

废旧芳纶纺织品回收再利用研究进展

宣永俊 周绪波 孙晓霞
东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘要: 废旧芳纶纺织品以直接丢弃、填埋或焚烧等方式不当处置, 不仅会带来潜在的环境问题, 还会造成资源的浪费。总结了芳纶的分类与应用, 重点介绍了废旧芳纶纺织品的机械回收和化学回收方法, 以及其再利用研究进展。当前废旧芳纶纺织品回收再利用仍处于初步发展阶段, 需进一步探索与研究。

关键词: 废旧芳纶纺织品; 芳纶; 回收; 再利用

中图分类号: X 791

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)06-0040-08

Research progress on recycling and reuse of waste aramid textiles

Xuan Yongjun, Zhou Xubo, Sun Xiaoxia

College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: Improper disposal of waste aramid textiles by direct disposal, landfill or incineration will not only bring potential environmental problems, but also lead to waste of resources. The classification and application of aramid were summarized, and the mechanical and chemical recycling methods of waste aramid textiles, as well as the research progress of their reuse were emphatically introduced. The recycling and reuse of waste aramid textiles is still in the preliminary stage of development, and further exploration and research is needed.

Keywords: waste aramid textile; aramid fiber; recycling; reuse

中国是全球第一大纺织、服装生产和消费大国, 其原料消耗量巨大, 废旧纺织品的回收再利用对于节约资源、减污降碳有着十分重要的作用, 能够对纺织产业的原料供给起到很好的补充, 推动纺织产业的绿色、低碳循环发展^[1]。废旧纺织品是一种可循环使用的资源, 若将其充分循环利用, 既能节约大量的纺织原料资源, 又能减轻石油消耗、耕地紧张等问题, 同时降低废旧纺织品燃烧处理产生的有害气体

排放量, 减轻废旧纺织品填埋造成的土壤污染问题。基于此, 废旧纺织品的回收再利用在环保和社会效益方面均意义重大^[2]。

近年来, 纺织业的产量翻番, 而纺织品在被丢弃之前的使用时间则缩短了约 40%。被丢弃的纺织品中, 73% 的废旧纺织品被焚烧或填埋, 约 12% 被回收利用, 其中仅不到 1% 用于生产新的纺织品^[3]。《关于加快推进废旧纺织品循环利用的实施意见》

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52203056)

收稿日期: 2024-03-12

作者简介: 宣永俊, 男, 2001 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为废旧纺织品的回收与再利用

通信作者: 孙晓霞, 副教授, xxsun@dhu.edu.cn

提出,到 2025 年,基本形成废旧纺织品回收利用系统,显著提高其回收利用率,使回收利用率提高到 25%,年产废旧纺织品再生纤维 200 万 t;到 2030 年,建立起一个比较完整的废旧纺织品回收利用系统,使废旧纺织品的回收利用率高达 30%,年产废旧纺织品再生纤维 300 万 t^[4-6]。

芳纶纺织品具有高强、高模量、耐高温等特性^[7-9]。在现代工业生产和高科技行业快速发展的背景下,汽车、工程机械、微电子、通信、船舶等行业对高性能材料提出了更高的要求。芳纶作为一种高性能纤维,在建筑材料、电子电器、防弹产品、交通运输、军工、航空航天等领域的应用日益广泛^[10]。在双碳目标、绿色可持续发展背景下,伴随着芳纶行业新的发展,废旧芳纶纺织品回收也成为人们无法逃

避的巨大挑战。如何以更绿色环保的方式实现芳纶纺织品的深度循环回收再利用,已成为人们越来越关注和热议的话题^[11]。

1 芳纶的分类与应用

1.1 分类

芳纶根据其化学结构的不同可分为 2 种主要类型(图 1):一种是聚间苯二甲酰间苯二胺,简称间位芳纶,美国杜邦公司注册商品名为诺美克斯(Nomex)纤维,我国称为芳纶 1313;另一种是聚对苯二甲酰对苯二胺,简称对位芳纶,美国杜邦公司注册商品名为凯夫拉(Kevlar)纤维,我国称为芳纶 1414^[12]。

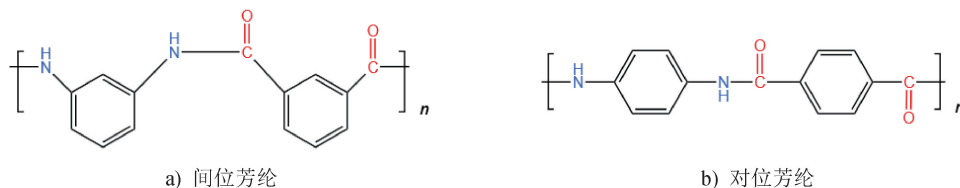


图 1 芳纶 1313 和芳纶 1414 的化学结构式

Fig. 1 Chemical structural formula of aramid 1313 and aramid 1414

1.2 应用

对位芳纶纺织品外观呈黄色[图 2a)],具有高强度和高模量的显著优势。它的抗拉强度是普通钢丝的 6 倍,拉伸模量是普通钢丝和玻璃纤维的 2~3 倍,密度仅为钢丝的 1/5,因此被广泛用于防弹、复合增强、车用摩擦材料等领域。

间位芳纶纺织品外观呈白色[图 2b)],具有优异的热性能及热湿舒适性,用这种纤维制成的织物不仅具有阻燃性,而且燃烧后不会熔化或滴落,因此被广泛用于电气绝缘、安全防护、高温过滤等领域。

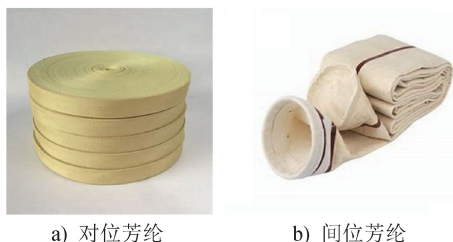


图 2 芳纶纺织品的典型应用

Fig. 2 Typical applications of aramid textiles

2 废旧芳纶纺织品回收方法

纱线生产和织造加工过程中,会不可避免地产生大量的芳纶废料。这些废料中的芳纶与原始纤维同属于原生纤维。有研究表明,芳纶纤维基材料经多次使用后,仍能保持与原始芳纶相同的结构,力学性能可能仅受到轻微损伤^[13]。回收的芳纶能够保持与原始芳纶相同或近似的优异性能,因此对其进行回收再利用非常有必要。目前常见的回收方法主要有机械回收与化学回收 2 种。

2.1 机械回收

机械回收是指在不显著改变纤维聚合物化学结构的情况下,将纺织废料加工成二次原料的回收工艺。这种回收方式能够将纺织废料再生为可用产品,且不会显著改变材料的化学结构^[14]。如图 3 所示,帝人芳纶公司从芳纶纱线废料、织物碎片、芳纶增强光缆,以及用过的防弹背心、切割防护手套中收集废旧芳纶纤维,并将其转化为浆粕(溶液形式)以替代石棉,制作刹车衬片和垫圈等^[15]。

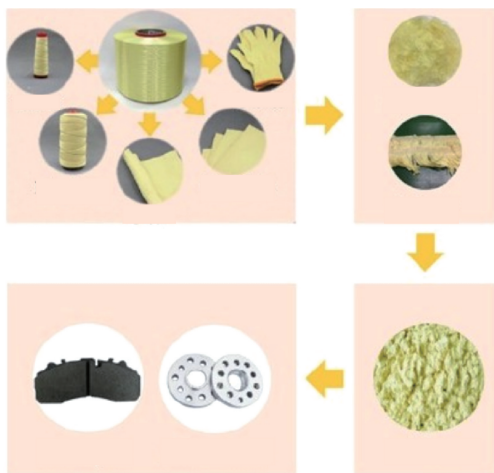


图3 废旧芳纶机械回收示意图
Fig. 3 Machinery recycling diagram of waste aramid

Liao 等^[16]提出了一种回收芳纶纤维废料以制备耐摩擦聚甲醛(POM)/芳纶纤维废料(AFW)复合材料的方法(图4):采用固态剪切铣削(S³M)技术制备粒径为 64.69 μm 的超细 AFW 粉末,将 POM 与制备的 AFW 粉末置于 85 °C 真空干燥箱中干燥 5 h,然后将不同质量比的 POM 与 AFW 加入高速混合器中混合搅拌 5 min,再通过双螺杆挤出机挤出混合物,得到具有优异摩擦性能和力学性能的 POM/AFW 复合材料。力学性能测试结果显示:与纯 POM 相比,当 AFW 质量分数为 20%时,复合材料的抗弯强度从 52.69 MPa 提高至 80.12 MPa,拉伸强度增加至 58.65 MPa,提高了 17.4%。这主要是由于采用 S³M 技术制备的超细 AFW 粉末表面粗糙,提供了更多的活性位点,能够增强 AFW 与 POM 的界面相互作用。

总体而言,目前关于机械回收的研究相对较少,大部分研究仍集中在对原生芳纶的机械处理而非废旧芳纶的机械回收方面。机械回收主要通过机械对废旧芳纶纺织品进行物理层面的剥脱。然而,机械剥脱过程较剧烈,会对纺织品的物理力学性能产生不可逆转的损伤。由机械回收再利用的散纤维制成的纺织品带来的经济收益,能否弥补设备高能耗及损坏维修等带来的一系列问题,还有待进一步探究。

2.2 化学回收

纺织废料的化学回收可以克服机械回收面临的一些问题,提供了一种很有前途的替代方案。化学回收是通过改变聚合物废料的化学结构,将其转化

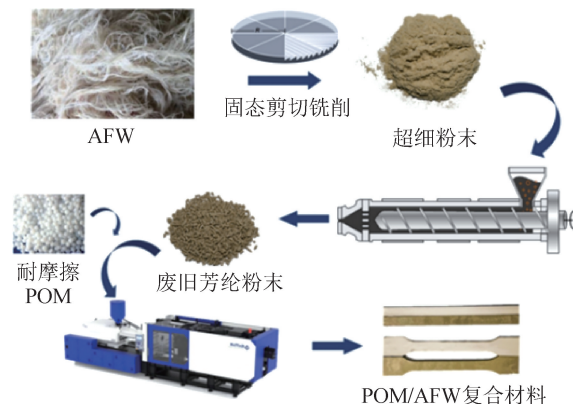


图4 利用 S³M 技术回收废旧芳纶制备复合材料示意图
Fig. 4 Schematic diagram of composite materials prepared from recycled waste aramid using S³M technology

为可用于制备新聚合物原料的单体实现的。化学回收允许将纤维降解为单体或构件,然后将它们重新聚合成质量相当或更优质的新纤维。

Yang 等^[17]通过氢氧化钾/二甲基亚砜(KOH/DMSO)体系中酰胺键的去质子化,首次成功将 Kevlar 纤维分解成芳纶纳米纤维(ANFs)。结果显示:对位芳纶纤维在 KOH(片状固体)和 DMSO(溶液)体系中被去质子化,形成均匀的透明溶液,其中 ANFs 直径范围为 3~30 nm,长度达 10 μm,且在 KOH/DMSO 体系中分散均匀。与其他方法相比,这种去质子化方法没有额外的能量消耗,并且制备的 ANFs 具有更小的尺寸和更均匀的直径分布。更重要的是,傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和 X 射线衍射(XRD)测试表明:所制备的 ANFs 保留了母体 Kevlar 纤维的化学结构和结晶度,表明 ANFs 能够很好地保留对位芳纶纤维的力学性能。然而,制备周期长(7 d 以上)和较低的 ANFs 质量分数(0.2%),限制了这种化学回收方法的大规模工业化应用。

Yang 等^[18]从节约资源和提高效益的角度出发,在去质子化方法的基础上,提出质子供体辅助去质子化方法,即在 KOH(片状固体)和 DMSO(溶液)体系中加入 H₂O(去离子水)作为质子供体,加快反应进程。研究结果显示,ANFs 的制备周期由原先的 7 d 以上显著缩短至约 4 h。此外,由于使用废旧芳纶纤维代替昂贵的原生芳纶纤维,ANFs 的制备成本有所降低,其回收利用经济可行。与传统回收方法制得的芳纶纤维相比,所得 ANFs 在尺寸均匀性、长径比、分散性、成膜性等方面均表现出显著的优势。

Chen 等^[19] 研究发现,前人的研究多集中在添加剂上,忽略了碱的影响。KOH 在 DMSO 中轻微溶解,这意味着 KOH/DMSO 体系中对位芳纶纤维的去质子化是一个相当缓慢的异质过程。根据非均相反应的特征,这种去质子化过程可能受到 KOH 存在形式的影响。他们通过进一步研究发现:与片状 KOH 相比,粉末状 KOH 的比表面积更大,可进一步缩短 ANFs 的制备周期。为此,研究人员在质子供体辅助去质子化方法的基础上进行优化,进一步缩短了 ANFs 的制备周期。碱溶体系去质子化回收废旧芳纶示意图如图 5 所示。研究结果显示,在 KOH (粉末状固体)/DMSO(溶液)/H₂O(去离子水)体系中,室温下制备质量分数为 0.2% 的 ANFs 仅需 26 min,这是迄今为止最短的时间,约为 Yang 等^[20] 报道的时间(4 h)的 1/10。进一步优化制备条件,可在 40 °C 下将制备时间进一步缩短至 15 min。他们还通过原位表征技术观察和监测 ANFs 制备过程中 Kevlar 纤维形态和结构的变化,并实现了不同结构 ANFs 气凝胶的可控制备。所得 ANFs 气凝胶具有良好的热稳定性,分解温度超过 500 °C。

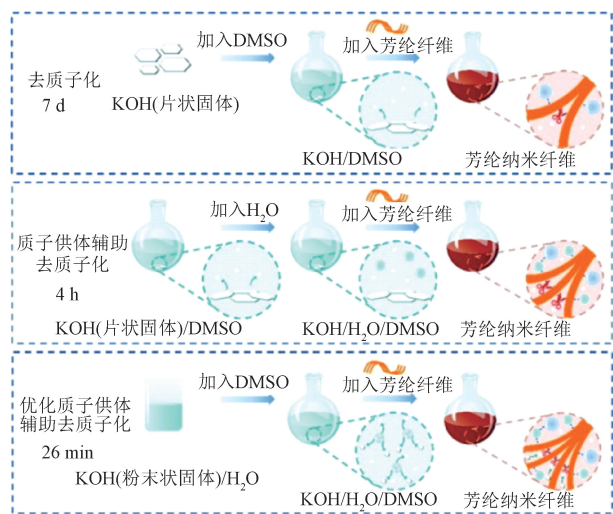


图 5 碱溶体系去质子化回收废旧芳纶示意图
Fig. 5 Schematic diagram of deprotonation of alkali solvent system for recycling of waste aramid

Okajima 等^[21] 分别使用超临界水、亚临界水和含氢氧化钠 (NaOH) 的亚临界水 3 种试剂,将 Kevlar 纤维分解成 2 个组成单体——对苯二胺 (PPD) 和对苯二甲酸 (TPA),从而实现了一种新的芳纶纤维的化学回收,如图 6a) 所示。Kevlar 纤维的最佳分解条件为:温度 250 °C,压力 4 MPa,反应时间 6 h,

NaOH 与 Kevlar 纤维的初始物质的量比为 5。在该分解条件下,Kevlar 被完全分解,2 种单体的回收率均约为 95%。

Okajima 等^[22] 利用超临界水、亚临界水和含 NaOH 的亚临界水将 Technora 纤维(对位芳纶纤维,化学成分与 Kevlar 纤维略有不同,密度低于 Kevlar 纤维)分解为水溶性组成单体 PPD、TPA 和非水溶性组成单体 3,4'-二氨基二苯醚 (DAPE),如图 6b) 所示。Technora 纤维的最佳分解条件为:温度 250 °C,压力 4 MPa,反应时间 3 h,NaOH 与 Technora 纤维的初始物质的量比为 10。在该分解条件下,Technora 纤维的分解效率达 100%,单体 PPD、TPA 和 DAPE 的回收率分别为 98.7%、93.1% 和 87.8%。此外,反应产物经过滤、液液萃取和盐酸沉淀纯化后,每种单体的纯度最低达 99%。

Shu 等^[23] 提出了废旧间位芳纶滤袋回收再利用的完整工艺(图 7)。该工艺主要包括预处理、溶出回收和再利用 3 个阶段。他们首先通过 FT-IR、XRD 分析和扫描电子显微镜 (SEM) 表征,验证了回收废旧间位芳纶滤料具有可行性。其次,选择适宜的溶解方法回收废旧滤料,并探讨了溶解温度、溶剂种类和增溶剂用量对溶解时间、溶解度和溶解产物的影响。最后,经过多次试验,得到最优工艺条件如下:溶解温度 110 °C,溶剂选择 *N,N*-二甲基乙酰胺 (DMAc),增溶剂氯化锂 (LiCl) 质量分数为 4%。在最优工艺条件下,他们成功实现了质量分数为 25% 的间位芳纶材料的 100% 溶解回收。该回收工艺不仅减轻了废旧滤袋对环境的威胁,而且实现了间位芳纶滤料的高质量回收,具有很大的应用前景。

化学回收废旧芳纶纺织品的思路简洁明确,主要分为 2 种:一种是将废旧芳纶纺织品溶解于溶剂体系,不破坏芳纶本身的化学结构,使其从肉眼可见的纺织品形成微米甚至纳米级的纤维;另一种是将废旧芳纶纺织品从聚合物的形式分解为组成单体,破坏其本身的化学结构。目前,前一种方法最大的问题在于制备工艺耗时长且分散液浓度过低,因此,其在高浓度分散液的低耗时制备,以及更好的溶剂体系选择方面还有待进一步探索;后一种方法的问题在于反应条件过于苛刻。此外,2 种方法都存在生产规模较小,仅限于实验室阶段,尚未实现产业化

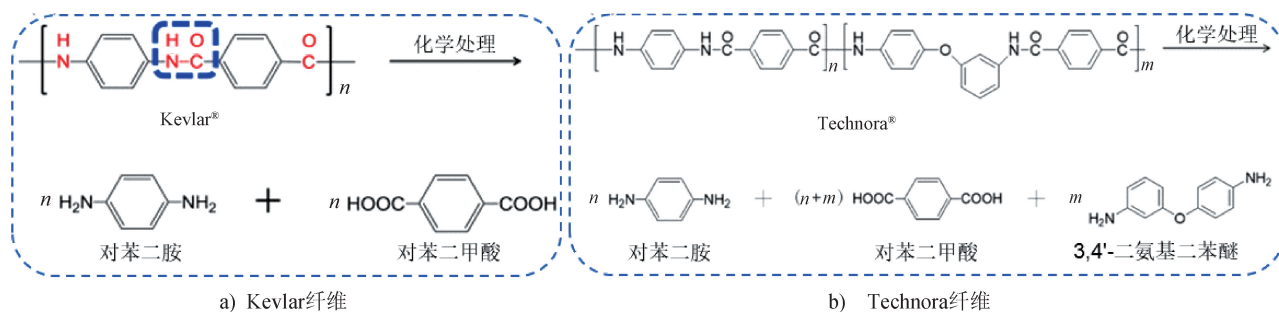


图6 Kevlar纤维和Technora纤维的化学回收原理
Fig. 6 Principles of chemical recycling of Kevlar and Technora fibers

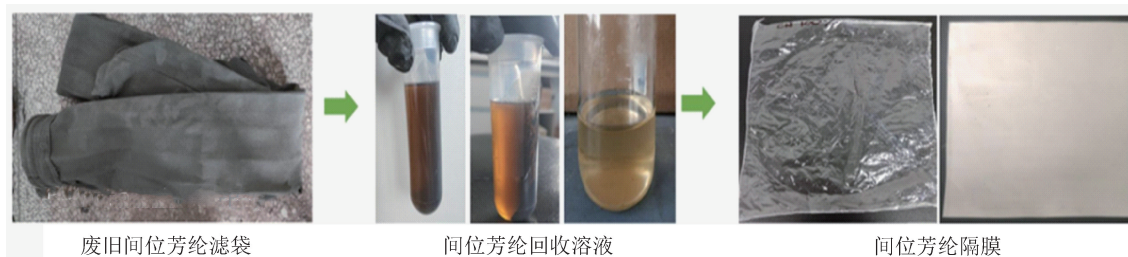


图7 废旧间位芳纶滤袋回收再利用示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the recycling and reuse of used meta-aramid filter bags

的问题。

3 废旧芳纶纺织品的再利用

3.1 增强材料

纤维增强聚合物(FRPs)具有比模量和比强度高、轻质等优点,近年来得以广泛应用。FRPs以聚合物为基体,高性能纤维为增强材料制成。在FRPs中,纤维能够赋予复合材料良好的力学性能,基体为纤维提供所需的排列,并保护纤维免受环境影响。将芳纶用作聚合物复合材料的增强材料,具有密度低、比强度和比模量高、耐高温等综合优势。

Loureiro等^[24]在聚酰胺6.6(PA6.6)基体中使用废旧对位芳纶作为增强材料,制备了芳纶质量分数分别为5%和10%的PA6.6/芳纶复合材料,并通过拉伸、弯曲和冲击试验评估PA6.6/芳纶复合材料的力学性能。研究表明:与纯PA6.6相比,添加质量分数为5%废旧对位芳纶纤维对材料的力学性能没有显著影响;添加质量分数为10%的废旧对位芳纶纤维可使材料的弯曲强度提高10%,拉伸强度和模量提高约15%,弯曲模量提高约20%。

Chen等^[25]采用磷酸对废旧对位芳纶进行回收

改性,再将其作为环保型阻燃剂应用于热塑性聚氨酯(TPU),并采用锥形量热仪(CCT)和热重/傅里叶变换红外光谱(TG-IR)测试了所得TPU的阻燃性能。CCT测试结果显示:磷酸改性对位芳纶(AF-P)的阻燃效果优于纯对位芳纶的。TG-IR测试结果表明:AF-P改善了TPU的炭化进程,使其残余质量达到30.6%,远高于原始TPU的,表明AF-P能够提高TPU在高温下的热稳定性。该研究结果对废旧芳纶的回收再利用及聚合物环保型阻燃剂的相关研究具有较好的参考价值。

Chuang等^[26]将芳纶废旧纺织品分散成芳纶短纤维,并与低熔点聚酯(LMPET)纤维混合,通过非织造工艺制备芳纶基布,再将这些基布添加到不同的组合中,形成芳纶复合基布或混合纤维增强复合板(图8)。研究表明:剪切、挤压和摩擦有助于提高复合板的力学性能;质量分数为90%的废旧芳纶混合纤维增强复合板具有最佳的力学性能和抗静态穿刺性能。该研究实现了利用回收的芳纶废旧纺织品生产高性能、低生产成本芳纶复合材料。

3.2 活性炭织物

活性炭是一种良好的吸附剂,可用于去除环境

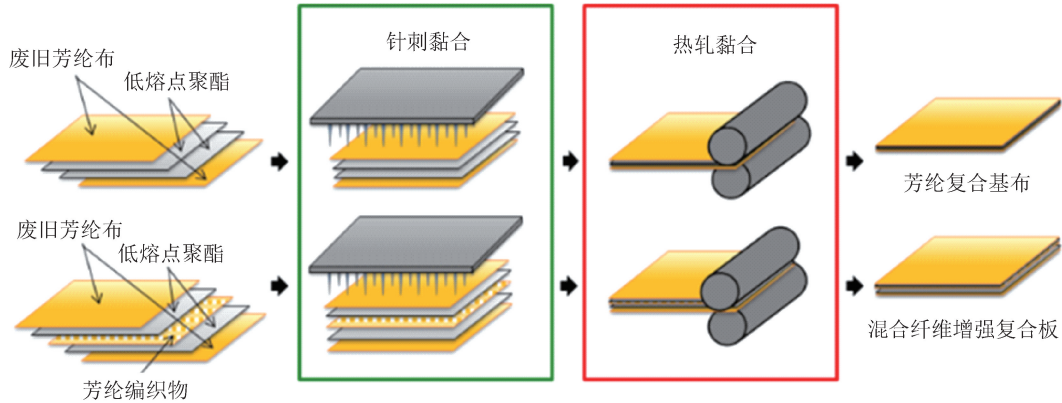


图 8 芳纶废旧纺织品制备芳纶复合基布或混合纤维增强复合板

Fig. 8 Aramid composite matrix or hybrid-fiber-reinforced composite boards prepared from waste aramid textiles

中的染料、重金属、有害烟雾、不良气味及一些有机物质。Karthik 等^[27]提出了一种新颖的单阶段方法制备多孔、导电活性炭织物(图 9),他们在 800、1 000 和 1 200 °C 下,将 Kevlar 废旧织物在木炭层下直接碳化制备活性炭织物,加热速率为 300 °C/h,无需任何中间稳定步骤,无需保温时间。结果表明:1 200 °C 高温下分解产生的活性炭具有更高的比表面积和导电率。较低的加热速率对较大面积的多孔形态的形成有显著影响。使用从工业中收集的 Kevlar 废旧织物可降低原材料采购成本。与其他物理活化碳化过程相比,这种单阶段方法的碳化过程耗时较少,耗电量也相对较低。此外,利用木炭热解和二氧化碳气氛的媒介促进分解,进一步降低了活性炭织物的生产成本,同时有效实现了废旧芳纶纺织品的回收再利用。

3.3 电池隔膜

芳纶因强度高、稳定性好、耐高温、耐腐蚀、密度低等优异特性,被广泛应用于锂离子电池隔膜领域,

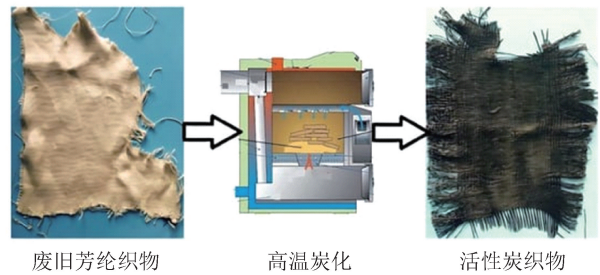


图 9 Kevlar 废旧织物制备活性炭织物

Fig. 9 Activated carbon fabrics prepared from waste Kevlar fabrics

其能够进一步提高电池隔膜的力学性能和热稳定性^[28-29]。张倩^[30]成功利用废旧间位芳纶滤袋制备高质量的电池隔膜(图 10)。研究表明:回收制备的间位芳纶电池隔膜在最高试验温度 200 °C 下使用 1 h 后,仍无明显尺寸收缩,其阻燃性和热稳定性有利于电池的使用安全性,电池隔膜的电阻率约为 $1.7 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$,达到了绝缘材料的要求。

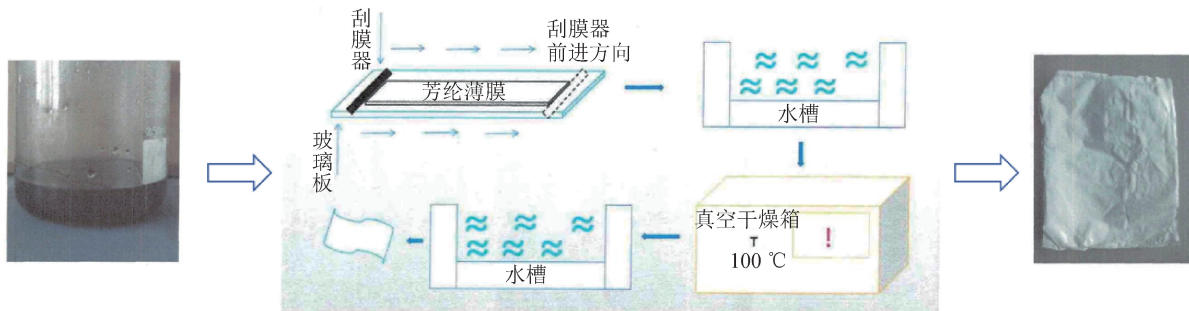


图 10 废旧间位芳纶滤袋制备电池隔膜

Fig. 10 Battery separator prepared from used meta-aramid filter bags

4 结束语

废旧芳纶纺织品的回收再利用具有重要意义。然而,目前我国废旧芳纶纺织品的回收渠道相对不完善。废旧芳纶纺织品的收集、分类和回收尚未形成完善的体系,缺乏有效的回收渠道。这导致废旧芳纶纺织品的回收率较低,大量的废旧芳纶纺织品可能被直接丢弃或随其他废弃物混合处理。废旧芳纶纺织品回收技术在我国仍处于初步发展阶段。

本文简要介绍了芳纶纺织品的分类与应用,重点总结了废旧芳纶纺织品的机械回收、化学回收方法,以及再利用的相关研究进展。通过分析梳理可以看出,整个废旧芳纶纺织品回收再利用尚处于起步阶段,有大量的研究空白需要填补。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

- [1] 杜欢政,刘建成,陆莎. 双碳目标下纺织产业的绿色创新与发展 [J]. 纺织学报, 2022, 43(9): 120-128.
- [2] BIZUNEH B, TADESSE R. Investigation of Ethiopian apparel industry's fabric waste and its management strategies [J]. The Journal of The Textile Institute, 2020, 113(1): 141-150.
- [3] WOJNOWSKA-BARYŁA I, BERNAT K, ZABOROWSKA M. Strategies of recovery and organic recycling used in textile waste management [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(10): 5859.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 三部门发文构建体系:加快废旧纺织品循环利用[EB/OL]. (2022-04-20)[2024-01-17]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-04/20/content_5686206.htm.
- [5] 沈娅,陈涛,张立杰. 废旧纺织服装回收与再利用研究进展 [J]. 纺织学报, 2023, 44(7): 232-239.
- [6] 张玮,刘姝瑞,张明宇,等. 废旧纺织品回收再利用的研究进展 [J]. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(1): 96-102.
- [7] 李海洋,尉霞,陈成煜,等. 羊毛/芳纶包芯纱针织物开发及其性能 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(6): 25-29.
- [8] 伍悦玥,吴铠,王萍,等. 芳纶平纹机织/非织造混杂结构复合材料低速冲击性能的有限元分析 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(6): 30-41.
- [9] 周欣伊,李娜,于俊荣,等. PPTA 纤维的光老化机制及其防紫外改性研究进展 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(7): 1-8.
- [10] 李明专,王君,鲁圣军,等. 芳纶纤维的研究现状及功能化应用进展 [J]. 高分子通报, 2018(1): 58-69.
- [11] 黄智宇,邢桐贺,何安南,等. 废旧纺织品的资源化循环再生利用研究进展 [J]. 科学通报, 2023, 68(增刊1): 188-203.
- [12] HE A N, XING T H, LIANG Z H, et al. Advanced aramid fibrous materials: fundamentals, advances, and beyond [J]. Advanced Fiber Materials, 2024, 6(1): 3-35.
- [13] SADROLODABAEI P, DE LA FUENTE A, ARDANUY M, et al. Mechanical performance of aged cement-based matrices reinforced with recycled aramid textile nonwoven fabric: comparison with other FRCMs [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02994.
- [14] BALOYI R B, GBADEYAN O J, SITHOLE B, et al. Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review [J]. Textile Research Journal, 2024, 94(3/4): 508-529.
- [15] GORE P M, KANDASUBRAMANIAN B. Functionalized aramid fibers and composites for protective applications: a review [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(49): 16537-16563.
- [16] LIAO Y, CHEN C, WEI B, et al. Green recycling of aramid fiber waste as the friction modifier of POM by solid state shear milling technology [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2022, 33(10): 3540-3550.
- [17] YANG M, CAO K, SUI L, et al. Dispersions of aramid nanofibers: a new nanoscale building block [J]. ACS Nano, 2011, 5(9): 6945-6954.
- [18] YANG B, LI W, ZHANG M, et al. Recycling of high-value-added aramid nanofibers from waste aramid resources via a feasible and cost-effective approach [J]. ACS Nano, 2021, 15(4): 7195-7207.
- [19] CHEN H J, BAI Q Y, LIU M C, et al. Ultrafast, cost-effective and scaled-up recycling of aramid products into aramid nanofibers: mechanism, upcycling, closed-loop recycling [J]. Green Chemistry, 2021, 23(19): 7646-7658.
- [20] YANG B, WANG L, ZHANG M, et al. Time saving,

- high-efficiency approaches to fabricate aramid nanofibers [J]. ACS Nano, 2019, 13(7): 7886-7897.
- [21] OKAJIMA I, OKAMOTO H, SAKO T. Recycling of aramid fiber using subcritical and supercritical water [J]. Polymer Degradation and Stability, 2019, 162: 22-28.
- [22] OKAJIMA I, OKAMOTO H, SAKO T. Efficient aramid fiber monomerization using alkaline subcritical water [J]. Polymer Degradation and Stability, 2021, 187: 109547.
- [23] SHU R, ZHANG Q, ZHAO Y B, et al. An efficient method to recycle and reuse meta-aramid from used dust filter bags [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 299: 121692.
- [24] LOUREIRO L, HENRIQUE CARVALHO V, PRADO BETTINI S H. Reuse of p-aramid from industrial waste as reinforcement fiber in polyamide 6.6 [J]. Polymer Testing, 2016, 56: 124-130.
- [25] CHEN X, WANG W, JIAO C. A recycled environmental friendly flame retardant by modifying para-aramid fiber with phosphorus acid for thermoplastic polyurethane elastomer [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 331: 257-264.
- [26] CHUANG Y C, BAO L, LOU C W, et al. Hybrid-fiber-reinforced composite boards made of recycled aramid fibers: preparation and puncture properties [J]. Fibers and Polymers, 2019, 20(2): 398-405.
- [27] KARTHIK D, BAHETI V, MILITKY J, et al. Activated carbon derived from carbonization of kevlar waste materials: a novel single stage method [J]. Materials, 2021, 14(21): 6433.
- [28] 刘经吉, 刘萍, 张薄. 涂层方式对芳纶阻燃性能的影响 [J]. 产业用纺织品, 2024, 42(1): 38-46.
- [29] 庞瑞雪, 杨斌, 张美云, 等. 新一代芳纶纤维基电池隔膜研究进展及展望 [J]. 中国造纸, 2023, 42(10): 105-117.
- [30] 张倩. 废旧芳纶滤料回收的实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2021.

(上接第 39 页)

- [42] NASSER J, STEINKE K, GROO L A, et al. Improved interlayer friction, impact response, and stab resistance of surface fibrillized aramid fabric [J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(19): 1900881.
- [43] DU Z, LIU Z F, CHEN C J, et al. Stab resistance mechanism of lightweight PLA/CFRP hybrid composite structures [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 156: 107795.
- [44] 陈立富. 无机颗粒层填充防刺树脂片的研制及机理表征 [D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [45] ZHANG X, LI T T, PENG H K, et al. Enhanced sandwich structure composite with shear thickening fluid and thermoplastic polyurethanes for high-performance stab resistance [J]. Composite Structures, 2022, 280: 114930.
- [46] MAYO JR J B, WETZEL E D, HOSUR M V, et al. Stab and puncture characterization of thermoplastic-impregnated aramid fabrics [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(9): 1095-1105.
- [47] 冯浩, 汪泽幸, 何斌, 等. 防刺服的研究与发展现状 [J]. 产业用纺织品, 2021, 39(2): 8-13.
- [48] NAYAK R, CROUCH I, KANESALINGAM S, et al. Body armor for stab and spike protection part 2: a review of test methods [J]. Textile Research Journal, 2019, 89(16): 3411-3430.
- [49] 梁高勇, 崔中雪, 张晓彤, 等. 警用防刺服的产品标准与研究方法 [J]. 产业用纺织品, 2022, 40(12): 9-17.

欢迎投稿《产业用纺织品》

<https://cyyf.cbpt.cnki.net> techtex@dhu.edu.cn