不同重力下薄燃料表面火焰传播的相似性

张 夏[1], 于 勇[2]
(1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080; 2. 北京理工大学宇航科学技术学院, 北京 100081)

摘 要: 利用数值模拟方法,研究了不同重力下有限空间内薄燃料表面逆风传播火焰的相似性. 结果表明,通道高度的变化,通过影响通道间的流场和壁面的热损失,来影响通道内燃料表面的火焰传播,因此用水平窄通道模拟微重力下大空间内的火焰传播,只能得到定性相似但定量差别较大的结果,这与他人的实验结果一致. 在微重力和常重力下的窄通道中,当 Grashof准数足够小时 (200可以作为一个定性参考值),其中的自然对流基本可以忽略,不同重力下窄通道中的火焰传播过程基本相似.

关键词: 微重力; 薄燃料; 火焰传播; 地面模拟; 相似性
中图分类号: TK401 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-8740(2008)04-0289-06

Comparability of Flame Spread over Thin Solid Fuel Surface Under Different Gravities

ZHANG Xia[1], YU Yong[2]
(1. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. School of Aerospace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The comparability of opposed-flow flame spread over thin solid fuels in finite spaces in different gravities was numerically simulated. The results show that the variation of the channel height affects the velocity profile of flow field in the channel and heat loss at the wall of the channel, and further, flame spread over solid fuels in the finite spaces. Therefore, using a horizontally narrow channel in normal gravity to simulate flame spread in large space in microgravity can only yield qualitatively similar but quantitatively different results. Which is consistent with the previous experimental results. In the process of flame spread in the narrow channel in normal gravity and microgravity, when Grashof number is low enough (200 can be taken as a qualitative reference value), natural convection can be ignored and flame spread processes in different gravities will be comparable.

Keywords: microgravity; thin solid fuel; flame spread; ground simulation; comparability

理论上,固体表面的火焰传播是燃烧学中的经典问题. 在载人航天的历史上,也确实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. 根据传播方向与空气流动的相对方向,火焰传播可以分为逆风传播和顺风传播两大类. 已有研究[3]表明,微重力下的低速气流环境中,发生逆风火焰的可能性更大,笔者将其作为研究对象.

薄燃料表面逆风火焰传播问题已经得到广泛研究[4]. 理论研究表明,在无限快速化学反应假定下,热薄燃料表面的火焰传播速度与气流速度无关[5-6]. 但

收稿日期: 2007-07-09.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10702009); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KJCX2-SW-L05).
作者简介: 张 夏 (1971—),男,博士,助理研究员.
通讯作者: 于 勇, yuyong@bit.edu.cn.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

考虑有限速度化学反应的数值模拟表明,在 Damkohler 数 Da(停留时间与化学反应时间之比的无量纲准数)足够小的条件下,即气流速度较高时,火焰可以吹熄[7]. 浮力对流[8]和强制对流[9]条件下的实验结果证实了这一结论,并成功地建立了无量纲火焰传播速度与 Da 之间的关联. 微重力条件下,火焰传播的强制对流实验[10]和自然对流数值模拟[11]结果进一步表明,除了高速吹熄极限外,热薄燃料表面的逆风传播火焰还存在低速冷熄极限. 其中,氧气浓度较低时,火焰传播速度随气流速度的变化曲线只有近冷熄区和近吹熄区两个分支,交点为火焰传播速度的最大值. 在冷熄极限附近,气流速度增大时,辐射热损失减小,火焰传播速度增大;在吹熄极限附近,气流速度增大时,反应气体停留时间减小,火焰传播速度减小. 氧气浓度较高时,在近冷熄区和近吹熄区之间,还存在中速热控制区,在这个区域火焰温度较高,无限快速化学反应假设成立,火焰传播速度与气流速度无关.

显然,气流速度对火焰传播具有重要影响. 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必然差别甚大,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[12]提出用窄通道(高度远小于长度和宽度的通道)实现这种设想. 实验表明,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. 研究者并没有进一步解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[13]和薄燃料的闷烧[14]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[15],而不同重力条件下火焰传播的相似性仍然有待研究. 笔者将用数值模拟方法,研究不同重力条件下薄燃料表面逆风传播火焰的相似性.

1 火焰传播模型

如图 1所示,在模拟的通道内薄燃料表面火焰传播中,气体流动方向与火焰传播方向相反,气体以均匀速度 u_0流进通道,火焰以速度 u_f向上游传播. 坐标原点固定在火焰前缘上时,火焰传播成为稳态问题. 取燃料表面为 x 方向,垂直于燃料表面为 y 方向. 计算域在 x 方向的长度为 70 cm(通道进、出口距离火焰前缘的距离分别为 50 cm和 20 cm), 在 y 方向的长度作为研究参数可以变化. 固体燃料燃尽点的位置为 $x = x_b$. 通道的放置方向包括微重力条件(这时重力加速度 $g = 10^{-6} g_e$, 与 x 方向相反)和常重力水平放置(这时重力加速度 g_e与 y 方向相反, g_e为常重力加速度). 其中,在微重力放置条件下,模拟对象对称,只需要计算通道的 1/2;而在水平放置条件下,则需要计算整个通道.

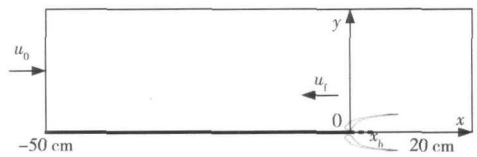


图 1 火焰传播示意

火焰传播模型由气相模型和固体燃料热解模型组成. 模拟的固体燃料为纸,化学成分为纤维素,分子式为 $C_6H_{10}O_5$. 由于燃料足够薄,计算中,假定燃料表面和通道中心面为同一个平面,同时燃料厚度在分解过程中保持不变,而燃料密度不断减小,直到分解完毕. 模拟中,忽略气相热辐射,但考虑固体表面的热辐射. 气相和固相模型通过气固界面上的边界条件耦合在一起,火焰传播速度 u_f以本征值存在于方程中.

1.1 气相模型

薄燃料表面火焰传播的气体方程组的通用形式为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + S_\phi \qquad (1)$$

式中 ϕ、Γ_ϕ和 S_ϕ 的意义见表 1.

表 1 方程(1)中 ϕ、Γ_ϕ和 S_ϕ的意义

方 程	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
连续方程	1	0	0
x 方向动量方程	u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x} + (\rho_\infty - \rho) g_x$
y 方向动量方程	v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y} + (\rho_\infty - \rho) g_y$
能量方程	T	μ / Pr	$-\Delta H k / C_g$
组分方程	w_i	μ / Sc	$s_i k$

式(1)和表 1中, ρ、u、v、p、T和 w_i分别为气体密度、x、y 方向速度、压力、温度和 i组分的质量分数; i表示燃料、氧气、氮气、水蒸气和二氧化碳; μ、Pr和 Sc分别为黏性系数、Prandtl数和 Schmidt数; c_g、g、ΔH、k和 s分别为比热容、重力加速度、反应热、反应速度和反应计量系数.

燃料气(纤维素)与氧气的化学反应方程为

$$C_6H_{10}O_5 + 6O_2 = 6CO_2 + 5H_2O \qquad (2)$$

反应速度

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$k = B_g \rho^2 w_f w_0 e^{-E_g/RT}$$

式中 B_g、E_g和 R 分别为反应指前因子、活化能和通用气体常数.

气相方程的边界条件为

$$x = -\infty \text{处}, u = u_0 + u_f, v = 0, T = T_0, w_i = w_{i0} \ (i\text{代表燃料、}O_2\text{、}N_2\text{、}H_2O\text{和 }CO_2) \tag{3}$$

$$x = \infty \text{处}, \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \ (\phi = u, v, T, w_i \ (i\text{代表燃料、}O_2\text{、}N_2\text{、}H_2O\text{和 }CO_2)) \tag{4}$$

$$y = y_\infty \text{处}, u = u_f, v = 0, T = T_0, \frac{\partial w_i}{\partial y} = 0 \ (i\text{代表燃料、}O_2\text{、}N_2\text{、}H_2O\text{和 }CO_2) \tag{5}$$

$$y = 0, x < x_b \text{处}, u = u_f, v = v_w, T = T_s, D\frac{\partial w_f}{\partial y} = m(w_f - 1), D\frac{\partial w_i}{\partial y} = m w_i \ (i\text{代表 }O_2\text{、}N_2\text{、}H_2O\text{和 }CO_2) \tag{6}$$

$$y = 0, x \geq x_b \text{处}, \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, v = 0 \ (\phi = u, T, w_i \ (i\text{代表燃料、}O_2\text{、}N_2\text{、}H_2O\text{和 }CO_2)) \tag{7}$$

式中:D 为质量扩散率;v_w 为燃料气喷射速度;m 为表面热分解产物的质量通量;T_s 为固体表面温度,这几个量由气相和固相的耦合方程组确定.

1.2　固体燃料分解模型

燃料的分解反应为一级 Arrhenius反应[16],

$$m = B_s \rho_s \tau e^{-E_s/RT_s} = \rho v_w \tag{8}$$

对燃料进行质量平衡分析得

$$m = \frac{d}{dx}(\rho_s \tau u_f) \tag{9}$$

$$B_s = B_{s0}\left(\frac{\rho_s}{\rho_{s0}}\right)^{0.8} \tag{10}$$

式中:B_s 和 E_s分别为固体分解反应指前因子和活化能;ρ_s和 τ分别为燃料密度和厚度;B_{s0}和 ρ_{s0}分别为固体分解反应指前因子基准值和初始密度.

忽略固体内部的热传导时,薄燃料的能量平衡关系为

$$q_c - q_r = \rho_s \tau u_f c_s \frac{dT_s}{dx} + m[L_v + (C_g - c_s)(T_s - T_0)] \tag{11}$$

式中:q_c和 q_r分别为燃料表面的导热通量和辐射通量;L_v和 c_s分别为固体燃料的分解热和比热容.

固体密度和温度微分方程的边界条件为

$$x = -\infty \text{处}, T_s = T_{s0}, \rho_s = \rho_{s0} \tag{12}$$

1.3　物性参数

模型中用到的各种物性参数的估算方法如下:密度根据理想气体的状态方程计算,黏性系数根据其与温度的指数律关系计算,气体的比热容根据温度和成分计算,各组分的比热容由其与温度的多项式关联确定[17].其他参数如表 2所示.

表 2　物性参数

参　　数	数　　值
T_0/K	300
$w(O)_0$/%	23.3
B_g/ ($m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$)	2.5×10^{12}
E_g/($J \cdot mol^{-1}$)	2.027×10^5
ΔH/($J \cdot kg^{-1}$)	1.674×10^7
ρ_{s0}/($kg \cdot m^{-3}$)	263.2
τ/m	7.6×10^{-5}
c_s/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1 256
B_{s0}/s^{-1}	2.0×10^{17}
E_s/($J \cdot mol^{-1}$)	2.2×10^5
L_v/($J \cdot kg^{-1}$)	5.7×10^5

1.4　模型求解方法

整个模型由气相模型和固相模型组成,必须联立求解,其中,一相的结果是另一相的边界条件.求解中,气相方程组采用 SIMPLEC算法[18],燃料分解方程采用四阶 Runge-Kutta方法求解.计算中使用非均匀网格,火焰前缘和燃料表面、壁面附近的网格最细,为 0.1 mm.网格在 x方向上火焰前缘的上游和下游都以 1.05的比例因子增大,在 y方向上网格首先增大直到达到计算域的 1/2后开始缩小,比例因子均为 1.05.对于 0.2 m的通道半高度,计算区域 0.7 m ×0.2 m包含 289 ×164个网格点.在 PⅣ 3.6 GHz CPU的联想个人计算机上,运行 2 cm/s进口气流速度的工况需要大约 3.5 h得到收敛结果,进口气流速度更高的工况,收敛时间变短.收敛标准为气相方程组的最大相对余源和、火焰传播速度、火焰前缘的导热通量的相对误差均小于 10^{-5}.

2　不同重力下薄燃料表面火焰传播的相似性

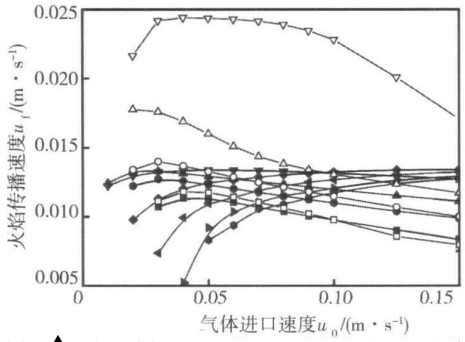
在低速气流条件下,火焰传播对浮力的变化更加敏感,因此笔者以低速气流为例,比较不同重力条件下火焰传播的相似性.

2.1　火焰传播速度

不同重力下,不同高度的通道内,火焰传播速度随气流速度的变化如图 2所示.

在微重力条件下的不同气流速度范围内,火焰传播速度随通道高度 h的变化表现出不同的特点.在较

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



微重力: ⬍无边界流畅; ◄ h = 40 cm; ► h = 20 cm; ◆ h = 10 cm; ▼ h = 4 cm; ▲ h = 2 cm; ● h = 1.4 cm; ■ h = 1 cm

常重力: ▽ h = 4 cm; △ h = 2 cm; ○ h = 1.4 cm; □ h = 1 cm

图 2　不同重力下窄通道内的火焰传播速度

高的气流速度下,火焰前缘处的传导热损失可以忽略,这时,火焰传播速度随通道高度发生变化,主要是因为通道高度变化时火焰周围的流场发生了变化. 这时,火焰处于吹熄极限分支,燃烧反应对停留时间的变化比较敏感. 减小通道高度会导致火焰遇见的气流速度增大,停留时间减小,最终导致火焰传播速度减小. 在低速气流条件下,火焰处于冷熄极限分支,燃烧反应对火焰的温度变化比较敏感,这时,火焰传播速度随通道高度发生变化,是因为通道高度变化时火焰周围的流场和热损失都发生了变化. 在冷熄极限附近 ($u_0 \leq 5$ cm/s),当通道高度 $h > 4$ cm时,壁面热损失不明显,在这种条件下,通道高度减小时,火焰遇见的气流速度增大,燃料表面热边界层变薄,火焰向燃料的传热通量增大,因此火焰传播速度增大,冷熄极限气流速度减小;但是,当通道高度 $h < 2$ cm时,继续减小通道高度后,尽管火焰向燃料的传热通量也会增大,但壁面传导热损失增大成为主要影响因素,因此火焰传播速度减小,冷熄极限气流速度增大;通道高度 h介于 2 cm和 4 cm之间时,火焰传播速度达到最大值,冷熄极限气流速度达到最小值. 低速气流条件下火焰传播速度随通道高度的变化趋势及火焰传播速度达到最大值的通道高度,与其他研究者顺风传播火焰的数值模拟结果[15]一致. 当气流速度稍高时 ($u_0 \geq 6$ cm/s),火焰传播速度随通道高度的变化呈现相似的趋势,不同的是,火焰传播速度的最大值出现在通道高度在 4 ～ 10 cm的条件下. 实际上,当通道高度 h大于 4 cm时,火焰前缘处的壁面热损失可以忽略.

在水平通道的火焰传播中,在较低的气流速度下,随着通道高度减小,火焰传播过程的热损失和浮力对流受到的限制增大,火焰传播速度减小. 在较高的气流条件下,随着通道高度减小,火焰遇见的混合气流速度增大,停留时间减小,最终导致火焰传播速度减小. 总的来说,尽管不同气流速度范围内,火焰传播速度随通道高度变化的趋势相同,但引起变化的机理不同.

可见,火焰传播速度不仅受进口气流速度的影响,还与通道的尺寸密切相关,因此要用小尺寸的水平窄通道,来定量模拟微重力条件下大尺寸通道中的火焰传播是不现实的,这就是文献[12]得到的结果. 而在相同尺寸的通道中,当自然对流受到限制时,火焰遇见的对流环境和热环境将具有很强的相似性,因此,有可能实现不同重力条件下火焰传播的功能模拟. 例如,当通道高度 h = 1 cm时,水平和微重力下的火焰传播速度相差很小. 其中水平方向的火焰传播速度稍大,与残余自然对流使得火焰传播在局部具有微弱的顺风火焰的特点有关. 另外,在 h = 1 cm的通道中,u_0 = 0.1 m/s是火焰处于冷熄极限分支和吹熄极限分支的交点. 在冷熄极限分支 ($u_0 < 0.1$ m/s),气流速度增大引起辐射热损失减小和氧气缺乏程度降低,这会导致火焰传播速度增大,而水平方向传播的火焰自然对流较大,因此火焰传播速度较微重力下的大. 但在吹熄极限分支 ($u_0 > 0.1$ cm/s),气流速度增大将导致化学反应停留时间减小,这将导致火焰传播速度减小,而水平方向传播的火焰自然对流较大,因此水平方向的火焰传播速度较微重力下的更小. 但是,由于残余自然对流很小,因此无论是在冷熄极限分支,还是在吹熄极限分支,不同重力下的火焰传播速度之间的差别都很小. 由于自然对流的增大,当通道高度增大时 (h = 1.4 cm),不同重力条件下的火焰传播速度之间的差别增大. 从火焰传播速度的角度看,h = 1 cm是一个可以有效限制自然对流的通道高度.

2.2　火焰结构

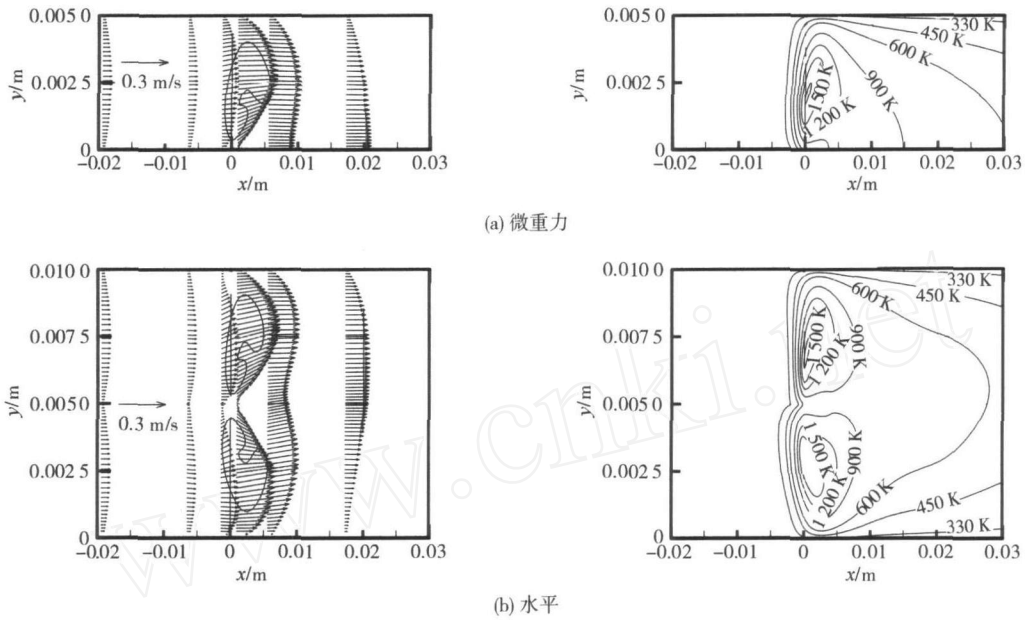
低速气流条件下 (u_0 = 3 cm/s),重力对 h = 1 cm和 h = 1.4 cm的通道内火焰周围的速度分布和温度分布的影响如图 3和图 4所示.

在 h = 1 cm的通道内,不同重力下的火焰形状及火焰附近的流场和温度场都比较接近,水平方向传播的火焰也基本对称. 但在离开火焰稍远处,与微重力下的情况相比,水平方向传播的火焰下游,出现了不对称的速度和温度分布. 由于控制逆风火焰传播的是火焰前缘,下游的影响不大. 因此,h = 1 cm的通道内不同重力下的火焰传播特性比较相似,这时,以通道半高度为基准计算的 Gr数为 219,这与实验结果相似.

在 h = 1.4 cm的通道内,火焰传播中重力的影响开始显示出来. 与微重力下的情况相比,水平传播的火焰,上下游速度分布的不对称性增强,下表面的火焰较上表面的长. 由于这种高度的窄通道中的火焰在结构上差别较大,因此不能有效地限制自然对流,这时,以通道半高度为基准计算的 Gr数为 542.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

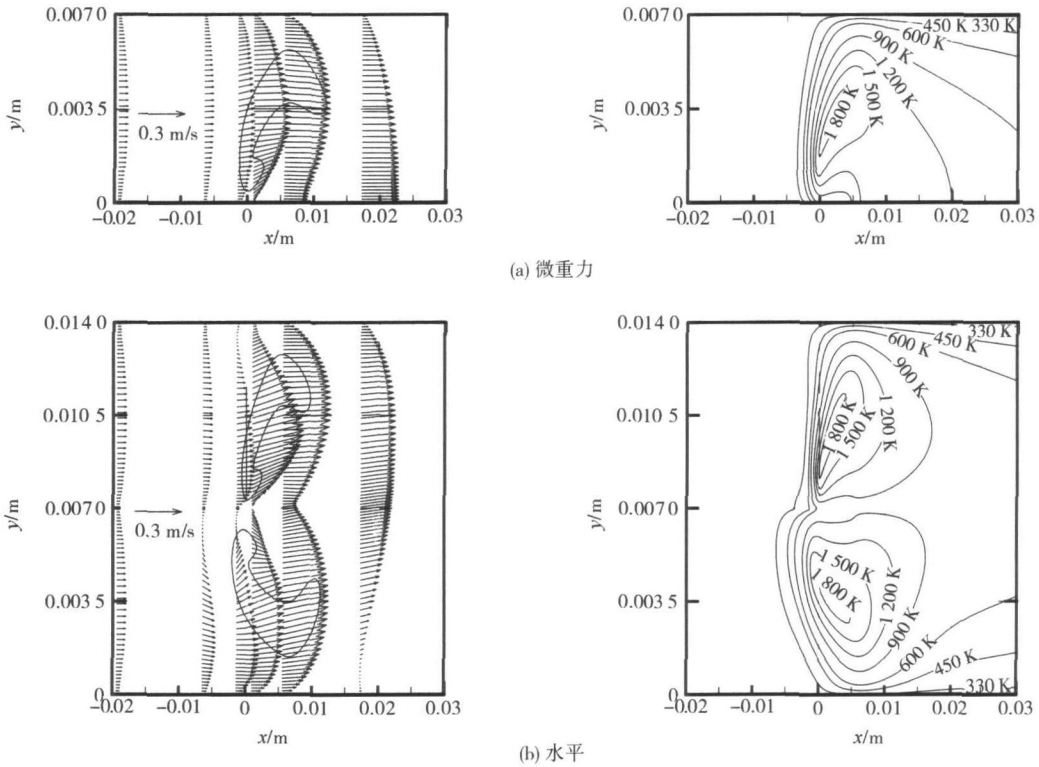
在微重力和常重力下的窄通道中,尽管火焰传播过程的 Gr准数并不相同,但当其足够小时(200可以作为一个定性参考值),其中的自然对流基本可以忽略,因此不同重力下窄通道中的火焰传播将表现出相似的特性.基于此,首先在地面上用窄通道模拟微重力下相同空间内的火焰传播,然后加入通道尺寸对流场及热损失的影响,以得到其他尺寸的空间中的火焰传播特性,是一种更可靠的地面模拟方法.



(a) 微重力

(b) 水平

图 3　不同重力下 h =1 cm 的通道内火焰周围的速度分布和温度分布



(a) 微重力

(b) 水平

图 4　不同重力下 h =1.4 cm 的通道内火焰周围的速度分布和温度分布

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结 语

通道高度的变化,通过影响通道间的流场和通道壁面的热损失,影响通道内燃料表面的火焰传播,因此用水平窄通道模拟微重力下大空间的火焰传播,只能得到定性相似但定量差别较大的结果,这与其他研究者的实验结果一致.

在微重力和常重力下的窄通道中,当 *Gr*准数足够小时(200可以作为一个定性参考值),其中的自然对流基本可以忽略,不同重力下窄通道中的火焰传播过程基本相似.

参考文献:

[1] 张 夏. 载人航天器火灾安全研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 100-115.
Zhang Xia. Progress in fire safety research for manned spacecraft[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 100-115 (in Chinese).

[2] National Aeronautics and Space Administration. NASA STD-6001 Flammability, Odor, Offgassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures for Materials in Environments That Support Combustion[S]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1998.

[3] Olson S L, Kashiwagi T, Fujita O, et al. Experimental observations of spot radiative ignition and subsequent three-dimensional flame spread over thin cellulose fuels[J]. *Combust Flame*, 2001, 125(1/2): 852-864.

[4] Wichman I S. Theory of opposed-flow flame spread[J]. *Prog Energy Combust Science*, 1992, 18(6): 553-593.

[5] deRis J N. Spread of a laminar diffusion flame[C]// *Twelfth Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Combust Institute, 1968: 241-252.

[6] Delichatsios M A. Exact solution for the rate of creeping flame spread over thermally thin materials[J]. *Combust Science Technology*, 1986, 44(5/6): 257-267.

[7] Frey Jr A E, T'ien J S. A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics[J]. *Combust Flame*, 1979, 36: 263-289.

[8] Altenkirch R A, Eichhorn R, Shang P C. Buoyancy effects on flames spreading down thermally thin fuels[J]. *Combust Flame*, 1980, 37: 71-83.

[9] Fernandez-Pello A C, Ray S R, Glassman I. Flame spread in an opposed forced flow: The effect of ambient oxygen concentration[C]// *Eighteenth Symp (Int) Comb*. Pittsburgh: The Combust Institute, 1980: 579-589.

[10] Olson S L. Mechanisms of microgravity flame spread over a thin solid fuel—Oxygen and opposed flow effects[J]. *Combust Science Technology*, 1991, 76(4/5/6): 233-249.

[11] Chen C-H, Cheng M-C. Gas-phase radiative effects on downward flame spread in low gravity[J]. *Combust Science Technology*, 1994, 97(1/2/3): 63-83.

[12] Melikhov A S, Bolodyan I A, Potyakin V I, et al. The study of polymer material combustion in simulated microgravity by physical modeling method[C]// *Fifth Int Microgravity Comb Workshop*. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 1999: 361-364.

[13] Dlugogorski B Z, Wang H, Kennedy E M, et al. Testing of gaseous fire suppressants in narrow channel apparatus[C]// *Proceedings of HOTWC-2002 12th Halon Options Technical Working Conference*. 2002.

[14] Zik O, Moses E. Fingering instability in solid fuel combustion: The characteristic scales of the developed state[C]// *Twenty-Seventh Symp (Int) Comb*. Pittsburgh: The Combust Institute, 1998: 2815-2820.

[15] Ross H D. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*[M]. San Diego: Academic Press, 2001.

[16] Kashiwagi T, Nambu H. Global kinetic constants for thermal oxidative degradation of a cellulosic paper[J]. *Combust Flame*, 1992, 88(3/4): 345-368.

[17] McBride B J, Zehe M J, Gordon S. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species[R]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2002, NASA TP-2002-211556.

[18] Van Doormaal J P, Raithby G D. Enhancements of the SIMPLEC method for predicting incompressible fluid flows[J]. *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals*, 1984, 7(2): 147-163.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net