

For citation: Xiao Xu. Effect of carbonization process on the microstructure and carbon material ordering of cotton spunlace nonwoven fabric // Grand Altai Research & Education — Выпуск 1 (26)'2026 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2026.01) — EDN: <https://elibrary.ru/PWXMFM>

UDK 621.315.614.7

EFFECT OF CARBONIZATION PROCESS ON THE MICROSTRUCTURE AND CARBON MATERIAL ORDERING OF COTTON SPUNLACE NONWOVEN FABRIC

Xiao Xu¹

¹ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China
E-mail: 2364976418@qq.com

Abstract. Using cotton spunlace nonwoven fabric with a grammage of 60 g/m² and 8 mesh apertures as the raw material, this study systematically investigated the effects of carbonization temperature (400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C) and carbonization time (1 h, 2 h, 3 h, 4 h) on its microstructure and carbon material ordering. The phase composition, morphological characteristics, and chemical bond changes of the samples before and after carbonization were characterized using Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy. The results show that as the carbonization temperature increases, the intensity ratio of disordered carbon to ordered carbon (ID/IG) significantly increases from 1.57 at 400 °C to 2.78 at 600 °C. However, at 700 °C, the structural stability of the material deteriorates, which is unfavorable for subsequent applications. Under the condition of 600 °C, the ID/IG value first increases and then decreases with extended holding time, reaching a maximum of 2.78 at 2 h. SEM images reveal that the carbonized samples still retain a fibrous intertwined structure. FTIR confirms the disappearance of the cellulose hydroxyl peak (3500–3300 cm⁻¹) and a significant weakening of the characteristic peaks of C–O and CH₂, indicating that the organic framework has been converted into a structure dominated by amorphous carbon. It is comprehensively determined that 600 °C and 2 h are the optimal carbonization process parameters, and the resulting material is suitable for use as a flexible sensor substrate.

Keywords: Cotton spunlace nonwoven fabric; Carbonization treatment; Raman spectroscopy; Microstructure; Amorphous carbon; Flexible sensor

碳化工艺对全棉水刺非织造布微观结构及碳材料有序性的影响

肖旭¹

¹ 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 武汉, 430073
E-mail: 2364976418@qq.com

摘要: 以克重 60 g/m², 8 目网眼的全棉水刺非织造布为原料, 系统研究了碳化温度 (400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C) 和碳化时间 (1 h, 2 h, 3 h, 4 h) 对其微观结构与碳材料有序性的影响. 采用拉曼光谱, 扫描电子显微镜和傅里叶变换红外光谱对碳化前后样品的物相组成, 形貌特征及化学键变化进行了表征. 结果表明: 随碳化温度升高, 无序碳与有序碳的相对强度比 (ID/IG) 从 400 °C 时的 1.57 显著增至 600 °C 时的 2.78; 但 700 °C 时材料结构稳定性下降, 不利于后续应用. 在 600 °C 条件下, ID/IG 值随保温时间延长先增后减, 2 h 时达到最大值 2.78. SEM 图像显示碳化后样品仍保留纤维状交织结构, FTIR 证实纤维素羟基峰 (3500~3300 cm⁻¹) 消失, C–O 及 CH₂ 特征峰大幅减弱, 表明有机骨架已转化为以无定形碳为主的结构. 综合确定 600 °C, 2 h 为较优碳化工艺, 所得材料适用于柔性传感器基底.

关键词: 全棉水刺非织造布; 碳化处理; 拉曼光谱; 微观结构; 无定形碳

0 引言

全棉水刺非织造布因无需化学粘合剂, 蓬松多孔, 吸湿环保等优势, 在医疗敷料和可穿戴电子领域受到关注 [1]. 通过碳化处理将其转化为导电碳材料, 是

构建柔性压力, 应变传感器的关键步骤 [2]. 碳化温度与时间直接影响碳材料的结构有序性, 缺陷密度及导电性能, 但针对水刺非织造布这一特定形态的碳化工艺参数研究尚不系统. 本文以全棉水刺非织造布为对象, 设置不同碳化温度与时间, 利用拉曼光谱, SEM 和 FTIR 表征材料微观结构与化学键变化, 旨在揭示碳化工艺的影响机制, 为柔性传感器基底材料提供优选工艺条件 [3].

1 实验材料及仪器



图 1. 克重 60, 全棉
8 目网眼水刺非织造布
Figure 1. Cotton spunlace
nonwoven fabric with
a grammage of 60 g/m²
and 8-mesh apertures

表 1. 实验仪器

Table 1. Experimental Instruments

实验仪器	型号	生产厂家
数显款搅拌器	LC-ES-60SH	上海力辰邦仪器科技有限公司
电子天平	YP6002	上海越平科学仪器 (苏州) 制造有限公司
数字式织物厚度仪	YG141	武汉国量仪器有限公司
恒温干燥箱	HS-DZG-6020	上海和晟仪器科技有限公司

2 全棉水刺非织布材料前处理

本实验分三阶段操作: 准备阶段需检查设备连接与炉膛清洁, 将样品置于耐高温容器中心, 并根据需求配置氩气及设定升温程序; 热解阶段通电后按预设参数升温, 全程监控气氛流量与密封性以防止氧化; 结束后关闭加热系统自然冷却,

待降至室温后佩戴防护装备取出样品并妥善保存, 最后清理炉膛, 关闭电源并归整工具. 全流程需严格控制温度曲线与气体稳定性以确保碳化效果.

3 碳化全棉水刺非织布材料的表征

3.1 拉曼光谱测试

拉曼光谱分析仪 (LaPRAM Odyssey, Horiba) 是研究碳纳米材料结构的一种重要技术, 基于拉曼散射原理, 当光经过物质时, 会与物质中的分子或晶体发生相互作用, 导致光的频率和能量发生变化, 通过分析这些散射光的频率和强度, 可以获得关于石墨烯的结构, 层数, 缺陷和掺杂等信息.

3.2 SEM 形貌

扫描电子显微镜 (Merlin Compact; Carl Zeiss, 德国), 经常被用来对石墨烯材料表面进行形貌观测. 比较特殊的是, 该仪器一般通过高能定向电子束, 对样品外层施以极其完备繁复的扫描操作. 实际情况表明, 电子束在撞击样本期间, 会和其表面区域产生多种微妙物理反应, 比如次级电子, 返射电子等信号就会随之出现. 这些信号最终全部由相关探头捕获, 并经过复杂放大机制, 再逐步转化为人眼可见的影像内容. 这样, 说起来, 其实主要就是为了便于进一步挖掘与认知石墨烯片层肉眼难察的表征. 潜移默化地, 在这种非接触手段下, 人们可以获得分辨率相当细致的视觉图像, 这对于理解石墨烯这类纳米薄膜在表面性质及内部构建方面, 无疑具有较强辅助作用.

3.3 红外光谱测试

傅里叶变换红外光谱仪 (TSENOR-27, BRUKER, 德国) 针对试样展开测试工作, 傅里叶变换红外光谱仪属于较为先进的分析仪器类别, 其凭借傅里叶变换技术来剖析物质的化学成分状况. 该设备依照分子振动转动能级跃迁所生成的红外光谱实施定性分析操作, 凭借检测不同化学键的振动模式这一方式, 能够精准地辨认出样品里包含的各类化学成分. 在红外光谱图当中, 不同的化学键会以波峰或者波谷这样的形式展现出来.

4 结果与讨论

4.1 拉曼光谱分析

在本次实验中, 利用该设备对碳化后的全棉水刺非织造材料进行对比验证和分析, 详细结果见图 2, 图 3.

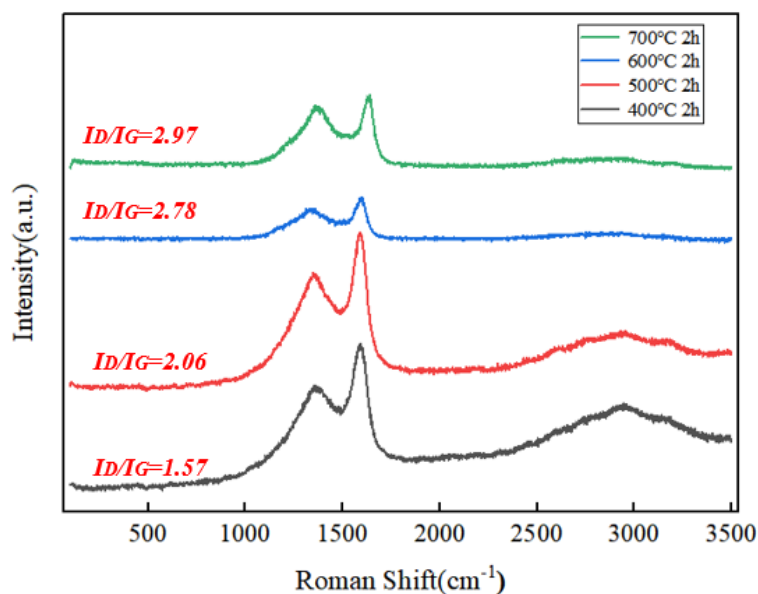


图 2. 不同温度的拉曼光谱图

Figure 2 Raman spectra at different temperatures

D 峰的相对强度 (ID) 代表样品中无序碳的含量, G 峰的相对强度 (IG) 则代表有序碳的含量, 无定形碳的程度可以用 ID/IG 来表示, 比值越大表示材料无定形碳的程度越高. 随着碳化温度的提升, ID/IG 值增加, 但是 700°C 温度太高, 使碳化全棉水刺非织造布结构稳定性变差, 无法组装成传感器, 所以选择 600°C, 对比 400°C, 500°C 及 600°C 下的光谱特征, 结合 I_D (无序碳含量表征) 与 I_G (有序碳含量表征) 的相对强度分析, 明确 I_D/I_G 值随温度升高显著增大, 从 400°C 的 1.57 提升至 600°C 的 2.78, 表明温度提升会加剧材料无定形碳程度, 凸显碳化温度对碳材料结构有序性的关键调控作用 [4]

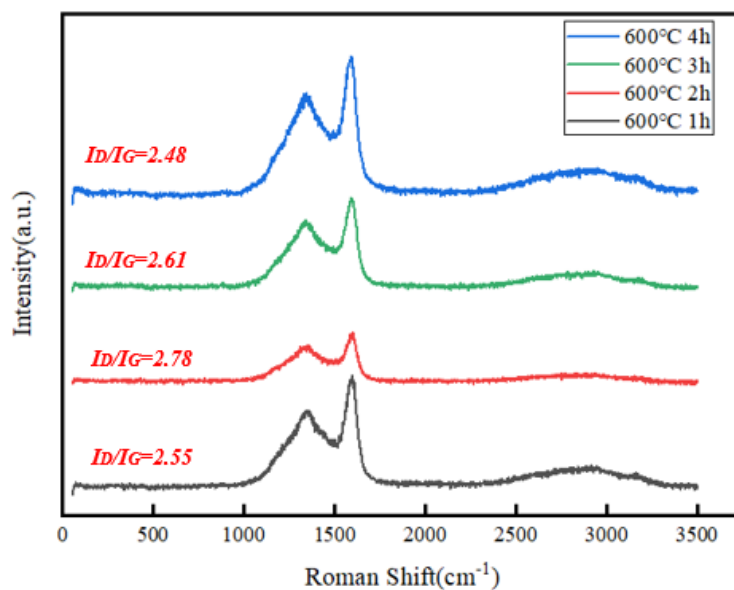


图 3. 对碳化时间分析数据

Figure 3. Data analysis of carbonization time

于 600°C 条件下, 通过对比 1h 至 4h 不同时长下的拉曼光谱, 发现 I_D/I_G 值随时间呈现特定变化规律, 如从 2.55 (1h) 到 2.78 (2h), 2.61 (3h) 直至 2.48 (4h), 揭示了碳化时长对材料中无定形碳与有序碳相对含量的影响机制。

4.2 SEM 形貌

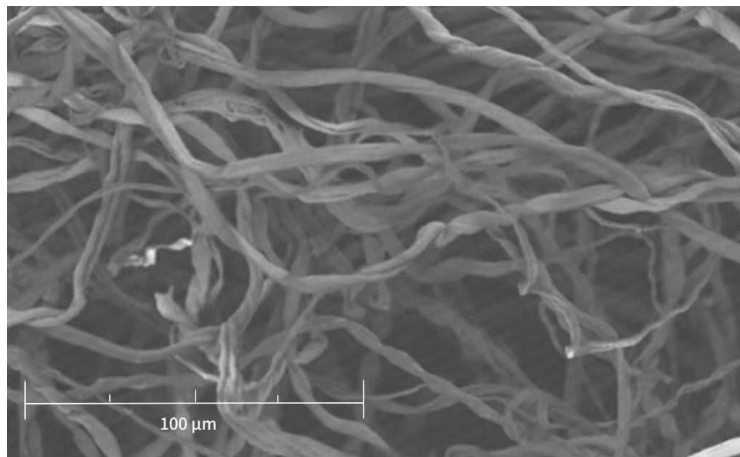


图 4. 碳化全棉水刺非织布材料的 SEM 图

Figure 4. SEM image of carbonized cotton spunlace nonwoven fabric

图 4 可以直观看到碳化全棉水刺非织造布的微观形貌, 呈现出纤维状交织结构, 能帮助了解其微观形态特征。

4.3 红外光谱分析

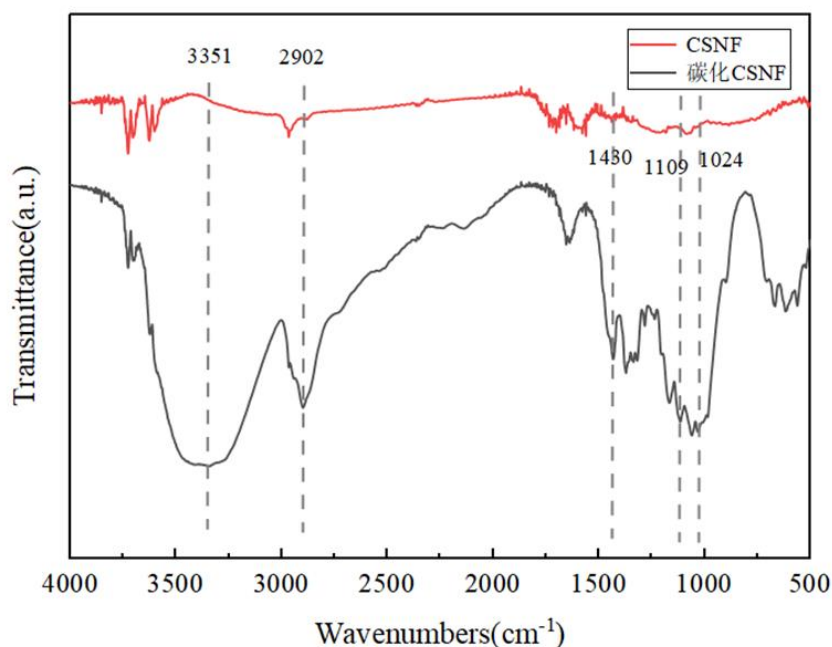


图 5. 碳化全棉水刺非织造布红外光谱分析图

Figure 5. FTIR spectrum analysis of carbonized cotton spunlace nonwoven fabric

图 5 为全棉水刺非织造布和 600°C, 2h 的碳化处理的的全棉水刺非织造布的傅里叶红外光谱图, 全棉水刺非织造布在出现的宽峰 3500~3300 cm^{-1} 出现的宽峰处为 O-H 的伸缩振动峰, 2902 cm^{-1} 和 1430 cm^{-1} 处分别为 CH_2 的伸缩振

动峰和 CH_2 的对称弯曲振动峰, 1109cm^{-1} 处为 C-O-H 的非对称伸缩振动峰, 1024cm^{-1} 处为 C-O 的伸缩振动峰, 这些峰均为纤维素纤维的特征峰. 将棉织物碳化后, 高温碳化导致纤维素脱水, O-H 被大量脱除, 此峰消失, 表明有机结构的破坏. 碳化过程中脂肪链断裂, C-H 键减少, 此区域峰强度显著降低. C-O 伸缩振动峰和 CH_2 弯曲振动峰强度大幅下降说明高温导致 C-O 键断裂, 表明纤维素骨架的分解.

5 结束语

本研究系统探讨了碳化温度与时间对全棉水刺非织造布微观结构及碳材料有序性的影响, 明确了 600°C , 2 h 为较优碳化工艺参数. 通过拉曼光谱, SEM 和 FTIR 等多手段表征, 揭示了碳化过程中纤维素向无定形碳转变的微观机制, 以及结构无序程度随工艺条件变化的规律. 该研究为全棉水刺非织造布在柔性传感器, 可穿戴电子器件等领域的碳基功能化应用提供了实验依据和工艺参考. 未来可进一步结合电学性能测试与器件集成研究, 探索其在人体生理信号监测, 人机交互等实际场景中的应用潜力.

参考文献

- [1] 黄锦波, 邵灵达, 祝成炎. 炭化三维间隔棉织物的制备及其电加热性能 [J]. 纺织学报, 2023, 44(04): 139-145.
- [2] 张应秀, 徐丽慧, 潘虹, 等. 基于甘蔗渣多孔碳的超疏水棉织物制备及其性能 [J]. 纺织学报, 2024, 45(10): 161-169.
- [3] 朱敏, 李伟, 张美云. 棉纤维素基碳微粒的制备及其光热性能 [J]. 上海纺织科技, 2024, 52(02).
- [4] 顾佳华, 戴鑫鑫, 邹专勇, 等. 表面刻蚀/聚硅氧烷修饰纯棉水刺材料的制备及其性能 [J]. 纺织学报, 2024, 45(02): 189-197.

References

- [1] Huang Jinbo, Shao Lingda, Zhu Chengyan. Preparation and electrothermal performance of carbonized three-dimensional spacer cotton fabric [J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(4): 139-145.
- [2] Zhang Yingxiu, Xu Lihui, Pan Hong, et al. Preparation and properties of superhydrophobic cotton fabric based on bagasse porous carbon [J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(10): 161-169.
- [3] Zhu Min, Li Wei, Zhang Meiyun. Preparation and photothermal performance of cotton cellulose-based carbon microparticles [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2024, 52(2).
- [4] Gu Jiahua, Dai Xinxin, Zou Zhuanyong, et al. Preparation and properties of surface etching/polysiloxane modified pure cotton spunlace material [J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(2): 189-197.