

竹地板燃烧特性的锥形量热仪分析^①

黄志伟^{1,2}, 关明杰^{1,2}

1. 南京林业大学 材料科学与工程学院, 南京 210037; 2. 国家林业局竹材工程技术研究中心, 南京 210037

摘要: 以锥形量热仪为研究手段, 对侧拼竹地板、胶合竹地板和重竹地板的燃烧特性进行了研究. 结果表明, 重竹地板的点燃时间最长, 相对于胶合竹地板和侧拼竹地板而言分别延长了 6 s 和 12 s; 重竹地板的热释放速率和有效燃烧热的第二峰值相对于胶合竹地板和侧拼竹地板而言分别延迟了 4 min 和 6 min; 在 15 min 前, 3 种竹地板的总热释放量大小依次为胶合竹地板、侧拼竹地板、重竹地板; 成炭率大小依次为重竹地板、胶合竹地板、侧拼竹地板; 烟比率大小依次为侧拼竹地板、胶合竹地板、重竹地板; 三者的 CO 浓度差别不大, 重竹地板的 CO₂ 曲线第二峰出现时间分别比胶合竹地板和侧拼竹地板延长了 4 min 和 6 min; 重竹地板相对于胶合竹地板和侧拼竹地板而言, 更有利于人们在火灾场中的逃生.

关键词: 侧拼竹地板; 胶合竹地板; 重竹地板; 燃烧特性; 锥形量热仪

中图分类号: S781.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)06-0187-06

竹地板是近几年才发展起来的一种新型建筑装饰材料, 以其材质细密、不易开裂、尺寸稳定性好、各向异性差异小等优点, 深得国内外消费者喜爱^[1]. 我国有着丰富的竹材资源以及较为成熟的开发技术, 因此竹地板产业具有相当大的市场潜力^[2]. 然而竹地板属于可燃材料, 一旦发生火灾, 竹地板不仅使得火势更容易在水平方向蔓延, 加大了火灾危害, 还增加了有毒烟气的释放, 因此, 其燃烧性能是火灾发生和发展的重要因素^[3]. 关于传统木地板的燃烧性能已有较多的研究^[4-6], 而竹地板由于使用时间还不长, 因此有关其燃烧性能和火灾危险的研究报道相对较少. 随着竹地板的推广, 有必要对竹地板的燃烧特性和火灾危险程度进行研究. 因此, 本文采用对比研究的方法, 使用锥形量热仪对目前使用量较大的侧拼竹地板、胶合竹地板和重竹地板的燃烧特性进行了研究.

近年来, 利用锥形量热仪来评价材料的燃烧性能的方法越来越被广泛地使用, 这是通过测定材料燃烧时所消耗的氧量来推算出试样燃烧时释放出的热量的方法, 可测出试件的参数有点燃时间、燃烧产物生成量、热释放速率、总热释放量、烟参数等, 由于锥形量热仪模拟材料的燃烧行为和实际火灾极为相似, 因此, 通过这些参数能较好地估计出材料在真实火灾中的危险程度^[7].

1 材料与方法

1.1 试验材料

侧拼竹地板, 尺寸为 900×100×17 mm; 胶合竹地板, 尺寸为 900×100×16 mm; 重竹地板, 尺寸为 900×100×16 mm. 3 种竹地板材质均为毛竹, 取自浙江安吉某竹业公司. 横截面结构示意图如图 1 所示.

① 收稿日期: 2015-11-18

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2011822); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD).

作者简介: 黄志伟(1991-), 男, 福建三明人, 硕士研究生, 主要从事竹材及竹木复合材料研究.

通信作者: 关明杰, 博士, 副教授.

1.2 试验方法

参考标准 ISO 5660-1: 2002, 将 3 种竹地板置于 23 ℃、相对湿度 50% 的恒温恒湿箱内调质直至质量恒定. 避开表面缺陷, 3 种竹地板分别截取 100×100 mm 的试件各 1 个用于测试. 在试验中, 为了保证热量和质量在非受热面的损失最小, 将试样用铝箔包裹其侧面和背面. 采用英国 STANTON

REDCROFT 公司生产的锥形量热仪测试 3 种竹地板试件的燃烧特性. 使用电辐射加热器, 辐射功率选为 50 kW/m², 相应温度为 780 ℃, 此时的辐射温度最接近于实际大火 的温度, 能更好地模拟出实际火灾. 燃烧试验的各种原始参数自动记录在计算机内, 然后使用 Origin 软件对所得的数据进行处理, 对比分析 3 种竹地板的燃烧特性.

2 结果与讨论

2.1 点燃时间

3 种竹地板的点燃时间(TTI)如表 1 所示, 用 T_{TTI} 表示, T_{TTI} 越长, 说明材料越不易被点燃, 安全性能就越好. 从表 1 可以看出, 重竹地板的点燃时间最长, 相对于胶合竹地板和侧拼竹地板而言分别延长了 6 s 和 12 s, 这是由于重竹地板的密度相对较大, 密度越大, 点燃时间相对越长. 就点燃时间而言, 延长了的点燃时间增加了人们在实际火灾中逃生的希望, 因为实际火灾中人们最佳逃生时机往往是火灾开始的前一段时间.

表 1 3 种竹地板的点燃时间

试样	质量/g	密度/(g·cm ⁻³)	点燃时间/s
侧拼竹地板	106	0.62	23
胶合竹地板	125	0.78	29
重竹地板	178	1.11	35

2.2 热释放速率

3 种竹地板的热释放速率曲线如图 2 所示. 热释放速率(RHR)也常被称为火强度, 用 R_{RHR} 表示, 是评判聚合物材料着火危险性的主要依据, 是材料最重要的燃烧参数之一^[8]. R_{pkRHR} (热释放速率的最大值)或 R_{RHR} 值越大, 材料越容易燃烧, 材料在火灾中的危险性就越大. 侧拼竹地板的平均 R_{RHR} 和 R_{pkRHR} 分别为 105.31 kW/m², 216.31 kW/m²; 胶合竹地板的平均 R_{RHR} 和 R_{pkRHR} 分别为 122.33 kW/m², 259.95 kW/m²; 重竹地板的平均 R_{RHR} 和 R_{pkRHR} 分别为 119.87 kW/m², 238.33 kW/m². 从图 2 中可以看出, 3 种竹地板都出现了两次波峰, 第一次波峰曲线相似程度较高, 且时间较短, 这是由于板材燃烧初期短暂的有焰燃烧所形成的. 而第一次波峰过后, 材料由于产生炭化层, 炭化层具有一定的阻燃效果, 限制了热量传递的同时, 导致热量向材料内部传递减弱, 因此 R_{RHR} 曲线在第一个峰值后出现下降^[9]. 第二次波峰出现在 10 min 之后, 且波峰维持的时间较长. 从图 2 的曲线图可知, 胶合竹地板的第二放热峰出现时间比侧拼竹地板延长了 2 min, 而重竹地板的第二放热峰出现时间分别比胶合竹地板和侧拼竹地板延长了 4 min 和 6 min. 从图 1 可以看出, 胶合竹地板在厚度方向上有多层固化了的酚醛树脂胶, 在燃烧过程中, 酚醛树脂的耐高温性能在一定程度上延缓热量由受热面向非受热面的传递, 导致胶合竹地板的阻燃性能相对侧拼竹地板要好, 所以它的第二放热峰较之于侧拼竹地板而言延长了 2 min. 重竹地板的阻燃性能相对最好, 这可能与重竹地板的密度大于另外两种地板的密度有关. 在材料相同的情况下, 密度越大, 导温系数越小, 材料内部各点温度趋于一致的能力就越弱^[10]. 在燃烧过程中, 重竹地板由受热面向非受热面传递热量相对更慢, 在一定程度上延缓了燃烧在厚度方向上的扩散. 同时, 重竹地板是将竹材完全疏解成竹束, 浸渍在酚醛树脂胶内, 干燥、组坯、热压制成, 而侧拼竹地板和胶合竹地板是

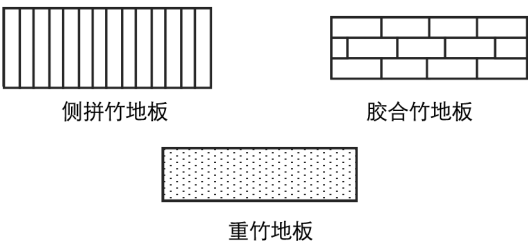


图 1 3 种竹地板结构

在竹青面或竹黄面施以酚醛树脂胶后组坯热压制成^[1], 因此渗透进入竹材细胞壁的胶粘剂不及重竹地板, 成品竹地板中的胶粘剂含量也不及重竹地板, 所以胶粘剂含量更高的重竹地板的阻燃性能相对最好. 这意味着一旦地板发生燃烧, 重竹地板使得强火到来的时间相对延长, 极大地提高了人们在火灾现场的逃生希望.

2.3 有效燃烧热

3 种竹地板的有效燃烧热曲线如图 3 所示. 有效燃烧热(EHC)所反映的是材料热解生成的可燃性挥发物在火焰中的燃烧程度, 用 E_{EHC} 表示. 从图 3 中可以看出, 在第二个峰出现之前, 三者的 E_{EHC} 曲线重合程度较高, 或许是由于 3 种竹地板的原材料都是毛竹, 因此其材料本身受热后所挥发出的物质也大致一样, 导致燃烧过程的有效燃烧热也基本一样. 在第二放热峰之后, 三者的曲线波动较大, 其原因是竹地板在燃烧时发生一定程度的开裂, 造成瞬间质量损失相对过大或瞬间热释放相对过大. 重竹地板的第二放热峰出现时间分别比胶合竹地板和侧拼竹地板延长了 4 min 和 6 min, 意味着一旦地板燃烧, 强火到来的时间相对延长, 这有利于火灾场中的人员进行扑救或者逃离火灾现场.

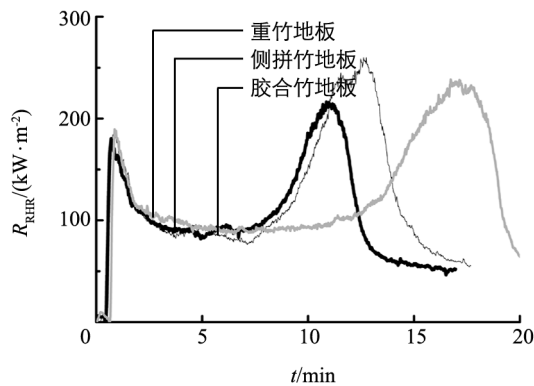


图 2 3 种竹地板的 R_{RHR} 曲线

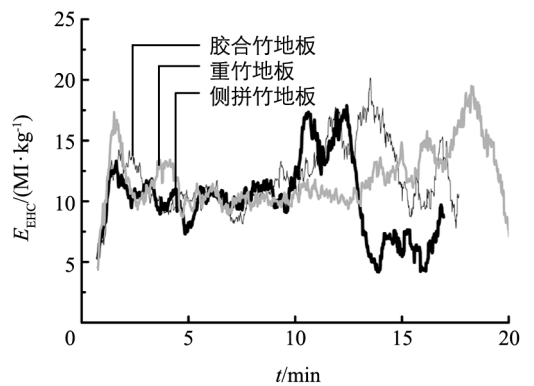


图 3 3 种竹地板的 E_{EHC} 曲线

2.4 总热释放量

3 种竹地板的总热释放量(THR)曲线如图 4 所示. 总热释放量(用 T_{THR} 表示)越大, 材料燃烧所释放出来的热量就越多, 火灾危险就越大. 从图 4 中可以看出, 在 15 min 以前, 3 种竹地板的 T_{THR} 大小依次为胶合竹地板、侧拼竹地板、重竹地板, 说明重竹地板的安全性相对高一些. 在 15 min 以后, 胶合竹地板和侧拼竹地板已基本燃烧完毕, 而重竹地板的 T_{THR} 继续增加, 超过了胶合竹地板和侧拼竹地板. 这是由于 T_{THR} 表征的是单位面积的材料在燃烧全过程中所释放热量的总和, 3 种竹地板的面积一样, 重竹地板的质量以及密度最大, 因此其含有的可燃成分也最大, 在燃烧结束时的总热释放也最大. 从试样被点燃到第二放热峰峰值出现的阶段, T_{THR} 增长较快并且在放热峰出现时变化最快, 当第二放热峰过后, T_{THR} 增加很缓慢, 说明材料的有焰燃烧提供了燃烧过程中释放的热量, 因此, 阻止材料的进一步燃烧的关键是抑制其有焰燃烧.

2.5 残余物质量

3 种竹地板的残余物质量曲线如图 5 所示. 残余物质量(Mass)是指试样在燃烧过程中某一时刻残余物的质量, 用 M_{Mass} 表示, 也可用成炭率来表示, 成炭的增加对材料保持结构强度有利. 从图 5 中可知, 3 种复合板的 M_{Mass} 曲线变化规律相似, 随着试样的燃烧, 残余物质的质量逐渐减少. 结合图 2 的 R_{RHR} 曲线可知, 在 R_{RHR} 曲线出现波峰的时间段, 残余物质质量下降最急剧, 而且 M_{Mass} 曲线的斜率变化与 T_{THR} 曲线出现斜率变化的规律是相似的. 因为残余物质质量变化和热释放总量变化最快的阶段是材料的有焰燃烧阶段, 因此残余物质质量损失率和热释放量在一定程度上是同步的. 根据图 5 还可以推出燃烧成炭率, 即试样的残余物质量占燃烧前试样质量的百分率. 选取燃烧过程中相同时刻的成炭率能直观地比较出 3 种材料的差异, 由于侧拼竹地板在 17 min 时已基本燃烧完毕, 所以选 3 种材料燃烧 17 min 时的成炭率来比较阻燃性能较为合适. 侧拼竹地板、胶合竹地板和重竹地板的成炭率分别为 20.74%、21.39%和 43%, 这可能与 3

种竹地板中胶粘剂含量差异有关. 成炭率越高, 材料保持结构强度的能力就越强, 在火灾场中逃生的希望就越大, 因此, 重竹地板相对于侧拼竹地板和胶合竹地板而言更安全.

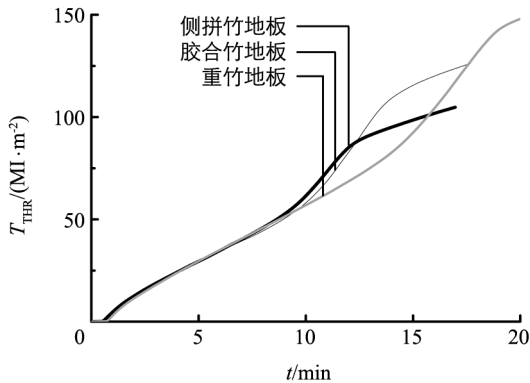


图 4 3 种竹地板的 T_{THR} 曲线

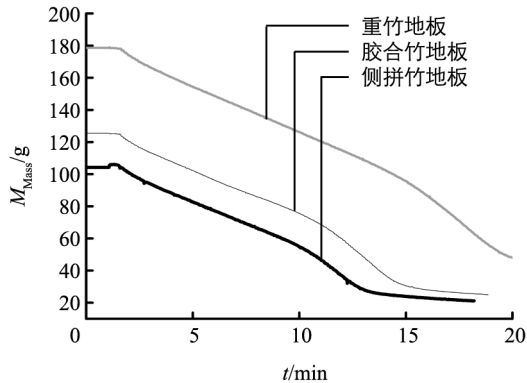


图 5 3 种竹地板的 M_{Mass} 曲线

2.6 质量损失速率

3 种竹地板的质量损失速率曲线如图 6 所示. 质量损失速率(MLR)主要反映了材料的热解反应的速率, 用 M_{MLR} 表示. 从图 6 中可知, 在第二个峰出现之前, 三者的 M_{MLR} 曲线重合程度较高且 3 条曲线的峰值基本相同, 或许是由于三者的原材料都是竹材而导致的. 将 M_{MLR} 曲线与 R_{RHR} 曲线进行对比可见, 二者的曲线形状相似, 并且波峰的位置也相同, 这表明竹材燃烧时的热释放和质量损失是同步的, 有焰燃烧过程中热量释放速率最快的阶段和竹材热解产生可燃物最快的阶段也是同步的. 从图中较为直观地看出重竹地板的 M_{MLR} 平缓段时间比胶合竹地板和侧拼竹地板都长, 这段时间越长, 留给人们在火灾中逃生的时间相对就越长, 因此能说明重竹地板的安全性相对较好.

2.7 烟比率

3 种竹地板的烟比率曲线如图 7 所示. 烟比率(SR)是指烟气透光性随时间的变化关系, 代表某时刻烟的“浓度”, 用 S_{SR} 表示, 是锥形量热仪测出的尾气的瞬时消光系数. S_{SR} 越大, 光线在烟气中的透过率越小, 即代表烟气浓度越大, 人们辨认目标和疏散方向的能力就越低, 火灾场越危险. 从图 7 中可以看出, 在 15 min 以前, 3 种竹地板的 S_{SR} 大小依次为侧拼竹地板、胶合竹地板、重竹地板, 说明重竹地板的烟气浓度相对最低, 即它的安全性相对高一些. 这是由于酚醛树脂胶有一定的抑烟效果, 重竹地板的胶粘剂含量相对最多, 所以它的抑烟效果相对最强. 3 种竹地板的烟比率变化并没有规律, 可能与酚醛树脂胶在热降解过程中复杂的结构变化有关^[11].

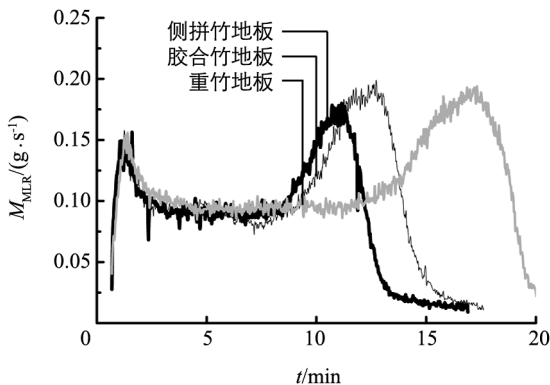


图 6 3 种竹地板的 M_{MLR} 曲线

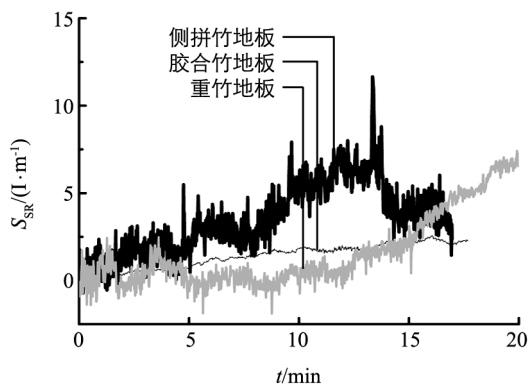


图 7 3 种竹地板的 S_{SR} 曲线

2.8 一氧化碳浓度

3 种竹地板的一氧化碳浓度曲线如图 8 所示. CO 浓度是指燃烧尾气中 CO 所占的比例. 从图 8 中可以

看出, 3 种竹地板的 CO 曲线重叠程度较大, 说明三者的 CO 浓度差别不大. 在燃烧过程中, 竹材中的碳元素在氧气充足的情况下完全氧化生成二氧化碳, 而在氧气不充足的情况下则生成有毒的一氧化碳, 可能由于 3 种竹地板的原料相同, 因此材料中碳元素的含量相似, 所以在燃烧的时候发生的反应也类似, 导致 CO 浓度曲线有较大的重叠.

2.9 二氧化碳浓度

3 种竹地板的二氧化碳浓度曲线如图 9 所示. CO₂ 浓度是指燃烧尾气中 CO₂ 所占的比例. 把图 9 的曲线和 R_{THR} 曲线进行对比, 发现二者的形状相似, 说明材料燃烧时的热释放主要是由生成 CO₂ 的反应提供的. CO₂ 曲线的第二峰结束前对应着有焰燃烧阶段, 结束后对应着红热燃烧阶段, 由图 9 中可知, 有焰燃烧阶段的 CO₂ 浓度大大高于红热燃烧阶段, 说明 CO₂ 主要是由有焰燃烧产生的^[12]. 此外, 3 种竹地板的 CO₂ 曲线峰值相似, 或许是由于 3 种地板中碳元素的含量相似引起的. 重竹地板的第二峰出现时间分别比胶合竹地板和侧拼竹地板延长了 4 min 和 6 min, 这对火场逃生而言是有利的.

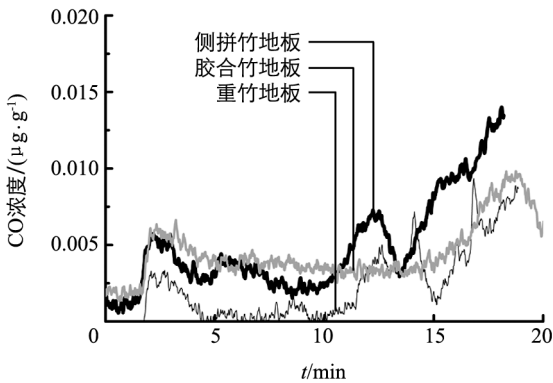


图 8 3 种竹地板的 CO 浓度曲线

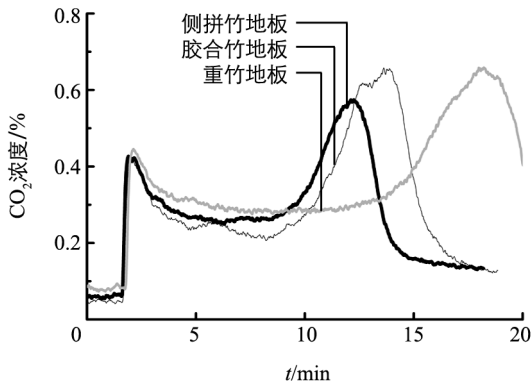


图 9 3 种竹地板的 CO₂ 浓度曲线

3 结 论

1) 点燃时间方面, 重竹地板的点燃时间相对于胶合竹地板和侧拼竹地板而言分别延长了 6 s 和 12 s; 热释放参数方面, 重竹地板的热释放速率和有效燃烧热的第二峰值相对于胶合竹地板和侧拼竹地板而言分别延迟了 4 min 和 6 min; 在 15 min 前, 3 种竹地板的总热释放量大小依次为胶合竹地板、侧拼竹地板、重竹地板.

2) 质量变化参数方面, 3 种竹地板的残余物质量和质量损失速率变化曲线相似, 3 种竹地板的成炭率大小依次为重竹地板、胶合竹地板、侧拼竹地板, 重竹地板的质量损失速率曲线平缓段时间比胶合竹地板和侧拼竹地板都长.

3) 烟参数及尾气参数方面, 3 种竹地板的烟比率大小依次为侧拼竹地板、胶合竹地板、重竹地板; 三者的 CO 浓度差别不大, CO₂ 曲线峰值相近, 但重竹地板的第二峰出现时间分别比胶合竹地板和侧拼竹地板延长了 4 min 和 6 min. 重竹地板相对于胶合竹地板和侧拼竹地板而言, 更有利人们在火灾场中的逃生.

参考文献:

[1] 陈玉和, 陈章敏, 吴再兴, 等. 竹材人造板生产技术 [J]. 竹子研究汇刊, 2008, 27(2): 5—10.

[2] 齐爱华, 韦亚红. 浅析我国竹地板的发展现状与前景 [J]. 林业机械与木工设备, 2009, 37(4): 8—12.

[3] 舒中俊, 谌强. 竹地板与普通实木地板燃烧性能的锥形量热仪对比实验研究 [J]. 火灾科学, 2007, 16(3): 148—151.

[4] BAKHTIYARI S, TAGHI-AKBARI L, ASHTIANI M J. Evaluation of Thermal Fire Hazard of 10 Polymeric Building Materials and Proposing a Classification Method Based on Cone Calorimeter Results [J]. Fire and Materials, 2015, 39: 1—13.

- [5] KIM J, LEE J H, KIM S, Estimating the Fire Behavior of Wood Flooring Using a Cone Calorimeter [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012, 110(2): 677—683.
- [6] 杨 森, 王灵玺, 张 静, 等. 五种木质地板阻燃性能的测试方法比较 [J]. 木材工业, 2015, 29(1): 31—34.
- [7] SCHARTEL B, HHL T R. Development of Fire-Retarded Materials-Interpretation of Cone Calorimeter Data [J]. Fire and Materials, 2007, 31: 327—354.
- [8] BABRAUSKAS V, Peacock R D. Heat Release Rate: the Single Most Important Variable in Fire Hazard [J]. Fire Safety Journal, 1992, 18: 255—272.
- [9] 章卫钢, 鲍滨福, 杜春贵, 等. 酚醛树脂浸渍压缩密实化杉木燃烧特性 [J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(3): 399—403.
- [10] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 155—156.
- [11] 陈鸢飞, 陈智琴, 肖绍懿, 等. 酚醛树脂热降解过程中的结构变化 [J]. 热固性树脂, 2008, 23(4): 4—8, 12.
- [12] 李 坚, 王清文, 方桂珍, 等. 木材波谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 280.

Combustion Characteristics of Bamboo Floorings Determined by a Cone Calorimeter

HUANG Zhi-wei^{1,2}, GUAN Ming-jie^{1,2}

1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Bamboo Engineering and Technology Research Center of SFA, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: The aim of this research was to analyze the combustion characteristics of flat pressed bamboo flooring, side pressed bamboo flooring and strand woven bamboo flooring commonly used for residential flooring. Experiments on the three kinds of bamboo flooring were performed using a cone calorimeter according to ISO 5660-1 specifications. The results showed that time to ignition (T_{TTI}) of strand woven bamboo flooring was the longest, extended by 6 s and 12 s compared to side pressed bamboo flooring and flat pressed bamboo flooring, respectively. The rate of heat release (R_{RHR}) and the second peak of effective heat of combustion (E_{EHC}) of strand woven bamboo were deferred by 4 min and 6 min, compared to side pressed bamboo flooring and flat pressed bamboo flooring, respectively. In the first 15 min of combustion, the total heat release (T_{THR}), char yield and smoke ratio (S_{SR}) of the three types of bamboo flooring were in the order of side pressed bamboo flooring > flat pressed bamboo flooring > strand woven bamboo flooring, strand woven bamboo flooring > side pressed bamboo flooring > flat pressed bamboo flooring, and flat pressed bamboo flooring > side pressed bamboo flooring > strand woven bamboo flooring, respectively. The difference in CO concentration was non-significant, and the second peak of CO_2 of strand woven bamboo flooring was deferred by 4 min and 6 min, compared to side pressed bamboo flooring and flat pressed bamboo flooring, respectively. So strand woven bamboo flooring was conducive to fire escape, compared to side pressed bamboo flooring and flat pressed bamboo flooring.

Key words: side pressed bamboo flooring; flat pressed bamboo flooring; strand woven bamboo flooring; combustion characteristic; cone calorimeter

责任编辑 汤振金