不同重力下窄通道内薄材料表面的火焰传播

张 夏

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

搞 要 在常重力下模拟微重力燃烧对载人航天器的火灾安全具有重要意义。窄通道就是这样一种可以有效限制自然对流的模拟设施。但是,不同重力下火焰传播的相似性仍然是有待研究的问题。本文用实验和数值模拟的方法,比较了不同重力下有限空间内热薄材料表面的逆风传播火焰。不同重力下火焰形状和火焰传播速度的比较表明,1 cm 高的水平窄通道可以有效地限制自然对流,在常重力下用这种通道能够模拟微重力下相同几何尺寸的通道中的火焰传播。因此,在地面上首先利用水平窄通道,模拟相同环境中的微重力火焰传播,然后考虑通道尺寸变化对火焰传播的影响,有可能成为地面模拟其他尺寸的空间中的微重力燃烧的方法。

关键词 微重力;火焰传播;薄材料;窄通道;地面模拟 中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2008)02-0347-04

OPPOSED-FLOW FLAME SPREAD OVER A THIN SOLID MATERIAL IN NARROW CHANNELS IN NORMAL AND MICROGRAVITY

ZHANG Xia

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Apparatus to simulate microgravity combustion in normal gravity is important for the fire safety of manned spaceflight. The narrow channel is such an apparatus in which the buoyant flow is restricted effectively. However, the comparability of flame spread in different gravity is still an open question. In present paper, opposed-flow flame spread over a thin solid material in narrow channels in different gravity was compared experimentally and numerically. The comparison of flame appearances and flame spread rates in normal and microgravity suggested that the 1 cm high horizontal channel can suppress natural convection effectively. Such apparatus can be used to simulate the microgravity flame spread in channels with the same geometrical size. Therefore, the simulation of microgravity flame spread on the ground may be realized by first using the horizontal narrow channel on the ground to simulate microgravity flame spread in the channel with the same size, and then considering the effect of the channel size on the flame spread.

Key words microgravity; flame spread; thin solid material; narrow channel; simulation on the ground

1 引 言

在载人航天的历史上,发生过多次火灾事故或危险事件^[1]。剔除材料中的潜在燃料是载人航天器防火的根本措施,其评价依据为材料的可燃性^[2],材料表面火焰传播的可能性以及火焰传播速度是关键指标。气流速度对火焰传播具有重要影响^[3],由于浮力对流的不同,材料在微重力下和地面上的燃烧特性差别其大,因此不能不加验证地把地面上材

料的燃烧特性照搬到载人航天器中,而应该开展微重力下材料燃烧特性的研究。但微重力燃烧实验成本昂贵,因此需要发展常重力下能够在功能上模拟微重力燃烧的设备。俄罗斯科学家 [4,5] 提出用窄通道实现这种目的。他们的实验结果表明,水平窄通道内获得的极限气流速度和火焰传播速度与和平号空间站上获得的结果定性一致,但定量上极限气流速度偏大,火焰传播速度偏小。他们没有进一步解

收稿日期, 2007-12-03; 修订日期: 2008-01-03

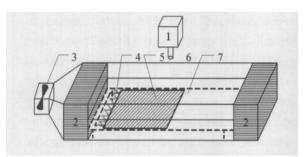
基金项目,中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No.KJCX2-SW-L05) 资助

作者简介: 张 夏 (1971-), 男, 宁夏隆德县人, 助理研究员, 博士, 研究方向为微重力燃烧与载人航天器火灾安全.

释产生这种结果的原因。目前水平窄通道设备已经 在气体灭火剂的检验 [6] 和薄燃料的闷烧 [7] 等研究 中得到应用, 但通道尺寸对火焰传播的影响, 还仅限 于对微重力下顺风传播火焰的数值模拟 [8],而不同 重力条件下火焰传播的相似性仅有初步研究 [9]。本 文将用实验和数值模拟方法,研究不同重力条件下 薄材料表面逆风传播火焰的相似性.

2 实验与数学模型

实验系统如图 1 所示, 主要由实验段和 CCD 图 像记录系统构成,实验段为燃烧通道,长 400 mm,宽 200 mm, 高度 h 可以调整。通道的两端用微孔铝蜂 窝器填充以保证气流均匀. 通道的一端安装风扇, 风 扇转动可以诱导形成 1~30 cm/s 的气流速度。气流 速度与风扇电压的关系事先用激光可视化技术进行 标定。材料试样为 0.0245 mm 厚、面积密度为 17.0 g/m² 的薄纸。试样用胶带纸粘在试样架上。试样架 的外框长度和宽度与通道的长度和宽度相同,内框 长度和宽度分别为 200 mm 和 100 mm。固定有试样 的薄铝框试样架放置于通道的中间位置。 试样架的 内框处于通道的下游位置。点火器为电阻 4 Ω 的电 热丝。试样的点燃通过电热丝通电加热试样实现。



1. CCD 摄像机 2. 铝蜂窝器 3. 风扇 4. 点火器 5. 试样 6. 燃烧通道 7. 试样架 图 1 实验系统构成

Fig.1 The Experiment System

实验在常重力和微重力下的常压空气气氛中进 行。在常重力下,首先启动风扇,当风扇运转 15 s 后气流开始进入稳定状态,这时,给点火器接通24 V 电压并持续 5 s 以点燃试样。火焰传播图像用焦 距为 12 mm 的 CCD 摄像机记录。火焰传播速度可 以根据火焰前沿的位移与时间的关系计算得到。实 验工况包括通道的水平和竖直放置两种情况, 水平 放置时重力加速度与试样表面垂直, 竖直放置时, 重力加速度与气流速度方向相反,火焰向下传播。

进行微重力实验时, 微重力由中国科学院力学 研究所国家微重力实验室的微重力落塔设施通过实 验舱的自由落体实现、微重力时间 3.6 s, 残余微重 力水平估计在 $10^{-3}g_e$ 左右, 其中 g_e 是地面上的重 力加速度。微重力与常重力实验的程序相似,但进 行微重力实验前,实验设备需要封装在微重力落舱 中,在试样点燃5s之后,开始释放落舱。火焰传播 速度根据落舱进入微重力状态后火焰前沿的位移与 时间的关系计算得到。实验中通道竖直放置, 残余 重力加速度与气流速度方向相反, 火焰向下传播.

火焰传播模型如图 2 所示, 气体以均匀速度 uo 流进通道,火焰以速度 u,向上游传播,取材料表面 为 x 方向, 垂直于材料表面为 y 方向。计算域在 x方向的长度为 40 cm, 火焰前沿上下游分别为 25 cm 和 15 cm, 在 y 方向的长度作为研究参数可以变化。

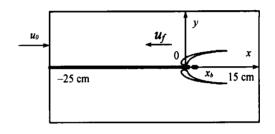


图 2 火焰传播示意图 Fig.2 A Sketch for Flame Spread

3 结果与讨论

常重力和微重力条件下不同放置方向和高度的 通道中的火焰传播图像如图 3 所示。在微重力下的 1 cm 高的通道中, 由于氧气供应不足, 3 cm/s 的气流 中的火焰前沿分裂成黄色的小火焰。当气流速度增 大到 4.5 和 6 cm/s 时, 火焰前沿连续, 但从火焰的颜 色可以看出火焰温度较低。在 3~6 cm/s 的气流速度 范围内, 火焰长度仅为 0.5 cm 。 当气流速度增大到 9 cm/s 时,火焰温度升高,火焰变长。在 1 cm 高的 水平通道中,在 3~4.5 cm/s 的气流速度范围内,火 焰前沿也分裂成小火焰。当气流速度增大到 6 cm/s 时,火焰前沿呈连续形状。火焰的颜色和长度与微 重力下的情况相似。在1 cm 高的竖直通道中, 在很 低的气流速度范围如 3~4.5 cm/s 的条件下, 火焰前 沿也不分裂成小火焰, 但是试样不能完全燃尽。当 气流速度达到 6 cm/s 时, 材料可以完全燃尽. 竖直 通道中火焰的颜色为亮黄色,火焰长度大约为1~2 cm, 这与微重力和水平通道中的火焰完全不同。当 通道高度增大到 2 cm 时,由于热损失减小,自然对 流的受限程度降低,水平和竖直通道中的火焰温度 明显更高, 火焰长度更长。

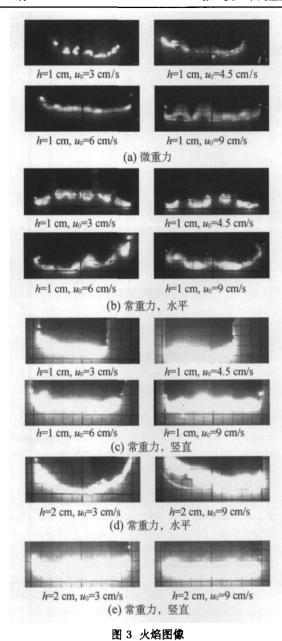


Fig.3 The Photographs of Flames

从火焰外观也可以看出, 1 cm 高的水平通道中的火焰,远比其他尺寸和方向的通道中的火焰与微重力下的情况更加相似。另外,低速气流条件下火焰前沿的分裂表明在二维火焰传播中存在由氧气供应不足控制的极限气流速度。但是,气流速度低于这一极限时,火焰并不一定熄灭,而是可能以小火焰的形式存在,这时氧气能够从火焰的侧面扩散进来。这种现象对载人航天器的火灾安全非常重要。

常重力和微重力条件下不同通道中火焰传播速度随气流速度变化的实验结果如图 4 所示。微重力下大尺寸实验段中的结果 ^[3,10] 也一起表示在图中以便比较。在 1 cm 高的通道中,水平和微重力下的火焰传播速度均随气流速度的增大而增大,这与微重力下大尺寸实验段的结果一致。但是,由于流动与热

条件不同,小尺寸和大尺寸实验段中的火焰传播速度明显不同。但在低速气流条件下,由于流动与热条件基本相同,1 cm 高的水平通道内的火焰传播速度几乎与相同尺寸的微重力通道内的火焰传播速度相同,这表明水平窄通道可以有效地限制自然对流(以通道半高度为基准计算的 Grashof 数 Gr=149)。在1或2 cm 高的竖直通道或2 cm 高的水平通道内,火焰传播速度基本与低速气流速度无关,这是因为在这两种情况下火焰传播主要由自然对流控制,这与微重力下的结果完全不同,表明竖直通道和大尺寸的水平通道很难限制自然对流。

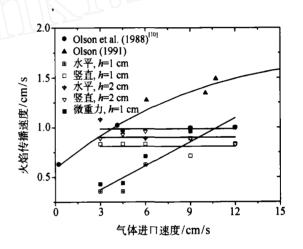


图 4 火焰传播速度随气流速度的变化 Fig. 4 Flame Spread Rates as a Function of Gas Flow Velocity

不同重力条件下通道内火焰传播速度随气流速 度变化的数值模拟结果如图 5 所示. 显然, 在 1 cm 高度的通道中,各个方向传播的火焰传播速度的差 别很小、原因是在这种条件下,尽管 Grashof 数并不 相同, 但因其足够小, 因此常重力和微重力下的自然 对流都可以忽略。与竖直通道中的火焰传播相比, 水平通道中的火焰传播能够更好地模拟微重力下的 情况。对于 2 cm 高度的通道, 竖直和水平通道中的 火焰传播与微重力下的情况明显不同。与微重力下 的火焰传播速度相比,竖直通道中传播速度更低, 而水平通道中的传播速度更高。在竖直通道的火焰 传播中, 混合对流使火焰传播进入吹熄极限分支, 因 此火焰传播速度变慢。在水平通道的火焰传播中, 自然对流使得部分火焰具有逆风火焰的特征而另一 部分火焰具有顺风火焰的特征, 这种特点在低速气 流条件下非常明显。由于残余自然对流的增大,随 着通道高度的增大,不同方向的通道中火焰传播速 度的差别明显增大。从火焰传播速度看, 1 cm 高度 的水平通道是可以有效限制火焰传播过程中自然对

29 卷

流的设施。

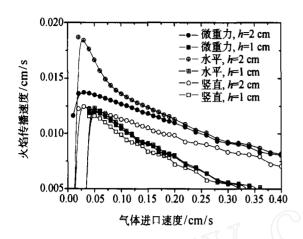


图 5 不同放置方向和高度的通道中的火焰传播速度 Fig.5 Flame Spread Rates in Channels with Different Directions and Heights

通道高度的变化必然会影响通道中的流场和壁面热损失,并进一步影响火焰传播,因此,在相同重力条件的不同尺寸的通道中的火焰传播将完全不同。相似地,在地面上用小尺寸实验段来模拟微重力下大尺寸实验段中的结果将不会得到满意的效果。这就是文献 [4], [5] 仅能得到定性符合而不能得到定量符合的结果的原因。而在窄通道中,虽然微重力和水平通道中火焰传播过程的 Grashof 数仍然不同,但其本身极小,因此自然对流可以忽略。由于这样的原因,水平窄通道与微重力下窄通道中的火焰传播相似。基于此,在地面上首先利用水平窄通道,模拟相同环境中的微重力火焰传播,然后考虑通道尺寸变化对火焰传播的影响,有可能成为地面模拟其他尺寸的空间中的微重力燃烧的方法。

4 结 论

本文利用实验和数值模拟方法,比较了常重力和微重力下有限空间内热薄材料表面的逆风传播火焰。不同重力条件下的火焰外观和火焰传播速度的比较表明,1 cm 高的水平窄通道可以有效限制火焰传播过程的自然对流。利用这样的设备可以模拟微重力条件下相同尺寸的通道中的火焰传播。因此,在地面上首先利用水平窄通道,模拟相同环境中的微重力火焰传播,然后考虑通道尺寸变化对火焰传

播的影响,有可能成为地面模拟其他尺寸的空间中的微重力燃烧的方法。

致 谢 北京立方天地科技发展有限责任公司的 虞建工程师,在激光可视化技术方面提供了很多帮助,作者表示感谢。

参考文献

- [1] 张夏,胡文瑞. 载人航天器的火灾安全问题. 载人航天, 2006, (4): 5-11, 25 Zhang X, Hu W. Fire Safety Problems of Manned Spacecraft. Manned Spaceflight, 2006, (4): 5-11, 25
- [2] 张夏. 载人航天器火灾安全研究进展. 力学进展, 2005, 35(1): 100-115
 Zhang X. Progress in Fire Safety Research for Manned Spacecraft. Adv. Mech., 2005, 35(1): 100-115
- [3] Olson S L. Mechanisms of Microgravity Flame Spread over a Thin Solid Fuel - Oxygen and Opposed Flow Effects. Combust. Sci. Tech., 1991, 76(4-6): 233-249
- [4] Ivanov A V, Balashov Ye V, et al. Experimental Verification of Material Flammability in Space. NASA CR-1999-209405, 1999
- [5] Melikhov A S, Bolodyan I A, Potyakin V I, et al. The Study of Polymer Material Combustion in Simulated Microgravity by Physical Modeling Method. In: Sacksteder K, ed. Fifth Int. Microgravity Combust Workshop, NASA CP-1999-208917. 1999. 361-364
- [6] Dlugogorski B Z, Wang H, Kennedy E M, et al. Testing of Gaseous Fire Suppressants in Narrow Channel Apparatus. In: Gann R G, Reneke P A, eds. Proc. HOTWC-2002 12th Halon Options Tech Working Conference. NIST Special Publication 984. 2002
- [7] Zik O, Moses E. Fingering Instability in Solid Fuel Combustion: The Characteristic Scales of the Developed State. Twenty-Seventh Symp. (Int.) Combust. Pittsiburgh: Combust. Inst., 1998. 2815–2820
- [8] T'ien J S, Shih H-Y, Jiang C-B, et al. Mechanisms of Flame Spread and Smolder Wave Propagation. In: Ross H D, ed. Microgravity Combustion: Fire in Free Fall, San Diego: Academic Press, 2001. 299-418
- [9] 张夏. 微重力下热薄燃料表面火焰传播的地面窄通道模拟研究. 力学学报, 2007, 39(4): 466-472 Zhang X. Simulation of Flame Spread over Thin Solid Fuel Under Microgravity Using Narrow Channel on Ground. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(4): 466-472
- [10] Olson S L, Ferkul P V, T'ien J S. Near-Limit Flame Spread Over a Thin Solid Fuel in Microgravity. Twenty-Second Symp. (Int.) Combust. Pittsburgh: Combust. Inst., 1988. 1213–1222