维复合材料的IFSS值为71.5 MPa，DA改性CF复合材料的IFSS值达到91.9 MPa，提升了28.5%，DA/POSS共沉积改性的复合材料IFSS为117.1 MPa，相较于未改性碳纤维复合材料提升了63.8%，复合材料的界面结合强度改善明显。Wu等[73]通过贻贝启发的铁离子-PDA共沉积技术，开发了一种简便有效的纤维表面改性方法，以实现界面黏附力的增强。研究设计了三种不同含量的铁离子，以比较所形成复合物的浓度如何影响碳纤维的表面特性和相应复合材料的界面黏附性。研究结果显示，与纯PDA改性纤维相比，随着铁离子浓度的增加，附着在纤维上的PDA纳米球的尺寸和数量先急剧下降，然后增加。用Fe^{3+}处理的纤维具有更高的IFSS，这与Fe^{3+}和邻苯二酚基团之间的配位键更强有关，配位键可以提高界面交联密度，从而促进应力传递，当$FeCl_3$用量为0.880 g时，$CF_{DA\text{-}Fe0.880}$界面剪切强度最大。该研究表明铁离子-PDA共沉积涂层的比例控制在复合材料的界面工程中显示出巨大的潜力。Lyu等[74]基于生物启发的多巴胺共聚特性，采用一步共沉积法将二氧化硅纳米颗粒接枝到碳纤维表面。对处理后的碳纤维进行了全面的研究，实验结果表明，黏附在碳纤维上的PDA和纳米粒子网络可将所制复合材料的层间剪切强度提高28.4%。动态力学分析结果证明，纤维/基体界面上的界面黏合具有良好的耐热循环性。这种一步共沉积方法在回收碳纤维表

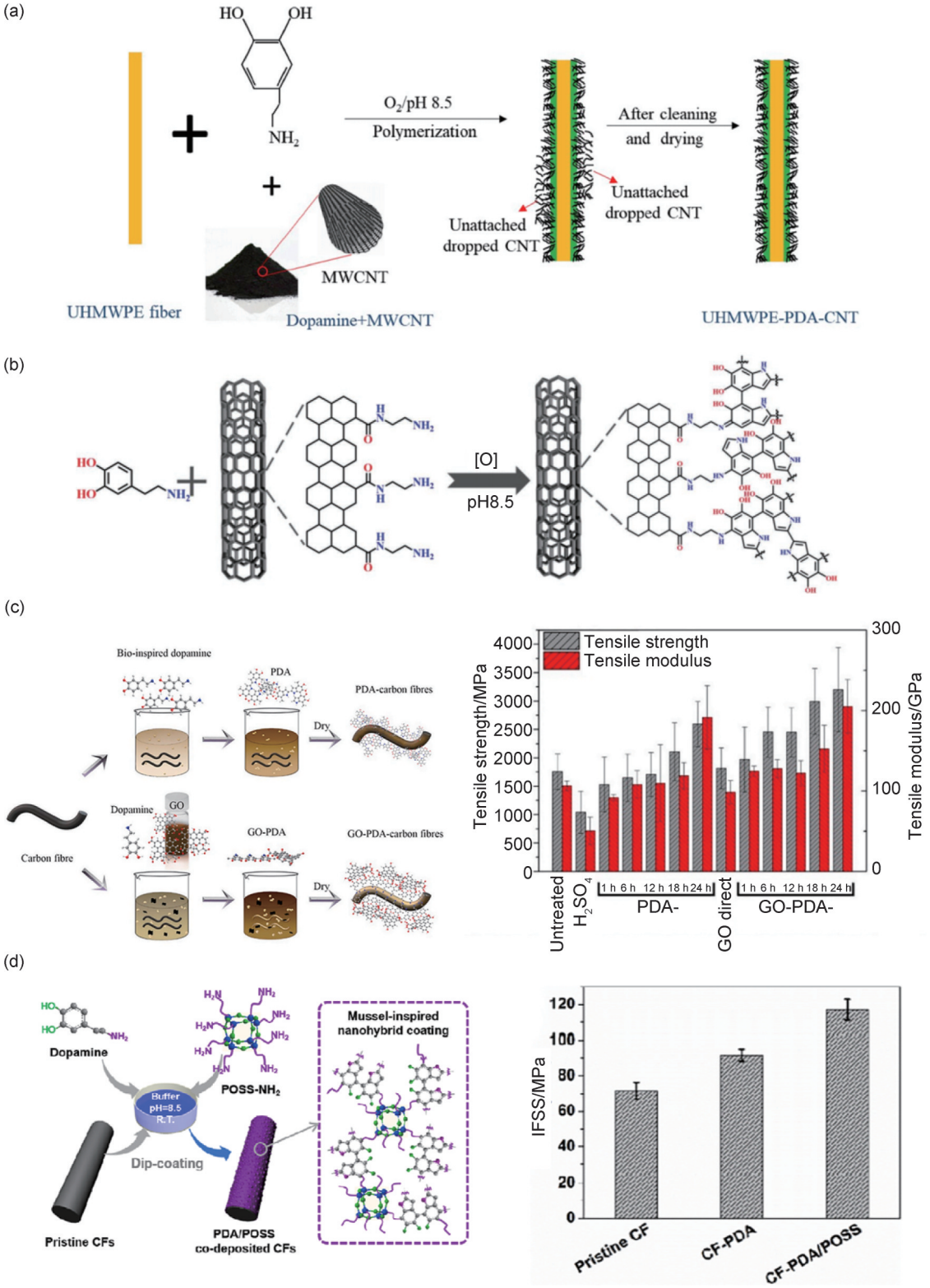


图8 多巴胺辅助共沉积改性碳纤维示意图

(a)DA/多壁碳纳米管共沉积改性聚乙烯纤维示意图[68];(b)氨基化碳纳米管/DA共沉积改性碳纤维可能发生的反应[69];(c)DA/氧化石墨烯共沉积改性碳纤维示意图[70];(d)DA/POSS共沉积改性碳纤维示意图[72]

Fig.8 Schematic diagram of dopamine assisted co-deposition modified carbon fiber

(a)schematic diagram of polyethylene fiber modified by co-deposition of dopamine/multi-walled carbon nanotubes[68];(b)possible reactions of carbon nanotubes modified by co-deposition of aminated carbon nanotubes/dopamine[69];(c)schematic diagram of carbon fiber modified by co-deposition of dopamine/graphene oxide [70];(d)schematic diagram of carbon fiber modified by co-deposition of dopamine/POSS[72]

面引入了大量极性基团，从而提高了碳纤维与聚苯硫醚基体之间的表面能和润湿性，是制造先进复合材料的一种稳健而绿色的方法。

综上所述，DA 的辅助共沉积策略是一种温和高效绿色的界面改性方法，以这种方法改性碳纤维不会在碳纤维造成损伤，且可以有效地提升复合材料的界面结合性能。这一策略为先进复合材料的纤维表面改性提供了一个前景广阔的平台。

4　总结与展望

在CFRP中，碳纤维和聚合物的界面对于复合材料的物理和化学性能具有重要影响。良好的界面结合可以更好地发挥增强材料的力学性能，并降低缺陷造成的不良影响。本文按照处理工艺的不同分类介绍了具有绿色发展前景的碳纤维DA处理法（尤其是DA的共沉积处理法）在碳纤维增强复合材料界面研究中的进展。以该方法处理碳纤维，能够温和地在纤维表面引入大量极性基团。整个处理过程条件温和，仅通过简单的自聚合与共沉积技术，便能实现对碳纤维材料表面的多功能化改性。这种方法不仅简化了改性流程，还大幅度减少了改性过程中的环境污染和能源消耗。DA改性技术，契合当前绿色、可持续的发展需求。但其应用仍存在一些重要问题和挑战有待探索。

（1）DA改性碳纤维的聚合沉积机制仍有待探索。PDA聚合过程及DA辅助共沉积的机理并不完全清楚，共沉积过程中PDA与共组分连接的确切结构、共沉积聚集体的生长模式、共组分在聚集体中的含量和分布以及聚集体在表面的共沉积过程，仍然不清楚，因此DA聚合沉积机制仍需要系统和深入的研究。

（2）改性工艺的优化。在处理碳纤维时，无论是采用DA氧化自聚合改性还是DA辅助共沉积改性，氧化剂的使用、浓度、温度、处理时间以及溶液的酸碱度等因素，均会对聚合沉积速率及所得涂层的形态结构产生重要影响。目前，关于这些改性工艺的具体参数尚未形成统一共识，因此，深入探究这些影响因素如何作用于最终改性涂层的形成规律，对于实现高效且稳定的改性过程至关重要。

（3）其他多酚化合物改性方法的开发。在工业生产中，DA作为一种原材料，面临着储存稳定性差的问题，变质速度较快。相比之下，多酚化合物要稳定得多，且在自然界中也有丰富的储备。其他多酚化合物改性碳纤维会产生与PDA涂层相似的表面改性效果，同样是值得开发的有效、绿色的碳纤维界面改性方法。

参考文献

[1] LI S L, SUN T, LIU C, et al. A study of laser surface treatment in bonded repair of composite aircraft structures [J]. Royal Society Open Science, 2018,5(3):171272.

[2] LAN X, ZHAO X Y. Application of carbon fiber composite materials in the field of industrial robots[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence. Shanghai,2019:310-315.

[3] FRIEDRICH H E.Challenges of materials technology for low consumption vehicle concepts [J]. Advanced Engineering Materials, 2003,5(3):105-112.

[4] CLAUSI M, TOTO E, BOTTI S, et al.Direct effects of UV irradiation on graphene-based nanocomposite films revealed by electrical resistance tomography [J]. Composites Science and Technology,2019,183 :107823.

[5] 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.

[6] ZHENG H, ZHANG W J, LI B W, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: a review [J].Composites Part B,2022, 233:109639.

[7] HOCHARD C, AUBOURG P A, CHARLES J P. Modelling of the mechanical behaviour of woven-fabric CFRP laminates up to failure [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(2): 221-230.

[8] LIU L T, DU M S, LIU F. Recent advances in interface microscopic characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites [J]. Frontiers in Materials, 2023, 10: 1124338.

[9] 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: 124255.

[10] WU Y D, WANG Z A, 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, 2021, 146: 106421.

[11] ZHAO F, HUANG Y D. Grafting of polyhedral oligomeric silsesquioxanes on a carbon fiber surface: novel coupling agents for fiber/polymer matrix composites [J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(11): 3695-3703.

[12] GAO B, ZHANG J, HAO Z N, et al. *In-situ* modification of carbon fibers with hyperbranched polyglycerol *via* anionic ring-opening polymerization for use in high-performance composites [J]. Carbon, 2017, 123: 548-557.

[13] MA L C, MENG L H, WANG Y W, et al. Interfacial properties and impact toughness of dendritic hexamethylenetetramine functionalized carbon fiber with varying chain lengths [J]. RSC Advances, 2014, 4(74): 39156-39166.

[14] WU Q, YANG X, WAN Q Q, et al. Layer-by-layer assembled nacre-like polyether amine/GO hierarchical structure on carbon fi-

ber surface toward composites with excellent interfacial strength and toughness [J]. Composites Science and Technology, 2020, 198: 108296.

[15] SONG S A, LEE C K, BANG Y H, et al. A novel coating method using zinc oxide nanorods to improve the interfacial shear strength between carbon fiber and a thermoplastic matrix [J]. Composites Science and Technology, 2016, 134: 106-114.

[16] LIU Z, TANG C, CHEN P, et al. Modification of carbon fiber by air plasma and its adhesion with BMI resin [J]. RSC Advances, 2014, 4(51): 26881-26887.

[17] WANG Y L, PILLAI S K R, CHE J F, et al. High interlaminar shear strength enhancement of carbon fiber/epoxy composite through fiber-and matrix-anchored carbon nanotube networks [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(10): 8960-8966.

[18] SHARMA S P, LAKKAD S C. Impact behavior and fractographic study of carbon nanotubes grafted carbon fiber-reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites [J]. Composites Part A, 2015, 69: 124-131.

[19] LIU W B, ZHANG S, HAO L F, et al. Fabrication of carbon nanotubes/carbon fiber hybrid fiber in industrial scale by sizing process [J]. Applied Surface Science, 2013, 284: 914-920.

[20] 王清清,王飘飘,钱鑫,等.水溶性热塑性聚酰亚胺上浆剂对国产高强高模碳纤维复合材料界面性能的影响[J].材料工程,2023,51(5):174-182.
WANG Q Q, WANG P P, QIAN X, et al. Effect of water-soluble thermoplastic polyimide sizing agent on interfacial properties of domestic high strength and high modulus carbon fiber composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(5): 174-182.

[21] YUAN H J, ZHANG S C, LU C X, et al. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/polyether sulfone composites through an organic solvent-free polyamic acid sizing [J]. Applied Surface Science, 2013, 279: 279-284.

[22] ZHANG X Q, XU H B, FAN X Y. Grafting of amine-capped cross-linked polyphosphazenes onto carbon fiber surfaces: a novel coupling agent for fiber reinforced composites [J]. RSC Advances, 2014, 4(24): 12198-12205.

[23] JIANG D W, XING L X, LIU L, et al. Interfacially reinforced unsaturated polyester composites by chemically grafting different functional POSS onto carbon fibers [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(43): 18293-18303.

[24] YANG S J, ZOU L Y, LIU C, et al. Codeposition of levodopa and polyethyleneimine: reaction mechanism and coating construction [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(48): 54094-54103.

[25] XIE L, CUI X, LIU J, et al. Nanomechanical insights into versatile polydopamine wet adhesive interacting with liquid-infused and solid slippery surfaces [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(5): 6941-6950.

[26] SZABÓ L, IMANISHI S, HIROSE D, et al. Mussel-inspired design of a carbon fiber-cellulosic polymer interface toward engineered biobased carbon fiber-reinforced composites [J]. ACS Omega, 2020, 5(42): 27072-27082.

[27] MEI X K, LU L S, XIE Y X, et al. Preparation of flexible carbon fiber fabrics with adjustable surface wettability for high-efficiency electromagnetic interference shielding [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(43): 49030-49041.

[28] MANOLAKIS I, AZHAR U. Recent advances in mussel-inspired synthetic polymers as marine antifouling coatings [J]. Coatings, 2020, 10(7): 653.

[29] CHEN S S, CAO Y W, FENG J C. Polydopamine as an efficient and robust platform to functionalize carbon fiber for high-performance polymer composites [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(1): 349-356.

[30] CHAI D L, XIE Z M, WANG Y S, et al. Molecular dynamics investigation of the adhesion mechanism acting between dopamine and the surface of dopamine-processed aramid fibers [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(20): 17974-17984.

[31] MUN S D, LEE S J, SONG J H. Tensile properties and surface treatment of fiber composites with the concentration of polydopamine and buffer solution [J]. Fibers and Polymers, 2021, 22(1): 249-255.

[32] LEE H, DELLATORE S M, MILLER W M, et al. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings [J]. Science, 2007, 318(5849): 426-430.

[33] ZHAO J J, SU Y L, HE X, et al. Dopamine composite nanofiltration membranes prepared by self-polymerization and interfacial polymerization [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 465: 41-48.

[34] FAN J X, LUO J Q, CHEN X R, et al. Polydopamine meets porous membrane: a versatile platform for facile preparation of membrane adsorbers [J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1448: 121-126.

[35] WANG H, WU J J, CAI C, et al. Mussel inspired modification of polypropylene separators by catechol/polyamine for Li-ion batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(8): 5602-5608.

[36] RYOU M H, LEE Y M, PARK J K, et al. Mussel-inspired polydopamine-treated polyethylene separators for high-power Li-ion batteries[J]. Advanced Materials, 2011, 23(27): 3066-3070.

[37] HE Y K, WANG J T, ZHANG H Q, et al. Polydopamine-modified graphene oxide nanocomposite membrane for proton exchange membrane fuel cell under anhydrous conditions [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(25): 9548-9558.

[38] LIU Y L, AI K L, LIU J H, et al. Dopamine-melanin colloidal nanospheres: an efficient near-infrared photothermal therapeutic agent for *in vivo* cancer therapy [J]. Advanced Materials, 2013, 25(9): 1353-1359.

[39] WANG R, WANG H Y, SUN L Y, et al. The fabrication and tribological behavior of epoxy composites modified by the three-dimensional polyurethane sponge reinforced with dopamine functionalized carbon nanotubes [J]. Applied Surface Science, 2016, 360: 37-44.

[40] RYU S, LEE Y, HWANG J W, et al. High-strength carbon nanotube fibers fabricated by infiltration and curing of mussel-inspired catecholamine polymer [J]. Advanced Materials, 2011,

23(17): 1971-1975.

[41] THAKUR V K, YAN J, LIN M F, et al. Novel polymer nanocomposites from bioinspired green aqueous functionalization of BNNTs [J]. Polymer Chemistry, 2012, 3(4): 962-969.

[42] RYU J H, MESSERSMITH P B, LEE H. Polydopamine surface chemistry: a decade of discovery [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(9): 7523-7540.

[43] ALFIERI M L, MICILLO R, PANZELLA L, et al. Structural basis of polydopamine film formation: probing 5, 6-dihydroxyindole-based eumelanin type units and the porphyrin issue [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(9): 7670-7680.

[44] QIU W Z, YANG H C, XU Z K. Dopamine-assisted co-deposition: an emerging and promising strategy for surface modification [J]. Advances in Colloid And Interface Science, 2018, 256: 111-125.

[45] DELLAVECCHIA N F, AVOLIO R, ALFÈ M, et al. Building-block diversity in polydopamine underpins a multifunctional eumelanin-type platform tunable through a quinone control point [J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(10): 1331-1340.

[46] DING Y H, WENG L T, YANG M, et al. Insights into the aggregation/deposition and structure of a polydopamine film [J]. Langmuir, 2014, 30(41): 12258-12269.

[47] D'ISCHIA M, NAPOLITANO A, BALL V, et al. Polydopamine and eumelanin: from structure-property relationships to a unified tailoring strategy [J]. Accounts of Chemical Research, 2014, 47(12): 3541-3550.

[48] LIEBSCHER J, MRÓWCZYNSKI R, SCHEIDT H A, et al. Structure of polydopamine: a never-ending story?[J]. Langmuir, 2013, 29(33): 10539-10548.

[49] HONG S, NA Y S, CHOI S, et al. Non-covalent self-assembly and covalent polymerization co-contribute to polydopamine formation [J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(22): 4711-4717.

[50] WU Q, WAN Q Q, LIU Q L, et al. Synergistic strengthening and toughening the interphase of composites by constructing alternating "rigid-and-soft" structure on carbon fiber surface [J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(21): 1900970.

[51] QIN W Z, LEI K X, YAN M L, et al. Carbon fiber-reinforced epoxy composite properties improvement by incorporation of polydopamine sizing at fiber-matrix interface [J]. Polymer Composites, 2023, 44(4): 2441-2448.

[52] SUN Z X, MA C P, GAO A J, et al. Modification of carbon fiber surfaces using dopamine [J]. Fibers and Polymers, 2023, 24(3): 1003-1014.

[53] WU Q, RAZZAK A, BAI H H, et al. Dopamine concentration-dependent surface modification for gaining carbon fiber composites with enhanced interfacial adhesion [J]. Composites Communications, 2022, 29: 101047.

[54] HAN W, ZHANG H P, TAVAKOLI J, et al. Polydopamine as sizing on carbon fiber surfaces for enhancement of epoxy laminated composites [J]. Composites Part A, 2018, 107: 626-632.

[55] 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, 2019, 160: 31-36.

[56] TIAN X L, HAN S, ZHUANG Q X, et al. Surface modification of staple carbon fiber by dopamine to reinforce natural latex composite [J]. Polymers, 2020, 12(4): 988.

[57] GU B, PU G H, DING B N, et al. Improved interfacial bonding strength of silicone rubber/carbon fiber modified by dopamine [J]. Polymer Composites, 2022, 43(10): 6975-6986.

[58] SUN N, ZHU B, GAO X, et al. Improved the interfacial characteristics of carbon fiber/polyamide 6 composites by synthesizing polydopamine rapidly on the carbon fiber surface with ultrasound-assisted [J]. Composites Science and Technology, 2023, 234: 109950.

[59] FAURE E, FALENTIN-DAUDRÉ C, JÉRÔME C, et al. Catechols as versatile platforms in polymer chemistry [J]. Progress in Polymer Science, 2013, 38(1): 236-270.

[60] 刘媛. 基于多巴胺的碳纤维表面修饰及其性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
LIU Y. Studies on dopamine-based carbon fiber surface modification and performance [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[61] CHEN Z, TU Q, SHEN X, et al. Enhancing the thermal and mechanical properties of carbon fiber/natural rubber composites by co-modification of dopamine and silane coupling agents [J]. Polymer Testing, 2023, 126: 108164.

[62] LIN Z, YANG J, JIA X H, et al. Polydopamine/FeOOH-modified interface in carbon cloth/polyimide composites for improved mechanical/tribological properties [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 243: 122677.

[63] GU B, ZHU X H, PU G H, et al. Interfacial bonding property of SR/CF composites enhanced by secondary modification [J]. Materials Today Communications, 2023, 36: 106489.

[64] CHEN S S, FENG J C. Epoxy laminated composites reinforced with polyethyleneimine functionalized carbon fiber fabric: mechanical and thermal properties [J]. Composites Science and Technology, 2014, 101: 145-151.

[65] LIU S, FENG Y, WANG Y, et al. Interfacial enhancement by constructing a "flexible-rigid" structure between high-modulus fillers and low-modulus matrix in carbon fiber/silicone rubber composites [J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 191: 108468.

[66] QUAN G, WU Y, WANG P, et al. Polydopamine-induced biomimetic mineralization strategy to generate hydroxyapatite for the preparation of carbon fiber composites with excellent mechanical properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277: 134529.

[67] LIU Y, FANG Y C, LIU X L, et al. Mussel-inspired modification of carbon fiber *via* polyethyleneimine/polydopamine co-deposition for the improved interfacial adhesion [J]. Composites Science and Technology, 2017, 151: 164-173.

[68] SHANMUGAM L, FENG X M, YANG J L. Enhanced interphase between thermoplastic matrix and UHMWPE fiber sized

with CNT-modified polydopamine coating [J]. Composites Science and Technology, 2019, 174: 212-220.
[69] WU D L, HAO Z N, SHENG Y J, et al. Construction of an orderly carbon fiber/carbon nanotubes hybrid composites by a mild, effective, and green method for highly interface reinforcement [J]. Advanced Materials Interfaces, 2022, 9(34): 2201360.
[70] ZENG L, LIU X Q, CHEN X G, et al. π-π interaction between carbon fibre and epoxy resin for interface improvement in composites [J]. Composites Part B, 2021, 220: 108983.
[71] WU Q, YANG X, YE Z Y, et al. Dopamine-dependent graphene oxide modification and its effects on interfacial adhesion of carbon fiber composites [J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 31: 102086.
[72] YANG X, DU H, LI S, et al. Codepositing mussel-inspired nanohybrids onto one-dimensional fibers under "green" conditions for significantly enhanced surface/interfacial properties [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(3): 4412-4420.
[73] WU Q, RAZZAK A, DENG H, et al. Mussel-inspired ferric ion-polydopamine complex as a facile, green and efficient platform to functionalize carbon fiber for improving interfacial adhesion of composites [J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 37: 102742.
[74] LYU Y, KOUTSOS V, BRÁDAIGH C M Ó, et al. Improving the interfacial adhesion between recycled carbon fibres and polyphenylene sulphide by bio-inspired dopamine for advanced composites manufacturing [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449: 141855.

基金项目:国家自然科学基金项目(22035007,22378393)
收稿日期:2024-10-30;**录用日期**:2024-12-01
通讯作者:王朵(1988—),女,研究员,博士,研究方向为界面工程和高性能复合材料,联系地址:北京市海淀区中关村北二街1号中国科学院过程工程研究所(100190),E-mail:wangduo@ipe.ac.cn;徐俊波(1979—),男,研究员,博士,研究方向为高性能复合材料成型及限域传递,联系地址:北京市海淀区中关村北二街1号中国科学院过程工程研究所(100190),E-mail:jbxu@ipe.ac.cn

(本文责编:解 宏)