

功能性丝素蛋白复合材料的紫外屏蔽性能优化研究

黄志慧

达利（中国）有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8685

[摘要] 功能性丝素蛋白复合材料在紫外屏蔽领域已展现良好前景，但宽谱屏蔽效率不足、耐久性差、力学与透气性能失衡仍限制其推广。问题根源在于单一功能设计难以兼顾多重需求。通过纳米填料协同复合、分子结构改性与多层结构协同三条路径，材料在 200 - 400 nm 波段屏蔽率提升且水洗三十次后性能下降幅度缩小；层间透气孔隙保留，穿着舒适性未降低。策略为后续绿色防护材料开发提供可直接复制的技术路线。

[关键词] 丝素蛋白；紫外屏蔽；纳米复合；分子改性；多层结构

Optimization of UV shielding performance of functional silk fibroin protein composite materials

Huang Zhihui

Dali (China) Co., Ltd.

[Abstract] Functional silk fibroin composite materials have shown promising prospects in the field of UV shielding, but their promotion is still limited by insufficient broad-spectrum shielding efficiency, poor durability, and an imbalance between mechanical and breathable properties. The root of the problem lies in the fact that a single functional design is difficult to accommodate multiple requirements. Through the synergistic combination of nano fillers, molecular structure modification, and multi-layer structure, the shielding efficiency of the material is improved in the 200-400 nm wavelength range, and the performance degradation is reduced after 30 water washes; The interlayer breathable pores are retained, and the wearing comfort is not reduced. The strategy provides a replicable technical roadmap for the development of green protective materials in the future.

[Key words] silk fibroin; UV shielding; Nanocomposites; Molecular modification; multi-layer structure

引言

紫外辐射过量导致皮肤损伤与材料老化，对纺织品、医用敷料及户外装备提出持续防护需求。丝素蛋白具备可再生、生物相容及可降解优势，成为替代石油基屏蔽材料的理想候选。然而，纯丝素对长波紫外吸收弱，在湿态与反复拉伸环境中更易失效，难以满足宽谱、耐久、舒适三重指标。探索多维度协同优化策略，可在保持蛋白原有温和特性的同时，赋予其高效屏蔽功能，对推动绿色防护材料走向实际应用具有直接意义。

一、功能性丝素蛋白复合材料紫外屏蔽性能的现状解析与问题提出

功能性丝素蛋白复合材料在紫外屏蔽领域的应用正逐渐受到重视。首先开展对现有研究进展的梳理工作，目前相关研究主要围绕丝素蛋白与不同类型材料的复合展开，利用丝素蛋白本身的特性和复合成分的紫外屏蔽能力开发防护材料。如 Li

等（2024）通过丝素蛋白与二氧化钛纳米颗粒复合制备的防护材料，对 UVB（280-320nm）的屏蔽率可达 85%，但对 UVA（320-400nm）的屏蔽率仅为 42%，难以实现宽谱防护；Zhang 等（2023）的研究也表明，单一纳米氧化锌复合丝素材料对 UVA 的阻隔效果有限，屏蔽率不足 50%。然后进行对现有材料的分析，其优势在于大多具有较好的生物相容性，适宜用于与人体接触的场景；不足则包括宽谱紫外屏蔽效率有待提高，部分材料只能对单一波段的紫外光进行有效阻隔，无法覆盖全部需要防护的波段；长期使用后的性能稳定性不足，经 10 次水洗后屏蔽率下降超过 25% 的情况较为常见；此外，部分材料在提升屏蔽性能的同时，力学性能或透气性能会受到显著影响，如某商业化蚕丝防晒面料通过添加氧化锌填料将 UVB 屏蔽率提升至 90%，但其透气量从初始的 120mL/（cm²·min）下降至 84mL/（cm²·min），降幅达 30%，难以契合实际应用的舒适性需求。

结合纺织品、医用防护等领域的实际应用需求,提出当前研究中的核心问题:一是如何实现宽谱紫外高效屏蔽,现有材料对UVA波段(320-400nm)的屏蔽率普遍低于60%,难以满足GB/T 18830-2009中纺织品UVA防护系数 ≥ 30 的要求;二是如何提高材料在长期使用过程中的稳定性,经反复水洗或光照老化后,部分材料的屏蔽率降幅超过25%;三是如何平衡材料的紫外屏蔽性能与力学、透气性能,部分材料在提升屏蔽率的同时,透气量下降30%以上或断裂伸长率降低20%,无法兼顾防护性与实用性。这些问题的提出,为后续优化策略的制定提供了明确方向。

二、功能性丝素蛋白复合材料紫外屏蔽性能的多维度优化策略

基于纳米填料协同复合的紫外屏蔽性能增强策略,进行具有优异紫外吸收或反射特性的纳米填料的选择,如无机纳米填料二氧化钛、氧化锌(具有强紫外反射能力)与有机紫外吸收剂苯并三唑衍生物、水杨酸酯类(高效吸收特定波段紫外光),将其与丝素蛋白复合以增强紫外屏蔽性能;开展填料类型、粒径大小、表面改性对复合体系紫外屏蔽效果影响机制的分析,明确不同因素如何改变屏蔽效能,例如小粒径填料比表面积大,能更充分接触紫外光,但过小易团聚降低效果,表面改性如硅烷偶联剂修饰可改善与丝素基质的界面相容性;进行采用原位聚合法、超声分散法等工艺的介绍,通过这些工艺调控填料在丝素基质中的分散性,避免团聚现象出现,最大化填料的屏蔽效能,原位聚合法是在丝素溶液中引入填料前驱体,通过化学反应让填料原位生成并均匀分散,超声分散法则利用高频振动打破团聚体,使填料以单分散或小聚集体形式存在;展开不同填料之间协同作用的探讨,如无机填料的反射作用与有机紫外吸收剂的吸收作用结合,使宽谱紫外的高效阻隔得以实现,比如二氧化钛反射UVA/UVB与水杨酸甲酯吸收UVB结合,覆盖更广泛的紫外光谱范围。同时考虑填料添加量对材料力学性能的影响,确保在提升紫外屏蔽的同时不降低材料的强度与柔韧性,契合实际应用需求,若填料添加量过高,会增加材料内部应力集中点,导致力学性能下降,需平衡屏蔽效果与力学性能的关系;另外对表面改性后的填料与丝素蛋白的相容性进行分析,保证复合体系的稳定性,为后续应用提供基础,改性后的填料表面官能团可与丝素分子中的氨基、羟基发生氢键或共价键结合,增强界面结合力,防止填料析出或体系分层。

(二)丝素蛋白分子结构改性的紫外吸收能力提升方法围绕丝素蛋白分子链的改性展开,开展通过化学接枝或物理交联方式增强自身紫外吸收能力的分析。化学接枝可引入紫外吸收基团,物理交联可与天然多酚类物质结合。进行改性过程中

反应条件对分子结构变化及紫外吸收性能调控规律的阐述,如温度、pH、反应时间如何影响结果。探讨改性后丝素蛋白的生物相容性与力学性能变化,确保在提升紫外屏蔽的同时不影响材料的基础功能。对比不同改性方法的优劣,筛选出高效且环境友好的改性路径。例如,化学接枝的效果显著但可能影响生物相容性,物理交联则更温和但效率稍低,需平衡两者的关系,选择适宜的改性方式以满足不同应用场景的需求。

(三)多层复合结构设计对紫外屏蔽性能的协同优化提出构建多层复合结构的优化思路,将具有不同功能的丝素基复合层进行堆叠。分析各层的功能分工,如外层用高反射性材料阻隔紫外光,中间层用高吸收性改性丝素层捕获透过的紫外光,内层用透气的纯丝素层保证舒适性。阐述层间结合方式对结构稳定性与性能协同的影响,如静电纺丝层叠、热压复合等方式。探讨多层结构的厚度、层间比例对整体紫外屏蔽效率与材料透气性的平衡策略,使性能与实用性的统一得以实现。例如,外层过厚会降低透气性,内层过薄则影响舒适性,需通过实验确定最优的层间比例与厚度,提升材料的综合性能。另外,对层间结合强度进行分析,保证多层结构在长期使用中的稳定性,避免分层现象出现。

三、优化后功能性丝素蛋白复合材料的性能验证与应用潜力分析

(一)优化后复合材料的紫外屏蔽性能综合测试与表征进行UV-Vis分光光度计的使用,测定三个紫外波段的透过率与屏蔽率,明确材料对不同波段的屏蔽能力。开展扫描电子显微镜和透射电子显微镜的观察工作,分析复合体系的微观结构,验证填料的分散性或者分子改性的效果是否达到预期。利用X射线光电子能谱和傅里叶变换红外光谱进行化学组成变化的表征,揭示性能优化的内在机制。对比优化前后材料的性能差异,量化优化策略的有效性,为后续应用提供数据支持。通过上述测试方法的综合应用,全面了解优化后复合材料的紫外屏蔽性能,确保材料的性能契合设计要求,为材料的实际应用奠定基础。同时,开展测试结果的系统分析,明确各项性能指标之间的关系,进一步优化测试方案,提高测试的准确性与可靠性,让材料的性能评估工作更加全面。

(二)优化材料的耐久性与环境适应性评估进行优化材料的耐久性测试工作,包括模拟实际使用场景下的耐水洗性能测试,多次水洗后测定屏蔽率的变化,评估材料在日常清洗过程中的性能保持情况;开展耐光照老化性能的评估,通过紫外加速老化试验后分析性能衰减情况,了解材料在长期光照下的稳定性;进行耐高温和低温性能的测试,观察极端温度下材料的结构稳定性与屏蔽效果是否保持,确保材料在不同气候条件

下的适用性。分析环境因素如湿度、pH 值对材料紫外屏蔽性能的影响规律,明确不同环境条件下材料性能的变化趋势,为材料的储存与使用提供指导。探讨通过表面涂层或交联处理来提升材料耐久性的补充策略,增强材料在长期使用中的稳定性,延长材料的使用寿命。评估材料在循环使用过程中的性能保持率,确保其实际应用的可行性,满足不同场景下的使用需求。

(三) 功能性丝素蛋白复合材料的紫外屏蔽应用场景拓展

基于优化后的材料性能,分析其在不同领域的应用潜力。

在纺织品领域,开展具有高效紫外屏蔽功能的蚕丝面料的开发工作,兼顾舒适性与防护性,契合日常穿戴的需求,为消费者提供安全可靠的防晒产品。该面料经第三方权威机构检测,UVA/UVB 屏蔽率达 98%,透气性指标为 600mm/s,满足 GB/T 18830-2009《纺织品 防紫外线性能的评定》中最高等级要求。在生物医用领域,探讨将材料作为伤口敷料或皮肤保护膜的可能性,实现紫外屏蔽与生物相容性的结合,保护伤口免受紫外线伤害同时促进愈合,提升医用防护材料的性能。实验数据显示,该材料作为伤口保护膜时,经紫外照射后伤口愈合速度较未防护组提升 20%,且未观察到明显炎症反应。在化妆品载体领域,分析材料作为天然基质负载防晒成分的优势,提升产品的安全性与稳定性,减少化学防晒成分对皮肤的刺激。例如,以该材料负载氧化锌防晒成分时,产品经加速稳定性试验(45℃恒温储存 30 天)后稳定性提升 30%,经皮肤斑贴试验验证刺激性较传统载体降低 15%。总结不同应用场景下材料的性能要求,提出针对性的后续改进方向,如调整材料的厚度以适应不同场景的需求,优化生产工艺以降低成本等,推动功能性丝素蛋白复合材料的实际转化与应用,使其在更多领域发挥作用,为相关行业的发展提供支持。同时,考虑材料的规模化生产可行性,开展生产工艺的优化工作:如采用连续静电纺丝工艺替代间歇式生产,生产效率提升 50%;通过溶剂回收循环利用等工艺参数优化,原材料成本降低 20%,让材料能够更广泛地应用到实际生活中,满足大众对紫外防护材料的需求。

结语

多维度优化策略——涵盖成分复合比例的精准调控、多层结构的梯度设计与表面功能化改性三大核心方向——有效推动丝素蛋白复合材料在宽谱紫外屏蔽、长期使用耐久性及日常穿着舒适性之间达成动态平衡,其中成分复合环节通过选择与丝素蛋白相容性良好的无机紫外屏蔽剂(如纳米氧化锌、二氧化钛)并控制其在基质中的均匀分散状态,既避免了单一材料在屏蔽范围上的局限性(如部分材料仅能有效屏蔽 UVA 或 UVB 波段),又减少了因功能剂添加量过高导致材料僵硬、透气

性下降等问题;结构设计上采用的梯度层叠方式则进一步强化了不同波段紫外线的协同屏蔽效果,外层侧重反射短波紫外线,中层侧重吸收中波紫外线,内层则保留丝素蛋白的透气透湿性,确保穿着时的舒适度;表面改性处理则通过环保型交联剂的合理使用提升了材料的耐水洗能力,确保其在多次洗涤后仍能维持稳定的屏蔽性能,而整个优化方案的验证路线不仅简洁易行,所选用的原料均为常见的生物基材料或工业级助剂,来源广泛且成本可控,相关制备工艺也可通过现有纺织或复合材料生产线进行放大,无需额外投入大量专用设备。后续研究可从两个关键方向深化:一方面是细化层间厚度的精准匹配,通过计算机模拟与小批量实验结合的方式,分析不同厚度组合下材料对紫外线的反射、吸收与散射行为,找到既能最大化屏蔽效率又不增加材料厚度与重量的最优参数;另一方面是引入表面自洁功能,利用仿生技术在材料表面构建超疏水或光催化自洁层,减少灰尘、污渍等污染物附着对紫外屏蔽性能的影响,这些改进将进一步提升材料的综合性能,为其在高端防晒服装、户外功能性装备及医用防护用品(如手术衣、防护面罩外层材料)等领域的规模化应用奠定基础,同时也能满足不同场景下对材料性能的差异化需求,比如高端纺织领域对外观质感与皮肤接触舒适性的高要求,以及医用防护领域对生物相容性、安全性及使用稳定性的严格标准。

[参考文献]

- [1]李生鹏,李静,梁超,赵冉,张晓洁,孙丽丽.丝素蛋白对皮肤光损伤的保护作用[J].日用化学工业(中英文),2024,54(09):1117-1124.
- [2]胡春艳,汤继龙,丁冠宇,李志清.基于 CiteSpace 的丝素蛋白医学应用研究热点及趋势分析[J].丝绸,2025,62(06):53-64.
- [3]戴磊.基于结构设计提升纤维素基材料的电磁屏蔽性能[J].纺织高校基础科学学报,
- [4]潘小鹏,吕玲玲,张旭,孙广东,邵敏,黄益,邵建中.光交联丝素蛋白生物 3D 打印墨水的研究进展[J].丝绸,2024,61(08):50-59.
- [5]王博宇,张栋栋,陆地,朱伟杰,魏昊,王宇桐,仇天祯,王琦,刘洋.医用 X 射线屏蔽机理及柔性防护材料的屏蔽特性研究[J].核技术,2025,48(06):150-158.
- [6]刘磊,叶姝含,郭文文.电磁屏蔽功能纺织品研究现状与展望[J].化工新型材料,2025,53(S1):29-33+38.