

文章编号: 1009-6094(2015)02-0144-07

EPS 外保温材料火灾蔓延速率的数值模拟与试验研究*

张 苗^{1,2}, 刘幸娜³, 黎昌海⁴,
陈 阵⁵, 王 霁¹, 宋文华¹

(1 天津工业大学环境与化学工程学院, 天津 300387; 2 天津市公安消防总队河北区消防支队, 天津 300100; 3 信阳市消防支队, 河南信阳 464100; 4 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026; 5 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 根据火灾动力学理论, 建立了热塑性外保温材料火灾蔓延速率模型。该模型对实际燃烧过程做了一定的假设简化, 主要考虑了材料厚度和火源位置对材料燃烧发展过程的影响。并提出无量纲参数“耦合燃烧度”, 用来表征热塑性材料的燃烧壁面与高温熔滴形成的油池火之间相互作用的程度。基于 ISO9705 全尺寸热释放速率实验室, 采用 20 × 20 × 10 cm³ 正庚烷油槽火源为火源样式, 设计了 4 种不同的燃烧工况研究 EPS 外保温材料的火灾蔓延规律和影响因素。结果表明: 其火灾蔓延速率随时间变化呈指数增长, EPS 的火灾蔓延速率的回归方程通式为 $V_p(t) = A \exp(Bt)$, 与理论推导方程 $V_p(t) = \varphi_1 \exp(\varphi_2 t)$ 有较好的相关性。当 EPS 的厚度为 50 mm 时, 火灾蔓延速率增幅最小, “耦合燃烧度”越大, 火灾蔓延速率增长越快, “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”从大到小为中火、底火、顶火、边角火。理论模型与试验结果有较好的一致性, 可以有效预测热塑性外保温材料的火灾蔓延速率。

关键词: 安全工程; EPS; 火灾蔓延速率; 材料厚度; 火源位置; 熔融流淌
中图分类号: X924.3 文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.02.031

0 引言

据不完全统计^[1], 从 2007 年至 2012 年底, 全国共发生建筑外墙易燃可燃装饰、保温材料火灾 1 300 余起, 造成 70 余人死亡、80 余人受伤。易燃可燃的建筑外保温材料已成为新一类火灾隐患。模塑聚苯乙烯 (EPS, Expanded Polystyrene) 是最常用的热塑性外保温材料, 遇火易燃且易产生融滴, 燃烧的融滴也易引燃其他材料并聚集在底部像液体池火般燃烧, 导致大面积燃烧, 促进火灾蔓延, 火势猛烈。

目前, 国内外研究者对热塑性外保温材料的燃烧特性及火灾危险性进行了各种研究。Zhang 等^[2]对敞开空间内热塑性材料的熔融流动行为及其对向上火蔓延的影响进行了初步试验, 发现热塑性材料的向上火蔓延规律与热固性材料明显不同。Bakhtiyari 等^[3]使用锥型量热仪测试了不同厚度的 EPS 板的火灾反应特性, 测试结果表明, 材料厚度越大, 熔融速度越快, 点燃时间越慢, 热释放量和烟气量也随之增大。Butler 等^[4]对热塑性材料无燃烧反应条件下的受热流动进行了模拟求解, 研究其受热的熔融滴落过程, 并分析了利用 FDS 模拟

热塑性材料火灾行为的可行性, 但是目前该工作仅局限于小尺寸的二维热解过程, 与真实火灾条件下的燃烧行为相差较远。Xie^[5]、徐亮^[6]、元延军^[7]和程旭东^[8]等分别对热塑保温材料的燃烧行为、熔融流淌速率及材料厚度对火灾蔓延的影响进行了初步研究。周勇等^[9]对 4 种不同厚度杉木板的热解前锋蔓延速率进行了研究, 得出了火灾蔓延速率变化的一些特征。

热塑性材料火灾发展过程是一个复杂多变的过程, 目前国内的研究多侧重于试验探究, 而其理论模型及数值模拟的研究较少。热塑性材料燃烧时, 壁面材料的燃烧和油池火燃烧相互促进耦合燃烧, 影响因素较多。因此, 其火灾蔓延速率模型的建立有一定的难度。本文基于火灾动力学理论, 建立热塑性材料燃烧过程火灾蔓延速率的预测模型, 分析材料厚度、火源位置对材料火灾特性的影响, 并与试验结果相互佐证, 得出 EPS 的“临界厚度”和“耦合燃烧度”, 初步探索 EPS 的火灾蔓延规律, 以期对热塑性外保温材料防火性能的改进、火灾的预防与控制及灭火技战术的研究提供理论依据。

1 热塑性外保温材料火灾蔓延模型

1.1 基本模型

热塑性外保温材料燃烧过程中会释放出大量热量, 并通过热传导、热对流、热辐射的方式将此热量向未燃的材料表面传递, 使未燃材料达到热解温度, 并进一步被点燃。随着材料的燃烧, 其表面会生成高温熔滴, 这些熔滴或黏结滞留在材料表面, 向未燃的材料内部传递热量并使其燃烧, 或滴落到材料底部形成一定规模的油池火。壁面燃烧材料与油池火的相互作用, 促进了燃烧的发展与蔓延, 致使火灾发展过程变得复杂。针对热塑性外保温材料特有的“耦合燃烧”作用, 初步建立了火灾蔓延速率模型, 见图 1。为使其能较好地量化火灾蔓延速率, 又能简化模型的计算过程, 对其边界条件进行如下假设: 1) 材料充分燃烧, 且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。

由于理论模型中忽略了材料表面的辐射热损失, 而实际情况下一定存在对外界的热辐射损失, 理论计算得到的火灾蔓延速率会比实际值稍大。

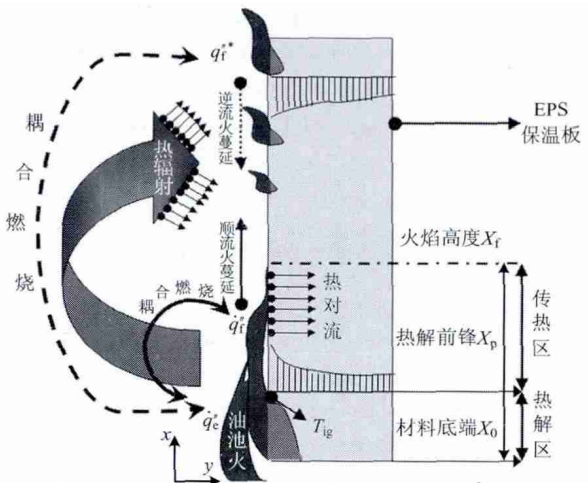


图 1 EPS 外保温材料火灾蔓延模型图
Fig.1 Fire spread model of EPS

* 收稿日期: 2013-11-22

作者简介: 张苗, 博士研究生, 从事防火建材及制品燃烧行为及高分子阻燃材料研究; 宋文华(通信作者), 教授、博士生导师, 从事灾害毒理与健康毒理学、环境化学与毒理学、安全科学与工程研究, songwenhuateam@sina.com。

基金项目: 公安部科技强警专项(2011 GABJC022)

1.2 理论推导

基于模型假设,热塑性材料火蔓延速度定义为

$$V_p(t) = \frac{x_f - x_p}{t_{ig}} \quad (1)$$

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

热解前锋表达式为^[10]

$$x_p(t) = x_{p0} + \int_0^t V_p t_{ps} dt_p \quad (2)$$

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 为火焰高度增长速度 m/s 。

火焰高度表达式为^[11+4]

$$x_f(t) = K \left(\tau q^* + \frac{\pi}{4} \omega^2 u \rho \delta^2 \Delta H_c \right)^n \quad (3)$$

式中 K 为与火源位置有关的常量,表征燃烧材料与油池火之间的“耦合燃烧”作用大小 m/kW ; τ 为与材料厚度有关的系数; q^* 为无量纲热释放速率; ω 为无量纲系数; u 为流体速度 m/s ; ρ 为材料密度 kg/m^3 ; δ 为材料厚度 m ; ΔH_c 为燃烧热 kJ/kg ; n 为与火焰高度相关的常数。

材料点燃时间表达式为

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

式中 k 为材料的导热系数 $W/(m \cdot K)$; c 为材料的比热容 $kJ/(kg \cdot K)$; T_{ig} 为材料点燃温度 $^{\circ}C$; T_∞ 为环境温度 $^{\circ}C$; Q''_{al} 为材料的总热释放速率 kW 。

将式(2)~(4)代入式(1),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^[15]可得

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

式(5)即为热塑性材料火蔓延速率公式,它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。其中, R 为与厚度有关的系数, W 为与密度有关的系数。

令

$$\varphi_1 = \frac{4K^2 G \left(R^2 \delta^4 + \frac{G^2}{R^2} \delta^{17} + 2G^2 \delta^9 \right)}{Z}$$

$$\varphi_2 = \frac{4(KR\delta^{\frac{5}{2}} - 1) \left(R^2 \delta^{\frac{25}{4}} + \frac{G^2}{R^2} \delta^4 + 2G\delta^{\frac{9}{2}} \right)}{Z} \quad (6)$$

因此,火蔓延速率公式可以表示为

$$V_p(t) = \varphi_1 \exp(\varphi_2 t) \quad (7)$$

可知,理论推导的火蔓延速率随时间呈指数关系增长。

1.3 耦合燃烧度

热塑性外保温材料在燃烧过程中有熔融流动特性,其热解前锋所需的热量来源于燃烧火焰和高温熔滴形成的油池火。然而火源位置不同,其燃烧材料与油池火之间的“耦合燃烧”作用大小(K)差别就会很大,相互作用程度越强烈,其供给的热通量越多。因此,本文引入无量纲参数——“耦合燃烧度”(用 I 表示),来表征材料壁面燃烧火焰和高温熔滴形成的油池火之间的“耦合燃烧”作用程度。

在不同火源位置条件下,热解前锋受到的热通量能够很好地表征材料的“耦合燃烧度”(I),选取两种火源位置下材料点燃热流的比值来表征 I ,并定义火源在材料底部时的 I 为 1,则

$$K = I \propto q'' \quad (8)$$

$$I_i = \frac{q''_{pi}}{q''_{pd}} \quad (9)$$

式中 I_i 为任一火源位置下材料的“耦合燃烧度”; q''_{pd} 为火源位置在底部时材料的点燃热流 kW/m^2 ; q''_{pi} 为任一火源位置下材料的点燃热流 kW/m^2 。

而热解前锋受到的热通量 q'' 与点燃时间 t_{ig} 之间有以下关系^[16]。

$$q'' S = t_{ig}^{-1/2} + \left[\frac{h(T_{ig} - T_\infty) + \varepsilon \sigma T_{ig}^4}{(T_{ig} - T_\infty) \sqrt{\frac{2}{3} k \rho c}} \right] \quad (10)$$

$$S = \left[\frac{\varepsilon}{(T_{ig} - T_\infty) \sqrt{\frac{2}{3} k \rho c}} \right] \quad (11)$$

式中 S 为 q'' 对 $t_{ig}^{-1/2}$ 关系的斜率; T_∞ 为周围环境温度,取 $25^{\circ}C$; T_{ig} 为材料的点燃温度,取 $360^{\circ}C$; k 为材料的导热系数,其值为 $0.04 W/(m \cdot K)$; h 为材料的热对流系数,其值为 $10 W/(m^2 \cdot K)$; ε 为材料的辐射率,其值为 0.83 ; ρ 为材料的密度,取 $14.6 kg/m^3$; c 为材料的比热容,为 $1.34 kJ/(kg \cdot K)$; σ 为斯蒂芬玻尔兹曼常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

代入计算,得到

$$0.83 q'' = \frac{241.6}{\sqrt{t_{ig}}} + 1.09 \quad (12)$$

由于 q'' 受材料厚度的影响很大,引入修正变量 Δ (Δ 与材料厚度成正比),修正后得到

$$I_i = \frac{\Delta_i t_{ig_i}^{-1/2} + 4.51 \times 10^{-3}}{\Delta_d t_{ig_d}^{-1/2} + 4.51 \times 10^{-3}} \quad (13)$$

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

2 试验部分

2.1 试验装置

试验平台主体是基于 ISO9705 全尺寸热释放速率实验室^[17]搭建的,整个试验装置设置在其集烟罩下。试验平台包括基体铁支架、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 $120 \times 100 \times 10 cm^3$,基体铁支架宽 $120 cm$,高 $240 cm$;铁支架上装订有 $2 cm$ 厚玻镁复合防火板,用来模拟基层墙体。试验时应满足 ISO9705 标准中相关的试验环境条件要求,室内环境温度在 $18 \sim 26^{\circ}C$,湿度范围为 $40\% \sim 60\%$ 。试验材料固定在装订有玻镁复合防火板的基体铁支架上,试验装置上方集气罩内的风速在 $0.05 \sim 0.1 m/s$ 范围内,并符合相关国际测试标准的要求。试验设计见图 2 和 3。

2.2 试验条件

试验火源样式采用正庚烷油槽火源,油槽尺寸为 $20 \times 20 \times 10 cm^3$,内部装入 $0.5 L$ 正庚烷 (C_7H_{16}) 相对密度为 $0.695 g/cm^3$,燃烧热为 $4806.6 kJ/mol$ 。火源位置见图 4。试验中使用的模型聚苯乙烯样品由上海永顺节能科技有限公司提

供其性能参数见表1。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3条纵线上,从左到右依次为纵L线、纵M线、纵R线,测点布置见图5。

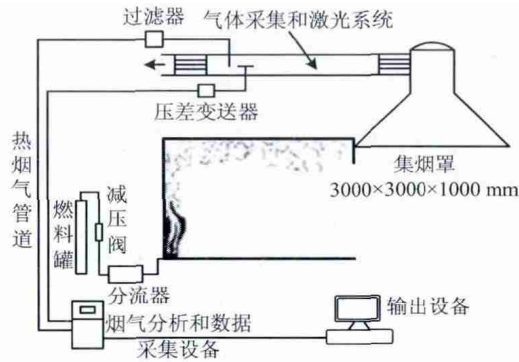


图2 ISO9705 标准实验室示意图

Fig.2 Schematic of ISO9705 standard laboratory

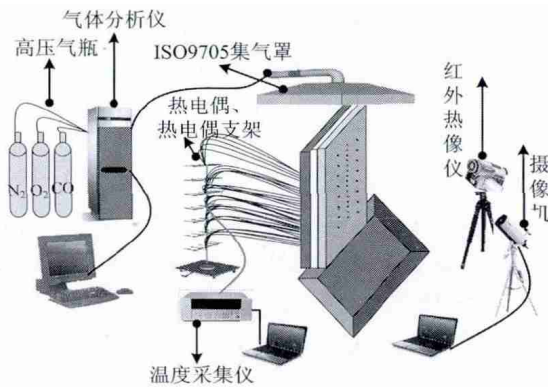


图3 试验平台主体示意图

Fig.3 Schematic of the experimental platform

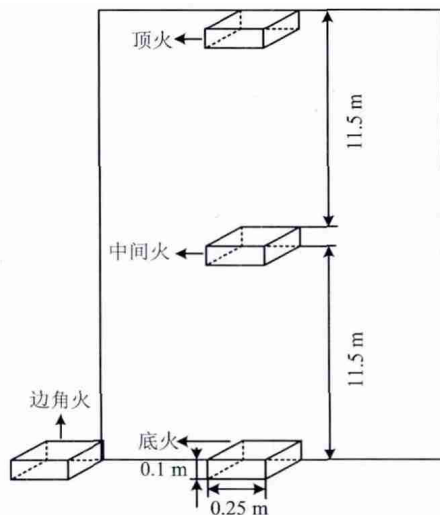


图4 火源位置图

Fig.4 Schematic of the fire source position

表1 样品性能参数

Table 1 Performance parameters of experimental sample

| 材料 | 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) $\times 10^3$ | 导热系数/ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | 热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 燃烧热/ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|-----|--|--|--|--|
| EPS | 17.06 | 0.041 | 1.3 | 40.18 |

2.3 试验方案

试验工况见表2,为保证试验结果真实可靠,每种工况重复试验2~3次。

3 结果与讨论

3.1 材料厚度对火蔓延速率的影响

图6显示了不同厚度的EPS在火灾充分发展阶段的热解前锋位置和火焰高度。由图6可知,相同时刻的火焰高度随材料厚度增加而增加;在充分燃烧阶段,不同厚度的EPS热解前锋高度均与时间呈较明显的指数增长关系。

对试验获得的数据进行指数拟合,得到不同厚度EPS的火蔓延速率方程通式为

$$V_p(t) = A' \exp(B't) \quad (14)$$

其中方程式中的相关参数见表3和4。通过分析可知,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, B' 决定火蔓延速度增长的快慢。随材料厚度增加, A' 和 B' 也相应增加,但 $\Delta B'$ 小于 $\Delta A'$ 。因此,在火灾充分发展阶段,EPS的火蔓延速率随着材料厚度增加而增长,当EPS的厚度为50 mm时,火蔓延速率增幅最小,即材料的火灾危险性增幅与保温性增幅相比是最小的,称为EPS的“临界厚度”。

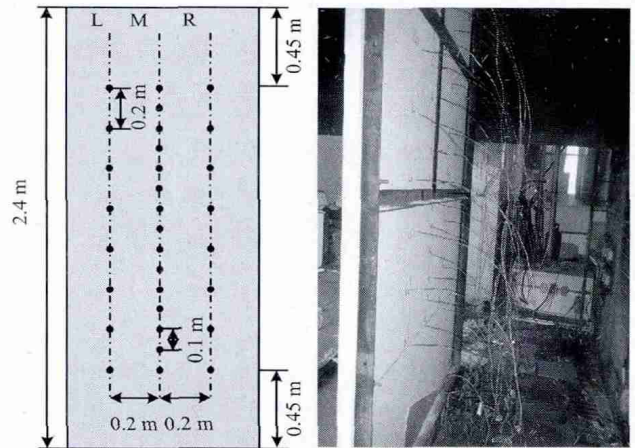


图5 试验热电偶布置图

Fig.5 Schematic of the thermocouple layout

表2 试验工况统计表

Table 2 Statistics of experimental conditions

| 工况号 | 材料 | 面积/ m^2 | 厚度/mm | 耐火等级 | 火源位置 |
|-----|-----|------------------|-------|------|------|
| 1-1 | EPS | 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 | EPS | 2.4 × 1.2 | 50 | B2 | 底部 |
| 2-2 | | | | | 中间 |
| 2-3 | | | | | 顶端 |
| 2-4 | | | | | 边角 |

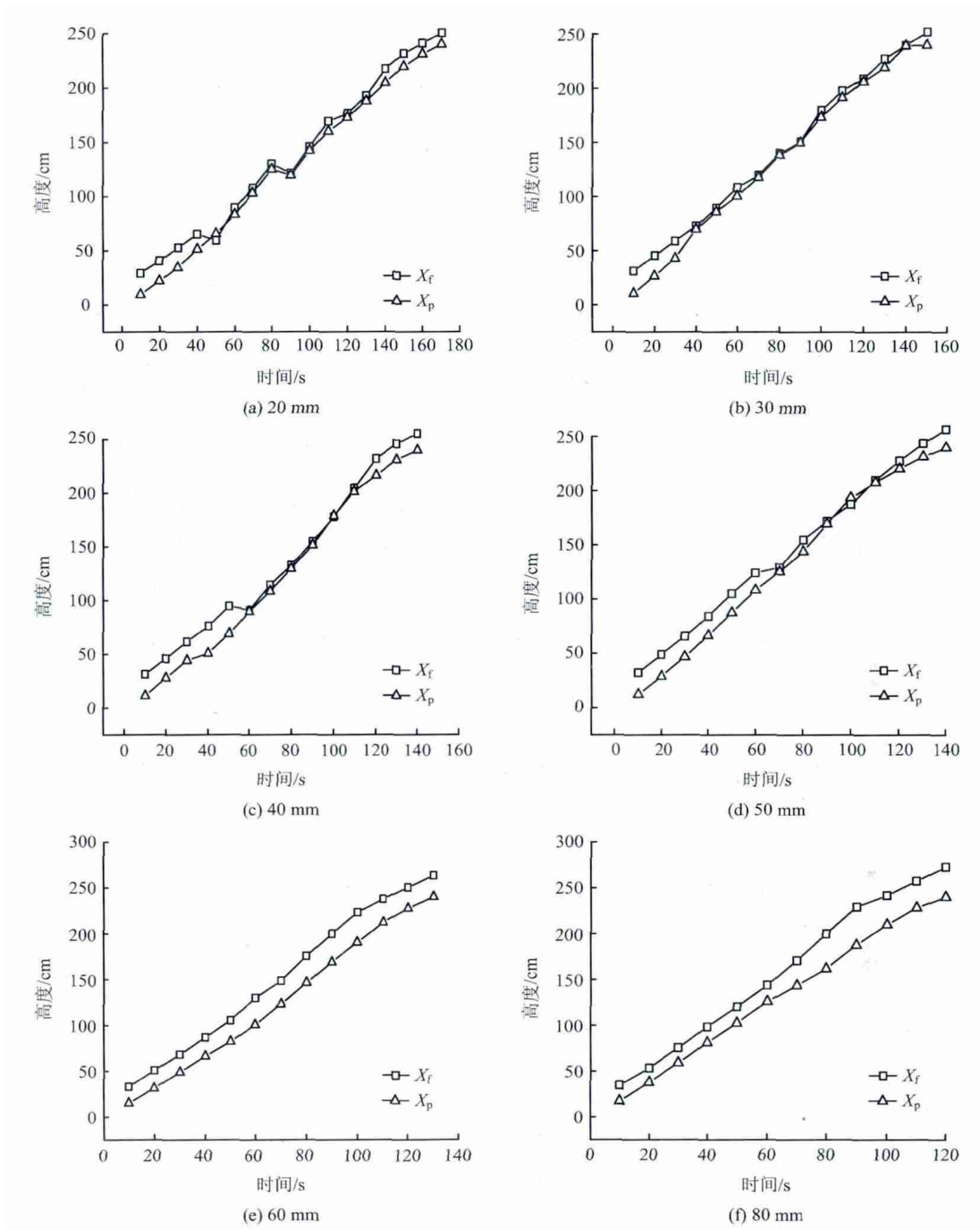


图 6 不同厚度 EPS 保温板的热解前锋和火焰高度

Fig. 6 Pyrolysis front and flame height of EPS with different thicknesses

表 3 不同厚度 EPS 保温板火灾蔓延速率方程中各参数的取值

| 工况号 | 材料 | A' | B' | 相关系数 |
|-----|-----|------|-------|---------|
| 1-1 | EPS | 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 |

表 4 理论模型与试验结果的相对误差

| 工况号 | 通用方程形式 | $(\varphi_1 - A')/A'$ | $(\varphi_2 - B')/B'$ |
|-----|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1-1 | $V_p(t) = A' \exp(B't)$ | 0.014 682 | 0.035 714 |
| 1-2 | | 0.007 396 | 0.062 016 |
| 1-3 | | 0.004 237 | 0.043 478 |
| 1-4 | | 0.011 173 | 0.024 39 |
| 1-5 | | 0.016 607 | 0.023 46 |
| 1-6 | | 0.007 642 | 0.022 333 |

3.2 火源位置对火蔓延速率的影响

不同的火源位置会使材料燃烧出现不同的火焰蔓延轨迹。底火工况下,火焰蔓延主要为向上的火蔓延,是典型的顺流火蔓延;顶火工况下,火焰蔓延主要为向下的火蔓延,是典型的逆流火蔓延;中火工况下,火蔓延包括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;边角火工况下,火

蔓延包括水平横向蔓延和竖直向上蔓延,也是顺流火和逆流火蔓延的结合。由于不同方式的火蔓延,其火焰蔓延机理和蔓延规律不同,火灾发展过程不同,因此,其火蔓延速率有较大差距。不同火源位置下 EPS 的燃烧发展过程见图 7,不同火源位置工况下 EPS 在火灾充分发展阶段的火焰高度 X_f 和热解前锋位置 X_p 见图 8。

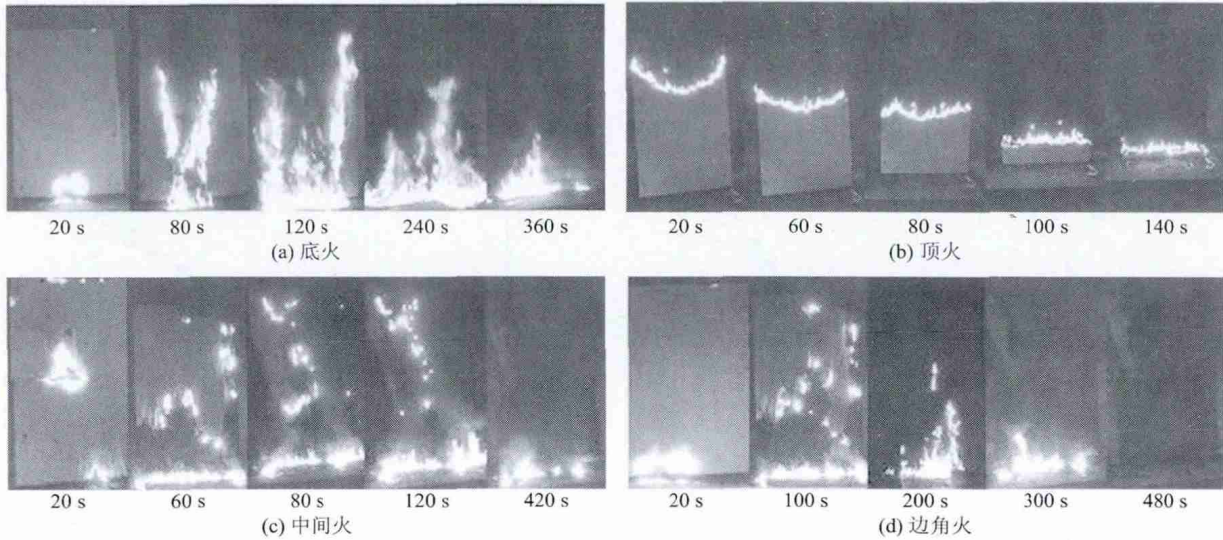


图7 不同火源位置下 EPS 的火蔓延过程

Fig. 7 Fire spread of EPS under different fire source position

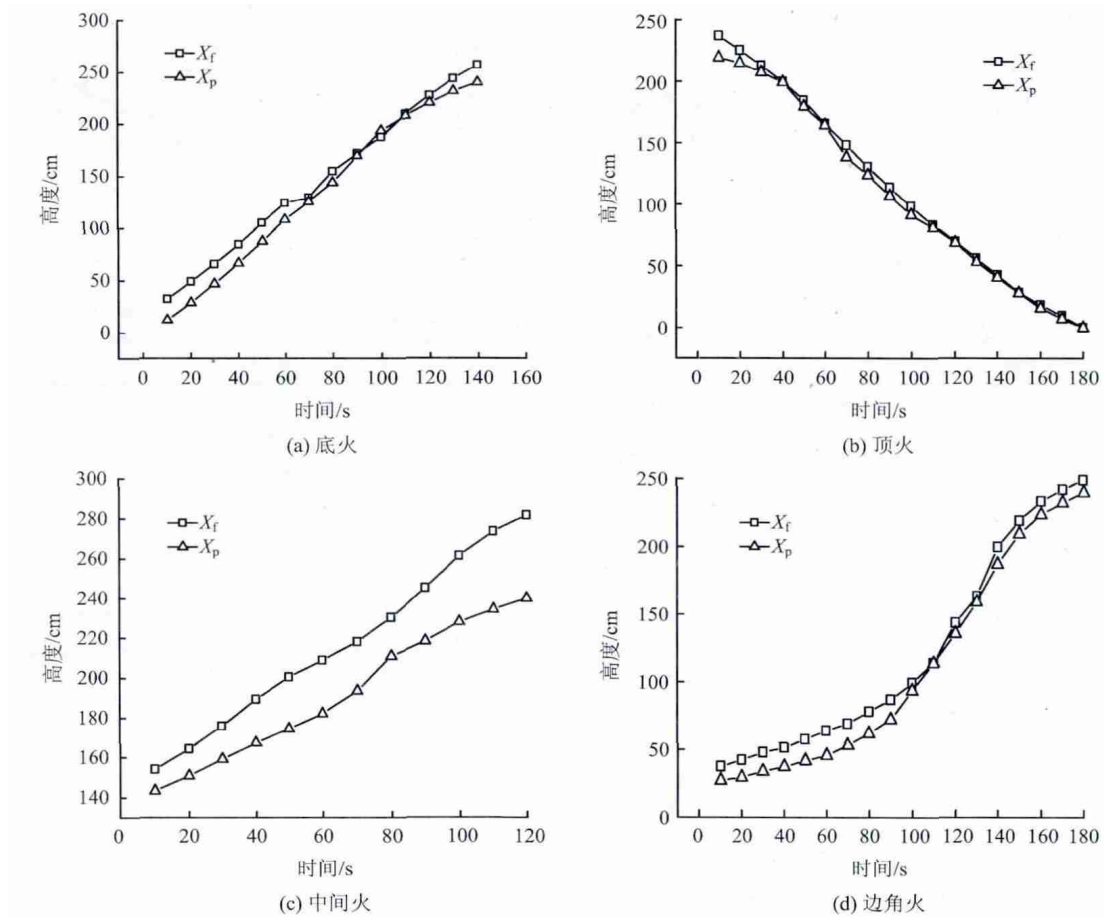


图8 不同火源位置下 EPS 的热解前锋和火焰高度

Fig. 8 Pyrolysis front and flame height of EPS under different fire source position

根据 3.1 节对火蔓延速率的分析,将试验数据进行指数拟合,可以得到不同火源位置下 EPS 的火蔓延速率的回归方程通式,即

$$V_p(t) = A'' \exp(B''t) \quad (15)$$

其中方程式中的参数如表 5 所示,2-2(U)表示向上火蔓延,2-2(D)表示向下火蔓延。通过分析可知,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, B'' 决定火蔓延速度增长的快慢。由表 5 可知,对于 EPS 材料,中间火工况下的向上火蔓延的 A'' 最大,这是因为初期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,燃烧剧烈,单位时间内释放的热量,因此,火蔓延速度增长也最快,即 B'' 也最大。不同火源工况下,初始蔓延速度从大到小依次为中间火向上火蔓延、底火、边角火、中间火向下火蔓延、顶火;不同火源工况下,火蔓延速度增长由快到慢依次为中间火向上火蔓延、底火、中间火向下火蔓延、顶火、边角火。材料燃烧的火蔓延速率越大,火灾危险性就越大。因此,不同火源位置工况下的火灾危险性由大到小依次为中间火、底火、顶火、边角火。

3.3 火蔓延速率试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 φ_1 、 φ_2 的取值(见表 6),并得到不同工况下火蔓延速率的理论方程(见表 7)。

此理论推导出的 φ_1 、 φ_2 值与试验获取的相关参数值相近。可见,在误差允许的范围内,本文推导的模型能够比较准确地预测热塑性外保温材料火蔓延速率。还可以发现,耦合燃烧度(I)随材料厚度增加而增大,当 EPS 厚度为 50 mm 时, $I = 1$;不同火源位置条件下 I 由大到小依次为中火、底火、顶火、边角火;由于 φ_1 和 φ_2 会随 I 增大而增大,火蔓延速率会随 I 增大而加快。

4 结 论

1) 基于火灾动力学理论,构建了热塑性外保温材料的火蔓延速率方程 $V_p(t) = \varphi_1 \exp(\varphi_2 t)$;提出了表征材料壁面燃烧火焰和高温熔滴形成的油池火之间的“耦合燃烧”作用程度的无量纲参数——耦合燃烧度(I),且 φ_1 和 φ_2 会随 I 增大而增大,因此,火蔓延速率会随 I 增大而加快。

表 5 不同火源位置工况下 EPS 火蔓延速率方程中各参数的取值
Table 5 Parameters of fire spread rate regression equations for EPS

| 工况号 | 材料 | 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) | EPS | 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 |

表 6 火蔓延模型中 φ_1 、 φ_2 及 I_i 的取值
Table 6 Values of φ_1 , φ_2 , I_i in fire spread model

| 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 |

2) 试验结果表明, EPS 的火蔓延速率随时间变化呈指数增长,且随着材料厚度和火源位置的不同而发生变化;当 EPS 的厚度为 50 mm 时,火蔓延速率增幅最小;当火源位置为中间火时,火蔓延速率最大。

3) 理论模型与试验结果具有较好的一致性,可以有效预测热塑性外保温材料的火蔓延速率; I 随材料厚度增大而增大,当 EPS 厚度为 50 mm 时, $I = 1$;当火源位置为中间火时, I 最大,即 $I = 1.396$;当火源位置为边角火时, I 最小,即 $I = 0.697$ 。

References(参考文献):

- [1] BO Jianwei(薄建伟). Fire risks of external insulation material and its control measures[J]. *Fire Science and Technology*(消防科学与技术), 2012, 31(3): 296-299.
- [2] ZHANG J, SHIELDS T J, SILCOCK G W H. Effect of melting behavior on upward flame spread of thermoplastics[J]. *Fire and Materials*, 1997, 21(1): 1-6.
- [3] BAKHTIYARI S, TAGHI-AKBARI L, BARIKANI M. The effective parameters for reaction-to-fire properties of expanded polystyrene foams in bench scale[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2010, 19: 27-37.
- [4] BUTLER K M. *A numerical model for combustion of bubbling thermoplastic materials in microgravity* [R]. Gaithersburg, Md, USA: National Institute of Standards and Technology, 2002.
- [5] XIE Qiyuan, ZHANG Heping, XU Liang. 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(7): 529-533.
- [6] XU Liang(徐亮). *The study on fire performance of typical thermoplastic lining(典型热塑性装饰材料火灾特性研究)* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [7] QI Yanjun(齐延军), CUI Yu(崔瑜), GONG Lunlun(龚伦伦), et al. Thermal stability analysis of the rigid polyurethane foam for the exterior insulation[J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2012, 12(4): 212-216.
- [8] CHENG Xudong(程旭东). *Study on melting and flowing combustion behavior of typical thermoplastics in compartment(受限空间内典型热塑性材料熔融流动燃烧行为研究)* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.

表 7 不同工况下的火蔓延速率理论方程

Table 7 Theoretical equations for fire spread under different conditions

| 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 | $V_p(t) = 6.89 \exp^{0.117t}$ |

- [9] ZHOU Yong(周勇), ZHANG Heping(张和平), WAN Yutian(万玉田), et al. Research on the vertical flame spread velocity of lining materials with different thickness[J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2010, 10(6): 142-144.
- [10] CONSALVIJ 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.
- [11] DELICHATSIOS M A. Flame heights in turbulent wall fires with significant flame radiation[J]. *Combustion Science and Technology*, 1984, 39(1): 195-214.
- [12] 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.
- [13] TU K M, QUINTIERE J G. Wall flame heights with external radiation[J]. *Fire Technology*, 1991, 27(3): 195-203.
- [14] ZUKOSKI E. Mass flux in fire plumes[C]//International Association for Fire Safety Science. *Proceedings of the Fourth International Symposium Fire Safety Science*, Gaithersburg. New York: Taylor & Francis, 1994.
- [15] YANG Xiaolin, XU Da, XU Youjun. 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.
- [16] ZUKOSKI E, KUBOTA T, CETEGEN B. Entrainment in fire plumes[J]. *Fire Safety Journal*, 1981, 3(3): 107-121.
- [17] YANG Yun, ZHANG Heping, WANG Wei, et al. Study of heat release rate of typical lining materials in full scale fire test[J]. *Fire Safety Journal*, 2003, 12(3): 191-195.

Numerical simulation and experimental investigation on the fire propagation of EPS material

ZHANG Miao^{1,2}, LIU Xing-na³, LI Chang-hai⁴, CHEN Zhen⁵, WANG Ji¹, SONG Wen-hua¹

(1 Chemical and Environmental Engineering, College Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2 Hebei District Fire Department of Tianjin, Tianjin 300100, China; 3 Xinyang Fire Detachment, Xinyang 065000, Henan, China; 4 State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 5 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This article is aimed at introducing a numerical simulation and an experimental investigation on the fire propagation rate of the EPS (Expanded Polystyrene) material. The reason for us to pick up the research topic is that we have seen the danger and hazardness of the disasters and damages that take place every year and urgent needs have come to us to reduce such fire hazards through a theoretical research to make clear the combustion characteristic features. In order to achieve the goal, we have first of all established a fire spread rate model for the thermoplastic insulation material, which has been established on the basis of a series of hypothetical simplification in accordance with the fire dy-

namics theory while considering the effects of the material thickness and fire location on the combustion. In the model we have also pointed out that the fire spreading rate increases exponentially with the lasting time of the fire in line with the derivation of the combustion characteristic parameters. In addition, the dimensionless parameter—"the coupled combustion degree" which represents the mutual promoting role on the upward fire spread and flowing fire was proposed. In this paper, we have carried out full-size experiments of heat release rate based on the ISO9705 laboratory testing results of the fire spread rate of thermoplastic insulation material with the laboratory apparatus including iron framings, thermal infrared images, the thermocouples, data acquisition instruments for temperature, cameras, anemographs and computers with four burning conditions designed with the fire styles of $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ normal heptane tanks. In hoping to measure all the testing samples, we have laid out 32 K-sheathed thermocouples on every testing sample, each having been tested for 2 or 3 times for reducing likely errors. Thus, we have made clear the effects of the material thickness and the fire location on the EPS fire rate spreading. And, eventually, the results of our experiments and numerical simulation show that the fire spreading rate tends to increase exponentially with the time, which is well in accord with the theoretical hypothesis. All the above results of investigation and simulation demonstrate that the fire spread rate tends to increase exponentially with the fire time lasting. The greater the thickness and the "coupled combustion degree" increase, the faster the fire spreading rate changes, whereas the sequence of the "coupled combustion degree" under different fire locations turns out to be: middle fire > bottom fire > top fire > corner fire. The simulation and the investigation results we have gained also prove in nice accord with the experimental data and can be used to predict the fire spreading rate of the thermoplastic insulation materials effectively.

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

CLC number: X924.3 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2015)02-0144-07