

基于 VOSviewer 可视化分析芳纶纳米纤维的研究进展



高培议¹, 崔浩然², 霍思静¹, 刘丰嘉¹, 牛世元², 王卉卉¹, 耿赛^{2,*}

¹ 青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东青岛 266061

² 青岛科技大学化工学院, 山东青岛 266061

摘要: 芳纶纳米纤维 (ANFs) 是一种新型的高分子纳米纤维材料, 其具有宏观芳纶纤维的各项优异性能, 同时其纳米材料比表面积大、质轻高强, 因而被广泛应用。本文通过文献计量的研究方法, 检索 2013-2022 年 Web of science 数据库及 CNKI 数据库中有关芳纶纳米纤维研究的相关文献信息, 采用 VOSviewer 计量分析软件可视化分析近十年间相关文献中关键词、发文量、高被引频次、合作关系及共词聚类等信息变化趋势, 剖析近年来芳纶纳米纤维材料领域的研究态势, 总结阐述芳纶纳米纤维的研究现状、进展和研究热点。分析结果表明, 芳纶纳米纤维材料是一个新兴的材料研究领域, 自 2018 年起发文量呈指数型增长, 2019-2022 年间的发文量约占研究期内总量的 81%, 相关研究多刊载在 ACS NANO, ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS, NANOSCALE 等期刊上, 具有较高的学术研究价值。芳纶纳米纤维的热点研究领域多集中于复合薄膜材料及其力学性能等方面。各种不同的研究热点之间联系十分密切, 有较强的关联性和互补性。

关键词: 芳纶纳米纤维; 可视化分析; 复合薄膜; 力学性能

DOI: 10.57237/j.mater.2023.02.002

Research Progress in Visualization Analysis of Aramid Nanofibers Based on VOSviewer

Peiyi Gao¹, Haoran Cui², Sijing Huo¹, Fengjia Liu¹, Shiyuan Niu², Huihui Wang¹, Sai Geng^{2,*}

¹ Polymer Science and Engineering College, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China

² Chemical Engineering Institute, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: Aramid nanofiber (ANFs) is a new type of polymer nanofiber material, which has various excellent properties of macro aramid fibers. At the same time, its nanomaterials have a large specific surface area, light weight, and high strength, and are widely used. This article uses bibliometric research methods to search for relevant literature information on aramid nanofiber research in the Web of Science database and CNKI database from 2013 to 2022. VOSviewer econometric analysis software is used to visually analyze the trend of information changes in keywords, publication volume, high citation frequency, cooperative relationships, and co word clustering in relevant literature over the past decade, and to analyze the research trend in the field of aramid nanofiber materials in recent years, Summarize and elaborate on the research status, progress, and research hotspots of aramid nanofibers. The analysis results indicate that aramid nanofiber materials are an emerging field of material research, with an exponential increase in publication volume since 2018. From 2019 to 2022, the publication volume

*通信作者: 耿赛, gengsai@qust.edu.cn

accounted for approximately 81% of the total amount during the research period. Relevant research is mostly published in journals such as ACS NANO, ADVANCED FINAL MATERIALS, NANOSCALE, and has high academic research value. The hot research field of aramid nanofibers mostly focuses on composite thin film materials and their mechanical properties. There is a strong correlation and complementarity between various research hotspots.

Keywords: Aramid Nanofibers; Visual Analysis; Composite Film; Mechanical Property

1 引言

随着加工原材料和零部件等下游产业的快速发展, 芳纶纳米纤维 (ANFs) 的市场需求将持续攀升, 行业发展前景将更加广阔。作为一种良好的纳米尺度构建基元, ANFs 能与其他聚合物/无机物复合制备功能性纳米材料, 这使其在高温防护、复合增强材料、吸附材料、过滤材料、红外隐身、锂电池隔膜等多个领域都拥有广阔的应用前景, 因此近年来针对 ANFs 基复合材料的研究已经成为材料领域的研究热点之一。

芳纶纳米纤维 (ANFs) 是一种新型纳米材料, 它既具有芳纶纤维优异的强度、模量等性能, 兼具比表面积大、高长径比等优点。同时, 因为它表面暴露着许多极性基团, 使其反应活性增大, 能够通过效应力传递来改善聚合物性能, 因此用芳纶纳米纤维所制成的橡胶具有各种优异的性能。芳纶纳米纤维在保留了宏观纤维在热稳定性和高结晶度方面优异性能的同时, 其纳米尺度又为纤维提供了更大的比表面积, 使得芳纶纳米纤维表面具有很多活性官能团, 可以作为结合位点去与其他纳米材料结合。芳纶纳米纤维的特性来自于芳香族结构和酰胺键, 它们通过氢键相互作用, 从而形成线型的刚性直链, 产生有效的晶体微区, 导致高的结晶性和内聚能, 从而显现出优异的力学性能。由于其具有低密度、高阻燃、高绝缘、耐高温等特性, 在轻质结构、高温防护、电气绝缘材料领域得到了广泛的研究与应用[1-7]。芳纶纳米纤维还因具有优异的机械性能、耐高温、柔韧性高, 在聚合物增强、电池隔膜和柔性电极等领域也有着良好的应用潜力和前景[8-10]。

作为一种新型纳米填料, 芳纶纤维的杨氏模量为 90GPa, 抗拉强度为 3.6GPa, 具有优异的力学性能以及高强度, 高模量, 低密度, 尺寸稳定性好等优点, 因此被广泛应用于制备纤维, 橡胶复合材料, 纤维增强的橡胶复合材料广泛应用于轮胎、输送带、胶管等承载耐压的橡胶制品以及轮胎帘线或诸如垫圈和离合器衬里的汽车部件, 以及用于航空航天设备、军用运

输等诸多领域[11-14]。

2 基于 VOSviewer 的芳纶纳米纤维文献研究的可视化分析

2.1 近十年发文量变化分析

本文基于中国知网 (CNKI) 和 Web of Science (WOS) 数据库, 以“芳纶纳米纤维”和“Aramid nanofibers”为检索词, 共在中国知网筛选出相关文献 37 篇, WOS 348 篇, 以此为样本进行分析。图 1 为 2013-2022 年每年发文量的趋势图。由图可知, 2013-2017 年间 WOS 数据库的发文量缓慢上升, 芳纶纳米纤维研究处于初步发展阶段; 2017-2022 年间与芳纶纳米纤维相关文章的发表量大幅上升, 表明研究热度持续升高, 芳纶纳米纤维的优异性能已被发掘。其中 2020-2022 期间发文量增长率达到 87%, 研究处于快速发展阶段, 说明近两年关于芳纶纳米纤维的研究理论正在进行当中, 研究热度持续高涨。

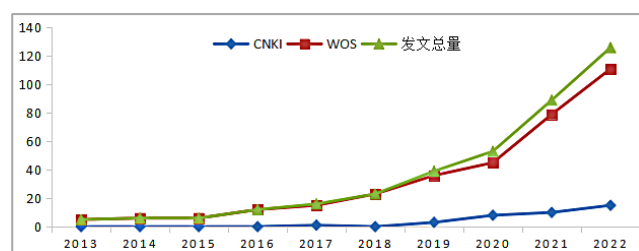


图 1 2013—2022 年每年发文量的趋势图

2.2 被引频次变化分析

文献的被引频次在一定程度上反映了文章的质量和研究的热点, 通过对其进行分析可以明确该领域较为热门的研究方向, 并为后续工作和研究提供参考。

表 1 列出了 CNKI 数据库中 Top10 的高引文献,

其发表时间集中在 2020—2022 年之间。CNKI 数据库有关“芳纶纳米纤维”的中文文献被引次数总体处于较低水平，其中来自陈健（第一作者）在 2020 年发表于中国造纸学报的文章《芳纶纳米纤维及其复合材料研究进展》被引次数最多，为 19 次。

表 1 CNKI 数据库中发表时间在 2020—2022 年之间 Top10 的高引文献

序号	文献名	第一作者	来源	发表年	被引频次
1	芳纶纳米纤维及其复合材料研究进展	陈健	中国造纸学报	2020	19
2	对位芳纶纳米纤维复合膜的制备与性能研究	庾星星	武汉纺织大学	2017	15
3	基于芳纶纳米纤维的芳纶纳米纸结构与性能研究进展	杨斌	中国造纸	2020	10
4	芳纶纳米纤维涂布增强间位芳纶纸性能研究	李卫卫	中国造纸	2021	6
5	连续制备柔性导热的氮化铝/芳纶纳米纤维复合薄膜	曾繁展	复合材料学报	2020	4
6	芳纶纳米纤维/碳纳米管复合材料的制备与性能研究	曹文鑫	哈尔滨工业大学	2019	4
7	芳纶纳米纤维纸的制备及其紫外老化性能研究与应用	罗晶晶	陕西科技大学	2019	4
8	加工芳纶纳米纤维/聚乙烯醇水凝胶制备高强度复合薄膜	李小林	复合材料学报	2021	3
9	芳纶纳米纤维在白炭黑/溶聚丁苯橡胶复合材料中的应用	张寒珠	弹性体	2022	2
10	轻质高强芳纶纳米纤维/聚酰亚胺复合气凝胶的制备及性能	卓海龙	精细化工	2021	1

表 2 列出了 WOS 数据库中 Top10 的高引文献，其发表时间集中在 2017—2020 年。英文文献的研究深度和热度较中文期刊有显著提高，WOS 中检索出的 348 篇文献共被引用 6990 次，平均每篇文献被引 20.26 次。来自马忠雷于 2019 年发表的文章《High-Performance and Rapid Response Electrical Heaters Based on Ultraflexible, Heat Resistant, and Mechanically Strong Aramid Nanofiber/Ag Nanowire Nanocomposite Papers》被引次数最多，达到 221 次。马忠雷通过真空辅助过

滤工艺将一维超长羟基磷灰石（HAP）纳米线和芳纶纳米纤维（ANF）协同集成，报告了一种具有高介电击穿强度和机械强度的高柔性、热稳定性和阻燃纳米复合纸。多功能 HAP/ANF 纳米复合纸在小型化和柔性电子器件、高压电绝缘设备以及阻燃和高温领域具有广阔的应用前景。由表 2 可知，被引频次排名前 10 的文献作者超过半数来自中国，表明中国在芳纶纳米纤维研究领域的国际贡献度很高。

表 2 被引频次排名前 10 的文献作者

序号	文献名	第一作者	来源	发表年	被引频次
1	High-Performance and Rapid-Response Electrical Heaters Based on Ultraflexible, Heat-Resistant, and Mechanically Strong Aramid Nanofiber/Ag Nanowire Nanocomposite Papers	Ma, ZL	ACS NANO	2019	221
2	Multifunctional Aramid Nanofiber/Carbon Nanotube Hybrid Aerogel Films	Hu, PY	ACS NANO	2020	184
3	Highly Compressible, Thermally Stable, Light-Weight, and Robust Aramid Nanofibers/Ti ₃ AlC ₂ MXene Composite Aerogel for Sensitive Pressure Sensor	Wang, L	ACS NANO	2020	158
4	Strong and Stiff Aramid Nanofiber/Carbon Nanotube Nanocomposites	Zhu, JQ	ACS NANO	2015	155
5	Janus (BNNS/ANF)-(AgNWs/ANF)thermal conductivity composite films with superior electromagnetic interference shielding and Joule heating performances	Han, YX	NANO RESEARCH	2022	151
6	Mechanically Strong Graphene/Aramid Nanofiber Composite Electrodes for Structural Energy and Power	Kwon, SR	ACS NANO	2017	147
7	Fabrication, Applications, and Prospects of Aramid Nanofiber	Yang, B	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	2020	138
8	Reactive Aramid Nanostructures as High-Performance Polymeric Building Blocks for Advanced Composites	Cao, KQ	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	2013	134
9	Ultrathin MXene/aramid nanofiber composite paper with excellent mechanical properties for efficient electromagnetic interference shielding	Xie, F	NANOSCALE	2019	131
10	Timesaving, High-Efficiency Approaches To Fabricate Aramid Nanofibers	Yang, B	ACS NANO	2019	123

2.3 作者及其合作关系

WOS 数据库中的 348 篇文献共有 1361 个作者，发文量最多的作者为为中国学者陆赵情，共发表相关文章 27 篇。发文量排名前十的作者 60% 为中国的学者，可见中国在该领域的研究力量较强。图 2 是近十年芳纶纳米纤维相关研究主要学者合作关系图，图中球的大小代表发文量，颜色和距离代表相互合作的紧密关系，可以看出以陆赵情、张美云、黄玉东、Kotov Nicholas (Kotov Nicholas)、庾新林、Lutkenhaus jodie (Lutkenhaus Jodie L.)、贾红兵为代表的 7 个核心作者群，他们的主要发文量和被引频次如图 3 所示。由图可知，陆赵情发文数量 27 篇，引用频次 634 次，其被引频次最高的一篇文章是《Fabrication, Applications, and Prospects of Aramid Nanofiber》，为 151 次。作者在文中阐释了‘芳族聚酰胺

纳米纤维 (ANF) 作为一种一维纳米材料，其在高长宽比，高比表面积，出色的强度和模量以及化学和热稳定性方面的优异性能。被认为是具有优异性能的最有前途的纳米构建基块之一而受到广泛关注。文章同时综述了 ANF 在纳米复合材料增强，电池隔膜，电绝缘纳米纸，柔性电子以及吸附和过滤介质中的应用，重点介绍了 ANF 的未来发展可能面临的挑战和前景。张美云发文数量 18 篇，引用频次 811 次；黄玉东发文数量 14 篇，引用频次 315 次；kotov Nicholas (Kotov Nicholas) 发文数量 12 篇，引用频次 1139 次；庾新林发文数量 12 篇，引用频次 245 次；Lutkenhaus jodie L (Lutkenhaus Jodie L.) 发文数量 12 篇，引用频次 399 次；贾红兵发文数量 9 篇，引用频次 83 次；这些作者是芳纶纳米纤维研究领域的高产和高引用学者。

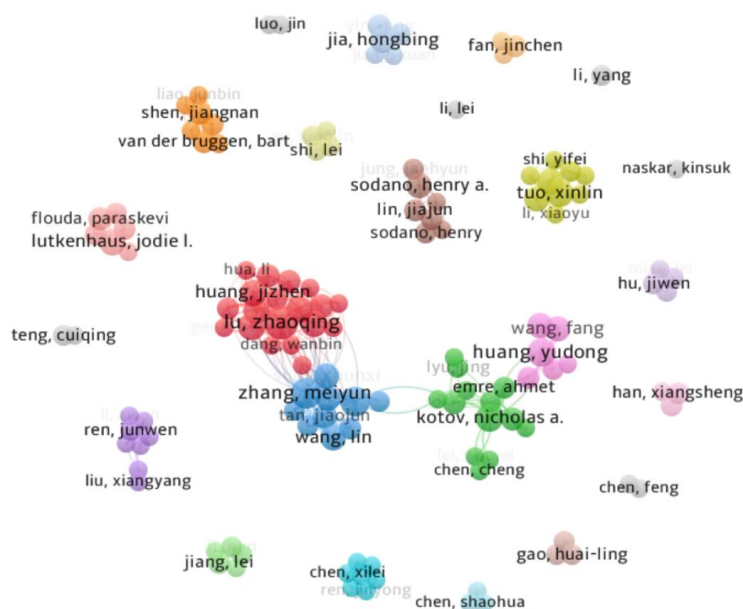


图 2 2013-2022 年 WOS 数据库中主要学者合作关系图

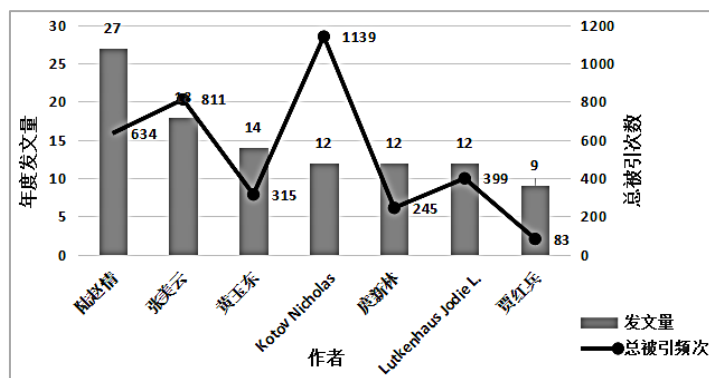


图 3 芳纶纳米纤维研究领域前 7 位高产作者发文及被引情况

2.4 研究热点分析

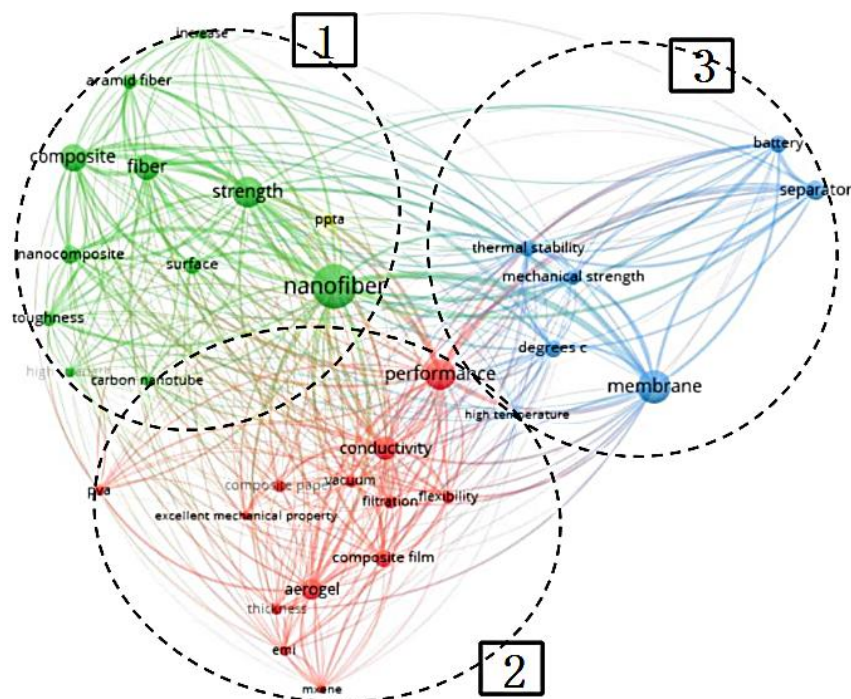


图 4 2013-2022 年 WOS 数据库中高频关键词的共现网络

关键词是文章高凝练的点,从根本上反应文章的主要内容,出现频率越高的关键词则说明在此研究方面占据着越高的地位。基于 VOSviewer 软件可视化分析“Aramid nanofibers”研究中的关键词,共有 8474 个关键词,其中频次出现 20 次以上的关键词共有 67 个。如图 4 所示被分为了三个聚类,且同一聚类的关联性较大。

1 号聚类出现频次较高的关键词有 nanofiber(纳米纤维)、composite(复合材料)、fiber(纤维)、strength(力)、nanocomposite(纳米复合材料)等,这一部分主要是对芳纶纳米纤维的复合材料的研究。研究表明,芳纶纳米纤维具有优异的力学性能以及高强度,高模量,低密度,尺寸稳定性好等优点,因此被广泛应用于制备橡胶复合材料,纤维增强的橡胶复合材料广泛应用于轮胎、输送带、胶管等承载耐压的橡胶制品。郇秀竹在芳纶纳米纤维/MXene/硅橡胶复合材料的制备及其电磁屏蔽应用一文中提出以芳纶纳米纤维作为气凝胶的增强材料,然后再回填硅橡胶进而制备出芳纶纳米纤维/MXene/硅橡胶复合材料的方法,得到了一种具有高电磁屏蔽性能、柔韧性、轻质、耐候等优良性能的电磁屏蔽复合橡胶材料。张寒珠等人研究了芳纶纳米纤维在白炭黑/溶聚丁苯橡胶复合材料中的应用,通过制备芳纶纳米纤维胶乳预分散体,将芳纶纳米纤

维应用于白炭黑/溶聚丁苯橡胶复合材料中,研究此种复合材料的性能发现,随着芳纶纳米纤维添加量的增加,复合材料的定伸应力和撕裂强度显著提高、损耗因子峰值显著减小。

2 号聚类出现频次较高的关键词有 performance(性能)、conductivity(电导率)、aerogel(气凝胶)、composite film(复合薄膜)、composite paper(复合纸)、thickness(厚度)等,这一部分主要是对芳纶纳米纤维复合物的性能的研究。而其中一个典型的研究热点是对复合薄膜力学性能的研究,马秦在芳纶纳米纤维基复合薄膜的强韧化及其机理研究中研究了聚乙烯醇辅助芳纶纤维纳米化及其复合薄膜的力学性能,结果表明:复合薄膜的拉伸强度随着 PVA 添加量的增加先增大后减小。其研究发现当 PVA 的添加量为 33 wt.%时,复合薄膜(ANF/PVA-II 薄膜)的最大拉伸强度可高达 283 MPa,相比于纯的 ANF 薄膜增强了 57%;其断裂伸长率为 17%,韧度为 32 MJ m^{-3} ,相比于纯 ANF 薄膜,分别提高了 65%和 152%。姜宽在凯夫拉纳米纤维复合薄膜的制备及性能研究中使用 KOH 对凯夫拉纤维分子进行去质子化,成功制备了凯夫拉纳米纤维/DMSO 分散液,根据水对凯夫拉纳米纤维的凝胶化作用,成功制备了 ANF 凝胶,利用真空辅助絮凝的方法制备了

ANF 薄膜, 并且研究了 ANF 凝胶动态流变性能以及 ANF 薄膜力学性能。最终 ANF 的 FTIR、Raman 和 XRD 测试表明 ANF 薄膜保留了凯夫拉纤维的结构, 进而保留了优异的力学强度。耿博等研究者在芳纶纳米纤维丝素蛋白复合薄膜的制备及其性能研究中发现 SF 的加入增强了 ANF 的界面相互作用, 层间粘附力也明显增大。骨质产生的微裂纹会导致局部膨胀并且会加强裂纹周围区域的柔韧性。ANF/SF 复合薄膜层间的纤维粘连现象与骨质结构类似, 因此具有比较相似的增韧机理。李小林、樊新波、王建锋在加工芳纶纳米纤维/聚乙烯醇水凝胶制备高强度复合薄膜中研究了 ANF 含量、预拉伸比对、水凝胶的化学交联对 ANF/PVA 复合薄膜力学性能的影响。所有研究都表明, 添加了芳纶纳米纤维的复合薄膜材料拉伸强度会有显著的提高, 层间粘附力增大, 柔韧性增强, 表现出更优异的力学性能

3 号聚类出现频次较高的关键词有 membrane (膜)、mechanical strength (机械强度)、thermal stability (热稳定性)、separator (分离器)、battery (电池) 等, 这一部分主要是关于膜的各种性能的研究。王灵晓等人在静电纺芳纶纳米纤维膜的制备及其过滤性能一文中提出了一种制备静电纺芳纶纳米纤维的方法, 并研究了这种材料特殊的膜滤性能, 发现制备出的膜具有较好的热稳定性和耐高温性质, 在耐高温过滤领域具有广阔的应用前景。

3 结语

芳纶因其高比模量、耐化学、低密度、高比强度、耐冲击等优异性能脱颖而出, 渐渐成为树脂基复合材料的增强相优选材料。针对芳纶表面改性的问题, 涂层技术受到了广泛的关注。通过在芳纶表面形成无机纳米粒子、聚合物或碳材料涂层, 在芳纶表面引入活性基团, 增加纤维的粗糙度以及表面活性, 随后获得高活性纤维, 进而提高复合芳纶材料的界面性能。芳纶纳米纤维是一种具有优良性能的纳米单元, 不但解决了芳纶纤维本身化学反应活性低且光滑的难题, 而且可以复合各种导电材料, 丰富了芳纶纳米纤维在各领域的进一步研究。但芳纶纳米纤维的表面仅有酰胺基团一种基团, 因此其结合能力较差, 需要加入交联剂来提高材料的稳定性。如何对芳纶纳米纤维表面进行活性处理仍需要进一步深入的研究。该文章综述了芳纶纳米纤维在复合薄膜制备中的应用与进展, 并通过制备 ANF 凝胶等说明了芳纶纳米纤维应用于与其他

复合薄膜制备后薄膜的拉伸强度等力学性能的增强。通过引入极性、多官能团的聚合物来实现 ANF 薄膜的增强增韧, 还可以对传统 ANF 复合薄膜的制备方法进行改进, 在宏观纤维纳米化过程中引入聚合物, 原位将聚合物负载在 ANF 表面, 制备复合分散液, 并组装成薄膜。基于良好的界面相互作用提升了 ANF 复合薄膜的力学性能。芳纶纳米纤维与其他材料制备的复合薄膜具有良好的柔性, 能够被反复地折叠且不易断裂, 其性能良好且应用广泛, 在相关领域的基础研究和实际应用中显示出无法估测的潜力[15, 16]。由于其具有质轻高强和设计性优良等特点被广泛应用于汽车工业、航空航天、防弹装甲等尖端领域。芳纶纳米纤维的表面改性方法值得相关研究人员进一步探索, 以扩大其在复合薄膜等其他领域的应用。

参考文献

- [1] 郇秀竹. 芳纶纳米纤维/MXene/硅橡胶复合材料的制备及其电磁屏蔽应用 [D]. 青岛科技大学, 2022.
- [2] 周君. 真空辅助过滤法制备 MXene/ANF 复合薄膜及其性能研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [3] 马秦. 芳纶纳米纤维基复合薄膜的强韧化及其机理研究 [D]. 陕西科技大学, 2022.
- [4] 程刊. 芳纶纳米纤维的制备及其功能化材料性能研究 [D]. 贵州大学, 2021.
- [5] 李小林, 樊新波, 王建锋. 加工芳纶纳米纤维/聚乙烯醇水凝胶制备高强度复合薄膜 [J]. 复合材料学报, 2021, 38 (12): 3986-3995.
- [6] 马秦, 司联蒙, 骆志荣, 陆赵情. 仿贝壳层状 MTM/PVA/ANF 复合薄膜的制备及其性能研究 [J]. 中国造纸学报, 2020, 35 (03): 15-20.
- [7] 曾繁展. 芳纶纳米纤维基复合材料的制备及其性能研究 [D]. 湖南工业大学, 2020.
- [8] 曾繁展, 陈宪宏, 王建锋. 连续制备柔性导热的氮化铝/芳纶纳米纤维复合薄膜 [J]. 复合材料学报, 2020, 37 (12): 3043-3051.
- [9] 一种壳聚糖/芳纶纳米纤维复合薄膜的制备方法 [J]. 高科技纤维与应用, 2019, 44 (06): 62.
- [10] 姜宽. 凯夫拉纳米纤维复合薄膜的制备及性能研究 [D]. 南京理工大学, 2020.
- [11] 邝青霞. 凯夫拉纳米纤维复合薄膜的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2016.

- [12] 耿博, 俄松峰, 马秦, 宁逗逗, 赵瑞霞, 田萃钰, 陆赵情. 芳纶纳米纤维/丝素蛋白复合薄膜的制备及其性能研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40 (06): 9-17.
- [13] 杨斌. 芳纶纳米纤维高效制备及其在纸基绝缘材料中的应用 [D]. 西北工业大学, 2019.
- [14] 张寒珠. 橡胶基芳纶纳米纤维复合材料的制备及性能研究 [D]. 青岛科技大学, 2022.
- [15] 王灵晓, 徐桂龙, 唐敏, 梁云. 静电纺芳纶纳米纤维膜的制备及其过滤性能 [J]. 现代纺织技术, 2023, 31 (01): 136-144.
- [16] 刘箐箐, 吴德敏, 沈梦霞, 段超, 戴磊, 童树华, 孟育, 华飞果. 芳纶纳米纤维基导电复合材料的发展与应用 [J]. 中国造纸, 2022, 41 (04): 107-117.