

超高分子量聚乙烯纤维制备技术进展

张瑞玲

中国石化仪征化纤有限责任公司 江苏 仪征 211400

摘要: 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维凭借其超长分子链等特性,具备优异的力学性能。本文从原料特性与配方优化入手,阐述了原料特性对纤维性能的影响及配方组分调整要点。介绍凝胶、熔融纺丝及后处理工艺的技术要点,探讨力学性能提升、耐环境及加工性能优化方向。还分析了新型工艺探索、绿色制备技术发展及多功能复合纤维制备等研究热点与发展趋势,为UHMWPE纤维制备技术发展提供参考。

关键词: 超高分子量聚乙烯纤维;凝胶纺丝;熔融纺丝;性能优化

引言:超高分子量聚乙烯纤维因出色的强度、模量和耐腐蚀性,在高性能材料需求增长中备受瞩目,极端环境下的稳定性使其成为现代材料的重要组成部分。制备技术进步对提升性能、拓展应用意义重大。近年该纤维从原料配方、纺丝工艺到后处理技术持续突破,为应用提供支撑。系统梳理发展现状,分析技术突破与创新方向,对推动研究和工程应用具有指导意义。

1 原料特性与配方优化

1.1 原料基本特性

超高分子量聚乙烯具有超长分子链结构,分子链长度远超普通聚乙烯,这种结构使其在受力时能通过分子链的滑移与取向分散应力,为纤维提供优异的力学性能基础^[1]。高结晶度是其另一显著特点,分子链规整排列形成紧密的晶体结构,增强分子间作用力,使纤维具备高强度与高模量。分子结构中的非极性特征,让材料对化学试剂表现出良好的抵抗能力,不易被酸碱侵蚀,有助于维持纤维在复杂环境中的性能稳定性。超长分子链还赋予材料出色的韧性,在外力冲击下不易断裂,这种特性使纤维在承受剧烈拉伸或撞击时能保持结构完整。分子链的缠结程度会影响材料的加工性能,缠结过密会增加溶解难度,缠结不足则可能导致纤维强度下降,需在制备过程中通过工艺调整平衡这一矛盾。分子链末端的基团性质也会影响材料性能,极性末端基团可增强分子间的相互作用,进一步提升纤维的抗疲劳性能,延长使用寿命。

1.2 配方组分调整

抗氧化剂在原料配方中能抑制分子链的氧化降解,延缓材料在加工和使用过程中的老化速度,保持纤维性能的长期稳定。润滑剂的加入可降低分子链间的摩擦阻力,改善材料在加工过程中的流动性,使熔体或溶液更易通过喷丝孔,减少加工过程中的能量消耗。不同添加

剂的比例需根据加工需求和纤维性能目标进行调节,抗氧化剂比例过高可能影响材料的结晶行为,降低纤维强度;润滑剂用量过多则可能削弱分子间作用力,导致纤维韧性下降。某些功能性添加剂能赋予纤维特殊性能,如紫外线吸收剂可提升纤维的耐候性,使其在户外环境中不易因光照而性能衰减。配方调整需综合考虑加工条件与最终应用场景,通过优化组分比例,使纤维在保持力学性能的同时,满足特定环境下的使用要求,实现加工性能与产品性能的协调统一。相容性助剂的加入可改善添加剂与聚合物基体的结合状态,避免添加剂团聚影响纤维均匀性,确保功能性在纤维中均匀分布,提升整体性能稳定性。增塑剂的适量添加可降低聚合物熔体黏度,尤其在低温加工时帮助提升材料流动性,且不显著影响纤维的核心力学性能。

2 主要制备工艺及技术要点

2.1 凝胶纺丝工艺

凝胶纺丝工艺始于聚合物溶解阶段,将超高分子量聚乙烯颗粒分散于特定溶剂中,通过加热与搅拌形成均匀的凝胶纺丝液。这一过程需控制溶解温度与时间,确保聚合物充分溶胀却不发生过度降解,纺丝液的黏度需维持在适宜范围,过高会导致流动困难,过低则影响后续成形稳定性^[2]。纺丝成形环节中,凝胶纺丝液经喷丝板挤出进入凝固浴,溶剂快速挥发或被萃取,形成含少量溶剂的凝胶丝条。凝胶丝拉伸是提升纤维性能的关键,拉伸过程中分子链随外力作用逐渐取向,凝胶状态下的塑性变形可减少分子链断裂,使取向更充分。拉伸程度直接影响纤维强度,适度拉伸能促使分子链排列更规整,过度拉伸则可能导致丝条断裂。凝固浴的温度与成分会改变凝胶丝的结构,进而影响后续拉伸效果,需与纺丝液特性形成匹配。凝胶丝在进入拉伸环节前需经洗涤去除残留溶剂,溶剂残留过多会削弱分子间作用力,

降低拉伸效率。洗涤所用液体的温度需与凝胶丝特性适配，温度过高可能引发丝条收缩，温度过低则难以彻底清除溶剂。

2.2 熔融纺丝工艺

熔融纺丝工艺的核心是原料熔融状态的精准控制，通过加热使超高分子量聚乙烯达到熔融流动状态，温度需高于熔点却不引发材料热降解。纺丝温度与速度的匹配决定纤维成形质量，温度过高会导致分子链热运动加剧，影响成形后的结构稳定性；温度过低则熔体黏度增大，纺丝速度被迫降低，制约生产效率。该工艺的技术难点在于平衡生产效率与纤维性能，快速纺丝虽能提升产量，但可能使分子链来不及充分取向，导致纤维强度下降。慢速纺丝可改善分子取向，却会降低生产节奏。熔体在喷丝孔出口处的牵伸比需精细调节，牵伸不足会使纤维截面不均匀，牵伸过度则易引发丝条断裂，需通过设备参数的协同调整实现稳定生产。纺丝组件的密封性能需严格保障，防止熔体泄漏造成温度波动，干扰纺丝过程的稳定性。喷丝板的清洁度对纺丝质量影响显著，微孔堵塞会导致纤维出现断头或粗细不均，需定期维护或更换，确保通畅。

2.3 后处理工艺

纤维成形后的拉伸环节通过外力作用进一步促使分子链取向，拉伸倍数增加可使分子排列更紧密，提升纤维的强度与模量。拉伸过程需分阶段进行，逐步提高拉伸程度，避免单次拉伸强度过大导致纤维断裂。拉伸时的环境温度需控制在材料的玻璃化转变温度以上，增强分子链的塑性，使取向更易实现。热处理环节通过加热让分子链在取向状态下进行松弛与重排，减少内应力的同时促进结晶完善。热处理温度需低于熔点，防止纤维结构因熔融而破坏，温度过低则无法达到优化结晶的效果。热处理时间与纤维厚度相关，较粗的纤维需延长处理时间以确保内部结构充分调整。后处理工艺通过调控拉伸倍数与热处理参数，协同优化纤维的结晶度与取向度，使力学性能得到显著提升，同时改善纤维的尺寸稳定性，减少使用过程中的形变。拉伸设备的夹持力需均匀分布，避免局部应力集中造成纤维损伤，影响最终性能。热处理后的冷却速率需缓慢控制，快速冷却可能导致内应力重新积聚，削弱热处理效果。

3 性能优化技术与方向

3.1 力学性能提升

力学性能是超高分子量聚乙烯纤维的核心指标，其提升需从分子链取向与结晶结构调控入手。原料的超长分子链结构为力学性能提升提供基础，通过优化纺丝工

艺强化分子链取向是关键路径^[3]。在凝胶纺丝中，提高拉伸倍率可促使分子链更规整排列，配合适宜的拉伸温度，减少分子链断裂，增强取向效果；熔融纺丝时，调整熔体温度与纺丝速度的匹配关系，为分子链取向创造有利条件，避免因速度过快导致取向不足。结晶结构的优化同样重要，原料的高结晶度特性可通过工艺参数调整进一步强化。冷却条件的控制能影响结晶形态，快速冷却可固定分子链取向结构，缓慢冷却则助力结晶完善，两者协同作用提升纤维强度与模量。喷丝孔的几何参数设计需与原料特性适配，引导分子链在挤出过程中预先取向，为后续拉伸环节的性能提升奠定基础。通过多工艺环节的协同，实现分子链取向与结晶结构的优化匹配，全面增强纤维的力学性能。

3.2 耐环境性能改进

耐环境性能的改进需结合原料的化学稳定性，通过工艺手段构建防护体系。超高分子量聚乙烯分子结构的非极性特征使其具备一定耐化学性，在此基础上，表面改性技术可进一步增强环境适应性。通过化学接枝引入抗紫外线基团，形成表层防护，减少光照对分子链的破坏，配合原料配方中添加的紫外线吸收剂，内外协同提升耐候性。针对酸碱等腐蚀环境，利用分子链的化学稳定性，通过共聚改性引入耐化学基团，降低纤维在腐蚀介质中的溶胀与侵蚀程度。表面涂覆惰性材料形成物理屏障，阻挡腐蚀性介质与纤维本体接触，且不影响原有力学性能。这些改进需与后处理工艺结合，确保防护层与纤维本体结合牢固，在保持原料固有化学稳定性的同时，显著提升纤维在复杂环境中的性能稳定性。

3.3 加工性能优化

加工性能的优化需兼顾原料的加工特性与制备工艺的顺畅性，为后续应用创造条件。超高分子量聚乙烯分子链的缠结状态影响加工流动性，通过配方调整可改善这一状况。添加润滑剂降低分子链间摩擦阻力，配合增塑剂适量加入，能有效降低熔体黏度，尤其在低温加工时提升流动性，使纺丝液更易通过喷丝孔，减少加工能耗。纤维的表面形态与线密度均匀性对后续加工至关重要，需通过纺丝与后处理工艺协同控制。调整冷却速率与拉伸条件，使纤维表面形成适度粗糙度，增强与其他材料的界面结合力，利于编织过程中的抱合力提升；优化纺丝参数减少线密度波动，确保编织时张力分布均匀，避免缺陷产生。这些优化措施需与纺丝工艺中的凝胶纺丝液黏度控制、熔融纺丝速度调节相呼应，形成从原料到成品的加工性能保障体系，使纤维更好适应不同应用场景的加工需求。

4 制备技术的研究热点与发展趋势

4.1 新型工艺探索

静电纺丝辅助工艺通过电场力作用使纺丝液形成超细纤维,这种技术能细化纤维直径,增加比表面积,为提升纤维力学性能提供新路径^[4]。电场参数的调整可控制纤维形态,均匀的电场分布有助于形成连续无缺陷的纤维结构,减少传统纺丝中可能出现的粗细不均现象。超临界流体纺丝技术利用超临界流体的特殊溶解性能,使聚合物在较低温度下形成均一溶液,降低加工过程中的能耗与热降解风险。超临界状态的调控能改变溶液的流变特性,使纺丝过程更易控制,所得纤维的结构更规整。这些新型工艺在提升纤维性能的同时,可能简化生产流程,减少设备投资与运行成本,为大规模应用创造条件。新型工艺还可与传统工艺结合,通过优势互补克服单一技术的局限性,拓展超高分子量聚乙烯纤维的性能边界。静电纺丝中引入磁场辅助,可进一步调控分子链取向,使纤维力学性能更优。微波辅助纺丝技术通过微波加热促进聚合物溶解,缩短制备时间,均匀的热场分布能减少纺丝液局部温差,提升纤维结构一致性。等离子体处理工艺可在纤维表面构建活性基团,增强与功能性材料的结合力,为多工艺融合提供新可能。

4.2 绿色制备技术发展

原料选用向可再生资源倾斜,通过生物基单体合成超高分子量聚乙烯,减少对化石资源的依赖,降低制备过程的环境负荷。溶剂回收技术的改进可提高溶剂循环利用率,采用高效分离方法回收纺丝废液中的溶剂,净化后的溶剂可重新用于纺丝过程,减少废弃物排放。能源消耗的优化通过工艺集成实现,将不同工序的能量需求进行统筹规划,利用余热回收装置将高温工序的热量转移至低温工序,提高能源利用效率。加工过程中引入环境友好型助剂,替代传统有毒有害助剂,降低对操作人员与周边环境的危害。绿色制备技术的发展注重全生命周期的环境影响,从原料获取到产品废弃处理,各环节均采取减量化、资源化措施,推动超高分子量聚乙烯纤维制备向可持续方向发展。开发可生物降解的纺丝溶剂,则能从源头减少环境污染,提升工艺绿色度。

4.3 多功能复合纤维制备

复合纺丝技术通过将超高分子量聚乙烯与功能性材料在纺丝过程中结合,形成兼具多种性能的复合纤维。将导电填料引入纺丝液,可制备具有导电性能的复合纤维,这种纤维在保持高强度的同时,能实现电信号传输,适用于智能穿戴领域。添加抗菌剂的复合纤维可抑制微生物滋生,拓展应用场景至医疗防护领域。复合方式的选择影响纤维性能,共混复合操作简便,适合大规模生产;皮芯复合则可使纤维表层与芯层分别承担不同功能,在保证力学性能的同时强化功能性表现。界面相容性的改善是复合纺丝的关键,通过表面处理或添加相容剂,增强不同组分间的结合力,能够避免复合纤维在受力时出现分层现象。多功能复合纤维的制备为超高分子量聚乙烯纤维赋予更多应用可能,推动其从结构材料向功能材料领域延伸。如将光催化材料融入复合纤维,可赋予其自清洁性能,提升在户外环境中的耐用性。

结束语

超高分子量聚乙烯纤维制备技术正朝着高效、环保与多功能化的方向发展。通过优化原料配比、改进纺丝工艺以及加强后处理控制,可以进一步提升纤维的综合性能。同时,绿色制备理念的引入和新型复合技术的应用,为材料的可持续发展和功能扩展提供了新路径。未来,还需持续推动工艺创新与设备升级,加快技术成果向实际应用的转化,使超高分子量聚乙烯纤维在更广泛的领域中发挥价值。

参考文献

- [1]黄伟,丁金友,陈功林,等.超高分子量聚乙烯纤维制备技术研究进展[J].塑料科技,2025,53(3):161-167.
- [2]徐建军.超高分子量聚乙烯纤维的工业化制备和构效关系综述[J].高分子通报,2024,37(6):776-791.
- [3]瞿才新,赵磊.基于超高分子量聚乙烯纤维的复合材料增强体制备与工艺[J].轻纺工业与技术,2025,54(1):24-26,55.
- [4]金长先,邵大冬,高乾宏.磷酸酯功能化超高分子量聚乙烯纤维的制备及其轴吸附性能[J].辐射研究与辐射工艺学报,2023,41(2):32-43.