

不同加热面毛竹材燃烧性能研究

卢凤珠¹, 陈飞², 马灵飞¹, 马乃训³

(1 浙江林学院工程学院, 浙江 临安 311300 2 浙江省临安市锦城镇林业工作站, 浙江 临安 311300;
3. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

关键词: 毛竹材; 竹壁层; 加热面; 燃烧性能; 锥形量热仪

中图分类号: S795.7 文献标识码: A

Study on Burning Behaviour of *Phyllostachys pubescens* with Different Heated Surface

LU Feng-zhu¹, CHEN Fei², MA Ling-fei¹, MA Nai-xun³

(1 School of Engineering Zhejiang Forestry College Lin'an 311300 Zhejiang China 2 Forestry Work Station of Jincheng Town
Lin'an 311300 Zhejiang China 3 Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400 Zhejiang China)

Abstract Burning behaviour of *Phyllostachys pubescens* aged 6 years with different heated surface were tested by cone calorimeter with the heat irradiance $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. The results showed that the ignition time of bamboo wood was in order of outer culm > inner culm > middle culm when the tangential section was used as a heated surface. Meanwhile, with the radial section or cross section was used as a heated surface, the ignition time of bamboo wood was in order of outer culm > middle culm > inner culm. When the tangential section, the radial section and cross section of middle culm were used as heated surface, the longest ignition time was produced by the cross section. The total heat release of 600 s of bamboo wood was in order of outer culm > inner culm > middle culm. The peak HRR of outer culm and inner culm was at first peak, the time of the 2nd peak HRR of bamboo wood was delayed from inner culm to outer culm. When the cross section used as the heat surface, the width of the 2nd peak HRR increased. The carbonization time became shorter. There were two stronger process of smoke, one was before the igniting and another was after the charring finished. The weakest smoke appears in the charring and flameless combustion stage. The mass loss and the heat release indicated the same changing curves.

Key words *Phyllostachys pubescens*; radial position; heated surface; burning behaviour; cone calorimeter

锥形量热仪(简称 CONE)是当前用以表征材料燃烧性能的主要试验仪器,能同时获得材料燃烧时有关释热、点燃时间、释烟、毒性、质量变化参数等多种重要的动态信息,其实验的结果与大型燃烧实验结果之间存在着良好的相关性,已成为评价材料燃烧性能的主要手段。利用 CONE 对木质材料燃烧性能的研究已有许多报道^[1~6],但对竹材不同加热面燃烧性能的研究尚未见报道。本文采用 CONE 法对 6

年生的毛竹 (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de Lehaie)人工林竹材燃烧性能进行了测定与分析,旨在为毛竹材合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试材采集与加工

1.1.1 试材来源 于 2005 年 7 月在浙江省临安市三口镇采集胸径为 105~110 mm、6 年生毛竹 10 株。

收稿日期: 2006-11-21

基金项目: 浙江省科技厅重大项目“速生林木与竹类资源精深加工及高效利用共性关键技术及产品开发”(2003C12009)

作者简介: 卢凤珠(1964—),女,浙江临安人,高级实验师,从事木材科学与技术等研究。

毛竹齐地砍倒后,由刀口(基部)向上截取 1 100 mm,编号后运回实验室。

1.1.2 试件加工 (1)试件要求:试件长×宽为 100 mm×100 mm,厚度不超过 50 mm。试样由小竹条组成,如图 1 所示。(2)试件加工:根据实验要求将试材毛竹筒剖开,加工成 15 mm 宽的竹条,每根竹条由下而上截取 100 mm 的竹块,截取时跃过竹节。将截得的竹块沿纵向从竹青到竹黄剖成三等份,得竹材的外层(含竹青)、中层(竹肉)、内层(含竹黄)竹片,每块竹片的规格长(纵向)×厚(径向)×宽(弦向)为 100 mm×t mm×15 mm(t 约为 1/3 竹壁厚)。径切面试件:用竹扦把竹片沿厚度方向(径向)串接成 100 mm,其规格长(纵向)×宽(径向)×厚(弦向)为 100 mm×100 mm×15 mm;弦切面试件:同样用竹扦把竹片以弦向平拼成 100 mm,然后相叠成厚度为 15 mm,规格长(纵向)×宽(弦向)×厚(径向)为 100 mm×100 mm×15 mm;横切面试件:100 mm 长的竹片依次截取 15 mm,用竹扦将 15 mm 长的小竹片以弦向平拼成 100 mm,然后又把平拼成 100 mm 的竹片以径向串接成 100 mm,规格长(径向)×宽(弦向)×厚(纵向)为 100 mm×100 mm×15 mm。每组试件 4 个,即 3(层)×3(个加热面)×4(个),共 36 个试件。

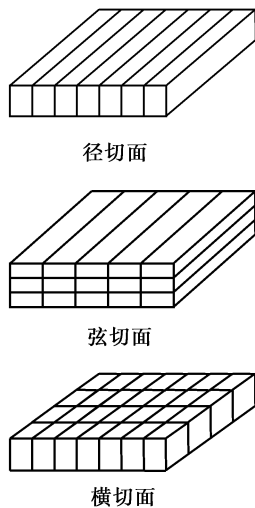


图 1 试件示意图

1.2 试验仪器

锥形量热仪(按 ISO 5660-1 & ASIM E 1354-93 标准进行测试),英国燃烧测试技术(FTT)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生产;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生产;JA 2003

型电子天平,上海精密仪器厂生产。

1.3 试验方法

先将毛竹材于 60 ℃ 下干燥,然后在相对湿度 65%、温度 20 ℃ 的高低交变湿热试验机中,调节含水率恒定为 11%~12% 后用于燃烧实验。为了使实验温度接近真实火灾温度,本实验采用热辐射功率 $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,相应温度为 740 ℃ 左右。根据测试结果,利用计算机辅助分析,确定竹材的燃烧特性。

本文中竹壁外层弦切面是指竹青面,竹壁内层弦切面是指竹黄面,各表中的数据均为所有试件(每组 4 个)部分燃烧参数的平均值。

2 结果与分析

2.1 点燃时间分析

点燃时间为达到材料表面产生有焰燃烧所需要的持续点火时间^[4]。一般来说点燃时间越长,说明材料越不易点燃。点燃时间是评价材料阻燃性的重要指标之一。

2.1.1 试样取材部位对点燃时间的影响 从表 1 可以看出,毛竹材弦切面加热时,从外层(竹青)到中层(竹肉)的点燃时间迅速下降,加热面为内层(竹黄)时点燃时间又迅速增大。产生这种现象的原因主要是由于竹材中硅质细胞中 SiO_2 含量和竹壁厚度方向的密度分布不均匀。在竹材中,表层竹青的硅质细胞中 SiO_2 含量(4.3%~4.6%)是竹黄中含量(0.13%~0.18%)的 30 倍左右^[7]。 SiO_2 为不燃物质, SiO_2 含量的变化显然会影响材料的点燃时间, SiO_2 含量越高,其点燃时间越长;但 SiO_2 含量的变化对点燃时间的影响仅仅是一个方面,材料密度对点燃时间也产生影响,点燃时间与材料密度、热传导率、比热成正比,与热辐射强度成反比^[3]。因此,竹材的密度越大,点燃时间越长。从毛竹材竹壁厚度方向看,竹材微密度从竹青到竹黄径向变化时,开始迅速降低,约到 1/3 部位时下降梯度变缓,密度变化在一个很窄的范围内,到接近竹黄时密度达最小值,而后在竹黄层密度又有所上升,通常比最小密度高 50% 以上^[8],二者的共同影响导致了毛竹材弦切面加热时点燃时间外层最长,内层次之,中层最短。

表 1 毛竹材不同加热面的点燃时间

项目	加热面								
	弦切面竹壁层			径切面竹壁层			横切面竹壁层		
	外层	中层	内层	外层	中层	内层	外层	中层	内层
点燃时间 /s	34.0	13.3	19.3	27.3	13.1	10.3	44.3	16.7	14.3

2.1.2 毛竹材径切面、横切面对点燃时间的影响 由表 1 可知,毛竹材径切面、横切面加热的点燃时间为竹壁外层 > 中层 > 内层。这是竹材在竹壁厚度方向的密度变化引起的,在竹壁厚度方向,秆茎密度自内向外呈逐渐增大的变化规律^[9,10],而点燃时间与材料密度成正比,竹材密度增大,其点燃时间延长。

2.1.3 竹壁中层弦切面、径切面、横切面对点燃时间的影响 由表 1 可知,毛竹材竹壁中层加热面为弦切面、径切面、横切面时的点燃时间分别是 13.3、13.1、16.7s,竹壁中层横切面加热时点燃时间最长。加热面对点燃时间的影响主要是由同一材料在加热方向热传导率的不同引起的,点燃时间与热传导率成正比^[1-3]。竹材与木材有类似的结构,木材在顺纤维方向加热时热传导率约为垂直纤维方向加热时热传导率的 2.0~2.5 倍,而同为垂直纤维方向加热时径向、弦向热传导率差异不大^[11]。因此,毛竹材在不同方向加热时,点燃时间存在一定差别,即横切面的点燃时间比在垂直纤维方向加热的弦切面、径切面点燃时间长,而弦切面、径切面加热时点燃时间差异不大。

2.2 释热速率和释热总量分析

2.2.1 试样取材部位对释热速率和释热总量的影响 材料释热越快或释热量越大,一般情况下在火灾中的危险性就越大^[4]。由表 2 可知,毛竹材从着火到表面燃烧 60、180、300s 快速放热时的平均释热速率以及着火后 300、600s 间释热总量,以竹材弦切面加热时最大,两者大小关系均为竹壁外层(竹青) > 内层(竹黄) > 中层(竹肉);而径切面、横切面加热时,竹青(外层)、竹黄(内层)的平均释热速率、释热总量较小,但着火后 600s 间释热总量均为竹壁外层 > 内层 > 中层;着火后 300、600s 间竹青加热面的释热总量 ($1.653 \sim 7.410 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) 是同一加热时段外层径切面、外层横切面释热总量的 1.5~2.0 倍。从图 2 中可知, (1) 竹材加热面快速放热阶段第一释热速率峰值为弦切面外层(竹青) > 内层(竹黄) > 中层(竹肉),完全燃烧第二释热速率峰值为弦切面外层(竹青) > 中层(竹肉) > 内层(竹黄);竹青、竹黄加热面燃烧的最大释热速率峰值 (ρKHRR) 均出现在第一释热峰。这可能首先是由于竹青表面光滑并附有 1 层蜡质,竹黄表面光滑,由数层至数十层高度木质化的石细胞组成,竹青、竹黄的表面物质以及这些物质对热传导作用而加速表面燃烧放热所产生的结果;其次当竹黄组织致密光滑的表面层燃烧后,

热量向组织疏松、质地脆弱、密度最小的内部传递,使第二释热峰最早出现,且峰值最低;第三毛竹材外层微密度最大,导致竹青面燃烧第一释热峰大于第二释热峰,即释热速率与毛竹材微密度成正比。(2) 竹材弦切面燃烧时,热量进一步向试件内部传递以及炭化过程所需的时间自竹材秆茎由内向外呈增加的变化规律,即第二释热峰出现的时间依次为竹黄 < 竹肉 < 竹青。这是因为毛竹材竹秆由内向外单位面积维管束密度、纤维含量增加,即基本密度增加^[9,10],从而延长了热量向毛竹材内部传递的时间。这与吴玉章等^[11]研究人工林木材燃烧性能的研究结果相一致。

表 2 毛竹材不同加热面的燃烧释热性能

加热面	竹壁层	着火后平均释热速率 $/(kW \cdot m^{-2})$			着火后释热总量 $/(MJ \cdot m^{-2})$	
		60 s 间	180 s 间	300 s 间	300 s 间	600 s 间
弦切面	外层	202.5	207.5	198.7	1.653	7.410
	中层	103.6	104.0	100.1	826	3.102
	内层	188.3	169.2	168.1	1.362	5.803
径切面	外层	148.4	138.2	122.2	982	3.855
	中层	139.9	112.5	99.7	911	3.420
	内层	128.0	106.5	95.0	894	3.569
横切面	外层	122.6	114.9	103.3	749	3.648
	中层	129.0	99.6	85.0	804	3.284
	内层	134.5	108.2	94.8	890	3.628

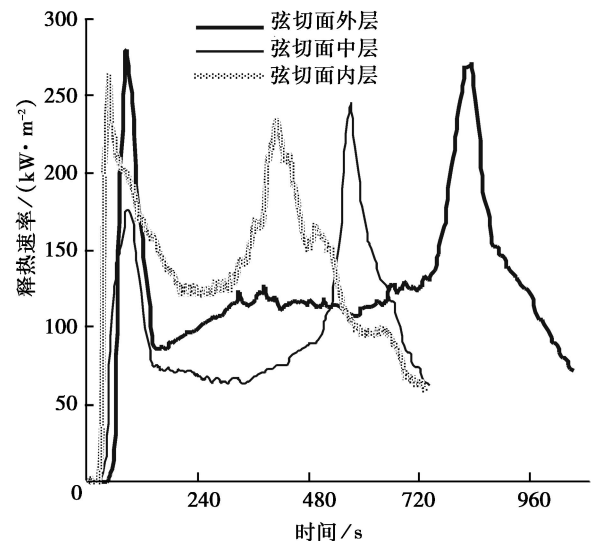


图 2 试件取材部位对释热速率的影响

2.2.2 毛竹材弦切面、径切面、横切面对释热速率和释热总量的影响 毛竹材加热面对释热速率和释热总量的影响主要表现在第二释热峰的变化。从图 3 可知, (1) 加热面为横切面时,第二释热峰宽度增加,释热速率变慢,热量进一步向试件内部传递以及

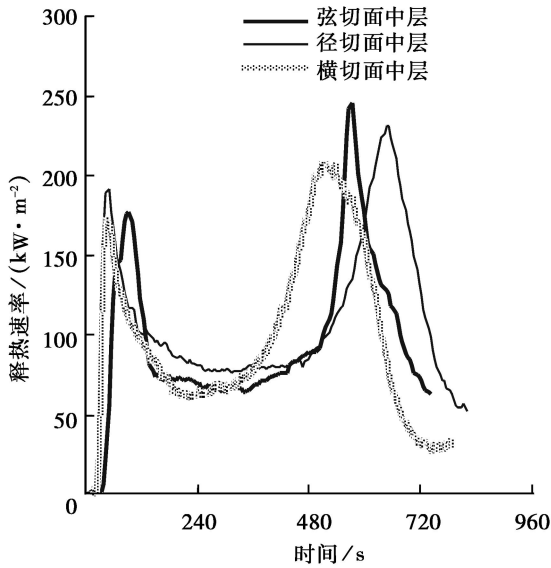


图 3 加热面对释热速率的影响

炭化过程所需的时间缩短,使第二释热峰提早出现,释热峰宽窄变化反映了释热速率的快慢。从表 2 也能看出,毛竹材横切面加热时,从着火到表面燃烧 60、180、300 s 快速放热时的平均速率以及着火后 300、600 s 间释热总量比弦切面、径切面加热时相对小一些。这可能是由于毛竹材横切面上有无数个维管束孔状细胞,使单位面积竹材有效燃烧物质减少,单位时间内单位面积燃烧释放热量减少,而维管束孔状又加快了热量向试件内部传递,促进试件的炭化,试件炭化越快质量损失也越快,从而加快了热量的提前释放。(2)最大释热速率峰值 (pkHRR) 出现的时间最迟的是径切面,而最早的是横切面加热,这是因为径切面的热传导率小,传热时间、炭化过程所需的时间相对延长。由表 2 可知,径切面加热时,着火后 300 s 前的平均释热速率及释热总量自竹材秆茎由内向外呈逐渐增大的变化规律,与竹材秆茎密度的变化一致^[9,10]。

2.3 质量损失速率分析

由图 4 可知,竹材质量损失与发热过程有着相似的变化曲线。外层弦切面(竹青)加热面质量损失峰值极值发生在第一质量损失峰,第二质量损失峰出现时间最迟,即传热时间、炭化过程所需的时间最长。横切面加热时对质量损失的影响主要表现在第二质量损失峰出现的时间提前并且质量损失峰宽度增加,试件传热及炭化的时间减少,热传导率大的横切面加热时炭化速度、释热速率比纵切面加热时要快,质量损失也同步加快。反映了试件在热辐射源作用下,不同加热面试件热解的反应速度,揭示出质

量损失与释热速率的密切关系。

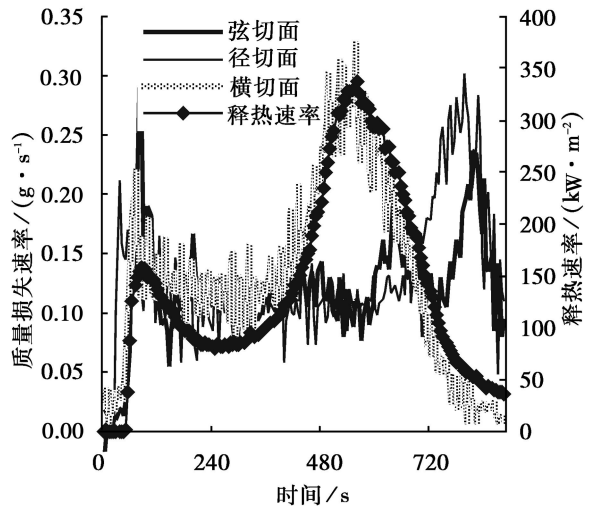


图 4 竹壁外层质量损失速率、释热速率

2.4 释烟总量分析

图 5 是竹壁中层各加热面随时间变化的释烟总量曲线,竹壁外层、内层与之相似。从该曲线可知,热传导率大的横切面加热时的释烟总量也大(从表 3 也能证实),并与释热曲线的各个过程相对应,释烟总量从直线上升(第一释热速率峰值)到平缓部分(炭化过程)时间缩短,进入到强发烟阶段(第二释热速率峰值)时间最早,整个释烟过程与释热过程相对应。

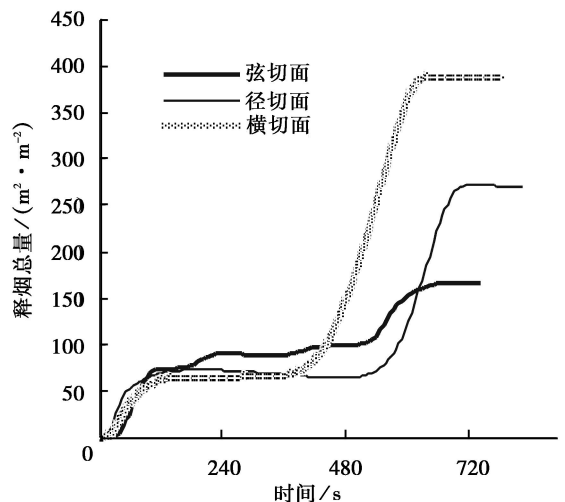


图 5 竹壁中层释烟总量曲线

表 3 毛竹材不同加热面的释烟总量

项目	加热面								
	弦切面竹壁层		径切面竹壁层		横切面竹壁层				
	外层	中层	外层	中层	外层	中层			
释烟总量/(m³·m⁻²)	454	203	170	605	285	312	715	367	364

3 小结

(1)通过锥形量热仪对 6 年生毛竹人工林竹材竹壁层的不同加热面的实验测定表明,毛竹材弦切面加热时,从外层(竹青)到中层(竹肉)的点燃时间迅速下降,而加热面为内层(竹黄)时点燃时间又迅速增大;加热面为径切面、横切面时的点燃时间,竹壁外层 > 中层 > 内层;毛竹材竹壁中层横切面加热时的点燃时间最长。毛竹材不同加热面的点燃时间不仅取决于自身的物质,还与毛竹材各加热面的密度、热传导率有关。

(2)毛竹材弦切面加热时,从着火到表面燃烧 60、180、300 s 快速放热时的平均释热速率依次为竹青 > 竹黄 > 竹肉,快速放热阶段第一释热速率峰值为竹青 > 竹黄 > 竹肉,而完全燃烧第二释热速率峰值为竹青 > 竹肉 > 竹黄,第二释热峰出现的时间自竹材秆茎由内向外呈延迟的变化规律。毛竹材横切面加热时,第二释热峰宽度增加,释热速率变慢,热量进一步向试件内部传递以及炭化过程所需的时间缩短,使出现第二释热峰的时间比弦切面、径切面加热时都提前。释热速率与毛竹材微密度变化成正比。竹青加热面着火后 300、600 s 间释热总量是同一竹壁层同一加热时段其它加热面的 1.5~2.0 倍左右。在相同加热面的条件下,着火后 600 s 间释热总量为竹壁外层 > 内层 > 中层(竹肉)。

(3)毛竹材从开始受热到着火前和炭化过程结束后即第二释热峰产生之前释烟量最大,炭化过程

和无焰燃烧阶段释烟量最低,热传导率大的横切面加热时的释烟总量也大;毛竹材质量损失过程与释热过程有着相似的变化曲线。

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] Subyakto, Subijanto 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]. Journal of Wood Science, 2003, 49(3): 241~247
- [3] 原田寿郎.木材の燃焼性および耐火性能に関する研究[J].森林総合研究所研究報告,2000,37&1~85
- [4] 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
- [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] Hansén 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 and Materials, 2002, 26(2): 77~86
- [7] 郑郁善,洪伟.毛竹经营学[M].厦门:厦门大学出版社,1998,417~431
- [8] 王朝晖,江泽慧,阮锡根.X射线直接扫描法研究毛竹材密度的径向变异规律[J].林业科学,2004,40(3):111~116
- [9] 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
- [10] 江泽慧.世界竹藤[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2002:232~233
- [11] 成俊卿.木材学[M].北京:中国林业出版社,1985:489~505