

## 竹质材料阻燃研究概况与展望

周中玺, 杜春贵\*, 魏金光, 余辉龙

(浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 详细阐述了近年来国内外竹质材料常用的阻燃剂、阻燃处理方法以及阻燃性能的测试等方面的研究进展, 针对研究中存在的问题展望了竹质材料阻燃研究的方向为环保型、复合型、纳米材料阻燃剂, 阻燃材料的物理力学和加工性能等。

**关键词:** 竹质材料; 阻燃剂; 阻燃处理; 阻燃性能

**中图分类号:** S782.39; S781.9

**文献标识码:** A

## Review on Researches on Fire Retardant of Bamboo-based Material

ZHOU Zhong-xi, DU Chun-gui\*, WEI Jin-guang, YU Hui-long

(School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China)

**Abstract:** Presentations were made in details on research progress on fire retardant, fire-retardant treatment, testing of retardant properties of bamboo-based materials at home and abroad in recent years. Further researches of fire retardant bamboo-based material should be focused at environment-friendly, compound types, nano-based fire retardants, as well as at their physical and mechanical properties and processing properties.

**Key words:** bamboo-based material; fire retardant; retardant treatment; retardant properties.

我国的竹林面积、竹材产量、竹种资源均居世界首位, 素有“竹子王国”之称<sup>[1~2]</sup>, 中国的竹材加工利用技术居世界领先水平。竹质材料具有良好的视觉、触觉特性和较高的强重比, 大量应用于建筑、家具及室内装饰装修行业<sup>[3]</sup>, 出现快速增长的势头。但竹质材料属于可燃材料, 随着消费量的快速增长, 发生火灾的可能性必将增加。我国近年来公共场所火灾事故发生的频率、规模以及造成的经济损失呈递增趋势, 其中高层建筑采用大量的可燃材料装修, 是造成火灾迅速蔓延扩大的一个主要原因<sup>[4~6]</sup>。因此, 对竹质材料进行阻燃处理, 提高其耐火性能, 减低火焰传播速度, 使其达到国标难燃及以上等级至关重要<sup>[7]</sup>。目前, 已有学者进行了竹质材料阻燃的研究, 但相关研究报道不多, 也不够系统和深入。本文从竹质材料阻燃处理所用阻燃剂的种类、阻燃处理方法和阻燃性能的测试等方面进行了概述, 并针对当前存在的问题展望了今后竹质材料阻燃研究的发展方向。

### 1 竹质材料阻燃剂

由于竹质材料的物理、化学性质与木质材料相似, 故目前有关竹质材料阻燃的研究多是建立在木质材料阻燃研究的基础之上。而木质材料阻燃处理的常用方法是在木质材料中加入阻燃剂<sup>[8]</sup>, 此法同样适用于竹质材料的阻燃处理。根据目前国内外学者在竹质材料<sup>[9~10]</sup>和木质材料阻燃研究<sup>[11~19]</sup>时所用的阻燃剂, 竹质材料的可分为无机阻燃剂、有机阻燃剂、树脂型阻燃剂三大类。

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-07-23

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(LZ17C160001)

作者简介: 周中玺(1993-), 男, 江苏镇江人, 硕士生, 从事竹材工业化利用研究; \*通讯作者。

## 1.1 无机阻燃剂

无机阻燃剂最早使用,虽有容易吸湿等缺点,但具有无毒、低烟,热稳定性好、不产生有毒性气体、价格便宜等优点,至今仍被广泛采用<sup>[20]</sup>。在阻燃剂发展初期,木材阻燃所用的无机阻燃剂,主要是各种铵盐、硫酸盐、磷酸盐等盐类或复盐的化合物,后期主要应用磷-氮复合、磷-卤复合、磷-氮-硼复合等高效阻燃体系为特征的无机阻燃剂<sup>[21]</sup>。目前,在竹质材料的阻燃处理研究与应用中,人们在木质材料阻燃的基础上,常选用磷氮系阻燃剂和硼类化合物两类无机阻燃剂。

1.1.1 磷氮系阻燃剂 磷类化合物的作用主要是脱水炭化,原因是在高温加热时,磷类化合物受热分解,产生化学反应,生成聚偏磷酸,而聚偏磷酸具有较强的吸水或脱水效果,可以形成具有一定厚度的不易燃烧的碳层,从而起到阻燃作用<sup>[22]</sup>。在加入氮的化合物以后形成的磷氮类化合物可以提高阻燃有效性,可以使用较低量的化学试剂,达到较高的抗火焰传播能力<sup>[23]</sup>。最常见和最有效的磷氮类化合物是磷酸一铵盐和磷酸二铵盐。

靳肖贝等<sup>[24]</sup>以慈竹竹束为原料,用磷酸二氢铵和聚磷酸铵处理竹束并制备阻燃重组竹,采用锥形量热仪测试了阻燃重组竹的燃烧性能。结果表明,这2种阻燃剂均能有效降低重组竹的热释放速率和热释放总量,延长了点燃时间,其中聚磷酸铵能够大幅度降低发烟量和产烟速率且处理材的引燃时间长,为未处理材的3倍;而磷酸二氢铵处理材抑制燃烧效果好,对材料力学性质影响小,热释放总量比未处理材下降了62.38%。

傅深渊等<sup>[25]</sup>以磷酸氢二铵为阻燃剂,三聚氰胺苯酚甲醛共缩聚树脂(MPF)和酚醛树脂(PF)为胶黏剂,研究不同温度下竹丝成形材的燃烧性能。结果显示,磷酸氢二铵能有效提高竹丝成形材的阻燃性能;燃烧温度为735℃时,4种试件的阻燃效果依次为:经磷酸氢二铵处理的MPF树脂竹丝成形材>经磷酸氢二铵处理的PF树脂竹丝成形材>未处理的MPF树脂竹丝成形材>未处理的PF树脂竹丝成形材。

杜春贵等<sup>[26]</sup>以浓度为30%的磷酸氢二铵为阻燃剂,对重组竹的构成单元-竹束进行阻燃处理制备阻燃重组竹。结果显示,阻燃剂的施加方法对重组竹的物理力学性能有一定的影响。

凌启飞等<sup>[27]</sup>利用竹粉和聚乳酸为原料复合制备聚乳酸/竹粉复合材料,分别采用氢氧化铝(ATH)和聚磷酸铵(APP)阻燃剂,对聚乳酸/竹粉复合材料进行阻燃抑烟处理并对阻燃处理后的复合材料进行性能测试。结果表明,两种阻燃剂均有效提高了聚乳酸/竹粉复合材料的阻燃性能。

1.1.2 硼类化合物 近年来,随着新的环保要求和法规的不断推出,硼系阻燃剂以其优良的阻燃性能、低毒和抑烟特性正越来越多地引起人们的注意<sup>[28]</sup>。硼类化合物是通过热膨胀熔融、覆盖在材料表面,隔断氧气供给,从而阻止了木材的燃烧和火焰传播达到阻燃目的<sup>[29]</sup>。此类阻燃剂用于竹质材料的阻燃处理的研究并不多。

杨守禄等<sup>[30]</sup>利用硼酸、硼砂对毛竹进行阻燃处理。研究结果表明,硼酸、硼砂不仅能降低竹材的最大热解速率,缩短高温热解区间,促进残炭生成;而且能抑制竹材燃烧时的烟释放。所以硼酸、硼砂处理竹材能发挥高效的阻燃抑烟功效。

靳肖贝等<sup>[24]</sup>用硼硼合剂(硼酸与硼砂质量比为1:1混合成的水溶液)处理慈竹竹束并制备阻燃重组竹,采用锥形量热仪测试了阻燃重组竹的燃烧性能。结果表明:该阻燃剂能有效降低重组竹的热释放速率和热释放总量,延长点燃时间,大幅度降低发烟量和产烟速率,其处理材的抑烟效果好,发烟总量比未处理材降低了88%。

## 1.2 有机阻燃剂

有机阻燃剂大部分是含磷、硼和氮元素的多元复合体,磷或卤素在聚合或缩聚过程中参加反应,结合到高聚物的主链或侧链中<sup>[21]</sup>。在竹质材料阻燃处理研究与应用中,常以木材阻燃剂为基础,目前用得最多的是有机磷-氮-硼复合阻燃体系,它由硼酸等含硼化合物与以尿素、双氰胺或三聚氰胺代替氮而制得的磷酸盐构成的阻燃体系。

王清文<sup>[31]</sup>研发的FRW阻燃剂,是由高纯度脒记脒磷酸盐、硼酸和少量助剂等合成的一种新型有机磷-氮-硼复合体系阻燃剂,具有优异的阻燃性能,适用于木材、竹材及其他纤维类材料的阻燃处理。

金春德等<sup>[32]</sup>采用FRW阻燃剂对刨切薄竹进行阻燃处理。结果表明,经FRW阻燃处理的刨切薄竹阻燃和抑烟效果提升明显。

朱敏等<sup>[33]</sup>以磷酸、硼酸、双氰胺为活性物质合成了一种新型竹材阻燃剂, 并探讨了新型竹材阻燃剂的合成工艺。试验结果表明, 在常温常压下, 低浓度的阻燃剂处理竹材后, 其氧指数为 33.4%; 氮磷硼比例为 1:1:1.2 和 1:1:1.5 时烟密度等级最低。

### 1.3 树脂型阻燃剂

树脂型阻燃剂是指在配方中加入低聚合度合成树脂, 浸渍木材后, 在干燥过程中树脂固化或指在树脂制造过程中加入磷酸或 N-P 系列化合物, 通过树脂固化形成的阻燃剂, 如 UDFP 树脂 (尿素-双氰胺-甲醛-磷酸), MDFP 树脂 (三聚氰胺-双氰胺-甲醛-磷酸) 等<sup>[21]</sup>。树脂型阻燃剂尚处于发展阶段, 与其它类型阻燃剂相比, 具有吸湿性低, 阻燃剂不会析出, 可减少胶粘剂用量等优点<sup>[21]</sup>。

目前, 此类阻燃剂在竹质材料阻燃中的应用研究极少, 仅见陈晔<sup>[34]</sup>以树脂类阻燃剂 (主要成分为甲醛、尿素、磷酸铵盐类、硼砂、氢氧化铝、三聚氰胺等) 对竹材进行了浸渍处理。其研究表明, 经树脂类阻燃剂处理后, 竹材的氧指数有了明显提高。

## 2 竹质材料阻燃处理方法

木材阻燃处理方法主要有物理阻燃法和化学阻燃法。物理阻燃法是指不使用化学药剂, 也不改变木材的结构及木材化学成分的阻燃方法<sup>[35]</sup>; 化学阻燃法是指将具有阻燃功能的化学药剂以不同的方式注入木材表面或内部或与木材的某些化学成分发生反应, 改变木材的热解过程, 从而提高木材的抗燃烧性能<sup>[29]</sup>。竹质材料的阻燃常用化学处理法, 分为表面处理 (表面涂覆法)、深层处理 (浸渍处理工艺)、复合法、化学改性法。

### 2.1 表面处理

表面处理即在表面涂刷 (表面涂覆法)、喷淋阻燃剂或黏贴不燃性物质, 通过保护层的隔氧、隔热作用达到阻燃的目的, 优点是药剂量较少, 对竹材物理力学性能影响小, 操作方便; 缺点是耐磨性较低, 保护层一旦遭到破坏, 就不具备阻燃性能<sup>[29]</sup>。

目前, 仅见黄晓东<sup>[36]</sup>以竹胶合板为对象, 用表面涂敷法涂刷自制的膨胀型聚氨酯防火涂料。其研究表明, 经阻燃处理的竹胶合板氧指数值达到 54, 阻燃性能优良。

### 2.2 深层处理

深层处理让阻燃剂进入到竹质材料内部并具有一定的深度。目前, 大部分采用浸渍处理。分为常压浸渍法和高压浸渍法。常压浸渍法, 是指在常压下将竹质材料浸渍在一定温度的阻燃剂溶液中, 通过含水率梯度和温度梯度的作用使阻燃剂溶液渗透到竹质材料中, 浸渍时间的长短取决于竹质材料所需的阻燃程度和浸渍性能<sup>[37]</sup>, 其优点是工艺简单、成本低廉、设备投资少, 缺点是适用于较薄和渗透性较好的材料<sup>[7]</sup>。高压浸渍法, 是指将竹质材料置于高压罐内, 抽真空, 借助于真空状态使竹质材料吸入阻燃剂药液, 然后加压将阻燃剂压入竹质材料内部, 目前常用满细胞法<sup>[37]</sup>。经过阻燃浸渍处理的竹质材料氧指数和抗弯强度都比素材有所提高<sup>[38]</sup>。

杜春贵等<sup>[39]</sup>采用常压浸渍法对竹束进行阻燃处理, 研究阻燃处理工艺对竹束载药率和重组竹物理力学性能的影响。结果表明, 竹束载药率随着浸渍处理时间的延长和阻燃剂的质量分数的增大而增大; 阻燃重组竹的含水率和 24 h 吸水厚度膨胀率大于未阻燃重组竹, 且随着浸渍处理时间的延长和阻燃剂质量分数的增大而增大。综合评判, 竹束浸渍处理的较佳时间为 120 min, 阻燃剂的质量分数不宜大于 30%。

王书强等<sup>[40]</sup>利用复配阻燃剂, 采用常压浸渍法研究了温度、时间、浸渍质量浓度等对竹单板载药量的影响, 并测试不同载药量薄竹胶合板的燃烧和力学性能。结果表明, 温度 60℃, 时间 8.0 h, 浸渍质量浓度 300.0 g·L<sup>-1</sup> 为最佳浸渍条件; 随着载药量的增加薄竹胶合板的热释放速率、总热释放量、烟释放速率和总烟释放量都减小, 而残余物质剩余量、点燃时间和氧指数在逐渐增加, 阻燃效果显著。

李素琼等<sup>[41]</sup>采用常压浸渍法制备阻燃性竹制成品, 以载药率、氧指数为评价指标, 对硅酸钠和铝酸钠的混合浸渍比、浸渍温度和浸渍时间条件进行优化。结果显示, 浸渍比 1:3, 浸渍温度 90℃, 浸渍时间 4 h, 制得的竹制品载药率为 5.08%、氧指数为 39.68%, 与单因素实验相比更经济。

陈晞<sup>[34]</sup>采用高压浸渍法,通过正交试验,分析了真空度、真空时间、浸注压力和浸注时间4个因素对竹材吸药量、氧指数和抗弯强度的影响。结果显示,竹材较为理想的阻燃浸注处理工艺为真空度0.08 MPa、真空时间1.5 h、浸注压力0.7 MPa、浸注时间2 h。

### 2.3 复合法

复合法又称机械添加法,它是指在胶粘剂中加入阻燃剂,或者在刨花、纤维等原料中直接拌入阻燃剂,进而制得具有阻燃性能的材料。但是,阻燃剂的加入量会影响胶粘剂的固化过程,因此,必须根据实际情况的需要调整固化剂配方<sup>[38]</sup>。这种方法常用于竹刨花板和竹胶合板的阻燃处理。

杜春贵等<sup>[42]</sup>在精刨竹碎料中直接喷施30%磷酸氢二铵,制备阻燃竹碎料板并检测其阻燃性能。结果显示,阻燃竹碎料板有较好的阻燃性能。

王书强等<sup>[43]</sup>采用常压浸渍法,将阻燃剂加入薄竹单板以制备成具有阻燃性能的薄竹胶合板,在常压下研究了温度、时间、复配阻燃剂质量分数等参数对薄竹单板载药量的影响,测定了不同载药量薄竹胶合板的燃烧性能。结果表明:随着载药量的增加,胶合板的点燃时间和残余质量逐渐增加,而总热释放量和总烟释放量逐渐减小,阻燃效果明显。

### 2.4 化学改性法

化学改性法是指采用高分子化合物的单体,通过加压浸渍等手段注入材料内,再经核照射、高温加热等方法,使化学单体在材料内发生化学变化或使药剂分子与材料的化学成分发生反应的方法<sup>[44]</sup>。目前,化学改性在木材中主要用来提高木材的物理力学性质及抗生物降解的能力,它能克服木材阻燃处理后存在的强度降低,但存在不抗流失、有效期短等诸多问题<sup>[44]</sup>。然而尚未见将此法用于竹质材料阻燃研究的报道。

## 3 竹质材料阻燃性能的测试

竹质材料阻燃性能的测试,常用的是锥形量热仪法、氧指数法、热分析法、红外光谱分析法和核磁共振波谱法。

### 3.1 锥形量热仪法

锥形量热仪(CONE)是以氧消耗原理为基础的新一代聚合物材料燃烧性能测定仪,可获得释热速率(HRR)、总释热(THR)、点燃时间(TTI)、烟及毒性参数等<sup>[45]</sup>燃烧参数。锥形量热仪法由于具有参数测定值受外界因素影响小、试验结果与大型燃烧测试结果具有很好的相关性、能够表征出材料的燃烧性能等优点,多用来评价材料在恒定热源作用下的燃烧状况<sup>[46]</sup>。

卢凤珠等<sup>[47]</sup>用CONE法,对竹材去除竹青保留竹黄、去除竹黄保留竹青以及竹秆上、中、下(保留竹青竹黄)不同部位进行了燃烧性能的测定,分析了它们的燃烧性能。结果显示,点燃时间、第二释热峰出现的时间及峰值、质量损失速率与竹材两表面的去与不去有极显著线性相关关系;竹秆部位与点燃时间有极显著性,与质量损失速率(峰值)有显著相关,与第二释热峰出现的时间及峰值分别为无显著相关及有一定相关。

金春德等<sup>[32]</sup>采用FRW阻燃剂对刨切薄竹进行阻燃处理,用CONE测定不同载药率处理材与未处理材的阻燃性能。结果表明,刨切薄竹经FRW阻燃处理后,热释放速率、总热释放量和总烟释放量随着载药率的增大而减小,点燃时间延长,残余物质量增加,阻燃抑烟效果显著。

杜春贵等<sup>[42]</sup>以精刨竹碎料为原料,制备阻燃竹碎料板和未阻燃竹碎料板,采用CONE检测其阻燃性能。结果表明,阻燃竹碎料板的热释放速率、总热释放量、有效燃烧热和质量损失速率明显降低,而点燃时间、炭生成量明显增加,证明阻燃竹碎料板有较好的阻燃性能。

刘姝君等<sup>[48]</sup>通过CONE,测试分析聚磷酸铵(APP)处理竹基纤维复合材料的燃烧特性。结果表明:APP处理试样的释热速度、释热总量、失重率、发烟总量等指标值均有下降,阻燃性能得到改善。

### 3.2 氧指数法

氧指数(OI)是指在试验条件下,试件在氧、氮混合气流中,维持平稳燃烧所需的最低氧气浓度,以氧所

占混合气体的最低体积百分数来表示<sup>[49]</sup>。OI 值在 27~60 的材料一般为自熄材料, 21~27 的为缓慢燃烧材料, 小于 21 为易燃性材料<sup>[50]</sup>。所以, 材料的 OI 值越高, 表明材料的难燃性越好, 阻燃剂的性能越好。

朱敏等<sup>[33]</sup>用氧指数法测定了经阻燃剂处理后竹材的耐热性能。结果表明, 阻燃处理后竹材的 OI 从 28.4% 提高到 33.4%, 达到了国标难燃 B1 级。

王书强等<sup>[40]</sup>利用复配阻燃剂, 采用常压浸渍法对竹单板进行阻燃处理, 并通过氧指数法测试不同载药量薄竹胶合板的燃烧性能。结果表明, 阻燃处理过的薄竹胶合板 OI 都有明显提高, 并且随着载药量的增加而增加, 当载药量 $\geq 8\%$ 时, 其 OI 已达到 GB8624-2012 中 B1 级家具制品和日本 JISD1322-1977 中的难燃一级的要求。

### 3.3 热分析法

热分析法是指用热力学参数或物理参数随温度变化的关系进行分析的方法<sup>[51]</sup>, 主要用于研究材料的阻燃性能和阻燃机理。目前热分析法包括热重分析、差热分析、差示扫描量热法等。

陈卫民等<sup>[52]</sup>采用热重分析仪研究了无机矿物质粉填充对竹木重组材阻燃抑烟性能的影响。结果表明, 10% 的无机矿物质粉填充能够改善竹木重组材的物理力学性能, TG 曲线 900 s 时的残余质量均较未处理材增加, 说明无机矿物质具有催化成炭的作用。

靳肖贝等<sup>[53]</sup>采用 3 种磷酸铵盐 (APP, DAP, MAP) 分别与硼酸/硼砂复配化合物 (SBX) 进行复配, 对毛竹竹条进行加压浸渍处理, 利用热重分析仪分析了阻燃剂对竹材的热解行为及燃烧性能的影响。结果表明: 阻燃处理竹材的热降解过程发生改变, 起始降解温度降低, 高温热解区间缩短, 残余质量分数增加 58%~74%。3 种复配阻燃剂处理竹材燃烧后都能形成致密炭层, 具有良好的阻燃和抑烟性能。

### 3.4 红外光谱分析法

红外光谱分析方法是基于红外电磁辐射与物质之间相互作用产生的光谱特征频率与强度进行物质结构分析的方法<sup>[54]</sup>, 主要应用于研究阻燃剂的阻燃机理以及材料燃烧过程中结构的变化<sup>[55]</sup>。

目前, 此方法在竹质材料阻燃性能测试的应用中极少, 仅见蔡润之等<sup>[56]</sup>通过红外光谱仪表征了自制的膨胀型阻燃剂的结构特性, 考察了其对于竹浆纤维织物热降解行为的影响及阻燃机理。其试验结果表明, 该阻燃剂对竹浆纤维织物的阻燃效果明显, 耐久性较好。

### 3.5 核磁共振波谱法

核磁共振波谱法是指具有核磁性质的原子核, 在高强磁场作用下吸收无线电波发生共振吸收, 实现能态跃迁并产生核磁共振波谱图<sup>[7]</sup>。核磁共振波谱图可以提供阻燃剂分子中化学官能团的数目和种类, 还可以借助它来研究阻燃机理。

目前, 此方法在竹质材料阻燃性能测试的应用中仅见朱敏<sup>[57]</sup>用核磁共振波谱法, 表征了 PNB 竹材阻燃剂原料双氰胺中的 C 燃剂键转化为 C=O 键, 脒基脲磷酸盐成功转化。

## 4 竹质材料阻燃研究存在的问题

竹质材料阻燃的研究取得了一些研究成果, 但尚处于探索和初步发展阶段, 还有许多问题有待进一步深入地研究。

- (1) 当前使用的大多数阻燃剂均不具有抑烟的效果, 而火灾中的烟雾是导致人死亡的直接原因。
- (2) 竹质材料大量使用水基型阻燃剂, 其阻燃效果虽好, 但是容易吸收水分而流失, 进而影响阻燃效果。
- (3) 高浓度阻燃剂处理后的竹质材料虽具有较佳的阻燃性能, 但阻燃剂的实际载药量有限, 且阻燃剂的浓度越高, 成本也越高。

## 5 展望

竹质材料阻燃技术的研究和发展方向主要有以下几个方面。

(1) 环保型阻燃剂研究。环保型阻燃剂因其本身无毒,生产和使用过程中不污染环境,并且能够在阻燃的同时降低烟雾量和抑制有毒气体的产生等优点,将成为今后研究的重点。

(2) 复合型阻燃剂研究。开发不易水解和流失,成本低廉且具有防腐、防虫等多功能的“一剂多效”型复合阻燃剂。

(3) 纳米材料阻燃剂研究。将具有阻燃性能的纳米材料添加到竹质材料内部,在浓度相同的情况下,增加阻燃剂的载药量,使其变为难燃材料。

(4) 阻燃材料的物理力学和加工性能研究。经过阻燃处理的竹材吸湿性低,尺寸稳定性好;物理力学性能和加工工艺性能基本不受影响;视觉、触觉和调节环境的特征基本不受影响将成为阻燃性能评价的重要指标。

#### 参考文献:

- [1] 李世东, 许传德. 中国竹业发展历程与 21 世纪发展战略[J]. 竹子研究汇刊, 1998, (1): 1-5.
- [2] 李智勇, 王登举, 樊宝敏. 中国竹产业发展现状及其政策分析[J]. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2005, (4): 50-54.
- [3] 徐明, 任海青, 徐金梅, 等. 中国近五年竹材加工利用研究进展及展望[J]. 世界林业研究, 2008, 21(1): 61-67.
- [4] 余妹兰, 蒋笑天, 张新. 公共场所重大火灾回归神经网络组合预测模型[J]. 消防技术与产品信息, 2014, (1): 4-7.
- [5] 李春晨, 杨旭, 陈月. 公共场所特大火灾事故调研及对策分析[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(5): 48-50.
- [6] 陈景来. 高层建筑火灾成因及预防对策分析[J]. 低温建筑技术, 2014, (2): 149-150.
- [7] 刘姝君, 储富祥, 于文吉. 竹质阻燃材料处理的研究进展[J]. 竹子研究汇刊, 2012, (04): 52-56.
- [8] 方桂珍. 木材功能性改良[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 94-100.
- [9] Zhou X, Chen K, Yi H. Synthesis and application of a formaldehyde-free flame retardant for bamboo viscose fabric[J]. Textile Res J, 2014, 84(14): 1515-1527.
- [10] Peng H, Feng J, Zhou Y, *et al.* Percolation and catalysis effect of bamboo-based active carbon on the thermal and flame retardancy properties of ethylene vinyl-acetate rubber[J]. J App Polym Sci, 2015, 132(34): 1-8.
- [11] Branca C, Di B C. Oxidation characteristics of chars generated from wood impregnated with  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ [J]. Therm Chim Acta, 2007, 456(2): 120-127.
- [12] Sain M, Park S H, Suhara F, *et al.* Flame retardant and mechanical properties of natural fiber-PP composites containing magnesium hydroxide [J]. Polym Degrad Stab, 2004, 83(2): 363-367.
- [13] Stark N M, White R H, Mueller S A, *et al.* Evaluation of various fire retardants for use in wood flour-polyethylene composites [J]. Polym Degrad Stab, 2010, 95(9): 1903-1910.
- [14] Zhang Z X, Zhang J, Lu B X, *et al.* Effect of flame retardants on mechanical properties, flammability and foamability of PP/wood-fiber composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2): 150-158.
- [15] Dobele G, Urbanovich I, Zhurins A, *et al.* Application of analytical pyrolysis for wood fire protection control[J]. J Anal App Pyrol, 2007, 79(1): 47-51.
- [16] Stevens R, Van Es D S, Bezemer R, *et al.* The structure-activity relationship of fire retardant phosphorus compounds in wood[J]. Polym Degrad Stab, 2006, 91(4): 832-841.
- [17] Chou C S, Lin S H, Wang C I, *et al.* A hybrid intumescent fire retardant coating from cake- and eggshell-type IFRC[J]. Powd Technol, 2010, 198(1): 149-156.
- [18] Baysal E, Altinok M, Colak M, *et al.* Fire resistance of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) treated with borates and natural extractives[J]. Bioresour Technol, 2007, 98(5): 1101-1105.
- [19] Ayrlimis N. Effect of fire retardants on internal bond strength and bond durability of structural fiberboard[J]. Build Environ, 2007, 42(3): 1200-1206.
- [20] 关瑞芳, 李宁. 无机阻燃剂的应用现状及其发展前景[J]. 合成材料老化与应用, 2013, 42(4): 55-57.
- [21] 何明明, 于广和, 孙玉泉. 国内外木材阻燃研究现状、处理技术及发展趋势[J]. 中国阻燃, 2013(2): 6-10.
- [22] 歹明莉. 磷系阻燃剂的现状与展望[J]. 中华民居旬刊, 2013(3): 328-329.
- [23] 罗杰, 罗维尔. 实木化学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1988: 424-427.
- [24] 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.
- [25] 傅深渊, 程书娜, 赵广杰, 等. 阻燃型竹丝成形材燃烧动力学和燃烧性能[J]. 浙江农林大学学报, 2009, 26(6): 767-773.
- [26] Du C G, Song J G, Chen Y X. The Effect of Applying Methods of Fire Retardant on Physical and Mechanical Properties of Bamboo Scrimber[J].

