

微重力下热薄材料燃烧特性的窄通道实验研究

肖 原^{1,2}, 胡 俊², 王双峰¹, 赵建福¹

(1. 中国科学院微重力重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190;
2. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 利用高度分别为 10 mm, 12 mm 和 14 mm 的水平窄通道对微重力环境下热薄材料表面的火焰传播、材料的可燃极限进行了地面实验模拟研究。在环境氧气浓度为 18% 和 21%, 气流速度为 0–50 cm/s 条件下, 窄通道模拟实验结果与已有微重力实验结果的对比分析表明: 气流速度小于 15–20 cm/s 时, 高度为 12 mm 和 14 mm 的窄通道能较好模拟微重力条件下材料表面的火焰传播, 气流速度大于 15–20 cm/s 时, 高度为 10 mm 的通道能较好模拟; 高度为 12 mm 和 14 mm 的窄通道能够模拟热薄材料的可燃极限曲线, 而高度为 10 mm 的通道模拟的可燃极限曲线则出现一定偏差。分析认为, 窄通道能够有效地限制浮力对流, 进而提供模拟微重力条件下材料燃烧特性的实验环境, 通道内的剩余浮力对流和通道壁面热损失可能是造成材料燃烧特性定量差别的主要原因。

关键词: 火焰传播; 微重力; 地面模拟; 热薄材料

中图分类号: V524.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2010)07-1877-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.07.028

A Narrow Channel Experimental Study on Flammability Characteristics of Thermally Thin Fuels under Simulated Microgravity Conditions

XIAO Yuan^{1,2}, HU Jun², WANG Shuang-feng¹, ZHAO Jian-fu¹

(1. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The flame spread over thermally thin solid material surfaces and the flammability limits of such material have been experimentally investigated in narrow channels with height of 10 mm, 12 mm and 14 mm, which are used to produce simulated microgravity conditions in laboratory. The experimental results under conditions of flow velocity of 0–50 cm/s and oxygen concentration of 18% and 21% are compared with those from previous tests conducted under the microgravity condition. For flow velocities less than 15–20 cm/s, flame spread characteristics under microgravity condition can be effectively reproduced in narrow channels of 12 mm and 14 mm height, moreover, for flow velocities greater than 15–20 cm/s, flame spread rates under the microgravity can well be simulated by flames spreading in the 10-mm-height channel. In narrow channels with height of 12 mm and 14 mm, the measured flammability map is found close to that obtained at microgravity, whereas the flammability boundary obtained in the 10-mm-height channel deviate from the microgravity case. The experiments show that the buoyant convection is suppressed to a great degree in narrow channels, consequently in which a simulated microgravity environment can be produced. The results also indicate some quantitative differences between observations under simulated and actual microgravity conditions, and these diversities in quantities may be attributed to the effects of residual buoyant convection in narrow channels and heat loss on channel walls.

Key words: Flame spread; Microgravity; Ground-based simulation; Thermally thin material

0 引 言

载人航天器舱内存在着发生火灾的三个要素,

即氧气、可燃材料和点火源, 如果处理不当则有可能出现火灾事故。历史上也确实发生过多载人航天器火灾事故, 并造成严重后果^[1-3]。因此, 防火安全

问题一直受到各航天大国的高度重视^[3-5]。

为了预防载人航天器火灾的发生,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。绕地球飞行的载人航天器处于微重力(通常小于 $0.01 g$, g 为地球表面重力加速度)状态,该状态下对常重力燃烧过程影响较大的浮力对流基本消失,使得材料的燃烧特性明显不同于常重力情况,因此不能不加验证地把地面上得到的材料防火特性照搬到载人航天器防火安全中,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,这些研究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,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,有必要发展能够在地面实验室中从功能上模拟微重力燃烧过程的方法。为此,俄罗斯航天研究部门首先提出了通过减小实验空间尺寸限制浮力对流的思路,并利用窄通道对微重力燃烧过程进行模拟^[2,6]。对条状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。最近,国内学者通过实验和数值模拟进一步研究了窄通道内薄纸张表面逆风火焰传播的特性^[7],结果表明,竖直放置的窄通道不能有效地限制浮力对流,而在高度为 10 mm 的水平窄通道内,随着强制气流速度增大,材料表面的火焰传播速度首先增大然后减小,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同,说明水平窄通道可以在很大程度上限制浮力对流。

已有研究说明,对于微重力下的材料燃烧过程,水平窄通道是一种很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、影响模拟准确性的主要因素等。本文在前人研究基础上,对水平窄通道内热薄材料表面的逆风火焰传播、材料可燃特性等进行了实验观测,分析了窄通道高度、强迫气流

速度、环境气氛和材料参数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,并讨论了窄通道功能模拟的主要机理和误差来源。

1 实验系统

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 900 mm 、宽 360 mm 的水平通道,高度可在 $10\text{--}14\text{ mm}$ 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。氧/氮混合气按照指定流量比例在流量计的控制下进行充分混合后向整流段供应,以在实验段内产生需要的流动和气氛条件。其中,气体流量较小(小于 30 L/s)时,使用质量流量控制器进行控制,流量误差为其最大量程的 1% ;流量较大(大于 30 L/s)时,使用转子流量计,流量误差为其最大量程的 2.5% 。实验中使用的氧/氮混合气有两种,氧气浓度分别为 21% 和 18% ,实验段内的气流平均速度可在 $0\text{--}50\text{ cm/s}$ 范围内调整。固定试样的试样架由不锈钢窄条组成并通过螺栓进行连接,其高度可以通过螺母进行调节。

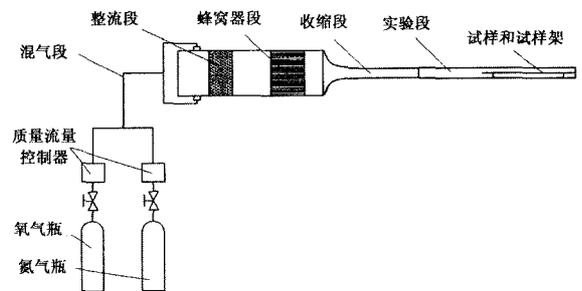


图 1 窄通道实验系统示意图

Fig.1 Sketch of narrow channel facility

实验燃料为两种热薄材料:(1)餐巾纸,厚度 0.062 mm ,半厚度面密度 10.9 g/m^2 ,宽度有 25 mm 和 35 mm 两种,长度 255 mm ;(2)字典纸,厚度 0.058 mm ,半厚度面密度 18.1 g/m^2 ,长度和宽度与第一种材料相同。为保证实验结果的重复性,所有试样在实验前均经过干燥处理。

实验步骤如下:首先利用双面胶带,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,用两台数码摄像机(Sony DCR-TRV900E)同时从顶面和侧面记录试样点燃、火焰顺风传播或熄灭的过程,用于进一步的分析处理,图像记录速率为 25 帧/s。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。分析表明,在试样的中间部分火焰保持稳定传播,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。

2 实验结果分析与讨论

2.1 火焰传播速度

不同高度 ($h = 10, 12, 14 \text{ mm}$) 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 $V_c (= V_f + V_g, V_g$ 为气流平均速度) 的变化如图 2 所示,其中图 2(a) 是环境氧气浓度为 21% 时的实验结果,图 2(b) 是环境氧气浓度为 18% 时的结果,图中也给出

了 Olson 等人^[8-9] 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 2 中的结果说明,窄通道可以有效地抑制浮力对流,从而提供模拟的微重力条件。微重力条件下,热薄材料表面的火焰在气流速度较小时会因为辐射热损失过大而熄灭(冷熄)^[10],在气流速度较高时,燃烧反应的停留时间减小,反应过程不能完成,火焰也将熄灭(吹熄)^[11];与两种熄灭机理相对应地,图 2 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 ($V_c < 15 - 20 \text{ cm/s}$) 和高速近吹熄区 ($V_c > 15 - 20 \text{ cm/s}$)。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。

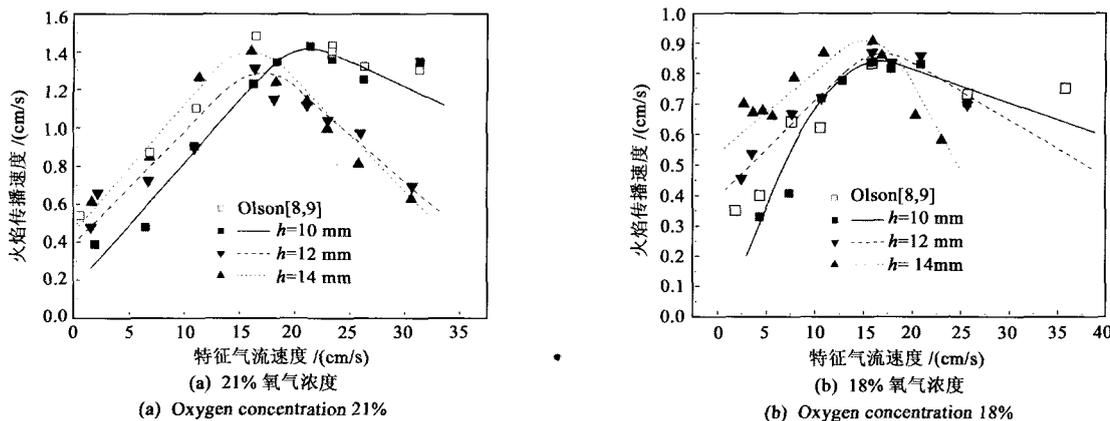


图 2 不同高度通道内餐巾纸火焰传播速度随特征气流速度变化曲线图

Fig. 2 Flame spread rates over napkin in narrow-channels with different heights as a function of characteristic relative velocity

图 2(a) 所示结果表明,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。显然,高度较小的窄通道对浮力对流的限制作用更强,但是通道高度减小时火焰向通道壁面的传导热损失增刁;高度较大的通道内火焰向通道壁面的热损失较小,但是通道内残存浮力对流的强度增大。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 2(a) 中通道高度为 14 mm, 12 mm 和 10 mm 的模拟数据依次减小。其中,高度为 12 mm 和 14 mm 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 10 mm 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 2(a) 中通道高度为 10 mm 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 2(b) 所示)。此时,在低速近冷熄气流

区,高度为 10 mm 和 12 mm 的通道中的火焰传播速度与微重力数据符合得比较好,14 mm 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,14 mm 高度通道中火焰速度偏低。对比图 2(a)和(b)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。

值得注意的是,虽然不同高度窄通道模拟得到的火焰传播速度随气流速度的变化规律有差异,它们给出的最大火焰传播速度相互符合得很好,也接近微重力实验结果。另外,在静止环境中,三个通道内的火焰在点燃后均不能形成稳定传播,将很快地自行熄灭,这与微重力实验^[9]和顺风火焰传播数值模拟研究^[12]的结论一致。

2.2 可燃极限

可燃极限是衡量材料防火性能的重要指标之一,它用来表示材料可燃范围,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 3 所示。如前文所述,微重力条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 3 的窄通道实验模拟结果和 Olson 等人^[8,10]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 10 cm/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^[5]。在地面常重力环境中,燃烧引起的浮力对流速度估计至少可达到 20 cm/s^[5],因而只可能对吹熄分支进行实验观测。

高度为 12 mm 和 14 mm 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 10 mm 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 3 中“U”形可燃极限曲线的最低点被称为基

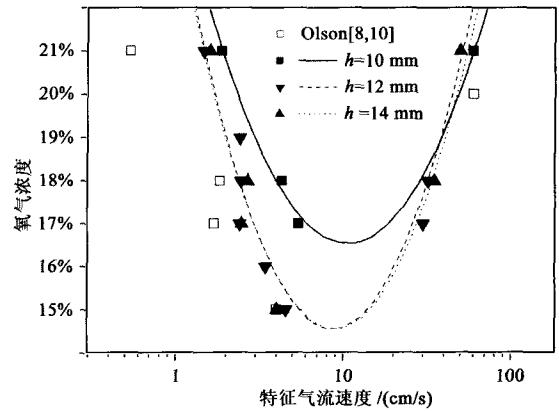


图 3 不同高度通道内餐巾纸表面逆风传播火焰的可燃极限

Fig.3 Flammability boundaries for flame spread over napkin in narrow-channels with different heights

本极限氧气浓度^[13],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 12 mm 和 14 mm 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^[8]相同。

2.3 材料性质的影响

在无限快速化学反应的假设条件下,理论分析^[14]得到的热薄材料表面火焰传播速度与气流速度无关,可表示为:

$$V_{f,thin} = \frac{\sqrt{2}\lambda_g}{\rho_s C_p \tau} \cdot \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \quad (1)$$

其中, λ_g 为气相热传导系数, ρ_s 为材料密度, τ 为材料的厚度, C_p 为固相比热, T_f 为火焰温度, T_v 为燃料气化温度, T_∞ 为环境温度。这表明,材料的面密度 (ρ_s 和 τ 的乘积)直接影响火焰速度,二者之间成反比关系。虽然实际的化学反应速率是有限大的,大量研究证明,公式(1)预测的火焰传播速度与材料面密度的关系是正确的,而 $V_{f,thin}$ 也适合作为火焰传播速度的参考值。

在高度为 14 mm 的窄通道中,两种实验材料(餐巾纸和字典纸)表面火焰传播速度随气流速度的变化如图 4 所示;为了对不同材料的窄通道实验结果和 Olson 等人^[8-9]的微重力实验结果进行比较,图中的火焰速度用公式(1)预测的 $V_{f,thin}$ 值无量纲化,得到无量纲火焰传播速度 $V_f/V_{f,thin}$ 。在计算 $V_{f,thin}$ 时,除了面密度通过实验测量选取外,根据航天飞机实验数据^[15]取 T_f 为 1500 K,其余参数选取自^[10]。可以看出,随着气流速度的增大,字典纸表面的火焰传

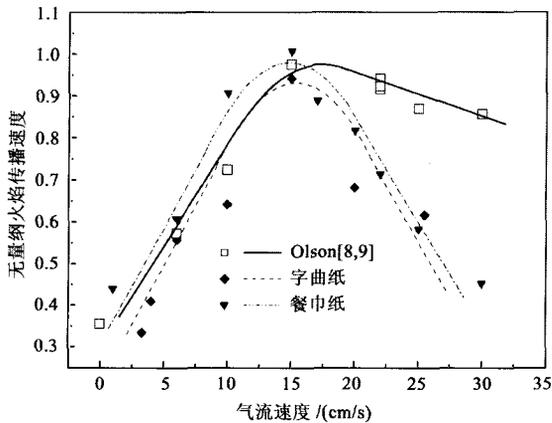


图4 高度为14 mm通道内两种实验材料的火焰传播速度比较

Fig.4 Comparisons of dimensionless flame spread rates over two sample in 14-mm-height narrow channel

播速度的变化同样呈现出微重力下特有的非单调规律,考虑了材料性质特别是面密度的影响后,对两种热薄材料得到的无量纲火焰速度的变化曲线相互符合得很好。同时,实验中也发现字典纸表面火焰传播的极限气流速度比餐巾纸要大,说明对于面密度较大的热薄材料,燃烧要在更有利的条件下才能维持,这与微重力条件的实验结果^[10]相一致。

2.4 讨论

在地面常重力条件下,由于存在密度差引起的浮力对流,材料表面火焰传播速度与强迫气流速度之间的关系并不明显^[7];而在微重力实验中,浮力对流几乎消失,火焰传播速度与气流速度的关系中出现了特有的低速近冷熄区^[4-6]。格拉晓夫数 ($Gr = L^3 g (\Delta\rho/\rho)/\nu^2$) 可以作为衡量燃烧问题中浮力对流作用的特征数,其中 L 为特征尺寸,在窄通道中认为是通道半高度, g 为重力加速度, $\Delta\rho/\rho$ 为气体密度相对变化率, ν 为动力粘性系数。Bhattacharjee 等人^[16]建议,火焰前沿附近区域的温度 T_e 应作为火焰诱导浮力对流的参考温度,根据文献^[10],本文在计算 Gr 时取 $T_e = 618$ K,同时各物性参数选为该温度下空气的参考值。对于高度为 10 mm, 12 mm 和 14 mm 窄通道内的热薄材料火焰,计算分别得到 $Gr_{\text{narrow}} \approx 464, 801$ 和 1273。大量传热实验研究表明^[17],当:

$$GrPr < 2000 \quad (2)$$

时,主要传热机理为气相热传导,浮力对流传热可以忽略。对于空气, $Pr \approx 0.7$, 因而从(2)式可以得到 Gr 的一个临界值, $Gr_{cr} \approx 2857$, 小于该值时浮力对流的作用

较小。三个通道内的 Gr_{narrow} 均小于 Gr_{cr} , 说明窄通道内的浮力对流在很大程度上受到限制。由于浮力对流的强度大大减小,窄通道内的实验环境能够模拟微重力条件下热薄材料燃烧的主要特征,包括火焰传播的低速近冷熄区、材料的可燃极限等。

从 Gr 的定义式出发,可得到通道高度的临界值:

$$L_{cr,h} = \left(\frac{v^2 Gr_{cr} \Delta\rho}{g\rho} \right)^{1/3} \quad (3)$$

计算得到 $L_{cr,h} \approx 9$ mm, 窄通道半高度大于 $L_{cr,h}$ 时,剩余浮力对流的影响逐渐增大。为了验证对 $L_{cr,h}$ 的估计,在高度为 16 mm, 18 mm 和 20 mm 的通道内进行了 21% 氧气浓度下的火焰传播实验,结果表明,16 mm 和 18 mm 高度的通道中火焰传播速度也与微重力数据符合得较好,而高度为 20 mm 的通道中得到的数据则明显偏离微重力数据。限于本文篇幅和研究重点,对这些实验结果不作详细的讨论。

由于通道高度较小,火焰向壁面的热损失可能会影响窄通道模拟微重力燃烧特性的准确程度。当通道高度小于由热平衡得到的气相热长度标尺 L_g 时,在壁面作用下火焰温度显著降低,甚至导致火焰熄灭。微重力环境 21% 氧气浓度条件下的薄纸张表面的火焰温度大约为 1500 K^[15], 当气流速度为 5 cm/s 时,由 $L_g \approx \alpha_g / V_f = 6$ mm, 其中 α_g 为气相热扩散率。因此在高度为 10 mm 即半高度为 5 mm 的窄通道内,火焰将由于较大的热损失而变得十分微弱,表现为图 2(a) 和图 3 中高度为 10 mm 的窄通道所对应较低的火焰传播速度和较小的可燃范围,此时将较小的通道高度记为 $L_{cr,l}$ 。如果氧气浓度降低,火焰温度随之降低。由于在近冷熄极限附近的火焰传播速度 V_f 较小, $V_f (= V_f + V_g)$ 对氧气浓度变化不敏感,气相热长度尺寸 L_g 也将随氧气浓度的降低而减小,通道半高度将大于气相热长度尺寸 L_g , 进而不会引发过大的热损失。因此,当氧气浓度降低时,如图 2(b) 所示,高度为 10 mm 的窄通道能够实现较好地模拟。

以上分析给出了微重力条件下热薄材料表面火焰传播窄通道模拟的两个临界通道高度,当通道半高度 $L > L_{cr,h}$ 时,剩余浮力对流将会对模拟效果产生一定影响;当 $L < L_{cr,l}$ 时,由火焰靠近壁面而引发的热损失将会降低窄通道的模拟准确度。本文实验将窄通道高度选取在两个临界高度之间时,能够比较有效地减少壁面热损失和剩余浮力对流对材料燃

烧特性的影响,进而实现对微重力下材料的模拟。

3 结 论

对不同高度(10 mm, 12 mm 和 14 mm)水平窄通道内热薄材料表面的火焰传播、材料可燃极限进行实验观测,分析了窄通道内材料燃烧特性与微重力条件下实验结果的相似性,以及窄通道功能模拟的机理和误差。研究得到的主要结论如下:

(1) 窄通道模拟得到的火焰传播速度随气流速度的变化趋势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 15 - 20 cm/s)和高速气流时的近吹熄区(特征气流速度大于 15 - 20 cm/s)两个区域;在不同的气流速度区域,窄通道模拟微重力下火焰传播的相似性不同,但利用三个高度的窄通道可分别对不同气流速度区内的微重力火焰传播进行模拟;另外,窄通道实验能够正确地给出微重力下材料表面的最大火焰传播速度,以及静止微重力环境中的材料燃烧特性。

(2) 使用高度为 12 mm 和 14 mm 的通道可以对材料在微重力条件下的可燃特性进行模拟,获得的基本极限氧气浓度(能够维持燃烧的最低氧气浓度)也与微重力实验结果相同,而在 10 mm 高度的通道中材料的可燃范围明显偏小。

(3) 与常规实验通道(高度较大)相比,窄通道内的浮力对流在很大程度上受到限制,因而窄通道实验能够模拟微重力环境中热薄材料燃烧的主要特征;通道内的剩余浮力对流和壁面热损失的作用,是造成窄通道功能模拟与微重力实验结果之间定量误差的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Friedman R. Fire safety in spacecraft[J]. Fire and Materials, 1996, 20: 235 - 243.
- [2] Ivanov A V, Ye V, Balashov T V, Andreeva T V, Melikhov A S. Experimental verification of material flammability in space [R]. NASA CR - 1999 - 209405, 1999.
- [3] 张夏. 载人航天器火灾安全研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35: 100 - 115. [ZHANG Xia. Progress in fire safety research for manned spacecraft[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 100 - 115.]
- [4] Friedman R, Sacksteder K R. Science and technology issues in spacecraft fire safety[R]. NASA TM - 88933, AIAA - 87 - 0467, 1987.
- [5] 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[M]. Academic Press, San Diego, 2001: 525 - 562.
- [6] Melikhov A S, Bolodyan I A, Potyakin V I. The study of polymer material combustion in simulated microgravity by physical modeling method[C]. Fifth International Microgravity Combustion Workshop. Cleveland, Ohio, 1999: 361 - 364.
- [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[D]. 北京: 中国科学院力学研究所博士后研究报告, 2006. [ZHANG Xia. Experimental and theoretical studies on the opposed-flow flame spread over solid surface in finite space under different gravities[D]. Beijing, Post-Doctoral Report, Institute of Mechanics, China Academic of Science, 2006.]
- [8] 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: 233 - 249.
- [9] Olson S L, Paul V F, T'ien J S. Near-limit spread over a thin solid fuel in microgravity[J]. Twenty-Second Symposium on Combustion, 1988: 1213 - 1222.
- [10] Olson S L. The effect of microgravity on flame spread over a thin fuel [C]. NASA Technical Memorandum 100195, 1987.
- [11] Fernandez-Pello A C, Ray S R, Glassman I. Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration[J]. Eighteenth International Symposium on Combustion, 1981: 579 - 589.
- [12] Shin H Y, T'ien J S. Modeling concurrent flame spread over a thin solid in a low-speed flow tunnel[J]. Proceeding of Combustion Institute, 2000: 2777 - 2784.
- [13] T'ien J S. Diffusion flame extinction at small stretch rates: the mechanism of radiation loss[J]. Combustion and Flame, 1986, 65: 31 - 34.
- [14] De'Ris J N. Spread of a laminar diffusion flame[J]. Twelfth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1969: 241 - 252.
- [15] Olson S L, Kashiwagi T. Experimental observations of spot radiative ignition and subsequent three dimensional flame spread over thin cellulose fuel[J]. Combustion and Flame, 2001, 125: 852 - 864.
- [16] Bhattacharjee S, King M D, Takahashi S, Nagumo T, Wakai K. Downward flame spread over poly (methyl) methacrylate[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000(28): 2891 - 2897.
- [17] Ross H D. Basics of microgravity, microgravity combustion: fire in free fall[M]. San Diego Academic Press, 2001: 1 - 34.
- [18] Holman J P. Heat transfer (9th edition)[M]. McGraw Hill Education, 2002.

作者简介:肖原(1985 -),男,硕士,现从事燃烧及航天器防火工程研究。

通信地址:北京市海淀区北四环西路 15 号(100190)

电话:13521882470

E-mail: waterscar@sina.com