

加压条件下甲烷/空气预混火焰可燃 极限的微重力实验研究

张 海¹ 樊 融¹ 田雪沁¹ 许 考¹ 汤根土¹ 王双峰² 万士昕²

(1. 清华大学热能工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084,
2. 中国科学院力学研究所, 国家微重力实验室, 北京 100190)

摘 要 本文成功搭建了适用于中国科学院力学研究所国家微重力实验室 (NMLC) 落塔的高压对冲火焰实验系统, 并首次开展了微重力条件下加压对冲火焰实验, 测定了一定张力条件下甲烷/空气层流预混火焰的熄灭极限。实验结果表明, 随着压力的增高, 甲烷/空气混合气体的可燃极限呈先增后降的非单调变化趋势, 峰值发生在 0.4 MPa 左右。浮力对加压下微弱火焰熄灭极限的影响明显, 在常重力条件下, 相同张力下的熄灭极限较微重力条件下的偏大, 峰值出现的压力略低。微重力条件下的实验结果与使用 CHEMKIN 的数值模拟的结果相当一致。

关键词 加压; 可燃极限; 预混火焰; 微重力; 落塔

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2010)01-0173-04

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FLAMMABILITY LIMITS OF PREMIXED CH₄/AIR MIXTURES AT ELEVATED PRESSURES AT MICROGRAVITY

ZHANG Hai¹ FAN Rong¹ TIAN Xue-Qin¹ XU Kao¹ TANG Gen-Tu¹
WANG Shuang-Feng² WAN Shi-Xin²

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract An experimental system of counterflowing flames is built up, suitable for using the NMLC's 3.6 s drop tower. Experimental studies of the flammability limits of premixed CH₄/Air laminar flames at elevated pressures are conducted at microgravity. The extinction limits at fixed strain rates are successfully measured at pressure of 0.1~0.5 MPa. It is found that during the experimental pressure range, the extinction limits at a fixed strain rate increases and then decreases with pressure. The peak value is around 0.4 MPa at microgravity, and around 0.3 MPa at normal gravity. The buoyancy effect is noticeable to the extinction limits of the weakly burning flames, thereby the flammability limits. With its presence, the extinction limits at the same strain is larger while the pressure corresponding to the peak value is smaller. The experimental data obtained at microgravity agree well with simulated results and theoretical analyses.

Key words pressure; flammability limits; laminar premixed flame; microgravity; drop tower

0 引 言

预混气体的可燃极限一方面直接关系到燃料的防火安全和燃烧室的设计, 另一方面它本身是化学动力学、流体力学和传热传质等过程相互作用的一个极限状态, 反映的是燃料的一个重要的固有特性。在早期的研究中, “可燃极限”被宽松地定义为反应混合物中可燃成分的某一浓度范围, 在此范围以外,

火焰的传播变为不可能。在贫燃火焰侧的极限浓度被称为贫燃极限; 相应地, 在富燃火焰侧的极限浓度被称为富燃极限^[1]。近期的研究表明, 这种基于燃烧现象而宽松定义的可燃极限实际上受到火焰形状、火焰所处的流场以及各种热损失等外部条件的影响, 不能被认为是燃料的固有特性。因此, 研究者

收稿日期: 2008-11-17; **修订日期:** 2009-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.50576041)

作者简介: 张 海 (1967-), 男, 福建宁化人, 副教授, 主要从事燃烧基础理论、煤清洁燃烧方面研究。

在理论上将“可燃极限”更加严格地定义为可燃成分在反应混合物中的某一浓度范围,在此范围以外,一维、稳态、层流、平面和准绝热(除火焰本身的辐射外)的火焰传播变为不可能^[2~4]。这种定义下的可燃极限消除了外部因素的影响,所以又被称为基本可燃极限或理论可燃极限。

然而,理论可燃极限所对应的火焰模型是一种理想假设,很难甚至不可能在实验室中加以测定。传统的测定方法主要有两种,即极限管法和定容圆球法^[5]。但极限管法中火焰与管壁相互接触,引起传导热损失并自由基销毁。而在定容圆球法中火焰处于不断的扩张中,其所受的张力随时间变化,环境压力也可能不断增大,另外由于点火能被“记忆”在容器内,亦可能降低数据的可靠性^[6]。消除热传导损失的有效方法是将火焰稳定在不与壁面接触的空间内。根据理论可燃极限的定义,火焰还必须保持平面,并且处于一个一维的、稳定的层流流场中。经过比较,对冲火焰系统最接近这些条件的要求^[4,7,8],这一由两个对称的喷嘴组成,反应气流分别从喷嘴喷出,在点燃后,火焰依靠流体的张力稳定在两个喷嘴之间。对于预混气流,将形成两个对称的平面火焰。

现有可燃极限的研究基本上限制在常压下,对不同压力下可燃极限的研究较少,而且研究结果之间存在一定的矛盾。一些文献笼统地认为,压力的增大有利于扩大贫富两侧的可燃范围^[1],一些学者认为可燃极限与压力呈一“V”字型关系^[10],还有一些学者认为可燃极限与压力之间的关系更接近一“U”字型,贫氧侧受压力的影响明显,可燃极限在富氧侧受压力的影响不明显^[11]。得出这些不同结论的原因很大程度上也是因为使用的实验方法不同。另外一个重要原因是现有的实验都是在地面进行。研究表明,可燃极限必须通过接近可燃极限的微弱火焰来研究^[4,8,9]。然而微弱火焰的一个特点就是火焰速度低。这样,就产生另一个实际问题:浮力引起的自然对流可能改变火焰锋面的形状、影响火焰内部的传质传热过程、导致燃烧的不稳定甚至火焰的熄灭和点火的不可可能性。为了克服浮力的影响,微弱火焰的研究必须在微重力条件下进行^[11]。

本文建立一套适应我国新建的微重力落塔的加压对冲火焰实验系统,测量不同张力(拉伸率)下甲烷/空气层流预混火焰的熄灭极限,为预混气体可燃极限的理论研究提供可靠的实验数据。

1 实验系统和方法

本文使用的落塔隶属中国科学院力学研究所国家微重力实验室(NMLC),塔高116 m,有效微重力

时间约为3.6 s,微重力水平约为 $10^{-2}g \sim 10^{-3}g$ 。

图1为实验系统的示意图。实验系统的主体是一个有法兰密封的加压燃烧室,采用航空铝制成,实际工作压力为0.1~1 MPa。在点火以前,燃烧室充满一定压力的氮气,通过背压阀和压力传感器实现压力监控。燃烧室内安装有两个对冲喷嘴,预混气体喷入燃烧室内后电火花点火器点燃,预混气体的流量由质量流量控制器调整,两路管路完全相同。燃烧室侧面设有观察窗,可通过摄像机记录火焰燃烧状况。实验系统的自动控制通过一个32通道的PLC实现。

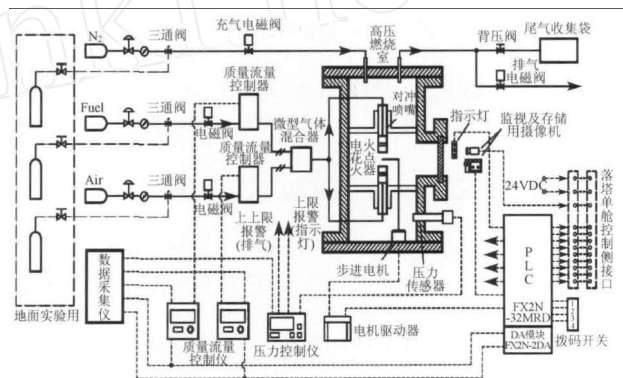


图1 实验系统的示意图

Fig. 1 The schematic of experimental system

由于落塔严格的质量要求,本实验装置中空气、燃料、以及提供高压燃烧室背压的氮气都储存在各自的容积为1 L的铝合金高压气瓶中。在气瓶出口的管路上还安装了三通阀,可以通过阀门快速切换到大气瓶供气来进行地面实验,或对高压燃烧室内充气加压。从背压阀排除的气体被收集在一个容积为30 L的尾气收集袋中,避免实验中燃烧的尾气对外释放,产生不平衡的推力影响落舱的飞行状态。实验燃料为甲烷。实验台外观如图2所示。

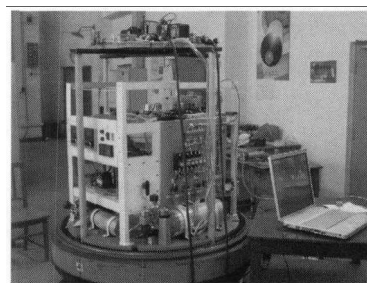


图2 实验系统的外观图

Fig. 2 The side view of the experimental apparatus

实验过程采用与Maruta等^[8]的测量方法,即首先在常重力下将化学当量比较高的混合气体点燃,然后控制化学当量比缓缓下降,并在此期间释放落

舱, 火焰在下降过程中熄灭, 由火焰的熄灭时刻和浓度变化曲线测得微重力环境下火焰熄灭时的化学当量比, 浓度变化见图 3。

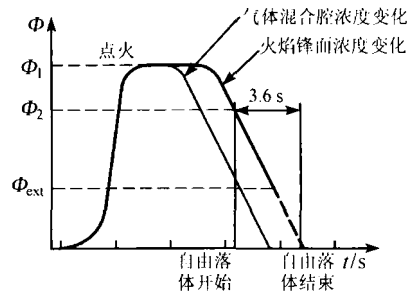


图 3 对冲火焰系统的浓度变化示意图
Fig. 3 Variation of the fuel concentration during the drop

2 结果与讨论

(1) 延迟时间的测定

在实验过程中, 混合气体的化学当量比是通过流量控制器测得的燃料与空气的即时流量计算出来的。显然, 它只能表示质量流量控制器出口处的混合气体浓度。喷嘴出口处混合气体的化学当量比变化 (也就是火焰的化学当量比变化) 与测量记录中的化学当量比变化之间必然存在着一定的延迟时间。准确确定这一延迟时间至关重要。

在 Maruta 的研究中^[8], 延迟时间的测定首先令火焰稳定燃烧, 然后在某一时刻突然停止燃料的供给, 并适当增加空气流量以保持管路中气体流速不变, 同时使用高速摄像机记录下火焰发光消失的时刻, 两时刻之间的间隔即为延迟时间。但本文实验发现使用这种方法时, 测量结果与通过气体流速计算出来的延迟时间有一定的差距。根据采集出来的燃料流量信号可以发现, 当燃料电磁阀关闭的时候, 燃料的流量并不是阶跃地变化至 0, 而是有一个逐渐变化的过程, 如图 4 所示。因而延迟时间的测定不能选择火焰熄灭的时刻作为终止点, 而应该以流量变化时刻与两个火焰锋面之间间距开始变化时刻来进行计算。图 5 给出了根据火焰锋面随上游的燃料阶跃变化而变化所得出的延迟时间的实验值和计算值, 两者吻合得很好。

通过 PLC 事先设定的化学当量比变化曲线和延迟时间的标定, 在实验过程中测得的火焰熄灭时刻, 就可以推算出该张力下火焰熄灭的化学当量比。如图 6 所示, 折线为由质量流量控制器反馈的流量信号计算得到的实际化学当量比变化曲线, 圆点为两个火焰锋面之间的距离变化。对于甲烷/空气预混气体, 在对冲结构中火焰熄灭前, 上下两个火焰向滞止面移动并且合并。合并过后很短的时间内, 火

焰熄灭。

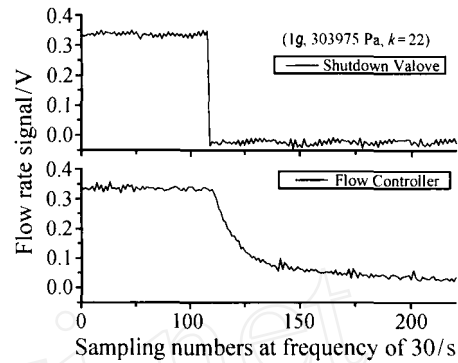


图 4 电磁阀关闭后流量计信号变化图
Fig. 4 Variations of flow rate signal after valve shutoff

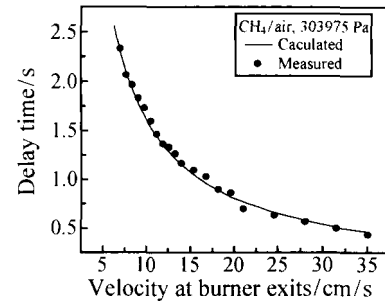


图 5 延迟时间的测量和计算结果
Fig. 5 Measured and calculated delay time

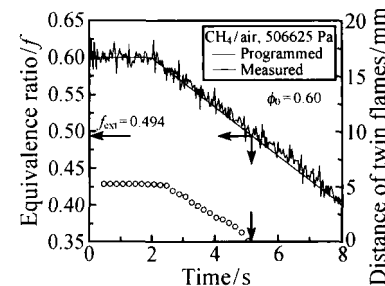


图 6 不同初始化学当量比下火焰熄灭极限的测量
Fig. 6 Measured and calculated delay time

(2) 实验结果及分析

图 7 给出了甲烷/空气预混火焰在整个实验中从常重力到微重力而后由于化学当量比下降而熄灭的不同形态。在常重力环境下, 上下火焰锋面都受到浮力引起的上升对流体影响而无法维持平面状态。当落舱开始下落进入微重力时间段以后, 原本弧形的火焰锋面立即变成了规整的平面火焰, 最后由于化学当量比的降低, 两个火焰锋面逐渐靠近, 直至融合在一起直至熄灭。从图可见微重力环境有效地减轻浮力对流带来的影响。图 8 所示为张力 20 s^{-1} , 压力为 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 的甲烷/空气层流预混火焰的熄灭极限, 实验值分别在常重力和微重力的条件下测得, 图中亦给出了相应的数值模拟值。

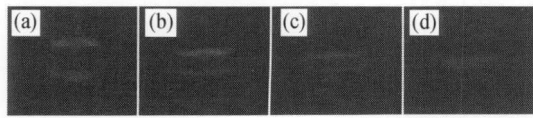


图7 微重力实验过程中对冲火焰变化过程
(a) 1g 火焰点燃不久 (b) 1g 开始下落时
(c) mg 化学当量比下降 (d) mg 熄灭前夕

Fig. 7 The variation of the flame front at microgravity

(a) 1g after ignition (b) 1g right before the drop
(c) mg, during the drop (d) mg, before extinction

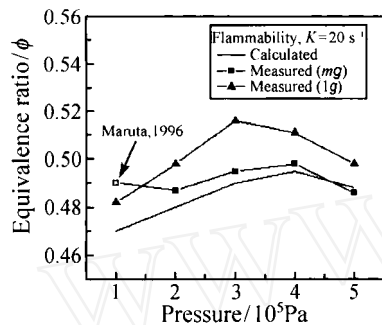


图8 不同压力下对冲甲烷/空气层流预混火焰 $K=20\text{ s}^{-1}$ 的熄灭极限

Fig. 8 The extinction limits of counterflowing premixed CH_4/air flames at $K=20\text{ s}^{-1}$

从图中可以看出, 实验的压力范围内, 压力对熄灭极限有明显的作用, 但这种作用不是单调的, 随压力的上升, 熄灭极限增大, 在压力达到一定数值后, 压力继续上升, 熄灭极限开始下降。常重力地面实验中峰值对应的压力为 0.3 MPa, 而微重力实验对应的峰值为 0.4 MPa。峰值的差别主要是由浮力引起的。另外可以看出, 与常重力的实验数据相比, 微重力下的实验数据与对冲火焰的数值模拟结果 (没有计入浮力项) 更为吻合。作者同时使用 CHEMKIN 开展了甲烷/空气一维自由传播层流预混火焰的可燃极限的数值计算, 结果如图 9 所示。可以看出, 对冲火焰所得的熄灭极限的实验结果与一维自由传播火焰的

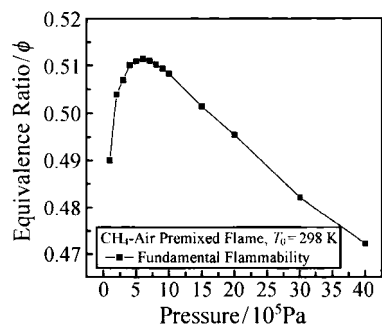


图9 不同压力下的一维自由传播甲烷/空气层流预混火焰的可燃极限

Fig. 9 Flammability limits at different pressures for the 1-D freely propagating CH_4/air premixed flames

模拟结果相一致, 也就是说, 压力对可燃极限的影响呈先增后降的趋势, 峰值发生在 0.4 MPa 左右。

3 结束语

了解压力对预混火焰可燃极限的影响具有重要的理论和实际意义。本文成功搭建了适用于微重力国家实验室 (NMLC) 落塔的高压对冲火焰实验系统, 首次在微重力条件下开展了加压对冲层流预混火焰可燃极限的实验研究。

研究结果表明随着压力的增高, 甲烷/空气混合气体的可燃极限并不是单调变化的, 呈先增后降的趋势, 峰值发生在 0.4 MPa 左右。浮力对加压下微弱火焰熄灭极限的影响明显, 在常重力条件下, 由于受到自然对流的影响, 相同张力下的可燃极限的测量值较微重力条件下偏大, 峰值出现的压力略低。微重力条件下的实验结果与使用 CHEMKIN 的数值模拟的结果相当一致。

参考文献

- [1] Williams F A. Combustion Theory [M]. 2nd ed. Benjamin-Cummings, Menlo Park, CA, 1985
- [2] Law C K. Combustion Physics [M]. Cambridge: Cambridge Press, 2006
- [3] Law C K, Egolfopoulos F N. A Unified Chain-Thermal Theory of Fundamental Flammability Limits [C]// Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion. 1992: 137-144
- [4] Zhang H, Egolfopoulos F N. Extinction of Near-Limits Premixed Flames in Microgravity [C]// Twenty-eighth Symposium (International) on Combustion. 2000: 1875-1882
- [5] Coward H F, Jones G W. Limits of Flammability of Gases and Vapors [R]. Bureau of Mines Bulletin 503, 1952
- [6] 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
- [7] Law C K, Zhu D L, Yu G. Propagation and Extinction of Stretched Premixed Flames [C]// Twenty-First Symposium (International) on Combustion. 1986: 1419
- [8] Maruta K, Yoshida M, Ju Y, et al. Experimental Study on Methane-Air Premixed Flame Extinction at Small Stretch Rates in Microgravity [C]// Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, 1996: 1283
- [9] 徐旭常, 毛健雄, 曾瑞良, 等. 燃烧理论与燃烧设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988
XU Xuchang, MAO Jianxiong, ZENG Ruiliang, et al. Combustion Theory and Combustion Devices [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1988 (in Chinese)
- [10] Glassman I. Combustion [M]. 3rd Edition. Academic Press, 1996
- [11] Ronney P D. Understanding Combustion Processes through Microgravity Researches [C]// Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion. 1998: 2485