

压缩炭化杨木的微观结构与化学成分

陈琛¹, 邓玉和¹, 徐了², 周宇³, 陈旻¹, 吴晶¹, 王向歌¹, 杨莹¹

(1. 南京林业大学 木材工业学院, 江苏 南京 210037; 2. 浙江升华云峰新材股份有限公司, 浙江 湖州 313200; 3. 南京林业大学 信息学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 研究压缩、炭化过程中木材结构与化学成分的变化对压缩炭化木的应用有重要意义。利用扫描电镜、扫描电镜 X 射线能谱和红外光谱分析研究了杨木经压缩、炭化的微观结构和木材的化学成分变化。研究发现: 意杨 *Populus euramericana* 经过压缩、炭化后, 细胞腔变小, 胞壁距离减小, 胞壁距离最大分别缩小 56.94% 和 53.34%, 但细胞壁本身仍然保持了其完整性; 心边材各元素的变化趋势一致, 炭元素上升, 氧元素下降, 以边材为例, 素材 O/C 为 1.76, 压缩、炭化处理后分别为 1.65, 1.45; 杨木在热压和高温炭化过程中, 纤维素的降解, 使 C—H 伸缩振动吸收峰强度下降, 并发生了一定的位移, 半纤维素降解使 C=O 伸缩振动吸收峰强度降低, 木质素苯环和酚醚键 C—O—C 的伸缩振动吸收峰的变化说明木质素也发生了化学反应, 炭化后的心材在波数 2 853 cm⁻¹ 附近出现了明显的振动, 说明木材内部复杂的化学反应产生了新的化学基团。图 9 表 1 参 15

关键词: 木材学; 压缩炭化; 杨木; 微观结构; 化学成分

中图分类号: S718.1; TQ 351.21

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2012)05-0671-09

Microstructure and chemical composition of compressed and carbonized poplar

CHEN Chen¹, DENG Yu-he¹, XU Liao², ZHOU Yu³, CHEN Min¹, WU Jing¹, WANG Xiang-ge¹, YANG Ying¹

(1. College of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Zhejiang Sublimation Yunfeng New Material Co. Ltd., Huzhou 313200, Zhejiang, China; 3. College of Information, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The study of microstructure and chemical composition of carbonized wood has an important meaning for its application. Changes in microstructure and chemical composition of compressed and carbonized poplar (*Populus euramevicana*) were studied using a scanning electron microscope (SEM), Energy-dispersive X-ray spectrum (EDS) Analysis, and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. Results showed that after Poplar was compressed and carbonized, to maintain cell wall integrity the cell cavity and the distance between the cell walls, which reduced 56.94%, 53.34% at maximum, noticeably diminished. Element content in the sapwood and the heartwood varied similarly after hot-pressing and after carbonization with carbon content increasing and oxygen content decreasing. For example, the C-over-O ration of untreated wood was 1.76, after compressed and carbonized, the ration reduced to 1.65 and 1.45. Cellulose and hemicellulose degradation led to a reduction in peak absorption intensity for C—H and C=O during hot-pressing and carbonization with some displacement also taking place. In addition, the change in peak absorption intensity for a benzene ring and phenolic-ether bond illustrated a chemical change in lignin. Thus, after carbonization in the heartwood, the new absorption peak located near the wave number at 2 853 cm⁻¹ indicated that during this treatment a complicated chemical reaction had generated new chemical groups. [Ch, 9 fig. 1 tab. 15 ref.]

收稿日期: 2011-11-10; 修回日期: 2012-03-09

基金项目: 江苏省科技厅富民强县项目(BN2009220)

作者简介: 陈琛, 从事木材科学与技术研究。E-mail: ccmg2005@hotmail.com。通信作者: 邓玉和, 教授, 博士生导师, 从事复合材料研究。E-mail: dengyuhe@hotmail.com

Key words: wood science; compressed and carbonized; poplar; microstructure; chemical composition

压缩木是木材通过热压处理而制成的一种密度大、强度高的强化处理材料^[1]。木材炭化热处理就是将木材放在高温的环境中进行一段时间的热解处理,木材组分在炭化热处理过程中发生了复杂的化学反应,改变了木材的某些成分,达到增加木材尺寸稳定性的目的^[2-3]。经压缩炭化处理的木材,性能发生显著变化,这与其结构与化学成分的变化密不可分,因此,研究压缩、炭化过程中木材结构与化学成分的变化对研究压缩炭化木有重要的意义。黄广华^[4]对巨尾桉 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 等木材密实化的结构进行了研究,发现低质速生林木材压缩后,导管、木纤维、管胞等细胞受到挤压,胞壁没有受到破坏,细胞腔等空隙变小。王洁瑛等^[5]研究了热处理过程中杉木压缩木材红外光谱。研究发现,在热处理固定杉木压缩木材的过程中,半纤维素和木素发生了化学变化。唐晓淑^[6]将压缩处理后的杉木压缩材在 180~200 °C 下热处理一定的时间,发现热处理使木材内部发生了半纤维素和木素的热分解,同时也引起纤维素的结晶形态发生了变化。杨树 *Populus* 是中国人工林主要树种,由于心边材材质存在一定的差异,心材含较多的内含物,因此,本研究采用扫描电镜(SEM)、扫描电镜 X 射线能谱、红外光谱(FTIR)手段^[7-9],分别分析研究了杨木心材、边材在压缩、炭化过程中的微结构和化学成分的变化。

1 材料和实验方法

1.1 材料

实验用木材树种为意杨 *Populus euramericana*, 产自江苏省泗阳县,木材试件要求无开裂、无腐朽、无变色等可见缺陷。

1.2 仪器与设备

XLB 平板硫化机, 5 mm 厚度规, GZX-9240MBE 电子恒温鼓风干燥箱, 荷兰 FEI 环境扫描电镜, 英国牛津 EDS 250 扫描电镜 X 射线能谱仪, 傅氏转换红外光谱分析仪(简称 FTIR 光谱仪)。

1.3 实验方法

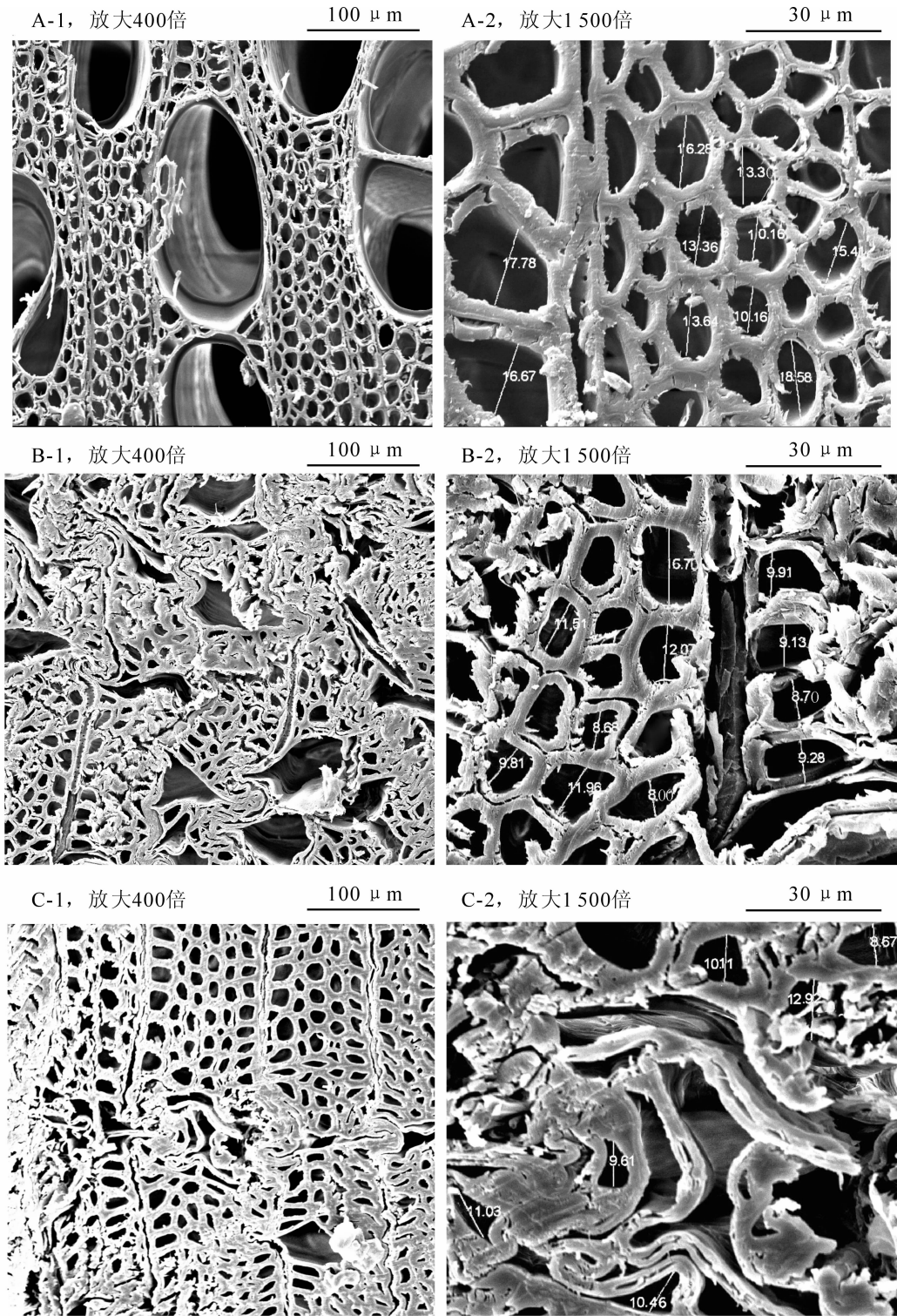
将 10 mm 厚、含水率为 15% 的杨木心边材旋切板置于 120 °C 的热压机中压缩 50 min, 压力使上热压板压到厚度规即可, 制成压缩率为 50%, 厚度为 5 mm 的压缩木, 压缩木在 200 °C 条件下炭化 2 h 制成杨木心边材压缩炭化木。

分别取杨木心材、边材, 压缩的杨木心材、边材, 压缩炭化杨木心材、边材, 用刀片削制成 5 mm × 5 mm × 1 mm 试件, 刀片的刃口只能用 1 次, 不能重复使用, 用以扫描电镜和能谱分析, 其中扫描电镜扫描试样横切面; 将心边材杨木、压缩杨木、压缩炭化杨木分别磨成木粉, 木粉的目数为 40~100 目用以红外光谱分析。

2 结果与分析

2.1 压缩炭化材的微观结构

图 1 为杨木、压缩杨木和压缩炭化杨木边材的扫描电镜图像。从图 1A 和图 1B 可以看出: 杨木边材经过压缩后, 其细胞产生了较大的变形, 原本较为宽大的细胞腔被压缩成了扁平状, 细胞腔变小, 对比图 1A-2 和图 1B-2, 可知压缩后胞壁距离明显变小, 素材胞壁距离普遍为 10.16~18.58 μm, 压缩后胞壁距离减小为 8.00~12.07 μm, 但由于木材本身的变异性和机械压力的不均匀性, 使胞壁距离变化不均匀, 胞壁距离最大缩小 56.94%, 最小缩小 21.25%; 虽然细胞发生了明显的变形, 但细胞壁本身并没有被压溃, 仍然保持了其完整性^[10], 这是由于湿热状态下木材的可塑性增加, 木质素的玻璃化转变温度降低, 密实化过程所需的功率降低, 大大减小了木材微观破坏的可能性。速生杨木边材经过压缩后, 孔隙率变小, 密度有了很大的提高。对比图 1B-2 和图 1C-2 发现, 由于炭化后细胞壁成分热解, 使胞壁变薄, 表现为炭化后胞壁距离略有所增加, 普遍为 8.67~12.92 μm, 对比图 1A-2, 图 1C-2 中胞壁距离最大缩小了 53.34%, 最小缩小了 14.66%; 对比图 1B 和图 1C 可以看出: 压缩杨木经过炭化后, 其微观结构与压缩杨木相比, 孔隙率有所增加, 这是由炭化后胞壁距离较压缩材略有增加导致的。



A 杨木；B 压缩杨木；C 压缩炭化杨木

图 1 杨木边材在不同处理条件下的显微结构图

Figure 1 Microstructure of poplar sapwood treated under different conditions

从图 2D 中可以看到：心材的导管和木射线里有一定的内含物。由图 2E 可知：杨木心材经高温压缩后，其胞腔变小，压缩后的胞壁仍然保持其完整性，细胞没有被压溃，但经压缩后的杨木心材胞腔中内含物仍然存在，说明压缩杨木压缩时，温度主要使木材的塑性增加，在外力作用下胞腔变小，胞腔内含物没有明显变化。高温炭化处理使内含物部分降解，经高温炭化处理的杨木心材导管内含物明显减少(图 2F)。对比分析图 2D-2，图 2E-2，图 2F-3 可以看出：与素材相比，经压缩、炭化后胞壁距离

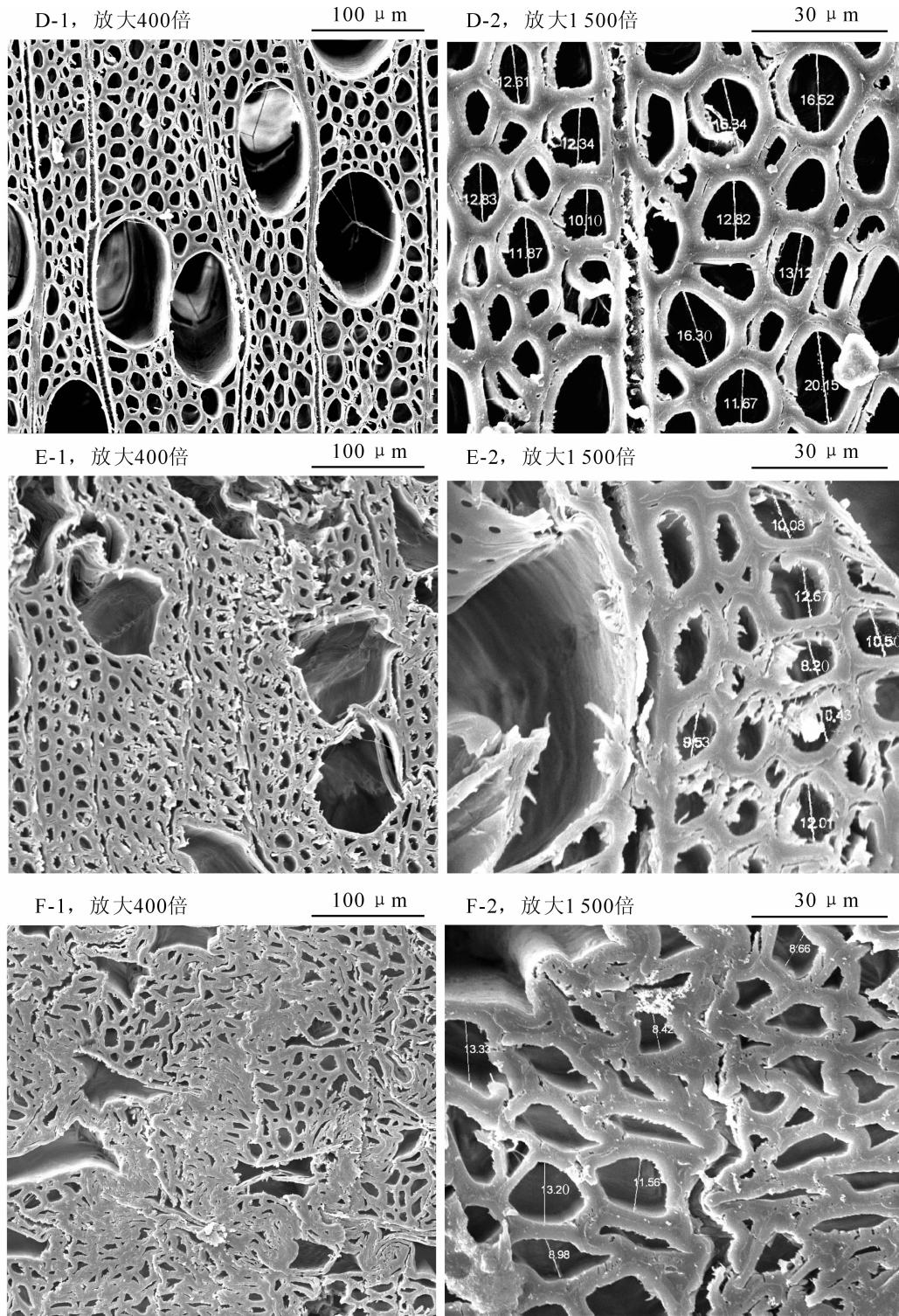


图2 杨木心材在不同处理条件下的显微结构图

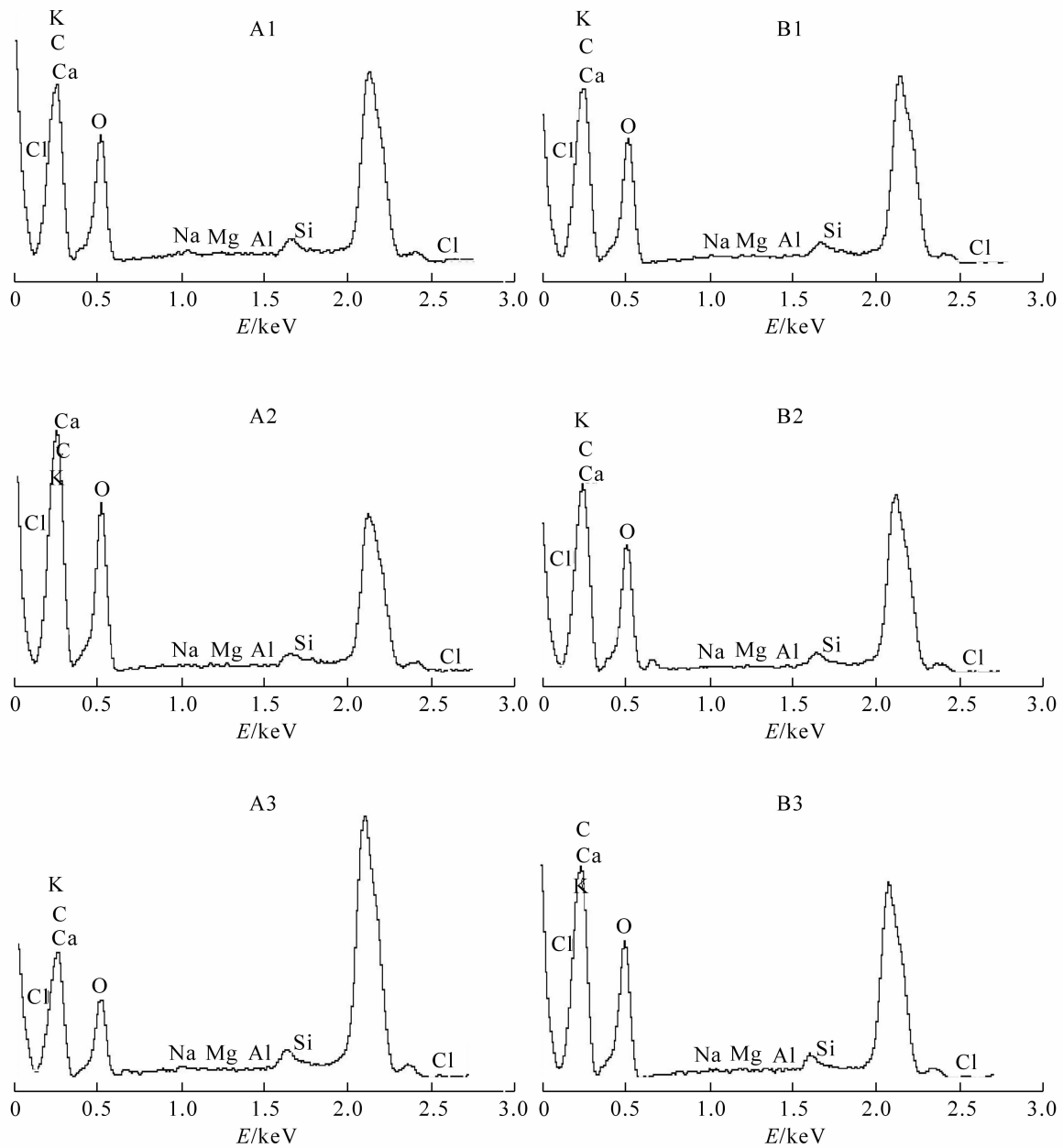
Figure 2 Microstructure of poplar heartwood treated under different conditions

明显减小, 素材胞壁距离普遍为 10.1~16.52 μm , 压缩后为 8.2~12.67 μm , 最大缩小了 50.36%, 最小缩小了 18.81%, 炭化后胞壁距离减小为 8.42~13.33 μm , 较压缩材略有所增加, 较素材胞壁距离最大减小了 49.03%, 最小减小了 16.63%。由此可见: 压缩、压缩炭化材的胞壁距离的变化趋势与边材相同。

2.2 压缩炭化木的化学成分

2.2.1 扫描电镜 X 射线能谱分析 杨木在压缩、炭化过程中, 随着复杂化学反应的发生, 伴随着组成元素的变化。为了更好地了解杨木经压缩、炭化后的化学成分的变化, 采用扫描电镜 X 射线能谱分析了木材的主要元素碳(C)氢(H)氧(O)等的变化。

从图 3 和表 1 可以看出，木材主要组成元素是碳(C)，氧(O)，少量钠(Na)，镁(Mg)，铝(Al)，硅(Si)等元素，代表炭元素和氧元素的 0.3 keV 和 0.5 keV 附近都有强峰，边材碳(C)原子和氧(O)原子的比心材高，边材为35.83%和 63.01%，心材为 34.52%和 61.64%，因为木材主要由纤维素、半纤维素、木素等组成，而这些物质主要是炭、氧组成的高聚物，由于心材含有较多的内含物，内含物主要为无机物，所以心材碳(C)原子和氧(O)原子比边材低。杨木含有一定量的无机物，在图 3 中出现了钠(Na)，镁(Mg)，铝(Al),硅(Si)，氯(Cl)，钾(K)和钙(Ca)等元素的特征峰，杨木心材除铝(Al)和硅(Si)元素比边材略高外，其他元素均比边材低，这是因为杨木心材有内含物，所以无机物含量高。杨木经压缩、炭化特征峰发生了变化，说明杨木在压缩、炭化过程中化学元素会产生变化^[9,11]。杨木边材的 O/C 为 1.76，无机物为 1.16%，说明杨木边材的氧元素较高，含氧基团多，亲水性好，木材的吸水性高；杨木边材经压缩后 O/C 降为 1.65，无机物降为1.13%，O/C 降低表明杨木边材在经压缩处理后发生炭化，碳元素有所上升，



A1 杨木边材；B1 杨木心材；A2 压缩杨木边材；B2 压缩杨木心材；
A3 压缩炭化杨木边材；B3 压缩炭化杨木心材

图 3 心材和边材 X 射线能谱分析图

Figure 3 X-ray EDS analysis of poplar sapwood and heartwood

表1 不同处理条件下杨木心材边材组成元素

Table 1 Composition of sapwood and heartwood of modified poplar

元素	杨木原子相对百分比/%					
	杨木边材	边材压缩	边材炭化	杨木心材	心材压缩	心材炭化
C, K	35.83	37.53	40.35	34.52	38.31	39.72
O, K	63.01	61.94	58.58	61.64	61.07	59.05
Na, K	0.29	0.32	0.51	0.44	0.08	0.20
Mg, K	0.07	0.02	0.01	0.07	0.08	0.14
Al, K	0.16	0.12	0.12	0.08	0.07	0.07
Si, K	0.08	0.04	0.01	0.05	0.04	0.01
Cl, K	0.15	0.08	0.29	0.18	0.09	0.12
K, K	0.22	0.17	0.10	2.60	0.06	0.49
Ca, K	0.19	0.38	0.23	0.42	0.20	0.20

氧元素略有下降, 无机物略有下降, 相对应的吸收峰强度也发生也较为明显的变化, 说明木材内部发生了一定的化学反应; 杨木经高温炭化处理后的 O/C 降为 1.45, 无机物升高至 1.27%, 与杨木压缩材相比, 经炭化处理的杨木其 O/C 降低了 12.1%, 无机物增加了 12.4%, 且略大于杨木边材无机物的含量。由于元素含量是相对的, 压缩过程中碳(C)的增加量大于氧(O)的降低量, 表现为无机物相对降低, 炭化过程中碳(C)的增加量小于氧(O)的降低量, 表现为无机物增加, 所以, 压缩、炭化过程中, 无机物表现为先降后升。O/C 进一步减小和无机物的变化表明杨木边材经炭化处理后, 木材内部发生了进一步的炭化, 木材组成成分之间发生了复杂的化学反应, 炭元素持续上升, 氧元素继续下降, 导致其亲水性能进一步下降, 体现在炭化后的板材吸水性低, 木材的尺寸稳定性好。从图 3B 中可以看出: 杨木心材, 其碳(C), 氧(O)及无机物经压缩炭化处理同样也会发生变化, 杨木心材的 O/C 为 1.78, 与边材相近, 无机物为 3.84%, 是边材无机物含量的 3.3 倍, 这是因为杨木心材的细胞中有内含物(图 2D), 因此, 无机物比边材高的多。杨木心材经压缩后其 O/C 为 1.59, 无机物为 0.62%, 无机物降低了 83.9%, 说明杨木在压缩过程中由于温度的作用发生了降解。压缩杨木经高温炭化处理后 O/C 呈继续下降的趋势, 为 1.49, 无机物则上升至 1.23%, 远低于杨木本身的含量。能谱分析的结果表明杨木心材经高温炭化处理后, 发生了进一步的热解, 各元素含量的变化趋势类似于边材。

2.2.2 红外光谱分析 木材进行炭化热处理过程中, 木材内部的半纤维素成分部分分解, 纤维素、木素在一定温度下也发生了变化, 游离羟基减少, 吸湿性降低, 淀粉、糖类等营养物质反应、挥发, 木材内部重新形成新的化学键结合, 从而达到提高木材尺寸稳定性、耐候耐久性的目的^[7]。图 4 为杨木边材的红外光谱图, 其波数变化范围是 400~4 000 cm^{-1} 。其中 2 917 cm^{-1} 附近属于纤维素的特征吸收峰, 1 738 cm^{-1} 附近属于半纤维素和木质素的特征吸收峰, 1 246 cm^{-1} 附近的吸收峰主要存在于木质素中, 1 054 cm^{-1} 附近的吸收峰主要存在于纤维素和半纤维素中^[12-14]。在波数 3 409, 2 917, 1 738 cm^{-1} 附近有 3 个强的吸收峰, 分别是羟基(—OH), 甲基和亚甲基(—CH₃, —CH₂)与羰基(C=O)的伸缩振动吸收峰, 说明木材中含有大量的纤维素和半纤维素, C—H 伸缩振动吸收峰较强, 这是 3 大组分均有的官能团, 在 1 640~1 500 cm^{-1} 的吸收峰也较明显, 它主要反映了木质素芳香核结构的特点^[5]。与杨木边材相比, 压缩、压缩炭化杨木边材的红外谱图形状发生了较大的变化, 出现了新的吸收峰, 吸收峰的强度和位置也发生了变化(图 5 和图 6), 说明杨木经压缩和压缩炭化处理木材的官能团、化学成分和化学结构发生了较大变化^[15]。在波数 3 400 cm^{-1} 附近的压缩杨木和压缩炭化杨木的羟基吸收峰的强度均明显增强, 且压缩炭化杨木的羟基吸收峰的强度明显高于压缩杨木。此外, 两者的羟基吸收峰均发生了一定的位移, 同样压缩炭化杨木的羟基吸收峰的位移大于压缩杨木。杨木边材、压缩材到炭化材的羟基吸收峰强度依次加强。这是因为杨木长时间在一定的温度作用下压缩, 温度使压缩木产生了部分炭化, 而压缩材经过高温炭化处理, 其炭化的程度更高。这是因为杨木在压缩、炭化过程中会产生氢键缔合, 使得 O—H 的振

动加强。红外吸收光谱中羟基峰的变化趋势也可以说明杨木在热压和炭化过程中纤维素、半纤维素和木质素发生了化学变化。在高温炭化过程中，细胞壁各成分的羟基与羟基、羟基与羧基之间形成氢键和范德华力结合，使游离羟基数量减少，吸湿性降低。波数 $2\ 917\ \text{cm}^{-1}$ 附近为纤维素上的 C—H 伸缩振动，图 4~6 中的 C—H 吸收峰强度依次降低，说明杨木边材经过热压和炭化处理后，其纤维素可能发生了化学变化，结晶区增多，非结晶区减少，表现为杨木边材、压缩杨木边材和压缩炭化杨木边材的尺寸趋于逐渐稳定。在波数 $1\ 730\ \text{cm}^{-1}$ 附近的乙酰基和羧基上的 C=O 伸缩振动发生了明显变化，杨木经热压后，该吸收峰强度逐步减弱，经高温炭化处理后，上述吸收峰强度减弱更明显，该吸收带是半纤维素的特征吸收峰，这说明杨木在热压和炭化处理过程中半纤维素发生了化学反应。波数 $1\ 507\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰为木质素苯环骨架振动， $1\ 260\ \text{cm}^{-1}$ 附近的酚醚键 C—O—C 伸缩振动吸收峰，也是木质素的伸缩振动，图 4~6 中显示压缩、压缩炭化处理的两处吸收峰发生了明显变化，这说明杨木在热压和高温炭化处理过程中木质素发生了化学反应。波数 $1\ 060\ \text{cm}^{-1}$ 附近的 C—O 伸缩振动吸收峰也发生了变化，经压缩和压缩炭化后，该吸收峰强度有所减弱，该吸收带的 C—O 键主要存在于纤维素和半纤维素中，也进一步说明压缩炭化处理使纤维素和半纤维素发生了化学反应。图 7~9 为杨木、压缩杨木和压缩炭化杨木心材的红外光谱图。由于心材、边材中木材组分基本相同，只是含量稍有差异，所以心材中各特征吸收峰的变化趋势基本与边材一致。由于杨木心材中的抽提物比边材丰富，所以相对边材，心材压缩炭化材在波数 $2\ 853\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现了明显的振动，由于在 $2\ 900\ \text{cm}^{-1}$ 附近为纤维素的特征吸收峰，同时也是木材中脂肪酸类物质的特征吸收峰，所以经炭化后吸收峰的明显增强说明木材纤维素发生了降解，而当温度冷却后，可能降解产物又重新组合，发生了复杂的交联作用，产生新的化学基团，或者木材中的抽提物在高温条件下发生交联化反应，可能产生了新的化学基团^[13-14]。

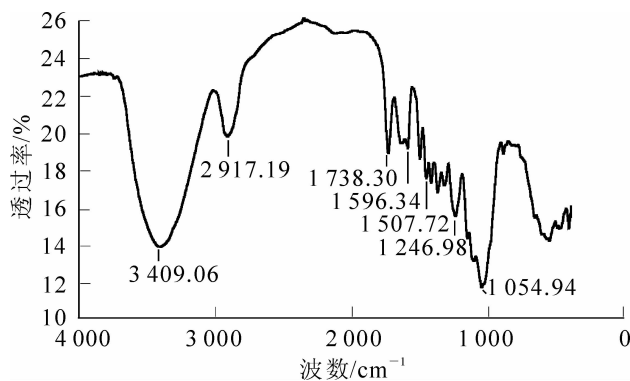


图 4 杨木边材红外光谱图

Figure 4 Infrared spectrum of poplar sapwood

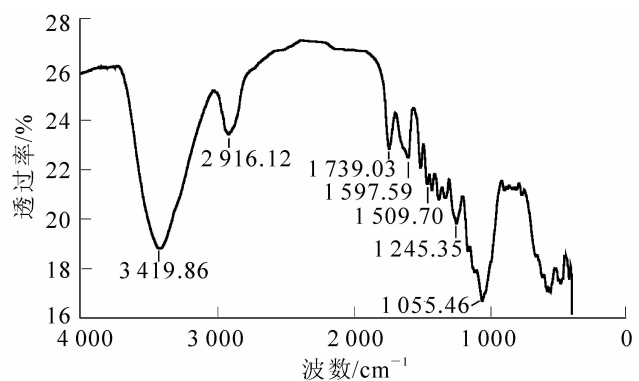


图 5 压缩杨木边材红外光谱图

Figure 5 Infrared spectrum of compressed poplar sapwood

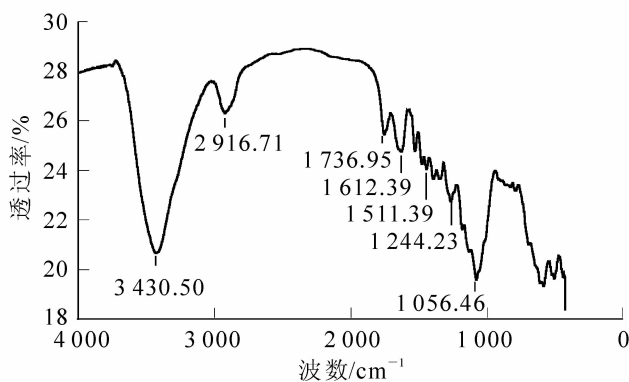


图 6 压缩炭化杨木边材红外光谱图

Figure 6 Infrared spectrum of compressed and carbonized poplar sapwood

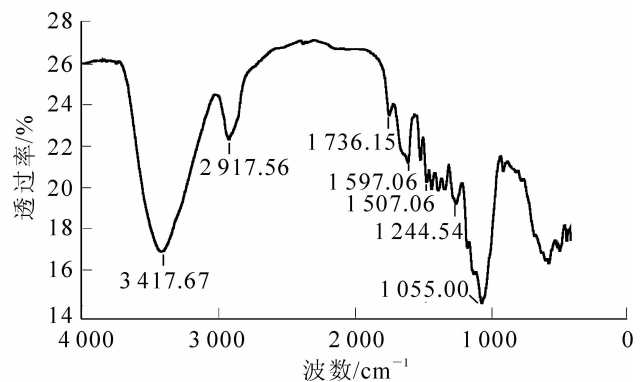


图 7 杨木心材红外光谱图

Figure 7 Infrared spectrum of poplar heartwood

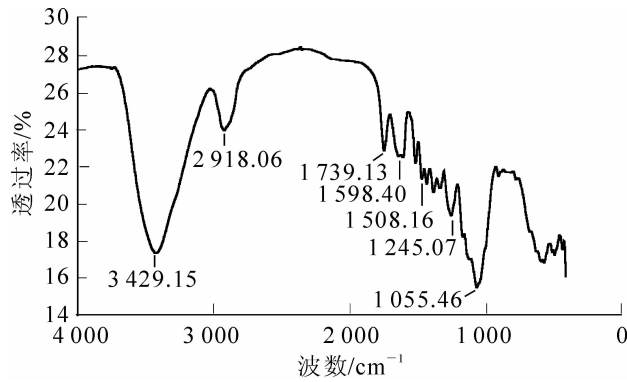


图8 压缩杨木心材红外光谱图

Figure 8 Infrared spectrum of compressed poplar heartwood

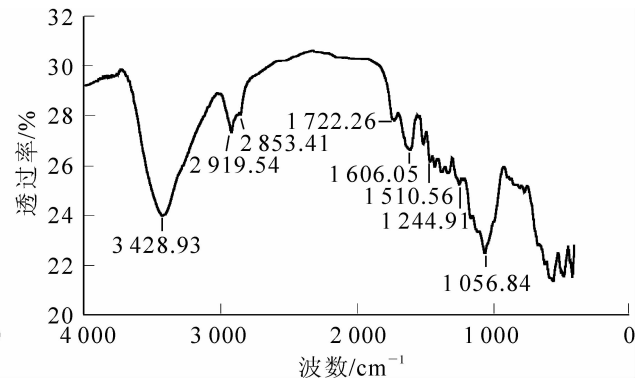


图9 炭化杨木心材红外光谱图

Figure 9 Infrared spectrum of compressed and carbonized poplar heartwood

3 结论

与素材相比,心边材的压缩、压缩炭化材的胞壁距离的变化趋势相同;杨木心边材经过压缩后,细胞产生了较大的变形,细胞腔变小,细胞壁距离明显减小,边材细胞的胞壁距离最大缩小了56.94%,最小缩小了21.25%,但细胞壁本身并没有被压溃,仍然保持了其完整性,压缩板材经过炭化后,胞壁距离略有所增加,与素材相比,炭化材胞壁距离最大缩小了53.34%,最小缩小了14.66%;心材在高温炭化作用下导管内含物明显减少,说明炭化使内含物发生部分降解。

杨木含有大量的碳(C)原子和氧(O)原子,心材含有较多的内含物,无机物含量为边材的3.3倍,所以边材碳(C)原子和氧(O)原子比心材高;经压缩、炭化处理,心材、边材各元素变化趋势一致,杨木中炭元素逐步上升,氧元素逐步下降,木材成分在压缩炭化过程中发生了化学反应。

高温加热处理使纤维素、半纤维素、木质素发生软化和降解,游离羟基减少,吸湿性降低,压缩木的尺寸稳定性得到提高,心边材的红外光谱图变化趋势相似;与杨木素材相比,经压缩、压缩炭化处理后,纤维素上的C—H伸缩振动吸收峰强度依次下降,并发生了一定的位移,纤维素可能发生了化学反应,结晶区增多,非结晶区减少,半纤维素降解使C=O伸缩振动吸收峰强度逐步降低,木质素苯环和酚醚键C—O—C的伸缩振动吸收峰的变化说明木质素也发生了化学反应,炭化处理后的心材在波数2853 cm⁻¹附近出现了明显的振动,说明心材内部复杂的化学反应产生了新的化学基团。

参考文献:

- [1] 刘占胜,张勤丽,张齐生.压缩木制造技术[J].木材工业,2000,14(5):19-21.
LIU Zhansheng, ZHANG Qinli, ZHANG Qisheng. Manufacturing technology of compressed wood [J]. *China Wood Ind*, 2000, 14 (5): 19 - 21.
- [2] 林兰英,陈志林,傅峰.木材炭化与炭化物利用研究进展[J].世界林业研究,2007,20(5):21-26.
LIN Lanying, CHEN Zhilin, FU Feng. Research on development of wood carbonization and charcoal's [J]. *World For Res*, 2007, 20 (5): 21 - 26.
- [3] 顾炼百,涂登云,于学利.压缩木的特点及应用[J].中国人造板,2007(5):30-32.
GU Lianbai, TU Dengyun, YU Xueli. Characteristic and application of thermowood [J]. *China Wood-based Panels*, 2007 (5): 30 - 32.
- [4] 黄广华.低质速生材密实化结构的研究[D].福州:福建农林大学,2007.
HUANG Guanghua. *Study on Compression Structure of Inferiority Fast-growing Wood* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.
- [5] 王洁瑛,赵广杰,中野隆人,等.热处理过程中杉木压缩木材的材色及红外光谱[J].北京林业大学学报,2001,23(1):59-64.
WANG Jieying, ZHAO Guangjie, NAKANO T, et al. Change of brightness, chromatism and infra red spectra of

- compressed China fir wood during heat treatment [J]. *J Beijing For Univ*, 2001, **23** (1): 59 – 64.
- [6] 唐晓淑. 热处理变形固定过程中杉木压缩木材的主成分变化及化学应力松弛[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
TANG Xiaoshu. *Influence of Heat Fixation on the Major Components and Chemical Stress Relaxation of Compressed Chinese Fir Wood* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004.
- [7] 沈隽, 方桂珍, 刘一星, 等. 木材波谱技术在高温蒸气处理制造木屑“自胶合”材中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2000, **28** (4): 69 – 71.
SHEN Jun, FANG Guizhen, LIU Yixing, *et al.* Application of wood spectroscopy technology in high temperature treatment of manufacturing wood residues self-bonding board [J]. *J Northeast For Univ*, 2000, **28** (4): 69 – 71.
- [8] ZUO Songlin, GAO Shangyu, YUAN Xigen, *et al.* Carbonization mechanism of bamboo (*Phyllostachys*) by means of fourier transform infrared and elemental analysis [J]. *J For Res*, 2003, **14** (1): 75 – 79.
- [9] 董慧茹. 仪器分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 190 – 199.
- [10] 陈瑞英, 胡国楠. 速生杨木密实化研究[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2005, **34** (3): 324 – 329.
CHEN Ruiying, HU Guonan. Study on the compression of fast-growth poplar [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci Ed*, 2005, **34** (3): 324 – 329.
- [11] RUDDIC J N R, YAMAMOTO K, WONG P C, *et al.* X-ray photoelectron spectroscopic analysis of CCA-treated wood [J]. *Holzforschung*, 1993, **47** (6): 458 – 464.
- [12] 李坚. 木材波谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 66 – 90.
- [13] 李贤军, 刘元, 高建民, 等. 高温热处理木材的 FTIR 和 XRD 分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, **31** (1): 104 – 107.
LI Xianjun, LIU Yuan, GAO Jianmin, *et al.* Characteristics of FTIR and XRD for wood with high-temperature heating treatment [J]. *J Beijing For Univ*, 2009, **31** (1): 104 – 107.
- [14] DUDLEY H, WILLIAMS, IAN F. *Spectroscopic Methods in Organic Chemistry* [M]. New York: The McGraw-Hill Companies, 2001.
- [15] KANSIZ M, HERAUD P, WOOD B, *et al.* Fourier transform infrared microspectroscopy and chemometrics as a tool for the discrimination of cyanobacterial strains [J]. *Photochemistry*, 1999, **52** (3): 407 – 417.