

基于 VOSviewer 可视化分析芳纶纤维表面改性的研究进展



刘旭¹, 崔浩然², 蔡维琪¹, 高培议¹, 孙清宇², 宁月婷², 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: 芳纶纤维是一种新型高科技合成纤维, 因其表面光滑且具有化学惰性, 通常使用物理或化学方法对纤维表面进行改性, 增强芳纶纤维复合材料的界面性能。本文通过文献计量的研究方法, 以 Web of Science 核心合集数据库为基础, 检索 2008-2022 芳纶纤维表面改性的相关文献, 采用 VOSviewer 计量分析软件对发文量、发文机构、高被引论文、合作关系及共词聚类分析, 剖析近年来芳纶纤维表面改性的研究态势, 阐述了芳纶纤维表面改性的研究现状、进展及其热点主题。结果表明, 芳纶纤维表面改性在全球范围内受到广泛关注, 自 2015 年起发文量呈指数式增长, 2015-2022 年间发文量约占研究期内总量的 85%。相关研究多刊载在 Polymer Composites, Applied Surface Science 及 Journal of Applied Polymer Science 等高水平期刊上, 具有较高的学术影响力。该领域的相关研究多集中在芳纶纤维表面改性的方法及其应用领域, 重点关注了纤维材料表面改性对其复合材料的结构性能影响。各研究主题之间联系紧密, 有较强的关联性和互补性。

关键词: 芳纶纤维; 改性; 复合材料; VOSviewer

DOI: [10.57237/j.se.2024.03.003](https://doi.org/10.57237/j.se.2024.03.003)

Research Progress on Surface Modification of Aramid Fibers Based on VOSviewer Visualization

Xu Liu¹, Haoran Cui², Weiqi Cai¹, Peiyi Gao¹, Qingyu Sun¹, Yueting Ning¹, Fengjia Liu¹, Shiyuan Niu², Huihui Wang¹, Sai Geng^{2,*}

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

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

Abstract: Aramid fiber is a new type of high-tech synthetic fiber, because of its chemically inert surface, the fiber surface is usually modified by physical or chemical methods to enhance the interface properties with aramid fiber composites. Based on the Web of Science core collection database, this paper uses the research method of bibliometric research to retrieve the relevant literature on surface modification of aramid fiber from 2008 to 2022, and uses VOSviewer econometric analysis software to analyze the research situation of surface modification of aramid fiber in recent years, and expounds the research status, progress and hot topics of surface modification of aramid fiber. The results show that the surface modification of aramid fiber has received widespread attention worldwide, with an exponential increase in publications since 2015, accounting for about 85% of the total during the study period from 2015

*通信作者: 耿赛, gengsai@qust.edu.cn

to 2022. Related research is mostly published in high-level journals such as Elsevier and Wiley, and has high academic influence. Most of the relevant research in this field focuses on the methods and applications of aramid fiber surface modification, focusing on the influence of fiber material surface modification on the structural properties of its composites. The research topics are closely related to each other, and have strong correlation and complementarity.

Keywords: Aramid Fiber; Modification; Composites, VOSviewer

1 引言

随着中国科技的不断发展，新材料的研究和应用日益受到重视。芳纶纤维，作为一种高性能的合成纤维，因其优异的物理和化学性能，已在众多领域得到广泛应用，包括航空航天、建筑、体育用品和汽车等。本文旨在通过对 2008 年至 2022 年期间发表的关于芳纶纤维表面改性研究的文献进行可视化分析，全面了解该领域的研究动态和发展趋势。这些研究为芳纶纤维的进一步开发和应用提供了有力的理论支撑和实践基础。

芳纶纤维因其高强度、轻质、耐热、耐腐蚀等优异性能[1]，已被广泛应用于各个领域。然而，因芳纶纤维的对称性和结晶度高，使得其横向的分子作用力变弱，同时芳纶纤维分子结构中含有大量的芳香环，不易发生位移，会使分子间的氢键变弱，在外力作用下极易发生断裂，表面极性较低，与其他材料的界面相容性较差，这在一定程度上限制了其在复合材料中的应用。因此，对芳纶纤维进行表面改性[2]，以改善其表面性能、提高其与其他材料的界面相容性以及使芳纶充分发挥其优异的力学性能，已成为该领域的研究热点。纵观 2008 年至 2022 年的研究文献，芳纶纤维表面改性的主要技术包括物理改性和化学改性[3]。前者主要包括 γ 射线辐射方法[4]、等离子体处理、激光处理等。这些方法主要通过改变纤维表面的形貌和粗糙度，提高纤维与基体的机械结合力，从而改善复合材料的性能。例如，等离子体处理不仅可以引入表面活性基团，提高纤维的表面极性，还可以改变纤维表面的形貌，提高纤维与基体的结合力。化学改性主要包括接枝、硅烷偶联剂处理、酸碱处理、表面刻蚀等[5]。这些方法主要通过在纤维表面引入新的化学基团，改变纤维的表面化学性质，提高纤维与基体的化学结合力，从而改善复合材料的性能。例如，接枝可以在纤维表面引入含有极性基团的聚合物，提高纤维的表面极性，改善纤维与基体的界面相容性。此外，

还有一些新的改性技术正在研发中，如纳米技术、生物酶处理等。这些新技术有望进一步提高芳纶纤维的表面性能，拓宽其在复合材料中的应用。

近年来，国内外有关学者对芳纶纤维应用及其表面改性的研究逐渐深入，探究表面改性的方法，各类文章的发表量逐年递增，但其内容多、涉及面广，且多是定性分析，系统的定量分析极少。因此，本文试图通过文献计量学的方法，对芳纶纤维应用及其表面改性领域的相关研究进行定量的分析，系统性梳理对于芳纶纤维表面改性研究的发展现状，并探讨其未来走向[6]。

2 分析方法

本文数据来源于 Web of Science 核心合集数据库，采用高级检索式：TS= (sludge AND brick) 进行检索，检索时间为 2008 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 25 日，共得到文献 342 篇。在此基础上，利用 Web of Science 文献检索报告及计量可视化工具 VOSviewer，绘制了年度发文被引、作者合作共现及关键词聚类网络等可视化图谱，全面梳理了芳纶纤维的改性和应用，能够为国内外研究工作提供借鉴和参考。

3 结果分析

3.1 年度发文分析

2008—2022 年，芳纶纤维应用与改性的研究领域一共发表 342 篇文章，总被引频次为 6867 次，篇均被引频次为 20.08 次，其年度变化趋势见图 1。

关于芳纶纤维应用与改性的相关研究始于 2008 年，自 2011 年后该领域内的文章开始逐年增多，这与全球对新型纳米材料的关注密不可分。如图 1 所示，除了个别年份的发文量出现波动以外，芳纶纤维应用与改

性领域的文章是逐年递增的,且近几年发文量出现激增的态势。从总体上看,发文量的整个变化过程可以分为3个阶段:2008—2010年是芳纶纤维研究的发展初期,随着工业的发展以及轮胎等相关产业的转型,芳纶纤维开始受到相关学者的关注,关于芳纶纤维应用与表面改性的文章也开始发表,但此阶段的文章数量不足20篇,平均1年发表5-6篇文章,没有明显增长趋势。2010—2016年处于起步阶段,开始有更多学者进行该领域的研究,发文量逐年增加,从7篇(2008年)增长到16篇(2015年)。2016—2022年关于芳纶纤维应用与改性的研究飞速发展,论文数量显著增加,增长速度快于上个阶段,并在2022年达到62篇。至2023年7月25日,该领域发文量为19篇,增长不多,可能由于芳纶纤维改性技术遇到了瓶颈,需要科研人员投入更多精力研发出新的技术。近年来,芳纶纤维的应用及改性问题已经成为中国乃至世界关注的重点,各国、各地方都出台了相关政策,关于芳纶纤维表面改性的研究定会突破瓶颈,越来越深入,发文量也会逐年增加。

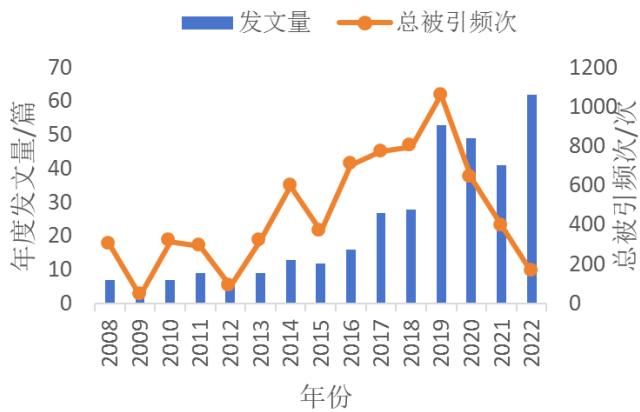


图1 Web of Science 数据库中 2008—2022 年芳纶纤维表面改性研究相关文章的年度变化趋势

被引频次总体上看呈逐年增高的趋势,这是任何发展中的研究该有的表现。值得指出的是,2019年该领域发表了53篇文章,共计被引频次为1062次,为整个阶段中被引频次最高的年份,说明2019年的研究具有突破性,之后的研究大多是在2019年研究成果的基础上进行的。

3.2 国家发文分析

芳纶纤维的应用与改性领域发文量前10位的国家如图2所示。中国、美国、印度和英国在该领域的发

文量与总被引频次均排在前列。发文总量最多的是中国,在2008—2022年间共发表文章223篇,总被引频次为4560次,平均每篇被引20.45次。对于各个国家发文的篇均被引频次,孟加拉国的篇均被引频次高达110次,位列第一,说明在芳纶纤维应用与改性领域孟加拉国发表的文章比较有权威性和代表性,质量较高。此外,德国及美国紧随其后,其篇均被引频次分别是43.75,38.67次。值得指出的是,虽然中国在该领域发文及总被引频次均位于首位,但其篇均被引频次仅为20.45次,排名第10位,这表明中国在此领域的学术影响力仍有待加强。

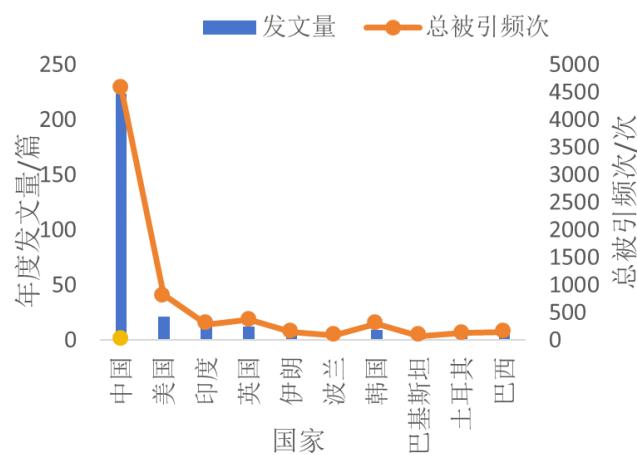


图2 2008—2022年芳纶纤维应用与改性研究领域发文量前10位的国家

3.3 发文机构分析

表1展示了2008—2022年芳纶纤维应用与改性研究领域发文量排名前10位的机构。Sichuan University (四川大学)以23篇的发文量位居高产机构的榜首,发文量在10篇以上的还有Donghua University(东华大学)(20篇)、Chinese Academy Of Sciences (中国科学院)(16篇)、Beijing University Of Chemical Technology(北京化工大学)(15篇)、Guizhou University (贵州大学)(15篇)、Harbin institute of technology (哈尔滨工业大学)(10篇),Zhengzhou University (郑州大学)Beijing University Of Chemical Technology (北京化工大学)发文量虽不是最高,但篇均被引频次却高达46.4次,位列第一。此外,Sichuan University (四川大学)篇均被引次数也较高,为31.65次。

表 1 2008—2022 年芳纶纤维应用与改性领域发文量前 10 位的机构及被引情况

机构	发文量/篇	总被引频次/次	篇均被引频次/次	所属国家
Sichuan Univ	23	728	31.65	中国
Donghua Univ	20	190	9.50	中国
Chinese Academy Of Sciences	16	342	21.38	中国
Beijing Univ Of Chemical Technology	15	696	46.40	中国
Guizhou Univ	15	169	11.27	中国
Harbin Institute Of Technology	10	423	42.30	中国
Shanghai Univ Of Engineering Science	9	60	6.67	中国
Soochow Univ China	9	268	29.78	中国
Qingdao Univ Of Science Technology	8	173	21.63	中国
Army Engineering Univ Of Pla	7	51	7.29	中国

3.4 作者发文及合作关系分析

图 3 展示了 2008-2022 年 Web of Science 核心合集数据库中芳纶纤维表面改性研究领域前 10 位的高产作者。其中, 发文量最多的作者是 Liu, XY, 共发表文章 13 篇, 总被引频次为 309 次, 篇均被引频次为 23.78 次; 其次是 Tian, M 和 Wang, WC, 两者发表文章均 12 篇, 总被引频次均为 613 次, 篇均被引频次都是 51.08 次; 前 10 位高产作者中, 发文篇均被引频次最多的是 Tian, M 和 Wang, WC。Tian, M 和 Wang, WC (12 篇) 发文量虽然略低于 Liu, XY (13 篇), 但两者总被引频次和篇均被引频次均位列第一, 可以看出, Tian, M 和 Wang, WC 是芳纶纤维表面改性的领军者。发

文前 10 位的作者发文量均在 7 篇及以上, 一共 95 篇文章, 占该领域发文量总数的 27.8%, 说明该领域主要依赖于少数作者的深入研究, 其发展程度相对不足, 有待进一步完善。

图 4 展示了 2008-2022 年 WOS 数据库中在芳纶纤维表面改性领域发文超过三次的作者关系图, 共 91 名。由图 4 可以看出, 在芳纶纤维表面改性领域, 各学者主要以团队方式进行研究, 每个团队内作者联系紧密, 各个团队之间联系较少。图中, 超过 6 人的共有七个团队, 分别以 Lou, Z, Chen, XL, Liu, XY, Zhang, LQ, Yu, MH, Tang, C, Yang, X 为代表, 其中, Lou, Z 团队和 Chen, XL 团队、Zhang, LQ 团队和 Tang, C 团队联系较紧密, 有合作关系, 其余团队较为独立。

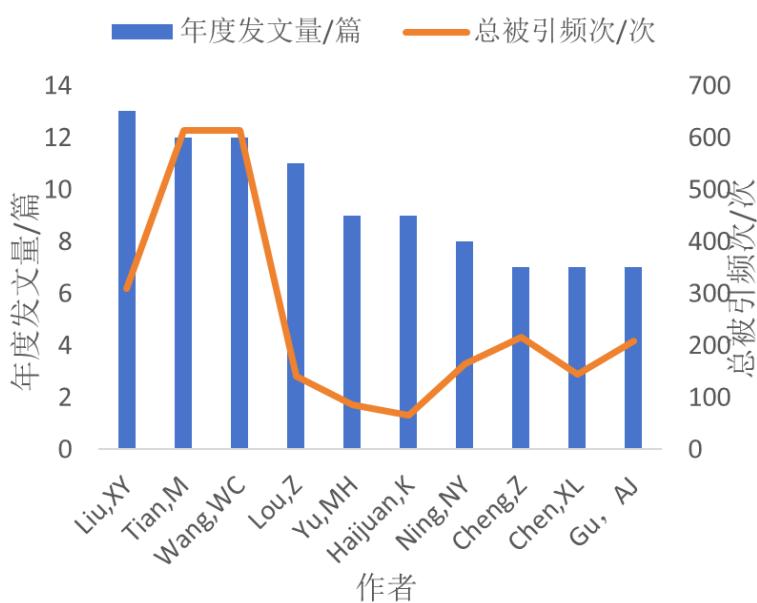


图 3 2008-2022 年芳纶纤维表面改性研究领域前 10 位的高产作者发文及被引情况

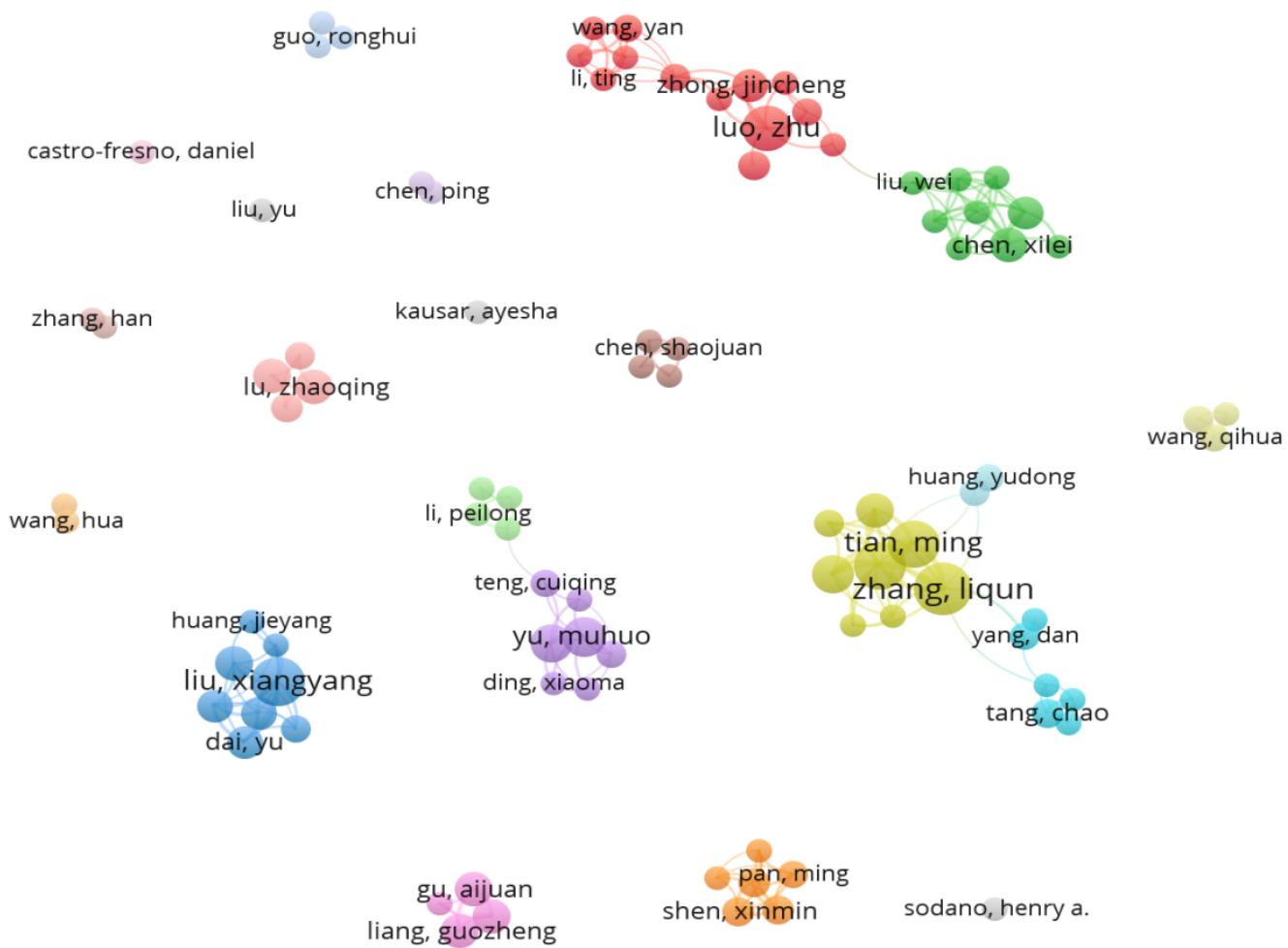


图 4 2008-2022 年芳纶纤维表面改性领域作者关系图

3.5 刊载期刊及高被引论文

表 2 展示了 2008-2022 年 Web of Science 核心合集数据库中该研究领域载文前 10 的期刊。由表 2 可知, 在芳纶纤维表面改性的研究中, 发文最多的期刊为 Polymer Composites, 发文量 18 篇, 占该领域总研究的 5.26%, 总被引次数为 145 次, 篇均被引频次为 8.06

次。Applied Surface Science 的篇均被引频次为 44.80, 在高发文期刊中位列第一。此外, 在发文前 10 的期刊中, 除了 Fibers and Polymers 和 Journal of Composite Materials, 其他期刊影响因子均大于等于 3, 具有较高的影响力, 说明芳纶纤维表面改性的相关研究处在科技的前沿。

表 2 2008-2022 年芳纶纤维表面改性研究领域代表性期刊发文量及被引情况

期刊	发文量/篇	总被引频次/次	篇均被引频次/次	影响因子
Polymer Composites	18	145	8.06	5.200
Applied Surface Science	15	672	44.80	7.392
Journal of Applied Polymer Science	15	219	14.60	3.000
Polymers	11	113	10.27	4.967
Composite Part a Applied Science and Manufacturing	9	338	37.56	9.463
Composites Part B: Engineering	8	268	33.50	11.322
Composites Science and Technology	8	260	32.5	9.100
Materials & Design	8	351	43.88	8.400
Fibers and Polymers	7	119	17.00	2.347
Journal of Composite Materials	7	72	10.29	2.900

表3展示了2008-2022年芳纶纤维表面改性领域总被引频次前10位的论文。由表3可知,芳纶纤维表面改性领域排名前10的高被引论文均在高水平期刊上发表,其中ACS Applied Materials & Interfaces发表了3篇文章,其余期刊各发表1篇。在该领域内总被引频次最高的是2014年发表在ACS Applied Materials & Interfaces上的Surface Modification of Aramid Fibers by Bio-Inspired Poly(dopamine) and Epoxy Functionalized Silane Grafting [7],总被引频次达278次,年均被引频次为30.87,位列第二。该文章展示了一种新型间位芳纶(MPIA)纤维仿生表面改性方法及其与橡胶基体粘连性的改善,通过仿生多巴胺自氧化聚合和环氧官能化硅烷KH560接枝相结合,使MPIA纤维的表面改性,MPIA纤维/橡胶的界面附着力显著提高了62.5%。该文中使用的改性方法显示出一种低成本、有效、无毒

的工艺,最重要的是对纤维的机械性能无害,是纤维表面改性的里程碑。这10篇高被引论文中,发表最早的是2008年刊登在Surface and Coatings Technology上的Surface modification of aramid fiber by air DBD plasma at atmospheric pressure with continuous on-line processing [8],该文章介绍了在大气压下通过空气介电阻挡放电等离子体对芳纶纤维进行改性。最近发表的年均被引频次最高的是2019年在Polymer上刊登的Amino graphene oxide/dopamine modified aramid fibers: Preparation, epoxy nanocomposites and property analysis [9]。该文章通过多巴胺和氨基氧化石墨烯接枝的自氧化聚合对芳纶纤维进行改性,为高性能纤维的表面改性提供了简单的途径,以实现其在多功能聚合物复合材料中的潜在应用。

表3 2008-2022年芳纶纤维表面改性领域总被引频次前10位的论文

年份	作者	出处	标题	总被引频次/次	年均被引频次/次
2014	Sa, RN	ACS Applied Materials & Interfaces	Surface Modification of Aramid Fibers by Bio-Inspired Poly(dopamine) and Epoxy Functionalized Silane Grafting	278	30.89
2013	Wang, WC	ACS Applied Materials & Interfaces	Surface Silverized Meta-Aramid Fibers Prepared by Bio-inspired Poly(dopamine) Functionalization	152	15.20
2019	Gong, XY	Polymer	Amino graphene oxide/dopamine modified aramid fibers: Preparation, epoxy nanocomposites and property analysis	145	36.25
2016	Patterso, BA	ACS Applied Materials & Interfaces	Enhanced Interfacial Strength and UV Shielding of Aramid Fiber Composites through ZnO Nanoparticle Sizing	119	17.00
2008	Xi, M	Surface and Coatings Technology	Surface modification of aramid fiber by air DBD plasma at atmospheric pressure with continuous on-line processing	115	7.67
2015	Wang, CX	Applied Surface Science	Surface modification of aramid fiber by plasma induced vapor phase graft polymerization of acrylic acid. I. Influence of plasma conditions	111	13.88
2019	Bhattacharjee, S	Advanced Materials Interfaces	Graphene Modified Multifunctional Personal Protective Clothing	110	27.50
2017	Chen, XL	Journal of Composite Materials	A recycled environmental friendly flame retardant by modifying para-aramid fiber with phosphorus acid for thermoplastic polyurethane elastomer	107	17.83
2019	Yang, G	Composites Communications	Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review	104	26.00
2014	Chen, JR	Applied Surface Science	Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating	97	10.78

3.6 研究热点主题

图5展示了芳纶纤维应用与改性研究领域的关键词共现图谱,圆圈代表关键词的节点,圆圈越大代表关键词出现的频次越高,节点连线代表关键词的共现关系,不同编号代表不同聚类。由图5可知,关键词可以分为3个聚类群。

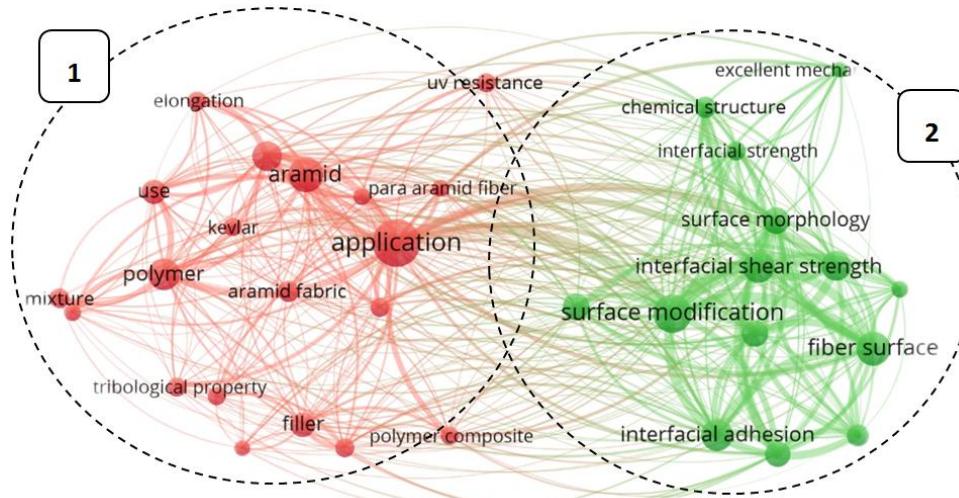


图 5 芳纶纤维应用与表面改性研究领域文献的关键词共现网络图谱

(1) 1号聚类: 主要以 *application* (应用)、*aramid fabric* (芳纶织物)、*filler* (填料)、*polymer* (聚合物)、*uv resistance* (耐紫外线)、*mixture* (混合物)、*elongation* (延伸率) 等关键词为核心进行连接。此聚类主要研究芳纶纤维的应用等内容, 芳纶纤维作为一种高性能合成纤维, 具有出色的物理和化学性能, 其应用涵盖多个领域, 从航空航天到体育用品, 从建筑到汽车工业, 其性能和优势得到了充分发挥和展示。在航空航天领域[10], 有研究表明芳纶纤维可用于制造高强度结构件、飞机发动机零部件和高性能复合材料等。例如, 某些研究关注芳纶纤维复合材料在载荷传输和结构强度方面的优越性能, 为航空器的轻量化设计提供了解决方案。在建筑领域, 芳纶纤维也有广泛的应用前景。研究人员探索了芳纶纤维在地震抗震结构、桥梁、水利工程以及防腐保温方面的应用。其中, 一项研究提出了利用芳纶纤维增强材料作为地震抗震结构的增强手段, 提高了结构的承载能力和抗震性能, 为地震灾害预防和抗震建筑的发展带来了新的思路。在体育用品领域, 研究人员对芳纶纤维的应用进行了深入研究。芳纶纤维制成的产品具有高强度、轻量、透气性和耐磨性等特点[11], 因此被广泛应用于高强度篮球底板、高强度 PVC 地板、高强度击剑盔以及高强度跑鞋等。这些应用不仅提高了体育用品的性能, 还为运动员提供了更好的保护和体验。在汽车领域, 芳纶纤维也

有广泛的应用潜力。研究人员关注其在发动机、变速箱、制动系统、悬架和车身结构等方面的应用。芳纶纤维的高耐热性和耐腐蚀性使其成为制造高温引擎盖和其他关键部件的理想材料。此外, 芳纶纤维复合材料的应用也在车身轻量化和提高汽车燃料效率方面具有潜力[12]。芳纶纤维的优异性能和多样化的应用使其成为各行各业的重要材料之一, 随着技术的不断进步和研究的深入, 芳纶纤维在未来将发挥更大的作用, 并为各个领域的发展做出更大的贡献。

(2) 2号聚类: 重点以 *surface modification* (表面改性)、*interfacial shear strength* (界面剪切强度)、*fiber surface* (纤维表面)、*surface morphology* (表面形态)、*interfacial adhesion* (界面附着力)、*interfacial strength* (界面强度) 等关键词为核心。该聚类主要研究芳纶纤维表面采用不同方法改性后, 对芳纶纤维性能及芳纶/聚合物复合材料界面性能产生的影响。邓婷婷等人在微波辐射下用稀硫酸对对位芳纶纤维进行表面温和改性, 以提高其与基体材料的界面附着力。结果表明在芳纶纤维表面引入了磺酸基团后, 改性芳纶纤维的断裂强度和热稳定性没有受到不利影响, 芳纶纤维的主要结构也没有受到影响, 这种逐渐改变硫酸浓度的改性方法可广泛应用于许多领域。陆赵情等人通过氩气低温等离子体处理短切的芳纶纤维使其改性, 以增强芳纶纸的界面强度, 发现

氩低温等离子体处理在纤维表面引入了一些新的极性基团，并增加了纤维表面的润湿性和粗糙度。杨丹等人使用丙酮和氯化钙试剂处理芳纶纤维，使其表面粗糙度极大增强，且纤维强度提高了 10.2%。贾楚元等人通过 γ 射线辐照和化学处理制备 3- γ 丙基三乙氧基硅烷 (APS) 接枝的芳纶纤维，以改善芳纶纤维和环氧基质之间的界面性能，最终使芳纶纤维增强复合材料的界面剪切强度从 36.33 提高到 54，增加了 51.03%。孙辉等人为了提高芳纶纤维的抗紫外性能，在芳纶纤维表面和超临界二氧化碳中的纤维/微纤维间的界面空间合成了 TiO_2 纳米颗粒，从而减弱了芳纶纤维光降解性能。这种改性还可以通过在不使用溶剂的情况下进行低温处理来提高拉伸强度，可扩展的 scCO₂ 中简单的合成工艺用于绿色溶剂的轻度修饰，为在聚合物上合成金属氧化物提供了一种有希望的技术。

4 结论

芳纶纤维作为一种增强复合材料，随着其在航空、军事、建筑、交通运输等领域应用越来越广泛，芳纶纤维的改性和多功能化是研究发展的必然趋势。芳纶纤维表面改性研究领域主要分为起步阶段（2008-2014 年）、快速发展阶段（2015-2022 年）2 个阶段。自 2015 年起，发文量呈指数式增长，2015-2022 年间发文量约占研究期内总量的 85%。相关研究多刊载在 Polymer Composites, Applied Surface Science 及 Journal of Applied Polymer Science 等高水平期刊上，具有较高的学术影响力。

改变芳纶纤维表面性质能有效发挥芳纶纤维在复合材料中的优异性能。对芳纶纤维表面改性主要分为两种：(1) 破坏芳纶纤维的光滑表面，使分子沿纤维轴向的取向度降低，纤维表面的粗糙程度上升，表面极性增大，纤维与基体的浸润性增加；(2) 在芳纶纤维表面增加功能化活性基团或形成连接“桥梁”，使其与基体以物理或化学键结合，提高纤维与基体的界面粘结强度[13]。芳纶纤维的改性方法可分为物理改性和化学改性[14]。物理改性主要是通过外界能量改变纤维表面形态和性质，该方法对设备的要求严格，成本高。化学改性主要通过化学反应改变纤维表面分子的化学结构、组成来改变芳纶纤维的性质，该方法反应程度不易控

制、工艺流程复杂、但改性作用效果明显。

现有的物理、化学改性方法正在不断成熟，越来越多的物理化学交叉方式也会应运而生，旨在通过环保、安全、高效的过程得到适合应用于不同条件下的芳纶复合材料，并且有更多的研发改性芳纶纤维被应用在工业上。芳纶纤维改性研究的进步不仅体现中国技术的发展，也能更高效地利用芳纶纤维，减轻芳纶纤维生产压力，降低成本。寻找环保、安全、经济、高效、便捷的改性方法仍然是芳纶纤维改性研究的应用技术中的重中之重[15]。

参考文献

- [1] 袁悦, 董建华, 赵新迪, 刘洁, 孙昌梅. 芳纶纤维的改性应用 [J]. 鲁东大学学报 (自然科学版), 2021, 37(01): 62-72.
- [2] 盛翔, 任慧, 卞成乾, 李建勋, 卞延超. 芳纶纤维表面改性的应用研究 [J]. 中国检验检测, 2020, 28(01): 19-22.
- [3] 朱大勇. 芳纶纤维表面改性及其性能的研究 [D]. 贵州大学, 2018.
- [4] 谢非. γ -射线辐照强化 F-3A 芳纶纤维及表面活化改性研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [5] 胡建海, 唐鋆磊, 李涵, 许亮亮, 林冰, 杨明君, 王莹莹, 黎红英, 张志恒. 碳纤维和芳纶纤维的蚀刻改性及其复合材料界面结合性能研究进展 [J]. 表面技术, 2021, 50(10): 94-116.
- [6] 费有静, 裴小兵. 论芳纶纤维的应用与发展趋势 [J]. 新材料产业, 2019, (04): 35-38.
- [7] Sa R, Yan Y, Wei Z, et al. Surface modification of aramid fibers by bio-inspired poly (dopamine) and epoxy functionalized silane grafting [J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6(23): 21730-21738.
- [8] Xi M, Li Y L, Shang S, et al. Surface modification of aramid fiber by air DBD plasma at atmospheric pressure with continuous on-line processing [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(24): 6029-6033.
- [9] Gong X, Liu Y, Wang Y, et al. Amino graphene oxide/dopamine modified aramid fibers: Preparation, epoxy nanocomposites and property analysis [J]. Polymer, 2019, 168: 131-137.
- [10] 赵肖斌, 姚博炜. 芳纶纤维材料在电气绝缘和电子领域中的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2019, (21): 92-93.
- [11] 赵志平, 巩相君, 吴耀琴, 孙昌梅, 张盈. 改性芳纶纤维在高性能橡胶复合材料制备中的应用 [J]. 鲁东大学学报 (自然科学版), 2023, 39(03): 264-272.

- [12] 朱大勇, 翁婷, 鲁圣军, 王彩红. 芳纶纤维的表面改性及其在橡胶制品中的应用研究 [J]. 化工新型材料, 2017, 45(08): 21-23.
- [13] 张蕊. 改性着纶纬子针织复合材料力学性能的研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [14] 凌新龙, 郭立富, 黄继伟等. 芳纶纤维表面改性技术研究现状与进展 [J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2016, 33(02): 44-52.
- [15] 刘清清, 郭荣辉. 芳纶纤维的改性研究进展 [J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37(03): 86-93.