

DOI: 10.7652/xjtuxb201509008

稀释气对高甲烷含量天然气燃烧特性的影响

汤成龙, 司占博, 张旭辉, 张双, 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: 针对高甲烷含量天然气在实际发动机中燃烧温度过高、 NO_x 排放过高的问题, 利用定容燃烧弹实验和 Chemkin 软件模拟计算相结合的方法, 对其预混层流燃烧特性进行研究, 分析了不同稀释比和稀释气种类(N_2 和 CO_2) 对混合气的层流火焰速度、 NO_x 摩尔分数、燃烧压力和燃烧期等燃烧特性参数的影响。研究表明, 层流火焰速度、质量燃烧率和热释放率均随稀释比的增加而减小, 稀释气添加导致火焰温度下降, 从而降低了 NO_x 摩尔分数。Markstein 长度和火焰厚度都随稀释比的增加而增加, 火焰流动不稳定性得到抑制。添加稀释气导致燃烧压力峰值和压力升高率降低、燃烧期延长, 与 N_2 相比, CO_2 对混合气燃烧特性的稀释效果更加显著, 从而为通过废气再循环技术路径降低高甲烷含量天然气发动机燃烧温度, 控制 NO_x 排放提供了理论指导。

关键词: 天然气; 稀释; 层流火焰速度; 燃烧特性

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)09-0041-06

Effects of Diluents on the Combustion Characteristics of Natural Gas with High Methane Content

TANG Chenglong, SI Zhanbo, ZHANG Xuhui, ZHANG Shuang, HUANG Zuohua

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

Abstract: The combustion characteristics of premixed laminar flames of natural gas with high methane content were studied to reveal the influences of dilution ratio and diluent kinds (N_2 and CO_2) on the combustion characteristics such as the laminar flame speed, NO_x mole fraction, combustion pressure and combustion duration. The study results show that the laminar flame speed, the mass burning flux and the heat release rate all decrease with the increasing of dilution ratio; and with the addition of diluents, the flame temperature decreases, hence decreasing the NO_x mole fraction. The Markstein length and flame thickness also increase with the dilution ratio, indicating that the flow instability of flame is suppressed. The combustion pressure peak and the pressure rising rate decrease while the combustion duration increases with the addition of diluents. Additionally, compared with N_2 , CO_2 has more obvious dilution effect on the combustion characteristics of natural gas with high methane content.

Keywords: natural gas; dilution; laminar flame speed; combustion characteristics

随着化石能源短缺和大气污染的日益严重, 探索高效燃烧方式已成为内燃机和燃烧学界的重要研究方向。天然气(主要成分是甲烷, 以及少量乙烷

等)具有安全性高、排放性能好、价格低等优点, 已成为目前应用最为广泛的汽车代用燃料。为进一步提高天然气发动机的热效率, 通常会使用较高的压缩

比,结果导致发动机更容易发生爆震,缸内燃烧温度升高, NO_x 排放增加。甲烷具有超高的辛烷值和良好的抗爆性,所以一些天然气发动机从业者追求使用高甲烷含量的天然气来克服压缩比提高产生的爆震现象。此外,废气再循环(EGR)是将燃烧后产生的部分残余废气引入到气缸中,使燃烧反应在低氧状态下进行,致使燃烧温度降低,该方式可以有效降低发动机燃烧产生的 NO_x 含量^[1-4]。

目前,天然气和甲烷基础燃烧特性已经得到了广泛的研究。Liao等利用定容燃烧弹研究了天然气/空气的层流火焰速度和Markstein长度,结果表明层流火焰速度在当量比为1.1附近达到最大,Markstein长度随初始压力和温度的增加略微减小,而随当量比的增加而增加^[5]。Gu等通过实验研究了甲烷/空气在不同压力和温度下的层流燃烧速度和Markstein长度,指出火焰不稳定性随初始压力的增加而增加,随当量比的增加而降低^[6]。Stone等研究了添加稀释气(CO_2/N_2)对甲烷/空气层流火焰速度的影响^[7]。Hu等研究了EGR率和氢气掺混量对火花塞点火式天然气发动机燃烧特性的影响,结果表明火焰燃烧期随EGR率的增加而延长,随氢气掺混量的增加而缩短^[8]。Tang等研究了甲烷含量、压力和稀释比对天然气/空气爆炸特性的影响,结果指出甲烷含量增加对天然气层流燃烧特性影响较小,而随初始压力增加,爆炸压力峰值和压力升高率峰值均明显增大,添加稀释气则会抑制爆炸压力,使得压力升高率的峰值减小^[9]。

然而,稀释气对高甲烷含量下天然气基础燃烧特性的影响尚未得到充分研究。因此,本文研究了不同稀释比和稀释气种类下高甲烷含量天然气的层流燃烧速度、质量燃烧率、火焰厚度、绝热火焰温度、 NO_x 摩尔分数、燃烧压力和燃烧期等燃烧特性参数信息,从而可以得到稀释气对燃烧特性的影响规律,以期从燃烧角度对天然气发动机的缸内优化提供参考。

1 实验装置和数据处理方法

1.1 实验装置

本文中稀释比定义为

$$\phi_r = \frac{V_d}{V_f + V_a + V_d} \quad (1)$$

式中: V_f 表示燃料体积; V_a 表示空气体积; V_d 表示稀释气体积。

如图1所示,实验系统由定容燃烧弹、温度压力

监控系统、高速摄像机和纹影系统、点火和数据采集系统组成,其详细描述见文献[10-11]。容弹($\Phi 180 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$)两端分别装有一个直径为80 mm的玻璃视窗,用来提供燃烧过程可视化的光学通路。容弹内中心位置装有两根点火电极,外部布置有压力传感器、热电偶、液体注射阀和进排气阀。高速摄像机(Phantom V611)拍摄速度采用1万幅/s。实验的配气方法是依据分压定律分别向弹体内注入天然气、稀释气和空气,静置10 min后点火。燃烧结束后抽真空冲洗容弹至少3次。本实验采用的天然气成分的体积分数为甲烷95%、乙烷5%,空气采用 O_2 和 N_2 以体积比为1:3.762的比例混合。稀释气除选用 N_2 和 CO_2 外,还增加了与实际发动机EGR组分比热容最为接近的 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合气(其中 N_2 体积分数为85%, CO_2 体积分数为15%)。实验采用的燃空当量比均为1.0,初始压力为101 kPa,初始温度为423 K。

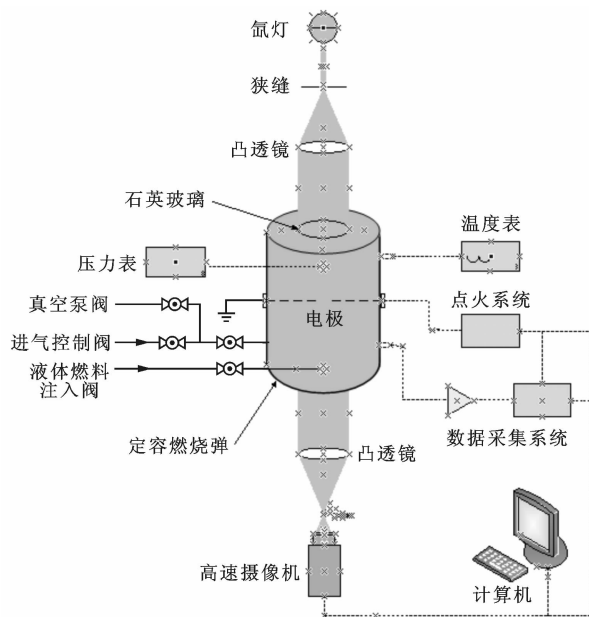


图1 实验系统示意图

1.2 数据处理方法

对于球形扩散火焰,可以通过火焰半径对时间的微分来获得拉伸火焰传播速率 S_b ^[12],即

$$S_b = \frac{dr_f}{dt} \quad (2)$$

式中: r_f 为火焰半径; t 为火焰扩散时间。

火焰拉伸率 α 由火焰前锋面上无限小面积 A 的对数值对时间的导数获得^[13]

$$\alpha = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{2}{r_f} \frac{dr_f}{dt} = \frac{2}{r_f} S_b \quad (3)$$

只考虑火焰传播初期,拉伸火焰传播速率与火

焰拉伸率之间存在如下线性关系^[14]

$$S_b^0 - S_b = L_b \alpha \quad (4)$$

将式(4)拟合的直线外推至拉伸率 $\alpha=0$, 即可得无拉伸火焰传播速率 S_b^0 , 直线的斜率为已燃气 Markstein 长度 L_b 的负值。

图2给出了 N_2 作为稀释气体时不同稀释比下拉伸火焰传播速率与拉伸率的关系, 可以看出, 拉伸火焰传播速率与拉伸率呈近似线性关系。将直线 $S_b - \alpha$ 外推至 $\alpha=0$, 即可得无拉伸火焰传播速率 S_b^0 , 由式(4)可知, L_b 即为该直线斜率 k 的相反数。由图2可知, 随稀释比增加, L_b 明显降低。这主要是由于稀释气的添加使得燃烧反应放出的总热量减少, 另外稀释气体也吸收部分反应放出的热量, 以上两个因素导致燃烧温度降低, 进而火焰传播速率减小。

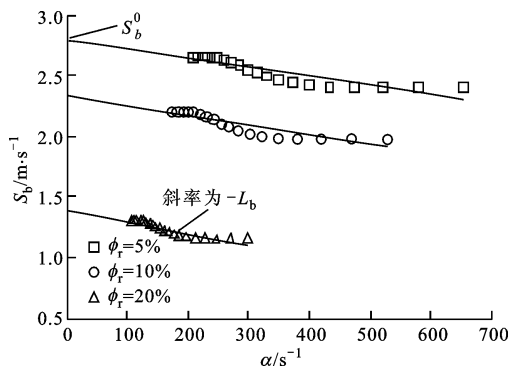


图2 拉伸火焰传播速率与拉伸率的关系

由火焰前锋面的质量守恒可得

$$A_f \rho_u S_u^0 = A_f \rho_b S_b^0 \quad (5)$$

式中: A_f 为火焰前锋面面积; ρ_u 和 ρ_b 分别为未燃和已燃气体的密度, ρ_u 可通过燃气初始状态获得, ρ_b 由过热平衡法计算得到^[15]。

由此, 可以推出无拉伸层流燃烧速率

$$S_u^0 = \rho_b S_b^0 / \rho_u = f / \rho_u \quad (6)$$

式中: f 为质量燃烧率。

甲烷和乙烷的化学反应机理已经比较成熟, 其中被广泛应用的是 GRI-Mech^[16-17] 化学反应机理。本文中的 NO_x 摩尔分数利用 Chemkin-II 软件包中的 Premix 模块^[18] 结合 GRI-Mech3.0 机理计算得到, 绝热火焰温度采用 Equilibrium 模型计算得到。

2 实验结果与分析

2.1 层流火焰速度和质量燃烧率

图3和图4分别给出了当量比为1.0时采用不同种类稀释气的情况下, 稀释比对层流火焰速度与质量燃烧率的影响。质量燃烧率定义为 $f = \rho_u S_u^0$,

是表征混合气的化学反应、扩散和放热最直观的参数。由图3、图4可知, 层流火焰速度和质量燃烧率均随稀释比的增大而减小。这主要是由于稀释气体的加入降低了容弹内单位体积可燃混合气的相对浓度, 导致火焰放热量减少, 从而使得混合气的燃烧温度和层流火焰速度降低。在相同稀释比下, 层流火焰速度随 $N_2 + CO_2$ 混合气中 N_2 比例的减小明显降低, 且稀释比增加相同的量时, CO_2 对层流火焰速度的抑制作用比 N_2 更为明显。这主要是因为 CO_2 作为三原子分子, 其比热容比 N_2 的大, 吸热能力比 N_2 更强, 所以与 N_2 相比, CO_2 对混合气燃烧温度降低的效果更明显, 进而使得火焰传播速率降低程度较大。由于稀释比变化对混合气的密度影响不大, 所以质量燃烧率和层流火焰速度具有相同的趋势。

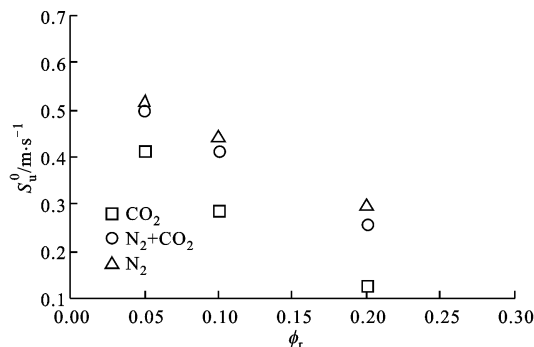


图3 层流火焰速度与稀释比的关系

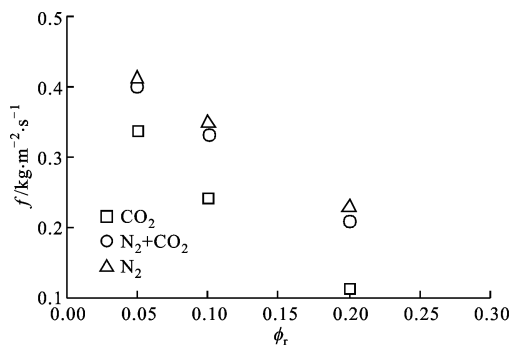


图4 质量燃烧率与稀释比的关系

2.2 Markstein 长度和火焰厚度

层流火焰厚度 δ_L 的计算参考 Thierry 等的方法^[19], 定义为

$$\delta_L = \frac{T_{ad} - T_u}{(dT/dx)_{\max}} \quad (7)$$

式中: T_{ad} 为绝热火焰温度; T_u 为未燃气初始温度。

Markstein 长度表示层流火焰本身属性对拉伸的敏感程度, 是反映火焰稳定性的重要参数。图5和图6分别给出了不同稀释气种类下 Markstein 长

度和火焰厚度随稀释比的变化关系。可以看出,对于3种稀释气体,Markstein长度均随稀释比的增加而增加,这反映出稀释气体的加入使得火焰前锋面对于扰动的抑制能力增强,即降低了火焰的不稳定性。

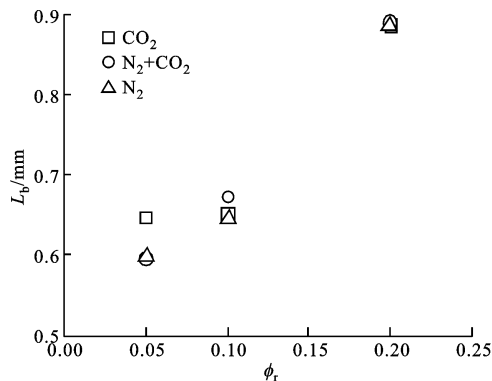


图5 Markstein长度与稀释比的关系

图6表明对于同一种类稀释气,火焰厚度随稀释比的增加而增加,这意味着火焰流动不稳定性得到抑制。火焰厚度变大主要是由于稀释比增加导致未燃混合气化学反应速率降低引起的。当稀释比相同时,CO₂作为稀释气时,火焰厚度变化较为显著,这进一步说明CO₂稀释气对火焰传播和火焰厚度的影响要大于N₂稀释气的影响。

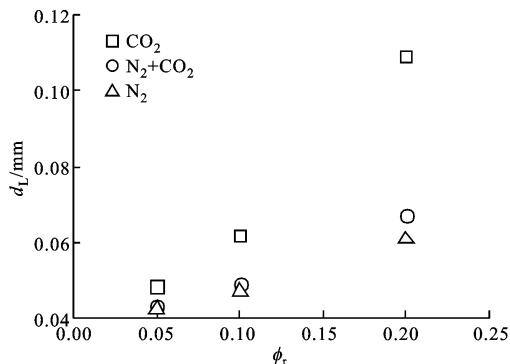


图6 火焰厚度与稀释比的关系

2.3 燃烧热参数和NO_x排放

图7给出了3种稀释气下绝热火焰温度 T_{ad} 随稀释比的变化关系。可以看出,绝热火焰温度随稀释比的增加而下降,这是由于惰性气体稀释减弱了反应区的化学反应强度,稀释气加入到可燃混合气后会降低其热值,并且随着稀释气的添加致使额外热容增大,吸收燃烧释放的部分热量,导致绝热火焰温度下降,而此量值的降低也是层流火焰速度下降的原因之一。此外,对于给定稀释比,绝热火焰温度随N₂+CO₂混合气中N₂比例的减小而降低,这说

明CO₂的热作用强于N₂。

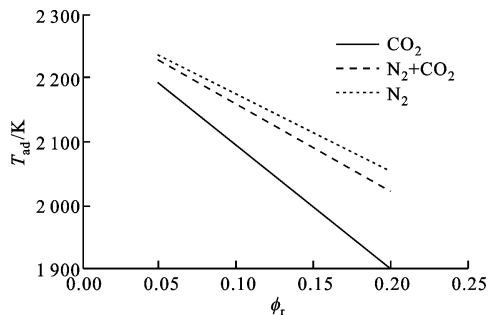
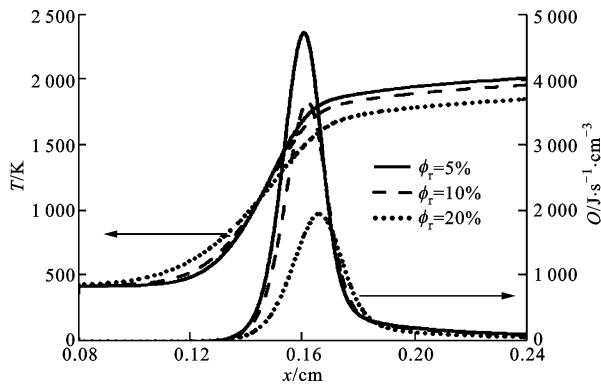
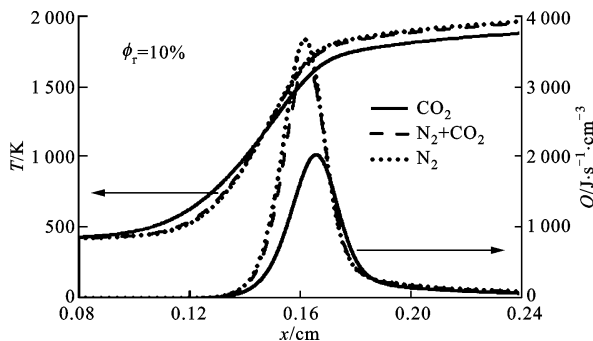


图7 绝热火焰温度与稀释比的关系

图8给出了不同稀释比和稀释气种类下火焰温度和热释放率随轴向距离 x 的变化曲线。由图可知,火焰温度和热释放率都随稀释比的增加而降低。图8a中,N₂作为稀释气体,稀释比为5%时最高火焰温度是2028 K,而在稀释比为20%时的最高火焰温度是1864 K,下降了164 K,说明总热释放量随稀释比的增加而减少。这主要是由于稀释气的加入吸收了部分化学反应释放的能量致使火焰温度降低,进而引起层流火焰速度降低。当稀释比为10%时,随N₂+CO₂混合气中N₂比例的增加火焰温度和热释放率均增加,这与N₂+CO₂混合气中N₂比例对层流火焰速度的影响趋势是一致的。



(a)不同的稀释比下



(b)不同的稀释气种类下

图8 火焰温度和热释放率随轴向距离的变化关系

基于 GRI-Mech3.0 机理计算得出的 NO_x 摩尔分数在不同稀释气下随稀释比的变化关系如图 9 所示。由图可知, NO_x 摩尔分数随稀释比的增加而迅速降低。这是由于 N 、 OH 、 O 、 H 和 N_2 等是 NO_x 排放生成的重要物质, 这些物质主要是在高温区产生, 而稀释气体的加入降低了火焰温度(见图 8a), 故 NO_x 摩尔分数随稀释比的增加而下降。此外, 该下降趋势在 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合气中 N_2 比例较小时更为明显, 表明 CO_2 稀释气对 NO_x 排放的降低作用更为明显。

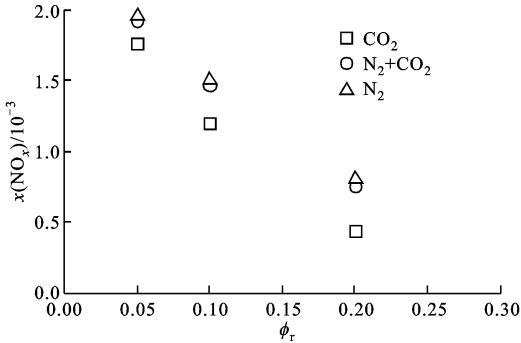


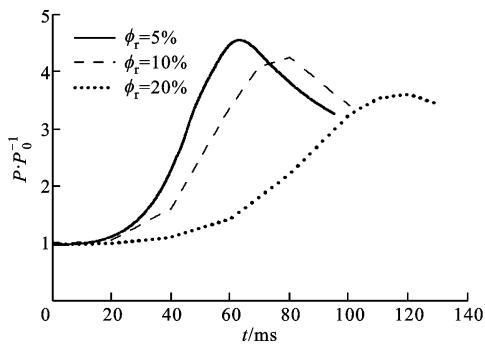
图 9 NO_x 摩尔分数随稀释比的变化关系

2.4 燃烧压力与燃烧期

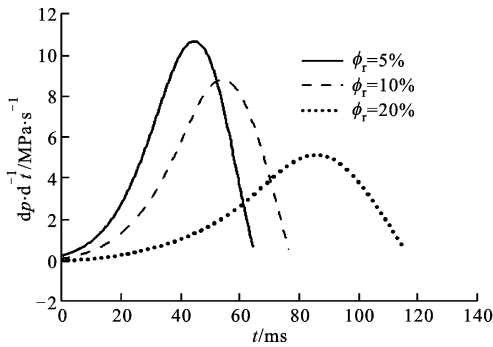
图 10 给出了 N_2 作为稀释气时不同稀释比下燃烧压力与压力升高率随时间的变化关系。由图可知, 燃烧压力峰值和压力升高率峰值都随稀释比的增加而减小。这是由于稀释气的添加使混合气燃烧放热量减少, 导致最高燃烧温度降低, 压力峰值降低。压力升高率峰值的降低是由混合气的最大热释放率随稀释比的增大而减小引起的。另外, 稀释比越大, 从点火到燃烧压力达到峰值的时间也就越长, 反映了混合气火焰传播速度越慢。

稀释比为 10% 时, 不同种类稀释气对燃烧压力与压力升高率的影响如图 11 所示。可以看出, 随 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合气中 N_2 比例的增加燃烧压力峰值和压力升高率均增大, 燃烧压力峰值出现的时间也更早, 这是由于 N_2 稀释气相比 CO_2 稀释气, 其对应的混合气绝热火焰温度和热释放率较大所致。此外, 随时间延长, 燃烧压力开始明显降低, 这主要是由壁面传热量增大与混合气总热值降低造成的。

燃烧期 t_R 是对内燃机燃烧效率和排放特性有重要影响的参数之一, 所以燃烧期的标准量化和控制显得尤其重要。本文采用的燃烧期定义为从点火到燃烧压力达到峰值所需要的时间^[20]。由图 12 可看出, 燃烧期随稀释比的增大而增大, 这是由于火焰传播速度随稀释比的增大而减小, 致使火焰在燃烧

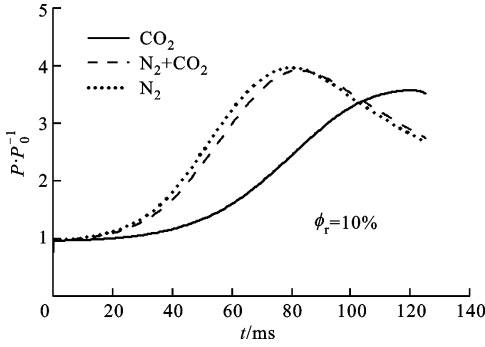


(a) 燃烧压力随时间的变化关系

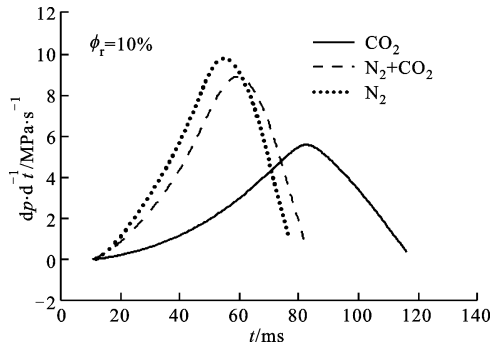


(b) 压力升高率随时间的变化关系

图 10 稀释比对燃烧压力和压力升高率的影响



(a) 燃烧压力随时间的变化关系



(b) 压力升高率随时间的变化关系

图 11 稀释气种类对燃烧压力和压力升高率的影响

室的燃烧持续时间增加。稀释比相同时, 随 $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ 混合气中 N_2 比例的增加混合气的燃烧期逐渐

减小。当稀释比为 5% 时, N_2 稀释气对应的混合气燃烧期相比 CO_2 稀释气的小了 17.5 ms, 而当稀释比为 20% 时, 其差值为 132.3 ms。这说明 CO_2 对燃烧期的影响作用大于 N_2 的影响, 与 CO_2 和 N_2 对层流火焰速度的影响作用是一致的。

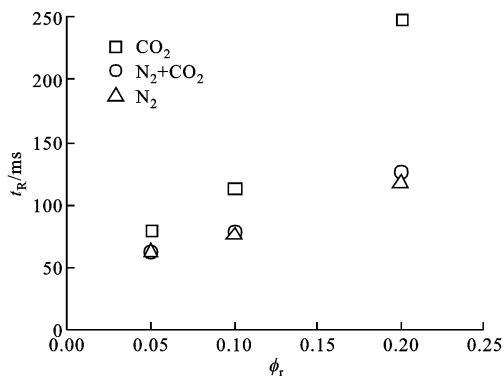


图 12 燃烧期与稀释比的关系

3 结 论

本文通过实验和数值模拟两方面分析了高甲烷含量天然气基础燃烧特性, 得到了不同稀释比和稀释气种类下层流火焰特性参数, 主要结论如下。

(1) 添加稀释气降低了混合气的火焰温度, 导致 NO_x 摩尔分数随稀释比的增加而下降, 而且混合气层流火焰速度、质量燃烧率和热释放率均随稀释比的增加而减小。

(2) 随着稀释比的增加, Markstein 长度和火焰厚度都增加, 火焰流动不稳定性得到抑制, 火焰前缘面对扰动的抑制能力增强。

(3) 添加稀释气造成燃烧压力峰值与压力升高率降低, 而且从点火到燃烧压力达到峰值的时间越长, 燃烧期延长。

(4) N_2 和 CO_2 对混合气基础燃烧特性的影响作用有着明显区别, CO_2 对混合气的影响效果更加明显。

参考文献:

- [1] HEFFEL J W. NO_x emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(11): 1285-1292.
- [2] CHO G, MOON G, JEONG D, et al. Effects of internal exhaust gas recirculation on controlled auto-ignition in a methane engine combustion [J]. Fuel, 2009, 88(6): 1042-1048.
- [3] ABD-ALLA G H, SOLIMAN H A, BADR O A, et

al. Effects of diluent admissions and intake air temperature in exhaust gas recirculation on the emissions of an indirect injection dual fuel engine [J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42(8): 1033-1045.

- [4] TANG C L, ZHENG J J, HUANG Z H, et al. Study on nitrogen diluted propane-air premixed flames at elevated pressures and temperatures [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(2): 288-295.
- [5] LIAO S Y, JIANG 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.
- [6] GU X J, HAQ M Z, LAWES M, et al. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 2000, 121(1/2): 41-58.
- [7] STONE R, CLARKE A, BECKWITH P. Correlations for the laminar-burning velocity of methane/diluent/air mixtures obtained in free-fall experiments [J]. Combustion and Flame, 1998, 114(3/4): 546-555.
- [8] HU E J, HUANG Z H, LIU B, et al. Experimental study on combustion characteristics of a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combining with EGR [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 34(2): 1035-1044.
- [9] TANG C L, ZHANG S, SI Z B, et al. High methane natural gas/air explosion characteristics in confined vessel [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278: 520-528.
- [10] TANG C L, HUANG Z H, JIN C, et al. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(18): 4906-4914.
- [11] TANG C L, HUANG Z H, JIN C, et al. Explosion characteristics of hydrogen-nitrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(1): 554-561.
- [12] 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.
- [13] TANG C L, HE J J, HUANG Z H, et al. Measurements of laminar burning velocities and Markstein lengths of propane-hydrogen-air mixtures at elevated

(下转第 83 页)