静电纺丝技术制备MXene功能化聚己内酯杂化纤维及其性能研究

何春霞，张 杨

（黄河科技学院，河南 郑州 450063）

摘 要：采用静电纺丝技术制备功能化聚己内酯（PCL）/过渡金属碳氮化物二维纳米材料（MXene）杂化超细纤维，系统探讨纺丝液浓度、电导率、表面张力及纺丝电压对纤维形貌、直径分布、热性能及力学性能的影响。通过对MXene表面进行功能化处理，使其在PCL基体中实现均匀分散与界面增强。结果表明，适宜的PCL（质量分数15.0%）与纺丝电压（26 kV）可获得直径均匀、结构稳定的纤维。MXene的引入能够显著提高纺丝液电导率并降低表面张力，促进纤维细化与均匀化，同时能够增强纤维的热稳定性、结晶度及力学性能。研究结果为高性能可降解功能纤维的设计与制备提供参考，拓展MXene在生物医用与柔性电子领域的应用潜力。

关键词：聚己内酯；MXene；静电纺丝；杂化纤维；热性能

中图分类号：TQ340.64 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3360（2026）09-0126-06

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.023

Preparation of MXene Functionalized Polycaprolactone Hybrid Fiber by Electrospinning Technology and Study on Its Properties

HE Chunxia, ZHANG Yang

(Huanghe S & T University, Zhengzhou 450063, China)

Abstract: Functionalized polycaprolactone (PCL)/transition metal carbide nitride two-dimensional nanomaterial (MXene) hybrid ultrafine fibers were prepared by electrospinning technology. The effects of spinning solution concentration, electrical conductivity, surface tension, and spinning voltage on fiber morphology, diameter distribution, thermal properties, and mechanical properties were systematically investigated. By functionalizing the MXene surface, uniform dispersion and interface enhancement were achieved in the PCL matrix. The results demonstrated that an appropriate PCL (mass fraction of 15.0%) and spinning voltage (26 kV) produced fibers with uniform diameter and stable structure. The introduction of MXene significantly increased the electrical conductivity of the spinning solution and reduced its surface tension, promoting fiber refinement and homogenization, while simultaneously enhancing the thermal stability, crystallinity, and mechanical properties of the fibers. The study results provides references for the design and preparation of high-performance biodegradable functional fibers, and expands the application potential of MXene in the fields of biomedicine and flexible electronics.

Keywords: Polycaprolactone; MXene; Electrospinning; Hybrid fiber; Thermal properties

聚己内酯(PCL)作为一种典型的脂肪族聚酯类高分子材料，凭借其优异的生物相容性、良好的可降解性及独特的力学性能，在生物医用、组织工程、包装材料等领域展现出巨大的应用潜力[1-3]。PCL在生物体内可通过水解反应逐步降解为二氧化碳和水，最终被生物体完全代谢，不会产生有害残留，PCL凭借这一特性成为替代传统石油基高分子材料的理想选择之一。目前，PCL已被广泛应用于医用手术缝合线、药物控释载体、细胞培养支架等生物医

收稿日期Submitted date 2025-08-13；修回日期Revised date 2025-09-16；录用日期Accepted date2025-10-11

基金项目：河南省科技攻关计划项目（252102221038）；河南省新一轮重点学科-机械项目（0203240011）

联系人，1479145052@qq.com

引用本文：何春霞，张杨.静电纺丝技术制备MXene功能化聚己内酯杂化纤维及其性能研究[J].塑料科技，2026，54(9)：126−131.

Citation：HE C X, ZHANG Y. Preparation of MXene functionalized polycaprolactone hybrid fiber by electrospinning technology and study on its properties[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 126-131.

学领域，在环保包装材料、农业地膜等领域的应用研究也在不断深入[4-7]。然而，纯PCL在实际应用中仍存在一些局限性。PCL的力学性能(尤其是强度和模量)相对较低，热稳定性有待提高，这在一定程度上限制其在高性能领域的应用[8-10]。为克服这些不足，目前通过共混、共聚、填充等多种改性方法对PCL进行性能优化，其中纳米粒子填充改性的方法因其能在较低的添加量下即可显著改善材料性能而备受关注。

过渡金属碳氮化物二维纳米材料(MXene)作为一种新型二维纳米材料，以其独特的结构和优异的性能引起广泛关注。MXene通常由过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物构成，具有典型的层状结构，其表面存在丰富的官能团(如—OH、—O、—F等)。MXene不仅有良好的亲水性和分散性，还能与聚合物基体形成较强的界面相互作用[11-15]。此外，MXene还展现出卓越的电学性能、优异的热传导性能以及较高的机械强度，这些特性使其成为聚合物改性的理想纳米填料[16-18]。将MXene与PCL复合，有望在保留PCL生物相容性和可降解性的基础上显著提升复合材料的力学性能和热稳定性能，拓展其在智能生物材料、柔性电子器件等高端领域的应用。

静电纺丝技术作为一种制备纳米级至微米级超细纤维的有效方法，具有操作简单、成本较低、适用范围广的优点。通过静电纺丝技术制备的超细纤维比表面积大，孔隙率高，纤维直径可控，这些结构特性使其在过滤材料、组织工程支架、药物递送系统等领域具有不可替代性[19-21]。目前，关于PCL复合纤维的静电纺丝研究已有较多报道，但将MXene用于PCL静电纺丝改性的研究仍处于初步阶段。MXene的加入对PCL纺丝液的性质以及对静电纺丝过程和纤维性能的影响的机理尚未完全明确。此外，针对PCL/MXene复合纤维的工艺参数优化研究较少。基于以上背景，采用静电纺丝技术制备PCL/MXene复合超细纤维，重点探讨纺丝液浓度、纺丝电压、接收距离以及MXene添加量对复合纤维形貌、直径分布和热性能的影响，旨在揭示MXene对PCL静电纺丝过程及纤维性能的调控机制，优化工艺参数，为制备高性能PCL/MXene复合超细纤维材料提供依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

PCL粒料，数均分子量80 000 g/mol，广东绿宝生物材料有限公司；MXene，实验室自行制备；四氢呋喃(THF)，分析纯，天津市德恩化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

偏光显微镜，XPF-550C，上海蔡康仪器公司制造；差示扫描量热仪(DSC)，Q20，美国TA仪器公司；电导率仪，DDS-11A，上海理达仪器厂；全自动表面张力仪，QBZY-1，上海方瑞仪器有限公司；旋转自动黏度仪，SV-II+PRO，美国BROOKFIELD公司；电子试验机，Model44，MTS工业系统(中国)有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，TM3030，日本日立公司；静电纺丝机，KH-2，济南良睿科技有限公司。

1.3 静电纺丝制备PCL/MXene超细纤维

1.3.1 纺丝液的制备

称取一定量PCL溶于THF中，磁力搅拌2~3 h，配制质量分数为5.0%、7.5%、10.0%、12.5%、15.0%、18.0%的PCL溶液。将MXene按比例加入THF中，超声振荡3 h后加入PCL，搅拌2~3 h，制备PCL/MXene共混纺丝液。纺丝前超声除气泡10~20 min。表1为静电纺丝液的配方。

表1 静电纺丝液的配方

Tab.1 Formula of electrospinning solution

w_{PCL}/%	m_{PCL}/g	V_{THF}/mL	m_{MXene}/g	w_{MXene}/%
5.0	1.0	20	0	0
7.5	1.5	20	0	0
10.0	2.0	20	0	0
12.5	2.5	20	0	0
15.0	3.0	20	0	0
18.0	3.6	20	0	0
15.0	3.0	20	0.2	1.0

1.3.2 纺丝液的静电纺丝

静电纺丝机参数：电压20~28 kV、接收距离25 cm、推进速率5 mL/h。环境温度(25±1) ℃，相对湿度(2.5±0.2)%，纤维收集于铝箔或水相接收器，真空干燥，备用。

1.4 性能测试与表征

纤维形貌测试：采用偏光显微镜(400×)观察纤维形貌，通过电荷耦合器件(CCD)摄像头成像，使用二维测量软件测定50根纤维直径，计算平均值和标准偏差。

电导率测试：采用电导率仪测定，电极预热0.5 h后，用待测液润洗2~3次，稳定后读数，重复测定3次，取平均值。

表面张力测试：采用全自动表面张力仪(白金板法)测定，重复3~5次取平均值。

零切黏度(η_0)测试：采用旋转黏度仪测定，设置“External Mode”模式，标准液校准后，记录稳定读数，重复测定3次，取平均值。

热性能测试：采用差示扫描量热仪测定，样品质量5~10 mg，氮气保护(50 mL/min)，升温速率10 ℃/min，温度范围30~350 ℃，记录第二次升温曲线，以消除热历史。在相对结晶度计算过程中，PCL质量分数为100%结晶的熔融焓按照157 J/g计算。

力学性能测试：将电纺纤维膜剪成4 cm×1 cm的长方形待测样，在室温下用电子试验机进行力学性能测试。夹具间距为15 mm，拉伸速度为100 mm/min。

SEM：采用扫描电子显微镜对复合纤维膜的形貌进行表征。样品经喷金导电处理，加速电压15 kV，每组随机选取50根纤维，采用ImageJ软件统计纤维直径及其标准差。

2 结果与讨论

2.1 纺丝液浓度对静电纺丝的影响

2.1.1 η_0和纤维平均直径

η_0是指聚合物溶液或熔体在剪切速率趋于零时的黏度，不随时间变化，直接反映聚合物流体层间的微观属性，能够评价不同高聚物流体(溶液或熔体)层间化学特性与流体黏度。纺丝液浓度通过调控溶液的η_0对静电纺丝的可纺性与纤维形貌起调控作用。图1为静电纺丝液的η_0和纤维平均直径。

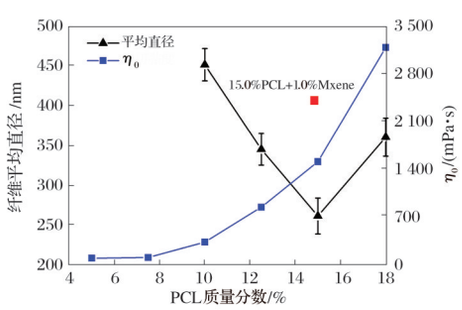


图1 静电纺丝液的η_0和纤维平均直径

Fig.1 η_0 and average fiber diameter of electrospinning solutions

从图1可以看出，当PCL质量分数不超过7.5%时，η_0仅为52.48、61.49 mPa·s，分子链缠结极弱，电场力无法维持射流连续性。此时，纺丝过程以液滴散落为主，难以获得连续纤维。当PCL质量分数为10.0%时，η_0为290.20 mPa·s；当PCL质量分数为15.0%时，η_0为1 484.32 mPa·s。η_0随着PCL浓度的升高逐步增加。此时，分子链缠结程度增强，为射流提供充足内聚力。当PCL质量分数为15.0%时，分子链缠结与射流稳定性达到平衡，纤维平均直径最小(261.4 nm)，均匀性最优，可纺性最佳。当PCL的质量分数为18.0%时，η_0为3 183.64 cP。高黏度会引发两个问题：一是溶剂占比减少，静电纺丝中溶剂快速挥发导致聚合物在喷丝口凝结，造成出丝堵塞；二是高黏度限制射流电场拉伸，纤维直径粗化至360.5 nm，可纺性显著下降。在PCL质量分数为15.0%的溶液中加入质量分数为1.0%的MXene溶液，η_0迅速增加至2 445.20 mPa·s。这是由于MXene作为一种二维纳米片层材料，其表面的官能团能够与PCL分子链之间形成氢键或其他相互作用力，从而增加分子链运动的阻力，导致溶液的黏度显著上升。黏度的增加能够增强射流稳定性，但过高黏度又会抑制射流拉伸，因此复合体系需更精细调控浓度以平衡“稳定性”与“拉伸性”[22]。

2.1.2 电导率

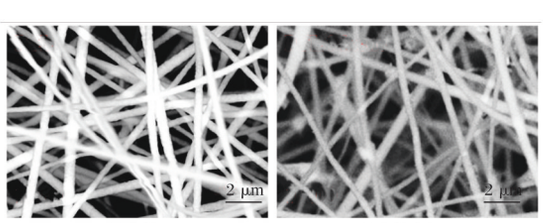
溶液电导率是衡量溶液传导电荷能力的重要参数。其与电场强度的乘积等于传导电流的密度。在静电纺丝过程中，纺丝液的电导率对可纺性及纤维性能有着显著影响。一般而言，电导率的增加意味着溶液携带电荷的能力增强，在电场作用下更易产生电荷斥力，从而有利于射流的拉伸细化，改善可纺性。表2为静电纺丝液的电导率。从表2中可以看出，在PCL溶液(质量分数为5.0%~18.0%)中，溶液的电导率几乎保持不变，均为0.01 μS/cm。这表明在PCL体系中，PCL浓度的变化对溶液的导电性能没有明显影响。这可能是由于PCL本身是一种绝缘体，其分子结构中缺乏可自由移动的电荷载体。而在质量分数为15.0%的PCL溶液中加入质量分数为1.0%的MXene后，溶液的电导率发生显著变化，从0.01 μS/cm增至0.22 μS/cm。这一结果充分说明MXene的加入能够显著提高PCL纺丝液的电导率。其原因在于MXene作为一种具有优异导电性能的二维纳米材料，其本身含有丰富的电荷载体，分散到PCL溶液后，能够为溶液提供额外的导电通道，从而有效提升溶液的导电能力。

表2 静电纺丝液的电导率

Tab.2 Conductivityof electrospinning solutions

w_{PCL}/%	w_{MXene}/%	电导率/(μS·cm^{-1})
5.0	0	0.01
7.5	0	0.01
10.0	0	0.01
12.5	0	0.01
15.0	0	0.01
18.0	0	0.01
15.0	1.0	0.22

在相同电压、接收距离、推进速率下，对不加MXene与加入MXene后纺丝纤维的SEM照片进行对比。图2为PCL纤维及PCL/MXene纤维的SEM照片。



(a) PCL (b) PCL/Mxene

图2 PCL纤维及PCL/MXene纤维的SEM照片(10 000×)

Fig.2 SEM images of PCL fiber and PCL/MXene fiber (10 000×)

从图2中可以看出，MXene的加入使静电纺丝纤维直径减小。这是因为MXene的加入提高了溶液的电导率。在电场作用下，溶液射流所携带的电荷增多，电荷之间的

斥力增大，射流在飞行过程中受到的拉伸作用更强，从而使纤维直径减小[23]。同时，电导率的提高也有利于射流的稳定分裂，减少纤维直径的波动，使纤维的均匀性得到改善。

2.1.3 静电纺丝液的表面张力

表面张力是射流形成与串珠结构产生的核心因素。射流形成阶段，液滴需要克服表面张力才能被电场拉伸；射流运动阶段，表面张力会促使射流收缩为球形，过强时易形成串珠纤维。因此，为减少串珠纤维的形成，获得形貌良好的纤维，通常需要减小纺丝液的表面张力。

对质量分数为15.0%的PCL溶液及加入质量分数1.0% MXene后的溶液表面张力进行测试，表3为表面张力测试结果。从表3可以看出，MXene的加入使溶液的表面张力有一定程度的减小，从30.54 mN/m降至27.21 mN/m。这种表面张力的降低有利于改善纺丝过程。在相同电压下(此时电荷密度也相同)，表面张力的减小使液滴更易被拉伸形成射流。同时，在射流运动过程中，表面张力引起的收缩作用减弱，从而使所纺出的纤维直径更均匀，串珠纤维所占比例也会相应减小。电场力与表面张力的合力增大，导致射流拉伸作用增强，纤维直径也会随之减小。MXene能够降低PCL溶液表面张力，这可能与其表面特性有关。MXene表面存在大量的极性官能团(如—OH、—O等)，这些官能团与溶剂THF之间具有较强的相互作用，能够降低溶液表面的自由能，从而导致表面张力减小。

表3 表面张力测试结果

Tab.3 Surface tension test results

w_{PCL}/%	w_{MXene}/%	表面张力/(mN·m^{-1})
15.0	0	30.54
15.0	1.0	27.21

2.2 纺丝电压对PCL纤维的影响

2.2.1 纤维直径

在静电纺丝过程中，纺丝电压是影响射流形成和纤维形态的关键参数之一。电场力与表面张力的合力驱动射流的拉伸和固化。根据现有理论，在一定电压范围内，纤维直径通常随电压的增大而减小，但是当电压超出适宜范围时，可能导致射流不稳定，进而影响纤维的均匀性和直径分布。本研究选取电压范围为20~30 kV、质量分数为15.0%的PCL溶液进行静电纺丝，分析所得纤维平均直径随纺丝电压的变化关系。图3为不同纺丝电压下制备的PCL纤维的SEM照片。图4为纺丝电压对PCL纤维直径的影响。从图3和图4可以看出，在20~26 kV电压范围内，纤维平均直径呈逐渐减小趋势。20 kV时，纤维直径较大，随着电压升至26 kV，直径降至最低值。这一现象可归因于电压增加时纺丝驱动力增强，促进射流的充分拉伸。然而，当电压进一步升高至28 kV时，纤维直径反而增大。可能的原因如下：一是过高电压导致射流拉伸过度，在固定接收距离下射流飞行时间缩短，纤维未及完全固化即被收集；二是高电压可能诱发射流不稳定，如过度分裂或弯曲，从而降低纤维均匀性并增大直径。

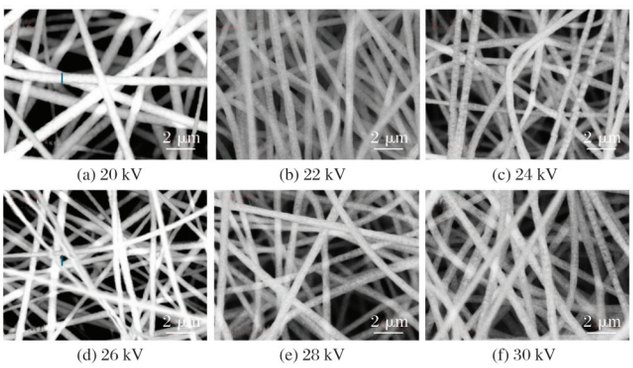


图3 不同纺丝电压下制备的PCL纤维的SEM照片(10 000×)

Fig.3 SEM images of PCL fibers prepared under different spinning voltages (10 000×)

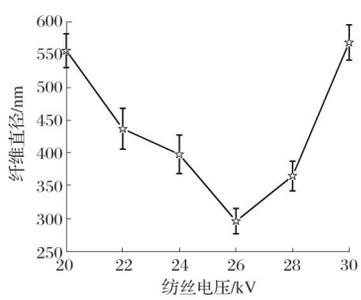


图4 纺丝电压对PCL纤维直径的影响

Fig.4 Effect of spinning voltage on PCL fiber diameter

为验证电压的最优性，对质量分数15.0%的PCL纺丝液在26 kV、接收距离25 cm工艺下制备的纤维直径进行统计。图5为15.0% PCL纤维直径分布。从图5可以看出，纤维直径大致符合正态分布规律。这表明26 kV电压下纤维直径分布集中，均匀性优良，进一步证实26 kV是该体系下较为适宜的纺丝电压。

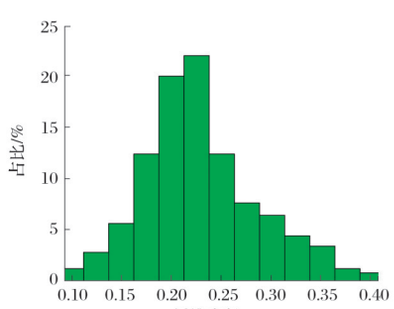


图5 15.0% PCL纤维直径分布

Fig.5 Diameter distribution of 15.0% PCL fiber

2.2.2 热性能

实验通过对不同电压下所得纺丝试样进行升温过程的跟踪，研究纺丝电压对PCL纤维热性能的影响。图6为不同纺丝电压下制备的PCL纤维的DSC曲线。从图6可以看出，随着纺丝电压的增加，纺丝试样的熔融吸热峰先向

右移再向左移。出现这种变化的原因可能是射流在外加纺丝电压所产生的电场力作用下，高分子链段会发生取向而呈现有序的结构[24-25]。在较低电压范围内，电压升高使得分子链取向度提高，形成的晶体相对完善，熔点升高，表现为熔融峰右移；随着纺丝电压值的进一步增大，取向作用越明显，体系成核过程变得迅速而简单，成核数目逐渐增多，由于晶核数目越多形成的晶体就越不完善(晶体尺寸较小，缺陷较多)，因而这些晶体对应的熔点随着纺丝电压的增加便呈现出下降的趋势，即熔融峰左移。

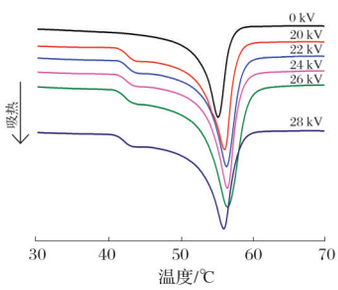


图 6 不同纺丝电压下制备的 PCL 纤维的 DSC 曲线

Fig.6 DSC curves of PCL fibers prepared under different spinning voltages

2.2.3 相对结晶度

图 7 为不同纺丝电压下制备的 PCL 纤维的相对结晶度。从图 7 可以看出，随着纺丝电压的升高，纤维的相对结晶度呈现先升高后降低的趋势，在 26 kV 时达到最大值，这一趋势与熔融峰的偏移规律具有显著相关性。

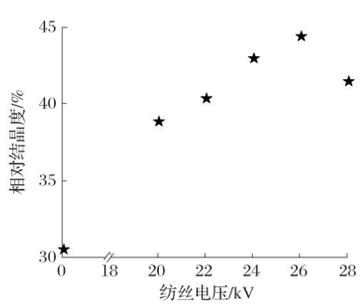


图 7 不同纺丝电压下制备的 PCL 纤维的相对结晶度

Fig.7 Relative crystallinity of PCL fibers prepared under different spinning voltages

结合分子链取向与晶体形成机制，可进行如下解释：在较低电压范围(20~26 kV)，随着纺丝电压的升高，电场力对射流的拉伸作用逐渐增强，促使 PCL 分子链沿射流运动方向的取向度逐步增强。有序的分子链取向为晶体生长提供规整的模板，有利于分子链段的紧密堆砌与晶格完善，从而促进晶体的均匀生长，熔融焓升高，表现为相对结晶度随电压的升高而增加。这与该阶段熔融峰右移(晶体完善度提高)的现象一致，印证取向作用对晶体生长的促进效应。当电压超过 26 kV 后，相对结晶度反而随电压的升高而下降。这是由于过高的电场力使分子链过度取向。一方面，强拉伸作用使分子链刚性增加，链段运动受限，难以进一步调整排列以形成更完善的晶体；另一方面，过度取向可能引发分子链局部断裂或扭曲，破坏晶体生长的连续性。尽管此阶段射流中可能因强取向产生更多晶核，但晶核数目过多反而导致晶体生长空间受限，形成的晶体尺寸较小、缺陷增多(即晶体完善度下降)，整体结晶有序性降低，最终表现为相对结晶度的下降。这一结果与高电压下熔融峰左移(晶体不完善)的特征相互印证，揭示纺丝电压通过调控分子链取向与晶体生长过程，对 PCL 纤维热结晶行为产生的规律性影响。

2.3 MXene 对 PCL 纺丝纤维的影响

2.3.1 热性能

图 8 为添加 MXene 前后 PCL 纤维的 DSC 曲线。从图 8 中可以看出，MXene 的加入使静电纺超细纤维熔融吸热温度增加。这可能由两方面原因决定：一方面，MXene 具有优异的热性能，它的加入既能增加聚合物分子链间的作用力，又能通过自身的热传导作用提高聚合物的热性能；另一方面，MXene 具有良好的导电性，加入聚合物中后，聚合物导电性有一定的提高，在电场中分子链的取向作用增加，而取向有利于结晶，因此纤维的相对结晶度得到提高，熔融吸热温度提高。同时，MXene 的存在可能起到异相成核剂的作用，促进 PCL 晶体的形成和生长，形成更完善的晶体，从而导致熔点升高。此外，MXene 与 PCL 分子链之间的相互作用也可能限制分子链的运动，提高晶体的稳定性，进而使熔点上升。

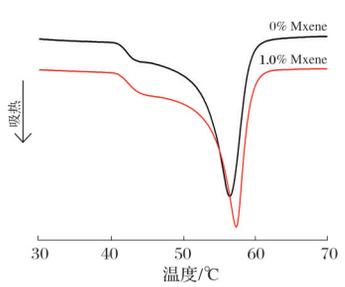


图 8 添加 MXene 前后 PCL 纤维的 DSC 曲线

Fig.8 DSC curves of PCL fibers before and after MXene addition

2.3.2 力学性能

图 9 为 MXene 对 PCL 纤维力学性能的影响。从图 9 可以看出，添加质量分数为 1.0% 的 MXene 后，PCL 纳米纤维的弹性模量与拉伸强度均显著提升。PCL 纳米纤维的弹性模量约为 1.8 MPa，拉伸强度约为 0.7 MPa；而添加质量分数为 1.0% 的 MXene 后，弹性模量增至约 2.6 MPa，拉伸强度升至约 1.0 MPa。这一增强效应可归因于 MXene 与 PCL 基体的协同作用。MXene 有高本征模量与优异的力学性能，其均匀分散于 PCL 纤维中时，既通过界面相互作用有效传递应力，抑制分子链滑移，又以片层结构构建“支撑网络”阻碍裂纹扩展，从而协同提升复合材料的刚性与拉伸承载能力[26-27]。

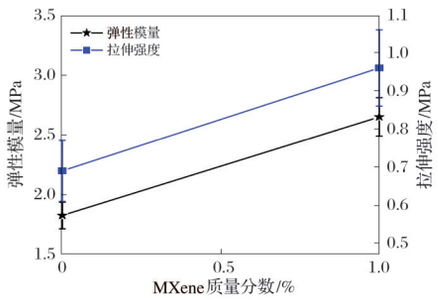


图9 MXene对PCL纤维力学性能的影响

Fig. 9 Effect of MXene on mechanical properties of PCL fibers

3 结论

通过静电纺丝成功制备功能化PCL/MXene杂化超细纤维，揭示溶液性质与工艺参数对纤维结构与性能的协同调控机制。研究发现，MXene的引入不仅改善纤维的形貌均匀性，还显著提升其热性能与力学强度。这归因于MXene优异的导电性、热传导性及与PCL分子链的界面作用。在PCL质量分数为15.0%、MXene质量分数为1.0%、纺丝电压为26 kV的优化工艺条件下可获得综合性能优异的纤维材料。研究结果为可降解高分子与二维材料的复合化提供有效途径，为其在生物医学、环境保护及柔性电子等领域的应用奠定基础。

参考文献

[1] 唐浩, 钟倩, 吴洪瀚, 等. 3D打印生物可吸收聚酯支架用于骨再生治疗[J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(20): 5304-5311.

[2] 陈武祥, 常显涛, 耿亚婷, 等. 医用聚己内酯/滑石粉形状记忆交联复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2026, 43(3): 1485-1495.

[3] 郭伊霖, 赵春草, 薛嫚, 等. 聚酯类生物降解型聚合物在医疗美容中的应用进展[J]. 中国皮肤性病学杂志, 2023, 37(12): 1436-1443.

[4] GOHIL M, JOSHI G. Perspective of polycarbonate composites and blends properties, applications, and future development: A review[M]// Green Sustainable Process for Chemical and Environmental ENgineering and Science. Amsterdam: Elsevier, 2022.

[5] ZHU Y, YU R H, WANG S D, et al. Unexpected core-shell char from polycarbonate/polyborosiloxane composites and its application in improving flame retardancy[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 136742.

[6] 柳小军, 商雨情, 管文超, 等. 负载钛酸钙取向性静电纺聚己内酯/丝素蛋白支架促进周围神经再生[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(28): 6070-6082.

[7] 侯君孝, 王羽, 唐璐, 等. 精加工聚丙交酯及聚己内酯基心血管支架研究进展[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 26-33.

[8] 田家宇, 李多华, 张锋, 等. 构建聚己内酯/纳米金刚石-磷脂复合材料及性能评价[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(16): 3380-3387.

[9] 张琼. 纳米蒙脱石改性聚乳酸/聚己内酯复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(1): 80-83.

[10] 花蕾. 长、短碳纳米管改性PCL柔性复合材料[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 21-28.

[11] 郑革, 陈杰, 林恩顺, 等. MXene/Cu界面协同增强铝基复合材料性能[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2025, 47(4): 162-173.

[12] 李冠廷, 严明龙, 赵文杰. MXene改性防腐涂层: 表界面调控及其防腐机制[J]. 材料保护, 2025, 58(8): 1-15.

[13] 孙莎莎, 黄卫春, 王梦可. 二维MXenes的界面调控机制及其应用研究进展[J]. 无机化学学报, 2025, 41(8): 1465-1482.

[14] 庞新语, 陈健, 乔轩, 等. MXene/聚吡咯复合材料的制备及其超级电容器性能研究[J]. 功能材料, 2025, 56(7): 7126-7134.

[15] MURALI G, REDDY MODIGUNTA J K, PARK Y H, et al. A review on MXene synthesis, stability, and photocatalytic applications[J]. ACS Nano, 2022, 16(9): 13370-13429.

[16] LI X L, HUANG Z D, SHUCK C E, et al. MXene chemistry, electrochemistry and energy storage applications[J]. Nature Reviews Chemistry, 2022, 6(6): 389-404.

[17] GAUTAM R, MARRIWALA N, DEVI R. A review: Study of Mxene and graphene together[J]. Measurement: Sensors, 2023, 25: 100592.

[18] 单杨, 段荣霞, 赵芳, 等. MXene基材料在电磁屏蔽领域研究进展[J/OL]. 材料工程, 1-19[2025-09-16]. https://link.cnki.net/urlid/11.1800.tb.20250710.1307.002.

[19] WU J H, HU T G, WANG H, et al. Electrospinning of PLA nanofibers: Recent advances and its potential application for food packaging[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(27): 8207-8221.

[20] CHO Y, BEAK J W, SAGONG M, et al. Electrospinning and nanofiber technology: Fundamentals, innovations, and applications[J]. Advanced Materials, 2025, 37(28): 2570190.

[21] 徐杰, 刘向东. 多孔纤维的制备及应用研究进展[J]. 化工学报, 2026, 77(2): 623-633.

[22] WANG Y, WANG C. Extension rate and bending behavior of electrospinning jet: The role of solution conductivity[J]. Polymer, 2021, 222: 123672.

[23] LI X B, WANG S, ZHENG M Y, et al. Synergistic integration of MXene nanostructures into electrospun fibers for advanced biomedical engineering applications[J]. Nanoscale Horizons, 2024, 9(10): 1703-1724.

[24] 苏澳旗. 静电纺丝复合纳米纤维膜的制备及其性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2025.

[25] 韩琳, 陶林娜, 潘其营, 等. 静电纺丝三明治结构纤维膜的可控制备及其电化学性能[J]. 塑料科技, 2022, 50(5): 39-42.

[26] XIANG H F, ZHANG F, ZOU B L, et al. High-performance lithium batteries achieved by electrospun MXene-Enhanced cation-selective membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 704: 122867.

[27] RENKLER N Z, BABAR Z U D, BARRA M, et al. Optimizing electrospun PVA fibers with MXene integration for biomedical applications[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2025, 310 (7): 2400433.