

窄通道内热薄燃料表面火焰传播特性研究

任 坦^{1,2} 王双峰¹ 胡 俊² 肖 原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 利用实验和数值模拟对微重力和常重力条件下高度为 14 mm 和 10 mm 的窄通道内热薄纸张表面火焰传播特性进行了研究。不同重力条件下窄通道内火焰传播速度随气流速度变化的规律符合得较好, 说明地面窄通道实验能够模拟微重力条件下材料表面火焰传播的主要特征。地面窄通道中浮力流动速度的最大值约为 5 cm/s, 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。对火焰传播过程中的热损失分析表明, 固相表面热辐射和气相热辐射对火焰传播的影响与气流速度有关。

关键词 火焰传播; 热薄材料; 微重力; 窄通道

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)09-1617-03

Study on Flame Spread Over Thermally Thin Fuels in Narrow Channel Apparatus

REN Tan^{1,2} WANG Shuang-Feng¹ HU Jun² XIAO Yuan¹

(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 paper has been investigated in narrow channels with height of 14 mm and 10 mm by combined use of experiments and numerical simulations. Good agreement was found between the flame spread rate data obtained in normal gravity and microgravity conditions, indicating that the narrow channel apparatus in normal gravity reproduced the main characteristics of microgravity flames. Compared with typical normal gravity test channel (the height was relatively large), buoyancy was largely suppressed in narrow channels, and the maximum buoyant velocity was suggested to be about 5 cm/s. Additionally, the present numerical results showed that the effects of solid and gas phase radiations on flame spread depend on the magnitude of forced flow velocity.

Key words flame spread; thermally thin fuel; microgravity; narrow channel

0 引 言

为了评估载人航天器火灾安全并更好地理解固体材料表面火焰传播过程, 国内外学者已经对典型热薄材料和热厚材料开展了一些微重力实验。为了对更广泛的材料进行研究, 特别是满足大量的工程试验需求, 俄罗斯航天研究部门提出通过减小实验空间尺寸限制浮力对流的思路, 利用窄通道对微重力条件下的燃烧过程进行模拟^[1]。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。

Zik 等^[2,3]研究了窄通道内宽试样热薄燃料的逆风火焰传播过程, 观察到手指状不稳定火焰, 并对火焰分裂的机理进行了分析。Olson 等^[4,5]对分裂

火焰开展了进一步研究, 发现地面窄通道中出现与微重力条件下相似的小火焰(flamelet), 因此认为窄通道可以提供模拟微重力火焰传播特性的实验环境。肖原等^[6,7]通过地面实验考察了窄通道内热薄和热厚材料的燃烧特性, 发现窄通道实验也可对微重力下材料的可燃极限进行模拟。

已有研究表明, 地面窄通道可以提供模拟微重力条件下材料燃烧主要特性的实验环境, 但对火焰传播过程中的流动和热损失特性的认识还很不全面, 对窄通道实验模拟微重力火焰传播的机理没有很好地进行解释。本文将通过落塔微重力实验与地面窄通道实验结果的对比, 同时利用数值模拟手段对窄

收稿日期: 2011-01-15; 修订日期: 2011-08-05

基金项目: 中国科学院空间科学预先研究项目资助

作者简介: 任 坦(1984-), 男, 河北保定人, 博士研究生, 主要从事微重力燃烧和载人航天火灾安全方面的研究。

通道内火焰传播中的流场和热损失进行分析, 讨论窄通道内火焰传播的特性以及模拟微重力条件下火焰传播特性的机制。

1 实验与数值模拟方法

窄通道地面实验系统和实验步骤如文献 [6] 和文献 [7] 中所述。微重力实验在中国科学院微重力重点实验室的落塔 (3.6 s 微重力时间, 微重力水平 $10^{-3}g$) 中进行, 实验装置 (图 1 所示) 主要组成部分与地面实验系统相同, 实验段尺寸为 400 mm 长, 150 mm 宽, 高度为 10 mm 和 14 mm, 实验所用气体为 21% 氧气/79% 氮气混合气, 实验段内气流平均速度可在 3~20 cm/s 范围变化。实验材料为半厚面密度 $10.9 g/m^2$ 的薄纸, 试样长 255 mm, 宽 25 mm。

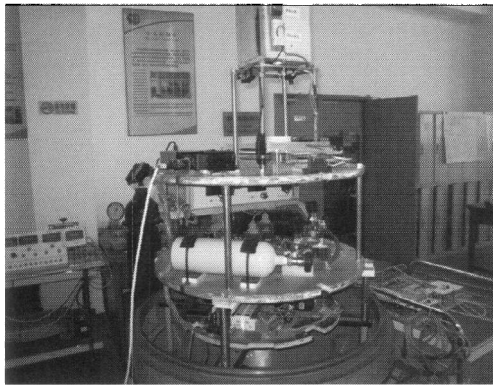


图 1 落塔实验装置
Fig. 1 Experimental package in drop tower

热薄燃料表面二维火焰传播的示意图如图 2 所示。气相反应为单步、不可逆的二阶 Arrhenius 反应, 反应动力学参数取自文献 [8], 固相模型为多步热解模型, 有关参数取自文献 [9] 和 [10]。数值计算模型采用 FDS 5 (Fire Dynamics Simulator Version 5) 内核, 其详细说明见文献 [11]。计算域的长度和宽度与实验段尺寸相同, 燃料位于通道中心位置。

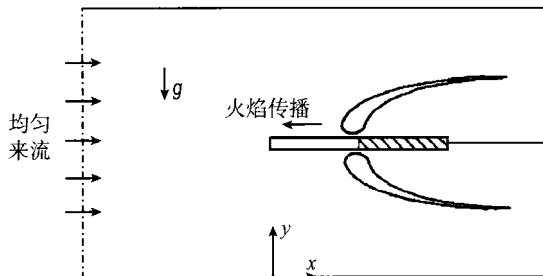


图 2 计算模型示意图
Fig. 2 Configuration of computational domain

2 结果与讨论

图 3 为 14 mm 高度通道内火焰传播速度随气流速度的变化。地面实验、微重力实验、数值模拟和 Olson^[12] 落塔实验给出的火焰速度大小以及它们的变化趋势相互符合。

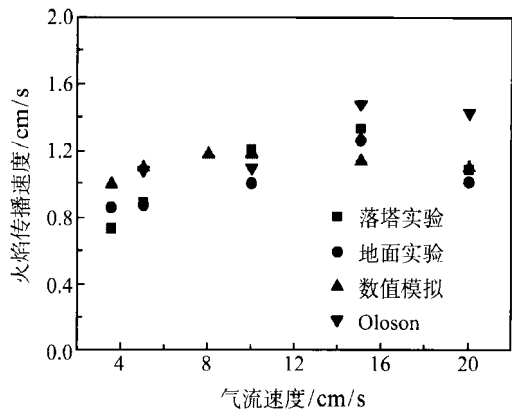


图 3 14 mm 高度通道内火焰传播速度随气流速度变化
Fig. 3 Flame spread rates in 14-mm-height channel as a function of flow velocity

本文数值模拟得到了常重力与微重力下通道内的垂向速度分布, 二者的差值为浮力流动速度。浮力流动速度的典型分布如图 4 所示。随着强迫气流速度减小, 浮力速度逐渐增大, 最大值约为 5 cm/s。Hirano 等^[13] 估计了不受限空间中由燃烧引起的浮力流动速度, 约为 30 cm/s, 而根据 Sacksteder 和 T'ien^[14] 给出的竖直管道中火焰诱导的浮力流动速度公式, 估算浮力速度约为 20 cm/s, 两个估计值都远大于窄通道内的浮力流动水平。

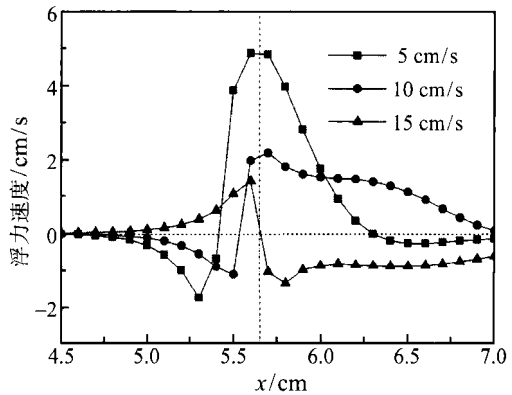


图 4 10 mm 高度通道内浮力速度的典型分布
Fig. 4 Typical distribution of buoyancy-induced velocities in 10-mm-height narrow channel

根据 Olson 等^[5]的分析公式, 可对火焰传播中固相表面的辐射热损失比进行计算, 而气相辐射热损失与燃烧热释放速率的比值则通过数值计算确定, 结果如图 5 所示。可以看出, 随着气流速度增大, 固相辐射损失比减小, 当气流速度较小时损失比可达 40% 左右, 气流增大到 20 cm/s 时, 损失比接近于 10%; 气相辐射损失比随气流速度的增大而逐渐增大。当气流速度较大时, 气相和固相辐射的作用逐渐接近, 而当气流速度较小时, 固相表面辐射远大于气相辐射, 在热损失中起主导作用。

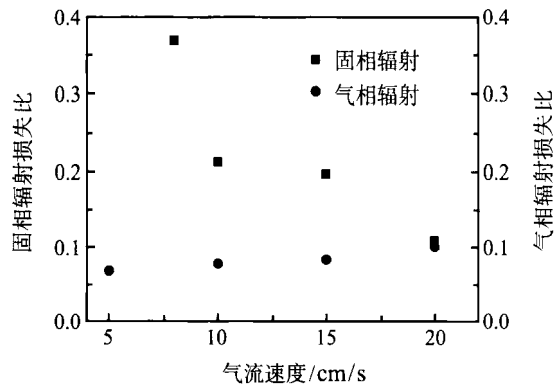


图 5 10 mm 通道内固相表面辐射损失比和气相辐射损失比随气流速度的变化

Fig. 5 Solid and gas phase radiative heat loss ratios in 10-mm-height channel as a function of flow velocity

3 结 论

(1) 地面窄通道实验和微重力实验中热薄材料表面火焰的传播速度符合较好, 表明地面窄通道实验能够模拟微重力条件下火焰传播的主要特征。

(2) 地面窄通道中浮力流动速度的最大值约为 5 cm/s, 与较大空间内的情况相比, 浮力对流受到显著抑制。

(3) 能量分析表明, 气流速度较低 (5 cm/s) 时, 固相表面辐射为火焰传播中热损失的主导因素, 当气流速度较高时, 气相辐射和固相表面辐射共同主导热损失。

参 考 文 献

[1] Ivanov A V, Balashov Y V, Andreeva T V, et al. Experi-

mental Verification of Material Flammability in Space [R]. NASA CR-1999-209405, 1999

- [2] Zik O, Olami Z, Moses E. Fingering Instability in Solid Fuel Combustion: the Characteristic Scales of the Developed State [J]. The Combustion Institute, 1998, 27: 2815-2830
- [3] Zik O, Olami Z, Moses E. Fingering Instability in Combustion [J]. Physical Review Letters, 1998, 81(18): 3868-3871
- [4] Olson S L, Miller F J, Wichman I S. Characterizing Fingering Flamelets Using the Logistic Model [J]. Combustion Theory and Modelling, 2006, 10: 323-347
- [5] Olson S L, Miller F J, Jahangirian S, et al. Flame Spread Over Thin Fuels in Actual and Simulated Microgravity Conditions [J]. Combustion and Flame, 2009, 156: 1214-1226
- [6] 肖原, 胡俊, 王双峰, 等. 微重力下热薄材料燃特性的窄通道实验研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1877-1882
XIAO Yuan, HU Jun, WANG Shuangfeng, et al. A Narrow Channel Experimental Study on Flammability Characteristics of Thermally Thin Fuels Under Simulated Microgravity [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7): 1877-1882
- [7] 肖原, 任坦, 王双峰, 等. 窄通道内热厚材料表面火焰传播的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(8): 1423-1426
XIAO Yuan, REN Tan, WANG Shuangfeng, et al. Flame Spread Over Thermally Thick Fuels in Narrow Channel Apparatus [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(8): 1423-1426
- [8] Frey A E, T'ien J S. A Theory of Flame Spread Over a Solid Fuel Including Finite-Rate Chemical Kinetics [J]. Combustion and Flame, 1979, 36: 263-289
- [9] Long Y, Wichman I S. Theoretical and Numerical Analysis of a Spreading Opposed-Flow Diffusion Flame [J]. Proceedings of the Royal Society, 2009, 465: 3209-3238
- [10] Blasi C D. Dynamics of Concurrent Flame Spread Over a Thin Charring Solid in Microgravity [J]. Fire and Materials, 1998, 22: 95-101
- [11] McGrattan K, Hostikka S, Floyd J, et al. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide [M]. Version 5. USA: NIST Special Publication, 1018-5, 2007
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Sacksteder K R, T'ien J S. Buoyant Downward Diffusion Flame Spread and Extinction in Partial-Gravity Accelerations [J]. The Combustion Institute, 1994, 25: 1685-1692