

UV 辐照对尼龙 6 织物结构与性能的影响

叶 挺 王潮霞 殷允杰

(江南大学纺织科学与工程学院生态纺织教育部重点实验室 无锡 214122)

摘要 为了探究紫外(Ultraviolet, UV)辐照对尼龙 6 织物结构与性能的影响,采用固定功率(100 W/cm^2)的紫外光对尼龙 6 织物进行辐照,分析不同辐照时间对其表面形态、红外光谱、白度、力学性能、热稳定性、表面润湿性等产生的影响。结果表明:UV 辐照对尼龙 6 织物的结构与性能造成损伤。当辐照时间达 8 min 时,尼龙 6 织物表面粗糙程度增加,纤维之间发生粘连;衰减全反射红外光谱显示尼龙 6 织物表面部分发生光氧化降解;辐照后织物泛黄,白度下降;由于酰胺键($-\text{CONH}-$)断裂,纤维无定形区增加,尼龙 6 织物的熔点由原来的 $223.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $215.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,热稳定性下降;断裂强力从 $1\ 008.0\text{ N}$ 下降到 425.3 N ;辐照后织物的表面润湿性增加。进一步增大 UV 辐照的时间,尼龙 6 织物的结构与性能损伤程度会增大。

关键词 尼龙 6 织物, UV 辐照, 断裂强力, 热稳定性, 表面润湿性

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rj.39.030204

Effects of ultraviolet irradiation on structure and properties of nylon 6

YE Ting WANG Chaoxia YIN Yunjie

(Key Laboratory of Science & Technology of Eco-Textile, Ministry of Education, College of Textiles Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT Nylon 6 fabric was subjected to ultraviolet (UV) irradiation for different time periods (with a UV power density of 100 W/cm^2) to investigate the influence of UV irradiation on the structure and properties of the nylon 6 fabric. The surface morphology, infrared spectra, whiteness, breaking strength, thermal stability, and surface wettability were discussed herein. The results indicate that UV irradiation could cause damage to the structure and properties of the nylon 6 fabric. When the fabric was UV-irradiated for 8 min, the surface roughness of the fiber increased, and adhesion occurred between the fibers. The attenuated total reflection Fourier transformed infrared spectroscopy (ATR-FTIR) spectra indicate that the UV-irradiated part of the nylon 6 fabric surface was photo-oxidized. After the UV irradiation, the nylon 6 fabric became yellow, and the whiteness decreased. Owing to the fracture of the amide group ($-\text{CONH}-$), the amorphous region of the fiber increased. As a result, the melting point of the nylon 6 fabric decreased from $223.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $215.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, suggesting a reduction in thermal stability, and the breaking strength decreased from $1\ 008.0\text{ N}$ to 425.3 N . After the UV irradiation, the surface wettability of the fabric

基金资助: 国家中重点研发计划-子课题(2018YFC0810304)和江苏省自然科学基金(SBK2019020945)资助

第一作者: 叶挺,男,1997年11月出生,2019年于河南工程学院获工学学士学位,现为江南大学硕士研究生,主要研究方向为纺织品功能整理

通信作者: 殷允杰,博士,副教授, E-mail: yinyunjie@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 初稿 2020-08-21; 修回 2021-01-04

Supported by National Key R&D Program-Sub-project (National Key Research and Development Program of China, 2018YFC0810304) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (SBK2019020945)

First author: YE Ting (male) was born in November 1997, and obtained his bachelor's degree from Henan University of Engineering. Now he is a graduate student at Jiangnan University, focusing on material science; organic chemistry; functional coating

Corresponding author: YIN Yunjie, doctoral degree, associate professor, E-mail: yinyunjie@jiangnan.edu.cn

Received 21 August 2020; accepted 04 January 2021

increased. Damages caused to the structure and properties of the nylon 6 fabric would become more serious with further increase in the irradiation time.

KEYWORDS Nylon 6 fabric, UV irradiation, Breaking strength, Thermal stability, Surface wettability

CLC TL13

聚己内酰胺 (PA), 俗称尼龙 6, 是由己内酰胺单体在高温下开环聚合制备的一类高分子聚合物, 其分子主链中含有大量的酰胺键 ($-\text{CONH}-$)^[1-3]。它的表面光滑, 耐磨性好, 强度居合成纤维之首^[4-5], 这种面料非常适合做户外登山服、冲锋衣等^[6-7]。但户外运动过程中, 由于光照中含有大量紫外光线, 在空气和阳光下, 光氧化降解是聚酰胺主要的降解方式^[8], 经长时间照射会造成面料表面逐渐老化, 织物组织结构内部脆损。

UV 辐照技术通常采用的紫外光波长为 180~380 nm, 并受外界各种环境因素 (光照、氧气、水分、温度) 的影响^[9-11], 尼龙 6 织物在紫外辐照条件下会发生交联和光氧化现象^[12], 且绝大多数老化现象大部分都集中在化学老化方面, 主要体现为纤维大分子链的交联和降解^[13]。空气中的氧气在 UV 辐照下会转变为活性氧^[14-15], 高分子纤维材料会被氧化, 表面生成大量极性基团 (如羧基、羟基、醛基等)^[16]。UV 辐照技术有诸多优点: 辐照过程中不需要添加其他助剂就能在材料表面迅速光固化成膜^[17], 同时保持材料本身的洁净性, 辐照所需时间短, 生产效率高, 产品出错率低^[18]。通过 UV 辐照光固化成膜技术将性能优异的高分子材料结合到织物表面, 进而赋予织物优异的性能, 这种方法值得深入探究^[19]。但 UV 光固化的同时也会对织物造成一定的影响, 使织物本身的结构和性能发生一些变化^[20]。

为了探究 UV 辐照对尼龙 6 织物结构和性能的影响, 本文对尼龙 6 织物进行 UV 辐照处理, 分析了 UV 辐照前后织物的形态结构、热稳定性、白度、力学性能、表面润湿性的变化情况, 为 UV 辐照在尼龙 6 织物表面改性及后续光固化成膜的应用奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 药品与仪器

超细 400D 尼龙 6 织物 (克重 181.33 g/m², 厚度 0.5 mm), 碧川纺织有限公司产品。AL-104 型电子天平、20A-4KW 型紫外辐照仪 (保定荣达电

子设备有限公司, 功率密度 100 W/cm²)、SU1510 型扫描电子显微镜 (日本日立株式会社)、HD026N+ 型电子织物强力仪 (南通宏大实验仪器有限公司)、Datacolor-850 型电脑测色配色仪 (美国爱色丽股份有限公司)、WSD-III 型全自动白度仪 (北京康光仪器有限公司)、Q200 差示扫描量热仪 (美国 TA 仪器公司)、Nicolet.is10 傅里叶变换红外光谱仪 (美国赛默飞世尔科技有限公司)、DSA100 型液滴形状分析仪 (德国 KPÜSS 仪器公司)。

1.2 尼龙 6 织物 UV 辐照处理

履带式紫外辐照仪 (主峰波长 365 nm, UV 功率密度 100 W/cm²) 预热 2 min 后, 将织物直接置于紫外灯的正下方 (辐照距离为 15 cm), 开始计时。经辐照所需的时间后, 将织物取出, 然后进行各项测试。为保证实验的准确性, 所用的织物都辐照同一面 (称辐照面为织物正面, 未辐照面为反面, 下文不再赘述)。

1.3 衰减全反射红外光谱 (ATR-FTIR) 测试

为了探究 UV 辐照处理对尼龙 6 织物表面基团的影响, 使用 Nicolet.is10 型傅里叶红外光谱仪, 将辐照后的尼龙 6 织物对折两次, 放置在探头与样品台中间进行 ATR 测试, 测试范围为 500~4 000 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹, 扫描次数为 32, 对 UV 辐照前后织物进行衰减全反射红外光谱分析。

1.4 尼龙 6 织物表面形态

使用 SU1510 型扫描电子显微镜, 分别放大不同倍数, 观察比较 UV 辐照前后织物的表面微观形貌。

1.5 尼龙 6 织物热稳定性

采用 Q200 差示扫描量热仪分析 UV 辐照前后尼龙 6 热稳定性是否发生变化。测试条件: 氮气流量为 20 mL/min, 升温速率为 10 °C/min, 测量温度范围为 25~300 °C。采用量热法测试结晶度 X_c (%), 计算见式 (1)。

$$X_c = \frac{\Delta H_{\text{EXP}} \times 100}{\Delta H_F} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_{EXP} 为试样的结晶焓; ΔH_F 是尼龙 6 织物的 100% 结晶焓, 取值 188.1 J/g^[21]。

1.6 尼龙 6 织物白度

尼龙 6 织物本身表面光滑, 富有光泽。经 UV 辐照后观察到织物表面泛黄程度随辐照时间加深, 为进一步探究 UV 辐照对织物白度的影响情况, 使用 Daticolor-850 型电脑测色配色仪测量其织物表面的表观色深值。用 WSD-III 型白度仪测定织物的白度。将织物折叠成 4 层 (织物经、纬方向保持一致), 测量同一块织物的 4 个不同点 (A、B、C、D), 取其算术平均值, 结果以亨利白度值表示。亨特白度计算公式见式 (2)。

$$W_h = 100 - \sqrt{(100 - L^2) + a^2 + b^2} \quad (2)$$

式中: W_h 表示亨特白度; L 表示亨特明度; a 、 b 表示亨特色品指数。

1.7 尼龙 6 织物力学性能

由于 UV 辐照会引起尼龙 6 织物大分子链中酰胺键、碳链之间的断裂, 继而影响其力学性能。为了探究 UV 辐照前后尼龙 6 织物力学性能的变化, 对其进行力学测试, 采用 HD026N+ 型电子织物强力仪, 按照 GB/T3923.1-2004 《纺织品织物拉伸性能第 1 部分: 断裂强力和断裂伸长的测定条样法》测定断裂强力^[22]。每块试样测量三次取平均值。

1.8 尼龙 6 织物表面润湿性测试

为探究后续 UV 光固化成膜与织物之间表面张力是否发生变化, 对不同 UV 辐照时间下尼龙 6 织物的接触角进行测试, 观察辐照前后织物表面润湿性的变化。室温条件下, 用液滴形状分析仪进行接触角测试, 在织物上剪取 10 mm×25 mm 的小试样制成测试样, 将 5 μL 蒸馏水水珠滴在锦纶织物上, 等待 15 s 后进行拍照, 进行接触角测试, 每个样品需测定 4 次, 取平均值。

2 结果与讨论

2.1 衰减全反射红外光谱分析

图 1 所示为不同 UV 辐照时长下尼龙 6 织物的衰减全反射红外光谱图。1 545 cm^{-1} 为酰胺 II 带 N-

H 基团的伸缩振动峰, 1 645 cm^{-1} 为酰胺 I 带 C=O 基团的伸缩振动峰。已知尼龙 6 织物的 N-H 伸缩振动峰约为 3 300 cm^{-1} , 这是聚酰胺的显著特征, 纤维大分子链之间具有氢键。从图 1 可以看出, 1 725 cm^{-1} 处为羰基 (-C=O-) 的伸缩振动峰, 红外吸收峰随 UV 辐照时长增加明显减弱, 说明 UV 辐照过程中羰基含量减少, 聚酰胺的加工是一个复杂的过程, 其中的一些不规则结构、杂质及各类添加剂在辐照过程中都会对降解产生一定影响, 值得肯定的是, 1 725 cm^{-1} 处羰基伸缩振动峰的减弱并不是造成尼龙 6 织物光热氧化降解的原因。辐照后的织物与未辐照时的相比, 在 1 645 cm^{-1} 、1 545 cm^{-1} 、3 300 cm^{-1} 处红外吸收峰的伸缩振动强度变化不明显, 引起这种现象可能的原因有几点: (1) 所使用的织物为超细 400D 尼龙 6, 对紫外光照有一定的抵抗作用; (2) 织物由于 UV 辐照所产生的一系列影响变化主要原因是因为光氧化降解所导致, 与交联与否无关。3 300 cm^{-1} 处红外没有发生明显变化, 说明大分子链末端氨基没有发生变化, 主要与 -CONH- 相连的亚甲基碳碳键的断裂, 所形成的碳自由基与空气中的活泼氧反应生成 α -羰基酰胺 (-CONH(CH₂)₄COCONH-) ^[23]。三处红外吸收峰的微弱变动表明, 尼龙 6 织物具备一定的抗 UV 能力, 紫外辐照会对其大分子链上的 -CONH- 造成小部分影响, 光、热同时作用时, 热氧老化对织物的影响占主要因素。

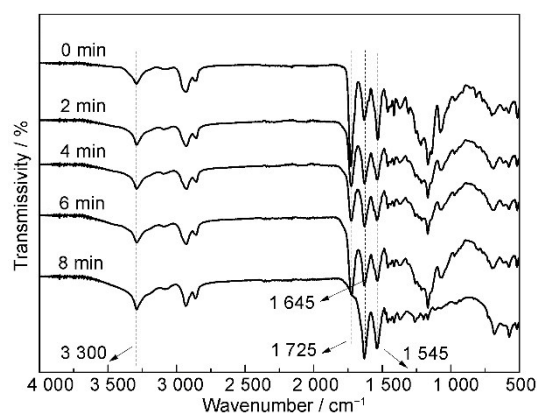


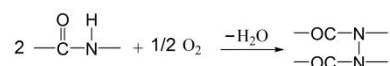
图 1 尼龙 6 织物的衰减全反射红外光谱
Fig.1 ATR-FTIR spectra of nylon 6 fabric

2.2 UV 辐照对尼龙 6 织物热稳定性的影响

图 2 表示尼龙 6 织物热稳定性随辐照时长的变化情况, 图 3 测量了辐照时长下尼龙 6 织物结晶度

的变化。从图2~3中可以看出,辐照2 min后,随UV辐照时长的增加,尼龙6织物的熔点由223.3 °C下降到215.6 °C。熔点主要与结晶度有关,结晶度的下降导致织物熔点降低。UV辐照8 min时出现两个峰值,说明织物在升温过程中可能出现结晶-熔融-再结晶现象。对织物辐照时,一方面,纤维大分子链中-CONH-断裂形成活性自由基(氧负离子),样品表面温度会随着辐照时间的延长而升高,最高可达120 °C;另一方面,N-H的离解能较低,约为318 kJ/mol,由于空气中氧气的存在,-CONH-也会与空气中的活泼氧反应产生交

联结构^[24],反应机理如下。



光、热氧化共同作用导致尼龙6织物分子内形成三维交联网络结构,三维交联网络的存在限制了直链大分子的有序排列,织物柔性变小,无定形区增加,结晶度下降。另外,大分子链中酰胺键(-CONH-)部分断裂导致纤维之间氢键减少,分子间作用力下降造成结晶度由30.13%下降到21.97%,熔点下降。

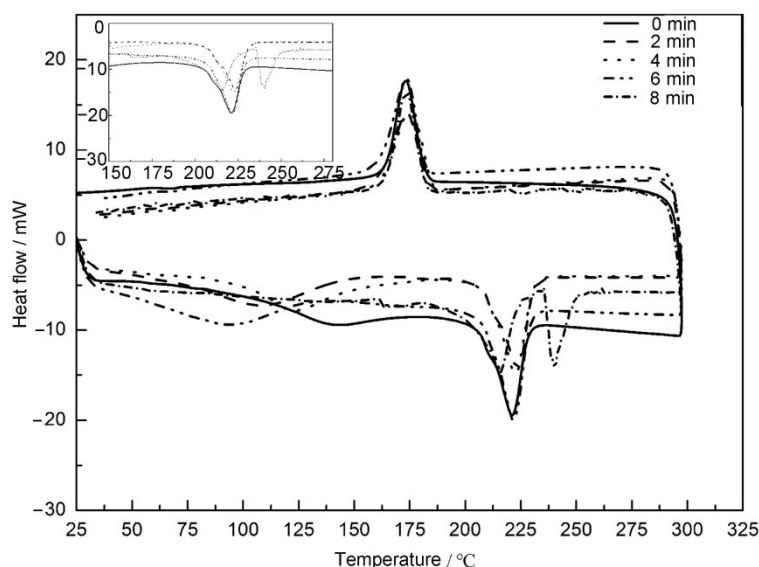


图2 尼龙6织物的热稳定性
Fig. 2 Thermal stability of nylon 6 fabric

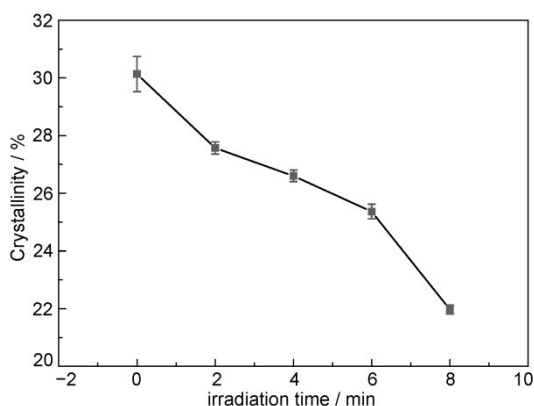


图3 辐照时间对尼龙6织物结晶度的影响
Fig.3 Influence of irradiation time on crystallinity of nylon 6 fabric

2.3 UV辐照对尼龙6织物表面形态的影响

由于UV具有较高的能量,可能会引起尼龙6

织物表面形态的改变,因此我们测量了尼龙6织物表面形态随辐照时长的变化情况,具体见图4。从图4可以看出,尼龙6织物在UV辐照前表面光滑,排列有序,辐照2 min时,纤维表面产生一些凹坑,进一步辐照时长达4~6 min时,纤维表面发生刻蚀、粘连现象,当UV辐照达8 min时,观察图4(e)放大部分A区域(f)图所示,纤维之间粘连现象加大,表面凹坑减少,这是由于UV辐照过程中伴随着大量的热,纤维吸收紫外光波段能量,组织结构变软,凹坑随着辐照时长增加逐渐陷落。UV辐照会改变织物的表面形态,增加其表面粗糙度,降低尼龙6织物的熔点和结晶度,改善其吸湿性和尺寸稳定性。

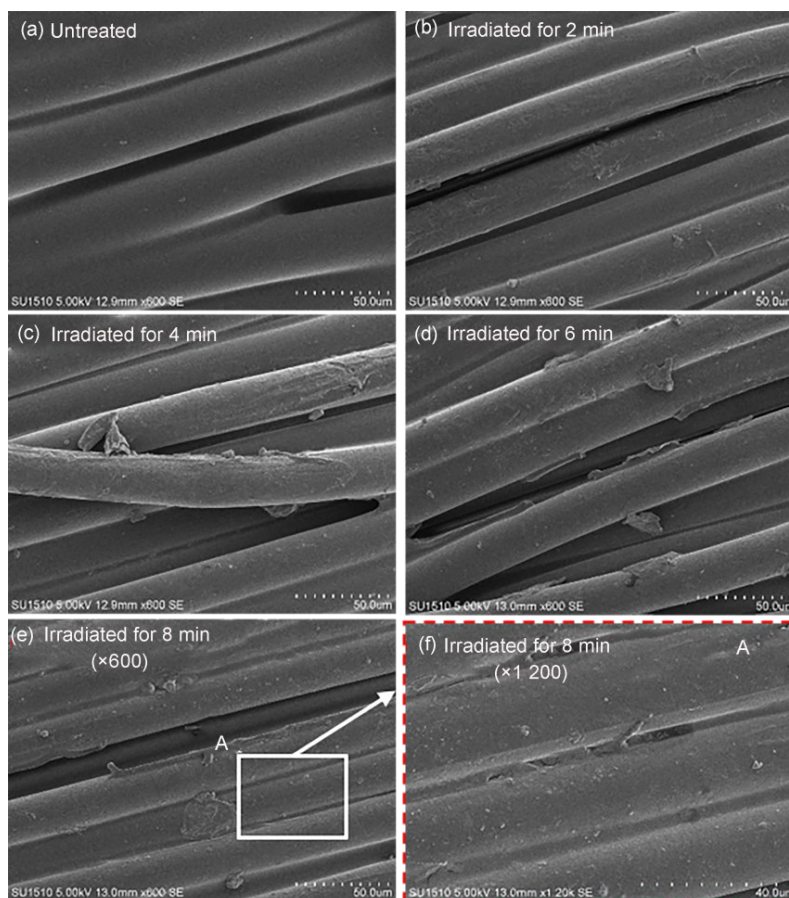


图4 尼龙6织物的表面形貌
Fig.4 Surface morphology of nylon 6 fabric

2.4 UV 辐照对尼龙 6 织物白度的影响

表1表示尼龙6织物表观色深值随辐照时长的变化情况。其中, L^* 代表亮度, a^* 表示颜色从绿色到红色的分量, b^* 表示颜色从蓝色到黄色的分量, ΔE 代表色差值。从表1可以看出, UV辐照0~8 min过程中, L^* 减小说明织物表面亮度逐渐下降, a^* 先减小后增大说明织物UV辐照过程中颜色由偏绿光到灰色再到偏红光的转变, b^* 增大说明织物由偏蓝光转为黄光, ΔE 上升说明织物与原布色差值增大。说明随辐照时长的增加织物泛黄程度加深。

由于聚酰胺中具有 $-\text{CONH}-$ 基团, 离解能较低, 大分子链在受光、热作用时极易发生断裂, 同时 $-\text{CONH}-$ 是一生色基团, 在UV辐照作用下引发聚合物降解, 造成织物性能下降, b^* 值增高, 白度下降, 光氧化降解也会造成织物泛黄。

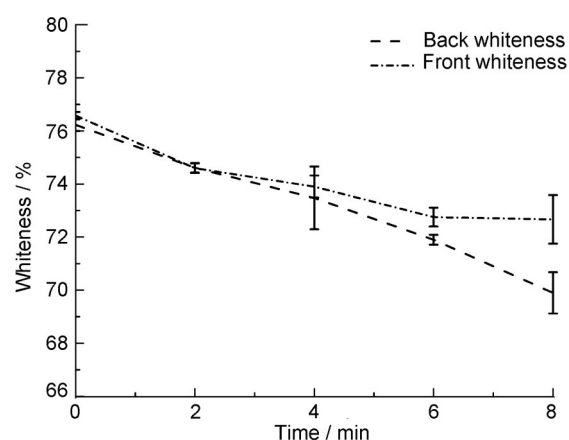


图5 尼龙6织物白度变化
Fig.5 Variation of whiteness of nylon 6 fabric

图5表示尼龙6织物两面白度值随辐照时长的变化情况。结果表明, 当UV辐照达到8 min时, 织物正面白度从76.23%下降到69.90%, 反面白度从76.58%下降到72.67%。

表1 UV辐照对尼龙6织物表面色深值的影响
Table 1 Effect of UV irradiation on the color performance of nylon 6 fabric

辐照时间 / min Irradiation time	L^*	a^*	b^*	c^*	$h / (^\circ)$	ΔE
0	91.64	4.29	-17.04	17.57	284.12	0
2	86.78	-0.13	14.61	14.61	90.52	32.3
4	86.24	-0.15	15.00	15.00	90.56	32.8
6	85.90	-0.03	16.38	16.38	90.09	34.2
8	82.69	1.88	23.24	23.32	85.37	41.3

注: c^* 代表饱和度,表示样品点在 a^* 、 b^* 平面投影点到中心的距离(半径); h 代表色调,表示样品点在 a^* 、 b^* 平面投影点与中心连线和 a^* 的夹角。

Note: c^* is the saturation, which represents the distance (radius) from the projection point of the sample to the center in plane a^* and b^* . h is the tone, which represents the angle from the sample in the center line of the plane projection a^* and b^* to a^* .

2.5 UV辐照对尼龙6织物力学性能的影响

表2为尼龙6织物力学性能随辐照时长的变化情况。结果表明,织物的断裂强力与断裂伸长率随辐照时间的增加而逐渐下降。由于纤维大分子链中的C-O共价键与紫外辐照能量相当,受辐照后吸收能量产生跃迁,分子链转为激发态,产生活性自由基,纤维内部脆损。另外,织物经辐照

后会发生一定程度的刻蚀,表面产生缺陷,这种刻蚀程度随辐照时间延长而增大,同时织物表面受热后部分发生重塑,纤维变软,冷却到室温后织物手感变硬,-CONH-断裂使分子内氢键减少,分子间作用力下降,造成尼龙6织物结晶度下降,断裂强力降低。当UV辐照达到8 min时,断裂强力从1 008 N下降到425.3 N,断裂伸长率由73.5%下降到26.3%。

表2 UV辐照对尼龙6织物力学性能的影响
Table 2 Effect of UV irradiation on mechanical properties of nylon 6 fabric

辐照时间 / min Irradiation time	平均断裂强力 / N Average breaking force	平均断裂伸长率 / % Average elongation at break
0	1 008.0	73.5
2	734.6	52.7
4	664.6	47.1
6	500.6	34.5
8	425.3	26.3

2.6 UV辐照对尼龙6织物表面润湿性能影响

图6为尼龙6织物两面随辐照时长表面润湿性的变化。尼龙6织物表面含有羰基和胺基,易与水分子形成氢键,因此具有较强的吸湿性。随着UV辐照时长的增加,织物正面接触角由120.98°下降到91.84°,反面接触角由145.65°下降到119.05°。从理论来说,尼龙6在接受UV辐照时,由于织物表面发生脆损,粗糙程度会增大,进而导致织物表面疏水性增大,但测量结果表明辐照后织物的表面润湿性能有所提升。原因有以下几点:(1)UV辐照过程中,光氧化降解导致尼龙6织物表面大分子链中-CONH-发生部分断裂形成碳自由基,

空气中活泼氧与断裂的碳自由基氧化生成羧基(-COOH)等亲水性基团;(2)UV辐照能量极高,实验过程中给样品表面温度会随之升高,最高可达120℃,热氧老化作用使得织物纤维组织结构软化,过高的温度造成纤维纱线之间粘连,织物表面结构变得光滑。冷却到室温过程中又进一步发生皱缩,导致纱线之间交织孔隙增大,接触角进一步下降。

综上所述,织物大分子链上-CONH-断裂占次要原因,主要原因是由于织物的组织结构变化导致亲水性上升。

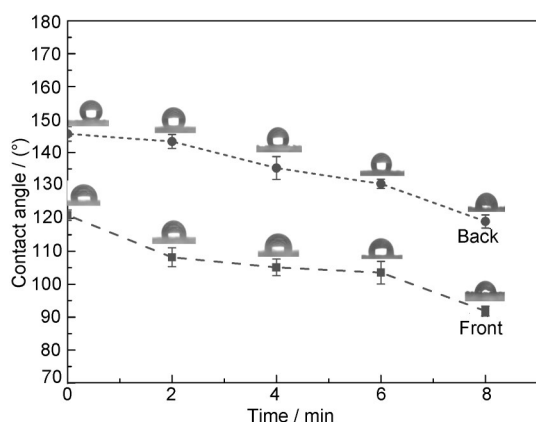


图6 尼龙 6 织物正/反面接触角变化

Fig.6 Contact angle change on positive/negative of nylon 6 fabric

3 结论

采用 UV 光对尼龙 6 织物辐照过程中, 织物大分子中共价键发生断裂, 纤维的结构和性能发生变化, 并且随着辐照时间的延长, 变化程度增大。当辐照时间达 8 min 时, 织物形态结构发生变化, 表面有一定程度的刻蚀, 大分子链中 (C-O) 断裂产生活性自由基, 紫外辐照产生的能量及高温使织物表面发生粘连现象。同时由于空气中氧气的存在使织物表面发生光氧化, 分子链中端羧基增多, 末端氨基减少, 酰胺键 (-CONH-) 的部分断裂使得氢键减少, 分子间作用力下降, 断裂强力下降, 热稳定性有所降低。织物表面因光氧化作用产生一定程度的泛黄, 正面白度下降了 6.33%, 反面白度下降了 3.91%; 断裂强力从 1 008.0 N 下降到 425.3 N; 辐照后织物的表面润湿性增加, 正面接触角下降了 29.14°, 反面接触角下降了 26.6°。UV 辐照为尼龙 6 织物表面功能改性及光固化成膜技术提供了理论支持。

参考文献

- 1 蔡琤, 易国斌, 陈旭东. 尼龙老化机理研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2013, **42**(4): 42-47. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5381.2013.04.011.
CAI Cheng, YI Guobin, CHEN Xudong. The development of study on nylon ageing mechanism[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2013, **42**(4): 42-47. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5381.2013.04.011.
- 2 高国峰, 李晓燕, 戴明欣, 等. 热拉伸和紫外辐照对尼龙 12 结构和性能的影响[J]. 广州化工, 2019, **47**(11): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9677.2019.11.026.
GAO Guofeng, LI Xiaoyan, DAI Mingxin, *et al.* Effects of hot stretch and ultraviolet irradiation on structure and properties of nylon 12[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, **47**(11): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9677.2019.11.026.
- 3 王海利, 黄仁军, 吴盾, 等. 热氧老化对尼龙 6 结晶行为与性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, **29**(8): 88-92.
WANG Haili, HUANG Renjun, WU Dun, *et al.* Effect of thermal oxidative aging on the crystallization behavior and properties of nylon-6[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2013, **29**(8): 88-92.
- 4 翁雨晴, 董晶, 王少飞, 等. 电子束辐照接枝改性棉织物的疏水性能[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, **36**(6): 060302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.060302.
WENG Yuqing, DONG Jing, WANG Shaofei, *et al.* Hydrophobic property of cotton-fabric modified by electron-beam irradiation[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, **36**(6): 060302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.060302.
- 5 桑伟, 周岚, 冯新星, 等. 电子束辐照诱导丙烯酸接枝尼龙 66 织物的改性研究[J]. 材料工程, 2017, **45**(10): 111-116. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.001319.
SANG Wei, ZHOU Lan, FENG Xinxing, *et al.* Acrylic acid improved nylon 66 fabric by electron beam irradiation-induced grafting[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, **45**(10): 111-116. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.001319.
- 6 翁淑珍. 相对湿度对毛织物抗紫外线老化性能的影响[J]. 毛纺科技, 2017, **45**(10): 32-35. DOI: 10.19333/j.mfkj.2017040271004.
WENG Shuzhen. Influences of relative humidity on ultraviolet resistance properties of wool fabrics[J]. Wool Textile Journal, 2017, **45**(10): 32-35. DOI: 10.19333/j.mfkj.2017040271004.
- 7 舒颖, 叶林, 杨涛. 聚酰胺的长期紫外光氧化行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, **24**(7): 98-101. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7555.2008.07.025.
SHU Ying, YE Lin, YANG Tao. The long-term Ultraviolet-oxidative aging behavior of polyamide[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, **24**(7): 98-101. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7555.2008.07.025.
- 8 李涛, 张涛, 张开瑞, 等. 紫外线辐照对棉纤维结构与性能的影响[J]. 纺织学报, 2014, **35**(3): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9721.2014.03.011
LI Tao, ZHANG Tao, ZHANG Kairui, *et al.* Effect of UV irradiation on structure and properties of cotton fibers [J]. Journal of Textile Research, 2014, **35**(3): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9721.2014.03.011
- 9 马志鹏, 丁放, 林兴焕, 等. 电子束辐照制备卤胺抗菌棉织物[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, **36**(4): 040302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.040302.
MA Zhipeng, DING Fang, LIN Xinghuan, *et al.*

- Preparation of N-halamine antibacterial cotton fabrics via electron beam irradiation[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2018, **36**(4): 040302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.040302.
- 10 朱春波, 蒋学, 王鸿博, 等. 辐照接枝改性涤纶织物的亲水性能[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2016, **34**(3): 030302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2016.rj.34.030302. ZHU Chunbo, JIANG Xue, WANG Hongbo, *et al.* Hydrophilic property of polyester fabric modified by irradiation grafting[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2016, **34**(3): 030302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2016.rj.34.030302.
 - 11 华林林. 尼龙6的紫外光交联及其阻燃材料的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. HUA Linlin. Studies on photo-crosslinking of PA6 and its flame retardant materials[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
 - 12 何华玲. 消防服用织物热防护性能及热湿舒适性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017. HE Hualing. Studies on the heat and moisture transfer properties of fabrics used for protective clothing of firefighters[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.
 - 13 王义亮. 耐高温尼龙的抗老化研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013. WANG Yiliang. The study on anti-aging property of high-temperature nylon[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2013.
 - 14 吴国辉. 紫外线辐照对等离子体改性羊毛 织物性能的影响[J]. *印染助剂*, 2018, **35**(10): 44-46. DOI: 10.3969/j.issn.1004-0439.2018.10.014. WU Guohui. Influences of ultraviolet irradiation on properties of wool fabrics treated by plasma treatments [J]. *Textile Auxiliaries*, 2018, **35**(10): 44-46. DOI: 10.3969/j.issn.1004-0439.2018.10.014.
 - 15 张建国, 钱琴芳, 吴中华, 等. 户外运动锦纶面料的超泼水防风抗紫外整理[J]. *印染*, 2013, **39**(3): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4017.2013.03.011. ZHANG Jianguo, QIAN Qinfang, WU Zhonghua, *et al.* Multifunctional finish of nylon fabric for sportswear with ultra water repellence and UV protection and wind proof [J]. *Dyeing and Finishing*, 2013, **39**(3): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4017.2013.03.011.
 - 16 唐慧, 楚珮, 唐人成. 锦纶对紫外吸收剂的吸附和抗紫外性能[J]. *印染*, 2010, **36**(24): 11-14. TANG Hui, CHU Pei, TANG Rencheng. Adsorption and UV protection properties of UV absorbers on polyamide fiber[J]. *Dyeing and Finishing*, 2010, **36**(24): 11-14.
 - 17 高亚萌, 王硕, 杨文秀. 锦纶织物超细 TiO₂ 防紫外线与抗老化涂层整理[J]. *针织工业*, 2019(1): 51-53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4033.2019.01.013. GAO Yameng, WANG Shuo, YANG Wenxiu. Coating finishing of anti-ultraviolet and anti-aging for nylon fabrics with ultrafine TiO₂[J]. *Knitting Industries*, 2019 (1): 51-53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4033.2019.01.013.
 - 18 李娇妍. 环境中的紫外辐照对有机纤维的损伤效应分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011. LI Jiaoyan. The damage effects of ultraviolet irradiation environment on organic fibers[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
 - 19 石增强, 潘亮, 阳建红. ARMOS 纤维的紫外老化[J]. *复合材料学报*, 2009, **26**(2): 107-112. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2009.02.017. SHI Zengqiang, PAN Liang, YANG Jianhong. Ultraviolet aging of ARMOS fiber[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, **26**(2): 107-112. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2009.02.017.
 - 20 周立亚, 陈梦琴. 紫外光敏变色织物的颜色响应性能研究 [J]. *纺织导报*, 2019(11): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3025.2019.11.032 ZHOU Liya, CHEN Mengqin. Study on the color change response of ultraviolet photosensitive fabrics[J]. *China Textile Leader*, 2019(11): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3025.2019.11.032
 - 21 Eltahir Y A, Saeed H A M, Chen Y J, *et al.* Parameters characterizing the kinetics of the non-isothermal crystallization of polyamide 5, 6 determined by differential scanning calorimetry[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2014, **34**(4): 353-358. DOI: 10.1515/polyeng-2013-0250.
 - 22 王宗乾, 杨海伟, 汤立洋. 等. 漂白羊毛的防紫外线整理及其耐光稳定性能[J]. *纺织学报*, 2017, **38**(3): 99-107. DOI: 10.13475/j.fzxb.20160506309. WANG Zongqian, YANG Haiwei, TANG Liyang, *et al.* Anti-ultraviolet finishing and light stability of bleached wool[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, **38**(3): 99-107. DOI: 10.13475/j.fzxb.20160506309.
 - 23 李荣福, 胡兴洲. 聚酰胺热氧化降解机理[J]. *高分子学报*, 2000(2): 136-141. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3304.2000.02.002 LI Rongfu, HU Xingzhou. Mechanism of thermo oxidative degradation of polyamide[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2000(2): 136-141. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3304.2000.02.002
 - 24 陈润锋, 钟世云, 朱丹. 脂肪族聚酰胺降解和稳定研究现状[J]. *合成材料老化与应用*, 2001(2): 27-33. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2001.02.008. CHEN Runfeng, ZHONG Shiyun, ZHU Dan. Research status of degradation and stabilization of aliphatic polyamides[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2001(2): 27-33. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2001.02.008.