

高辛烷值燃料-空气预混层流燃烧特性研究

巩静, 金春, 姜雪, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在定容燃烧弹中采用高速纹影摄像方法研究了不同当量比($\phi=0.8\sim 1.4$)和初始温度(373 K, 423 K, 473 K)下高辛烷值燃料-空气预混合气的层流燃烧特性, 分析了当量比和初始温度对燃烧的影响. 结果表明: 拉伸火焰传播速率、无拉伸火焰传播速率、拉伸层流燃烧速率和无拉伸层流燃烧速率随着初始温度的增加而增加, 无拉伸层流燃烧速率在 $\phi=1.0\sim 1.1$ 附近有最大值; 马克斯坦长度随初始温度的增加而增加, 随当量比的增加而减小; 燃烧压力峰值与混合气质量的比值在 $\phi=1.1$ 时出现最大值, 初始温度增加, 该比值相应增加.

关键词: 高辛烷值燃料; 层流燃烧速率; 马克斯坦长度

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0026-05

Study on Laminar Burning Characteristics of High Octane Fuel-Air Mixtures

GONG Jing, JIN Chun, JIANG Xue, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The laminar combustion characteristics of ETBE-ethanol-tert-butyl alcohol-air mixtures were studied at various equivalence ratios (0.8-1.4) and initial temperatures (373 K, 423 K and 473 K) by using a constant volume combustion bomb and Schlieren photography. The influences of equivalence ratios and initial temperatures on the combustion characteristics were analyzed. The results show that the stretched flame speed, the unstretched flame speed, the stretched laminar burning speed and the unstretched laminar burning speed increase with the increase of the initial temperature. The unstretched laminar burning speed exhibits a maximum value at the equivalence ratio of 1.1. The Markstein length increases with the increase of the initial temperature and decreases with the increase of the equivalence ratio. The ratio of the peak combustion pressure to the mass of mixture shows a maximum value at the equivalence ratio of 1.1, and this ratio increases with the increase of the initial temperature.

Keywords: high octane fuel; laminar burning velocity; Markstein length

能源短缺和环境恶化是人类目前所面临的两大问题, 大规模开发和使用可再生能源和清洁替代能源是从根本上解决能源和环境问题的主要途径. 在此背景下, 替代燃料的研究取得了长足的发展. 乙基叔丁基醚(ETBE)是汽油高辛烷值添加剂, 目前我国还没有规模化生产和使用. ETBE 的生产过程中伴随有高辛烷值燃料的产生, 它由 ETBE、乙醇和叔丁醇(TBA)组成, 均为高辛烷值燃料. 生产 ETBE-

乙醇-TBA 混合物比生产 ETBE 成本低得多, 因此如能大规模使用高辛烷值混合燃料作为汽油添加剂将具有低成本、可规模化的特点. 然而, 有关高辛烷值燃料的燃烧特性研究目前还没有报道. 在此方面开展相关研究有助于增加对高辛烷值燃料预混合气燃烧的认识, 并为其在工程中的应用提供理论依据. 本文基于球形扩散火焰理论和双区模型, 在定容燃烧弹中, 利用高速纹影摄像法对常压下不同燃空当

量比($\phi=0.8\sim1.4$)和初始温度($T_0=373\text{ K}$, 423 K , 473 K)下的高辛烷值燃料-空气预混合气的层流燃烧特性进行研究,获得了相关燃烧的基本参数.

1 实验装置与混合气配制

利用容弹法研究预混层流燃烧特性的实验系统如图 1 所示.本实验中利用水银压力计来验证燃料注入的准确性以保证未燃气的当量比,采用传统的电感放电点火方式点燃混合气,利用高速摄像装置记录火焰发展的纹影照片,并同步采集燃烧弹中的压力.实验室中采用的定容燃烧弹为圆柱体空腔,其内腔直径为 180 mm、长为 210 mm、容积为 5.34 L.

本实验燃料为高辛烷值燃料——无水乙醇 $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ 、叔丁醇 $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ 、乙基叔丁基醚 $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$ 的混合物,其组成如表 1 所示,表 2 给出了各组分的理化性质.

表 1 混合燃料的组成

组分	乙醇	叔丁醇	乙基叔丁基醚
质量分数 $w/\%$	65.3	11.9	22.8

设混合燃料分子式为 $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta\text{O}_\gamma$,由混合燃料的组成可得 $\alpha=2.680\ 893\ 591$, $\beta=7.361\ 787\ 183$, $\gamma=1$.根据化学平衡,得到混合燃料的化学计量燃烧反应式为

$$\text{C}_\alpha\text{H}_\beta\text{O}_\gamma + \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right)\text{O}_2 + 3.761\ 9 \times$$
$$\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right)\text{N}_2 = \alpha\text{CO}_2 + \frac{\beta}{2}\text{H}_2\text{O} + 3.761\ 9 \times$$
$$\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right)\text{N}_2$$

由此计算出 1 mol 混合燃料完全燃烧所需的理论空气量为 19.15 mol.

表 2 乙醇、叔丁醇、乙基叔丁基醚的主要理化特性

理化特性	乙醇	叔丁醇	乙基叔丁基醚
相对分子质量	46.07	74.12	102.18
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	78.4	82.5	71
液态密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	790	786	740
理论空燃比	14.286	28.572	42.858
$w(\text{C})/\%$	52.094 6	64.759 8	70.463 9
$w(\text{H})/\%$	13.023 7	13.491 6	13.701 3
$w(\text{O})/\%$	34.729 8	21.586 6	15.658 6

设 L 为实际充入容弹的空气量,即 1 mol 燃气实际消耗的空气量, L_0 为 1 mol 混合气所需消耗的理论空气量,可知 $L_0=19.15\text{ mol}$.定义当量比 $\phi=L_0/L$,这样就可根据当量比计算出不同温度下注入容弹内的燃料量.

由于实验为常压,因此混合气配制过程中可先充入空气至常压,到实验所选取的温度点时用微量进样器注入一定量液体燃料使其符合一定当量比.待液体燃料完全雾化并与容弹内空气混合均匀后对容弹内的混合气放气,使其达到常压.

2 实验数据及分析

火焰在扩展过程中会因为各种淬熄因素的影响而熄灭.为了保证形成火核并具有相当的传播速率,产生连续的火焰传播过程,火花点火能量有最低值的限制.点火能量的引入必然会对火焰的传播产生影响. Bradley^[1]、Liao^[2] 和 Lamoureux^[3] 等人对甲烷、天然气和氢气层流火焰的研究表明,点火能量对火焰传播的影响仅限于火核半径约小于 6 mm 时.火核半径超过这个临界值时,不同点火能量下的层

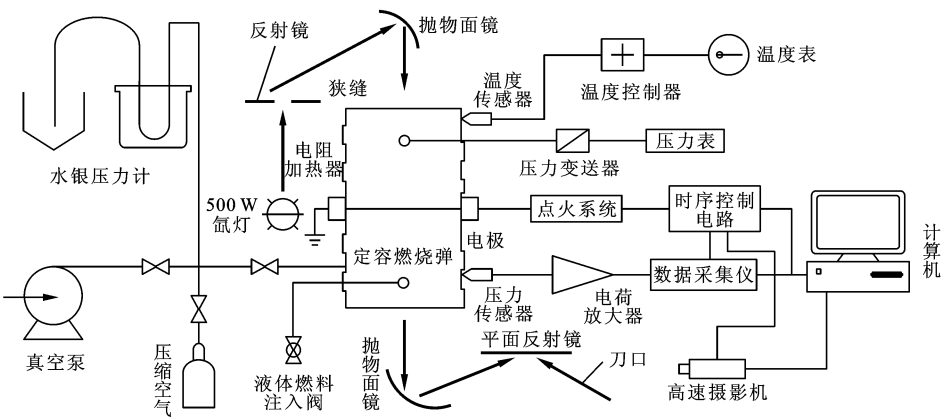


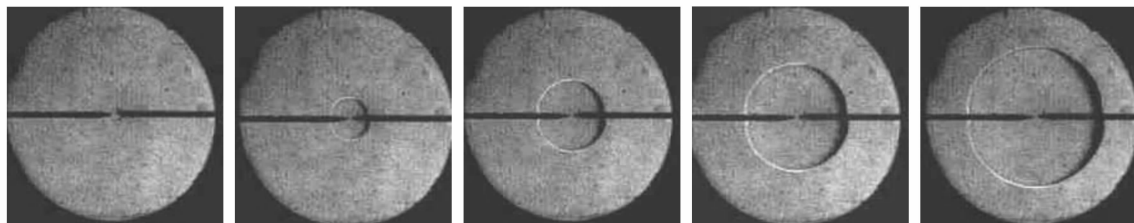
图 1 实验系统布置图

流燃烧速率趋于一致,点火能量对火焰传播的影响基本消失,火焰传播速率独立于点火能量.文献[4]表明,当火焰半径小于30 mm时,压力的变化较小.因此,为了避免点火能量和压力的影响,本文将数据范围选择在火焰半径为5~25 mm之间.

图2为本文实验拍摄到的典型火核发展过程纹影照片.从图中可以看出,对于静止的可燃预混合气,点火成功后火焰呈球形状态由已燃区向未燃区不断扩展.

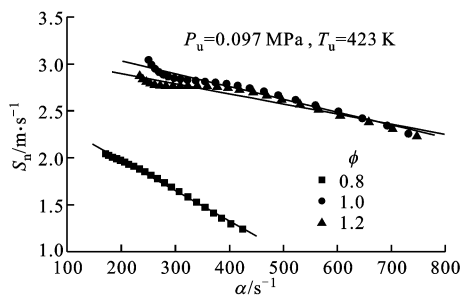
图3为不同当量比和初始温度下的拉伸火焰传

播速率与拉伸率的关系.从图中可以看出,由于在数据处理范围的选择上避免了点火能量和火焰传播后期压力升高的影响,拉伸火焰传播速率 S_n 和拉伸率 α 近似呈线性关系.拟合出的直线在 S_n 轴上的截距即为无拉伸火焰传播速率 S_l ,斜率的负值即为马赫斯坦长度 L_b .由图可知: $\phi=1.0$ 时的火焰传播速率最快;当量比一定时,随着初始温度的增加,拉伸火焰传播速率增加.这表明温度增加使化学反应速率提高,导致火焰传播速率增加.

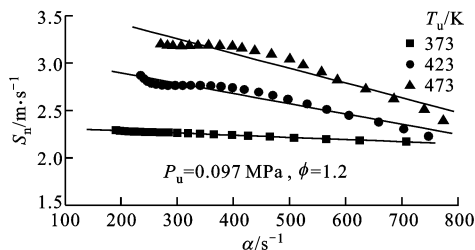


初始压力 $P_u = 0.097$ MPa; 初始温度 $T_u = 423$ K; 当量比 $\phi = 1.0$

图2 高辛烷值燃料-空气预混合气火焰传播纹影照片



(a) 不同当量比下拉伸火焰传播速率与拉伸率的关系



(b) 不同初始温度下拉伸火焰传播速率与拉伸率的关系

图3 拉伸火焰传播速率与拉伸率的关系

图4为不同初始温度下无拉伸火焰传播速率与当量比的关系.由图可见,初始温度增高,无拉伸火焰传播速率增加.无拉伸火焰传播速率在 $\phi=1.0\sim 1.1$ 附近达到最大值,随着初始温度的增加,最大无拉伸火焰传播速率向偏浓混合气的方向移动.

层流燃烧速率分为拉伸层流燃烧速率和无拉伸

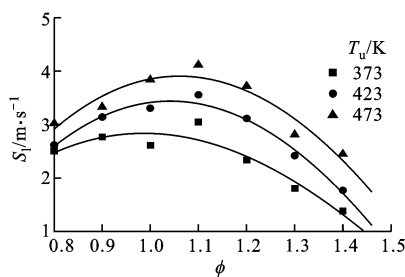


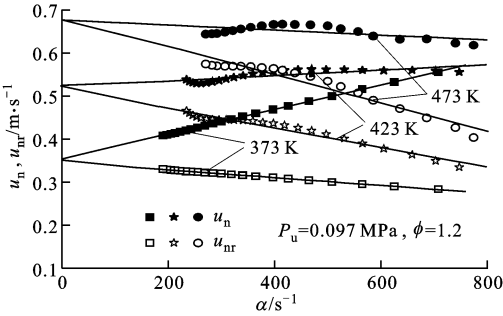
图4 无拉伸火焰传播速率与当量比的关系

层流燃烧速率两种.拉伸层流燃烧速率又可分为 u_n 和 u_{nr} .前者定义在火焰锋面的外侧,取决于未燃混合气的卷吸率;后者定义在火焰锋面的内侧,取决于燃烧产物的生成率[5].

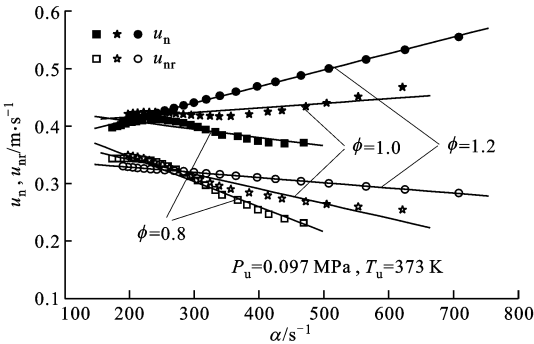
图5给出了不同初始温度和当量比下拉伸率对 u_n 和 u_{nr} 的影响. u_n 随伸率的增加而增加, u_{nr} 随拉伸率的增加而减小.随拉伸率的增加, $u_n - u_{nr}$ 增加,反映出火焰厚度对燃烧速率的影响增加.由拉伸率的定义可知,大的拉伸率对应着小的火焰半径,此时火焰厚度的影响相对较大.当拉伸率趋于0时,火焰半径趋于无穷,火焰锋面厚度的影响可以忽略,此时无论燃烧速率定义在火焰锋面的那一侧,都应该趋于同一个值,即无拉伸层流燃烧速率 u_l .

在初始压力和当量比相同的情况下, $T_u = 473$ K时 $u_n - u_{nr}$ 最小,表明随着初始温度的增加,火焰厚度对燃烧速率的影响降低.初始温度和压力相同

时, $\phi=1.2$ 时 u_n-u_{nr} 最大, 表明随着混合气浓度增加, 火焰厚度对燃烧速率的影响增强。



(a)不同初始温度下拉伸层流燃烧速率与拉伸率的关系



(b)不同当量比下拉伸层流燃烧速率与拉伸率的关系

图5 拉伸层流燃烧速率与拉伸率的关系

图6为高辛烷值燃料-空气预混合气的无拉伸层流燃烧速率与当量比的关系。最大无拉伸层流燃烧速率出现在 $\phi=1.0\sim1.1$ 附近。随着初始温度的增加, 无拉伸层流燃烧速率增大并向偏浓混合气的方向移动, 这与无拉伸火焰传播速率的规律一致。

图7为不同初始温度下马克斯坦长度与当量比的关系。混合气的马克斯坦长度均随当量比的增加而呈线性减小的趋势, 随初始温度的增加而呈线性增加趋势, 表明初始温度和浓度对马克斯坦长度的影响呈线性。马克斯坦长度还与火焰稳定性密切相关, 大的马克斯坦长度对应着高的火焰稳定性。实验结果表明: 火焰稳定性随当量比的增加而降低, 随初始温度的增加而提高。

图8a是不同初始温度下燃烧压力 p 随时间 t 的变化关系。随着初始温度的增加, 燃烧压力升高的相位提前, 但峰值压力降低。着火滞燃期缩短是造成相位提前的主要原因。

图8b为不同初始温度下单位质量混合气燃烧压力 p 随时间 t 的变化关系。初始温度增加, 单位质量混合气燃烧对应的压力升高率和峰值压力增加, 反映出初始温度增加对燃烧的促进作用。图8a中出

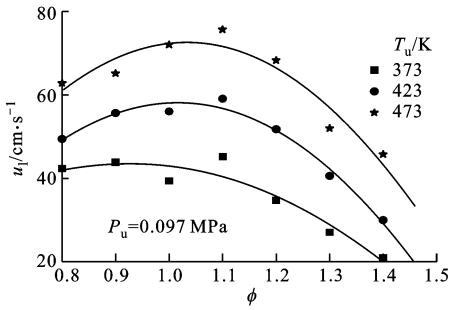


图6 无拉伸层流燃烧速率与当量比的关系

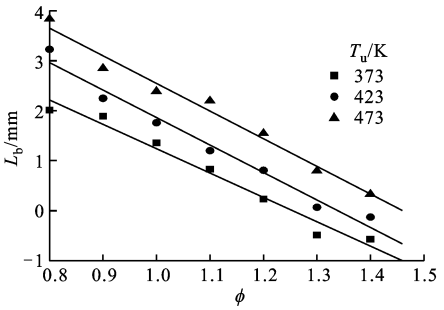
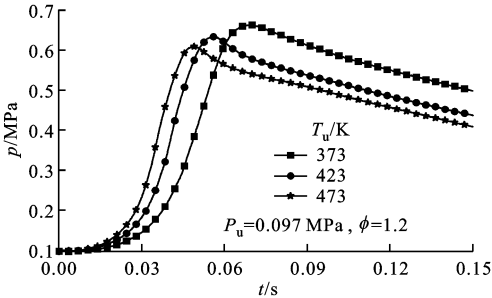
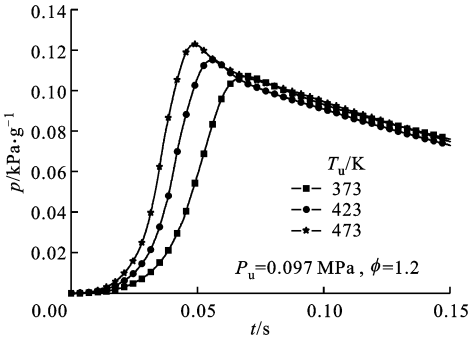


图7 马克斯坦长度与当量比的关系



(a)混合气燃烧压力与时间的关系



(b)单位质量混合气燃烧压力与时间的关系

图8 不同初始温度下混合气燃烧压力与时间的关系

现的初始温度增加后燃烧峰值压力降低的现象是初始温度提高导致容弹内燃料质量减少所致。

图9为单位质量混合气对应的燃烧压力峰值与当量比的关系。压力峰值在当量比 $\phi=1.1$ 时出现最大值。初始温度增加, 此压力峰值相应增加。高的初

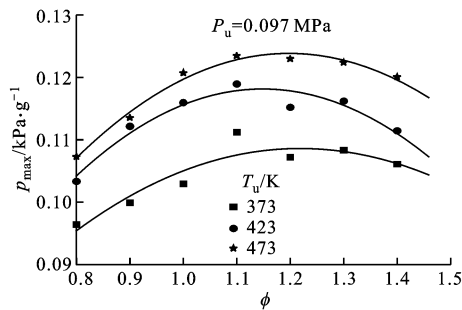


图9 单位质量混合气燃烧压力峰值与当量比的关系

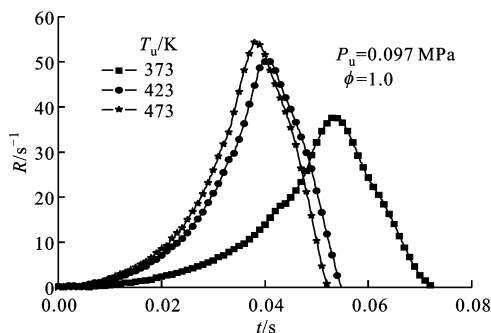


图10 质量燃烧速率与时间的关系

始温度条件下单位质量混合气燃烧所引起的压力升高值相应增加,反映出提高初始温度对燃烧的促进作用增强。

规范化质量燃烧速率 R (简称质量燃烧速率) 定义为 $\frac{1}{m} \frac{dm_b}{dt}$ (m 为可燃气总质量, m_b 为已燃气体质量), 该值能直观反映出整个燃烧过程的燃烧速率, 可通过双区燃烧模型计算得到^[6]。图10给出了 R 与时间(点火时刻为0时刻)的关系。随初始温度的增加, R 增加, 达到最大 R 的时间和燃烧持续时间均缩短, 反映出火焰传播速率随初始温度的增加而增加。从图中可以看出, 从 373 K 到 423 K, 燃烧放热速率增加比较明显, 而从 423 K 到 473 K, 燃烧放热速率变化不大, 反映出初始温度从常温提高后对燃烧的促进作用比较明显, 随着初始温度的进一步提升, 其对燃烧放热速率的影响作用减弱。

3 结 论

(1) 当量比一定时, 层流燃烧速率随初始温度的增加而增加, 在实验所研究的范围内, $T_u = 473$ K 时

无拉伸层流燃烧速率有最大值。初始温度一定时, 随当量比的变化, 无拉伸层流燃烧速率在 $\phi = 1.0 \sim 1.1$ 附近有最大值。

(2) 初始温度一定时, 混合气的马克斯坦长度随当量比的增加而减小, 火焰的不稳定性增加; 当量比一定时, 马克斯坦长度随初始温度的增加而增加, 火焰稳定性增强。

(3) 单位质量混合气燃烧的峰值压力和质量燃烧速率随初始温度的增加而增加, 在当量比 $\phi = 1.1$ 附近单位质量混合气燃烧的压力峰值出现最大值, 体现出初始温度和浓度对燃烧的影响。

参考文献:

- [1] BRADLEY D, GASKELL P H, GU X J. Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames; a computational study [J]. Combustion and Flame, 1996, 104(1/2): 176-198.
- [2] LIAO S Y, JANG D M, GAO J, et al. Measurements of Markstein numbers and laminar burning velocities for natural gas-air mixtures [J]. Energy and Fuels, 2004, 18(2): 316-326.
- [3] LAMOUREUX N, DJEBAILI-CHAUMEIX N, PAILLARD C E. Laminar flame velocity determination for H_2 -air-He- CO_2 mixtures using the spherical bomb method [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27(4): 385-393.
- [4] HUANG Zuohua, WANG Qian, YU Jinrong, et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air premixed mixtures [J]. Fuel, 2007, 86(15): 2360-2366.
- [5] BRADLEY D, HICKS R A, LAWESL M, et al. The measurement of laminar burning velocities and Markstein numbers for iso-octane-air and iso-octane-n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb [J]. Combustion and Flame, 1998, 115(1/2): 126-144.
- [6] HUANG Zuohua, WANG Qian, MIAO Haiyan, et al. Study on dimethyl ether-air premixed mixture combustion with a constant volume vessel [J]. Energy and Fuels, 2007, 21(4): 2013-2017.

(编辑 荆树蓉)