

液化石油气-氢气-空气层流燃烧特性的研究

陈万生, 王锡斌, 杨宁, 黄佐华, 汪大海, 蒋德明

(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: 研究了定容燃烧弹中不同过量空气系数(0.6~1.4)、掺氢比例(0~60%)和初始压力(0.081~0.124 MPa)下的液化石油气-氢气-空气混合气的层流燃烧现象,分析了过量空气系数、掺氢比例、初始压力等因素对规范化质量燃烧速率、燃烧持续期等层流燃烧特性参数的影响.研究表明:当过量空气系数在0.8~1.0范围内取值时,混合气的规范化质量燃烧速率和压力升高速率取最大值.随着初始压力的降低,规范化质量燃烧速率升高,燃烧持续期缩短,浓燃和稀燃更加明显;随着掺氢比例的增加,压力升高速率增加,混合气的规范化质量燃烧速率增加,燃烧持续期显著缩短,短的燃烧持续期所对应的过量空气系数范围变宽.

关键词: 液化石油气;氢气;层流燃烧

中图分类号: TK412 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1081-05

Study on Laminar Combustion Characteristics of Liquefied Petroleum Gas-Hydrogen-Air Mixtures

CHEN Wansheng, WANG Xibin, YANG Ning, HUANG Zuohua

WANG Dahai, JIANG Deming

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

Abstract: The laminar combustion characteristics of the liquefied petroleum gas-hydrogen-air mixture were studied in a constant volume combustion chamber under the excess air ratios from 0.6 to 1.4, the hydrogen volume fractions from 0 to 60% and the initial pressures from 0.081 to 0.124 MPa. Influences of the excess air ratio, the hydrogen fraction and the initial pressure on the combustion characteristics such as the normalized mass burning rate and the combustion duration were discussed. The results show that the mass burning rate and the peak value of the rate of pressure rise reach their maximum values at a specific excess air ratio from 0.8 to 1.0. With the decrease of the initial pressure, the normalized mass burning rate increases while the combustion duration decreases, especially for the rich and/or the lean mixtures. The rate of pressure rise and the normalized mass burning rate increase while the combustion duration decreases remarkably with the increase of hydrogen fraction. The short combustion duration over a wide range of the excess air ratio occurs with the increase the hydrogen fraction.

Keywords: liquefied petroleum gas; hydrogen; laminar combustion

21世纪汽车能源将进入一个多样化时期,新能源的开发利用,对能源结构调整、环境保护、实现长期可持续发展起到了积极的作用.液化石油气(LPG)的主要成分是丙烷和丁烷,另外还含有少量

的乙烯、丙烯和丁烯^[1].由于LPG抗爆震性能强,可适当增大发动机压缩比以提高发动机动力性、经济性,其燃烧温度低,NO_x生成量少,作为气体燃料容易与空气均匀混合,燃烧较完全,CO和HC的排放

量低,所以被认为是一种很有前途的汽油机代用燃料。目前,在LPG燃烧特性的基础研究中具有代表性的研究成果包括:廖世勇^[2]采用球形火焰法,在定容燃烧弹中测量了LPG的层流燃烧速率;Kohtaro^[3]在定容燃烧弹中对LPG添入了十六烷值改进剂,并测量了其着火滞后期,估算了十六烷值;Kweonha^[4]在定容燃烧弹中研究了LPG的喷雾和扩散火焰等。但是,到目前为止,国内还没有LPG-氢气混合燃料层流燃烧特性的研究报导。因此,本文采用基础燃烧研究中通用的定容燃烧装置,用可视化技术研究了LPG掺氢混合燃料的层流燃烧特性,分析了不同的初始条件对LPG掺氢混合燃料的层流燃烧特性的影响。

1 试验方法与装置

本试验系统如图1所示,其中包括4个部分:混合气配制系统、压力采集系统、纹影和高速摄像系统以及点火系统和控制电路。采用电感放电点火方式点燃混合气,同时同步采集燃烧弹中的压力,并利用高速摄像装置记录火焰发展的纹影情况。高速摄像机为美国REDLAKE公司生产的HG-100K,拍摄速度设定为5 000帧/s。

定容燃烧弹内腔是底面直径为130 mm、长为130 mm的圆柱体空腔,其容积为1.725 L。在试验中,将定容弹置于平台基座上,在其相对的2个圆柱底面安装石英玻璃,为火焰的纹影成像提供光学通道。在容弹的上表面安装气阀和压力传感器,在中心线上布置点火电极以实现空腔中心点火。

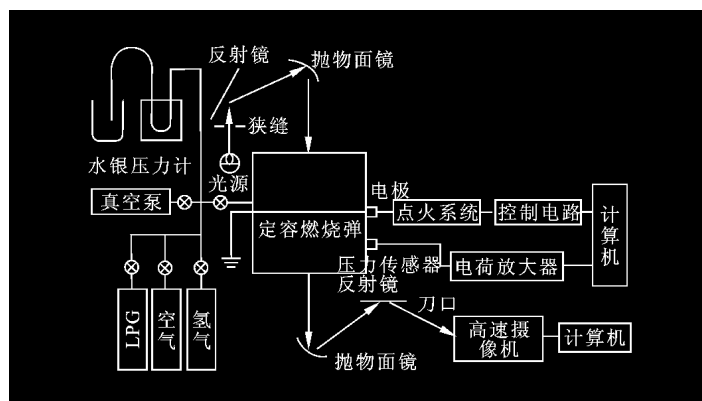


图1 试验系统示意图

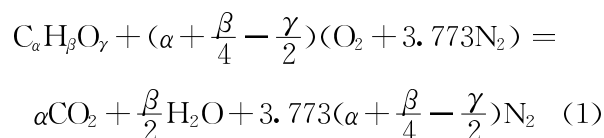
2 LPG-氢气-空气均匀混合气的配制

试验所用氢气纯度(质量分数)为99.995%,试验所用LPG产自兰州炼油厂,其主要成分见表1。

表1 试验用LPG成分

成分	体积分数/%
C ₂ H ₆	0.02
C ₃ H ₆	0.92
C ₃ H ₈	27.65
C ₄ H ₈	1.72
i-C ₄ H ₁₀	25.68
n-C ₄ H ₁₀	42.6
C ₅ H ₁₀	1.41

混合燃料由LPG和氢气按照一定的体积比例组成,掺氢比 $\varphi(\text{H}_2)$ 为混合燃料中氢气所占的体积分数。设混和燃料的分子式为C_aH_βO_γ,由表1中的LPG成分、掺氢比可得 α 、 β 、 γ ,则LPG掺氢的化学计量燃烧反应式为



那么1 mol燃料完全燃烧时所需的理论空气摩尔数为

$$L_0 = \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right)(1 + 3.773) \quad (2)$$

由Dalton分压定律可知,配制初始压力为 p_0 、过量空气系数为 ϕ_a (实际空气量与理论空气量的质量比)、掺氢比为 $\varphi(\text{H}_2)$ 的未燃混合气,三者的分压力分别为 $p_0(1 - \varphi(\text{H}_2))/(1 + L_0\phi_a)$ 、 $p_0\varphi(\text{H}_2)/(1 + L_0\phi_a)$ 、 $p_0L_0\phi_a/(1 + L_0\phi_a)$ 。

配制混合气时,首先将燃烧弹抽真空,然后分别将LPG、氢气和空气按计算所得分别注入。各组分气体的分压力由水银压力计确定,压缩空气由压气机制备。

3 试验结果与分析

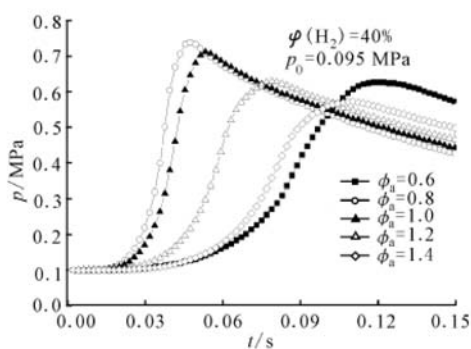
为反映层流燃烧特性,定义了如下参数:规范化质量燃烧速率(可简记为 r_{NMR})为已燃气质量 m_b 随时间的变化率与总可燃气质量 m 的比值,即 $\frac{1}{m} \frac{dm_b}{dt}$;

燃烧持续期(可记为 t_1)为从火花点火开始到已燃混合气质量达90%所经过的时间;火焰发展期(可记为 t_2)是从火花点火开始到已燃混合气质量达10%所经过的时间。本文根据测得的压力曲线,利用化学平衡分析法^[1]和准维双区模型^[5],计算得到已燃气质量,由此进一步得到以上3个参数,并分析了不同

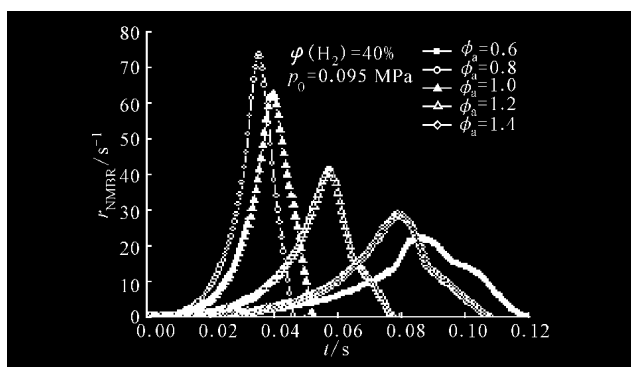
的初始条件对燃烧特性的影响。

3.1 过量空气系数对 LPG-氢气-空气混合气燃烧特性的影响

图2是初始压力为0.095 MPa、掺氢比为40%、不同过量空气系数下的压力曲线和规范化质量燃烧速率曲线。由图可见,过量空气系数在0.8~1.0范围内取值时,压力升高最快,达到的最大压力比其他过量空气系数对应的最大压力大,并且达到峰值压力时的时间也最短;浓混合气和稀混合气的压力升高速率、规范化质量燃烧速率都会减小。虽然过量空气系数在0.8~1.0范围内取值时,规范化质量燃烧速率和燃烧峰值压力达到了最大值,但当混合气继续加浓到过量空气系数为0.6时,规范化质量燃烧速率迅速下降,是图2的几个试验工况点中较低的。同时,过量空气系数为0.6时的峰值压力比稀燃情况下稍高。



(a)燃烧压力



(b)规范化质量燃烧速率

图2 不同过量空气系数下的燃烧压力和规范化质量燃烧速率

产生上述现象的主要因素有:①定容弹中峰值压力受放热速率和总放热量的综合影响;②定容弹内混合气的放热量取决于反应物,即浓混合气时取决于空气,稀混合气时取决于燃料;③定容弹体积一定,燃料与空气按照化学计量比燃烧时,空气与燃料

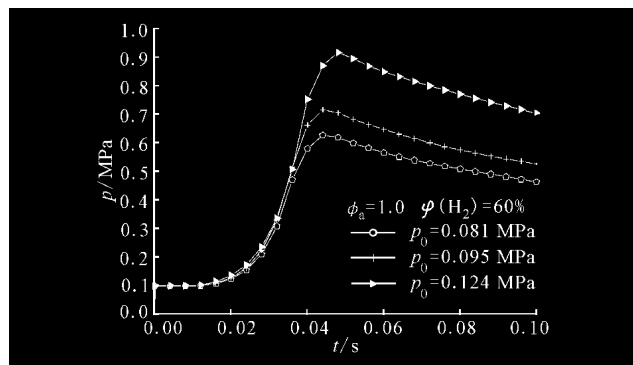
的体积比很大。燃料为氢气、丙烷、丁烷时,空燃体积比约为2.4:1、24:1、31.2:1。在试验工况范围内,随着过量空气系数的变化,空气的摩尔数基本不变,燃料的摩尔数随之而变。这样,当未燃气是浓混合气时,定容弹内空气量与按化学计量比燃烧时相比基本不变,而未燃气是稀混合气时,燃料则基本上与过量空气系数成比例地减小。因此,只有在按化学计量比燃烧时,总放热量才能达到最大值;当未燃混合气偏浓时,放热量缓慢减少;当未燃混合气偏稀时,则放热量随燃料量近似成比例地减少。一般认为,燃烧速率是未燃混合气稍浓时最快,未燃混合气过浓或过稀都会导致燃烧速率降低。由于过量空气系数为0.8和1.0时总放热量相差不大,此时放热速率起决定作用,导致过量空气系数为0.8时峰值压力稍大,且达到峰值压力的时刻也更早,而未燃混合气过稀时峰值压力降低,达到峰值压力的时间也更晚。当过量空气系数为0.6时,混合气过浓,此时已临近燃烧浓限,燃烧速率很低。同时,混合气过浓时多原子分子成分(燃料、CO₂和H₂O等)的增加会导致混合气的比热容增加,使混合气的温度升高、速度降低,燃烧速率的降低使达到峰值压力的时刻较晚,但由于总放热量只是略微下降,所以峰值压力比其他稀混合气时要高一些。

3.2 初始压力对 LPG-氢气-空气混合气燃烧特性的影响

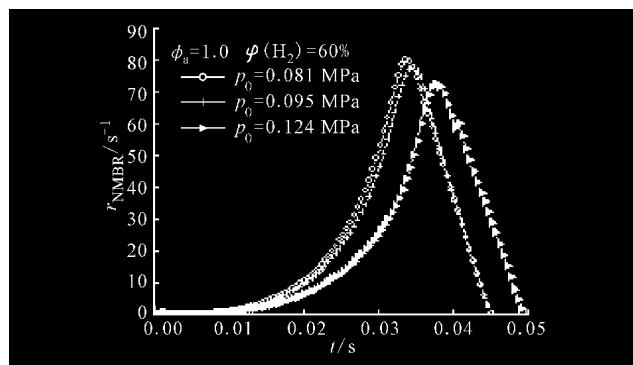
图3a、图3b为掺氢比为60%时不同初始压力条件下的燃烧压力和规范化质量燃烧速率曲线。可以看出:初始压力大,燃烧压力也大,到达最大压力所需的时间也更长;初始压力较小者对应的规范化质量燃烧速率大,火焰传播得更快。不同初始压力条件下的燃烧持续期和火焰发展期如图3c、图3d所示。由图可知,初始压力小,燃烧持续期、火焰发展期较短,在过量空气系数为1.2时,该趋势更加明显。

根据文献[6]知,燃烧过程中活性基浓度的峰值是随压力升高而下降的,表明燃烧速率可能随压力的升高而下降。另一方面,增加压力会增加绝热火焰温度和反应区的温度,这又将增加燃烧速率。在低速火焰中,第1个因素(活性基浓度峰值)起到主导作用;在高速火焰中,活性基浓度很高,压力变化对活性基浓度影响很小,这时第2个因素(热因素)起主导作用,燃烧速率随压力升高而增大。本文的试验是在定容燃烧弹中进行的,燃料是LPG掺氢气,属于低速火焰,故初始压力较大时燃烧速率小,火焰传播速率慢。

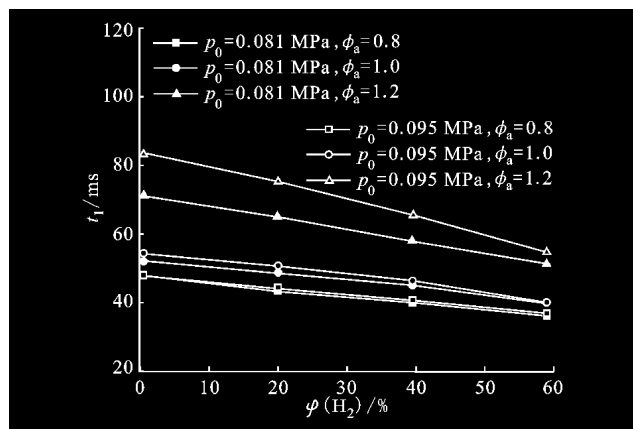
3.3 掺氢对 LPG-氢气-空气混合气燃烧特性的影响



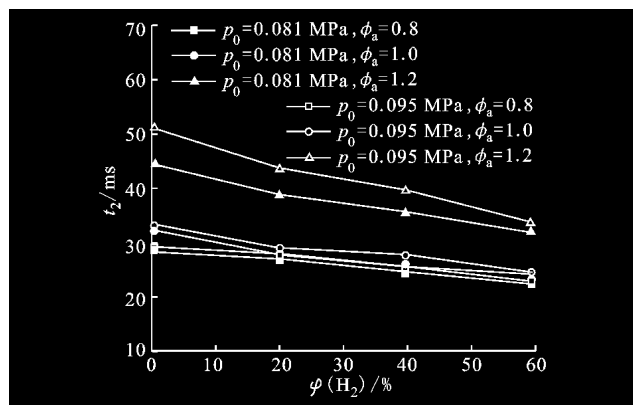
(a) 燃烧压力



(b) 规范化质量燃烧速率



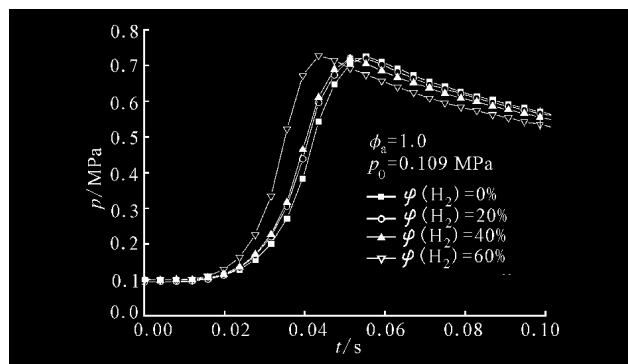
(c) 燃烧持续期



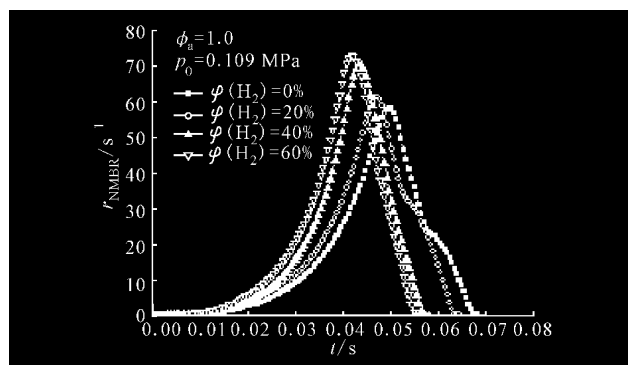
(d) 火焰发展期

图 3 不同初始压力条件下的混合气燃烧特性

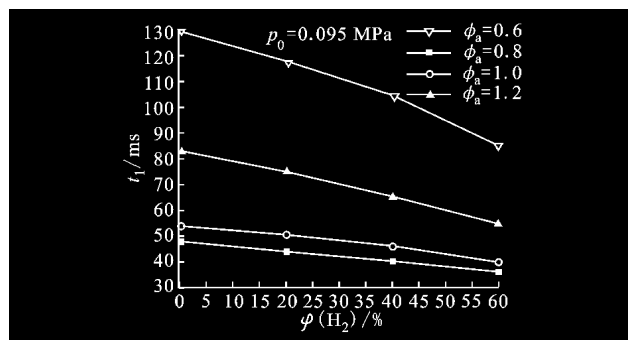
图 4a、图 4b 所示为按化学计量比配制的混合气, 初始压力为 0.109 MPa 时的压力曲线和规范化质量燃烧速率曲线。由图 4 可见, 随着掺氢比的增加, 压力升高速率增加, 到达最大压力的时间缩短,



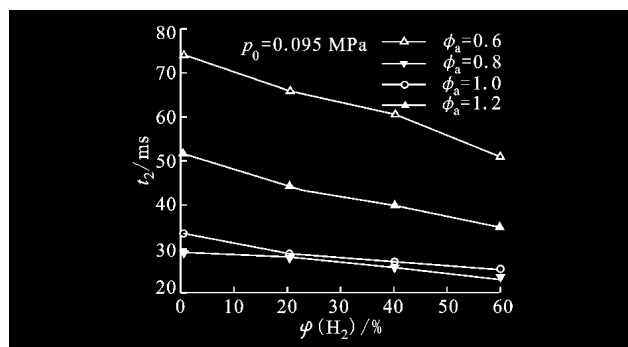
(a) 燃烧压力



(b) 规范化质量燃烧速率



(c) 燃烧持续期



(d) 火焰发展期

图 4 不同掺氢比下的混合气燃烧特性

但最大压力值并无明显变化. 掺氢后, 规范化质量燃烧速率增加, 这表明掺氢可以明显提高混合气的燃烧速率. 按化学计量比配制的混合气, 当初始压力为 0.109 MPa 时, 掺氢比增加, 燃烧速率加快; 当掺氢比超过 20% 以上时, 燃烧速率明显加快, 但考虑到氢气的体积热值很低, 放热速率将随掺氢比增加而下降. 因此, 掺氢比为 20% 左右时将可以获得最佳的燃烧速率和放热速率.

当初始压力为 0.095 MPa 时, 燃烧持续期、火焰发展期随掺氢比的变化趋势分别如图 4c、图 4d 所示. 在试验研究的范围内, 各种掺氢比下最短的燃烧持续期、最短的火焰发展期均出现在过量空气系数为 0.8 附近. 随掺氢比的增加, 燃烧持续期缩短, 在稀燃和浓燃情况下掺氢的影响更加显著, 可以加快燃料燃烧, 在一定程度上能够弥补由空燃比偏离引起的燃烧速率的降低. 同时, 火焰发展期也将缩短, 表明掺氢使燃料更易点燃. 随着掺氢比增加, 短的燃烧持续期对应的过量空气系数范围变宽. 因此, 若在发动机上应用 LPG 燃料时, 采用掺氢可以提高燃料的热效率, 并且在更宽广的空燃比范围内可以获得优良的燃烧特性.

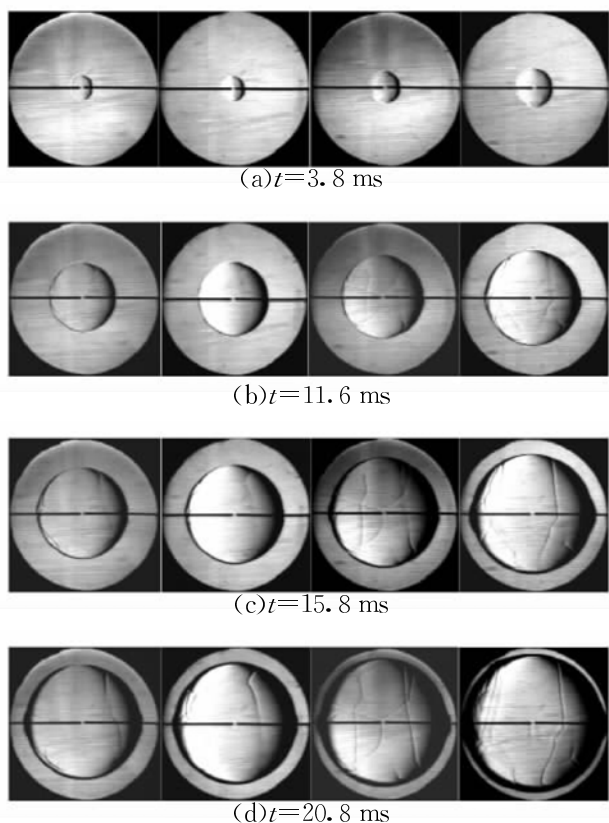


图5 火焰传播纹影照片

从前面的分析可知, 掺氢能够提高混合气的燃烧速率, 因而在相同的过量空气系数下, 燃烧速率的提高就体现在火焰传播的速度上. 图 5 直观形象地显示了掺氢对混合气燃烧速率的促进作用. 可以看出, 在同一时刻下, 掺氢比大的混合气已燃区的半径也比较大.

4 结 论

根据上述试验及分析, 可得出如下结论.

(1) 过量空气系数在 0.8~1.0 的范围内, 规范化质量燃烧速率取值较高, 燃烧过程中的峰值压力较大, 压力升高速率较快.

(2) 在同一过量空气系数、掺氢比及初始压力较大的情况下, 规范化质量燃烧速率较小、燃烧持续期和火焰发展期较长, 当混合气过浓或过稀时更加明显.

(3) 掺氢能明显提高混合气燃烧速率, 缩短燃烧持续期和火焰发展期, 当混合气过浓或过稀时更加明显. 随着掺氢比的增加, 短的燃烧持续期对应的过量空气系数范围变宽.

参考文献:

- [1] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 10-11.
- [2] 廖世勇. 内燃机替代燃料预混燃烧基础研究 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2005: 35-45.
- [3] KOHTARO H. Evaluation of ignition quality of LPG with cetane number improver: SAE paper, 010870. [R]. Washington, USA: SAE Inc, 2002.
- [4] KWEONHA P. The flame behaviour of liquefied petroleum gas spray impinging on a flat plate in a constant volume combustion chamber [J]. Journal of Automobile Engineering, 2005, 219(5): 655-663.
- [5] HUANG Zuohua, ZHANG Yong, ZENG Ke, et al. Natural gas-hydrogen-air premixed mixture combustion with a constant volume bomb [J]. Energy & Fuels, 2007, 21(2): 692-698.
- [6] 蒋德明, 陈长佑, 杨嘉林. 高等车用内燃机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 40-42.

(编辑 王焕雪)