

专利成果

- 李德宏, 徐敏军, 支建海, 陈礼群, 杨建行, 钱鑫
一种碳纤维拉伸性能测试的制样方法, CN102809499B, 2015-01-14
- 李德宏, 支建海, 钱鑫, 陈礼群, 徐敏军, 杨建行
一种碳纤维拉伸性能测试的制样装置。CN202757814U, 2013-02-27
- 张永刚, 王雪飞, 徐敏军, 王冶铁, 杨建行
低温炭化炉, CN104611785B, 2016-08-31
- 钱鑫, 陈礼群, 支建海, 张永刚, 王雪飞, 李德宏, 宋书林
一种高强度高模量碳纤维及其制备方法。CN108642605B, 2020-08-04
- 钱鑫, 张永刚, 王雪飞, 郑凯杰, 李德宏, 钟俊俊, 衡芳芳, 宋书林
一种高强高模碳纤维的处理系统。CN208266326U, 2018-12-21
- 张永刚, 文章苹, 王雪飞, 钱鑫, 李德宏, 王微霞, 王欣宇
电化学聚合改性表面处理碳纤维的方法及碳纤维复合材料。CN108755126A, 2018-11-06
- 王雪飞, 钱鑫, 张永刚, 宋书林, 李德宏
一种高拉伸模量石墨纤维及其制备方法。CN108754673A, 2018-11-06
- 钱鑫, 王雪飞, 张永刚, 宋书林
一种高拉伸强度高拉伸模量碳纤维及其制备方法。CN109023592B, 2020-09-01
- 张永刚, 文章苹, 钱鑫, 王雪飞, 李德宏, 宋书林, 王欣宇
一种碳纤维增强陶瓷基复合材料热解碳界面层的制备方法。CN109987948A, 2019-07-09
- 张永刚, 文章苹, 钱鑫, 王雪飞, 李德宏, 宋书林, 王欣宇
一种氧化石墨烯改性碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料的制备方法。CN110078515A, 2019-08-02
- 黄显雯, 马洪波, 徐敏军, 张永刚
复合式碳纤维原丝上油装置。CN212404484U, 2021-01-26
- 王雪飞, 熊龙, 张永刚, 钱鑫, 宋书林
一种富氮多孔聚丙烯腈基碳纤维及其制备方法和应用。CN110541210A, 2019-12-06

2022 No. 03-04

今日材料所

NIMTE TODAY

今日材料所

NIMTE TODAY

2022
NO.

03-04

碳纤维让工业更坚强 让生活更美好



前言

碳纤维复合材料是伴随着我国航空航天及国防事业的快速发展而成长起来的新型材料，是国家大力发展的战略性新兴产业材料。中科院宁波材料所碳纤维及其复合材料团队致力于国产高性能碳纤维制备技术和复合材料加工技术的研发，自主设计并建设了全国产化碳纤维生产试验线，拥有完善的高性能纤维制备及表征检测平台。团队科研人员从纤维微观结构设计与可控调控出发，先后突破了高品质原丝可控成型、石墨化微晶结构可控增长、高效表面结构设计与调控等系列化关键技术，成功实现了高强中模、高强高模以及新一代高强高模高韧系列化碳纤维关键制备技术，其中研制的CNI QM65 (M65J级) 高强高模碳纤维最高模量已达639GPa，标志着我国在该领域由长期“跟跑”向“并跑”转变。“十四五”期间，碳纤维及其复合材料团队将继续致力于碳纤维及其复合材料的研究，为我国高性能碳纤维材料的研发贡献力量。

目录

团队介绍 03

碳纤维及其复合材料团队简介
团队主要成员介绍

科研平台 07

碳纤维制备与评价平台
热固性预浸料加工平台
高性能纤维表征检测平台

研究进展 14

高强高模系列碳纤维
高强中模系列碳纤维
碳纤维表面结构调控及其复合材料性能研究
碳纤维表面金属化修饰研究
高性能碳纤维助剂研制之原丝油剂
高性能碳纤维助剂研制之耐高温热塑性上浆剂
低成本大丝束民用腈纶基碳纤维研究进展
面向能源应用的多孔碳纤维制备与应用进展
高导热型高强高模碳纤维及其复合材料制备技术

专利成果 24

团队介绍

碳纤维及其复合材料团队简介

碳纤维及其复合材料团队（原特种纤维事业部）成立于2008年，长期致力于高性能碳纤维的国产化研制工作，目前建有吨级规模聚丙烯腈基碳纤维中试研制平台及配套原丝生产平台，并拥有国家发改委碳纤维制备技术国家工程实验室等平台。团队先后承担了国家发改委、国家基金委、科技部、中科院、浙江省、宁波市重大平台建设及研制科技专项，目前在研项目包括中科院战略先导科技专项、浙江省重点研发、宁波市2025重大科技专项等项目。

目前团队主要研究方向包括：高强中模 / 高强高模 / 新一代高强高模高韧碳纤维的关键制备技术及工程化，国产高性能碳纤维预浸料

成型加工技术，高性能碳纤维及其复合材料标准化体系的建立及应用。

团队现有成员43人，其中中级及以上人员13人，研究生13人。近五年来在 *Composites Part B-Engineering*、*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*、*Applied Surface Science* 等国内外知名期刊上发表学术文章50余篇；申请国家发明专利60余项，目前授权专利超40项；以牵头单位，制定及参与制定《聚丙烯腈基碳纤维原丝》、《碳纤维含水率和饱和吸水率试验方法》、《聚丙烯腈基碳纤维原丝残留溶剂测试方法》等国家标准及行业标准12项。



团队主要成员介绍



张永刚

正高级工程师，博士生导师

1998年毕业于天津纺织工学院，2008年进入中科院宁波材料所从事高性能碳纤维及其复合材料研制。长期从事高性能纤维的研制工作，研究方向为高性能碳纤维，碳纤维陶瓷基复合材料。作为项目联系人分别承担装备发展部项目，科工局项目，中科院创新基金，浙江省创新团队项目，宁波市科技创新重大专项，宁波市自然科学基金，国家重点实验室开放基金以及众多企业技术开发项目。已发表论文30余篇，申请国家专利近20项。



李德宏

正高级工程师，硕士生导师

2005年毕业于东华大学，2008年进入中科院宁波材料所。从事碳纤维与碳化硅纤维研制表征工作。作为项目负责人承担国家发改委碳纤维表征检测服务平台项目、化纤协会国家高性能纤维表征检测（宁波）基地、科技部国家科技支撑计划子项目。已主持或参与完成三十六项科研项目，涉及PET、PLA、PEN、芳纶、碳纤维等多个领域。制定或参与制定国标、行标与协会标准7项。获中国石化科技进步二等奖1项、中石化科学技术带头人（第三层次）、中石化优秀青年知识分子称号。



马洪波

高级工程师

1994年毕业于成都科技大学，2008年进入中科院宁波材料所。长期从事聚丙烯腈基碳纤维原丝的研制工作，在丙烯腈聚合及湿法纺丝方面经验丰富。作为核心骨干参与国家、浙江省、宁波市以及中科院等多项项目的研制工作。



王雪飞

副研究员，硕士生导师

2010年毕业于浙江大学，同年进入中科院宁波材料所，主要负责碳纤维结构研究工作。研究方向包括碳纤维、结构储能复合材料、多孔碳纤维。作为项目负责人承担国家、浙江省和宁波市自然科学基金项目、企业合作项目。参与浙江省重点研发计划、宁波市重大专项、装备发展部、中科院先导专项和重点部署项目等。已发表论文二十余篇，申请国家专利十余项，参与编写专著一部，作为完成者之一获得2020年产学研合作创新成果奖二等奖。



钱鑫

高级工程师，硕士生导师

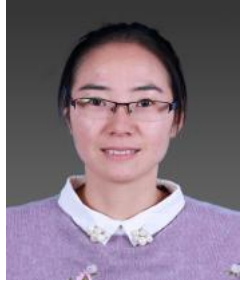
2013年毕业于中国科学院大学，同年进入中科院宁波材料所。研究方向为碳纤维高性能化过程中的关键制备技术。研究方向包括，国产高性能碳纤维成形过程中的微观结构转变机制研究、高性能碳纤维的表面结构调控对复合材料界面性能的影响机理及碳纤维的表面新型活化机理研究。作为项目主要负责人，承担浙江省自然科学基金、宁波市自然科学基金重点项目、宁波市自然科学基金、企业横向项目、浙江省重点研发项目等项目。参与中科院A类先导专项项目、科技部973计划、中科院重要方向项目、中科院重点部署项目、宁波市重大科技专项等研究项目。已发表论文50余篇，申请国家专利10余项，参与编写专著1部。



李莹莹

工程师

2013年毕业于哈尔滨理工大学，2018年进入中国科学院宁波材料技术与工程研究所从事碳纤维复合材料研发工作。研究方向包括预浸料制备技术、碳纤维复合材料成型。作为项目主要负责人，承担低热膨胀系数高导热碳纤维预浸料制备技术研究、高强高模预浸料制备等研究项目。参与中科院A类先导专项项目等，申请中国发明专利2项。



钟俊俊

高级实验师

2011年毕业于新疆大学，2011年7月进入中科院宁波材料所特种碳纤维及复合材料团队，从事碳纤维原辅料、原丝性能、导热性能和结构性能方法的开发与表征，以及实验室能力认可和检验员的相关工作；参与制定行业标准2项；2021年12月被宁波材料所聘为高级实验师。



黄显雯

工程师

2010年毕业于浙江理工大学，同年进入中科院宁波材料所，从事丙烯腈聚合及聚丙烯腈基碳纤维原丝研制工作。兼任团队项目质量员，负责协助团队负责人开展高性能碳纤维产品质量管理工作。作为项目负责人，承担低成本大丝束碳纤维制备关键技术开发项目研制工作。作为骨干参与国家自然科学基金、浙江省重点研发计划、宁波市科技创新2025重大专项等项目，申请国家专利4项。



王飘飘

工程师

2019年毕业于北京理工大学，2019年7月进入中国科学院宁波材料技术与工程研究所碳纤维及其复合材料团队，主要从事碳纤维原丝、耐高温热塑性碳纤维上浆剂及质子交换膜燃料电池用碳纸的研制工作。参与高强高模预浸料、中国科学院先导专项、装备发展部、宁波市重大科技专项等研究项目。

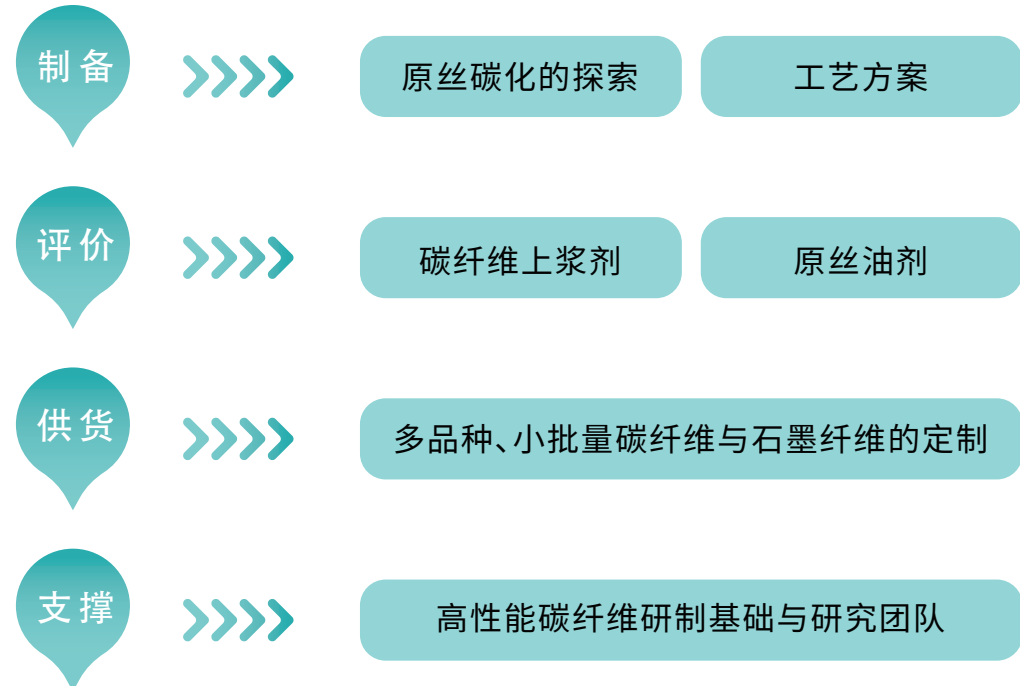
科研平台

碳纤维制备与评价平台

碳纤维制备与评价平台由吨级规模碳纤维及配套聚丙烯腈原丝生产线组成，包括从原料纯化、聚合、脱单、脱泡、纺丝等有机纤维制备，到预氧化、低温碳化、高温碳化、石墨化、表面处理和上浆等碳纤维制备的全套连续在线

装置。可开展1~24K规格原丝及碳纤维、石墨纤维研制工作，还可进行原丝油剂和碳纤维上浆剂评价，能为碳纤维研制生产单位提供原丝氧化碳化工艺方案，并为碳纤维用户单位提供多品种、小批量的碳纤维与石墨纤维的定制服务。

碳纤维制备与评价平台



● 碳纤维吨级线

设备构成 预氧化、低温碳化、高温碳化、石墨化、表面处理和上浆。

设备用途 碳纤维制备和助剂评价。



● 碳纤维原丝 2-3 吨级线

设备构成 原料纯化、聚合、脱单、脱泡、纺丝。

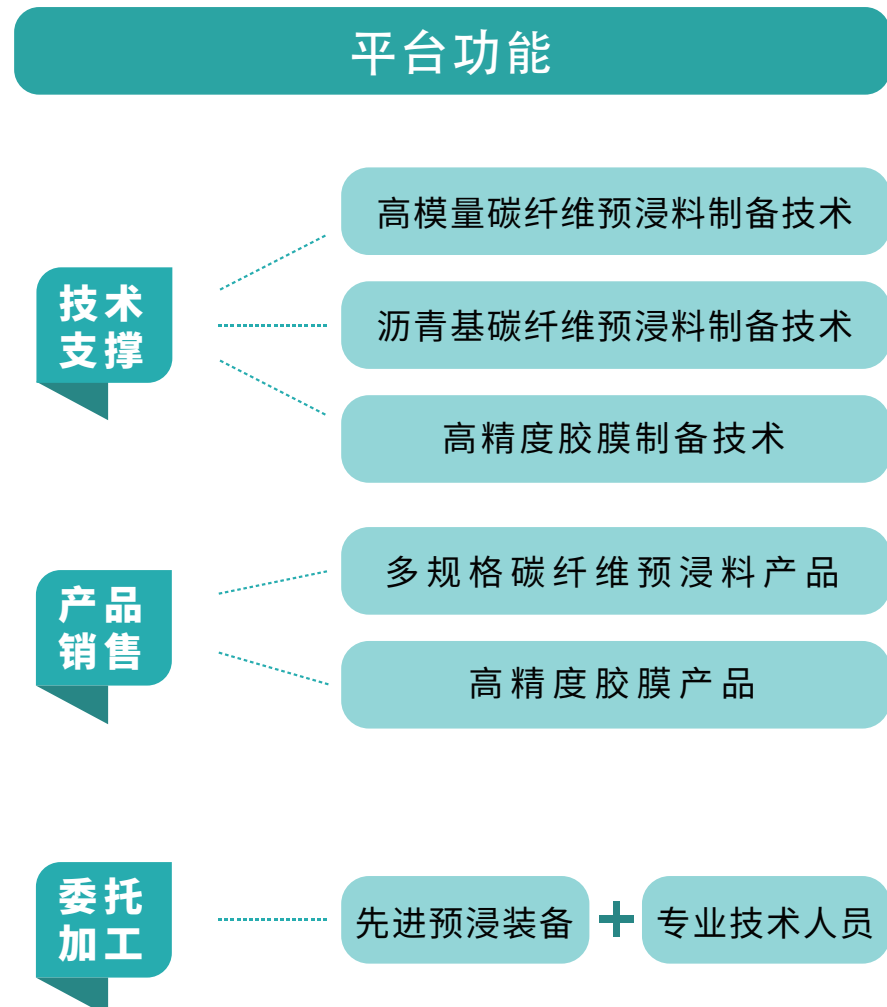
设备用途 碳纤维原丝制备、腈纶纤维改性和纤维表面上油。



热固性预浸料加工平台

热固性预浸料加工平台具备先进的预浸料及其树脂胶膜生产设备，拥有先进的高模量碳纤维预浸料制备技术，在专业的科研、技术、生产人员支撑下，能够规模化制备国内领先的 PAN 基高模量碳纤维预浸料、沥青基碳纤维预

浸料，解决低延伸率纤维的预浸料制备关键问题，并能够提供碳纤维预浸料产品、委托加工等服务，服务于航空航天、交通运输、体育器材等相关领域。



● 碳纤维预浸料生产线

设备构成 幅宽 300mm，用于加工碳纤维预浸料，年最高产量可达 16 万平方米。

设备用途 用于高模型碳纤维、高强型碳纤维、沥青基碳纤维等热固性预浸料的制备。



● 热固性胶膜生产线

设备构成 幅宽 300mm，可以环氧、双马、氰酸酯等热固性树脂为原料。

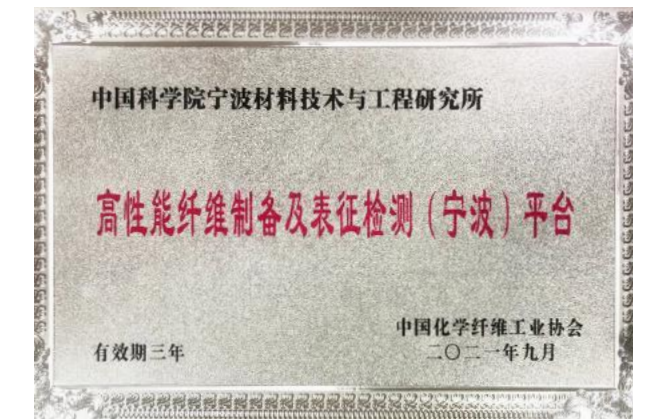
设备用途 配合预浸料生产线使用，主要用于热熔预浸料的树脂胶膜制备及特殊要求的胶膜产品生产。



高性能纤维表征检测平台

高性能纤维表征检测服务平台负责开发各种高性能纤维的检测方法，包括碳纤维、碳化硅、超高分子量聚乙烯、芳纶、聚酰亚胺、玻璃纤维和玄武岩等。结合公共技术服务测试中心的大型设备仪器，在高性能纤维的表面微观形貌与结构分析、物性分析、有机和无机成分

分析方面也形成了完善的检测体系，并为国内几十家高校、院所和企业提供测试与评价服务。2011 年，化纤协会将本测试平台列为“国家高性能纤维表征检测基地”。2013 年，“碳纤维表征检测服务平台”获得了国家产业化支持。



高性能纤维表征检测服务平台拥有凝胶渗透色谱仪 (GPC)、高温同步热分析仪 (DSC-TGA)、万能材料试验机、单纤维物性分析仪、气相色谱仪 (GC)、气质联用仪 (GC-MS) 和偏光显微镜等 20 多台先进精良仪器，并配备了一支专业的表征检测队伍。以大型仪器为基础，结合碳纤维制备平台，开展测试项目共计 90 个，涵盖原料 (单体、溶剂、引发剂)、辅料 (包括油剂、上浆剂)、聚合物、原丝、碳纤维以及过程控制，形成了碳纤维检测示范平台。目前，本平台已有

21 个碳纤维相关检测方法和 6 个碳化硅纤维检测方法得到 CNAS (中国合格评定国家认可委员会) 认可与 CMA (中国计量) 认证。

高性能纤维表征检测服务平台通过完善高性能纤维检测方法和建立相关检测标准，健全高性能纤维行业评测体系，形成了认证认可所需关键技术，推动国内高性能纤维行业的健康、快速发展，也为区域社会经济的可持续发展提供创新性解决方案，具有一定的示范效果。

平台制定或参与制定国家和行业的标准			
FZ/T 50044-2018	碳纤维灰分含量试验方法	FZ/T 50031—2015	碳纤维 含水率和饱和吸水率试验方法
FZ/T 50043-2018	聚丙烯腈基碳纤维原丝含油率试验方法	HX/T51004-2014	聚酰亚胺 (PI) 短纤维
GB/Z 32009-2015	纺织新材料力学性能数据表	FZ/T54065-2012	聚丙烯腈基碳纤维原丝
FZ/T 50032—2015	聚丙烯腈基碳纤维原丝残留溶剂测试方法	HX/T50006-2012	先驱体法连续碳化硅 (SiC) 纤维

检测项目	
仪器名称	主要功能 / 技术指标
高温同步热分析仪	能同时测试样品热效应（转变温度、热焓等）与质量的变化 温度范围：室温 ~1650°C
5569A 万能材料试验机	用于塑料、橡胶、皮革、纤维、织物、纸等材料的静态力学性能测试 最大载荷：5kN
3366 万能材料试验机	用于普通化纤、高强高模芳纶、高强高模聚乙烯、聚丙烯腈等高性能纤维的拉伸性能 用于碳纤维层间剪切和弯曲性能的测试 最大载荷：1kN
凝胶渗透色谱仪	测定天然生物大分子（如蛋白质、多糖）、化学合成高分子聚合物等样品的分子量和分子量分布 柱温：40°C 分子量：500~1000000 溶剂：DMF
单纤维物性分析仪	用于普通化纤、高强高模聚乙烯、碳纤维、玻璃纤维、工程用短纤维等高性能纤维的单丝力学性能和纤度 拉力范围：0.01~210 cN 纤度范围：0.5~200 dtex
毛细管流变仪	测定热固性材料的流动性和固化速度 测定软化点、熔融点、流动点的温度 测定高聚物熔体的粘度及粘流活化性 研究熔融纺丝的工艺条件 温度范围：室温 ~450°C 驱动力：50 kN
静态热机械分析仪	测定高低温状态下的物理机械性能测试 温度范围：-150~1000°C / 室温 -1500°C
气相质谱联用仪	对多组分有机物进行定性定量分析 柱箱温度：室温 ~450°C；配有 EI 和 CI 检测器
气相色谱仪	对 AN、DMSO 残留和 AN 中杂质以及其他有机物进行检测分析 柱箱温度：室温上 4°C ~450°C
偏光显微镜	透射反射模式下观察样品的形貌 放大倍率：100X、200X、400X、630X



所获得资质认定证书

研究进展

高强高模系列碳纤维

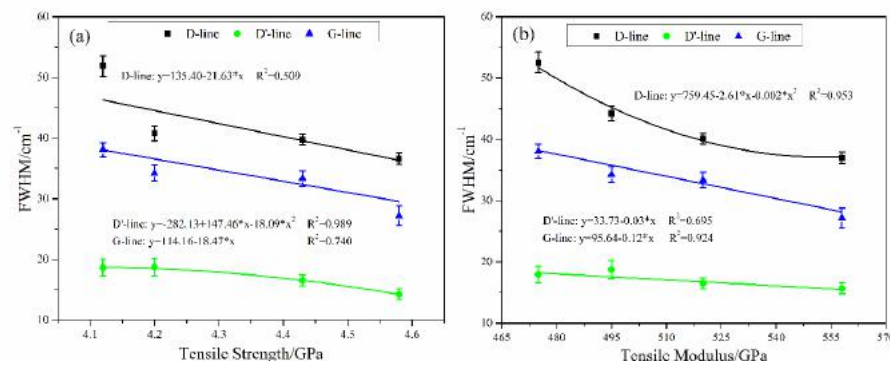
高强高模碳纤维具有高比模量、高比强度、低热膨胀、尺寸稳定性好等特性，对复合材料的结构轻质化、大型化和高性能化起到关键作用，成为卫星主体结构、功能结构、防护结构和辅助结构上不可替代的关键材料，也是深空探测、火星/探月计划、临近空间飞行器等领域不可或缺的核心原材料。

高强高模碳纤维是由高强中模碳纤维经 2000-3000°C 石墨化处理制备得到，研究团队系统研究了高强中模碳纤维向高强高模碳纤维转变过程中微观结构演变机制，建立了石墨微晶结构参数对纤维力学性能的影响机制（*化工进展*, 2019, 38: 2276; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 112C: 111; *高科技纤维及应用*, 2016, 41: 24; *高科技纤维及应用*, 2016, 41: 28）；通过采用 Raman 光谱系统研究了高强高模碳纤维 Raman 特征图谱，

建立了纤维力学性能与无序结构 D 峰、石墨特征结构 G 峰特征峰参数之间的定性定量函数关系（*Journal of Raman Spectroscopy*, 2019, 50: 665）。

除石墨化以外，预氧化、碳化也是影响纤维最终性能关键因素，在预氧化阶段，纤维内部由线型结构逐渐转变成耐热梯形结构，为后续高温环境下的不熔不燃奠定结构基础，但上述结构转变程度控制较难，为此发明了以预氧化阶段纤维体密度、氢元素含量、环化程度等为定量表征方法，实现了预氧化阶段结构可控转变；在碳化阶段发明了基于纤维结构转变的两段石墨化处理等方法。

基于该领域研究工作，在国内外核心期刊发表论文十余篇，其中 SCI、EI 收录文章 3 篇；获授权中国发明专利 3 项、授权实用新型专利 1 项、实审发明专利 1 项。



纤维力学性能与微观结构相关性

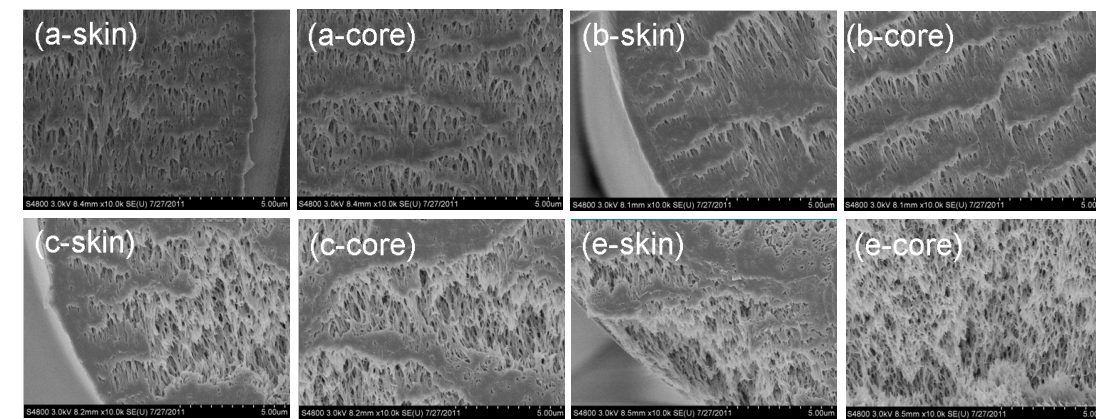
高强中模系列碳纤维

高强中模碳纤维具有高强度、低密度、耐腐蚀、耐疲劳、耐磨损等一系列优异特性，尤其是以日本东丽 T800、T1000 等，美国 Hexcel 公司 IM7、IM10 等为代表的高强中模碳纤维成为制约民用航空、火箭等各级主结构升级换代的关键原材料。

为了突破国产 T800 级高强中模碳纤维关键技术，研究团队围绕高品质聚丙烯腈 (PAN) 原丝成型技术开展了 PAN 相对分子质量及分子链分布、PAN 原丝凝固成型机制与控制、PAN 原丝缺陷形成机理、原丝油剂对纤维结构性能影响等研究，对 GPC 谱图中不同溶剂峰和异常峰的产生原因进行了分析，探讨了异常峰对测试结果的影响；随着牵伸比的提高，初生 PAN 纤维的内部结构变得越来越疏松，孔隙越来越多，初生 PAN 纤维的膨润度在喷头牵伸比为 0.5 时出现最小值，然后随着喷头牵伸比的提高一直增大；粘

连是尺度最大、最致命的缺陷，它不但会导致碳纤维性能降低、还会影响正常生产的进行，粘连的产生主要与纤维表面上油不均匀有关。

此外，预氧化过程中氧化反应与氧的扩散密切相关，氧由纤维皮层逐渐向芯部扩散，由于存在热和氧浓度梯度，从而导致纤维在径向上组成与结构的差异，也就是皮芯结构。皮芯结构会进一步传递给碳纤维，并影响碳纤维的力学性能，因此提升径向结构均质性对提高碳纤维力学性能有积极作用。研究团队针对 PAN 预氧化纤维皮芯结构开发了一种快速、定量表征的刻蚀法，并通过预氧化过程中的温度、气氛、时间及添加剂来调控纤维径向结构，以提升 PAN 预氧化纤维的径向结构均一性。基于该领域研究工作，在国内外核心期刊发表论文 20 余篇，获授权中国发明专利 10 余项、授权实用新型专利十余项；培养硕士研究生 10 余名。



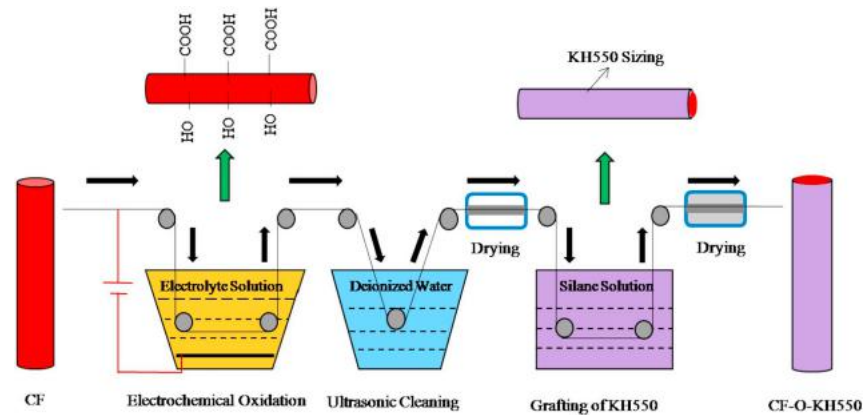
不同喷头牵伸比初生 PAN 纤维的皮层与芯部结构 (50μm 喷丝板) (a) × 0.3, (b) × 0.5, (c) × 0.7, (e) × 0.9

碳纤维表面结构调控及其复合材料性能研究

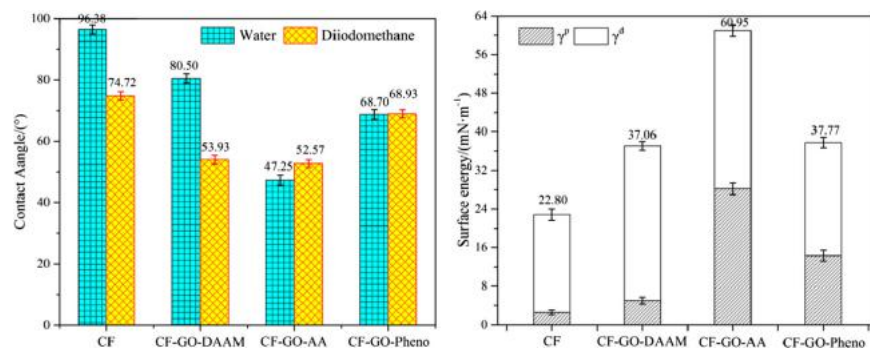
由于碳纤维经过高温热处理制备得到，纤维表面呈现高惰性结构，为了提高纤维表面活性位点，提高纤维与基体界面结合性能，需要对其表面进行改性处理，处理方法较多但目前只有电化学氧化实现生产在线配套，为此系统研究了纤维表面电化学氧化机制。

在针对高强中模碳纤维表面处理过程中，研究了铵盐类电解质对碳纤维表面结构与性能影响作用，明确了纤维表面活性结构演变过程，建立了基于氢氧根离子可控的表面氧化机制 (*Applied Surface Science*, 2012, 259: 238; *Journal of Reinforced Plastics and Composites*,

2012, 31: 999) ，明确了纤维表面 -OH、-COOH 等活性基团与树脂基体官能团之间的化学作用机理，为碳纤维表面与复合材料界面调控提供了理论基础 (*Surface and Interface Analysis*, 2016, 48:1271; *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, 32: 393; *Surface and Interface Analysis*, 2013, 45: 937) ；为了明确碳纤维表面高惰性化学结构形成机制，探讨了热处理过程中纤维表面结构演变机制，研究显示在热处理过程中纤维表面结构与内部结构相似，同样经历了结构破坏 - 重排过程 (*Applied Surface Science*, 2015, 327: 246) 。



碳纤维表面的连续功能化改性

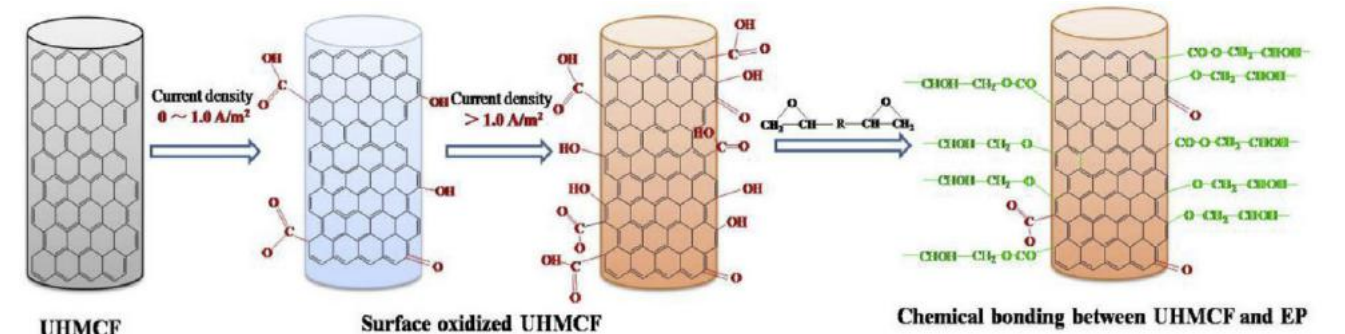
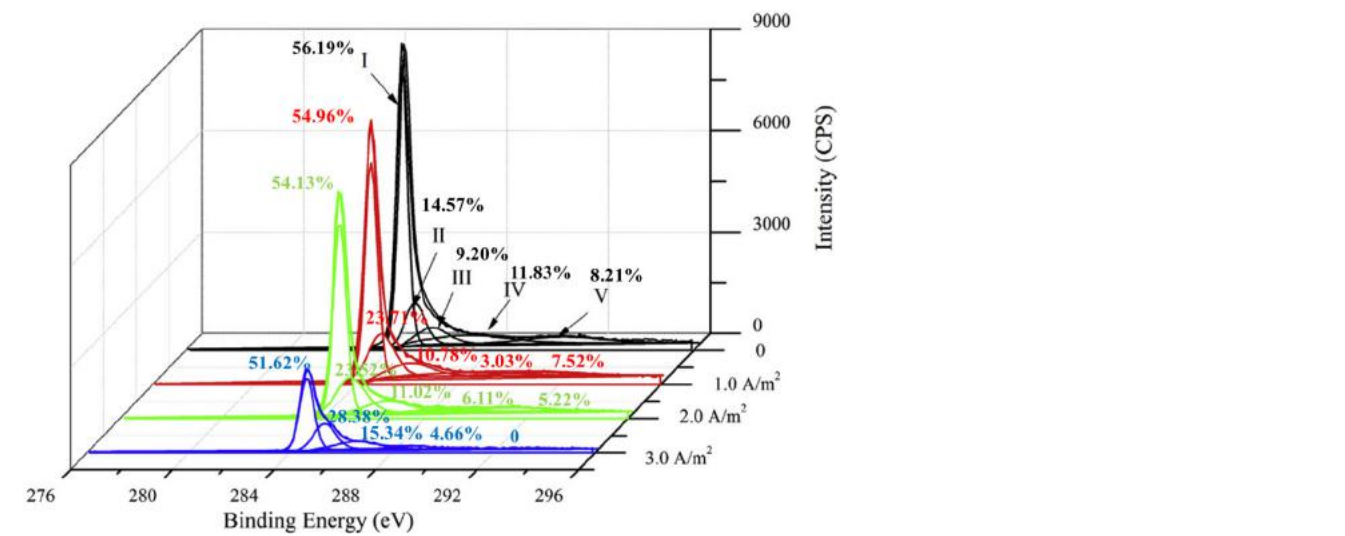


功能化改性后纤维润湿性显著提升

与高强中模碳纤维相比，高强高模碳纤维表面呈更高化学惰性，因此在电化学处理过程中采用氧化效果更显著的弱酸性体系，对其纤维表面氧化机制研究时发现纤维表面存在递进式氧化过程，即：纤维表面发生先氧化后交联作用 (*Composites Part B: Engineering*, 2019, 164C: 476) ；在氧化处理过程中，由于纤维表面刻蚀对纤维力学性能带来一定不利影响，通过在处理过程中接枝氧化石墨烯和其他共聚单体，实现了纤维表面活性和力学性能同步提升 (*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*,

2019, 119: 21) ；此外，通过氧化处理后在碳纤维表面进一步引入硅烷偶联剂，可以改善碳纤维的工艺性能，提升纤维与树脂基体之间的界面结合性能 (*Applied Surface Science*, 2019, 486: 546) 。

通过系列化系统性研究工作，初步形成了一定基础理论体系，为工程化工工艺与技术开发提供了一定的指导意义。在碳纤维表面处理技术领域发表 SCI 收录论文 10 余篇，培养硕士研究生 2 名、博士研究生 1 名。



高模碳纤维表面氧化过程中的微观结构演变

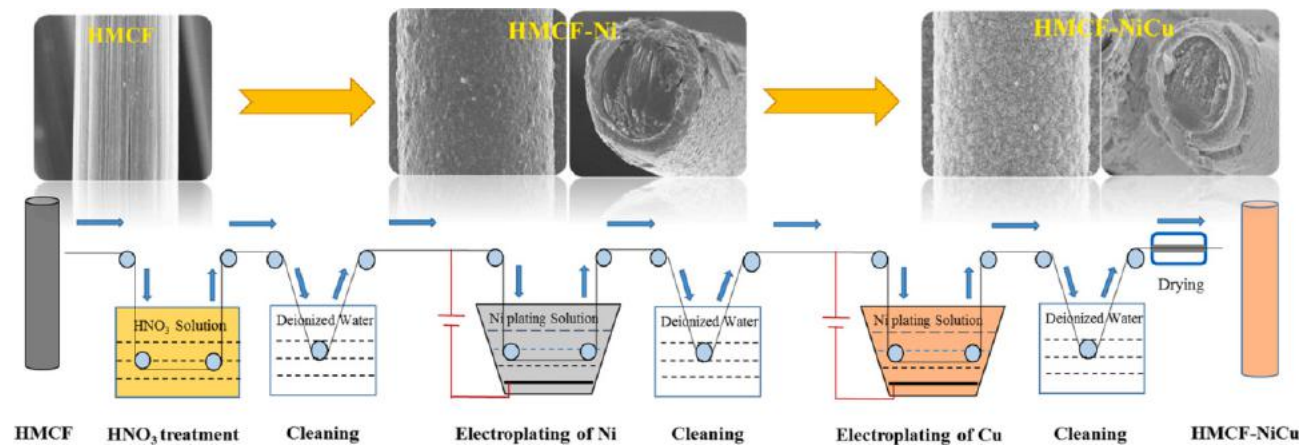
碳纤维表面金属化修饰研究

目前高性能碳纤维因其高比强度、高比模量等力学特性在复合材料中获得广泛应用。除了优异力学性能外，碳纤维在导热等功能性领域也具有显著优势，尤其是高模碳纤维比中模碳纤维具有更高石墨化程度和含碳量，因此具有更加优异的导热性等。树脂基体导热性较差以及纤维/树脂界面热阻成为制约高模碳纤维树脂基复合材料导热性能发挥关键因素，因此通过高模碳纤维表面金属化修饰，在复合材料内部构建导热通路成为提升复合材料导热性能途径之一。

在高模碳纤维的表面金属化结构构筑领域，研究团队以高模碳纤维为阴极，以金属镍、铜等为阳极开展了连续电化学镀处理，在进行电化学镀之前首先使用强氧化溶剂对纤维表面处理增加纤维表面能，提高纤维表面沉积效率（*Carbon Letters*, 2021, 31:449-461）；通过电化学镀镍前

后高模碳纤维表面微观结构研究发现，3min、6min 电化学镀镍处理后，纤维直径分别提高了 5.4%、26.2%，且处理后纤维表面出现明显金属镍颗粒，处理后表面镍元素主要以 Ni(OH)₂、NiO 和金属 Ni 颗粒形式存在，详细探讨了纤维表面镀镍机理（*中国有色金属学报*, 2021: 1-10, 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40167, EI 收录）。

在高模碳纤维表面电化学镀镍基础上进行了进一步的电化学镀铜，处理后表面粗糙度有所下降，随着纤维表面镀层引入，由于纤维缺陷和应力集中的减少，处理后纤维的拉伸强度反而有所提高，此外电镀处理后纤维导电性能大幅提升（*Materials Today Communications*, 2021, 27: 102345）。

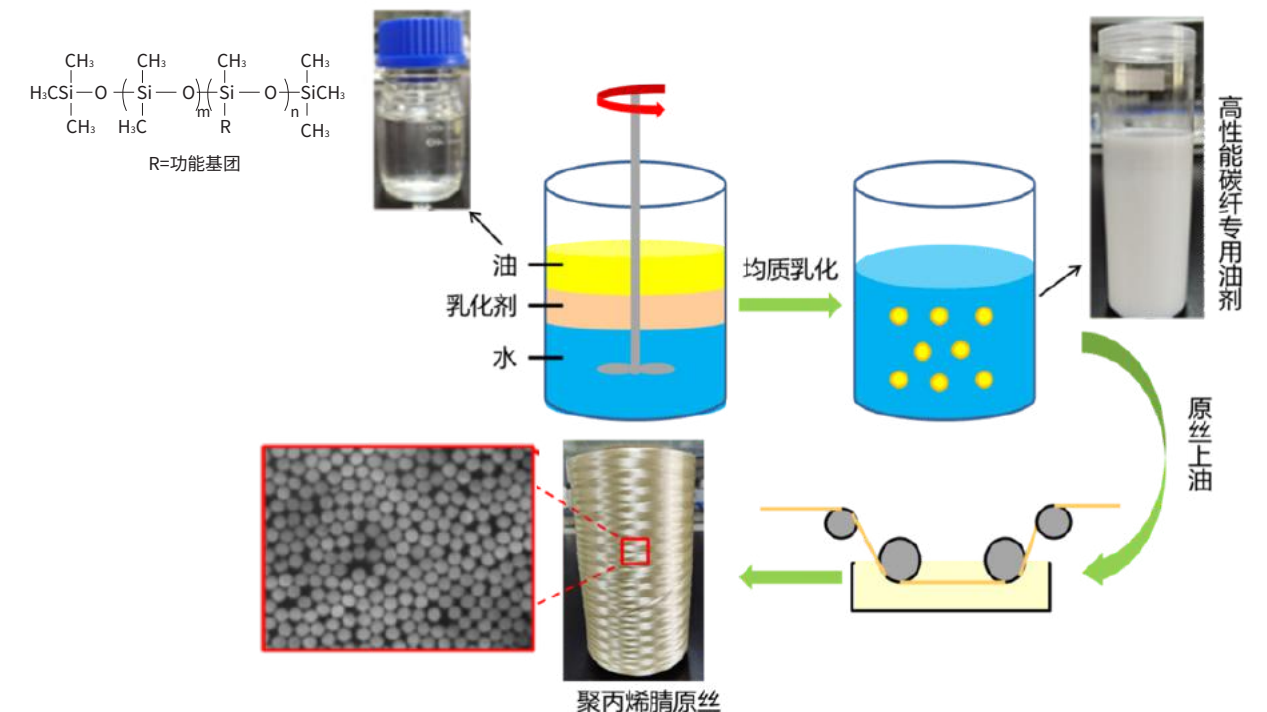


高模量碳纤维表面的连续金属化修饰

高性能碳纤维助剂研制之原丝油剂

碳纤维属于脆性材料，缺陷是制约其拉伸性能的主要因素。在各类缺陷中，最主要的就是纤维表面上大量的微孔和裂缝，约占缺陷总数的 90%，是容易产生应力集中的地方，对碳纤维的拉伸强度有显著影响。PAN 基碳纤维来源于高质量的 PAN 原丝，纺丝过程是引入纤维表面缺陷的主要制备过程之一，而上油工艺是保证原丝稳定生产的重要手段，纺丝油剂因此成为原丝制备过程中的关键助剂。目前国内碳纤维企业所使用的原丝油剂几乎全部依赖进口，严重制约国产高性能碳纤维制备技术真正意义上的自主保障。

研究团队成功开发了高性能碳纤维专用油剂制备技术，通过对油剂中的关键组分的分子结构、油剂配方的设计与优化，可满足在纺丝过程中在原丝表面均匀铺展成膜，有效防止聚丙烯腈原丝制备过程的机械损伤；并且预氧化过程中仍具有优良的隔离性，保护单丝之间不发生局部热粘连或热并丝；在碳化过程中可完全分解，避免油剂引入的硬质、不易除去的灰分杂质以影响碳纤维性能。下一步，团队将进一步调控油剂的耐热性与高温分解性能，逐步实现高性能碳纤维专用油剂的国产化、规模化制备技术。



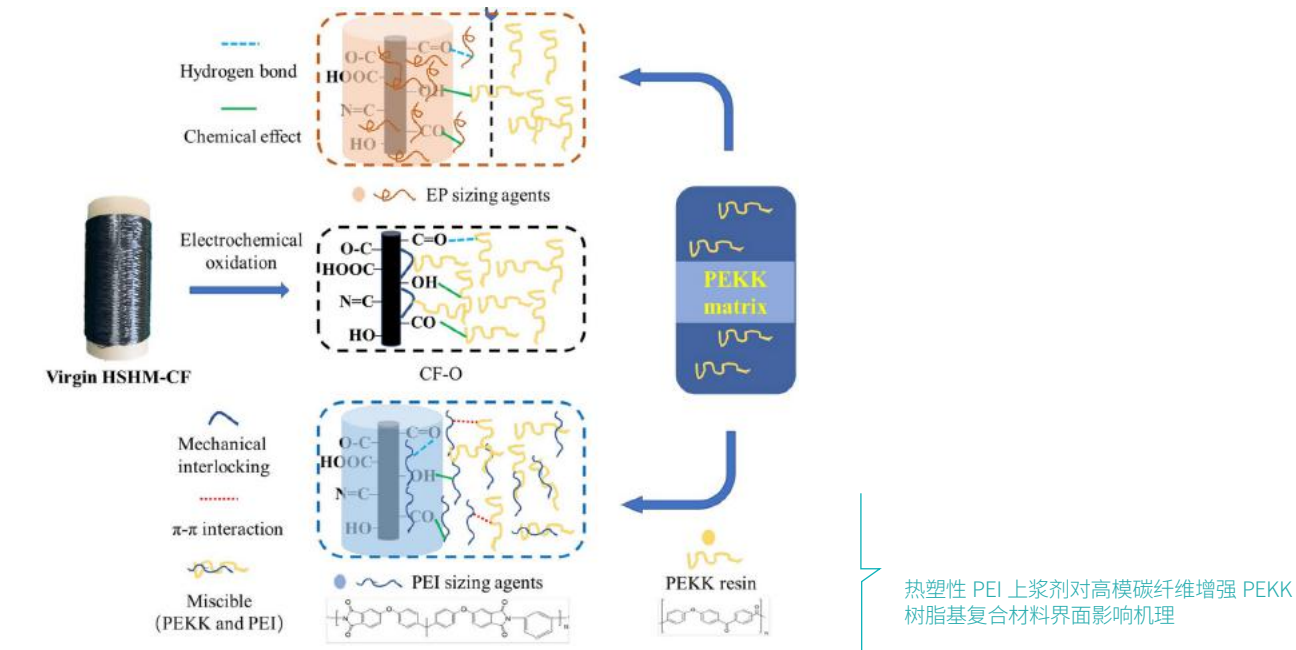
高性能碳纤维原丝油剂制备及应用示意图

高性能碳纤维助剂研制之耐高温热塑性上浆剂

碳纤维上浆剂是碳纤维制备工艺中极为重要的辅助材料。上浆剂作为碳纤维与基体树脂的中间相，对提高碳纤维及其复合材料的综合性能具有重要意义。目前市售上浆剂主体成分以热固性环氧树脂为主，随着碳纤维热塑性复合材料应用逐渐获得青睐，热固性环氧型上浆剂耐温性差、与热塑性基体不匹配性等成为制约复合材料性能关键因素之一。

针对上述问题，研究团队设计合成了耐高温且与热塑性树脂相匹配的热塑性聚酰亚胺（PI）上浆剂，其 5% 热失重温度均高于 450°C，最高可达 554°C，具有很好的耐热性；PI 上浆剂对碳纤维有良好的浸润性，提高碳纤维的耐磨性、集束性、直挺度和强度；与未经上浆碳纤维相比，碳纤维 / 聚醚醚酮（PEEK）复合材料层间剪切

强度（ILSS）提高了 54%（*Journal of Polymer Science*, 2020, 58, 2951；专利：202010996523.1）。为了提升高模碳纤维与聚醚醚酮（PEKK）复合材料界面结合性能进一步设计并合成了热塑性聚酰亚胺（PEI）上浆剂，对比研究了市售热固性环氧上浆剂和 PEI 热塑性上浆剂对高模碳纤维 / PEKK 复合材料界面性能影响，结果显示未进行上浆处理高模碳纤维 / PEKK 复合材料 ILSS 仅为 40.7 MPa，使用热固性环氧上浆剂和 PEI 热塑性上浆剂复合材料 ILSS 分别为 61.5 MPa、74.8 MPa，随后对复合材料界面增强机理进行了深入探讨（*Applied Composite Materials*, 2021: 1-20, 10.1007/s10443-021-09995-8）；本领域另外一项最新研究成果文章被材料工程（EI 收录）接受。



低成本大丝束民用腈纶基碳纤维研究进展

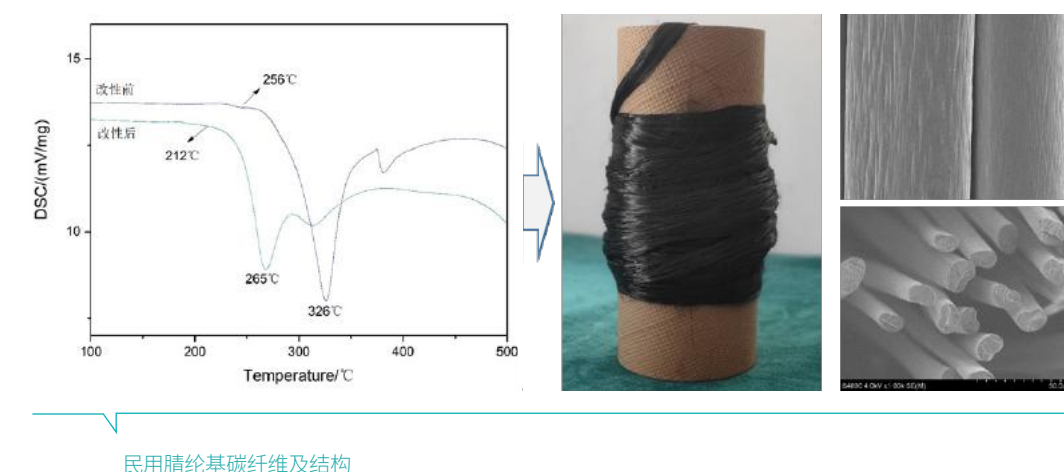
按照丝束大小碳纤维可以分为大丝束碳纤维和小丝束碳纤维。一般将 24K（每束含有 24000 根碳纤维）以上称为大丝束碳纤维，主要应用在汽车、风电叶片、能源建筑和体育用品等领域，又称为工业级碳纤维；小丝束一般是指丝束规格为 1~24 K 的碳纤维，主要应用于航空航天领域，也称为宇航级碳纤维。

在碳纤维的生产成本构成中，前驱体纤维成本约占碳纤维总成本的 51%。相比于小丝束碳纤维，大丝束碳纤维最大的优势就是成本低和生产效率高。目前国外逐渐形成了以民用腈纶纤维为前驱体的低成本碳纤维技术路线，其中以 Zoltek 为代表的企业已经突破商业化生产技术，其原丝成本仅为每千克 2-3 美元，约为专用于制造碳纤维的商用 PAN 原丝的 60%。随着风电叶片、压力容器、汽车轨交、太阳能等工业应用的发展，必将引起一轮低成本碳纤维工业革命。

研究团队基于碳纤维原丝和高性能碳纤维的

研制基础，选用国产 50K 民用腈纶，通过化学改性，在低温下诱导腈纶中的氰基发生环化反应，将大丝束腈纶热稳定起始反应温度和放热峰值温度分别降低 44°C 和 61°C，有效地拓宽了放热峰，制备得到热处理过程中易于环化的腈纶纤维。

预氧化过程是碳纤维制备过程中有机结构向无机结构转化的重要工艺流程。通常是在空气气氛中对原丝进行一定温度梯度热环境中较长时间热处理，使其成为具有热稳定性结构的纤维。大丝束碳纤维与小丝束碳纤维相比，在生产工艺中最大的难点在于预氧化过程中容易出现放热集中，甚至产生失火等安全事故，造成重大损失。本研究团队使用自主设计的关键氧化碳化设备，进一步通过预氧化阶段的热稳定化和高温碳化处理阶段的关键工艺优化，实现纤维内部结构的可控转化，成功制备得到连续的腈纶基碳纤维，其单丝强度和模量分别达到 2.56 GPa 和 317GPa，达到通用级碳纤维力学性能。



面向能源应用的多孔碳纤维制备与应用进展

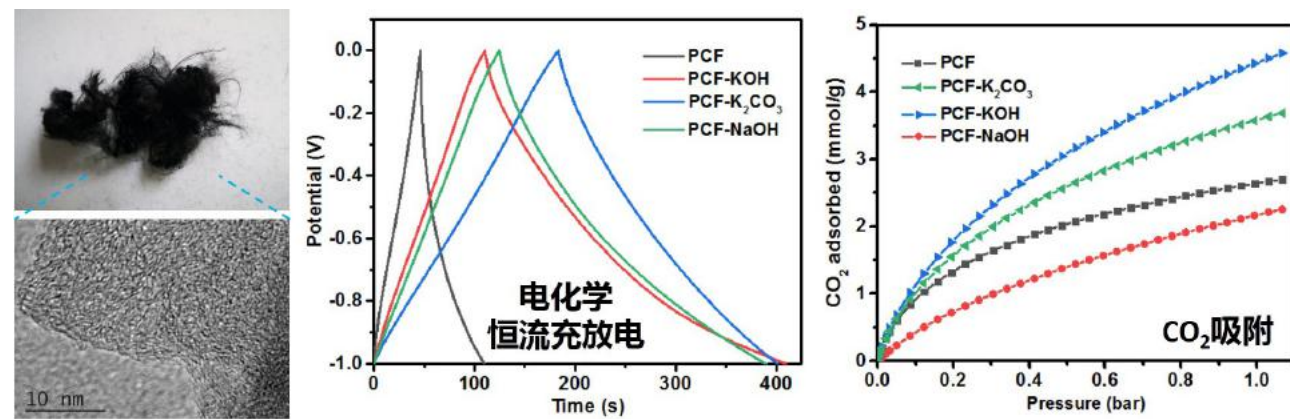
化石能源的不断消耗会造成温室气体大量排放，产生严重的环境问题，如全球变暖、酸雨、海水酸化等。而风能、水能、太阳能等绿色能源的间歇性、区域性和高成本则限制了其广泛应用。因此，迫切需要开发先进的能量转换和存储技术，来应对化石能源供应短缺，逐步摆脱对化石能源的依赖，实现“双碳”目标。

超级电容器是一种优秀的储能电容器，其功率密度远高于锂电池，充放电循环次数可达几十万次，寿命达十年以上，运行安全性好；短时间功率输出高是其最大优势。超级电容器广泛应用于新能源、消费电子产品等领域。

电极材料是影响超级电容器行业发展的关键因素。碳材料则是最广泛应用的电极材料之一。研究人员在前期工作基础上【聚酰亚胺基 *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59: 18106; 聚丙烯腈基 *Energy & Fuels*,

2019, 33: 12558, 201910832235.X】，提出了以碳化聚酰亚胺纤维为先驱体，在惰性气氛中通过活化制备了聚酰亚胺基多孔碳纤维，获得的多孔碳纤维能够保持良好的纤维形态。多孔碳纤维具有丰富的微孔结构，其比表面积达到 $1156 \text{ m}^2/\text{g}$ ，孔体积为 $0.54 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。在 1 A/g 的电流密度下，多孔碳纤维的比电容达到 299 F/g 。碳材料的多孔结构提供了较大的表面积，增加了离子储存位点，减少了电子和离子的距离扩散路径。良好的导电性提高了电子转移效率，提高了其循环稳定性和高速率性能。丰富氮氧官能团改善了其润湿性并提供了赝电容，从而提高了其电化学性能。

开展多孔碳纤维的 CO_2 吸附性能研究，在 25°C 和 1 bar 条件下， CO_2 吸附量为 4.4 mmol/g ，高于商业化液胺吸收系统的 $3\text{-}4 \text{ mmol/g}$ ，并建立 CO_2 吸附量与孔结构之间的良好相关性，为二氧化碳减排提供新型材料的选择。



多孔碳纤维样品及电化学性能、二氧化碳吸附性能

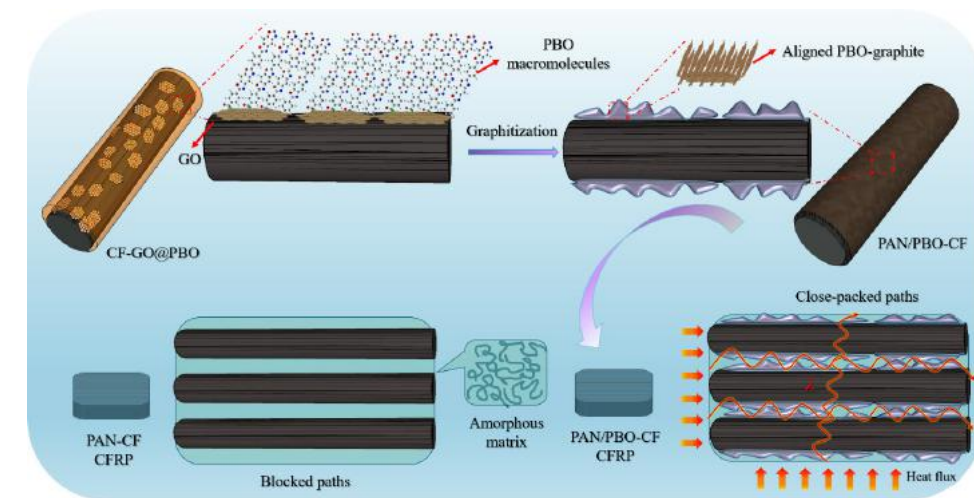
高导热型高强高模碳纤维及其复合材料制备技术

近年来电子设备正逐渐朝着集成化、小型化和轻量化的方向发展，随着微电子技术和器件功率密度的提高，器件热聚集问题越发明显，例如航空航天领域超高速飞机微电子结构和卫星结构面板。此外，5G 时代电子设备集成度日益提高，随之而来的过热使用环境给设备的安全性和稳定性带来了巨大的挑战，也对材料导热性能提出了更高的要求。碳纤维热导率高，达到 $100\text{-}1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，但受限于树脂基体的低热导率及纤维 / 树脂界面热阻，其复合材料的导热性能难以达到理想水平。

针对高导热碳纤维复合材料的需求，研究团队利用碳纤维表面改性技术，以氧化石墨烯为接枝桥梁，在纤维表面均匀接枝高取向度和结晶度的聚对苯撑苯丙双噁唑 (PBO)；再经石墨化，制备同轴 PAN/PBO 复合碳纤维。高取向度

的刚性棒状 PBO 聚合物在石墨化过程中形成紧密堆叠的石墨片层。以该复合基碳纤维为增强体通过模压成型工艺制备环氧树脂复合材料，其面内导热系数可提高 50% 以上，达到 $82.86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ；厚度方向导热系数提高 137%，导热系数可达 $2.54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (*Composites Part B: Engineering*, 2022, 229, 109468)。

研究团队在碳纤维表面构建了镍、碳纳米管、PBO 衍生石墨的三维导热网络，以该碳纤维为增强体可以通过树脂传递模塑成型、模压成型等成型技术制备复合材料。所得的单向碳纤维环氧树脂复合材料导热系数比未改性材料提升了 573%，达到 $5.39 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。碳纤维表面沉积的 Ni/CNT 网络和纤维间垂直的石墨烯桥联结构能够在纤维间提供更多高效的热传导路径，提高复合材料厚度方向的声子传递效率，进而增强其导热性能。



PAN/PBO 复合基碳纤维的设计思路及其复合材料的导热机理