文章编号:1001-2060(2015)05-0725-05

当量比对掺氢天然气预混燃烧特性的影响

贾 亮 李惠林 何 锋 范星光

(贵州大学 机械工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘 要: 为了提高内燃机燃用掺氢天然气的燃烧质量,提高 车辆的动力性和排放性,在不同掺氢比下,利用定容燃烧弹 高速纹影装置所得到的球形火焰纹影图像,结合球形火焰扩 散理论,分析燃、空当量比对掺氢天然气预混燃烧特性的影 响规律。结果表明:高掺氢比下,高当量比使得未拉伸层流 燃烧速率出现峰值,高当量比可提高火焰燃烧速率;高掺氢 比使得火焰不稳定性增强,高当量比可抑制火焰的不稳定 性,增强火焰的稳定性趋势;当量比存在一个临界值 *Φ* = 1.0 燃烧压力最大,达到最大燃烧压力所需的时间最短,且 高掺氢比时最大燃烧压力较大。

关 键 词: 天然气; 氢气; 当量比; 稳定性; 定容燃烧弹中图分类号: TK401 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.019 引 言

目前,车辆发动机使用的替代燃料主要有甲烷 含量较高与含氢量较高的气体燃料,但使用这些替 代燃料车辆的发动机都存在动力不足和部分排放物 排放浓度较高的问题。国内外在替代燃料燃烧排放 特性方面已经开展了研究。文献 [1-2]将氢气掺 混在天然气中能够提高混合气燃烧速率,降低稀薄 燃烧时的循环变动,从而提高发动机的动力性和排 放性; 文献 [3-4]研究了掺氢比等因素对掺氢天然 气 - 空气的火焰传播过程的影响,发现不同掺氢比 会影响火焰稳定性; 文献 [5-6]对燃用不同掺氢比 的天然气与排放的关系进行研究,并指出低掺氢比 的天然气燃料的 NO_x 排放较低。研究表明,混合气 氢含量的比例对提高车辆动力性和降低车辆排放有 明显影响。

本研究通过定容燃烧弹高速纹影装置分析不同 掺氢比下 燃空当量比对掺氢天然气预混火焰燃烧 特性的影响规律 层流燃烧速率、火焰稳定性和最大 燃烧压力随燃空当量比变化的关系规律 结果表明: 高当量比可提高火焰燃烧速率和最大燃烧压力,抑 制火焰的不稳定性,且高掺氢比时这种趋势更为 明显。

1 试验装置

用定容燃烧弹与纹影装置结合的方法对掺氢天 然气 - 空气预混火焰燃烧特性展开研究,试验装置 如图1所示。根据分压定律按所需的燃空当量比在 定容燃烧弹中配制均匀混合气,待混合气静止后利 用电感放电式电极点燃混合气,采用 CS20000 系统 同步采集燃烧压力,并同时触发高速摄像机拍照,记 录火焰的燃烧过程。

试验中图像数据误差主要有理论误差和实验误 差两个方面,理论误差主要因图像检测采用 C - 均 值聚类 - 射线定弧组合算法而产生的。该算法容易 受到图像检测背景噪声的干扰,干扰比较强烈且射 线路径被覆盖时,这种误差通常比实验误差大。实 验误差主要来自高速纹影装置,其每秒产生1万幅 图像数据,图像数据的清晰度直接影响实验数据的 精度。利用 C - 均值聚类 - 射线定弧组合算法对高 速纹影装置产生的图像数据进行处理,经多次重复 试验,该算法在球形火焰扩散的初期、中期和后期的 平均准确率分别为94.32%、97.25%和 95.98%。 可见该算法对火焰扩散图像数据具有较好的处理 效果。

试验所用的氢气纯度为 99.995% ,天然气具体 成分如表 1 所示 ,设天然气分子式为 $C_{\alpha}H_{\beta}O_{\gamma}$,其中 $\alpha = 1.01523 \beta = 3.928084$, $\gamma = 0.05086$ 。定容燃烧 弹中可燃混合气可表示为 $(1 - x) C_{\alpha}H_{B}O_{\gamma} + xH_{2} +$

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-07-02

基金项目:贵州省科技计划资助项目(黔科合重大专项字(2012)6001);贵州大学研究生创新基金资助项目(研理工2015019) 作者简介:贾 亮(1985-),男,河北张家口人,贵州大学硕士研究生.

表1 天然气成分

Tab. 1 Composition of natural gas

成分	体积分数/%
CH ₄	96.160
$C_2 H_8$	1.096
$C_3 H_8$	0.136
N_2	0.001
CO ₂	2.540
其它	0.067

定义燃空当量比 $\Phi = L_0/L$,数值范围为 0.6 – 1.4 掺氢比 $R_{\rm H_2}$ 为混合燃气中氢气的体积分数。 L_0 为容弹内燃气所需要消耗的理论空气量;本研究选 取 20% 和 80% 的掺氢比代表掺氢天然气的低、高掺 氢比。



图1 试验装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the experiment equipment

2 球形火焰扩散理论

在球形扩散火焰中,拉伸火焰传播速率由火焰 半径和时间的关系式给出^[7],即:

$$S_{\rm n} = {\rm d}r_{\rm u}/{\rm d}t \tag{1}$$

式中: r_u—纹影照片中火焰的半径; t—时间。

火焰拉伸率 α 为火焰表面上无限小面积 A 的 对数值对时间取导数 即:

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}(\ln A)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{A} \cdot \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} = \frac{2}{r} \cdot \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \frac{2}{r} S_{\mathrm{n}} (2)$$

火焰扩散初期是容弹内压力变化很小的阶段,

火焰锋面呈较规则的球形,拉伸火焰传播速率和火焰拉伸率近似成线性关系^[8],即:

$$S_1 - S_n = L_b \alpha \tag{3}$$

式中: $L_{\rm b}$ 一马克思坦长度; $S_{\rm 1}$ 一无拉伸层流火焰传播 速率。

利用式(1)、式(2)分别求出相应的 S_n 和 α 。

未拉伸层流燃烧速率 *u*₁和质量燃烧流量 *f* 分 别由式(4)、式(5) 计算^[9] 即:

$$u_1 = \rho_{\rm b} S_1 / \rho_{\rm u} \tag{4}$$

$$f = \rho_{\rm b} S_1 = \rho_{\rm u} u_1 \tag{5}$$

式中: $\rho_{\rm b}$ 一已燃区气体密度; $\rho_{\rm u}$ 一未燃区气体密度。

拉伸层流燃烧速率有两种定义:未燃气体的消 耗速率 u "定义在火焰锋面的外侧;产物的生成速率 u "定义在火焰锋面的内侧。分别由式(6)、式(7) 计算。

$$u_{\rm n} = S(S_{\rm n}\rho_{\rm n}/\rho_{\rm u}) \tag{6}$$

$$u_{\rm nr} = \rho_{\rm b} (u_{\rm n} - S_{\rm n}) / (\rho_{\rm b} - \rho_{\rm u})$$
(7)

式中: *S*一修正函数,取决于火焰半径和两区的密度比^[9]。

$$S = 1 + 1.2 \left[\frac{\delta_{1}}{r_{u}} \left(\frac{\rho_{u}}{\rho_{b}} \right)^{2.2} \right] - 0.15 \left[\frac{\delta_{1}}{r_{u}} \left(\frac{\rho_{u}}{\rho_{b}} \right)^{2.2} \right]^{2}$$
(8)

式中: δ_1 一 火焰厚度 $\delta_1 = v/u_1$ (v 一未燃混合气体 的运动黏性系数)。

3 试验结果与分析

在初始压力 P_0 为 0.1 MPa、初始温度 T_0 为 300 K 的条件下,开展天然气 – 氢气 – 空气混合气预混 燃烧的试验,获得不同当量比 Φ (0.6 – 1.4) 和不同 掺氢比 $R_{\rm H_2}$ (20% 与 80%)下的掺氢天然气的层流 燃烧速率、马克思坦长度等参数,分析燃空当量比对 掺氢天然气预混火焰燃烧特性的影响规律。为消除 点火对火焰发展产生的波动影响,要求火焰半径 $r_{\rm u} \ge 5$ mm; 另外,通过对照实测容弹内的压力变化和 相应纹影图像,发现火焰半径 $r_{\rm u} \le 25$ mm 时,容弹内 压力变化很小;故纹影图片测量半径范围为 5 – 25 mm。

3.1 当量比对层流燃烧速率的影响

层流燃烧速率是层流燃烧研究中的重要待测参数。图2给出了低、高掺氢比下,火焰半径随时间的

变化规律。容弹点火后,火焰从近似球形的火核向 外扩散,半径迅速增大。低、高掺氢比时不同当量比 下,火焰半径与时间的变化规律均呈线性关系。低 掺氢比时,随当量比增加,火焰半径的增长速率均是 先增大后减小;高掺氢比时,随当量比增加,火焰半 径的增长速率持续增大,半径增长速率的最大值所 对应的当量比规律是不同的。低掺氢时, $\phi = 1.0$ 半径增长速度最快;高掺氢比则是 $\phi = 1.4$ 时。表 明高掺氢比下,高当量比使得未拉伸层流燃烧速率 出现较大峰值。







图 3 给出了低、高掺氢比,未拉伸层流燃烧速率 随当量比的变化规律。随当量比的增加,未拉伸层 流燃烧速率先增大后减小,且最大值出现的位置从 低掺氢比混合气逐渐向高掺氢比混合气方向移动。 本研究试验数据与文献[3]数据进行对比,结果基





图 3 低、高掺氢比时未拉伸层流燃烧 速率随当量比的变化关系

Fig. 3 The relationship of unstretched laminar burning velocity at various equivalence ratios with high low hydrogen blend ratios

3.2 当量比对火焰稳定性的影响

图 4 给出了低、高掺氢比时拉伸火焰传播速率 随半径的变化规律。低掺氢比时,当 $\phi < 1.0$ 时,火 焰的传播速率随火焰半径的增大而减小的趋势增 强; 当 $\phi > 1.0$ 时,火焰传播速率随火焰半径的增大 而增加的趋势增强。而高掺氢比时,不论当量比高 低,火焰传播速率均随火焰半径的增大而减小,但随 当量比增加,火焰传播速率随半径变化率减小。根 据马克思坦理论,当马克思坦长度为正值,此时为稳 定火焰,拉伸火焰传播速率随半径的增大而增加,火 焰锋面凸起部分的传播速率将得到抑制; 当马克思 坦长度为负值,此时为不稳定火焰,该拉伸火焰传播 速率随半径的增大而减小,火焰锋面凸起部分的传 播速率将进一步增加。表明火焰随掺氢比的增加趋 于不稳定; 随当量比的增加,火焰的不稳定趋势逐渐 减弱 稳定性趋势得到增强。

图 5 给出了低、高掺氢比,马克思坦长度 L_b随 当量比 Φ 的变化规律。随当量比 Φ 的增加,马克思 坦长度 L_b增加,表明高掺氢比时不稳定趋势更为明 显;随当量比增加,火焰的不稳定趋势逐渐减弱。

图 6 给出了低、高掺氢比,掺氢天然气在点火后 球形火焰传播时的纹影图像。在低、高掺氢量时,随 当量比的增加,火焰表面均由裂纹状态逐渐恢复至 光滑状态,但高掺氢比时,在火焰传播过程中可观察 到火焰表面出现大量明显裂纹和凹坑。这表明随当 量比的增加 掺氢天然气火焰的不稳定性得到抑制, 且当量比对浓混合气燃烧火焰的不稳定性抑制更为 明显。





Fig. 4 Flame speed versus flame radius under various equivalence ratios with low ,high hydrogen blend ratios

图 7 给出了低、高掺氢比在不同当量比下,火焰 厚度(δ_1)随当量比 ϕ 的变化规律。无论掺氢比高 低,随当量比的增加,火焰厚度均先增后减,最小值 出现位置均在 $\phi = 1.0$ 处。对于定容燃烧试验,在 火焰发展中后期,火焰厚度可定性预测火焰的稳定 性^[7]。火焰越厚,不稳定性趋势越弱。当 $\phi < 1.0$ 时,火焰厚度随当量比的增加而减小,即火焰不稳定 性趋势增加;当 $\phi > 1.0$ 时,火焰厚度随当量比的 增加而增加,即火焰稳定性提高。表明高掺氢比时 火焰的不稳定性较高,高当量比时火焰的稳定性趋 势增强。



Fig. 5 Markstein length at various equivalence ratios with low high hydrogen blend ratios



图6 低、高掺氢比时不同当量比下 球形火焰传播纹影图片

Fig. 6 Schlieren photos of flame propagation at various equivalence ratios with 20vol% and 80vol% hydrogen addition

3.3 当量比对容弹内燃烧压力的影响

燃烧压力是内燃机工作评价重要指标之一。优 化燃烧压力可提高车辆的动力性。燃烧压力是通过 影响燃烧室内的燃料与空气之间的化学反应以及流 动和传热过程来影响发动机的性能。

图 8 给出了低、高掺氢比时最大燃烧压力随当量比的变化规律。无论掺氢比高低,火焰厚度均存在一个临界当量比(*Ф* = 1.0),该值对应燃烧压力

最大 达到峰值所用的时间最短 , $\phi < 1.0$ 或 $\phi >$ 1.0时最大压力均减小且达到峰值所用时间增大。 这是因为在 $\Phi = 1.0$ 时 拥有理想的化学反应比例, 同时保证化学反应过程中 CH4、H2与 O2的接触率最 大 接触时间最长。高掺氢比时混合气的最大燃烧 压力较大且达到峰值所用时间较短 这是因为氢气 H-H 共价键的能量远小于 C-H 共价键的能量, 从而使氢气较天然气在化学反应中更易释放能量。 反应总体速率更快;混合气中掺氢比越大燃烧时化 学反应能量就越高,反应总体速率就越快。表明当 量比的大小直接影响预混气体燃烧反应所释放能量 的高低和化学反应的总体速率。



低、高掺氢比时火焰厚度随当量比的 图 7 变化关系

Fig. 7 Flame thickness at various equivalence ratios

with low high hydrogen blend ratios



低、高掺氢比时最大燃烧压力 图 8 随当量比的变化关系



结 4 论

(1) 高掺氢比 高当量比使得未拉伸层流燃烧 速率最大,优化当量比,可提高掺氢天然气的燃烧 速率。

(2) 相对低掺氢比,高掺氢比使得火焰稳定性 减弱;相对较低当量比。高当量比可抑制火焰的不稳 定性 增强火焰的稳定性趋势。

(3) 在临界值 $\Phi = 1.0$ 处 ,燃烧压力达到最 大,且达到最大燃烧压力所需的时间最短;当高掺氢 比时最大燃烧压力进一步增大。

研究表明:优化当量比,可改善内燃机燃用掺氢 天然气的燃烧质量。

参考文献:

- [1] Ma F Li S Zhao J et al. Effect of compression ratio and spark timing on the power performance and combustion characteristics of an HCNG engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, $2012 \ 37(23) : 18486 - 18491.$
- [2] Ma F ,Deng J ,Li S ,et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of a hydrogen-enriched com-pressed natural gas engine under idling condition [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2011 36(20):13150-13157.
- [3] Huang Z Zhang Y Zeng K et al. Measurements of Laminar Burning Velocities for Natural Gas-Hydrogen-Air Mix-tures [J]. Combustion and Flame 2006 ,146(1/2): 302 - 311.
- [4] Miao H Jiao Q Huang Z et al. Effect of Initial Pressure on Laminar Combustion Characteristics of Hydrogen Enriched Natural Gas [J]. International Journal of Hydrogen Energy ,2008 ,33 (14): 3876 - 3885.
- [5] Nagalinyam B ,Duebel F ,Schmillen K. Performance Study Using Natural Gas Hydrogen-supplemented Natural Gas and Hydrogen in AVL Research Engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy ,Britain ,1983 8(9):715-720.
- [6] Hoekstra R L Collier K Mulligan N et al. Experimental study of a clean burning vehicle fuel [J]. International Journal of Hydrogen Energy 1995 20(9):737 - 745.
- [7] Gu X J ,Haq M Z ,Lawes M ,et al. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane - air mixtures [J]. Combustion & Flame 2000 ,121(1):41 - 58.
- [8] Kwon O C Rozenchan G Law C K. Cellular instabilities and selfacceleration of outwardly propagating spherical flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute 2002 29(2):1775 - 1783.
- [9] 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.

(单丽华 编辑)

tion

当量比对掺氢天然气预混燃烧特性的影响 = Influence of the Equivalent Ratio on the Premixed Combustion Characteristics of Natural Gas Mixed and Diluted With Hydrogen [刊 汉]JIA Liang ,HE Feng ,LI Hui-lin , FAN Xing-guang (College of Mechanical Engineering ,Guizhou University ,Guiyang ,China ,Post Code: 550025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 30(5). -725 -729

In order to improve the combustion quality of natural gas mixed and diluted with hydrogen in an internal combustion engine and enhance the power and emission performance of a vehicle , by making use of the spheric flame schlieren images obtained from a constant volume combustion bomb high speed schlieren system in combination with the spheric flame propagation theory ,analyzed was the law governing the influence of the fuel/air equivalent ratio on the premixed combustion characteristics of natural gas mixed and diluted with hydrogen at various proportions of hydrogen mixed and diluted. It has been found that at a high proportion of hydrogen mixed and diluted ,a high equivalent ratio can force the unstretched laminar flow combustion rate to emerge a peak value and can heighten the combustion rate while a high proportion of hydrogen mixed and diluted can make the instability of the flame to be enhanced. A high equivalent ratio can contain the instability of the flame and enhance the stability of the flame and there exists a critical value of the equivalent ratio $\varphi = 1.0$ at which the combustion pressure is biggest and the time duration required for attaining the maximum combustion pressure is shortest. In addition , at a high proportion of hydrogen mixed and diluted , the maximum combustion pressure is comparatively big. **Key words**: natural gas hydrogen equivalent ratio stability constant volume combustion bomb

燃烧器配风方式对低热值煤层气燃烧影响数值模拟 = Numerical Study of the Influence of the Air Distribution Mode of a Burner on the Combustion of Coalbed Gas With a Low Heating Value [刊,汉]CHEN Yanrong ,LI Hao-jie ,YANG Zhong-qing (Education Ministry Key Laboratory on Low Grade Energy Utilization Technologies ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) ,FAN Hu (Chongqing Youshui Hydropower Development Co. Ltd. ,Chongqing ,China ,Post Code: 409809) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 30(5). - 730 - 735

Numerically simulated were various air distribution modes of a low heating value coalbed gas burner with a gas swir-