

微重力和常重力环境中柱状固体材料表面 火焰传播实验研究

吴传嘉^{1,2} 朱凤^{1,2} 王双峰^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 在微重力和常重力环境中, 对不同氧气浓度下柱状聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 表面火焰传播现象进行了实验研究。微重力实验观测了低速强迫对流中的火焰传播, 地面实验研究了浮力对流影响下火焰向下传播的规律, 分析了氧气浓度与流动对火焰传播的影响。微重力和常重力下的火焰在形态和传播速度上具有显著区别。结合微重力和常重力的实验结果, 将火焰传播速度随气流速度的变化关系分为三个区: 辐射控制区, 传热控制区和化学反应控制区。

关键词 火焰传播; 柱状固体材料; 微重力; 浮力对流

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2019)11-2672-06

Experimental Study on Flame Spread Over Cylindrical Solid Fuels in Micro and Normal-Gravity Environments

WU Chuan-Jia^{1,2} ZHU Feng^{1,2} WANG Shuang-Feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Flame spread phenomena over a cylindrical polymethyl methacrylate (PMMA) at different oxygen concentrations have been experimentally studied under microgravity and normal gravity conditions. In microgravity experiments flame spread in low-speed forced flows was observed, and in normal gravity experiments downward flame spread behaviors in buoyancy-induced flows were investigated. The effects of oxygen concentration and flow velocity on flame spread were analyzed. The flame appearance and spread rate show significant differences in microgravity and normal gravity. Combining the results from the two sets of experiments, three distinct regimes are identified to delineate the variation of flame spread rate with gas flow velocity, namely microgravity radiation regime, heat transfer regime and chemical kinetics regime.

Key words flame spread; cylindrical solid fuel; microgravity; buoyant convection

0 引 言

固体材料表面的火焰传播是一个非常复杂的过程, 会受到试样形状、环境氧气浓度、气流速度、重力等因素的影响^[1-5]。关于平板材料已经做了大量的研究, 发现无论是热薄还是热厚材料, 火焰传播速度随气流速度变化关系都可以分成三个区域^[1,6]。

关于圆柱形材料, Fernandez-Pello 等^[7]在空气环境下, 针对不同直径 ($d=25.4$ mm, 6.4 mm, 1.6 mm) 的 PMMA 开展实验, 获得了不同气流速度 ($2\sim 70$ cm·s⁻¹) 下的火焰逆风传播规律。发现气流

速度较低时, 火焰传播速度不变; 继续增大气流速度, 火焰传播速度会随着气流速度增加而减小。Sibulkjn 和 Lee^[8]研究了试样与水平方向成不同角度 ($\theta=-90^\circ\sim+40^\circ$) 时的火焰传播速度, 并建立理论模型得到了火焰前锋热流量的分布。李先庭等^[9]建立了逆风情况下火焰沿柱状燃料传播的数学模型, 并预测了火焰传播速度和火焰结构。Delichatsios 等^[10]分析了板状与柱状 PMMA 燃烧现象的差异, 得到了柱状材料火焰传播速度表达式, 并和数

收稿日期: 2019-02-22; **修订日期:** 2019-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1738117); 中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助项目 (No.XDA04020410; No.XDA04020202-10)

作者简介: 吴传嘉 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体材料燃烧方面的研究。 **通信作者:** 王双峰, 研究员, 博士, Email: sfwang@imech.ac.cn.

值解做了对比。发现柱状 PMMA 因其本身曲率的存在, 在相同的环境条件下, 火焰传播速度大于平板 PMMA 表面的火焰传播速度。

由于重力的存在, 在地面实验中燃烧过程会受到浮力对流的影响, 难以观测低速流动 ($\leq 20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 中的火焰传播现象。在微重力环境中, 几乎不存在浮力流动, 为观测低速流动下的燃烧过程提供了条件。由于落塔等设施的实验时间较短, 难以提供足够的时间来观测柱状材料表面的火焰传播情况。目前柱状材料在微重力低速流动环境下的火焰传播速度仅有 NASA 在国际空间站获得的实验数据^[11], 他们对低气流速度 ($0.4\sim 8 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 和低氧气体积分数 ($15\%\sim 21\%$) 下的柱状浇铸 PMMA (cast PMMA) 逆风火焰燃烧进行研究, 发现火焰传播速度随气流增大先增加后减小。目前, 针对柱状 PMMA 在低速气流流动和高氧气体积分数条件下的传播规律并不清楚。

本文在微重力和常重力环境下对柱状 PMMA 试样开展表面火焰传播实验。微重力实验利用实践十号 (SJ-10) 返回式科学实验卫星的实验设备, 对柱状挤压 PMMA (extruded PMMA) 在高氧气浓度下的燃烧开展实验研究, 获得了不同气流速度下的火焰传播速度。常重力环境中, 在不同氧气浓度和气流速度下, 对柱状 PMMA 开展了燃烧实验, 观测了火焰传播特性。结合 Link 等^[21] 在国际空间站开展实验获得的低速流动中的火焰传播速度, 总结了柱状 PMMA 表面火焰逆向传播的规律。

1 实验方法

1.1 微重力实验

为了在实践十号返回式科学实验卫星上开展微重力实验, 专门研制了名为“非金属燃烧箱”的实验装置。具体描述见文献 [12]、[13]。燃烧箱是一个密闭的实验舱, 舱内共有 8 个独立的实验段, 其中两个实验段用于观察柱状 PMMA 表面的火焰传播。该实验设备内部安装有压力传感器、氧气浓度传感器和热电偶, 用于测量实验舱内的压力、氧气浓度和温度的动态变化。同时, 研制了综合电控系统, 用于控制实验流程, 包括: 排出舱内气体, 充气以形成设定的实验条件 (压力和氧气浓度), 点燃试样, 记录点火、火焰传播和熄灭全过程等。详细实验步骤见文献 [13]。

实验材料选用柱状挤压 PMMA, 试样直径为 10 mm, 长 69 mm, 试样表面的中间具有一圈螺旋状的凹槽。试样两端固定在试样架上, 电热丝固定在试样

表面的凹槽中。点火时, 对电热丝的两端施加 28 V 的直流电, 点火功率约为 110 W。用一台彩色 CCD 摄像机从正面记录试样点燃、火焰传播和熄灭的过程, 记录帧率为 25 fps。实验工况如表 1 所示。

表 1 微重力实验参数

Table 1 Test conditions for the microgravity experiments

氧气体积分数/%	气流速度/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	持续时间/s
33.5	12	65
	9	35
	6	60
	0	>750
	12	80
49.4	9	50
	6	60
	0	>750
	12	80

1.2 地面常重力实验

地面实验系统主要包括实验装置主体、气体供给与控制系统、图像记录系统。实验装置主体主要由整流段和实验段两部分组成, 如图 1 所示。该装置是一个内径 90 mm, 外径 100 mm, 高 530 mm 的圆筒形通道。其中, 整流段高 130 mm, 内部填充蜂窝器和玻璃珠, 以形成稳定均匀的气流。实验段高 400 mm。为便于观察实验现象, 通道使用石英玻璃制作。在通道中心位置, 放置一根直径为 4 mm 的不锈钢支杆, 支杆的顶部有 10 mm 长的螺纹, 用于固定试样。试样底部距离整流段的高度约为 100 mm。气体供给与控制系统包括质量流量控制器 (Alicat Scientific, MC)、高压气瓶和连接管道。实验中使用的氧/氮混合气有五种, 氧气体积分数 X_{O_2} 分别为 18.1%、21.0%、24.9%、33.5%、49.4%, 均为提前配置的气体。实验段内气流平均速度 V_g 范围为 $2\sim 130 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。实验中使用一台 CMOS 摄像机 (PointGrey GS3-U3-41C6C-C) 对点火、火焰传播和熄灭过程进行记录, 记录帧率为 20 fps。

实验样品为直径 $d=10 \text{ mm}$ 的圆柱, 分别由浇铸聚甲基丙烯酸甲酯 (cast PMMA) 和挤压聚甲基丙烯酸甲酯 (extruded PMMA) 两种材料加工而成。为了减小对气流的干扰, 试样两端加工成半球型, 试样中间长度均为 64 mm。试样底部有一个螺纹孔, 以便于安装在试样支杆上。

实验步骤如下: 安装好实验试样之后, 启动气体供给与控制系统, 将流量计设定至预定流量, 并打开气瓶供气, 待实验段内气流稳定后, 点燃试样, 在现场观察记录的同时, 用 CMOS 摄像机记录火焰传播过程。当火焰传播至试样底部时, 关闭气体供

应系统,并用氮气进行灭火。

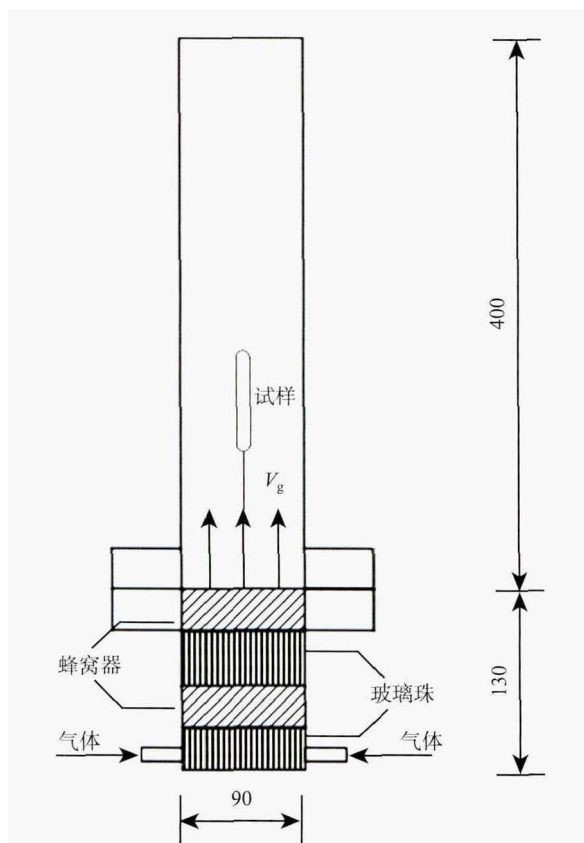


图 1 圆柱形流动通道示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic of the cylindrical flow tunnel (Unit: mm)

2 实验结果与讨论

2.1 火焰外观

图 2 是常重力与微重力情况下, $X_{O_2}=33.5\%$, 挤压 PMMA 试样在不同气流速度时的火焰图像。两种情况下, 火焰外观有着明显的区别。微重力情况下, 火焰长度较短, 宽度较大, 火焰整体呈蓝色, 火焰尾部敞开。重力情况下, 火焰前锋附近呈蓝色, 下游火焰为黄色, 火焰的尾部闭合。常重力下火焰长度较大, 宽度较小。比较来看, 微重力火焰宽度大约是常重力火焰宽度的两倍。火焰长度的差异是由于火焰诱导产生向上的浮力流动造成的。

Link 等^[1]在微重力实验中对浇铸 PMMA 进行了研究, 为了与他的结果进行对比, 本文也对浇铸 PMMA 进行了地面实验。对于浇铸 PMMA, 在燃烧过程中 PMMA 的顶端会形成一个热解的圆锥, 该热解锥被火焰包裹, 在燃烧过程中清晰可见。图 3 给出了 $X_{O_2}=24.9\%$ 时浇铸 PMMA 的火焰图像, 以及在燃烧结束后形成的热解锥的图像。实验发现, 热解锥长度随火焰传播速度的增加而增加。

尽管浇铸与挤压 PMMA 有相同的化学式, 但是其燃烧现象却并不相同。由于二者的聚合度不同^[8], 浇铸 PMMA 的热解区在燃烧过程中能够保持圆锥的形状, 而挤压 PMMA 在低氧气浓度 ($X_{O_2} \leq 21.0\%$) 燃烧时会出现滴落现象, 不能形成圆锥的形状。在高氧气浓度 ($X_{O_2}=33.5\%$, 49.4%) 时, 由于化学反应剧烈, 火焰沿试样表面迅速传播, 挤压 PMMA 并没有出现滴落现象。由于试样并没有被完全热解, 试样的长度没有明显变化。

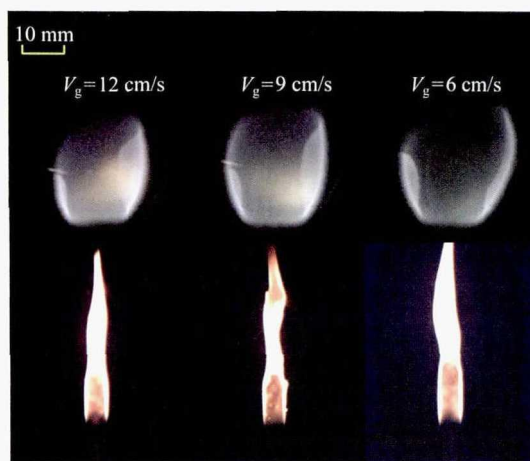


图 2 微重力 (上排) 与常重力 (下排) 的火焰外观 $X_{O_2}=33.5\%$, 挤压 PMMA

Fig. 2 Flame appearance in microgravity (above) and normal gravity (below), $X_{O_2}=33.5\%$, extruded PMMA

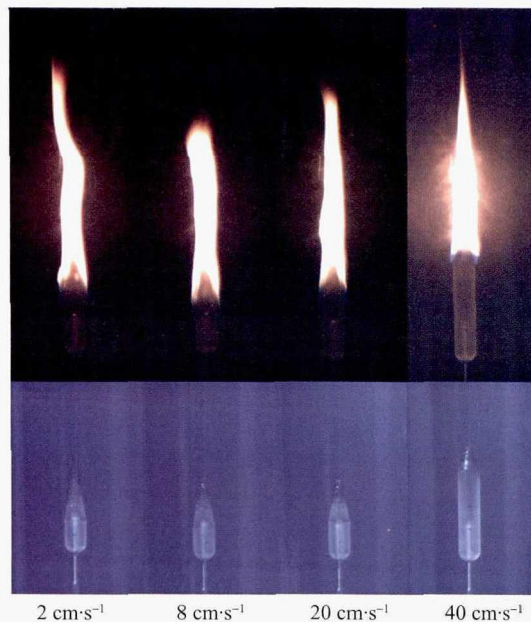
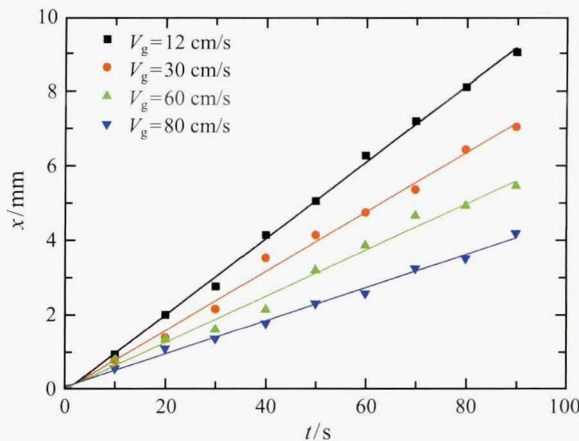


图 3 不同气流速度下浇铸 PMMA 的表面火焰和热解锥 $X_{O_2}=24.9\%$

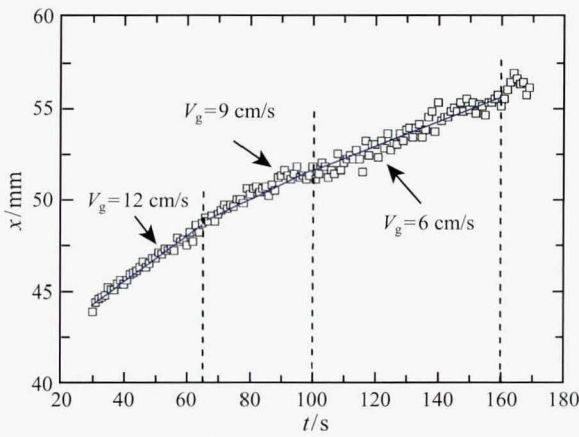
Fig. 3 Typical images of spreading flames over cast PMMA rod surface and pyrolysis cones under various flow velocities, $X_{O_2}=24.9\%$

2.2 火焰传播速度

根据记录的实验图像, 可以得到不同时刻火焰锋面的位置, 进而计算出火焰传播速度。作为典型示例, 图 4 给出了地面与微重力实验中, 浇铸 PMMA 与挤压 PMMA 在不同气流速度时火焰锋面的相对位置。从图中可以看出, 随着时间的增加, 所有火焰均稳定传播, 火焰锋面的位置与时间之间存在很好的线性关系, 即在一定的气流环境中, 火焰以稳定的速度传播。通过计算拟合直线的斜率, 就可以得到火焰传播速度。



(a) 常重力 ($X_{O_2}=21.0\%$, 浇铸 PMMA)
(a) Normal gravity ($X_{O_2}=21.0\%$, cast PMMA)



(b) 微重力 ($X_{O_2}=33.5\%$, 挤压 PMMA)
(b) Microgravity ($X_{O_2}=33.5\%$, extruded PMMA)

图 4 火焰前锋相对位置随时间的变化

Fig. 4 Position of flame leading edge as a function of time

图 5 给出了地面实验中不同氧气浓度下火焰传播速度随气流速度的变化。在常重力环境下, 当氧气浓度低于 18% 时, 固体材料表面火焰不能维持传播^[11]。从图 5(a) 可以看出, $X_{O_2}=18.1\%$ 时, 火焰传播速度随着气流速度的增加而减小, 直至熄灭; $21.0\% \leq X_{O_2} \leq 24.9\%$ 时, 在 $V_g < 20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的

范围, 火焰传播速度基本不随气流速度的增加而发生变化, 当 $V_g > 20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 火焰传播速度随着气流速度的增加而减小。已有的研究表明^[14], 在自然对流条件下, 浮力流动的速度大约为 $25 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当外加的强迫气流速度较小时, 浮力对流速度远大于强迫对流速度^[15], 对火焰传播起主导作用。随着气流速度进一步增加, 火焰的停留时间缩短, 成为限制火焰传播的主要因素。当停留时间与化学反应时间相当, 即 Da 数很小时, 气相化学反应速率成为影响火焰传播的主导因素, 在这个阶段火焰传播是受到化学反应速率控制的。

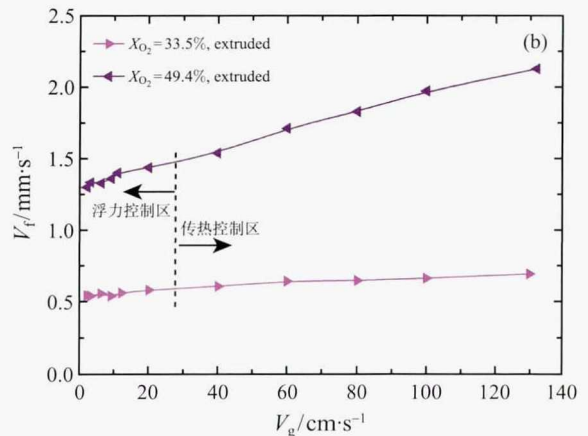
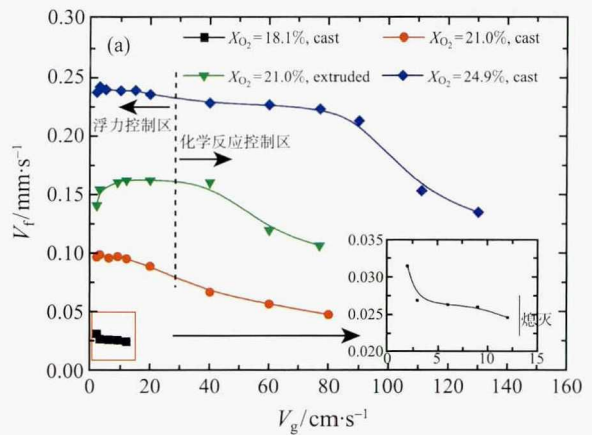


图 5 地面实验中不同氧气浓度下火焰传播速度随气流速度的变化

Fig. 5 Flame spread rates at different oxygen concentrations as a function of flow velocity in normal gravity

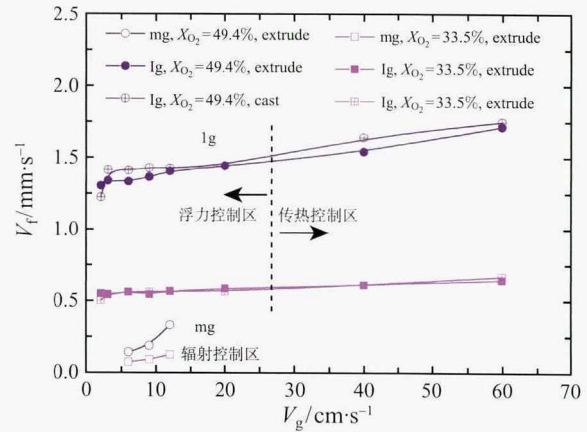
当强迫流动的速度适中, 并且氧气供给充足时, 化学反应速率可以认为无限快, 此时气相传热主导火焰传播过程。在这个区域内, de Ris^[16] 建立了热厚材料表面火焰传播的传热控制理论, 理论分析表明火焰传播速度随着气流速度增加而增加。图 5(b) 给出了氧气浓度为 33.5% 和 49.4% 时, 火焰传播速度随气流速度的变化。在实验测试的气流速度范围

内 ($20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1} < V_g < 130 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$), 火焰传播速度随着气流速度的增加呈线性增加的趋势, 与 de Ris [16] 的理论预测接近。如果气流速度能够继续增加, 火焰停留时间逐渐减小, 当有限快化学反应速率不能忽略时, 火焰传播速度将随气流速度的增加而下降直至吹熄。

此外, 图 5(a) 中比较了氧气浓度为 21% 时, 浇铸 PMMA 和挤压 PMMA 试样表面火焰传播速度随气流速度的变化。随着气流速度增加, 两种试样的火焰传播速度表现出相似的变化规律。相比较而言, 在相同气流速度下, 火焰在挤压 PMMA 表面的传播更快, 而且挤压 PMMA 火焰传播速度开始降低时对应的气流速度更大。这种区别是由挤压 PMMA 燃烧时的滴落现象引起的, 在重力影响下, 液滴从试样热解区滴落, 促进了火焰向下传播。

在微重力低速流动环境下, 火焰传播速度表现出与地面实验不同的特点。图 6(a) 给出了极限氧气浓度附近浇铸 PMMA 火焰传播速度随气流速度的变化。当 $X_{O_2} \leq 21\%$ 时, 在微重力低速流动区, 火焰传播速度随着气流速度的增加而增加。图 6(b) 给出了挤压 PMMA 在微重力高氧气浓度 ($X_{O_2} = 33.5\%$, 49.4%) 环境下的火焰传播速度。可以看出, 氧气浓度增大后, 火焰传播速度仍然随气流速度的增加而增加。由于没有浮力对流的影响, 微重力实验能够反映低速流动下的火焰传播特性; 地面实验中, 当强迫气流的速度远大于浮力流动速度时, 浮力的影响可以忽略, 实验结果可以反映高速流动下的火焰传播特性。

图 6(b) 的实验结果表明, 与地面中速流动区域 ($20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1} < V_g < 60 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 相比, 微重力低速流动中的火焰传播速度随强迫流动速度的变化更快。在低速流动条件下, 由于燃烧强度降低, 火焰向固体



(b) 远离极限氧气浓度

(b) Away from limiting oxygen concentration

图 6 微重力与常重力下火焰传播速度随气流速度的变化
Fig. 6 Variation of flame spread rates with flow velocities in microgravity and normal gravity

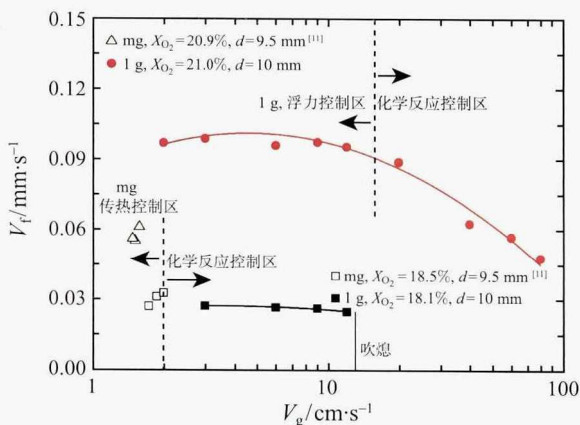
表面传导的热量减少, 固体表面的辐射热损失成为影响火焰传播的主要因素, 这个区域的火焰传播为辐射控制区。当气流速度小于临界气流速度时, 火焰熄灭, 这种熄灭现象称为冷熄 [1,6,16]。空间微重力实验发现, 当气流速度由 $6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 0 时, 火焰经过数秒的动态变化后最终熄灭。

图 6(b) 同时给出了浇铸 PMMA 表面的火焰传播速度, 可以看出, 火焰在浇铸 PMMA 和挤压 PMMA 试样表面的传播速度基本相同, 这与氧气浓度为 21.0% 时的情况有明显差别。在较高的氧气浓度下, 挤压 PMMA 剧烈燃烧, 材料熔化后迅速气化, 不能形成液滴, 火焰传播不再受到滴落的影响, 因此火焰传播速度接近浇铸 PMMA 的火焰传播速度。

3 结 论

1) 微重力和常重力火焰形态有着明显的区别。在微重力环境中, 火焰整体为蓝色, 尾部敞开; 常重力环境中, 由于浮力对流的影响, 火焰基本呈黄色, 火焰尾部闭合。相同条件下, 微重力火焰的宽度约为常重力火焰宽度的 2 倍。

2) 地面实验中, 火焰传播速度受到氧气浓度和气流速度的影响: 氧气浓度接近极限浓度时, 火焰传播速度随气流速度增加而减小; 氧气浓度较低 ($X_{O_2} \leq 25\%$) 时, 在较低的气流速度范围 ($< 20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$), 火焰传播速度基本不依赖气流速度变化。气流速度继续增加, 火焰传播速度减小; 氧气浓度较高 ($X_{O_2} \geq 33.5\%$) 时, 在实验测试的气流速度范围 ($< 130 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 内, 火焰传播速度随气流速度的增加而缓慢上升。



(a) 近极限氧气浓度 (浇铸 PMMA)

(a) Near limiting oxygen concentration (cast PMMA)

3) 微重力实验揭示了低速强迫流动中火焰传播的规律, 即火焰传播速度随气流速度的增加而增加。这与受浮力对流影响的地面实验结果不同。在整个气流速度范围内, 柱状固体材料的表面火焰传播速度随气流速度的变化可以分为三个区域: 辐射控制区, 传热控制区和化学反应控制区。

参 考 文 献

- [1] Olson S L. Mechanisms of Microgravity Flame Spread Over a Thin Solid Fuel: Oxygen and Opposed Flow Effects [J]. *Combustion Science and Technology*, 1991, 76(4-6): 233-249
- [2] Delichatsios M A. Flame Heat Fluxes and Correlations of Upward Flame Spread Along Vertical Cylinders in Various Oxygen Environments [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 2899-2904
- [3] Higuera F J. Flame Spread Along Horizontal Solid Fuel Cylinders [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 211-217
- [4] Gollner M J, Miller C H, Tang W, et al. The Effect of Flow and Geometry on Concurrent Flame Spread [J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 68-78
- [5] Olson S L, Ferkul P V. Microgravity Flammability Boundary for PMMA Rods in Axial Stagnation Flow: Experimental Results and Energy Balance Analyses [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 180: 217-229
- [6] ZHU Feng, LU Zhanbin, WANG Shuangfeng. Flame Spread Over a Thick Solid Fuel in Low-Velocity Opposed and Concurrent Flows [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2016, 28: 87-94
- [7] Fernandez-Pello C, Ray S R, Glassman I. Downward Flame Spread in an Opposed Forced Flow [J]. *Combustion Science and Technology*, 1978, 19(1/2): 19-30
- [8] Sibulkjn M, Lee C K. Flame Propagation Measurements and Energy Feedback Analysis for Burning Cylinders [J]. *Combustion Science and Technology*, 1974, 9(3/4): 137-147
- [9] 李先庭, 彦启森. 逆流风下火焰沿柱状燃料的传播 [J]. *火灾科学*, 1995, 4(2): 1-9
LI Xianting, YAN Qisen. Flame Spreading over a Cylinder Fuel in an Opposed Air Flow [J]. *Fire Safety Science*, 1995, 4(2): 1-9
- [10] Delichatsios M A, Altenkirch R A, Bundy M F, et al. Creeping Flame Spread Along Fuel Cylinders in Forced and Natural Flows and Microgravity [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 2835-2842
- [11] Link S, Huang X, Fernandez-Pello C, et al. The Effect of Gravity on Flame Spread over PMMA Cylinders [J]. *Scientific Report*, 2018, 8(120): 1-9
- [12] 王双峰, 尹永利, 朱凤, 等. 非金属固体材料在微重力环境中的着火及燃烧特性研究 [J]. *力学与实践*, 2016, 38(2): 217-220
WANG Shuangfeng, YIN Yongli, ZHU Feng, et al. A Study on the Ignition and Burning of Non-metallic Solid Materials in Microgravity [J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 217-220
- [13] 朱凤, 王双峰, 尹永利, 等. 微重力环境中热厚材料着火特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(1): 213-217
ZHU Feng, WANG Shuangfeng, YIN Yongli, et al. Ignition of a Thermally-Thick Solid Fuel in Microgravity [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(1): 213-217
- [14] Hirano T, Norekis S E, Waterman T E. Measured Velocity and Temperature Profiles Near Flames Spreading Over a Thin Combustible Solid [J]. *Combustion and Flame*, 1974(23): 83-96
- [15] Fernandez-Pello A C, Ray S R, Glassman I. Flame Spread in an Opposed Flow: The Effect of Ambient Oxygen Concentration[C]// *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, USA, 1981: 579-589
- [16] deRis J N. Spread of a Laminar Diffusion Flame [C]// *Twelfth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, USA, 1969: 241-252