

研究报告

木块在小尺寸轰燃实验中的点燃 及预测模型

季经纬, 宋 虎, 杨立中, 范维澄

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 利用小尺寸轰燃实验台对松木和杉木的点燃性能进行了研究。该实验台能够提供接近实际火灾的燃烧环境, 实验具有较好的可重复性。在锥形量热计实验的基础上提出了一种新的材料热辐射引燃判据。采用实验测得的轰燃实验台上层热烟气温度的平均值, 结合热辐射引燃判据计算了木材在轰燃实验台中的点燃情况。

[关键词] 轰燃; 木材; 点燃

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)07-0062-05

1 引言

研究室内火灾中的轰燃现象及其产生条件一直是火灾科研的热点课题。轰燃的发生标志着火灾发展到不可控制的程度, 严重威胁到火场人员的安全, 增大了周边建筑物着火的可能性。人们已经进行了许多小尺寸和全尺寸的轰燃实验, 期望能够量化轰燃发生的物理条件。在这些实验的基础上发展了许多火灾模型, 这些模型通过计算火灾中热烟气的温度, 热辐射强度等物理量, 结合实验得出的一些判据可以预测单室或多室, 单层或多层建筑中发生轰燃的可能性。

用可测量的物理量来量化轰燃发生的条件是一件非常困难的事情, 现在主要通过判断热烟气层的平均温度是否达到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或地面处的热辐射强度是否达到 20 kW/m^2 来确定轰燃的发生。

这些判据是基于大量的全尺寸和小尺寸实验的结果提出的, 文献[1]中有详细的介绍。轰燃是众多火灾特殊现象中的一种, 而不是必然现象。许多因素影响室内火灾向轰燃的转变, 决定因素应该是火源的释热速率。因此, 研究轰燃发生最根本的途径是准确预测火灾释热速率的变化, 即模拟初始火

源能否通过各种传热途径引燃周围的可燃物, 使火灾释热速率发生变化这样的思路来研究轰燃的发生。中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室设计一种小尺寸轰燃实验台进行了这方面的探索性研究^[2]。

2 小尺寸轰燃实验

进行全尺寸的实验是最理想的, 但全尺寸的实验投入很大, 实验成本也非常昂贵, 作为探索性的实验装置, 中小尺寸更合适一些。另外中小尺寸装置研究轰燃时受外界影响因素少, 可以更好地研究感兴趣的火灾参数对轰燃产生的影响。

2.1 小尺寸轰燃实验台

小尺寸轰燃实验台为一立方腔体, 内尺寸为 $0.8\times 0.8\times 0.8\text{ m}^3$ 。腔体壁面分为3层, 内外2层是不锈钢板, 中间为硅酸铝隔热层。这样的设计保证了一定的隔热效果和密闭性。腔体的顶部留有6个安装热电偶的开口, 用来测量火源温度和热烟气层的温度。数据采集信号通过数据线连接到 HP 数据采集系统。腔体开口高度和宽度可以调节, 以保证达到轰燃所需要的通风条件。图1(a), (b)分别是轰燃实验台的外观和内部示意图。

[收稿日期] 2002-12-02

[基金项目] 国家重点基础研究专项经费资助项目(2001CB409600)、国家自然科学基金重点资助项目(59936140)

[作者简介] 季经纬(1976-)男, 江苏泰州市人, 中国科学技术大学博士研究生

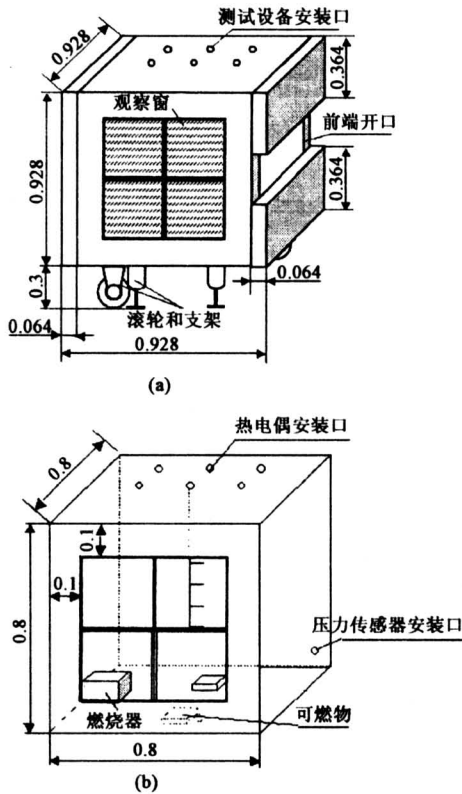


图 1 轰燃实验台示意图 单位：m

Fig.1 Sketch map of USTC flushover apparatus

2.2 腔体开口设置

腔体前端的开口材料与结构和腔体壁面相同，这 2 块板既可以水平固定，也可以垂直固定，通过固定不同的螺栓可以控制水平开口的高度或垂直开口的宽度，如图 2 所示。

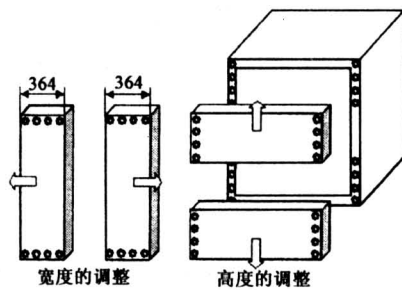


图 2 开口装置示意图

Fig.2 Sketch map of hatch fittings

2.3 燃烧器

采用油池燃烧器，每次实验注入 1 000 ml 的柴油，可供燃烧 20 min 左右。实验时在柴油表面添加 50 ml 汽油用以点燃柴油。

2.4 可燃物

实验采用的可燃物是松木和杉木，木块尺寸为

10×10×2 cm³。木块在腔体中的位置如图 3 所示，木块表面距上壁面 60 cm，可分别进行了单个木块和 2 个木块的实验。2 个木块实验时，可取相同材料的木块也可取不同材料的木块。

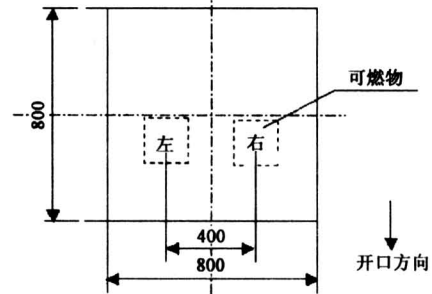


图 3 木块在腔体中的位置

Fig.3 Position of wood in the cavity

2.5 测量设备

通过 6 组热电偶对腔体上层温度进行测量。每棵热电偶树均匀分布 5 支 K 型热电偶，间隔 10 cm，顶端热电偶距腔体上壁 5 cm。

热烟气层的平均温度采用数学平均法计算^[3]。

$$T_{ave} = \frac{\int_{H_i}^{H_r} T dy}{H_r - H_i}, \quad (1)$$

$$\int_{H_i}^{H_r} T dy = \frac{1}{2} \left[\sum_{j=k+1}^L (T_j + T_{j+1})(h_{j+1} - h_j) + (T_{k+1} + T_{ref})(h_{k+1} - H_i) \right], \quad (2)$$

其中， H_r —上壁面高度； H_i —烟气层与下层空气分界面的高度； h_j —热电偶距上壁面的高度； T_j —各支热电偶的读数； T_{ref} —烟气层与下层空气分界面的温度； T_k —烟气层与下层空气分界面下方第一个热电偶的温度值； T_{k+1} —烟气层与下层空气分界面上方第一个热电偶的温度值； L —热电偶数。

3 实验结果

当柴油点燃后，腔体上层迅速形成明显的热烟气层，在其后的过程中烟气层的厚度基本稳定在 0.4 m 左右，这个现象与特殊的腔体构造有关，它将简化以后的分析工作。

木块在以柴油为火源的条件下点燃的实验结果如表 1 所示。

综合实验结果可以看出，相对于杉木，松木是一种比较容易着火的木材。在所有的实验中，松木均被点燃，除 Test B5 外，点燃时间在 700~800 s

之间,而杉木则不能保证每次被点燃。影响木材可燃性的因素很多,可分为内因和外因两个方面。内因主要是木材的种类。木材的种类不同,它的密度、化学成分、湿度等就会不同,有时还会有相当大的差异,这从根本上决定了不同木材的点燃性能的不同。即使是同一种木材随树木的生长环境不同或在树木不同的部位,其密度、化学成分、湿度,也不尽相同。外因主要是燃烧环境,如外部热辐射、湿度、空气流通情况,燃烧时的方向等。在通常的燃烧环境下,外部热辐射是外因中的主要因素。本实验中木材可燃性的差异除与热烟气层有一定的关系外,最主要的还是木材本身的不均匀性。各组实验的热烟气层平均温度如图4所示。

表1 木块点燃时间

Table 1 Ignition Time of wood

Test number	Test wood	Ignition time /s	Test number	Test wood	Ignition time /s
Test A1	松木	703	Test B1	松木	792
				杉木	未点燃
Test A2	松木	804	Test B2	松木	862
				杉木	未点燃
Test A3	松木	742	Test B3	松木	784
				杉木	812
Test A4	杉木	868	Test B4	松木	756
				杉木	762
Test A5	杉木	717	Test B5	松木	872
				杉木	937
Test A6	杉木	未点燃	Test B6	松木	767
				松木	776
			Test B7	杉木	未点燃
				杉木	未点燃

4 木块在小尺寸轰燃实验中的总辐射能量点燃预测模型

建立点燃预测模型可以为今后的实验在选择实验材料上提供比较科学的理论依据,也可以依据可燃物的点燃情况通过计算来预测轰燃的发生。

4.1 可燃物的受热

在轰燃实验台中,可燃物接收的热量主要来自于上层热烟气层和油池火焰的热辐射。文献[2]证明,火焰对可燃物的热辐射强度较小,为便于分析,本模型只考虑了热烟气层对可燃物的热辐射。

热烟气层对木块的热辐射可简化为灰色气体对表面辐射问题,并且引入了辐射换热区域法的基本

思想计算可燃物和热烟气层之间的辐射换热^[4]。

热烟气层气体子域 V_k 中微元体 dV_k 位于 l_k , 可燃物表面子域 A_j 中微元面 dA_j 位于 l_j , 二者之间的距离为 l_{k-j} , 连线 l_{k-j} 与表面 dA_j 的法线之间的夹角为 θ_j , 如图5所示。

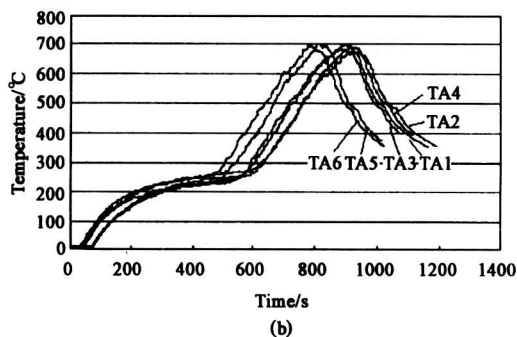
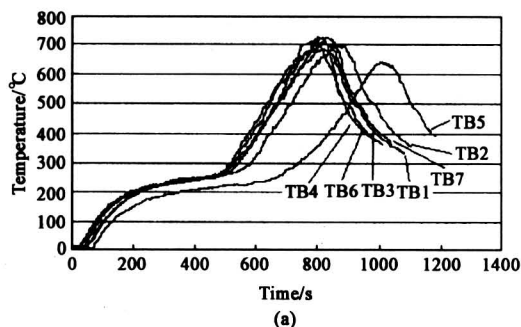


图4 两个木材实验上层烟气平均温度

Fig.4 Average temperature of the upper smoke layer with two wood blocks

单位立体角内向外发射的辐射能量为:

$$\alpha_\lambda(l_k) I_{\lambda b}(l_k) dV_k d\lambda.$$

从 dV_k 看微元面积 dA_j 所张的立体角为 $dA_j \cos\theta_j / l_{k-j}^2$ 。因此, dV_k 在此立体角内对微元面 dA_j 所发射的辐射能量是:

$$\frac{\alpha_\lambda(l_k) I_{\lambda b}(l_k) \cos\theta_j dA_j dV_k d\lambda}{l_{k-j}^2}.$$

考虑到气体子域 V_k 中为均匀温度分布,此容积中的气体吸收系数 α_λ 可认为是一个常数。因而气体透射率可简化为:

$$\tau_{i\lambda}(l_{k-j}) = \exp\left[-\int_{l_k}^{l_j} \alpha_\lambda(l^*) dl^*\right] = \exp[-\alpha_\lambda(l_j - l_k)]. \quad (3)$$

假定气体是灰体,并用 α 表示容积 V_k 中气体的吸收系数,则有

$$G_{k-j} A_j = \alpha \frac{\sigma T_k^4}{\pi} \int_{V_k} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_j}{l_{k-j}^2} \tau_i(l_{k-j}) dA_j dV_k, \quad (4)$$

这里 G_{k-j} 代表容积 V_k 对表面 A_j 的入射辐射, T_k 为子域 V_k 的温度。

$$\overline{g_{kS_j}} = \frac{\alpha}{\pi} \int_{V_k} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_j}{L_{k-j}^2} \tau_l(l_{k-j}) dA_j dV_k \quad (5)$$

把热烟气层容积划分为 M 个气体子域, 则从所有气体子域入射到 A_j 表面的辐射热流量为:

$$G_{k-j} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^M \overline{g_{kS_j}} \sigma T_k^4 \quad (6)$$

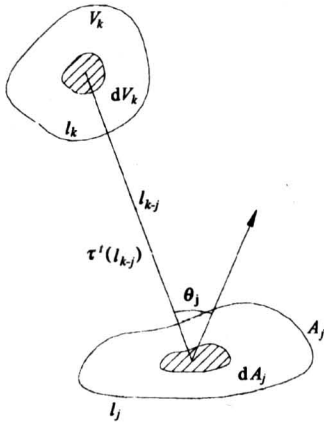


图 5 热烟气层气体对表面的热辐射

Fig.5 Head radiation from the hot layer to the surface

4.2 热辐射引燃判据

要预测火灾, 需要建立燃烧物通过热辐射是否能够引燃周围可燃物的判据, 常用的可燃物点燃判据有, 表面临界温度判据, 热解质量流量判据, 边界层总反应速率判据等。

作者采用了一种全新的点燃判据——总辐射量判据。这个判据来自于大量的锥形量热计实验。固体可燃物在被点燃之前, 由于温度升高发生热解、气化反应析出可燃性气体, 当可燃性气体析出的速度达到一定值后就会被点燃, 所以可燃物被引燃的基本动力是接受热量。材料在进行锥形量热计实验时, 试样被放置在锥形辐射器下接受一定强度的热辐射, 通常同一种材料在同一热辐射强度下被点燃的时间十分接近, 因此当它们点燃时接受的总热辐射能量基本上是一样的, 称这个能量为引燃能量 E_{ig} , 它是热辐射强度的函数。

$$E_{ig}(q) = A \cdot q \cdot t_{ig} \quad (7)$$

式中, q 为恒定热辐射强度, t_{ig} 为可燃物在锥形量热计下接收恒定热辐射的点燃时间。

当满足下列条件时, 认为可燃物在 t 时刻被点燃。

$$E_{ig}[q(\tau)] \leq c \int_0^t q(\tau) \cdot A dt \quad (8)$$

式中, $q(\tau)$ 为热辐射强度, A 为可燃物接收热辐射的面积, c 为修正系数, 根据实验或理论分析确定。文中 $c=1.05$ 。

式 (9)、(10) 分别是松木和柞木的 $E_{ig} \sim q$ 关系式, 它们将被应用于模型中。其中柞木的 $E_{ig} \sim q$ 关系式取自文献[5]。选用柞木是为了验证模型预测木块点燃的能力, 为今后的实验选材提供参考。

$$E_{ig} = 5949.6 q^{-1.5329} \quad (9)$$

$$E_{ig} = 218492 q^{-2.3368} \quad (10)$$

从式 (9)、(10) 及图 (6) 中可以看出, 松木要比柞木容易着火得多, 相同条件下松木可以着火而柞木则有可能不着火。

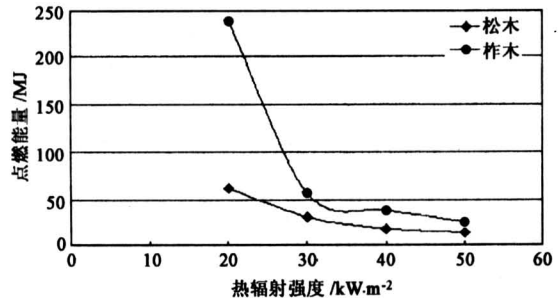


图 6 木材的引燃能量 E_{ig}

Fig.6 Ignition energy E_{ig} of wood

4.3 计算结果

以 Test B6 的上层烟气平均温度 (图 7) 为热烟气层的平均温度计算时, 松木经 691 s 被点燃, 而柞木不能被点燃。图 8 为木块表面的热辐射强度。计算出的松木点燃时间比实验值提前了 80 s 左右, 主要是由于采用烟气层的平均温度计算可燃物收到的热辐射与真实情况还有一定的差别。另

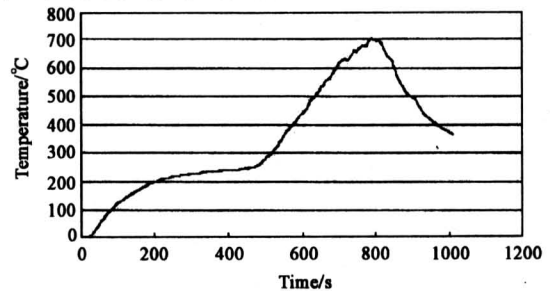


图 7 Test B6 的上层烟气平均温度

Fig.7 The average temperature of upper layer in test B6

外, 点燃判据来自于锥形量热计实验, 在锥形量热计实验中, 材料上方有持续的电火花作为点火源, 而在小尺寸轰燃实验中并没有这样的点火源存在, 所以计算出的点燃时间要比实验点燃时间短。

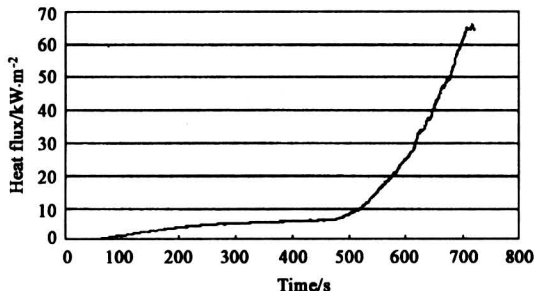


图8 木块表面的热辐射强度

Fig.8 heat radiation on wood surface

计算结果表明, 总辐射量判据是一种简单而有效的点燃判据。总辐射能量点燃预测模型可以较好地预测材料的点燃性及点燃时间。

5 结论

USTC 小尺寸轰燃实验提供了比锥形量热计更接近真实火灾环境的燃烧环境, 在火源条件稳定的情况下, 具有较好的可重复性。

通过计算木块在 USTC 小尺寸轰燃实验中接收的热量, 结合笔者提出的总辐射量判据可以比较好地预测木块在小尺寸轰燃实验中点燃性。总辐射量判据的优点是可以应用于各类可燃材料。目前的总辐射量判据的基础数据来自于锥形量热计实验, 所以在判断木块的点燃性上存在一定的偏差, 该判据还需要进行大量的实验和严格的理论推导加以证明。

参考文献

- [1] Peacock R D, Reneke P A, Bukowski R W, et al. Defining flashover for fire hazard calculations[J]. Fire Safety Journal, 1999, 32: 331~345
- [2] 宋 虎. 小尺寸腔室轰燃现象的实验和理论研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2002
- [3] Weaver S. A comparison of data reduction techniques for zone model validation [R]. Fire Engineering Research Report, 2000: 12~13
- [4] 卞伯绘. 辐射换热的分析与计算[M]. 北京:清华大学出版社, 1988
- [5] Ji Jingwei, Cheng Yuanping, Yang Lizhong, et al. Numerical simulation of fire development in a single compartment based on cone calorimeter experiments [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(5): 368~372

The Ignition and the Forecast Model of Wood Blocks in a Bench-scale Flashover Apparatus

Ji Jingwei, Song Hu, Yang Lizhong, Fan Weicheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] The ignition of both deal and fir blocks were tested with a bench-scale flashover test apparatus. Tests results showed that the bench-scale flashover test apparatus could offer a test environment similar to the true fire environment and tests executed with the apparatus had good repeatable property. Based on the cone calorimeter test results, a new ignition criterion of wood was presented in the paper. Ignition time of wood block in the bench-scale flashover test apparatus were calculated with the tested average temperature of the upper smoke layer and the new ignition criterion. The calculation results showed that the new approach was facile and available for the purpose of forecasting the ignition time of wood blocks in the bench-scale flashover test apparatus.

[Key words] flashover; wood; ignition