

文章编号: 1000-5692(2005)02-0198-05

不同竹龄毛竹材燃烧性能的研究

卢凤珠¹, 徐跃标², 钱俊¹, 徐群芳³, 严建敏¹

(1. 浙江林学院 工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省东阳市千祥林业站 浙江 东阳 322124

3. 浙江林学院 理学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 利用锥形量热仪, 在 $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的热辐射功率下, 对 1~6 年生的毛竹 *Phyllostachys pubescens* 人工林竹材的燃烧性能指标进行了测定。结果表明: 随着竹龄的增加, 毛竹材的点燃时间、释烟总量和比消光面积均有所增大, 质量损失率和第一释热峰有所下降, 第二释热峰与竹龄无显著相关, 但出现的时间延迟; 4 年生以上的毛竹材各项燃烧性能指标趋于稳定。图 3 表 2 参 8

关键词: 木材学; 毛竹; 竹材; 燃烧性能; 锥形量热仪

中图分类号: S781.9 **文献标识码:** A

采用锥形量热仪 (CONE) 对木质材料阻燃性的研究已有许多报道^[1~9], 但对竹材方面的研究尚未见报道。本文利用 CONE 对 1~6 年生的毛竹 *Phyllostachys pubescens* 人工林竹材燃烧性能指标进行了测定, 分析了竹龄与各项燃烧参数之间的相关性, 为毛竹材的阻燃研究和工业化利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试材采集与加工

1.1.1 试材来源 毛竹试材于 2004 年 6 月采自浙江省临安市三口镇。每竹龄取胸径 105~110 mm 样竹 3 株, 共 18 株。毛竹齐地砍倒后, 由刀口向上取 800 mm, 按竹龄分成 6 组, 编号后运回实验室^[7]。

1.1.2 试件加工 ①试件要求: 锥型量热仪对试件的要求为边长 100 mm 的正方形, 试件厚度不超过 50 mm。②试件加工步骤: 为了使试件符合测试要求, 先把毛竹加工成 16 mm 宽的竹片, 然后把竹片去青去黄定厚加工成长×宽(弦向)×厚(径向)为 800 mm×16 mm×8 mm 的竹条, 每块竹条由下而上截取 100 mm, 用竹扞把所截的竹块按弦向平拼做成试件, 其规格长×宽(弦向)×厚(径向)为 100 mm×100 mm×8 mm。每组试件 3 个, 共 18 个试件。

1.2 试验仪器设备

锥形量热仪 (ASTME-1354-93, ISO 5660), 英国燃烧测试技术公司生产; DGG-9240 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海森信实验仪器有限公司出品; EL-10KA 高低交变湿热试验机, 广州爱斯佩克环境仪器有限公司制造。

1.3 试验方法

先将竹材于 60 °C 下干燥, 然后在相对湿度 65%、温度 20 °C 的高低交变湿热试验机中调节含水率恒定在 11%~12% 后用于 CONE 实验。

收稿日期: 2004-09-08; 修回日期: 2004-12-20

基金项目: 浙江省科学技术厅重大项目(2003C12009)

作者简介: 卢凤珠, 实验师, 从事阻燃技术等研究。E-mail: fengzhulu@yahoo.com.cn

为使实验温度接近真实火灾温度, 本实验 CONE 的热辐射功率采用 $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 相应温度在 $743 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。将竹材除加热面外的所有面用铝箔纸包裹, 放入不锈钢的试件架内, 并用石棉隔断热量从样品背面向外传递, 以减少外界的影响。数据 5 s 读取 1 次, 由计算机自动完成。根据测试结果, 分析毛竹材的燃烧特性。

2 结果与分析

2.1 毛竹材燃烧过程分析

2.1.1 点燃时间 (time to ignition, TTI) 指材料从加热开始到表面形成稳定火焰所需要的时间, 主要反映了材料被点燃的难易程度。一般来说 TTI 越大, 材料越不易点燃, 火灾危险性越小。从表 1 列出的不同竹龄毛竹材燃烧性能指标可知: 随着竹龄的增加, 毛竹材的基本密度逐渐增大, TTI 也呈增加趋势, 4 年生竹材的 TTI 达到最大, 而后变化幅度不明显。

2.1.2 释热速率 (heat release rate, HRR) 指单位时间内单位面积试件燃烧释放热量的速率。CONE 给出材料燃烧过程中 HRR 随时间的动态变化, HRR 的最大值称释热速率峰值 (pkHRR)。HRR 是评价材料火灾安全性能最重要的指标之一。HRR 或 pkHRR 越大, 单位时间内燃烧反馈给材料单位表面积的热量就越多, 结果造成材料热解速度加快和挥发性可燃物生成量增多, 从而加速了火焰的传播。因此, HRR 或 pkHRR 越大, 材料在火灾中的危险性就越大^[3]。

从图 1 给出的试件释热速率随加热时间而变化的曲线可知, 竹材燃烧发热有 4 个阶段: ①试件从着火到表面燃烧的快速放热阶段, 出现了第一释热峰, 即第一释热峰对应于试件点燃时的短暂有焰燃

表 1 不同竹龄毛竹材的燃烧性能对比

Table 1 Comparison of burning behavior of *Phyllostachys pubescens* wood at different ages

竹龄/a	基本密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	点燃时 间/s	释热速率/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)		质量损失率 ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	释烟总量/ ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	比消光面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$)			
			第一释热峰	第二释热峰			a_{60}	a_{180}	a_{300}	
1	①	583	21	213.5 (55)	219.6 (205)	0.241	151.1	55.7	40.6	35.3
	②	574	22	219.8 (45)	251.2 (205)	0.249	155.6	42.9	39.6	36.4
	③	581	20	198.4 (45)	225.1 (205)	0.232	143.2	47.8	34.5	34.2
	平均	579	21.0	210.6 (48)	232.0 (205)	0.241	150.0	48.8	38.2	35.3
2	①	618	22	198.6 (50)	225.7 (230)	0.230	184.5	57.2	31.1	39.3
	②	601	21	192.5 (45)	300.3 (240)	0.289	155.0	43.5	21.0	32.3
	③	593	21	202.5 (45)	250.4 (255)	0.259	138.1	43.3	19.9	27.5
	平均	604	21.3	197.9 (47)	258.8 (242)	0.259	159.2	48.0	24.0	33.0
3	①	613	22	188.7 (50)	234.9 (215)	0.274	205.2	55.8	40.3	43.1
	②	625	23	197.3 (45)	233.0 (225)	0.217	159.4	49.6	35.1	37.5
	③	619	22	192.8 (40)	211.1 (210)	0.215	159.4	50.9	31.7	34.6
	平均	619	22.3	192.9 (45)	226.3 (217)	0.235	174.7	52.1	35.7	38.4
4	①	649	27	204.5 (55)	234.1 (220)	0.219	289.0	67.5	55.7	56.4
	②	657	25	198.3 (60)	263.7 (220)	0.244	262.0	78.1	51.6	54.3
	③	658	27	199.1 (55)	295.5 (240)	0.263	247.0	68.7	47.9	51.6
	平均	655	26.3	200.6 (57)	264.4 (230)	0.242	266.0	71.4	51.7	54.1
5	①	640	27	192.8 (55)	223.5 (260)	0.210	250.7	71.9	45.4	51.0
	②	663	23	188.4 (55)	213.5 (255)	0.202	298.7	82.0	53.8	64.1
	③	642	27	194.5 (55)	262.7 (265)	0.225	248.0	70.9	45.0	53.1
	平均	648	25.7	191.9 (55)	233.2 (260)	0.212	265.8	74.9	48.1	56.1
6	①	633	25	191.6 (50)	224.1 (275)	0.190	257.8	71.6	49.8	58.6
	②	655	26	180.1 (45)	223.3 (270)	0.197	229.0	74.6	45.2	54.8
	③	652	24	178.6 (45)	259.9 (280)	0.199	207.1	74.3	40.1	47.6
	平均	647	25	183.4 (47)	235.8 (275)	0.195	231.3	73.5	45.0	53.7

说明: 括号中数值指峰值发生的时间 (s); 质量损失率为平均值; a_{60} 、 a_{180} 、 a_{300} 指从引燃到燃烧 60、180、300 s 的平均比消光面积

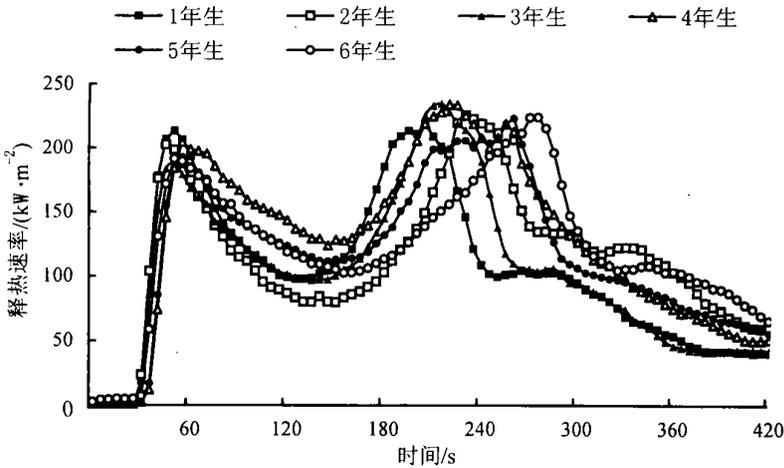


图1 释热速率曲线
Figure 1 Heat release rate curves

烧过程；②热量进一步向试件内部传递以及炭化过程；③全部炭化之后的燃烧，出现了比第一释热峰大的第二释热高峰即pkHRR，对应于第2次出现较高火焰时的燃烧过程，这是毛竹材燃烧发热的主要阶段；④火焰消失，进入无焰燃烧阶段。此结果与吴玉章等^[1]、李坚等^[3]对木材燃烧性能的研究结果相类似。

从表1和图1还可以看出，随着竹龄的增加，竹材从着火到表面燃烧的释热速率第一峰值有降低趋势；全部炭化之后燃烧的最大释热速率有一定的变异，但与竹龄的关系不明显，而竹材pkHRR出现的时间趋于延迟。

2.1.3 质量损失率 (mass loss rate, MLR) 指材料在燃烧过程中质量减少的速率，反映了材料在实验热辐射条件下热解反应的速率。竹材燃烧质量损失速率MLR时间曲线见图2。由表1图2并与HRR曲线进行对比，可得出如下规律：MLR曲线的形状与HRR曲线相似，并且波峰的位置与HRR曲线相同。这表明竹材燃烧时热释放和质量损失是同步的，有焰燃烧释放热量速度最快的阶段就是竹材热解产生可燃物最快的阶段；随竹龄的增加，质量损失率峰值出现延迟并呈降低趋势。

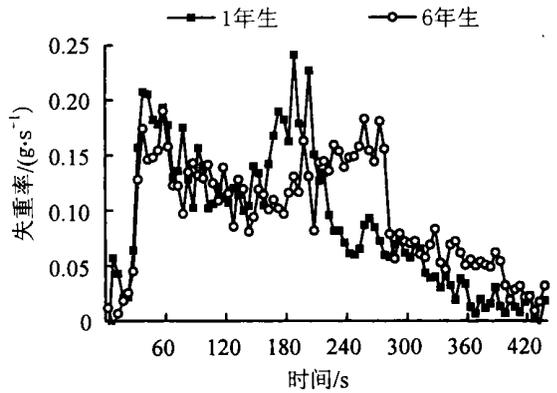


图2 质量损失率曲线
Figure 2 Mass loss rate curves

2.1.4 释烟总量 (total smoke release, TMR) 指单位面积的材料在燃烧过程中所释放烟量的总和，是评价材料火灾安全性的又一重要指标。由图3竹材燃烧的释烟总量变化曲线可知，其变化情况与释热速率曲线相似，也有4个过程：

①起始的倾斜部分，此部分对应竹材点燃前的发烟量，从受热开始到竹材点燃前，竹材发烟量呈直线上升；②曲线平缓部分，此部分与释热速率曲线的平坦部分，即炭化过程相对应，此过程发烟量变化缓慢，说明炭化过程中发烟量较低；③平缓曲线结束后的倾斜部分，此部分对应炭化过程结束后的强发烟过程，发烟量也呈直线上升；④曲线末尾的平缓部分，它与竹材无焰燃烧过程相对应，与炭化过程相似，发烟也较少。比较发烟总量曲线的各部分，点燃前和炭化过程结束后的发烟量最大，炭化过程以及无焰燃烧阶段发烟量最低，说明竹材燃烧释放的热量主要是由有焰燃烧提供的。从图3及表1还可得知，竹材释烟总量随竹龄的增加而变大，4年生的竹材达到最大，而后变化不明显。这可能与毛竹材的纤维素含量和基本密度等有关，因为毛竹长到4年生时，纤维素含量和基本密度等已趋基本稳定^[8]。

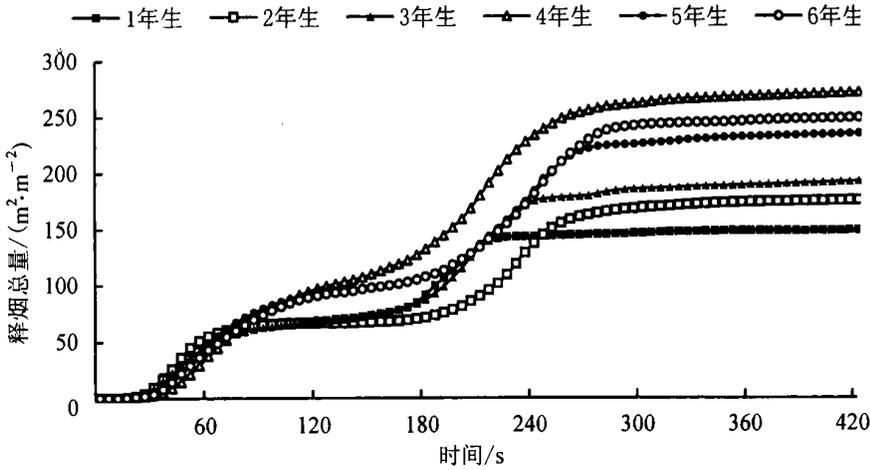


图 3 释烟总量曲线

Figure 3 Total smoke release curves

2.1.5 比消光面积 (specific extinction area, SEA) 指在实验条件下消耗单位质量的材料所产生的烟量 (以面积计)。由表 1 可知: 竹材从引然到燃烧 60, 180, 300 s 的平均比消光面积随着竹龄的增加而变大, 4 年生以上的毛竹材趋于稳定。

2.2 竹龄对毛竹材燃烧性能的影响

为了进一步了解竹龄对毛竹材各项燃烧性能指标的影响, 对表 1 的参数进行了方差分析 (表 2)。结果表明: 竹龄对基本密度、点燃时间、第一释热峰及峰值发生的时间、第二释热峰发生的时间、释烟总量和比消光面积影响极显著, 对质量损失率影响显著, 对第二释热峰影响不显著。

表 2 不同竹龄毛竹材燃烧性能方差分析的 F 值

Table 2 F values of variation analysis on burning behavior of *Phyllostachys pubescens* wood at different ages

变差来源	基本密度	点燃时间	释热速率		质量损失率	释烟总量	比消光面积		
			第一释热峰	第二释热峰			a_{60}	a_{180}	a_{300}
竹龄	29.15	10.49	6.40 (5.14)	1.13 (31.84)	3.53	15.86	16.20	13.86	14.27

说明: $F_{0.01}(5, 12) = 5.06$ $F_{0.05}(5, 12) = 3.11$; 括号中数据指峰值发生时间的 F 值

进一步用 q 值检验法对 6 种不同竹龄的燃烧性能进行多重比较。结果显示: 1 年生与 3, 4, 5, 6 年生之间以及 2 年生与 4, 5, 6 年生之间的基本密度有极显著差异, 3 年生与 4 年生之间的基本密度有显著差异, 其余相互之间差异不显著; 1, 2 年生与 4 年生的点燃时间有极显著差异, 1, 2 年生与 5 年生以及 3 年生与 4 年生的点燃时间有显著差异, 其余相互之间差异不显著; 1 年生与 6 年生的第一释热峰有极显著差异, 其余相互之间差异均不显著; 3 年生与 4 年生的第一释热峰产生的时间有显著差异, 其余相互之间差异不显著; 1, 3 年生与 5, 6 年生之间以及 4 年生与 6 年生之间的第二释热峰产生的时间有极显著差异, 2 年生与 6 年生之间以及 4 年生与 5 年生之间的第二释热峰产生的时间有显著差异, 其余相互之间差异不显著; 1, 2 年生与 4, 5 年生之间的释烟总量有极显著差异, 1 年生与 6 年生之间以及 3 年生与 4, 5 年生之间的释烟总量有显著差异, 其余相互之间差异不显著; 1 年生与 5, 6 年生从引然到燃烧 60 s 的平均比消光面积有极显著差异, 1 年生与 4 年生之间以及 3 年生与 4, 5, 6 年生之间从引然到燃烧 60 s 的平均比消光面积有显著差异, 2 年生与 4, 5, 6 年生从引然到燃烧 60, 180, 300 s 的平均比消光面积均有极显著差异, 3 年生与 4 年生从引然到燃烧 180 s 的平均比消光面积有显著差异, 1 年生与 5 年生从引然到燃烧 300 s 的平均比消光面积有极显著差异, 1 年生与

4, 6年生之间以及3年生与4, 5年生之间的从引燃到燃烧300 s的平均比消光面积有显著差异, 其余相互之间差异不显著。

3 结论

通过锥形量热仪实验测定发现, 毛竹材的基本密度、点燃时间、第一释热峰发生的时间、第二释热峰发生的时间、释烟总量和比消光面积随竹龄的增加而增大, 释热速率第一峰值和平均质量损失率随竹龄的增加而减小。经多重比较和方差分析表明, 竹龄对毛竹材的基本密度、点燃时间、第一释热峰及峰值发生的时间、第二释热峰发生的时间、释烟总量和比消光面积影响极显著; 对质量损失率影响显著; 对第二释热峰影响不显著; 毛竹材的各项燃烧性能的差异3年生以后在不断减少, 4年生以后的各项燃烧性能趋于稳定, 并稳定在较高水平。

参考文献:

- [1] 吴玉章, 原田寿郎. 人工林木材燃烧性能的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 131-136.
- [2] Subyako, Subiyanto B Hata T, et al. Evaluation of fire-retardant properties of edge-jointed lumber from tropical fast-growing woods using cone calorimeter and a standard fire test[J]. *Jpn Wood Sci*, 2003, 49(3): 241-247.
- [3] 李坚, 王清文, 李淑君. 用CONE法研究木材阻燃剂FRW的阻燃性能[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 108-114.
- [4] 田晓瑞, 贺庆棠, 舒立福. 利用锥形量热仪分析树种阻燃性能[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(1): 48-51.
- [5] 李坚, 王清文, 方桂珍, 等. 木材波谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 285-290.
- [6] Hansen A S, Hovde P J. Prediction of time to flashover in the ISO 9705 room corner test based on cone calorimeter test results[J]. *Fire Mater*, 2002, 26: 77-86.
- [7] 杨云芳, 俞友明, 方伟, 等. 红壳竹竹材物理力学性质的研究[J]. 浙江林学院学报, 1998, 15(2): 158-163.
- [8] 马灵飞, 马乃训. 毛竹材材性变异的研究[J]. 林业科学, 1997, 32(4): 356-364.

Combustion properties of *Phyllostachys pubescens* wood at different ages

LU Feng-zhu¹, XU Yue-biao², QIAN Jun¹, XU Qun-fang³, YAN Jian-min¹

(1. School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Qianxiang Forest Station of Dongyang City, Dongyang 322124, Zhejiang, China; 3. School of Sciences, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Combustion properties of wood of *Phyllostachys pubescens* aged between 1 year and 6 years were tested with cone calorimeter under the heat radiation of $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. The results showed that with the increase in age, ignition time, total smoke release and extinction area of bamboo wood increased while the weightlessness rate and the first heat release peak decreased. There was no significant correlation between the second heat release peak and the age of wood, but the appearance of the second peak was delayed. The combustion properties of *Phyllostachys pubescens* wood tended to stabilize after the age of 4 years. [Ch, 3 fig. 2 tab. 8 ref.]

Key words: wood science; *Phyllostachys pubescens*; bamboo wood; combustion property; cone calorimeter (CONE)