

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.20181229

点火位置对乳胶泡沫水平火蔓延规律的影响

张明振^{1,3}, 黄冬梅¹, 胡毅伟¹, 原琪¹, 席合一¹, 沈利铭², 段鹏征²(¹ 中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018; ² 喜临门家具股份有限公司, 浙江 绍兴 312000;³ 深圳市城市公共安全研究院消防安全研究所, 广东 深圳 518046)

摘要: 为研究点火位置对乳胶泡沫材料水平方向火蔓延规律的影响。搭建小尺寸实验平台, 在距离材料中心点0 (x1)、3.54 cm (x2)、7.08 cm (x3)、10.62 cm (x4)、14.16 cm (x5)、17.70 cm (x6) 位置处点火, 研究了试样表面温度、质量损失、火焰高度、火蔓延速度等特性参数的变化规律。结果表明, 随着点火位置由材料中心点向边缘点移动, 平均火蔓延速度分别为0.24、0.23、0.19、0.31、0.42、0.51 cm·s⁻¹, 呈现先减小后增大的规律; x3点火位置时的平均火焰高度较低, 燃烧时间较长, 平均质量损失速率较低, 主要与火蔓延过程中的热量传递方式有关。研究结果显示了乳胶泡沫的火蔓延过程, 得到了点火位置对火蔓延的影响规律。

关键词: 乳胶泡沫; 点火位置; 火蔓延; 传热; 安全; 实验验证

中图分类号: X 932

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2019) 07-2802-09

Effect of ignition position on horizontal flame spread of latex foam

ZHANG Mingzhen^{1,3}, HUANG Dongmei¹, HU Yiwei¹, YUAN Qi¹, XI Heyi¹,
SHEN Liming², DUAN Pengzheng²

(¹ College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; ² Xilinmen Furniture Co. Ltd., Shaoxing 312000, Zhejiang, China; ³ Institute of Fire Safety, Shenzhen City Public Safety Technology Research Institute Co. Ltd., Shenzhen 518046, Guangdong, China)

Abstract: A small-size experimental platform was developed to study the effect of ignition position on horizontal flame spread of 2 cm thickness latex foam. The ignition position was 0 (x1), 3.54 cm (x2), 7.08 cm (x3), 10.62 cm (x4), 14.16 cm (x5) and 17.70 cm (x6) from the center point of the material surface. The characteristic parameters, such as surface temperature, mass loss, flame height and flame spread speed were measured during the tests. The results showed that the average flame spread rate is 0.24, 0.23, 0.19, 0.31, 0.42 and 0.51 cm·s⁻¹ for the tests that the ignition position is far from the center point of the material. At the x3 ignition position condition, the average flame height and mass loss rate was lower and the combustion time was longer than the other tests due to the difference of the heat transfer mode. Then the heat transfer mechanism of the combustion process with different ignition position was analyzed.

Key words: latex foam; ignition position; flame spread; heat transfer; safety; experimental validation

收稿日期: 2018-10-19 修回日期: 2019-04-09

通信作者: 黄冬梅(1984—), 女, 博士, 副教授, dmhuang@cjl.edu.cn, 20021567@163.com

第一作者: 张明振(1992—), 男, 硕士研究生, 2292453790@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0810600, 2017YFC0804905); 浙江省自然科学基金项目(17E060004); 浙江省重点研发项目(2018C01136)

引用本文: 张明振, 黄冬梅, 胡毅伟, 原琪, 席合一, 沈利铭, 段鹏征. 点火位置对乳胶泡沫水平火蔓延规律的影响[J]. 化工学报, 2019, 70(7): 2802-2810

Citation: ZHANG Mingzhen, HUANG Dongmei, HU Yiwei, YUAN Qi, XI Heyi, SHEN Liming, DUAN Pengzheng. Effect of ignition position on horizontal flame spread of latex foam[J]. CIESC Journal, 2019, 70(7): 2802-2810

引 言

随着人们生活水平的提高,乳胶床垫因具有透气抗菌、超高弹性、经久耐用等优点受到消费者的广泛青睐。乳胶泡沫作为床垫填充材料,由天然乳胶(NR)发泡而成,极易被引燃,一旦被引燃将迅速释放大量热和有毒烟雾^[1]。乳胶泡沫均匀分布气孔,发生火灾时,这些孔隙为燃烧提供充足的氧气,促使火焰不断向周围蔓延,加剧火灾危险性,造成巨大人员伤亡及财产损失。另外,火焰蔓延过程复杂,除了受材料自身性质的影响^[2],同样受到各种外界环境的影响^[3],研究不同条件下火焰蔓延规律并了解其传热机理很有必要。

前人研究发现样品宽度、厚度及外部环境等因素影响火焰的蔓延过程,不同条件下火焰蔓延规律具有较大差异。Wang等^[4]研究点火条件对聚合物聚丙烯(PP)燃烧特性的影响,在PP薄板的右下边缘,下边缘中心和整个下边缘三个点火位置点火,结果表明,点火位置明显影响放热速率、峰值放热率、烟雾温度、CO浓度和消光系数等特性参数。黄新杰等^[5]在合肥和拉萨两地搭建火蔓延实验台,研究了保温材料EPS、XPS在不同初始环境压力和温度条件下的火蔓延过程,EPS材料的火蔓延速度分别为0.22、0.31 cm·s⁻¹,XPS材料的火蔓延速度分别为0.12、0.22 cm·s⁻¹。万维等^[6]通过实验测量了3 mm厚的白木在氧浓度分别为正常大气氧浓度0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5倍条件下的火蔓延特性,研究发现,火蔓延速率以二次指数形式随氧浓度的增加而增加。王喜世等^[7]实验测量了木材在顺风条件下风速大小对火蔓延速率的影响,当风速在80~200 cm·s⁻¹范围内,火蔓延速率随风速的不断增大而增大,其中植木的火蔓延速率增长最快,最大火蔓延速率为0.83 cm·s⁻¹。齐丽婷等^[8]通过测量牛皮纸、硬纸板的火蔓延速率,并建立薄片火蔓延速率的简化模型,其中牛皮纸、横纹硬纸板、竖纹硬纸板的火蔓延速率分别为0.136、0.061、0.118 cm·s⁻¹。Zhang等^[9]对白木和挤塑聚苯乙烯(XPS)的火蔓延特性进行了研究,发现两种材料的火焰蔓延速率和表面热通量都首先下降,然后随样品宽度的增加而上升。主要原因是受到对流和辐射两种不同传热方式的影响,当样本宽度较小时,对流状态占主导地位。热通量随样品宽度增加而减小,使得火焰蔓延速率下降;当样品宽度较大时,辐射状态占主导地位,热通量

随样品宽度的增加而增加,火焰蔓延速率上升。何学超等^[10]分析了在90°弯曲管道内不同点火位置时预混火焰的传播特性及其微观结构变化。Xiao等^[11]研究了不同点火位置时封闭管道内氢气燃烧的火焰形状及火焰传播速度等参数的变化规律。

综上所述,研究点火位置对火蔓延规律的影响具有十分重要的意义,基于此,本文选取乳胶泡沫材料为研究对象,沿材料对角线方向选取6个不同的点火位置,研究火焰特性参数的变化规律和不同点火位置条件下的传热机制。

1 实验装置

实验装置如图1所示,主要由实验平台、排烟系统、数据采集系统3部分组成。实验平台包括样品支架、隔热石棉板、实验样品。在进行火焰蔓延实验时,为保证样品背火面良好通风,样品由孔径为1.5 cm的50 cm×50 cm低碳钢铁丝网承托,尺寸为50 cm×50 cm×70 cm的不锈钢样品支架放置在电子秤上,隔热石棉板放置在尺寸为60 cm×40 cm×30 cm落地实验支架表面,避免实验样品燃烧灰烬掉落对质量结果造成影响。实验样品乳胶泡沫(NR)尺寸25 cm×25 cm×2 cm,气孔间距3 cm,每个样品上表面和下表面绘制一组间隔2.5 cm的平行线,方便热电偶的布置以及随时记录火焰前锋的蔓延距离。如图1(b)所示,样品表面布置11根热电偶T1~T11。

排烟系统包括尺寸为200 cm×300 cm集烟罩和直径40 cm排烟管道。数据采集系统主要由电子秤、数据采集仪、K型铠装热电偶、图像采集设备和计算机组成。K型(镍铬-镍硅)铠装热电偶直径0.05 cm,铠装部分和补偿导线的长度均为100 cm,测温范围-200~1300℃^[12-13]。电子秤精度0.2 g。温度数据采集选用安捷伦34908A型。CCD1型和2型相机用于记录样品表面45°方向和水平方向火焰形态和火焰蔓延过程^[14],CCD3型相机记录与样品表面呈-45°方向的样品背火面燃烧过程。

分别在距材料中心点0、3.54、7.08、10.62、14.16、17.70 cm位置处点火,使用明火电子点火器引燃实验样品,点火器使用燃料为液态正丁烷(C₄H₁₀)。在不同点火位置点火时,点火器与实验样品表面呈45°夹角,使点火器火焰与实验样品表面接触面积大小一样,在试样产生稳定火焰之后移开

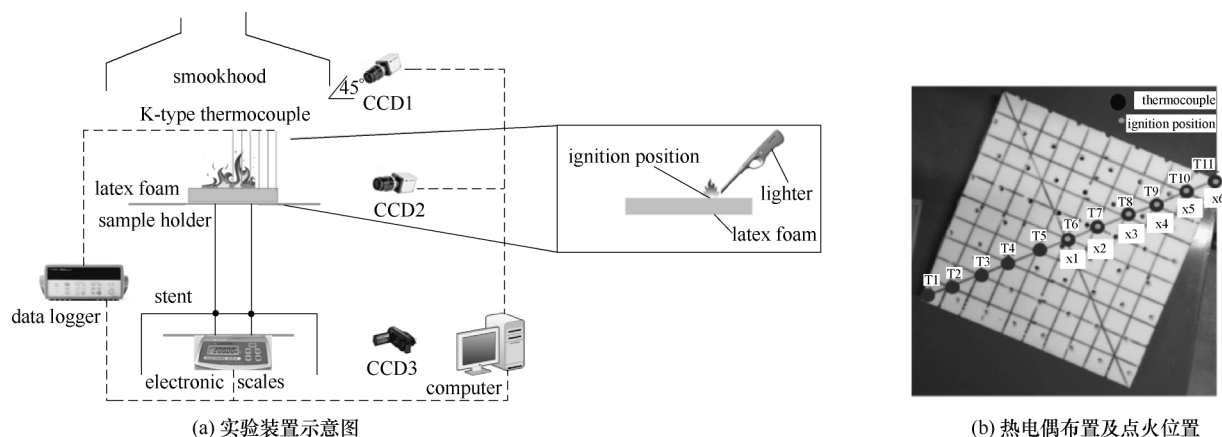


图 1 实验装置示意图和热电偶布置及点火位置

Fig.1 Schematic of experimental device and sample ignition position and thermocouple arrangement

点火器。样品选取时保证其气孔分布一致,为避免样品含水率对实验结果产生影响,将实验材料放置于 40℃ 干燥箱 12 h。

2 实验结果分析与讨论

图 2(a)所示为位于实验样品边缘的热电偶 T1 在 2 组 x1 点火位置实验过程中的温度变化,通过式 (1) 计算其标准偏差系数

$$RSD = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

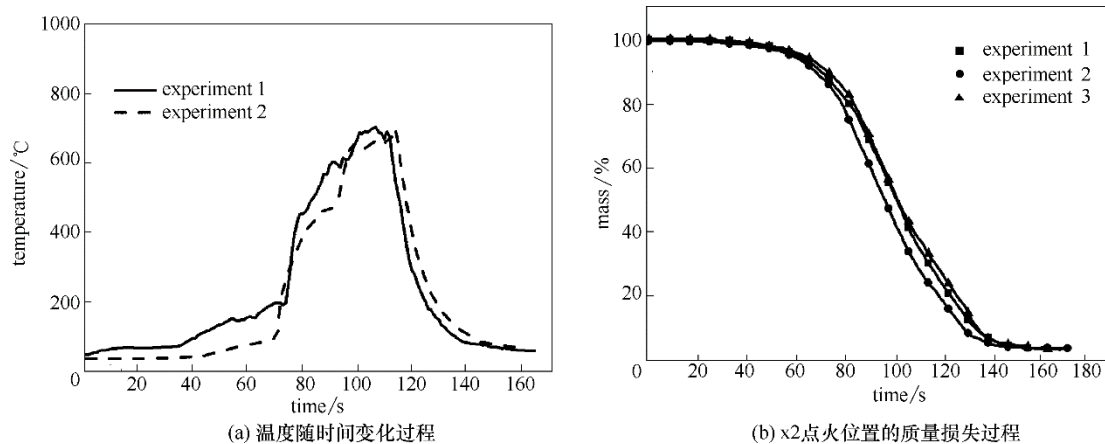
其中, S 为标准偏差, $\bar{x}$ 为平均值。在这两组实验过程中,燃烧时间 72、74 s 后火焰蔓延至热电偶 T1 位置,热电偶温度迅速升高,在 100 s 左右达到峰值。由式 (1) 计算热电偶 T1 温度的平均标准偏差系数为 12%。图 2(b) 为 3 组 x2 位置点火时燃烧过程的质量变化曲线,由式 (1) 可得实验 E1-E3 的质量

平均标准偏差系数为 13.3%。

相对标准偏差(RSD)表示精密性,描述获得实验数据的分散程度,在不同的实验条件下有不同的度量。火焰蔓延实验受到试样条件和环境条件等多种因素的影响,可重复性较差,计算所得标准偏差系数可在一定程度上反映本实验的重复性和再现性。

2.1 火焰形态

图 3 为不同点火位置时乳胶泡沫材料不同时刻的火焰形态,包括已燃区、火焰区、未燃区,引燃初期火焰区较小,火焰形态变化不大,经过稳定的扩展阶段,火焰高度、火焰前锋长度不断增大,当火焰蔓延至材料边缘时,火焰形态发生变化。当火焰前锋蔓延至材料尾端,整个材料表面被全部引燃。图 3 可见点火位置 x1 时火焰形态为圆锥形,经过 74 s 火焰蔓延至整个材料表面,火焰形态变为角锥形,在燃烧时间 110 s 时火焰形态突然变大,乳胶泡沫材



(a) 温度随时间变化过程

(b) x2点火位置的质量损失过程

图 2 实验样品温度和质量变化过程

Fig.2 Experimental sample temperature and mass change process

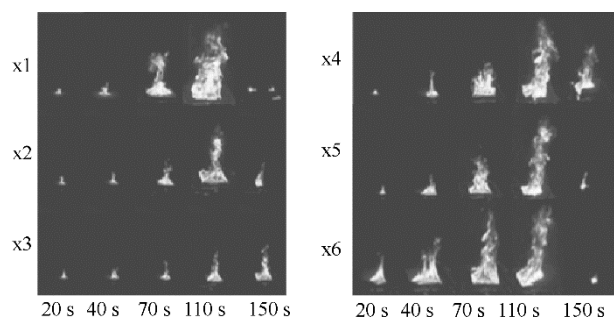


图3 不同点火位置时乳胶泡沫火焰形态

Fig.3 Latex foam flame pattern at different ignition positions

料剧烈燃烧,瞬间释放大量热量。这主要是因为火焰在水平方向蔓延的同时也在竖直方向蔓延,当背火面被烧穿时,大量新鲜空气涌入。点火位置x2、x3时,火焰蔓延至整个材料表面所需时间分别为92 s、129 s。火焰在燃烧初始阶段蔓延速率较慢,同时火焰高度波动幅度较小。点火位置x4、x5时火焰蔓延至整个材料表面所需时间分别为90 s、76 s,随着材料的不断消耗,火焰波动幅度加大,分别在195 s、180 s时火焰熄灭。点火位置x6时点燃初期火焰形态为角锥形,经过70 s火焰蔓延至整个材料表面,在176 s时火焰熄灭。

试样热解产生大量挥发性产物,当挥发分和空气组成的混合物达到其化学当量比的时候开始燃烧,火焰内部存在大量活跃气态分子,火焰形状与这些气态分子的移动过程有关。由图3所示火焰形态可知,在火焰蔓延至材料边缘之前,材料表面火焰区呈圆形向四周方向蔓延,当火焰蔓延至材料边缘之后,火焰区形状和火焰形态发生变化。燃烧时间20 s时,x1~x5点火位置的火焰体积相差不大,在燃烧时间为40 s、70 s时,x3点火位置的火焰体积较小,未燃区接收到火焰的热量较少,其热解过程相对较缓慢。图4为实验样品表面火蔓延过程示意图,不同点火位置点距离材料边缘最短距离分别为12.5、10、7.5、5、2.5、0 cm,除中心点火位置x1外,点火位置点距离材料边缘位置越近,材料燃烧时间越

短。火蔓延过程中未燃区接收的热量与火焰前锋长度和火焰区火焰体积等参数有关^[15-16]。火焰蔓延过程中,火焰前锋长度有一个不断增长的过程,火焰区传递到未燃区的热量随火焰前锋长度的增加而增加,进而加速未燃区材料的热解。

2.2 火焰高度

应用自行编写的 Matlab 程序,对工业相机 (CCD2) 获得火焰图像进行二值化处理^[17-18],判断火焰图像中每一个像素点是否为火焰区,由程序计算并导出火焰高度数据,相机帧率为 25 fps。图5为2 cm厚度乳胶泡沫材料在不同点火位置条件下的火焰高度变化。以点火位置x1、x4时火焰高度为例,点火位置x1时火焰高度在95 s前随时间不断升高,在95~110 s之间火焰高度在一定范围内脉动。点火位置x4时,火焰高度没有在一定范围内脉动的阶段,在120 s时达到峰值。火焰高度值由浮力作用决定^[19-20],随着燃烧过程的加剧,产生的热量不断增多,使火焰向上的浮力增加,进而火焰高度不断增加,火焰高度在极短时间内出现波动现象是由于受到空气卷吸作用,火焰高度在一定范围内波动。在材料背火面烧穿时,突然有大量新鲜空气涌入,加剧材料燃烧,使得火焰高度迅速升高。随着材料的不断消耗,火焰高度开始缓慢降低。

如图6所示,点火位置x2、x3时燃烧时间较长,最大火焰高度较低。点火位置从材料中心位置x1到材料边缘位置x6变化过程中,平均火焰高度分别约为287.24、305.62、275.42、311.83、313.58、341.48 mm。由此发现,点火位置x3时平均火焰高度最小,随着点火位置x3向材料边缘移动平均火焰高度不断增大。x6点火位置平均火焰高度最高,原因是x6点火位置位于材料边缘,与空气接触面积最大,在材料引燃后,试样热解产生的挥发分在浮力和空气卷吸作用下可以更快地向材料上方移动。另外,边缘点火时可以为材料的燃烧提供充足的氧气,使得试样的燃烧更为充分。

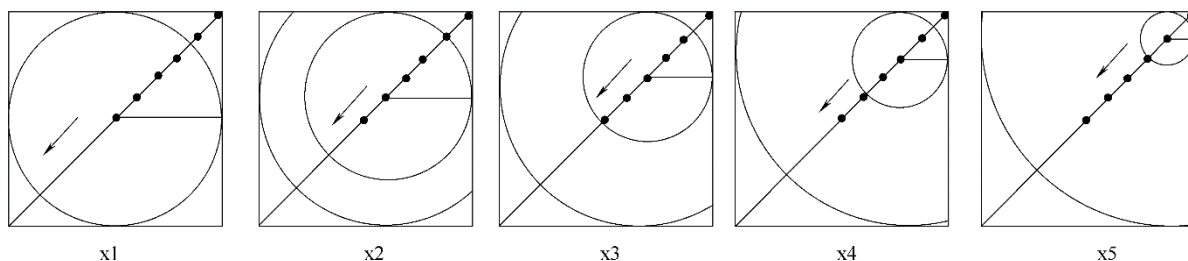


图4 表面火蔓延过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of surface fire spread

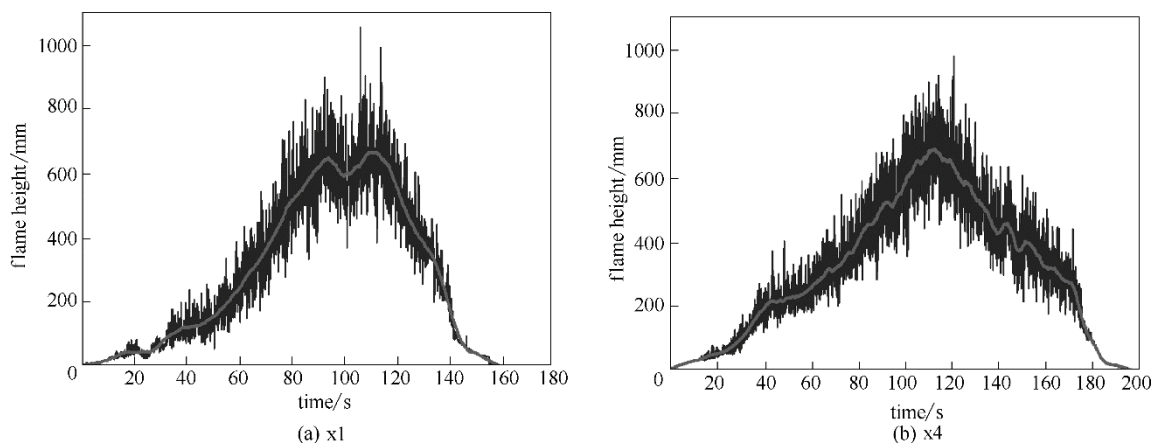


图5 不同点火位置下乳胶泡沫火焰高度

Fig.5 Flame height of latex foam under different ignition positions

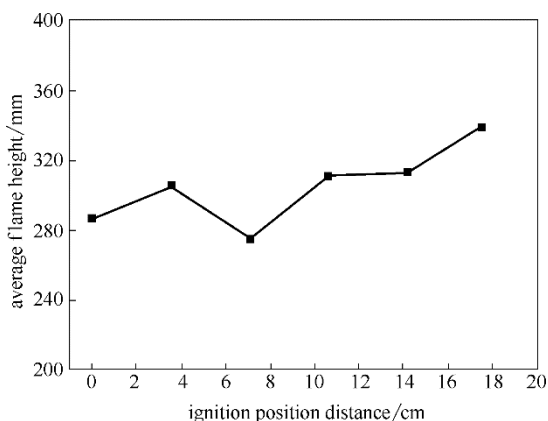


图6 不同点火位置条件下火焰高度变化

Fig.6 Flame height under different ignition positions

2.3 质量损失速率

质量损失速率^[21]是一个重要的燃烧参数,表示材料燃烧过程中质量损失的变化,反映乳胶泡沫在不同点火位置的热解挥发速度大小。图7为不同点火位置条件下乳胶泡沫的质量变化趋势,平均质量损失速率分别为0.62、0.52、0.44、0.49、0.55、0.54 g·s⁻¹。热释放速率是评价火灾危险性的重要因素^[22-23],表示单位时间内可燃物燃烧所释放出的热量。由式(2)可获得材料热释放速率^[24]

$$Q = \phi \dot{m} \Delta H \quad (2)$$

式中, ϕ 为燃烧效率因子, $\dot{m}$ 是质量损失速率, ΔH 为材料热值。不同点火位置条件下热释放速率比值等于质量损失速率比,热释放速率越大说明有更多的能量传递到固体表面,导致火蔓延速率增大。

图8给出了不同点火位置条件下乳胶泡沫的质量损失速率曲线。可以看出,质量损失速率均呈现先增大后减小的规律,是由于初始发展阶段火焰区

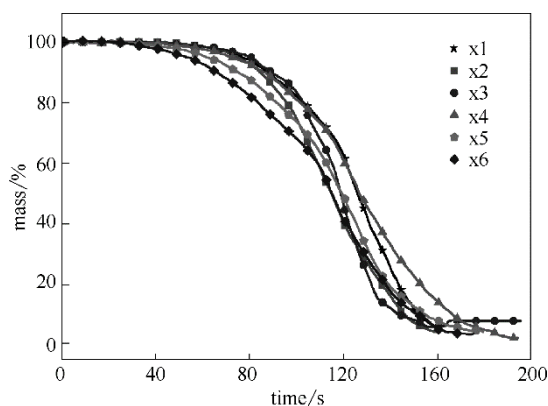


图7 不同点火位置下乳胶泡沫的质量变化

Fig.7 Change of latex foam quality at different ignition positions

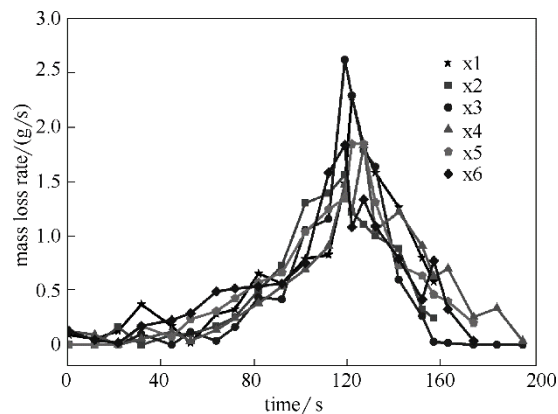


图8 不同点火位置下乳胶泡沫的质量损失速率

Fig.8 Mass loss rate of latex foam at different ignition positions

燃烧面积较小,质量损失速率较小,火焰区燃烧面积随时间不断增大,质量损失速率相应增大。不同点火位置x1~x6的最大质量损失速率分别为2.28、1.56、2.62、1.85、1.84、1.83 g·s⁻¹。x3位置时平均质量损失速率最小,最大质量损失速率较大,在110~

130 s时间段内质量损失速率大于其他点火位置条件下,但是在其他时间段内质量损失速率均处于较低水平。是由于在x3点火位置时,火蔓延过程燃烧较为平缓,火焰蔓延至材料边缘后,大量空气突然涌入,使得燃烧过程突然加剧,因为x3点火位置条件时剩余材料较多,燃烧剧烈程度相比其他点火位置条件下更大,最大质量损失速率亦增大。由于整体燃烧过程时间较长,平均质量损失速率最小。中间点火位置条件下燃烧时间最短,平均质量损失速率最大,燃烧过程较为剧烈,发生火灾时对周围环境具有更大的危害性。

2.4 火焰温度及火蔓延速率

如图1(b)所示材料表面布置11根热电偶,可以得到乳胶泡沫表面在燃烧过程中的温度变化规律,读取火焰前锋蔓延至不同位置时的时间。本文选取乳胶泡沫材料厚度为2 cm,根据材料表面温度分布曲线计算热穿透深度 σ_T 。 σ_T 可以定义为^[25]

$$\sigma_T = C\sqrt{\alpha t} \quad (3)$$

式中, α 是热扩散系数, $\alpha=c_p k/\rho$, c_p 为样品的比热容, $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$; k 为热导率, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$; ρ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 t 是从初始条件达到点火所需温度的时间; C 是经验常数。乳胶泡沫材料的热扩散系数 α 为 $2\times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,经验常数 C 为2.7。图9为点火位置x1、x2、x6时材料表面温度分布曲线及温度与时间的一阶导数曲线。可得不同点火位置下x1~x6点火时间分别为8、12、9、11、13、11 s。由式(3)可得不同点火位置下材料热穿透深度分别为3.4、5.1、3.8、4.0、4.4、4.0 cm。可知2 cm厚度乳胶泡沫为热薄型材料。

图10为乳胶泡沫表面温度随时间变化的曲线,当火焰蔓延至热电偶布置点,温度迅速升高。火焰温度的高低对热量的传递有着一定的影响^[26],温度越高传递到未燃区的热量越多,使得材料热解、火焰蔓延加快。由图10可知,点火位置x1在第二阶段仍然有一个温度上升的过程,火焰在蔓延至材料表面之后燃烧程度变得更加剧烈,在110 s时温度达到峰值,随后急剧下降。点火位置x6在第2阶段时,温度在一定范围内波动,随着材料的不断消耗,温度开始降低,燃烧过程进入熄灭阶段。温度峰值出现在稳定燃烧阶段,是由于材料背火面烧穿,大量新鲜空气瞬间涌入,燃烧突然加剧,导致温度急剧升高。

图11为火蔓延速率随时间变化曲线,在距离材料中心点0、3.54、7.08、10.62、14.16、17.70 cm位置处

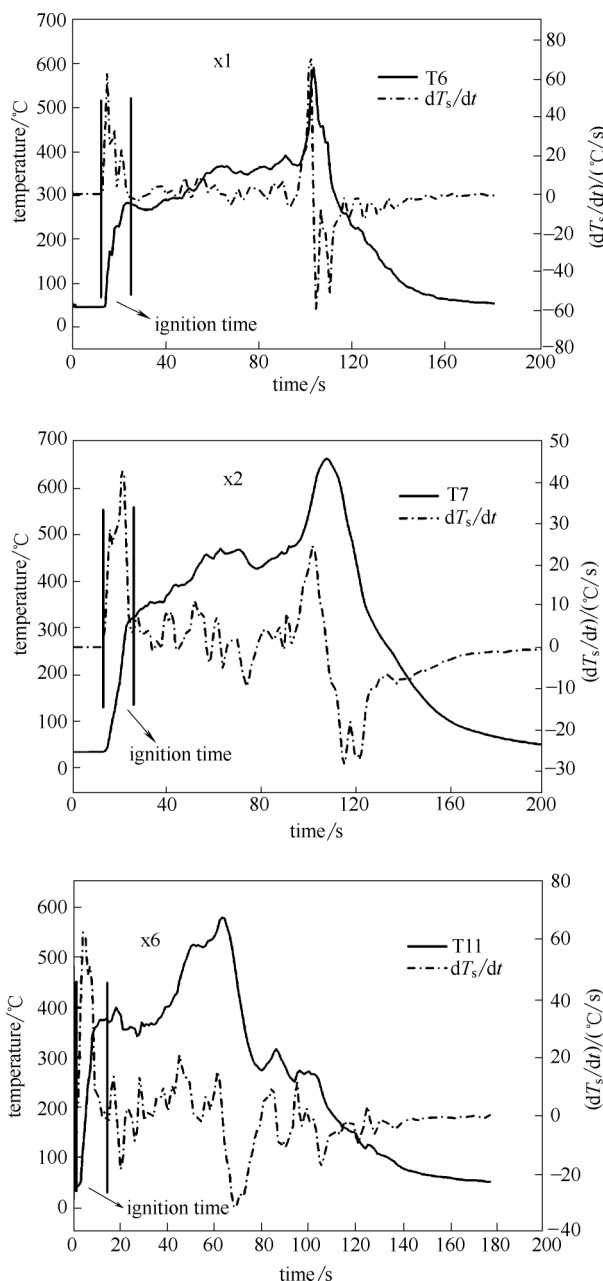


图9 不同点火位置乳胶泡沫材料表面温度分布曲线

Fig.9 Surface temperature profile of latex foam in different ignition positions

点火,平均火蔓延速率分别为0.24、0.23、0.19、0.31、0.42、0.51 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。x2、x3位置时平均火蔓延速率较小,x4、x5、x6位置时,点火位置越靠近材料边缘平均火蔓延速率越大。材料未燃区接受到的热量主要来自火焰辐射热和固体传热,与火焰区面积、火焰前锋周长有关^[27]。

点火位置为x3时,火蔓延速率变化相对较小,火蔓延过程较为稳定,燃烧时间也较长,最大火蔓延速率为0.39 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。点火位置x6时,经过70 s整个

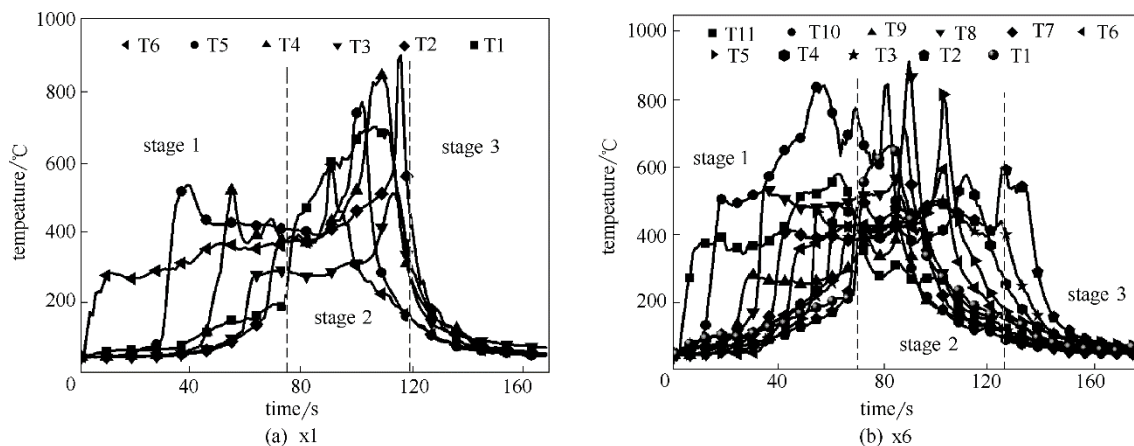


图10 乳胶泡沫表面温度随时间的变化

Fig.10 Latex foam surface temperature change with time

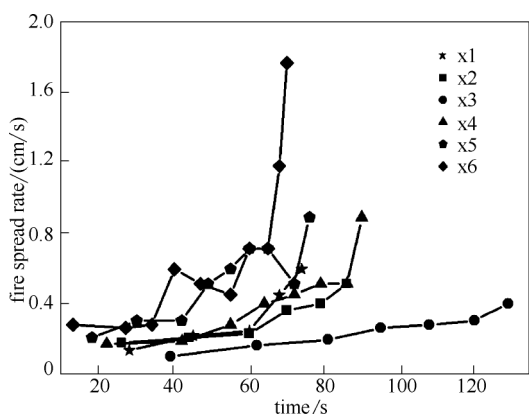


图11 火蔓延速率随时间的变化

Fig.11 Change of fire spread rate with time

材料表面即被引燃,最大火蔓延速率为 $1.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。点火位置在 x1、x2、x4、x5 时,最大火蔓延速率分别为 0.59 、 0.51 、 0.89 、 $0.89 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。火蔓延过程中的火蔓延速率与火焰前锋长度可由式(4)^[25]表示

$$v_p = \frac{(dT/dt)_{\max}}{T_{ig} - T_1} \times \delta_f \quad (4)$$

其中, T_{ig} 和 T_1 分别是点火温度和环境温度, $^{\circ}\text{C}$; v_p 是火焰蔓延速率, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $(dT/dt)_{\max}$ 是样品表面温度最大变化速率, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$; δ_f 是火焰前锋长度, cm 。

2.5 火焰蔓延过程传热模型

图12所示为火焰蔓延过程中的传热原理示意图,材料表面可大致分为燃烧区、未燃区、燃烬区^[28],乳胶泡沫接收外界热源传递来的大量热量,其特殊三维网状多孔结构使得热量不易散发出去,使得温度不断升高,进而材料开始热解。图中 $\hat{q}_{f,c}''$ 代表从火焰传递到材料的对流热量, $\hat{q}_{f,r}''$ 代表传递到材料的辐射热, $\hat{q}_{s,rr}''$ 代表从材料表面到周围的再辐射^[29]。

由图10可知点火位置不同使得材料火蔓延速率产生差异,与火蔓延过程中热量的传递有关,燃烧区产生的能量不断注入未燃区,使未燃区材料热解,燃烧得以维持^[30]。当传入未燃区的热量减少时,其热解速率减慢,火蔓延速率随之减少。乳胶泡沫温度达到热解温度时,材料热解释放出可燃气与空气混合后发生扩散燃烧,产生热量反馈到未燃区固体表面,加速未燃区材料热解,燃烧完成的地方成为燃烬区^[31-32]。由图12(a)所示,燃烧区向四周的未燃区传递对流热和辐射热,随着燃烧的加剧, $\hat{q}_{f,c}'' + \hat{q}_{f,r}''$ 不断增大,未燃区材料热解速率 $\dot{m}''$ 增大,火蔓延速率相应增大。由图12(b)所示,燃烧区向一个方向传递对流热和辐射热,燃烬区随着时间变化不断增大, $\hat{q}_{f,c}'' + \hat{q}_{f,r}''$ 不断减小,未燃区材料热解速率 $\dot{m}''$ 减小。在燃烧的初期阶段,热量主要通过固体的热传导进行传递,随着火焰形态的不断变化,热辐射在热量传递中所占的比重不断增加,这与 Ray 等^[33]的研究结果相一致。

对于热薄型材料,基于热输运理论的固体表面火蔓延模型可表示如下

$$v_f = \frac{\Phi}{\rho c_p d (T_{ig} - T_1)} = \frac{\hat{q}_f'' \delta_{ph}}{\rho c_p d (T_{ig} - T_1)} \quad (5)$$

式中, ρ 、 c_p 和 d 分别是乳胶泡沫材料的密度、比热容和厚度, $\hat{q}_f''$ 是预热区表面接收到的热通量, δ_{ph} 是火焰前锋长度, T_{ig} 和 T_1 分别是点火温度和环境温度。火蔓延速率与参数 Φ 呈正比,不同点火位置时平均火蔓延速率比例关系可表示为 $1:0.96:0.79:1.29:1.75:2.13$, x3 点火位置燃烧过程中火蔓延速率较慢,其火蔓延前锋长度较小,火焰体积较小,未燃区

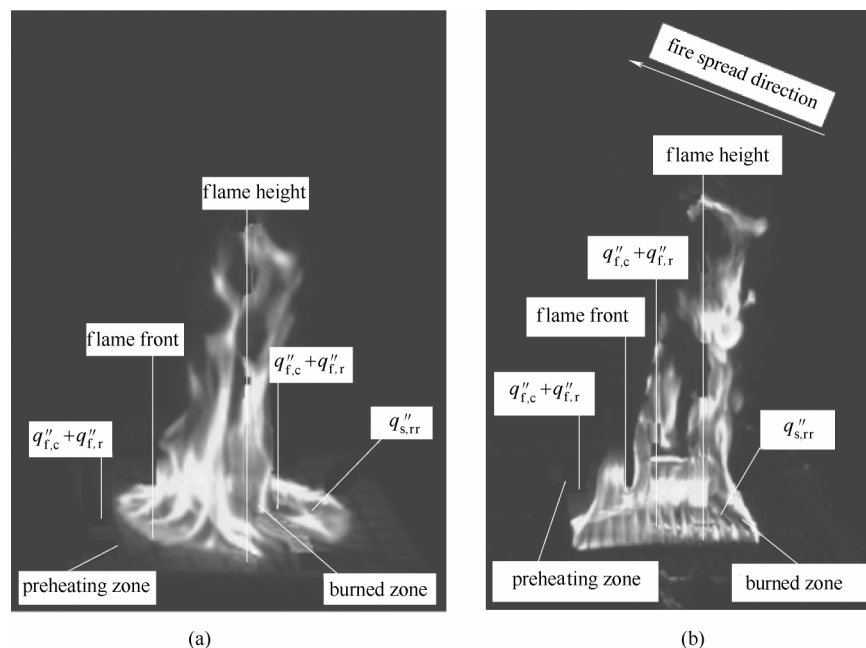


图12 火焰蔓延过程传热模型

Fig.12 Heat transfer model of flame propagation process

接收到的热通量小,材料完全燃烧之后的剧烈程度较弱,与图3所示火焰形态变化过程相吻合。

3 结 论

本文通过对乳胶泡沫材料对角线方向上的不同点火位置进行一系列燃烧特性实验,分析了火蔓延过程中火焰形态变化、表面温度分布、火蔓延速率、火焰高度等特性参数的变化规律,得到如下结论。

(1)火焰从点火点蔓延至材料边缘过程中火焰形态呈圆锥形,蔓延至材料边缘后火焰区形状发生变化,x1~x6点火位置平均火焰高度分别约为287.24、305.62、275.42、311.83、313.58、341.48 mm。

(2)不同点火位置平均火蔓延速率分别为0.24、0.23、0.19、0.31、0.42、0.51 cm·s⁻¹,引火点从材料中心至边缘变化过程中,火蔓延速率呈现先减小后增大的规律。x3点火位置时火蔓延速率最慢,由于其火蔓前锋长度较小,火焰体积较小,未燃区接收到的热通量小,热解较为缓慢。

(3)热量主要通过热传导、热辐射、热对流3种方式进行传递,在燃烧的初期阶段,热传导作为能量传递主要传热方式,随着燃烧过程的发展,热辐射在热量传递中所占的比重不断增加。中间点火位置时,材料辐射热、对流热以及未燃区材料热解速率随火蔓延过程不断增大,而边缘点火时表现出

减小的趋势。

参考文献

- [1] Chow W K. Assessment on heat release rate of furniture foam arrangement by a cone calorimeter[J]. Journal of Fire Sciences, 2002, 20(4): 319-328.
- [2] Fan H, Chen Y, Huang D M, et al. Kinetic analysis of the thermal decomposition of latex foam according to thermogravimetric analysis[J]. International Journal of Polymer Science, 2016, 2016: 1-7.
- [3] Huang D M, Zhang M Z, Guo C N, et al. Experimental investigations on the effects of bottom ventilation on the fire behavior of natural rubber latex foam[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 201-210.
- [4] Wang X, Cheng X, Li L, et al. Effect of ignition condition on typical polymer's melt flow flammability[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1): 766-771.
- [5] 黄新杰,孙金华,纪杰,等.不同外界环境下保温材料表面火蔓延规律研究[J].科学通报,2010,55(32): 3147-3152.
Huang X J, Sun J H, Ji J, et al. Study on fire spread pattern of insulating material under different external environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(32): 3147-3152.
- [6] 万维,孙金华,李杰.环境氧浓度对可碳化固体可燃物表面火蔓延的影响[J].火灾科学,2008,17(2): 73-76.
Wan W, Sun J H, Li J. Flame spread over charring materials: the influence of ambient oxygen concentration[J]. Fire Safety Science, 2008, 17(2): 73-76.
- [7] 王喜世,廖光焯,范维澄,等.木材表面火蔓延特性的动态测量研究[J].火灾科学,2000,9(1): 8-12.
Wang X S, Liao G X, Fan W C, et al. Dynamic test study on flame spread characteristics over wood surface[J]. Fire Safety Science, 2000, 9(1): 8-12.

- [8] 齐丽婷, 余永刚. 薄片可燃物火蔓延速率的测量与计算[J]. 热科学与技术, 2004, **3**(4): 365–368.
Qi L T, Yu Y G. Measurement and calculation of fire spreading velocity of combustible solids slices[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, **3**(4): 365–368.
- [9] Zhang Y, Sun J H, Huang X J, et al. Heat transfer mechanisms in horizontal flame spread over wood and extruded polystyrene surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, **61**(1): 28–34.
- [10] 何学超, 孙金华, 卢国建, 等. 点火位置对弯管预混火焰传播特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2015, **21**(1): 60–64.
He X C, Sun J H, Lu G J, et al. Influence of ignition positions on the propagation of premixed flame in a curved duct[J]. Journal of Combustion Science, 2015, **21**(1): 60–64.
- [11] Xiao H, Duan Q, Lin J, et al. Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation in a closed combustion tube [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, **39**(16): 8557–8563.
- [12] 肖琳, 张立新, 徐丽艳, 等. 专用K型铠装热电偶制作工艺的研究[J]. 功能材料, 2005, **36**(11): 1725–1727.
Xiao L, Zhang L X, Xu L Y, et al. The production research for specified armourd K-type thermocouple[J]. Journal of Functional Materials, 2005, **36**(11): 1725–1727.
- [13] 魏可臻, 张奇. 热电偶热传导测温中的动态响应时间和误差估计[J]. 测试技术学报, 2007, **21**(6): 523–526.
Wei K Z, Zhang Q. Dynamic response time and deviation estimate of thermocouple during heat-exchange temperature measurement [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, **21**(6): 523–526.
- [14] 王林, 靳红雨, 吕东. 基于MATLAB图像处理技术提取火焰高度[J]. 消防科学与技术, 2017, **36**(3): 366–369.
Wang L, Jin H Y, Lyu D. Detection of flame tip height based on MATLAB image processing technology[J]. Fire Science and Technology, 2017, **36**(3): 366–369.
- [15] Jiang L, Miller C H, Gollner M J, et al. Sample width and thickness effects on horizontal flame spread over a thin PMMA surface[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, **36**(2): 2987–2994.
- [16] Zhou Y, Xiao H, Yan W, et al. Horizontal flame spread characteristics of rigid polyurethane and molded polystyrene foams under externally applied radiation at two different altitudes [J]. Fire Technology, 2015, **51**(5): 1195–1216.
- [17] Mishra D P, Kumar P. Experimental investigation of laminar LPG-H₂ jet diffusion flame with preheated reactants[J]. Fuel, 2008, **87** (13/14): 3091–3095.
- [18] 江平. 航空煤油池火脉动频率试验研究[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(4): 76–81.
Jiang P. Experimental study of the fluctuation frequencies of aviation fuel pool fires[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(4): 76–81.
- [19] Weise D R, Biging G S. Effects of wind velocity and slope on fire behavior[J]. Fire Safety Science, 1994, **4**(4): 1041–1051.
- [20] Linn R R, Cunningham P. Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere – fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, **110**(13): 107–126.
- [21] Zhang B S, Zhang J Q, Wang X M, et al. Effects of air inlet configuration on forced-ventilation enclosure fires on a naval ship [J]. Fire Technology, 2016, **52**(2): 547–562.
- [22] Mouritz A P, Mathys Z, Gibson A G. Heat release of polymer composites in fire[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, **37**(7): 1040–1054.
- [23] Babrauskas V, Peacock R D. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard[J]. Fire Safety Journal, 1992, **18** (3): 255–272.
- [24] 钟委, 霍然, 史聪灵. 热释放速率设定方式的几点讨论[J]. 自然灾害学报, 2004, (2): 64–69.
Zhong W, Huo R, Shi C L. Some discussion on methodology to design heat release rate[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, (2): 64–69.
- [25] Quintiere J G. Fundamentals of Fire Phenomena[M]. Chichester: John Wiley, 2006: 26.
- [26] 黄新杰, 刘伟, 陈功建, 等. 不同宽度及放置角度下聚甲基丙烯酸甲酯的燃烧传热特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, **33** (7): 88–93.
Huang X J, Liu W, Chen G J, et al. Effects of width and incline angle on combustion and heat transfer characteristics of poly[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2017, **33**(7): 88–93.
- [27] Huang D M, Zhang M Z, Shi L, et al. Fire behaviors of single and laminated natural latex foam[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, **136**: 278–286.
- [28] 周洋. 高原环境中硬质聚氨酯和聚苯乙烯泡沫的火蔓延特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
Zhou Y. Study on flame spread characteristics of rigid polyurethane and polystyrene foams at a high altitude[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [29] Jiang L, Xiao H, Zhou Y, et al. Theoretical and experimental study of width effects on horizontal flame spread over extruded and expanded polystyrene foam surfaces[J]. Journal of Fire Sciences, 2014, **32**(3): 193–209.
- [30] 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[J]. 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[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, **18**(5): 1029–1036.
- [31] Zhang Y, Huang X, Wang Q, et al. Experimental study on the characteristics of horizontal flame spread over XPS surface on plateau[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(1/2): 34–39.
- [32] Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics[M]. John Wiley & Sons, 2011: 55–75.
- [33] Ray S R, Fernandez-pello A C, Glassman I. A study of the heat transfer mechanisms in horizontal flame propagation[J]. Journal of Heat Transfer, 1980, **102**(2): 357–363.