

# 微重力下固体材料燃烧特性的 地面实验模拟方法研究

王双峰, 肖 原

(中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100090)

**摘 要** 在对水平窄通道内典型热薄固体材料的燃烧特性进行实验和数值模拟的基础上, 分析了材料表面火焰传播、材料可燃极限与微重力实验结果的相似性, 以及窄通道实验模拟微重力材料燃烧特性的机理。研究表明, 在航天器舱内常见的低速气流条件下, 高度为 10mm~14mm 的窄通道能较好地模拟微重力环境中材料表面火焰传播的特征, 并复现材料的可燃极限曲线; 窄通道内火焰诱导的浮力流动速度的最大值约为 5cm/s, 与常规实验通道(高度较大)相比, 窄通道能够有效地限制自然对流, 进而提供模拟微重力条件下材料燃烧特性的实验环境。

**关键词** 火焰传播; 微重力; 固体材料; 地面模拟; 防火安全

**中图分类号:** TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825 (2012) 04-0070-05

## 1 引 言

防火安全是载人航天器设计和运行中必须妥善解决的重要问题, 这方面的研究也一直受到各航天大国的高度重视<sup>[1-3]</sup>。为了预防载人航天器舱内火灾的发生, 首先需要掌握航天器材料在特定环境中的防火特性, 并以此为基础建立材料选用和使用规范。载人航天器处于微重力状态, 这时对地面常重力燃烧过程有着重要影响的自然对流基本消失, 材料的燃烧特性明显不同于常重力下的情况。因此不能不加验证地把地面上材料的防火特性照搬到航天器中, 必须系统地开展微重力环境中材料着火、火焰传播以及熄灭特性的研究, 这些工作也是火灾检测和控制的基础。

各种航天飞行器是开展微重力燃烧实验的理想平台, 部分实验也可利用落塔、探空火箭、抛物线飞机等短时微重力设施进行。但是, 所有这些设施的使用成本高, 实验准备周期长, 对实验条件的限制较多, 很难满足载人航天器防火安全研究和工程设计

的需要。为了对范围广泛的材料进行研究, 特别是满足大量的工程实验的需求, 俄罗斯航天研究部门首先提出通过减小实验空间尺寸限制自然对流的思路, 并利用窄通道对微重力燃烧过程进行模拟<sup>[4]</sup>。对热厚材料进行的燃烧实验表明, 窄通道内火焰传播速度变化规律与微重力实验结果定性符合, 但研究者并没有给出通道尺寸对模拟结果的影响, 也未对造成模拟误差的原因进行分析。Olson 等<sup>[5, 6]</sup>通过实验和数值分析研究了窄通道内热薄燃料表面火焰传播中出现的手指状小火焰, 认为 10mm 高度的窄通道可以模拟微重力环境, 模拟机理为氧气浓度和气流速度较低时通道抑制自然对流, 并产生较大的热损失。国内方面, 张夏<sup>[7, 8]</sup>对高度为 10mm 的水平窄通道中热薄材料表面的火焰传播速度进行了实验和数值模拟研究, 发现在低速气流条件下火焰传播速度的变化趋势与微重力实验结果相近。

已有研究说明, 对于微重力下的材料燃烧过程, 水平窄通道是一种有希望的地面模拟方法。但在将其应用于材料防火性能研究和评价之前, 还有诸多

收稿日期: 2011-10-27; 修回日期: 2012-04-18

基金项目: 载人航天领域预先研究项目(020105)

作者简介: 王双峰(1972-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事微重力燃烧与航天器防火安全研究工作。E-mail: sfwang@imech.ac.cn

的问题需要深入研究,其中特别是要定量了解窄通道内燃烧过程与微重力燃烧过程的相似程度、窄通道功能模拟的机理和控制参数等。本文在前人研究基础上,对窄通道内典型热薄固体材料表面的逆风火焰传播、材料可燃特性等进行实验观测,分析了窄通道高度、强迫气流速度和环境气氛等对燃烧特性的影响,给出了窄通道模拟微重力燃烧过程的适用条件,并根据数值模拟结果讨论了窄通道功能模拟的主要机理。

## 2 实验和数值模拟方法

水平窄通道实验系统如图1所示,主要包括实验装置主体和气体供给与控制系统。实验装置主体由整流段、收缩段和实验段组成,它的设计类似一个小风洞,即通过整流段和收缩段获得稳定均匀的气流,并向实验段供应。实验段是一个长900mm、宽360mm的水平通道,高度可在10mm~14mm范围内调整,为便于观察,实验段使用平板玻璃制作。由于实验段的宽度远大于高度,保证了高度中心附近流动的二维性。实验气源为工业纯氮和纯氧,它们按照指定比例在流量计的控制下进行充分混合后向整流段供应,在实验段内产生需要的流动和气流条件,气流平均速度可在0~50cm/s范围内调整。实验燃料为典型的热薄固体材料:(1)餐巾纸,厚度0.062mm,半厚度面密度10.9g/m<sup>2</sup>; (2)字典纸,厚度0.058mm,半厚度面密度18.1g/m<sup>2</sup>; (3)打印纸,厚度0.115mm,半厚度面密度35g/m<sup>2</sup>。试样宽度35mm,长度255mm。

实验步骤如下:将试样固定在试样架上,通过微调试样架高度使试样与实验段上下壁面的距离相等;启动气体供给与控制系统,并设定气体流量控制参数;待实验段内流动稳定后,用电热丝在实验段出口处点燃试样;在现场观察记录的同时,用两台数码相机同时从顶面和侧面记录试样点燃、火焰逆风

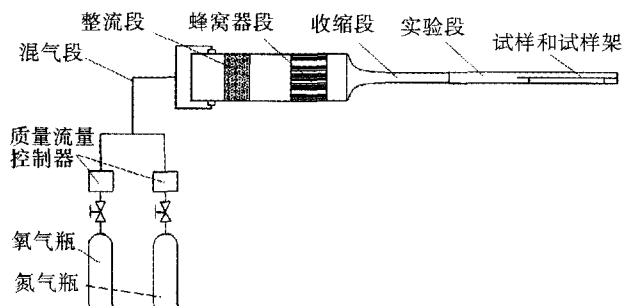


图1 窄通道实验系统示意图

传播或熄灭的过程,用于进一步的分析处理,图像记录速率25帧/s。分析表明,在试样的中间部分火焰锋面具有二维特征,并保持稳定传播,即火焰传播速度不变,此时的图像记录被用于火焰传播速度的测量。在同一条件下,实验重复进行3~5次,对数据作算数平均值处理得到最终的实验结果,而单次实验结果相对于平均值的变化不超过8%。

数值模拟中热薄燃料表面二维火焰传播的示意图如图2所示。计算域左边界为通道入口,假设来流均匀,上下边界为通道壁面,右边界为出口,燃料位于通道中心。取平行于燃料的表面的方向为 $x$ 方向,垂直燃料表面的方向为 $y$ 方向,坐标原点选取在燃料左边界与计算域下边界的交点位置。数学模型包括气相模型和固相热解模型,热薄燃料为纸,分子式C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>。气相模型包括连续、动量、组份和能量方程,假设气相反应为单步、不可逆的二阶Arrhenius反应,有关参数取自文献[9];固相模型为多步热解模型,各参数取自文献[10]和[11]。数值计算采用FDS 5内核,计算域长200mm,高度与通道高度相同。

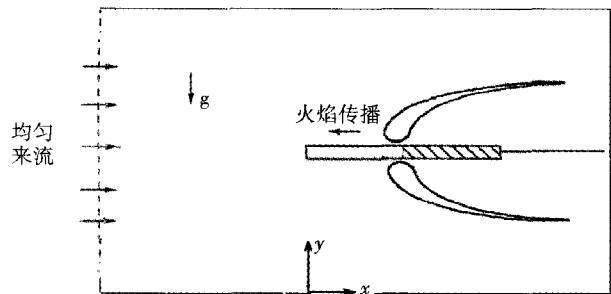


图2 逆风火焰传播计算模型示意图

## 3 结果和讨论

### 3.1 火焰传播速度

火焰传播速度是表征材料燃烧特性的重要指标之一,它的大小代表了火灾蔓延风险的强弱。不同高度( $h=10,12,14$ mm)窄通道内餐巾纸表面逆风火焰传播速度 $V_f$ 随特征气流速度 $V_c(=V_f+V, V$ 为气流平均速度)的变化如图3所示,图中也给出了Olson等<sup>[12,13]</sup>对相似材料得到的落塔微重力实验结果。可以看出,三个高度的窄通道模拟得到的 $V_f-V_c$ 关系曲线的变化趋势均与微重力实验结果一致,即 $V_f$ 先随着 $V_c$ 的增大而增大,达到最大值后随着 $V_c$ 的增大而减小。由于 $V_f-V_c$ 曲线的非单调变化规律是微重力条件下所特有的,图3中的结果说明,窄通道可以有效地抑

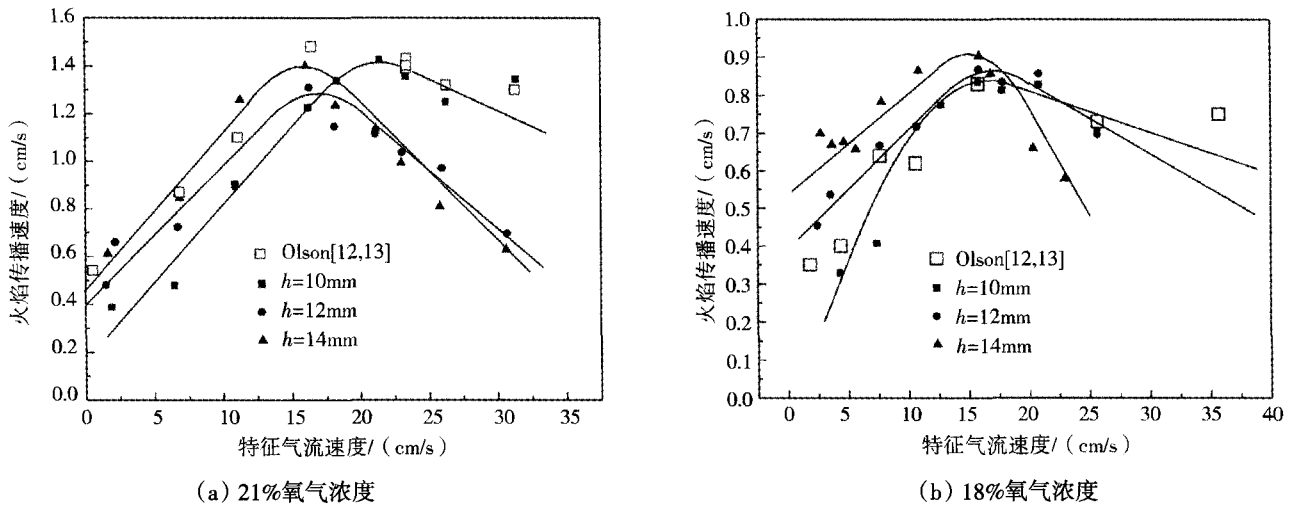


图3 窄通道内火焰传播速度随特征气流速度的变化

制自然对流,从而提供模拟的微重力条件。根据微重力条件下热薄材料表面火焰传播的不同机理<sup>[2]</sup>,以特征气流速度的大小为依据,图3中火焰传播速度与气流速度的关系可划分为两个区域:低速近冷熄区( $V_c < 15 \sim 20 \text{ cm/s}$ )和高速近吹熄区( $V_c > 15 \sim 20 \text{ cm/s}$ )。在低速近冷熄区,当气流速度增大时,氧化剂传输增强,同时火焰更靠近燃料表面,火焰传播加快;在高速近吹熄区,燃烧反应的停留时间减小、反应速率衰减的影响开始占据主导地位,导致火焰传播减速。

在不同气流速度区域内,窄通道内火焰传播与微重力下火焰传播的相似性也有不同。在低速近冷熄气流区,火焰距离通道壁面较近,热损失对火焰传播的影响显著,因而图3(a)中通道高度为14mm、12mm和10mm的模拟数据依次减小。其中,高度为12mm和14mm的通道中火焰传播速度与微重力数据符合得很好,而高度为10mm的通道中得到的数据偏低,最大火焰速度对应的气流速度则偏高。随着气流速度的增加,火焰将逐渐贴近材料表面,离开通道壁面的距离增大,这使得壁面热损失减小,但是在较高的通道内,由于剩余浮力流动的作用火焰依然会相当靠近通道上壁面,引起明显的热损失。因此,在高速气流区,图3(a)中通道高度为10mm时的火焰传播速度反而比其它两个通道内获得的数据高,且能很好地模拟微重力实验结果。上述分析也适合气流氧气浓度为18%时的实验结果(图3(b)所示)。此时,在低速近冷熄气流区,高度为10mm和12mm的通道中的火焰传播速度与微重力数据符合得比较好,14mm高度的通道中得到的火焰传播速度明显偏

高;在高速近吹熄区,两个高度较小的窄通道可以模拟微重力结果,14mm高度通道中火焰速度偏低。可以看出,氧气浓度减小时,为了模拟低速气流区的火焰传播,需要使用高度更小的窄通道。

随着通道高度和气流速度的变化,另外两种实验材料(字典纸和打印纸)表面火焰传播速度的变化趋势与餐巾纸的实验结果相近似。不过,由于材料性质特别是面密度的差异,相同气流速度条件下,三种材料的火焰传播速度不同。

### 3.2 可燃极限

可燃极限是材料防火性能的重要指标,它用来表示材料的可燃范围,即在一定氧气浓度下能够维持材料燃烧的极限(最低和最高)气流速度,以及气流速度一定时能够维持燃烧的极限(最低)氧气浓度。不同高度窄通道内得到的餐巾纸表面逆风火焰的可燃极限曲线如图4所示。如前文所述,微重力条

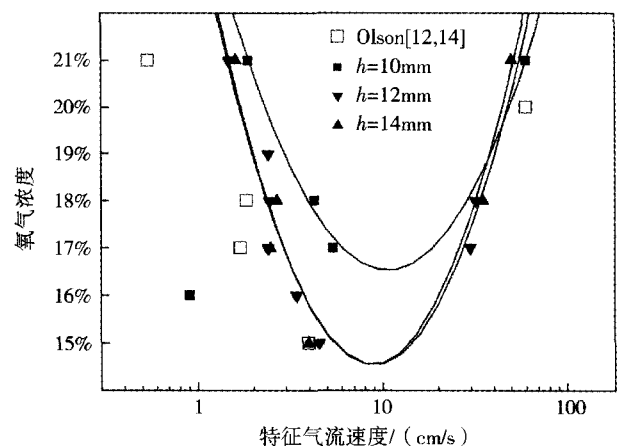


图4 窄通道内逆风传播火焰的可燃极限

件下材料表面的火焰传播有两种熄灭途径:低速气流时的冷熄和高速气流时的吹熄,相应地,从图4的窄通道实验模拟结果和 Olson 等<sup>[12, 14]</sup>的微重力实验结果中均可以观察到两个熄灭分支,其中冷熄分支对应的气流速度小于10cm/s,载人航天器舱内由于通风引起的气流速度通常在此范围内<sup>[2]</sup>。在地面常重力环境中,燃烧引起的自然对流速度估计至少可达到20cm/s<sup>[2]</sup>,因而只可能对吹熄分支进行实验观测。

高度为12mm和14mm的通道内测得的餐巾纸对应可燃极限曲线相互一致,也与微重力实验数据接近,说明使用它们可以对材料在微重力条件下的可燃特性进行模拟,而在10mm高度的通道中材料的可燃范围明显偏小,特别是低速冷熄极限分支远在其他通道模拟结果的上方。实际上,与微重力实验数据相比,窄通道模拟给出的材料冷熄分支均不同程度地向右偏移,即极限气流速度大于微重力下实验结果。这主要是因为窄通道燃烧实验中存在壁面热损失,而可燃极限附近的燃烧反应对热损失非常敏感。图4中“U”形可燃极限曲线的最低点被称为基本极限氧气浓度<sup>[15]</sup>,当氧气浓度低于该极限值时,无论气流速度大小,都不会出现稳定的火焰传播。可以看到,在12mm和14mm高度的窄通道中基本极限氧气浓度约为15%,与微重力实验的观测结果<sup>[12]</sup>相同。对另外两种实验材料(字典纸和打印纸)在不同高度窄通道内的可燃极限进行观测,实验结果进一步证实了上述发现。

### 3.3 浮力流动速度分析

通过数值模拟,可得到常重力和微重力条件下窄通道内垂向气流速度的分布。以10mm高度通道中燃料上方1.7mm处的情况为例(图5),可以看到,不同重力时垂向气流速度的量级均为5cm/s,常重力下,随着强迫气流速度的增大垂向速度先减小再增大,微重力下,垂向速度则随强迫气流速度的增大而增大;强迫气流速度增大时,微重力和常重力下的垂向气流速度最大值逐渐靠近。在微重力环境中,浮力引起的自然对流基本消失,垂向流动主要由燃烧产生的热膨胀引起,因此常重力与微重力下垂向气流速度的差值即为浮力流动速度。窄通道内浮力流动速度的典型分布如图6所示。随着强迫气流速度的增大,浮力速度逐渐减小,最大值约为5cm/s,当强迫气流速度为15cm/s时,浮力速度约为1.5cm/s。

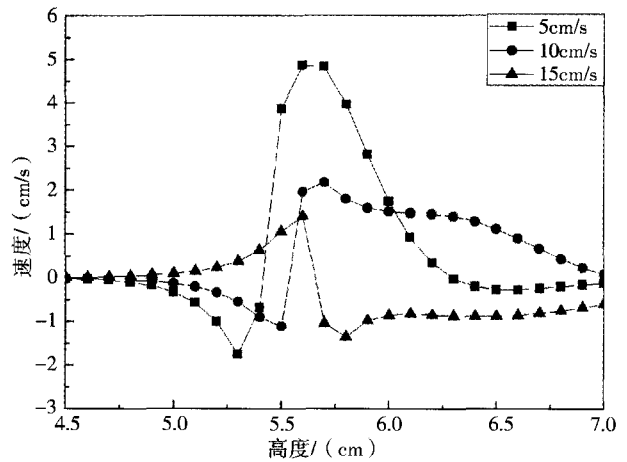


图5 强迫气流速度不同时,常重力和微重力下10mm高度通道内垂向气流速度的典型分布

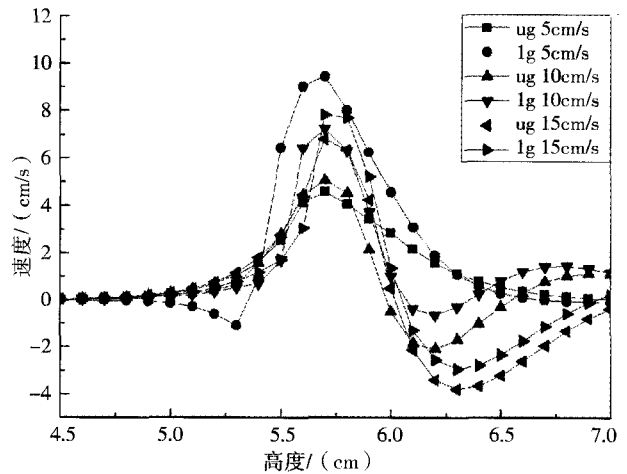


图6 强迫气流速度不同时10mm高度通道内浮力流动速度的典型分布

Hirano 等<sup>[16]</sup>估计了非受限空间中由燃烧引起的自然对流速度,约为30cm/s,而根据 Sacksteder 和 T'ien<sup>[17]</sup>给出的竖直管道中火焰诱导的浮力流动速度公式,估算出浮力速度约为20cm/s,都显著大于窄通道内的浮力流动水平。

## 4 结论

水平窄通道为微重力环境中材料燃烧特性的地面模拟提供了一种可行的实验方法。研究表明,窄通道内热薄材料表面火焰传播的主要特征与微重力实验结果一致,即可划分为气流速度较低时的近冷熄区(特征气流速度小于15cm/s~20cm/s)和高速气流时的近吹熄区(特征气流速度大于15cm/s~20cm/s)两个区域,利用三个高度(10mm, 12mm和14mm)的窄通道可分别对不同气流速度区的微重力火焰传播进

行模拟;同时,使用高度为 12mm 和 14mm 的通道可以模拟材料在微重力条件下的可燃特性,获得的基本极限氧气浓度也与微重力实验结果相同;窄通道中火焰产生的浮力流动速度的最大值约为 5cm/s,与常规实验通道(高度较大)相比,窄通道内的自然对流在很大程度上受到限制,因而能够提供近似的微重力条件。◇

### 参 考 文 献

- [1] Friedman R. Fire safety in spacecraft. *Fire and Materials*, 1996, 20: 235-243.
- [2] Friedman R, Ross H D. Combustion Technology and Fire Safety for Human-crew Space Missions. In: Ross H D. ed. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. Academic Press, San Diego, 2001: 525-562.
- [3] 张夏, 胡文瑞. 载人航天器的火灾安全问题. *载人航天*, 2006, 4: 4-11/25.
- [4] Ivanov A V, Balashov Y V, Andreeva T V, Melikhov A S. Experimental verification of material flammability in space. *NASA CR-1999-209405*, 1999.
- [5] Olson S L, Miller F J, Wichman I S. Characterizing fingering flamelets using the logistic model. *Combustion Theory and Modelling*, 2006, 10: 323-347.
- [6] Olson S L, Miller F J, Jahangirian S, Wichman I S. Flame spread over thin fuels in actual and simulated microgravity conditions. *Combustion and Flame*, 2009, 156: 1214-1226.
- [7] 张夏. 不同重力下有限空间内固体表面逆风火焰传播的实验与理论研究. 中国科学院力学研究所博士后研究报告, 2006.
- [8] 张夏. 不同重力下窄通道内薄材料表面的火焰传播. *工程热物理学报*, 2008, 29: 347-350.
- [9] Frey A E, T'ien J S. A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics. *Combustion and Flame*, 1979, 36: 263-289.
- [10] Long Y, Wichman I S. Theoretical and numerical analysis of a spreading opposed-flow diffusion flame. *Proceedings of the Royal Society*, 2009, 465: 3209-3238.
- [11] Blasi C D. Dynamics of concurrent flame spread over a thin charring solid in microgravity. *Fire and Materials*, 1998, 22: 95-101.
- [12] Olson S L. Mechanisms of microgravity flame spread over a thin solid fuel: oxygen and opposed flow effects. *Combustion Science and Technology*, 1991, 76: 233-249.
- [13] Olson S L, Ferkul P V, T'ien J S. Near-limit spread over a thin solid fuel in microgravity. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1988, 22: 1213-1222.
- [14] Olson S L. The effect of microgravity on flame spread over a thin fuel. *NASA Technical Memorandum 100195*, 1987.
- [15] T'ien J S. Diffusion flame extinction at small stretch rates: the mechanism of radiation loss. *Combustion and Flame*, 1986, 65: 31-34.
- [16] Hirano T, Noreikis 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.
- [17] Sacksteder K R, T'ien J S. Buoyant downward diffusion flame spread and extinction in partial-gravity accelerations. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1994, 25: 1685-1692.

## A Ground-based Experimental Method for Solid Material Flammability Simulation in Microgravity Environment

WANG Shuangfeng, XIAO Yuan

(Key Laboratory of Microgravity, China Academy of Sciences, Beijing 100090, China)

**Abstract:** The flame spread characteristics over thermally thin solid materials and the flammability limits of such materials have been investigated in horizontal narrow channels by experimental measurements and numerical simulations. The mechanism of narrow channel device to produce a microgravity environment is discussed. For the low forced flow velocities typically expected in space facilities, flame spread characteristics in microgravity can be effectively reproduced in narrow channels with height of 10~14 mm. Moreover, the measured flammability data in the narrow channels are close to those obtained in microgravity environment. The maximum buoyant velocity is estimated to be about 5 cm/s in the narrow channels. Compared with typical normal gravity test channel with relatively large height, buoyant effect is essentially suppressed. Consequently, a simulated microgravity environment can be produced with the horizontal narrow channels.

**Keywords:** Flame Spread; Microgravity; Solid Material; Ground Simulation; Fire Safety