

氢内燃机怠速性能试验研究

何义团^{1,2}, 马凡华², 邓 蛟², NAEVE Nashay²

(1. 重庆交通大学 机电与汽车工程学院, 重庆 400074;

2. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 为研究氢内燃机的怠速特性, 在一台 6 缸氢内燃机上研究了过量空气系数 λ 与点火提前角 θ_i 对发动机主要性能参数的影响. 结果表明: 随着 λ 的增大, 最大指示热效率 η_i 所对应的 θ_i 逐步增加, η_i 随之增加, NO_x 排放随之减小; 同一 λ 条件下, NO_x 排放随着 θ_i 增大而增加; 氢内燃机怠速时可采用 $\lambda > 2.5$ 的稀混合气, 且应适当增大 Q_i ; 最大缸压随着 λ 增加而降低、随着 θ_i 增大而上升; 不同 λ 值条件下最大压力升高率的规律基本相似, 只是在 $\lambda = 2.5$ 、 $\theta_i < 10^\circ\text{CA}$ 时, 最大压力升高率基本保持不变.

关键词: 氢内燃机; 怠速特性; 过量空气系数; 点火提前角

中图分类号: TK 46 + 4

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2012)10 - 1560 - 05

Idle Characteristics of a Hydrogen Fueled SI Engine

HE Yi-tuan^{1,2}, MA Fan-hua², DENG Jiao², NAEVE Nashay²

(1. School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper investigates the effect of the excess air ratio λ and ignition advance angle θ_i on idle characteristics of a turbocharged hydrogen fueled SI engine. The experimental data are conducted under various operating conditions including different λ and θ_i . It is found that the ignition advance angle at MBT point gradually increases with increasing excess air ratio from 1.1 to 2.5. The indicated thermal efficiency increases as λ increases. NO_x emission decreases as λ increases. When λ is kept constant, NO_x emission increases as θ_i increases. During idle conditions of a hydrogen fueled engine, a lean mixture with a λ more than 2.5 is suitable, and θ_i should increase appropriately. The maximum cylinder pressure increases with an increase of λ and θ_i . The trend of the maximum rate of pressure rise is similar at different λ . Only under the conditions of $\lambda = 2.5$ and $\theta_i < 10^\circ\text{CA}$, the maximum pressure rise rate remains almost unchanged.

Key words: hydrogen engine; idle characteristics; excess air ratio; ignition advance angle

氢能以其清洁、高效、可再生等特点, 被认为是最有潜力的车用替代能源. 怠速是发动机最重要的工况之一, 怠速性能对发动机燃油经济性、排放特性以及整车的乘坐舒适性和操控性有很大的影响. 国内外学者在该领域做了大量的研究工作, 但主要集

中在天然气掺氢 (hydrogen-enriched compressed natural gas, HCNG) 或汽油加氢的怠速研究. 马凡华等^[1-3]的研究表明, 天然气掺氢后, 有利于改善怠速燃烧, 从而增加怠速稳定性. Ji 等^[4-5]研究了汽油掺氢后发动机的怠速性能, 其研究表明, 怠速

收稿日期: 2010-11-02.

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(2010BB4264); 重庆市交通运输工程重点实验室基金资助项目(2011CQJY003).

作者简介: 何义团(1977—), 男, 副教授, 在站博士后, 主要从事代用燃料发动机方面的研究, E-mail: heyituan@163.com.

时,汽油掺氢后,发动机的指示热效率 η_i 比原汽油机的高,随着掺氢比的增加,燃烧速度加快,循环变动减小,且 CO 、 HC 和 NO_x 的排放都比原机降低。

Hu 等^[6] 在高温高压条件下研究了氢气-空气混合气的层流燃烧速度,结果表明,随着当量比逐渐增加(混合气由稀到浓),层流燃烧速度先增加后减小,最大层流燃烧速度出现在当量比为 1.8 的时候。层流燃烧速度随初始温度的增加而升高,随着初始压力的增加而降低。Hu 等利用球形发展火焰研究了常温常压下不同燃空当量比(0.4~4.5)、稀释气(N_2 、 CO_2 和 15% CO_2 + 85% N_2) 和稀释度(0、0.05、0.10 和 0.15)时氢气-空气-稀释气混合气的预混层流燃烧速度和马克斯坦长度,分析了火焰拉伸对火焰传播速度的影响。研究结果表明:氢气-空气-稀释气混合气的层流燃烧速度随稀释度的增大而减小,火焰稳定性下降;在同一稀释度下,层流燃烧速度在当量比为 1.8 处达最大值^[7]。

本文通过分析不同过量空气系数、点火提前角对氢内燃机燃烧排放特性的影响,得出过量空气系数和点火提前角对发动机怠速性能的影响规律。

1 试验方案及数据处理

试验机为 EQD210-20 单点电喷直列水冷四冲程天然气发动机,采用进气道喷射,进气方式为增压中冷,气缸数×缸径×行程为 6×105×120,活塞总排量为 6.234 L,压缩比为 10:1,额定功率/转速为 154 kW/2 800 r/min,最大扭矩/转速为 620 N·m/1 600 r/min。

原发动机怠速转速为 800 r/min。试验工况为发动机节气门全关,发动机无转矩输出。采用闭环控制,当发动机转速随着点火提前角和过量空气系数变化时,步进电机自动调整步数,将发动机转速控制在 800 r/min。过量空气系数 λ 分别为 1.1、1.4、1.7、2.0、2.5,点火提前角 θ_i 为压缩上止点前 0°~20°CA,间隔为 2°CA。

对采集的上止点信号用 Stas^[8] 提出的热力学方法进行修正,缸压信号每隔 1°CA 采集 1 次。试验各个工况的示功图由在该工况下连续采集 136 个循环的示功图进行平均处理后得到。再由示功图计算出循环指示功、放热率及循环变动的数据。其中放热率的计算采用改进的 R-W 方法^[9]。

2 试验结果与分析

2.1 η_i

从图 1 可看出,固定 θ_i ,随着 λ 增大, η_i 增加。

而针对每个固定的 λ ,随着 θ_i 减小, η_i 先增大后减小。本次试验中,当 λ 分别为 1.1、1.4、1.7、2.0、2.5 时,每条试验曲线最大 η_i 对应的 θ_i 分别为 4、6、6、14、18°CA BTDC。

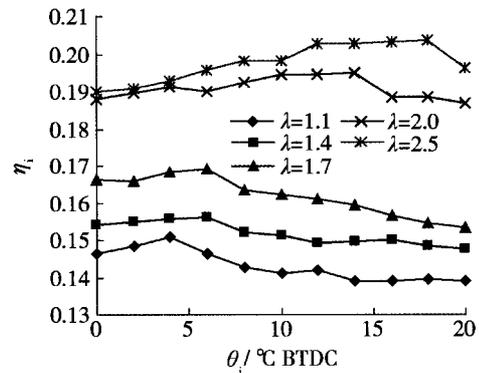


图1 η_i 与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 1 η_i versus θ_i for different λ

随着 λ 增大,最大 η_i 所对应的 θ_i 逐步增大,这是因为稀混合气使燃烧速度变慢,为了提高 η_i ,则需适当加大点火提前角。从图 1 可知, $\lambda = 2.5$ 时的 η_i 远高于 $\lambda = 1.1$ 时的 η_i ,这是因为稀燃时,缸内温度低,热损失相对较小。Shudo 等^[10] 的研究表明,在 $\lambda = 2.5$ 时,通过缸壁产生的传热损失占总放热的 25%,而 $\lambda = 1$ 时,这种传热损失达 45%。可见,发动机以氢气为燃料时,可采用尽可能稀的混合气,减少传热损失,提高 η_i 。

2.2 燃料消耗量

从图 2 可看出,由于氢气稀燃能力强,燃烧速度快,随着 λ 增大,燃料消耗量逐渐减低,当 $\lambda > 2.5$ 时,燃料消耗量仍有下降趋势。当混合气较稀($\lambda > 1.7$)时,由于燃烧速度降低,点火提前角较小,后燃增加,为了稳定发动机转速,因此燃料消耗增加。

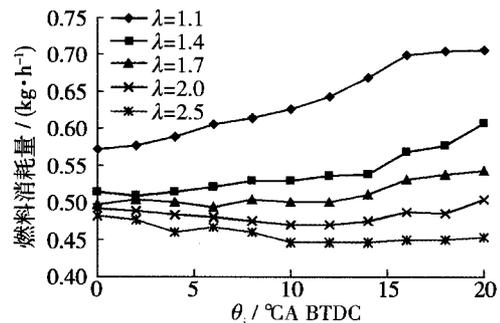


图2 燃料消耗量与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 2 Fuel consumption versus θ_i for different λ

2.3 NO_x 排放

NO_x 为燃氢发动机最大的污染排放物。图 3 是

NO_x 与 λ 和 θ_i 的关系. 相同 λ 条件下, NO_x 排放随 θ_i 增加而增大. 当 $\lambda < 1.7$ 时,随着 θ_i 增大, NO_x 排放急剧上升. 当 $\lambda = 2.5$ 和 2.0 时, NO_x 排放值很低,其中 $\lambda = 2.5$ 时,基本不产生 NO_x ,低于 5×10^{-6} .

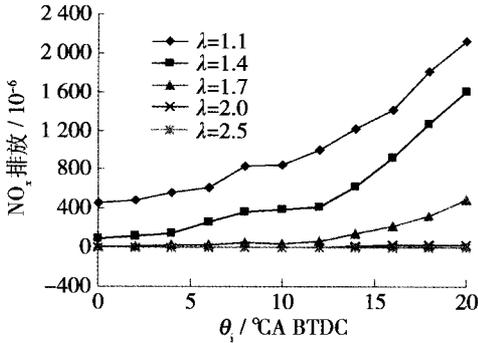


图3 NO_x 与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 3 NO_x emission versus θ_i for different λ

该试验现象与 White 等^[11]的结论较为吻合. 他们提出,由于 NO_x 在 $\lambda \leq 2.0$ 时快速增大,要实现超低排放,氢内燃机的 λ 应控制在 2.0 以上. 刘福水等^[12]提出,在启动、怠速及小负荷阶段供给内燃机较稀薄的混合气,以获得最低的 NO_x 排放特性和最高的热效率,最低混合气浓度可控制在 $0.2 \sim 0.3$ 倍当量浓度范围内,通过增大节气门开度来调节功率输出,直至节气门全开. 本试验为怠速工况,如果混合气过稀,则在节气门全关条件下,发动机做功过低,不足以维持发动机稳定运转.

2.4 平均指示压力循环变动

图4为平均指示压力循环变动(CoV_{imep})与 λ 和 θ_i 的关系. 从图4可看出,当 $\lambda \leq 2.0$ 时,循环变动很小,均在3%左右,只有在 $\lambda = 2.0$ 且 $\theta_i \leq 4^\circ\text{CA}$ 时,循环变动才上升,但也低于5%. $\lambda = 2.5$ 时循环变动明显上升,且随 θ_i 减小逐渐增加. 说明发动机

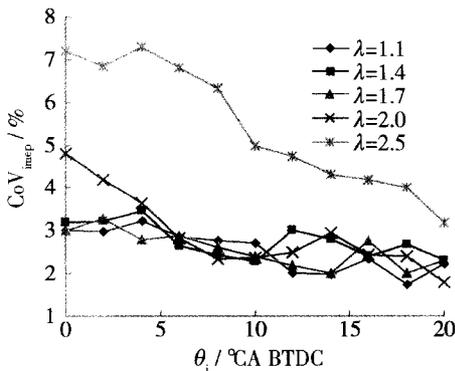


图4 平均指示压力循环变动与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 4 CoV_{imep} versus θ_i for different λ

燃烧氢气,混合气的 λ 达 2.5 左右时,才对发动机燃烧产生一定的影响. 且当 $\theta_i > 10^\circ\text{CA}$ 时,即使 λ 高达 2.5 ,循环变动也低于5%,说明发动机燃烧纯氢时,可采用 $\lambda \geq 2.5$ 的稀混合气,且适当增大 θ_i ,对发动机经济性、排放性均十分有利.

2.5 燃烧放热规律率

图5和6为 λ 对瞬时放热率的影响. 由图可看出,随着 λ 的增加,瞬时放热率越来越低,且瞬时放热率峰值所对应的曲轴转角逐渐远离上止点. 对比 $\theta_i = 10^\circ\text{CA}$ 和 $\theta_i = 0^\circ\text{CA}$,当 $\theta_i = 10^\circ\text{CA}$ 、 $\lambda = 1.1$ 时,由于混合气较浓,燃烧速度快,大部分放热集中在压缩上止点前,压缩负功大幅度增加,导致热效率低. 而当 $\theta_i = 0^\circ\text{CA}$ 时,主要放热过程发生在活塞下行过程中,同样会降低热效率. 因此,对于较浓混合气,应适当减小 θ_i ,而对于较稀混合气,则应增大 θ_i .

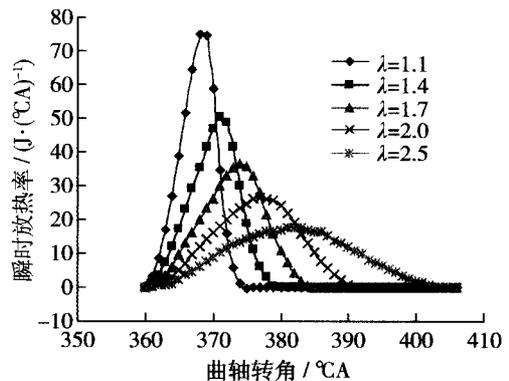


图5 瞬时放热率与 λ 的关系($\theta_i = 0^\circ\text{CA}$ BTDC)

Fig. 5 Heat release rate versus λ ($\theta_i = 0^\circ\text{CA}$ BTDC)

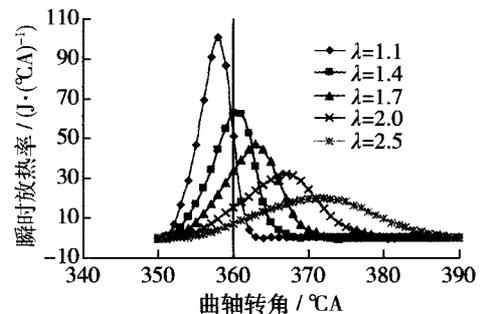


图6 瞬时放热率与 λ 的关系($\theta_i = 10^\circ\text{CA}$ BTDC)

Fig. 6 Heat release rate versus λ ($\theta_i = 10^\circ\text{CA}$ BTDC)

2.6 火焰发展期和快速燃烧期

本文定义火焰发展期为从发动机开始点火到累积放热量10%所持续的曲轴转角,快速燃烧期定义为累积放热量10%~90%所持续的曲轴转角.

图7为火焰发展期与 λ 之间的关系. 随着 λ 的

逐渐增大, 火焰发展期逐渐增大, 这说明稀混合气不利于火核形成和快速发展^[9]. 而且随着 θ_i 减小, 火焰发展期时间缩短, 这是因为 θ_i 越靠近上止点, 缸内的温度压力越大, 越有助于火焰传播. 还可看出, 在相同 λ 条件下, 当 $\theta_i \leq 8^\circ\text{CA}$, 火焰发展期维持不变.

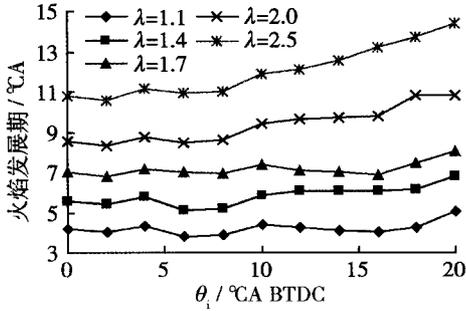


图 7 火焰发展期与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 7 Flame development angle versus θ_i for different λ

图 8 为快速燃烧期与 λ 之间的关系. 随着 λ 的增加, 混合气浓度降低, 燃烧速度下降, 快速燃烧期增加. 随着 θ_i 的增大, 经过火焰发展期之后, 快速燃烧期越接近上止点, 所对应的温度和压力越高, 燃烧持续时间就越短.

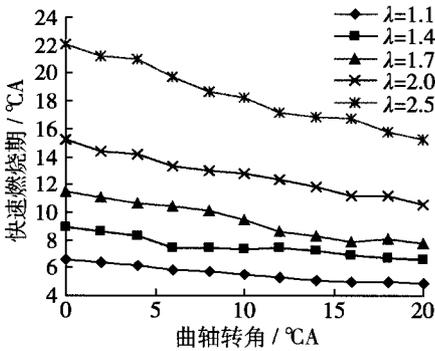


图 8 快速燃烧期与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 8 Rapid combustion period versus θ_i for different λ

2.7 缸压曲线

图 9 和 10 分别为 $\theta_i = 10$ 和 0°CA 条件下的缸压与 λ 的关系. 随着 λ 的增加, 气缸最大压力逐渐降低, 且气缸最大压力对应的曲轴转角逐渐远离上止点. 这是因为 λ 越大, 混合气越稀, 燃烧速度越慢. 对比 $\theta_i = 10$ 和 0°CA 的缸压曲线, $\theta_i = 0^\circ\text{CA}$ 时, 所有 λ 所对应的缸压曲线均出现双峰, 这是因为 θ_i 太小, 前一个为压缩峰值, 而后一个为燃烧峰值. 在压缩阶段, λ 越大, 则缸压越大, 这是因为此时缸内是稀混合气, 为了维持发动机恒定转速, 步进电机开度增大, 进气量增大, 故压缩时压力会增大. 而燃烧

开始后, 混合气越稀, 燃烧放热量速度越慢, 缸压也越小.

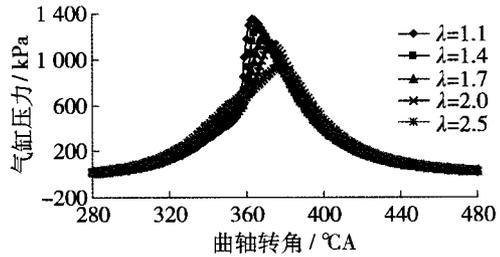


图 9 气缸压力与 λ 的关系 ($\theta_i = 10^\circ\text{CA BTDC}$)

Fig. 9 Cylinder pressures versus λ ($\theta_i = 10^\circ\text{CA BTDC}$)

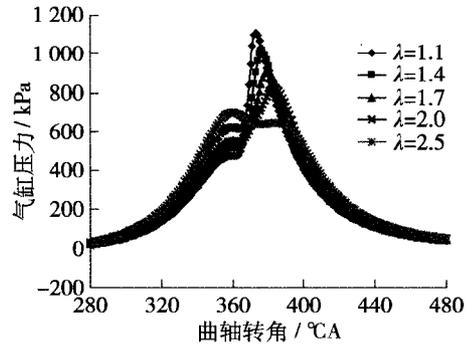


图 10 气缸压力与 λ 的关系 ($\theta_i = 0^\circ\text{CA BTDC}$)

Fig. 10 Cylinder pressures versus λ ($\theta_i = 0^\circ\text{CA BTDC}$)

2.8 最大压力与最大压升率

图 11 和 12 分别为最大缸压、最大压升率与 λ 和 θ_i 的关系. 最大缸压随 λ 的增加而下降、随 θ_i 的增大而上升. θ_i 越大, 燃料在上止点前燃烧的比例越大, 缸内温度和压力也就越高. 不同 λ 值条件下最大压升率的规律基本相似, 只是在 $\lambda = 2.5$ 、 $\theta_i < 10^\circ\text{CA}$ 时, 最大压升率基本保持不变. 主要因为, 在此 λ 条件下, 混合气很稀, 而 θ_i 又很小, 活塞达上止点前, 燃料燃烧很少, 大部分燃料燃烧拖后, 最大压

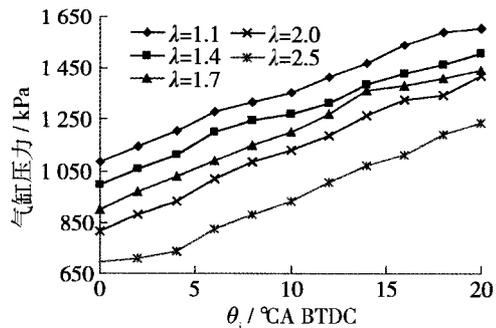


图 11 最大缸压与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 11 Maximum pressure versus θ_i for different λ

升率出现在压缩过程,而不是燃烧过程.从图10中 $\lambda = 2.5$ 所对应的缸压曲线能明显看出这样的规律.

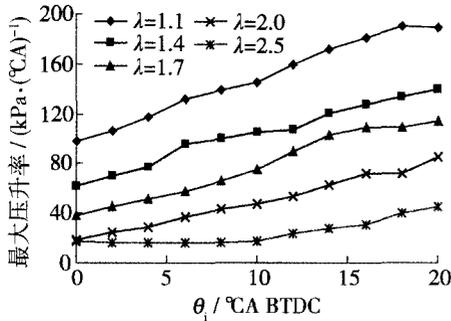


图12 最大压升率与 λ 和 θ_i 的关系

Fig. 12 Maximum pressure rise rate versus θ_i for different λ

3 结论

1) η_i 随着 λ 增大而增大;随着 λ 增大,最大 η_i 所对应的 θ_i 逐步增加.

2) NO_x 排放随着 λ 增大而减小;同一 λ 条件下,排放随着 θ_i 增大而增加,当混合气较浓($\lambda \leq 1.4$)时,排放随 θ_i 增大急剧上升; $\lambda \geq 2.0$ 时,可实现超低排放,且 η_i 较高.

3) $\lambda \geq 2.0$ 时,平均指示压力循环变动才会明显上升,且随着 θ_i 减小逐渐增加;缸内燃机怠速时可采用 $\lambda \geq 2.5$ 的稀混合气,且应适当增大点火提前角.

4) 最大缸压随着 λ 增加而下降、随着 θ_i 增大而上升;不同 λ 条件下最大压升率的规律基本相似,但在 $\lambda = 2.5$ 、 $\theta_i \leq 10^\circ\text{CA}$ 时,最大压升率出现在压缩过程,其值基本保持不变.

5) 综合考虑气耗、排放以及循环变动等,本次试验发动机怠速的最佳工况为 $\lambda = 2.5$ 、 $\theta_i = 18^\circ\text{CA}$,此时发动机 η_i 超过20%, NO_x 排放低于 5×10^{-6} .

参考文献:

[1] MA F H, DING S F, WANG Y F, et al. Performance and emission characteristics of a spark-ignition (SI) hydrogen-enriched compressed natural gas (HCNG) engine under various operating conditions including idle conditions [J]. Energy & Fuels, 2009, 23 (6): 3113-3118.

[2] 马凡华, 汪俊君, 程伟, 等. 不同掺氢比的HCNG燃料对天然气发动机怠速性能的影响[J]. 内燃机学报, 2008, 26(4): 296-301.

MA Fan-hua, WANG Jun-jun, CHENG Wei, et al. Influence of hydrogen ratio on idle performance of natural gas-hydrogen fuelled engine [J]. Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2008, 26 (4): 296-301.

(in Chinese)

[3] MA F H, WANG J J, WANG Y, et al. Influence of different volume percent hydrogen/natural gas mixtures on idle performance of a CNG engine [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(3): 1880-1887.

[4] JI C W, WANG S F. Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition [J]. Internal Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(8): 3546-3556.

[5] JI C W, WANG S F. Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at idle and lean conditions [J]. Internal Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(2): 346-355.

[6] HU E J, HUANG Z H, HE J J, et al. Experimental and numerical study on laminar burning velocities and flame instabilities of hydrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures [J]. Internal Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34: 8741-55.

[7] 胡二江, 何佳佳, 黄佐华, 等. 氢气-空气-稀释气混合气层流燃烧速度的测定和火焰稳定性分析[J]. 科学通报, 2008, 53(20): 2514-2525.

HU Er-jiang, HE Jia-jia, HUANG Zuo-hua, et al. Measurements of laminar burning velocities and flame stability analysis for hydrogen-air-diluent mixtures [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (20): 2514-2525. (in Chinese)

[8] STAS M J. A universally applicable thermo dynamic method for TDC determination[C]//SAE Paper, 2000-01-0561.

[9] AVARZMAN M B. Investigation of completeness of combustion in CNG fuelled spark ignition engines [D]. Windsor: University of Windsor, 2000.

[10] SHUDO T, NABETANI S, NAKAJIMA Y. Analysis of the degree of constant volume and cooling loss in a spark ignition engine fuelled with hydrogen [J]. Internal Journal of Engine Research, 2001, 2: 81-92.

[11] WHITE C M, STEEPER R R, LUTZ A E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review [J]. Internal Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31: 1292-1305.

[12] 刘福水, 郝利君, HEITZ P B. 氢燃料内燃机技术现状与发展展望[J]. 汽车工程, 2006, 28(7): 621-625.

LIU Fu-shui, HAO Li-jun, HEITZ P B. Technical status and development prospect of hydrogen IC engine [J]. Automotive Engineering, 2006, 28 (7): 621-625. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)