

EPS 火灾蔓延速率的数值模拟与实验研究

张 苗^{1,2}, 刘幸娜³, 吴振坤⁴, 黎昌海⁵, 陈 阵⁶, 王 霁¹

(1. 天津工业大学 环境与化学工程学院, 天津 300387; 2. 天津市消防总队, 天津 300090;

3. 信阳市消防支队, 河南 信阳 464100; 4. 安徽省消防总队, 安徽 合肥 230011;

5. 中国科学技术大学 国家重点火灾实验室, 安徽 合肥 230026; 6. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要:建立了热塑性外保温材料火蔓延速率模型, 提出了表征向上火蔓延和向下熔融流淌燃烧相互促进作用大小的无量纲参数, 耦合燃烧度。通过实验研究了 EPS 外保温材料的火蔓延规律和影响因素。实验结果表明, 其火蔓延速率随时间变化呈指数增长; “耦合燃烧度”越大, 火蔓延速率增长越快; “耦合燃烧度”随材料厚度的增加而增大; 不同火源位置下, “耦合燃烧度”的大小排列为: 中火 > 底火 > 顶火 > 边角火; 理论模型与实验结果具有较好的一致性。

关键词: EPS; 火蔓延速率; 材料厚度; 熔融流淌

中图分类号: X913.4, TU551, TK121 **文献标志码:** A

文章编号: 1009-0029(2014)05-0501-05

笔者对 EPS 外保温材料的火蔓延规律进行数值模拟与全尺寸实验, 分析了燃烧过程中火蔓延速率的变化情况, 揭示其火灾发展规律, 为热塑性外保温材料火反应机理及火灾防控技术的研究提供理论指导和数据参考。

1 热塑性外保温材料火蔓延模型的建立

1.1 基本模型

笔者基于“耦合燃烧”作用, 提出了热塑性外保温材料火蔓延速率模型, 如图 1 所示。

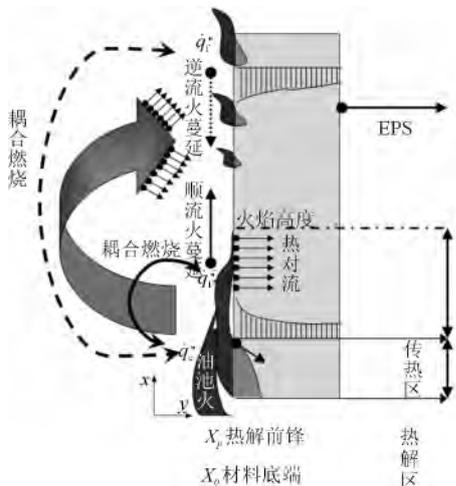


图 1 EPS 外保温材料火蔓延模型图

模型假设为: (1) 材料充分燃烧, 忽略通风等环境条件对燃烧过程的影响; (2) 忽略材料表面的辐射热损失; (3) 火焰上游温度为环境温度; (4) 材料的点燃温度为定

值; (5) 油池火充分燃烧, 油池火火焰直径近似为油池火面积的当量直径。

1.2 理论推导

1.2.1 热解前锋

热解前锋可由式(1)表达。

$$x_p(t) = x_{p0} + \int_0^t V_p t_{ps} dt_p \quad (1)$$

式中: x_{p0} 为 $t=0$ 时 x_p 的位置, m, 与火源位置有关; t_{ps} 为虚拟变量; V_p 为火焰高度增长的速度。

1.2.2 火焰高度

火焰高度与热释放速率的关系如式(2)所示。

$$x_f(t) = K[Q'_{al}(t)]^n \quad (2)$$

式中: K 为与火源位置有关的常量, m/kW; Q'_{al} 为总热释放速率, kW; n 为火焰高度相关的常数。

热塑性壁面材料燃烧过程可看作是半无限大固体的非稳态导热过程。燃烧过程中满足能量守恒定律, 如式(3)所示。

$$Q'_f + Q'_e = Q'_{al} \quad (3)$$

式中: Q'_f 为材料燃烧的热释放速率, kW; Q'_e 为高温熔滴形成的油池火的热释放速率, kW。

无量纲热释放速率如式(4)所示。

$$q^* = \frac{q''}{\rho_a c_p T_\infty g^{1/2} L^{5/2}} \quad (4)$$

式中: ρ_a 为周围空气密度, 取 1.2 kg/m^3 ; c_p 为周围空气定压比热容, 取 $1.0 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; T_∞ 为周围空气温度, 取 298 K ; L 为与 q^* 成比例的长度尺度。

因此, 材料厚度和材料燃烧的热释放速率的无量纲关系式, 如式(5)所示。

$$Q'_f = \tau q^* 6 \infty \frac{1}{L^{5/2}} \infty \delta^{5/2} \quad (5)$$

式中: τ 为与材料厚度有关的系数; δ 为材料厚度。

材料燃烧过程中形成的油池火在油盆中自由蔓延, 并且油池火的面积与样品的质量近似成线性关系, 笔者用油池火的当量直径来衡量油池火面积的大小, 故材料厚度与油池火的当量直径成正比, 又由于高温熔滴形成的油池火中液体燃料均猛烈燃烧, 所以燃烧火焰的直径

可近似认为是油池火面积的当量直径,即火焰面积近似为油池火面积,由此可得式(6)。

$$A \propto D^2 \propto \delta^2 \quad (6)$$

式中: ω 为无量纲系数,与材料的黏性和密度有关; D 为油池火的当量直径; δ 为材料厚度; A 为火焰面积。

又有式(7)、式(8)。

$$\dot{m} = u\rho A \quad (7)$$

$$Q_c = \dot{m}\Delta H_c \quad (8)$$

式中: ΔH_c 为燃烧热,kJ/kg; \dot{m} 为燃料的质量燃烧速率,kg/s; u 为流体速率,m/s; A 为火源面积,m²。

代入计算,得式(9)。

$$x_f(t) = K \left(\tau q^* + \frac{\pi}{4} \omega^2 u \rho \delta^2 \Delta H_c \right)^n \quad (9)$$

1.2.3 点燃时间

点燃时间计算如式(10)所示。

$$t_{ig} \approx \frac{\pi}{4} k \rho c \left(\frac{T_{ig} - T_{\infty}}{Q_{al}''} \right)^2 \quad (10)$$

式中: T_{ig} 为材料点燃温度,℃; T_{∞} 为环境温度,℃。

采用热解前锋位置和火焰高度共同表示火蔓延速率,如式(11)所示。

$$V_p(t) = \frac{x_f - x_p}{t_{ig}} \quad (11)$$

式中: x_f 为火焰高度; x_p 为热解前锋高度; t_{ig} 为材料点燃时间; $V_p(t)$ 为火蔓延速率。

将式(1)、式(9)、式(10)代入式(11),令 $Z = \pi k \rho c (T_{ig} - T_{\infty})^2$, $G = WRu\Delta H_c$ 并结合拉普拉斯变换,得式(12)。

$$V_p(t) = 4K^2 G \left(R^2 \delta^{13/4} + \frac{G^2}{R^2} \delta^{17/2} + 2G^2 \delta^9 \right) / Z \exp \left\{ 4 \left(KR\delta^{5/2} - 1 \right) \left(R^2 \delta^{25/4} + \frac{G^2}{R^2} \delta^4 + 2G\delta^{9/2} \right) Z \right\} \quad (12)$$

式中: R 、 W 分别为与厚度和密度有关的系数。

式(12)为热塑性材料火蔓延速率公式,很好地表征了材料厚度、火源位置与火蔓延速率之间的关系。

令:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 4K^2 G \left(R^2 \delta^{13/4} + \frac{G^2}{R^2} \delta^{17/2} + 2G^2 \delta^9 \right) / Z, \\ \varphi_2 &= \left\{ 4 \left(KR\delta^{5/2} - 1 \right) \left(R^2 \delta^{25/4} + \frac{G^2}{R^2} \delta^4 + 2G\delta^{9/2} \right) / Z \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

火蔓延速率公式可表示为式(14)。

$$V_p(t) = \varphi_1 \exp^{\varphi_2 t} \quad (14)$$

可知,理论推导得出的火蔓延速率随时间增长呈指数关系增长。

1.3 耦合燃烧度

热塑性材料燃烧过程中,其热解前锋所需的热量来

源于燃烧火焰和高温熔滴所形成的油池火。然而,在不同火源位置下,燃烧材料与油池火之间的相互作用程度差别较大,相互作用越强烈,其供给的热通量越多。笔者引入一无量纲参数“耦合燃烧度”(用 I 表示)来表征热塑性材料的燃烧壁面与高温熔滴形成的油池火相互作用程度(K)。其中, $K = I \propto q''$, q'' 为热解前锋受到的热通量。耦合燃烧度(I)用两种火源位置下材料点燃热流 q''_{st} 的比值表征(火源在材料底部时 I 值为1),如式(15)所示。

$$I_i = \frac{q''_{pi}}{q''_{pd}} \quad (15)$$

式中: I_i 为任一火源位置下材料的“耦合燃烧度”; q''_{pd} 为火源从底部起火时材料的点燃热流,kW/m²; q''_{pi} 为任一火源位置下材料的点燃热流,kW/m²。

热解前锋受到的热通量 q'' 同点燃时间 t_{ig} 之间的关系如式(16)、式(17)所示。

$$q''_{pi} \times S = t_{ig}^{-1/2} + \left[\frac{h(T_{ig} - T_{\infty}) + \epsilon \sigma T_{ig}^4}{(T_{ig} - T_{\infty}) \sqrt{\frac{2}{3} k \rho c}} \right] \quad (16)$$

$$S = \left[\frac{\epsilon}{(T_{ig} - T_{\infty}) \sqrt{\frac{2}{3} k \rho c}} \right] \quad (17)$$

式中: S 为 q''_{pi} 对 $t_{ig}^{-1/2}$ 关系的斜率; T_{∞} 为周围环境温度,取25℃; T_{ig} 为材料的点燃温度,取360℃; k 为材料的导热系数,取0.04 W/(m·k); h 为材料的热对流系数,取10 W/(m²·k); ϵ 为材料的辐射率,取0.83; ρ 为材料的密度,取14.6 kg/m³; c 为材料的比热容,取1.34 kJ/(kg·K); σ 为斯蒂芬玻尔兹曼常数,为 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴)。

代入计算,得式(18)。

$$0.83 q''_{pi} = \frac{241.6}{\sqrt{t_{ig}}} + 1.09 \quad (18)$$

由于 q''_{pi} 受到材料厚度影响很大,引入修正变量 Δ (Δ 与材料厚度成正比),修正后得式(19)。

$$I_i = \frac{\Delta_i t_{ig_i}^{-1/2} + 4.51 \times 10^{-3}}{\Delta_d t_{ig_d}^{-1/2} + 4.51 \times 10^{-3}} \quad (19)$$

式中: t_{ig_i} 为 p_i 火源位置下的材料点燃时间; t_{ig_d} 为 P_d 火源位置下的材料点燃时间。

2 实验部分

2.1 实验装置

实验平台主体是基于ISO 9705全尺寸热释放速率实验室搭建的,整个实验装置设置在其集烟罩下。实验平台的组成包括:基体铁支架、铁皮池、红外热像仪、热电偶、温度数据采集仪、摄像机、风速仪、计算机等。其中,铁皮池尺寸为120 cm×100 cm×10 cm,基体铁支架宽120 cm,高240 cm;铁支架上安装2 cm厚玻镁复合防火板,模拟基层墙体。实验时,室内环境温度在18~26℃,湿度为40%~60%。实验材料固定在装订有玻镁复合防

火板的基体铁支架上,实验装置上方集气罩内的风速在 0.05~0.1 m/s,并符合相关国际测试标准的要求。实验设计如图 2 所示。

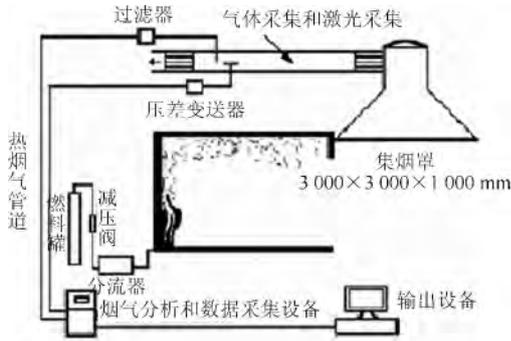


图 2 ISO 9705 标准实验室示意图

2.2 实验条件

实验火源样式采用正庚烷油槽火源,油槽尺寸 20 cm × 20 cm × 10 cm,内部装入 0.5 L 正庚烷。

实验样品材料上共布置 32 个 K 型铠装热电偶以采集温度数据,分布在三条纵线上,从左到右依次为纵 L 线、纵 M 线、纵 R 线,测点布置如图 3 所示。

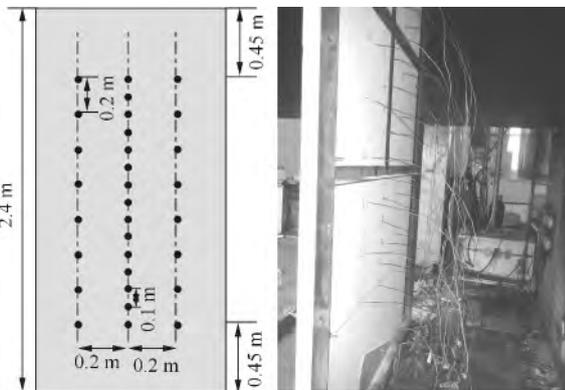


图 3 实验热电偶布置图

2.3 实验方案

为保证实验结果的真实可靠,每种工况重复 2~3 次实验,具体工况如表 1 所示。

3 结果与讨论

3.1 火源位置对火蔓延速率的影响

不同的火源位置使材料燃烧出现不同的火焰蔓延轨迹。对于底火工况,主要为向上的火蔓延,是典型的顺流火蔓延;对于顶火工况,主要为向下的火蔓延,是典型的逆流火蔓延;对于中火工况,火蔓延包括了向上和向下两个方向的蔓延,是顺流火和逆流火蔓延的结合;对于边角火工况,火蔓延包括了水平横向蔓延和竖直向上蔓延,同样是顺流火和逆流火蔓延的结合。由于不同的火蔓延方式,火焰蔓延机理和蔓延规律不同,火灾发展过程不同。因此,火蔓延速率有很大差距。

将实验中获得的数据进行指数拟合,可以得到 EPS 的火蔓延速率的回归方程,如式(20)所示。

$$V_p(t) = A' \exp(Bt) \quad (20)$$

表 1 实验工况统计

工况号	面积/m ²	厚度/mm	耐火等级	火源位置
1-1	2.4×1.2	20	B2	底部
1-2		30		
1-3		40		
1-4		50		
1-5		60		
1-6		80		
2-1	2.4×1.2	50	B2	底部
2-2				中间
2-3				顶端
2-4				边角

统计不同火源位置下火蔓延速率公式中的参数,如表 2 所示。其中,2-2(U)表示向上火蔓延,2-2(D)表示向下火蔓延。

表 2 不同火源位置下 EPS 火蔓延速率方程中各参数的取值

工况号	A'	B	相关系数
2-1	7.24	0.252	0.995 1
2-2 (U)	8.18	0.389	0.992 9
2-2 (D)	4.19	0.237	0.988 9
2-3	3.11	0.218	0.986 9
2-4	4.89	0.117	0.998 1

热塑性外保温材料的火蔓延速率主要受参数 A 和 B 的影响。其中,A 影响初始蔓延速度,而 B 则决定了火蔓延速度增长的快慢。由表 3 可知,中火工况下的向上火蔓延的 A 最大,因为初起燃烧阶段的热解前锋受到很大的辐射量,致使火焰初始蔓延速度很大,此工况下的燃烧程度剧烈,单位时间内释放大量的热量,因此,火蔓延速度增长得最快,即 B 最大。因此,不同火源工况下初始蔓延速度从大到小的顺序是:中火向上火蔓延>底火>边角火>中火向下火蔓延>顶火,不同火源下火蔓延速度增长的快慢顺序是:中火向上火蔓延>底火>中火向下火蔓延>顶火>边角火。材料燃烧的火蔓延速率越大,则火灾危险性越大,从此角度出发,不同火源位置工况的火灾危险性大小顺序是:中火>底火>顶火>边角火。

3.2 材料厚度对火蔓延速率的影响分析

图 4 为不同厚度的 EPS 在火灾充分发展阶段的热解前锋位置和火焰高度。

对实验中获得的数据进行回归拟合,得出热解前锋高度和火蔓延速率的相关参数,如表 3 所示。

由实验数据可知,相同时刻的火焰高度随着材料厚度的增加而增加。而火蔓延速率受参数 A' 和 B' 的影响。其中,A 影响初始蔓延速度,随着厚度的增加而增加;B 则决定了火蔓延速度增长的快慢,也随厚度的增加而增加,但其增幅小于 A'。因此,在火灾充分发展阶段,EPS 外保

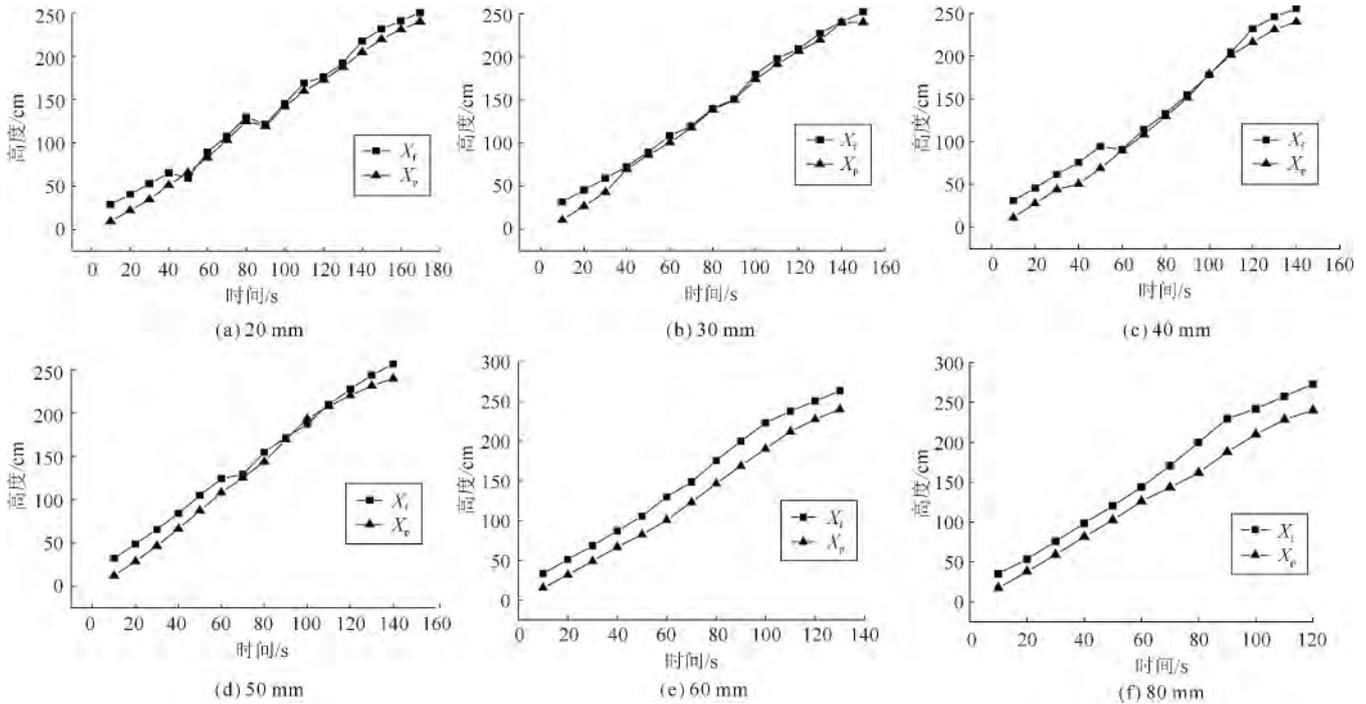


图 4 不同厚度 EPS 保温板的热解前锋和火焰高度

表 3 不同厚度 EPS 保温板火蔓延速率方程中各参数的取值

工况号	A	B	相关系数
1-1	6.13	0.112	0.996 7
1-2	6.76	0.129	0.997 2
1-3	7.08	0.207	0.989 7
1-4	7.16	0.246	0.995 1
1-5	8.43	0.341	0.998 2
1-6	9.16	0.403	0.996 9

温材料的火蔓延速率随着材料厚度的增加而增长,当 EPS 的厚度为 50 mm 时,火蔓延速率增幅最小。

3.3 火蔓延速率实验值与理论值的对比

根据理论模型,代入相关数据,推算出火蔓延速率方程中的 φ_1 、 φ_2 (如表 4 所示),并得不同工况下的火蔓延速率理论方程,如表 5 所示。图 5 为不同工况下的“耦合燃烧度”的变化曲线。

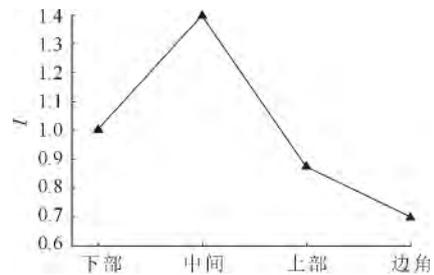
表 4 火蔓延模型中 φ_1 、 φ_2 及 I_i 的取值

工况	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-1	2-2	2-3	2-4
φ_1	6.22	6.81	7.11	7.24	8.57	9.23	7.24	8.18	7.11	6.89
φ_2	0.116	0.137	0.216	0.252	0.349	0.412	0.252	0.389	0.218	0.117
I_i	0.420	0.616	0.783	1	1.282	1.467	1	1.396	0.872	0.697

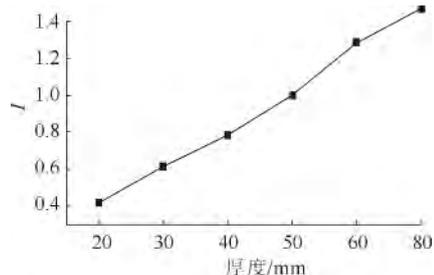
可以看出,理论推导的 φ_1 、 φ_2 和实验获取的 A、B 很相近,在误差允许的范围。笔者推导的模型能够比较准确地预测热塑性外保温材料火的蔓延速率。同时,可以明显看出,理论值要稍大于实验值,这是因为理论模型中假设了火焰对壁面材料的热辐射过程中无损失热量,而现实热辐射过程中一定存在对外界的热量损失,因此理论计算的火蔓延速率稍大。

表 5 不同工况下的火蔓延速率理论方程

工况号	方程	工况号	方程
1-1	$V_p(t) = 6.22\exp^{0.116t}$	1-6	$V_p(t) = 9.23\exp^{0.412t}$
1-2	$V_p(t) = 6.81\exp^{0.137t}$	2-1	$V_p(t) = 7.24\exp^{0.252t}$
1-1-3	$V_p(t) = 7.11\exp^{0.216t}$	2-2	$V_p(t) = 8.18\exp^{0.389t}$
1-1-4	$V_p(t) = 7.24\exp^{0.252t}$	2-3	$V_p(t) = 7.11\exp^{0.218t}$
1-1-5	$V_p(t) = 8.57\exp^{0.349t}$	2-4	$V_p(t) = 6.89\exp^{0.117t}$



(a) 不同火源位置



(b) 不同材料厚度

图 5 不同工况下 I_i 的变化曲线

另外,还可以发现,“耦合燃烧度” I_i 随着材料厚度的增加而增大;而 φ_1 和 φ_2 又同时受到“耦合燃烧度” I_i 的影响,故火蔓延速率随着 I_i 的增大而加快。不同火源位置

条件下的“耦合燃烧度”大小顺序是:中火>底火>顶火>边角火。

参考文献:

- [1] WU Zhen-kun. Discussion on fire safety of external thermal insulation composite systems for buildings[J]. Journal of Chinese People's Armed Police Force Academy, 2011(8):16-20.
- [2] WU Zhen-kun, YAN Dong-sheng, YOU Fe. The combustion properties of the EPS core materials and their application in the fire cause investigation[J]. Fire Safety Science, 2011,16(3):180-184.
- [3] Zhang J, Shields T J, Sileok G W H. Effect of melting behavior on upward flame spread of thermoplastics[J]. Fire and Materials, 1997,21(1):1-6.
- [4] Ohlemiller T J, Shields J, Butler K. Exploring the role of polymer melt viscosity in melt flow and flammability behavior[C]// New Developments and Key Market Trends in Flame Retardancy. Fall Conference. Proceedings. Fire Retardant Chemicals Association, Lancaster, PA, 2000:1-28.
- [5] Sherratt J. The effect of thermoplastic melt flow behavior on the dynamics of fire growth[D]. University of Edinburg, 2001.
- [6] Xie Q Y, Zhang H P, XU L. Large-scale experimental study on the effects of flooring materials on combustion behavior of thermoplastics [J]. Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, 2008,45:529-533.
- [7] 程旭东. 受限空间内典型热塑性材料熔融流动燃烧行为研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2010.
- [8] Consalvi L, Pizzo Y, Porterie B, et al. On the flame height definition for upward flame spread[J]. Fire Safety Journal, 2007,42(5):384-392.
- [9] CUI Yu. Fire behavior of commonly used organic exterior insulation materials under vertical wall condition[M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [10] Delichatsios M A. Flame heights in turbulent wall fires with significant flame radiation [J]. Combustion Science and Technology, 1984,39(1):195-214.
- [11] Quintiere J. Some factors influencing fire spread over room linings and in the ASTM E-84 tunnel test[J]. Fire and Materials, 1985,9(2):65-74.
- [12] Tu K M, Quintiere J G. Wall flame heights with external radiation [J]. Fire Technology, 1991,27(3):195-203.
- [13] Zukoski E. Mass flux in fire plumes[C]//Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium, Gaithersburg:1994.
- [14] YANG Xiao-lin, XU Da, XU You-jun. Application of inversion technique for the Laplace Transform on partial differential equation[J]. Journal of Central-south Institute of Technology, 2005,9(2):65-74.
- [15] 智会强, 牛坤, 路世昌, 等. PHOENICS 火灾模拟应用方法与有效性验证[J]. 消防科学与技术, 2009,28(10):718-722.
- [16] 黄颖, 罗静, 李晶. EPS 保温板垂直壁面蔓延特性实验研究[J]. 消防科学与技术, 2013,32(9):1016-1020.

· 科技信息 ·

NFPA 与美国消防研究基金会 联合开展消防宣传活动

美国消防协会近期与美国消防研究基金会等组织联合开展消防宣传活动,对消防服务部门开展火灾风险教育,要求重视中型散装容器储存的可燃或易燃液体所存在的火灾风险。NFPA 与美国消防研究基金会联合发布视频,以表明池火的危害性,宣传正确储存易燃与可燃液体的重要性。

李艳艳 供稿

Numerical and experimental investigation on the fire spread of the EPS material

ZHANG Miao^{1,2}, LIU Xing-na³, WU Zhen-kun⁴,
LI Chang-hai⁵, CHEN Zhen⁶, SONG Wen-hua¹

(1. Chemical and Environmental Engineering College, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin General Fire Brigade, Tianjin 300090, China; 3. Xinyang Fire Detachment, Henan Xinyang 464100, China; 4. Anhui General Fire Brigade, Anhui Hefei 230011, China; 5. Fire Science State Major Laboratory, National University of Science and Technology of China, Anhui Hefei 230025, China; 6. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The fire spread rate model for thermoplastic insulation material was established, and the dimensionless parameter - "coupled combustion degree" which represented the mutual promoting role on the upward fire spread and flowing fire was proposed. The main characteristics of fire spread and influence factors for EPS was studied through the experiment. The results showed that the fire spread rate increased exponentially with time and the bigger "coupled combustion degree" which increases with increasing thickness is, the faster the fire spread rate changes. The sequence of "coupled combustion degree" under different fire locations is: middle fire > bottom fire > top fire > corner fire. The simulation results are in good agreement with experimental data.

Key words: EPS; fire spread rate; material thickness; melt flow

作者简介:张 苗(1986-),女,天津人,天津工业大学环境与化学工程学院博士研究生,主要从事建筑火灾预防与控制以及防火建材及制品燃烧行为研究,天津市西青区宾水西道,300387。

收稿日期:2013-12-27