

ESPUN

Progress in Electrospinning

Vol.25

Sept. | 2018 3



骨组织工程应用进展

生物敷料

纳米纤维酶固定化

纤维载药与药物控释

A Family of Electro-Spinner
Fibers or Particles Producer in Nano-to-Micro Scale

Elite精英系列

针对追求完美的用户精心设计，凝聚12项创新科技，历经50多次功能改进，新增显微摄影系统、激光校准、3D细胞培养板制备组件等高端配置。将成为您实验室中的明星级研发平台，极具展示性。



MedSpun系列

产业化纳米纤维生产设备，具有生产连续化，工艺一体化，控制自动化，安全性高，订制灵活等特点，已服务于上海微创、广州弘健、四川迪康、烟台隽秀等多家企业。



SS通用系列

超高性价比，满足静电纺丝常规实验操作，兼具组织工程支架、取向纤维、核壳纤维、复合微球制备等更多丰富功能，五个型号总有一款适合您。



纳米静电纺丝设备

十余年清华技术积累，卓越品质保障
全系列设备满足您从科研到产业的全面需求

Handy轻便系列

灵活且实用，可以与已有高压电源或注射泵联用，更能充分利用实验室的有限空间。出大成果不拘小节。



数秒之内，
创造纳米微观世界

全系列机型将带给您惊叹的自动化控制及前所未有的便捷
详情请关注公司网站www.ualery.com



合作流程



设备、材料、服务一体化
——专注静电纺丝技术

注:
3 可以邀请客户参与完成
5 设备选型包括第三方设备供应商的设备方案

上海微创合作案例



合作特点

- 协同攻克工艺技术
- 确认产品成形为先
- 设备服从产品工艺

北京	主要客户	广东
清华大学 “千人计划” 化学系危岩老师课题组 清华大学 化工系郭宝华老师课题组 清华大学 材料系王晓慧老师课题组 清华大学 汽车工程系“百人计划” 张剑波老师课题组 北京大学 生物医学工程系系于钢老师课题组 北京大学口腔医院 魏世成老师课题组 北京航空航天大学 生物医学工程学院李光老师课题组 北京理工大学 材料系冯增国老师课题组 北京化工大学 理学院宋宇飞老师课题组 北京师范大学 水科学研究院豆俊峰老师课题组 中科院过程所 “千人计划” 杨传芳老师课题组 北京纳米能源研究所 杨亚老师课题组 中国地质大学(北京) 材料系实验室 中国石油大学(北京) 机械学院郑忠礼老师课题组 中国科学院中心 中科院“百人计划” 蒋兴学老师课题组	以下为部分区域信息。 详情请咨询 400-823-0080 湖北 武汉理工大学 材料科学系副教授姜立强老师课题组 华中科技大学 光电国家实验室刘国震老师课题组 华中科技大学 “千人计划” 郭新老师课题组 华中科技大学 “青年千人计划” 崔天佑老师课题组 华中科技大学 化学与化工学院夏帆老师课题组 安徽 中国科学技术大学 材料系余彦老师课题组 中国科学技术大学 功能膜徐铜元老师课题组 中国科学技术大学 物理学院王中平老师课题组 四川 & 重庆 四川大学 中国工程院院士王玉忠老师课题组 四川大学 化工系杨银老师课题组 四川大学 轻工与食品学院但卫华老师课题组 华西医科大学 医学院林云峰老师课题组 重庆大学 化学化工系陈国老师课题组 中国工程物理研究院化工材料研究所 江苏 & 浙江 浙江大学 求是特聘教授王立老师课题组 浙江大学 高分子系徐志康老师课题组 浙江大学 材料系路建美老师课题组 苏州大学 高分子系陈红老师课题组 苏州大学 物理学院李亮老师课题组 南京理工大学 化工学院朱俊武老师课题组 南京理工大学 环生学院李建生老师课题组 南京航空航天大学 材料科学与技术学院张松刚老师课题组 南京工业大学 化工学院陈强老师课题组 扬州大学 理学院薛怀国老师课题组	华南理工大学 轻工与食品学院杨晓泉老师课题组 中山大学 化工学院张芝老师课题组 中山大学 工学院张强老师课题组 南方医科大学 神经外科秦建强老师课题组 山东 & 内蒙古 & 东北地区 吉林大学 化学学院李俊峰老师课题组 吉林大学 超分子结构与材料国家重点实验室 吉林大学 “唐彪特聘教授” 张彤老师课题组 黑龙江大学 化学化工与材料学院赵辉老师课题组 哈尔滨师范大学 化工学院凤玉老师课题组 哈尔滨理工大学 电气工程学院王唯老师课题组 东北林业大学 材料学院鞠广萍老师课题组 大连理工 化工学院王治宇老师课题组 大连理工 工程力学系诗伦老师课题组 内蒙古科技大学 材料与冶金学院郝喜红老师课题组 中国石油大学(华东) 理学院薛庆忠老师课题组 山东大学 材料学院范润华老师课题组 企业客户 上海微创医疗器械(集团)有限公司 武汉华威生物材料工程有限公司 广州市弘健生物医用制品科技有限公司 烟台隽秀生物科技有限公司 江阴瑞康生物医学科技 其他 香港大学 香港高等科技学院 Nanyang Technological University University of Ottawa

部分学术成果

学校	用户	刊物名称	影响因子
四川大学	王玉忠院士	ACS Nano	12.881
华中科技大学	翟天佑教授	Journal of Materials Chemistry A	5.099
武汉理工大学	姜立强教授	Macromolecular Rapid Communications	4.941
新疆大学	贾殿赠教授	Advanced Functional Materials	11.805
四川大学	夏和生教授	Nature Communications	11.470
中国科学技术大学	杨传芳教授	Journal of Materials Chemistry A	7.443
中科院过程所	杨传芳教授	Journal of Materials Chemistry A	7.443
吉林大学	吴俊峰教授	Nanoscale	7.394
东北林业大学	韩广萍教授	Carbohydrate Polymers	4.074
复旦大学	刘天西教授	RSC Advances	3.840
西北工业大学	姚军燕教授	RSC Advances	3.840
东北林业大学	韩广萍教授	RSC Advances	3.840
复旦大学	邵正中教授	Polymer	3.840
四川大学	褚良银教授	Materials	3.562
清华大学	翁国教授	Materials Letters	2.651
		Journal of Applied Polymer Science	2.489
		Journal of Materials Science	2.371
		Journal of Applied Polymer Science	1.768

仍在增加.....

Statistics

2018 年自然科学基金关键词检索数据统计 1

Research Highlights

静电纺石墨烯基纳米纤维在生物学方面的研究进展 7

Editors' Choice

生物医用文献快报 23

2018 年 9 月第 3 期（总第 25 期）

季 刊 2012 年创刊

主办单位：易丝帮

学术委员会成员（姓氏拼音首字母升序）

常 江	陈学思	陈义旺	冯增国	郭宝华	何吉欢	黄争鸣
金昌显	李从举	李广涛	刘天西	刘延波	龙云泽	莫秀梅
潘 伟	任 杰	邵长路	王 策	危 岩	杨卫民	袁晓燕
赵 勇	朱美芳	朱 静				

编辑部成员

名誉主编：危岩 胡平 主 编：蔡云岫 副主编：戚妙

电子邮箱：journal@espun.cn

2018 年自然科学基金关键词检索数据统计

统计

据统计,以“纳米纤维”和“电纺丝”为关键词检索并删除重复的项目后,2018 年自然科学基金共计新批准 70 项,总资助额度为 2787 万元(见表 1)。本刊去年曾统计过 2017 年获批自然科学基金项目总数为 68 个,受资助总额 2870 万元。由此可见,相较于 2017 年,2018 年自然科学基金在资助额度和数量上都基本持平。

表 1 2018 年以“纳米纤维”和“电纺丝”为关键词检索的项目列表

项目名称	负责人	依托单位	批准金额 (万元)	项目起 止月
多级调控自组装 MXene 静电纺丝复合薄膜及高效污水净化机理研究	焦体峰	燕山大学	65	2019-01 至 2022-12
基因修饰人脂肪干细胞复合静电纺丝分层组装支架材料构建仿生淋巴管复合体的研究	李平	中山大学	57	2019-01 至 2022-12
静电纺丝制备无定形氧化钨/高分子复合纳米纤维膜及其在污水处理及贵金属回收方面的应用	王挺	山东大学	65	2019-01 至 2022-12
干细胞靶向多肽修饰的梯度矿化的透明质酸/聚膦腈同轴电纺丝纳米纤维支架原位诱导关节骨软骨组织的再生及其修复机制的研究	张辛	北京大学	57	2019-01 至 2022-12
高屏蔽效能静电纺纳米纤维基复合材料的组成和空间结构与屏蔽性能关联机制研究	王策	吉林大学	65	2019-01 至 2022-12

基于纳米纤维场效应晶体管的 CMOS 器件研究及其在生物传感器中的应用	刘国侠	青岛大学	60	2019-01 至 2022-12
松油烯-4-醇脂质体/CS-PEO 纳米纤维的控释机理及抗菌机制研究	葛彦	南通大学	21	2019-01 至 2021-12
丝瓜络/丝素纳米纤维复合多孔基高通量/结合容量分子印迹膜的构建及其选择性分离纯化青蒿素的行为和机理研究	孟敏佳	江苏大学	24	2019-01 至 2021-12
同轴异质结构柔性纳米纤维氨气传感器的构建及其氨敏机理研究	逢增媛	江南大学	26	2019-01 至 2021-12
流动状态下聚苯胺纳米纤维的结构精细调控与储能增强机制	秦宗益	东华大学	46	2019-01 至 2022-12
限域空间内构筑石墨烯纳米纤维柔性电极及其电化学动力学研究	何海勇	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	60	2019-01 至 2022-12
耐高温微纳米纤维玻璃棉真空绝热材料结构设计及绝热机理研究	陈舟	南京工业大学	25	2019-01 至 2021-12
木素基核壳结构碳纳米纤维的制备及应用基础研究	郑志锋	西南林业大学	60	2019-01 至 2022-12
反应熔渗制备高体积分数 SiC 纳米纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料的界面设计及增强增韧机制研究	陈建军	浙江理工大学	60	2019-01 至 2022-12
高性能呼吸传感器功能层悬空纳米纤维的定域定向制造基础研究	赵婷婷	上海大学	25	2019-01 至 2021-12
氧空位多元钙钛矿纳米纤维的设计与调控及其电解水制氢性能研究	朱罕	江南大学	26	2019-01 至 2021-12
SiC 包覆碳“核-壳结构”纳米纤维的高温宽频吸波调控机理	张亚妮	西北工业大学	60	2019-01 至 2022-12
具有非对称结构的纳米纤维基柔性仿生智能驱动膜的研究	王栋	武汉纺织大学	59	2019-01 至 2022-12
海泡石纳米纤维负载 Ni-NiAl ₂ O ₄ 复合材料的制备及其催化甲烷水蒸气重整反应性能研究	王菲	河北工业大学	60	2019-01 至 2022-12

基于纳米纤维复合膜的抗菌-抗氧化与食品新鲜度-pH 颜色响应机制研究	王华林	合肥工业大学	60	2019-01 至 2022-12
基于表面分子印迹聚吡咯纳米纤维同时选择性高效提取食品中多种非法添加物的效能及应用研究	祁菲菲	西安交通大学	22	2019-01 至 2021-12
梯度结构纳米纤维吸音气凝胶的可控构筑及其声能耗散机制研究	印霞	东华大学	59	2019-01 至 2022-12
基于阶梯喷射与负压流场耦合的纳米纤维定向凝聚与包芯成纱动力学模型及在微小口径血管支架上的应用	邵伟力	中原工学院	25	2019-01 至 2021-12
控释活性生物分子的氧化凝胶静电纺纤维及抑制肌腱粘连研究	崔文国	上海交通大学	59	2019-01 至 2022-12
3D 打印静电纺定向沉积细胞与纳米纤维仿生构筑三维空间内“细胞和细胞外基质”	邓红兵	武汉大学	59	2019-01 至 2022-12
静电纺压电纳米纤维膜声电转换器件结构参数对器件频率响应性能的影响机理研究	郎晨宏	泉州师范学院	25	2019-01 至 2021-12
负载双介孔硅与 P65 siRNA/布洛芬复合纳米粒子的 PELA 电纺纤维膜防治肌腱粘连的作用及机制研究	陈帅	上海交通大学	21	2019-01 至 2021-12
丝粒复合结构的三级同轴电纺成纤机理及其调控药物释放的关键机制研究	杨焱瑶	上海理工大学	25	2019-01 至 2021-12
电纺直写微纳 3D 打印的构-效同步微能场调控机制研究	王翔	厦门理工学院	25	2019-01 至 2021-12
径向 Denosumab / P34HB 电纺支架的制备及其在下颌骨骨缺损修复中的基础研究	傅娜	天津医科大学	21	2019-01 至 2021-12
载 Defactinib 的 Gt-PCL 电纺纤维支架维持 BMSCs 构建软骨皮下表型稳定性的作用机制研究	陆阳	上海交通大学	20	2019-01 至 2021-12
三级同心轴电纺丝技术构建贝伐单抗-阿苯达唑-替莫唑胺复合缓释系统局部控释治疗恶性胶质瘤及其机制研究	倪石磊	山东大学	57	2019-01 至 2022-12

N-取代聚苯胺电纺丝纳米纤维负载可控量子点可见光下持续降解气态有机污染物	章家立	华东交通大学	41	2019-01 至 2022-12
柔性核鞘结构石墨烯复合纤维超级电容器直接纺丝制备、界面结构调控与性能研究	张永毅	中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所	42	2019-01 至 2022-12
仿海葵结构高舒适纳米纤维膜的可控制备及其透湿机制研究	生俊露	嘉兴学院	26	2019-01 至 2021-12
不对称超润湿 Janus 皮层复合纳米纤维膜的构筑及膜蒸馏耐久性研究	王威	哈尔滨工业大学	59	2019-01 至 2022-12
仿鸟骨结构纳米纤维复合材料及其在临近空间环境中吸波机制研究	鹿现永	北京航空航天大学	59	2019-01 至 2022-12
分级多孔 PI-ZrO ₂ -PI 复合纳米纤维超薄膜制备及对高温 PM _{2.5} 的过滤研究	张兴双	山东省科学院	23	2019-01 至 2021-12
基于超分子主客体组装构建的核-壳结构树状大分子纳米平台用于肿瘤靶向的多模态成像与协同治疗	郭睿	东华大学	65	2019-01 至 2022-12
基于扩散界面理论的纳米纤维增强复合材料的跨尺度断裂破坏研究	张律文	上海交通大学	65	2019-01 至 2022-12
聚合物半导体纳米纤维的多尺度组装与光电器件构筑	张磊	南京大学	65	2019-01 至 2022-12
碳纳米纤维材料对关键放射性核素的高效去除及机理研究	王祥学	华北电力大学(保定)	65	2019-01 至 2022-12
含嘌呤结构纳米纤维素基离子传导材料的制备及机理的应用基础研究	赵光磊	华南理工大学	66	2019-01 至 2022-12
聚合物模板法柔韧陶瓷纳米纤维的可控制备及诱导成型机制研究	丁彬	东华大学	60	2019-01 至 2022-12
同轴静电溶液喷射法 MOFs/FPAS 纳米纤维水电解制氢隔膜结构的调控与离子传输特性研究	程博闻	天津工业大学	60	2019-01 至 2022-12
可加工的液晶态纳米纤维素流体材料: 制备、性能及防伪应用	常春雨	武汉大学	59	2019-01 至 2022-12

基于纳米纤维网络的复合材料层间增韧及损伤和裂纹原位检测研究	高杰峰	扬州大学	59	2019-01 至 2022-12
纳米纤维素/PEGDA 可调控泊松比三维生物支架设计与光固化成形机理	唐爱民	华南理工大学	57	2019-01 至 2022-12
基于 Sox9 表达调控的纳米纤维仿生支架复合体促脊髓损伤内源性再生修复及相关机制研究	高明勇	武汉大学	56	2019-01 至 2022-12
基于磁性纳米纤维素/MOF 复合材料构建模拟酶系统及可视化检测苯酚的研究	王阳	陕西科技大学	22	2019-01 至 2021-12
基于纳米纤维素模板的多级孔分子筛的制备机理及构效关系研究	张兰	昆明理工大学	24	2019-01 至 2021-12
以磁控 PLGA 纳米纤维/PDMS 复合薄膜为夹层肺芯片的构建与应用	高兴华	上海大学	25	2019-01 至 2021-12
木质纳米纤维素载银纳米线复合协同作用机制及其银锌电池性能研究	李勍	东北林业大学	25	2019-01 至 2021-12
羧甲基壳聚糖-Nisin 核壳结构纳米纤维的可控构建及其持续抑菌机制研究	吴春华	福建农林大学	22	2019-01 至 2021-12
基于非晶 Cu-Ti/金属 Cu 三明治薄膜制备半导体纳米纤维材料及性能研究	胡青卓	合肥工业大学	25	2019-01 至 2021-12
大形变陶瓷纳米纤维的多级结构制备及柔性压力传感应用研究	黄思雅	南方科技大学	25	2019-01 至 2021-12
胶原结构在明胶纳米纤维中的复原及其形状记忆功能研究	谭淋	四川大学	25	2019-01 至 2021-12
可控多级微纳米纤维集合体过滤材料的制备及其过滤与透气机理研究	祝国成	浙江理工大学	25	2019-01 至 2021-12
用于超级电容器的导电高分子/碳纳米纤维包芯纱的连续制备及电容构筑机制	张弘楠	东华大学	26	2019-01 至 2021-12
基于 CVD 液晶模板法的生物医用聚对二甲苯纳米纤维可控构筑及其降解性能研究	谢璠	陕西科技大学	25	2019-01 至 2021-12

氮掺杂多孔碳纳米纤维支撑过渡金属氧化物/导电聚合物传感界面的构筑及其无酶电化学传感研究	丁永玲	山东省科学院	26	2019-01 至 2021-12
基于纳米纤维素诱导的环糊精-聚乙烯亚胺/聚苯乙烯高性能阴离子交换膜的设计与制备	范敏敏	四川大学	25	2019-01 至 2021-12
高温高盐环境中纳米纤维素/有机碱杂化体系的构建及油水界面行为研究	魏兵	西南石油大学	24	2019-01 至 2021-12
LiNi _{0.5} Co _{0.2} Mn _{0.3} O ₂ /黑磷/纳米纤维素的柔性电极制备及其电化学性能研究	王任衡	深圳大学	24	2019-01 至 2021-12
基于纳米纤维素晶体(CNCs)的纳滤膜构建及性质调控研究	白朗明	哈尔滨工业大学	27	2019-01 至 2021-12
纳米纤维素晶体对水泥基材料水化反应及微观结构影响机理的研究	付腾飞	福建农林大学	24	2019-01 至 2021-12
基于 hiPSC 和单层纳米纤维基片技术构建仿生心脏芯片用于药物心脏毒性多角度评价	汤亚东	广东工业大学	21	2019-01 至 2021-12
基于三维近场生物电纺技术构建移行结构化肌腱复合物	杨龙	贵州医科大学	21	2019-01 至 2021-12

王毅，清华大学摩擦学国家重点实验室

摘要：石墨烯及其衍生物在生物学领域的应用愈来愈受到人们的关注，其研究领域已经涉及到生物相容和安全性、抗菌和抗病毒、药物和基因载体、生物传感器、组织工程、生物成像以及肿瘤的光热和光动力治疗等。本文主要介绍了近几年通过静电纺丝制备的基于石墨烯及其衍生物的纳米纤维在生物学方面的应用。

关键词：静电纺丝；石墨烯及其衍生物；生物学

Abstract: The application of graphene and its derivatives in the field of biomedicine has received increasing attention. Its research fields consists of biocompatibility and safety, antibacterial and antiviral, drug and gene carriers, biosensors, biological imaging, photothermic and photodynamic therapy of tumors, as well as tissue engineering. This article mainly introduces the progress of biomedical application of graphene –based electrospun nanofibers in recent years.

Keyword: electrospinning; graphene and its derivatives; biomedicine

1 前言

1.1 石墨烯及其衍生物

2004 年，英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫，通过微机械力从高取向热解石墨上剥离出单片的石墨烯碳层，由此开始引起了一股石墨烯的研究热潮。由于石墨烯具有高导热性、高弹性和机械强度、超强的黏附性、大的比表面积以及独特的载流子特性，使其在电子器件、复合材料、

储能材料等领域得到广泛的研究，并取得一定的科学进展。Georgakilas 等^[1]对石墨烯及其衍生物的 $\pi - \pi$ 相互作用、范德华力、离子相互作用、允许非共价修饰石墨烯和氧化石墨烯的氢键的简要描述。并且对药物递送、能源材料、生物传感，生物成像和生物医学技术等应用进行了探讨。

1.2 静电纺丝制备石墨烯聚合物在医学方面的应用

石墨烯纳米片（GNSs）由于其显著的特征，包括特殊的电子传输，优异的机械性能，高表面积和抗菌功能而引起了显著的科学关注。

在 Barzegar 等^[2]研究中，通过优化静电纺丝参数来制备的中空 PVA 纳米纤维，并通过相对简单的静电纺丝技术改善所得连续纤维的热性能，实现了石墨烯纳米填料的结合。在 Navarro-Pardo 等^[3]石墨烯基材料的静电纺丝纳米复合材料中，讨论了使用石墨烯作为填料的聚酰胺电纺纳米复合材料的研究。选择用于分散碳纳米材料的适当溶剂是解决碳基纳米复合材料分散的主要问题的重要因素。这种增强聚酰胺静电纺丝纤维的新型碳纳米材料在各种科学和技术领域的研究已经显示出各种独特的应用特性。

Das, Sriya 等^[4]通过静电纺丝聚乙烯吡咯烷酮稳定的石墨烯和 PVA 的水溶液制备原始石墨烯/聚乙烯醇（PVA）纳米纤维。这是用分散的原始石墨烯增强的静电纺纳米纤维的首次报道。研究了石墨烯负载与临界静电纺丝参数之间的关系。显微镜检查显示纤维内均匀的纤维形成和良好的石墨烯分散性。流变学数据表明，石墨烯分散体的优异水平将聚合物的模量提高了 205%。我们还发现石墨烯显著提高了基线以上纤维的热稳定性（提高 15°C）和结晶度（提高 59%），而光学显微镜图像显示出均匀的电纺纤维形成而没有显著成珠。

Huang Chien-Lin 等^[5]研究了 GNS 添加对溶液流变性和电导率的影响。结果显示在 PVA 溶液中添加 GNS 增加了溶液的粘度和电导率；PVA / GNS 复合纳米纤维的电纺纤维直径小于纯 PVA 纳米纤维的电纺纤维直径；GNS 不仅嵌入在纤维中，而且在纤维上形成突起，另外，PVA / GNS 纤维的结晶度随着 GNS 含量的增加而降低。

在 Azarniya 等^[6]研究中，介绍了用氧化石墨烯（GO）纳米片增强的新型壳聚糖/细菌纤维素（CS / BC）纳米纤维复合材料。所制备的纳米纤维复合材料可能适用于生物医学应用，如皮肤组织工程和伤口敷料。Jin 等^[7]通过静电纺丝与

化学还原相结合，真空过滤石墨烯氧化物水溶液，开发了一种新颖的制造工艺，成功制备出具有可控纳米纤维图案的独立式 RGO 薄膜。获得的具有蛋白质官能化的 RGO 膜可以作为优异的细胞培养基底。制造的 RGO 薄膜也可用于许多其他生物医学应用，如工程生物标记或生物传感器。

2 静电纺丝制备石墨烯聚合物在生物医学的医用

石墨烯及其衍生物氧化石墨烯和其它功能化的石墨烯还具有比较好的生物相容性，在医用领域（包括生物传感、疾病诊断、药物载体和基因传递、抗菌和抗病毒材料、细胞和肿瘤成像、肿瘤的光热治疗以及组织工程）具有潜在的应用前景。本文将介绍纳米石墨烯的生物相容性、生物安全性、可降解性以及以上医用领域的研究进展。

2.1 静电纺丝制备石墨烯及衍生物的聚合物在细胞相容性和生物安全性的应用

石墨烯（G）和未经修饰的氧化石墨烯（GO）对细胞有一定的毒性且有浓度依赖性，并且石墨烯的毒性高于氧化石墨烯和还原氧化石墨烯，其细胞毒性作用机制包括细胞膜的损伤、ROS 的产生以及与凋亡相关的基因表达水平的改变，但是氧化石墨烯经大分子（如壳聚糖、聚乙二醇、葡萄聚糖、过氧化物酶和蛋白等）进行表面修饰后，只展现出非常低的细胞毒效应。

在 Thampi 等^[8]研究中，研究了用于生物医学应用的氧化石墨烯（GO）增强静电聚碳酸酯聚氨酯（PCU）纳米复合膜的制备。用 L-929 成纤维细胞进行的体外细胞毒性试验和用新鲜静脉血液进行百分比溶血试验表明，细胞膜与具有可接受水平的溶血特性的细胞相容。因此，这些结果突出显示了这种机械改进的复合膜在生物医学领域的应用的潜力。

在 Mahmoudi 等^[9]研究中，通过静电纺丝包含壳聚糖（80 体积%）、聚乙烯吡咯烷酮（15 体积%）和含有 GO 纳米片的聚环氧乙烷（5 体积%）的混合溶液来制备 GO 改性的纳米纤维生物聚合物。结果表明，GO 纳米片显著改变高浓度壳聚糖溶液的电导率和粘度，使得平均直径为 60nm 的超细均匀纤维是可纺的。具有可控孔结构的 GO 增强纳米纤维表现出增强的弹性模量和拉伸强度

(150-300%)，并具有可控的水渗透性以满足天然皮肤的所需性能。生物相容性测定和 SEM 成像表明，纳米纤维结构促进附着并维持 72 小时特征性细胞形态和活力。

Ma Yu 等^[10]研究了一种聚合物/在天然蜂蜜介质中机械剥离石墨烯纳米复合纤维。对比了普通手术缝线和 PVA / MEG 纳米复合纤维对伤口愈合的影响，结果表明，含有 0.3wt%MEG 处理组的 PVA / MEG 纳米复合纤维的伤口愈合周期明显缩短。因此，PVA / MEG 纳米复合纤维可以用作手术缝合线的有希望的新候选者。

2.2 静电纺丝制备石墨烯及衍生物的聚合物在抗菌方面的应用

应用具有抗微生物活性和适当的伤口渗出物处理能力的伤口敷料对于促进伤口愈合具有特别重要的意义。石墨烯材料具有独特的结构和出色的热学，光学，机械和电子性能，引起了纳米材料领域的极大兴趣，应用范围非常广泛。在这些应用中，抗菌剂领域已经取得了很大进展。通过静电纺丝技术制备的石墨烯及其衍生物复合材料在抗菌领域有广泛的应用。

Kang Y 等^[11]制备的具有氧化石墨烯 (GO) 的聚 L-丙交酯纳米复合材料。通过 L-丙交酯在冻干 GO 表面的开环聚合合成了接枝有聚 L-丙交酯 (GO-g-PLLA) 的 GO，对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好抗菌活性。

Okan B 等^[12]通过掺入抗微生物剂的热剥离氧化石墨烯 (TEGO) 和静电纺丝技术，制备了三维氟化五嵌段聚 (L-丙交酯-共- ϵ -己内酯) 基支架。研究发现石墨烯结构中的表面官能团的量对抑制细菌生长具有显著影响。

在 Shams 等^[13]研究中，含有氧化石墨烯纳米片作为抗菌伤口敷料的聚氨酯/硅氧烷膜，通过使用设计的敷料，实现了外力的物理保护和伤口湿润环境的保存。并且对革兰氏阳性，革兰氏阴性和真菌菌株的广泛抗菌活性，同时对成纤维细胞具有非常好的细胞相容性。

Thampi 等^[14]研究了石墨烯氧化物薄膜涂覆聚合物，发现以非常薄的膜形式的氧化石墨烯 (GO) 通过电喷雾的简单方法被包裹到电纺纤维性聚碳酸酯聚氨酯 (PCU) 膜 (GOPCU) 上。观察到 GOPCU 表面上血小板粘附力降低；同时，金黄色葡萄球菌 (革兰氏阳性，球菌) 和铜绿假单胞菌 (革兰氏阴性，杆菌) 的细菌粘附也降低了 85%。同时促进 L929 细胞的粘附和增殖。表 1 为静电纺丝制

备石墨烯及其衍生物纤维的抗菌作用。

表 1 静电纺丝制备石墨烯及其衍生物纤维的抗菌作用

文献	样品名称	抗菌原理	优缺点
Kang Y 等 ^[11]	PLLA / GO-g-PLLA	--	GO-g-PLLA 的接枝率高达 30.4%
Okan 等 ^[12]	含 TEGO 基聚合物支架	TEGO 石墨烯结构中的表面官能团	无
Thampi 等 ^[14]	GO-PCU 膜	表面亲水性官能团羟基、羧基和羰基等	抗菌且促进体细胞粘附和增殖
Shams 等 ^[13]	聚氨酯/硅氧烷膜	--	同时具有良好细胞相容性
Gopal 等 ^[15]	CS-PVA-GO 纤维膜	--	对革兰氏阴、阳性细菌有良好的抗菌活性

备注：实验中使用的试验对象大肠杆菌和金黄色葡萄球菌

通过静电纺丝技术制备含有石墨烯（GR）及其衍生物和 Ag 掺杂官能化的纳米纤维聚合物在抗菌剂领域有广泛的研究。由于具有高比表面积，活性基团和蜂窝状原子结构，石墨烯及其衍生物通常用作 AgNPs 的底物，以减少聚集并提高协同抗菌活性。AgNP 修饰的石墨烯及其衍生物具有显著的抗菌性能。使用石墨烯及其衍生物作为底物可防止凝聚并增强 Ag 颗粒的稳定性。石墨烯及其衍生物的改性表面和物理化学性质也有助于调节 Ag 颗粒的尺寸，促进 Ag 的抗菌活性。这些性质，包括 AgNPs 与石墨烯及其衍生物的协同效应，增强石墨烯或石墨烯衍生物与 Ag 复合材料结合的抗菌活性。石墨烯及其衍生物通过共价键，静电或共轭连接与各种材料相互作用，使其成为与不同类型材料结合的完美基材。

Shi L 等^[16]讨论了石墨烯及其衍生物及其杂化体，特别是与 AgNPs 结合的杂化体的抗菌作用。石墨烯及其衍生物的杀菌作用归因于记忆应力，膜应力，包埋，电子转移和光热效应。记忆应力和电子转移会破坏细菌膜的完整性，导致细胞内容物的泄漏。夹带可将细菌从气体和营养物中分离出来，预先排出它们的增殖。光热效应提高了周围环境的温度以杀灭细菌。这些因素取决于石墨烯及其衍生物的物理化学性质，包括它们的层，表面，横向维度，尖锐边缘和氧化基团。

Pant 等^[17]通过静电纺丝技术成功制备了含有氧化石墨烯（GO）和 Ag 掺杂官能化还原氧化石墨烯（Ag-RGO）的聚氨酯（PU）纳米纤维。通过扫描电子显微镜和元素映射技术研究 GO 薄片与 Ag 纳米颗粒在纳米纤维中的均匀分布。X 射线衍射和热重分析证实在双组分纳米纤维垫中存在 GO 和 Ag。针对大肠杆菌的抗菌试验表明 GO 和 Ag-RGO 添加到 PU 纳米纤维中大大提高了杀菌效率。图 1 位掺杂银离子的石墨烯抗菌效果图。

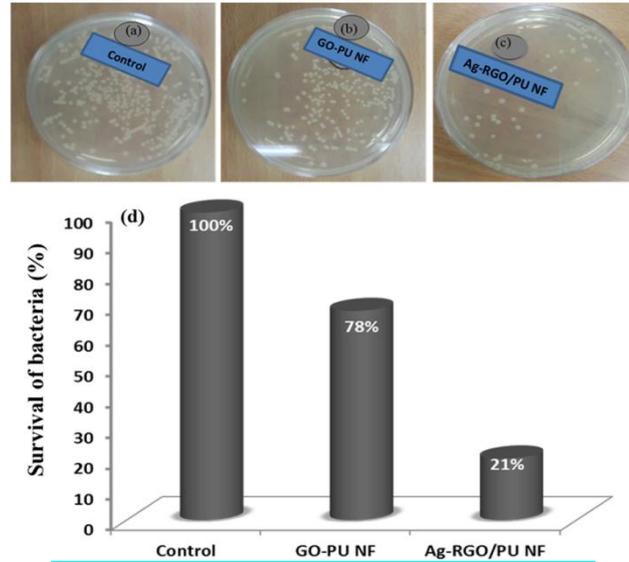


图 1^[17]掺杂 Ag 离子的石墨烯及其衍生物抗菌效果图

Cai N 等^[18]研究中，壳聚糖/明胶（CG）复合纳米纤维体系被用于描绘通过包含氧化石墨烯-银（GO-Ag）纳米填料来协同增强 PEC 纳米纤维膜的机械和抗菌性能。掺入 GO-Ag 纳米复合材料可协同增强 CG 复合材料基体的机械和抗菌性能。GO-Ag 的引入使 CG 纳米纤维膜的弹性模量提高了 105%，拉伸强度提高了 488%。同时，由于 GO-Ag 具有优异的抗菌能力，GO-Ag / CG 纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别比 CG 高出 80.5% 和 50.1%。GO-Ag / CG 的抗菌能力的协同提高可能涉及 GO 对微生物在 AgNPs 附近的积累。GO-Ag 的掺入具有很大的潜力，可以同时改善 PEC 纳米纤维在生物学应用中的机械和抗菌性能。

Liu C 等^[19]通过通过静电纺丝开发了具有杀菌活性的新型 PLA1%-GO-Ag 杂化纳米复合纤维垫。琼脂片分散结果表明，PLA-1%GO 纳米复合材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌没有抑制区。而 PLA-1%GO-Ag 混合纤维垫对大肠杆菌表现出优异的抗菌效果。因此，接触大肠杆菌后从杂种释放的银离子足以通过释放 ROS 来诱导细胞死亡。相比之下，由于其较厚的细胞壁而对金黄色葡萄球菌具有较低的杀菌效果。

de Faria 等^[20]研究提出与石墨烯银纳米复合材料的电纺纳米纤维垫的功能化，开发具有抗菌性能的柔性涂层材料。用 EDC 和 NHS 作为交联剂通过简单的后制造方法将用银纳米粒子装饰的氧化石墨烯（GO）片材结合到 PLGA-壳聚糖纳米纤维的表面。GO-Ag 片材与纳米纤维表面的不可逆结合赋予杂交垫显著的

抗微生物活性，导致革兰氏阴性（大肠杆菌和铜绿假单胞菌）的失活率为 99%，对革兰氏阳性（金黄色葡萄球菌）的失活率为 76%。表 2 为静电纺丝制备 Ag 掺杂的石墨烯及其衍生物纤维的抗菌作用。

表 2 静电纺丝制备 Ag 掺杂的石墨烯及其衍生物纤维的抗菌作用

文献	样品名称	抗菌原理	优缺点
Shi L 等 ^[17]	石墨烯-AgNPs 杂合体	记忆应力和电子转移会破坏细菌膜的完整性	抗菌机制不明确
Pant 等 ^[17]	Ag-RGO-PU 纤维	---	提高了杀菌效率
Cai N 等 ^[18]	GO-Ag / CG	可能与 GO 诱导的微生物积累有关	同时提高纤维的机械和抗菌性能
Liu C 等 ^[19]	PLA-GO-Ag	银离子释放 ROS 来诱导细胞死亡	具有选择性抗菌效果
de Faria 等 ^[20]	PLGA-chit-GOAg	GO-Ag 与 PLGA-壳聚糖垫表面的共价结合	大肠杆菌的失活率为 99%

备注：实验中使用的试验对象大肠杆菌和金黄色葡萄球菌

表 2 为各种石墨烯与银离子掺杂效果对比。虽然混合抗菌机制的解释仍然存在争议，但掺杂显然具有潜在的抗菌应用。这些抗菌材料在医药，食品和水净化方面显示出巨大的潜力。上述令人印象深刻的工作表明，石墨烯及其衍生物可用作复合抗菌材料的底层，但对于生物医学领域的应用，这种材料的生物相容性必须进一步分析。

2.3 静电纺丝制备石墨烯及衍生物的聚合物在生物传感中的应用

Lawal^[21]讨论了最近的石墨烯（GR）电化学生物传感器，通过有效固定酶，包括葡萄糖氧化酶，辣根，准确检测生物分子，包括葡萄糖，过氧化氢，多巴胺，抗坏血酸，尿酸，烟酰胺腺嘌呤二核苷酸，DNA，金属和免疫传感器过氧化物酶和血红蛋白。基于 GR 的生物传感器在高灵敏度，宽线性检测范围，低检测限和长期稳定性方面表现出卓越的性能。该领域未来的挑战包括微型化生物传感器和简化大规模生产等问题。但是 Tung 等^[22]指出当前的挑战包括开发低成本，超高和用户友好的传感器，这些传感器应具有高选择性，快速响应和恢复时间以及小尺寸。

Ekabutr 等^[23]使用静电纺丝和 VPP 技术来制造 PPy / PAN-MWCNT / SPCE。在 SPCE 表面上涂有 PPy 层的导电纳米纤维结构的存在增强了电化学氧化还原活性，其中所产生的电流由径向扩散产生并且具有良好的阳极/阴极电流响应的准可逆性，并且具有低的 DEpin 和 Fe(CN)₆^{3-/4-} 氧还原偶联体系。在标准 H₂O₂

检测的情况下，PPy / PAN-MWCNT / SPCE 给出了明确的电催化响应，表明修饰电极表现为可处理的器件，其阳极电流大于这是传统的平面 SPCE，可用于测量浓度范围从 0.125 到 10 mM 的 H₂O₂。同时 PPy / PAN-MWCNT / SPCE 在葡萄糖检测中，在 10.36V 和 11.25V 下线性范围分别为 0.125-6mM 和 0.125-7mM。

Wang 等^[24]由化学氧化聚吡咯 (PPy) 包覆的电纺聚己内酯 (PCL) 纳米纤维的核壳结构构建的网状支架，以及对带正电的聚 (二甲基二烯丙基氯化铵) (PDDA) 的薄层进行以下表面改性，获得还原后的氧化石墨烯 (RGO) 片材。结果表明，由网状支架支撑的石墨烯在检测神经递质多巴胺 (DA) 中显示出显著的电催化性质。检测限为 0.34M (S / N = 3)，检测范围从 4M 到 690M。实现了尿样和 DA 注射液中 DA 的成功测定。这种有吸引力的制造策略可以扩展到制造其他基于石墨烯片材的传感器。

Jia 等^[25]研究报道了一种在石英晶体微量天平 (QCM) 上制备传感涂层以实现快速和准确的氨检测的新方法。使用静电逐层 (LBL) 自组装技术，将带正电荷的聚乙烯亚胺 (PEI) 和带负电荷的氧化石墨烯 (GO) 依次组装在带负电荷的电纺乙酰胺纤维素 (CA) 纳米纤维的表面上。在气体传感测试中，基于 CA / PEI / GO 的 QCM 传感器不仅具有低检测限和快速响应，而且在氨检测方面也具有良好的可逆性和选择性。

Arvand 等^[26]研究中通过电聚合方法在 GE 上制备了一种新型的纳米 PLC / ZnO-NPseCuO-NFs 材料。实验结果表明，CuO-NFs 和 ZnO-NPs 的存在共同引起电活性表面的增加。所制得的传感器应用于单独和同时测定嘌呤碱基，并展现出宽的线性检测范围，高灵敏度和稳定性，可接受的重现性和低检测限。这些特征提供了应用该电极用于灵敏和选择性测定三种不同 DNA 样品中 G 和 A 的可能性。下表为静电纺丝制备的含石墨烯及其衍生物聚合物在生物传感方面的应用。

表 3 静电纺丝制备的含石墨烯及其衍生物聚合物在生物传感方面的应用

参考文献	传感器名称	检测效果	优缺点
Ekabutr 等 ^[23]	PPy / PAN-MWCNT / SPCE	测量 0.125 到 10 mM 浓度的 H ₂ O ₂	线性相关性
Wang 等 ^[24]	RGO / PDDA / PCL @ PPy	对 DA 具有极佳的电催化活性	重复、稳定性好和规模制造
Jia 等 ^[25]	CA / PEI / GO	快速和准确的氨检测的新方法	可逆性和选择性
Arvand 等 ^[26]	PLC/ZnO-NPseCuO-NFs/GE	单独和同时测定嘌呤碱基	高灵敏度和稳定性，重现性

2.4 静电纺丝制备石墨烯及衍生物的聚合物在组织工程中的应用

组织工程和再生医学是一个涉及生物学，医学和工程学的初级多学科领域。通过恢复，维持或改善组织和器官功能，预计将为全球数百万人提高健康和生活质量的方式带来革命性的变革。其中组织要么在患者体内生长，要么在患者体外建立并随后移植。组织工程和再生医学旨在控制和指导特定的组织再生，以通过利用人体的自然愈合反应来恢复缺陷的结构和功能。它可以为天然组织提供功能替代物，不仅可以作为植入物的移植物，而且可以作为特定组织发育和功能受控研究的生理相关模型。由于纳米石墨烯及其衍生物具有独特的机械性能（如高弹性、柔性、超强黏附性、良好可塑性）、优异的导电性以及优异的生物相容性，纳米石墨烯及其衍生物在组织工程领域有着广泛的应用。石墨烯及其相关材料有诱导干细胞向成骨细胞，神经元细胞和其它细胞分化的能力。

其中，Bressan,等^[27]证实石墨烯及其相关材料能够诱导人类干细胞分化为特定谱系。与传统底物或支架相比，涂有石墨烯或GO或甚至3D石墨烯泡沫的材料能够保证干细胞的成活性并诱导成骨分化。就神经元再生而言，石墨烯和GO显示出相同的有希望的分化潜力。同时在其它组织领域，石墨烯及其衍生物也有较强的诱导能力^[28]。

Nayak 等^[29]对石墨烯及其衍生物用于组织工程和再生医学的研究发现。一些与组织工程有关的研究已经证明石墨烯及其衍生物可以作为生物相容性基质，用于增强各种干细胞如hMSCs、hNSCs和iPSCs的生长、粘附、增殖和自发分化。这些研究已经提出了不同的机制，概述了基于碳纳米材料的这些支架对于在其上生长的干细胞的行为的作用。

在Aznar等^[30]研究中，提供了一种新的方法来生产涂覆有石墨烯材料的静电纺丝素支架，混合支架结合其性能可能对组织工程应用具有吸引力。Jalaja K等^[31]通过静电纺丝工艺制造将氧化石墨烯掺入明胶中形成氧化石墨烯装饰明胶纳米纤维，具有纳米增强GO功能的复合明胶纳米纤维体系显示出优异的物理化学和生物学性能，并且这些复合纳米纤维有应用于组织工程的前景。HaiBin等^[32]通过静电纺丝法制备了一系列聚乳酸（PLA）基纳米复合纤维膜，具有生物相容性和力学性能等综合优势将使得这种纳米复合纤维支架成为组织工程应用的一种有应用前景的材料。

2.4.1 骨组织工程支撑材料

将生物材料支架与活体干细胞结合用于组织再生是组织工程的主要方法。在 Luo Yu 等^[33]研究中，通过静电纺丝技术制备氧化石墨烯（GO）掺杂的聚乳酸-乙醇酸共聚物（PLGA）纳米纤维支架，用于增强 MSC 的成骨分化。研究结果表明，GO 掺杂的 PLGA 底物诱导成骨标记基因如 ALP，Col I 和 Ocn 的表达。同时，它促进 ALP 活性和骨钙蛋白分泌。与 GO 结合的 PLGA 纳米纤维不仅促进人类间充质干细胞（hMSC）的附着和增殖，而且增强 hMSC 向成骨细胞的分化，这对于需要细胞外基质（ECM）仿生的生物学应用是重要的。

具有相互连接的孔隙，良好的机械性能，优异的生物相容性和骨诱导性的骨支架对于制造具有挑战性。在 Weili 等^[34]研究中通过静电纺丝和生物矿化 MOPTG / HA 复合纳米纤维支架，来模拟矿化胶原纤维束在层状骨中的构建。加入 10wt% TSF 显著加速了暴露于模拟体液的 PLGA / GO 纳米纤维上 HA 的成核和生长。通过组装多排正交纤维的正交层，机械性能也得到显著提高。此外，生物测定表明，复合支架不仅支持 hMSC 粘附和增殖，而且还增强成骨和碱性磷酸酶活性。基于优异的机械性能，细胞相容性，骨诱导性和再生活性，这些支架是用于修复结构骨的有前途的基质。

可生物降解的多孔生物材料支架在骨再生中起关键作用。在 Liang 等^[35]研究中制备了含有不同含量 GO 的多孔纳米羟基磷灰石/胶原/聚(乳酸-乙醇酸共聚物)/氧化石墨烯（nHAC / PLGA / GO）复合支架。结果表明合成的支架具有三维多孔结构，且具有良好的生物降解性。体外实验表明，nHAC / PLGA / GO (1.5wt%) 支架显著增强成骨细胞（MC3T3-E1）的细胞粘附和增殖，具有良好的细胞相容性和骨再生能力。

在 Zhou 等^[36]研究中，一种新型 P34HB / GO 纳米纤维支架通过静电纺丝成功制造并首次应用于体内骨修复。GO 对纤维直径产生巨大影响并显著增强了支架性能。支架是多孔结构良好、可生物降解的，具有改善的细胞性能。虽然 P34HB 和 P34HB / GO 支架都能够进行体内骨修复，但 P34HB / GO 呈现出最佳的能力。GO 促进骨生成，甚至在早期阶段迅速增加骨量。因此它在骨组织工程领域具有很高的应用潜力。表 3 为静电纺丝制备石墨烯及其衍生物纤维在骨组织工程的应用。

表 3 静电纺丝制备石墨烯及其衍生物纤维在骨组织工程的应用

参考文献	样品名称	应用效果	优缺点
Luo Yu 等 ^[33]	GO-PLGA 支架	促进 hMSC 的附着、增殖和分化	促进 ALP 活性和骨钙蛋白分泌
Weili 等 ^[34]	MOPTG / HA 支架	机械性能也得到显著提高	增强成骨和碱性磷酸酶活性
Liang 等 ^[35]	nHAC / PLGA / GO	增强 MC3T3-E1 的细胞粘附和增殖	生物降解性
Zhou 等 ^[36]	P34HB / GO 支架	体内骨修复, 促进骨生成	生物降解性

2.4.2 神经组织材料

视神经的损害将导致永久性视野丧失和不可逆的眼部疾病, 如青光眼。视神经的损伤主要来源于视网膜神经节细胞 (RGCs) 的萎缩、凋亡或死亡。尽管在电子视网膜植入物方面取得了一些进展, 这些植入物可以电刺激未损伤的 RGC 或视网膜部分来传递信号, 但刺激的 RGC 自我修复/再生尚未实现。

石墨烯的生物相容性能够充当神经生物组织工程的电极结构或支架, 以便刺激或恢复受损组织的功能。在 Yan 等^[37]研究中, PPy-G / PLGA 通过静电纺丝合成了 PPy-G 纳米片。得到的 PPy-G / PLGA 纳米纤维显著改善了 RGC 密度并且沿着纳米纤维的方向引导了 RGC 的神经突生长。电刺激导致细胞长度提高了 137%, RGC 的抗衰老作用显著增强。因此, PPy-G 修饰纳米复合材料支架开辟了 RGCs 生长和视神经再生的新途径, 为临床治疗青光眼等视神经相关疾病提供了新的替代方法。

在 Aznar 等^[38]研究中, 探讨了 rGO 包被的电纺 SF 支架在神经组织工程中的潜在应用。提供了一种新的方法来生产生物相容性和导电性支架, 允许远离水电解电位的电流施加到细胞上。通过应用 ES 或用神经生长因子 (NGF) 进行治疗, 可以增加分化细胞的百分比, 即在电流施加至细胞培养物时, 神经突生长更加显著, 试图探索这些支架来刺激或恢复受损神经组织的功能。

2.4.3 其它

成肌细胞分化是肌生成中的关键步骤, 并且长期以来被认为主要由生物生长因子控制。然而 Patel 等^[39]在研究中, 成功地制造了具有不同石墨烯浓度的纤维石墨烯 PCL 纳米复合材料支架。石墨烯浓度的调整使得对纳米复合材料支架的物理化学和机械性能进行了良好的控制。这些复合支架以及它们的降解产物在小

鼠成肌细胞 C2C12 细胞中显示出优异的生物相容性并促进细胞粘附和扩散。重要的是,即使当接种成肌细胞的支架在生长培养基中培养时,复合支架诱导成肌细胞分化成多核细长肌管。总的来说,这些复合支架被证明是用于骨骼肌组织工程的有前景的一类细胞指导性支架,并且有可能指导该领域未来的支架开发。

纳米石墨烯及其衍生物在组织工程领域的研究还处在起步阶段,尤其是体内生物学评价、不可降解性能及其在体内的毒副作用还有待进一步的系统性研究。初步研究表明,石墨烯及其衍生物经静脉注射,腹腔注射,口服之后主要沉积在内皮网状系统,肝脏和脾脏,虽然在体内滞留的时间较长,最后经肾脏和粪便排出体外,对动物体的毒性微乎其微。但是 G、GO 和 RGO 能够提高生物支架的机械强度,有利于细胞的黏附、生长、增殖和分化,说明纳米石墨烯在组织工程领域有很好应用前景。

2.5 石墨烯在细胞和肿瘤成像以及肿瘤光热和光动力治疗中的应用

石墨烯独特结构特点和对近红外光吸收特性以及容易进行化学加工和修饰,使得它可用作生物学成像以及对肿瘤的光热和光动力治疗。但是这方面很少有关于静电纺丝制备的石墨烯材料在此方面的研究。

磁性颗粒在生物学领域显示出非常广泛的应用前景,特别是在细胞操作,药物递送系统,磁热疗和 NRI 对比度增强的成功中。具有官能团的氧化石墨烯具有很好的生物学效应。Feng 等^[40]通过静电纺丝技术制造的开发磁性短纤维包裹石墨烯氧化物。短纤维具有优异的磁性(饱和磁化强度值: 50.33emu/g),对 NdFeB 磁体有很强的响应外观。SEM 图像和激光共聚焦图像显示,短纤维包裹的氧化石墨烯和细胞之间具有非常紧密的粘附。细胞-纤维结构行为的控制可以通过应用外部磁体来实现。这些结果可能为磁场治疗疾病提供了一个有吸引力的观点。

3 结论

本文主要论述了静电纺丝技术制备石墨烯及其衍生物的聚合物在细胞的相容性和安全性、抗菌应用、生物传感器和组织工程等方面的研究进展。

在细胞的相容性和安全性方面,石墨烯及其衍生物通过聚合物改性之后,能

够与细胞很好的相容。在抗菌方面，与银离子掺杂的石墨烯聚合物相比，未掺杂的石墨烯聚合物有很好的细胞相容性，促进体细胞的粘附和繁殖。而掺杂的石墨烯聚合物更多的是体现在提高抗菌和杀菌效率。在生物传感器方面，使用石墨烯材料制得的传感器有高速反应的灵敏性、检测结果良好的线性相关性、以及非常高的稳定性、重复性和选择性。在组织工程方面，使用石墨烯制得的材料，能够促进 ALP 活性和骨钙蛋白分泌，增强成骨和碱性磷酸酶活性，同时具有良好的生物降解性。

4 展望

综上所述，石墨烯及其衍生物在医用各领域的研究已经取得一定的进展，但大多数都处于初步阶段，以体外细胞实验居多，体内实验很少，要实际应用到临床还有很多实验数据要补充。功能化的氧化石墨烯作为高效载药的平台，特别是难溶的抗癌药物，已经得到了广泛的研究，但是还没有使用静电纺丝的方法制备出相应的石墨烯负载药物。

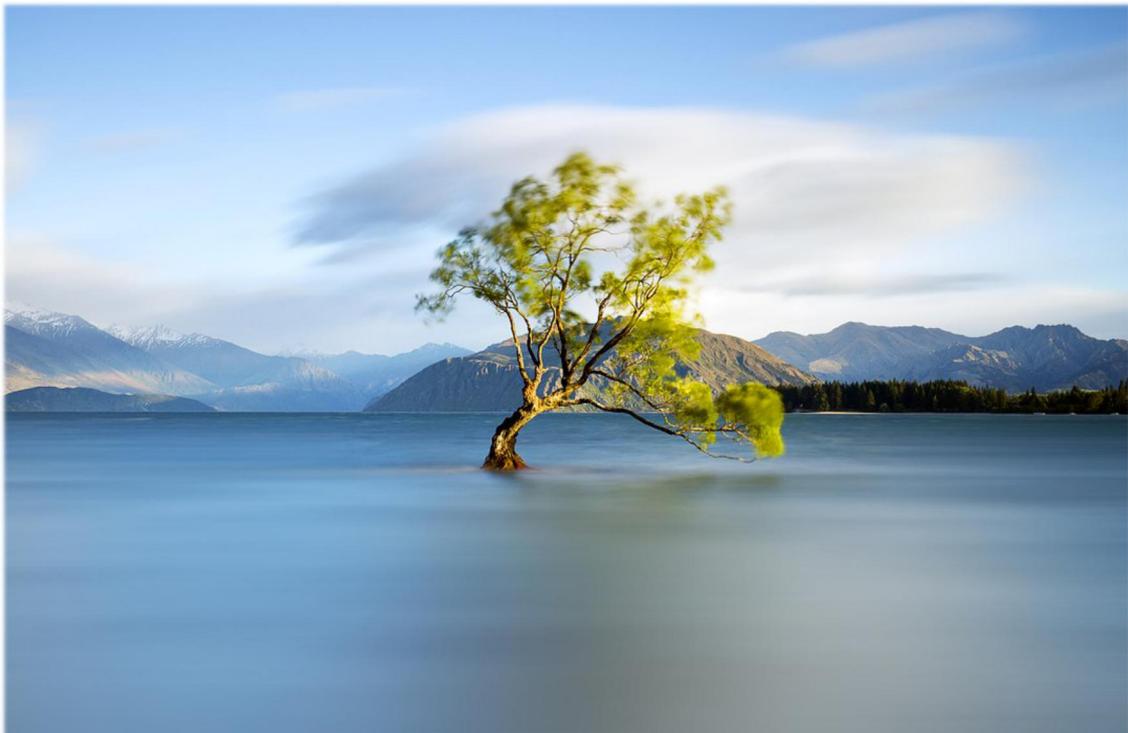
参考文献

- [1] Georgakilas V, Tiwari J N, Kemp K C, et al. Noncovalent Functionalization of Graphene and Graphene Oxide for Energy Materials, Biosensing, Catalytic, and Biomedical Applications[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(9): 5464-5519.
- [2] Barzegar F, Bello A, Fabiane M, et al. Preparation and characterization of poly(vinyl alcohol)/graphene nanofibers synthesized by electrospinning[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2015, 77: 139-145.
- [3] Navarro-Pardo F, Martinez-Hernandez A L, Velasco-Santos C. Carbon Nanotube and Graphene Based Polyamide Electrospun Nanocomposites: A Review[J]. Journal of Nanomaterials, 2016, 2016: 1-16.
- [4] Das S, Wajid A S, Bhattacharia S K, et al. Electrospinning of polymer nanofibers loaded with noncovalently functionalized graphene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 128(6): 4040-4046.
- [5] Huang C, Peng S, Wang Y, et al. Microstructure and characterization of electrospun poly(vinyl alcohol) nanofiber scaffolds filled with graphene nanosheets[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(17): n/a-n/a.
- [6] Azarniya A, Eslahi N, Mahmoudi N, et al. Effect of graphene oxide nanosheets on the physico-mechanical properties of chitosan/bacterial cellulose nanofibrous composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 85: 113-122.
- [7] Jin L, Zeng Z, Kuddannaya S, et al.

- Synergistic effects of a novel free-standing reduced graphene oxide film and surface coating fibronectin on morphology, adhesion and proliferation of mesenchymal stem cells[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2015, 3(21): 4338-4344.
- [8] Thampi S, Muthuvijayan V, Parameswaran R. Mechanical characterization of high-performance graphene oxide incorporated aligned fibroporous poly(carbonate urethane) membrane for potential biomedical applications[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(16): n/a-n/a.
- [9] Mahmoudi N, Simchi A. On the biological performance of graphene oxide-modified chitosan/polyvinyl pyrrolidone nanocomposite membranes: In vitro and in vivo effects of graphene oxide[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 70: 121-131.
- [10] Ma Y, Bai D, Hu X, et al. Robust and Antibacterial Polymer/Mechanically Exfoliated Graphene Nanocomposite Fibers for Biomedical Applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(3): 3002-3010.
- [11] Kang Y, Wang C, Shi X, et al. Crystallization, rheology behavior, and antibacterial application of graphene oxide-graft-poly(ϵ -lactide)/poly(ϵ -lactide) nanocomposites[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 451: 315-324.
- [12] Okan B S, Marset A, Seyyed Monfared Zanjani J, et al. Thermally exfoliated graphene oxide reinforced fluorinated pentablock poly(ϵ -lactide-co- ϵ -caprolactone) electrospun scaffolds: Insight into antimicrobial activity and biodegradation[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(22): n/a-n/a.
- [13] Shams E, Yeganeh H, Naderi-Manesh H, et al. Polyurethane/siloxane membranes containing graphene oxide nanoplatelets as antimicrobial wound dressings: in vitro and in vivo evaluations[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2017, 28(5).
- [14] Thampi S, Nandkumar A M, Muthuvijayan V, et al. Differential Adhesive and Bioactive Properties of the Polymeric Surface Coated with Graphene Oxide Thin Film[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(5): 4498-4508.
- [15] Panthi G, Park S, Kim T, et al. Electrospun composite nanofibers of polyacrylonitrile and Ag₂CO₃ nanoparticles for visible light photocatalysis and antibacterial applications[J]. *Journal of Materials Science*, 2015, 50(13): 4477-4485.
- [16] Shi L, Chen J, Teng L, et al. The Antibacterial Applications of Graphene and Its Derivatives[J]. *Small*, 2016, 12(31): 4165-4184.
- [17] Pant B, Park M, Jang R, et al. Synthesis, characterization, and antibacterial performance of Ag-modified graphene oxide reinforced electrospun polyurethane nanofibers[J]. *CARBON LETTERS*, 2017, 23(1): 17-21.
- [18] Cai N, Zeng H, Fu J, et al. Synergistic effect of graphene oxide-silver nanofillers on engineering performances of polyelectrolyte complex nanofiber membranes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(19): 46238.
- [19] Liu C, Shen J, Yeung K W K, et al. Development and Antibacterial Performance of Novel Poly(lactic Acid-Graphene Oxide-Silver Nanoparticle Hybrid Nanocomposite Mats Prepared By Electrospinning[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2017, 3(3): 471-486.

- [20] de Faria A F, Perreault F, Shaulsky E, et al. Antimicrobial Electrospun Biopolymer Nanofiber Mats Functionalized with Graphene Oxide-Silver Nanocomposites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(23): 12751-12759.
- [21] Lawal A T. Progress in utilisation of graphene for electrochemical biosensors[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2018, 106: 149-178.
- [22] Tung T T, Nine M J, Krebsz M, et al. Recent Advances in Sensing Applications of Graphene Assemblies and Their Composites[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(46): 1702891.
- [23] Ekabutr P, Chailapakul O, Supaphol P. Modification of disposable screen-printed carbon electrode surfaces with conductive electrospun nanofibers for biosensor applications[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013: n/a-n/a.
- [24] Wang Z, Ying Y, Li L, et al. Stretched graphene tented by polycaprolactone and polypyrrole net-bracket for neurotransmitter detection[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 396: 832-840.
- [25] Jia Y, Yu H, Zhang Y, et al. Cellulose acetate nanofibers coated layer-by-layer with polyethylenimine and graphene oxide on a quartz crystal microbalance for use as a highly sensitive ammonia sensor[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2016, 148: 263-269.
- [26] Arvand M, Sayyar Ardaki M. Poly- l -cysteine/electrospun copper oxide nanofibers-zinc oxide nanoparticles nanocomposite as sensing element of an electrochemical sensor for simultaneous determination of adenine and guanine in biological samples and evaluation of damage to dsDNA and DNA purine bases by UV radiation[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2017, 986: 25-41.
- [27] Bressan E, Ferroni L, Gardin C, et al. Graphene based scaffolds effects on stem cells commitment[J]. *J Transl Med*, 2014, 12: 296.
- [28] Esrafilzadeh D, Jalili R, Stewart E M, et al. High-Performance Multifunctional Graphene-PLGA Fibers: Toward Biomimetic and Conducting 3D Scaffolds[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(18): 3105-3117.
- [29] Nayak T R, Cai W. Engineering Carbon Nanomaterials for Stem Cell-Based Tissue Engineering[M]. *Engineering in Translational Medicine*, Cai W, London: Springer London, 2014, 641-665.
- [30] Aznar-Cervantes S, Martínez J G, Bernabeu-Esclapez A, et al. Fabrication of electrospun silk fibroin scaffolds coated with graphene oxide and reduced graphene for applications in biomedicine[J]. *Bioelectrochemistry*, 2016, 108: 36-45.
- [31] Jalaja K, Sreehari V S, Kumar P R A, et al. Graphene oxide decorated electrospun gelatin nanofibers: Fabrication, properties and applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, 64: 11-19.
- [32] Ma H, Su W, Tai Z, et al. Preparation and cytocompatibility of polylactic acid/hydroxyapatite/graphene oxide nanocomposite fibrous membrane[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(23): 3051-3058.
- [33] Luo Y, Shen H, Fang Y, et al. Enhanced Proliferation and Osteogenic Differentiation of Mesenchymal Stem Cells on Graphene Oxide-Incorporated Electrospun Poly(lactic-co-glycolic acid) Nanofibrous Mats[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(11): 6331-6339.
- [34] Shao W, He J, Wang Q, et al. Biomaterialized

- Poly(L-lactic-co-glycolic acid)/Graphene Oxide/Tussah Silk Fibroin Nanofiber Scaffolds with Multiple Orthogonal Layers Enhance Osteoblastic Differentiation of Mesenchymal Stem Cells[J]. ACS BIOMATERIALS SCIENCE & ENGINEERING, 2017, 3(7): 1370-1380.
- [35] Liang C, Luo Y, Yang G, et al. Graphene Oxide Hybridized nHAC/PLGA Scaffolds Facilitate the Proliferation of MC3T3-E1 Cells[J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13(1).
- [36] Zhou T, Li G, Lin S, et al. Electrospun Poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate)/Graphene Oxide Scaffold: Enhanced Properties and Promoted in Vivo Bone Repair in Rats[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(49): 42589-42600.
- [37] Yan L, Zhao B, Liu X, et al. Aligned Nanofibers from Polypyrrole/Graphene as Electrodes for Regeneration of Optic Nerve via Electrical Stimulation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(11): 6834-6840.
- [38] Aznar-Cervantes S, Pagán A, Martínez J G, et al. Electrospun silk fibroin scaffolds coated with reduced graphene promote neurite outgrowth of PC-12 cells under electrical stimulation[J]. Materials Science and Engineering: C, 2017, 79: 315-325.
- [39] Patel A, Xue Y, Mukundan S, et al. Cell-Instructive Graphene-Containing Nanocomposites Induce Multinucleated Myotube Formation[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2016, 44(6): 2036-2048.
- [40] Feng Z, Shi C, Zhao B, et al. Magnetic electrospun short nanofibers wrapped graphene oxide as a promising biomaterials for guiding cellular behavior[J]. Materials Science and Engineering: C, 2017, 81: 314-320.

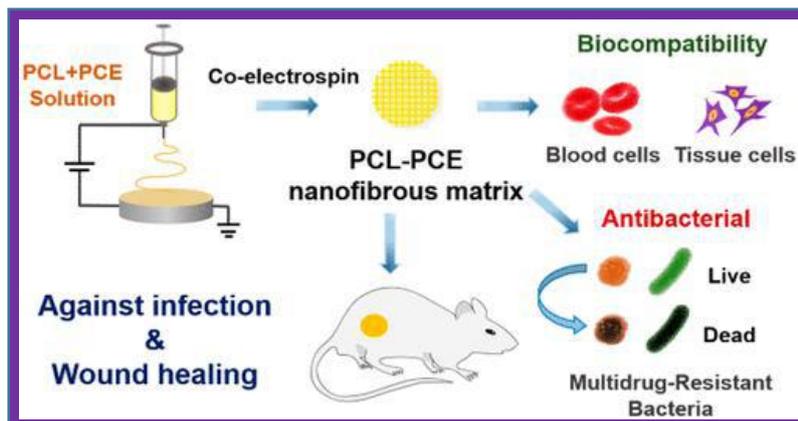


仿生弹性聚多肽纳米纤维支架治疗细菌感染 促进伤口愈合/皮肤再生

细菌感染导致的慢性皮肤损伤已成为近年来医学上的重要威胁，特别是耐多药细菌(MDR)引起的伤口感染，往往导致慢性皮肤伤口难以愈合。常规抗菌生物材料包括无机纳米材料(银、锌、铜)和有机分子(季铵盐、烷基化聚乙烯亚胺)可用于MDR细菌的治疗，但是这些抗菌生物材料的细胞相容性和血液相容性在伤口愈合中均不理想。为了有效治疗MDR感染，促进伤口修复，迫切需要开发具有生物相容性、抗MDR感染、仿生结构和力学性能的多功能生物活性敷料。

目前生物可降解聚合物纳米纤维支架在创面愈合中表现出脆性或塑性力学行为或低生物活性。近年来，聚(柠檬酸)基(PC)弹性体因其具有仿生粘弹性、良好的生物相容性和血管生成能力、快速合成、低成本、生物相容性降解产物等优点，在组织工程和药物/基因治疗领域具有广阔的应用前景。纯PC聚合物由于其固有的低分子量等缺点，通过电纺技术难以形成纳米纤维结构。因此，通常是与其他天然或合成生物医学聚合物混合以制备仿生弹性体pc基纳米纤维支架。

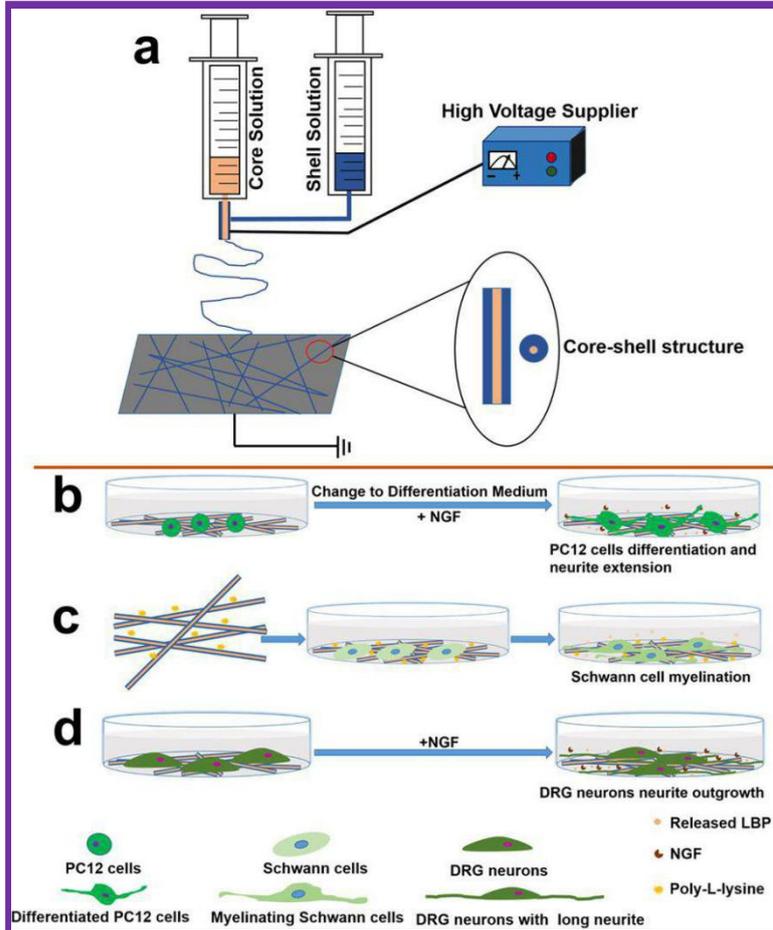
近期，西安交通大学雷波课题组针对影响伤口愈合和皮肤组织再生的几个关键科学问题，利用静电纺丝技术制备一种基于细菌分泌的天然聚多肽的



仿生杂化皮肤修复组织工程支架材料(PCL-PCE)。

该材料具有仿生皮肤的组织弹性，还具有高效的光谱抗菌活性，可以显著抵抗动物创面细菌感染和促进伤口愈合，增强皮肤附属器如毛囊的再生。这种仿生材料中天然聚多肽能够杀灭常见的皮肤创面感染微生物，抑制组织坏死。其仿生皮肤组织的弹性，可为创面创造出适宜的生物力学环境。其仿生的结构和活性组分设计最终实现抗感染，促进新生血管形成和胶原蛋白分泌。该研究对开发具有高度生物活性快速诱导皮肤创面愈合和皮肤再生的新型医用材料具有重要的意义和应用价值。相关研究成果以“Biomimetic Elastomeric Polypeptide-Based Nanofibrous Matrix for Overcoming Multidrug-Resistant Bacteria and Enhancing Full-Thickness Wound Healing/Skin Regeneration”为题发表于国际著名期刊ACS Nano上。

包覆枸杞多糖电纺纳米纤维支架修复周围神经损伤



神经再生

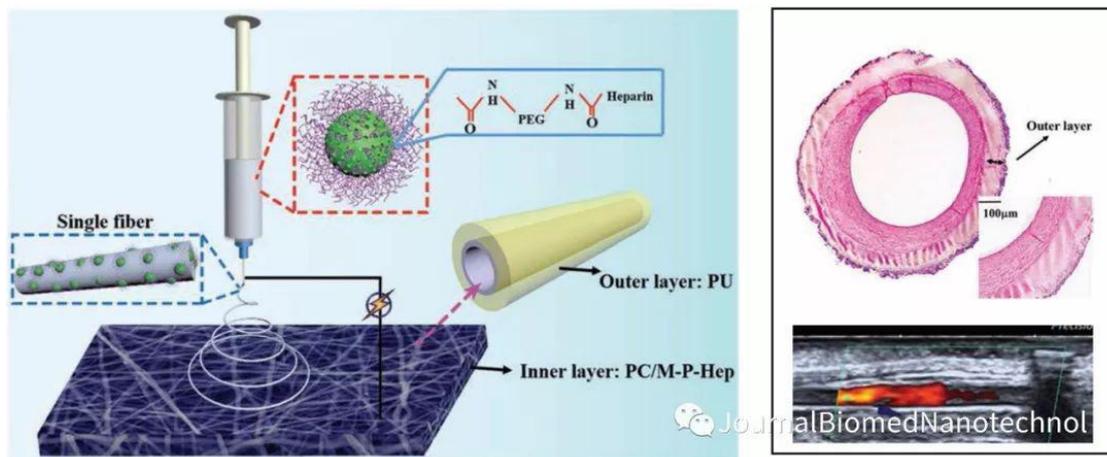
是周围神经损伤后的临床挑战，支架能够引导轴突的再生并且起到恢复的桥梁作用。另外，基于生物材料的支架模拟天然细胞外基质（ECM）结构，其可以为细胞的生长和轴突的延伸提供足够的空间和粘附位点。更重要的是，支架应具有提供药物和/或信号因子的能力，这些因素可指导再生轴突的生长和延伸。枸杞多糖（LBP）是枸杞提取物的主要成分，具有神经保护作用，并且在许多研究中有望用于神经恢复。

静电纺丝纳米纤维已被广泛用作神经组织工程中的潜在支架。它为细胞功能提供了有利的环境，包括粘附，迁移，增殖和分化。另一方面，通过同轴静电纺丝制造的核-壳结构纳米纤维经常用作药物释放应用的载体，可以通过转动芯鞘组合物来控制药物释放行为，同时保持其生物活性。此外，纳米纤维表现出更高的表面积与体积比，这将有助于释放药物的释放并增加细胞和纤维之间的接触面积，从而增强细胞对药物的摄取。因此，静电纺丝纳米纤维是神经再生应用的潜在候选者。

近日，东华大学莫秀梅教授和济南大学 Kwok-Fai So（共同通讯作者）通过同轴静电纺丝将 LBP 结合到核-壳结构的纳米纤维支架中，以研究在支架上培养的 PC12 和施万细胞的增殖。在神经组织工程中引入生物活性化学物质如 LBP 可加速神经再生。通过免疫染色的 NF200 表达评估 PC12 细胞的神经元分化，并通过 SEM 观察形态变化。结果表明，释放的 LBP 显著增强 NGF 诱导的 PC12 细胞的增殖和神经元分化。此外，通过 LSCM 免疫染色，在装载 LBP 的支架上也观察到雪旺细胞髓鞘形成和促进 DRG 神经元神经突向外生长。总之，作为具有神经保护作用的药物，包覆 LBP 静电纺丝纳米纤维作为周围神经再生的组织工程支架具有广泛的应用价值。

静电纺双层血管支架内层具有接枝 PEG 和肝素的介孔硅

用于兔颈总动脉再生



心血管疾病是导致人类死亡的常见疾病。冠心病、血管瘤、外周血管病变等引起的心脏骤停的发病率呈上升趋势，占全世界死亡总数的 30%。血管移植是治疗冠心病有效的治疗方法。目前临床常用的血管移植植物包括自体血管、异体血管和人工血管。自体或同种异体血管的来源是有限的，因此有必要制造人工血管，以取代自体或异体血管。大直径 (>6mm) 人造血管，如：膨化聚四氟乙烯管，已成功应用于临床，但此血管用于小口径 (<6 mm) 的血管移植时出现凝血而血栓现象。因此小血管移植物的抗凝血和促内皮化成为目前解决小血管缺损的关键问题。

针对这一问题，Journal of Biomedical Nanotechnology 第 15 卷第一期封面文章报

道了东华大学莫秀梅课题组与上海中山医院陆树洋等合作制备了一种双层血管复合移植材料。将聚乙二醇的一端接枝在介孔二氧化硅纳米粒子上另一端接有肝素，由此得到的含肝素二氧化硅纳米粒子与 PLGA/胶原混合静电纺成纳米纤维管作为血管内层，此内层材料促进了人脐静脉内皮细胞的增殖，减少了血小板的粘附，增加了抗凝血性。血管外层为静电纺聚氨酯纳米纤维，以此提供机械支撑。内层材料为可降解材料，体外降解实验 60 天后，纤维膜的重量损失了 92.4%；外层聚氨酯为不可降解材料。由此构成的双层血管支架被皮下植入大鼠体内 7, 14 和 28 天后都没有发生炎症反应，表现出优良的组织相容性。进一步将内径为 2mm 的双层血管支架植入新西兰大鼠颈总动脉 15mm 长缺损处用于血管再生，植入两



个月后血管依然保持血流通常，HE 组织切片显示内层材料已经降解并再生出血管组织，免疫荧光染色检测到此血管组织为单层内皮层（CD31 标记）和多层平滑肌层（ α SMA 标记）。综上所述，本文研究的此种具有功能化内层的双层血管支架有潜力应用于小口径血管组织再生。以 Electrospun bilayer composite vascular graft with an inner layer modified by PEG and Heparin to regenerate the blood vessel 为题发表在 Journal of Biomedical Nanotechnology。

电喷-电纺技术构建可注射纳米纤维微球及其在细胞载体方面的应用

可注射纳米纤维微球的功能类似于 3D 支架，用于传递细胞和生长因子/药物使损伤部位组织再生。纳米纤维微球的可注射和仿生属性，使其在生物医学应用领域受到越来越多的关注。近日，内布拉斯加医学中心谢敬伟教授课题组首次报道了结合静电纺丝和电喷雾制备纳米纤维微球的新方法，并探索了其在细胞治疗领域的潜在应用。首先，电纺聚合物和生物活性玻璃纤维，经过冷冻切割或探针超声波仪均质化形成所需长度的电纺纳米纤维段的分散体，再通过电喷滴入液氮，然后冷冻干燥和热处理，最终得到纳米纤维微球。相关研究发表于 ACS Appl. Mater. Interfaces，DOI: 10.1021/acscami.8b06386。

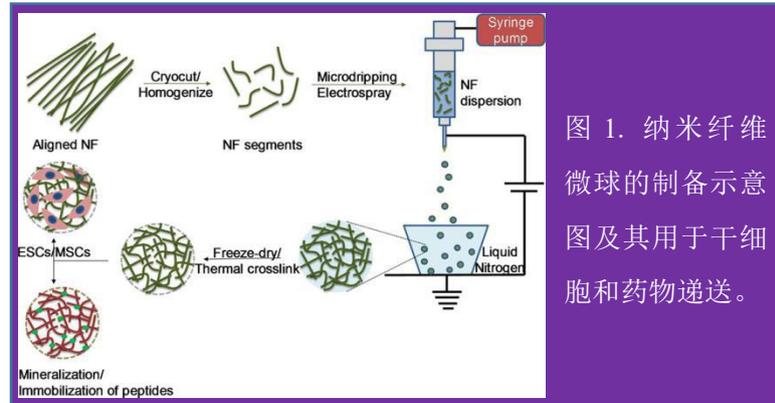


图 1. 纳米纤维微球的制备示意图及其用于干细胞和药物递送。

通过冷冻切割和/或用探针超声波仪均化制备短电纺 NF 片段。PLGA-明胶和生物活性玻璃纤维的随机纤维垫使用探针超声波仪均化，从图中可以看出均匀化下短纤维段中值长度为~20 μ m，而取向 PCL-明胶 NF 垫冷却切割的长度为 30 和 50 微米。

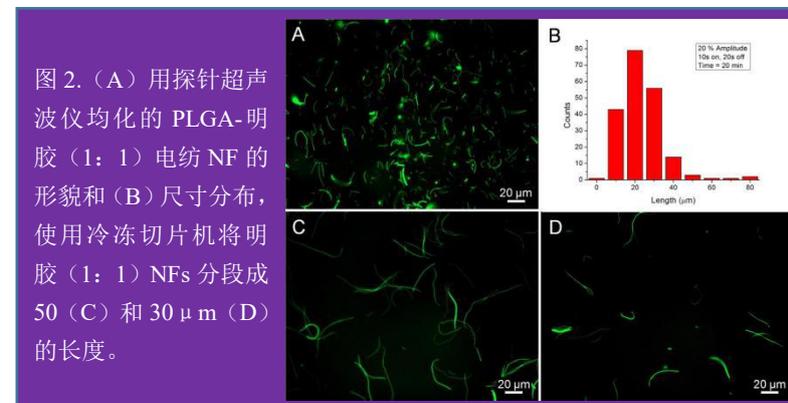


图 2. (A) 用探针超声波仪均化的 PLGA-明胶 (1: 1) 电纺 NF 的形貌和 (B) 尺寸分布，使用冷冻切片将明胶 (1: 1) NFs 分段成 50 (C) 和 30 μ m (D) 的长度。

此外，通过电喷还可以制备多种形貌，包括固体，纳米纤维，多孔纳米纤维微球，以及空心纳米纤维微球。研究表明，与固体微球相比，纳米纤维微球用于大鼠骨髓间充质干细胞的细胞载体效率更高。小鼠胚胎干细胞可以在纳米纤维微球上进行神经分化， β -III-微管蛋白和 β -微球蛋白的阳性染色表明神经突向外生长。

期刊征稿

《静电纺丝进展》是一本专业的囊括电纺行业前沿、会议、资讯、数据等全方位的电子杂志。从杂志开办到现在得到了广大读者的一致好评，同时也得到了老师和同学们的大力支持和鼓励。

为了更加丰富杂志内容，促进交流学习，《静电纺丝进展》现向老师和同学们公开征集稿件，希望有志的老师同学踊跃投稿，为我们的《静电纺丝进展》注入新鲜的血液，稿件一经采用，我们将给予您相应的稿酬，期待各位的来稿。

投稿须知：

- 1.资料可靠，数据准确，具有理论性、科学性、实用性
- 2.文稿内容格式包括论文题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词、正文、参考文献、作者简介等。文章篇幅不限。
- 3.投递方式来稿请将文章发送至 journal@espun.com，以附件形式发送并请注明文章投稿。稿件中请注明所属单位、姓名、联系电话，以便本刊编辑联系相关事宜。同时也可扫描下方二维码，关注公众号“电纺进展”进行投稿。
- 4.本刊网址 <http://www.espun.cn>



关注“电纺进展”公众号



扫码进入易丝帮网站