

我国木材阻燃研究现状及发展趋势

王灵燕, 聂玉静, 陈争骥, 马灵飞*

(浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 叙述了近几年国内新型阻燃剂的研究进展, 包括卤系阻燃剂、金属系阻燃剂、磷-氮-硼复合类阻燃剂; 简述欧盟、美国、日本、中国的阻燃木材的分级标准及影响木材阻燃的因素, 如载药量、发烟性、吸湿性方面的研究; 对我国在木材阻燃的发展提出了建议, 开发低吸湿低烟高阻燃型木材、开发新的阻燃处理方式, 推动我国木材阻燃技术的进步。

关键词: 木材; 阻燃剂; 载药量; 发烟性; 吸湿性

中图分类号: S782.39

文献标识码: A

Researches on Fire-retardanding of Wood in China

WANG Ling-yan, NIE Yu-jing, CHEN Zheng-ji, MA Ling-fei*

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

Abstract: Reviews were made on researches on wood fire-retardanting in China, including halogen fire-retardant, metal fire-retardant, nitrogen-phosphorus-boron compounded fire-retardant. Relative standards of the EU, USA, Japan, China were presented as well as drug loading capacity, smokiness, hygroscopicity, environmental protection of fire-retarding wood. Suggestions were put forwarded on the further research direction of wood fire-retarding, such as high fire-retarding wood with low hygroscopicity-smokiness and new treatments of fire-retardants.

Key words: wood; fire-retardant; drug loading capacity; smokiness; hygroscopicity

木材不仅是传统的建筑用材, 广泛运用于古建筑与现代建筑中, 而且大量应用于室内装修。随着现代人对生活品质的提升, 木质家具及木质室内装饰材料等成为大众宠儿, 对于木质建筑的需求也呈逐年上升趋势。但木材是具有火灾隐患的材料, 《建筑内部装修设计防火规范》中天然木材的燃烧性能等级为 B2 级^[1], 不仅易燃, 而且燃烧时释放大量热能, 加快火灾蔓延速度。2014 年, 全国接报火灾共计 39.5 万起, 死亡 1 817 人, 受伤 1 493 人, 直接财产损失 43.9 亿元^[2]; 火灾起因各不相同, 但火势迅速扩大造成人员伤亡、财产损失等都与建筑材料、房屋内部装饰中使用塑料、木质材料等可燃材料有直接关系。为了避免财产损失, 保障人民生命安全, 对木材及木质材料进行阻燃处理迫在眉睫^[3]。

1 木材阻燃剂的研究现状

阻燃木材作为功能性木材, 除了需具有良好的阻燃性能, 还应基本保留木材原有的优良特性。理想的木材阻燃剂应该具有如下特点: (1) 阻燃效能高, 有效阻止有焰燃烧、阴燃; (2) 来源丰富, 无毒, 对环境友好;

收稿日期: 2016-05-05; 修回日期: 2016-07-18

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201204702); 国家自然科学基金 (31270592)

作者简介: 王灵燕 (1991-), 女, 在读研究生, 从事木材科学与材性改良研究; *通讯作者。

燃烧产物应少烟、低毒、无刺激性和无腐蚀性; 具有防腐、防虫性能; (3) 低吸湿性, 阻燃性能持久, 在湿度较高的环境中不易水解和流失; 阻燃后木材尺寸稳定性好; (4) 木材的物理力学性能、工艺性能、视觉、触觉等环境调节特性基本不受影响。

木材阻燃剂种类繁多, 按所含元素组成可分为: 卤系阻燃剂、金属类阻燃剂、磷-氮系阻燃剂及硼系阻燃剂等。现阶段新型阻燃剂的开发, 除开发新的阻燃剂, 还会根据阻燃机理的不同, 对两种及以上不同类别的阻燃剂复合制备具有协同阻燃效应的复合阻燃剂, 阻燃效果更加理想。

1.1 卤系阻燃剂

卤系阻燃剂抑制木材燃烧主要在起火及燃烧阶段, 化合物受热分解生成卤化氢致火焰熄灭。但卤系阻燃剂具有较高的吸湿性和潮解性, 燃烧时会生成较多的烟、腐蚀性气体和有毒气体, 且卤系阻燃剂经常与氧化锑并用, 使得材料的烟与有毒气体生成量更大。近年来, 禁用含卤阻燃剂的呼声日益高涨, 阻燃剂去卤化已是大势所趋^[4]。

1.2 金属系阻燃剂

金属系阻燃剂原以金属氢氧化物为主, 在高温下能分解释放水分子, 可延缓材料的热降解速度, 减缓或抑制材料的燃烧, 促进炭化和抑烟。现许多学者研究发现金属的其他化合物形式及其他金属也有很好的阻燃效果。

姚春华等^[5]分析了经氢氧化镁、氯化镁和碱式碳酸镁处理木粉的燃烧性能、发烟性能和成炭特性, 发现 3 种镁系化合物均明显降低木材的热释放速率和总烟释放量, 表现出良好的阻燃抑烟效果; 碱式碳酸镁与氯化镁对木材具有协同阻燃抑烟效果。云维采等^[6]以纳米氧化镁作为阻燃剂利用机械混合加入到木粉中, 当添加量为 16.7% 时氧指数达到 31%, 燃烧过程中的热释放速率、热释放量、烟产生速率、总生烟量和 CO 产率明显降低, 样品残炭率提高约 10%, 具有很好的阻燃效果。陈德胜等^[7]介绍了以二氧化铈为代表的稀土族类阻燃剂的优势及常用的制备方法, 并分析了以二氧化铈为代表的稀土族类阻燃剂的发展前景, 为探索金属类阻燃剂提供了新的方向。Taghiyari^[8-10]将纳米银浸注于样品中, 并与硼砂等物质的阻燃性能进行比较, 结果表明, 金属银能提高材料的耐火性能, 且在提高木材的阻燃性能方面有很大潜力, 但仍需要进行更多的研究。

1.3 磷-氮-硼复合类阻燃剂

磷氮系阻燃剂在木材的燃烧过程中具有降低热分解温度, 减少可燃性气体的产生, 增加炭的生成等作用, 而硼化合物遇热膨胀熔融后覆盖于材料表面, 隔断氧气, 从而阻止木材的燃烧以达到阻燃目的, 二者复合生成磷-氮-硼体系, 经验证可形成阻燃协同效应, 达到良好的阻燃效果。故磷氮硼复合类阻燃剂成为众多学者深入研究的对象^[11]。

赵爱民等^[12]采用水为溶剂经过二步反应合成了含硼膨胀型阻燃剂磷酸三聚氰胺硼酸盐, 添加阻燃剂的环氧树脂的极限氧指数达到 25%, 并有膨胀效应。姚春华等^[13]探讨了由磷酸、硼酸、双氰胺等为主要组分制备的磷-氮-硼阻燃剂的优化配方, 杨木木材氧指数从 23.4% 提高至 60%, 烟密度由 40.46% 降至 25%。王奉强^[14]合成出以羟甲基化磷酸脒基脒 (G21) 和硼酸为主要阻燃活性物质的磷-氮-硼复合木材阻燃剂 G21BA。G21BA 使胶合板的热释放、烟释放等均明显低于单独使用其活性成分处理胶合板及胶合板素材, 残炭量增加。王石进等^[15]将木材阻燃剂 FRW 与水溶性聚磷酸铵复配处理樟子松, 复配制剂处理的试样的成炭率较高, 二者之间具有阻燃协效作用, 制剂成本可降低 12% 左右。Jiang 等^[16]将羟甲基磷酸脒基脒、硼酸复合阻燃剂加入到 DMDHEU 树脂合成新的复合阻燃剂处理木材, 可显著降低木材的热释放速率、热解温度和烟释放量, 阻燃性能可达到 B1 级, 且处理后的木材保持良好的尺寸稳定性。

磷氮硼复合类阻燃剂阻燃抑烟效果优异, 但处理后木材及胶合板的胶合性能受到影响。付小丁^[17]合成三聚氰胺磷酸盐并与硼酸进行协效复配, 阻燃剂处理后的木材热释放速率、总热释放量、质量损失速率、烟释放总量均有不同程度的下降, 表面炭层的致密程度以及强度均增加, 但影响了刨花板的物理强度, 力学性能下降。杨建铭等^[18]以聚磷酸铵、硼酸和硼砂复配氮磷硼阻燃剂浸渍处理桉木, 阻燃桉木胶合板的胶合强度略有降低,

但符合国家Ⅱ类胶合板标准。马林榕等^[19]以硼酸/硼砂、磷酸和尿素制成氮磷硼系阻燃剂制备阻燃胶合板,也得出相似的结论:阻燃性能明显提高,但胶合板的胶合强度略有降低,但符合国家Ⅱ类胶合板标准。上述研究中,磷氮硼复合类阻燃剂对于胶合板胶合性能的负面影响均较大,减少该种负面影响需要更多研究。

1.4 其他复合类阻燃剂

根据阻燃机理的不同,有机类阻燃剂与无机类阻燃剂复合、阻燃物质与木材复合形成复合材料等也是当今阻燃研究的热点。王明枝等^[20]以硼酸-硼砂为阻燃剂,十二烷基二甲基甜菜碱为助剂,酚醛树脂为胶黏剂,制备杨木定向刨花板,阻燃效果明显,平均释热速率降低 31.6%,释热总量降低 30.52%,残余物质质量分数提高 37.17%,尤其是抑烟效果显著,发烟总量降低 94.94%,硼酸-硼砂与十二烷基二甲基甜菜碱之间存在显著的阻燃协同作用。赵大伟等^[21]以阻燃型石蜡乳液对云南松木材进行常压浸渍处理,阻燃剂的加入可使石蜡乳液浸渍材的氧指数上升 37.8%,达到难燃材料的标准,烟密度等级为 35.7,且具有较好的抗流失性。叶菁菁等^[22]采用碳酸钾与硅溶胶对杉木试件进行二次加压浸注处理,制得 K_2CO_3 、 SiO_2 、无机质复合木材,点燃时间较未处理试件延长近一倍,热释放速率及总量下降 30%,尤其是抑烟效果显著;同时具有良好的抗流失性能,对阻燃效力的持久保持较为有利。Kumar 等^[23]将粘土矿物与硅酸钠混合制成复合材料作为阻燃剂处理木材,处理后试件的热释放速率、有效燃烧热、质量损失和 CO 、 CO_2 释放量均降低,5 min 内试件总发热量为 $8 MJ/m^2$,完全可以作为一种新型木材阻燃剂,值得借鉴。

2 木材阻燃标准

目前,木材阻燃在国际上并没有统一的标准。ISO 1182《产品的阻燃防火测试—不燃测试》用于建筑材料难燃性测试,适用范围最广,除欧盟采用此标准外,中国 GB 8624《建筑材料及制品燃烧性能分级》标准中 A 级测试方法也参照于此;日本《建筑基准法》也引用作为不燃材料测试方法。各阻燃标准中所采用测试设备均不相同,具体阻燃标准如下。

2.1 欧盟标准

欧盟将建筑材料的燃烧性能分为 7 个等级,分别为 A1, A2, B, C, D, E, F; 或 A1f1, A2f1, Bf1, Cf1, Df1, Ef1, Ff1; 或 A1L, A2L, BL, CL, DL, EL, FL, 于 2007 年颁布实施的标准 EN 13501《建筑制品和构件的火灾分级》^[24]。A1, A1f1, A1L 级根据 EN ISO 1182^[25]和 EN ISO 1716^[26]进行测试;B, C, D 级根据 EN 13823^[27]和 EN ISO 11925-2^[28]进行测试;E 级等级根据 EN ISO 11925-2 进行测试;F 级根据 EN ISO 11925-2 进行测试但未达到 E 级要求。该标准中特别考虑了燃烧热值、火灾发展速率、产烟率等燃烧要素^[29]。

2.2 美国标准

美国将材料分为不燃性材料和可燃性材料两大类。以 ASTM E 84《建筑材料表面燃烧性能的测定方法》为基础^[30],根据试验测得的 FSI 值(及烟密度)将材料分类。FSI 值越小的材料,火灾危险性越小:A 类:FSI 值 0~25,且烟指数 < 450;B 类:FSI 值 26~75,且烟指数 < 450;C 类:FSI 值 76~200,且烟指数 < 450。

高层建筑和楼道,应采用 $FSI < 25$ 的材料, $25 < FSI < 100$ 的材料只能用于防火要求不是很严格的场所,而 $FSI > 100$ 的材料不符合阻燃的要求^[31]。

2.3 日本标准

日本标准 JISA 1321-1994《建筑物的内部装修材料及施工方法的不燃性试验方法》^[32]中,将材料按其燃烧性能分为不燃级、准不燃级和难燃级。根据日本《建筑基准法》,采用锥形量热仪作为试验装置,照射强度为 $50 kW \cdot m^{-2}$,不燃级材料需满足防火材料没有贯通到内部的裂缝和孔,燃烧 10 s 以上最高发热速度不超过 $200 kW \cdot m^{-2}$,燃烧试验 20 min 内总发热量不超过 $8 MJ \cdot m^{-2}$ 。而准不燃级材料和难燃级材料则将达到上述条件的燃烧时间分别调整为 10 min 和 5 min。

2.4 中国标准

中国对阻燃木材的分级标准主要参照欧盟,分为 7 大等级,且相应测试均按照欧盟的测试制定相关测试国

标。目前我国现行的阻燃木质材料的试验标准有: GB/T 8626-2007《建筑材料可燃性试验方法》, GB 8624-2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》, GB/T 17658-1999《阻燃木材燃烧性能试验火传播试验方法》, GA/T 42.1-1992《阻燃木材燃烧性能试验方法木垛法》, GA/T 42.2-1992《阻燃木材燃烧性能试验方法火管法》。

我国现在许多研究中对于阻燃木材阻燃性能测试均广泛采用锥形量热仪, 锥形量热仪是建立在氧消耗原理基础上的新一代聚合物材料燃烧性能测定仪, 可模拟小型火灾现场, 结果具有很强的说服力, 后续标准制定中可参照日本标准引用锥形量热仪作为测试仪器。

与上述发达国家相比, 我国在木质阻燃材料技术及标准制定方面相对落后, 应加快在建筑结构、家具以及装饰材方面木质材料阻燃性能、有毒成分含量分级、检测及评价体系的制定与完善, 与国际接轨。

3 影响木材阻燃的因素

3.1 载药量

木材的阻燃性是评价阻燃剂效果的指标。阻燃木材的燃烧难易程度与木材的载药量有着直接关系, 理论上载药量越高, 阻燃性越好^[33]。一般来说, 1 m^3 木材中不可燃性成分超过 200 kg, 即为不燃材。日本准不燃木材注入量要求为 $150\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (固体分量) 以上, 载药量不够, 木材的阻燃效果很难达到理想水平; 而载药量过高也存在成本浪费、影响木材力学性能、胶合强度等问题。但现今国内阻燃市场, 由于载药量等因素的限制, 大量阻燃级木材的阻燃性仅能达到难燃级水平, 不燃级及准不燃级木材亟待研究和开发。

3.2 发烟性

发烟性是评价阻燃剂阻燃效果的决定性因素之一。火灾中烟气及有毒性气体对人体造成的伤害很大。统计显示, 火灾中大部分死亡者是因为吸入烟尘及有毒气体昏迷致死的, 且浓烟会使人员在逃生时迷失方向, 从而过多吸入浓烟窒息, 同时也给营救工作增添难度, 火灾补救工作难以顺利进行^[34]。若阻燃剂阻燃性优异但抑烟效果差, 当实际运用于生活中, 烟气带来的伤害并没有减弱, 阻燃效果并不理想。故近年来研究抑烟型阻燃剂的报道越来越多且成果显著。

现阶段抑烟型阻燃剂研究普遍集中于磷氮类阻燃剂, 采取与硼类物质复合或加入金属物质均能有效抑烟。张晓腾等^[35]在氮磷阻燃剂中添加氢氧化镁处理杨木, 复合后烟密度等级显著低于氮磷阻燃处理材, 降低约 31.81%。潘景^[36]在不同浓度的氮磷系阻燃剂中添加不同比例的 MH/ATH ($\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{Al}(\text{OH})_3$) 进行复配, 处理后的木材烟密度等级均远小于 75, 具有很好的抑烟效果。陈旬等^[37]在木粉中添加氯化锰或碳酸锰, 阻燃木材试样的总烟释放量分别降低了 93.3% 和 31.2%, CO 平均释放量分别降低了 27% 和 8.1%。改性海泡石与聚磷酸铵在木材燃烧过程中的阻燃作用和对烟雾毒气的调控作用也得到研究^[38], 二者共同处理木材时木板的总烟释放量降低 84.42%。陈旬等、夏燎原等^[39-41]则在聚磷酸铵中加入铁、铜、锡改性及 5A 分子筛分别合成不同的复合阻燃剂, 阻燃处理后木材的烟释放量均大幅减少, 且显著降低 CO 释放量。夏燎原等^[42]制备了介孔 SiO_2 -APP 复合阻燃剂, 能有效降低杨木粉的总烟释放量, 催化木材形成炭层, 表现出显著抑烟特性。吴义强等^[43]开发了以聚磷酸铵、硼酸锌、超细化天然矿物质等为主要组分的新型 NSCFR 木材阻燃剂, CO, CO_2 总生成量降低, 抑制烟雾毒气释放, 具有显著的阻燃抑烟效果。

3.3 吸湿性

吸湿性是影响载药量的重要因素, 同时也是评价阻燃效果的决定性因素之一。经阻燃剂处理后, 特别是水基型阻燃剂, 处理材的吸湿性均有不同程度的增加。当相对湿度高于 80% 时, 吸湿性增加更为明显。有研究^[44]显示, 经无机阻燃剂处理后的木材, 在 26.7°C 、相对湿度 30% 的环境中, 含水率变化不大; 当相对湿度增加到 65% 时, 含水率增加 2%~15%; 当相对湿度达结露点时, 大多数无机阻燃剂会发生水解变质, 阻燃效果大大下降。当阻燃处理材处于相对湿度较高的环境中时, 可能会导致木材发生润胀, 加剧腐朽速度, 也会对后续加工造成不利影响。郝慧伶^[45]发现 BL 型阻燃剂吸湿性比未处理材要大很多, 限制了阻燃木材的适用范围。

吸湿性除了会影响阻燃剂的有效作用年限, 也会影响阻燃剂对金属的腐蚀性。当阻燃木材处于温湿度均较

高的环境中时,阻燃剂与木材中吸收的水分可形成电解质溶液,腐蚀建筑或者家具中用于连接或固定的五金部件,影响建筑用材或家具使用安全及寿命。若阻燃剂本身吸湿性低,阻燃处理后木材吸湿性与未处理材相比持平或更低,上述问题均在一定程度上得以解决。所以对于阻燃木材吸湿性的控制至关重要。

对此,蒋明亮等^[46]用 FR-1 处理木材,处理材吸药量从 18.3%增至 63.0%时,其吸湿率从 19.03%增加到 19.77%,增幅较小,但比对照材的 18.63%要高。涂道伍等^[47]用 KY-Fw 阻燃剂处理木材,杉木阻燃木材、泡桐阻燃木材的吸湿率分别高于素材的吸湿率约为 0.6%,0.7%。赵大伟等^[21]发现蜡乳液的浸入可以降低云南松材的吸水性,而阻燃剂的加入不会对石蜡乳液浸渍材的吸水性降低产生负面效应。

日本学者^[48-52]发现硼系物(硼酸、硼砂、硼酸锌等)、胍类是性能优良的木材阻燃剂,使用硼酸、硼砂、胍类复合磷酸、碳酸氢铵等作为木材阻燃剂,着重提高硼酸等物质在水中的溶解性,制得高浓度硼类阻燃剂;处理后木材干物质增重量达到未处理前的 60%以上;锥形量热仪所得数据表明处理材的阻燃性能为不燃级水平,且木材吸湿性与素材相比几乎持平甚至更低,有效地解决上述所述高吸湿性所带来的问题,值得更深入研究。

4 木材阻燃发展趋势

木材使用场所与人的活动密切关联。阻燃处理的目的是减少火灾事故发生,同时延长木制品的寿命,从而节约森林资源。在阻燃处理的过程中,要增强阻燃剂中有效成分与木材主成分之间的相互结合,一方面加强阻燃剂的有效性,另一方面减少阻燃剂对外界环境可能造成的污染^[53]。这不仅有利于保护环境,更有利于可持续发展。阻燃剂去卤化即是实现环保性的一个重要体现。

4.1 开发低湿低烟高阻燃性木材

未来的木材阻燃剂不仅要求具有防腐性、防虫(防朽)性及结构尺寸稳定性,最应具备的特征是——低吸湿低烟高阻燃性。低吸湿性能除了能提高阻燃剂本身的耐流失性能,而且能减少后续加工的不良影响,增加阻燃剂或阻燃产品的有效使用年限,未来需加大对低吸湿木材阻燃的研究。

研究显示,氮磷类阻燃剂与硼类阻燃剂或金属类物质复合后能有效阻燃及抑烟。结合国内外学者对于降低阻燃剂吸湿性的研究,将三者复合生成氮磷-硼-金属阻燃剂以达到低吸湿低烟高阻燃目的研究亟待开展。

4.2 开发新的阻燃处理方式

目前对于木材的阻燃处理大多还是将基础材全部浸入阻燃剂,以提高载药量达到好的阻燃效果。高载药量是高阻燃性的保证,但同时也增加了生产成本等,且不同的使用地点对于阻燃木材的要求也各不相同。以较低载药量满足不同阻燃性也是研究的方向之一。

4.2.1 分层阻燃处理 分层阻燃处理,即对板材不同位置采取不同程度的阻燃处理。对于表层及表层以下一定深度的部位进行高浓度阻燃处理,以达到不燃级标准,使得一定时间内火焰无法达到木材内部;而对于芯部的木材阻燃处理时,载药量仅需达到难燃级或准不燃级即可。因地制宜使用处理方式,以达生产利益、环境友好最大化。

4.2.2 表面封存处理 表面分层处理,即用树脂等对阻燃处理后的木材表面进行二次封存处理,防止内部阻燃药剂析出至表面,影响后续加工和使用,降低阻燃性能。

4.2.3 表面穿孔注入 表面穿孔注入,即在待处理木材表面等距离打出直径为 1 mm 的深孔,孔深及孔间间隔视具体而定,再进行真空加压等处理,此法能有效控制大径级厚板阻燃药剂的渗入深度、均匀度及载药量。

当前,提高药剂注入量,保证载药量达到准不燃级、不燃级水平的阻燃木材投入实际使用,同时开发具备低烟、低吸湿性、高阻燃性的环保型阻燃剂是迫切所需;重视木材阻燃剂的环保和安全性能,亟待我国在木质阻燃材料技术的研究及标准制定与完善。

参考文献:

- [1] 陆斌. 木材阻燃技术的应用和存在的问题[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2006(s1): 119-120.

- [2] 张樵苏. 2014 年全国火灾伤亡人数同比下降[EB/OL]. (2015-02-13) http://news.xinhuanet.com/legal/2015-02/13/c_1114368320.htm.
- [3] 嘎力巴, 刘妹, 王鲁英. 木材阻燃研究及发展趋势[J]. 化学与黏合, 2012 (4): 68-71.
- [4] 周勇. 国内外无卤阻燃剂的研究进展(续)[J]. 江苏科技信息, 2012 (4): 37-39.
- [5] 姚春花, 吴义强, 胡云楚. 3 种无机镁系化合物对木材的阻燃特性及作用机理[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32 (1): 18-23.
- [6] 云维采, 纪全, 谭利文. 纳米氧化镁对木材的阻燃特性[J]. 应用化工, 2015, 44 (6): 1 057-1 060.
- [7] 陈德胜, 金虎成. 铈化合物阻燃应用与制备研究[J]. 装备制造技术, 2015 (4): 266-268.
- [8] Taghiyari H R. Fire-retarding properties of nano-silver in solid woods[J]. Wood Sci Technol, 2012, 46 (5): 939-952.
- [9] Taghiyari H R. Study on the effect of nano-silver impregnation on mechanical properties of heat-treated Populus nigra[J]. Wood Sci Technol, 2011, 45 (2): 399-404.
- [10] Taghiyari H R. Effects of nano-silver on gas and liquid permeability of particleboard[J]. Digest J Nanomater Biostruct, 2011, 6 (4): 1 509-1 517.
- [11] 王清文. 新型木材阻燃剂 FRW[J]. 精细与专用化学品, 2003, 11 (2): 12-13.
- [12] 赵爱明, 董延茂, 鲍治宇. 磷酸三聚氰胺磷酸盐阻燃剂的合成[J]. 山东化工, 2009, 38 (12): 1-6.
- [13] 姚春花, 卿彦, 吴义强. 磷-氮-硼复合木材阻燃剂配方优化及处理工艺[J]. 林业科技开发, 2010, 24 (5): 91-93.
- [14] 王奉强. 羟甲基化磷酸脒基脲/硼酸复合阻燃剂的合成与性能研究[D]. 东北林业大学, 2011.
- [15] 王石进, 王奉强, 王清文. 木材阻燃剂 FRW 与聚磷酸铵复配的阻燃协同效应研究[J]. 木材工业, 2014, 28 (3): 17-21.
- [16] Jiang T, Feng X, Wang Q, et al. Fire performance of oak wood modified with N-methylol resin and methylolated guanylurea phosphate/boric acid-based fire retardant[J]. Construct Build Mater, 2014, 72: 1-6.
- [17] 付晓丁. 磷氮硼阻燃剂的制备及其对刨花板阻燃性能影响的研究[D]. 中国林业科学研究院, 2012.
- [18] 杨建铭, 朱晓丹, 田翠花. 氮磷硼复合阻燃按木胶合板的性能评价[J]. 林产工业, 2014, 41 (5): 17-20.
- [19] 马林榕, 张世锋, 高强. 氮磷硼阻燃剂及制备阻燃胶合板的性能评价[J]. 木材工业, 2014, 28 (3): 30-33.
- [20] 王明枝, 张宇, 曹金珍. 硼酸-硼砂及甜菜碱处理定向刨花板的协效阻燃性能[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36 (1): 114-120.
- [21] 赵大伟, 徐忠勇, 蒲黄彪. 石蜡乳液浸渍云南松材的燃烧性能及吸湿吸水性研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, (3): 95-99.
- [22] 叶箐箐, 赖俊英, 钱晓倩. 碳酸钾与硅溶胶复合对木材阻燃改性研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 38 (9): 24-27.
- [23] Kumar S P, Takamori S, Araki H, et al. Flame retardancy of clay-sodium silicate composite coatings on wood for construction purposes[J]. Rsc Advances, 2015, 5 (43): 34 109-34 116.
- [24] Institution B S. Fire classification of construction products and building elements. Classification using test data from reaction to fire tests[J]. International Organization, 2007.
- [25] Institution B S. BS EN ISO 1182. Reaction to fire tests for building and transport products. Non-combustibility test[J]. International Organization, 2002.
- [26] Institution B S. Reaction to fire tests for building and transport products - Determination of the heat of combustion[J]. International Organization, 2002.
- [27] Standards B. Reaction To Fire Tests For Building Products - Building Products Excluding Floorings Exposed To The Thermal Attack By A Single Burning Item[J]. International Organization, 2002.
- [28] Institution B S. Reaction to fire tests. Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame. Single-flame source test[J]. International Organization, 2002.
- [29] 庞维峰, 曹永建, 谢桂军. 木质材料阻燃技术及标准发展现状与展望[J]. 广东林业科技, 2012, 28 (3): 57-61.
- [30] Standard N. Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials[J]. Astm., 2009.
- [31] 纪磊, 陈志林, 蔡智勇. 美国阻燃处理木材的现状[J]. 木材工业, 2011, 25 (2): 26-28.
- [32] JIS A 1321, Testing method for incombustibility of internal finish material and procedure of buildings[S]. Japan: Technical Committee on Architecture, 1994.
- [33] 张志军, 陈成, 王清文. 水基型木材阻燃剂吸湿性评价[J]. 林产工业, 2007, 34 (2): 28-30.
- [34] 黄锐, 杨立中, 方伟峰. 火灾烟气危害性研究及其进展[J]. 中国工程科学, 2002, 4 (7): 80-85.
- [35] 张晓滕, 母军, 储德森. MH 复合 N-P 阻燃剂的合成及其浸渍处理杨木的阻燃抑烟性研究[J]. 化工新型材料, 2015, (1): 126-129.
- [36] 潘景. 阻燃剂对杨木抑烟效果的研究和机理探索[D]. 北京林业大学, 2013.
- [37] 陈旬, 袁利萍, 胡云楚. 两种锰化合物对木材阻燃抑烟作用的比较研究[J]. 功能材料, 2014 (11): 11076-11080.

- [38] 陈旬, 袁利萍, 胡云楚. 聚磷酸铵和改性海泡石处理木材的阻燃抑烟作用[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(10): 147-152.
- [39] 陈旬, 袁利萍, 胡云楚. 锥形量热法研究 APP/5A 分子筛对木材的阻燃抑烟作用[J]. 林产化学与工业, 2014, 34(2): 45-50.
- [40] 夏燎原, 田梁材, 胡云楚. 改性 13X 分子筛在聚磷酸铵阻燃碎料板中的协同作用与烟气转化行为[J]. 林产化学与工业, 2014, 34(3): 31-36.
- [41] 夏燎原, 吴义强, 胡云楚. 锡掺杂介孔分子筛在木材阻燃中的烟气转化作用[J]. 无机材料学报, 2013, 28(5): 532-536.
- [42] 夏燎原, 胡云楚, 吴义强. 介孔 SiO_2 -APP 复合阻燃剂的制备及其对木材的阻燃抑烟作用[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(1): 9-13.
- [43] 吴义强, 姚春花, 胡云楚. NSCFR 木材阻燃剂阻燃抑烟特性及其作用机制[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(1): 1-8.
- [44] 王永强. 阻燃材料及应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 559-560.
- [45] 郝慧伶. 阻燃杨木单板与胶合板的吸湿性研究[D]. 北京林业大学, 2011.
- [46] 蒋明亮, 刘秀英. FR-1 阻燃处理材的吸湿性与野外耐腐蚀性[J]. 木材工业, 2002, 16(4): 18-19.
- [47] 涂道伍, 徐斌, 邵卓平. KY-Fw 木材阻燃剂对木材吸湿性和尺寸稳定性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(4): 473-476.
- [48] 伊藤貴文, 木質材料の不燃化方法及び不燃化木質材料[P]. 日本专利: P2009-113258A, 2009-05-28.
- [49] 谷口謙, 木材および木質材料などの準不燃化および不燃化処理方法[P]. 日本, P2003-291110A, 2003-10-14.
- [50] 日高 明広, 不燃ボードの製造方法[P]. 日本, P201023462A, 2010-02-04.
- [51] 関川 秀友, 不燃木材板の製造方法[P]. 日本, P2006182024, 2006-07-13.
- [52] 根岸 さち子, 不燃木材板の製造方法[P]. 日本, P2005186620A, 2005-07-14.
- [53] 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.