

不同放置角度的建筑装饰材料 PMMA 的火焰蔓延特性

黄新杰^{1,2*}, 刘伟¹, 陈功建¹, 王纯洁¹, 唐刚¹, 张浩¹

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为揭示建筑装饰材料聚甲基丙烯酸甲酯(有机玻璃, PMMA)在不同放置角度下的火焰蔓延特性, 通过自主搭建的小尺寸火焰蔓延实验平台, 研究了宽 3 cm、厚 2 mm 的 PMMA 试样在不同放置角度下的火焰蔓延特性。结果表明, 放置角度对 PMMA 火焰蔓延过程中热解区域及预热区长度影响很大, 由 15°到 30°及由 -60°到 -75°时(顺流火焰蔓延时放置角度为正, 逆流火焰蔓延时放置角度为负), 平均火焰倾角增加幅度最大。顺流火焰蔓延的火焰长度随放置角度增加先略减小后逐渐增加, 逆流火焰蔓延的火焰长度随放置角度的绝对值增加而略减小。放置角度由 0°到 15°时, 顺流火焰蔓延的平均速度呈跃变增长, 逆流火焰蔓延的平均速度随放置角度绝对值增加而略降低。

关键词: 有机玻璃; 放置角度; 顺流火焰蔓延; 逆流火焰蔓延; 火焰蔓延速度

中图分类号: TQ325.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)03-0454-07

Flame Spread Characteristics over Building Decoration Material of PMMA with Different Placed Angles

Xinjie HUANG^{1,2*}, Wei LIU¹, Gongjian CHEN¹, Chunjie WANG¹, Gang TANG¹, Hao ZHANG¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In order to reveal the effect of placed angle on flame spread characteristics over polymethyl methacrylate (PMMA), a small-scale flame spread setup was established and then a series of flame spread experiments on PMMA samples with width 3 cm, thick 2 mm and different placed angles were carried out. The results showed that the pyrolysis zone and preheating zone length were largely influenced by placed angle through infrared image analysis. The average flame angle increased greatly when the placed angle changed from 15° to 30° and from -60° to -75° (for upward flame spread, the placed angle is positive, and for downward flame spread, the placed angle is negative). Meanwhile, for upward flame spread, the flame length decreased slowly and then increased with placed angle, however, for downward flame spread, the flame length decreased slightly with the absolute value of the placed angle. As for the upward flame spread, when the placed angle changed from 0° to 15°, the average flame spread speed will increase greatly. And for the downward flame spread, the average flame spread speed decreased slightly with the absolute value of the placed angle.

Key words: polymethyl methacrylate; placed angle; upward flame spread; downward flame spread; flame spread speed

1 前言

聚甲基丙烯酸甲酯(有机玻璃, PMMA)因具有较好的透明性、化学稳定性、力学性能、耐候性、易染色、易加工和外观优美等优点广泛应用于商业、建筑、轻工化工等领域, 如街头标志、广告灯箱、电话亭和透明屋顶等。但 PMMA 树脂耐火性差, 燃烧时易放出可

燃、易爆、刺激性气体并引发火灾。实际使用 PMMA 常涉及不同的角度, 如透明屋顶的坡度、门窗和采光体等。因而研究不同放置角度的 PMMA 的火焰蔓延特性具有很大的现实意义, 国内外学者^[1-7]对此也进行了一些研究。Quintiere^[1]研究了 PMMA 放置角度对其火焰蔓延速率的影响, 通过理论分析发现火焰蔓延速度为试样放置角度、火焰传播方向和材料属性的函数。

收稿日期: 2017-08-15, 修回日期: 2017-11-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(编号: 2012CB719700); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51206002); 火灾科学国家重点实验室开放课题(编号: HZ2012-KF04); 安徽省自然科学基金青年基金资助项目(编号: 1608085QE113)

作者简介: 黄新杰(1981-), 男, 安徽省合肥市人, 博士, 副教授, 主要从事材料燃烧性能研究, E-mail: hxj501@mail.ustc.edu.cn.

引用格式: 黄新杰, 刘伟, 陈功建, 等. 不同放置角度的建筑装饰材料 PMMA 的火焰蔓延特性. 过程工程学报, 2018, 18(3): 454-460.
Huang X J, Liu W, Chen G J, et al. Flame Spread Characteristics over Building Decoration Material of PMMA with Different Incline Angles (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 454-460, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217298.

Dupuy 等^[2]考察了辐射和对流传热对不同角度放置的材料火焰传播的影响. Ito 等^[3]运用全息干涉技术测量了不同放置角度的 PMMA 火焰蔓延时火焰前锋处温度的分布. Liang 等^[4]揭示了不同海拔高度对 PMMA 材料火焰垂直向上蔓延的影响. Ayani 等^[5]探讨了 PMMA 火焰向下蔓延的机制, 发现火焰蔓延速度随材料厚度增加趋于恒定. 陈潇^[6]研究了 PMMA 不同表面朝向及放置角度下, 侧向火焰蔓延的特性. Gollner 等^[7]研究了 PMMA 在不同放置角度下火焰蔓延速度和质量损失速率, 发现最大火焰蔓延速度为垂直方向, 但此时质量损失速率却不是最大. 针对不同放置角度下 PMMA 材料火焰蔓延的研究大多集中在火焰蔓延速度及火焰蔓延过程的传热机理, 对燃烧过程中火焰结构形态, 如火焰高度、火焰长度、火焰角度等研究较少, 目前仅有几篇相关的报道^[8-10]. 火焰结构形态对揭示燃烧机理及传热传质等具有重要的指导意义, 因此有必要进行研究. 此外, 火焰蔓延过程中角度与质量损失速率的关系尚需深入研究.

本工作对宽 3 cm、厚 2 mm、不同放置角度的 PMMA 进行小尺寸火焰蔓延实验, 揭示了火焰结构形态及燃烧特性参数, 如火焰倾角、火焰长度、火焰蔓延速度、质量损失速率等的变化规律, 对装饰性材料消防设计及火灾事故调查均有一定的指导意义.

2 实验

2.1 实验材料及分析仪器

PMMA(南昌国际工业有限公司), 无色透明材料(透明度大于 92%), 密度 1180 kg/m³, 宽 3 cm, 厚 2 mm, 长 50 cm, 属于热薄型材料^[11], 易燃烧, 有限氧指数为 17.3, 燃烧时易产生甲醛、CO 等有毒有害物质. 铝箔(合肥泰翔包装材料有限公司), 厚度 0.15 mm. 热电偶(R 型和 K 型, 合肥科博教学用品有限公司), DL750 数据采集仪(日本横河数字示波器有限公司), Ti450 红外热像仪[福祿克测试仪器(上海)有限公司], SL40000 电子天平(安徽省科学器材有限责任公司).

2.2 实验方法

在小尺寸火焰蔓延实验台中进行实验, 研究不同放置角度对 PMMA 燃烧特性的影响. 实验台如图 1 所示, 包括 K 型和 R 型热电偶、电子天平、热流计、数据采集仪、摄像机、红外摄像机、石膏板、旋转支架及电脑等装置. 实验过程中使用火焰机气点火装置对 PMMA 进行末端点火, 用摄像机拍摄整个火焰蔓延过程, 用红外热像仪分析 PMMA 及火焰的温度分布, 用电子天平记录火焰蔓延过程中 PMMA 的质量变化.

PMMA 背面贴有厚 0.15 mm 的铝箔, 起隔热和防止流淌滴落的作用. 试样置于厚 1 cm 的石膏板上, 放置角度为 0°, ±15°, ±30°, ±45°, ±60°, ±75°和±90°(角度为正表示火焰顺流蔓延, 角度为负表示火焰逆流蔓延). 试样上表面每隔 2 cm 画一组平行线, 记录不同时刻热解前锋位置. 在试样下表面粘贴长 5 cm 的双面胶, 防止试样从石膏板面滑落. 实验重复 2 次以降低实验误差.

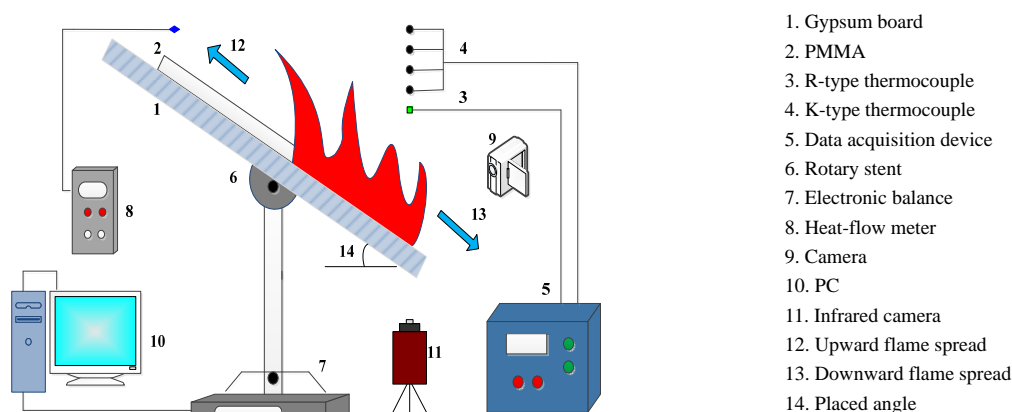


图 1 PMMA 火焰蔓延实验台示意图

Fig.1 Schematic of experiment table of flame spread of PMMA

3 结果与讨论

3.1 火焰形态

图 2 为 PMMA 在不同放置角度下的火焰形状. 可以发现, 对于顺流火焰(放置角度为正), 随材料放置角

度增加, 火焰蔓延速度增大, 热解区域长度明显增长, 火焰燃烧更剧烈. 放置角度为 45°时, 火焰出现了明显的湍流现象, 火焰上下跳动剧烈, 且产生了间歇性火焰区域, 即火焰羽流现象. 放置角度为 60°时, 开始出现熔融滴落现象. 这主要是由于 PMMA 材料属于热塑性

材料, 燃烧过程中发生了相变, 熔融的 PMMA 在重力作用下向下流淌. 当逆流火焰蔓延(材料放置角度为负)时, 随放置角度绝对值增大(即放置角度由 -15° 到 -90°), 火焰蔓延得越来越慢.

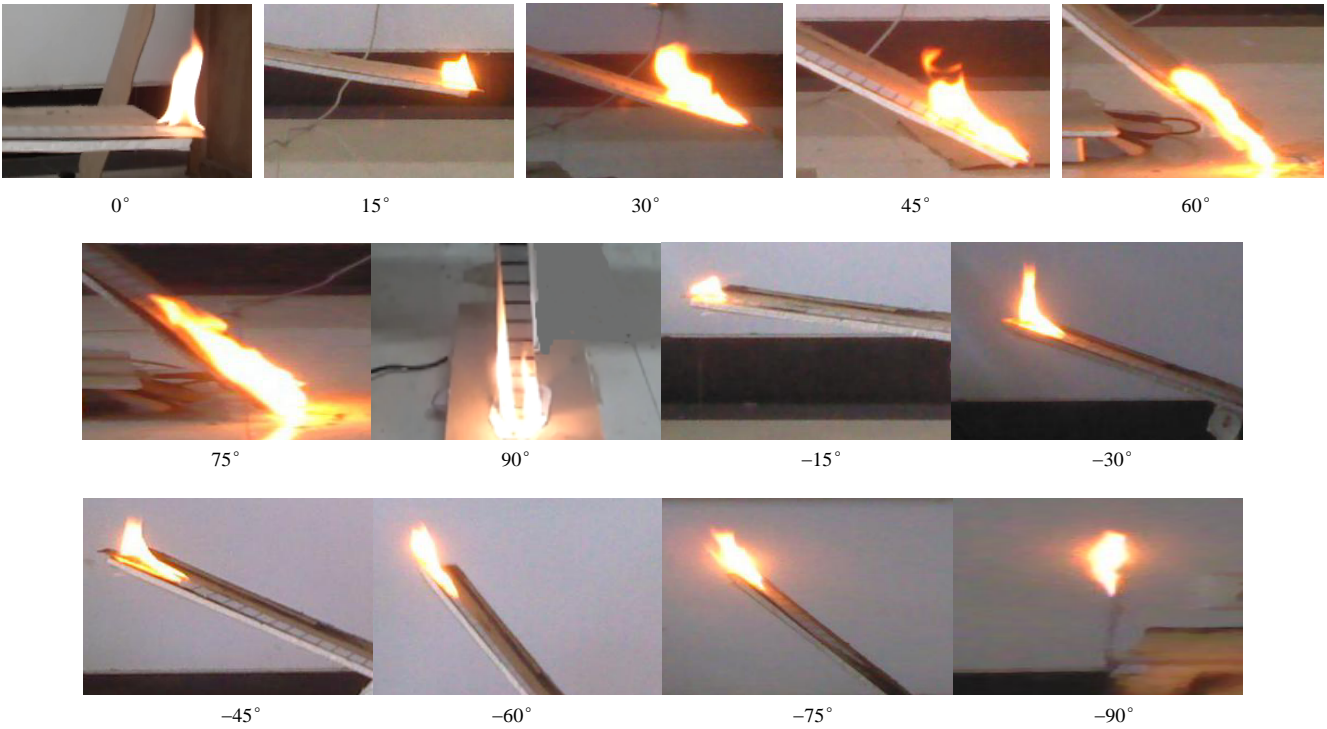


图 2 不同放置角度下 PMMA 火焰形状
Fig.2 Flame shape of PMMA with different placed angles

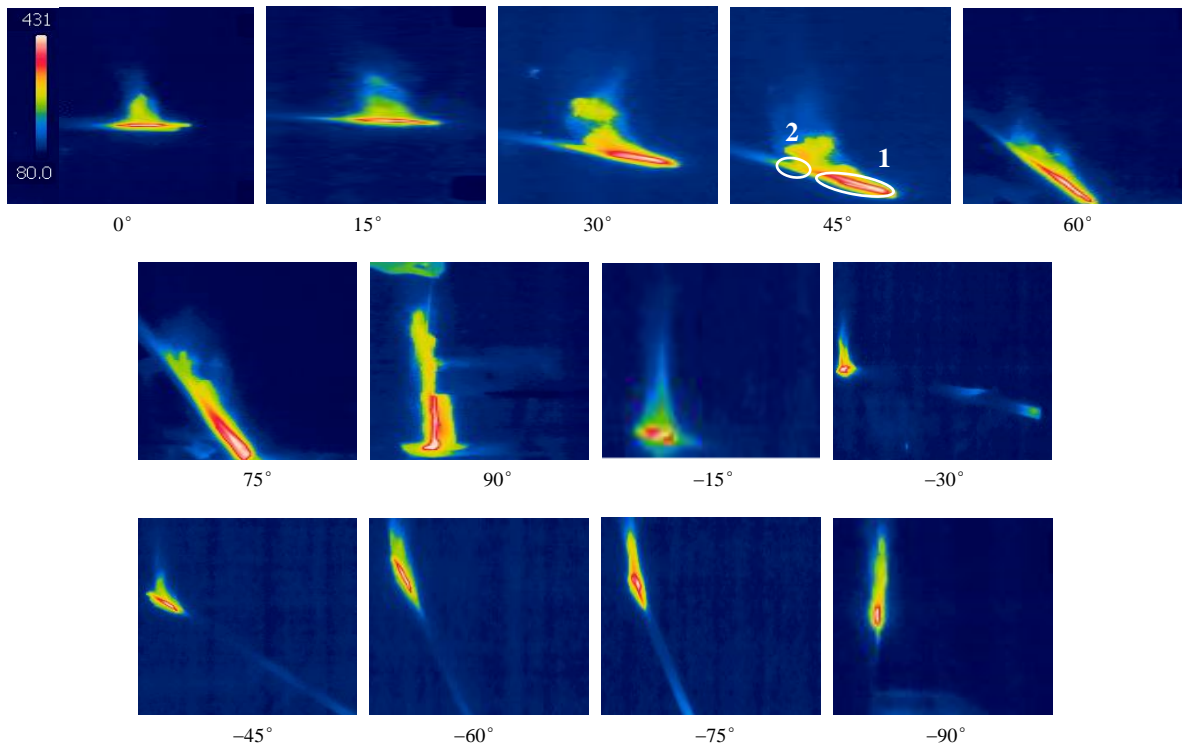


图 3 不同放置角度下 PMMA 试样火焰红外热像图
Fig.3 Infrared image of PMMA with different placed angles

图 3 为 PMMA 在不同放置角度下火焰蔓延侧面红外热像图. 可以看出, 在顺流火焰蔓延过程中, 随放置角度增加, 红外热像图中的红色区域(如 45°图中 1 所示)面积明显增加, 表明材料的热解区域(热解温度约 400℃ 以上形成的区域)面积增加, 使火焰蔓延更易进行. 同时, 随放置角度增加, 材料的预热区(45°图中 2 所示, 温度由约 200℃ 到 400℃ 的区域)长度逐渐增加. 当材料放置角度 $\theta=90^\circ$ 时, 预热区长度甚至长于热解区长度, 此时材料燃烧非常剧烈, 火焰蔓延速度非常大. 当 PMMA 材料火焰逆流蔓延时, 随放置角度绝对值(即放置角度由 -15° 到 -90°)增加, 其热解区域面积及预热区长度出现了相反的特点. 因此, 放置角度绝对值越大, 热

解区域面积越小, 同时预热区长度越小, 火焰蔓延速度越小.

3.2 火焰倾角

PMMA 在不同放置角度下燃烧的火焰结构如图 4 所示, 标注了材料的热解区(材料受热发生分解反应的区域) P 、火焰长度 L (表面火焰区火焰底部到火焰前端的距离)、火焰高度 H (火焰长度相对于材料表面的垂直距离)、材料的放置角度 θ 和火焰的倾角 α (火焰蔓延过程中火焰与材料表面形成的角度)等参数. 通过图 4 可很好地分析顺流和逆流火焰特性参数的变化, 更有效地揭示火蔓延过程中的传热传质等问题.

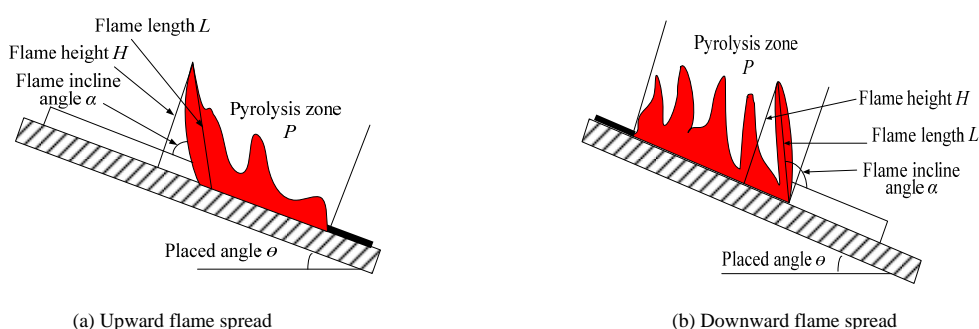


图 4 PMMA 火焰结构示意图

Fig.4 Schematic of flame structure of PMMA

图 5 为不放置角度下 PMMA 试样平均火焰倾角 α 的变化. 可以看出, 火焰顺流蔓延时, 随放置角度增加, 平均火焰倾角逐渐减小, 燃烧区火焰越来越贴近试样表面, 且放置角度为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 时火焰倾角变化幅度最大. 这是因为随试样放置角度增加, 火焰蔓延加剧, 试样上方空气卷吸作用越来越剧烈, 同时热解气体受到浮力的影响更贴近试样表面. 与此同时, 火焰逆流蔓延时, 放置角度绝对值增大, 火焰倾角逐渐增加, 在 $-60^\circ \sim -75^\circ$ 时

火焰倾角增加幅度最大. 放置角度为 -90° 时, 火焰倾角近似为 180° , 此时火焰对预热区的传热最小.

3.3 火焰长度

图 6 为不同放置角度下 PMMA 的火焰瞬时长及平均长度. 可以看出, 不同试样放置角度下, 在燃烧初始阶段火焰长度较小, 且有一个逐渐发展的过程. 随燃烧持续及火焰蔓延, 火焰长度趋于稳定并上下波动. 对于顺流火焰蔓延, 放置角度在 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 和 90° 时, 火焰平均长度分别为 6.7254, 6.3250, 6.1540, 8.4017, 8.5039, 8.5771 和 12.4389 cm, 随放置角度增加先略减小后逐渐增加. 这主要是由于放置角度越大, 火焰蔓延速度越大, 热解区域长度及预热区长度均增加, 使火焰燃烧剧烈程度增加, 火焰长度越来越长. 对于逆流火焰蔓延, 放置角度为 $-15^\circ, -30^\circ, -45^\circ, -60^\circ, -75^\circ$ 和 -90° 时, 火焰平均长度分别为 6.2255, 5.7795, 5.0957, 4.9394, 4.3862 和 2.4812 cm, 随放置角度绝对值增加逐渐减小. 这主要是由于逆流情况下, 随放置角度绝对值增加, 火焰蔓延过程中热量传递较少, 火焰蔓延受到一定抑制, 限制了火焰长度增长. 不难看出, 当放置角度由 $\pm 75^\circ$ 到 $\pm 90^\circ$ 时, 火焰长度变化最大. 这主要由于 $\pm 90^\circ$ 时火焰蔓延最充分和最受限制, 很大程度上影响了火焰

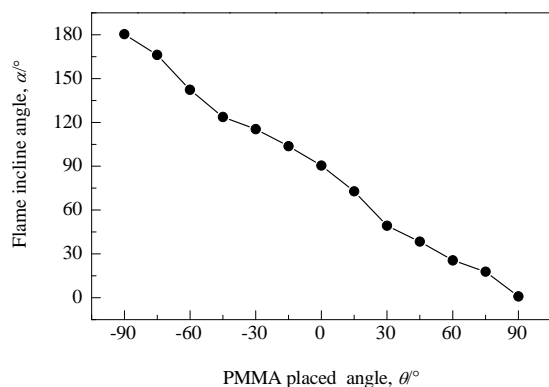


图 5 不同放置角度下 PMMA 火焰的蔓延倾角

Fig.5 Flame incline angle of PMMA with different placed angles

长度.

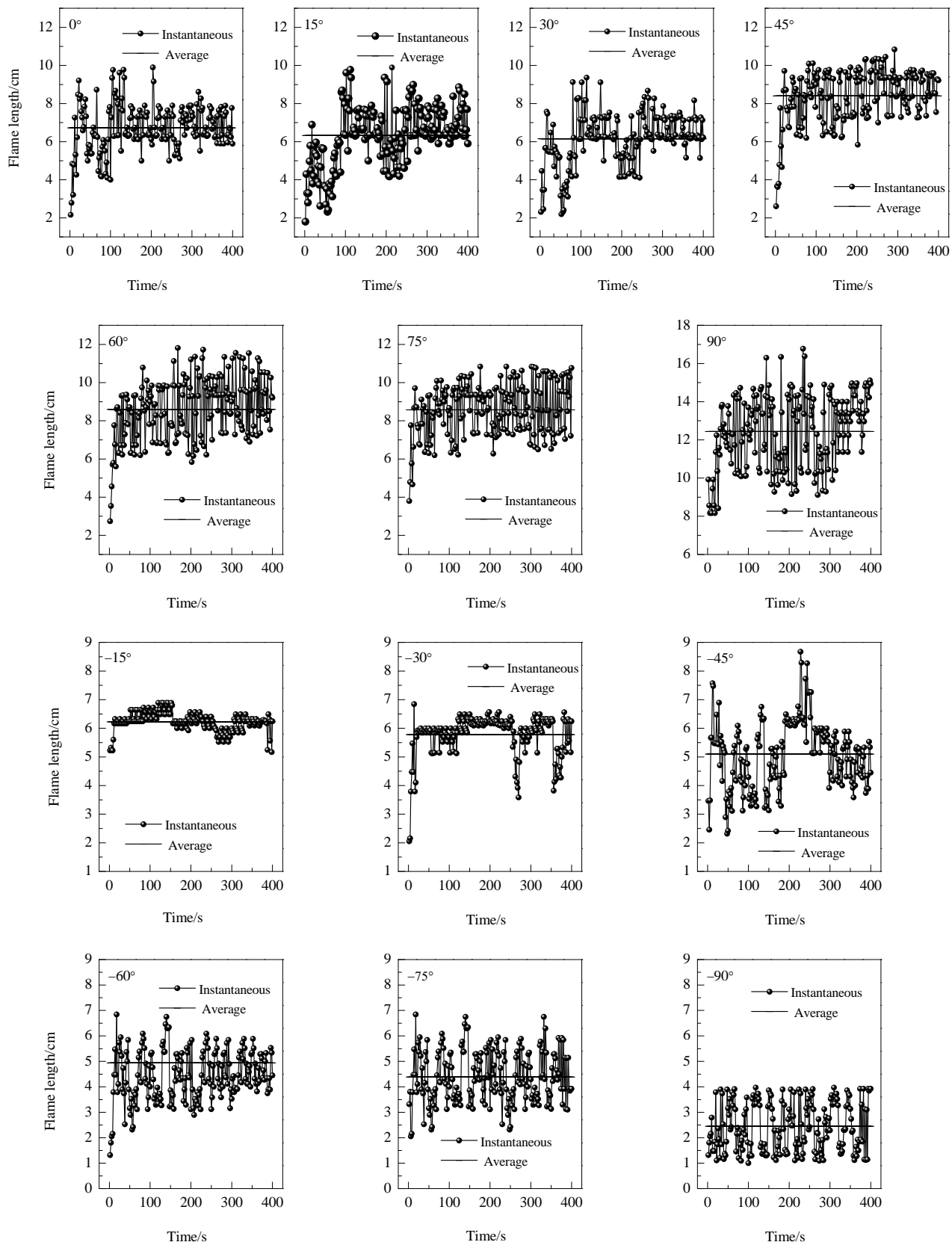


图6 不同放置角度下 PMMA 试样的火焰长度
Fig.6 Flame length of PMMA with different placed angles

3.4 火焰蔓延速度

图 7 为不同放置角度下 PMMA 试样燃烧的平均火焰蔓延速度. 可以发现, 随材料放置角度增加, 平均火焰蔓延速度逐渐增大. Chen 等^[9]的研究发现, 火焰蔓延速度与放置角度成正比, 与本工作的结果一致. 在顺流火焰蔓延时, 平均火焰蔓延速度变化不大. 放置角度由水平角度到 15° 时, 火焰蔓延速度有很大的跃升, 角度效应非常明显, 与 Drysdale 等^[12]的结论基本吻合,

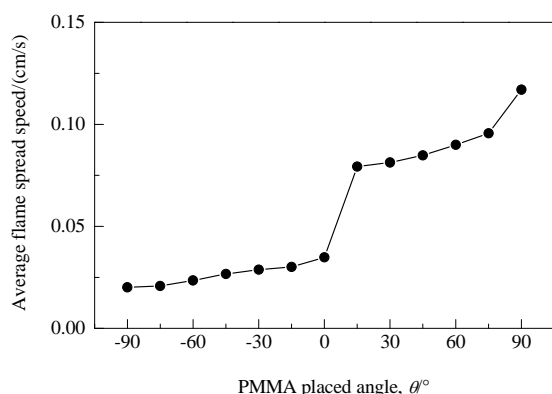
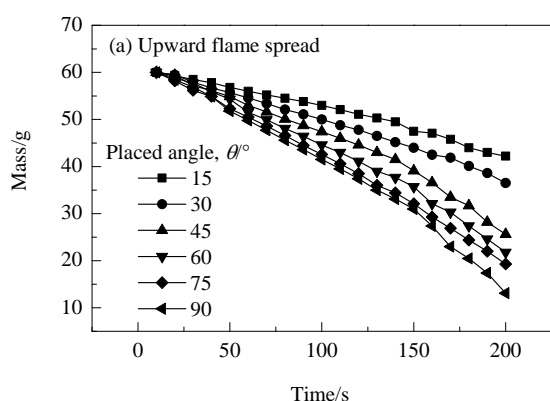


图 7 不同放置角度下 PMMA 平均火焰蔓延速度
Fig.7 Average flame spread speed of PMMA with different placed angles



但角度略偏小, 这可能是由于本实验统计的为平均火焰蔓延速度, 有别于火焰蔓延速度加速的情况. 放置角度由 75° 到 90° 时, 火焰蔓延速度变化也较大, 这主要是由于火焰蔓延过程中, 贴壁效应非常明显, 使火焰蔓延速度达到了最大值, 因而火焰蔓延速度变化较大. 逆流火焰蔓延过程中, 随放置角度绝对值增加, 火焰蔓延速度略减小, 这是角度效应对逆流火焰蔓延的影响相对较弱所致.

3.5 质量损失速率

图 8 为不同放置角度下火焰蔓延过程中 PMMA 质量随时间的变化. 可以看出, 无论是顺流火焰蔓延还是逆流火焰蔓延, 随放置角度增加, 材料质量损失速率越来越快. 初始阶段试样燃烧相对稳定, 各曲线斜率保持不变(质量损失速率恒定), 随火焰蔓延, 曲线斜率逐渐增大. 从放置角度 45° 开始, 顺流火焰蔓延斜率增加尤为明显. 这是因为随放置角度增加, 火焰燃烧区长度增加, 导致燃烧面积和火焰长度增加, 使质量损失速率增大. 放置角度为 -75° 和 -90° 时, 逆流火焰蔓延质量损失较接近. 这主要是由于放置角度为 -90° 时, PMMA 流淌滴落明显, 促使火焰蔓延, 使 PMMA 在放置角度为 -75° 和 -90° 时质量损失较接近.

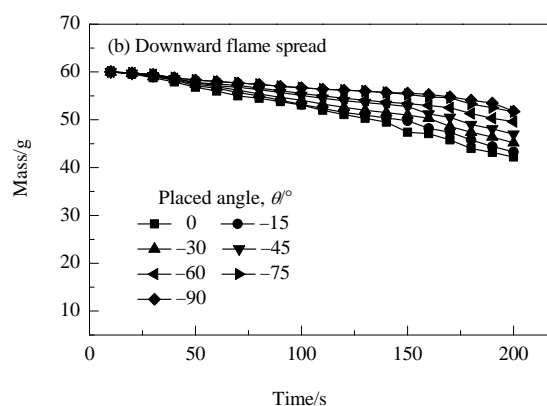


图 8 不同放置角度下 PMMA 试样质量随时间的变化
Fig.8 Mass change of PMMA with time under different placed angles

4 结论

研究了宽 3 cm、厚 2 mm 的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 在不同放置角度下的火焰蔓延特性, 分析了火焰倾角、火焰长度、火焰蔓延速度和质量损失速率等参数的变化规律, 得到如下结论:

(1) 顺流火焰蔓延(放置角度为正)时, 随放置角度增加, 平均火焰倾角逐渐减小, 且在放置角度 $15^\circ \sim 30^\circ$ 时火焰倾角变化最大; 逆流火焰蔓延(放置角度为负)时, 随放置角度绝对值增大, 火焰倾角逐渐增加, 在放置角

度 $-60^\circ \sim -75^\circ$ 时火焰倾角增加最大.

(2) 顺流火焰蔓延时, 随放置角度增加, 火焰平均长度先略减小后又逐渐增加; 逆流火焰蔓延时, 火焰长度随放置角度绝对值增加而略减小. 在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 及 $-75^\circ \sim -90^\circ$ 时, 火焰长度变化最大.

(3) 顺流火焰蔓延过程中, 放置角度由 0° 到 15° 时火焰蔓延速度增长较大, 角度效应较明显. 逆流火焰蔓延过程中, 随放置角度绝对值增加, 火焰蔓延速度略减小.

参考文献:

- [1] Quintiere J G. The Effects of Angular Orientation on Flame Spread over Thin Materials [J]. *Fire Saf. J.*, 2001, 36(3): 291–312.
- [2] Dupuy J L, Maréchal J. Slope Effect on Laboratory Fire Spread: Contribution of Radiation and Convection to Fuel Bed Preheating [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2011, 20(2): 289–307.
- [3] Ito A, Kashiwagi T. Characterization of Flame Spread over PMMA Using Holographic Interferometry Sample Orientation Effects [J]. *Combust. Flame*, 1988, 71(2): 189–204.
- [4] Liang C J, Cheng X D, Yang H, et al. Experimental Study of Vertically Upward Flame Spread over Polymethyl Methacrylate Slabs at Different Altitudes [J]. *Fire Mater.*, 2016, 40(3): 472–481.
- [5] Ayani M B, Esfahani J A, Mehrabian R. Downward Flame Spread over PMMA Sheets in Quiescent Air: Experimental and Theoretical Studies [J]. *Fire Saf. J.*, 2006, 41(2): 164–169.
- [6] 陈潇. 表面朝向对典型固体可燃物着火特性及侧向火焰蔓延的影响研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 76–80.
- Chen X. Effects of Angular Orientation on Piloted Ignition and Lateral Flame Spread of Typical Solid Combustibles [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 76–80.
- [7] Gollner M J, Huang X, Cobian J, et al. Experimental Study of Upward Flame Spread of an Inclined Fuel Surface [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2013, 34(2): 2531–2538.
- [8] 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(methyl methacrylate) [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33(7): 88–93.
- [9] Chen X, Liu J H, Zhou Z H, et al. Experimental and Theoretical Analysis on Lateral Flame Spread over Inclined PMMA Surface [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2015, 91: 68–76.
- [10] Jiang L, He J J, Sun J H. Sample Width and Thickness Effects on Upward Flame Spread over PMMA Surface [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2018, 342: 114–120.
- [11] 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]. *Proc. Combust. Inst.*, 2017, 36(2): 2987–2994.
- [12] Drysdale D D, Macmillan A J R. Flame Spread on Inclined Surfaces [J]. *Fire Saf. J.*, 1992, 18(3): 245–254.