水雾协流作用下甲烷层流预混火焰熄火规律

刘晅亚　陆守香*　朱迎春　刘 义

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027. * 联系人, E-mail: sxlu@ustc.edu.cn)

摘要　在自行研制的水雾协流管式燃烧器的基础上, 利用高速纹影实验系统对水雾协流作用下层流预混火焰燃烧速度、火焰拉伸以及熄火规律进行了实验研究, 分析其现象产生过程与机理, 得到了不同浓度甲烷预混火焰临界熄火时火焰拉伸率与燃烧速度的变化规律. 结果表明, 管式燃烧器预混火焰面拉伸与燃料浓度、混合气体流量以及水雾雾滴直径有关; 对于较大粒径的细水雾, 水雾载荷比越小, 火焰面拉伸现象越明显; $Le > 1$ 的富燃料预混火焰, 当水雾载荷比较小时, 燃烧速度越大的预混火焰更容易发生回火; 而 $Le < 1$ 的贫燃料预混火焰, 在相同水雾条件下, 预混气体浓度越小, 火焰就越容易产生熄脱.

关键词　细水雾　协流　火焰拉伸　抑制　管式燃烧器

在有关细水雾灭火与抑爆技术的研究应用中, 人们发现在抑制、熄灭障碍火和气云爆燃火焰传播过程中, 细水雾的效力有限, 而且在一定条件下, 水雾作用甚至会增大爆炸超压, 增强火焰燃烧以及加速气云火焰的传播 [1~5]. 水雾作用于气云火焰阵面时, 由于水雾液滴蒸发产生的气体膨胀, 以及未完全蒸发的大颗粒水雾液滴穿透火焰面所产生的扰动, 火焰面上会出现一定程度的火焰拉伸与扰动, 这种现象不同程度地影响着火焰反应区与火焰面的传质传热过程, 或加速火焰燃烧或促使火焰熄灭 [6,7]. 针对火焰拉伸对火焰稳定性以及熄火特性的影响, 人们通常认为, 由于火焰面的质量、热量扩散引起的空气动力变形、火焰卷曲以及流动过程都会产生火焰拉伸效应, 从而对预混火焰结构、火焰传播速度以及火焰熄灭条件产生影响 [8,9]. 而有关细水雾作用下的气体预混火焰拉伸及熄火规律实验研究的报道却相对较少, 对于水雾作用所产生的火焰拉伸对预混火焰抑制的影响也很少有相关深入的研究.

根据气体预混火焰燃烧状态的不同, 水雾与预混火焰相互作用的实验研究方法主要有传播火焰实验方法 [2,4,10~12]和驻定火焰实验方法 [13~16]. 利用火焰传播管可非常直观地对火焰在水雾区内的传播过程进行观测, 也便于对单颗粒水雾液滴在传播火焰热气流动中的畸变行为进行研究. 例如, Acton等人 [2]、Thomas[12]以及Catlin等人 [17]均在火焰传播管中对水雾抑制爆炸火焰传播的效果进行了实验研究, 分析了水雾作用对火焰传播速度与爆炸火焰超压的影响. 由于受到点火、预混气混合浓度分布以及火焰传播管壁面特性条件的影响, 利用火焰传播的实验方法只能对预混火焰传播规律、水雾区内火焰燃烧特性以及抑制火焰传播所需的水雾条件进行宏观的唯象分析, 而很难就水雾对预混火焰的作用过程进行细致、准确地观测, 尤其对水雾的抑制机理以及水雾对火焰结构与火焰稳定性的影响等方面的研究存在相当大的难度. 采用驻定火焰的实验方法对水雾作用下预混火焰燃烧特性进行研究, 则具有易实现、便于观测、重现性好等优点. 目前, 水雾与驻定火焰相互作用的实验研究, 有两种主要的实验方法, 即水雾与火焰对流作用实验法和预混气协流水雾实验法. 水雾与火焰对流作用时水雾液滴会对火焰面产生很强的扰动, 而且蒸发的水蒸气与空间弥散的水雾液滴也会包裹火焰面, 影响对火焰阵面燃烧特性的观测 [13]. 采用水雾协流的方法使水雾液滴群与可燃气体以及空气预先混合, 随混合气体作用于火焰阵面, 从而减小水雾液滴直接作用时对火焰面所产生的扰动. Fuss等人 [18]利用管式燃烧器, 对液滴平均直径小于 1 μm的水雾对预混火焰燃烧速度的影响进行了实验研究, 并与水蒸气, N_2, CF_4 以及化学抑制剂CF_3Br对火焰的抑制效果进行了对比, 研究结果表明, 水雾对火焰燃烧速度的降低效果大约是同等质量的N_2 和CF_4 的 3.5 倍. Lin等人 [14,19]则利用大活化能渐近分析方法, 通过预蒸发模型就同向流作用的水雾液滴对

2006-12-19 收稿, 2007-05-08 接受

安徽省人才开发基金项目(编号: 2004Z024)、国家"十五"科技攻关项目(编号: 2004BA803B0108)和国家自然科学基金项目(批准号: 50606035)资助

本生灯火焰的拉伸变形规律进行了数值模拟研究，结果表明：对于不同浓度的甲烷/空气本生灯火焰，当 Lewis 数(Le)不同时，水雾作用引起的火焰拉伸会产生燃烧增强，或燃烧减弱以致熄火的不同效果.

对于细水雾与稳定的预混火焰之间的相互作用，目前人们主要采用水蒸气或液滴直径小于 10 μm的微细水雾，就细水雾对预混火焰燃烧速度的影响和灭火有效性进行实验以及数值模拟研究；而对于具有广泛工程应用背景的粒径大于 30 μm的细水雾与预混火焰相互作用的研究则鲜有报道，尤其是细水雾作用对预混火焰结构、火焰稳定性、火焰拉伸等燃烧特性的影响的研究相对不足. 为进一步研究在较大颗粒细水雾协流条件下的预混火焰拉伸及熄火规律，本文在管式燃烧器研究的基础上，利用自行研制的水雾协流管式燃烧器实验装置[20]，运用高速纹影系统以及CCD摄像研究了不同水雾条件下的甲烷/空气预混火焰燃烧特性，分析协流水雾作用下的火焰拉伸以及熄火规律，探讨协流水雾对预混火焰的影响.

1 实验

实验系统简图如图 1 所示，整套实验装置主要由水雾协流管式燃烧器实验台、纹影光学系统以及高速摄像系统组成. 纹影光学系统由一个功率为 250 W 的汞灯和两个焦距为 2 m 的凹面镜、反射镜以及狭缝、刀口、纹影镜系统组成，其光路系统见图 1.

实验时首先按流量比例确定甲烷/空气混合气体浓度，以及对应稳定层流预混火焰所需的气体流量大小，并根据所采用的喷头设定实验所需的喷雾压力以及喷头与进气孔的间距条件. 在预混气浓度稳定之后，开启点火装置，点燃预混气形成稳定火焰之后，启动水雾控制电磁阀，利用纹影与高速摄像系统研究不同水雾条件下火焰燃烧与熄灭过程，运用喷嘴法对火焰燃烧速度进行测量[21,22].

在气体协流条件下，管式燃烧器烧嘴出口处的水雾特性与协流气体流量、喷雾压力、喷头类型以及喷头与进气孔距离有关. 本文前期采用三维激光多普勒测速计和可适性相位多普勒速度计系统(简称三维LDV/APV系统)，对管式燃烧器烧嘴出口处的气体协流水雾特性进行了实验测量，并分析了燃烧 管管口处水雾流场的条件，具体实验结果参见文献[23].

在燃烧管烧嘴出口处，预混气体协流的水雾液滴量决定着水雾惰化与抑制甲烷预混火焰的效果. 作用于预混火焰阵面的水雾液滴量，主要由协流气体流量、雾滴直径、水雾喷头流量以及喷头与进气孔

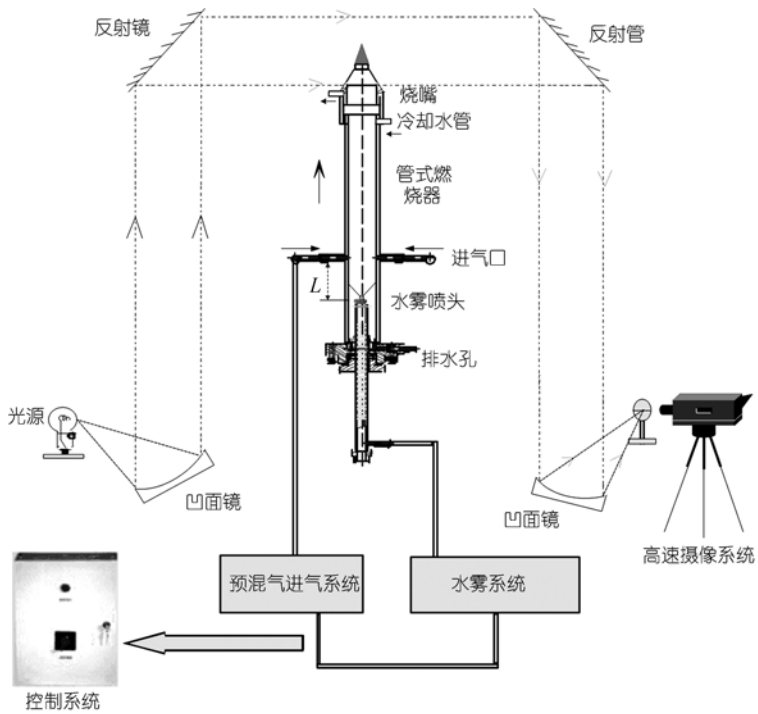


图 1 预混气体协流水雾管式燃烧器实验台结构示意图

的间距所决定. 根据雾滴的数密度以及雾滴直径大小, 水雾液滴与协流的未燃混合气体的质量比率定义为作用在预混火焰阵面上的水雾雾滴载荷比 [24], 即

$$\Gamma = \frac{N_d \pi d_p^3 \rho_{\text{water}}}{6\rho_{\text{gas}}}. \tag{1}$$

对于水雾液滴数密度, 则有

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}(N_d u_d) = 0, \tag{2}$$

$$N_d = \frac{60 N_i}{T S_i Q} A_g, \tag{3}$$

其中, Γ 为水雾载荷比, N_d 为对应协流气体流量条件下的水雾雾滴数密度, d_p 为水雾液滴直径(μm), u_d 为液滴运动速度(m/s), N_i 为 LDV 测量单位截面上所通过的水雾雾滴数, A_g 为燃烧管烧嘴出口截面积, T 为 LDV 测量时间(s), S_i 为 LDV 测量截面积(m^2), Q 为对应协流气体流量(L/min).

水雾载荷比的大小反映了水雾液滴在燃烧管烧嘴出口混合气体中所占的比例, 即由混合气体协流作用于预混火焰阵面时水雾液滴与预混气体的质量比. 本文采用了平均液滴直径在 30~150 μm 之间的水雾喷头, 在不同的水雾协流条件下, 不同浓度甲烷预混气体中的水雾载荷比曲线如图 2 所示, 图中虚线位置表示预混火焰稳定燃烧时的混合气体流量范围. 从图中可以看出, 在气体协流的初始阶段, 当预混气体流量较低时, 协流水雾液滴在混合气中的载荷比较大, 并随着混合气体流量的增大而减小; 当混合气体流量大于 2 L/min 时, 随着混合气体流量的增大, 水雾液滴载荷比也相应增大; 在预混火焰稳定燃烧的混合气流流量范围内, 随着混合气体流量的增大, 燃烧管烧嘴出口处的水雾载荷比近似线性地逐渐增大. 其中 L = 30 mm 时混合气体中水雾液滴载荷比较大, 混合气体浓度对水雾液滴载荷比影响不大, 在燃烧管烧嘴出口 z = 0 处, 水雾喷头距进气孔不同位置条件下, 化学当量比分别为 0.9 与 1.2 的混合气体的水雾载荷比变化基本相同.

2　结果与分析

2.1　水雾协流作用下火焰拉伸熄脱特性

图 3 所示为水雾作用下化学计量比分别为 Φ = 1.2, Φ = 1.35 以及 Φ = 0.9 的甲烷/空气层流预混火焰熄灭过程的 500 fps 高速纹影图片. 图中充分展示了 PJ10 喷头在距进气孔 L = 30 mm, 喷雾压力 0.4 MPa, 不同水雾载荷比条件下甲烷预混火焰经历火焰拉伸、火焰不稳定至熄脱(与火焰吹脱现象不同, 在水雾作用下燃烧被抑制而引起的火焰脱离燃烧管烧嘴, 最终熄灭的现象称为熄脱)的全过程. 由图 3(a)可知, 在 147 ms 水雾载荷比为 0.015 时, Φ = 1.2 的甲烷预混火焰被轴向拉伸, 火焰高度逐渐增大, 此时淡蓝色火焰发光区逐渐转变为亮红色; 当火焰伸展到 75 mm (t = 195 ms)高度时, 火焰逐渐开始缓慢回落并在 35 mm 高度的位置上维持了较长时间, 此时火焰阵面焰锥角减小, 火焰阵面发光区光辐射强度则不断增大; 火焰焰锥边缘逐渐产生褶皱变形, 在焰锥顶部上方燃烧产物流场的湍流度也不断增大, 随着火焰褶皱面的扩大, 火焰在协流水雾的作用下逐渐被抬离燃烧

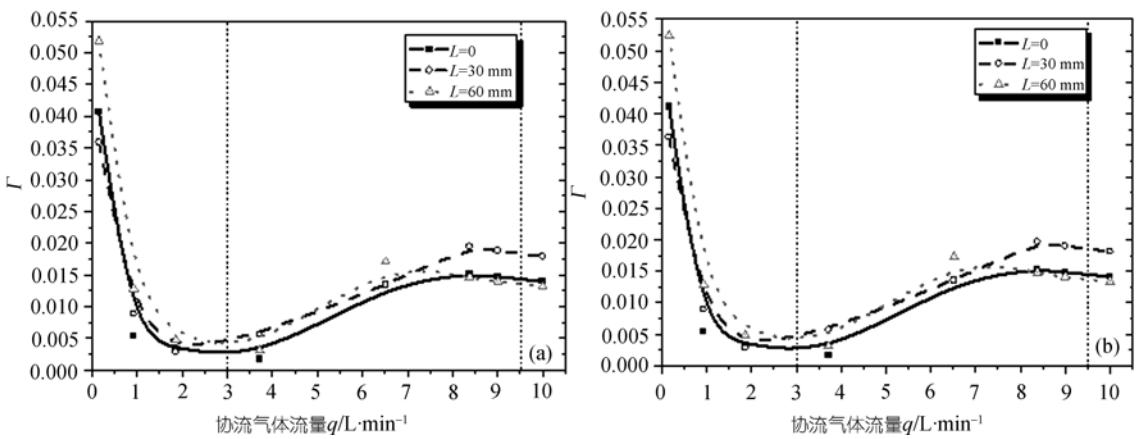
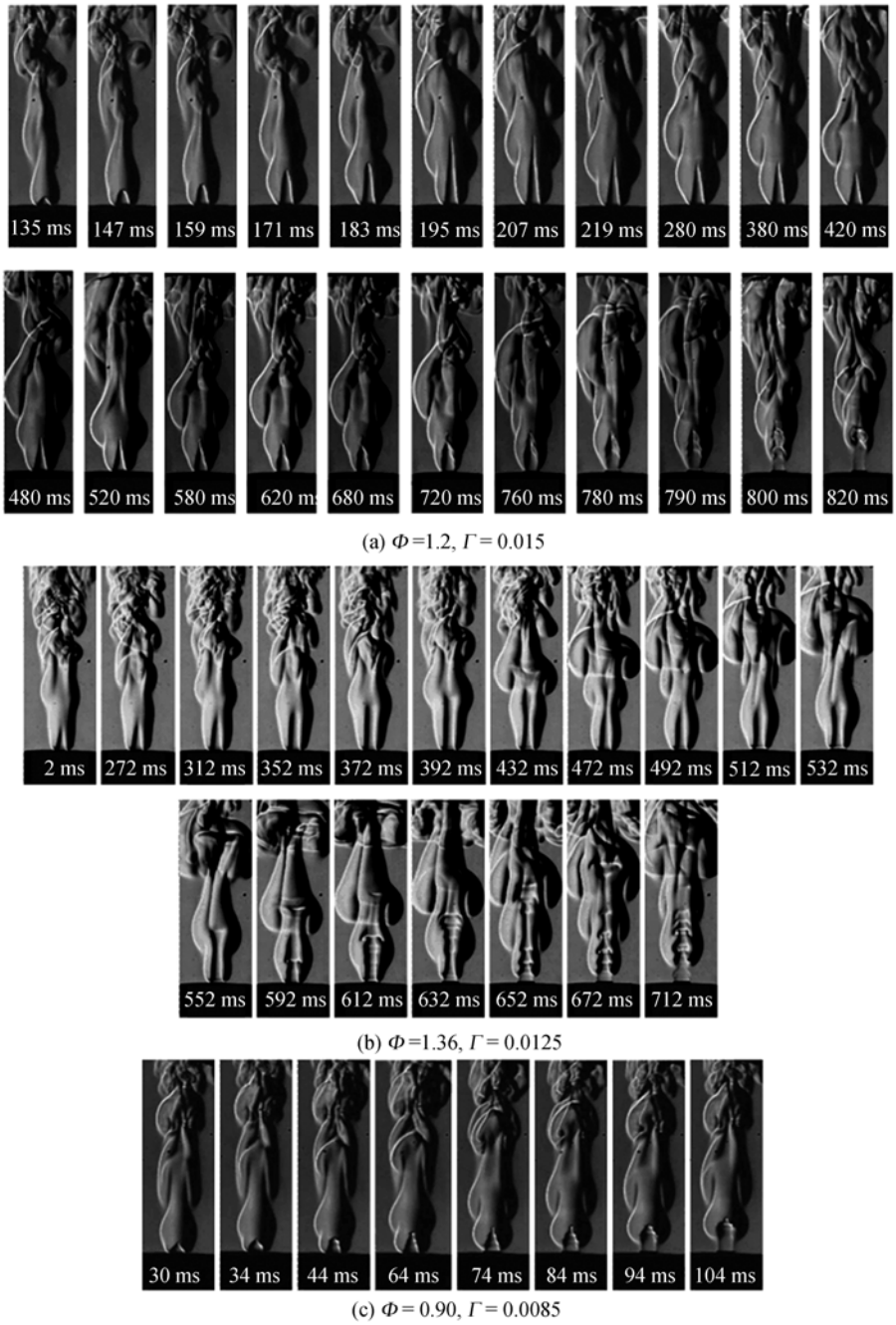


图 2　不同水雾协流条件下, 燃烧管出口不同浓度甲烷预混气体中的水雾载荷比曲线

(a) 化学当量比 Φ = 0.9, z = 0; (b) 化学当量比 Φ = 1.2, z = 0



(a) Φ=1.2, Γ = 0.015

(b) Φ=1.36, Γ = 0.0125

(c) Φ = 0.90, Γ = 0.0085

图 3 水雾协流作用下不同化学当量比的甲烷/空气层流预混火焰高速纹影图片

管管口并最终熄灭. 当水雾载荷比为 0.0125, Φ = 1.35, t = 272 ms 时启动水雾, 在水雾作用的初期, 火焰锥角减小, 火焰拉伸增强, 此时焰锥顶角逐渐出现开口, 火焰高度不断增大; 当火焰高度至 80 mm(t = 472 ms)时, 焰锥开始缓慢回落并在 45~55 mm 的高度上维持了较长时间, 锥形火焰面顶部开始出现不稳定的开口; 在 t = 592 ms 时, 焰锥边缘逐渐产生较强的褶皱变形, 火焰褶皱面逐渐扩大; 612 ms 时火焰逐渐被抬离燃烧管管口并最终熄灭. 当水雾载荷比为 0.0085, Φ = 0.9 时, 如图 3(c), 水雾作用时火焰面出现了小幅度的轴向拉伸, 同时火焰阵面发光区厚度变薄, 并且在火焰面边缘出现一定程度的抖动与湍流化现象; 从火焰面拉伸开始不到 60 ms 的时间内, 火焰即被逐渐抬离燃烧管烧嘴口而熄火. 在同样水

雾工况下，采用相同的实验方法还对当量比分别为 0.68, 0.81 以及 0.88 等多个贫燃料甲烷预混火焰与水雾的相互作用过程进行了实验研究，均得到了与 Φ = 0.90 相似的实验现象.

对于当量比 $\Phi < 1$ 的贫燃料预混火焰，水雾量充足时，预混火焰在较小的火焰拉伸条件下就很快被抑制熄脱，水雾载荷比越大，火焰拉伸至熄脱的时间就越短；对于当量比 $\Phi > 1.0$ 的富燃料火焰，协流水雾作用所产生的火焰拉伸变化及熄火规律不仅与作用于火焰阵面的水雾载荷比有关，而且燃烧管内预混气体流速、火焰燃烧速度等都会对水雾的抑制效果产生影响. 由图 3(a)和(b)可知，当量比 $\Phi = 1.2$ 预混火焰在较高的水雾载荷比条件下，其火焰拉伸过程与熄火时间明显长于燃烧速度较小的 $\Phi = 1.35$ 的预混火焰，并且在其火焰拉伸过程中，在 $t = 219$ ms 开始出现短暂的燃烧增强现象.

2.2 水雾协流作用下火焰拉伸率

如图 3 所示，协流水雾作用于预混火焰阵面时，稳定锥形预混火焰面会产生强烈的火焰拉伸形变过程. Law等人 [25]以及Rahim[26]研究认为，由于火焰前沿边界层传热与传质的不均匀性，使火焰燃烧速度产生较强的速度梯度变化，从而造成火焰面拉伸变形. 水雾作用所产生的火焰拉伸主要由火焰阵面气体流动不稳定性、火焰面内外热损失以及火焰面质热扩散特性的 Le 所决定. 根据 Le 及火焰拉伸率定义式，针对管式燃烧器轴对称的锥形火焰面，则火焰拉伸率为 [25,27]:

$$\kappa = -\frac{u \sin 2\alpha}{2R}, \tag{4}$$

$$Le = \frac{\lambda}{\rho_u C_p D}, \tag{5}$$

其中，u 为混合气体流速，α 为焰锥顶角之半，R 为管式燃烧器燃烧喷嘴半径；λ 为混合气体热导率，C_P 为混合气体定压比热，ρ_u 为未燃气体混合物密度，D 为混合气体质量扩散系数. 设定 λ, C_P, ρ_u, D 不随温度变化，即 Le 在燃烧过程中保持恒定.

由高速纹影与 CCD 摄像所测得的焰锥顶角以及火焰高度等实验结果，根据(4)和(5)式对不同浓度甲烷/空气预混气体 Le 及在不同水雾条件下的火焰拉伸率进行测算. 图 4 为水雾载荷比为 0.012 时，不同当量比的甲烷/空气预混火焰的火焰拉伸率变化曲线. 如图 4(a)所示，对于化学当量比为 1.65, 1.44, 1.41 的富燃料甲烷预混火焰，水雾作用时，处于负拉伸状态的火焰拉伸率先增大，而后又减小；随着火焰负拉伸的减弱，锥形预混火焰最终逐渐由平面火焰转变为正拉伸倒锥火焰，燃烧不断增强，直至火焰完全快速回火；而对于临近最佳化学当量比的 $\Phi = 1.24$, 1.16 与 1.12 的富燃料预混火焰，在水雾作用初期，预混火焰负拉伸先增大，而后减弱，在经历了较长时间相对稳定的火焰负拉伸之后，预混火焰才最终熄脱. 对于 $Le < 1$ 的贫燃料预混火焰，如图 4(b)所示，化学计量比为 0.95, 0.88 以及 0.84 的预混火焰，在协流水雾作用下，锥形火焰负拉伸随着拉伸率的增大，燃烧强度在不断减弱，并最终发生熄脱. 由上述实验结果可知：在相同的水雾条件下，$Le > 1$ 时，甲烷预混气浓度越大，火焰拉伸率变化就越大；而对于 $Le < 1$ 的贫燃料预混火焰，甲烷浓度越低，火焰拉伸熄脱的速度就越快.

Lin和Hou[28,29]运用大活化能渐近分析的方法，研究了单分散的水雾液滴对本生火焰的火焰锥面形状与结构的影响，分析了锥形火焰面质量组分与热量扩散优先性，以及火焰拉伸对燃烧速度的影响，通过数值分析论证了水雾作用量与火焰拉伸对火焰稳定性的影响. 他们的理论研究同样验证了本文实验研究的结果，即对于甲烷/空气本生灯型预混火焰，当 $Le > 1$ 时，增大火焰正拉伸则燃烧相应增强；当 $Le < 1$ 时，增大火焰负拉伸则燃烧减弱或熄灭. 对于富燃料甲烷/空气预混火焰，减小作用于火焰阵面的水雾量或增大火焰正拉伸都可使燃烧增强；而对于贫燃料预混火焰，增大水雾作用量或增强火焰负拉伸均会使燃烧强度减弱，并导致锥形火焰面被破坏而熄灭.

2.3 水雾协流作用下预混火焰 Markstein 数与燃烧速度

在水雾作用下，不同当量比的甲烷预混火焰，火焰拉伸以至熄灭过程也是各不相同的. 为研究火焰表面弯曲与火焰拉伸对燃烧速率以及燃烧稳定性的影响，根据火焰反应区热量与质量扩散特性，Markstein首次提出了预混火焰当地燃烧速度与火焰阵面弯曲之间的唯象关系，如下式所示 [30]:

$$\frac{S_u - S_u^0}{S_u^0} = Ma\frac{\delta}{R}, \tag{6}$$

其中 S_u 为火焰拉伸状态燃烧速度，S_u^0 为未拉伸时平

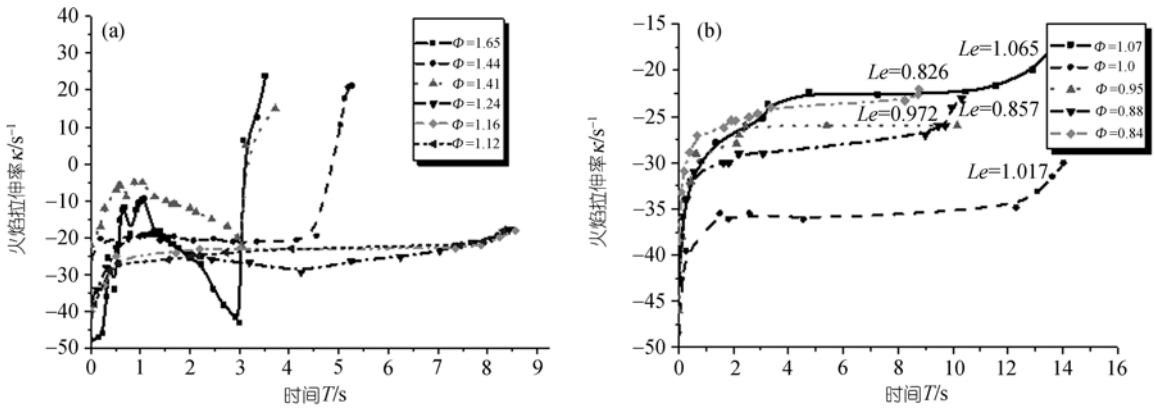


图 4 不同当量比甲烷/空气预混火焰在水雾作用下火焰拉伸率曲线

(a) $Le > 1$; (b) $Le < 1$

面火焰燃烧速度，δ为火焰扩散层厚度[$=\lambda/(\rho C_P S_u^0)$]，$R$ 为火焰阵面弯曲半径(以凹向未燃气体为正).

Markstein长度参数用以表征燃烧速率对火焰拉伸的敏感程度, Markstein数则用以表征由于外在火焰拉伸所引起的当地燃烧速度的变化，其大小由混合气体扩散特性决定 [31~35].

$$Ma = \frac{L}{\delta}, \tag{7}$$

对于平面火焰拉伸率，则

$$\kappa = -\frac{S_u^0}{R}. \tag{8}$$

Markstein长度数以及火焰拉伸率与拉伸状态下火焰燃烧速度呈线性关系，火焰拉伸时燃烧速度为 [32,34,36,37]

$$S_u = S_u^0 - L\kappa. \tag{9}$$

对于本生灯型预混火焰，位于焰锥上的火焰拉伸由该点气流运动速度以及火焰面燃烧速度引起，根据(8)式本生灯型预混火焰拉伸率，则

$$S_u = S_u^0 + L\frac{u\sin 2\alpha}{2R}, \tag{10}$$

其中L为Markstein长度，其与火焰厚度具有相同的阶数，主要由Lewis数和反应区的扩散特性所决定，即单位火焰拉伸所减少的燃烧速率．Tien等人 [38]和Bradley等人 [39]曾对Markstein长度进行了理论推导，即

$$L = \frac{\delta\sigma}{1-\sigma}[\ln\sigma^{-1} + \frac{\beta(Le-1)}{2}\int_0^{(1-\sigma)/\sigma}\frac{\ln(1+x)}{x}\mathrm{d}x], \tag{11}$$

其中混合物燃烧的热膨胀率

$$\sigma = \frac{T_b}{T_u} = \frac{\rho_u}{\rho_b} = \frac{V_b}{V_u}\cdot\frac{m_u}{m_b}, \tag{12}$$

β 为 Zeldovich 数

$$\beta = E(T_b - T_u)/RT_b^2. \tag{13}$$

对于燃烧的总活化能为

$$\frac{\mathrm{d}\ln f^0}{\mathrm{d}(1/T_b^0)} = -\frac{E_a}{2\Re}, \tag{14}$$

其中 $\Re$ 为理想气体常数，f^0 为气体逸度，$f^0 = p\varphi$，逸度因子$\varphi = 1$ 时, $f^0 = p$.

$Le = 1$ 时,

$$L = \frac{\delta\sigma}{1-\sigma}\ln\sigma^{-1}, \tag{15}$$

则当 $\sigma = T_b/T_u > 1$时, $L < 0$; 当 $\sigma < 1$时, $L > 0$.

(ⅰ) $Le > 1$ 时，当 $\sigma > 1$时，则 $L > 0$;

当 $\sigma < 1$ 时，则 $\left|\frac{\beta(Le-1)}{2}\frac{(\ln\sigma(1-\sigma))^2}{4}\right| > \left|\ln\sigma^{-1}\right|$, 即 $L > 0$.

(ⅱ) $Le < 1$ 时，当 $\sigma > 1$ 时，则 $\frac{\beta(Le-1)}{2}\cdot\frac{(\ln\sigma(\sigma-1))^2}{4} < 0$, $L < 0$;

当 $\sigma < 1$时,则 $\ln\sigma^{-1} > 0$, $\left|\frac{\beta(Le-1)}{2}\frac{(\ln\sigma(1-\sigma))^2}{4}\right| < \left|\ln\sigma^{-1}\right|$, 则 $L > 0$.

对于管式燃烧器锥形预混火焰，协流水雾雾滴作用时，由于雾滴的蒸发、吸热降温作用，火焰阵面燃烧的热膨胀率随作用的水雾通量的不同而变化．不同当量比的预混气体，火焰阵面传热与传质之间的变化，使得火焰热膨胀率产生不同的变化，火焰Markstein 长度数相应的变化，导致燃烧速度也相应

地增大或减小. 燃烧热膨胀率增大时, 球形预混火焰产生正拉伸, 而管式燃烧器锥形预混火焰负拉伸增强, 使得燃烧减弱; 反之, 锥形预混火焰负拉伸减小, 甚至产生火焰正拉伸, 使燃烧增强.

对于水雾作用时火焰拉伸状态下的甲烷预混火焰燃烧速度, 则由(10)式计算可得. 以火焰拉伸时燃烧速度与水雾作用前无火焰拉伸时的燃烧速度之比 S_L/S_L^0 表征水雾作用过程中的燃烧速度的变化规律. 图 5 为水雾载荷比 0.0175 的条件下, 不同当量比甲烷/空气预混火焰燃烧速度 S_L/S_L^0 变化曲线. 从图中可以看出, 对于 $Le<1$ 的甲烷预混火焰, 如图 5(a)所示, 在水雾作用初始阶段, 甲烷浓度越低, 则预混火焰燃烧速度降低就越快; 水雾液滴作用 2 s 后, 预混火焰燃烧速度变化相对平稳, 甲烷浓度越大, 水雾作用所需的熄火时间就越长. 当 $Le>1$ 时, 在相同水雾条件下预混火焰燃烧速度变化率相对较大, 如图 5(b)所示, 当量比 $\Phi=1.61$ 的富燃料甲烷预混火焰在水雾作用初期便出现了火焰加速现象; 当量比为 1.44 的预混火焰燃烧速度则在水雾作用下先减小, 而后缓慢增大, 最终很快加速并在燃烧管内回火; 而对于当量比为 1.36, 1.24 与 1.07 的甲烷预混火焰, 在相同的水雾条件下均出现了不同程度的火焰加速现象, 但在水雾持续作用下火焰最终被抑制、熄脱.

图 6 为在水雾载荷比 0.0175 的条件下, 不同浓度甲烷预混火焰燃烧速度 S_L/S_L^0-T 变化规律曲线. 从图 6(a)中可以看出, 对于化学当量比小于 0.84 的贫燃料甲烷预混火焰, 在水雾作用下, S_L/S_L^0-T 曲线形状近似于斜线, 火焰得到了快速抑制并最终熄脱; 当甲烷浓度升高, 接近于最佳当量比时, 如图 6(b)所示, 此时水雾与甲烷预混火焰之间的作用时间相应延长. 在水雾作用初始阶段, 火焰燃烧速度随之降低, 并保持一段时间稳定后最终熄脱, 其 S_L/S_L^0-T 曲线呈水平倒转"S"形; 当甲烷浓度继续增大, 如图 6(c)所示, 预混气体当量比为 1.36 和 1.41 时, 水雾作用初期, 燃烧速度首先得到一定程度的抑制, 但随即燃烧速度又逐渐增强, 其中 $\Phi=1.36$ 的预混火焰最终被抑制熄脱, 而 $\Phi=1.41$ 的预混火焰则被加速, 并最终在燃烧管内形成回火, 此时 S_L/S_L^0-T 曲线呈现"W"形; 对于该浓度条件下的预混火焰, 水雾作用过程相对比较复杂, 火焰最终被抑制熄脱或是被加速回火则取决于甲烷预混气体浓度与水雾载荷比的大小, 如图 6(c)所示, 水雾载荷比为 0.012 时, $\Phi=1.3$ 的甲烷预混火焰 S_L/S_L^0-T 曲线也同样具有上述类似的变化规律. 而对于当量比为 1.44, 1.46 以及 1.48 的高浓度甲烷预混火焰, 如图 6(d)所示, 在当前水雾条件下, 预混火焰则直接产生火焰加速现象, 并最终在燃烧管内回火, 此时 S_L/S_L^0-T 曲线为"Γ"形; 而当水雾载荷比减小至 0.012 时, $\Phi=1.41$ 的甲烷预混火焰燃烧速度也出现了类似的变化规律. 由此, 通过上述对甲烷预混火焰熄火规律的研究可知: 在协流水雾作用下, 不同浓度的甲烷预混火焰熄火过程中燃烧速度变化规律基本上可分为斜线形、水平倒转"S"形、"W"形以及"Γ"形四类.

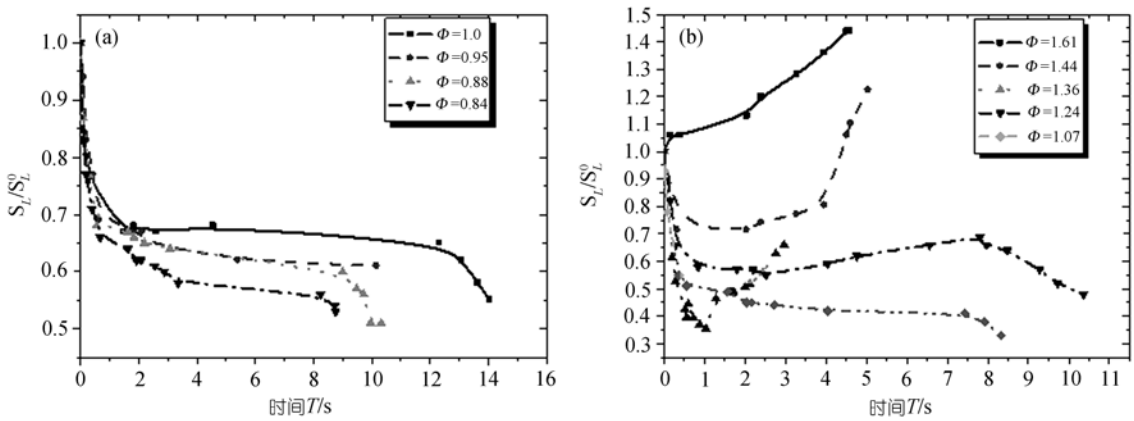


图 5　水雾载荷比 0.0175 的协流水雾条件下不同浓度甲烷预混火焰 S_L/S_L^0-T 曲线

(a) $Le<1$; (b) $Le>1$

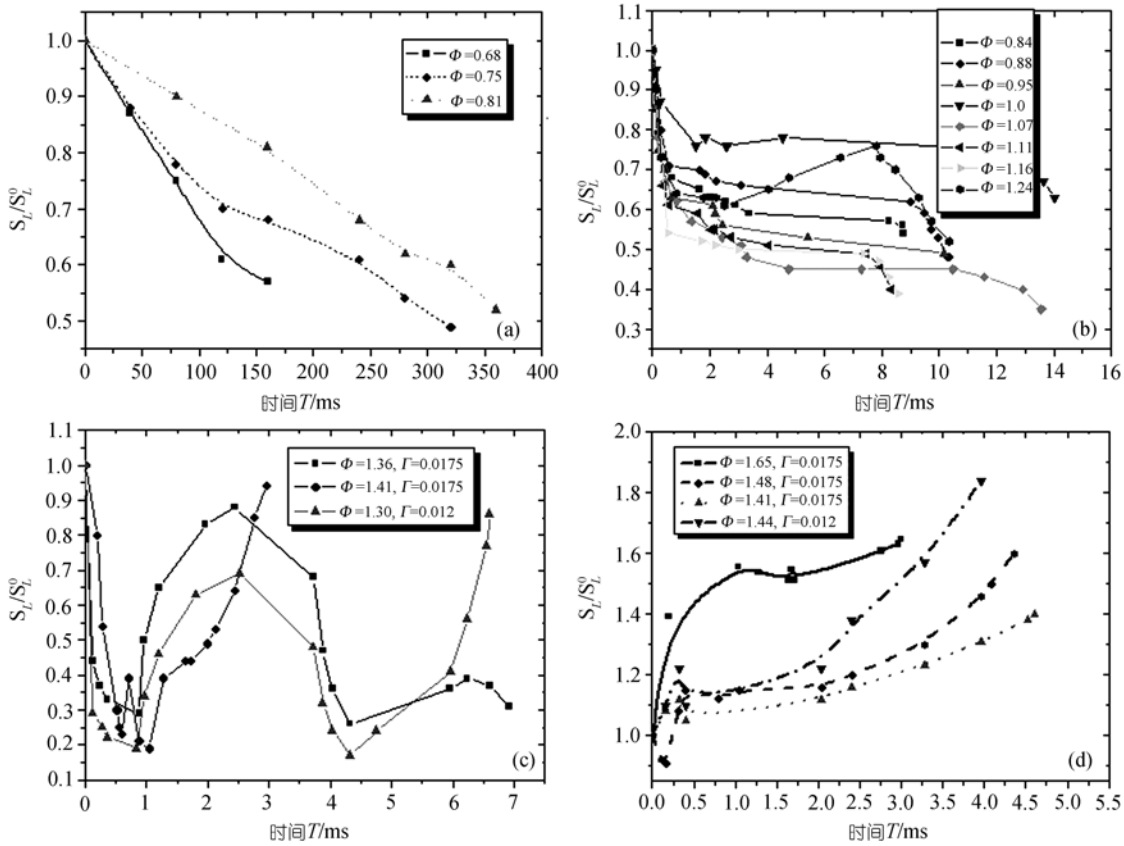


图 6 协流水雾作用下不同浓度甲烷预混火焰燃烧速度 S_L / S_L^0-T 曲线

(a) 斜线形; (b) 水平倒转“S”形; (c) “W”形; (d) “Γ”形

3 结论

利用高速纹影与 CCD 摄像, 以及自行研制的水雾协流管式燃烧器, 对水雾抑制甲烷/空气层流预混火焰燃烧过程进行实验研究, 分析了协流水雾作用下稳定层流预混火焰拉伸与熄火规律. 结论如下:

(ⅰ) 在相同水雾载荷比条件下, 预混火焰燃烧速度越大, 则水雾抑制作用的时间就越长; 而预混气体浓度越大, 相同水雾条件下所产生的火焰拉伸率变化就越大; 对于 $Le > 1$ 的富燃料预混火焰, 当水雾载荷比较小时, 燃烧速度越大的预混火焰更容易发生回火; 而 $Le < 1$ 的贫燃料预混火焰, 在相同水雾条件下, 预混气体浓度越小, 火焰就越容易产生熄脱.

(ⅱ) 在协流水雾量不充足的条件下, 即对于小雾量、较大粒径雾滴颗粒的细水雾, 管式燃烧器甲烷预混火焰所产生的火焰拉伸与卷曲现象更明显, 火焰拉伸率也越大; 对于相同浓度的甲烷预混火焰, 作用于火焰阵面的水雾载荷比越大, 则火焰阵面所产生的火焰负拉伸与火焰抑制效果就越明显.

(ⅲ) 在协流水雾作用下, 根据预混火焰燃烧速度及水雾载荷比的不同, 甲烷预混火焰熄火过程中燃烧速度变化规律基本上可分为斜线形、水平倒转“S”形、“W”形以及“Γ”形四类; 对于 $Le < 1$ 的贫燃料甲烷预混火焰, 协流水雾作用时的火焰拉伸现象不明显, 火焰快速熄脱; 对于 $Le > 1$ 的富燃料预混火焰, 在水雾液滴作用下, 火焰阵面拉伸强度不断增大, 水雾载荷比不足时, 可使预混火焰面燃烧速度得到增强, 甚至会在燃烧管内形成回火.

参 考 文 献

1 Jones A, Thomas G O. Mitigation of small-scale hydrocarbon-air explosions by water sprays. Chem Eng Res Des, 1992, 70(A2): 197—199

2 Acton M R, Sutton P, Wickens M J. Investigation of the mitigation of gas cloud explosions by water sprays. Gas Eng Manage, 1991, 31(7-8): 166—172

3 Dong G, Liu H W, Chen Y L. General, nitrogen-containing semi-detailed chemical kinetic mechanism for methane laminar premixed flame. J Combust Sci Techn, 2002, 8(1): 44—48

4 Liu X Y, Lu S X, Qin J, et al. Experimental study on suppression of methane flame propagating by water mist. In: 2004 International Symposium on Safety Science and Technology, Shanghai. Beijing: Science Press, 2004. 1493—1498

5 Van Wingerden K, Wilkins B. Influence of water sprays on gas explosions. Part 1: Water-spray-generated turbulence. J Loss Prevent Proc Ind, 1995, 8(2): 53—59 [DOI]

6 Clanet C, Searby G, Clavin P. Primary acoustic instability of flames propagating in tubes: Cases of spray and premixed gas combustion. J Fluid Mech, 1999, 385: 157—159 [DOI]

7 Tsai C H, Lin T H. Influence of inert sprays on extinction of premixed flames propagating in a duct with varying cross-sectional area. Atomizat Sprays, 2005, 15(5): 545—565 [DOI]

8 Beshay K R, Abou-Ellail M M, Chan S H. Structure of stretched hydrogen-Air diffusion flames near extinction. In: Proceedings of the National Heat Transfer Conference. Ananheim, CA: American Society of Mechanical Engineers, 2001

9 Subramaniyam S, Mulemane A, Im K S, et al. Spray and fuel-air mixing of the swirler/venturi mixers for LPP combuster and fuel reformer applications. In: 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reston, United States, 2004. 3494—3510

10 Mesli B, Gokalp I. Extinction limits of opposed jet turbulent premixed methane air flames with sprays of water and NaCl-water solution. Combust Sci Techn, 2000, 153: 193—211

11 Thomas G O. On the conditions required for explosion mitigation by water sprays. Proc Safety Environ Protect, 2000, 78(5): 339—354 [DOI]

12 Thomas G O. The quenching of laminar methane-air flames by water mists. Combust Flame, 2002, 130(1-2): 147—160 [DOI]

13 Shimizu H, Tsuzuki M, Yamazaki Y, et al. Experiments and numerical simulation on methane flame quenching by water mist. J Loss Prevent Proc Ind, 2001, 14(6): 603—608 [DOI]

14 Lin J C, Lin T H. Influence of water spray on normal and inverted Bunsen flame. Combust Sci Techn, 2003, 175(7): 1263—1291 [DOI]

15 Takahashi F, Linteris G T, Katta V R. Suppression characteristics of cup-burner flames in low gravity. In: 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reston, United States, 2004. 11952—11961

16 Seiser R, Seshadri K. The influence of water on extinction and ignition of hydrogen and methane flames. Proceed Combust Inst, 2005, 30(1): 407—414 [DOI]

17 Catlin C A, Fairweather M, Ibrahim S S. Predictions of turbulent, premixed flame propagation in explosion tubes. Combust Flame, 1995, 102(1-2): 115—128 [DOI]

18 Fuss S P, Chen E F, Yang W H, et al. Inhibition of premixed methane/air flames by water mist. Proc Combust Inst, 2002, 29(1): 361—368 [DOI]

19 Lin J C, Hou S S, Lin T H. A theoretical study on Bunsen spray flames. Intern J Heat Mass Transfer, 2003, 46(6): 963—971 [DOI]

20 朱迎春, 刘晅亚, 陆守香. 灭火剂有效性的燃烧器实验评价方法. 消防科学与技术, 2005, 24(6): 684—687

21 Linnett J W. Methods of measuring burning velocities. Proc Combust Inst, 1953, 4: 20—35

22 Senior D A. Burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures: Determination by burner method with schlieren photography. Combust Flame, 1961, 5: 7—10

23 朱迎春, 刘晅亚, 陆守香, 等. 管式燃烧器烧嘴上方细水雾雾场特性的 LDV/APV 实验研究. 火灾科学, 2006, 15(1): 21—25

24 Modak A U, Abbud-Madrid A, Delplanque J -P, et al. The effect of mono-dispersed water mist on the suppression of laminar premixed hydrogen-, methane-, and propane-air flames. Combust Flame, 2006, 144(1-2): 103—111 [DOI]

25 Law C K, Sung C J. Structure, aerodynamics, and geometry of premixed flamelets. Prog Energy Combust Sci, 2000, 26(4-6): 459—505 [DOI]

26 Rahim F. Determination of burning speed for methane/oxidizer/diluent mixtures. Doctor Dissertation. Boston, Massachusetts: Northeastern University, 2002. 31—45

27 Ju Y, Matsumi H, Takita K, et al. Combined effects of radiation, flame curvature, and stretch on the extinction and bifurcations of cylindrical CH_4/air premixed flame. Combust Flame, 1999, 116(4): 580—592 [DOI]

28 Lin J C, Hou S S. Influence of water sprays and heat loss on negatively and positively stretched curved premixed flames. Atomizat Sprays, 2006, 16(7): 827—842 [DOI]

29 Hou S S, Lin J C. The influence of preferential diffusion and stretch on the burning intensity of a curved flame front with fuel spray. Intern J Heat Mass Transfer, 2003, 46(26): 5073—5085 [DOI]

30 Searby G, Quinard J. Direct and indirect measurements of Markstein numbers of premixed flames. Combust Flame, 1990, 82(3-4): 298—311 [DOI]

31 Choi C W, Puri I K. Contribution of curvature to flame-stretch effects on premixed flames. Combust Flame, 2001, 126(3): 1640—1654 [DOI]

32 Bradley D, Gaskell P H, Gu X J. Burning velocities, markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: A computational study. Combust Flame, 1996, 104(1-2): 176—198 [DOI]

33 Bechtold J K, Matalon M. The dependence of the Markstein length on stoichiometry. Combust Flame, 2001, 127(1-2): 1906—1913 [DOI]

34 Gu X J, Haq M Z, Lawes M, et al. Laminar burning velocity and markstein lengths of methane-air mixtures. Combust Flame, 2000, 121(1): 41—58 [DOI]

35 Tseng L K, Ismail M A, Faeth G M. Laminar burning velocities and Markstein numbers of hydrocarbon/air flames. Combust Flame, 1993, 95(4): 410—426 [DOI]

36 Liao S Y, Jiang D M, Gao J, et al. Measurements of Markstein numbers and laminar burning velocities for natural gas-air mixtures. Energy Fuels, 2004, 18(2): 316—326 [DOI]

37 Davis S G, Quinard J, Searby G. Determination of Markstein numbers in counterflow premixed flames. Combust Flame, 2002, 130(1-2): 112—122 [DOI]

38 Tien J H, Matalon M. On the burning velocity of stretched flames. Combust Flame, 1991, 84(3-4): 238—248 [DOI]

39 Bradley D, Gaskell PH, Gu X J. Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: A computational study. Combust Flame, 1996, 104(1-2): 176—198 [DOI]