

不同高度通道内热薄燃料火焰传播特性的研究

胡俊¹, 任坦¹, 王双峰², 肖原^{1,2}

(1. 北京理工大学宇航学院飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

摘要: 为探究通道高度对逆风火焰传播特性的影响,采用实验、数值模拟、理论分析方法对微重力条件下不同高度通道内热薄燃料火焰传播特性进行了研究。通道高度分别为10mm, 14mm和60mm的短时落塔微重力实验结果表明,相同逆风气流速度时,随通道高度增加,火焰传播速度逐渐增大,且10mm, 14mm和16mm高度通道下的火焰长度比约为通道半高度比的二次方关系。数值模拟与理论分析表明,微重力条件下,随通道高度增加,火焰传播速度、火焰长度先增大再减小,呈非单调的变化趋势。燃烧热释放速率随高度变化呈非单调变化趋势,同火焰传播速度变化规律基本一致。

关键词: 微重力; 火焰长度; 火焰传播速度; 热释放速率

中图分类号: O643.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2012)07-0876-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2012.07.004

Research on Flame Spread over Thin Solid Fuels in Different Channel Heights

HU Jun¹, REN Tan¹, WANG Shuang-feng², XIAO Yuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, School of Aerospace Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to determine the effect of the channel height to flame properties, drop tower experiments, numerical simulation and theoretical analysis methods are used to study flame propagation properties over thin solid fuels in different height channels under the microgravity condition. The height of the drop tower microgravity experiments is 10, 14 and 60mm. The short time microgravity experiment results in 10, 14 and 60mm channel heights indicate that flame spread rates increase with the increase of channel heights under same flow velocities. The flame lengths ratio of 10 and 14mm channel heights is proportional to square of half channel height ratio. The results of numerical simulation and theoretical analysis show that flame spread rates and flame lengths are nonlinearly change with the increase of channel heights increase firstly, and then decreased. The heat release rate increased firstly and then decreased with the increase of channel heights, thus inducing to the nonlinear trend occurred in flame spread rate.

Key words: Microgravity; Flame length; Flame spreading rate; Heat release rate

0 引言

载人航天器中存在着发生火灾的三个要素,即氧气、可燃材料和点火源,如果处理不当则可能导致火灾事故。历史上也确实发生过多起载人航天器火灾事故,并造成严重危害^[1]。为了评估载人航天器

火灾安全和更好地理解固体燃料表面火焰传播过程,国内外学者开展了相关的微重力燃烧研究。

固体表面火焰传播是燃烧学中的经典问题。过去几十年,学者进行了大量的理论、实验和数值模拟研究。DeRis^[2]和Delichatsios^[3]基于无限化学反应的假设得出了热薄燃料火焰传播速度的理论分析解

和精确解,公式中火焰传播速度与气流速度无关。Olson^[4]实验研究表明,气流速度对火焰传播的影响分为三个区,近冷熄区,导热控制区和化学反应动力学控制区。其中 DeRis 和 Delichatsios 理论分析解位于 Olson 实验研究的导热控制区,火焰传播速度和气流速度无关。近几十年来,基于 DeRis 和 Delichatsios 的理论分析解,人们开展了进一步的实验和理论研究。

微重力实验主要在航天飞行器、探空火箭、抛物线飞机和落塔设施中进行。其中微重力燃烧实验,由于实验空间和可利用气体有限,所需的强制气流通常在实验通道中形成,通道截面尺寸一般很小,从而影响流场分布及火焰结构,进而对火焰传播速度和火焰长度产生较大的影响^[5]。因此研究通道尺寸效应对微重力实验结果的影响有重要的意义。

Shih 和 Tien^[6]数值模拟研究了顺风火焰传播特性在不同高度的通道下的变化规律。发现随通道高度降低,火焰长度、传播速度先增大再减小,呈非单调变化趋势。认为流场和壁面热损失的共同作用导致了以上现象。最近,Shih^[7]进一步数值模拟研究了顺风火焰随平行放置的纸间距变化的传播特性,纸间距从 50cm 趋近于 0 时,火焰长度、火焰传播速度随燃料间距降低同样呈现非单调变化趋势。已有研究表明通道高度对顺风火焰传播特性有较大的影响。

微重力条件下,当强制气流速度较小时,逆风火焰比顺风火焰发生的概率更大^[8]。过去开展的逆风火焰微重力实验,研究变量主要集中于燃料的厚度和形状、气流速度、氧气浓度、稀释气体类型和压力^[5]。而通道高度对逆风火焰长度、火焰传播速度等重要特性的影响规律尚未有明确的研究结果。

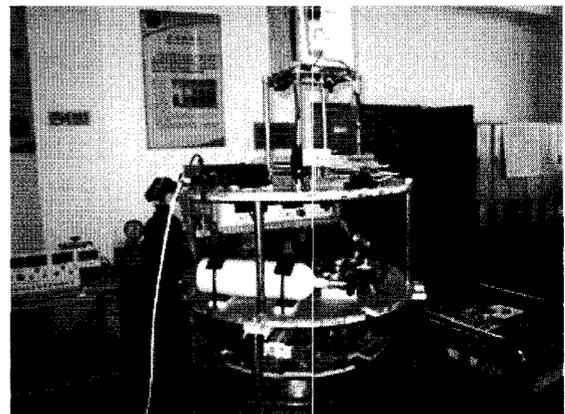
本文采用短时落塔微重力实验与数值模拟相结合的方法,研究通道高度对逆风火焰传播特性的影响。利用微重力落塔实验观测 10mm、14mm 和 60mm 高度通道内逆风火焰的火焰长度、火焰传播速度等特性的变化规律,并辅以数值模拟方法,系统验证、比较和分析上述变化产生的原因与机制,综合探讨通道高度对逆风火焰传播特性的影响规律。

1 实验研究

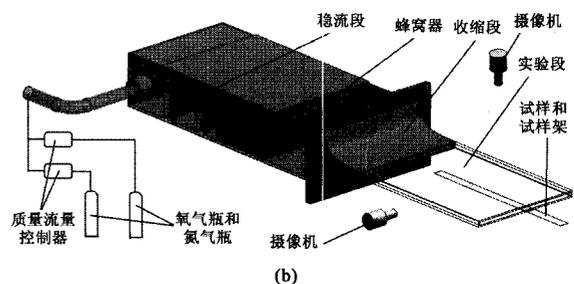
1.1 实验装置及方法

微重力实验在中国科学院微重力重点实验室的

落塔中进行,落塔微重力时间为 3.6s,微重力水平为 $10^{-3}g$ 。落塔实验装置如图 1(a)所示。不同通道实验系统示意图如图 1(b)所示,气流从左侧实验段流入,点火后的火焰从实验段右侧向左传播。实验装置主要包括主体部分和气体供给与控制系统。实验装置主体部分由整流段、收缩段和实验段组成,它的设计类似一个小型风洞,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。实验段尺寸为 400mm 长,150mm 宽,通道高度分别为 10mm、14mm 和 60mm。实验气源为工业纯氮和纯氧,通过质量流量控制器向整流段供应氧/氮混合气,混合气中氧气、氮气质量分数分别为 21%、79%。实验段内气流平均速度可在 3cm - 20cm/s 范围变化。综合考虑落塔微重力时间较短,实验纸张需较薄且易燃,选用了纸张品质较为均匀稳定的顺清柔餐巾纸作为固定的实验用纸,纸张半厚度面密度 $10.9g/m^2$,试样长 255mm,宽 25mm。为便于观察,实验段使用平板玻璃制作。



(a)



(b)

图 1 (a) 落塔实验装置(b) 不同通道实验系统示意图

Fig.1 (a) The drop tower package (b) The sketch map of the test system in different channels

实验步骤如下:将试验纸张通过双面胶固定在试验架上。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,用两台摄像机同时从顶面和侧面记录试样点燃、逆风火焰传播的过程。火焰传播速度通过火焰稳定传播后高速摄像照片读取,根据照片帧频时间及照片中火焰前缘的相对传播距离计算得到火焰传播速度。

1.2 实验结果

图 2 给出了微重力下不同高度通道内火焰传播速度结果。由图 2 可知,相同气流速度条件下,随通道高度增大,火焰传播速度逐渐增大。而 14mm 高度通道内,随气流速度增大,火焰传播速度先增大再减小,呈非单调趋势。

图 3 给出了 10mm、14mm 高度通道内微重力火焰图像。图 3(a)、(b)为通道高度 10mm、14mm,气流速度为 10cm/s 的微重力火焰图像,可以看出两种高度下均为蓝色火焰,火焰前缘保持均匀一致。图 3(c)、(d)为通道高度 10mm、14mm,气流速度为 15cm/s 的微重力火焰图像,可以看出两种高度下除前缘为蓝色外,火焰颜色均为橘黄色,表明此时由于供应的氧气增加,燃烧产生的 soot 增加导致火焰呈现橘黄色。火焰长度通过读取火焰照片来确定,将可见火焰前、后缘距离定义为火焰长度。火焰长度测量结果,气流速度为 10cm/s 时,通道高度 10mm、14mm 的火焰长度分别为 5.295mm、11.34mm;气流速度为 15cm/s 时,通道高度 10mm、14mm 的火焰长度分别为 14.355mm、27.66mm。可以看出,在相同气流速度下通道高度从 10mm 上升到 14mm 后,火焰长度增加了约 $\sqrt{1.4}$ 倍左右,表明火焰长度比约为通道半高度比的二次方关系。

从上述三种通道高度内火焰传播特性的实验结果看,随着通道高度增大,空间限制作用减小,参加化学反应的氧气量逐渐增大,火焰强度逐渐加大,对火焰燃烧、传播有增强作用。

由于实验条件限制,仅对三种通道高度进行了短时落塔微重力实验研究,通道高度的变化有较大跨度,为系统研究通道高度的影响,在与实验结果进

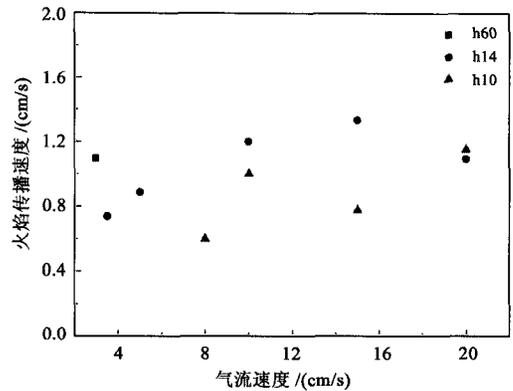


图 2 不同通道下火焰传播速度图

Fig. 2 Flame spread rates in different channel heights

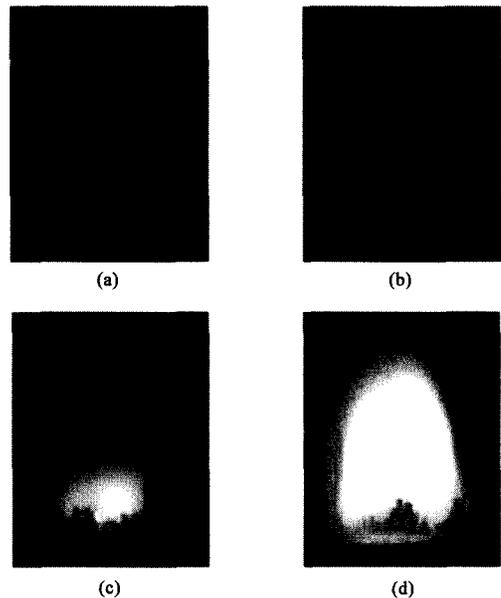


图 3 10mm 和 14mm 通道内气流速度 10cm/s 和 15cm/s 时的微重力火焰图像

Fig. 3 The photos of the microgravity flame in flow velocities of 10cm/s and 15cm/s under 10mm and 14mm channel heights

行比较验证的基础上,引入了数值模拟方法,缩小了通道高度变化跨度,进一步探究火焰长度和火焰传播速度随通道高度的变化规律。

2 数学模型

图 4 给出了微重力条件下受限通道内热薄燃料表面火焰传播的示意图。忽略重力影响,计算域取对称半域。计算域左边界为通道入口,上边界为通道壁面,右边界为出口,燃料放于计算域的对称边

界。均匀来流从计算域左端流入,火焰在燃料右端(来流下游)点火并向左端逆风传播。取平行于燃料表面的方向为 x 方向,垂直燃料表面方向为 y 方向,计算域内采用均匀网格,在 x 方向的网格间距 0.2mm,在 y 方向的网格间距 0.08mm。数值模拟通道高度分别为 10、14、20、30、40、60(mm)。

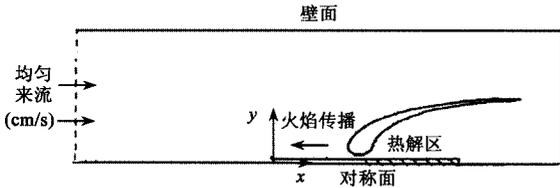


图 4 计算域内火焰传播示意图

Fig. 4 The sketch map of flame spread in model computation

数学模型包括气相模型和固相热解模型。气相模型采用单步、不可逆的二阶 Arrhenius 反应,反应动力学参数参考文献[9]。固体燃料为餐巾纸,成份为纤维素,分子式 $C_6H_{10}O_5$,固相模型为多步热解模型,反应示意图如图 5 所示,反应动力学参数和热物性参数参考文献[10]和[11]。数值计算方法采用 FDS 5(Fire Dynamics Simulator Version 5)开源程序,其详细说明见文献[12,13]。

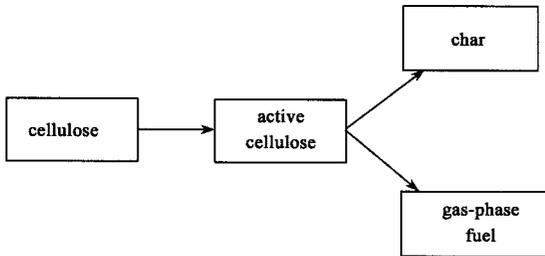


图 5 固相热解模型示意图

Fig. 5 The sketch map of solid phase pyrolysis model

3 结果与讨论

3.1 数值模拟结果

图 6 给出了 14mm 高度通道内火焰传播速度随气流速度的变化结果。比较微重力落塔实验、地面模拟实验^[1]、数值模拟和 Olson^[4]落塔实验给出的火焰传播速度值及变化趋势,可以发现,数值模拟和短时落塔微重力实验所得火焰传播速度值及变化趋势相近。其中地面模拟实验在高度为 12mm 和 14mm 的窄通道下进行,通过窄通道有效限制浮力

对流,进而提供能够近似模拟微重力条件下材料燃烧特性的实验环境。图 7 给出了微重力下 14mm 高度通道,气流速度 10cm/s 时沿燃料表面传播的火焰图像。其中图 7(a)为微重力落塔实验观测的火焰,图 7(b)为采用全计算域数值模拟得到的火焰图像。对比实验观测图像和数值模拟火焰图像,可以看出模拟结果与实验结果相似。

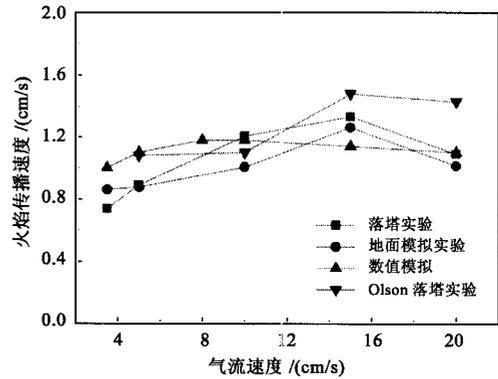


图 6 14mm 高度通道内火焰传播速度随气流速度变化

Fig. 6 Flame spread rates in 14mm height channel as a function of flow velocity

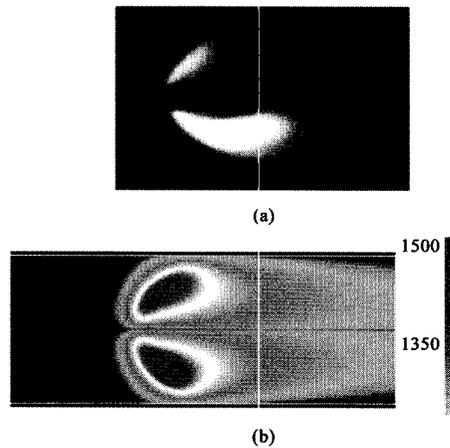


图 7 (a)实验火焰形态 (b)数值模拟火焰形态

Fig. 7 (a) The flame shape in test (b) The flame shape in simulation

图 8 给出了不同高度通道下, O_2 浓度 21% ,气流速度 5cm/s 时逆风火焰传播速度数值模拟结果与 Shih^[6]等顺风火焰传播速度数值模拟结果的比较。由图 8 可知,火焰传播速度随通道高度增加先增大再减小,在高度 30 mm 处达到最大值,呈现非单调的变化趋势,与 Shih 和 Tien^[6]数值模拟顺风火焰的

变化规律相似。但数值模拟的逆风火焰传播速度均小于 Shih 和 Tien^[6] 的数值模拟结果。已有研究^[6,14] 也发现部分气流条件下顺风火焰比逆风火焰燃烧更强烈,火焰传播速度更快的现象。

图 9 给出了不同高度通道下, O₂ 浓度 21%, 气流速度 5cm/s 时逆风火焰长度数值模拟结果与 Shih^[6] 等顺风火焰长度数值模拟结果的比较。通道高度从 10mm 增大到 60mm, 逆风火焰长度呈非单调的变化趋势, 在通道高度 40mm 时, 逆风火焰长度达到最大值。同 Shih 和 Tien^[6] 数值模拟结果相比, 火焰长度变化趋势相似, 但逆风火焰长度值均小于顺风火焰长度值。

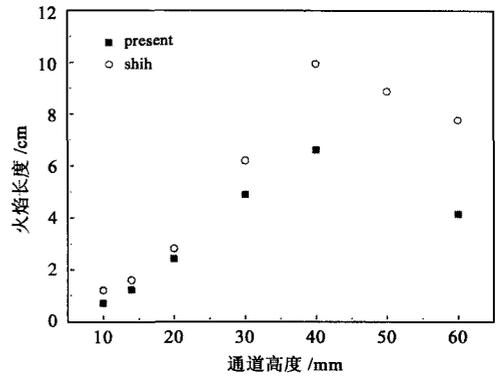


图 9 逆风模拟和 Shih^[6] 顺风模拟火焰长度的比较

Fig. 9 The comparison of numerical simulation flame lengths between upwind condition (present work) and downwind condition (shih^[6])

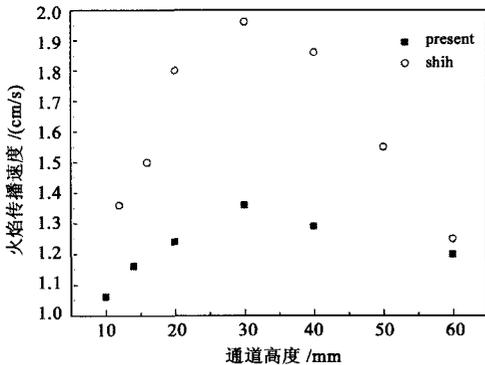


图 8 逆风模拟与 Shih^[6] 顺风模拟火焰传播速度的比较

Fig. 8 The comparison of numerical simulation flame spread rates between upwind condition (present work) and downwind condition (shih^[6])

已有研究表明^[5], 火焰向前传热机理影响火焰传播速度, 而火焰向前传热通过固相和气相来实现。固相传热的方式主要为固相热传导, 对于热薄燃料, 固相热传导的作用很小, 可以忽略。对于逆风火焰, 气相传热方式为气相热传导; 而对于顺风火焰, 气相传热方式为气相对流换热。

当坐标系建立在火焰面上, 火焰传播问题简化为稳态问题, 则气相热传导的热流密度为 $q_1 = \lambda_g (T_f - T_\infty) / L_g$, λ_g 为气相热传导系数, T_f 为火焰温度, T_∞ 为自由来流温度, L_g 为气相热扩散长度。对流换热的热流密度为 $q_2 = h(T_f - T_\infty)$, h 为对流换热系数。假定气相热扩散长度之外为自由来流温度 T_∞ , 假定 $T_f = 1500\text{K}$, $T_\infty = 300\text{K}$, 取参考温度为 $(T_f + T_\infty) / 2 = 900\text{K}$, 此时 $\lambda_g \approx 6.22 \times 10^{-2} \text{W}/(\text{m} \cdot$

$\text{K})$ ^[15]。 $L_g = \alpha_g / V_r$, $\alpha_g \approx 1.383 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ ^[15], V_r 取为 6cm/s 。取 $h \approx 60 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[15], 代入下式得:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\lambda_g}{hL_g} = \frac{\lambda_g V_r}{h\alpha_g} \approx 0.45$$

由上面计算结果可以看出, $V_r \approx 6\text{cm/s}$ 时, 气相热传导热流密度小于对流换热热流密度, 从而导致顺风火焰的强度比逆风火焰更强, 火焰传播速度更快, 火焰长度更长。

Bhattacharjee^[16] 等人研究认为单位时间内, 火焰高度范围内流过的氧气量等于燃料燃烧消耗的氧气量, 即:

$$\rho_g V_r L_h y_{O_2, \infty} \sim s \rho_s \tau V_f$$

其中, ρ_g 为气相密度, V_r 特征相对速度, 其大小为火焰传播速度 V_f 和气流速度 V_g 之和。 L_h 为火焰高度, $y_{O_2, \infty}$ 为来流氧气浓度, s 为化学反应当量比, $\rho_s \tau$ 为燃料半厚度面密度。

对于相同材料不同高度通道下, 氧气浓度和气流速度相同时, $\rho_g, y_{O_2, \infty}, s, \rho_s \tau, V_g$ 均为定值。由微重力实验和数值模拟结果可知 V_f 的量级约为 1cm/s , V_g 大于 V_f , 因此 V_r 可近似为 V_g , 此时火焰传播速度为:

$$V_f \sim \frac{\rho_g V_r L_h y_{O_2, \infty}}{s \rho_s \tau} \sim V_r L_h \sim V_g L_h \sim L_h$$

当火焰与通道壁面接触时, 火焰高度近似为通道半高度 L 。因此由上式可得 $V_f \sim L$, 此时火焰传播速度与通道半高度近似线性关系。

当火焰与通道壁面不接触时, 即火焰高度小于

通道半高度 L 时,

$$V_f \sim V_r L_h \sim V_r \frac{1}{5} \left(\frac{F}{y_{O_2, \infty}} \right) L_g \sim \frac{1}{5} \left(\frac{F}{y_{O_2, \infty}} \right) \alpha_g \sim \text{const}$$

其中 L_g 为气相热扩散长度, α_g 为气相热扩散系数。 $L_g = \alpha_g / V_r$, $F = (T_f - T_v) / (T_v - T_\infty)$, 相同材料不同高度通道下, 氧气浓度和气流速度相同时, L_g 、 F 、 $y_{O_2, \infty}$ 、 α_g 为定值, 此时火焰传播速度为定值, 与通道高度无关。

火焰传播速度与通道高度无关的结论基于不考虑辐射等热损失而得出的, 而随通道高度增大, 气相辐射热损失此时不可忽略^[17], 气相辐射逐渐增大, 从而导致维持火焰传播的能量逐渐减小, 火焰传播速度随通道高度增加而逐渐减小, 表现出如图 8 所示的下降趋势。

在整个火焰长度 L_f 内通过氧气扩散到达燃料表面的氧气量和消耗的燃料呈化学当量比关系, 即:

$$L_f \rho_g D (y_{O_2, \infty} - 0) / L_h \sim s \rho_s \tau V_f$$

D 为氧扩散系数, 相同材料不同高度通道下, 氧气浓度和气流速度相同时, ρ_g 、 D 、 $y_{O_2, \infty}$ 、 s 、 ρ_s 、 τ 均为常值, 此时火焰长度与火焰传播速度和火焰高度成正比, 即为: $L_f \sim V_f L_h$ 。当火焰与通道壁面接触时, $L_h \sim L$, 代入 V_f 的表达式得: $L_f \sim L^2$ 。此时火焰长度与通道半高度近似二次方关系。

当火焰与通道壁面不接触时, 即火焰高度小于通道半高度 L 时,

$$L_f \sim V_f L_h \sim V_f \frac{1}{5} \left(\frac{F}{y_{O_2, \infty}} \right) \frac{\alpha_g}{V_r} \sim \frac{V_f}{V_r} \sim \frac{V_f}{V_g + V_f}$$

其中 F 、 $y_{O_2, \infty}$ 、 α_g 为定值。火焰长度与火焰传播速度成正比, 与特征相对速度成反比。以上分析, 当火焰高度小于通道半高度 L 时, V_f 随通道高度增加而逐渐减小, 从而导致 L_f 随通道高度增加也逐渐减小。而考虑近似关系系数及热损失等影响因素, V_f 和 L_f 的峰值对应通道高度没有完全吻合。

通过以上理论分析, 发现相同材料不同高度通道下, 氧气浓度和气流速度相同时, 当火焰高度近似为通道半高度时, 火焰传播速度与通道半高度近似线性关系, 火焰长度与通道半高度近似二次方关系; 当火焰与通道壁面不接触, 火焰高度小于通道半高度 L 时, 考虑辐射等热损失的影响, 火焰传播速度随通道高度增加而逐渐减小, 火焰长度随通道高度增加也逐渐减小。考虑近似关系系数及热损失的影响,

火焰传播速度和火焰长度的峰值没有完全吻合。

3.2 热释放速率分析

Quintiere^[18] 和 Hirano^[19] 的研究认为逆风火焰靠近火焰前缘处会形成预混火焰。Quintiere^[18] 根据预混火焰的火焰速度公式推导出固体燃料表面火焰传播速度公式为

$$V_f = \frac{\text{热释放速率}}{\text{维持燃料达到点火温度的能量}}$$

当燃料不变时, 维持燃料达到点火温度的能量为定值, 则由公式可知, 火焰传播速度和热释放速率成正比。对于微重力条件下不同高度通道内逆风火焰传播问题, 上述结论是否适用, 前人没有对此进行研究。以下将分析逆风火焰热释放速率和火焰传播速率的关系。

图 10 给出了不同高度通道下 21% O_2 浓度, 气流速度 5cm/s 时逆风火焰热释放速率的分布情况。图 10 中在时刻 1.5s 之前为模型点火时间, 燃烧热释放速率处于波动状态。当超过 2.5s 后, 火焰基本处于稳定状态, 此时对应的各个通道的热释放速率基本保持恒定。比较不同高度通道下的热释放速率的变化规律, 发现随通道高度增大, 热释放速率先增大再减小, 在通道高度 30mm 时达到最大值, 与数值模拟逆风火焰传播速度最大值对应的通道高度相同。

图 11 对比了热释放速率和火焰传播速度结果, 其中热释放速率为火焰稳定后的平均值, 并对热释放速率作无量纲处理, 以所有通道中热释放速率的最大值作为 1 处理。由图 11 可以看出, 火焰传播速度和热释放速率随通道高度的变化规律相似, 热释放速率和火焰传播速度随通道高度增大先增大再减小, 在高度 30mm 时达到最大值, 表明火焰传播速度与热释放速率成正比。因此分析产生不同高度通道内火焰传播速度非单调变化规律的原因是热释放速率的非单调变化。

4 结论

(1) 短时落塔微重力实验结果表明: 在 10、14、60mm 三种通道高度下, 相同逆风气流速度时, 随通道高度的增大, 火焰传播速度逐渐增大。比较 10、14mm 高度通道下两个气流速度时的火焰长度结果, 发现火焰长度比约为通道半高度比的二次方关系。

(2) 综合理论分析与数值模拟对通道高度系统

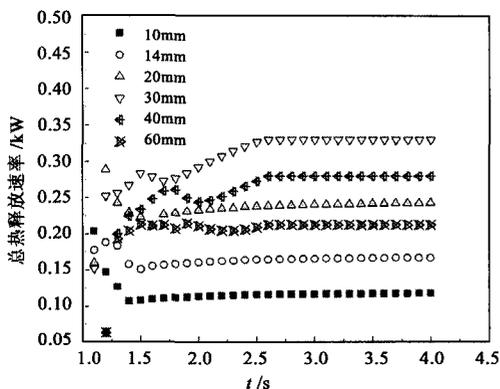


图 10 不同高度通道内的热释放速率分布
Fig. 10 The distribution of total heat release rate in different height channels

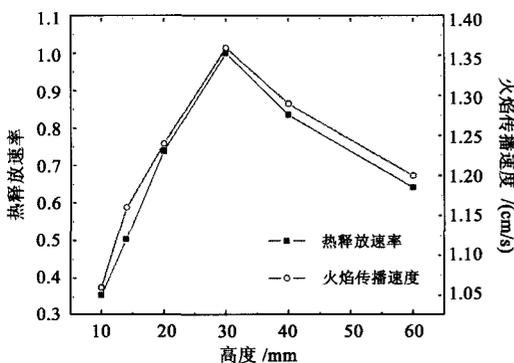


图 11 热释放速率和火焰传播速度分布
Fig. 11 The distribution of total heat release rate and flame spread rates

变化的研究表明:微重力条件下,随通道高度增加,火焰传播速度、火焰长度先增大再减小,呈非单调的变化趋势,变化规律与顺风火焰的相似,但火焰传播速度、火焰长度值均小于顺风火焰的值。

(3) 相同材料不同高度通道下,氧气浓度和气流速度相同时,当火焰高度近似为通道半高度,火焰传播速度与通道半高度为线性关系,火焰长度与通道半高度为二次方关系;当火焰高度小于通道半高度,考虑辐射等热损失的影响,火焰传播速度和火焰长度随通道高度增加而逐渐减小。

(4) 不同高度通道内的燃烧热释放速率随高度增大先增大再减小,呈非单调的变化趋势,同火焰传播速度变化规律基本一致。

参 考 文 献

[1] 肖原,胡俊,王双峰,等. 微重力下热薄材料燃烧特性的窄

通道实验研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(7):1877 - 1882.
[Xiao Yuan, Hu Jun, Wang Shuang-feng, et al. A narrow channel experimental study on flammability characteristics of thermally thin fuels under simulated microgravity conditions[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7):1877 - 1882.]

[2] DeRis J. Spread of a laminar diffusion flame[J]. Symposium (International) on Combustion, 1969, 12(1): 241 - 252.

[3] Delichatsios M A. Exact solution for the rate of creeping flame spread over thermally thin materials[J]. Combustion Science and Technology, 1986, 44(5): 257 - 267.

[4] 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(4): 233 - 249.

[5] Ross H D. Microgravity combustion; fire in free fall [M]. Cleveland; Academic press, 2001.

[6] Shih H Y, T'ien J S. Modeling wall influence on solid-fuel flame spread in a flow tunnel[C]. AIAA - 97 - 0236, 1997.

[7] Shih H Y. Flame spread and interaction in an array of thin solids in low-spread concurrent flows [J]. Combustion Theory and Modelling, 2009, 13(3): 443 - 459.

[8] Nakamura Y, Kashiwagi T, Mcgrattan K B, et al. Enclosure effects on flame spread over solid fuels in microgravity [J]. Combustion and Flame, 2002, 130(4): 307 - 321.

[9] 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.

[10] Long Y, Wichman I S. Theoretical and numerical analysis of a spreading opposed-flow diffusion flame [J]. Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2009, 465(2110): 3209 - 3238.

[11] Blasi C D. Dynamics of concurrent flame spread over a thin charring solid in microgravity [J]. Fire and Materials, 1998, 22(3): 95 - 101.

[12] Mcgrattan K, Hostikka S, Floyd J, et al. Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide [EB/OL]. 2007 [2012]. http://fds-smv.googlecode.com/svn/trunk/FDS/trunk/Manuals/All_PDF_Files/FDS_Technical_Reference_Guide.pdf.

[13] Mcgrattan K, Hostikka S, Floyd J, et al. Fire dynamics simulator (version 5) user's guide [EB/OL]. 2007 [2012]. http://fds-smv.googlecode.com/svn/trunk/FDS/trunk/Manuals/All_PDF_Files/FDS_User_Guide.pdf.

[14] Kumar A, Shih H Y, T'ien J S. A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids [J]. Combustion and Flame, 2003, 132(4): 667 - 677.

[15] 陶文铨. 传热学 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006: 4 - 547.

- [16] Bhattacharjee S, Takahashi S, Wakai K, et al. Correlating flame geometry in opposed-flow flame spread over thin fuels [C]. The Combustion Institute 33, Beijing, China, 2010.
- [17] 任坦, 王双峰, 胡俊, 等. 窄通道内热薄燃料表面火焰传播特性研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9):1617 - 1619. [Ren Tan, Hu Jun, Wang Shuang-feng, et al. Study on flame spread over thermally thin fuels in narrow channel apparatus[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1617 - 1619.]
- [18] Quintiere J G. Fundamentals of fire phenomena [M]. West Sussex: John Wiley & Sons, LTD, 2001.
- [19] Hirano T. Combustion science for safety [C]. The Combustion Institute 29, Sapporo, Japan, 2002.

作者简介:胡俊(1972-),男,副教授/博士,主要从事流动与燃烧、飞行器气动设计及计算流体力学相关研究。

通信地址:北京理工大学宇航学院(100081)

电话:(010)68918781

E-mail:hujun@bit.edu.cn

(编辑:沃云峰)