

## 微重力环境中热厚材料着火特性研究

朱凤<sup>1,2</sup> 王双峰<sup>1,2</sup> 尹永利<sup>3</sup> 刘仁豪<sup>3</sup> 杨京松<sup>3</sup> 田柳<sup>3</sup>

(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

3. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

**摘要** 在空间微重力环境中, 对聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 试样进行点燃实验, 研究了不同氧气浓度和环境压力条件下热厚材料的着火特性。结果表明, 在研究涉及的实验条件下, 材料均可被点燃。外加热源消失后, 氧气浓度较高时, 点火形成的材料表面火焰可以自维持并稳定传播, 而氧气浓度较低时, 火焰不能自维持并最终熄灭。材料着火具有爆发性, 材料热解形成的可燃气体瞬间被点燃形成火焰。重复点火时, 材料可以被点燃, 但外加热源消失后火焰不能维持传播, 材料着火过程中散发出大量的发光颗粒并随气流迁移, 存在引燃周围易燃物的风险。材料着火后形成的稳定火焰总是朝着与气流流动相反的方向运动, 即火焰逆风传播, 没有出现顺风传播的现象。

**关键词** 热厚材料; 着火; 火焰传播; 微重力; 实践十号卫星

**中图分类号:** TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 231X(2018)01-0213-05

## Ignition of a Thermally-Thick Solid Fuel in Microgravity

ZHU Feng<sup>1,2</sup> WANG Shuang-Feng<sup>1,2</sup> YIN Yong-Li<sup>3</sup> LIU Ren-Hao<sup>3</sup>  
YANG Jing-Song<sup>3</sup> TIAN Liu<sup>3</sup>

(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;

3. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

**Abstract** Ignition experiments of thermally-thick PMMA plates in microgravity have been performed aboard SJ-10 satellite of China, and the effects of oxygen concentration and ambient pressure on ignition processes were investigated. It is found that, all the fuels can be ignited under the present experimental conditions. A steady-spread and self-sustained flame is formed at high oxygen concentration, while at lower oxygen concentration the flame cannot be self-sustained and will extinguish ultimately. The flame is formed instantaneously when the pyrolysis gas is ignited, showing an explosive characteristic at the moment of ignition. When the igniter is energized repeatedly, PMMA plates can also be ignited in all of the tests. However, after the igniter is powered off, the flame cannot be self-sustained. A large amount of luminous particles are released and migrated with gas flow during the process of flame formation, which indicates the risk of igniting surrounding combustible materials. After the material is ignited, the flame spreads opposing the gas flow, i.e., only opposed-spread flame is formed.

**Key words** thermally-thick fuel; ignition; flame spread; microgravity; SJ-10 satellite

## 0 引言

在微重力环境中, 外加热源作用下固体材料的着火以及表面火焰传播严重威胁着载人航天器和航天员的安全, 认识材料着火和火焰传播的过程对于航天器火灾的预防和控制具有重要意义。如果外部热源将材料点燃, 但在热源的影响消失后, 火焰随之熄灭, 这种着火模式对航天器的防火是有利的。反之, 如果材料着火后火焰可维持传播, 就有可能引

发大范围的火灾, 对航天器的安全构成重大威胁。

已有国外学者对固体材料在微重力环境中的着火特性进行了实验和理论研究。Kashiwagi<sup>[1]</sup> 和 Amos<sup>[2]</sup> 等分别对材料一维点火和稳定着火过程进行了数值计算研究, 提出了热辐射作用下材料着火的计算模型。Nakamura 等<sup>[3]</sup> 通过数值模拟分析重力条件对着火特性的影响, 指出了在不同重力条件下

**收稿日期:** 2017-01-05; **修订日期:** 2017-12-19

**基金项目:** 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; No.XDA04078000)

**作者简介:** 朱凤 (1988-), 女, 博士研究生, 主要从事固体材料燃烧和防火安全方面的研究。 **通信作者:** 王双峰, 研究员,

Email: sfwang@imech.ac.cn

热传输和质量传输的主导作用。Fujita 等<sup>[4]</sup>对薄纸张进行实验,研究了微重力环境中材料辐射点火的过程,结果表明,随着氧气浓度的增加,火焰延迟时间减小。Olson 等<sup>[5-6]</sup>研究了微重力环境中薄材料表面点火的着火延迟时间与氧分压的关系,实验证实了着火延迟时间与氧分压之间的反比关系。Olson 等<sup>[7]</sup>通过地面模拟实验研究了不同重力条件下热厚材料的着火延迟时间,发现着火延迟时间随着重力水平的降低而减小。这些研究工作以激光或热辐射作为外加热源,材料局部均匀受热,可获得理论分析需要的材料着火的主要特征参数,对于分析着火机理具有重要意义。在实际火灾中,材料往往由直接接触的热源点燃,同时,在研究微重力环境中材料表面火焰传播过程时,已有的空间实验<sup>[8-11]</sup>都是以电热丝为点火源,由于缺乏对点火过程和点火有效性的研究,空间燃烧实验面临点火失败的风险。为了认识微重力下材料着火的实际过程,并指导材料燃烧的空间实验,需要对热源直接接触试样的点火过程进行研究。

本文利用 2016 年 4 月成功发射的实践十号 (SJ-10) 返回式科学实验卫星<sup>[12]</sup>对典型热厚固体材料着火和火焰传播过程进行空间实验研究,在微重力环境中用电热丝加热和点燃 PMMA 平板试样,观察不同氧气浓度和环境压力条件下材料的着火过程,分析主要因素对材料着火特性的影响。

## 1 实验方法

为开展空间实验,研制了名为“非金属燃烧箱”的专用实验设备,详细描述见文献<sup>[13]</sup>,<sup>[14]</sup>。燃烧实验过程在一个密封的实验舱内进行,实验舱内含有 8 个独立的实验段,截面尺寸为 95 mm×95 mm,长 120 mm,每个实验段中安装一个实验样品。本文的实验结果和讨论仅限于其中的 4 个实验样品。根据空间实验的要求,实验设备实现了自动控制实验过程、在实验段内形成预定的低速流动条件、依次对试样进行着火和火焰传播实验、对试样进行加热和点燃、获得试样点燃和火焰传播燃烧过程中的图像、控制实验舱内的初始气体环境(压力和氧气浓度)、向外排出废气、测量实验段内环境参数(压力、温度和氧气浓度)变化等功能。

实验材料为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA),试样厚 10 mm,长 61.6 mm,宽 50 mm,密度 1.19 g·cm<sup>-3</sup>。如图 1 所示,实验样品固定在试样架上,为了减少实验过程中试样向四周和底面的热量损失,在试样架与试样之间填充 0.5 mm 厚的云母片。点火电热丝贯穿试样宽度方向,固定在试样表面凹槽中,距离

试样下游端约 15.8 mm,点火过程中,在电热丝两端施加 28 V 直流电,产生约 110 W 的恒定加热功率。试样架安装在实验段内中间部位,试样表面处于实验段高度的中心位置。用两台彩色 CCD 摄像机分别从正面和侧面记录试样点燃、火焰传播和熄灭的过程,记录速率为 25 帧/秒。

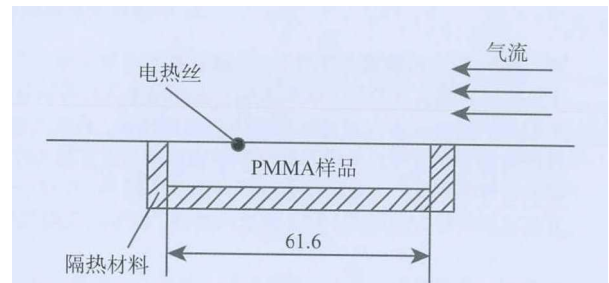


图 1 实验样品安装示意图

Fig. 1 Schematic of the test sample

卫星在轨运行期间,首先依次完成了 4 个 PMMA 试样的实验,其后,利用卫星留轨提供的拓展实验机会,再次对 4 个试样进行实验,但对氧气浓度和环境压力等参数进行了改变。空间实验参数如表 1 所列。单次实验的主要步骤如下:首先排出实验舱内的气体至舱内的压力小于 0.5 kPa;排气结束后,先后从两个高压气瓶向实验舱内充入不同混合比例的氧/氮混合气体,控制两种气体的充入压力,使之混合后达到设定的氧气浓度和压力;打开实验舱内的风扇,使舱内气体充分混合,并在实验段内形成稳定气流;电热丝加电,并持续 20 s,用 CCD 摄像机记录试样着火过程。

表 1 空间实验参数

Table 1 Test conditions for the microgravity experiments

样品 编号	首次点火实验			重复点火实验		
	$P/\text{kPa}$	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	$V_g/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$P/\text{kPa}$	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	$V_g/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
1	101	35	9	101	35	9
2	101	40	9	56	35	9
3	101	25	9	101	50	9
4	101	30	9	70	35	9

根据获得的 CCD 记录图像对材料着火特性进行分析,材料表面形成可见火焰即认为点火成功,电热丝断电后,在实验设定的气流持续时间 ( $\geq 55$  s) 内火焰能够稳定存在,即认为该火焰能够维持,否则认为没有形成能够稳定传播的火焰。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 材料着火和火焰传播

图 2 是氧气体积分数  $\varphi(\text{O}_2)$  分别为 25%、30%、

35%和 40%，压力  $p$  为 101 kPa，气流速度  $V_g=9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下，PMMA 试样点火过程的俯视图像，气流流动的方向向上。在所有氧气浓度时，点火过程中均形成可见火焰，火焰前锋位于电热丝的上游一侧，火焰的尾部位于下游一侧，火焰朝着与气流流动相反的方向传播即火焰逆向传播。这是由于在火焰的下游会形成一个贫氧区，来流气体中的氧气被逆

向传播的火焰消耗，不能支持火焰同向传播。Olson 等<sup>[6]</sup>对薄材料着火过程的实验研究也有相似结果。当氧气浓度  $\varphi(\text{O}_2) \geq 30\%$  时，在电热丝断电后，材料表面形成二维火焰，并维持逆向传播；当在氧气浓度  $\varphi(\text{O}_2) = 25\%$  时，在电热丝断电后，火焰宽度和长度均迅速减小，并最终熄灭，没有形成稳定传播的火焰。

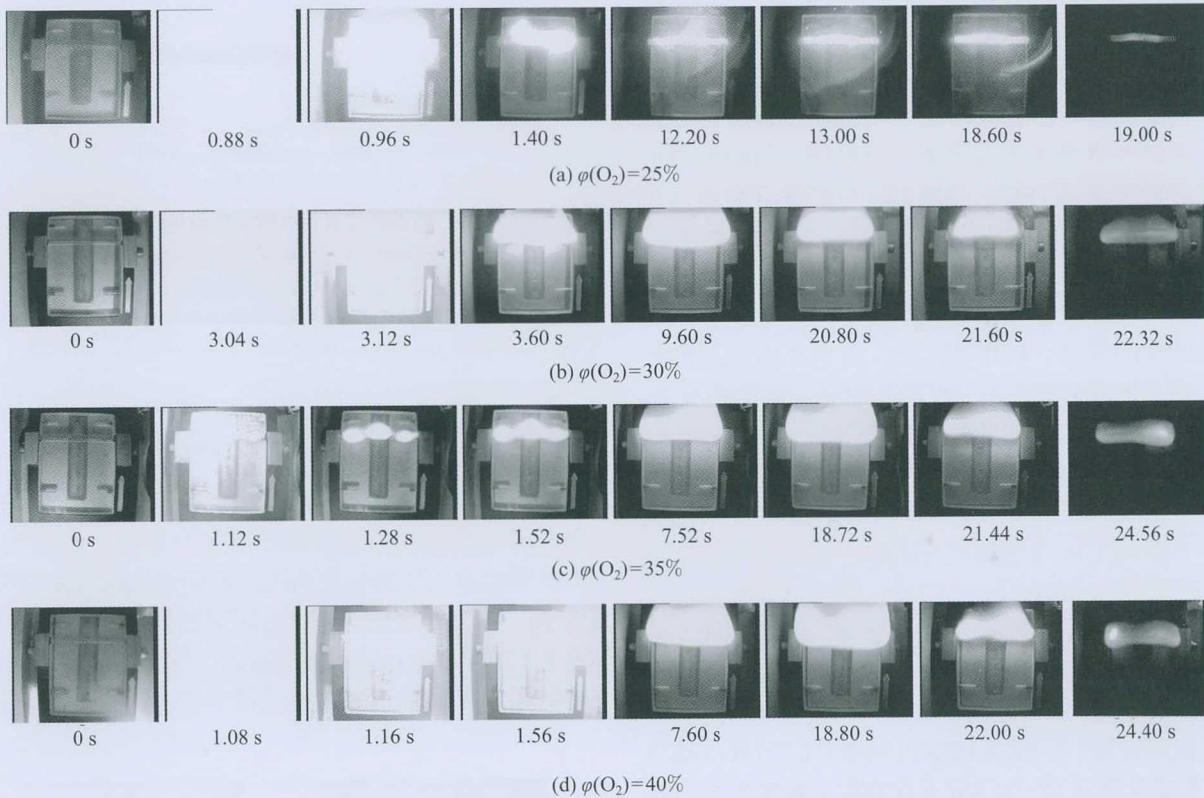


图 2 不同氧气浓度下 PMMA 试样点火过程 ( $p=101 \text{ kPa}$ ,  $V_g = 9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 2 Images of PMMA sample ignition at various oxygen concentrations ( $p=101 \text{ kPa}$ ,  $V_g = 9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

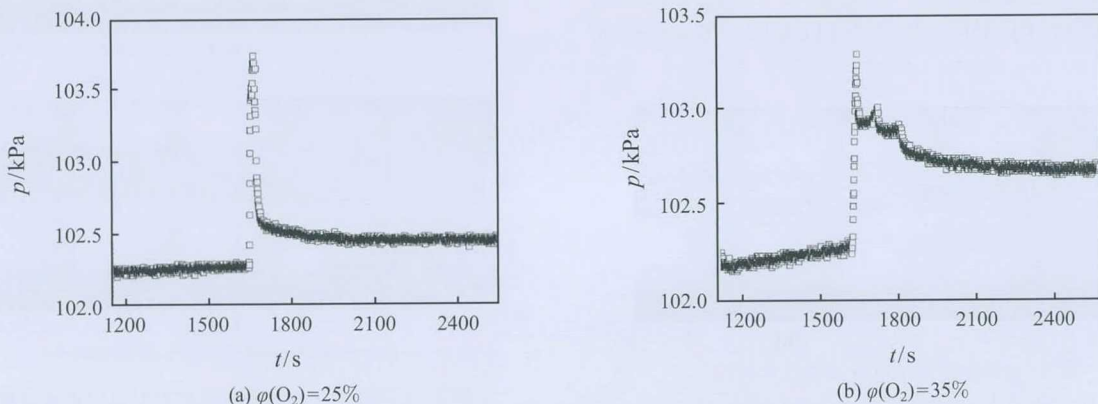


图 3 材料着火过程中实验舱压力的变化 (以实验开始时刻作为起始时间)

Fig. 3 Chamber pressure as a function of time (It is recorded initially from the beginning of the experiment)

在试样被加热的过程中,着火具有爆发性,即气相火焰瞬间出现,并且初始火焰的宽度均远大于试样宽度,而由于火焰亮度较高,CCD 过度曝光。材料着火的爆发性还体现在实验舱内压力瞬间增加。图 3 给出了氧气体积分数  $\varphi(\text{O}_2)$  为 25% 和 35% 两种情况下实验舱内压力随时间的变化,可以看出,在着火的瞬间,实验舱内压力增加 1.5 kPa 左右。在其它氧气浓度条件下进行的实验也有相似的现象。由于舱压信号的采集频率较低 (1 Hz),而着火的时间过程极短,实际的压力峰值可能没有被测量到,着火瞬间舱压的增幅可能更大。分析认为,实验舱压力的突增是由材料着火瞬间形成的微弱冲击波造成的,在微重力条件下,浮力流动的大幅减弱使得材料热解出的可燃气容易在表面聚集,当可燃燃气与环境中的氧气进行混合达到着火极限时,可燃混合物被电热丝瞬间点燃,发生剧烈的燃烧反应。值得注意的是,在同一实验设备中进行的地面实验表明,常重力下材料的着火过程比较平稳,实验舱压力也没有出现突然增加的现象,材料着火后,由于浮力流动的影响火焰发生周期性抖动,表现出湍流火焰的特点。

## 2.2 重复点火时材料的着火特性

地面实验和空间实验结果表明,经过一次燃烧实验后,PMMA 试样仅表面约 1mm 的厚度被消耗,试样主要的变化为电热丝与试样之间的接触程度减小。图 4 是  $p=101\text{ kPa}$ ,  $\varphi(\text{O}_2)=35\%$ ,  $V_g=9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下,PMMA 试样再次点火过程中的俯视和侧视图像。在电热丝通电后约 10 s 时间内,火焰宽度小于试样的宽度,10 s 之后,火焰体积迅速增加,宽度超过试样宽度,同时火焰驻离距离随时间增加而增加。实验观察到,在材料着火过程中火焰散发出大量的发光颗粒,它们随着气流向下游迁移。在实际中,这些随气流运动的炽热颗粒可能引燃环境中的其它可燃物从而引发火灾,因此在进行航天器防火设计时值得特别重视。图 5 给出了同一实验中材料着火前后实验舱内的压力变化,可以看出,在火焰形成

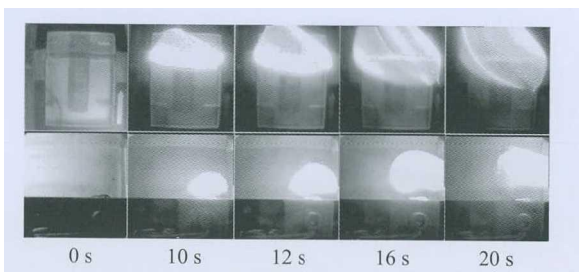


图 4 电热丝重复加电时试样点火过程  
( $p=101\text{ kPa}$ ,  $\varphi(\text{O}_2)=35\%$ ,  $V_g=9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 Images of PMMA sample ignition when the igniter was repeatedly energized ( $p=101\text{ kPa}$ ,  $\varphi(\text{O}_2)=35\%$ ,  $V_g=9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

的时刻实验舱内压力上升了约 1.3 kPa,与试样初次点火时的情况相似。

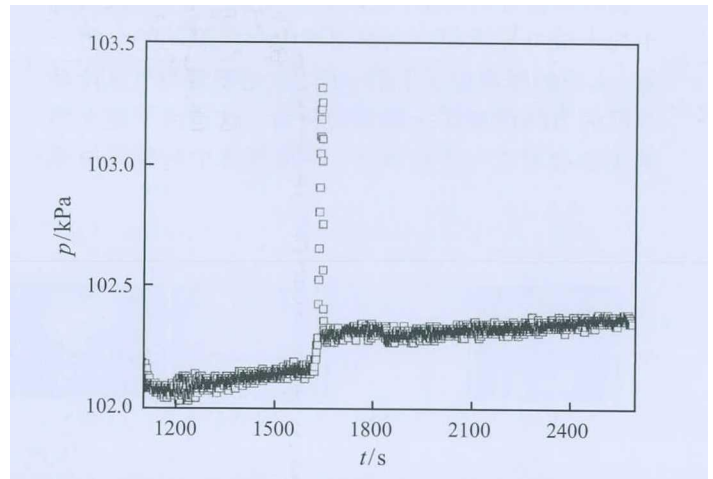


图 5 电热丝重复加电时实验舱压力的变化  
( $p=101\text{ kPa}$ ,  $\varphi(\text{O}_2)=35\%$ ,  $V_g=9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 Chamber pressure as a function of time when the igniter was repeatedly energized  
( $p=101\text{ kPa}$ ,  $\varphi(\text{O}_2)=35\%$ ,  $V_g=9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

图 6 是两种不同压力 ( $p=70\text{ kPa}$  和  $p=56\text{ kPa}$ ),  $\varphi(\text{O}_2)=35\%$ ,  $V_g=9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  时,材料点火过程的俯视和侧视图像。环境压力降低后,材料着火过程与图 4 所示的着火过程具有相似特征,而且在着火时刻也发生了实验舱内压力瞬间增加的现象(图 7 所示)。综合前文的分析,在不同的压力和氧浓度条件下,试样着火时实验舱内的压力都出现突然增加,这种现象可以用于探测航天器中发生的初期火灾。

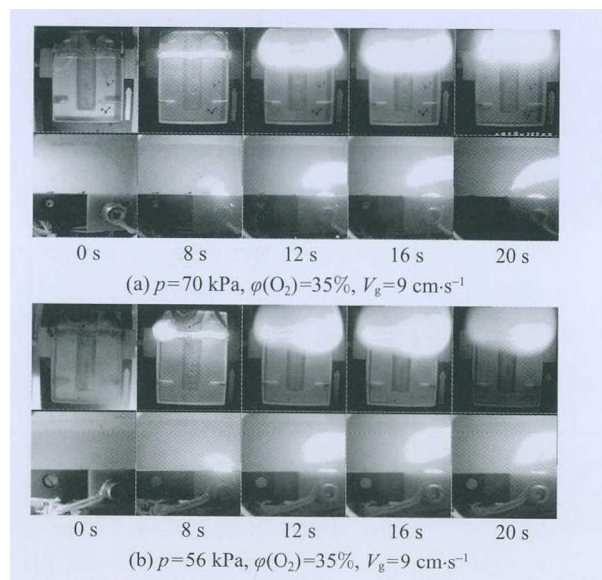


图 6 不同压力下电热丝重复加电时试样点火过程

Fig. 6 Images of PMMA sample ignition when the igniter was repeatedly energized at various ambient pressures

一个值得注意的现象是,在本文微重力实验涉及的环境条件下,虽然电热丝重复加电可以点燃 PMMA 试样,但当电热丝断电后,火焰尺寸逐渐减小,火焰最终熄灭,不能形成自维持的火焰。

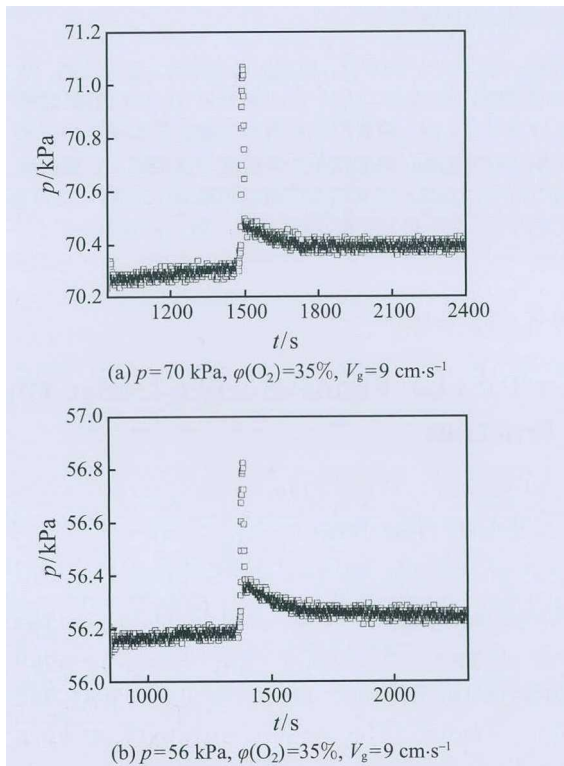


图7 不同压力下电热丝重复加电时点火过程中实验舱压力变化  
Fig. 7 Chamber pressure as a function of time when the igniter was repeatedly energized at various ambient pressures

### 3 结 论

1) 微重力环境中,在氧气浓度 25%~50%的低速流动条件下,PMMA 材料均可被点燃,而当点火源消失后,当环境氧气浓度  $\geq 30\%$  时,着火形成的火焰可自维持传播,当氧气浓度较低时,火焰不能维持,并将最终熄灭。

2) 微重力下材料着火具有爆发性,材料热解形成的可燃气体瞬间被点燃形成火焰,着火时刻实验舱内压力瞬间达到峰值。

3) 重复点火时,材料可以被点燃,但在外加热源消失后,火焰不能自维持;材料着火过程中散发出大量的发光颗粒,增加了引燃周围可燃物的风险。

4) 材料着火后火焰逆风传播,即形成的稳定传播的火焰朝着与气流流动相反的方向运动,没有产生顺风传播火焰。

### 参 考 文 献

[1] Kashiwagi T. A Radiative Ignition Model of a Solid Fuel

- [J]. *Combustion Science and Technology*. 1974, 8: 225-236
- [2] Amos B, Fernandez-Pello A C. Model of the Ignition and Flame Development on a Vaporizing Combustible Surface in a Stagnation Point Flow: Ignition by Vapor Fuel Radiation Absorption [J]. *Combustion Science and Technology*. 1988, 62: 331-343
- [3] Nakamura Y, Yamashita H, Takeno T, et al. Effects of Gravity and Ambient Oxygen on a Gas-Phase Ignition Over a Heated Solid Fuel [J]. *Combustion and Flame*. 2000, 120: 34-48
- [4] Fujita O, Takahashi J, Ito K. Experimental Study Radiative Ignition of a Paper Sheet in Microgravity [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2000, 28: 2761-2767
- [5] Olson S L, Kashiwagi T, Fujita O, et al. Experimental Observations of Spot Radiative Ignition and Subsequent Three-Dimensional Flame Spread over Thin Cellulose Fuels [J]. *Combustion and Flame*. 2001, 125: 852-864
- [6] Olson S L. Piloted Ignition Delay Times of Opposed and Concurrent Flame Spread over a Thermally-Thin Fuel in a Forced Convective Microgravity Environment [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011, 33: 2633-2639
- [7] Olson S L, Beeson H D, Haas J P, et al. An Earth-based Low Stretch Apparatus for Material Flammability Assessment in Microgravity and Extraterrestrial Environments [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005, 30: 2335-2343
- [8] West J, Tang L, Altenkirch R A, et al. Quiescent Flame Spread over Thick Fuels in Microgravity [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*. 1996, 26(1): 1335-1343
- [9] Altenkirch R A, Tang L, Sacksteder K, et al. Inherently Unsteady Flame Spread to Extinction Over Thick Fuels in Microgravity [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*. 1998, 27(2): 2515-2524
- [10] Vietoris T, Ellzey J L, Joulain P, et al. Laminar Diffusion Flame in Microgravity: The Results of the Minitexus 6 Sounding Rocket Experiment [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2000, 28: 2883-2889
- [11] Olson S L, Hegde U, Bhattacharjee S, et al. Sounding Rocket Microgravity Experiments Elucidating Diffusive and Radiative Transport Effects on Flame Spread Over Thermally Thick Solids [J]. *Combustion Science and Technology*, 2004, 176(4): 557-584
- [12] HU Wenrui, ZHAO Jianfu, LONG Mian, et al. Space Program SJ-10 Microgravity Research [J]. *Microgravity Science and Technology*. 2014, 26: 159-169
- [13] 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
- [14] 尹永利, 王双峰, 刘仁豪, 等. SJ-10 卫星固体材料燃烧实验装置 [J]. *空间科学学报*, 2016, 36(4): 492-496  
YIN Yongli, WANG Shuangfeng, LIU Renhao, et al. Experimental Facility for Ignition and Burning of Solid Materials aboard SJ-10 Satellite [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, 36(4): 492-496