

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021021

光谱成像技术在木材改性研究领域的应用进展

董友明¹, 谭艺², 李建章^{1,2}

(1. 南京林业大学林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏南京 210037;

2. 北京林业大学木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)



摘要: 木材改性技术是木材提质增效的主要手段。改性剂筛选、改性工艺优化以及改性机理解析等都离不开先进的表征分析技术。光谱成像技术将光谱分析技术与显微成像技术相结合, 能够精确表征样品物理化学结构, 甚至微观性能, 已成为木材改性研究的重要工具。针对近年来光谱成像技术在木材改性研究领域的应用现状, 本文主要从红外光谱成像、拉曼光谱成像和激光共聚焦显微成像技术等方面进行了综述, 并对此类技术在木材改性研究领域的应用前景进行了展望。

关键词: 木材改性; 光谱成像技术; 红外光谱成像; 拉曼光谱成像; 激光共聚焦显微成像; 应用进展

中图分类号: S781.7; O657.3 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 06-0001-08

Application of Imaging Spectroscopy in Wood Modification Research

DONG You-ming¹, TAN Yi², LI Jian-zhang^{1,2}

(1. Co-Innovation Center of Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037,

Jiangsu, China; 2. Ministry of Education (MOE) Key Laboratory of Wooden Material Science and Application,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Wood modification is an efficient approach to improve wood properties and function wood. The main research topics of wood modification include the types of modifiers, optimization of the modification process, and investigation of modifying mechanism, which all depend on the advanced characterization and analysis techniques. Imaging spectrometry which is combining a spectrometer with an optical microscope, provides insights of chemical compositions in context with microstructure at the micrometer level, particularly the micro-mechanical properties. It has become an important tool for wood characterization. In this review, the application of imaging spectrometry techniques on wood modification are summarized, mainly including infrared microspectroscopy, Raman microspectroscopy, and confocal laser scanning microscopy. Additionally, the existing problems of the imaging spectrometry techniques used for wood modification are presented, as well as the potential development are outlooked.

Key words: wood modification; microspectroscopy; infrared microspectroscopy; raman microspectroscopy; confocal laser scanning microscopy; application progress

收稿日期: 2021-03-04; 修改日期: 2021-11-10

基金项目: 南京林业大学青年科技创新基金“基于细胞壁修饰的木材浸渍改性及增强机制研究”(CX2019003)。

作者简介: 董友明 (1988—), 讲师。Email: youming.dong@njfu.edu.cn

木材改性是速生林木材提质增效的主要手段, 已发展成为涵盖众多改性方法的研究领域, 这些方法大体上可分为整体改性和表面改性。整体改性是将改性剂充分渗透到木材内部, 使其与木材

形成物理化学结合,或利用特殊的条件处理(高温、高压、高湿等),改变木材整体性能,常用方法包括乙酰化、糠醇树脂改性、防腐处理、热改性等^[1-4]。表面改性是对木材表面进行物理化学处理的技术,包括表面接枝改性、表面沉积纳米粒子、等离子体处理等^[5-6]。

大部分改性方法能在一定程度上提高木材性能,但改性剂的功效是否发挥到极致仍难以确定;同时,许多高效的木材改性技术受限于分析技术的发展水平,其改性机理尚难以准确揭示。这涉及到木材表面改性深度、细胞壁物理化学结构变化、木材与改性剂界面特征等问题。传统的观测技术(如光学显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜等)以二维成像和微观结构表征为主,很难满足这种需求。近几十年来,由于分析技术的不断发展,将光谱分析技术与显微成像技术相结合,能够定性和定量地获得样品的化学结构、微观形貌、力学性能等多方面信息,极大推动了木材改性机理的揭示,对木材改性的效果调控与效率提高具有重要意义。提高木材物理力学性能的关键是细胞壁的改性^[7],这就需要光谱成像技术实现对改性木材细胞壁的物理化学结构的表征。这类光谱成像技术以红外光谱成像、拉曼光谱成像和激光共聚焦显微成像等技术为主,并结合其他表征技术对木材切片进行表征,可构建木材微观形貌、化学成分和微观力学性能等的相关关系。

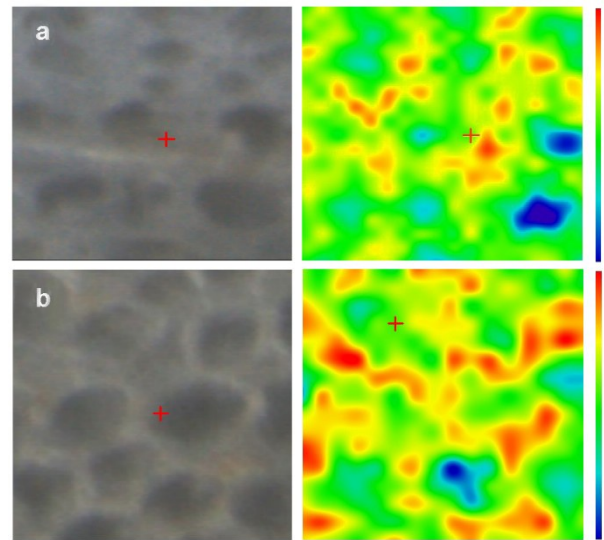
针对光谱成像技术在木材改性研究领域的应用,本文主要从红外光谱成像、拉曼光谱成像、激光共聚焦显微成像等方面进行了现状总结,并对其发展前景进行展望。

1 红外光谱成像技术

利用红外光谱表征样品的化学信息是常用的分析方法。红外光谱成像技术是将红外光谱仪与显微镜相结合,通过样品台的移动,获得采集区域各个位点的红外吸收信息,再通过选择不同特征谱带,即可显示出该特征谱带所对应的特征基团或化学成分在采集区域的空间分布图像。

红外光谱成像技术可用于表征木材细胞壁化学成分的空间分布,采用衰减全反射(attenuated

total reflection, ATR)模式,分辨率可达 $1.56\ \mu\text{m} \times 1.56\ \mu\text{m}$,能够较为清晰地通过化学成分来区分木材细胞结构,如胞间层、细胞壁与细胞腔等^[8-9]。WANG Kai-li等^[10]利用红外成像系统对十八烷基异氰酸酯改性毛白杨(*Populus tomentosa*)进行了研究。通过观测特征谱带 $1\ 658\ \text{cm}^{-1}$ (异氰酸酯基团与木材羟基反应产生的C=O)在图像中的分布情况,确定改性剂进入了木材内部,并均匀分布在木材细胞壁中,如图1所示。



a 未改性木材;b 改性木材。

图1 木材细胞壁电镜图像及其在 $1\ 658\ \text{cm}^{-1}$ 吸收带的红外光谱成像^[10]

Fig. 1 SEM images of wood cell wall and the corresponding FTIR image at $1658\ \text{cm}^{-1}$ of untreated and treated wood

LI Wan-ju等^[11]利用红外成像对糠醇改性毛白杨和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)进行了分析,通过采集细胞壁位点上的红外吸收光谱,有效避开细胞腔内糠醇树脂信号的干扰,确认糠醇树脂在木材细胞壁内发生了聚合反应,为糠醇树脂改性的细胞壁增强机制提供了直接证据。GUO Juan等^[12]利用红外成像技术测试湿热-压缩处理木材的细胞壁化学成分,发现经湿热-压缩处理后木材的木质素、半纤维素和无定形区纤维素发生了降解,导致木材结晶度提高。

因此,红外光谱成像技术在改性木材化学成分分析方面具有突出的优势,能够直观地表征改性木材微米级区域的分子结构和官能团信息,获

得改性剂在木材内的空间分布信息, 对于木材改性部位的调控、改性机理的揭示具有重要意义。透射模式和 ATR 模式是红外光谱成像中常用的方式, 与透射模式相比, ATR 模式不需要制备木材切片, 操作便捷, 空间分辨率较高, 但 ATR 附件中的晶体材料会对样品信号产生一定干扰^[13]。此外, 红外光谱成像的分辨率、对水分敏感性等问题在应用中具有局限性, 而拉曼光谱成像在此方面具有明显的优势, 二者基本特征对比见表 1^[14]。

表 1 红外光谱成像与拉曼光谱成像技术基本特征对比^[14]

Tab.1 Comparison of the principal characteristics of infrared and Raman microspectroscopy

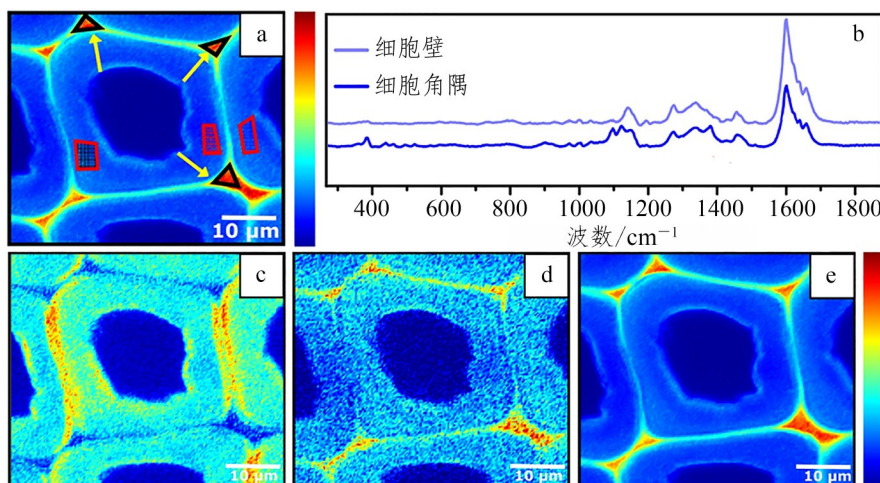
项目	红外光谱成像	拉曼光谱成像
原理	光子吸收	光子非弹性散射
激发光特征	多色性;光源为碳化硅棒或同步加速辐射源;红外线波段	单色性;光源为激光;紫外或可见光或近红外线波段
光谱选择规则	偶极矩变化(不对称结合,如-OH)	极化率变化(对称结合,如C-C)
频率范围	4 000~600 cm^{-1}	4 000~50 cm^{-1} (斯托克斯线与反斯托克斯线)
分辨率(横向)	5~20 μm	0.3~2 μm
分辨率(共聚焦/深度)	—	0.6~4 μm
采样方式	透射、反射、透-反射、衰减全反射(ATR)	反射(散射)、浸没式物镜
样品制备	最优厚度(透射模式)样品直接接触(ATR模式)	平整表面用于成像,非接触,以水为溶剂或不产生干扰的玻璃片作为载体
存在问题	易受玻璃、水和二氧化碳的干扰	易受荧光干扰、易损坏样品(燃烧)

2 拉曼光谱成像技术

拉曼光谱分析技术具有简单快速、可定性定量分析、不受水分干扰、谱峰锐利、扫描范围广等优势。但前期由于拉曼光谱设备较为精密,且存在易损坏样品(燃烧)和荧光干扰等问题,并没有得到广泛应用。近年来,随着激光技术的迅速发展,滤光片、检测器以及信号增强方法都得到了很好的发展,拉曼光谱分析技术才得到了推广应用^[15]。

目前,拉曼光谱成像技术在木材、竹材局部化学成分分析方面已经得到较多应用^[16]。通过拉曼光谱成像对木材切片进行表征,不仅能够通过定位扫描区域,直接获得局部化学的光谱图像(面扫描)和光谱曲线(点扫描),还能选择波数范围,获得某一种或一类化学成分在区域内的分布图像。

如图 2 所示,通过点扫描定位图 2a 中的细胞壁和细胞角隅,可分别获得相应的拉曼光谱曲线(图 2b),而通过选择木材中纤维素(1 065~1 102 cm^{-1})、木质素(1 104~1 173 cm^{-1})等的波数范围,就能集成各个化学成分在木材中的分布图像(图 2c~2e)。拉曼光谱成像技术能够很好地分析改性木材中的局部化学信息,从而揭示改性剂的分布状态及作用机制。



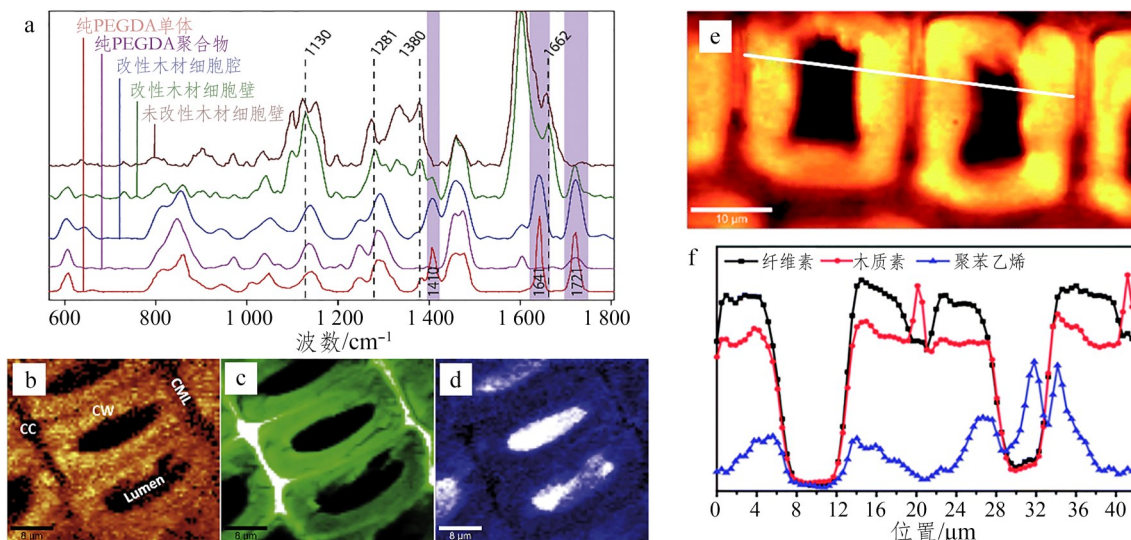
a 为细胞结构的拉曼光谱图像;b 为 a 图中细胞壁和细胞角隅的拉曼光谱曲线;
c、d 和 e 分别为纤维素(1 065~1 102 cm^{-1})、木质素(1 104~1 173 cm^{-1})、木质素与抽提物(1 538~1 690 cm^{-1})的分布图像。

图 2 欧洲赤松心材拉曼光谱成像^[17]

Fig.2 Raman imaging of heartwood of Scots pine

Ermeydan等^[18]利用拉曼光谱成像技术分析了聚乙二醇双丙烯酸酯 (Poly (ethylene glycol) diacrylate, PEGDA) 改性剂在木材中的分布状态, 如图3所示。由于在光谱 $1\ 721\ \text{cm}^{-1}$ 处只有 PEGDA 聚合物具有较强的信号峰 (主要源于 PEGDA 中的羰基), 故将 $1\ 721\ \text{cm}^{-1}$ 区域的拉曼信号集成图像

作为 PEGDA 聚合物的分布图像, 发现改性剂不仅填充了木材细胞腔, 还能渗透到木材细胞壁中 (图3d), 揭示了 PEGDA 改性的增强机制。在聚苯乙烯改性木材的研究中, 利用拉曼成像的直观性, 获得了改性剂在多个毗邻细胞结构内的分布曲线 (图3e、3f)^[19]。



a 为未改性木材和 PEGDA 改性木材的拉曼光谱曲线; b~d 分别为木材中纤维素 ($1\ 350\sim 1\ 390\ \text{cm}^{-1}$)、木质素 ($1\ 560\sim 1\ 610\ \text{cm}^{-1}$) 和 PEGDA 聚合物 ($1\ 695\sim 1\ 725\ \text{cm}^{-1}$) 的拉曼图像^[18]; e 为聚苯乙烯改性木材的拉曼光谱图像; f 图为沿 e 图中的白色直线获得的纤维素、木质素和聚苯乙烯的拉曼信号强度变化曲线^[19]。

图3 PEGDA、聚苯乙烯改性木材的拉曼光谱曲线

Fig.3 Raman spectra of PEGDA and polystyrene modified and control wood

经改性处理后, 木材化学结构复杂程度进一步增加, 而拉曼光谱成像就是这些化学成分的大量波谱数据的集合, 不仅存在各成分间波谱信号的重叠现象, 微观区域内的化学分布成像还具有主观性, 这增加了准确揭示木材成分的空间分布和光谱信息的难度。为此, 一些光谱数据处理方法被应用于拉曼光谱成像, 如聚类分析、主成分分析、顶点成分分析^[20-22]等。通过这些方法, 可以有效解离木材内各成分间的谱峰重叠问题, 从而确定改性剂在木材细胞壁中的分布状态。

3 激光共聚焦显微成像技术

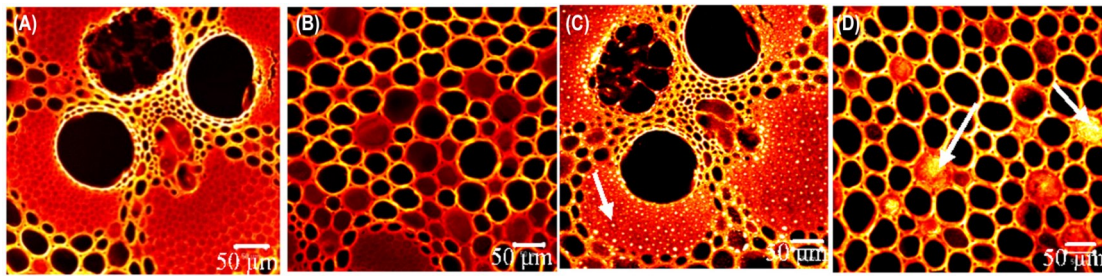
木材在紫外光和可见光激发下可产生荧光, 即自发性荧光, 这主要源于木质素中的酚类成分和抽提物中的萜类、酮类等成分^[23]。通过测定这些成分的荧光特性, 可进行木材树种鉴定、木质素结构和分布分析。而通过添加荧光探针, 又可实

现木材内部孔隙构造表征。一些木材改性剂也具有荧光特性, 往往与木材本身的荧光物质具有不同的激发波长, 因此可通过荧光显微技术对其在木材内的作用形态进行表征分析。

激光共聚焦显微成像 (confocal laser scanning microscope, CLSM) 是在荧光显微镜基础上配置激光扫描装置, 以激光作为激发光源, 通过光源针孔与检测针孔共轭聚焦方式, 对样品进行断层扫描, 实现三维成像, 从而提供样品化学分布信息^[24]。CLSM 技术在木材改性领域的应用已有较多报道。在糠醇树脂改性木材的研究中, Thygesen 等^[25]在改性欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 的研究中发现, 糠醇树脂具有荧光特性且集中于木质素含量较多的区域; 沈晓双等^[26]在改性毛白杨 (*Populus tomentosa*) 发现, 糠醇树脂在细胞壁、胞间层和细胞腔中均有分布。此外, CLSM 也可用于糠醇树脂改性竹材的研究中, 能够直观地表征

糠醇树脂在竹材结构内的分布,如图4所示^[27]。DONG You-ming 等^[28-29]在松香浸渍改性毛白杨(*Populus tomentosa*)中利用 CLSM 追踪松香成分

在木材中的分布,发现松香及其衍生物主要集中于木材细胞腔、薄壁细胞内,部分进入了细胞壁。



A和B分别为未改性竹材维管束和薄壁细胞;C和D分别为糠醇树脂改性竹材维管束和薄壁细胞。白色箭头为糠醇树脂在竹材纤维细胞和薄壁细胞内的信号^[27]。

图4 竹材 CLSM 图像

Fig.4 CLSM images of untreated and furfurylated bamboo

这些研究表明,CLSM在表征具有荧光特性的改性剂在改性木材中的空间分布具有显著优势。对于没有荧光特性的改性剂,这种方法可通过木质素的荧光特性大体上区分木材细胞结构与改性剂,但不能分析细胞壁内改性剂的分布。

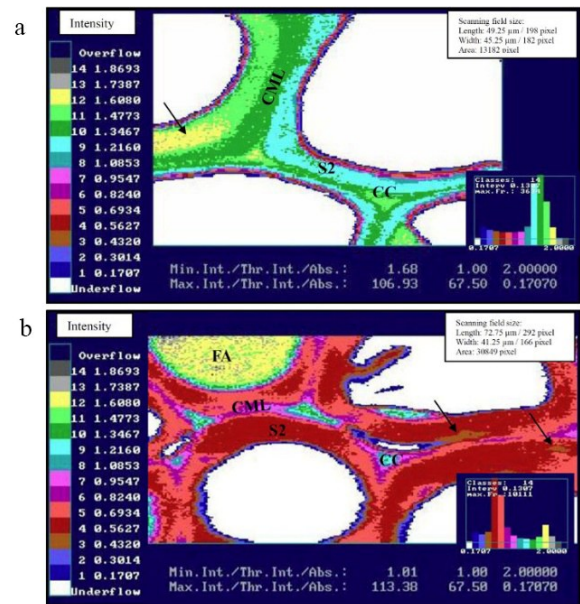
而通过对比改性木材腐朽前后的紫外光谱显微成像特征(图5b),从化学结构上证实糠醇改性木材在褐腐初期细胞壁结构不会发生变化,而细胞壁最外层和胞间层处的木质素优先发生了降解。

4 其他光谱成像技术

4.1 紫外光谱显微成像

将紫外吸收光谱与显微镜相结合,形成紫外光谱显微成像技术,可表征化学成分的空间分布。在木质材料中,木质素富含 π 电子,具有较强的紫外吸收能力,常利用紫外光谱显微成像表征木质素结构及其分布^[30]。

对于一些具有紫外吸收能力的改性剂,也可用紫外光谱成像表征。Kielmann 等^[31]利用紫外光谱显微成像技术观测了氮羟甲基树脂浸渍改性白蜡木(*Fraxinus excelsior*)、榉木(*Fagus sylvatica*)和枫木(*Acer platanoides*),其空间分辨率为 $0.25\ \mu\text{m} \times 0.25\ \mu\text{m}$,结果表明树脂在胞间层中较为集中,并能够进入细胞壁和薄壁细胞,但由于解剖学构造和化学成分的不同,几种木材之间的树脂分布存在差异;同时,该研究也表明,通过选择树脂的最大吸收波长(240 nm),可有效避免木质素信号(270~280 nm)的干扰。Ehmcke 等^[32-33]对糠醇树脂改性木材的紫外光谱显微成像特征进行了研究,发现糠醇树脂能够增强木材的紫外吸收能力,在胞间层含量最高,其次是 S_2 层(图5a),



a 未腐朽;b 经过21天腐朽。

图5 糠醇树脂改性辐射松木材的紫外光谱显微成像^[33]
Fig.5 UV microscopic scanning profiles of furfurylated *Pinus radiata*

与 CLSM 类似,紫外光谱显微成像只能应用于具有紫外吸收特性的改性剂在木材内的表征分析,具有一定局限性。若改性剂与木质素的吸收波长类似,则会与木质素信号重叠,难以获得有效数据。

4.2 高光谱成像技术

高光谱成像是一种集数字图像和光谱信息于一体的表征分析技术，具有快速、无损的特点。由于其光谱范围广（200~2 500 nm），能够同时且快速提供测试对象表面形貌特征和化学成分信息，高光谱成像技术在食品检测、医学、土壤检测、森林病虫害监测等领域有着广泛应用^[34-35]。

近年来，高光谱成像技术也被应用于木材科学领域，如木材种类鉴定、应力木检测、木材缺陷和腐朽识别、含水率检测等^[36-38]。但是，高光谱成像技术用于改性木材的表征还处于探索阶段，

缺乏有效的分析模型以及数据积累^[39]。Awais 等^[40]利用近红外高光谱成像表征乙酰化改性木材，结合主成分分析技术，将近红外光谱特征峰与基团相对应，直观地表征改性木材表面的乙酰基分布状态，并发现早材比晚材优先发生乙酰化反应，如图 6 所示。为增强高光谱成像分析的准确性，Mäkela 等^[41]通过近红外高光谱成像和拉曼光谱成像定量分析了早材和晚材的乙酰化程度，与传统称重法相比，能更准确地表征木材不同结构中的改性程度。

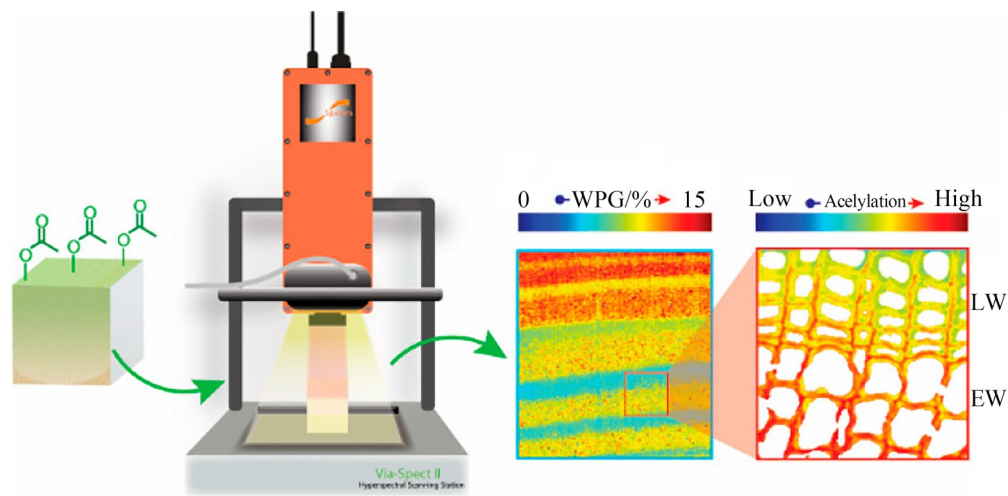


图 6 乙酰化木材表面高光谱成像技术表征示意图^[40]

Fig. 6 Illustration of hyperspectral near-infrared images of determining the acetic anhydride in wood blocks

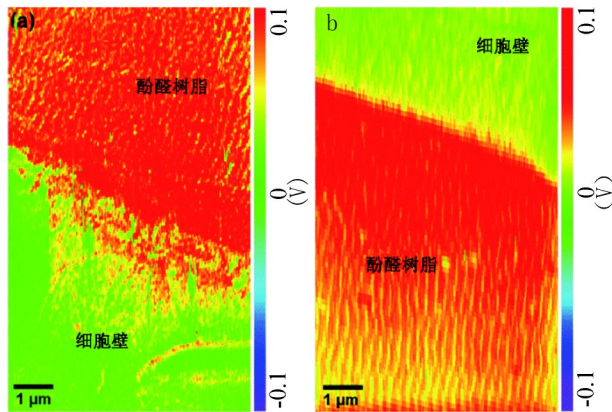
4.3 纳米红外显微成像技术

传统的红外成像技术受光学衍射极限和元器件限制，其空间分辨率只能达到微米级，难以完全满足使用需求。近年来，纳米红外显微成像技术作为一种新型的表征技术在生命科学、材料科学等领域得到了开发与应用，将红外成像与原子力显微镜相结合，利用原子力探针探测样品因红外吸收效应所产生的热膨胀，建立红外波长与热膨胀的函数关系，而通过原子力显微镜的轻敲模式，可在纳米级尺度上同时获得样品表面微观形貌、空间化学结构以及微观光学性能，因此也称为红外原子力显微成像（Atomic force microscopy-based infrared spectroscopy, AFM-IR）^[42]。

纳米红外显微成像技术在木材科学领域的探索应用已有报道。WANG Xin-zhou 等^[43]利用 AFM-IR 对酚醛树脂胶黏剂与木材细胞壁间的界面结合

形态进行了表征。研究者将胶黏剂与木材界面作用的区域分成两种类型：胶黏剂与木材细胞壁直接接触的胶层（类型 I）；渗透到细胞腔中的胶黏剂与细胞壁的结合区域（类型 II）。通过 AFM-IR 的分析，直观地发现在类型 I 的胶层处，胶黏剂渗透到了木材细胞壁中，与纤维素和半纤维素发生了化学结合（图 7a）；而对于类型 II，渗透到木材细胞腔中的胶黏剂与细胞壁之间存在明显的界线（图 7b）。

Gusenbauer 等^[44]对云杉（*Picea abies*）进行琥珀酸酐改性和甲基丙烯酸三氟甲酯改性，使其分别羧基化和氟化。利用 AFM-IR 以及原子力显微镜的轻敲模式进行表征，不仅获得了化学成分分布图和微观形貌图，还获得了细胞壁的粘附力和杨氏模量分布图，从而直观地揭示改性机制以及对木材细胞壁化学成分和性能的影响。



a 界面类型 I 中 C=C 的分布成像;

b 界面类型 II 中 C=C 的分布成像^[43]。

图7 木材与酚醛树脂胶黏剂界面区域纳米红外成像

Fig. 7 Corresponding IR amplitude images of wood-PF interfacial areas

5 结语

1) 木材改性技术为促进木材优化利用、扩大木材应用范围起到了重要推动作用。木材改性技术种类多, 改性机制与改性功效不尽相同。光谱成像技术为改性剂筛选、改性工艺优化提供了重要的理论和技术支撑, 具有快速、简单、准确、全面等优势, 已成为木材改性研究的重要工具。

2) 光谱成像技术在木材改性机制的研究中发挥着重要作用, 包括改性木材中的界面作用机制、界面结合形态、化学结构变化等, 不仅能够提供样品表面某一位点的化学信息, 还能从空间上提供样品的化学分布信息, 有效地揭示改性木材微观结构与化学结构的相关性。随着新技术的发展, 传统表征手段的限制因素逐步被克服, 如红外的光学衍射极限、拉曼光谱较低的信噪比等, 这极大地促进了木材改性机制的准确揭示。此外, 将多种分析技术有机结合, 既能扬长避短, 充分发挥各种表征技术的优势, 丰富和完善试验数据, 又能使获得的结果相互印证, 提高数据的准确性。因此, 专业化、高效化、多功能化将成为光谱成像技术今后的发展趋势。

3) 随着新材料、新技术的不断发展, 一些新分析手段在生物领域、高分子领域得到了良好应用, 并逐渐拓展到木材改性研究领域, 如高光谱成像技术, 有效弥补了木材改性研究领域表征分析技术的不足。尽管如此, 这些新方法仍然存在

测试成本高昂、制样过程复杂、测试条件苛刻等问题, 且在表征结果的分析上缺乏数据积累, 在很大程度上限制着其在木材改性研究领域的深入应用, 这需要借助其他相对成熟的分析方法进行验证。随着今后分析技术的不断发展, 这些问题将逐步被解决。

参考文献:

- [1] 柴宇博, 刘君良, 吕文华. 乙酰化杨木的热压缩工艺与性能分析[J]. 木材工业, 2017, 31(1): 15-18.
CHAI Y B, LIU J L, LV W H. Hot-pressing process and properties evaluation on poplar wood acetylated with acetic anhydride[J]. China Wood Industry, 2017, 31(1): 15-18.
- [2] KONG L Z, GUAN H, WANG X Q. In situ polymerization of furfuryl alcohol with ammonium dihydrogen phosphate in poplar wood for improved dimensional stability and flame retardancy[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(3): 3349-3357.
- [3] 孟辰笑凝, 赵科岩, 高慧, 等. 有机烷氧基硅烷偶联剂在木材防腐中的应用[J]. 林产工业, 2020, 57(11): 65-68.
MENG C, ZHAO K Y, GAO H, et al. Application of organoalkoxysilane coupling agent in wood anticorrosion[J]. China Forest Products Industry, 2020, 57(11): 65-68.
- [4] 付宗营, 周凡, 高鑫, 等. 热处理对进口辐射松木材抗弯性能和尺寸稳定性的影响[J]. 木材工业, 2019, 33(6): 47-50.
FU Z Y, ZHOU F, GAO X, et al. Heat treatment effect on bending properties and dimensional stability of imported radiata pine wood[J]. China Wood Industry, 2019, 33(6): 47-50.
- [5] GUO B T, Liu Y Z, Zhang Q, et al. Efficient flame-retardant and smoke-suppression properties of Mg-Al-layered double-hydroxide nanostructures on wood substrate[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(27): 23039-23047.
- [6] Petrič M. Surface modification of wood[J]. Reviews of Adhesion and Adhesives, 2013, 1(2): 216-247.
- [7] 董友明, 张世锋, 李建章. 木材细胞壁增强改性研究进展[J]. 林业工程学报, 2017, 2(4): 34-39.
DONG Y M, ZHANG S F, LI J Z. Research progress in wood cell wall modification[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(4): 34-39.
- [8] GUO J, ZHOU H B, Stevanic J S, et al. Effects of ageing on the cell wall and its hygroscopicity of wood in ancient timber construction[J]. Wood Science and Technology, 2018, 52(1): 131-147.
- [9] SONG K L, YIN Y F, Salmén L, et al. Changes in the properties of wood cell walls during the transformation from sapwood to heartwood [J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(4): 1734-1742.
- [10] WANG K L, DONG Y M, YAN Y T, et al. Highly hydrophobic and self-cleaning bulk wood prepared by grafting long-chain alkyl onto wood cell walls[J]. Wood Science and Technology, 2017, 51(2): 395-411.
- [11] LI W J, LIU M H, WANG H K, et al. Fabrication of highly stable and durable furfurylated wood materials. Part II: the multi-scale distribution of furfuryl alcohol (FA) resin in wood[J]. Holzforschung, 2020, 74(12): 1147-1155.
- [12] GUO J, SONG K L, Salmén L, et al. Changes of wood cell walls in response to hygro-mechanical steam treatment[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 207-214.
- [13] XU J L, Thomas K V, Luo Z, et al. FTIR and Raman imaging for microplastics analysis: State of the art, challenges and prospects[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, 119: 115629.

- [14] Gierlinger N. New insights into plant cell walls by vibrational microspectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2018, 53(7): 517-551.
- [15] 林坤, 张建襄. 提高共焦拉曼光谱成像系统分辨率的技术分析[J]. *激光杂志*, 2018, 39(8): 11-14.
LIN K, ZHANG J H. Technical analysis of improving the resolution of confocal Raman spectroscopy imaging system[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(8): 11-14.
- [16] Kanbayashi T, Kataoka Y, Ishikawa A, et al. Confocal Raman microscopy reveals changes in chemical composition of wood surfaces exposed to artificial weathering[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2018, 187: 136-140.
- [17] Belt T, Keplinger T, Hänninen T, et al. Cellular level distributions of Scots pine heartwood and knot heartwood extractives revealed by Raman spectroscopy imaging[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 108: 327-335.
- [18] Ermeýdan M A. Modification of spruce wood by UV-crosslinked PEG hydrogels inside wood cell walls[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2018, 131: 100-106.
- [19] Ermeýdan M A, Cabane E, Gierlinger N, et al. Improvement of wood material properties via in situ polymerization of styrene into tosylated cell walls[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(25): 12981.
- [20] Keplinger T, Cabane E, Chanana M, et al. A versatile strategy for grafting polymers to wood cell walls[J]. *Acta Biomaterialia*, 2015, 11: 256-263.
- [21] DONG Y M, Altgen M, Mäkelä M, et al. Improvement of interfacial interaction in impregnated wood via grafting methyl methacrylate onto wood cell walls[J]. *Holzforschung*, 2020, 74(10): 967-977.
- [22] 陈胜, 张逊, 许凤. 基于显微拉曼光谱的稀酸预处理马尾松细胞壁解构机理研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2136-2142.
CHEN S, ZHANG X, XU F. Study on cell wall deconstruction of *Pinus massoniana* during dilute acid pretreatment with confocal Raman microscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 2136-2142.
- [23] Donaldson L A, Radotic K. Fluorescence lifetime imaging of lignin autofluorescence in normal and compression wood[J]. *Journal of Microscopy*, 2013, 251(2): 178-187.
- [24] 李成辉, 田云飞, 闫曙光. 激光扫描共聚焦显微成像技术与应用[J]. *实验科学与技术*, 2020, 18(4): 33-38.
LI C H, TIAN Y F, YAN S G. Laser scanning confocal microscopy and its application[J]. *Experiment Science and Technology*, 2020, 18(4): 33-38.
- [25] Thygesen L G, Barsberg S, Venås T M. The fluorescence characteristics of furfurylated wood studied by fluorescence spectroscopy and confocal laser scanning microscopy[J]. *Wood Science and Technology*, 2010, 44(1): 51-65.
- [26] 沈晓双, 邹献武, 李改云, 等. 糠醇单体与预聚体混合物改性杨木[J]. *林业科学*, 2019, 55(9): 197-204.
SHEN X S, ZOU X W, LI G Y, et al. Modified poplar wood with the mixture of prepolymer and monomer of furfuryl alcohol[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(9): 197-204.
- [27] LI W J, LIU M H, WANG H K, et al. The furfuryl alcohol (FA) resin distribution in the furfurylated bamboo[J]. *Holzforschung*, 2021, 75(2): 187-194.
- [28] DONG Y M, YAN Y T, WANG K L, et al. Improvement of water resistance, dimensional stability, and mechanical properties of poplar wood by rosin impregnation[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, 74(2): 177-184.
- [29] DONG Y M, ZHANG W, Hughes M, et al. Various polymeric monomers derived from renewable rosin for the modification of fast-growing poplar wood[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174: 106902.
- [30] ZHANG Y, Naebe M. Lignin: A review on structure, properties, and applications as a light-colored UV absorber[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(4): 1427-1442.
- [31] Kielmann B C, Adamopoulos S, Militz H, et al. Modification of three hardwoods with an N-methylol melamine compound and a metal-complex dye[J]. *Wood Science and Technology*, 2014, 48(1): 123-136.
- [32] Ehmcke G, Pilgård A, Koch G, et al. Topochemical analyses of furfuryl alcohol-modified radiata pine (*Pinus radiata*) by UMSP, light microscopy and SEM[J]. *Holzforschung*, 2017, 71(10): 821-831.
- [33] Ehmcke G, Pilgård A, Koch G, et al. Improvement of a method for topochemical investigations of degraded furfurylated wood[J]. *International Wood Products Journal*, 2016, 7(2): 96-101.
- [34] 黄华国. 林业定量遥感研究进展和展望[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(12): 1-14.
HUANG H G. Progress and perspective of quantitative remote sensing of forestry[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(12): 1-14.
- [35] 邓亚美, 王秀娟, 杨敏莉, 等. 成像技术在食品安全与质量控制中的研究进展[J]. *色谱*, 2020, 38(7): 741-749.
DENG Y M, WANG X J, YANG M L, et al. Research advances in imaging technology for food safety and quality control[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2020, 38(7): 741-749.
- [36] Ma T, Schimleck L, Inagaki T, et al. Rapid and nondestructive evaluation of hygroscopic behavior changes of thermally modified softwood and hardwood samples using near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI)[J]. *Holzforschung*, 2021, 75(4): 345-357.
- [37] 周竹, 方益明, 尹建新, 等. 高光谱成像技术及其在木材无损检测中的研究进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(3): 458-466.
ZHOU Z, FANG Y M, YIN J X, et al. Review of nondestructive detection of wood and wood products based on hyperspectral imaging technology[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2015, 32(3): 458-466.
- [38] 赵鹏, 韩金城, 王承琨. 基于I-BGLAM纹理和光谱融合的高光谱显微成像木材树种分类[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(2): 599-605.
ZHAO P, HAN J C, WANG C K. Wood species classification with microscopic hyper-spectral imaging based on I-BGLAM texture and spectral fusion[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(2): 599-605.
- [39] Myronycheva O, Sidorova E, Hagman O, et al. Hyperspectral imaging surface analysis for dried and thermally modified wood: an exploratory study[J]. *Journal of Spectroscopy*, 2018, 2018: 1-10.
- [40] Awais M, Altgen M, Mäkelä M, et al. Hyperspectral near-infrared image assessment of surface-acetylated solid wood[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2020, 3(8): 5223-5232.
- [41] Mäkelä M, Altgen M, Belt T, et al. Hyperspectral imaging and chemometrics reveal wood acetylation on different spatial scales[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(8): 5053-5066.
- [42] WANG L, WANG H M, Wagner M, et al. Nanoscale simultaneous chemical and mechanical imaging via peak force infrared microscopy [J]. *Science Advances*, 2017, 3(6). DOI: 10.1126/sciadv.1700255.
- [43] WANG X Z, DENG Y H, Li Y J, et al. *In situ* identification of the molecular-scale interactions of phenol-formaldehyde resin and wood cell walls using infrared nanospectroscopy[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(80): 76318-76324.
- [44] Gusenbauer C, Jakob D S, Xu X G, et al. Nanoscale chemical features of the natural fibrous material wood[J]. *Biomacromolecules*, 2020, 21(10): 4244-4252.