

# 烯碳改性 UHMWPE 纤维的蠕变机理及研究进展

成 畅<sup>1</sup>, 刘艳红<sup>2</sup>, 刘艳玲<sup>3</sup>, 黄依琳<sup>4</sup>, 高 媛<sup>5\*</sup>

(1. 闽南理工学院光电与机电工程学院, 福建 石狮 362700; 2. 内蒙古工业大学轻工与纺织学院, 内蒙古 呼和浩特 010080; 3. 新兴际华(上海)工程科技研究院有限公司, 上海 201616; 4. 闽南理工学院信息工程学院, 福建 石狮 362700; 5. 北京农业职业学院通识教育学院, 北京 102442)

**摘 要:** 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维因比强度高、耐腐蚀等优异特性, 广泛应用于高端装备领域, 但其易蠕变、耐热性差等缺点限制其应用范围。文章系统综述了 UHMWPE 纤维的抗蠕变改性方法, 重点分析共混、化学交联、分子链支化及辐照交联等改性策略的作用机理与研究进展, 指出交联程度、填料分散性及纺丝工艺对纤维性能具有关键影响。在此基础上, 提出基于烯碳材料的改性新思路, 通过构建物理交联点与导电网络, 协同提升纤维的耐蠕变性与抗静电性能, 为开发高性能多功能 UHMWPE 纤维提供依据与技术参考。文章指出未来研究应聚焦于烯碳材料可控分散、纺丝-拉伸工艺协同优化以及绿色低碳低成本制备技术的开发, 推动 UHMWPE 纤维向高抗蠕变、多功能化及结构一体化方向发展, 满足高端领域对高性能纤维的持续需求。

**关键词:** 超高分子量聚乙烯纤维; 石墨烯; 碳纳米管; 耐蠕变; 抗静电性

中图分类号: TB332; TQ342.61

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0220-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.040

## Creep Mechanism and Research Progress of Carbonaceous Modified UHMWPE Fibers

CHENG Chang<sup>1</sup>, LIU Yanhong<sup>2</sup>, LIU Yanling<sup>3</sup>, HUANG Yilin<sup>4</sup>, GAO Yuan<sup>5\*</sup>

(1. School of Optoelectronics and Mechatronics Engineering, Minnan University of Science and Technology, Shishi 362700, China; 2. College of Light Industry and Textile, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China; 3. Xinxing Cathay (Shanghai) Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201616, China; 4. School of Information Engineering, Minnan University of Science and Technology, Shishi 362700, China; 5. College of General Education, Beijing Voctional College of Agriculture, Beijing 102442, China)

**Abstract:** Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber is widely used in high-end equipment because of its outstanding specific strength and corrosion resistance, but its easy creep and poor heat resistance limit its application scope. The article systematically reviews the creep-resistant modification methods of UHMWPE fiber, focusing on the mechanisms and research progress of blending, chemical cross-linking, molecular chain branching, and irradiation cross-linking. It points out that the degree of cross-linking, filler dispersion, and spinning process are key factors affecting fiber performance. On this basis, a new modification strategy based on olefinic carbon materials is proposed: Constructing physical cross-linking points and conductive networks to simultaneously improve creep resistance and antistatic properties, to provide a basis and technical reference for developing high-performance multifunctional UHMWPE fibers. The article suggests that future research should focus on the controllable dispersion of olefinic carbon materials, synergistic optimization of spinning-drawing processes, and the development of green and low-cost fabrication technologies, promoting UHMWPE fibers toward high creep resistance, multifunctionality, and structural integration to meet the continuous demand for high-performance fibers in advanced fields.

**Keywords:** Ultra-high molecular weight polyethylene fiber; Graphene; Carbon nanotubes; Creep resistance; Antistatic properties

收稿日期 Submitted date 2025-06-05; 修回日期 Revised date 2025-07-08; 录用日期 Accepted date 2025-10-21

基金项目: 2024 年度福建省中青年教育科研项目(科技类)(JAT241184); 2024 年度闽南理工学院科技创新团队(24XTD156)

\*联系人, gaoyuan\_jobs@163.com

引用本文: 成畅, 刘艳红, 刘艳玲, 等. 烯碳改性 UHMWPE 纤维的蠕变机理及研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 220-224.

Citation: CHENG C, LIU Y H, LIU Y L, et al. Creep mechanism and research progress of carbonaceous modified UHMWPE fibers[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 220-224.

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维,因其极高的比强度与比模量以及优异的耐冲击、耐磨蚀、抗切割和耐化学腐蚀等特性,广泛应用于国防军工、航空航天、海洋工程与高端个体防护等领域<sup>[1-2]</sup>。然而,UHMWPE纤维分子链间仅存在较弱的范德华力,其高度取向与结晶的微观结构也导致了固有的易蠕变、耐热性差及界面黏结性差等显著缺点<sup>[3-4]</sup>。这些缺陷严重制约其在承力构件和复合材料中的进一步应用与发展<sup>[5]</sup>。

为克服上述瓶颈,国内外研究人员致力于通过多种改性手段提升UHMWPE纤维的综合性能<sup>[6]</sup>。现有的改性策略主要涵盖物理共混<sup>[7]</sup>、化学交联<sup>[8]</sup>、分子链支化<sup>[9]</sup>及辐照交联<sup>[10]</sup>等途径。其中,共混改性通过引入纳米填料(如碳纳米管)以物理方式限制分子链滑移;化学与辐照交联则旨在构建分子链间的三维网络结构,从而显著增强抗蠕变能力。然而,这些方法在实践应用中仍面临诸多挑战。例如,填料分散不均易导致应力集中,过度交联则会损害纤维的力学性能,部分工艺存在溶剂回收困难或能耗较高等<sup>[11]</sup>。因此,开发一种能够协同提升UHMWPE纤维抗蠕变性能并赋予其新功能(如抗静电性)的高效改性技术,已成为当前研究的前沿与焦点。

近年来,烯碳材料因其独特的二维片层结构、卓越的力学性能与优异的导电性,在聚合物改性领域展现出巨大潜力<sup>[12-13]</sup>。将其引入UHMWPE体系,有望在分子链间构建稳固的物理交联点和高效的导电网络,从而解决纤维的蠕变与静电积聚难题,为开发新一代高性能、多功能UHMWPE纤维提供了全新的技术路径。

本文系统梳理了UHMWPE纤维抗蠕变改性的研究现状与关键技术瓶颈,重点分析烯碳材料在抑制分子链滑移、构建导电通路方面的双重作用机制。在此基础上,深入探讨影响烯碳改性效果的关键因素,包括烯碳材料的分散性及纺丝-拉伸工艺参数的协同调控,旨在为开发超低蠕变、兼具抗静电功能的新型UHMWPE纤维提供依据与技术思路,推动国内UHMWPE纤维产品的多元化与产业升级。

## 1 抗蠕变UHMWPE纤维的改性方法

高抗蠕变UHMWPE纤维由于其优异的抗蠕变性能以及轻质高强、耐腐蚀和抗疲劳的独特优势,主要用于海洋系泊电缆、船舶电缆和海洋渔业等。目前针对超高分子量聚乙烯纤维的抗蠕变改性方法主要包括共混改性、化学交联改性、分子链支化改性和辐照交联改性<sup>[14]</sup>。

### 1.1 共混改性

共混改性是通过引入石墨烯、碳纳米管(CNTs)等无机填料来抑制UHMWPE分子链间的相对滑移,从而增强其抗蠕变能力<sup>[15]</sup>。该方法的关键在于控制填料的添加量,过多易引起团聚与分散困难,过少则改善效果不显著。郑晗等<sup>[16]</sup>采用石墨烯共混和支化改性两种方法以改善UHMWPE纤维的耐蠕变性能。研究发现,在石墨烯最优

添加质量分数8%时,改性纤维初始蠕变变形减小37.6%,当石墨烯添加质量分数超过8%后,初始蠕变量反而增加。LIU等<sup>[17]</sup>发现,纯UHMWPE纤维和UHMWPE/CNTs复合纤维在25℃升温至100℃时的蠕变行为变化分别为1.32%和0.86%;与纯UHMWPE纤维相比,UHMWPE/CNTs复合纤维的拉伸强度提高12.8%。该研究指出CNTs的改性机理:一是作为成核剂,增加了复合纤维的结晶度,使分子间作用力增强;二是CNTs被分散在聚合物基体中,从而限制UHMWPE分子链段的拉伸与滑移。

### 1.2 化学交联改性

化学交联改性根据活性自由基链生成三维网络结构的不同方式,又可分为过氧化物交联改性和硅烷交联改性<sup>[18]</sup>。值得注意的是,交联程度直接影响改性纤维的性能;适度交联有助于提升纤维的模量与拉伸强度,而过度交联则会显著破坏UHMWPE纤维的伸直链结构,导致其拉伸强度下降。此外,残留于萃取液中的交联剂也给溶剂回收过程带来显著挑战<sup>[11]</sup>。

过氧化物交联改性是指过氧化物在受热下产生自由基;该自由基夺取聚合物分子链上的氢原子,生成活性大分子自由基;最终,这些活性链相互结合,形成稳定的交联结构<sup>[19]</sup>。常用的过氧化物是过氧化二异丙苯(DCP)。刘群<sup>[20]</sup>采用冻胶纺丝法制备DCP改性UHMWPE纤维,通过对比改性前后纤维在不同温度下的蠕变行为,发现DCP改性可显著提升其抗蠕变性能;在60、80、100℃条件下,纤维的蠕变率分别下降11.1%、45.5%和51.1%。

硅烷交联改性是过氧化物热分解产生的自由基先夺取UHMWPE分子链上的氢,形成活性自由基中心,进而与硅烷接枝;接枝产物在水和催化剂作用下最终通过缩合形成交联结构<sup>[21]</sup>。陶德昌等<sup>[22]</sup>利用凝胶纺丝法制备硅烷偶联剂KH-590交联改性UHMWPE复合纤维。研究发现,凝胶量的增加表明分子链发生了交联,交联程度随着KH-590含量的增加而增大。当KH-590质量分数为2.0%时,UHMWPE复合纤维的抗蠕变性能最佳。

### 1.3 分子链支化改性

分子链支化改性是通过在UHMWPE纤维分子主链上引入短支链,以降低其分子链的规整度,并产生空间位阻效应,从而有效抑制分子链的相对滑移,进而增强其抗蠕变性能<sup>[23]</sup>。郑晗等<sup>[16]</sup>利用支化改性法研究UHMWPE纤维的耐蠕变性能。研究发现,支化改性通过调控分子结构,有效提升了纤维在恒定载荷下的抗变形能力,但随着支链数增加,纤维强度呈现下降趋势。YANG等<sup>[24]</sup>在纺丝溶液加入不同量的引发剂DCP和1-己烯,采用熔融接枝纺丝和高温牵伸法制备具有类似于鱼骨架分子结构的高抗蠕变UHMWPE纤维。当单体添加质量分数增加至5.0%时,伸长率明显下降;在70℃时,蠕变伸长率从8.5%下降至2.5%,提高70%以上。

### 1.4 辐照交联改性

辐照交联改性是通过高能射线或紫外线等对UHMWPE纤维进行表面辐照,诱导纤维分子链间形成共价交联结构,从而限制分子链滑移,进而达到提高其抗蠕变性能的目的<sup>[25-26]</sup>。由于UHMWPE纤维具有结晶度高和取向度高的特点,其晶区分子链排列高度规整,结构致密;而非晶区分子链堆叠相对疏松,存在一定的自由体积。因此,在交联处理过程中,交联剂与光敏剂分子主要通过扩散进入纤维的非晶区,难以进入晶区。在后续紫外线辐照下,交联反应仅发生于有限的非晶区内,形成交联网络<sup>[27]</sup>。此外,若紫外辐照时间过长,会加剧UHMWPE分子链的断裂与降解,致使纤维的热稳定性和力学性能显著降低<sup>[28]</sup>。王燕玲等<sup>[29]</sup>采用萃取与紫外辐照联用技术,将交联剂(TMPTA)和光引发剂(Irgacure 500)引入UHMWPE纤维,在纤维内部构建交联结构以改善其蠕变性能。研究显示,随萃取液中TMPTA含量的增加,纤维凝胶含量呈现先升后降的趋势。在90 °C、0.25 cN/dtex条件下测试20 min,当TMPTA质量分数为2%时,改性纤维的抗蠕变性能较未改性纤维提升52.99%,表明交联结构可有效限制高温下分子链间的滑移,从而增强纤维的热稳定性。

### 2 烯碳改性UHMWPE纤维的机理与模型构建

图1为烯碳改性UHMWPE纤维的机理模型构建。从图1a可以看出,为提升UHMWPE纤维的耐蠕变与抗静电性能,可采用双路径技术策略实现,即利用石墨烯超薄片层结构特性,通过纳米级分散技术与双螺杆挤出纺丝工艺耦合<sup>[30]</sup>,使石墨烯片层定向嵌入UHMWPE分子链间及结晶/非晶区界面,形成物理交联点以阻碍分子链滑移,实现宏观耐蠕变性能提升。从图1b可以看出,基于石墨烯与碳纳米管的协同作用,构建纤维轴向导电网络,通过“线-面”导电通路设计赋予纤维稳定的抗静电性能。通过微观结构调控实现纤维宏观性能的精准设计,可为UHMWPE纤维及其他高性能纤维的功能化改性提供参考与新思路。

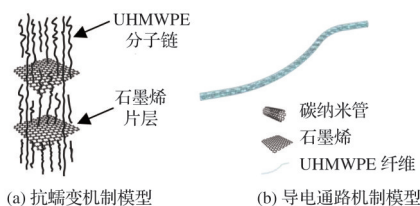


图1 烯碳改性UHMWPE纤维的机理模型构建

Fig.1 Mechanism model construction of carbonaceous modified UHMWPE fibers

相关研究表明,UHMWPE纤维易发生蠕变的现象主要归因于其简单的聚乙烯分子结构以及较弱的分子间作用力<sup>[31]</sup>,致使分子链在应力作用下易于发生相对滑移。其发生普弹变形与高弹变形占比极低,这与其高度结晶和高度取向的致密结构密切相关<sup>[32]</sup>。同时,UHMWPE纤维内

部呈现两相结构,晶区与非晶区以串联或并联形式相互连接。在特定温度与应力条件下,纤维内部晶区发生从正交晶系向六方晶系的相转变<sup>[33]</sup>。与正交晶系相比,六方晶系中分子链排列更为疏松,链间滑移阻力显著降低,从而更易发生蠕变变形。晶区之间通过缚结分子相互连接,在外力作用下,应力主要由缚结分子承担并传递<sup>[34]</sup>。由于成品UHMWPE纤维中非晶区的缚结分子已具有较高取向度,可用于进一步滑移的余地有限,因此蠕变过程中的分子链滑移主要发生于发生相转变的六方晶区内部<sup>[35]</sup>。具体机制表现为晶区中的缚结分子逐渐被抽出,随变形进行,其末端缺陷逐渐累积,最终导致纤维发生蠕变断裂<sup>[36]</sup>。

### 3 影响烯碳改性UHMWPE纤维的制备关键因素

相较于UHMWPE纤维冻胶纺丝工艺,烯碳改性UHMWPE纤维的制备需重点聚焦于两大技术维度:一是开发烯碳材料的纳米级均匀分散技术,确保功能组分在聚乙烯基体中的稳定存在;二是建立纺丝-萃取-拉伸全流程参数协同调控机制,突破现有工艺中耐蠕变性、导电性能与力学强度的矛盾关系。图2为改性UHMWPE纤维的湿法制备工艺。

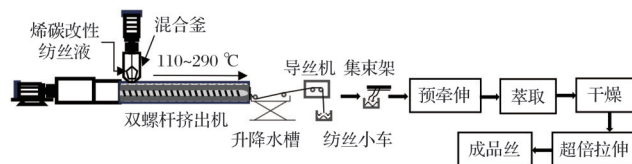


图2 改性UHMWPE纤维的湿法制备工艺

Fig.2 Wet preparation process of modified UHMWPE fibers

#### 3.1 烯碳材料的分散技术

烯碳材料在纤维基体中的分散质量是决定其改性UHMWPE纤维性能的关键因素,实现纳米尺度均匀分散是将其微观特性有效转化为宏观复合材料优异性能的核心前提。目前常用的分散方法主要分为3类:物理分散法、化学分散法和物理化学协同分散法。物理分散法主要包括机械搅拌、超声、砂磨、微波辐射等<sup>[37]</sup>。化学分散法是通过化学改性来改变烯碳材料表面的化学性质,达到提高其分散性的目的,通常分为共价改性和非共价改性两种<sup>[38]</sup>。物理化学协同分散法将物理方法和化学方法结合使用,通常能获得最佳的分散效果和稳定性<sup>[39]</sup>。

图3为烯碳材料的分散制备过程。

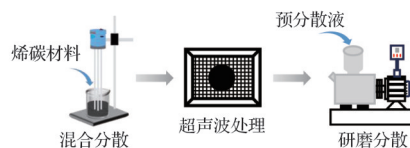


图3 烯碳材料的分散制备过程

Fig.3 Dispersion preparation process of carbonaceous materials

通过机械搅拌与超声分散过程使超分散剂充分润湿烯碳材料表面,制得烯碳预分散液,再将其通过球磨机研

磨进行二次分散<sup>[40]</sup>,从而使烯碳材料浆料体系达到纳米级均匀分散的效果。如烯碳材料的分散不佳,将会使改性UHMWPE纤维在拉伸过程中容易产生应力集中点,从而导致纤维的力学性能显著下降。

### 3.2 纺丝工艺设计

#### 3.2.1 螺杆转速

适当的螺杆转速设计可产生强烈的剪切作用,进一步破碎CNTs、石墨烯等改性剂的团聚体,使其在UHMWPE基体中分散得更均匀;同时,高剪切场有利于UHMWPE大分子链的解缠结,使其在流动方向产生一定的预取向,为后续的牵伸工序奠定基础。若剪切速率过高也会导致剪切生热,可能引起局部温度过高,使聚合物分子量降解,从而削弱纤维的最终力学性能。同样,在低剪切速率下,物料停留时间的延长会导致UHMWPE分子链解缠不足与热降解<sup>[41]</sup>,从而显著劣化纤维的力学性能。WANG等<sup>[42]</sup>研究表明,质量分数为6% UHMWPE凝胶的流变行为受纺丝温度和剪切速率显著影响。随温度由140℃升至200℃,凝胶黏度先增后减,并在约180℃时达到峰值。黏度初始增加归因于分子链缠结增强,而超过180℃后的下降反映链段扩散与解缠能力的改善。在低剪切速率下( $<0.1\text{ s}^{-1}$ ),因超长分子链的深度缠结,黏度变化不大;随着剪切速率增大,凝胶表现出显著的剪切稀化行为,此为假塑性流体的典型特征。因此,通过精确调控纺丝温度与剪切速率,可有效优化烯碳改性UHMWPE纤维的可纺性。

#### 3.2.2 纺丝温度

由于UHMWPE分子量较高,纺丝原液黏度较大,足够的纺丝温度是保证其充分溶解、获得良好流动性以实现冻胶挤出的必要条件<sup>[43]</sup>。纺丝温度过低会导致溶解不充分,挤出压力过高,甚至会使烯碳材料分散不佳,造成堵塞喷丝板的情况。然而,纺丝温度过高也会引起聚合物热降解,从而导致UHMWPE纤维的力学性能下降。因此,适宜的纺丝温度能够有助于提升烯碳材料在聚乙烯基体的均匀分散与相容性;纺丝温度影响聚合物在溶剂中的溶解度和溶液的弛豫时间,从而影响初生纤维的晶态结构。LI等<sup>[44]</sup>指出,高剪切力通过减少缠结数引发网络变形,凸显了温度在调控剪切诱导结构演变中的关键作用;在缠结浓度远高于链重叠浓度时,升高温度可降低体系熵值,有利于形成更大程度的网络变形。

#### 3.2.3 超倍热拉伸工艺

超倍热拉伸工艺是使UHMWPE纤维产生拉伸变形、大幅提高分子链取向度和结晶度的关键步骤<sup>[45]</sup>。而改性UHMWPE纤维所形成的结晶、取向等凝聚态结构不仅影响纤维的力学性能,同时也对纤维的蠕变行为和导电性产生重要的影响。

在湿法冻胶纺丝过程中,UHMWPE分子链发生解缠结并将解缠状态保持在冻胶纤维中,经过萃取干燥后形成大量的疏松的结晶结构。而超倍热拉伸过程迫使

UHMWPE分子链沿纤维轴向高度取向排列,并促使原有的折叠链晶体向伸直链晶体转变。随着拉伸倍数的增加,疏松的结晶结构致密化,纤维的熔点和结晶度逐渐升高,发生斜方晶系向六方晶系的固相转变;拉伸倍数继续增加,晶区缺陷逐渐减少,晶粒不断自我完善,晶区的取向度逐渐增加<sup>[46]</sup>。热拉伸过程同样会调整烯碳材料在纤维中的取向,如CNTs在牵伸力场下会沿纤维轴方向排列,起到成核剂作用,有利于纤维结晶度的提高<sup>[47]</sup>,从而更有效地承担和传递载荷,充分发挥其增强效应。

### 4 结论

UHMWPE纤维作为关键战略材料,其抗蠕变性能提升是研究的核心问题。本文系统分析共混改性、化学交联、分子链支化及辐照交联等抗蠕变方法的机理与效果,并进一步提出基于烯碳材料的物理交联与导电网络协同改性策略,为突破传统改性方法的局限提供了新方向。目前国内UHMWPE纤维产业产能较大,但仍面临超高强纤维制备技术不足、工艺调控精细化程度不高等挑战。未来研究应聚焦于烯碳材料可控分散、纺丝-拉伸工艺协同优化以及绿色低碳制备技术的开发,推动UHMWPE纤维向高抗蠕变、多功能化及结构一体化方向发展,满足高端领域对高性能纤维的持续需求。

### 参考文献

- [1] CHHETRI S, BOUGHERARA H. A comprehensive review on surface modification of UHMWPE fiber and interfacial properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 140: 106146.
- [2] 成畅, 秦立庆, 万琪, 等. 超高分子量聚乙烯纤维的研究现状及趋势[J]. 塑料科技, 2025, 53(10): 198-202.
- [3] WANG Y X, HOU R X. Research progress on surface modification and application status of UHMWPE fiber[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2263(1): 012016.
- [4] ZHANG W X, JING X F, BAI Y Q, et al. Study on the aging behavior of an ultra-high molecular weight polyethylene fiber barrier net in a marine environment[J]. Materials, 2022, 15(16): 5599.
- [5] 殷立杰. 超高分子量聚乙烯纤维表面改性及其增强复合材料的界面黏合研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [6] HE J, WANG Y, QIAN Y, et al. Surface modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene and applications: A review[J]. Polymers, 2024, 16(23): 3431.
- [7] 周文博. 石墨烯改性超高分子量聚乙烯单丝及其渔网的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [8] 汪维海, 陈宏, 黄志超, 等. 多酚-氨基硅烷改性超高分子量聚乙烯纤维的制备及其界面性能[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(6): 63-72.
- [9] 谢远洋, 钟璐玮, 韩松涛, 等. 超高分子量聚乙烯材料研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 188-192.
- [10] 黄鑫, 王恩召, 张天骄, 等. 紫外辐照交联改性UHMWPE纤维的研究[J]. 合成纤维工业, 2011(2): 23-26.
- [11] 董天泓, 王新鹏, 郭俊谷, 等. 耐热抗蠕变UHMWPE纤维的结构与性能研究[J]. 合成纤维, 2024, 53(8): 31-40.
- [12] 王玉周, 王玉庆, 刘佳鑫, 等. 不同尺寸石墨烯增强PA66纤维的效果

- 分析[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(5): 35-41.
- [13] 郭妙才, 赵大方, 鹿海军. 碳纳米管/石墨烯杂化碳纤维织物复合材料的力学、导电和雷击性能[J]. 复合材料学报, 2025(8): 4487-4498.
- [14] 王燕玲. 抗蠕变超高分子量聚乙烯纤维的制备及其性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2025.
- [15] BHATTACHARYYA A, CHEN S, ZHU M. Graphene reinforced ultra high molecular weight polyethylene with improved tensile strength and creep resistance properties[J]. Express Polymer Letters, 2014, 8(2): 74-84.
- [16] 郑晗, 孙勇飞, 王新威. 不同改性方法对超分子量聚乙烯纤维蠕变行为的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(8): 140-147.
- [17] LIU X X, ZHANG S H, XU X J, et al. Study on the creep and recovery behaviors of UHMWPE/CNTs composite fiber[J]. Fibers and Polymers, 2013, 14(10): 1635-1640.
- [18] 董天泓, 王新鹏, 郭俊谷, 等. UHMWPE 纤维抗蠕变改性的研究进展[J]. 合成纤维, 2023, 52(1): 13-19.
- [19] KAYANDAN S, DOSHI B N, ORAL E, et al. Surface cross-linked ultra high molecular weight polyethylene by emulsified diffusion of dicumyl peroxide[J]. Journal of Biomedical Materials Research, Part B, Applied Biomaterials, 2018, 106(4): 1517-1523.
- [20] 刘群. 超分子量聚乙烯的交联改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [21] 赵丽丽, 李杰, 蒋波, 等. UHMWPE 纤维抗蠕变性能的研究进展[J]. 合成纤维, 2025(11): 24-28.
- [22] 陶德昌, 文鑫, 严坤, 等. 硅烷交联 UHMWPE 纤维的在线制备及抗蠕变性能研究[J]. 化工新型材料, 2025(5): 83-89.
- [23] 王栋, 杨晨光, 文鑫, 等. 高抗蠕变自交联超分子量聚乙烯纤维及其制备方法: CN114318575A[P]. 2022-04-12.
- [24] YANG C G, TAO D C, WANG F, et al. Ultrahigh-molecular-weight polyethylene fibers with excellent creep resistance derived from an online-tailored fish-skeleton-like molecular structure[J]. Macromolecules, 2024, 57(14): 6848-6859.
- [25] DONG T H, NIU F F, QIANG Z, et al. Thermal aging behavior and heat resistance mechanism of ultraviolet crosslinked ultra-high molecular weight polyethylene fiber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, DOI: DOI: 10.1002/app.55648.
- [26] DONG T H, NIU F F, QIANG Z, et al. Structure and properties evolution of UV crosslinked ultra-high molecular weight polyethylene fiber during processing[J]. Journal of Polymer Science, 2024, 62(11): 2385-2398.
- [27] WEN X, LI Z Y, YANG C G, et al. Electron beam irradiation assisted preparation of UHMWPE fiber with 3D cross-linked structure and outstanding creep resistance[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 199: 110370.
- [28] 江猛, 孙小杰, 孙苗苗, 等. 高强紫外辐照对改性聚乙烯性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 24-29.
- [29] 王燕玲, 李娜, 王彦, 等. 紫外光辐照交联改性对 UHMWPE 纤维蠕变性能的影响[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2025(3): 433-443.
- [30] 蒋波, 王政委, 成凤, 等. 石墨烯对超分子量聚乙烯纤维蠕变行为的影响规律研究[J]. 复合材料科学与工程, 2025(10): 53-59.
- [31] 张秀雨, 于俊荣, 彭宏, 等. 硅烷交联改性对 UHMWPE 纤维蠕变性能的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2015(1): 1-5.
- [32] WANG H L, XU L, LI R, et al. Improving the creep resistance and tensile property of UHMWPE sheet by radiation cross-linking and annealing[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 125: 41-49.
- [33] 陈聚文, 潘婉莲, 黎倩倩, 等. 超分子量聚乙烯纤维蠕变性能改性研究[J]. 合成纤维, 2003(2): 15-17.
- [34] 李志尧. 超分子量聚乙烯纤维在线制备及蠕变性能调控研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2024.
- [35] 郑硕, 王勇军, 金依林, 等. 超高强型超分子量聚乙烯纤维多级热拉伸过程中的蠕变行为[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(10): 85-93.
- [36] 于俊荣. 高强高模聚乙烯纤维成形机理与工艺研究[D]. 上海: 东华大学, 2002.
- [37] 丁建涛, 孟凡涛, 隋江, 等. 石墨烯分散方法研究进展[J]. 应用化工, 2018(5): 1043-1047.
- [38] 丁会敏, 杨光, 唐诗洋, 等. 碳纳米管分散研究现状[J]. 黑龙江科学, 2023(20): 25-28.
- [39] 刘婉玥, 杨文刚, 姜欣荣, 等. 碳纳米管预分散及其对复合材料层间剪切力学性能影响研究[J]. 炭素技术, 2021, 40(6): 26-32.
- [40] 刘艳玲, 徐广海, 李玉武, 等. 超分子量聚乙烯黑色纤维的制备及性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2024(5): 83-87.
- [41] YANG W X, BIN Y Z, WANG H, et al. Rheological properties of UHMWPE/HDPE blend gels and morphology and mechanical properties of gel-spun fibers[J]. Polymer Engineering & Science, 2021, 61(7): 2127-2136.
- [42] WANG J, HU X F, LIU F K, et al. Gel-spinning of ultra-high molecular weight polyethylene by a twin-screw extruder with an ultra-large length-to-diameter ratio[J]. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(11): 3773-3785.
- [43] 赵丽丽, 成凤, 厉勇, 等. 超分子量聚乙烯溶胀工艺的研究进展[J]. 合成纤维, 2024, 53(7): 22-24.
- [44] LI K, MATSUBA G. Effects of shear temperature-controlled entanglement network on the structure evolution of poly(ethylene oxide) in shear flow[J]. Polymer, 2019, 171: 8-14.
- [45] QIN S X, JIN T C, ZHANG H B, et al. Optimization of hot drawing process of ultra-high molecular weight polyethylene monofilament prepared by melt spinning[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, DOI: 10.1002/app.53075.
- [46] 孙国庆. 超分子量聚乙烯纤维湿法冻胶纺丝成型工艺及结晶行为研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [47] 李燕. 多壁碳纳米管改性超分子量聚乙烯纤维的研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.