

富燃料丙烷/空气预混火焰特性的微重力实验研究

袁莉¹ 王双峰¹ Jarosinski J² Gorczakowski A² Podfilipski J²

(1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100190; 2. 罗兹工业大学热能技术与制冷系, 罗兹 90-924, 波兰)

摘要 地面常重力 (1g) 条件下, 丙烷/空气预混火焰向上传播的富燃极限为 9.2% C₃H₈, 而向下传播时的富燃极限仅为 6.3% C₃H₈, 二者之间存在明显差距。利用微重力条件下的实验, 对燃料浓度从 6.5%到 8.6%(微重力实验中测定的可燃极限) 范围内的丙烷/空气预混火焰特性进行了研究。实验发现, 重力对近极限丙烷/空气火焰的传播有显著影响, 影响程度随着当量比的增加而增大。微重力下丙烷/空气的富燃极限为 8.6% C₃H₈ ($\phi = 2.24$), 明显高于 1g 条件下向下传播火焰的可燃极限, 略低于向上传播火焰的可燃极限。随着当量比的增大, 根据压力变化曲线计算的火焰层流燃烧速度从 8.5 cm/s 逐渐减小到 2.7 cm/s, 可燃极限处的层流燃烧速度与前人实验数据一致。

关键词 预混火焰; 可燃极限; 层流燃烧速度; 微重力

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)07-1241-04

Experimental Study of Rich Propane/Air Flames in Microgravity

YUAN Li¹ WANG Shuang-Feng¹ Jarosinski J² Gorczakowski A² Podfilipski J²

(1. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Heat Technology and Refrigeration, Technical University of Lodz, Lodz 90-924, Poland)

Abstract Flammability limits for flames propagating in rich propane/air mixtures under normal gravity conditions appeared to be 6.3% C₃H₈ for downward propagation and 9.2% C₃H₈ for upward propagation, and the concentration gap between the two limits was extremely large. In the present work, microgravity experiments were carried out to examine flame properties in propane/air mixtures over the specific range of concentration that extended from 6.5% C₃H₈ to 8.6% C₃H₈ (the flammability limit found in the microgravity experiments). It was found that buoyancy played a significant role in flames propagating near flammability, and the influence increased with equivalence ratio. The rich limit was determined to be 8.6% C₃H₈ under microgravity, which was far behind the limit for downward-propagating flame and close to the limit for upward-propagating flame at 1g. The laminar burning velocities, calculated on base of the pressure curves, gradually decreased from 8.5 cm/s to 2.7 cm/s with the increase of equivalence ratio, and burning velocity at the flammability limit was consistent with previous experimental data.

Key words premixed flame; flammability limit; laminar burning velocity; microgravity

0 引 言

在地面常重力 (1g) 条件下, 标准极限管和封闭容器中测得的预混气体可燃极限与火焰传播方向有关, 这是火焰拉伸和预混气体的 Lewis 数 (定义为 $Le = \alpha/D$, α 是混合物的热扩散系数, D 是稀缺反应物的质量扩散系数) 共同影响的结果。贫燃料甲烷/空气和富燃料丙烷/空气都是典型的 $Le < 1$ 的预混气; 实验发现, 甲烷/空气火焰向上传播的贫燃极限为 5.25% CH₄, 向下传播时则为 5.85% CH₄^[1]; 而对于富燃料丙烷/空气火焰, 向上和向下传播的可燃

极限分别为 9.2% C₃H₈ 和 6.3% C₃H₈^[2], 两者差别尤其显著。

人们早就认识到了重力场中的浮力对流对可燃极限附近火焰的传播和熄灭有重要影响^[3~5], 通过消除浮力的干扰, 微重力条件下的实验为理解近极限火焰的特性提供了很好的途径。Krivulin 等^[6] 利用失重飞机提供的微重力条件研究了浮力对预混火焰可燃极限的影响, 测得的氢气/空气贫燃极限和丙烷/空气富燃极限均介于 1g 条件下向上和向下传播

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-06-13

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: 袁莉 (1986-), 女, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事微重力燃烧方面的研究。

火焰可燃极限之间。Strehlow 等^[1]的微重力实验发现甲烷/空气的贫燃极限与 1g 时向上传播火焰的极限相同, 小于向下传播火焰的极限, 而丙烷/空气 3 种可燃极限(微重力、1g 时向上传播和向下传播)很接近。Jarosinski 等^[2]对富燃料丙烷/空气预混火焰开展了微重力落塔实验, 在柱形容器中测得火焰可见时的可燃极限为 8.75% C₃H₈, 燃烧容器内有压力变化时的可燃极限为 9.0% C₃H₈, 另外根据压力变化曲线得到极限处层流燃烧速度约为 2.0 cm/s。最近, Wang 等^[7]利用微重力条件下向外传播的球形火焰, 研究了贫燃料甲烷/空气预混火焰的层流燃烧速度, 并且考虑了火焰拉伸的影响, 得到极限处层流燃烧速度为 1.2 cm/s。

如前所述, 不同传播方向的丙烷/空气火焰的可燃极限差别显著, 目前关于丙烷/空气预混火焰的实验基本集中在火焰向下传播时的富燃极限以下。本文的主要目的是利用微重力实验研究燃料浓度从 6.5% 到 8.6% 的富燃料丙烷/空气预混火焰特性, 分析重力对火焰传播的影响, 测量丙烷/空气预混气体的富燃极限, 并根据燃烧容器内的压力变化曲线计算火焰的层流燃烧速度。

1 实验原理

1.1 实验装置

实验装置由密闭燃烧容器、电火花点火器、纹影显示系统、高速摄像机和压力测量系统组成。立方体容器内部边长为 80 mm, 前后壁分别安装石英玻璃以便光学观察。容器底端和侧壁上分别装有一个放电电极, 用来电火花中心点燃预混气体。实验中使用纹影系统对点火和火焰传播过程进行观察, 并用高速数字摄像机 (Redlake MotionScope M1) 进行记录, 图像的记录速率为 500 帧/s。容器底端装有一个应变压力传感器, 对燃烧容器中的压力变化过程进行测量。反应气在质量流量计的控制下按比例进行预混, 绝对误差估算为 $\pm 0.02\%$ 。实验对常温 (298 ± 2 K) 条件下燃料浓度从 6.5% 到 8.6% 的丙烷/空气预混气体进行研究。其中, 8.6% C₃H₈ 为本文微重力实验得到的富燃极限。实验中使用的丙烷纯度为 99.95%。

整个装置安装在一个钢制框架内, 既能用于地面实验, 也能用于微重力条件下的实验。微重力实验在波兰罗兹工业大学燃烧实验室的落塔设施中完成, 该设施可提供 1.2 s 的微重力时间, 微重力水平为 $10^{-3}g \sim 10^{-2}g$ 。

1.2 实验步骤

实验前将燃烧容器抽真空, 向其充入预混气至

容器内压力略高于环境压力, 重复 5 次以保证容器内能充满指定浓度的预混气。充气完成后, 打开排气阀门数秒钟, 然后关闭, 以此平衡容器内外压力, 保证反应混合物的初始压力为标准大气压。

微重力实验时, 同时启动高速摄像机和压力传感器, 随即释放实验装置, 在很短的时间延迟后, 计时器触发电火花产生电火花。对每一种浓度的丙烷/空气预混气体, 重复进行 2~3 次实验。

2 结果和讨论

2.1 可燃极限

Ronney 和 Wachman^[8]将微重力条件下密闭容器中的可燃极限定义为可支持火焰准定常传播直到容器壁面的极限燃料浓度。根据这一定义本文测得富丙烷/空气的极限为 8.6% C₃H₈ (当量比 $\phi = 2.24$), 与 Krivulin 等^[6]的微重力实验结果完全一致, 小于 Jarosinski 等^[2]的微重力实验结果 (9.0% C₃H₈), 但是应该注意到后者实验中所用的丙烷纯度为 96.4%。与 1g 下标准极限管中测得的数据^[9]相比, 本文得到的可燃极限明显大于火焰向下传播时的极限 (6.3%), 略低于向上传播时的极限 (9.2%)。

2.2 重力对火焰传播的影响

重力 (浮力) 对本文研究的富燃料丙烷/空气预混火焰的传播有显著影响, 影响程度随着当量比的增加而增大。当丙烷浓度小于 7.0% 时, 燃烧速度较大, 火焰可同时向上和向下传播, 但向上传播较快。随着燃料浓度的增大, 燃烧速度逐渐减小, 当浮力引起的气流上升速度大于燃烧速度时, 火焰只能向上传播, 此时火焰形状呈蘑菇形, 当到达容器顶部时才能向两侧和下方传播。当燃料浓度大于 8.5% 时, 火焰到达容器顶端后也不能再向下传播, 容器中下半部分的燃料无法被燃烧。而在微重力条件下, 对所有的可燃预混气体, 火焰都能基本保持球形对称向外传播, 但是由于极限附近火焰微弱, 火焰形状容易受到影响, 在点火电极附近火焰形状较为平坦。图 1 给

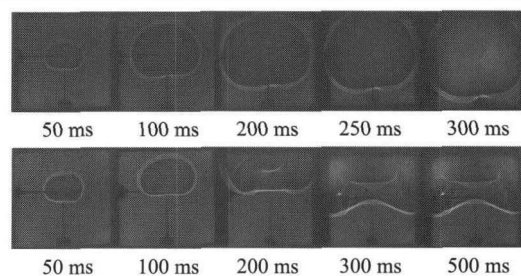


图 1 8.5% C₃H₈ 火焰传播过程的纹影图

Fig. 1 Flame propagation in a mixture of 8.5% C₃H₈

出了丙烷浓度为 8.5% 时火焰传播过程的纹影记录。其中, 上排为微重力实验结果, 下排为 1g 条件下的实验结果, $t = 0$ 为点火时刻。

重力对火焰传播的影响也体现在燃烧容器内的压力变化过程中。从图 2 可以看出, 微重力下的最大压力总是高于 1g 下的最大压力, 而且随着当量比的增大两者的差距增大, 当丙烷浓度超过 8.0% 时, 1g 下的压力变化相当平缓。

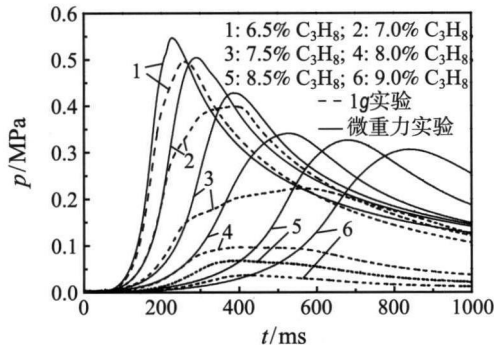


图 2 丙烷浓度不同时燃烧容器内压力变化过程
Fig. 2 Pressure records for propane/air mixtures of different concentration

2.3 层流燃烧速度的计算

根据燃烧容器内的压力变化曲线可以计算预混气体的燃烧速度, 其理论假设和实际应用可参见文献 [10], [11]。假设封闭容器中未燃预混气体的质量分数和压力上升之间有如下关系:

$$\frac{m_u}{m_{u0}} = \frac{P_e - P}{P_e - P_0} \quad (1)$$

未燃气体的消耗率 dm_u/dt 与火焰半径 r_{flame} 、未燃气体密度 ρ_u 、火焰燃烧速度 S_L 有关, 可以表示为:

$$\frac{dm_u}{dt} = -4\pi r_{\text{flame}}^2 \rho_u S_L \quad (2)$$

假设气体为等熵压缩 ($P\rho_u^{-\gamma} = C$, γ 是未燃气体的比热比, C 是常数), 对式 (1) 微分后代入式 (2) 可得:

$$\frac{dP}{dt} = 4\pi \frac{P_e - P_0}{V_{\text{vessel}}} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} r_{\text{flame}}^2 S_L \quad (3)$$

由体积关系 $V_b = V_{\text{vessel}} - V_u$ 和 $\frac{V_u}{V_{\text{vessel}}} = \frac{m_u}{m_{u0}} \cdot \frac{\rho_{u0}}{\rho_u}$, 可以得到火焰半径的表达式:

$$r_{\text{flame}} = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{vessel}}}{4\pi} \left(1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 可得层流燃烧速度的表达式如下:

$$S_L = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{vessel}}}{4\pi}} \left(1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0}\right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{dP}{dt} \quad (5)$$

火焰传播的初期受点火过程的影响较大, 而随着火焰向外传播, 容器内的压力增大会对火焰特性产生不可忽略的影响。这里取火焰半径大于 15 mm、压力增加小于 0.01 MPa 范围内的压力数据进行层流燃烧速度的计算。

图 3 给出了不同当量比时丙烷/空气预混火焰的层流燃烧速度。随着当量比的增大, 层流燃烧速度减小, 由 8.5 cm/s 逐渐降低到 2.7 cm/s。本文实验得到富燃料丙烷/空气预混火焰的极限层流燃烧速度 $S_{L,\text{lim}}$ 为 2.7 cm/s, 这与 Jarosinski 等 [2] 的微重力实验结果 ($S_{L,\text{lim}} \approx 2.0$ cm/s) 相近。此外, Lakshmisha 等 [12] 考虑了辐射热损失后数值模拟得到的极限层流燃烧速度为 2 cm/s, Williams [13] 理论推导得到的贫碳氢燃料/空气预混火焰极限速度约为 2.3 cm/s。可以看出, 虽然目前关于极限燃烧速度的大小尚未形成一致结论, 但是本文实验所得的极限速度与前人研究结果是一致的。由于 $S_{L,\text{lim}}$ 很小, 在 1g 条件下浮力对流的存在使得很难对其进行准确测量。

文献中关于富燃极限附近丙烷/空气预混火焰的研究较少, 但是对于当量比小于 1.60 的火焰已开展了较多的实验测量工作。图 4 将本文所得实验结果与文献 [14]~[19] 中的结果进行比较, 可以看出本文结果延续了前人得到的层流燃烧速度随当量比变化的趋势。当然, 为了精确地测定近可燃极限处丙烷/空气预混火焰的层流燃烧速度, 还应该考虑火焰拉伸、辐射热损失以及炭黑机理等多种因素的影响, 因此还需要做更多相关的研究工作。

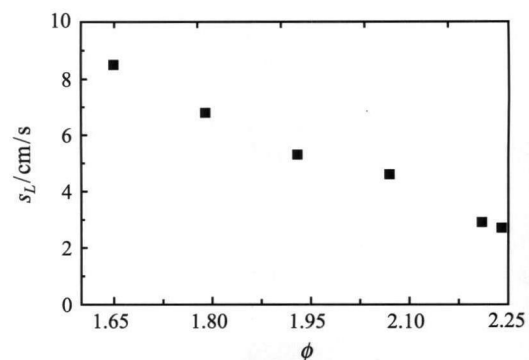


图 3 层流燃烧速度随当量比的变化
Fig. 3 Calculated laminar burning velocities as a function of mixture concentration

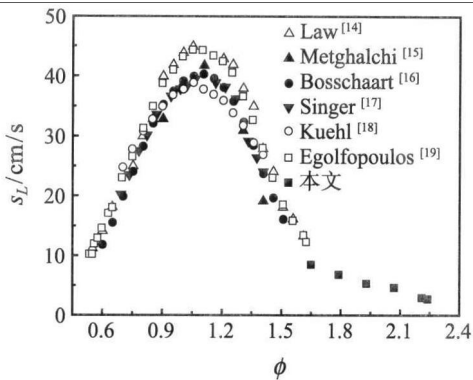


图4 本文层流燃烧速度结果与文献数据

Fig. 4 Laminar burning velocities by various workers

3 结 论

本文通过微重力实验,对富燃料丙烷/空气($\phi = 1.65 \sim 2.24$)预混火焰特性进行了研究,分析了重力对富燃料丙烷/空气预混火焰传播过程的影响,得到了火焰的富燃极限以及极限附近的层流燃烧速度,并与前人的数据进行了比较,得到以下主要结论:

(1) 在 $1g$ 条件下,可燃极限附近预混火焰比较微弱,自然对流对火焰传播造成了严重影响。微重力环境通过消除浮力干扰,为研究近极限火焰特性提供了理想条件。

(2) 本文得到的富燃料丙烷/空气预混气体可燃极限为 $8.6\% \text{ C}_3\text{H}_8$,明显高于 $1g$ 条件下向上传播火焰的可燃极限,略低于向上传播火焰的可燃极限。

(3) 随着当量比的增大,丙烷/空气预混火焰层流燃烧速度从 8.5 cm/s 逐渐减小到 2.7 cm/s ,数据变化趋势与文献结果相一致。

(4) 富燃极限处丙烷/空气预混火焰的层流燃烧速度非常小,约为 2.7 cm/s 。

参 考 文 献

- [1] Strehlow R A, Noe K A, Wherley B L. The Effect of Gravity on Premixed Flame Propagation and Extinction in a Vertical Standard Flammability Tube [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1986, 21: 1899-1908
- [2] Jarosinski J, Podfilipski J, Gorczakowski A, et al. Experimental Study of Flame Propagation in Propane-Air Mixture Near Rich Flammability Limits in Microgravity [J]. Combustion Science and Technology, 2002, 174: 21-48
- [3] Lovachev L A. Flammability Limits—a Review [J]. Combustion Science and Technology, 1979, 20: 209-224
- [4] Bradley D, Mitcheson A. Mathematical Solutions for Explosions in Spherical Vessels [J]. Combustion and Flame,

1976, 26: 201-217

- [5] Coward H F, Jones G N. Limits of Flammability of Gases and Vapors [R]. US: Bureau of Mines Bull, 1952
- [6] Krivulin V N, Kudryavtsev E A, Baratov A N, et al. Investigation of Limit Flames in Microgravity [J]. Doklady Physical Chemistry (Engl. Transl.), 1980, 247: 686-689
- [7] Wang Shuang-Feng, Zhang Hai, Jarosinski J, et al. Laminar Burning Velocities and Markstein Lengths of Premixed Methane/Air Flames Near the Lean Flammability Limit in Microgravity [J]. Combustion and Flame, 2010, 157: 667-675
- [8] Ronney P D, Wachman H Y. Effect of Gravity on Laminar Premixed Gas Combustion I: Flammability Limits and Burning Velocities [J]. Combustion and Flame, 1985, 62: 107-119
- [9] Jarosinski J, Strehlow R A, Azarbarzin A. The Mechanisms of Lean Limit Extinguishment of an Upward and Downward Propagating Flame in a Standard Flammability Tube [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1982, 19: 1549-1557
- [10] Lewis B, Elbe G von. Combustion Flames and Explosions of Gases [M]. 3rd Edition. London: Academic Press, 1987: 388
- [11] Dahoe A E, Zevenbergen J F, Lemkowitz S M, et al. Dust Explosions in Spherical Vessels: The Role of Flame Thickness in the Validity of the 'Tube-root law' [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9: 33-44
- [12] Lakshmisha K N, Paul P J, Mukunda H S. On the Flammability Limit and Heat Loss in Flames with Detailed Chemistry [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1990, 23: 433-440
- [13] Williams F A. Combustion Theory [M]. 2nd Edition. Menlo Park, CA, Benjamin-Cummings, 1985
- [14] Law C K, Peters N, Rogg B. Reduced Kinetic Mechanisms for Application in Combustion Systems [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993
- [15] Metghalchi M, Keck J C. Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure [J]. Combustion and Flame, 1980, 38: 143-154
- [16] Bosschaart K J, Goey L P H. The Laminar Burning Velocity of Flames Propagating in Mixtures of Hydrocarbons and Air Measured With the Heat Flux Method [J]. Combustion and Flame, 2004, 136: 261-269
- [17] Singer J M. Burning-Velocity Measurements on Slot Burners Comparison With Cylindrical Burner Determinations [J]. Symposium on Combustion, 1953, 4: 352-358
- [18] Kuehl D K. Laminar-Burning Velocities of Propane-Air Mixtures [J]. Symposium on Combustion, 1961, 8: 510-521
- [19] Egolfopoulos F N, Zhu D L, Law C K. Experimental and Numerical Determination of Laminar Flame Speeds: Mixtures of C_2 -hydrocarbons with Oxygen and Nitrogen [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1990, 23: 471-478