

不同外界环境下保温材料表面火蔓延规律研究

黄新杰, 孙金华*, 纪杰, 张英, 王青松, 张毅

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: sunjh@ustc.edu.cn

2010-03-18 收稿, 2010-09-10 接受

国家自然科学基金(50976110)和中国博士后科学基金(20090450703)资助项目

摘要 为了揭示保温材料模塑聚苯乙烯泡沫板(EPS)和挤塑聚苯乙烯泡沫板(XPS)在不同放置角度以及不同压力和氧气浓度等环境条件下火蔓延特性规律, 分别在高原地区的拉萨和平原地区的合肥对其进行了火蔓延实验. 实验是在小尺寸火蔓延实验台中进行的. 通过分析在水平放置时, 保温材料在两地火蔓延过程中平均池火长度、火蔓延速度、平均火焰高度、预热区长度等特性参数的变化规律, 定量地揭示了高原和平原环境对保温材料火蔓延特性参数的影响. 重点分析了水平放置情况下, 保温材料火蔓延过程中各参数的变化特点, 得到在合肥地区测得的 EPS 和 XPS 的平均池火长度、火蔓延速度、平均火焰高度、预热区长度都高于在拉萨地区情况下.

关键词

保温材料
模塑聚苯乙烯泡沫板
挤塑聚苯乙烯泡沫板
低压低氧
火蔓延速度

面对全球能源的日益紧张, 能源问题已经成为制约世界经济保持平稳快速增长, 社会可持续发展的主要因素之一. 建筑耗能是我国能源消耗的一个主要方面, 大力发展节能型建筑已成为当今社会和人们的共识. 由于外墙外保温材料具有很好的保温隔热效果, 广泛地运用于高层建筑中. 目前高层建筑外立面所采用保温材料绝大部分都是高分子有机发泡保温板, 如模塑聚苯乙烯泡沫板(EPS)、挤塑聚苯乙烯泡沫板(XPS)等. 然而这类保温材料具有发热量大, 火焰温度高, 燃烧速度快, 发烟量和毒性大等特点, 其火灾安全隐患已经得到广泛的关注. 例如, 2009 年 2 月 9 日中国中央电视台北配楼发生的火灾, 就是由于烟花点燃了北配楼外立面构造中的保温材料(XPS), 之后迅速蔓延, 最终点燃了整栋大楼, 火灾造成了 1 名消防员牺牲, 7 人受伤, 直接经济损失达数亿元人民币. 因此, 系统地研究保温材料的火蔓延特性, 具有重要的现实意义. 火蔓延速度在很多情况下, 决定了火灾的严重程度. Lie 实验研究了两种典型的保温材料, EPS(热塑性)、聚氨酯泡沫(热固性)

在空心墙中的火蔓延情况, 得到了保温材料在两层混凝土面板中具有不同空气间隙情况下的火蔓延速度的大小^[1]. Oleszkiewicz 研究了全尺寸下外墙外保温材料的火蔓延特性, 对不同种类的保温材料进行了火灾危险性的分析, 测定了火蔓延的距离以及最大的热通量, 从而对材料的火蔓延特性进行了分类^[2]. 邹样辉等人^[3]对泡沫等多种典型可燃材料在外加辐射条件下的水平方向火蔓延进行了实验, 分析了不同性质材料的火蔓延速率的变化规律. 徐亮等人^[4]利用 ISO9705 装置对热塑性装饰材料 EPS 进行了火灾特性实验, 将保温材料的火蔓延归属于流动燃烧类型, 得到材料的熔融流动能力是影响流动燃烧火灾发展过程的重要因素. 然而由于我国幅员辽阔, 南北的温差和东西的海拔高度相差都非常大, 针对不同环境条件下(压力、氧浓度等)建筑保温材料的火蔓延特性研究的相对较少. 仅有几篇关于可碳化固体可燃物白木在高原地区的火蔓延特性研究的报道, 对比了在拉萨和合肥环境下, 火蔓延速度、火焰高度、火焰温度等参数的变化^[5-7].

英文版见: Huang X J, Sun J H, Ji J, et al. Flame spread over the surface of thermal insulation materials in different environments. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-4187-z

本文对常用的保温材料 EPS, XPS, 在相同的尺寸下, 分别在拉萨高原环境和合肥平原环境下进行了小尺寸火蔓延实验. 重点分析了保温材料在水平放置角度下, 两地火蔓延过程中平均池火长度、火蔓延速度、平均火焰高度、预热区长度等特性参数的变化规律.

1 实验

(i) 实验系统. 实验是在小尺寸火蔓延实验台进行的. 实验系统如下图 1 所示, 由以下 2 个部分组成: (a) 旋转式实验支架系统, 包括旋转实验支架和石膏板. 在石膏板上放有保温材料, 可进行保温材料在不同放置角度下单面火蔓延实验; (b) 火蔓延特性测量系统, 包括热电偶、辐射热流计、摄像机以及数据采集器和热流采集器. 通过热电偶可以测定保温材料火蔓延过程中气相温度的变化以及保温材料表面和内部温度的变化; 通过热流计可以测定火蔓延过程中热辐射通量的变化; 通过摄像机拍摄保温材料火蔓延的动态过程, 得到保温材料的热解前锋位置和火蔓延时间的关系.

(ii) 试样准备和实验测量. 选取两种典型的保温材料 EPS, XPS, 其密度分别为 18 和 36 kg/m³, 材料的尺寸大小相同, 长度、宽度、厚度分别为 80, 4, 4 cm. 试样的底表面用铝箔进行包裹, 起到隔热和防止熔融的保温材料流淌到石膏板上. 在试样的上表面每隔 5 cm 画一条平行线, 便于拍摄火蔓延过程中, 不同时刻热解前锋的瞬时位置.

实验时将准备好的试样放置于石膏板上, 在试样的上表面, 中间位置长度 40 cm 处, 布置一热电偶,

测量火蔓延过程中, 试样表面温度的变化.

2 结果及分析

保温材料火蔓延实验, 是在具有高原环境的拉萨和具有平原环境的合肥进行的. 实验时两地地理气象条件如下表 1 所示.

从表 1 可以看出, 拉萨地区属于低压低氧的环境, 而合肥地区属于常压常氧的环境. 保温材料在两地的火蔓延, 可以代表着高原和平原环境下, 不同大气压力不同氧气浓度下, 保温材料火蔓延的特点.

2.1 水平角度下保温材料火蔓延特点

保温材料 EPS, XPS 作为典型的热塑性材料, 其燃烧过程有其自身的特点. 图 2 为在拉萨环境下, 80 cm 长、4 cm 厚、4 cm 宽 EPS 在水平角度下, 不同时刻火蔓延过程中火焰形状, 能够很好地反映保温材料火蔓延的特点. 很明显, EPS, XPS 等热塑性固体材料与可炭化固体材料表面火蔓延有明显的不同. 对于热塑性材料而言, 其燃烧区有两部分构成, 其一是在固体表面燃烧的火焰区(定义火焰区 I), 其二是紧随其后的池火区(定义火焰区 II), 其定义如图 3 所示. 这是由于当未燃的热塑性材料接受到火焰传给的热量时, 开始收缩、熔融、热解、起泡和汽

表 1 两地地理气象条件

地区	大气压力 /kPa	绝对氧 气浓度 (%)	空气 密度/kg·m ⁻³	相对湿度 (%)	环境 温度/K
拉萨	65.5	13.2	0.83	25	297
合肥	101.8	21.0	1.28	35	295

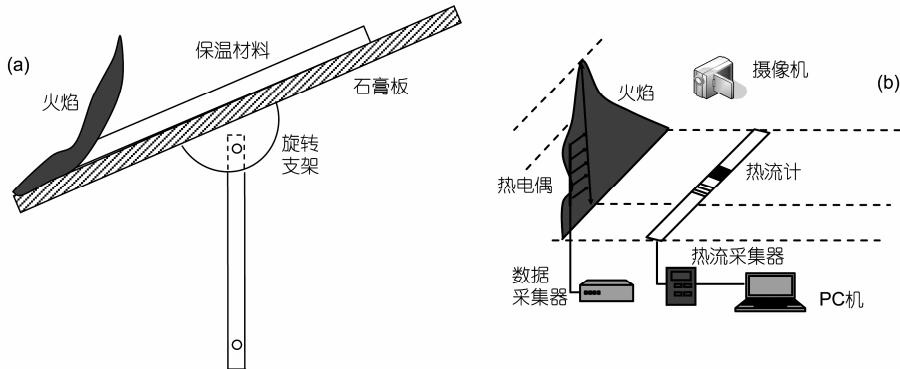


图 1 保温材料小尺寸火蔓延实验系统

(a) 旋转式实验支架系统; (b) 火蔓延特性测量系统

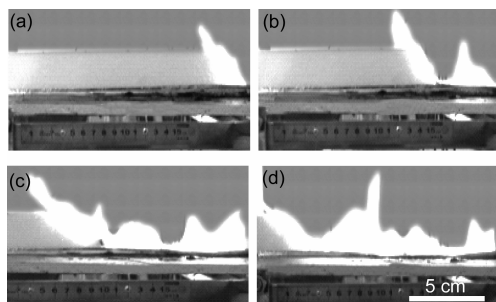


图2 拉萨环境下 EPS 不同时刻火焰形状
(a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 120 s

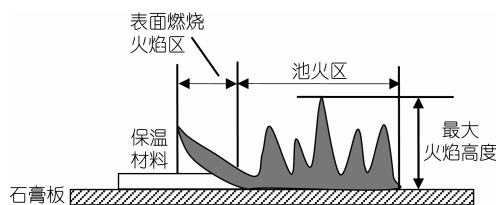


图3 热塑性材料表面火蔓延结构示意图

化,在固体表面附近形成火焰,那些没有在火焰区 I 内消耗掉的熔融 EPS 液体,便在火焰区 I 后形成池火燃烧.池火的长度和最大火焰高度的定义同样如图 3 所示.

2.2 水平角度下池火长度和最大火焰高度

由于热塑性材料具有受热软化流动的特性,这使得热塑性材料在火灾中可能会通过可燃液体的流动加速火蔓延速度,扩大火灾的危害程度,也可能通过流动行为减少火源附近可燃物的荷载从而限制火灾发展.因此,研究火蔓延过程中池火长度的变化,对研究火灾危险性具有一定的现实意义.

图 4 为 4 cm 厚、4 cm 宽的 EPS 在水平放置情况下,分别在拉萨和合肥实验中得到的池火的长度随时间的变化关系.

从图 4 可以看出,在拉萨, EPS 形成的平均池火的长度为 23.13 cm,而在合肥,平均池火的长度为 33.48 cm,明显高于拉萨情况下的池火长度.同时,在拉萨地区获得的最大池火长度为 26 cm,同样小于合肥地区的实测值 39 cm,表明大气压力和氧气浓度对池火长度的影响是显著的.

从图 4 同样可以看出,无论在合肥还是在拉萨,池火的长度都呈周期性的波动变化,即火蔓延初期池火的长度随着时间的增加而加长,达到最大池火

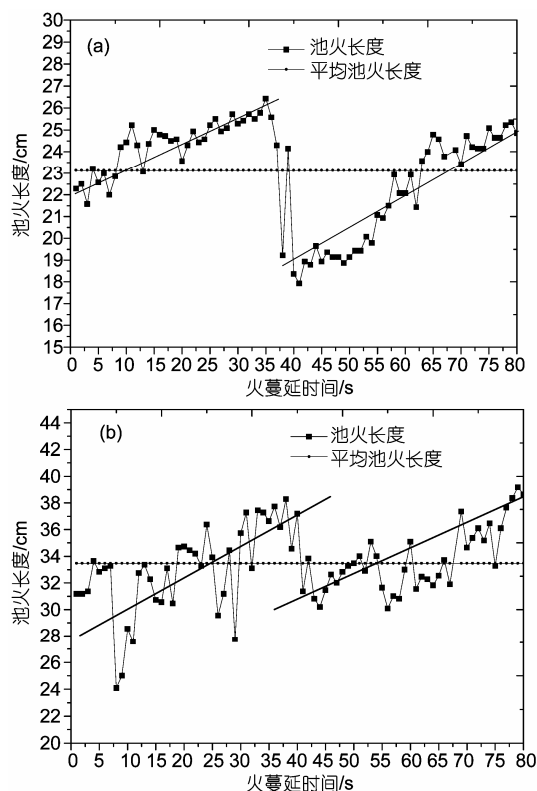


图4 两地 EPS 火蔓延过程中池火长度
(a) 拉萨; (b) 合肥

长度后又迅速下降,然后再开始增加,这样周而复始.这是由于保温材料为热塑性材料,当其燃烧时,未燃材料接受到火焰传给的热量时,开始收缩熔融,并形成了池火,同时池火的燃尽需要一定的时间,使得池火长度呈现出分段递增的特点.显然在池火长度递增的区间内,有 $v_f > v_b$,即 EPS 等保温材料火蔓延速度 v_f (I 区火焰前锋的移动速度)大于材料的燃尽速度 v_b (池火后部火焰向前移动的速度).

图 5 为 EPS 在水平放置时分别在拉萨和合肥两地测得的 I 区热解前锋位置与时间的关系图,由图 5 可见,两地情况下,热解前锋位置跟火蔓延时间近似于成线性关系,即火蔓延速度不随火蔓延时间变化而变化.其火蔓延速度分别为 0.31 cm/s(合肥)和 0.22 cm/s(拉萨).

对于热固性材料表面火蔓延,其火焰传播速度的大小主要取决于火焰区反馈给热解区的热量,遵循火蔓延速度公式^[8]:

$$\rho v_f \Delta H = q_v, \quad (1)$$

其中 q_v 为材料热解前锋处接受到的热通量, ΔH 为

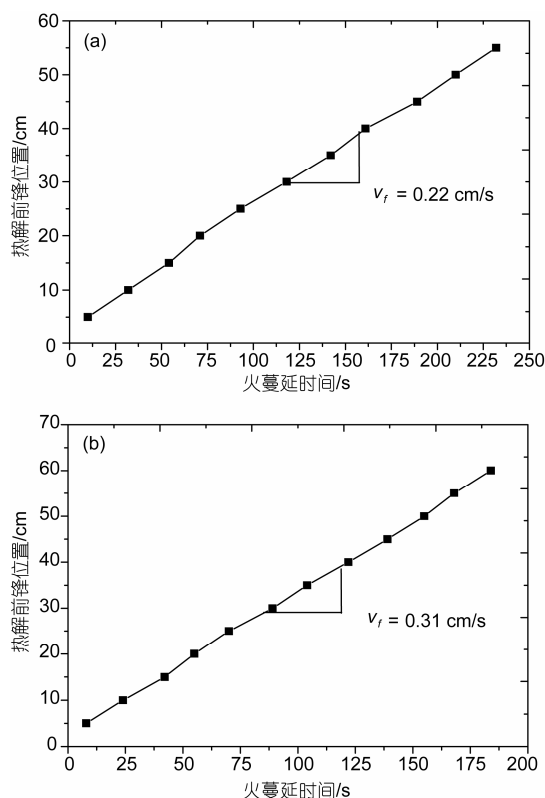


图 5 两地 EPS 火蔓延过程中热解前锋位置-时间图
(a) 拉萨; (b) 合肥

热固性材料的焓变, 有

$$\Delta H = c_p(T_{ig} - T_s) + L_v, \quad (2)$$

其中 c_p , T_{ig} , T_s 分别为材料的定压比热, 点燃温度, 初始温度, L_v 为材料的汽化潜热. 当考虑保温材料 EPS 热解前锋处的热通量 q_v 为辐射热通量和导热热通量之和, 忽略对流热通量, 即 $q_v = q_{rv} + q_{cv}$, q_{rv} 为热解前锋处的辐射热通量, q_{cv} 为热解前锋处的导热热通量, 有

$$q_v = \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_{ig}^4) + \lambda_s \left(\frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x=0}, \quad (3)$$

其中, T_f 为火焰平均温度, ε 为火焰的发射率,

$q_{rv} = \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_{ig}^4)$, $q_{cv} = \lambda_s \left(\frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x=0}$, $x=0$ 表示热解处. 对于 EPS 类热塑性固体材料, 由于有熔融的材料形成了池火, 在池火长度递增的区间内, EPS 的火蔓延速度 v_f 大于材料的燃尽速度 v_b , 有 $v_f > v_b$. 也就是说, 对热塑性保温材料 EPS 而言, 热解处接受的热量小于 $\rho v_f \Delta H$ 之值, 即 $q_v < \rho v_f \Delta H$, 有 $\frac{q_v}{\Delta H \rho} < v_f$.

同时, q_v 的热量要大于材料刚刚进行热解时所需要的热通量, 即 $c_p \rho v_f (T_{ig} - T_s) < q_v$, 有 $v_f < \frac{q_v}{c_p \rho (T_{ig} - T_s)}$.

综上, 有

$$\frac{q_v}{\Delta H \rho} < v_f < \frac{q_v}{c_p \rho (T_{ig} - T_s)}, \quad (4)$$

即

$$\frac{\varepsilon\sigma(T_f^4 - T_{ig}^4) + \lambda_s \left(\frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x=0}}{\Delta H \rho} < v_f < \frac{\varepsilon\sigma(T_f^4 - T_{ig}^4) + \lambda_s \left(\frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x=0}}{c_p \rho (T_{ig} - T_s)}. \quad (5)$$

由于 EPS 火蔓延是由几个池火长度递增的区间组成, 所以(4)式适用于整个火蔓延过程.

图 6 为在拉萨和合肥实验中得到的池火火焰区的最大火焰高度随时间的变化关系图. 由图 6 可以看出, 合肥地区的平均最大火焰高度为 10.07 cm, 比拉萨地区的平均最大火焰高度 8.07 cm 约高 2 cm. 这主要由于, 无论在拉萨和合肥, EPS 等保温材料的火蔓延燃烧, 均属于扩散燃烧的类型. 在正常压力环境下, 扩散火焰的氧气是通过自然对流和扩散机制供应的^[9]. 而在拉萨低压低氧环境下, 空气密度要低于合肥情况下, 如表 1 所示, 使得空气浮力降低, 自然对流相应减弱, 从而削弱了氧气的对流供应, 使得平均最大火焰高度要低于合肥情况下.

通过以上实验结果及其分析可以看出, 对于同样厚度、宽度的 EPS, 在水平放置情况下, 其火蔓延过程在合肥和拉萨并没有本质的差别, 但是在拉萨低压低氧的环境下, 无论是平均池火长度, 还是平均最大火焰高度均比合肥环境条件下要小. 也即是说, 池火火焰容积在合肥情况下要大于拉萨. 即对于同样尺寸大小的 EPS 试样, 在合肥实验得到的单位时间的热释放速率要高于拉萨, 其火灾危险性将高于拉萨.

我们用同样的方法研究分析了 XPS 分别在拉萨和合肥环境下的火蔓延特性规律, 实验所用的 XPS 尺寸与 EPS 相同. 图 7 为分别在拉萨和合肥两地, 实验测得的 XPS 池火长度随时间的变化关系. 由图 7 可见, 池火长度在整个火蔓延过程中呈现增长的趋势, 没有出现类似于 EPS 池火长度分段递增的情况. 这是由于虽然 EPS 和 XPS 主体成分均为 PS 材料, 但 XPS

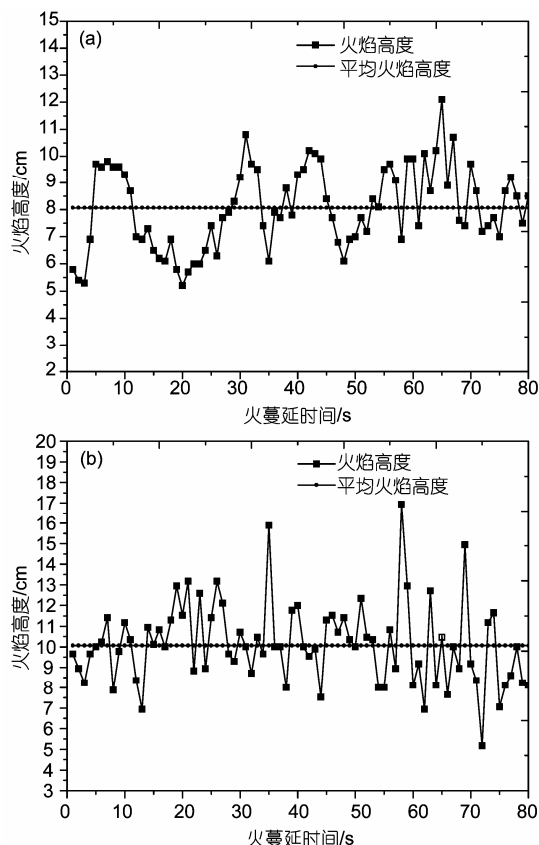


图6 两地EPS火蔓延过程中最大火焰高度
(a) 拉萨; (b) 合肥

的密度约为EPS的2倍,在同样宽度、厚度情况下,单位长度XPS形成的池火的质量约为单位长度EPS形成的池火质量的2倍,因而使得在XPS火蔓延过程中,池火具有很好的连续性并且池火的燃烧时间加长.对于XPS的火蔓延速度范围同样符合公式(4).

从图7还可以看出,在合肥,XPS平均池火长度为32 cm,而在拉萨平均池火长度为20.5 cm,明显小于合肥情况下.同时,对两地XPS火蔓延过程中,最大火焰高度进行了测定,得到XPS在拉萨情况下,平均最大火焰高度为9.3 cm,小于合肥情况下平均最大火焰高度10.0 cm. XPS火蔓延速度在拉萨和合肥情况下分别为0.12, 0.22 cm/s.得到XPS在两地火蔓延过程中,平均池火长度、火蔓延速度、平均火焰高度等特性参数的变化规律基本上和EPS的变化规律是一致的.

2.3 水平角度下预热区长度

保温材料表面火蔓延过程中,热解前锋处未燃材料接受到火焰辐射传给的热流量以及通过固体导

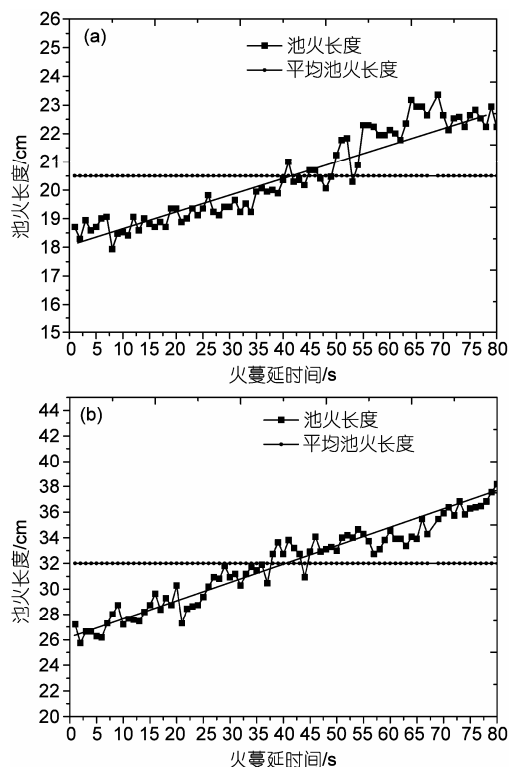


图7 两地XPS火蔓延过程中池火长度
(a) 拉萨; (b) 合肥

热传给的热流量,使其达到热解温度,生成可燃性气体,进而进行燃烧.火蔓延速度,遵循公式:

$$\rho c_p v_f d(T_{ig} - T_s) = q_v \delta_f, \quad (6)$$

其中 d 为材料的厚度, c_p 为保温材料的定压比热, δ_f 为预热区的长度.对(6)式进行变换有

$$v_f = \frac{q_v \delta_f}{\rho c_p d(T_{ig} - T_s)}, \quad (7)$$

其中 ρ , c_p , d , T_{ig} 和 T_s 在合肥和拉萨两地数值相同,因此,热解前锋处接受到的热通量 q_v 和预热区长度 δ_f 直接影响着保温材料的火蔓延速度.以下将对在拉萨和合肥两地,保温材料火蔓延过程中预热区长度进行分析.通过,对保温材料EPS, XPS中间位置40 cm处上表面布置热电偶,记录保温材料火蔓延过程中,保温材料表面的温度变化,进而求得相应的温度梯度,从而求出预热区的长度.

图8分别为两地EPS火蔓延过程中表面温度及相应的温度梯度的实验结果.坐标原点为热解前锋处, x 轴代表材料表面离热解前锋的距离.通过预热区

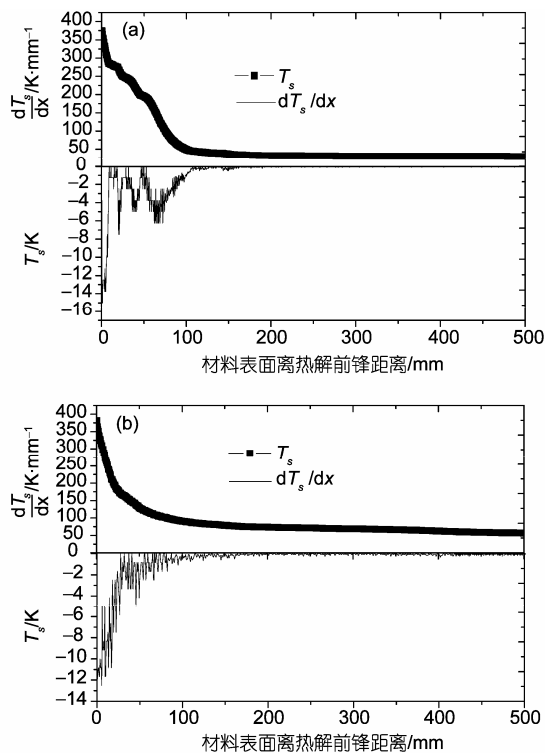


图 8 两地 EPS 火蔓延过程中表面温度及相应的温度梯度
(a) 拉萨; (b) 合肥

长度的定义公式, $\delta_f = (T_{ig} - T_{\infty}) / |dT_s/dx|_{\max}^{[10]}$, 其中 T_{ig} 为 EPS 的热解温度, $T_{ig} = 373^\circ\text{C}$. 通过计算, 在拉萨情况下, EPS 的预热区长度为 2.49 cm, 而在合肥情况下, 预热区长度为 2.9 cm. 同理, 可以求出 XPS 在两地火蔓延过程中, 预热区的长度, 在拉萨情况下为 3.0 cm, 在合肥情况下为 3.48 cm.

通过上述分析可以看出, 无论是 EPS 还是 XPS, 其预热区的长度在合肥都略大于在拉萨情况下. 从而可以得到, 影响两地保温材料水平火蔓延速度主

要因素为热解前锋处接受的热通量. 从火蔓延公式

$$v_f = \frac{q_v \delta_f}{\rho c_p d (T_{ig} - T_s)}$$

EPS, XPS 无论在合肥和拉萨, 其火蔓延速度满足公

$$v_f < \frac{q_v}{\rho c_p (T_{ig} - T_s)}$$

中, 更多的是形成熔融的池火火焰区, 而保温材料的气化部分很少, 因而有火蔓延速度更接近于

$$\frac{q_v}{\rho c_p (T_{ig} - T_s)}$$

为 $\Delta H = 1.6 \text{ kJ/g}$, 有火蔓延速度 $\frac{q_v}{\Delta H \rho} < v_f$. 其火蔓延速度范围与以上分析是一致的.

3 结论

通过对常用的保温材料 EPS 和 XPS, 长度、宽度、厚度分别为 80, 4, 4 cm, 在拉萨高原环境和合肥平原环境下进行小尺寸火蔓延实验. 分析了在水平放置的情况下, 火蔓延过程中平均池火长度、火蔓延速度、平均最大火焰高度、预热区长度等特性参数的变化规律, 得到:

(1) 水平角度下, 两地 EPS 的池火长度呈现周期性的分段递增的现象, 而对于 XPS, 在本实验范围内没有观察到这种分段递增的现象.

(2) 在水平放置的情况下, 保温材料 EPS, XPS 在两地火蔓延速度范围界于 $\frac{q_v}{\Delta H \rho}$ 和 $\frac{q_v}{c_p \rho (T_{ig} - T_s)}$ 之间.

(3) 在水平放置的情况下, 在合肥地区实验得到的 EPS 和 XPS 的平均池火长度、火蔓延速度、平均最大火焰高度、预热区长度均要高于拉萨地区的实验测得的数值.

参考文献

- 1 Lie T T. Contribution of insulation in cavity walls to propagation of fire. Fire Study No.29 of the Division of Building Research, 1972, 12
- 2 Oleszkiewicz I. Fire exposure to exterior walls and flame spread in combustible cladding. Fire Technol, 1990, 25: 357—375
- 3 邹样辉, 周建军, 钟占荣, 等. 外加辐射条件下水平方向火蔓延的实验研究. 中国科学技术大学学报, 2001, 31: 465—469
- 4 徐亮, 张和平, 万玉田, 等. 热塑性装饰材料大尺度火灾实验研究. 中国科学技术大学学报, 2008, 38: 563—568
- 5 李杰, 纪杰, 张英, 等. 高原环境下可碳化固体可燃物表面火蔓延特性研究. 科学通报, 2009, 54: 1127—1132
- 6 孙晓乾, 李元洲, 霍然, 等. 西藏古建筑常用木材的着火特性试验. 中国科学技术大学学报, 2006, 36: 77—80
- 7 尤飞, 胡源, 宋磊. 西藏古建筑中装饰织物的燃烧特性研究. 中国科学技术大学学报, 2007, 37: 284—289
- 8 Williams F A. Mechanisms of fire spread. P Combust Inst, 1976, 16: 1281—1294
- 9 王伟刚, 孔文俊, 张培元. 低压环境下热薄固体燃料表面火焰传播实验研究. 工程热物理学报, 2004, 25: 887—890
- 10 Bhattacharjee S, Altenkirch R A, Sacksteder K. The effect of ambient pressure on flame spread over thin cellulosic fuel in a quiescent microgravity environment. J Heat Trans, 1996, 1: 181—190