

DOI 10.11715/rskxjs.R201507005

热厚材料表面的近极限火焰传播特性

王双峰^{1,2}, 朱 凤^{1,2}, 卢占斌³

(1. 中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049; 3. 上海大学应用数学和力学研究所, 上海 200072)

摘要: 利用窄通道实验系统对低速气流中聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)平板表面逆风传播火焰的熄灭极限和传播速度进行了研究, 主要实验参数为气流速度(≤ 10 cm/s)和氧气体积分数($\leq 50\%$)。实验发现, 当气流速度和氧气体积分数接近火焰熄灭边界时, 连续火焰分裂成为独立的、可稳定传播的小火焰, 该现象的存在使材料的可燃范围扩大到连续火焰边界之外。分析表明, 经典的热区火焰传播理论不能很好地预测火焰在低速流动中的传播速度, 其偏差随着气流速度和氧气体积分数的减小而增大。

关键词: 火焰传播; 熄灭极限; 热厚材料; 低速流动; 微重力

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2016)05-0402-06

Near-Limit Flame Spread over Thick Solid Fuels

Wang Shuangfeng^{1,2}, Zhu Feng^{1,2}, Lu Zhanbin³

(1. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Flame spread and extinction phenomena over a thick polymethylmethacrylate (PMMA) sheet in low-speed opposing flows have been experimentally investigated by using a narrow channel apparatus. Two primary variables considered are flow velocity (≤ 10 cm/s) and oxygen concentration ($\leq 50\%$). It is found that, when the velocity and oxygen concentration of the gas flow are close to the extinction boundary, the continuous flame breaks into independent, steady-spreading flamelets, which extends material flammability beyond continuous flame boundary. The classic spread rate formula, which has been established for the thermal regime of opposed-flow flame spread, is shown to overestimate the spread rate in low-velocity quenching. The difference between model predictions and experimental data becomes more significant with the decrease of imposed flow velocity and oxygen concentration.

Keywords: flame spread; extinction limit; thermally-thick fuel; low-speed flow; microgravity

火焰沿着热厚固体材料表面逆风传播(即传播方向与外界气体流动方向相反)的特性依赖于环境中的氧气浓度和气流速度。当氧气浓度大于维持火焰传播的极限氧气浓度时, 随着气流强度增加, 传播火焰可分为3个区域^[1]: ①热辐射起重要作用的低速流动区称为冷熄区; ②化学反应控制的高速气流区称为吹熄区; ③热辐射和化学反应影响较小的中等流速区则

称为热区。由于在地面常重力实验中存在由火焰引起的浮力对流, 现有对热厚材料表面火焰传播问题的实验研究主要涉及吹熄区和热区^[2], 而由于热区火焰传播的物理机理相对简单, 有关理论也得到比较充分的发展^[1,3-4], 但对低速流动中热厚材料燃烧特性的实验和理论认识都十分有限。

在微重力环境中, 浮力流动基本消失, 为观测低

收稿日期: 2015-10-22.

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项基金资助项目(XDA04020410).

作者简介: 王双峰(1972—), 男, 博士, 研究员.

通讯作者: 王双峰, sfwang@imech.ac.cn.

速流动中的燃烧过程提供了所需的实验条件。但是,热厚材料燃烧实验需要较长的微重力时间,落塔等地基微重力设施不能满足要求,已有固体材料燃烧的微重力实验大部分集中在热薄材料^[5],对热厚材料进行的实验还很少。West 等^[6]和 Altenkirch 等^[7]在美国航天飞机上针对不同压力(0.1 MPa 和 0.2 MPa)和氧气体积分数(50%和70%)的静止环境中的 PMMA (polymethylmethacrylate, 即聚甲基丙烯酸甲酯)表面的火焰传播进行了实验,观测到可持续数分钟但传播速度不断减小、最终熄灭的非稳态火焰。Olson 等^[8]利用探空火箭对低速气流(最大气流速度 V_g 为 10 cm/s)中 PMMA 表面的火焰逆风传播进行观测,发现当氧气体积分数较高(50%和70%)时火焰在流动速度很低($V_g = 1$ cm/s)的气流中即可稳定传播,当氧气体积分数为 35%时,同样的气流速度不能维持火焰传播。对于氧气体积分数为 50%的情况,实验测量了 V_g 为 1 cm/s、5 cm/s 和 10 cm/s 时的火焰传播速度。

在低速流动条件下,由于火焰停留时间增大,热辐射对火焰传播的影响变得重要起来^[9-10]。Bhattacharjee 等^[11]尝试在对逆风传播火焰的理论分析中引入辐射参数,用以表征辐射热损失的作用,进而建立了微重力区(即低速流动区)热薄和热厚材料表面火焰传播速度的理论公式。虽然热薄材料火焰传播速度的理论公式得到了实验结果的检验,对热厚材料火焰传播速度和熄灭极限的预测还缺乏相关实验数据的支持。

本文利用能够有效抑制浮力流动的窄通道实验系统对低速气流中 PMMA 表面的逆风火焰传播进行研究,实验参数为氧气体积分数和气流速度。在获得火焰冷熄极限的基础上,测量了不同氧气体积分数下火焰传播速度随气流速度的变化,并与热区火焰传播理论进行比较,分析了辐射热损失对低速流动区火焰传播的影响。需要指出的是,窄通道作为模拟微重力燃烧环境的实验方法,已被不同研究者用于固体材料表面火焰传播的研究^[12-17]。

1 实验方法

窄通道实验系统如文献[14-15]所述,主要包括实验装置主体部分和气体供给与控制子系统。实验装置主体由整流段、收缩段和实验段组成,气体通过整流段和收缩段后形成稳定均匀的气流,并向实验段供应。实验段是一个长 300 mm、宽 360 mm、高 10 mm 的水平通道,为了便于观察,实验段顶板和侧板用石

英玻璃制作。由于实验通道的宽度远大于高度,保证了中间区域流动的二维性。实验气源为工业纯氮和纯氧,它们在质量流量控制器(Alicat Scientific, MC)的控制下按照指定的流量比例进行充分混合,然后向整流段供应氧/氮混合气体,在实验段内产生指定的流动和气氛条件。实验中氧气体积分数的最大值为 50%,实验段内平均气流速度最大值为 10 cm/s。

实验材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),实验样品厚 10 mm、长 60 mm、宽 50 mm,密度 1.19 g/cm^3 。如图 1 所示,试样嵌入实验段的铝质底板,上表面与实验段下壁面平齐,其他表面与实验段底板之间铺设隔热材料(玻璃纤维棉),以减少燃烧实验过程中试样向底板的热传导。试样由安装在下游端电热丝点燃,通电后,试样在 5~8 s 内被点燃,当气流速度和氧气体积分数大于熄灭极限时,在试样表面形成逆风传播的火焰。

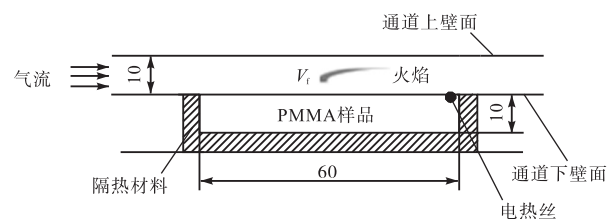


图 1 实验样品安装示意(单位:mm)

实验步骤如下:将试样安装到实验段中,试样上安装点火电热丝;启动气体供给与控制子系统,并设定气体流量控制参数;待实验段内流动稳定后,点火电热丝通电,试样被点燃;火焰离开电热丝后,电热丝断电。用两台数码摄像机(Sony DCR-TRV900E)分别从实验段上方和侧面记录试样点燃、火焰逆风传播或熄灭的过程,记录速率为 25 帧/s。在同一实验条件下,实验重复进行 3 次,部分实验重复 5 次。

对实验参数和测量结果的相对误差进行了分析,结果如下:气流速度和氧气体积分数误差 $\pm 2\%$,火焰传播速度的测量误差 $\pm 5\%$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 熄灭极限和近极限火焰传播现象

在一定氧气体积分数条件下,当逆向气流速度降低到某个极限值时材料表面的火焰传播将不能维持;另一方面,在一定气流速度条件下,当氧气体积分数减低到某个极限值时火焰也不能维持传播。由氧气体积分数和气流速度产生的火焰熄灭极限是衡量材料可燃性的重要特征参数,表示了材料可燃范围。在

低速流动中,热损失对火焰熄灭过程起着决定作用,相应的熄灭条件称为冷熄极限(quenching limit).

图 2 给出了气流速度 $V_g \leq 10 \text{ cm/s}$ 、氧气体积分数 $\phi_{O_2} \leq 50\%$ 范围内 PMMA 表面逆风传播火焰的熄灭极限曲线,其中符号 \circ 和 \bullet 表示火焰维持传播, \times 表示火焰熄灭,相应地,熄灭边界的上方为火焰传播区域,下方为火焰熄灭区域.可以看出,随着气流速度降低,极限氧气体积分数持续增加,当 $V_g > 2 \text{ cm/s}$ 时这种变化相当缓慢,而在 $V_g < 2 \text{ cm/s}$ 的极低流速区极限氧气体积分数急剧上升;当氧气体积分数降低时,极限气流速度先是缓慢增加,当 $\phi_{O_2} < 25\%$ 时转而快速增加.熄灭极限曲线的变化规律说明,在实验研究的参数范围内,随着气流速度或氧气体积分数的增加,材料的可燃范围增大;在 $\phi_{O_2} > 25\%$ 的高氧气体积分数环境中火焰传播对气流流动十分敏感, $V_g \approx 1 \text{ cm/s}$ 的微弱流动即可维持火焰传播,这与 Olson 等^[8]在微重力实验中的发现一致;熄灭边界的最低点对应的氧气体积分数约为 18%,氧气体积分数低于该值时无论气流速度大小都不能支持火焰传播.在图 2 中也给出了低速流动($V_g = 1 \text{ cm/s}$, ϕ_{O_2} 为 50% 和 35%)^[8]和静止环境(氧气体积分数 50%)^[6-7]中的微重力实验结果,它们很好地验证了窄通道实验在高氧气体积分数条件下得到的结果.

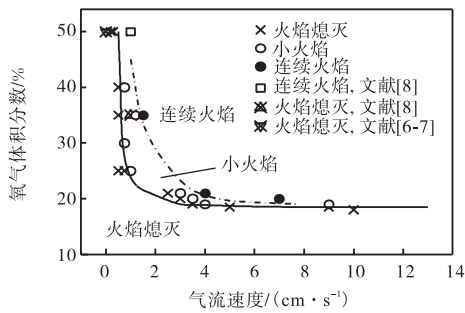


图 2 PMMA 表面逆风传播火焰的熄灭极限

当气流速度和氧气体积分数大于熄灭极限(即在图 2 中熄灭边界的上方)时,材料试样沿宽度方向被点燃后表面形成连续的火焰前锋,并逆风向前传播,但火焰形态随后的发展可分为两种情况:在离熄灭极限较远的区域,火焰前锋保持连续(如图 3 所示),而在靠近熄灭极限的区域,连续火焰将分裂成两个以上的独立火焰,它们经历一段时间的形态调整后最终形成稳定的弧形小火焰(flamelet),并分别向前传播,小火焰之间被未燃材料隔开(如图 4 所示).根据实验观察,图 2 中描画出了连续火焰和小火焰之间的边界.小火焰的存在将材料可燃范围向更低气流速度

和更低氧气体积分数扩展,随着气流速度增加,小火焰区收窄, $V_g = 10 \text{ cm/s}$ 时基本不再出现火焰分裂现象.

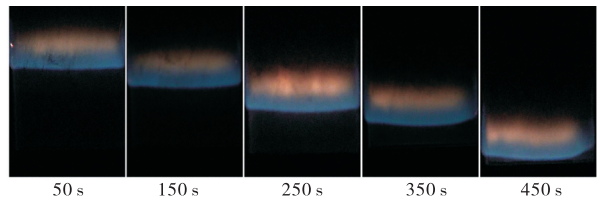


图 3 连续火焰的传播 ($\phi_{O_2} = 21\%$, $V_g = 8 \text{ cm/s}$, $t = 0 \text{ s}$ 为点火结束时刻,俯视观察)

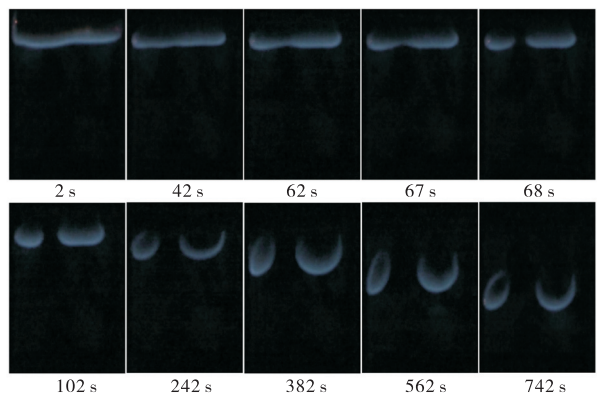


图 4 小火焰形成过程 ($\phi_{O_2} = 21\%$, $V_g = 3 \text{ cm/s}$, $t = 0 \text{ s}$ 为点火结束时刻,俯视观察)

小火焰形成后,可持续传播直到试样上游端,由于传播速度很小,这一传播过程长达几百到上千秒,充分说明了该现象的可维持性.对小火焰传播速度和火焰形态的分析也进一步表明,小火焰是稳定的近极限燃烧现象,可理解为初始二维火焰对贫氧环境的适应性改变.图 5 是同一实验(实验条件同图 4)中火焰宽度随时间的演化过程.火焰分裂发生在 65 s 左右,分裂前,火焰保持连续,但两侧逐渐熄灭,导致火焰宽度减小;火焰分裂后,每个小火焰的宽度以及它们宽度之和在约 70 s 的时间内继续减小,随后分别保持在约 12 mm、20 mm 和 32 mm.沿着小火焰弧形锋面顶点对应的垂直线跟踪火焰(或小火焰)的锋面,图 6 给出了锋面位置随时间的变化;可以看到,小火焰的位置随着时间稳定增加,二者之间呈线性关系.值得注意的是,小火焰形成后,传播速度立即达到稳定状态,而火焰宽度的调整则相对较慢.

在冷熄极限附近,热薄材料表面出现的小火焰传播现象已经在窄通道和微重力实验中得到证实^[13].本文实验结果表明,具有三维形态的小火焰也可以发生在热厚材料表面.二维火焰分裂成小火焰后,火焰

锋面面积与火焰体积的比值显著增大^[13], 不仅增加了氧气通过火焰表面向反应区的传输, 同时将燃烧释放的热量汇聚在较小的空间范围内, 从而为火焰下方的未燃材料提供足够的能量输入, 使火焰传播得以维持. 这一机制使得小火焰能够在连续火焰的边界之外稳定存在, 也扩大了材料的可燃范围.

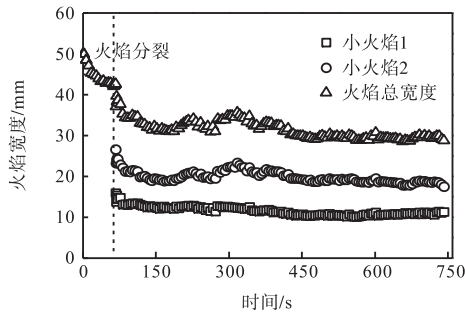


图5 火焰宽度随时间的变化(小火焰1和小火焰2分别对应图4中左右两个小火焰)

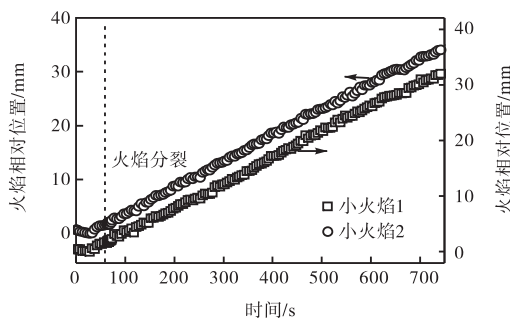


图6 火焰锋面位置随时间的变化

2.2 火焰传播速度

根据每次实验中火焰传播过程的俯视记录图像, 可获得不同时刻的火焰锋面位置, 进而计算火焰传播速度. 对于连续火焰, 沿着试样中心线对锋面位置进行跟踪. 作为典型示例, 图7给出了 $\varphi_{O_2} = 21\%$ 时3个连续火焰(V_g 为4 cm/s, 5 cm/s和8 cm/s)的相对位置随时间的变化. 可以看出, 随着时间增加, 所有火焰均稳定地向前传播, 火焰位置与时间之间存在很好的线性关系, 即在一定的流动条件下火焰保持不变的传

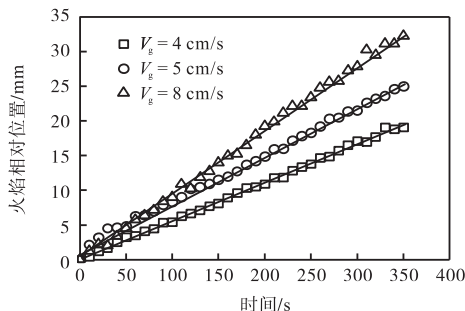


图7 连续火焰的锋面位置随时间的变化($\varphi_{O_2} = 21\%$)

播速度. 对于小火焰, 如图6所示, 在其形成后跟踪弧形锋面的顶点, 也得到了线性变化的火焰位置. 因此, 对火焰位置随时间变化的数据进行线性拟合, 拟合直线的斜率即表示火焰(包括小火焰)的传播速度.

图8是不同氧气体积分数条件下火焰传播速度随气流速度的变化, 为多次实验的算术平均结果, 图中同时给出了Olson等^[8]得到的微重力实验数据($\varphi_{O_2} = 50\%$, 气流速度为1 cm/s、5 cm/s和10 cm/s). 氧气体积分数一定时, 在本文研究的低速流动范围内, 火焰传播速度随着气流速度的增大而增大, 而当氧气体积分数增大时, 曲线整体上移, 即在同一气流速度下火焰传播速度增大. $\varphi_{O_2} = 50\%$ 时, 本文实验得到的变化趋势与微重力实验结果^[8]一致, 但火焰传播速度的数值明显大于后者. 此差异可归因于火焰侧面热损失引起的三维效应(three-dimensional effects): 侧面热损失减少火焰向燃料的能量传递, 从而抑制火焰传播, 其影响范围估计为 α/V_g (α 是气体热扩散系数), 低速气流中可达到cm量级^[16-19]; 在微重力实验中, PMMA样品的宽度仅为6.35 mm, 侧面热损失可影响到整个火焰, 这从实验中获得的抛物线形火焰面可以得到证明; 在本文实验中, 试样宽度大大增加, 如图3所示, 侧面热损失的作用局限在火焰两侧边缘, 火焰中间部分因不受影响而保持平直, 具有较高的传播速度.

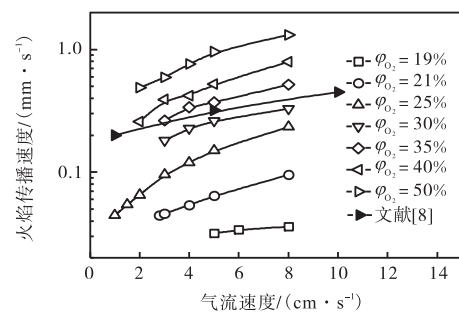


图8 不同氧气体积分数时火焰传播速度随气流速度的变化

在一系列简化假设的基础上, de Ris^[3]提出了最早的逆风火焰传播理论, 所得到的热区火焰传播速度公式曾被广泛使用. Bhattacharjee等^[1]通过数值模拟逐一考察了de Ris理论中主要假设的合理性以及在火焰传播速度公式中引起的误差, 认为气相化学反应无限快、热辐射可忽略等假设对于热区火焰传播是合理的, 但气流速度均匀分布(Oseen近似)和火焰附着在固体材料表面等假设会给火焰传播速度的理论预测带来严重的误差. 针对de Ris理论的局限性,

Bhattacharjee 等引入流体力学系数、火焰抬升系数用以考虑火焰前锋遇到的实际流动条件,得到扩展后的火焰传播速度公式,即

$$V_{f,EST} = \frac{F_{EST}^2}{\beta_5 \beta_6} V_{eqv} \quad (1)$$

式中: V_{eqv} 为等效气流速度,表示火焰前锋位置处的流动速度,对于通道内的流动和平板边界层,分别有计算公式将 V_{eqv} 与 V_g 建立联系; V_{eqv} 前面的参数组合包含了所有的热力学及能量和物质输运信息,可根据已知参数进行计算. 相比 de Ris 公式,公式(1)的适用范围仍然是处于热区的逆风火焰,但它与实验和数值模拟结果的符合程度显著提高,而且 $V_{f,EST} \cdot (\beta_5 \beta_6 / F_{EST}^2)$ 随 V_{eqv} 的变化规律与流动类型(通道流动或平板边界层)和气体环境条件无关. 在图 9 中,将图 8 给出的火焰传播速度实验结果与公式(1)进行比较, V_f 用 $(F_{EST}^2 / \beta_5 \beta_6)$ 归一化,并将 Bhattacharjee 等的数值计算结果 ($\varphi_{O_2} = 50\%$, $V_{eqv} \geq 20$ mm/s) 包含在图中,使气流速度范围扩展到热区和高速吹熄区. 可以看出,即使在低速流动区,公式(1)仍然对火焰传播速度起到了较好的归一化作用,不同氧气体积分数下的实验数据均落在理论预测曲线附近,说明该公式反映了热厚材料表面火焰逆风传播的主要控制机理. 另一方面,本文大部分实验数据小于热区理论的预测,但二者之间的差距随着气流速度和氧气体积分数的增大而减小;在 φ_{O_2} 为 50% 和 40% 的条件下,实验结果分别在 V_{eqv} 约为 12 mm/s 和 15 mm/s 时与理论公式一致,这可视为低速冷熄区向热区转变的临界气流速度;当氧气体积分数较小时,在气流速度达到实验中的最大值时,火焰速度仍然小于理论预测,说明需要更大的气流速度才能使火焰传播处于热区. 如前文所述,辐射热损失对低速流动中的火焰传播有重要影响,而在热区理论中其作用可以忽略,这使得公式(1)在低速流动条件下给出了偏大的火焰传播速度;随着流动速度的增大,热区假设逐渐得到满足,实验结果与公式(1)趋于一致,但冷熄区向热区转变的临界气流速度随着氧气体积分数的减小而增大. 另外, $\varphi_{O_2} = 50\%$ 时,将图 9 中的实验数据与 Bhattacharjee 等的计算结果相结合,可以看到火焰传播速度在整个气流速度范围内的变化情况: V_{eqv} 在 12 ~ 100 mm/s 时,火焰传播处于热区,传播速度符合公式(1);热区的左侧为低速冷熄区,右侧为高速吹熄区,火焰传播速度均小于公式(1)的预测,其原因分别为辐射热损失和有限化学反应速率的作用.

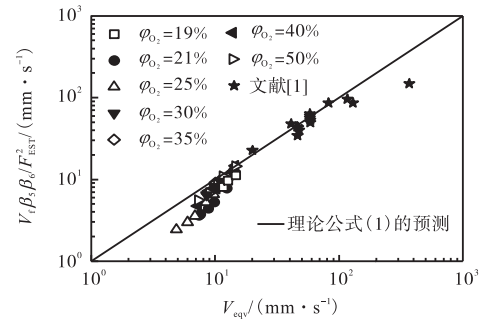


图 9 火焰传播速度的实验结果与热区理论预测

3 结 论

(1) 在低速流动中,热厚材料表面逆风传播火焰存在由氧气体积分数和气流速度决定的熄灭极限,在实验研究的参数范围内(气流速度 ≤ 10 cm/s,氧气体积分数 $\leq 50\%$),随着气流速度或氧气体积分数的增加,材料的可燃范围增大,在氧气体积分数较高 ($> 25\%$) 的环境中,火焰传播对气流速度尤其敏感.

(2) 在靠近冷熄边界的区域,材料表面的连续火焰分裂成为独立的小火焰,小火焰的可维持性、传播速度和火焰形态均说明这是稳定的近极限燃烧现象,它的存在扩大了材料的可燃范围.

(3) 利用热区火焰传播理论,可对低速流动中的火焰传播速度进行归一化,但与实验结果相比理论预测值偏大,它们的差距随着气流速度和氧气体积分数的减小而增大.

参考文献:

- [1] Bhattacharjee S, West J, Altenkirch R A. Determination of the spread rate in opposed-flow flame spread over thick solid fuels in the thermal regime[C]// *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, 1996: 1477-1485.
- [2] Fernandez-Pello A C, Ray S R, Glassman I. Flame spread in an opposed forced flow: The effect of ambient oxygen concentration[C]// *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, 1981: 579-589.
- [3] de Ris J N. Spread of a laminar diffusion flame[C]// *Twelfth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, 1969: 241-252.
- [4] Wichman I S. Flame spread in an opposed flow with a linear velocity gradient[J]. *Combustion and Flame*, 1983, 50: 287-304.
- [5] T'ien J S, Shih H Y, Jiang C B, et al. Mechanisms of flame spread and smolder wave propagation[G]// Ross H

- D. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. San Diego: Academic Press, 2001: 299-418.
- [6] West J, Tang L, Altenkirch R A, et al. Quiescent flame spread over thick fuels in microgravity [C]// *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, 1996: 1335-1343.
- [7] Altenkirch R A, Tang L, Sacksteder K, et al. Inherently unsteady flame spread to extinction over thick fuels in microgravity [C]// *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, 1998: 2515-2524.
- [8] Olson S L, Hegde U, Bhattacharjee S, et al. Sounding rocket microgravity experiments elucidating diffusive and radiative transport effects on flame spread over thermally thick solids[J]. *Combustion Science and Technology*, 2004, 176(4): 557-584.
- [9] T'ien J S. Diffusion flame extinction at small stretch rates: The mechanism of radiative loss[J]. *Combustion and Flame*, 1986, 65(1): 31-34.
- [10] Bhattacharjee S, Altenkirch R A. The effect of surface radiation on flame spread in a quiescent, microgravity environment[J]. *Combustion and Flame*, 1991, 84(1/2): 160-169.
- [11] Bhattacharjee S, Ayala R, Wakai K, et al. Opposed-flow flame spread in microgravity-theoretical prediction of spread rate and flammability map[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2279-2286.
- [12] Ivanov A V, Balashov Ye V, Andreeva T V, et al. Experimental Verification of Material Flammability in Space, NASA CR-1999-209405[R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 1999.
- [13] 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.
- [14] 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 (in Chinese).
- [15] 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 Shuangfeng, 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 (in Chinese).
- [16] 张夏, 于勇. 热薄材料表面火焰传播的三维效应[J]. *燃烧科学与技术*, 2010, 16(2): 137-142.
Zhang Xia, Yu Yong. Three-dimensional effects of flame spread over thermal thin solid materials[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2010, 16(2): 137-142 (in Chinese).
- [17] Zhang Xia, Yu Yong. Experimental studies on the three-dimensional effects of opposed-flow flame spread over thin solid materials[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158: 1193-1200.
- [18] Mell W E, Kashiwagi T. Dimensional effects on the transition from ignition to flame spread in microgravity [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1998, 27: 2635-2641.
- [19] Shin H-Y, T'ien J S. Modeling concurrent flame spread over a thin solid in a low-speed flow tunnel[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 2777-2784.