

对冲湍流预混火焰熄灭特性的实验研究¹⁾

王绥德^{*}, 王双峰^{*2)}, 王强^{+*}

^{*} (中国科学院力学研究所, 北京 100190) ⁺ (中国科学技术大学, 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 U_E 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 K 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 K 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

引言

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: 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, Ronney² 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。Karlovitz³ 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:

$$Ka = \left(\frac{u'}{\lambda} \right) \left(\frac{\delta_L}{S_L} \right) \quad (1)$$

其中 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, $\frac{u'}{\lambda}$ 代表湍流拉伸率, Karlovitz 数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 Bradley⁴ 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。他们由公式(1)导出了新的湍流 Karlovitz 火焰拉伸参数 $K = 0.157(u' / S_L)^2 \text{Re}_T^{-0.5}$, 并考虑 Lewis 数 Le , 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 为基于积分尺度的湍流雷诺数。Yang⁵ 等通过实验发现, 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。一些学者利用对冲火焰实验⁶⁻⁷ 也对湍流拉伸和预混气体浓度变化导致的湍流预混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够不完善。已有实验中, 对火焰拉伸作用的研究局限于均匀各向同性湍流, 对实际应用中同时存在的平均流场拉伸的影响没有予以考虑, 由此得到的实验结果用于探讨火焰熄灭过程时难免存在片面性。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。

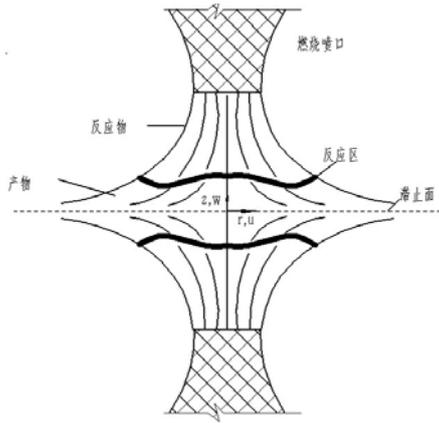


图 2 对冲预混湍流火焰示意图

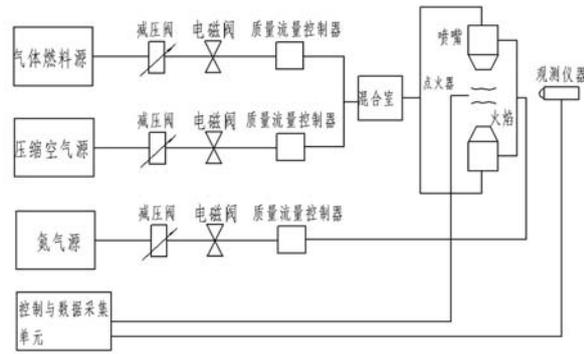


图 1 实验系统示意图

1 实验系统和方法

本文采用的对冲火焰实验系统如图 2 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，两个相对滞止面对称的湍流火焰火焰稳定在两个喷嘴之间（图 2 所示）。喷嘴上游收缩段的收缩比为 3.5:1，喷嘴出口直径为 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，孔径分别为 4、5 和 6 mm。

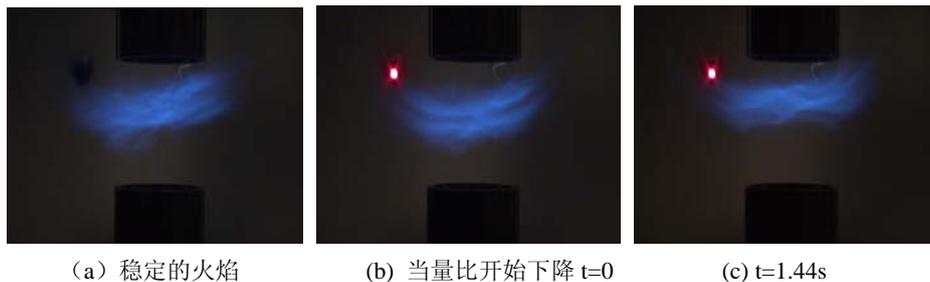
如图 2 所示，实验系统设有燃料（甲烷）、空气和氮气 3 路供气单元，气体流量由质量流量控制器控制设定和调整。燃料和空气按照指定的流量比例进入混合室，再向对冲喷嘴供应，氮气则直接进入保护气喷嘴。预混气体由电火花点火器点燃，实验过程的控制通过一个 PLC 控制器实现，使用数码摄像机对燃烧过程进行记录。

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，形成湍流火焰；在保持射流速度不变的情况下，缓慢降低预混气体中燃料的浓度，使火焰逐渐熄灭，测得火焰熄灭时的预混气体当量比。实验中射流速度 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，整体偏向上喷嘴，而且火焰两侧往上翘曲。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并熄灭。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，当在熄灭之前，火焰整体保持稳定。



(a) 稳定的火焰

(b) 当量比开始下降 $t=0$ (c) $t=1.44s$



(d) $t=3s$ (e) $t=4.24s$ (f) 火焰接近熄灭 $t=5.44s$
 图 3 对冲火焰熄灭过程 (初始当量比 0.63, $H=44\text{ mm}$, $U_E=1.3\text{ m/s}$)

2.2 火焰熄灭极限

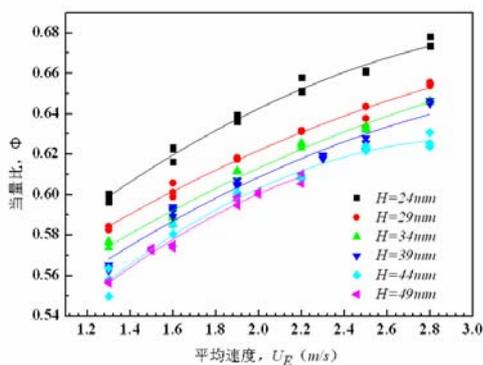


图 4 平均射流速度与当量比的对应关系
 (4 mm 多孔板)

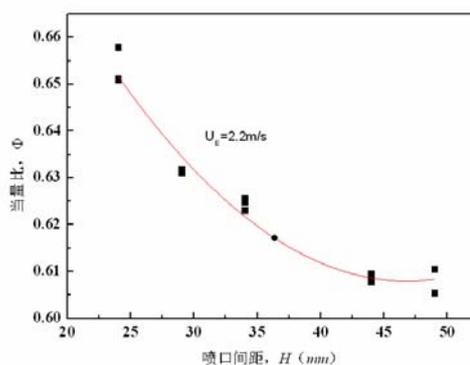


图 5 湍流预混火焰熄灭当量比随喷嘴间距的变化 (4 mm 多孔板)

错误! 未找到引用源。4 为使用 4 mm 多孔板时不同喷嘴间距条件下得到的湍流预混火焰熄灭时的平均射流速度与当量比的对应关系, 图 5 为射流速度一定时火焰熄灭当量比随喷嘴间距的变化。将图 4 的数据进一步表示成当量比随平均拉伸率 $\alpha_b = 2U_E/H$ 的变化, 结果如图 6 所示。

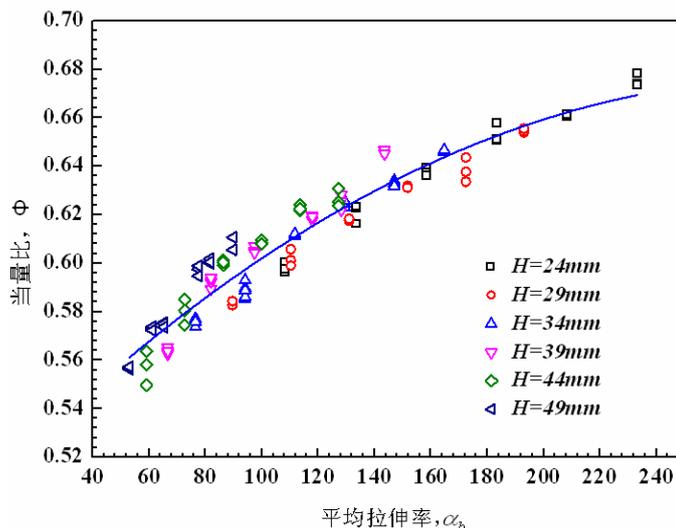


图 6 湍流预混火焰熄灭当量比随平均拉伸率的变化

前人⁷⁻⁸的实验表明, 在火焰接近熄灭的时候, 滞止流场可视为无反应流场, 湍流脉动强度只跟射流速度有关。图 5 是平均流速不变 (为 2.2m/s, 此时可认为湍流脉动速度不变, 即湍流拉伸率一定) 熄灭时当量比与喷嘴间距的关系, 喷嘴间距越大, 熄灭时当量比随之减小, 而不同的喷嘴间距对应着不同的平均拉伸率, 由此可以得到平均拉伸率对湍流火焰的影响; 喷嘴间距很大的时候, 曲线趋于平缓不再减小, 表示

此时拉伸率不再变化，流场拉伸率受喷口间距的影响较小，这和 Kostiuk⁷ 的实验结果一致；图 4 和图 6 中我们也可以看到，随着当量比的增大，喷口出口速度和平均拉伸率也随之增大，因此平均拉伸率对熄灭的影响是很显著的。

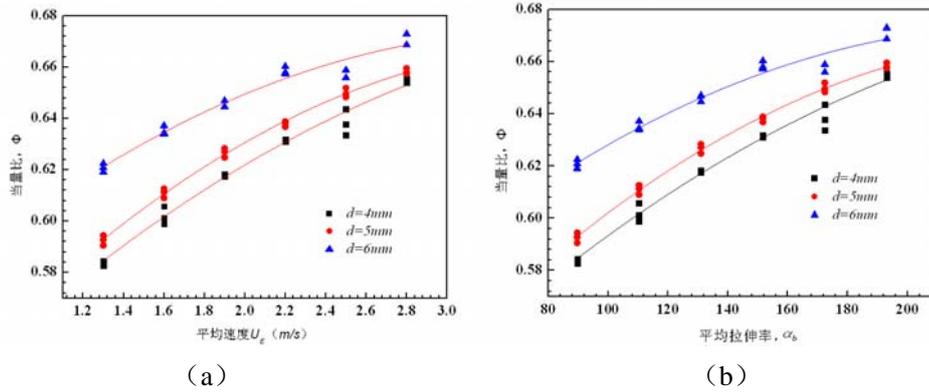


图 7 多孔板对火焰熄灭极限的影响

错误！未找到引用源。7 为喷口间距 $H=29\text{mm}$ 时使用不同多孔板得到的火焰熄灭极限。由错误！未找到引用源。7 (a) 可知，当量比一定时，越小直径的孔板需要更大的射流速度使火焰熄灭。Kostiuk⁶ 对无反应流场的测量实验表明，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，小孔直径较小的孔板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熄灭。

Cho¹¹ 通过实验发现 u' 在滞止流中跟喷口到滞止面的距离无关，而跟喷口出口速度有正比关系；Kostiuk⁷ 认为湍流积分尺度 L 约等于湍流孔板的小孔直径 d ，而 Coppola¹⁰ 和 Kostiuk⁶ 给出的实验结果中，在不大的雷诺数 Re 范围内也有类似的结论，即

$$\frac{u'}{U_E} \approx a \tag{2}$$

其中 a 为常数。由公式(1)和(2)可得到湍流拉伸率和 Karlovitz 数的公式：

$$\alpha_t = \left(\frac{a^3}{d\nu}\right)^{1/2} U_E^{3/2} \tag{3}$$

$$Ka = \alpha_t \frac{\nu}{S_L^2} \tag{4}$$

其中 d 为湍流孔板的小孔直径， ν 为预混气体的运动粘度。参考 Coppola¹⁰ 和 Kostiuk⁶ 给出的实验结果，本文取 $a = 0.25$ 。

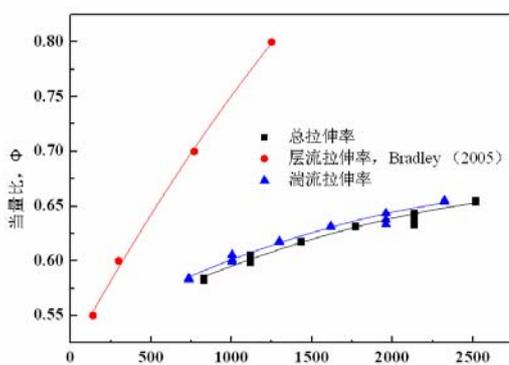


图 9 火焰熄灭的极限拉伸率

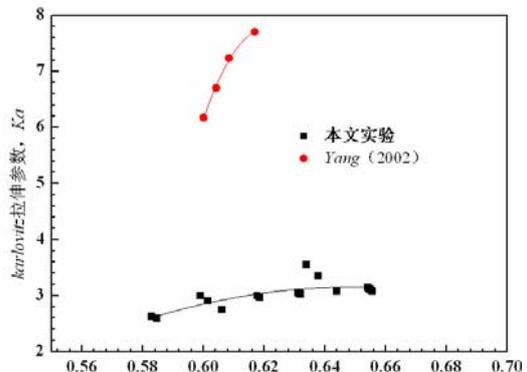


图 8 火焰熄灭的 Karlovitz 数

错误！未找到引用源。8 为对冲湍流火焰熄灭时的当量比随拉伸率的变化，其中总拉伸率 $\alpha_T = \alpha_b + \alpha_t$ ，

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，层流熄灭边界处在湍流熄灭边界之上。层流与湍流熄灭边界之间的间距可以认为是湍流作用部分的数量化，湍流越强熄灭边界越远离层流熄灭边界(层流熄灭边界可以认为是湍流脉动为零的情况)。图 9 是火焰熄灭时 Karlovitz 数随当量比的变化。随着当量比的增大 K 增大，与 Yang⁵ 的实验结果相比， K 随当量比的变化趋势相同，但数值明显偏低，这可能是由于对冲流场中的平均拉伸作用造成的。

从上文中结果可以看到，平均拉伸和湍流脉动拉伸同时影响火焰熄灭，平均轴向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，在某个流动条件下导致了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，这些熄灭的区域在局部的拉伸率降到足够低的时候也能重新引燃。当平均拉伸很大，熄灭也会很常见，而引燃的成功率也很低。当大于一定的拉伸率的时候，熄灭的火焰就不能再引燃了。由于湍流脉动的随机性，在每个区域的湍流拉伸也是不确定的，因此总拉伸率的波动也导致了局部火焰的熄灭与重新引燃，但是总拉伸率大于某一值的时候火焰无法引燃。

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，其熄灭时的平均射流速度 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) 当量比一定的条件下，当喷口间距接近两倍喷口直径时，滞止面附近的流场拉伸率受喷口间距的影响较小；

(3) 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 K 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., Yiguang Ju, Atsutaka Honda et al. Lewis Number Effect on Extinction Characteristics of Radiative Counterflow CH₄-O₂-N₂-He Flames. Proceedings of the Combustion Institute, 1998, 27: 2611-2617.
- 2 Ronney, P. D. Flame Structure Modification and Quenching By Turbulence. Combustion Science and Technology (Japanese edition), 1999, 6: 53-76.
- 3 Karlovitz, B., Denniston, D. W., et al. Studies On Turbulent Flames. Proceedings of the Combustion Institute, 1953, 4: 613-620
- 4 Abdel-Gayed, R., Bradley, D. Criteria for Turbulent Propagation Limits of Premixed Flames. Combustion and Flame, 1985, 62: 61-68
- 5 YANG, S. I., and SHY, S. S. Global Quenching of Premixed CH₄/Air Flames: Effects of Turbulent Straining, Equivalence Ratio, And Radiative Heat Loss. 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, Part I-Nonreacting Flow Field. 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, Part II-Reacting Flow Field and Extinction. 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. 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. Twenty-first Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1988: p1493.
- 10 Coppola, G., Gomez, A. Experimental Investigation on A Turbulence Generation System With High-Blockage Plates. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33: 1037-1048.
- 11 Bradley, D., Gaskell, P.H. and X.J. Gu, A. Sedaghat. Premixed Flamelet Modelling: Factors Influencing The Turbulent Heat Release Rate Source Term and The Turbulent Burning Velocity. Combustion and Flame, 2005, 143: 227-245.

EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENT PREMIXED FLAME QUENCHING IN OPPOSED STREAMS

Wang suide^{*}, Wang shuangfeng^{*}, Wang qiang^{*+}

^{*} (*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

⁺ (*University of Science and Technology of China, hefei 230026, China*)

Abstract: In the present work, the quenching of premixed turbulent methane/air flames has been explored in a opposed burner. Experimental results show that with the increase of the methane/air flame equivalence ratio the jet velocity U_E and the bulk stretch rate increase as the flames were quenching. It means that the bulk strain has a significant effect on flame limit. As the quenching equivalence ratio increase, both the turbulent stretch rate and Karlovitz number are increase which is consistent with the previous work. But because of the influence of the bulk stretch rate, when a certain equivalence ratio, Karlovitz number is smaller than the literature data. According to the experimental data, this paper probes into the mechanism of turbulent premixed flame.

Keywords: premixed combustion, turbulent flame, stretch rate, flame quenching

1) The project was supported by the Space science strategic leading subject of science and technology, Chinese academy of sciences, China (XDA04073300) and mechanical institute outstanding young talent cultivation project funding

2) E-mail: sfwang@imach.ac.cn