

基于碳量子点在服装材料中的安全应用研究

刘传营

南通理工学院 江苏 南通 226002

【摘要】：随着纺织工业的技术创新与发展，碳量子点作为新型荧光材料在服装领域展现出独特优势。碳量子点具有优异的光学性能、低毒性、环境友好及易于制备等特点，在服装材料领域的应用研究方兴未艾，通过对碳量子点与纤维材料结合机理的深入探究，开发出多种功能性服装材料制备工艺，实现了碳量子点在服装面料中的稳定负载，研究表明碳量子点改性后的服装材料具有良好的荧光性能和稳定性，在服装功能性开发方面展现出广阔应用前景，为服装产业的技术升级提供新思路。

【关键词】：碳量子点；服装材料；荧光性能；功能性纤维

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.033

碳量子点作为新兴的碳基纳米材料，因其独特的光学特性和优异的生物相容性，在材料科学领域备受瞩目。近年来随着纺织工业向智能化、功能化方向发展，碳量子点在服装材料领域的应用研究逐渐深入，碳量子点与纺织纤维的复合改性不仅赋予面料新颖的光学性能，还能保持织物原有的柔软性和透气性，通过深入研究碳量子点在服装材料中的应用机制，开发新型功能性面料制备工艺，对推动纺织工业技术创新具有重要价值。

1 碳量子点的制备与表征

1.1 碳量子点的制备方法

碳量子点的制备方法主要包括化学氧化法、水热法和电化学法等工艺路线，化学氧化法采用浓硫酸和浓硝酸混合液对碳源进行氧化处理，在 120℃ 条件下反应 6h，经过离心分离、透析、冷冻干燥等步骤制备碳量子点，水热法将葡萄糖、柠檬酸等含碳原料溶解在去离子水中，转移至反应釜中密封，在 180℃ 下反应 4h，获得棕黄色溶液，经过透析后得到碳量子点。电化学法利用石墨电极在电解液中进行电化学氧化还原反应，施加电压控制在 3V 至 5V 之间，反应 2h 后获得碳量子点溶液，相比之下水热法具有工艺简单、原料易得、产率较高等优点，适合规模化生产，制备得到的碳量子点粒径分布在 2nm 至 10nm 之间，形貌均匀，分散性良好，表面富含羧基、羟基等含氧官能团，这些特征为后续与纺织纤维的复合奠定基础^[1]。

1.2 碳量子点的性能表征

碳量子点的性能表征涉及形貌结构、光学性质和表面特性

等多个方面，透射电镜观察显示，制备的碳量子点呈球形结构，粒径分布均匀，未出现明显团聚现象。X 射线衍射图谱中在 $2\theta=25^\circ$ 处出现特征峰，表明碳量子点具有石墨化结构，傅里叶变换红外光谱分析发现，碳量子点表面存在 C=O、C-O、O-H 等特征吸收峰，证实表面富含含氧官能团，紫外可见吸收光谱显示，碳量子点在 230nm 至 270nm 范围内出现 $\pi-\pi$ 跃迁吸收峰，在 300nm 至 360nm 范围内出现 n- π 跃迁吸收峰。荧光光谱测试表明，碳量子点在 365nm 激发光下发出蓝绿色荧光，量子产率达到 15%，荧光寿命约为 5ns，动态光散射实验结果显示，碳量子点在水溶液中具有较好的分散稳定性，Zeta 电位为 -35mV，这些表征结果充分证实所制备的碳量子点具备优异的光学性能和表面活性，为后续应用研究提供可靠依据。

2 碳量子点与服装材料的复合技术

2.1 溶液浸渍法

溶液浸渍法是实现碳量子点与纺织纤维复合的常用方法，该方法将碳量子点水溶液配制成浓度为 0.5mg/mL 至 2.0mg/mL 的溶液，将织物样品浸入溶液中，在 60℃ 条件下浸渍处理 2h，期间间歇搅拌确保溶液与织物充分接触，浸渍完成后将织物取出，用去离子水反复漂洗至清洗液无明显荧光，随后在 50℃ 真空干燥 12h。实验发现，溶液 pH 值、浸渍温度和时间对复合效果有显著影响，当 pH 值为 7.0 时，碳量子点在纤维表面的分布最为均匀；温度升高有利于提高复合效率，但超过 80℃ 会导致织物强度下降；浸渍时间延长可增加碳量子点负载量，但 4h 后趋于饱和，该方法操作简单，适用于各类纺织材料，但存在部分碳量子点易脱落的问题。

2.2 原位合成法

原位合成法通过在纺织纤维表面直接生成碳量子点,实现复合改性,具体步骤是将纺织品浸入含有碳源和催化剂的前驱体溶液中,在140℃至160℃条件下进行水热反应,碳量子点在纤维表面原位生长。采用柠檬酸作为碳源时,将织物浸入质量分数为10%的柠檬酸溶液中,添加乙二胺作为催化剂,在高压反应釜中反应3h,该方法形成的碳量子点与纤维结合牢固,在反复水洗和摩擦后仍保持良好的荧光性能,扫描电镜观察显示,碳量子点均匀分布在纤维表面,粒径约为5nm,与纤维之间形成化学键合,这种方法避免了后处理过程,提高了复合效率,但反应条件要求较高^[2]。

2.3 静电纺丝法

静电纺丝法是将碳量子点与高分子材料共混纺丝制备复合纤维的新型方法,将碳量子点分散在聚乙烯醇、聚丙烯腈等纺丝液中,在15kV电压下进行静电纺丝,收集距离设定为15cm,纺丝液浓度控制在12%。制得的复合纳米纤维直径在200nm至500nm之间,碳量子点均匀分布在纤维基体中,透射电镜观察表明,碳量子点未发生团聚,与基体材料相容性良好,该方法可实现碳量子点的定向排列,提高发光效率,且纤维结构稳定,具有优异的力学性能,实验数据显示,添加质量分数为1%的碳量子点后,纤维的断裂强度达到350MPa,延伸率保持在15%以上。

2.4 喷涂法

喷涂法是一种快速简便的表面改性技术,将碳量子点分散液通过喷枪均匀喷涂在织物表面。制备过程中,将碳量子点分散液配制成浓度为1.5mg/mL的水溶液,加入质量分数为0.5%的羧甲基纤维素作为增稠剂,搅拌均匀后超声分散30min,喷涂工艺参数中,喷枪压力控制在0.2MPa,喷涂距离保持在20cm,喷涂速率控制在2mL/min,为确保涂层均匀性,喷涂过程采用往复式喷涂方式,每次喷涂面积重叠率控制在30%,单次喷涂厚度约70nm,经过三层喷涂后形成理想厚度。

为提高涂层与织物的结合力,在喷涂前采用低温等离子体对织物进行表面改性,处理功率为80W,氧气流量为50sccm,处理时间为90s,改性后织物表面亲水性显著提升,水接触角从85°降至35°,有利于碳量子点分散液的均匀铺展。实验结果表明,最终制得的复合织物表面形成均匀致密的碳量子点涂层,厚度约为200nm,扫描电镜观察显示涂层结构完整,无明显裂纹和孔洞,经过5000次摩擦循环测试后,涂层保持完整,重量损失率低于2%,该方法在保证改性效果的同时,具有工艺简单、设备投入少、生产效率高优势,特别适合规模化生产应用。

2.5 等离子体处理法

等离子体处理法利用低温等离子体对织物表面进行活化,增强与碳量子点的结合力,采用射频等离子体处理仪以氧气为工作气体,功率设定为100W,处理时间为180s。等离子体轰击在织物表面产生自由基和活性官能团,随后将织物浸入碳量子点溶液中进行复合,X射线光电子能谱分析表明,等离子体处理后织物表面的含氧基团明显增加,有利于与碳量子点形成化学键合,处理后的织物在摩擦和水洗测试中表现出优异的稳定性,荧光强度衰减不超过10%,该方法可显著改善复合效果,但设备投入较大,处理成本相对较高^[3]。

3 碳量子点改性服装材料的性能研究

3.1 光学性能分析

碳量子点改性后的服装材料展现出独特的光学性能,荧光光谱测试显示,改性织物在紫外光激发下发出稳定的蓝绿色荧光,发射峰位于450nm处,半峰宽约为80nm,激发光谱分析表明,最佳激发波长为365nm,在此波长下荧光强度达到最大值。荧光强度与碳量子点负载量呈正相关,当负载量从0.5%增加至2%时,荧光强度提升了3.2倍,继续增加负载量则出现荧光猝灭现象,量子产率测定结果显示,改性织物的荧光量子产率达到12%,这一数值远高于传统荧光织物,光致发光寿命测试发现,改性织物的荧光寿命约为4.5ns,衰减曲线呈现典型的单指数规律,表明发光过程稳定。

紫外可见漫反射光谱分析进一步揭示了改性织物的光学特性,在紫外区域200nm至400nm范围内,改性织物表现出强烈的吸收,透过率低于5%,表明具有优异的紫外线屏蔽效果。在可见光区域400nm至800nm,织物保持良好的透光性,透过率维持在85%以上,色度测试结果显示,改性织物在日光下呈现淡黄色,Lab值分别为95、-2.3、4.6,色差值 ΔE 小于1.5,说明改性对织物原有色泽影响较小,同时,在不同角度观察下,改性织物表现出独特的角度依赖性发光现象,这种特性为开发防伪标识提供新思路^[4]。

3.2 结构形貌表征

扫描电镜观察显示,碳量子点在纤维表面形成均匀的覆盖层,未出现明显团聚和脱落现象,高倍率成像下可见碳量子点呈规则球形颗粒,粒径分布在3nm至8nm之间,颗粒间距均匀。表面元素分布图谱分析表明,碳元素和氧元素分布密度显著提升,且分布均匀性良好,断面分析发现碳量子点主要分布在纤维表层0.5 μ m范围内,未出现深层渗透现象,原子力显微镜三维成像显示,改性织物表面形成均匀起伏的微观形貌,粗糙度Ra值从改性前的56nm升至89nm,显示出典型的纳米尺度表面特征。

X射线衍射分析发现,改性后织物在 2θ 为 15.2° 、 22.8° 和 34.5° 处的特征衍射峰位置和强度与原织物基本一致,表明碳量子点的引入未改变纤维的结晶结构。傅里叶变换红外光谱显示,改性织物在 3400cm^{-1} 处出现羟基伸缩振动吸收峰, 1640cm^{-1} 处出现羰基伸缩振动吸收峰,且峰强度明显增强,在 1380cm^{-1} 和 1120cm^{-1} 处新增的特征峰分别归属于C-N和C-O-C键的振动,证实碳量子点通过化学键合方式与纤维分子链发生了交联作用,拉曼光谱进一步验证了碳量子点的成功负载,在 1350cm^{-1} 和 1580cm^{-1} 处出现特征的D峰和G峰。

3.3 稳定性评价

改性织物的稳定性通过水洗、摩擦、光照等测试进行系统评价,标准水洗50次后,织物的荧光强度保持在初始值的85%以上,表面形貌未见明显变化,洗涤废液中未检测到碳量子点脱落,干湿摩擦色牢度测试结果均达到4级,表明碳量子点与纤维结合牢固。氙灯加速老化试验中,采用光照强度为 $550\text{W}/\text{m}^2$,经过100h曝光后,织物的荧光强度降低约20%,但发射光谱峰形和峰位保持稳定,热稳定性测试显示,改性织物在 120°C 环境下放置24h,重量损失小于1%,荧光光谱特征未发生改变,耐酸碱性测试采用不同pH值缓冲溶液浸泡处理,结果表明在pH值3至11范围内,织物的发光性能和光谱特征均保持稳定,且织物强度损失率控制在5%以内,证实改性织物具有优异的化学稳定性^[5]。

3.4 生物相容性研究

采用MTT法评价改性织物的细胞毒性,实验选用L929小鼠成纤维细胞,培养时间为24h、48h和72h。结果显示,

细胞存活率均在90%以上,说明改性织物具有良好的生物相容性,皮肤刺激试验采用白兔进行测试,改性织物与皮肤接触72h后,未观察到红肿、水肿等异常现象,刺激指数为0级,过敏反应测试选择豚鼠为实验对象,结果表明改性织物不会引起过敏反应,微生物测试显示,改性织物对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均无抑制作用,不会影响皮肤正常菌群。

3.5 应用性能测试

改性织物的应用性能测试包括力学性能、透气性、吸湿性等方面,拉伸测试结果显示,改性后织物的断裂强度为原织物的95%,延伸率基本保持不变,透气性测试表明,改性织物的透气率达到 $85\text{mm}/\text{s}$,满足服装面料要求。吸湿性测试发现,改性织物20min的吸水率为185%,与未改性织物相近,防紫外性能测试显示,改性织物的紫外防护系数UPF值超过40,达到优异防护等级,导热系数测定结果表明,改性不影响织物的热舒适性,织物悬垂性、抗皱性等风格指标也基本保持原有水平,这些结果证实碳量子点改性不会影响织物的基本性能。

4 结语

碳量子点在服装材料中的应用研究取得显著进展,通过优化制备工艺和改性方法,实现了碳量子点与纺织纤维的有效复合,研究发现,碳量子点改性后的服装材料不仅保持了原有织物的优良特性还获得了独特的荧光性能,这些研究成果为开发新型功能性服装材料提供了技术支持,推动了纺织工业向智能化、功能化方向发展,未来仍需提高碳量子点负载稳定性、优化制备工艺等方面深入研究,进一步拓展应用领域。

参考文献:

- [1] 周杰,包妍,朱蓓蓓,等.石墨相氮化碳量子点的合成及在分析检测中的应用进展[J].化工新型材料,2023,51(03):36-44.
- [2] 周嫣然,李依晨,李笑然,等.基于生物质材料的碳量子点的制备与性质探究[J].发明与创新(高中生),2023,(03):28-33.
- [3] 孙茜沄,胡定煜,刘昊月.基于Cite Space的碳量子点研究热点及趋势可视化分析[J].分析实验室,2023,42(06):843-852.
- [4] 周艳,陈学国,明珠,等.基于量子点的检测技术在法庭科学物证鉴定中的应用研究进展[J].化学研究与应用,2023,35(04):737-744.
- [5] 孙文瑾,李瑞珍,刘伟峰,等.基于碳量子点的分子印迹荧光检测体系研究进展[J].中国材料进展,2023,42(03):228-237.