http://pmse.scu.edu.cn

多巴胺对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料界面性能的影响

俞大为[1]，余 婷[2]，朱金铭[3]，杨家操[4]，张守玉[3]，王孝军[3,4]，杨 杰[3,4]

（1. 四川大学 高分子科学与工程学院，四川 成都 610065；2. 国家知识产权局专利局专利审查协作四川中心，四川 成都 610213；
3. 南京特塑复合材料有限公司，江苏 南京 210031；4. 四川大学 分析测试中心，四川 成都 610064）

摘要：碳纤维增强聚苯硫醚复合材料（CF/PPS）因其具有优异的综合性能被广泛关注，但实际应用中发现碳纤维与聚苯硫醚的界面结合并不理想，因此，改善CF/PPS界面结合强度来提升其宏观力学性能就有着深远的理论意义和应用价值。文中基于微球脱粘技术，将具有优良黏附性的多巴胺水溶液作为界面改性剂，对纤维进行表面改性，采用微球脱粘实验和宏观拉伸等实验测试探究了不同多巴胺浓度对CF/PPS界面性能的影响。结果表明，当多巴胺浓度为2 g/L时，聚多巴胺在碳纤维表面均匀黏附，形成较好的微纳结构，涂覆效果最佳，表观界面剪切强度最大为36.09 MPa，较未改性前增加13.50 %；PDA-CF2/PPS拉伸试样的断面呈现凹凸不平的形态，拔出的碳纤维上残留树脂基体最多，具有良好的界面改性效果。

关键词：碳纤维；聚苯硫醚；复合材料；多巴胺；界面性能
中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）08-0030-09

碳纤维增强聚苯硫醚复合材料（CF/PPS）是纤维增强树脂基复合材料中非常重要的一类[1,2]，其由碳纤维增强体和聚苯硫醚树脂基体组成[3]。聚苯硫醚（PPS）具有优异的耐热性、耐腐蚀性、阻燃性等[4]，在航空航天、电子电器等领域都具有广泛的应用[5~7]。然而纯的树脂韧性差，脆性大[8,9]，限制了它的应用。碳纤维具有优异的综合性能，常作为聚苯硫醚的增强体[10]，能解决聚苯硫醚韧性差、强度低的问题，进一步扩大了聚苯硫醚在各大领域中的应用。但是碳纤维与聚苯硫醚浸润性差，界面结合较差，仍有待进一步提升，因此对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料界面的研究意义重大[11,12]。

针对碳纤维表面惰性且光滑的缺点，大多是通过不同的碳纤维表面的改性来达到增强纤维与树脂基体间的界面结合性能和综合力学性能。改性方法较多，但适用于实际生产过程中的方法较少。其中直接将碳纤维浸泡于界面改性剂中对碳纤维进行表面改性，改性过程灵活方便和快捷，工艺简单实用，可以减少设备投资和工艺改进投资，是实现CF/PPS复合材料高性能化的一个重要途径。

随着微观力学测试方法的不断改进和发展，碳纤维增强聚苯硫醚复合材料的界面基础研究也逐渐慢慢兴起。Liu等[13]建立了适用于热塑性树脂的Microbond实验微球的制备方法，开发Microbond实验用仪器设备。通过Microbond微观力学手段研究CF/PPS复合材料的界面微观力学行为，并研究了拉伸速率和退火等不同条件对界面剪切强度测试的影响。Wang等[14]在此基础上进一步深入地研究残余热应力对碳纤维增强热塑性树脂在Microbond实验中的影响及形成原因，并寻求适当的退火处理来避

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0145
收稿日期：2024-03-11
基金项目：国家重点研发计划（2023YFB3712500）；江苏省科技厅重点研发计划（产业前瞻与关键核心技术）（BE2019008）；大飞机先进材料创新联盟项目（COMAC-SFGS-2023-1189）；四川大学工科特色团队（2020SCUNG107）；四川大学专职博士后研发基金（2024SCU12118）
通讯联系人：王孝军，主要从事高性能聚合物学术及产业化技术的研究，E-mail: wangxj@scu.edu.cn；
杨杰，主要从事高性能高分子材料的研究，E-mail: ppsf@scu.edu.cn

免这种残余热应力。同时通过拟合数据测量和理论计算量化这种残余热应力,通过校正计算表观界面剪切强度值来除去残余热应力带来的影响。他们的工作在纤维增强热塑性复合材料的界面微观力学测试中树立了新的里程碑,对微球脱粘法在复合材料中更大范围的应用具有至关重要的意义。

目前,碳纤维增强聚苯硫醚复合材料界面问题的研究还处于高速发展的阶段,研究人员正通过不同的改性方法来改善碳纤维与聚苯硫醚树脂的界面性能。例如,Xu等[15]研究了等离子体表面改性的方法对CF/PPS的界面黏结性能的影响。探讨了等离子体处理工艺对碳纤维表面形貌及化学组成的影响,发现纤维与树脂间的极性匹配对界面性能非常重要。Xu等[16]利用石墨烯尺寸、比表面积大且力学性能好的优势,将不同含量的石墨烯加入偶联剂KH560制成上浆剂来涂覆碳纤维表面,探索不同浓度石墨烯对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料界面性能的影响。

多巴胺(DA)能够在碱性的环境中发生自聚合反应[17~19],从而在物体表面形成一层聚多巴胺(PDA)涂层[20]。聚多巴胺涂层因为与贻贝黏附蛋白的组成结构相似,能使其具有强力的黏附性[21]。因此,本文利用聚多巴胺超强的黏附力来改善纤维与基体的结合,将黏性的聚多巴胺作为CF/PPS界面改性剂。将多巴胺涂覆在碳纤维表面,考察多巴胺对碳纤维表面形貌的影响。通过微球脱粘实验探究不同浓度多巴胺对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料的界面性能的影响,并通过拉伸试验表征多巴胺对CF/PPS界面的改善机理。本表面改性路线绿色无害且易于操作,可在一定程度上拓宽纤维的应用。

1　实验部分

1.1　主要原料

环氧上浆碳纤维:XKCF3506E-12K,大连兴科碳纤维有限公司;聚苯硫醚:纤维级,聚芳硫醚课题组;盐酸多巴胺、Tris-HCl:分析纯,成都科龙化工试剂厂;液压成型机:SHR-10A,成都航发液压工程公司。

1.2　碳纤维的处理

将碳纤维在不同浓度的盐酸多巴胺溶液(1.0 g/L,2.0 g/L和3.0 g/L)中浸泡处理。0.01 mol/L tris-HCl缓冲溶液的pH约8.5,该pH值是多巴胺自聚的最佳pH值,这种弱碱的条件不会对碳纤维的力学性能和表面环氧上浆剂造成影响。溶液在室温静置24 h,后用大量蒸馏水漂洗碳纤维以除去未涂覆在纤维上的PDA,室温晾干,碳纤维分别编号为PDA-CF1,PDA-CF2和PDA-CF3。

1.3　测试与表征

1.3.1　*微球脱粘试验*:将纤维级PPS树脂加热熔融并拉丝成纤维,且树脂纤维的直径尽量与单丝碳纤维直径相当;截取小段树脂纤维,在单丝碳纤维上打结并轻微拉紧,用刀片将两端多余的PPS纤维切掉;将试样置于四川大学科仪厂XRC-1型显微熔点仪上进行熔融。熔融温度在320 °C左右(熔点温度280 °C以上),熔融时间控制在10 s左右;当树脂熔融成微球后,将试样取出,在空气中冷却,将其存放在干净的培养皿中。在120 °C的鼓风烘箱中进行退火3 h,并缓慢冷却至室温后再取出备用。

筛选形貌对称、大小均匀的微球试样,进而在高倍CCD摄像头下通过配套统计软件测定碳纤维直径(d_f,单位mm)、树脂微球对碳纤维的包埋长度(l_e,单位μm)(60~90 μm最佳)和微球脱粘时的最大力值(F_{max},单位N)。根据式(1)计算得出复合材料表观界面强度(τ_{app},单位MPa)。

测试时,将纤维的一端用夹具夹紧,保证自由长度(lf)为5 mm,另一头用卡具卡住树脂微球,在0.02 mm/s拉伸速率下向上移动刀具,微球受到向上的作用力逐渐从纤维上剥离,并得到相应的力与位移曲线,进而得到微球脱粘时的F_{max}。

$$\tau_{app}=\frac{F_{max}}{\pi d_f l_e} \tag{1}$$

1.3.2　*形貌表征*:采用日本Jeol公司JSM-7500F型扫描电镜(SEM)表征纤维形貌和微球试样脱粘后形貌以及拉伸试样断面形貌。将微球试样贴于试样台上并做喷金处理,之后在SEM加速电压20 kV下获取试样形貌情况。采用美国AIST-NT公司HE002-H型原子力显微镜观察对比分析碳纤维表面的粗糙度,采用轻敲模式,探测面积为3 μm×3 μm。

1.3.3　*X射线光电子能谱分析*:采用英国KRATOS公司XSAM800型X射线电子能谱(XPS)表征碳纤维表面化学元素及其价态变化,射线源为MgKα,扫

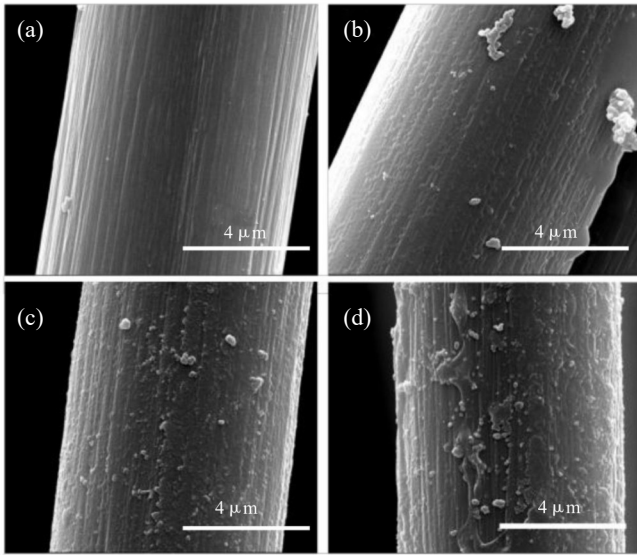


Fig. 1 SEM images of carbon fibers: (a) untreated CF and CF coated with different dopamine concentrations of (b) 1 g/L, (c) 2 g/L, and (d) 3 g/L

描元素光谱的范围为0~1200 eV，信号取至材料表面10 nm深度范围。

1.3.4 结晶形态表征：通过配有热台的德国Leica公司DMRX型偏光显微镜观察CF/PPS复合材料等温结晶过程。将PPS树脂在300 ℃热台上熔融并压成薄膜，之后将碳纤维嵌入树脂，制备等温结晶试样。将试样置于热台，加热至330 °C恒温5 min，确保样品树脂晶体完全熔融消除热历史，然后以100 °C/min的降温速率快速冷却至PPS的结晶温度附近230 °C进行等温结晶。通过摄像头以一定间隔时间记录晶体生长过程，放大倍数为200倍。

1.3.5 拉伸试样界面改性机理分析：制备拉伸试样时，将PPS树脂与不同多巴胺浓度涂覆后的碳纤维按照90:10质量比通过转矩流变仪使其混合均匀。所用温度为300 °C，转速为50 r/min，混合约6 min。将混合好的原料通过粉碎机粉碎成细小颗粒，以备后续制样。将粉碎的原料用热压机在310 °C压成哑铃型样条。放入烘箱于120 °C退火5 h。

采用美国Instron公司Instron 5967型万能材料试验机对拉伸试样进行常温拉伸性能测试，测试标准为GBT 1040.2-2006。试样断面尺寸为4 mm×1 mm，标距为30 mm；拉伸速度为2 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维表面形貌分析

对采用不同浓度的多巴胺涂覆后的碳纤维进行SEM分析，并与未涂覆的碳纤维进行对比，结果如Fig.1所示。可以发现，未涂覆的碳纤维表面有深浅不一的轴向沟槽，这些沟槽是湿法纺丝制备聚丙烯腈基碳纤维原丝过程造成的。而当碳纤维浸入多巴胺水溶液后，多巴胺就以那些沟槽为吸附位点和自聚合位点，使得纤维表面沟槽变浅(如Fig.1(b))；而当多巴胺浓度越来越大，多巴胺自聚合形成的纳米聚多巴胺颗粒就占据了整个沟槽，使得沟槽消失。当多巴胺浓度为2 g/L时，多巴胺刚好在碳纤维表面均匀的涂覆，形成良好的微纳结构。而当多巴胺浓度为3 g/L时，聚多巴胺颗粒在碳纤维表面会团聚，使得涂覆不均匀了。之前的研究者也发现当多巴胺溶液浓度为2 g/L时，多巴胺能有效地在纤维表面形成均匀的聚多巴胺涂层[22,23]，从AFM图（Fig.2）也发现，当多巴胺溶液浓度为2 g/L时，表面粗糙度也变大，由0.2105 μm增加到0.3220 μm。说明这些聚多巴胺纳米颗粒增加了纤维的比表面积和粗糙度，形成了微纳结构，有利于与树脂基体复合时形成机械锁合。

2.2 碳纤维表面化学结构分析

为了进一步证明多巴胺涂覆在碳纤维表面，对碳纤维表面进行XPS分析，结果如Fig.3所示。从Fig.3(a)中可以发现，聚多巴胺涂覆前后，碳纤维表面均含有C1s和O1s的峰，而只有聚多巴胺涂覆后的碳纤维表面才出现明显的N1s峰，而N元素主要来自多巴胺。Tab.1是涂覆多巴胺前后纤维表面元素组

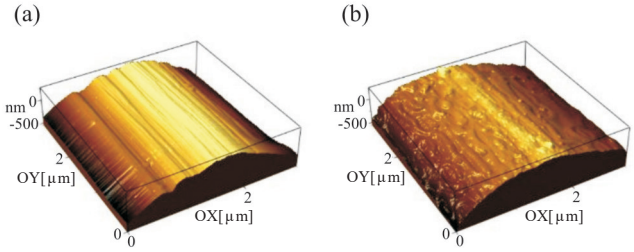


Fig. 2 AFM images of (a) untreated CF and (b) PDA-coated CF

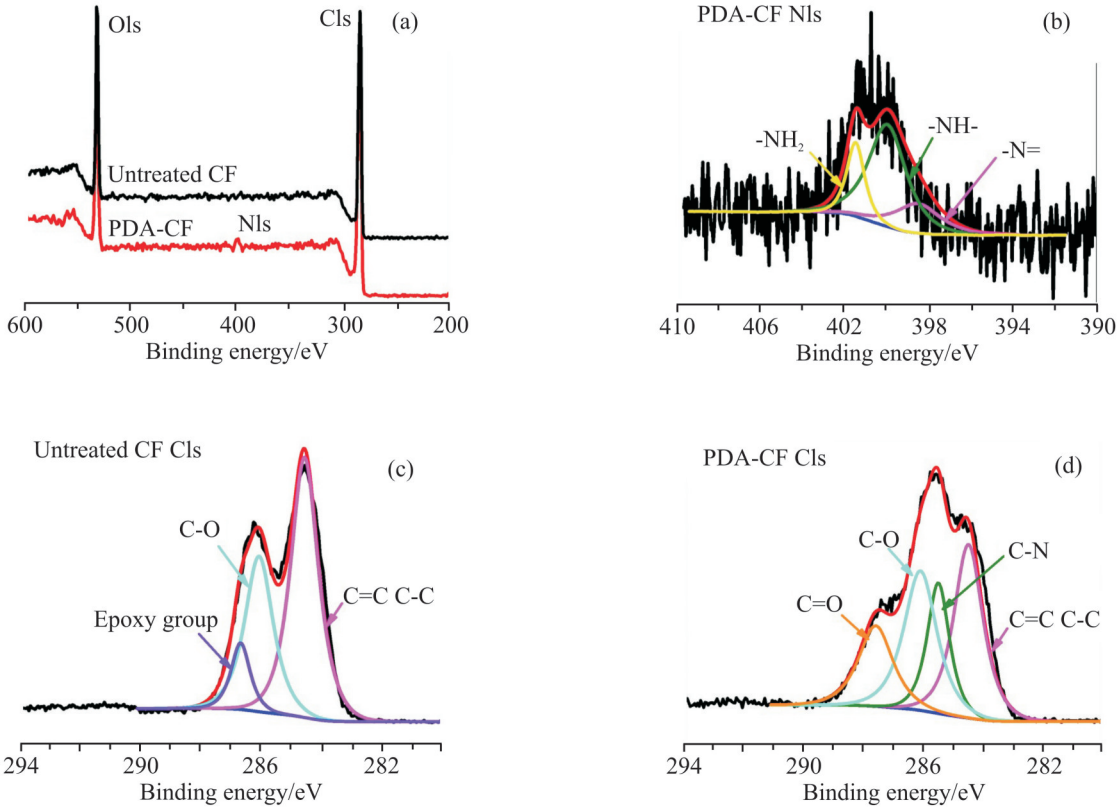


Fig. 3 XPS spectra of carbon fibers((a) wide scan spectra, (b) N1s spectra of PDA-coated CF), and C1s spectra of (c) untreated CF and (d) PDA-coated CF

Tab. 1 Contents of different elements on the surface of carbon fibers

Samples	Elemental composition			Composition ratio	
	C/%	O/%	N/%	O/C	N/C
Untreated CF	79.75	19.94	0.31	25.07	0.64
PDA-CF	76.61	20.93	2.46	27.32	3.21

成的相对含量,也可发现N元素含量明显增多,N/C也增大,说明多巴胺在碳纤维表面有较好的包覆。N1s峰可分为3个基团的峰,分别是—N=(398.5 eV),—NH—(399.8 eV)和—NH_2(401.7eV),亚氨基是由多巴胺自聚合产生的吲哚结构[24](如Fig.3所示),氨基是由于有少量多巴胺自组装造成的[25]。

对比Fig.3(c)和Fig.3(d),可以发现未涂覆多巴胺的碳纤维表面也含有C—O(286.1 eV),主要是由于市面售卖上的纤维表面有一层环氧上浆剂,所以也有环氧基团(286.7 eV),而当碳纤维表面涂覆多巴胺

Tab. 2 Contents of functional groups on the surface of carbon fibers by C1s XPS

Samples	Carbon-containing groups/%				
	284.6/eV C—C,C=C	285.5/eV C—N	286.1/eV C—O	286.7/eV Epoxy group	287.6/eV C=O
Untreated CF	54.91	—	35.26	9.83	—
PDA-CF	22.83	18.90	29.85	—	17.41

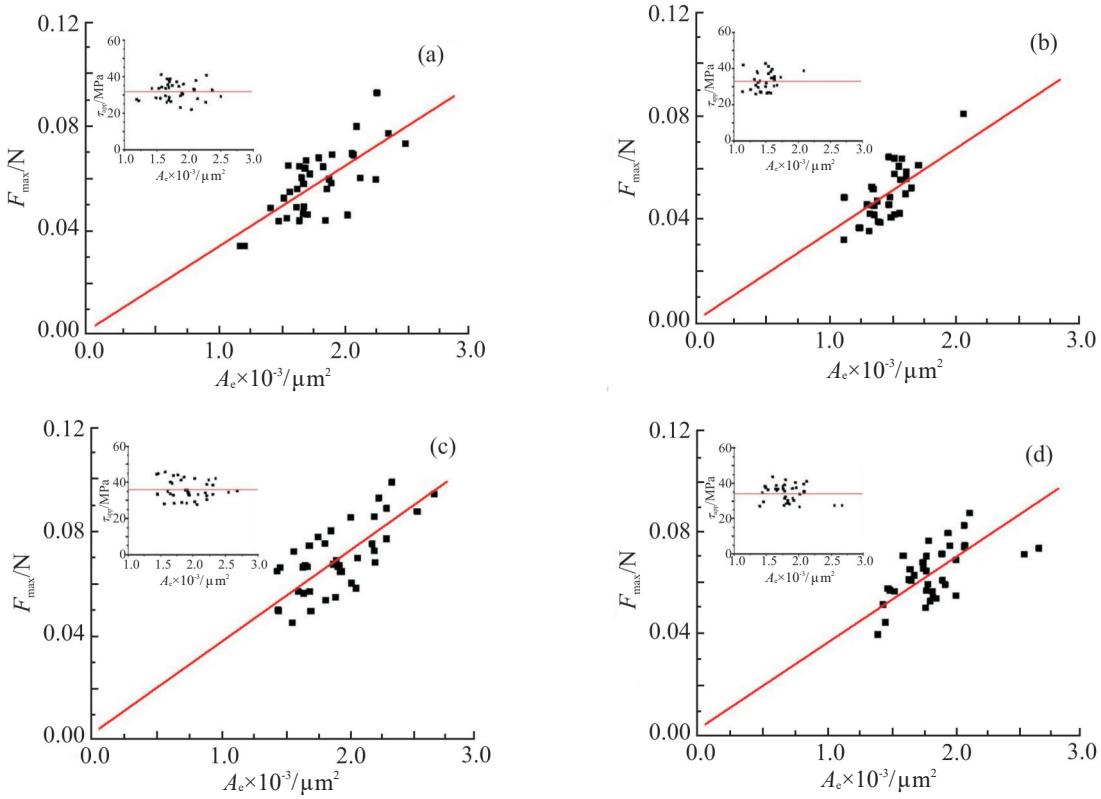


Fig. 4 Plots of the maximum pull-out force and corresponding interfacial shear strength as a function of embedded area for microbond specimens at the loading speed of 0.02 mm/s with different dopamine concentrations of (a) 0 g/L, (b) 1 g/L, (c) 2 g/L and (d) 3 g/L

后，纤维表面才出现C—N（285.5 eV）基团，也证明多巴胺已成功涂覆在碳纤维表面。Tab.2给出了C1s具体的分峰结果，可以发现碳纤维涂覆多巴胺后，纤维表面C—C和C=C含量减少了，C—N和C=O明显增多，说明多巴胺已成功涂覆在碳纤维表面。

2.3 CF/PPS界面剪切强度分析

Fig.4给出了在拉伸速率为0.02 mm/s时，不同多巴胺浓度涂覆后CF/PPS微复合材料的F_{max}-A_e与表观界面剪切强度值。从图中可以看出，纤维与树脂界面最大拔出力（F_{max}）与包埋面积（A_e）呈良好的线性关系，且将实验数据拟合后得到一条经过原点的直线$F_{max}=k\cdot A_e$，直线斜率（k）代表着单位包埋面积上界面层抵抗外载荷破坏的能力，统计后结果如Tab.3所示。从表中数据可以看出，当多巴胺浓度为2 g/L时，拟合出的直线斜率最大，说明该浓度下界面层的力学水平最高。Fig.4中的插图是根据式(1)计算得出的各个试样的表观剪切强度，从中可以看出，τ_{app}基本是一个常数，不随A_e的变化而变化，并计算得出平均值（结果如Tab.3所示），与拟合直线斜率得到的界面剪切强度值数据相关性较好，差异较小。随着多巴胺的浓度增加，CF/PPS微复合材料的界面剪切强度逐渐增大，当多巴胺浓度为2 g/L时，2种计算方法得到的界面剪切强度值达到最大；而当多巴胺浓度进一步增大到3 g/L时，界面剪切强度对比没有涂覆的依然有所提高，但提高幅度相对2 g/L更小些，可能是由于多巴胺团聚造成聚多巴胺分布不均，使得

Tab. 3 Microbond test results for interfacial shear strength for PPS/CF samples with different dopamine concentrations

Samples	K/(N·μm^{-2})	τ_{app} (slope) /MPa	$\bar{\tau}_{app}$(calculation)/MPa
0 g/L	0.03182	31.82	31.80±4.9
1 g/L	0.03318	33.18	32.85±5.1
2 g/L	0.03585	35.85	36.09±5.3
3 g/L	0.03401	34.01	34.39±4.8

τ_{app} (slope): obtained from the slope of regression line fitted from force (F_{max}) vs. embedded area (A_e) crossed with the origin point; $\bar{\tau}_{app}$ (calculation): average values of the individual τ_{app} on Eq. (1)

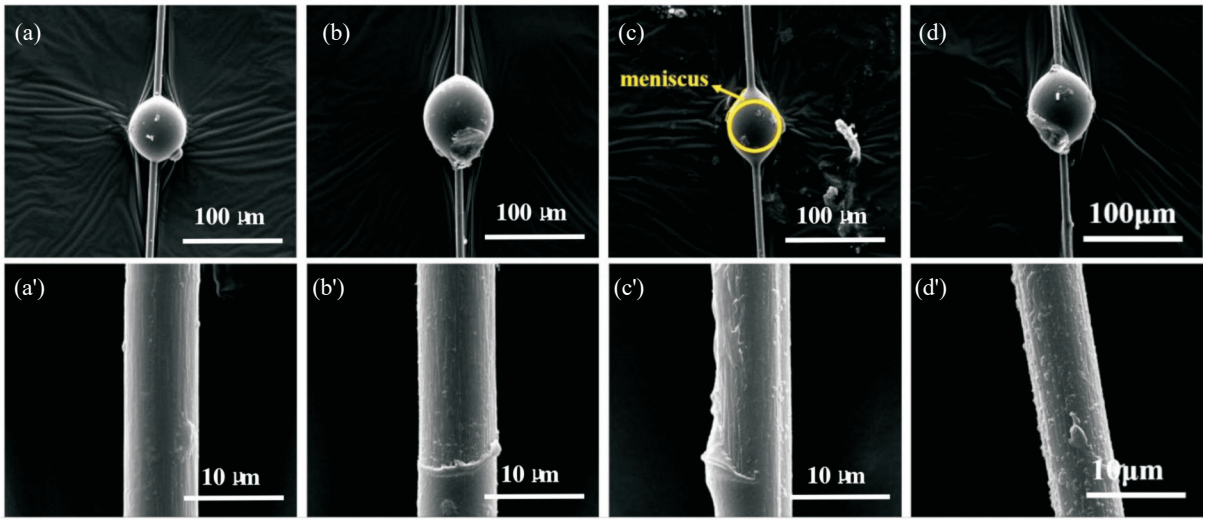


Fig. 5 SEM images of the microbond specimens (a, b, c, d) before and (a', b', c', d') after debonding with different dopamine concentrations of (a) 0 g/L, (b) 1 g/L, (c) 2 g/L and (d) 3 g/L

力学性能相对降低。

Fig.5是CF/PPS微复合材料经过微球脱粘实验前后的电镜图。从图中可以看出,未涂覆多巴胺时,制备出的CF/PPS微球试样很圆,表明聚苯硫醚树脂对碳纤维浸润性较差,脱粘后纤维表面残留树脂基体较少。而当碳纤维表面涂覆多巴胺后,微球试样圆度下降,微球端部出现明显的半月区[26],而且当多巴胺浓度为2 g/L时,微球呈椭球状,树脂和纤维浸润性得到改善,脱粘后纤维表面有较多的树脂基体残留和均匀的聚多巴胺颗粒残留;但当多巴胺浓度进一步增大到3 g/L时,试样依旧呈椭球状,但脱粘后的纤维表面有些许树脂基体残留,聚多巴胺颗粒较多。

2.4　结晶性分析

实验使用偏光显微镜观察了CF/PPS等温结晶过程,结果如Fig.6所示。从图中可以看出,未涂覆多巴胺的碳纤维体系中,球晶无规生长,碳纤维表面由于与分子链相互作用较弱,不能引发晶核生成,因此在碳纤维表面处的结晶较少。对比而言,涂覆了多巴胺的碳纤维表面有大量晶核,说明多巴胺涂层可作为一种高效成核剂提升PPS成核。由于纤维表面成核点密度较高,原本应该生成球晶的晶体由于三维空间生长受到阻碍,晶体之间相互挤压,因而只能够向垂直于纤维表面的一维方向进行生长,形成圆柱状的横晶结构。横晶界面层刚度和强度都比聚苯硫醚树脂球晶和非晶部分高,能够承受更大的剪切应力,使应力更有效地传递到碳纤维。而且碳纤维和树脂基体模量不匹配,不能使应力有效传递,横晶层就可作为一个中间层减少这种不匹配,改善应力传递效率[27]。从Fig.6可以发现,横晶像"锯齿"一样与树脂基体形成机械啮合,增强了纤维与树脂的界面相互作用。Zhou等[28]用多巴胺直接涂覆苎麻纤维(RF)去增强聚丁二酸丁二醇酯(PBS)也有相似的发现。

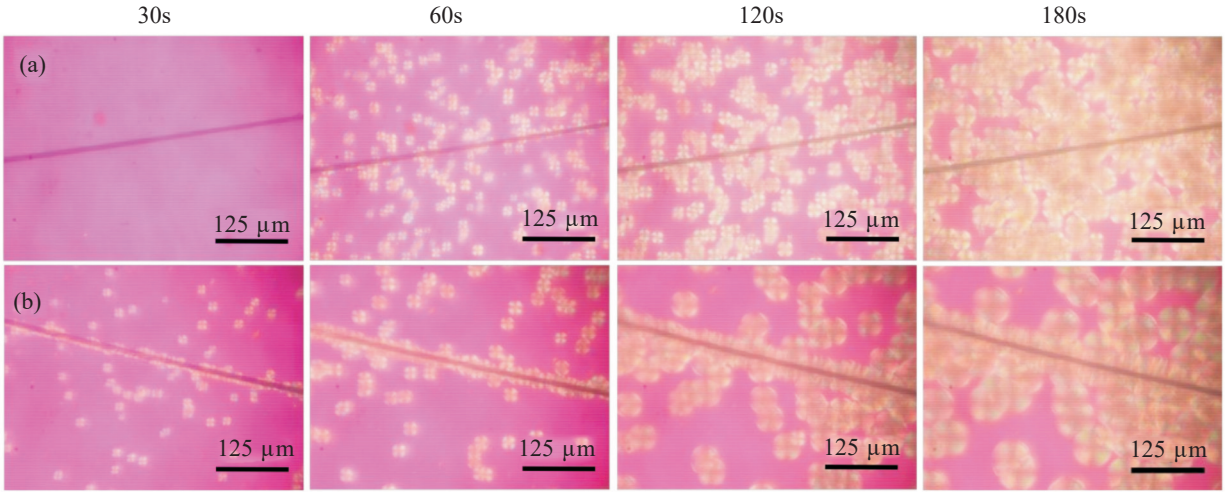


Fig. 6 Evolution of crystalline morphology of (a) untreated CF/PPS and (b) PDA-CF2/PPS

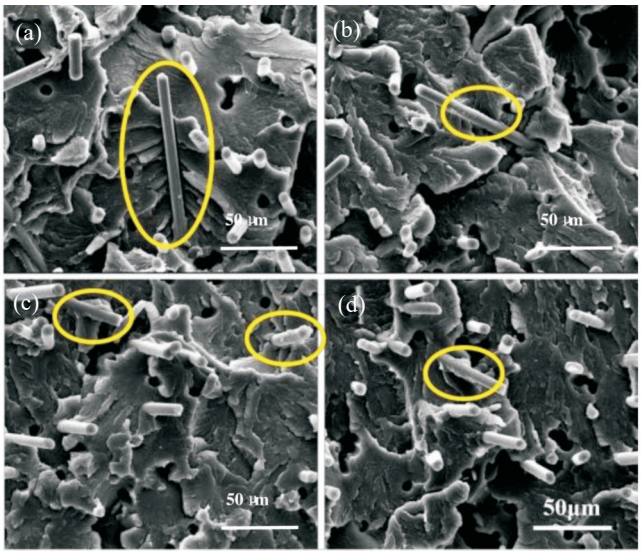


Fig. 7 SEM images of tensile fractured surface of CF/PPS composites with different dopamine concentrations of (a) 0 g/L, (b) 1 g/L, (c) 2 g/L and (d) 3 g/L

2.5 多巴胺对界面改善机理

当纤维表面涂覆多巴胺后，微球端部出现了半月区，说明多巴胺能有效改善聚苯硫醚树脂对碳纤维表面的浸润性[29]。本文还通过拉伸测试表征多巴胺涂覆前后CF/PPS宏观试样的微观界面变化，从而分析多巴胺对界面的改善机理，结果如Fig.7所示。从PDA-CF/PPS拉伸试样的断面图中可以发现，碳纤维在聚苯硫醚树脂中分布均匀，保证材料整体性能的稳定性。未涂覆多巴胺的试样拉断后，被拔出的纤维表面光滑，没有树脂基体残留；随着多巴胺的浓度增加，断面呈现出凹凸不平，说明破坏需要更多的能量，断裂需要克服更大的阻力，而且拔出纤维上残留的树脂也增加，多巴胺浓度为2 g/L纤维上残留的树脂基体最多。

3 结论

本文采用微球脱粘法，以界面理论为依据，采用界面调控和改性手段，系统性地探究了多巴胺表面处理对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料界面性能的影响。通过实验和结果分析得出如下结论。

（1）pH=8.5的条件下，聚多巴胺颗粒黏附在碳纤维表面，提升纤维表面粗糙度和浸润性。当多巴胺浓度过大时，聚多巴胺颗粒易于团聚。当多巴胺浓度为2 g/L时，聚多巴胺在碳纤维表面均匀黏附，涂

覆效果最佳。

（2）微球脱粘实验表明，涂覆多巴胺后，纤维和树脂浸润更好，微球端部出现半月区，界面剪切强度也增大，当多巴胺浓度为2 g/L时，F_{max}-A_e图拟合直线斜率最大，表观界面剪切强度最大为36.09 MPa，较未改性前增加13.50%，纤维拔出后残留的树脂基体较多。

（3）通过PDA-CF/PPS的宏观拉伸试样对界面改善机理进行分析。结果表明，随着多巴胺浓度增大，断面结构越凹凸，拔出的纤维上残留的树脂也越多，其中，多巴胺浓度为2 g/L时，纤维上残留的树脂基体最多。

参考文献：

[1] Krawczak P, Maffezzoli A. Advanced thermoplastic composites and manufacturing processes[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 166.

[2] Reis J P, Moura M D, Samborski S. Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: a review[J]. Materials, 2020, 13: 5832.

[3] Rajak D K, Pagar D D, Menezes P L, *et al*. Fiber- reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications [J]. Polymers, 2019, 11: 1667.

[4] Zuo P, Tcharkhtchi A, Shirinbayan M, *et al.* Overall investigation of polyphenylene sulfide (PPS) from synthesis and process to applications – a review[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2019, 304: 1800686.

[5] 王淼, 相鹏伟, 邵宝刚, 等. 聚苯硫醚复合材料的应用及进展[J]. 塑料, 2020, 49(6): 148-151.
Wang M, Xing P W, Shao B G, *et al.* Application and progress of polyphenylene sulfide composite[J]. Plastics, 2020, 49(6): 148-151.

[6] Osti de Moraes D V, de Melo Morgado G F, Magnabosco R, *et al.* Study of the influence of PPS, PAEK, and PEEK thermoplastic matrices on the static mechanical behavior of carbon fiber - reinforced composites[J]. Polymer Composites, 2023, 2023: 1-11.

[7] Ahn S, Park C, Choi J H, *et al.* A concise review of high performance PPS composites using various fillers[J]. Elastomers and Composites, 2022, 57: 81-91.

[8] Nara S, Sagawa H, Saito H, *et al*. Synergetic toughening of poly (phenylene sulfide) by poly(phenylsulfone) and poly(ethylene-ran-methacrylateran-glycidyl methacrylate)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: 49994.

[9] Jia Ge, Catalanotti G, Falzon B, *et al.* Process characteristics, damage mechanisms and challenges in machining of fibre reinforced thermoplastic polymer (FRTP) composites: a review [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 273: 111247.

[10] Chen G, Mohanty A K, Misra M. Progress in research and applications of Polyphenylene Sulfide blends and composites with carbons[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 209: 108553.

[11] Oshima S，Higuchi R，Kato M，*et al*. Cooling rate- dependent mechanical properties of polyphenylene sulfide (PPS) and carbon fiber reinforced PPS (CF/PPS) [J]. Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 2023, 164: 107250.

[12] Serban A. Automatic detection of fiber orientation on CF/PPS composite materials with 5- harness satin weave[J]. Fibers and Polymers, 2016, 17: 1925-1933.

[13] Liu B, Liu Z, Wang X, *et al.* Interfacial shear strength of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide measured by the microbond test[J]. Polymer Testing, 2013, 32: 724-730.

[14] Wang X, Xu D, Liu H Y, *et al.* Effects of thermal residual stress on interfacial properties of polyphenylene sulphide/carbon fibre (PPS/CF) composite by microbond test[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51: 334-343.

[15] Xu D, Liu B, Zhang G, *et al.* Effect of air plasma treatment on interfacial shear strength of carbon fiber – reinforced polyphenylene sulfide[J]. High Performance Polymers, 2016, 28 (4): 411-424.

[16] Xu J, Xu D, Wang X, *et al.* Improved interfacial shear strength of carbon fiber/polyphenylene sulfide composites by graphene[J]. High Performance Polymers, 2017, 29: 913-921.

[17] Ruppel S, Liang J F. Tunable properties of polydopamine nanoparticles and coated surfaces[J]. Langmuir, 2022, 38: 5020 5029.

[18] 代玉. 基于聚多巴胺衍生物碳材料的制备及其氧还原性能的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
Dai Y. Preparation of polydopamine derivative carbon materials and their oxygen reduction properties[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.

[19] Hu X, Ke Y, Zhang M, *et al.* Understanding the self-polymerization mechanism of dopamine by molecular simulation and applying dopamine surface modification to improve the interfacial adhesion of polyimide fibers with epoxy resin matrix [J]. High Performance Polymers, 2021, 33: 601-614.

[20] 李珍妮,邓字巍. 仿贻贝黏附性多巴胺的研究与应用进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(1): 185-190.
Li Z N, Deng Z W. Progress in research and application of mussel- inspired adhesive dopamine[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(1): 185-190.

[21] 庞田田, 王强, 韩璐, 等. 聚多巴胺涂层的制备及其衍生碳材料的概述[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(8): 175-181.
Pang T T, Wang Q, Han L, *et al*. Preparation of polydopamine coatings and its derivation of carbon materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(8): 175-181.

[22] Li Y, Chen Q, Yi M, *et al.* Effect of surface modification of fiber post using dopamine polymerization on interfacial adhesion with core resin[J]. Applied Surface Science, 2013, 274: 248-254.

[23] Li Y, Shi Y, Duan S, *et al*. Electrospun biodegradable polyorganophosphazene fibrous matrix with poly (dopamine) coating for bone regeneration[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2014, 102: 3894-3902.

[24] Lee H A, Park E, Lee H. Polydopamine and Its derivative surface chemistry in material science: a focused review for studies at KAIST [J]. Advanced Materials, 2020, 32: 1907505.

[25] 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: 4711-4717.

[26] Kang S K, Lee D B, Choi N S. Fiber/epoxy interfacial shear strength measured by the microdroplet test[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69: 245-251.

[27] Ning N, Fu S, Zhang W, *et al*. Realizing the enhancement of interfacial interaction in semicrystalline polymer/filler composites via interfacial crystallization[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37: 1425-1455.

[28] Zhou M, Li Y, He C, *et al*. Interfacial crystallization enhanced interfacial interaction of poly (butylene succinate)/ramie fiber biocomposites using dopamine as a modifier[J]. Composites Science and Technology, 2014, 91: 22-29.

[29] Sun Z, Guo F L, Li Y Q, *et al.* Effects of carbon nanotube-polydopamine hybridization on the mechanical properties of short carbon fiber/polyetherimide composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 236: 109848.

Effect of Dopamine on Interface Performance of Carbon Fiber Reinforced Polyphenylene Sulfide Composites

Dawei Yu[1], Ting Yu[2], Jinming Zhu[3], Jiacao Yang[4], Shouyu Zhang[3], Xiaojun Wang[3,4], Jie Yang[3,4]

(*1. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Patent Examination Cooperation Sichuan Center of the Patent Office, Chengdu 610213, China; 3. Nanjing Advanced Thermoplastic Composites Co., Ltd., Nanjing 210031, China; 4. Analysis and Testing Center, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

ABSTRACT: Carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide (CF/PPS) composites have excellent comprehensive properties, but in practical applications, it has been found that the interface bonding between carbon fibers and polyphenylene sulfide is not ideal. Therefore, improving the interfacial bonding strength of CF/PPS to enhance its macroscopic mechanical properties has profound theoretical significance and application value. Based on the microsphere debonding technology, dopamine aqueous solution with excellent adhesion was used as interface modifier to modify the surface of fiber. Microsphere debonding experiment and macroscopic tensile test were used to explore the effect of different dopamine concentrations on the interface performance of CF/PPS. The results show that when the dopamine concentration is 2 g/L, polydopamine uniformly adheres to the surface of carbon fibers, forming a good micro nano structure, and the coating effect is the best, the maximum shear strength of the apparent interface is 36.09 MPa, which is 13.50 % higher than before modification; the cross section of PD-CF2/PPS tensile sample show uneven shape, and the residual resin matrix is the most on the pulled carbon fiber, which exhibits a good interface modification effect.

Keywords: carbon fiber; poly (phenylene sulfide); composite materials; dopamine; interface performance