

二乙醚-空气预混火焰的不稳定性分析

张旻, 狄亚格, 黄佐华*, 张志远

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: zhhuang@mial.xjtu.edu.cn

2009-04-01 收稿, 2009-05-20 接受

国家自然科学基金重点项目(批准号: 50636064)和创新群体项目(编号: 50821604)资助

摘要 利用高速纹影摄像法和球形发展火焰研究了不同初始压力和不同当量比下的二乙醚-空气预混合气层流火焰燃烧特性, 得到了层流燃烧速率、马赫斯坦数、胞状结构出现的临界半径等燃烧参数, 分析了火焰前锋面的不稳定性. 研究结果表明: 无拉伸层流燃烧速率随初始压力增加而减小, 随当量比的增加而呈现出先增加后减少的趋势, 无拉伸层流燃烧速率的最大值出现在当量比为 1.1 处. 马赫斯坦数随初始压力和当量比的增加而减小, 反映出初始压力和当量比降低了火焰前锋面的稳定性. 胞状结构出现的临界半径随初始压力的增加而减小.

关键词

二乙醚
层流燃烧速率
马赫斯坦数
临界半径
火焰稳定性

柴油机因其热效率高、结构紧凑、燃油经济性好而成为内陆交通工具和工业发电站的主要动力来源. 柴油机车排放是大气污染的主要来源之一. 二乙醚是一种无色、透明、易流动的液体燃料, 便于车载, 挥发性好, 无腐蚀性, 分子结构简单且含氧量高, 可以通过一种简单的脱水过程从乙醇得到, 与乙醇相比, 二乙醚具有更高的能量密度和更好的压燃特性^[1]. 因此, 二乙醚可作为柴油机着火助燃剂使用^[2], 也可作为柴油机车替代燃料与柴油等燃料掺混使用^[3-5], 以减少柴油机车有害物排放和缓解化石燃料的供给矛盾. 目前, 对二乙醚的研究还主要集中在发动机上, 较少有研究涉及到二乙醚的基础燃烧方面, 由于燃料的基础燃烧特性是开展发动机燃烧研究的前提, 因此, 进行二乙醚燃料的基础燃烧特性研究十分必要.

层流火焰燃烧速率是燃烧过程中最重要的参数之一, 反映了可燃混合气本身的物化特性. 精确的层流火焰燃烧速率值可用于验证化学反应机理的正确性, 也可用于湍流燃烧模拟的输入数据, 同时对内燃机等动力装置的设计及优化有着重要的意义. 通常,

在确定层流火焰燃烧速率时会遇到火焰前锋面出现胞状结构的情况, 特别是在高压或者低碳碳氢燃料的稀燃和高碳碳氢燃料的浓燃时发生. 由于胞状结构的出现增加了火焰前锋面积, 从而导致层流火焰传播速率大幅度增加, 在实际应用中, 由于火焰前锋面的这种自加速而引起的不稳定性会引起火焰自紊流化, 甚至是爆炸, 从而导致了敲缸^[6]. 因此, 在燃烧研究中, 对火焰前锋面的不稳定性分析十分重要. Law等人^[7]利用压力释放容弹研究了高压下氢气-丙烷层流火焰的不稳定性. Jomaas等人^[8]分析比较了对等扩散燃料(乙炔)和非对等扩散燃料(氢气)的不稳定性. Bradley等人^[9]对异辛烷-空气和异辛烷-正庚烷-空气混合气层流火焰不稳定性开展了研究. 上述研究均报道了在火焰传播过程中胞状结构的出现, 使火焰速率增加, 火焰前锋面不稳定性增加.

影响预混层流火焰稳定性的因素有三类, 即体积力(body force)因素、流体动力学(hydrodynamic)因素和热扩散(thermal diffusive)因素, 其中体积力不稳定性是火焰传播速度过慢时由于浮力的影响, 火焰向上

引用格式: 张旻, 狄亚格, 黄佐华, 等. 0B 二乙醚-空气预混火焰的不稳定性分析. 科学通报, 2009, 54: 2597~2604

Zhang N, Di Y G, Huang Z H, et al. Flame instability analysis of diethyl ether-air premixed mixtures at elevated pressures. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0501-z

传播的现象. 浮力的影响只有在燃烧极限附近火焰传播速率很慢时才发生; 流体动力学不稳定性最先被Darrieus在1938年提出的, 随后在1944年被Landau进一步研究. 他们假定流体力学不稳定性是由火焰前锋面热膨胀引起火焰温度梯度与流线的正方向发生偏离引起的, 表现为火焰前锋面产生裂纹随后出现有规律的细胞状结构, 但是这种因素只有在火焰发展到一定程度即火焰半径足够大时才对火焰传播的稳定性产生影响, 流体动力学因素主要依赖于热膨胀系数(thermal expansion ratio)和火焰厚度的变化(flame thickness); 热扩散不稳定性是由火焰前锋面附近质量相对于热量的优先扩散而引起的, 这种优先扩散不稳定性主要决定于预混合气中质量扩散能力较强的反应组分, 如果混合气中扩散能力较强的组分较多, 则优先扩散作用使预混火焰稳定, 反之则使预混火焰不稳定, 热扩散只有在马赫斯坦数小于零时出现, 热扩散因素依赖于刘易斯数(Lewis number)^[10].

目前, 测量层流燃烧速率的方法有3种: 滞止面火焰法(the stagnation plane flame method)^[11,12], 热流法(the heat flux method)^[13]和燃烧弹法(the combustion bomb method)^[14-16]. 燃烧弹法是利用球形发展火焰, 通过记录球形火焰的发展状况来计算层流燃烧速率, 实验表明, 球形火焰是从容弹中心的点火电极开始向外发展的, 这种火焰结构对于观察火焰表面胞状结构的发展十分直观, 因为胞状结构开始被球面曲率引起的大拉伸所抑制, 此时对应着小的火焰半径; 但随着火焰的发展, 火焰半径增加, 拉伸强度减弱, 胞状结构将难以被抑制, 而不断发展, 瞬间覆盖到整个火

焰前锋面^[8]. 燃烧弹法模型简单, 数据处理方便, 初始条件易于控制, 火焰拉伸定义明确, 易于获得预混火焰的不稳定性信息和表征参数, 同时球形发展火焰也是最接近于火花点火发动机中的火焰传播. 因此, 燃烧弹法成为了研究燃料基础燃烧特性和分析其不稳定性的最合适的方法.

本文在定容燃烧弹内利用高速纹影摄像拍摄了预混火焰的发展情况, 同时基于球形发展火焰初期阶段的近定压法来计算二乙醚-空气预混合气的层流燃烧速率, 分析了初始温度为323 K时, 不同初始压力(0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 MPa)和不同燃空当量比(0.7~1.6)下二乙醚-空气预混合气的层流火焰传播特性, 获得了层流燃烧速率、马赫斯坦数、火焰厚度、胞状结构出现的临界半径等燃烧参数, 分析了火焰前锋面的不稳定性.

1 实验设备及实验过程

实验装置由5个部分构成, 即定容燃烧弹、加热系统、点火系统、数据采集系统和高速纹影系统. 本实验所使用的定容燃烧弹为圆柱形, 其直径为180 mm, 长度为210 mm, 石英玻璃视窗布置在两侧以便于光学测量, 燃烧弹结构简图如图1所示.

采用美国REDLAKE公司的HG-100K高速摄影仪拍摄球形火焰的发展情况, 拍摄速度在1000~10000幅/s内可调, 本研究选取的是5000幅/s. 实验中均匀混合气体用分压定律根据需要的当量比来配置, 初始压力为大气压时, 采用水银柱来计量和调节配气; 当初始压力大于大气压力时, 由压力变送

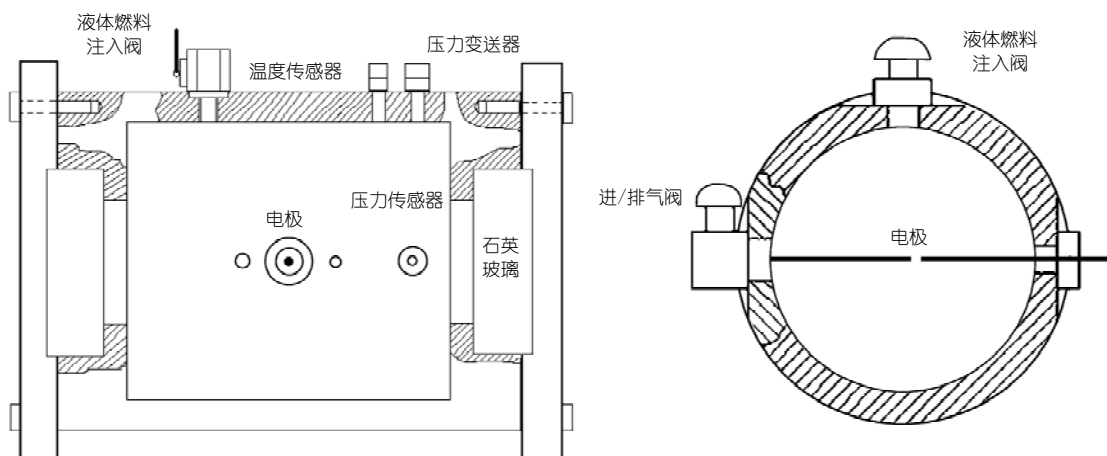


图1 定容燃烧弹结构简图

器来计量和调节配气。本实验所采用的压力变送器精度是 0.001 MPa。采用外部加热法对预混合气进行加热, 将功率为 2.4 kW 的加热带均匀的缠绕在燃烧体外部, 当加热带通电以后, 其产生的热量用于加热混合气, 燃烧体内部装有精度为 1 K 的热电偶, 用于测量混合气的温度, 同时从型号为 XMT121, 精度为 1 K 的数字温度显示仪上读出混合气的温度, 当混合气的温度达到所设定的初始温度后, 断开电源停止加热。配气结束后, 预混气静置 5 min 使内部气体保持稳定和温度场均匀, 本实验发现将预混合气体静置 30 min 与静置 5 min 相比, 实验结果无差别。利用电感式放电电极点燃混合气, 同时采用 YOKOGAMA 公司的 DL750 数字采集系统同步记录燃烧压力数据。每次燃烧结束后, 燃烧弹被抽成真空, 同时用干空气冲刷 3 次以消除上次燃烧的残余气体对下次实验造成的影响。

2 层流燃烧特性

2.1 层流燃烧速率

Law 等人^[7]、Bradley 等人^[9]和 Gu 等人^[17]给出了通过火焰发展图片获得拉伸火焰传播速率 S_n 与无拉伸火焰传播速率 S_1 的方法。Bradley 等人^[9]发现, 电极的点火能量影响到火焰发展的初期, 但当火焰半径大于 5 mm 时, 此影响基本消失。当火焰半径小于 30 mm 时, 本容弹内的压力基本保持不变。本文火焰半径的选取范围取 5~30 mm。

在火焰稳定传播过程中, 根据火焰前锋面上质量守恒, 无拉伸层流燃烧速率 u_1 可以由 S_1 得到, 即

$$u_1 = \rho_b S_1 / \rho_u, \quad (1)$$

式中, ρ_b , ρ_u 分别为已燃气体和未燃气体的密度, $\sigma = \rho_u / \rho_b$ 为热膨胀系数。

火焰厚度 δ_1 由(2)式给出^[9], 即

$$\delta_1 = \nu / u_1, \quad (2)$$

式中 ν 为未燃气体的运动黏度。马赫斯坦数 Ma 为无量纲化的马赫斯坦长度。

$$Ma = L_b / \delta_1, \quad (3)$$

式中 L_b 是马赫斯坦长度, 可根据文献[14]中的方法求出。

2.2 临界 Peclet 数

Bechtold 和 Matalon 将火焰面上出现大裂纹时的半径定义为临界半径 R_{cr} ^[18], 但 Jomaas 等人定义 R_{cr} 为胞状结构瞬间均匀分布在整個火焰面上时的半径, 这个瞬间与火焰前锋面突然失去稳定性相吻合^[8], 本文利用 Jomaas 等人推荐的定义求取临界半径 R_{cr} 。临界 Peclet 数为无量纲化的临界半径 R_{cr} , 记为 Pe_{cr} , 即

$$Pe_{cr} = R_{cr} / \delta_1. \quad (4)$$

3 实验结果与分析

3.1 层流燃烧速率

图 2 给出了初始温度 $T_u = 323$ K, 当量比 $\phi = 1.0$, 不同初始压力下火焰传播速率 S_n 随拉伸率 α 的关系。如图 2 所示, $P_u \leq 0.25$ MPa 时, 火焰前锋面基本保持光滑, 随着初始压力的增加, 火焰前锋面在早期阶段呈现光滑, 后期阶段出现裂纹, 随后裂纹继续发展直到整个火焰前锋面出现胞状结构, 图中位置 A、B 和 C 对应着胞状结构的出现点, 此时, 由于火焰前锋面积的增加, 燃烧速率大大提高, 初始压力越高, 胞状结构出现的火焰半径越小。火焰传播速率随初始压力的增加而减小。当初始压力 $P_u \leq 0.75$ MPa 时, S_n 随着 α 的增加而减小, S_n - α 拟合直线的斜率呈减小趋势。而 $P_u = 1.0$ MPa 时, S_n 基本上不随 α 的变化而变化。图 3 给出了初始温度 $T_u = 323$ K, 初始压力 $P_u = 0.75$ MPa, 当量比 $\phi = 1.2$ 时, 随着火焰发展典型的胞状结构形成

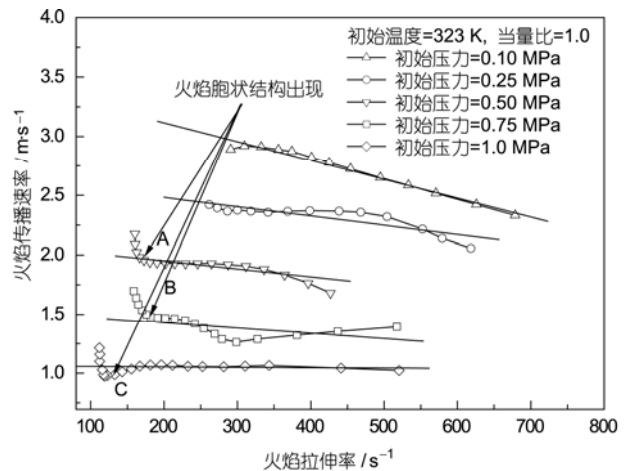


图 2 拉伸火焰传播速率与拉伸率的关系

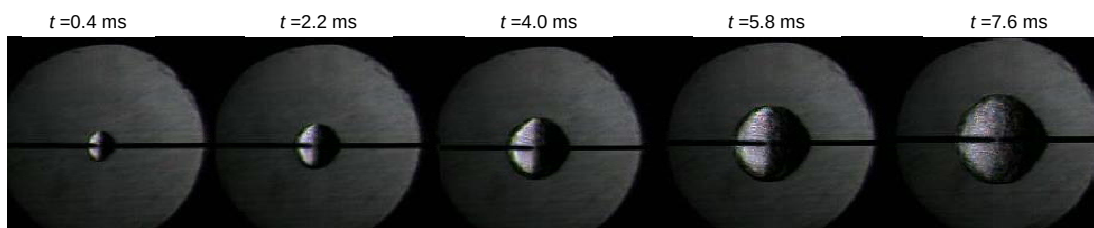


图3 胞状结构的形成和发展纹影图像

和发展的纹影图像. 随着时间的增加, 火焰半径逐渐增加. 在火焰发展过程中, 火焰前锋面最初保持光滑, 随后出现裂纹直到胞状结构逐渐布满整个火焰前锋面. 从图3中 $t=5.8$ ms 时可以清楚地看到胞状结构, 此刻也对应着火焰前锋面积的增加, 燃烧速率突然增加的情况.

图4给出了初始温度 $T_u=323$ K, 不同初始压力下无拉伸层流燃烧速率 u_l 与当量比的关系. 图5为初始温度 $T_u=323$ K, 不同当量比下无拉伸层流燃烧速率 u_l 与初始压力的关系. 对于给定的初始压力 u_l 在 $\phi=1.1$ 时到达最大值. 随着初始压力的增加, u_l 逐渐减小. 初始压力对火焰燃烧速率有双重影响, 一方面, 从燃烧热力学的角度出发, 随着初始压力的增加, 热解反应会增强, 火焰温度和化学反应速率增加, 使火焰燃烧速率呈增加趋势; 另一方面, 从链反应的角度出发, 随着初始压力的增加, 热解反应将被抑制, 导致链反应被抑制, 表现为火焰燃烧速率的降低^[19]. 燃烧速率随初始压力的变化趋势是上述两个因素综合作用的效果. 可见初始压力增加对链反应抑制的作用要高于

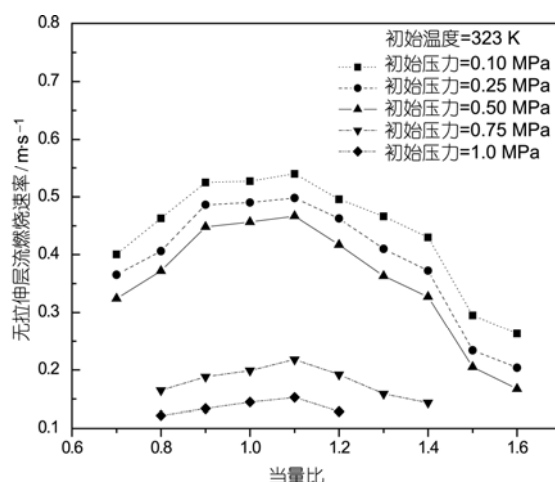


图4 无拉伸层流火焰速率与当量比的关系

初始压力增加对热解反应的作用, 从而使得火焰燃烧速率随初始压力的增加而减小.

3.2 火焰不稳定性分析

马赫斯坦数是表征火焰对拉伸是否稳定的无量纲数, 当马赫斯坦数为正时, 火焰传播速率随拉伸率

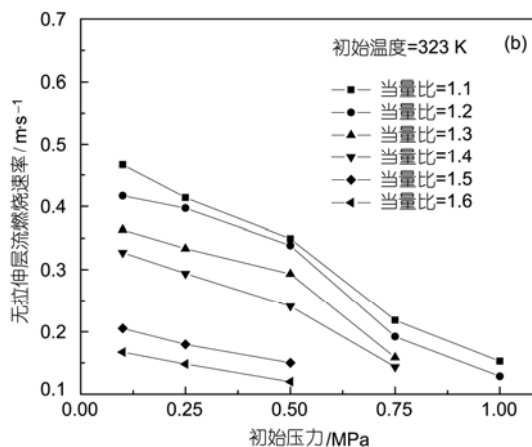
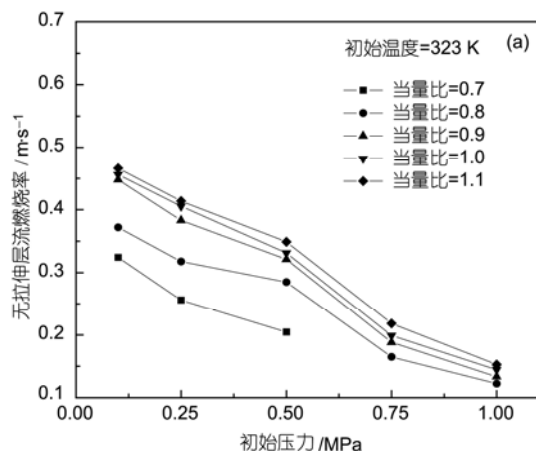


图5 无拉伸层流火焰速率与压力的关系

的增加而减小,此时,当火焰锋面出现突起时,突起部分的火焰传播速率将得到抑制,使火焰趋于稳定;反之,马赫斯坦数为负值时,火焰传播速率随拉伸率的增加而增加,当火焰锋面出现突起时,突起部分的火焰传播速率会进一步增加,使火焰趋于不稳定.图6给出了初始温度 $T_u=323\text{ K}$,不同初始压力下马赫斯坦数 Ma 与当量比的变化关系. Ma 随初始压力的增加而逐渐减小,表明随着初始压力的增加,火焰前锋面的不稳定性增强.在 $P_u \leq 0.75\text{ MPa}$ 时,随着当量比的增加, Ma 逐渐减小,表明火焰前锋面的不稳定性随当量比的增加而增加; $P_u=1.0\text{ MPa}$ 时, Ma 接近于零且不随当量比而变化.由图可知, Ma 由正值变化到负值是在当量比 $\phi=1.4$ 附近,可见随着初始压力的增加,火焰前锋面的不稳定性增加.

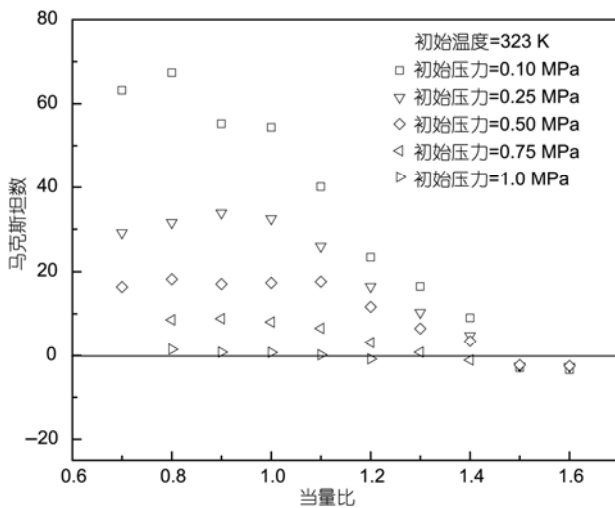


图6 马赫斯坦数与当量比的关系

如前所述,影响预混合气层流火焰稳定性的因素是体积力因素、流体动力学因素和热扩散因素.其中体积力不稳定性是火焰传播速度过慢时由于浮力的影响,火焰向上传播的现象,浮力的影响只有在燃烧极限附近火焰传播速率很慢时才发生;热扩散只有在马赫斯坦数小于零时出现,图6表明, $P_u \leq 1.0\text{ MPa}$ 且 $\phi \leq 1.2$ 时, Ma 均为正值,因此,本文主要考虑流体动力学因素对火焰不稳定性的影响.

从图7可以看出,在给定的初始温度和当量比下,随着初始压力的增加,火焰在更小的半径处出现胞状结构,导致火焰传播速率迅速增加,火焰前锋面出现不稳定结构.从图7右侧列出的数据可以看出,热

膨胀系数 σ 随初始压力的变化而基本不变,因此,初始压力增加而导致火焰前锋面不稳定性增加是由火焰厚度 δ_l 的变化而引起的.在相同的初始压力下,浓混合气的胞状结构出现的越早,这与马赫斯坦数的变化趋势一致.虽然电极处偶尔会出现小裂纹,但其对火焰传播速率的测量几乎没有影响^[20].图8和9分别给出了初始温度为 323 K ,不同初始压力时 σ 和 δ_l 随当量比的关系.由图可知,热膨胀系数随初始压力的变化而变化很小,而火焰厚度随初始压力的增加而减小,此特点再一次证明了火焰厚度的增加是引起了火焰前锋面不稳定性增加的因素.随着当量比的增加, σ 是呈现先增加后降低的趋势,在 $\phi=1.1$ 处达到最大值.随着当量比的增加, δ_l 呈现出先减小后增加的趋势,在 $\phi=1.1$ 处达到最小值.对于给定初始温度和初始压力,不同当量比时焰前锋面的不稳定性取决于热膨胀系数和火焰厚度共同作用的结果.

图10给出了火焰前锋面胞状结构出现的临界半径 R_{cr} 与当量比的关系.稀燃条件下,没有胞状结构出现.随着当量比的增加,胞状结构形成,当量比越大,对应的 R_{cr} 值越小.当量比一定时,初始压力的增加同样使 R_{cr} 减小.从另一个侧面说明了,火焰前锋面的不稳定性随着初始压力的增加而增加.本文得到的这个结果与Law等人^[7]、Jomaas等人^[8]、Bradley等人^[9]和Tang等人^[16,20]所研究的结果相一致.图11给出了临界Peclet数 Pe_{cr} 随当量比的关系.随着初始压力的增加, Pe_{cr} 减小. Pe_{cr} 随当量比的增加几乎呈线性减小趋势,此现象反应出采用 Pe_{cr} 数来表征胞状结构火焰是合理的^[8].

4 结论

本文研究了初始温度为 323 K ,不同初始压力和当量比下,二乙醚-空气预混合气层流燃烧特性,对火焰不稳定性进行了分析,得到了以下主要结论:

- (1) 无拉伸层流燃烧速率在 $\phi=1.1$ 时达到最大值;无拉伸层流燃烧速率随初始压力的增加而减小.
- (2) 马赫斯坦数随初始压力和当量比的增加而减小,表明火焰前锋面的不稳定性随着初始压力和当量比的增加而增加.
- (3) 随着初始压力的增加,胞状结构出现的临界半径和临界Peclet数减小;临界半径和临界Peclet数随当量比的增加而减小.

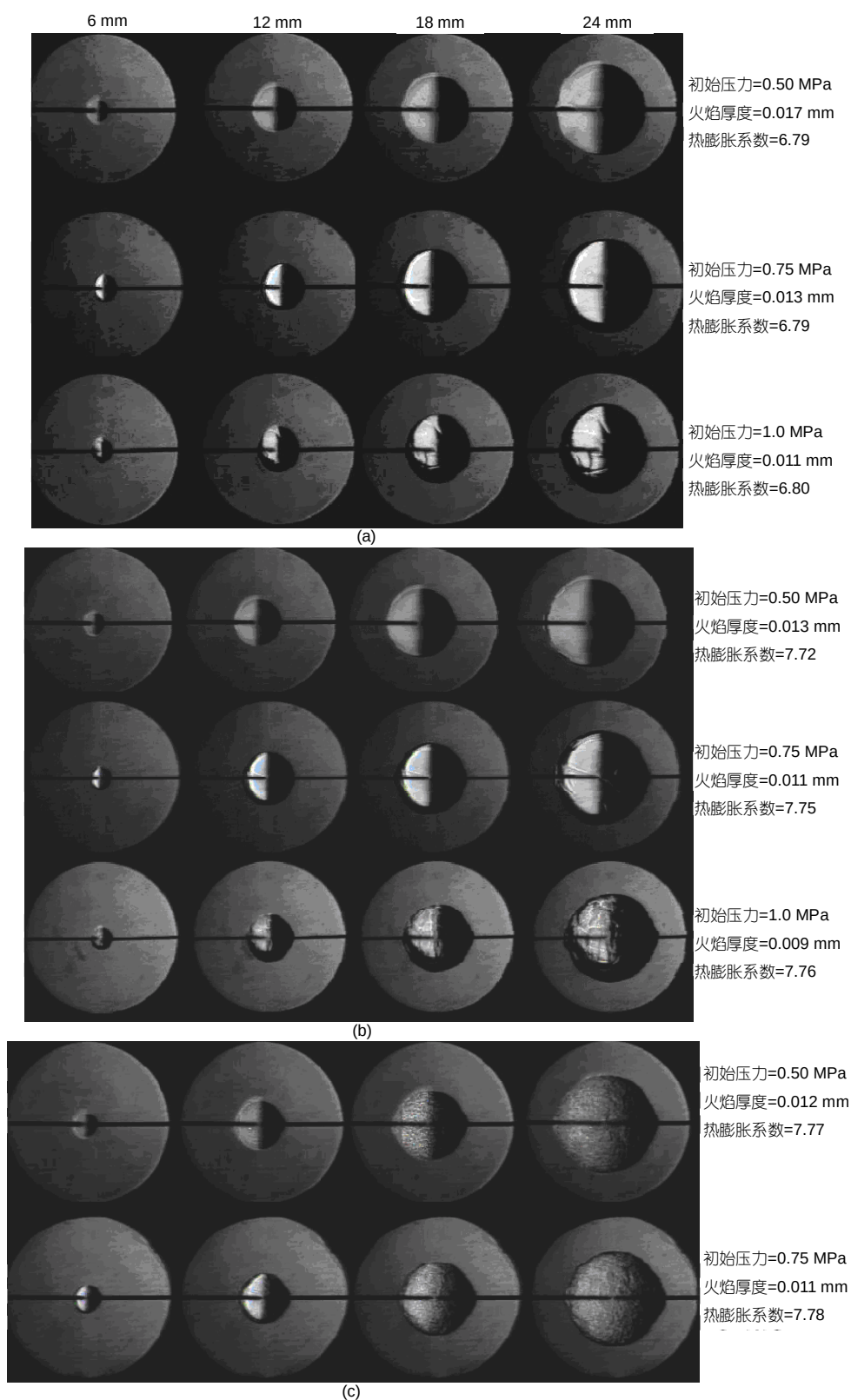


图 7 不同初始压力下二乙醚-空气预混火焰的纹影图片

(a) 初始温度 323 K, 当量比=0.8; (b) 初始温度 323 K, 当量比=1.0; (c) 初始温度 323 K, 当量比=1.2

S

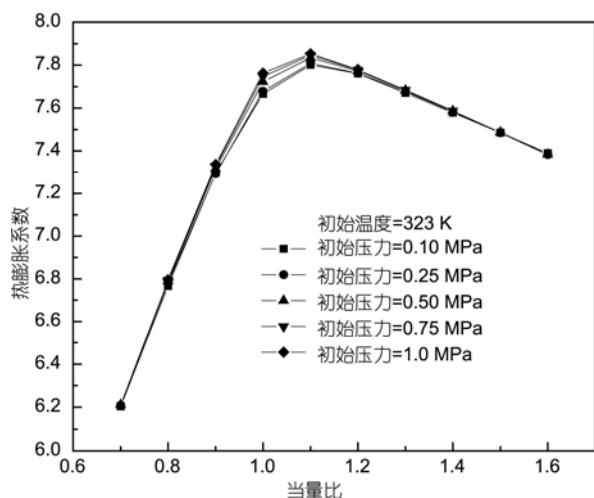


图 8 热膨胀系数与当量比的关系

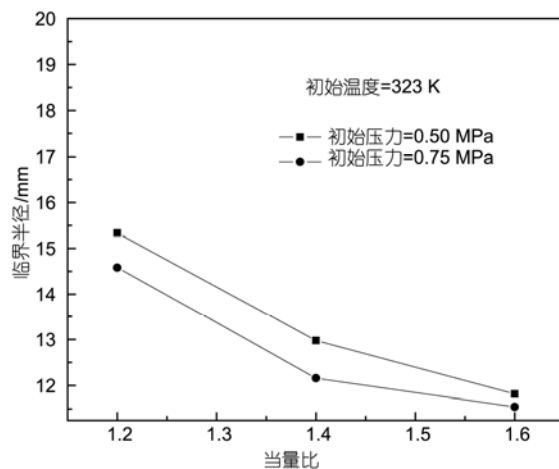


图 10 临界半径与当量比的关系

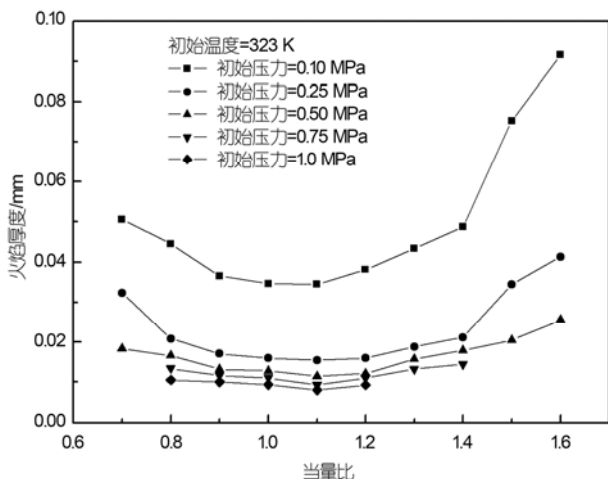


图 9 火焰厚度与当量比的关系

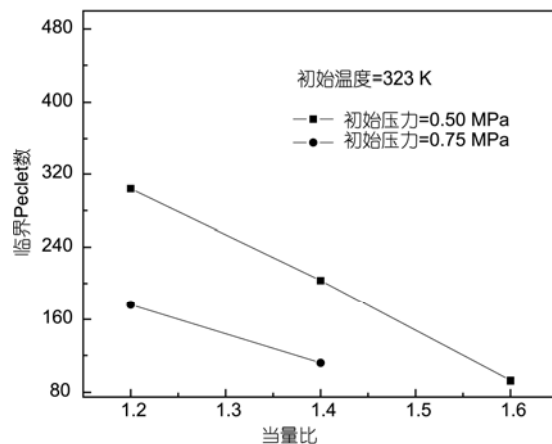


图 11 临界 Peclet 数与当量比的关系

参考文献

- 1 Bailey B, Eberhardt J, Goguen S, et al. Diethyl ether (DEE) as a renewable diesel fuel. SAE Paper, 1997, 972978
- 2 Miller Jothi N K, Nagarajan G, Renganarayanan S, et al. Experimental studies on homogeneous charge CI engine fueled with LPG using DEE as an ignition enhancer. Renew Energy, 2007, 32: 1581—1593 [\[DOI\]](#)
- 3 Ramadhas A S, Jayaraj S, Muraleedharan C. Experimental investigation on diethyl ether as fuel additive in biodiesel engine. Int J Global Energy, 2008, 29: 329—336 [\[DOI\]](#)
- 4 Saravanan C G. Effect of diethyl ether with emulsified fuel in a direct injection diesel engine. SAE Paper, 2007, 2007-01-2126
- 5 Natesan K. Performance and emission studies of diesel engine using diethyl ether as oxygenated fuel additive. SAE Paper, 2008, 2008-01-2466
- 6 Liberman M A, Bychkov V V, Golberg S M, et al. Numerical study of curved flames under confinement. Combust Sci Technol, 1998, 136: 221—251 [\[DOI\]](#)
- 7 Law C K, Jomaas G, Bechtold J K. Cellular instabilities of expanding dydrogen/propane spherical flames at elevated pressures: Theory and experiment. Proc Combust Inst, 2005, 30: 159—167 [\[DOI\]](#)
- 8 Jomaas G, Law C K, Bechtold J K. On transition to cellularity in expanding spherically flames. J Fluid Mech, 2007, 583: 1—26 [\[DOI\]](#)
- 9 Bradley D, Hicks R, Lawes M, et al. The measurement of laminar burning for iso-octane-air and iso-octane- n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb. Combust Flame, 1998, 115: 126—144 [\[DOI\]](#)
- 10 Tang C L, Huang Z H, Wang J H, et al. Effects of hydrogen addition on cellular instabilities of the spherically expanding propane

- flames. *Int J Hydrogen Energ*, 2009, 34: 2483—2487[DOI]
- 11 Jomaas G, Zheng X L, Zhu D L, et al. Experimental determination of counterflow ignition temperatures and laminar flame speeds of C2 – C3 hydrocarbons at atmospheric and elevated pressures. *Proc Combust Inst*, 2005, 30: 193—200[DOI]
 - 12 Chao B H, Egolfopoulos F N, Law C K. Structure and propagation of premixed flame in nozzle-generated counterflow. *Combust Flame*, 1997, 109: 620—638[DOI]
 - 13 Bosschaart K J, De Goeij L P H. Detail analysis of the heat flux method for measuring burning velocities. *Combust Flame*, 2003, 132: 170—80[DOI]
 - 14 Huang Z H, Zhang Y, Zeng K, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures. *Combust Flame*, 2006, 146: 302—311[DOI]
 - 15 Zhang Z Y, Huang Z H, Wang X G, et al. Measurements of laminar burning velocities and markstein lengths for methanol-air-nitrogen mixtures at elevated pressures and temperatures. *Combust Flame*, 2008, 155: 358—368[DOI]
 - 16 Tang C L, Huang Z H, Jin C, et al. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flames. *Int J Hydrogen Energ*, 2008, 33: 4906—4914[DOI]
 - 17 Gu X J, Haq M Z, Lawes M, et al. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane – air mixtures. *Combust Flame*, 2000, 121: 41—58[DOI]
 - 18 Bechtold J K, Matalon M. Hydrodynamic and diffusional effects on the stability of spherically expanding flames. *Combust Flame*, 1987, 67: 77—90[DOI]
 - 19 Huang Z H, Wang Q, Yu J R, et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-Air premixed mixtures. *Fuel*, 2007, 86: 2360—2366[DOI]
 - 20 Tang C L, He J J, Huang Z H, et al. Measurement of laminar burning velocities and Markstein lengths of propane-hydrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures. *Int J Hydrogen Energ*, 2008, 33: 7274—7285[DOI]