

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021067

自然老化对重组竹理化和燃烧性能的影响

李德月, 高 奇, 费本华, 陈瑞国, 刘志佳

(国际竹藤中心, 北京 100102)



摘要: 为了分析自然老化对户外重组竹性能的影响, 本研究选取在青岛户外放置两年的重组竹为研究对象, 测试其理化性能和燃烧性能。结果显示, 与对照样相比, 老化后重组竹的吸水厚度膨胀率和吸水率分别提高了88.32%和35.62%, 弹性模量和静曲强度的残余率分别为79.91%、75.72%。自然老化后重组竹的尺寸稳定性和力学强度仍能满足GB/T 40241—2021《户外重组竹》的要求。老化后重组竹灰分含量提高了1.64倍, 挥发分含量减少3.13%, 固定碳含量提高2.29%; 竹束内的半纤维素和纤维素降解; 与对照样相比, 老化重组竹的点燃时间延迟22 s; 热释放速率峰值降低8.41%, 总释烟量降低18.53%, 总释热量变化不显著。

关键词: 重组竹; 自然老化; 接触角; 力学强度; 燃烧性能

中图分类号: TS653; S781.9

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 01-0080-07

Effects of Natural Aging on Physicochemical and Combustion Properties of Bamboo Scrimber

LI De-yue, GAO Qi, FEI Ben-hua, CHEN Rui-guo, LIU Zhi-jia

(International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: In order to investigate the effect of natural aging, the bamboo scrimber, which was placed outdoors in Qingdao for two years was selected to test for the physicochemical and combustion properties. The results showed that the thickness swelling and water absorption of aged bamboo scrimber increased by 88.32% and 35.62%, respectively. The residual rate of modulus of elasticity and modulus of rupture were 79.91% and 75.72%, respectively. The dimensional stability and mechanical strength of aged bamboo scrimber can still met the requirements of GB/T 40241—2021 "Outdoor Bamboo Scrimber". The ash and fixed carbon content of aged bamboo scrimber were increased by 1.64 times and 2.29% than that of controlled samples, while the volatile content was decreased by 3.13%. In addition, the hemicellulose and cellulose in the aged bamboo scrimber were seriously degraded. The combustion test results showed that the ignition time of aged bamboo scrimber was extended by 22 seconds; the peak heat-release rate and the total smoke-release content decreased 8.41% and 18.53% respectively, while the total energy of heat-release changed slightly.

Key words: bamboo scrimber; natural aging; contact angle; mechanical strength; combustion performance

收稿日期: 2021-05-23; 修改日期: 2021-11-05

基金项目: 中央级公益性科研院所基本业务费专项资金项目“竹质装配式生态廊桥模块化组装与示范”(1632019013)。

作者简介: 李德月(1988—), 男, 博士研究生。Email: lideyue@icbr.ac.cn

通讯作者: 刘志佳, 男, 研究员。Email: Liuzhijia@icbr.ac.cn

重组竹是以竹束或竹篾为构成单元,经顺纹组坯、胶合热压制成的板材,具有力学强度高、尺寸稳定性好和耐腐蚀等优点,广泛应用于户外建筑和装饰等领域^[1-2]。重组竹在使用过程中易受外界条件的影响,表面降解导致颜色变化,还会因为长时间的蠕变导致力学性能下降^[3-4]。户外用重组竹需要具备良好的耐久性来抵抗自然环境的影响,因此对其老化性能的研究十分必要。

当前对材料耐久性的研究方法主要有加速老化法和自然老化法^[5]。人工加速老化法可以考察特定条件对材料耐久性的影响,但无法完全模拟户外复杂多变的环境,试验结果与实际应用之间的关联性不强^[6]。自然老化的研究可以真实地反映材料在某些特定区域气候条件下的变化,更加直观地判断重组竹的耐久性^[7-8]。

作为户外材料,重组竹被应用在外挂墙板、户外阳台地板、景观栈道等方面,对于这些特殊场景的应用,有必要讨论其燃烧性能。重组竹与其他竹质材料一样均属于可燃材料,在使用过程中存在火灾隐患^[9]。一旦发生火灾,燃烧时产生的烟雾和有毒气体极有可能造成人员伤亡和财产损失。然而,对于自然老化后重组竹的燃烧性能,目前尚缺乏足够的研究。自然老化后重组竹的各项理化性能发生了变化,导致其燃烧和阻燃性能也相应发生了改变。因此探究重组竹自然老化后的理化性能和燃烧性能,对于评价重组竹使用寿命,合理利用重组竹和预防火灾危害具有重要意义。

本研究以自然老化后的重组竹板材为研究对象,分别测试其表面接触角、力学强度、化学组分等,探究自然老化后重组竹理化性能的变化;并利用锥形量热仪评估重组竹的燃烧特性,分析其燃烧性能的变化规律,旨在为重组竹的使用和维护提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

重组竹:采用3~4年生的毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)竹束,浸渍水溶性的酚醛树脂胶黏剂热压制备而成。重组竹规格为2 000×200 mm×12 mm(长×宽×厚),含水率 $8.2\pm 0.5\%$,密度 $1.25\pm 0.04\text{ g/cm}^3$ 。

试验组试样共五块,水平放置于山东青岛市(东经 $119^{\circ}30'$ ~ $121^{\circ}00'$ 、北纬 $35^{\circ}35'$ ~ $37^{\circ}09'$)户外楼顶,放置时间为2017年9月至2019年8月,期间青岛温度和降水量情况见图1。

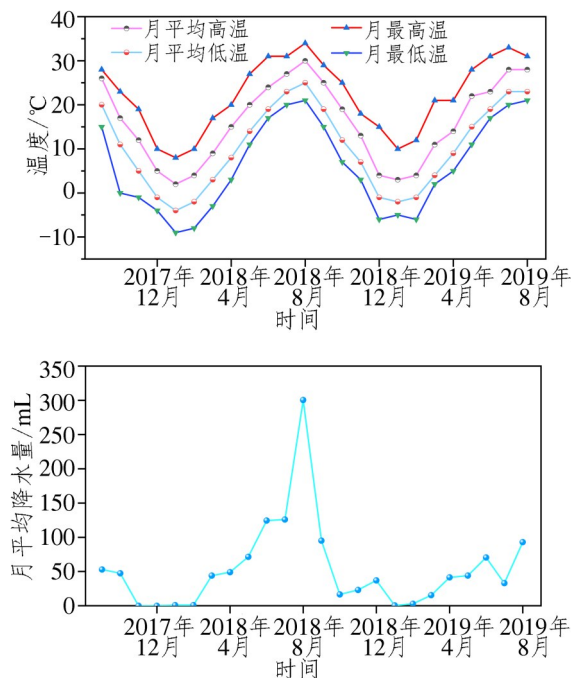


图1 试验期间青岛天气和降水情况

Fig.1 The weather and precipitation information of Qingdao during the experiment

对照组样品锯切后用密封袋保存于阴凉干燥处一个月后进行测试作为对照组数据。

1.2 试验设备

接触角测定仪、万能力学试验机、干燥箱、工业分析仪、元素分析仪、红外定硫仪、红外光谱仪、锥形量热仪。

1.3 性能测试

重组竹表面擦拭干净,从表面刮削适量粉末研磨过筛备用;重组竹试样按照所需尺寸锯切,并以重组竹的暴露面作为测试面。

1.3.1 重组竹物理力学性能

1)表面接触角 溶液选用蒸馏水,记录蒸馏水接触板面后10 s内接触角的变化。每组选取5块尺寸为100 mm×100 mm的样品,测试位置距试样边缘 $\geq 20\text{ mm}$,测试结果取平均值。

2)尺寸稳定性 参照GB/T 17657—2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》进行。吸

水厚度膨胀率试件长和宽均为 50 ± 1 mm, 吸水率试件长和宽均为 100 ± 1 mm。将试件浸于温度为 20 ± 1 °C的水中, 24 h后取出测量并计算厚度膨胀率和吸水率。每组选取6块样品测试, 结果取平均值。

3) 抗弯性能 参照 GB/T 17657—2013, 采用三点弯曲法测试静曲强度和弹性模量, 试件长 290 ± 1 mm, 宽度 50 ± 1 mm, 跨距 240 ± 1 mm。每组选取6块试验样品, 结果取平均值。

1.3.2 重组竹化学性能分析

1) 工业分析 参照 GB/T 28731—2012《固体生物质燃料工业分析方法》, 利用 Sundry-SD TGA5000a 工业分析仪对试样的水分、灰分、挥发分以及固定碳进行测试。每组样品测试3次, 结果取平均值。

2) 元素分析 C、H、N元素的测定参照 GB/T 28734—2012《固体生物质燃料中碳氢测定方法》, 利用 Sundry-AD CHN335 元素分析仪进行; S元素的测定参照 GB/T 28732—2012《固体生物质燃料全硫测定方法》, 利用 Sundry-SD S212 红外定硫仪进行。每组样品测试3次, 结果取平均值。

3) 红外光谱(FTIR)测试 选取 80 目重组竹粉末与 KBr 混合均匀后压片, 采用傅里叶红外光谱仪进行测试。

1.3.3 重组竹燃烧性能测试

测试样尺寸规格为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$, 用铝箔将试样的5个侧面包好。测试条件参照 ISO 5660-1: 2002 “Reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate—Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)”。设定热辐射强度为 $50\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 温度 $725\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测试时间为1 500 s。

2 结果与分析

2.1 重组竹物理力学性能

2.1.1 表面接触角

液体在固体材料表面上的接触角, 是衡量该液体对材料表面润湿性能的重要参数。当润湿液体为水时, 可以反映材料表面的疏水性, 接触角越大, 表面疏水性能越强^[10-11]。蒸馏水在重组竹样品表面接触角的测试结果, 如图2所示。

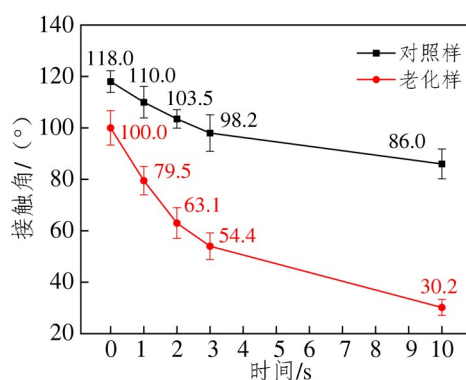


图2 重组竹对照和老化样的表面接触角
Fig.2 Contact angles of the controlled and aging bamboo scrimber samples

从图2可以看出, 对照样和老化样的初始接触角分别为 118° 和 100° , 随着接触时间的延长, 老化样的接触角呈急剧降低的趋势, 10 s后降到 30.2° , 较对照样降低了64.88%, 此时大部分水已浸润到重组竹内部。接触角的变化主要是自然老化过程中重组竹表面变粗糙所致^[12]。

2.1.2 尺寸稳定性与抗弯性能

重组竹样品老化前后的尺寸稳定性、抗弯性能测试结果, 见图3。

图3a显示, 浸泡24 h后, 重组竹老化样品的吸水厚度膨胀率和吸水率较对照样分别提高了88.32%和35.62%。吸水厚度膨胀率和吸水率的变化主要是由于重组竹在户外放置的过程中, 经过连续的干湿条件变化, 内结合强度降低, 导致其尺寸稳定性下降^[13]。

由图3b可知, 经户外放置两年后, 自然老化后重组竹的抗弯性能下降, 与对照样相比, 弹性模量的残余率为79.91%; 静曲强度的残余率为75.72%。这是因为重组竹板材在自然老化过程中周期性的吸湿和干缩, 导致板材的内结合强度下降, 引起抗弯性能降低。

自然老化后重组竹的尺寸稳定性和抗弯性能均下降, 但仍能满足 GB/T 40241—2021《户外重组竹》理化性能的要求(静曲强度 $\geq 90\text{ MPa}$, 弹性模量 $\geq 11\text{ 000 MPa}$, 24 h吸水厚度膨胀率 $\leq 3\%$)。

2.2 重组竹化学性能

2.2.1 化学成分

重组竹对照和老化样的工业分析和元素分析结果, 列于表1。

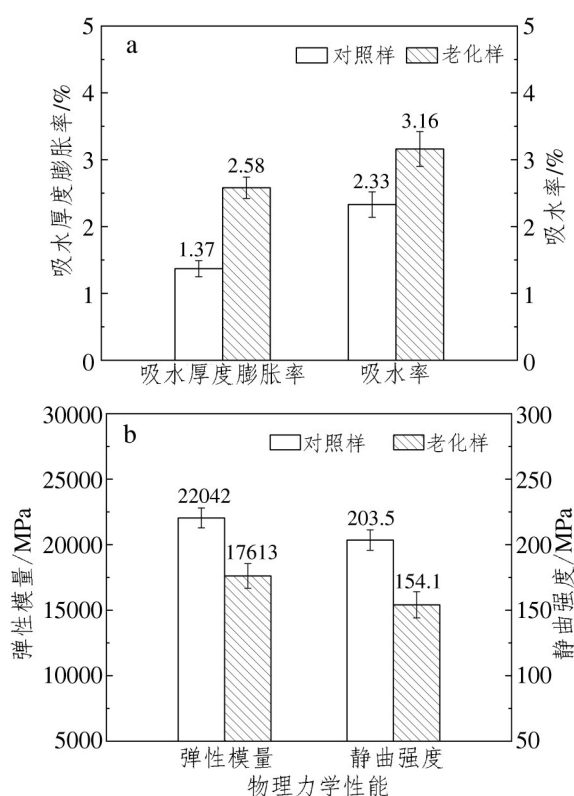


图3 重组竹对照和老化样的尺寸稳定性和抗弯性能

Fig.3 Dimensional stability and bending strength of controlled and aging samples

表1 重组竹对照和老化样的工业分析和元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the controlled and aging samples

试样	工业分析				元素分析			
	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%	C/%	H/%	N/%	S/%
对照样	6.63	1.35	71.19	27.42	55.61	5.20	0.05	0.02
老化样	7.09	2.22	68.06	29.71	55.35	5.10	0.05	0.03

由表1可知,老化后重组竹的灰分含量较对照样提高了1.64倍,挥发分减少了3.13%,固定碳含量提高了2.29%。这是因为在自然老化过程中,重组竹表面竹束内的挥发性物质逐渐逸出,导致挥发分含量下降和固定碳含量上升^[14]。加上周期性的干缩和湿胀使重组竹表面产生微隙,灰尘随空气和雨水进入重组竹内部,填充部分孔隙,使灰分含量提高。自然老化后重组竹中的H、N、S元素含量变化不明显,C元素下降主要归结于部分半纤维素和纤维素的降解^[14]。

2.2.2 红外光谱分析

采用FTIR光谱进一步分析重组竹在自然老化

过程中官能团的变化,结果见图4。

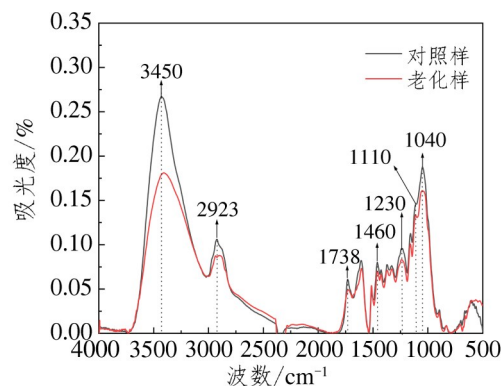


图4 重组竹对照和老化样的FTIR图谱

Fig.4 FTIR patterns of the controlled and aging samples

通常位于 $3\ 230\sim 3\ 550\ \text{cm}^{-1}$ 处羟基中O-H的伸缩振动峰,和位于 $1\ 050\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰及其两侧突起,被认为是纤维素的明显特征峰^[15];位于 $1\ 738\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰归因于半纤维素中非共轭C=O的伸缩振动;位于 $1\ 460\ \text{cm}^{-1}$ 附近的亚甲基内C-H的形变振动,表征木质素与聚木糖的特征峰^[16]。

由图4可知,对照组重组竹的红外图谱在 $1\ 738\ \text{cm}^{-1}$ 处表现出明显的半纤维素的特征峰,而老化样的图谱仅有微弱的吸收震动。说明自然老化后,重组竹表面竹束内的绝大多数半纤维素发生了降解。老化样图谱中 $3\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 040\ \text{cm}^{-1}$ 处峰明显减弱,说明自然老化后竹束内的纤维素也发生了降解; $1\ 460\ \text{cm}^{-1}$ 附近表征木质素中亚甲基的吸收峰降低,由于亚甲基存在于木质素苯环的侧链上,说明木质素侧链已发生降解。此外, $2\ 923\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰强度的下降也说明木质素和多糖结构中的甲基和亚甲基发生了降解。老化样的其他吸收峰,包括 $1\ 110\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 230\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰降低,表明木质素结构单元和多糖中的化学键断裂,部分芳环降解^[17]。重组竹中的木质素在自然环境中会以多种方式发生光降解,遭受破坏后的木质素会生成水溶性产物并最终形成发色基团,如醌结构、羧基、过氧羟基等,这是重组竹表面褪色的主要原因^[18]。而纤维素和半纤维素的降解,同样也会导致重组竹的力学强度降低。

2.3 燃烧性能

重组竹对照样和老化样燃烧性能的测试结果,列于表2。

表2 重组竹老化前后的燃烧性能

Tab.2 Combustion performance of bamboo scrimber before and after aging

燃烧性能参数	对照样	老化样
点燃时间/s	35	57
总热释放量/(MJ·m ⁻²)	262.3	278.2
总烟释放量/(m ³ ·m ⁻²)	923.6	752.5
热释放速率峰值/(kW·m ⁻²)	535.7	490.6
热释放速率峰值时间/s	780	975

2.3.1 点燃时间

点燃时间 (time to ignition, TTI) 是评价和比较材料耐火性能的一个重要参数, TTI 值越大, 表明材料越难以被点燃, 其火灾危险性就越小^[19-20]。由表2可以看出, 户外放置两年后的重组竹点燃时间较对照样延长了22 s, 说明自然老化后的重组竹表面更难被点燃, 发生火灾时可以留给人们更长的逃生时间。研究表明, 材料在点燃初期, 点燃时间通常与挥发分和水分含量有关, 挥发分含量越低、水分含量越高, 物质越难被点燃^[21]。由工业分析结果可知, 老化样的挥发分含量更低, 水分含量略高于对照样, 导致其表面更难点燃。

2.3.2 热释放速率与总热释放量

热释放速率 (heat-release rate, HRR) 的最大值为热释放速率峰值 (peak of heat-release rate, pkHRR), pkHRR 表征材料燃烧过程中达到的最大释热程度。总热释放量 (total heat-release, THR) 越大, 表明材料在燃烧过程中释放的热量越大, 形成的火灾危害性就越大^[22]。图5展示了重组竹试样老化前后的热释放速度和热释放总量的变化过程。

HRR 曲线包含两个释热峰, 分别对应材料点燃瞬间出现的短暂有焰燃烧过程和出现较高火焰时的燃烧过程^[23]。与对照样相比, 老化样的第一释热峰向后发生了轻微的推移, 这主要归因于点燃时间的延长。在燃烧过程中, 材料表面先被点燃产生第一释热峰, 燃烧产生的灰分会覆盖在材料表面, 阻碍氧气与材料内部继续发生反应, 随着反应温度的升高, 材料内部的挥发性物质会冲破表面灰层, 与氧气接触后剧烈燃烧, 产生第二释热峰。由于老化样的灰分含量较高, 导致第二释热峰的出现时间较对照样推迟了195 s。

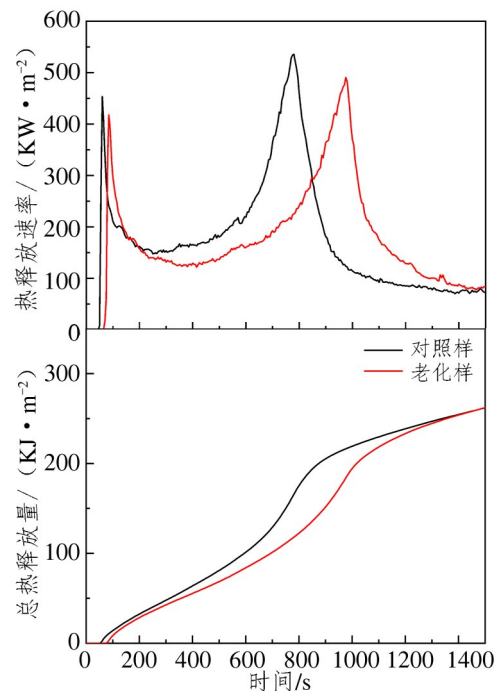


图5 重组竹老化前后的热释放曲线

Fig.5 HRR and THR curves of bamboo scrimber before and after aging

除此以外, 重组竹老化样的热释放速率峰值下降了8.41%, 这是因为部分半纤维素和纤维素在老化过程中发生了降解, 导致了挥发分含量降低^[21]。释热峰的延长意味着如果发生火灾, 自然老化后的重组竹会延长强火到来时间, 为逃生争取到宝贵的时间。老化前后样品的总热释放量基本保持一致的变化趋势, 老化样由于释热峰推移, THR 曲线在800~1 000 s的时间范围增幅略低于对照样。

2.3.3 烟生成速率与总烟释放量

烟生成速率 (smoke generation rate, SPR) 和总烟释放量 (total smoke emission, TSR) 表征材料燃烧过程中的发烟指数。在火灾发生时, 燃烧所释放的烟气不仅降低环境能见度, 增加逃生难度, 还会使人窒息甚至导致死亡^[24]。重组竹老化样和对照样燃烧过程中的 SPR 和 TSR 变化曲线如图6所示。

图6显示, 老化样与对照样的烟生成速率与热释放速率曲线的变化规律相似, 说明重组竹燃烧时的绝大部分烟气释放都集中在有焰燃烧阶段。两组试样的烟释放曲线都形成了2个典型的波峰, 但二者出现波峰的时间差别比较明显: 对照样主

要在 700~900 s 内释烟速度高, 烟释放量迅速增加; 而老化后的快速释烟阶段则集中在 900~1 100 s。由于老化样热释放峰的延迟, 烟释放峰也随之延迟。老化后的重组竹总烟释放量较对照样下降, 其中对照组的总烟释放量为 $923.6 \text{ m}^2/\text{m}^2$, 自然老化后重组竹的总烟释放量降低至 $752.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$, 下降了 18.53%。由工业分析结果可知, 老化后的重组竹挥发分含量下降, 是导致燃烧过程中烟雾释放减少的主要原因^[24]。

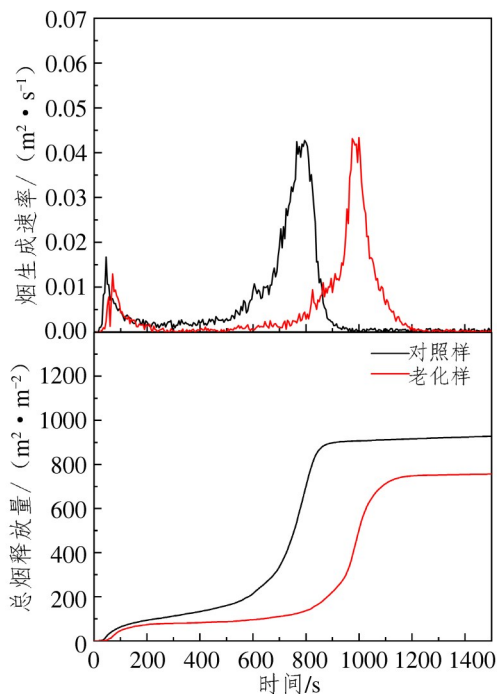


图6 重组竹老化前后的烟释放曲线

Fig.6 SPR and TSR curves of bamboo scrimber before and after aging

2.3.4 质量损失速率与残余物质量

老化前后重组竹试样燃烧过程中的质量损失速率 (mass loss rate, MLR) 和残余物质量 Mass (包括铝箔质量) 变化曲线, 如图7所示。

从图7可以看出, 两组试样的质量损失率曲线与热释放速率相近, 说明燃烧反应导致了材料的质量损失。老化后重组竹的最终残余物质量低于对照组, 燃烧前后对照样质量损失了 38.2 g, 老化后试样的质量损失了 42.7 g, 说明老化后的重组竹燃烧更加充分。

这是因为老化后重组竹的灰分含量提高, 灰分会在燃烧过程中充当催化剂的角色, 使燃烧更加充分^[26]。

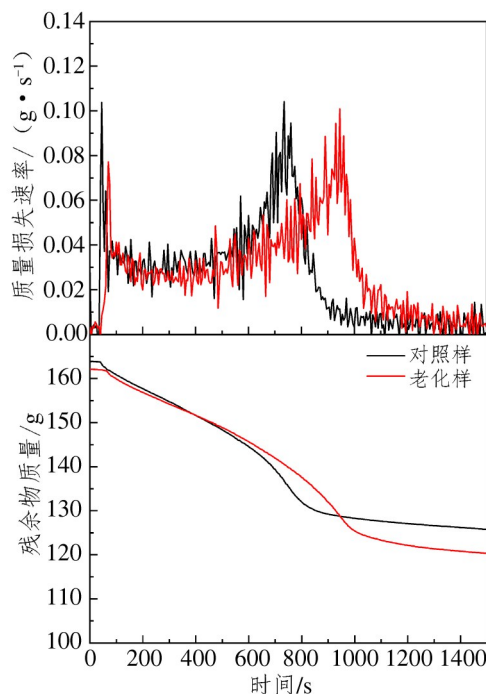


图7 重组竹老化前后的质量损失率和残余物质量曲线

Fig.7 MLR and Mass curves of bamboo scrimber before and after aging

3 结论

1) 通过对重组竹试样理化性能测试发现, 自然老化两年后重组竹的表面接触角初始为 100° , 较对照样降低了 15.25%, 润湿 10 s 后接触角下降到 30.2° , 较对照样降低了 64.88%; 老化后重组竹的吸水厚度膨胀率为 2.58%, 吸水率为 3.16%, 较对照样分别提高了 88.32% 和 35.62%, 弹性模量残余率为 79.91%, 静曲强度残余率为 75.72%。自然老化后重组竹的尺寸稳定性和抗弯性能仍能满足 GB/T 40241—2021《户外重组竹》的要求。

2) 与对照样相比, 自然老化两年后重组竹的灰分含量提高了 1.64 倍, 挥发分减少了 3.13%, 固定碳含量提高了 2.29%。

3) 利用锥形量热仪测试重组竹的燃烧性能发现: 老化后重组竹的点燃时间延迟, 热释放速率峰值降低, 总释热量基本不变, 烟释放时间延迟, 释放总量降低, 燃烧更加充分。自然老化两年后重组竹阻燃性能并未发生明显降低, 且点燃时间、烟和热量释放时间的延迟, 发生火灾时可以留给人们更长的逃生时间。

参考文献:

- [1] 秦莉, 于文吉. 重组竹研究现状与展望[J]. 世界林业研究, 2009, 22(6): 55-59.
QIN L, YU W J. Status and prospects of reconstituted bamboo lumber[J]. World Forestry Research, 2009, 22(6): 55-59.
- [2] 李琴, 汪奎宏. 重组竹产业化发展可行性分析[J]. 木材工业, 2007, 21(1): 33-35.
LI Q, WANG K H. Analysis on feasibility of industrialization for reconstituted bamboo timber[J]. China Wood Industry, 2007, 21(1): 33-35.
- [3] 魏洋, 张齐生, 蒋身学, 等. 现代竹质工程材料的基本性能及其在建筑结构中的应用前景[J]. 建筑技术, 2011, 42(5): 390-393.
WEI Y, ZHANG Q S, JIANG S X, et al. Basic properties and prospects of modern bamboo engineering materials applied in building structures[J]. Architecture Technology, 2011, 42(5): 390-393.
- [4] 周吓星, 陈礼辉. 抗老化剂改善竹粉/聚丙烯发泡复合材料的自然老化性能[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 301-307.
ZHOU X X, CHEN L H. Anti-aging agents improving natural weathering properties of bamboo powder/polypropylene foamed composites[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 301-307.
- [5] 张亚慧, 由佳, 杨婵, 等. 户外用重组木加速老化耐久性性能的评价[J]. 木材工业, 2018, 32(1): 33-35.
ZHANG Y H, YOU J, YANG C, et al. Durability of wood scrimber for outdoor use by accelerated aging tests[J]. China Wood Industry, 2018, 32(1): 33-35.
- [6] 于子绚, 江泽慧, 王戈, 等. 湿热耦合环境下竹束单板层积材的力学性能[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 127-130.
YU Z X, JIANG Z H, WANG G, et al. Mechanical properties of laminated bamboo scrimber in hygrothermal environment[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(8): 127-130.
- [7] 胡玉安, 何梅, 黄慧, 等. 竹基纤维复合材料染色材耐候性能研究[J]. 南方林业科学, 2015, 43(4): 54-57.
HU Y A, HE M, HUANG H, et al. Studies on aging performance of bamboo-based fiber composites from *Phyllostachys pubescens*[J]. South China Forestry Science, 2015, 43(4): 54-57.
- [8] 张亚慧, 祝荣先, 于文吉, 等. 户外用竹基纤维复合材料加速老化耐久性评价[J]. 木材工业, 2012, 26(5): 6-8.
ZHANG Y H, ZHU R X, YU W J, et al. Performance of exterior crushed bamboo-mat composite after accelerated aging test[J]. China Wood Industry, 2012, 26(5): 6-8.
- [9] 靳肖贝, 张禄晟, 李瑜瑶, 等. 3种阻燃剂对重组竹燃烧性能和物理力学性能的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 214-218.
JIN X B, ZHANG L S, LI Y Y, et al. Effects of three flame retardants on combustion, physical and mechanical properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 214-218.
- [10] 邸明伟, 尤来, 赵婷玉, 等. 聚乙烯木塑复合材料的异氰酸酯表面处理与胶接[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 94-99.
DI M W, YOU L, ZHAO T Y, et al. Surface coating treatment with isocyanate and bonding for wood/polyethylene composites[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 94-99.
- [11] 高巧春, 赵剑英, 蔡红珍. 相容剂对木塑复合材料润湿性及力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2011, 39(9): 95-98.
GAO Q C, ZHAO J Y, CAI H Z. Effect of compatibilizer on wettability and mechanical properties of wood-plastic composites[J]. Plastics Science and Technology, 2011, 39(9): 95-98.
- [12] 秦莉. 热处理对重组竹材物理力学及耐久性能影响的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [13] 王志勇, 肖生苓, 杨丽丽. 木质剩余物轨枕复合材料老化性能[J]. 东北林业大学学报, 2009, 8, 44-45.
WANG Z Y, XIAO S L, YANG L L. Aging properties of wood residues from sleeper composites[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 8, 44-45.
- [14] Kránitz K, Sonderegger W, Bues C T, et al. Effects of aging on wood: a literature review[J]. Wood Science and Technology, 2016, 50(1), 7-22.
- [15] Pandey K K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 71(12): 1969-1975.
- [16] Özgenç Ö, Durmaz S, Boyacı I H, et al. Determination of chemical changes in heat-treated wood using ATR-FTIR and FT Raman spectrometry[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2017, 171: 395-400.
- [17] LI N, RAO F, HE L L, et al. Evaluation of biochar properties exposing to solar radiation: a promotion on surface activities[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, DOI:10.1016/j.cej.2019.123353.
- [18] 池玉杰. 6种白腐菌腐朽后的山杨木材和木质素官能团变化的红外光谱分析[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 136-140.
CHI Y J. FTIR Analysis on function groups of david poplar wood and lignin degraded by 6 species of wood white-rot fungi[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 136-140.
- [19] 张丽娟. 常用装饰装修板材的燃烧性能的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [20] 李德, 黄冬梅, 何理辉, 等. 贴面工艺对合成板材燃烧性能的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 23-28.
LI D, HUANG D M, HE L H, et al. Influence of veneering technology on combustion performance of synthetic board[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12): 23-28.
- [21] XIANG H, YANG J, FENG Z, et al. Investigation of the cofiring process of raw or torrefied bamboo and masson pine by using a cone calorimeter[J]. ACS Omega, 2019, 4(21), 19246-19254.
- [22] Gałaj J, Karpovič Z, Jaskółowski W. Investigation into the influence of impregnation on pine timber combustion using a cone calorimeter and large scale tests[J]. Engineering Structures and Technologies, 2011, 3(3): 91-104.
- [23] 李江晓, 武轲, 陈广辉, 等. 单板与铝箔复合多层板的燃烧性能研究[J]. 木材工业, 2019, 33(1): 12-16.
LI J X, WU K, CHEN G H, et al. Combustion performance of laminated composite panels made from poplar veneers and aluminum foils[J]. China Wood Industry, 2019, 33(1): 12-16.
- [24] 杨庆云, 颜东升. 金属面EPS夹芯板燃烧性能及防火对策研究[J]. 科技信息, 2010, 2(23): 453-455.
YANG Q Y, YAN D S. Study on the combustion performance and fire prevention countermeasures of EPS sandwich board[J]. Science & Technology Information, 2010, 2(23): 453-455.
- [25] LIU Z J, FEI B H, JIANG Z H, et al. Combustion characteristics of bamboo-biochars[J]. Bioresource Technology, 2014, 167, 94-99.
- [26] ZHANG R, LEI K, YE B Q, et al. Effects of alkali and alkaline earth metal species on the combustion characteristics of single particles from pine sawdust and bituminous coal[J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 278-285.

(本文编校 孟凡丹)