

湍流预混火焰熄灭特性的实验研究

王绥德¹, 王双峰¹, 王强^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

摘要: 采用对冲火焰实验系统对贫燃料甲烷/空气湍流火焰发生熄灭的极限条件进行考察, 分析了平均流场拉伸和湍流拉伸对火焰熄灭的影响. 实验结果表明, 随着甲烷/空气火焰当量比的增大, 其熄灭时的射流平均速度以及平均拉伸率随之增大, 说明平均拉伸对火焰熄灭极限有显著影响. 当量比增大时, 湍流极限拉伸率和 Karlovitz 拉伸参数 Ka 均增大, 这与前人的实验结果一致, 但由于平均拉伸的影响, 当量比一定时, Ka 的数值比文献数据偏小. 根据实验数据, 文中对湍流预混火焰熄灭的机制进行了探讨.

关键词: 预混燃烧; 湍流火焰; 拉伸率; 火焰熄灭

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 1006-8740(2014)05-0466-05

Experimental Investigation of Turbulent Premixed Flame Extinction

Wang Suide¹, Wang Shuangfeng¹, Wang Qiang^{1,2}

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

2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Extinction of premixed turbulent methane/air flames was studied in a counterflow burner, and the effects of bulk and turbulent straining on the extinction limits were analysed. The experimental results show that the average jet velocity and bulk stretch rate at extinction increase as the equivalent ratio increases, indicating a significant influence of the bulk straining on flame extinction. With the equivalent ratio increasing, the critical value of turbulent stretch rate and Karlovitz number, Ka , for flame extinction both increase. Although the observation is consistent with previous experiments, the present value of Ka is smaller than literature data for the same equivalent ratio due to the effect of bulk straining. Based on the experimental results, the mechanism of turbulent flame extinction was discussed.

Keywords: premixed combustion; turbulent flame; stretch rate; flame extinction

湍流预混火焰熄灭特性的研究对内燃机和燃气轮机等实际设备的设计有重要指导意义, 而且湍流火焰熄灭是化学反应、流动和传热传质等过程相互作用的一个极限状态, 对该问题的认识可为检验和发展湍流燃烧理论提供帮助.

目前已经提出的湍流预混火焰的熄灭机理主要有两种, 即火焰拉伸机理和辐射热损失机理. 在层流预混燃烧中, 辐射热损失已被证明对低拉伸火焰的熄

灭过程有重要影响^[1], 而对于湍流预混燃烧, Ronney^[2]提出辐射热损失可能是导致湍流火焰熄灭的原因, 并对碳氢燃料/空气预混气体提出了火焰熄灭的判据, 但由于缺少可靠的实验数据, 还无法进行验证. Karlovitz 等^[3]首先引进了火焰拉伸的概念, 从此 Karlovitz 数被广泛用于描述湍流拉伸引起的火焰熄灭, 其定义为

$$Ka = (u'/\lambda) (\delta_L/S_L)$$

收稿日期: 2013-12-15.

基金项目: 中国科学院专项课题资助项目(XDA04073300); 中国科学院力学研究所优秀青年人才培养计划项目资助.

作者简介: 王绥德(1990—), 男, 硕士研究生, wangsuide@sina.com.

通讯作者: 王双峰, 男, 博士, 副研究员, sfwang@imech.ac.cn.

网络出版时间: 2014-04-02. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.11715/rskxjs.R201403054.html>.

式中: u' 、 λ 、 δ_L 、 S_L 分别为湍流脉动速度、泰勒微尺度、层流火焰厚度以及层流燃烧速度; Ka 表征了湍流脉动对火焰面面积的影响. Karlovitz 认为湍流对火焰熄灭的影响有两个方面. 首先, 湍流引起速度梯度; 其次, 湍流脉动会影响火焰的发展, 导致火焰锋面畸变(凹凸不平), 在局部存在湍流脉动的瞬时速度梯度.

Abdel-Gayed 和 Bradley^[4]认为当 Karlovitz 数很大时, 导致小火焰熄灭的局部拉伸率发生的概率足够大, 从而引起了大规模的小火焰熄灭, 进而使火焰完全熄灭, 即“小火焰单元熄灭引起完全熄灭”的假设. 他们推导出新的 Karlovitz 火焰拉伸参数为

$$K = 0.157 (u'/S_L)^2 Re_T^{-0.5}$$

并考虑 Lewis 数, 把火焰拉伸、反应物性质结合起来, 根据实验和理论得到了预混湍流火焰熄灭的拉伸机制, 其中 $Re_T = u'L/\nu$ 为基于积分尺度 L 的湍流雷诺数, ν 为预混气体的运动黏性系数. Yang 和 shy^[5]通过实验发现, 当量比趋近于 1 时, 湍流预混甲烷/空气火焰熄灭的拉伸参数 K 显著增大, 贫燃料火焰的熄灭受辐射热损失的影响很大, 辐射热损失越大, K 值越小. Kostiuk 等^[6-7]利用对冲火焰实验也对湍流拉伸和预混气体浓度变化导致的火焰熄灭进行了研究.

由于实验数据有限, 且数据缺少一致性, 人们对湍流预混火焰熄灭的控制机制的理解还不完善. 本文采用对冲火焰实验系统对贫燃料甲烷/空气湍流火焰的熄灭特性进行观测, 目的是同时考察平均拉伸和湍流拉伸的影响, 并将实验结果与前人得到的实验数据进行对比, 探讨湍流预混火焰的熄灭机理.

1 实验系统和方法

本文采用的对冲火焰实验系统如图 1 所示. 对冲流场由两个对称的射流喷嘴形成, 它们在实验中采用上下布置, 湍流状态的气流分别从上下喷嘴喷出, 相遇后在喷嘴之间形成统计意义上稳定的轴对称流场, 可燃气流被点燃后, 相对滞止面对称的两个湍流火焰稳定在两个喷嘴之间.

射流喷嘴上游收缩段的收缩比为 3.5 : 1, 喷口内径为 25 mm, 在出口段外围设有环形保护气出口, 实验中使用氮气作为保护气, 以增加实验火焰的稳定性. 在喷嘴出口上游 50 mm 处安装多孔板(均匀打孔), 以产生射流中的初始湍流, 孔板有 3 种, 孔径 d 分别为 4 mm、5 mm 和 6 mm.

如图 2 所示, 实验系统设有燃料(甲烷)、空气和

氮气 3 路供气单元, 气体流量由质量流量控制器进行设定和调整. 燃料和空气按照指定的流量比例进入预混室, 再向对冲喷嘴供应, 氮气则直接进入保护气喷嘴. 预混气体由电火花点火器点燃, 实验过程的控制通过一个可编程控制器实现, 使用数码摄像机对燃烧过程进行记录.

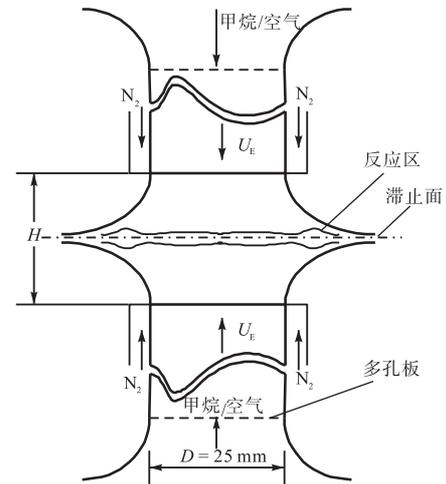


图 1 对冲预混湍流火焰示意

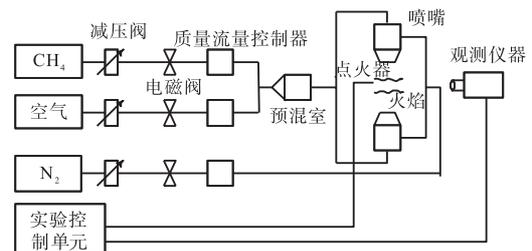


图 2 实验系统示意

实验过程如下: 根据射流平均速度 U_E 和预混气体当量比 ϕ 的要求设定各路气体的流量, 向对冲喷嘴供气; 对冲流场稳定后, 点燃预混气体, 形成稳定的湍流火焰; 在保持 U_E 不变的情况下, 缓慢降低预混气体中的燃料浓度, 使火焰逐渐熄灭, 得到火焰熄灭时的预混气体当量比. 实验中, 射流平均速度 U_E 的变化范围为 1.3 ~ 2.8 m/s, 喷嘴间距 H 的变化范围为 24 ~ 49 mm.

2 结果与讨论

2.1 火焰熄灭过程

图 3 为典型的甲烷/空气湍流火焰熄灭过程的实验记录. 由于浮力对流的作用, 火焰并不处于喷嘴之间的中间位置, 而是整体偏向上喷嘴, 火焰两侧往上翘曲. 浮力对流对火焰的这种影响在预混气体浓度降低的过程中表现得越来越明显. 随着当量比下降,

两个火焰锋面逐渐靠近,最终几乎合并在一起而熄灭. 实验中观察到,当对冲喷嘴间距较大时,两个火焰锋面在轴向方向上随机跳动,但在熄灭之前,火焰整体保持稳定.

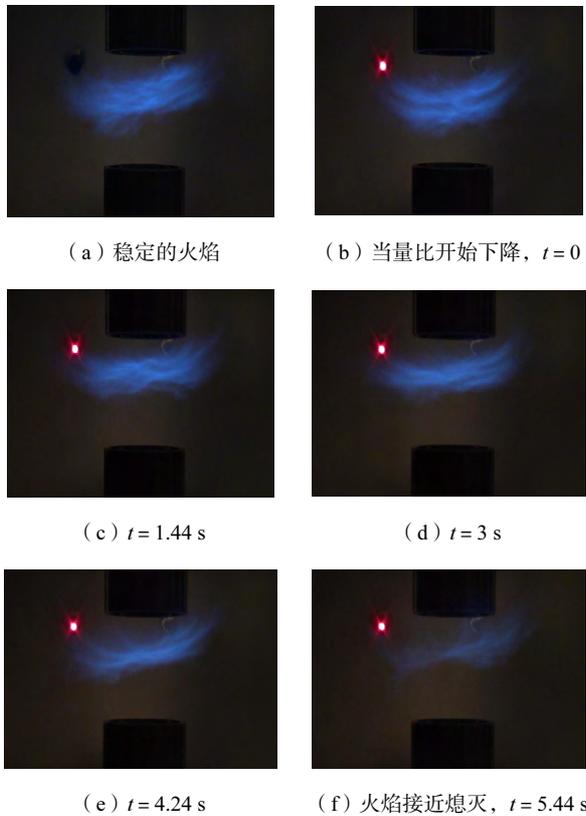


图 3 对冲火焰熄灭过程(初始当量比 0.63, $H = 44$ mm, $U_E = 1.3$ m/s)

2.2 熄灭极限

图 4 为使用 4 mm 多孔板时不同射流速度条件下得到的火焰熄灭当量比 ϕ_E 随着喷嘴间距 H 的变化. 可以看到,当 U_E 一定时,熄灭当量比随喷嘴间距的增大而减小,而在 H 一定时,熄灭当量比随射流平均速度的增大而增大. 由于喷嘴间距和射流速度决定着对冲流场的平均拉伸率,上述结果表明平均拉伸率对火焰熄灭有重要的影响. 另外, U_E 一定时,熄灭当量比随喷嘴间距的变化不是线性的,当喷嘴间距大

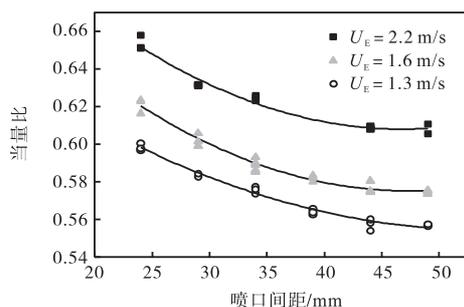


图 4 火焰熄灭当量比随喷嘴间距的变化(4 mm 多孔板)

于约 1.5 倍喷嘴内径时,熄灭当量比的变化逐渐趋于平缓,并最终接近常值,说明此时的平均拉伸率与喷嘴间距无关,这与 Kostiuik 等^[7]的实验结果一致.

前人的实验表明^[7-8],当对冲火焰接近熄灭时,湍流对冲流场几乎不受火焰的影响,流场特性接近冷态流场. 对冲流场中湍流火焰所受到的平均拉伸率可表示为

$$\alpha_b = 2 U_E / H \tag{1}$$

据此,可将图 4 中实验结果进一步表示成火焰熄灭当量比随平均拉伸率的变化,结果如图 5 所示,由图可见,随着当量比增大,火焰熄灭时的平均拉伸率增大.

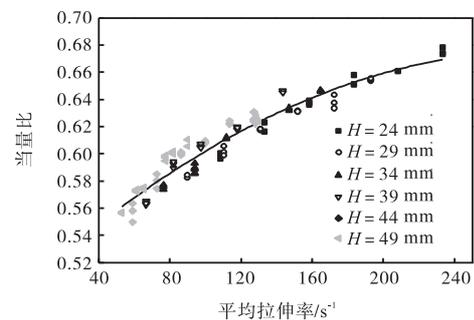


图 5 火焰熄灭当量比随平均拉伸率的变化

图 6 为喷嘴间距 $H = 29$ mm 时使用不同多孔板得到的火焰熄灭极限. 当量比一定时,孔板直径越小,使火焰熄灭所需要的平均拉伸率越大. Kostiuik 等^[6]的测量表明,多孔板的孔径影响着对冲流场中湍流强度,相同射流平均速度条件下,孔板的小孔直径越小,产生的湍流强度越低. 因此对于相同浓度的反应物,小孔直径越小的孔板其湍流的作用越小,此时就需要更高的射流速度以产生更大的平均拉伸和湍流拉伸,使火焰发生熄灭.

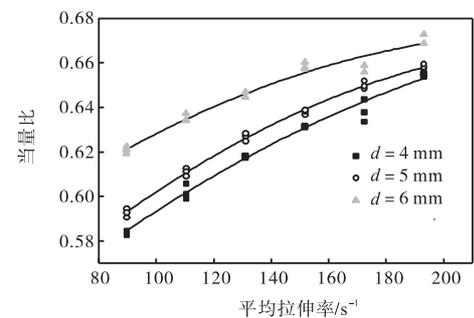


图 6 多孔板对火焰熄灭极限的影响($H = 29$ mm)

湍流引起的火焰拉伸率表示为 $\alpha_t = u' / \lambda$. Cho 等^[9]通过实验发现,滞止流场中湍流脉动速度 u' 的大小与离开喷嘴的距离无关,而与射流平均速度呈正比关系,在 Coppola 和 Gomez^[10]以及 Kostiuik 等^[6]的研究

中也有类似结论, 即:

$$u'/U_E \approx a \quad (2)$$

式中 a 为常数. 根据式(2), 并利用泰勒微尺度 λ 与积分尺度 L 之间的关联 $L/\lambda \sim Re_T^{0.5}$, 可得到计算湍流拉伸率的表达式为

$$\alpha_t = u'/\lambda = (a^3/L\nu)^{1/2} U_E^{3/2} \quad (3)$$

进一步将层流火焰厚度 δ_L 表示为 ν/S_L , 由 Karlovitz 数的定义和式(3)可得

$$Ka = \alpha_t \nu S_L^2 \quad (4)$$

参考 Coppola 和 Gomez^[10]以及 Kostiuk 等^[6]的研究, L 约等于湍流孔板的小孔直径 d , a 取 0.25.

图 7 为对冲湍流火焰发生熄灭时总拉伸率和湍流拉伸率的比较, 其中总拉伸率 $\alpha_T = \alpha_t + \alpha_b$, 图中也给出了对冲层流火焰的熄灭极限^[11]. 从图中可以看出, 层流火焰熄灭边界位于湍流火焰熄灭边界的上方, 湍流越强(湍流拉伸率越大)火焰熄灭边界与层流火焰熄灭边界之间的距离越远(层流火焰可以看作湍流强度为零的极限情况), 而与湍流拉伸相比, 平均拉伸率在总拉伸率中所占比例较小.

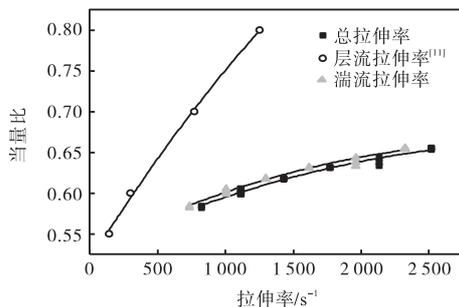


图 7 火焰熄灭的极限拉伸率

图 8 是火焰熄灭时 Karlovitz 数随当量比的变化. 随着当量比的增大 Ka 增大, 与 Yang 和 shy^[5]的实验结果相比, Ka 随当量比变化的趋势相同, 但数值明显偏低(在 Yang 实验中, $\phi = 0.6$ 时, $K = 6.2$, K 随 ϕ 增大的趋势由甲烷/氮气/空气和甲烷/二氧化碳/空气火焰的实验结果推论得出). 这种差异可能是由对冲流场中存在的平均拉伸作用造成的. 在 Yang 的实验中, 湍流场具有各向同性的特性, 火焰仅受到湍流拉伸的作用, 而本文研究的双射湍流火焰同时受到平均拉伸和湍流拉伸, 它们在火焰熄灭过程中的作用机理可能不同, 虽然平均拉伸率的数值较小, 从前文结果可以看到, 它对熄灭极限有显著的影响.

从实验结果可以看到, 平均拉伸和湍流脉动拉伸同时影响火焰熄灭, 平均速度梯度以及局部脉动速度梯度的相互作用在时间和空间上改变火焰的表面, 在

某个流动条件下引起燃烧反应区的产热与散热之间的失衡而导致火焰熄灭. 通过实验观察可以发现, 在平均拉伸一定的条件下, 湍流扰动会引起火焰局部熄灭, 这些熄灭的区域在瞬时拉伸率降低时能重新被引燃. 随着平均拉伸率的增大, 火焰局部熄灭的概率增加, 而被引燃的概率减小. 当拉伸率大于极限值时, 熄灭的火焰区无法再次引燃, 因而发生局部熄灭的火焰区域在增加, 最终使火焰完全熄灭.

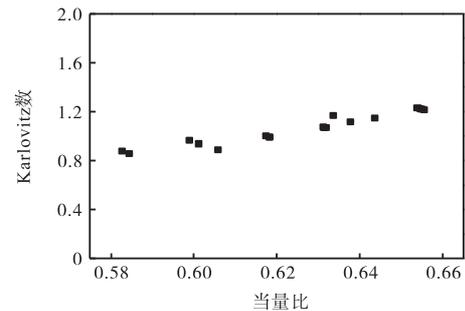


图 8 火焰熄灭的 Karlovitz 数

3 结论

本文采用对冲火焰实验系统对贫燃料甲烷/空气湍流火焰发生熄灭的极限条件进行考察, 分析了平均流场拉伸和湍流拉伸对火焰熄灭的影响. 实验中, 在保持对冲射流喷口流速不变的情况下, 通过逐渐降低燃料浓度使湍流火焰熄灭, 此时的拉伸率为极限拉伸率. 研究结果表明:

(1) 随着甲烷/空气火焰的当量比增大, 其熄灭时的射流平均速度 U_E 以及平均极限拉伸率随之增大, 对冲喷口间距减小时 U_E 也随之减小, 说明平均拉伸对火焰熄灭极限有显著影响.

(2) 当量比增大时, 湍流极限拉伸率和 Karlovitz 数均增大, 这与前人的结果一致, 但当量比一定时, Ka 的数值比文献数据偏小, 这可能是由于平均拉伸作用造成的.

参考文献:

- [1] Maruta K, Ju Y, Honda A, et al. Lewis number effect on extinction characteristics of radiative counterflow $CH_4-O_2-N_2-He$ flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1998, 27: 2611-2617.
- [2] Ronney P D. Flame structure modification and quenching by turbulence [J]. *Combustion Science and Technology*, 1999, 6: 53-76.
- [3] Karlovitz B, Denniston D W, Knapschaefer D H, et

- al. Studies on turbulent flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1953, 4: 613-620.
- [4] Abdel-Gayed R, Bradley D. Criteria for turbulent propagation limits of premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 1985, 62: 61-68.
- [5] Yang S I, Shy S S. Global quenching of premixed CH₄/air flames : Effects of turbulent straining , equivalence ratio, and radiative heat loss[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 1841-1847.
- [6] Kostiuk L W, Bray K N C, Cheng R K. Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams(I) : Nonreacting flow field [J]. *Combustion and Flame*, 1993, 92: 377-395.
- [7] Kostiuk L W, Bray K N C, Cheng R K. Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams(II) : Reacting flow field and extinction [J]. *Combustion and Flame*, 1993, 92: 396-409.
- [8] Coppola G, Coriton B, Gomez A. Highly turbulent counterflow flames: A laboratory scale benchmark for practical systems [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156: 1834-1843.
- [9] Cho P, Law C K, Hertzberg J R, et al. Structure and propagation of turbulent premixed flames stabilized in a stagnation flow [C]// *Twenty-First Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1988: 1493-1499.
- [10] Coppola G, Gomez A. Experimental investigation on a turbulence generation system with high-blockage plates [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33: 1037-1048.
- [11] Bradley D, Gaskell P H, Gu X J, et al. Premixed flamelet modelling: Factors influencing the turbulent heat release rate source term and the turbulent burning velocity [J]. *Combustion and Flame*, 2005, 143: 227-245.