

# 硼化物及磷酸盐处理 人工林木材的燃烧性能比较

吴玉章

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 利用锥形量热仪评价了阻燃处理人工林木材的燃烧性能, 比较了硼化物及磷酸二氢铵阻燃物质对点燃、释热、发烟的作用效果。结果表明, 硼化物对抑制木材点燃、释热, 减少失重等作用效果不及磷酸二氢铵, 但其抑烟效果优于磷酸二氢铵, 这与两者作用机理不同有关。

**关键词:** 燃烧性能; 人工林木材; 锥形量热仪; 硼化物; 磷酸二氢铵

中图分类号: S782.39 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2005)02-0035-04

## Comparison of Burning Behavior between Boride and Ammonium Phosphate Treated Plantation Wood

WU Yu-zhang

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In this study, the burning behaviors of three species of plantation wood (*Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana* and *Populus euramericana* cv. 'I-214'), respectively treated with two retardants, boride ( $H_3BO_3 : Na_2B_4O_7 = 1 : 1$ ) and ammonium primary phosphate, were all tested by cone calorimeter. The fire retarding effect of these retardants was evaluated by comparing the burning indexes of these three treated wood species, such as ignition time, mass loss rate, heat release rate, total heat released and total smoke production. It was found that the boride fire-retardant had poorer results in inhibiting ignition, heat release and mass loss in wood than the ammonium primary phosphate, but it was more effective than the latter in hindering smoking. These differences were analyzed and related with the retarding mechanisms of the two retardants.

**Key words:** Burning behavior; Plantation wood; Cone calorimeter; Boride; Ammonium primary phosphate

用于木材及木质材料的阻燃剂多为含P、N、B等元素的物质, 其最大优点是阻燃性能优良、本身无毒无害、燃烧时不产生有毒有害物质, 使用安全。尽管这类阻燃剂的性能还不完善, 但一直是木材阻燃研究和开发的重点, 如国内李坚等<sup>[1,2]</sup>研究和开发的FRW木材阻燃剂。

在评价阻燃性能方面, 国内的主要手段还是氧指数法(主要用于实验室研究)及建筑材料燃烧性能分级方法<sup>[3]</sup>, 即竖炉燃烧法(主要用于产品检验)等, 而国外已基本采用锥形量热仪方法, 对结构用材还有实大尺寸燃烧法, 并配有相应的评价标准<sup>[4,5]</sup>。为了与国际接轨, 国内也开始采用锥形量热仪进行阻燃性能评价<sup>[1,2,6]</sup>。以往的试验方法很多是在对火灾性状的工学知识还不完备的情况下开发出来的, 没有充分反映出现实发生火灾的环境, 而锥形量热仪充分考虑了火灾实际发生的状态, 模拟火灾实际发生的条件,

收稿日期: 2004-04-22; 修改稿: 2004-04-29

基金项目: 中日技术合作 JICA 渠道“中国人工林木材研究”项目内容之一。

作者简介: 吴玉章(1966—), 男, 中国林科院木材工业研究所副研究员, 博士。

研究材料燃烧、释热、发烟等情况,对材料燃烧特性的评价更具科学性和合理性<sup>[7]</sup>。本文利用锥形量热仪评价硼化物与磷酸二氢铵处理木材的燃烧性能,同时对硼化物与磷酸二氢铵的作用效果进行比较。

1 材料与方法

1.1 材料

试材 杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松(*Pinus massoniana*),采自江西大岗山林场;杨木(*Populus euramericana* cv. ‘I-214’)采自辽宁。木材气干后,按 ISO 5660-1 要求加工成幅面尺寸 100 mm×100 mm(*L*×*T* 或 *L*×*R*)、厚度 10 mm 的试样。每个条件重复试验 3 次。

阻燃物质 硼酸与硼砂混合物(混合比 1:1);磷酸二氢铵((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)。硼酸、硼砂、磷酸二氢铵均为化学纯,市售。

1.2 方法

将阻燃物质配成质量分数为 10%、25%和 35%的水溶液,采用真空法浸注到木材中。在 60 ℃下将处理材烘干至恒重,放进干燥器内准备作燃烧试验。采用 C3 型锥形量热仪(日本东洋制机),热源辐射强度为 50 kW/m<sup>2</sup>。为了减少外界的影响,将试样除加热面以外的其余 5 个面用铝箔包覆,放入不锈钢固定架内,为防止热量从试样背面向外传递,采用隔热棉隔断。每 2 s 读取数据一次,由计算机自动完成。

1.3 燃烧性能评价指标

为了比较 2 种阻燃物质对木材燃烧性能的影响及其作用效果,选择以下指标评定材料的燃烧特性:(1)引燃时间,即样品从加热开始到出现稳定火焰的时间,主要反映了木材被点燃的难易程度;(2)释热速率(*HRR*)和释热总量(*THR*),表示某一时刻木材受热分解释热的速率和总量;(3)有效燃烧热(*HOC*),木材受热分解每损失 1%质量的物质(即木材热解产生的可挥发性物质)燃烧所放出的热量;(4)平均失重率,反映木材受热分解质量减少的平均速率;(5)发烟总量(*TSP*),反映木材受热分解时某一时刻的发烟总量。测量方法均按文献[4,5]的规定进行。

2 结果与分析

2.1 引燃时间

表 1 中列出了 2 种阻燃物质不同吸收量下的木材引燃时间。在本试验条件下,不论吸收量如何,对杉木的引燃时间而言,硼化物与磷酸二氢铵之间没有显著差异。虽然随着硼化物的吸收量增加,杉木的引

燃时间有延长趋势,但这种变化还不足以说明对抑制木材着火有效。

对杨木和马尾松,随着阻燃物质吸收量的变化,二者之间显现出差异。吸收量低时,不论是硼化物还是磷酸二氢铵处理的木材,引燃时间略有增减,但变化不显著。随着吸收量的增加,两者之间的差异开始明显。当磷酸二氢铵吸收量超过 100 kg/m<sup>3</sup>后,木材引燃时间明显延长或未被点燃。硼化物则不然,即使吸收量超过 100 kg/m<sup>3</sup>,也未达到抑制点燃的效果。

以上结果与试验观察现象一致。磷酸二氢铵处理的杨木和马尾松木材,当其吸收量低于 100 kg/m<sup>3</sup>时很快被点燃,而吸收量超过 100 kg/m<sup>3</sup>后经过较长时间才会有稳定的火焰,有的甚至一直未产生稳定的火焰;硼化物处理的木材,在本试验的吸收量下很快产生稳定的火焰,说明硼化物抑制点燃的作用效果不如磷酸二氢铵。

表 1 2 种阻燃物质对木材燃烧性能的影响  
Tab. 1 Burning behaviors of 3 wood species treated with 2 retardants at different retentions

| 树种  | 阻燃物质  | 吸收量<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 引燃时间<br>/s | 有效燃烧热<br>/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) | 平均失重率<br>/(g·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ) |
|-----|-------|-------------------------------|------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| 杉木  | 硼化物   | 0                             | 12.0       | 13.55                            | 7.47                                            |
|     |       | 46.6                          | 13.8       | 8.58                             | 7.51                                            |
|     |       | 103.3                         | 17.8       | 9.00                             | 6.40                                            |
|     |       | 134.4                         | 24.2       | 8.86                             | 5.66                                            |
|     | 磷酸二氢铵 | 48.8                          | 8.8        | 8.04                             | 5.42                                            |
|     |       | 98.3                          | 11.0       | 7.19                             | 4.55                                            |
| 杨木  | 硼化物   | 0                             | 11.0       | 11.66                            | 10.44                                           |
|     |       | 66.3                          | 16.8       | 6.90                             | 9.35                                            |
|     |       | 124.3                         | 16.0       | 6.82                             | 7.20                                            |
|     |       | 149.1                         | 20.4       | 6.78                             | 6.30                                            |
|     | 磷酸二氢铵 | 58.7                          | 9.1        | 7.35                             | 6.54                                            |
|     |       | 113.5                         | 未点燃        | 0.59                             | 4.51                                            |
| 马尾松 | 硼化物   | 229.3                         | 280.0      | 1.02                             | 4.91                                            |
|     | 磷酸二氢铵 | 0                             | 20.8       | 12.12                            | 13.31                                           |
|     |       | 53.6                          | 14.5       | 8.27                             | 10.08                                           |
|     |       | 135.9                         | 21.4       | 6.72                             | 7.77                                            |
|     |       | 236.2                         | 85.7       | 3.81                             | 6.88                                            |
|     | 磷酸二氢铵 | 79.4                          | 20.7       | 5.19                             | 8.41                                            |
|     |       | 180.5                         | 未点燃        | 0.75                             | 5.57                                            |
|     |       | 216.0                         | 未点燃        | 0.33                             | 5.95                                            |

2.2 有效燃烧热和平均失重率

表 1 还列出了 2 种阻燃物质不同吸收量下的木材有效燃烧热和平均失重率。在本试验条件下,吸收量对杉木的有效燃烧热没有显著差异。阻燃处理后木材有效燃烧热可降低 30%~40%,即使吸收量增加,有效燃烧热的降低幅度并没有太大改变。

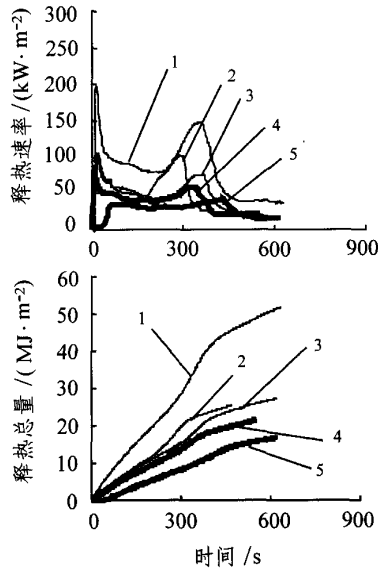
对于杨木和马尾松,随着阻燃物质吸收量的变化,二者之间显现出差异。吸收量低时,硼化物与磷酸二氢铵处理木材的有效燃烧热都降低了 30%~

40%。随着吸收量的再增加,两者之间的差异开始明显。当磷酸二氢铵吸收量超过  $100\text{ kg/m}^3$  后,有效燃烧热降低到  $1\text{ MJ/kg}$  或以下,而硼化物处理的试样随吸收量增加而没有太大降低幅度。说明磷酸二氢铵吸收量超过  $100\text{ kg/m}^3$  后,降低有效燃烧热的作用效果优于硼化物。

从平均失重率的变化来看,2 种阻燃物质效果差异不显著,磷酸二氢铵略优于硼化物。

2.3 释热速率和释热总量

图 1~3 显示阻燃处理木材的释热速率和释热总量变化过程。在本试验条件下,两种阻燃物质都不同程度地降低了木材的释热速率和释热总量,其中磷酸二氢铵降低幅度最大,尤其是吸收量超过  $100\text{ kg/m}^3$  后,杨木和马尾松的释热速率和释热总量降低更为明显,释热过程缓慢发生。



1. 对照;2. 硼化物  $52.7\text{ kg/m}^3$ ;3. 硼化物  $113.3\text{ kg/m}^3$ ;  
4. 磷酸二氢铵  $48.8\text{ kg/m}^3$ ;5. 磷酸二氢铵  $98.3\text{ kg/m}^3$

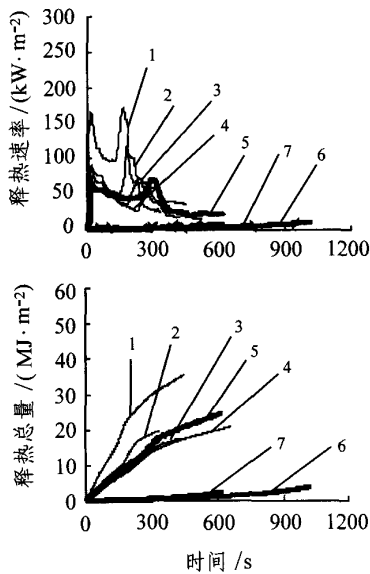
图 1 杉木木材释热速率和释热总量

Fig. 1 Rate and total amount of heat release of Chinese Fir

2.4 发烟总量

阻燃处理木材的发烟总量的变化过程如图 4~6 所示。在抑制发烟方面,硼化物处理的木材,随着吸收量的增加,其发烟量有增加趋势,但不论吸收量高低,其发烟量都比未处理木材的低;在低吸收量时,磷酸二氢铵处理材的发烟量低于未处理材,随着吸收量的增加,其发烟量亦增加。当吸收量超过  $100\text{ kg/m}^3$  后,发烟量超过未处理材。这种结果与试验观察到的现象相符,说明硼化物的抑烟效果优于磷酸二氢铵。

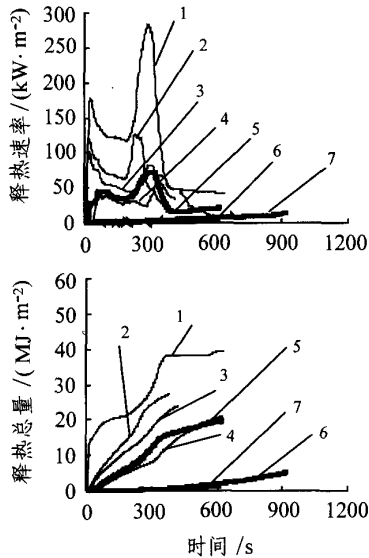
综上所述,两种阻燃物质在引燃、释热和发烟方



1. 对照;2. 硼化物  $60.8\text{ kg/m}^3$ ;3. 硼化物  $114.0\text{ kg/m}^3$ ;  
4. 硼化物  $152.4\text{ kg/m}^3$ ;5. 磷酸二氢铵  $58.7\text{ kg/m}^3$ ;  
6. 磷酸二氢铵  $113.5\text{ kg/m}^3$ ;7. 磷酸二氢铵  $229.3\text{ kg/m}^3$

图 2 杨木木材释热速率和释热总量

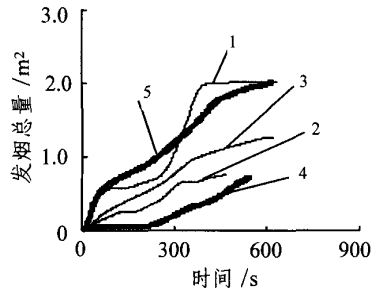
Fig. 2 Rate and total amount of heat release of Poplar



1. 对照;2. 硼化物  $51.2\text{ kg/m}^3$ ;3. 硼化物  $118.4\text{ kg/m}^3$ ;  
4. 硼化物  $214.2\text{ kg/m}^3$ ;5. 磷酸二氢铵  $79.4\text{ kg/m}^3$ ;  
6. 磷酸二氢铵  $180.5\text{ kg/m}^3$ ;7. 磷酸二氢铵  $216.0\text{ kg/m}^3$

图 3 马尾松木材释热速率和释热总量

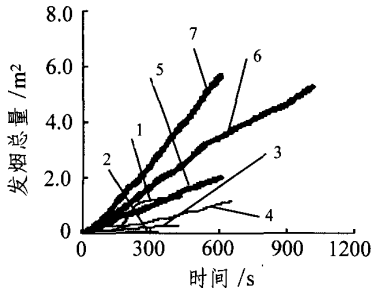
Fig. 3 Rate and total amount of heat release of Masson Pine 面表现出不同的作用效果。磷酸二氢铵在抑制点燃、释热方面优于硼化物,而硼化物在抑烟方面优于磷酸二氢铵,这是因为两者的作用机理<sup>[8~10]</sup>不同所致。磷酸二氢铵在促进木材脱水炭化的同时产生不燃性气体,改变了木材热解途径,而且产生的不燃性气体



1. 对照; 2. 硼化物 52.7 kg/m<sup>3</sup>; 3. 硼化物 113.3 kg/m<sup>3</sup>;  
4. 磷酸二氢铵 48.8 kg/m<sup>3</sup>; 5. 磷酸二氢铵 98.3 kg/m<sup>3</sup>

图 4 不同阻燃剂种类与吸收量时杉木处理材发烟总量

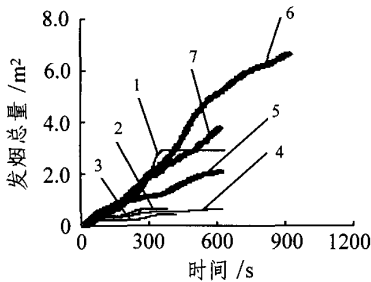
Fig. 4 Total smoke production of Chinese Fir



1. 对照 2. 硼化物 60.8 kg/m<sup>3</sup>; 3. 硼化物 114.0 kg/m<sup>3</sup>;  
4. 硼化物 152.4 kg/m<sup>3</sup>; 5. 磷酸二氢铵 58.7 kg/m<sup>3</sup>;  
6. 磷酸二氢铵 113.5 kg/m<sup>3</sup>; 7. 磷酸二氢铵 229.3 kg/m<sup>3</sup>

图 5 不同阻燃剂种类与吸收量时杨木处理材发烟总量

Fig. 5 Total smoke production of Poplar



1. 对照; 2. 硼化物 51.2 kg/m<sup>3</sup>; 3. 硼化物 118.4 kg/m<sup>3</sup>;  
4. 硼化物 214.2 kg/m<sup>3</sup>; 5. 磷酸二氢铵 79.4 kg/m<sup>3</sup>;  
6. 磷酸二氢铵 180.5 kg/m<sup>3</sup>; 7. 磷酸二氢铵 216.0 kg/m<sup>3</sup>

图 6 不同阻燃剂种类与吸收量时马尾松材发烟总量

Fig. 6 Total smoke production of Masson Pine

可以稀释木材热解产生的可燃性气体的浓度,使木材在受热初期不被点燃。但脱水炭化作用导致炭微粒的增加,烟密度增加,硼化物是低熔点的化合物,加热形成玻璃状涂膜覆在聚合物表面,起到隔热阻氧的作用。因此,在抑制点燃、释热方面不如磷酸二氢铵。另外,硼化物没有脱水炭化作用,也不会增加炭微粒,故烟密度也不会增加。

3 结论

磷酸二氢铵抑制点燃、释热、降低失重等效果优于硼化物,而抑烟效果逊于硼化物。不同树种的处理材,其阻燃性能也有一定差异。

本文得到日方专家池田敦、林良兴等指导,特致谢意!

参考文献:

[1] 李坚,王清文,李淑君,等. 用 CONE 法研究木材阻燃物质 FRW 的阻燃性能[J]. 林业科学,2002,38(5): 108-114.

[2] 李坚,王清文,李淑君,等. 用 CONE 法研究木材阻燃物质 FRW 的抑烟性能[J]. 林业科学,2002,38 (6):103-109.

[3] GB 8624-1997. 建筑材料燃烧性能分级方法[S].

[4] ISO5660-1, 1993(E). International Standard[S].

[5] ISO/FDIS834-1, 1997(E). International Standard[S].

[6] 吴玉章,原田寿朗. 人工林木材燃烧性能的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 131-136.

[7] 原田寿朗. 木材燃烧性能及耐火性能的研究[R]. 森林综合研究所研究报告第 378 号,2000.

[8] 薛恩钰,曾敏修. 阻燃科学及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1988;96-106.

[9] 王元宏. 阻燃物质化学及其应用[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1988;97-239.

[10] 李坚. 新型木材[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1993;79-104.

(责任编辑 袁东岩)

第十次全国木材干燥学术讨论会

征文启事

为满足经济建设对干燥木材的大量需求,近年来木材干燥生产能力迅速扩大,木材干燥技术也有长足进步,形成一定规模、具有中国特色的木材干燥生产体系。但在木材干燥发展中仍存干燥企业规模小、无序的市场竞争等很多问题,在干燥设备制造和质量控制方面亦有很大的差距。对此,中国林学会木材工业分会木材干燥研究会和中国林产工业协会木材干燥专业委员会初定,今年 10 月中旬在北京(具体地点和日期另行通知)联合召开第十次全国木材干燥学术讨论会,以推动木材干燥工业的持续、健康、快速发展。

会议议题:强化木材干燥技术创新力度,提高木材干燥质量,在实现木材资源高效和节约利用方面发挥木材干燥重要作用。现开始广泛征集论文,欢迎木材干燥工作者积极撰文投稿,论文将统一汇集编成册。并欢迎生产企业和个人赞助论文出版。截稿时间:

论文题目和摘要:2005 年 4 月 10 号

论文稿:2005 年 6 月 10 日

书写格式及投稿要求,请咨询:张璧光教授

zhangbg@bjfu.edu.cn 或 hbguang@sohu.com

电 话:010-62337960,62338569

传 真:010-62337742

会务咨询:高建民

电 话:010-62337960,80693913,62338878