



Flame spread characteristics of latex foam at different ignition positions

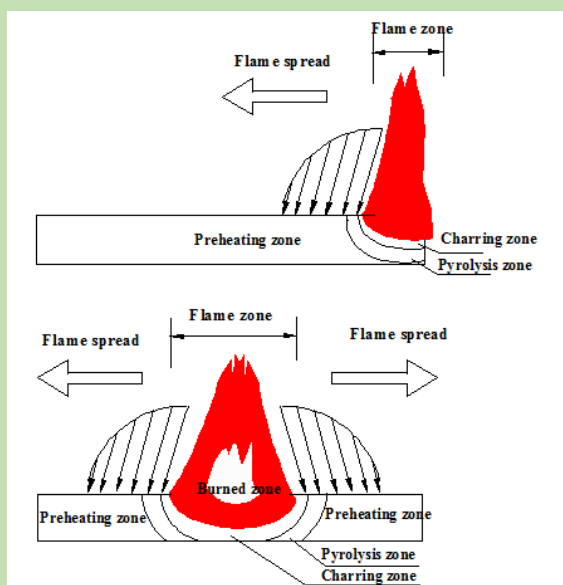
Mingzhen ZHANG¹, Dongmei HUANG^{1,2*}, Qi YUAN¹, Shuwen WANG¹

1. College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

2. Key Laboratory of Furniture Inspection Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract: Natural latex based furniture is widely used in our daily lives. However, it is very easy to be ignited. Once ignited, fire could spread remarkably fast accompanied with a large amount of heat, smoke and fumes, which are extremely harmful to human beings. It makes sense to study the flame spread of latex foam. In this paper, the influence of ignition positions on the flame spread characteristics of latex foam were analyzed experimentally using a small-scale experimental setup and the ignition point was put on the center and edge of the specimen. The surface temperature profiles, flame height and flame spread rate were measured. The results showed that the latex foam combustion process can be divided into 5 stages: heat absorption, pyrolysis, ignition, heat transfer and flame spread. The flame spread direction was from the center to the edge showing a circle shape for the center ignition conditions. For the edge ignition condition, flame spread from one edge point to the diagonal point with the shape of sector. The average flame rate and the time of flame spread to whole surface of material for edge ignition condition were much higher than that of the center ignition condition. The average flame rates for edge and center ignition conditions were 0.42 and 0.24 cm/s, respectively. However, maximum flame height under edge ignition condition showed a lower value than those under center ignition condition, which is 68.6 cm comparing to 82.7 cm. The scale of burnt zone under two conditions expanded gradually with an increase of flame temperature. Therefore, more energy was passed to unburnt zone, which led to the speed up of material pyrolysis and the increase of flame spread rate. The heat transfer mechanism of the sample was investigated. In practice, this study can have a practically guiding meaning for fire protection and rescue.

Key words: latex foam; ignition position; horizontal fire spread; fire spread rate; flame height



收稿: 2017-11-29, 修回: 2018-03-03, 网络发表: 2018-05-28, Received: 2017-11-29, Revised: 2018-03-03, Published online: 2018-05-28
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51306168); 浙江省自然科学基金资助项目(编号: 17E060004); 浙江省重点研发项目(编号: 2018C01136)
作者简介: 张明振(1992-), 男, 河南省濮阳市人, 硕士研究生, 安全工程专业, E-mail: zhangmingzhen2679@163.com; 黄冬梅, 通讯联系人, E-mail: dmhuang@cjlu.edu.cn.

引用格式: 张明振, 黄冬梅, 原琪, 等. 不同点火位置时乳胶泡沫火蔓延特性. 过程工程学报, 2018, 18(5): 1029-1036.
Zhang M Z, Huang D M, Yuan Q, et al. Flame propagation characteristics of latex foam at different ignition positions (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(5): 1029-1036, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217415.

不同点火位置时乳胶泡沫火蔓延特性

张明振¹, 黄冬梅^{1,2*}, 原琪¹, 王姝雯¹

1. 中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018

2. 浙江省家具检测技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018

摘要: 在边缘点火和中间点火条件下对多孔乳胶泡沫进行小尺寸燃烧, 研究了不同点火位置时火焰的蔓延过程和规律, 考察了材料表面温度分布、火蔓延速率和火焰高度随时间的变化. 结果表明, 边缘和中间点火时, 平均火蔓延速率分别为 0.42 和 0.24 cm/s, 蔓延至整个材料表面的时间分别为 84 和 74 s, 最大火焰高度分别为 68.6 和 82.7 cm. 随火焰区不断增大, 火焰温度不断升高, 传递给未燃区的热量增多, 加速了材料热解, 火蔓延速率增大.

关键词: 点火位置; 水平火蔓延; 火蔓延速率; 乳胶泡沫; 火焰高度

中图分类号: TQ328

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)05-1029-08

1 前言

乳胶泡沫具有弹性好、质量轻、抗螨除菌等优点, 作为高端床垫填充材料广泛用于私人家居、商场和大型娱乐场所等^[1]. 该材料由液体乳胶发泡而成, 主要成分为苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物, 极限氧指数为 18.3%~20.0%^[2]. 乳胶泡沫结构为三维网状, 内部存在大量连通或半连通的孔隙, 均匀分布的气孔增加了材料的比表面积, 结构如图 1 所示. 在火灾情况下, 气孔将极大程度促进火势蔓延、增加燃烧充分性, 燃烧过程中释放大热量和有毒有害气体如 HCN, CO 和 CO₂ 等^[3], 伴有极大刺激性气味, 产生大量黑烟及大颗粒絮状漂浮物, 严重阻碍人员疏散, 威胁人员生命及财产安全. 开展乳胶泡沫火蔓延规律研究迫切而必要.

研究者对固体可燃物的火蔓延过程已进行了大量研究. Holleyhead 等^[4]以灼热烟头引燃聚氨酯泡沫塑料, 分析了材料的阴燃及由阴燃向明火燃烧的转变过程. Woolley 等^[5]对各种类型的泡沫橡胶和聚氨酯制成的床垫、棉床垫、阻燃棉和防伪尼龙进行了点火实验, 研究表明不同点火位置的燃烧行为存在很大差异, 材料顶部点火趋向于快速燃烧, 从下部点燃可能导致延迟但更严重的火灾. 祝佳琰等^[6]用锥形量热计对软垫家具面料、聚氨酯海绵填料及其组合件的燃烧性能参数进行研究, 得出面料点燃时间越短, 相应组合件的点燃时间也越短, 使用阻燃面料能明显降低火灾危险性. Prasad 等^[7]通过建立火灾模型模拟聚氨酯泡沫板的燃烧和火蔓延过程, 对材料的传热机理进行分析, 定性预测了热释放速率、火焰蔓延速率和热通量.



图1 乳胶泡沫材料的结构
Fig.1 Structure of latex foams

可燃物的放置角度、厚度、宽度、环境氧浓度等对火蔓延过程影响较大. Zhang 等^[8]研究了木板高度和宽

度对水平火焰蔓延特征的影响; Chen 等^[9]分析了火焰在不同厚度木板上的蔓延过程和传热机理; 朱超等^[10]

研究了试样放置角度对可碳化固体表面火蔓延的影响, 在正角范围内火蔓延速率随角度增加不断上升; 王渊明等^[11]研究了试样宽度对硬质聚氨酯保温板燃烧过程中火焰高度、火焰温度和火蔓延速率的影响, 发现随宽度增加, 平均火焰高度和火蔓延速率先增加后减小, 最后不再变化。

点火位置是决定材料表面火蔓延特性的重要参数。对材料水平放置条件下不同点火位置时火焰的蔓延特性研究较少。火灾调查过程中涉及起火点的认定, 材料结构与点火位置对火焰蔓延模式和速率影响较大。材料背火面处于良好通风条件时, 乳胶泡沫特殊的气孔结构使大量新鲜空气不断涌入, 为火焰持续剧烈燃烧提供了条件。本工作研究了在背火面通风条件下不同点火位置时的火蔓延特性, 为乳胶泡沫阻燃技术的发展提供理论基础, 为制定合理灭火救援方案、预防与防治火灾提供指导和借鉴。

2 实验

2.1 实验装置

自行搭建的小尺寸火蔓延燃烧实验台如图 2(a)所示, 包括地秤、石棉板、不锈钢实验支架、铁丝网、实验材料、热电偶、数据采集仪、摄像机、集烟罩等。石棉板起绝热阻燃作用, 保护电子天平。铁丝网线径 0.52 mm, 孔径 2.3 mm, 置于实验支架上, 承托实验材料, 保证材料背火面通风。直径 1 mm 的 K 型铠装热电偶铠装部分和补偿导线长度均为 1 m, 测温范围 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[12]。数据采集仪(安捷伦科技有限公司)使用 34908A 多通道数据采集模块, 记录热电偶采集的温度。地秤与电脑连接, 实时传输实验材料燃烧过程中的质量损失数据。摄像机 1 与材料表面夹角 45° , 拍摄火焰形态及试样表面火蔓延过程。摄像机 2 与材料表面高度相同, 便于测量火焰高度。摄像机 3 与材料表面夹角为 -45° , 拍摄试样背火面燃烧情况。

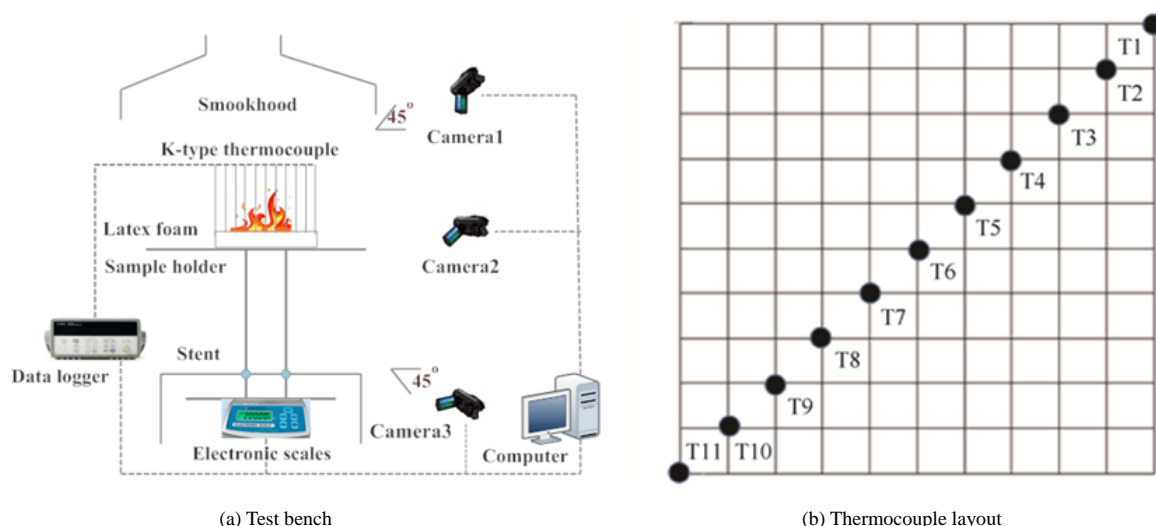


图 2 乳胶床垫火蔓延实验装置示意图
Fig.2 Device diagram of latex mattress fire spread test

2.2 实验方法

乳胶泡沫尺寸为 $25\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 2\text{ cm}$, 孔间距 30 mm, 孔径 6 mm, 热扩散系数 $\alpha = 2 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ 。为便于记录不同时刻火焰前锋位置, 在材料上表面和下表面每隔 2.5 cm 画一组平行线。热电偶沿材料对角线均匀布置于样品上表面, 每两根相邻热电偶间隔 3.54 cm, 如图 2(b)所示。

保证样品气孔分布位置一致, 实验开始前将样品置于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中 24 h, 点火位置为材料中间和边缘点火。实验结束后, 基于摄像机 1 的视频, 分析火焰结构及表面火蔓延过程, 基于摄像机 2 的图像计算不同时刻

火焰高度。测量火焰高度时, 每间隔 5 s 提取 10 帧图片, 取平均值。实验环境处于半封闭状态, 燃烧特性实验中小尺寸样品比大尺寸样品更易受环境影响, 为减小实验误差, 每组实验做 2 次。取边缘和中间点火 2 个特殊点火位置。

3 结果与讨论

3.1 乳胶泡沫火焰形态

图 3 为背面通风条件下, 相同燃烧时间后, 不同点火位置的火焰形貌。边缘点火时火焰沿材料对角线方向蔓延, 40 s 时材料表面火焰区呈三角形, 火焰整体呈三

角锥形, 面积为 312.5 cm^2 , 高 22 cm , 可估算出火焰体积约为 1718.8 cm^3 . 中间点火条件下, 火焰向四周蔓延, 40 s 时火焰前锋蔓延距离为 7.08 cm , 材料表面火焰区呈圆形, 整体火焰为圆锥形, 表面积为 157.4 cm^2 , 高 15 cm , 估算火焰体积为 787 cm^3 . 乳胶泡沫燃烧过程可分为 5 个阶段: 吸收热量、热解、点火、热量传递和火蔓延^[13]. 材料表面火蔓延速率与预热区尺度有关, 而预热区尺度主要取决于材料表面的热量, 包括火焰热辐射和对流传热, 与火焰体积和表面积等形态参数有关^[14,15].

预热区位于火焰前锋的边缘, 两种点火模式下预热区宽度均约为 2 mm . 边缘点火条件下, $10, 30$ 和 40 s 时, 火焰前锋周长分别为 $2.81, 21.24$ 和 35.36 cm ; 中间点火条件下, $10, 30$ 和 40 s 时火焰前锋周长分别为 $9.45, 25.12$ 和 44.46 cm . 经过相同时间, 中间点火时的预热区总面积大于边缘点火时.

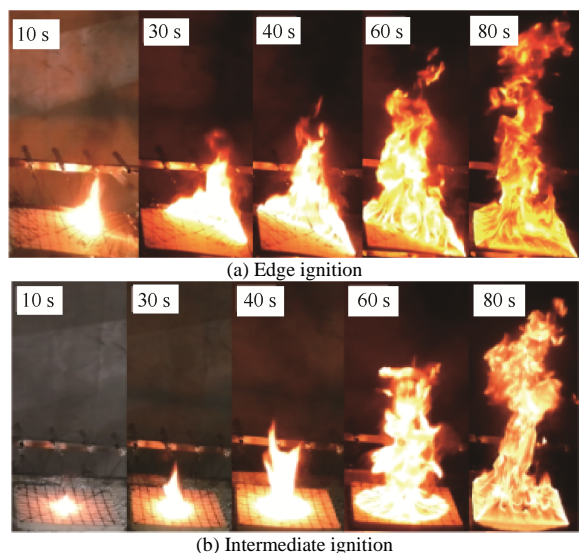


图3 火蔓延过程中火焰的形态
Fig.3 Flame during fire spread

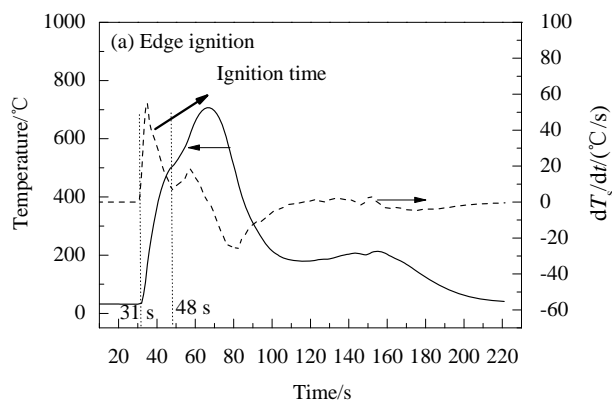


图 4 为乳胶泡沫背火面火蔓延过程. 边缘点火后 112 s , 材料背部边缘被引燃, 沿对角线方向开始蔓延. 中间点火后 89 s , 材料背部中间位置被引燃, 向四周蔓延. 乳胶泡沫密集分布的气孔成为供氧中心, 火焰在沿原蔓延路径蔓延的同时, 随气孔蔓延至材料背火面, 燃烧更充分. 中间点火时下表面中心部分最先被烧穿, 火焰沿材料气孔向外喷发, 边缘点火时材料下表面边缘位置最先被烧穿, 原因是燃烧初期火焰区热解产物不能渗透到 2 cm 厚度的样品底部, 随燃烧加剧, 样品厚度减小, 大量热量传递到样品底部 U 型热解区, 燃烧区热解产生的气体挥发产生燃烧孔^[16], 样品底部出现点火点, 火焰逐渐从点火点向未燃材料边缘蔓延. 材料燃烧过程中伴有结构坍塌、燃烧物掉落等现象, 随材料不断消耗, 燃烧开始减弱, 直至火焰熄灭.

火蔓延期间的热穿透深度 σ_t 可用下式^[17]估算:

$$\sigma_t = C\sqrt{at}, \quad (1)$$

其中, 经验常数 $C=2.7$, t 为从环境温度 T_1 升高到着火温度 T_{ig} 的时间(s). 图 5 为泡沫材料表面温度场变化曲

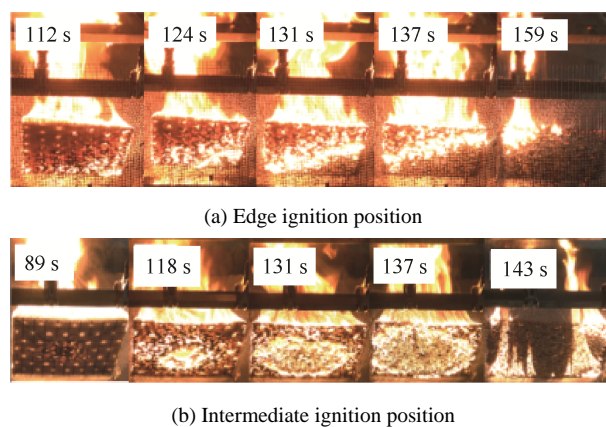


图4 背火面火蔓延过程
Fig.4 Intermediate ignition back fire surface fire spread process

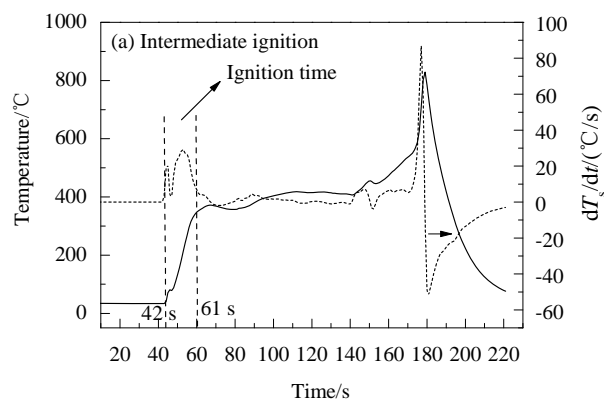


图5 乳胶泡沫材料表面温度随时间的变化
Fig.5 Variation of surface temperature of latex foam with time

线, 由图可知, 边缘点火和中间点火条件下点火时间分别为 17 和 19 s, 点火时间与点火源和材料接触面积有关. 由式(1)计算得边缘和中间点火热穿透深度分别为 4.86 和 5.43 cm, 均大于 2 cm. 乳胶泡沫属热薄型材料, 不同点火位置条件下热穿透深度不同.

3.2 火蔓延速率

火蔓延速率是研究固体可燃物表面火蔓延过程的重要参数之一. 图 6 为火焰前锋蔓延距离与时间拟合曲线. 由图可知, 火焰前锋位置随时间延长线性增长, 拟合直线的斜率为平均火蔓延速率, 即单位时间火焰前锋移动距离. 由图可知, 边缘点火时点燃材料 16 s 后, 火焰前锋蔓延距离为 3.54 cm, 84 s 后材料表面被全部引燃, 最大火蔓延速率为 1.18 cm/s, 平均火蔓延速率为 0.42 cm/s. 中间点火时点燃材料 22 s 后火焰前锋蔓延距离为 3.54 cm, 74 s 后整个材料表面被引燃.

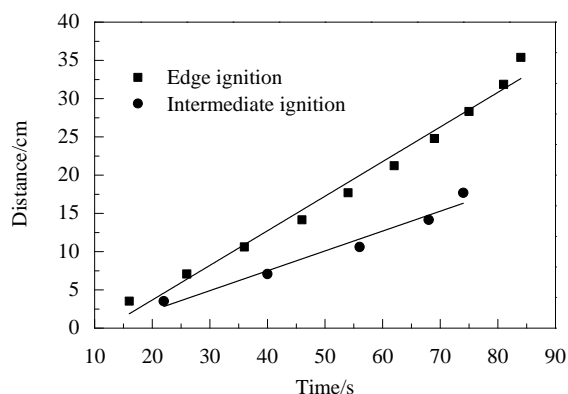


图 6 火焰前锋蔓延距离与时间的拟合曲线

Fig.6 Flame forward spreading distance and time fitting curve

边缘点火时乳胶泡沫火蔓延表现出稳态蔓延和加速蔓延两种特征, 中间点火条件下火蔓延仅表现出加速蔓延一种特征. 如图 7 所示, 火蔓延速率与时间正相关, 边缘点火条件下火蔓延速度在点火初期随时间延长不断增大, 26~46 s 火蔓延速率保持在 0.35 cm/s 不再升高, 表现出稳态蔓延特征, 随火焰蔓延, 分别在 54~62 s 和 75~81 s 以 0.44 和 0.59 cm/s 稳态蔓延. 固体表面火蔓延包括固相热解和气相燃烧两个过程, 固相热解为气相燃烧过程提供原料, 气相燃烧为固相热解提供热量^[18]. 当固相热解和气相燃烧两个过程中能量传递达到平衡时, 火蔓延表现出稳态特征.

中间点火时火蔓延速率随时间延长不断增加, 火蔓延速率小于边缘点火时, 最大火蔓延速率为 0.59 cm/s, 平均火蔓延速率为 0.24 cm/s. 燃烧过程中热量传播有热传导、热对流和热辐射 3 种方式^[19]. 火蔓延过程中, 材料表面燃烧区域面积不断变大, 传导给火焰前锋区域的

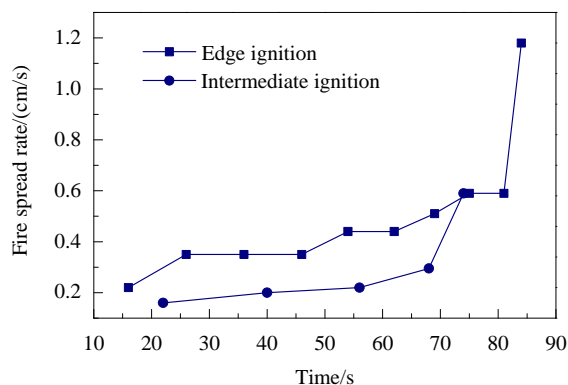


图 7 火蔓延速率随时间的变化

Fig.7 Variation of curve of fire spread rate with time

热量不断增多, 同时由于气相火焰对材料表面的辐射传热和对流传热^[20], 加快了材料未燃区热解, 使未燃区达到引燃温度的时间缩短, 火蔓延速率加快. 燃烧初期热传导为主, 随火焰区不断扩大, 辐射热和对流热为主.

文献^[21]对不同倾斜角度下火蔓延加速现象进行了实验研究, 发现火焰前锋长度可表征火焰区向未燃区传递的热量. 图 8 为不同点火位置时火焰前锋长度随时间的变化, 中间点火时火焰前锋呈圆形, 在火焰蔓延至材料边缘前, 火焰前锋长度随时间延长不断增大, 与火蔓延速率呈正相关, 在 72 s 时火焰蔓延至材料边缘, 火焰前锋长度最大, 为 78.5 cm.

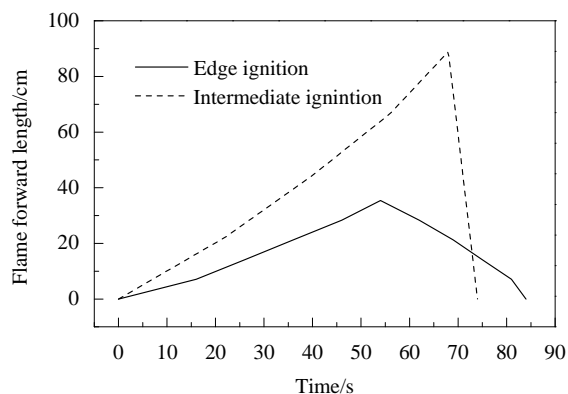


图 8 火焰前锋长度随时间的变化

Fig.8 Variation of flame front length with time

Quintiere^[17]提出火蔓延速率 v_p (cm/s)公式:

$$v_p = \frac{\delta_f}{t_f} = \frac{x_f - x_p}{t_f}, \quad (2)$$

其中, δ_f 为火焰前锋长度(cm), t_f 为着火时间(s), x_f 为湍流火焰长度(cm), x_p 为热解长度(s).

火蔓延速率与着火时间和火焰前锋长度有关, 着火时间一定时, 火焰前锋长度越长, 火蔓延速率越快. 2 cm

厚的乳胶泡沫材料为热薄型材料,着火时间如下^[17]:

$$t_f = \frac{\rho c_p d (T_{ig} - T_s)}{\dot{q}_f''}, \quad (3)$$

其中, ρ , c_p 和 d 分别为乳胶泡沫样品的密度(g/cm^3)、比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$ 和厚度(cm), T_s 为材料表面温度($^\circ\text{C}$), \dot{q}_f'' 为预热区表面热通量(W/m^2). 边缘点火时火焰前锋长度先增大后减小, 在 54 s 达到最大值 35.4 cm. 图 9

为乳胶泡沫表面火焰蔓延示意图, 包括已燃区、火焰区和未燃区, 其中未燃区可分为预热区和热解区. 边缘点火时火焰沿材料对角线方向蔓延, 未燃区能接收到更多的辐射热和对流热, 中间点火时火焰向四周蔓延. 火焰蔓延速率等于火焰前锋的移动速率^[22], 火焰前锋的移动速率与预热区接收到的热量成正比.

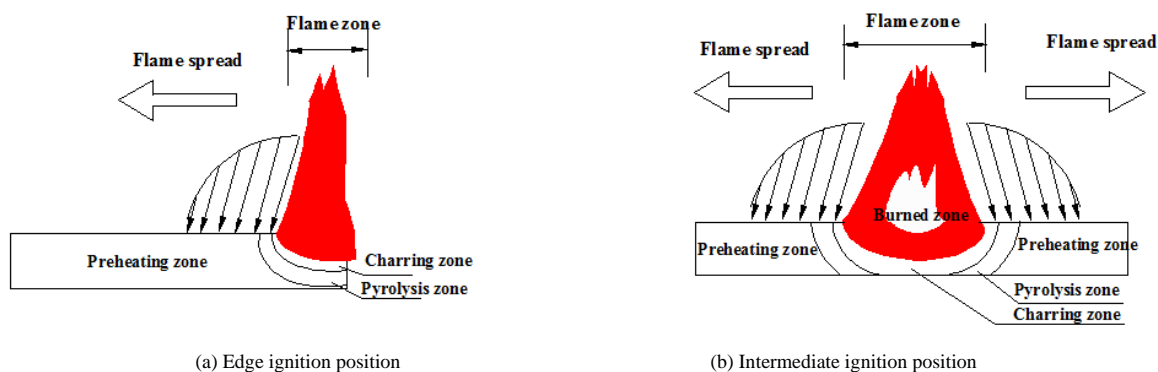


图9 表面火焰蔓延传热示意图

Fig.9 Diagram of heat transfer for flame spread over surfaces

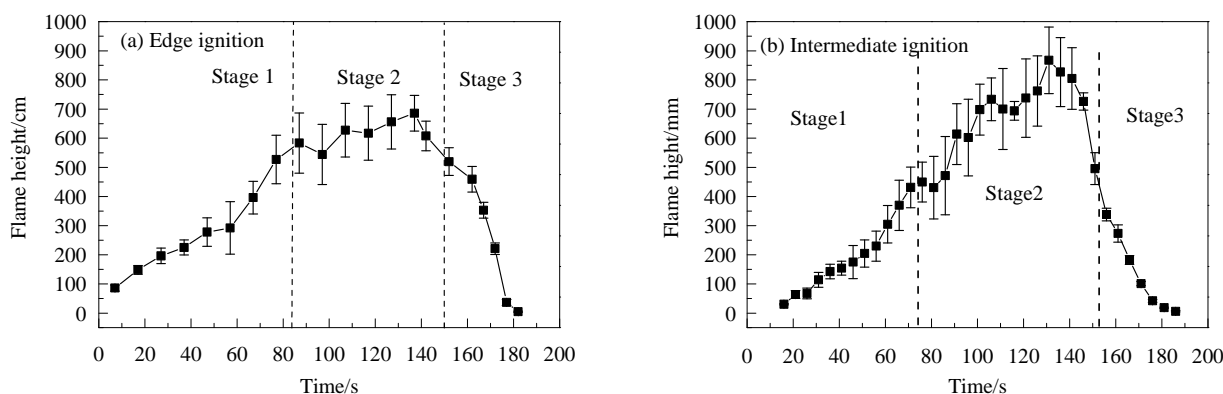


图10 不同点火位置时火焰高度随时间的变化

Fig.10 Variation of flame height with time under different ignition conditions

3.3 火焰高度

乳胶材料表面剧烈燃烧, 但燃烧过程中不能维持均匀的空气流, 火焰受空气卷吸作用存在脉动现象. 不同点火位置时火焰高度随时间的变化如图 10 所示, 边缘点火与中间点火条件下最高火焰高度分别为 68.6 和 82.7 cm.

边缘点火时火焰传播过程大致可分为 3 个阶段: 初始点火阶段、稳定燃烧阶段和熄灭阶段^[23]. 初始点火阶段从点火时刻开始至整个材料表面被引燃. 点火阶段和熄灭阶段火焰高度波动较大, 稳定燃烧阶段火焰高度变化较小, 基本呈周期性脉动. 初始点火阶段火焰高度较小, 原因是材料表面火焰区面积增加速度较慢, 剧烈燃

烧过程中供氧量不足. 稳定燃烧阶段火焰高度不再大幅升高, 小范围内上下浮动, 平均火焰高度为 60 cm, 150 s 后火焰高度急剧下降, 直至材料燃烧殆尽, 火焰熄灭. 中间点火条件下材料表面火焰区呈圆形, 空气卷吸较强, 热解产物向上运动的初始速度较大, 最大火焰高度较高, 燃烧过程中火焰高度不断增大, 130 s 时火焰高度达到峰值, 此阶段燃烧最猛烈, 随燃烧材料消耗, 火焰高度逐渐降低.

3.4 火焰温度

研究固体可燃物表面温度变化对研究材料的燃烧特性和火蔓延机理有重要作用. 两种不同点火位置时样品上表面温度随时间的变化如图 11 所示. 当火焰蔓延

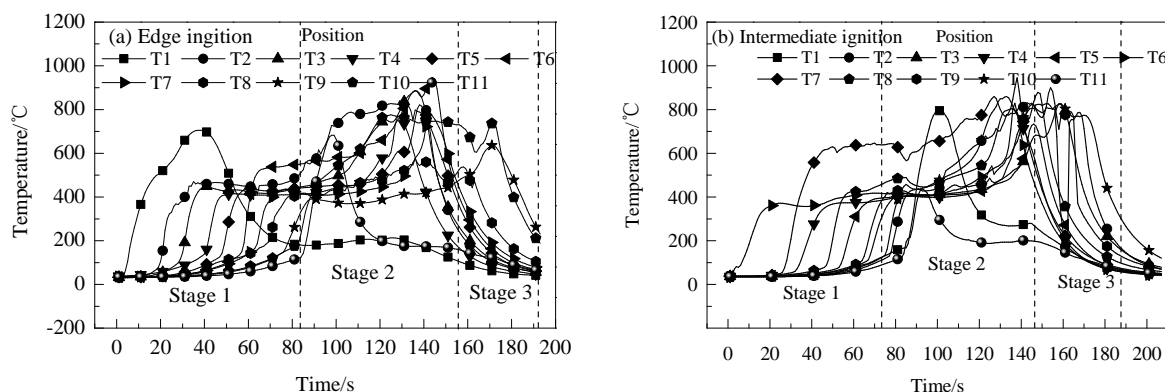


图 11 不同点火位置时材料表面各测点火焰温度随时间的变化

Fig.11 Variation of flame temperature of flame surface test point with time at different ignition positions

到测量点时, 热电偶所测温度迅速增加, 拐点均在约 400℃. 材料被全部引燃后, 温度再次升高, 最大温度分别为 945 和 947℃. 如图 11(a)所示, 边缘点火时 1 号热电偶所在位置的材料最先被引燃, 温度迅速升至 700℃后又下降, 之后稳定在约 200℃, 这是由于在接受到火焰热量后乳胶泡沫收缩, 原有空间结构被破坏, 体积缩小^[24], 导致该热电偶所在位置脱离火焰区.

中间点火时火焰主要集中在材料的中心部分, 随时间推移, 在背火面通风条件下, 有更多新鲜空气流入, 加剧火焰燃烧. 由于材料不断消耗, 中心火焰逐渐熄灭, 火焰区缩小, 火焰主要集中在材料角落边缘. 由图 11(b)可知, 位置 T6 的材料最先被引燃, 温度迅速升高, 140 s 时下降, 位置 T2 和 T10 的温度在 170 s 时下降, 位置 T1 和 T11 的温度变化趋势与边缘点火时极相似.

4 结 论

对乳胶泡沫材料进行小尺寸火蔓延实验, 分别在边缘点火和中间点火时, 研究了火蔓延过程和材料表面的温度分布, 得到火蔓延速率、火焰高度和火焰区表面温度等特性参数的变化规律, 考察了不同点火位置对水平方向火蔓延的影响, 得到如下结论:

(1) 边缘和中间点火时乳胶泡沫材料火焰形态差异较大, 分别为三角锥型和圆锥型.

(2) 火蔓延过程中, 中间点火时火焰加速蔓延, 边缘点火时火焰表现出稳态蔓延和加速蔓延 2 种特征. 边缘点火和中间点火条件下点燃时间分别为 17 和 19 s, 平均火蔓延速率分别为 0.42 和 0.24 cm/s, 最大火蔓延速率分别为 1.18 和 0.59 cm/s, 最大火焰高度分别为 68.6 和 82.7 cm, 燃烧时间分别为 182 和 186 s. 边缘点火时点燃时间较短、火蔓延速率较快; 中间点火条件下最大火焰高度和材料表面温度较高, 燃烧时间较长, 破坏性

更大.

参考文献

- [1] Ramasamy S, Ismail H, Munusamy Y. Tensile and morphological properties of rice husk powder filled natural rubber latex foam [J]. Polym. Plast. Technol. Eng., 2012, 51: 1524-1529.
- [2] 李玉芳, 李明. ABS 树脂阻燃剂的研究开发进展 [J]. 塑料制造, 2012, (6): 16-20.
Li Y F, Li M. The research development of ABS resin flame retardants [J]. Plastics Manufacturing, 2012, (6): 16-20.
- [3] Madrzykowski D, Bryner N, Grosshandler W L, et al. Fire spread through a room with polyurethane foam covered walls [C]// Proceedings of the Tenth International Interflam Conference. 2004: 1127-1138.
- [4] Holleyhead R. Ignition of solid materials and furniture by lighted cigarettes: a review [J]. Sci. Justice, 1999, 39(2): 75-102.
- [5] Woolley W D, Ames S A, Pitt A I, et al. Fire behaviour of beds and bedding materials [J]. Fire and Materials, 1976, 1(2): 63-73.
- [6] 祝佳琰, 朱五八, 王蔚. 典型软垫家具材料火灾特性的小尺寸实验研究 [J]. 火灾科学, 2006, 15(2): 86-91.
Zhu J Y, Zhu W B, Wang W. A study on the fire properties of typical upholstered furniture materials by cone calorimeter [J]. Fire Safety Science, 2006, 15(2): 86-91.
- [7] Prasad K, Kramer R, Marsh N, et al. Numerical simulation of fire spread on polyurethane foam slabs [C]//Proceedings of the Fire and Materials Conference. 2009: 350-364.
- [8] Zhang Y, Ji J, Li J, et al. Effects of altitude and sample width on the characteristics of horizontal flame spread over wood sheets [J]. Fire Saf. J., 2012, 51(7): 120-125.
- [9] Chen P, Sun J H, He X C. Behavior of flame spread downward over thick wood sheets and heat transfer analysis [J]. J. Fire Sci., 2007, 25(1): 5-21.
- [10] 朱超, 张英, 孙金华. 试样放置角度与外加辐射强度对可碳化固体表面火蔓延的影响 [J]. 火灾科学, 2010, 19(4): 232-238.
Zhu C, Zhang Y, Sun J H. Fire spread over charring materials: influence of the sample orientation and external radiant intensity [J]. Fire Safety Science, 2010, 19(4): 232-238.
- [11] 王渊明, 赵恒泽, 赵兰明, 等. 试样宽度对 RPU 板竖向逆流火蔓延的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(4): 365-370.
Wang Y M, Zhao H Z, Zhao L M, et al. Effects of sample width on downward flame spread over RPU slabs [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(4): 365-370.

- [12] 王杰, 崔超. 工业用热电偶现场校准相关问题的探讨 [J]. 中国标准导报, 2016, (2): 46–48, 52.
Wang J, Cui C. Discussion on the related-problems of industrial thermocouple field-calibration [J]. China Standards Review, 2016, (2): 46–48, 52.
- [13] Atreya A, Baum H R. A model of opposed-flow flame spread over charring materials [J]. Proc. Combust. Inst., 2002, 29(1): 227–236.
- [14] 黄新杰, 张英, 纪杰, 等. 拉萨和合肥环境下不同厚度保温材料 XPS 的火蔓延特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(6): 527–533.
Huang X J, Zhang Y, Ji J, et al. Thickness effect on flame spread characteristics of extrude polystyrene in Lhasa and Hefei environments [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(6): 527–533.
- [15] 陈鹏. 典型木材表面火蔓延行为及传热机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 75–78.
Chen P. Fire propagation behavior of typical wood surfaces and heat transfer mechanism [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 75–78.
- [16] Huang D M, Zhang M Z, Guo C N, et al. Experimentally investigating the effects of bottom ventilation on the fire behaviors of natural rubber latex foam [J]. Appl. Therm. Eng., 2018, 133: 201–210.
- [17] Quintiere J G. Fundamentals of fire phenomena [M]. Chichester: John Wiley, 2006: 171–173.
- [18] Delichatsios M A. Surface extinction of flames on solids: some interesting results [J]. Proc. Combust. Inst., 2007, 31(2): 2749–2756.
- [19] Fernandez-Pello A C, Ray S R, Glassman I. Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration [C]//Eighteenth Symposium (International) on Combustion. 1981: 579–589.
- [20] Zhang X, Yu Y. Experimental studies on the three-dimensional effects of opposed-flow flame spread over thin solid materials [J]. Combust. Flame, 2011, 158(6): 1193–1200.
- [21] Wu Y, Xing H J, Atkinson G. Interaction of fire plume with inclined surface [J]. Fire Saf. J., 2000, 35(4): 391–403.
- [22] Saito K, Quintiere J G, Williams F A. Upward turbulent flame spread [C]//Fire Safety Science Proceedings of the First International Symposium. 1986: 75–86.
- [23] Karlsson B, Quintiere J. Enclosure fire dynamics [M]. Florida: CRC Press, 1999: 6–10.
- [24] Fan H, Chen Y L, Huang D M, et al. Kinetic analysis of the thermal decomposition of latex foam according to thermogravimetric analysis [J]. Int. J. Polym. Sci., 2016, 2016: 1–7.