

doi: 10.12452/j.fxcxb.26062306

基于热解行为与微观特征的碳纤维增强树脂快速鉴别

段逸品, 周君龙, 彭莹, 蒋中鸣, 肖前, 张子豪*

(广州海关技术中心, 广东 广州 510123)

摘要: 针对碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)在两用物项管控与回收利用领域面临的快速鉴别需求, 该文建立了一套以热重分析(TGA)和扫描电镜-能谱分析法(SEM-EDS)为主、红外光谱(FTIR)为辅的多技术联用鉴别体系, 系统比较了CFRP与碳纳米管增强树脂、玻璃纤维增强树脂及预氧化聚丙烯腈纤维等易混淆材料之间的关键区分特征。研究表明: CFRP中的碳纤维组分在氧气气氛下于650~800 °C范围内呈现特征性的氧化失重, 在扫描电镜下表现为轴向平直挺括的微米级棒状纤维, 碳含量较高。上述多维度的区分特征能够将碳纤维与其他材料进行明确、可靠的区分, 从而为海关监管中的两用物项识别以及再生资源利用中的CFRP快速分拣等实际场景, 提供了准确、可行的技术参考。

关键词: 碳纤维增强树脂复合材料; 快速鉴别; 热重分析; 扫描电镜-能谱仪

中图分类号: O657.3; TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(XXXX)XX-0001-09

Rapid Identification of Carbon Fiber Reinforced Resin Based on Pyrolysis Behavior and Microscopic Features

DUAN Yi-pin, ZHOU Jun-long, PENG Yin, JIANG Zhong-ming, XIAO Qian, ZHANG Zi-hao*

(Guangzhou Customs District Technology Center, Guangzhou 510123, China)

Abstract: To address the urgent need for rapid identification of carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) in the contexts of dual-use item control and recycling, this study established a multi-technique identification approach primarily based on thermogravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS), supplemented by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The approach was applied to systematically compare the key distinguishing features between CFRP and other confusable materials, including carbon nanotube reinforced polymers, glass fiber reinforced polymers, and pre-oxidized polyacrylonitrile fibers. The results demonstrate that the carbon fiber component in CFRP exhibits a characteristic oxidative weight loss in the range of 650–800 °C under oxygen atmosphere. Under SEM, the carbon fibers appear as axially straight, rigid, micron-scale rod-like fibers with high carbon content. These multi-dimensional features enable a clear and reliable differentiation of carbon fibers from other materials. Consequently, this study provides an accurate and practical technical reference for the identification of dual-use items in customs supervision and the rapid sorting of CFRP in recycling applications.

Key words: carbon fiber reinforced polymer composites; rapid identification; thermogravimetric analysis; scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy

碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)凭借高比强度、高比模量及优异的耐腐蚀性, 已从航空航天、国防军工等高端领域扩展至新能源汽车、风电叶片、轨道交通等民用工业场景^[1]。CFRP的军民深度融合特性带来了监管与回收两大挑战: 一方面, 我国已将特定性能参数以上的高性能CFRP纳入出口管制清单, 但缺乏快速有效的鉴别手段; 另一方面, 随着CFRP加速普及, 废弃的CFRP数量急剧增加, 其回收工艺明显有别于常规树脂, 未经分类的混合处理严重制约了回收效率^[2-3]。

收稿日期: 2026-06-23; 修回日期: 2026-08-10

基金项目: 广州海关科研项目(2025GZCK12)

* 通讯作者: 张子豪, 硕士, 研究员, 研究方向: 进出口商品检验, E-mail: zhang_ziho@126.com

网络首发日期: XXXX-XX-XX

在实际检测中,由于某些形貌或性质特征较为相似,CFRP易与碳纳米管增强树脂、玻璃纤维增强树脂及预氧化聚丙烯腈(PAN)纤维布等材料混淆。现行鉴别方法也存在明显不足:海关行业标准《SN/T 5694-2024 碳纤维定性鉴别方法》(以下简称“SN/T 5694-2024”)[^[4]]构建了多技术联用的定性分析框架,但数据主要基于纯碳纤维,树脂基体的包裹会削弱甚至屏蔽拉曼特征信号;《ISO 14127:2024 碳纤维增强复合材料 树脂、纤维和孔隙含量的测定》(以下简称“ISO 14127:2024”)[^[5]]采用化学消解法测定纤维含量,但侧重于组分定量,难以在定性层面有效区分碳纤维与炭黑、碳纳米管等其他碳材料。

本研究以碳纤维的热解行为与微观形貌特征为核心判据,采用热重分析(TGA)氮气-氧气分段程序升温技术研究不同材料的热氧化行为差异,利用扫描电镜-能谱分析法(SEM-EDS)和透射电镜(TEM)表征增强填料的微观形貌、尺寸及元素组成,并辅以红外光谱识别复合材料基体,旨在为CFRP的快速鉴别提供简便、明确、可操作的技术方案。

1 实验部分

1.1 实验样品

本研究涉及的10款样品外观如图1所示。其中,样品A~H由企业和同行实验室提供,成分已知:A为长纤碳纤维;B、C为碳纤维增强黑色塑料件;D、E为碳纳米管增强黑色塑料件;F为黑色玻纤增强塑料粒;G为黑色玻纤增强塑料件;H为黑色聚丙烯腈预氧化纤维编织布。另有两款样品I(灰黑色块状材料)和J(黑色塑料件)来源于实验室抽样,其成分信息未知。



图1 样品A~J的外观形貌图
Fig. 1 Appearance of samples A-J

1.2 仪器与设备

NICOLET 6700型傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司);TGA 550型热重分析仪(美国TA仪器,沃特世公司);Thermo Fisher Quattro型扫描电镜(美国赛默飞世尔科技公司),配BRUKER XFlash 6300型能谱仪(德国布鲁克公司);JEM-2100F型透射电镜(日本电子株式会社),配Thermo UltraDry型能谱仪(美国赛默飞世尔科技公司);Leica FC7型冷冻超薄切片机(德国徕卡公司);BSA224S型电子天平(德国赛多利斯公司)。

1.3 测试方法

1.3.1 红外光谱分析 将样品裁切成合适的形状,采用全衰减漫反射(ATR)模式,分辨率 2 cm^{-1} ,扫描次数32次,范围 $4000\sim 650\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.2 热重分析 称取5~10 mg样品于铂金坩埚内,在氮气气氛下(纯度 $\geq 99.999\%$,流速 40.00 mL/min),于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温10 min,再以 $20\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速率从 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温10 min后将炉温降至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,随后切换至氧气氛围(纯度 $\geq 99.9995\%$,流速 40.00 mL/min),并以 $20\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速率升温至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.3 扫描电镜-能谱分析 将样品裁切为长、宽、高均不超过0.3 cm的碎片,并使其观察面向上,

用导电胶固定在样品台,使用喷金仪对截面进行表面喷金。以二次电子模式在 10 kV 加速电压下观察样品形貌,在 20 kV 加速电压下采集能谱信息,采用点分析法分析纤维状组分的成分。

1.3.4 透射电镜-能谱分析 使用冷冻超薄切片机,在 -80°C 下切取 90 nm 的样品薄片,用载网收集并转移到透射电镜上进行观察。测试电压 200 kV,曝光时间 0.5 s,采用点分析法分析纤维状组分的成分。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维增强树脂的热解行为及微观特征

红外光谱是聚合物材料定性分析的常用手段,但在 CFRP 鉴别中无法有效反映碳纤维的存在与否。图 2a 为纯碳纤维样品 A 与碳纤维增强树脂样品 B 和 C 的红外光谱对比。由于碳纤维结构中多为非极性共价键,样品 A 在 $4000\sim 650\text{ cm}^{-1}$ 波数范围内无任何特征吸收峰。CFRP 中的碳纤维填料同样不产生红外信号,但其强散射作用可能影响常规透射模式下树脂基体的光谱质量^[6]。衰减全反射(ATR)模式探测深度浅,受碳纤维体相散射干扰较小,可有效规避上述问题。如图 2 中样品 B 和 C 的 ATR 光谱所示, 1770 cm^{-1} 的处 C=O 伸缩振动峰及 1230 cm^{-1} 和 1190 cm^{-1} 处的 C—O—C 不对称伸缩振动峰清晰可辨,据此可判定二者的基体树脂均为聚碳酸酯^[7]。

碳纤维在氮气/氧气中的特征热稳定性是区别于其他组分的关键指标。图 2b 为样品 A、B 和 C 在氮气-氧气分段程序升温下的 TGA 曲线对比: 氮气气氛中, 样品 A 由 40°C 升温至 650°C 全过程无明显失重, 样品 B 和 C 在 $450\sim 500^{\circ}\text{C}$ 区间出现第一段失重, 对应树脂基体热分解。切换氧气气氛后, 样品 A 于 650°C 左右开始显著失重, 至 800°C 分解完全; 样品 B 和 C 在 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 区间出现第二段失重(残碳氧化), 随后在 $650\sim 800^{\circ}\text{C}$ 区间出现第三段失重, 与样品 A 一致, 为碳纤维的特征氧化台阶。样品 B 和 C 各阶段的失重质量可反映树脂、残碳与碳纤维的相对含量^[8]。

碳纤维在 $650\sim 800^{\circ}\text{C}$ 的失重虽可作为重要的热行为特征, 但石墨烯、炭黑等碳材料的热分解区间与之相近, TGA 在此区间的响应缺乏绝对的成分特异性^[9-10]。形貌观察与元素分析可更直观区分碳纤维增强相。如图 3 所示: 扫描电镜下, 纯碳纤维样品 A 呈轴向平直挺括的棒状纤维, 直径在微米级, 表面光滑, 衬度均匀。能谱半定量分析表明, 纤维主体元素为碳(含量 $>90\text{ wt}\%$), 伴有少量氧元素, 符合碳纤维的形貌和元素特征^[11]; 碳纤维增强树脂样品 B 和 C 的断面 SEM 图像显示, 树脂基体中包裹着大量纤维状结构, 取向分布各异, 部分区域可见纤维从基体中抽离后留下的孔洞。对该纤维进行 EDS 分析, 碳含量 $>90\text{ wt}\%$, 形貌与成分均与纯碳纤维一致, 确认为碳纤维增强相。需注意, SEM-EDS 仅反映所选截面局部信息, 若碳纤维被树脂完全包裹可能造成漏判, 故形貌观察应与热分析结果综合判断。

2.2 碳纤维增强树脂与碳纳米管增强树脂的区分鉴别

尽管同样具有高长径比和高碳含量, 但碳纳米管(CNTs)与碳纤维在工业应用与海关监管语境下

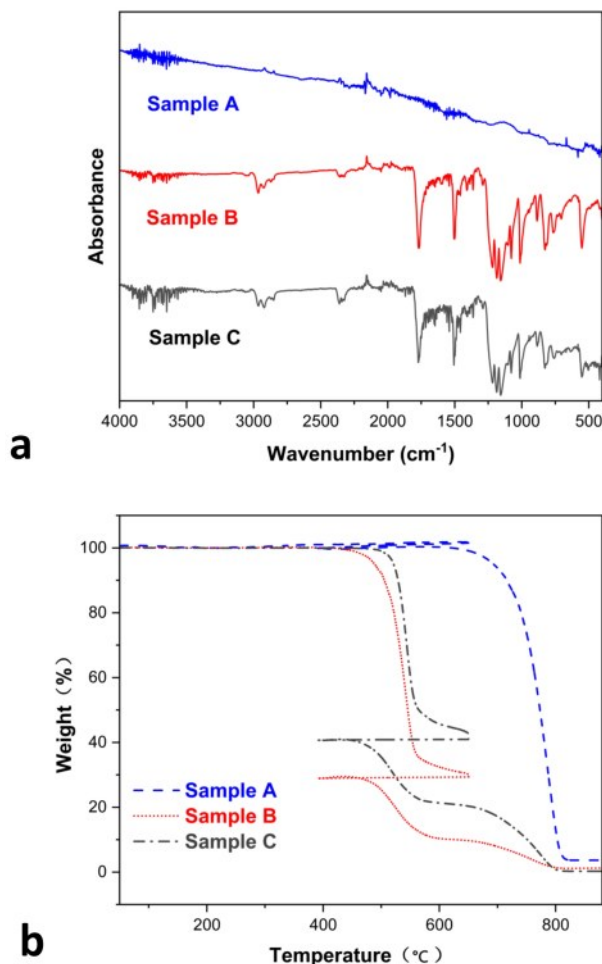


图2 样品A~C的红外光谱图(a)和热失重曲线(b)
Fig. 2 The FTIR spectra (a) and TGA curves (b) of sample A~C

属于截然不同的材料类别。根据《GB/T 40724-2021 碳纤维及其复合材料术语》^[12]，碳纤维定义为“由有机纤维经热解重组制得的、碳含量超过 90 wt%（质量分数）的纤维”，须经由聚丙烯腈（PAN）等有机前驱体纤维的热解碳化获得；而碳纳米管通过化学气相沉积、电弧放电等路径合成，二者在制备路线、性能与功能上存在本质区别^[13]。若将两者混淆，可能导致两用物项管控误判或回收工艺错配。本节重点讨论二者在热解行为和微观形貌上的区分特征。

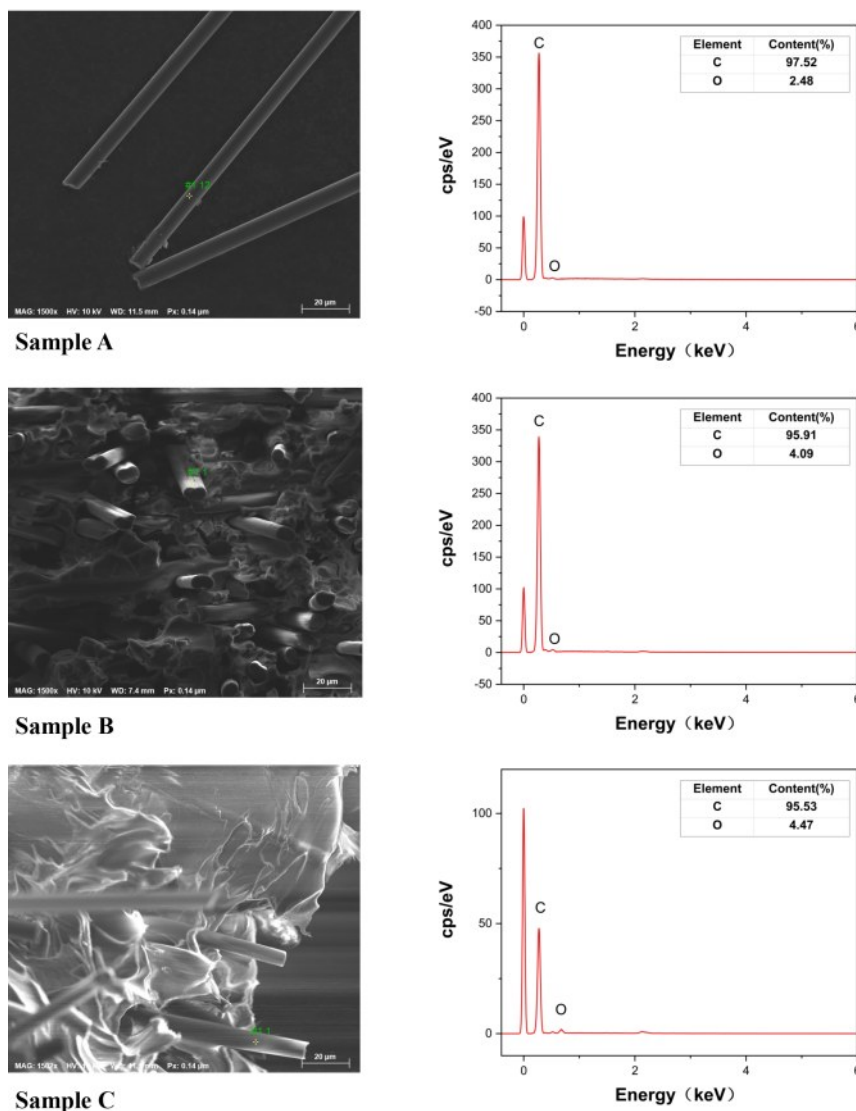


图3 样品A~C的SEM形貌图像（左）和能谱图（右）

Fig. 3 SEM images (left) and EDS spectra (right) of sample A~C

在热解行为上，碳纳米管增强的样品 D 和 E 与 CFRP 类似，在氮气气氛中同样呈现树脂基体在 650 °C 前的失重台阶；但切换至氧气气氛后，二者在 500 °C 左右即开始氧化失重，至 600 °C 附近残重趋于平衡，仅出现一段失重台阶，可归因于树脂热解残碳与碳纳米管的共同氧化分解（图 4）^[14]。对比图 2b 与图 4 可知，碳纳米管的氧化失重温度明显低于碳纤维，二者差值约 150~200 °C，可作为区分二者的热解行为判据。这一差异源于碳纳米管比表面积远高于碳纤维，管壁碳原子与氧的接触反应活性更高，因而氧化温度显著降低。

在微观形貌上，碳纤维与碳纳米管的尺度差异跨越 3 个数量级，导致二者在 SEM 下的可观测性截然不同。碳纤维具有微米级的直径，在 SEM 下清晰可辨（图 3）；碳纳米管直径则在纳米级，低于 SEM 常规观测极限分辨率，在树脂断面中通常不可见。以样品 D 和 E 为例，其断面 SEM 图像（图 5）仅呈现树脂韧性断裂特征——断面粗糙，可见撕裂痕迹和鱼鳞状纹路，衬度均匀，未观察到任何纤维状

结构^[15]。

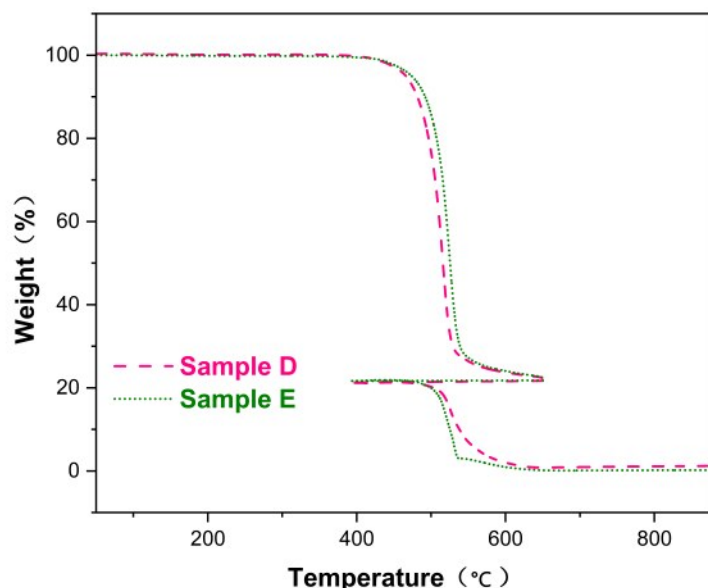


图4 样品D和E的热失重曲线

Fig. 4 TGA curves of sample D and E

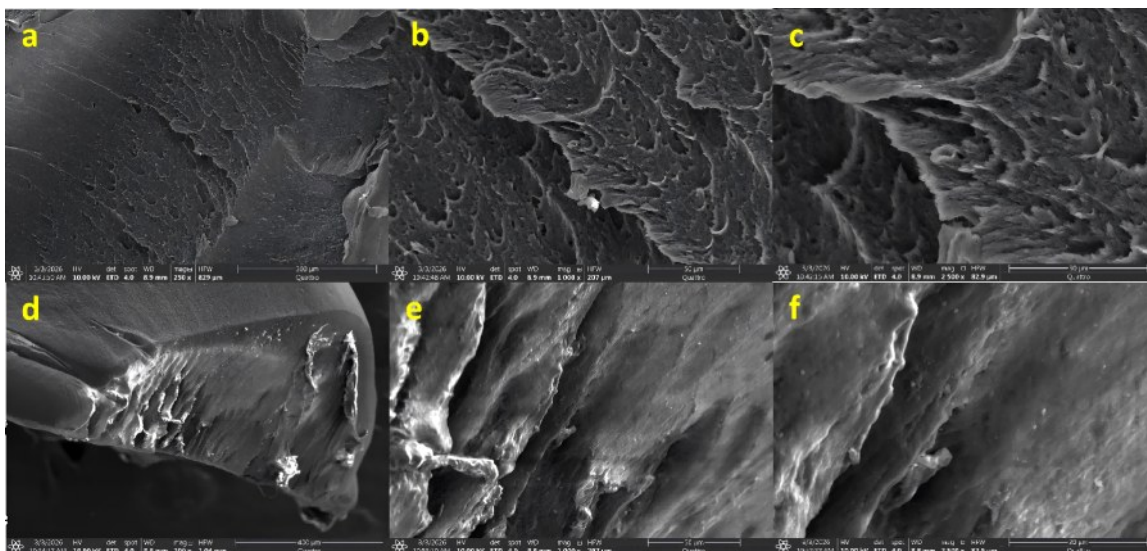


图5 样品D (a-250x, b-1000x, c-2500x) 和样品E (d-250x, e-1 000x, f- 2500x) 的SEM形貌图像

Fig. 5 The SEM image of sample D (a-250x, b-1000x, c-2500x) and sample E (d-250x, e-1000x, f-2500x)

采用TEM直接观察碳纳米管在树脂中的分散形态。如图6所示,在1万~5万放大倍数下,样品D的冷冻超薄切片中可见大量均匀分布的纤维状填充物,直径处于纳米级,形态蜷曲弯折,与碳纤维平直挺括的形貌形成鲜明对比;EDS分析确认这些纳米纤维的主要元素为碳(>90 wt%),含少量氧和微量硅,符合碳纳米管的元素特征。上述结果表明二者鉴别要点明确:碳纤维直径为微米级,通过SEM即可清晰表征;碳纳米管在SEM下不可见,须借助TEM才可观察其蜷曲的纳米级纤维形态^[16]。

2.3 碳纤维增强树脂与其他增强纤维材料的区分鉴别

除碳纳米管外,碳纤维在实际鉴别中还易与玻璃纤维、预氧化聚丙烯腈(PAN)纤维等其他材料产生混淆。本节重点论述这两类纤维与碳纤维在红外特征、热解行为和微观形貌上的区分要点。

玻璃纤维是以 SiO_2 为主要网络形成的硅酸盐纤维,与碳纤维同为轴向刚直、热稳定性优异的微米级增强纤维,对树脂具有良好增强效果。当玻璃纤维增强树脂中添加黑色母粒进行着色后,其外观可呈现与CFRP相近的黑色,加之二者均为纤维增强结构,常难以区分。玻璃纤维的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 骨架在约 1100 cm^{-1} 处产生强而宽的伸缩振动吸收峰,与碳纤维全波段无红外吸收应可形成鲜明对比^[17]。但在复

合材料的 ATR 分析中, 受基质和其他组分干扰, 红外信号可能并不足以用于确认玻纤的存在与否。以样品 F 和 G 为例, 其 ATR 光谱 (图 7a) 的信号以树脂基体的响应为主, 尽管二者均在 $1040\sim 1160\text{ cm}^{-1}$ 范围内存在宽吸收峰, 但此处可能源自玻纤中 Si—O 的伸缩振动和树脂基体中 C—O 伸缩振动的叠加, 不能单独作为判定玻纤存在的直接依据。

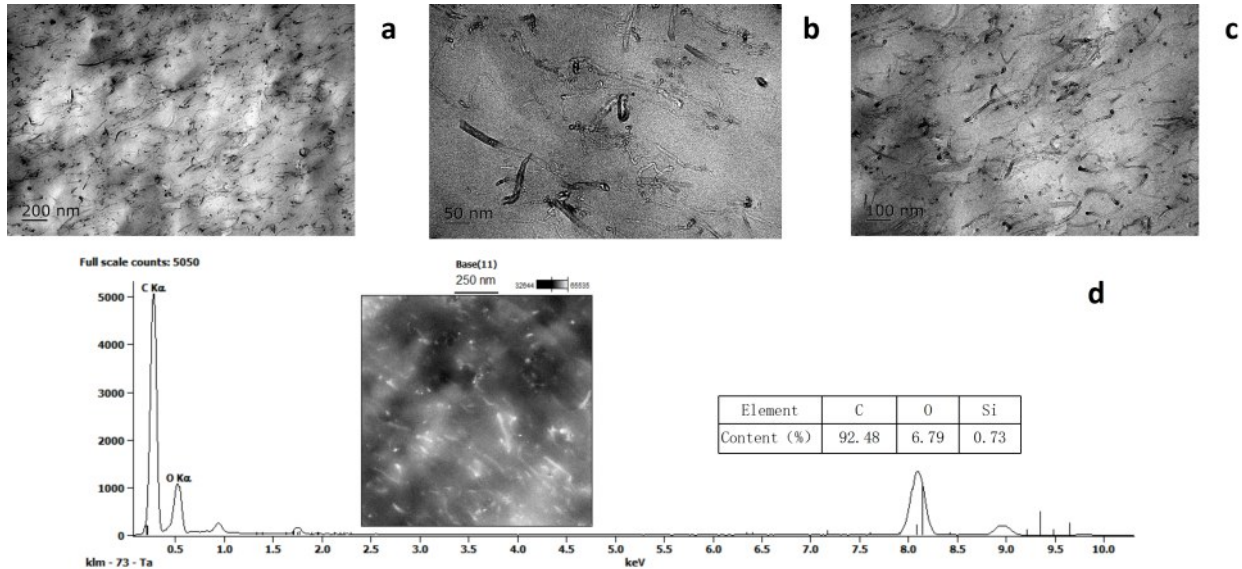


图6 样品D冷冻切片的TEM形貌图像(a~c)及切片中碳纳米管组分的TEM-EDS图(d)

Fig. 6 TEM images (a~c) of cryo-sectioned sample D and TEM-EDS images of carbon nanotube components in cryo-sectioned sample D (d)

a. 10 000x, b. 20 000x, c. 50 000x

在热解行为上, 玻璃纤维的热稳定性优于碳纤维: $40\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 在氮气和氧气气氛下均不发生热分解。样品 F 和 G 的 TGA 曲线 (图 7b) 仅呈现树脂热分解 (氮气气氛, $400\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和残碳氧化 (氧气气氛, $400\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) 两个失重阶段, 无 $650\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 氧化失重台阶。如图 8 所示, SEM 下, 玻璃纤维同样呈轴向平直挺括的纤维状, 直径与碳纤维相近, 单凭形貌难以区分; 但 EDS 分析可提供关键判据—其元素组成以 O、Si 为主, 含 Al、Ca 等硅酸盐特征元素, 与碳纤维以碳为主的特征截然不同^[18]。值得注意的是, 两款样品的能谱图中均可见归属于碳元素的 CK α 峰, 该信号可能来自树脂基体而非纤维本征组分, 在本节的半定量分析中未予计入。因此, 在增强树脂中, 玻纤与碳纤维的区分判据可归纳为: TGA 图中无 $650\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 氧化失重台阶、元素组成以硅氧为主。

预氧化纤维是碳纤维制备过程中的中间产物, 经预氧化处理后纤维呈黑色, 编织成布后外观与碳纤维预浸渍布颇为相似, 在口岸查验中易引发混淆。在红外光谱上, 样品 H 呈现丰富的特征吸收峰 (图 7a): 3185 cm^{-1} 处 N—H 的伸缩振动、 2242 cm^{-1} 处 $\text{C}\equiv\text{N}$ 伸缩振动 (残留氰基) 以及 1577 cm^{-1} 处 $\text{C}=\text{N}$ 的伸缩振动 (环化形成的共轭结构) 等含氮官能团均表明其处于预氧化阶段^[19]。热解行为方面, 样品 G 的 TGA 曲线 (图 7b) 显著区别于碳纤维: 氮气气氛下室温 $\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续失重, $300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 失重加剧; 切换氧气后 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近即显著失重, $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前残重降至零, 热稳定性远低于碳纤维。SEM 下, 样品 H 纤维直径处于微米级, 呈轻微弯曲的柔韧形态, 与碳纤维平直挺括的特征明显不同; EDS 显示碳含量显

著低于碳纤维水平（图8）。

2.4 成分未知样品的检验鉴别

如图9a所示，样品I的红外光谱中， 1411 cm^{-1} 附近的宽吸收峰与 871 cm^{-1} 附近的强吸收峰指示其主要成分应为碳酸盐；样品J的红外光谱呈现典型的聚乙烯特征， 2920 cm^{-1} 和 2850 cm^{-1} 附近的一对强吸收峰分别归属于亚甲基的不对称与对称伸缩振动， 1460 cm^{-1} 附近的吸收峰则对应亚甲基的剪切振动。

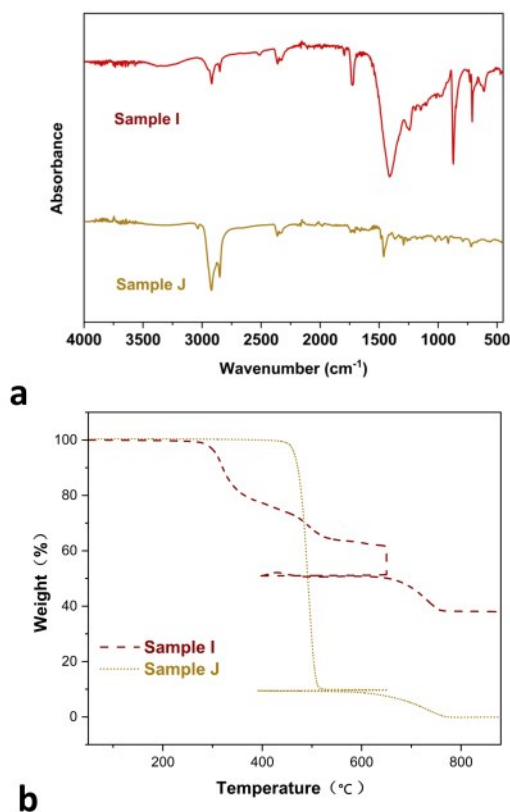


图9 样品I和J的的红外光谱图（a）及热失重曲线（b）
Fig. 9 FTIR spectra (a) and TGA curves (b) of sample I and J

基组分为碳纤维（图10）；相比之下，样品J截面中清晰可见平直挺括的纤维被塑性基体包裹，能谱分析进一步表明，该纤维主体元素为碳，并伴有少量氧（图11）。

综合红外光谱、热解行为及微观形貌-元素分析结果，推断样品I为碳酸盐和碳基填料的复合材料，不属于碳纤维增强树脂；样品J的热分解特征、纤维形貌及元素组成则与碳纤维增强树脂高度吻合，确认为CFRP。

与ISO 14127: 2024规定的消化分解-残渣分析法相比（需经硝酸或混合酸回流消解1.5~4 h，再经清洗、干燥、恒重等前处理后，尚需配合SN/T 5694-2024等方法进行仪器分析，通常需6~8 h才能完成），本方法以TGA氧化台阶与SEM/EDS形貌-元素分析为核心判据，辅以FTIR识别树脂基体，取样量仅需数毫克，无需消解等复杂前处理，3类测试可并行开展，最快约2 h即可完成鉴定，操作简便、判据明确，可为两用物项监管与回收分类等场景下的CFRP快速鉴别提供准确、可行的技术参考。

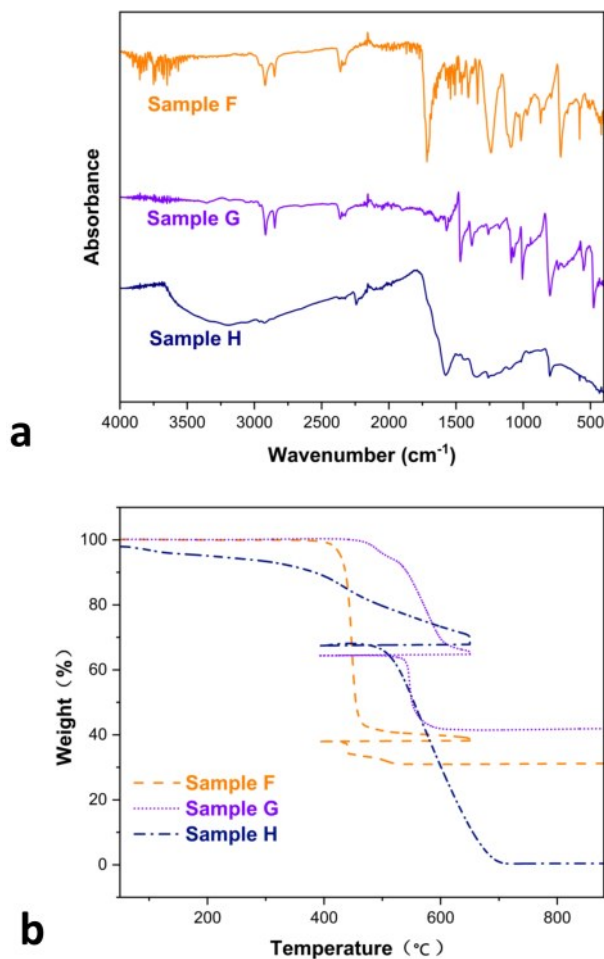


图7 样品F~H的红外光谱图（a）及热失重曲线（b）
Fig. 7 FTIR spectra (a) and TGA curves (b) of sample F~H

在氮气-氧气分段程序升温条件下（图9b），样品I与J的热失重曲线于650~800 °C区间均呈现明显的氧化失重台阶，提示两者可能均含有热稳定性较高的碳基材料。其中，样品I的残余质量显著高于样品J，表明其无机填料比例更大。扫描电镜观察显示，样品I截面未见任何纤维状结构，故可排除其碳

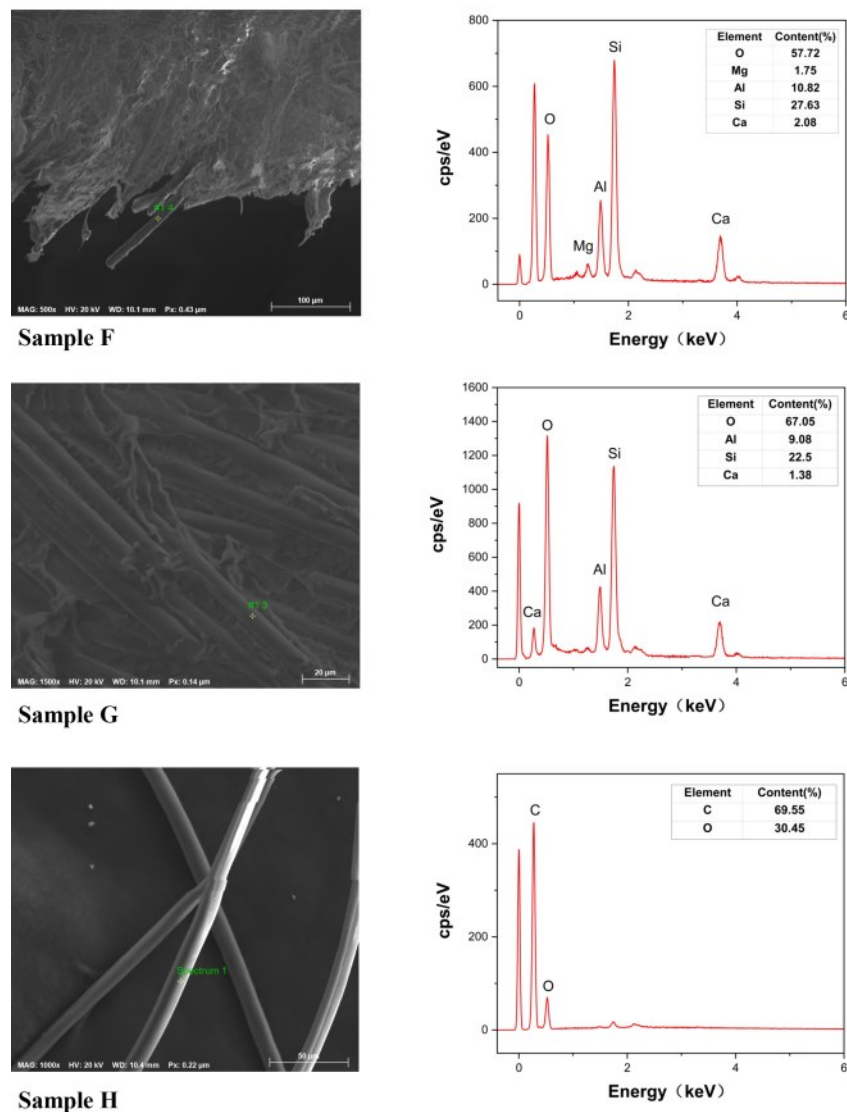


图8 样品F-H的SEM形貌图像(左)和能谱图(右)

Fig. 8 The SEM images (left) and EDS spectra (right) of sample F-H

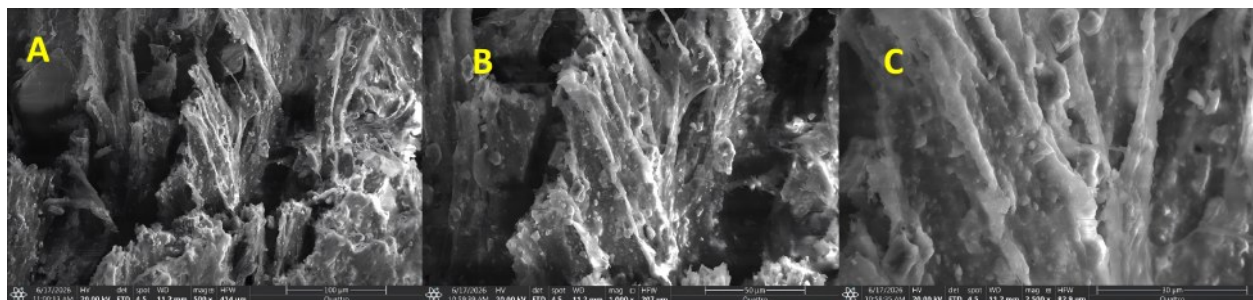


图10 样品I (a-250x, b-1000x, c-2500x) 的SEM形貌图像

Fig. 10 SEM images of sample I (a-250x, b-1000x, c-2500x)

3 结论

本研究以碳纤维的热解行为和微观形貌特征为核心判据, 辅以红外光谱识别树脂基体的特征, 建立了CFRP的快速鉴别方法。碳纤维在氮气-氧气分段程序升温条件下呈现特征的热解行为: 氮气气氛中650℃前无明显失重, 切换氧气后于650~800℃出现氧化失重台阶; 在SEM下呈轴向平直挺括的微米级棒状纤维, 碳含量>90 wt%。上述多维特征可将CFRP与碳纳米管增强树脂(纳米级蜷曲纤维, 氧化失重发生于500~600℃)、玻璃纤维增强树脂(650~800℃无显著热失重, 纤维含硅、氧、铝等典型

硅酸盐构成元素)及预氧化PAN纤维(含氮官能团红外吸收,低于700℃完全分解,纤维呈弯曲柔韧形态)明确区分。

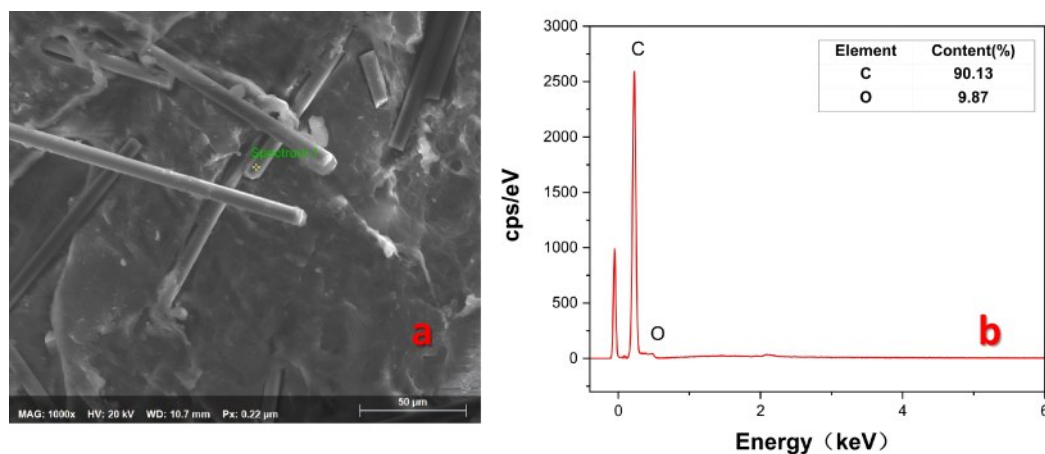


图 11 样品J的SEM形貌图像(a)和能谱图(b)

Fig. 11 SEM image (a) and EDS spectra (b) of sample J

参考文献:

- [1] Wang H H, Huo S Q, Chevali V, Hall W, Offringa A, Song P G, Wang H. *Adv. Mater.*, **2025**, 37 (27): 2418709.
- [2] Borjan D, Knez Ž, Knez M. *Materials*, **2021**, 14 (15): 4191.
- [3] Taylor J H, Troisi G, Masoudi Soltani S. *Chem. Eng. J. Adv.*, **2024**, 18: 100591.
- [4] SN/T 5694-2024. *Carbon Fibre Qualitative Identification Method. Industry Standards of the People's Republic of China* (碳纤维定性鉴别方法. 中华人民共和国出入境检验检疫行业标准) .
- [5] ISO 14127: 2024. Carbon-Fibre-reinforced Composites—Determination of the Resin, Fibre and Void Contents. International Organization for Standardization (碳纤维增强复合材料 树脂、纤维和空隙含量的测定. 国际标准化组织标准) .
- [6] Sun Y Y, Wang X Y, Dong W J, Yao W Z, Liu Z L, Li K. *Infrared Laser Eng.* (孙悦悦, 王玄玉, 董文杰, 姚伟召, 刘志龙, 李凯. 红外与激光工程), **2022**, 51 (3): 177-183.
- [7] Chuang Y F, Peng J S, Yang F Q, Chiang D, Lee S. *RSC Adv.*, **2017**, 7 (15): 9015-9023.
- [8] Jia M X. *China Plast. Ind.* (贾梦鑫. 塑料工业), **2021**, 49 (12): 123-127.
- [9] Ahn D, Choi H J, Kim H D, Yeo S Y. *Polymers*, **2020**, 12 (1): 179.
- [10] Martincic M, Sandoval S, Oró-Solé J, Tobias-Rossell G. *Nanomaterials*, **2024**, 14 (21): 1754.
- [11] Jiang G, Pickering S J, Walker G S, Wong K H, Rudd C D. *Appl. Surf. Sci.*, **2008**, 254 (9): 2588-2593.
- [12] GB/T 40724-2021. *Terminology for Carbon Fiber and Carbon Fiber Composites. National Standards of the People's Republic of China* (碳纤维及其复合材料术语. 中华人民共和国国家标准) .
- [13] Rathinavel S, Priyadharshini K, Panda D. *Mater. Sci. Eng. B*, **2021**, 268: 115095.
- [14] Shen J W, Tian Z, Wang L L. *J. Shanghai Second Polytech. Univ.* (沈娇雯, 田震, 汪玲玲. 上海第二工业大学学报), **2012**, 29 (2): 98-104.
- [15] Lapčík L, Vašina M, Lapčíková B, Staněk M, Ovsík M, Murtaja Y. *Nanotechnol. Rev.*, **2020**, 9 (1): 1491-1499.
- [16] Biehler E, Quach Q, Abdel-Fattah T M. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **2023**, 12 (8): 081002.
- [17] Bonon A J, Weck M, Bonfante E A, Coelho P G. *Mater. Sci. Eng. C*, **2016**, 69: 905-913.
- [18] Manh Vu C, Nguyen L T, Phuc B T, Tung N H, Nguyen D D. *Polym. Bull.*, **2020**, 77 (1): 357-374.
- [19] Xu S Y, Zhang Y M, Dong F Y, Wang B. *J. Donghua Univ. : Nat. Sci. Ed.* (徐世怡, 张玉梅, 董锋洋, 王彪. 东华大学学报: 自然科学版), **2025**, 51 (6): 126-132.

(责任编辑: 盛文彦)