

炭化处理对竹刨花板理化性能的影响

摘要: 竹刨花板已被广泛应用于家具制造、室内设计及建筑工程等领域, 但是其普遍存在着尺寸稳定性和阻燃抑烟性能差、内结合强度低等问题。本研究将炭化处理技术应用在竹刨花板的制备上, 探究深炭处理和浅炭处理对竹刨花的结构特性以及竹刨花板相关理化性能的影响。结果表明, 两种炭化处理都会引起半纤维素、纤维素不同程度的水解及木质素的降解与缩合重组。较未处理的竹刨花, 经深炭处理过的竹材纤维素的结晶度提高了 29.3%。随着炭化温度的升高, 竹刨花板的静曲强度及握钉力减小, 弹性模量先减小后增大, 尺寸稳定性和内结合强度显著改善。深炭竹刨花板的 24h 吸水厚度膨胀率仅为 2.2%, 内结合强度达到了 1.6MPa, 这已远超过普通刨花板的水平。同时, 竹刨花板的阻燃抑烟性能随着热处理温度的升高而增强, 随着炭化温度的升高, 热释放速率曲线整体下移。炭化竹刨花板的热释放总量也明显低于本色竹刨花板。炭化处理可使竹刨花板的烟释放速率和烟生成总量明显降低。炭化竹刨花板的一氧化碳释放速率和二氧化碳释放速率曲线整体低于本色竹刨花板。甲醛释放量测定结果表明, 本色、浅炭和深炭竹刨花板的甲醛释放量均低于国家标准中对于可直接用于室内的刨花板的限量值。但随着炭化程度的加深, 竹刨花板的甲醛释放量增加。

关键词: 炭化处理; 竹刨花板; 理化性能; 机理

1 引言

竹子生长速度快, 产量高, 可再生, 是一种除木材以外的重要的木质-纤维素资源^[1]。尤其是在中国, 木质资源短缺, 但是竹资源丰富且蓄积量居世界第一^[2-3]。作为竹基人造板的一种, 竹刨花板因强度高、质地均匀和较高的材料利用率而被广泛应用于家具制造、室内设计和建筑工程等领域。尽管如此, 它较差的尺寸稳定性, 较低的内结合强度, 较差的阻燃抑烟和防腐防霉性能等, 致使它的大规模商业应用受到了限制。为了提高它的性能, 通常用防水剂、阻燃剂、防腐剂等化学制剂对竹刨花板进行处理。但是, 这些化学添加剂不仅易流失、成本高, 而且对人体健康和环境有害。因此, 研究一种简单有效且无添加剂的处理方式以提高竹刨花板的性能是非常有必要的。炭化处理是一种在 160 °C 以上的低氧环境下对材料进行处理的改性技术^[4], 已获得较为广泛的产业化应用。尽管炭化处理导致材料的力学性能出现一定程度的下降, 但经其改性后, 材料具有环境友好、防腐高效、尺寸稳定和耐候性强等显著优点^[5]。因此, 炭化处理已被广泛应用于大量生物质材料的改性当中。为了研究热处理对木材润湿性的影响, Mohammed Hakkou 等人测定了在惰性气体下轻度热解的山毛榉的接触角, 结果表明, 炭化处理后木材的疏水性显著提高^[6]。Dali Cheng 等人研究了炭化后的竹材的防霉性能, 结果表明炭化处理在一定程度上抑制了霉菌的生长^[7]。此外, Kai Yang 等人研究了炭化处理对重组竹阻燃抑烟性能的影响, 结果表明, 炭化处理对重组竹具有明显的阻燃抑烟作用^[8]。然而, 炭化处理在竹刨花板上的应用尚未得到报道。

本文, 采用经过不同温度炭化处理过的竹刨花(浅炭: 180 °C, 深炭: 220 °C)制备竹刨花板, 探究炭化处理对竹刨花板尺寸稳定性、力学性能、阻燃抑烟等相关理化性能的影响及机理。其结果将有助于建立炭化处理改性竹刨花板的基础理论知识体系, 并为今后炭化处理改性竹刨花板的工业应用提供信息支持。

2 材料和方法

2.1 试验材料

本色竹刨花(竹材种类: 毛竹; 竹龄: 4-5 年; 尺寸: 长: 4-48mm, 宽: 0.15-4mm, 厚: 0.15-2.06, 长细比: 2.68-225), 浅炭竹刨花(本色竹刨花在饱和蒸汽中 180 °C 温度下炭化处理 4h), 深炭竹刨花(本色竹刨花在饱和蒸汽中 220 °C 温度下炭化处理 4h), 购自湖南桃花江竹材科技股份有限公司; 水溶性脲醛树脂胶(固含量: 51.4%, 黏度: 在 20 °C 时为 290-350mPa·s, PH: 9.53), 购自广西丰林人造板有限公司。

2.2 竹刨花板制备

制备流程如图 1 所示。首先, 将竹刨花和脲醛树脂胶均匀混合在一起, 脲醛树脂胶的固体质量为刨

花质量的 10%。然后将混合物放进烘干机里干燥至含水率达到 10% 左右。将竹刨花和胶黏剂的混合物在模具里进行手工铺装, 然后送进预压机里进行冷压初成型, 接着送进热压机里在 160℃ 的温度下热压 6min。本色竹刨花板 (OBP)、浅炭竹刨花板 (LBP) 及深炭竹刨花板 (DBP) 的密度均控制在 0.6 g/cm³, 板材尺寸大小控制在 450mm 高, 450mm 宽, 18mm 厚。

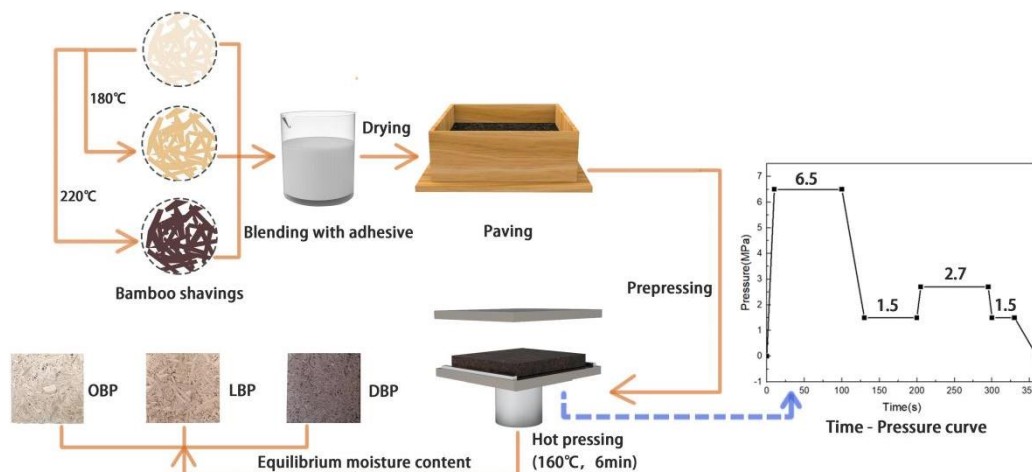


图 1 OBP、LBP 和 DBP 的制备方法

Fig.1 Preparation process of OBP、LBP and DBP

2.3 测试与表征

2.3.1 竹刨花的结构特性

利用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR, ALPHA, BRUKER) 研究了竹刨花样品的化学结构。所有的样品都被扫描并记录在 400–4000cm⁻¹ 的波数范围内, 分辨率为 4cm⁻¹。

采用 x 射线衍射仪 (XRD, XD-2, 北京浦西), 配备 Cu K α 辐射源 ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$), 以 36kV 和 20mA 运行研究竹刨花样品的晶体结构。扫描范围为 $5 \leq 2\theta \leq 45$, 扫描速度为 $4^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.3.2 竹刨花的耐热性能

采用同步热分析系统 (STA449F3, 德国 Netzsch) 对竹刨花进行热重分析 (TGA) 测试。试验温度范围为室温至 500℃, 加热速率为 10℃/min, 氮气流量为 30mL/min, 注入体积约为 5mg。

2.3.3 竹刨花板的剖面密度分布 (VDP)

采用 X 射线剖面密度测试仪测试竹刨花板的密度分布, 测试步长为 20 μm 。本研究剖面密度特征参数主要有峰值密度 (peak density, PD)、芯层密度 (core density, CD)、表芯密度比。PD 是指在剖面密度曲线对称的两表面峰值密度的平均值; 芯层是位于板厚度 35% 以内的中心区域, CD 是芯层中最低密度; 表芯密度比为 PD 与 CD 比值^[9]。

2.3.4 竹刨花板的尺寸稳定性

根据国标 GB/T 17657—2013^[10] 检测竹刨花板的 24h 吸水厚度膨胀率 (24h TS)。样品被放在温度为 (20±1)℃, PH 为 (7±1) 的水槽内, 测量其浸水 24h 前后的厚度变化。24h TS 计算如下式:

$$T(\%) = \frac{t_2 - t_1}{t_1}$$

t_1 指的是浸水前的样品厚度, t_2 指的是浸水后的样品厚度。

采用 LSA-100 型接触角分析仪 (德国, LAUDA Scientific GmbH) 对样品表面的疏水性进行测试。滴水量为 5 μL , 当水滴与试件接触 5s 后读数, 在同一样品表面不同位置测量 3 次, 取其平均值为接触角 (CA) 终值。

2.3.5 竹刨花板的力学性能

用三点弯曲法测竹刨花板样品的静曲强度 (MOR) 和弹性模量 (MOE), 两个支承辊之间的距离设为 370mm。同时检测了竹刨花板的内结合强度 (IB) 和握钉力, 板面握钉力记为 F_1 , 板边握钉力记为 F_2 。上述测试是根据国标 (GB/T 17657—2013)^[10] 中的要求, 采用万能力学试验机 (DSC-R-100, Japan Shima dazuo) 完成的。

2.3.6 竹刨花板的燃烧性能

采用锥形量热仪 (FTT0007, 英国燃烧试验技术公司), 根据标准 (ISO5660-1)^[11] 对竹刨花板的燃烧性能进行了测量。

2.3.7 甲醛释放量

根据标准 GB/T 17657-2013, 采用穿孔-萃取法对 OBP、LBP 及 DBP 的甲醛释放量进行测定。

3 结果和讨论

3.1 竹刨花的结构特性

3.1.1 傅里叶变换红外光谱 (FTIR)

FTIR 光谱检测是一种分析生物质材料官能团变化的有效方法^[12]。本色竹刨花、浅炭竹刨花及深炭竹刨花的 FTIR 光谱图如图 2 所示。竹刨花在 3437cm^{-1} 处的峰值指的是羟基 ($-\text{OH}$) 的伸缩振动; $3000-2750\text{cm}^{-1}$ 区域为亚甲基 ($-\text{CH}_2-$) 的伸缩振动吸收; $1800-1580\text{cm}^{-1}$ 区域主要是指纤维素和半纤维素中所含的酮、醛、羧酸以及酯的羰基 ($-\text{C}=\text{O}$) 伸缩振动吸收区; 1600cm^{-1} 处的峰值为苯骨架振动吸收^[13]; 1163cm^{-1} 处的峰值指的是吡喃环内醚 ($-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$) 的振动吸收^[14]。从图 2 中可以看出三种样品的光谱都具有竹材的普遍特征, 但是在特征峰的强度上出现了差异。随着炭化处理程度的加深, 3437cm^{-1} 处峰的强度明显降低, 即其所代表的羟基含量显著降低。这主要是由于竹刨花在炭化处理过程中自由羟基发生了脱水合成反应^[15, 16]。相关的方程如 Eq. 1 所示。此外, 与本色竹刨花和浅炭竹刨花相比, 深炭竹刨花半纤维素中木聚糖乙酰基的特征峰 (如 1736cm^{-1} 处的非共轭 $\text{C}=\text{O}$ 拉伸振动吸收峰) 明显减弱。这表明, 在高温炭化处理时, 半纤维素在很大程度上被水解。相关的方程如 Eq. 2 所示。由 FTIR 图谱可知, 木质素的特征峰 (如 1600cm^{-1} 处苯骨架振动) 随着炭化温度的提高, 其强度稍有增强。炭化温度较低时, 木质素以醚键和脂肪族断裂的降解反应为主。但随着炭化温度的升高, 由半纤维素降解生成的各种醛类物质与木质素的降解产物发生交联反应, 使其缩合重组, 从而导致木质素特征峰的强度变强^[17, 18]。随着炭化温度的增强, 纤维素的特征峰 (如 1163cm^{-1} 处的吡喃环内醚不对称伸缩振动) 的强度逐渐减弱, 这表明纤维素的热解反应逐渐活跃^[19]。其中, 半纤维素中乙酰基降解产生的乙酸对纤维素的稳定性有一定的影响, 可导致非结晶区纤维素的不完全酸水解^[20]。在 $800-500\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰存在差异, 这可能是由于竹刨花中抽提物含量的变化引起的。

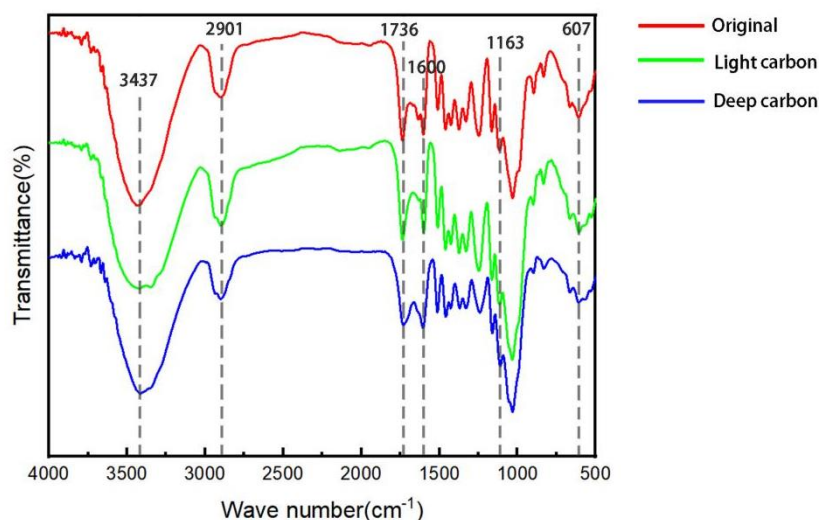


图2 本色竹刨花、深炭竹刨花和浅炭竹刨花的 FTIR 图谱

Fig.2 FTIR spectra of original bamboo shavings, light carbon bamboo shavings and deep carbon bamboo shavings



3.1.2 X-射线衍射 (XRD)

采用 XRD 研究了竹刨花在炭化处理前后的相对结晶度。竹材纤维素的相对结晶度是指纤维素的结晶区域占纤维素整体区域的百分比^[13]。竹材纤维素的结晶度和竹刨花板的 MOR、MOE 等性能密切相关, 同时也会对吸水性和尺寸稳定性产生一定程度的影响。本色竹刨花、浅炭竹刨花及深炭竹刨花的 XRD 图谱如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 相较于本色竹刨花, 深炭竹刨花的 002 晶体衍射峰的强度明显增加。采用 Segal 公式计算竹刨花中纤维素的相对结晶度 (CrI)^[21], 结果如下: 38.94% (本色竹刨花), 42.73% (浅炭竹刨花), 50.36% (深炭竹刨花)。相比于本色竹刨花, 深炭竹刨花的相对结晶度提高了 29.3%, 这主要是由于竹刨花纤维素的准晶状无定形区的羟基在热处理的过程中发生了缩聚反应。这个过程使得准结晶区中的微纤丝排列更加有序, 从而更加靠近结晶区 (Eq. 1)。上述结论与 FTIR 所获得的结果一致。

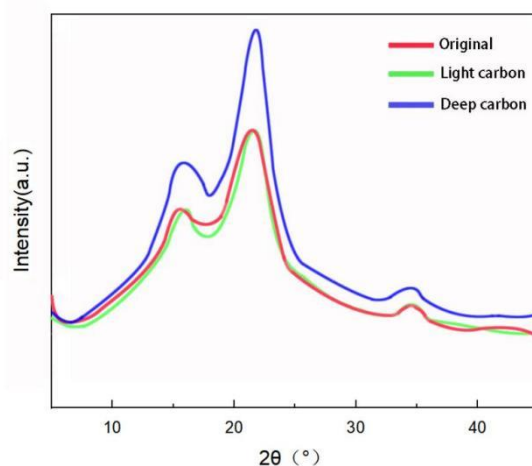


图 3 本色竹刨花、浅炭竹刨花和深炭竹刨花的XRD图谱

Fig.3. XRD patterns of original bamboo shavings, light carbon bamboo shavings and deep carbon bamboo shavings

3.1.3 耐热性能

竹刨花在炭化处理前后成分的变化及其热稳定性可以通过 TGA 来探究。本色竹刨花、浅炭竹刨花和深炭竹刨花的 TG-DTG 曲线如图 4 所示。TG-DTG 曲线大致可以分为三个阶段: 常温至 170℃、170℃至 370℃、370 至 750℃。从常温到 170℃这一阶段的失重主要是由于竹刨花中吸附水的蒸发引起的。170℃至 370℃, 竹刨花的 TGA 曲线急剧下降 (曲线开始出现下降的位置所对应的温度为热降解起始温度— T_0)。在这个温度范围内, 样品中各种大分子链发生解聚、脱水和分解, 最终形成炭化残余物。在这个阶段, 在 DTG 的曲线上会出现一个峰, 该峰为最大失重速率。当温度高于 370℃时, 炭化残余物将会氧化成低分子量的气体产物, 残余部分芳环化并逐步形成石墨结构^[13]。

从样品的 TG-DTG 曲线可以看出, 深炭竹刨花的 T_0 要明显高于本色和浅炭竹刨花。这表明, 深炭竹刨花更难开始热解。正如 TG 曲线所示, 随着炭化温度的升高, 因样品转化为炭化残余物所致使的质量损失逐渐降低 (本色: 66%, 浅炭: 62%, 深炭: 53%)。另外, 炭化处理也明显减小了竹刨花的最大失重速率。上述结果表明, 炭化处理能够在一定程度上提高竹刨花的耐热性能。这主要是因为炭化处理的过程中, 竹刨花中的半纤维素、木质素等热稳定性较差的成分已经被部分去除。并且炭化温度越高, 它们

的含量越少。另一方面,随着炭化温度的升高,纤维素的结晶度相对增加,这在一定程度上也提高了竹刨花的热稳定性。这与 FTIR 和 XRD 的结果相一致。

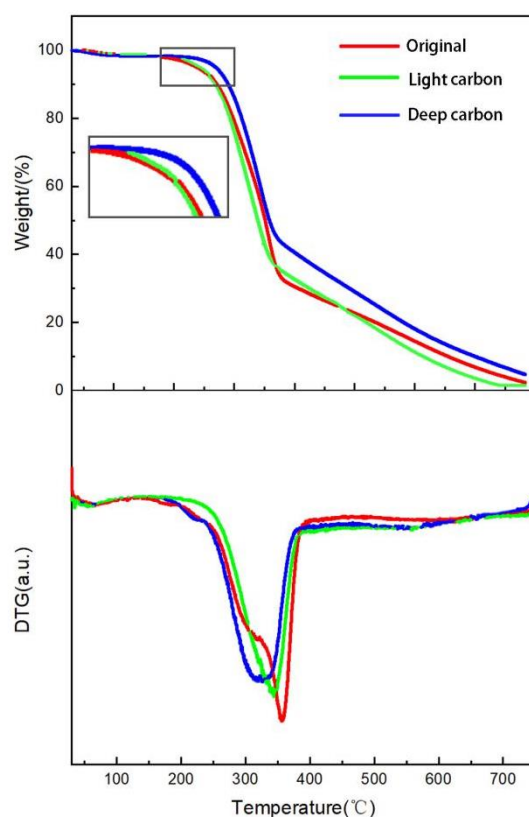


图4 本色竹刨花、浅炭竹刨花和深炭竹刨花的TG-DTG曲线

Fig.4 The TG-DTG curve of original bamboo shavings, light carbon bamboo shavings and deep carbon bamboo shavings

3.2 竹刨花板的剖面密度分布 (VDP)

VDP 是指人造板在厚度方向上的密度变化,通常沿厚度中心线成几何对称,表层密度高,芯层密度低^[22]。剖面密度分布会在一定程度上影响板材的静曲强度、弹性模量、内结合强度及吸水厚度膨胀率等相关性能^[23]。三种不同炭化程度的竹刨花板的剖面密度分布曲线如图 5 所示。由图可知,三种刨花板的剖面密度分布趋势大致相同,只是 PD、CD 值及表芯密度比存在差异。经计算,三种板材的表芯密度比分别为 1.66 (OBP)、1.59 (LBP) 和 1.64 (DBP),呈现出来先减小后增大的趋势。可见,一定温度内的炭化处理有助于改善板材厚度方向的密度均匀性。造成上述结果的原因,一方面是在炭化处理的过程中,纤维素结晶度的增加使竹刨花的脆性变大,从而有利于竹刨花在热压的过程中更易压溃以至紧密接触,有利于水分和热量的传导^[26],使得芯层温度升高的滞后性变小。另一方面,竹刨花炭化部分的热传导率仅为其自身的 1/3-2/3^[17],从而延缓了板坯内部的热量传导,进而使得表芯层的温差增大。

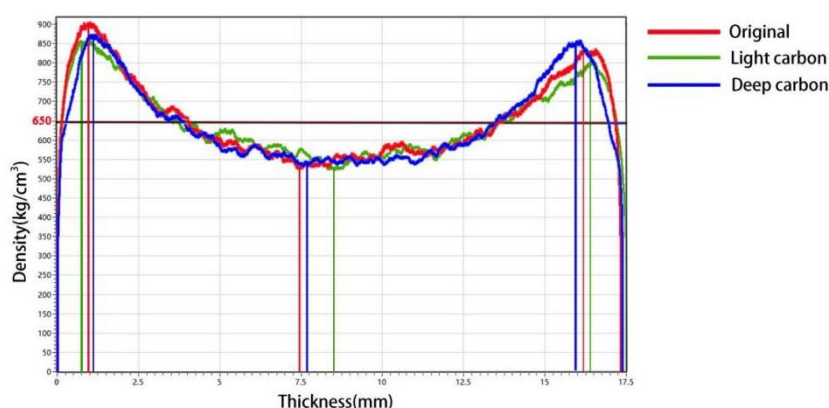


图 5 OBP、LBP 和 DBP 的剖面密度分布曲线图

Fig.5 The vertical density profile curve of OBP、LBP and DBP

3.3 竹刨花板的尺寸稳定性

一般来说,炭化处理能够提高生物质基材料的尺寸稳定性^[10]。24h 吸水厚度膨胀率(24h TS)是评价生物质基板材尺寸稳定性的一项重要指标。OBP、LBP 及 DBP 的 24h TS 如图 6 所示。相比于 OBP (6.7%),LBP (4.7%)和 DBP (2.2%)的 24h TS 有着明显的降低。同时,我们通过观察 OBP、LBP 和 DBP 与水的 CA 来分析两者在疏水性上的差异。经检测三种竹刨花板的 CA 分别为:35.1° (OBP),40.4° (LBP),66.3° (DBP),这表明对竹刨花进行炭化处理使竹刨花板的疏水性能有所改善,尺寸稳定性有了显著提高。在其它的研究中也找到了相似的结论^[28-30]。

根据 FTIR 图谱,由于炭化处理过程中游离羟基的脱水合成和半纤维素的降解,竹刨花的羟基含量大大降低。羟基是一种极性基团并具有亲水性。因此,羟基含量的减少将会导致竹刨花板吸水能力降低。此外,XRD 图谱显示炭化处理将会增加竹刨花的结晶度,以致竹刨花的内部结构更加紧密,竹刨花板的疏水性也将会增强。

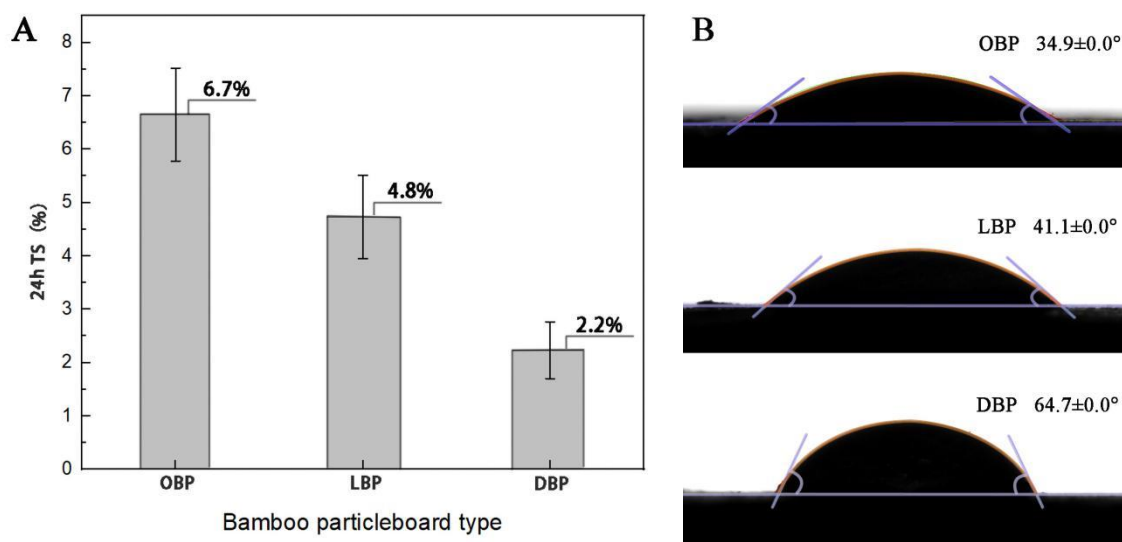


图 6 A.OBP、LBP 和 DBP 的 24h TS B.OBP、LBP 和 DBP 的 CA

Fig.6 A. The 24h TS of OBP, LBP and DBP; B. The CA of OBP, LBP and DBP

3.4 竹刨花板的力学性能

OBP、LBP、DBP 的力学性能如图 7-8 所示。由图可知,竹刨花板的静曲强度(MOR)随着炭化温度的升

高而减小。相比于 OBP, LBP 的 MOR 减小了 5.3%, 而 DBP 则减小了 16%。竹刨花板的握钉力也随着热压温度的升高而明显减小。相比于 OBP, LBP 的弹性模量 (MOE) 明显减小, 从 2620MPa 减小到 2070MPa, 减小了 21%。力学性能的损失主要是由于炭化处理的过程中竹刨花大量成分的损失, 这使得其内部结构变得松散。此外, 相比于本色竹刨花, 深炭竹刨花的结晶度提高了 23.4%。一般来说, 相对结晶度的增加会减小材料的抗冲击强度并增大其脆性。由三种刨花板的断面 (图 9) 也可以看出, 热处理温度越高, 刨花板的断面就越平整, 表明材质更脆。然而, DBP 的 MOE 却达到了 2990MPa, 比 OBP 高 14%, 比 LBP 高 44%。这可能是因为深炭竹刨花结构最为松散且脆性最大, 在热压的过程中更容易被压溃, 与胶黏剂接触面积较大, 使得刨花板内部“空穴”较少, 从而刚度较大。且刨花板的 MOE 也会随竹材结晶度的增大而增大。此外, 研究表明, 板材的 MOE 会随着表芯层密度差的增大而提高^[27], MOE 的测试结果与上述板材表芯层密度差的变化趋势一致。

检测结果表明, 随着炭化温度的增加, 竹刨花板的内结合强度 (IB) 显著增加。相比于 OBP (0.6MPa), LBP 的 IB 增加了 30%(0.78MPa), DBP 则增加了 167%(1.6MPa)。这可以从以下两方面解释。炭化处理导致竹刨花细胞壁上的半纤维素等成分被降解, 使得细胞壁发生了一系列的开裂破坏, 同时细胞壁上的纹孔变大, 从而有利于脲醛树脂胶黏剂浸渍和渗透进入木材的微观结构中^[31]。此外, 炭化后的竹刨花更容易被压溃, 板坯内部空隙较小, 刨花与胶黏剂的接触面积变大。

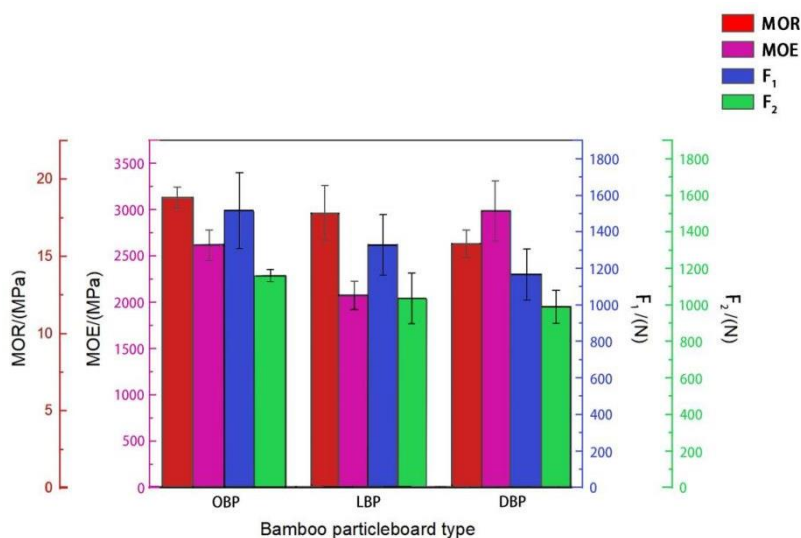


图 7 OBP、LBP 和 DBP 的 MPR、MOE 和握钉力

Fig.7 The MOR、MOE and screw holding capability of OBP、LBP and DBP

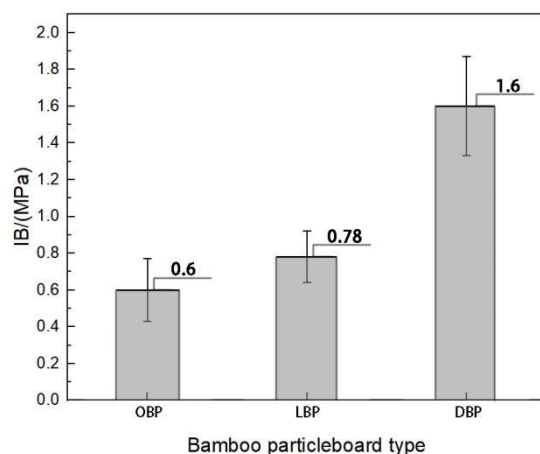


图 8 OBP、LBP 和 DBP 的内结合强度

Fig.8 The Internal bonding strength of OBP、LBP and DBP



图 9 a.OBP、b.LBP 和 c.DBP 的断面图

Fig.9 The sections of a. OBP、b. LBP and c.DBP

3.5 竹刨花板的阻燃抑烟性能

采用锥形量热仪对 OBP、LBP 及 DBP 的阻燃抑烟性能进行了研究。由图 10 可知, 随着时间的推移, 三种竹刨花板的热释放速率 (HRR) 均有两个放热峰, 分别对应着竹材的有焰燃烧和竹炭的燃烧^[32]。OBP、LBP、DBP 在 800s 左右分别达到第二个峰值 $218 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $182 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $140 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。随着炭化温度的升高, HRR 曲线整体下移。LBP、DBP 的热释放总量 (THR) 也明显低于 OBP。这表明, 对竹刨花进行炭化处理, 可以有效地减少竹刨花板燃烧热总量的释放, 起到了良好的阻燃作用。由图 11 (c) 可知, 三种竹刨花板的烟生成速率 (SPR) 曲线趋势大致相同。但相较于 OBP, LBP 和 DBP 所达到的两个峰值均较低, 说明两者的烟释放速率较小。OBP 在 825s 达到峰值 $0.012 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 而 DBP 在 920s 达到峰值 $0.0065 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 峰值降低了 45.8%, 时间推迟了 95s。同时, 由图 11 (d) 可知, LBP、DBP 的烟生成总量 (TSR) 也明显低于 OBP。上述结果表明, 炭化处理可显著降低竹刨花板的 SPR 和 TSR, 改善其烟释放情况。CO 和 CO₂ 是竹刨花板燃烧过程中释放的主要有毒气体。由图 11 (e) (f) 可知, LBP 和 DBP 的一氧化碳释放速率 (COP) 和二氧化碳释放速率 (CO₂P) 曲线整体低于 OBP。上述实验结果显示, 炭化处理使竹刨花板的阻燃抑烟性能显著增强, 这可以从以下方面进行解释。一方面, 竹刨花的炭化部分结构致密, 其热传导率较竹刨花本身较低, 进而延缓或阻碍了竹刨花板热量的传导。另一方面, 热处理导致竹刨花材质变脆, 部分导管和筛管细胞壁较薄, 在热压成板的过程中, 竹刨花细胞壁更容易被压溃, 细胞腔变小, 板材密实度增加, 孔隙率降低, 氧气通道堵塞, 竹刨花板燃烧性能因缺氧而下降。

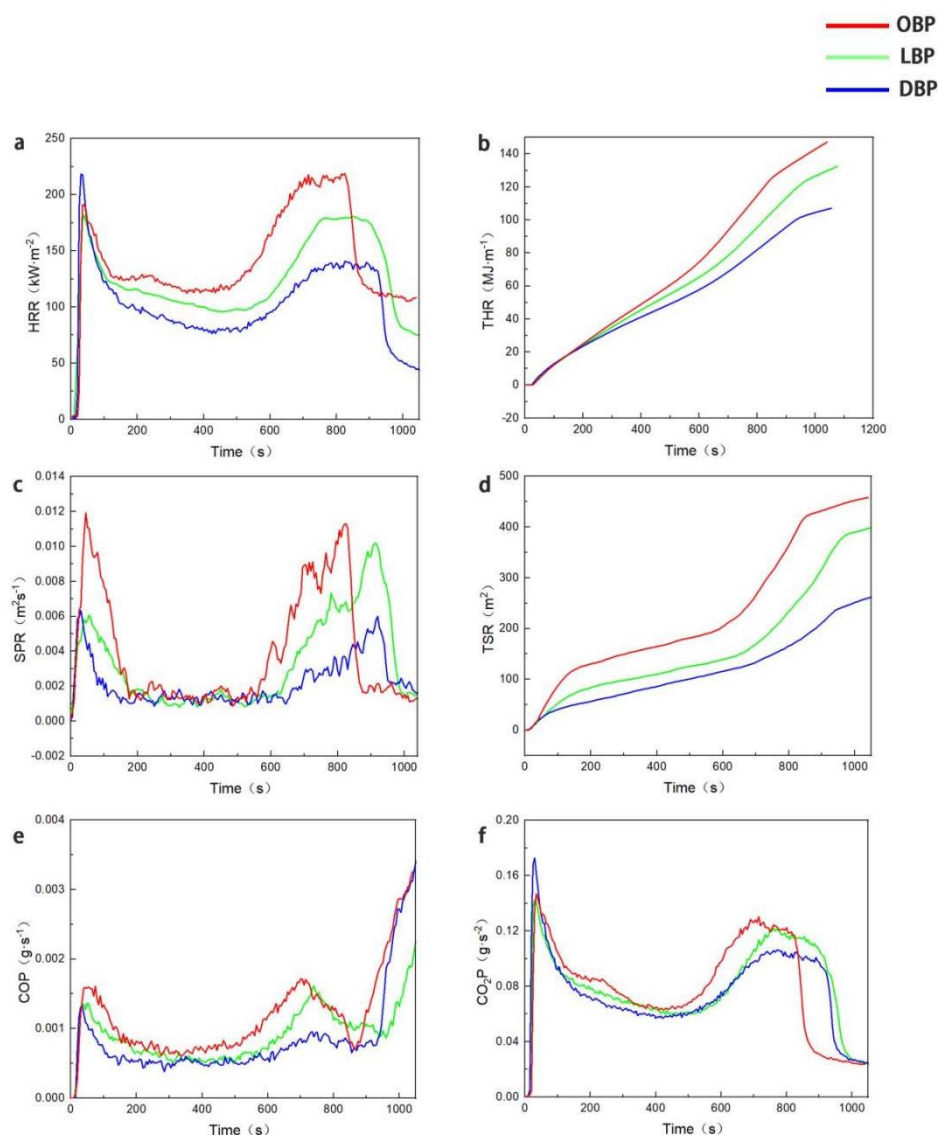


图 11 OBP、LBP 和 DBP 的 a. HRR、b. THR、c. SPR、d. TSR、e. COP、f. CO₂P 曲线图

Fig.11 The a. HRR、b. THR、c. SPR、d. TSR、e. COP、f. CO₂P curves of OBP、LBP and DBP

3.6 竹刨花板的甲醛释放性能

甲醛释放量测定结果表明, OBP、LBP 和 DBP 的甲醛释放量分别为 1.9 mg/100g, 2.8 mg/100g 和 5.0 mg/100g, 均低于标准 (GB/T 18580-2001) 上对于可直接用于室内的刨花板的限量值 (9 mg/100g)。但随着炭化程度的加深, 竹刨花板的甲醛释放量增加。这主要可以从两个方面来解释。一方面, 如 FTIR 结果所示, 炭化处理会导致竹刨花中木质素含量的增加和多糖的降解。木质素中的甲氧基键断裂会释放出甲醛, 因此其具有甲醛释放的潜力[3]。研究表明, 半纤维素等多糖的热分解过程会释放出甲醛[4]。此外, 脲醛树脂在热压过程中固化时, 其中的一部分游离甲醛逸出, 一部分将残留在竹刨花空隙中[5]。而炭化处理不仅会使刨花细胞壁产生开裂, 还会使其纹孔孔径变大, 从而增大了竹刨花中甲醛的残留量。

4 结论

(1) 炭化处理对竹刨花的化学成分产生了影响, 使得半纤维素、纤维素均有不同程度的水解, 木质素的降解产物发生了缩合重组反应。纤维素的结晶度随着炭化温度的升高而增大。

(2) TG-DTG 曲线表明,炭化处理在一定程度上提高了竹刨花的热稳定性。

(3) 竹刨花板的表芯密度比随着炭化温度的升高呈现先减小后增大的趋势。

(4) 炭化处理能够显著提高竹刨花板的尺寸稳定性和内结合强度。DBP 的 24h TS 仅有 2.2%, IB 达到了 1.6MPa。相比于 OBP, 24h TS 降低了 67.2%, IB 则提高了 167%。这远远超过了国标^[33]和市面上普通刨花板的水平。但是竹刨花板的 MOR 和握钉力随着炭化温度的增大而减小, MOE 则出现了先减小后增大的趋势。

(5) 竹刨花经炭化处理后,竹刨花板的 HRR、THR、SPR、TSR、COP、CO₂P 等指标均明显下降,阻燃抑烟性能得到增强,但是甲醛释放量增加。