

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.02.024

通风环境下保温材料 XPS 的火灾特性

尚融雪¹, 邹斌^{1,2}, 张培红¹, 郝宇军¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819;

2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230026)

摘要: 在 0, 0.6 和 1.2 m/s 机械通风条件下, 实验研究不同火源距离和火源位置时挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)的火灾行为、引燃特性及烟气特性。结果表明, 随着风速的增大, XPS 表面火焰蔓延速度逐渐增大且较早出现结焦现象。通风风速和火源位置相同时, XPS 引燃时间与火源距离近线性相关; 火源位于垂直墙面位置时, 风速从 0.6 m/s 增加到 1.2 m/s, XPS 最大引燃距离从 0.2 m 缩短至 0.15 m。与其他工况相比, 风速为 0.6 m/s 时, 烟气温度达最大值, 且氧气、二氧化碳及一氧化碳浓度变化量最小, XPS 燃烧速率随着风速的增加先增大后减小; 当风速较小时, 氧气浓度增加对 XPS 燃烧起主导促进作用; 随着风速的进一步增加, 其热效应对燃烧的抑制作用显著增强。

关键词: 挤塑聚苯乙烯(XPS); 机械通风; 引燃特性; 火灾行为; 烟气特性

中图分类号: X 932 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)02-0287-07

Fire Characteristics of Thermal Insulation Material XPS Under Ventilation Environment

SHANG Rong-xue¹, ZOU Bin^{1,2}, ZHANG Pei-hong¹, HAO Yu-jun¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China. Corresponding author: SHANG Rong-xue, E-mail: rongxue.shang@foxmail.com)

Abstract: The fire behavior, ignition characteristics and smoke characteristics of XPS (extruded polystyrene) were studied experimentally with various distances and locations of the fire source under the mechanical ventilation velocities of 0, 0.6 and 1.2 m/s. The experimental results showed that the flame spreading speed on the surface of XPS gradually increased and coking appeared earlier with the increase of wind speed. The XPS ignition time were nearly linearly related to the fire source distances under the same ventilation velocity and fire source location. The maximum ignition distance of XPS decreased from 0.2 m to 0.15 m with the increase of ventilation velocity from 0.6 m/s to 1.2 m/s when the fire source was perpendicular to the wall. In addition, the maximum temperature of smoke and the minimum variation of the concentrations of oxygen, carbon dioxide, and carbon monoxide were obtained when the ventilation velocity reached to 0.6 m/s. Therefore, the XPS burning rate increased first and then decreased with the growth of ventilation velocity. When the ventilation velocity was low, the increase of oxygen concentration promoted the XPS combustion. The thermal inhibitory influence of new air on the XPS combustion was enhanced significantly with the further increase of the ventilation velocity, thus the XPS combustion rate reduced.

Key words: extruded polystyrene (XPS); ventilation velocity; ignition characteristics; fire behavior; smoke characteristics

收稿日期: 2019-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51804065, 51774067); 中国博士后科学基金资助项目(2018M631811); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N170103007)。

作者简介: 尚融雪(1987-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学讲师, 博士; 张培红(1969-), 女, 河南南阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

建筑外墙保温系统是有效实现建筑节能的主要手段^[1]. 有机高分子保温材料挤塑聚苯乙烯(XPS)导热系数小,保温性能优良,被广泛应用于国内外不同建筑建设及改造工程中,但 XPS 易被引燃,热释放速率大,且火焰蔓延快,使建筑保温系统火灾危险性显著增加^[2].

许多学者对 XPS 火灾特性进行研究^[3]. Mehta 等^[4]用差示扫描量热法和热重分析法研究了发泡聚苯乙烯辐射加热过程的变化规律. Tsai 等^[5]通过锥形量热仪研究发现,聚苯乙烯泡沫水平放置时温度分布较为均匀,引燃临界热通量较低,引燃时间更短,热释放速率峰值更低,燃烧时间更长. Huang 等^[6]实验推导出了不同入射热通量下,XPS 的点火时间与辐射热流之间的函数关系. Zhang 等^[7]研究了 XPS 火焰蔓延受 XPS 板尺寸和外界环境(平原和高原)的影响规律;相比于平原地区,高原地区条件下 XPS 的熔融和热解阶段变长. Wu 等^[8]研究了气流温度和速度对厚 PMMA 板火焰蔓延的影响,气流的温度降低和速度增加都会导致引燃时间延长. Tewarson 等^[9]研究发现,随着外加辐射热通量的增加,聚苯乙烯

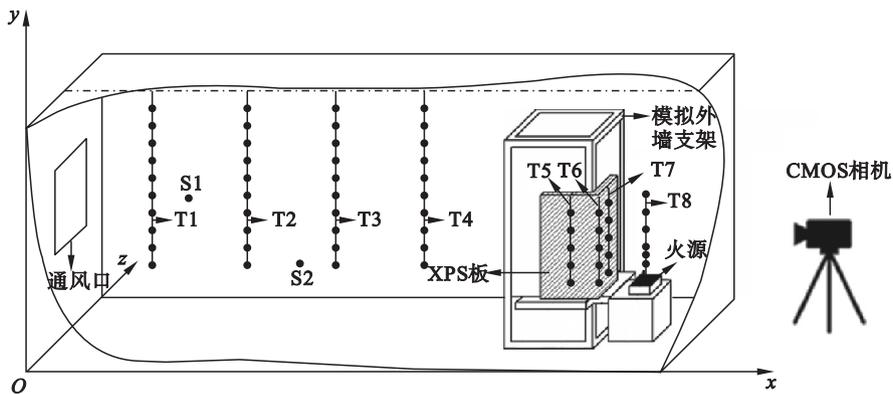
样品热释放速率快速下降,产生更多的一氧化碳、碳氢化合物和烟雾微粒.

虽然保温材料及其系统的火灾特性已有较为全面的研究,但自然环境下 XPS 火灾特性易受环境风速影响;其影响机制及规律仍待进一步研究. 为此,本文以酒精池火为火源,在 0, 0.6 和 1.2 m/s 机械通风条件下,实验研究 XPS 引燃特性随通风风速、火源距离和火源位置的变化规律, XPS 表面火焰蔓延速度、结焦效应出现时间和火焰高度随风速的变化规律,以及不同通风风速下的烟气浓度和温度及 XPS 材料燃烧状态等.

1 实验方法

1.1 实验系统

缩尺寸 XPS 火灾实验模型如图 1 所示. 该系统主要由火源系统、XPS 模拟外墙保温系统、数据采集系统和实验观测系统组成. 为清晰描述实验测点布置,以模型左前方边缘为零点,长、高、宽方向分别沿 x 轴、 y 轴及 z 轴设置参考坐标系(见图 1).



图中 T1 ~ T8 为热电偶树; S1, S2 为探头.

图 1 实验模型示意图

Fig. 1 Scheme of experimental setup

实验模型主体为 $3.6 \text{ m}(x) \times 1.2 \text{ m}(y) \times 1.4 \text{ m}(z)$,模型顶部和单侧壁面为 1 mm 厚镀锌钢板,另一侧为 8 mm 厚防火玻璃. 为了模拟机械通风环境,在实验模型的末端($x = 3.6 \text{ m}$)设计全开口,并于开口对侧、距模型底面 0.5 m 横向中心处($x = 0, y = 0.5 \text{ m}, z = 0.7 \text{ m}$)设置 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 通风口. 通风口与风量为 $0 \sim 2200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的变频排烟风机直接连接.

在缩尺寸模型靠近开口端($x = 0.3 \text{ m}, y = 0.55 \text{ m}, z = 0.7 \text{ m}$)设置 XPS 模拟保温外墙系统,采用角钢搭建 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 的支架,将两

块 $0.9 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的夹芯复合防火板固定在角钢支架上,防火板外壁面由 1 mm 厚的铝镁合金板保温棉填充组成. 实验选取两块 $0.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的 XPS 板,密度为 $27.5 \text{ kg}/\text{m}^3$,两块 XPS 板以 90° 角粘贴在防火板上. 在 XPS 板下部设置两个 $0.4 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的铁制熔融池,承接 XPS 板熔融滴落物.

火源系统采用 $0.18 \text{ m} \times 0.12 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的不锈钢盆,放置在高 0.3 m 的火源支架上. 估算不同通风风速下,本实验火源的平均热释放速率为 7.56 kW. 火源盆(100 mL 酒精)距离 XPS 板的距

离记为 d 。

数据采集系统主要由直径 0.001 m K 型铠装热电偶、德国 MRU VARIO PLUS 增强型烟气成分分析仪及 LXI 数据记录仪组成。热电偶的布置如图 1 所示。在热电偶树 T1 ~ T4 上分别垂直布置 10 支热电偶, 自下而上进行编号(后文热电偶树均自下而上编号), 如 T1 - 1 ~ T1 - 10。其中各热电偶树 1 ~ 10 号热电偶均间隔 0.05 m。T1 参考坐标为 $x = 0.5$ m, $y = 0.4 \sim 0.85$ m, $z = 0.7$ m, T2 ~ T4 沿 x 轴水平布置, 参考坐标分别为 $x = 1.0, 1.5, 2.0$ m。T5 ~ T7 由 5 支间隔 0.01 m 的热电偶组成, T5 ~ T7 最下方热电偶距模型底部 0.35 m。T5 和 T7 分别布置在距 XPS 板中心线 0.05 m 处, T6 布置在距两块 XPS 板夹角交线 0.05 m 处。在油池中心线上布置由 8 支热电偶组成的热电偶树 T8, 测量油池上方温度分布。热电偶 T8 - 1 ~ T8 - 5 间隔 0.05 m, T8 - 5 ~ T8 - 8 间隔 0.1 m, T8 最下方热电偶距模型底部 0.35 m。烟气分析仪探头布置在模型中靠近保温 XPS 板方向, 探头 S1 参考坐标为 $x = 0.9$ m, $y = 1$ m, $z = 1.05$ m, 探头 S2 为 $x = 2.25$ m, $y = 0.5$ m, $z = 1.05$ m。此外, 利用 CMOS 相机记录实验过程中 XPS 板的燃烧过程。

1.2 实验工况

实验中设置机械通风风速 v 分别为 0, 0.6 和 1.2 m/s。此外, 考虑到火灾场景多样性, 实验设置

不同 d 值的实验工况, 并设置两种火源布置(垂直墙面结构: 油池放置于单侧 XPS 板中心线方向; 垂直墙角结构: 油池放置于两块 XPS 板外侧角平分线方向)。

具体实验工况见表 1。

表 1 实验工况
Table 1 Experiment conditions

$v/(m \cdot s^{-1})$	火源位置	d/m
0	垂直墙角	0.05
0	垂直墙面	0.05
0.6	垂直墙角	0.05
0.6	垂直墙面	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25
1.2	垂直墙角	0.05, 0.1
1.2	垂直墙面	0.05, 0.1, 0.15, 0.2

2 结果与讨论

2.1 XPS 燃烧火灾行为

图 2 给出了不同风速时 XPS 火灾发展过程。将 XPS 被点燃时刻定义为火灾初始时刻, 即引燃时间 t 为 0 s, 并每间隔 30 s 记录一次火灾图像数据。

根据图 2 以及 Huang 等^[10]对 XPS 在燃烧过程中质量损失速率变化的研究分析可知, XPS 的燃烧过程包括热解收缩、引燃着火、表面燃烧、结焦和熔融滴落燃烧等。

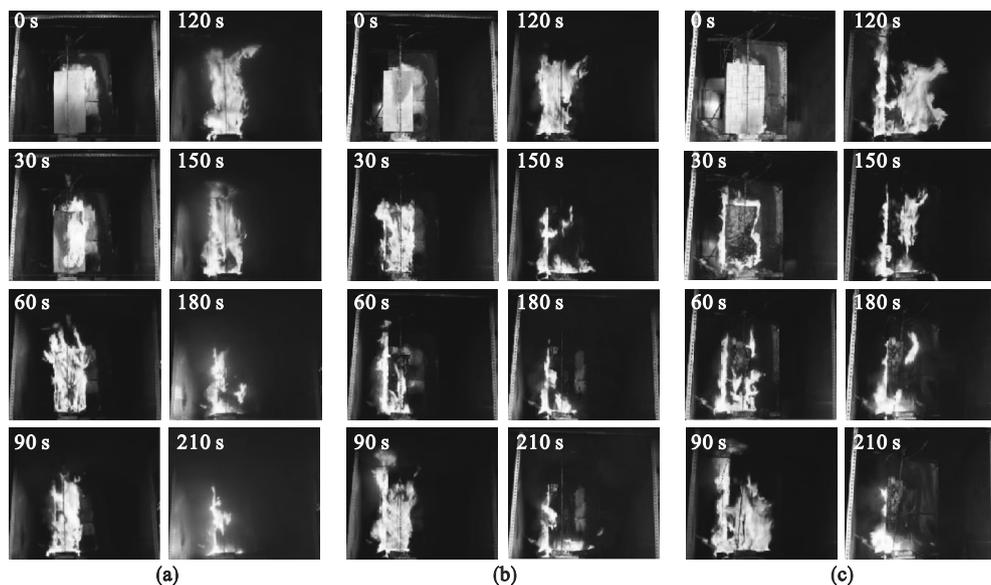


图 2 不同风速下 XPS 板的燃烧过程

Fig. 2 Combustion process of XPS under various ventilation velocities

(a) — $v = 0$ m/s; (b) — $v = 0.6$ m/s; (c) — $v = 1.2$ m/s.

对比不同风速作用下 XPS 的燃烧过程可以发现, 在表面燃烧阶段, 随着风速增加, 垂直于

XPS 表面的回流作用增强, 使火蔓延过程中的火焰剧烈震荡, 火焰燃烧方向摇摆现象显著, 预热区

XPS 受震荡火焰的辐射热逐渐增加;此外,垂直固定的 XPS 板过火面熔融物受重力影响,使未燃的 XPS 受熔融物卷落的强制性热传导作用增强,因此 XPS 表面火焰蔓延速度加快.在黏附火焰阶段,随着风速增大,XPS 板挥发的可燃性热解气体在 XPS 板表面的扩散速度增加,XPS 板随着燃烧温度的升高逐渐熔融并流动,风速的增加会加快可燃熔融物的流动,加速熔融滴落物表面炭壳的产生,XPS 从被引燃到出现结焦效应的间隔时间逐渐减少,导致火焰高度降低且持续时间增加,XPS 的火焰从两侧边逐渐向中心发展蔓延.同时,对比图 2 中 XPS 的火蔓延速度可知,当风速为 0.6 m/s 时,XPS 燃烧速率最大,XPS 从被引燃到火势减弱的时间间隔最小;当实验环境风速为 0 m/s 时,XPS 燃烧速率最小,XPS 从被引燃到火势减弱的时间间隔最大.

2.2 XPS 的引燃特性

2.2.1 火源距离对 XPS 引燃特性的影响

图 3 给出了火源垂直墙面位置, v 为 0.6 m/s 和 1.2 m/s 条件下 XPS 引燃时间与 d 的关系.从图中可知,XPS 引燃时间随 d 的增加近似线性增加,且当 v 为 0.6 m/s 时,引燃时间随 d 的增加显著延长.通过对不同风速条件下引燃时间与对应火源距离进行线性拟合可知,在 v 为 0.6 m/s 时,线性拟合优度 $R^2 = 0.989$;当 v 为 1.2 m/s 时,线性拟合优度 $R^2 = 0.892$,其拟合优度均较好.

在火源位于垂直墙面条件下,为有效分析

XPS 板周围温度分布,采集 T5 及 T7 上各热电偶测点实验数据.通过对比可知,以 T7 为例,当 d 和 v 不同时,测点 T7-1 温度值最高.

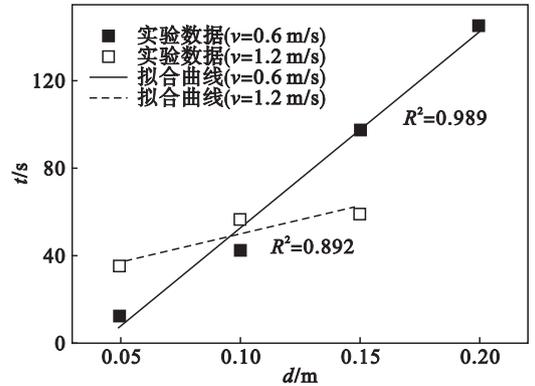


图 3 不同火源距离下 XPS 板的引燃时间
Fig. 3 Ignition time of XPS with different fire source distances

图 4 给出了垂直墙面火源位置时,不同 d 和 v 条件下,测点 T7-1 测得的温度随时间的变化关系.

从图 4 中可以看出,随着 d 的增加,测点 T7-1 的升温速率和最高温度依次降低,因此需要较长时间的热量积累才能使 XPS 达到持续燃烧的条件.当 d 增大到一定值时,在火源持续燃烧期间,升温速度较缓慢,且此时能达到的最高温度较低,XPS 不能达到持续燃烧的条件,则不能被引燃.如图 4 所示,在实验中当 v 为 0.6 m/s 时,XPS 能够被引燃的最大距离 $d_{\max} = 0.20$ m;当 v 为 1.2 m/s 时,XPS 能够被引燃的最大距离 $d_{\max} = 0.15$ m.

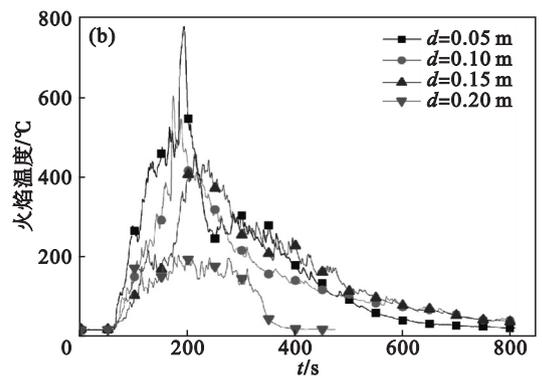
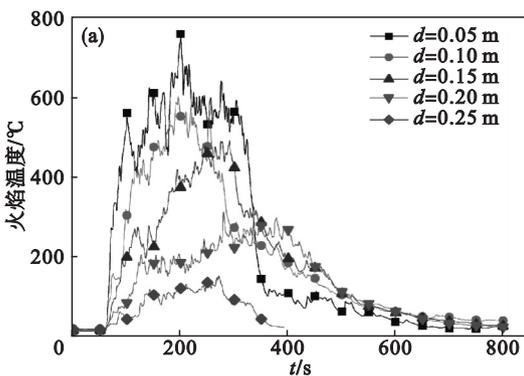


图 4 不同火源距离下热电偶测点 T7-1 温度

Fig. 4 Temperature data of T7-1 with different fire source distances

(a)— $v=0.6$ m/s; (b)— $v=1.2$ m/s.

2.2.2 通风风速对 XPS 引燃特性的影响

图 5 给出了火源位于垂直墙角及垂直墙面,火源距离 0.05 m 时,在不同风速条件下 XPS 引燃时间.

由图 5 可知,当 d 相同时,火源位于垂直墙面时 XPS 的引燃时间均小于垂直墙角位置,且 XPS

引燃时间均呈现先减小后增加的变化趋势.当 v 从 0 m/s 逐渐增加时,模型内预热区及燃烧区卷吸的新鲜空气逐渐增加,使火源燃烧速率增大,加快了火源火焰与周围环境的热交换;此外,随着风速的增加,XPS 板受到水平方向热气体流动的热对流作用逐渐增强,因此 XPS 引燃时间逐渐减

小. 随着风速的进一步增加, 过多卷吸的新鲜空气显著消耗预热区及燃烧区的热量, 热效应显著抑制火源对 XPS 板的热辐射, 使引燃时间逐渐增大.

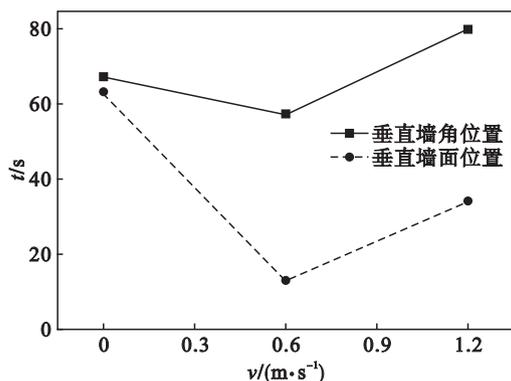


图 5 不同风速条件下 XPS 的引燃时间

Fig. 5 Ignition time of XPS under various ventilation velocities

当 v 为 0 m/s 时, 两种火源位置的 XPS 引燃时间相差不显著; 当 v 增加到 0.6 m/s 及

1.2 m/s 时, 火源放置在垂直墙角位置时的 XPS 引燃时间显著长于垂直墙面工况, 且当 v 为 0.6 m/s 时, 两种火源位置的 XPS 的引燃时间均达到最小值.

为进一步对比分析不同火源位置条件下 v 对 XPS 引燃特性的影响, 在 d 相同的条件下 ($d = 0.05$ m), 分别选取火源与 XPS 垂直中线位置的热电偶测点数据, 分析其温度变化.

图 6 分别给出了火源位于垂直墙面位置时测点 T7-1 及火源位于垂直墙角位置时测点 T6-1 的温度变化曲线.

从图 6 可知, 当风速相同时, 火源在垂直墙面的测点温度均高于垂直墙角工况, 此时 XPS 引燃时间减少. 当 v 为 0 m/s 时, 两种火源位置条件下测点温度差异较小, XPS 引燃时间相近; 当 v 达到 0.6 m/s 和 1.2 m/s 时, 两种火源位置条件下 XPS 引燃时间的差异也随之增加. 此外, 在三种风速下, 火源垂直墙面位置的测点温度均高于垂直墙角工况, 使得墙面位置的引燃时间均小于墙角位置.

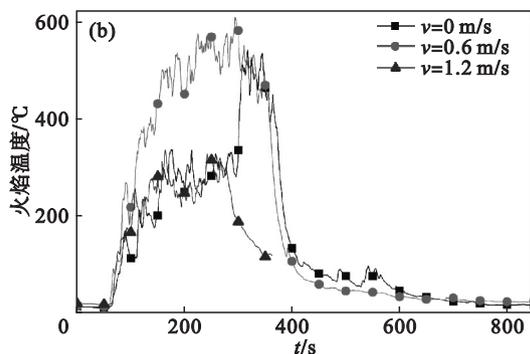
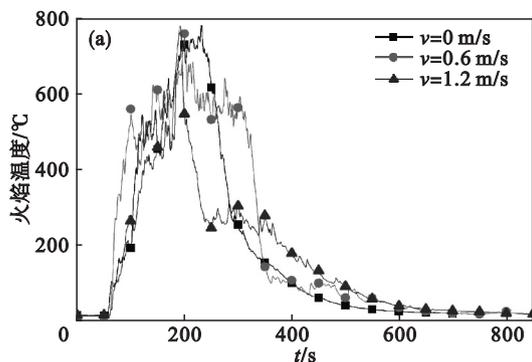


图 6 不同火源位置下热电偶测点温度

Fig. 6 Temperature data of T7-1 and T6-1 with different fire source location

(a) —火源在垂直墙面位置, T7-1; (b) —火源在垂直墙角位置, T6-1.

2.3 烟气特性

2.3.1 通风风速对烟气最高温度的影响

选取 T1 ~ T4, 对不同风速下的烟气温度进行测量. 实验发现, 位于模型顶部下方 0.1 m 处, 各热电偶树的 10 号测点温度最高. 图 7 给出了测点 T1-10, T2-10, T3-10 和 T4-10 的温度变化曲线.

从图 7 可知, 随着 v 的增加, 各测点烟气温度均呈现先升高后下降的变化趋势. 当 v 从 0 增加到 0.6 m/s 时, 距离 XPS 燃烧区域较近的 T4 测得烟气温度最大峰值; 随着 v 的继续增加, 烟气温度迅速下降, 当 v 增加至 1.2 m/s 时, 烟气温度达到该工况下的最小值.

对比图 7b ~ 7d, 随着测点与 XPS 距离的增加, 不同风速下的烟气温度峰值均随之下降, 风速为

0.6 m/s 及 0 条件下的烟气温度峰值增量逐渐减小, 且其峰值均高于 1.2 m/s 风速条件下的烟气温度峰值. 此外, 在三种风速工况下, 当风速为 0.6 m/s 时, 烟气温度达到峰值的升温时间最短; 风速为 1.2 m/s 时, 烟气温度达到峰值的升温时间最长.

2.3.2 风速对烟气浓度的影响

为了研究 XPS 在不同风速条件下火灾烟气组分的变化规律, 图 8 给出了不同风速条件下, 测点 S1 和 S2 的气体体积分数的变化曲线.

表 2 给出了不同风速下, O_2 , CO_2 和 CO 体积分数达到峰值的时间.

从图 8 可知, 点火后随着燃料的燃烧, 烟气探测仪测点处 O_2 的体积分数逐渐下降, CO_2 和 CO 的体积分数增加. 受火源功率的限制, O_2 , CO_2 和 CO 的体积分数变化量较小. 火源持续作用一段

时间后, XPS 被引燃, 发生表面燃烧, 此时 O_2 体

积分数迅速降低, 同时可测得 CO_2 和 CO 的体积

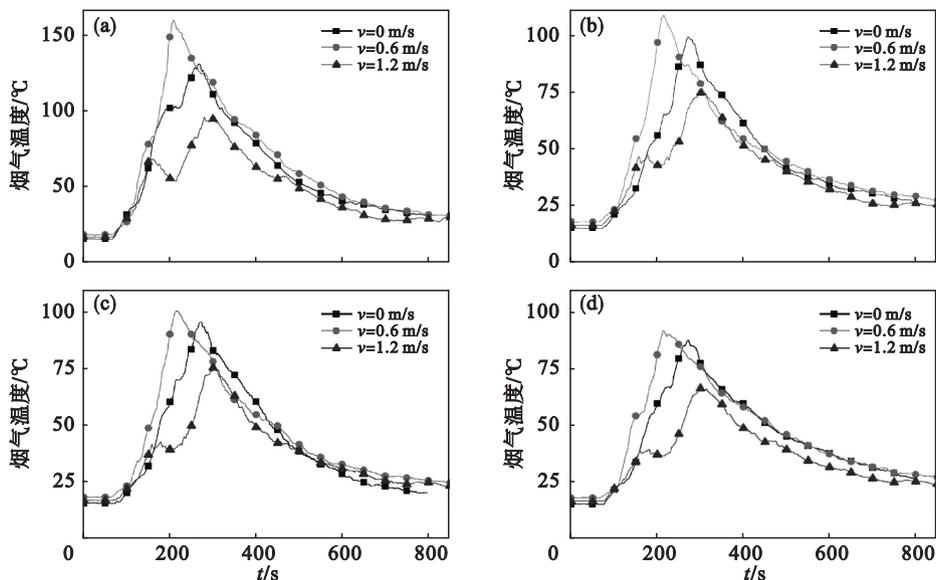


图 7 不同风速下测点 T1-10, T2-10, T3-10 和 T4-10 的烟气温度

Fig. 7 Smoke temperature data of T1-10, T2-10, T3-10 and T4-10 under various ventilation velocities

(a)—T4-10; (b)—T3-10; (c)—T2-10; (d)—T1-10.

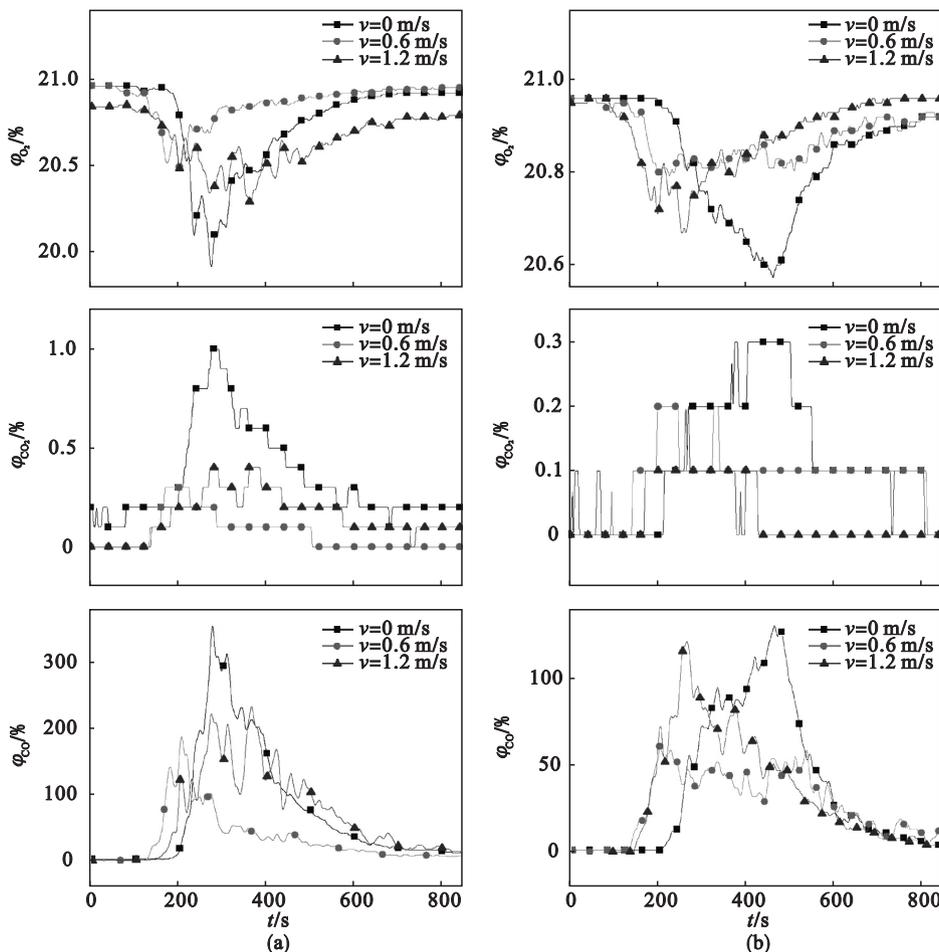


图 8 不同风速下的烟气浓度

Fig. 8 Smoke component concentration data of S1 and S2 under various ventilation velocities

(a)—S1; (b)—S2.

分数快速增加,并分别达到峰值.随着 XPS 的继续燃烧,火势逐渐减弱, O_2 、 CO_2 和 CO 的体积分数随之恢复到初始值附近.在受限空间火灾发展过程中, O_2 、 CO_2 和 CO 体积分数随时间的变化趋势,能为火灾燃烧状态的判断提供重要依据^[10].

从图 8 及表 2 可知,当 v 为 0.6 m/s 时, O_2 、 CO_2 和 CO 体积分数变化值最小,且达到各组分峰值所需的时间最短;当风速为 0 时,烟气中各组分体积分数变化值较大.

表 2 不同风速下烟气组分的变化
Table 2 Smoke component concentration under various ventilation velocities

测点	风速 $m \cdot s^{-1}$	O_2		CO_2		CO	
		$\varphi_{\min}/\%$	所需时间/s	$\varphi_{\min}/\%$	所需时间/s	$\rho_{\min}/(mg \cdot m^{-3})$	所需时间/s
S1	0	19.1	275	1	277	357	277
	0.6	20.48	205	0.3	171	189	207
	1.2	20.28	365	0.4	265	61	213
S2	0	20.57	463	0.3	371	131	465
	0.6	20.79	201	0.2	201	161	205
	1.2	20.67	267	0.2	265	122	265

注: φ_{\min} 为最小体积分数; ρ_{\min} 为最小质量浓度.

综上分析,XPS 燃烧速率随着风速的增加呈现先增大后减小的变化趋势.当风速较小时,自然或机械通风会显著增加 XPS 燃烧环境中的氧气浓度,化学效应对 XPS 燃烧过程起主导作用,促进氧化反应进行,使其燃烧速率逐渐增大;随着风速增加,燃烧区域的热量损失增加,热效应对 XPS 燃烧的抑制作用越来越显著,使其燃烧速率逐渐下降.

3 结 论

1) 随着通风风速的增加,XPS 表面火焰蔓延速度逐渐加快,XPS 从被引燃到出现结焦效应的时间间隔逐渐减小.

2) 当通风风速和火源位置相同时,XPS 引燃时间与火源距离近似线性相关;随着火源距离的增加,XPS 的升温速度及最高温度逐渐下降.当风速为 0.6 m/s 时,XPS 的引燃最大距离为 0.20 m;当风速为 1.2 m/s 时,XPS 的引燃最大距离为 0.15 m.

3) 当火源距离相同时,火源垂直墙面条件下 XPS 引燃时间小于垂直墙角工况,且随着风速的增加,不同火源位置条件下 XPS 引燃时间差异显著.

4) XPS 燃烧速率随着风速的增加呈现先增大后减小的变化趋势.当风速较小时,化学效应对 XPS 燃烧起主导促进作用;随着风速的增加,热效应对燃烧的抑制作用显著增强.

参考文献:

- [1] Rad E A, Fallahi E. Optimizing the insulation thickness of external wall by a novel 3E (energy, environmental, economic) method [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 205: 196 – 212.
- [2] Yu M M, Zhu G Q, Meng Q X. Experimental study and analysis of XPS vertical countercurrent fire spread [J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 945 – 953.
- [3] Leisted R R, Sørensen M X, Jomaas G. Experimental study on the influence of different thermal insulation materials on the fire dynamics in a reduced-scale enclosure [J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 93: 114 – 125.
- [4] Mehta S, Biederman S, Shivkumar S. Thermal degradation of foamed polystyrene [J]. *Journal of Materials Science*, 1995, 30(11): 2944 – 2949.
- [5] Tsai K C. Orientation effect on cone calorimeter test results to assess fire hazard of materials [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2): 763 – 772.
- [6] Huang Y, Li Y. Experimental and theoretical research on the fire safety of a building insulation material via the ignition process study [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2018, 12: 77 – 84.
- [7] 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.
- [8] Wu K K, Fan W F, Chen C H, et al. Downward flame spread over a thick PMMA slab in an opposed flow environment: experiment and modeling [J]. *Combustion & Flame*, 2003, 132(4): 697 – 707.
- [9] Tewarson A. Heat release rates from samples of polymethylmethacrylate and polystyrene burning in normal air [J]. *Fire & Materials*, 1976, 1(3): 90 – 96.
- [10] Huang X, Zhao J, Tang G, et al. Effects of altitude and inclination on the flame structure over the insulation material PS based on heat and mass transfer [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 90: 1046 – 1055.