

研究报告

汽油机燃用轻油基燃料的缸内过程参数分析

孙玲玲

(山东工业大学机械工程学院, 济南 250061)

[摘要] 介绍作者开发的一种汽油机用新型燃料, 为检验其品质, 对发动机缸内过程参数进行了全面测试分析。结果表明: 汽油机燃用轻油基混合燃料时无爆震, 动力性稍低于燃用汽油, 缸内过程参数标准偏差明显低于燃用汽油。这充分说明, 所开发的轻油基混合燃料品质优良, 适于汽油机使用。

[关键词] 轻油; 汽油机; 缸内过程参数; 抗爆性

主要符号说明

p_{li} — m 个连续循环低压部分(进气、排气行程)平均指示压力的平均值, 即

$$p_{li} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_{lij}$$

p_{lij} —第 j 个循环的低压部分平均指示压力

p_{hi} — m 个连续循环高压部分(压缩、膨胀行程)平均指示压力的平均值

p_{ij} —第 j 个循环的平均指示压力, 即

$$p_{ij} = p_{hij} - p_{lij}$$

p_i — m 个连续循环平均指示压力的平均值, 即

$$p_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \text{ 或 } p_i = p_{hi} - p_{li}$$

p_z — m 个连续循环最高燃烧压力的平均值

$\frac{dp}{d\varphi}|_{\max}$ — m 个连续循环最大压力升高率的平均值

φ_z — m 个连续循环最高燃烧压力出现位置的平均值

$\alpha \frac{dp}{d\varphi}|_{\max}$ — m 个连续循环最大压力升高率出现位置的均值

σ —标准偏差

σ_{pi} —平均指示压力的标准偏差, 即

$$\sigma_{pi} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (p_{ij} - p_i)^2}$$

σ_{pz} —最高燃烧压力的标准偏差

$\sigma \frac{dp}{d\varphi}|_{\max}$ —最大压力升高率的标准偏差

σ_{φ_z} —最高燃烧压力出现位置的标准偏差

$\sigma \alpha \frac{dp}{d\varphi}|_{\max}$ —最大压力升高率出现位置的标准偏差

1 引言

轻油是一种石化产品, 主要来源是: a. 油田生产中油气分离过程得到的凝析油, 约为原油产量的2%, 我国年产原油约130 Mt, 凝析油产量约2.6 Mt; 气田开采的天然气中凝析油约占0.03%^[1], 我国天然气年产量约 $230 \times 10^8 \text{ m}^3$, 可得凝析油约0.4 Mt。b. 炼油厂原油分馏、裂化、分子重整所得化工轻油约8.65 Mt。c. 石化工业用天然气合成乙烯时的伴生轻油馏分约0.1 Mt。以上合计年产11.75 Mt的轻油具有很大的开发利用价值。目前轻油主要作为石化原料, 属长线产品, 与汽油相比, 有500~700元/t的差价, 如能将其中的1 Mt开发为汽车燃料, 每年可获得5~7亿元的经济效益。

轻油的物化特性与车用70号汽油相近, 但辛烷值低(马达法辛烷值为65~70), 蒸气压高(约100 kPa), 不能直接作汽油机燃料。为提高轻油利用价值, 经过对多种常用和专门开发的调和剂的研究分析, 确定以甲醇、酚溶剂油以及甲基叔丁基醚(MTBE)作为轻油高辛烷值调合剂, 通过分析测试确定了轻油基混合燃料组成和配比, 其组成及主要理化性质如表1所示。

[收稿日期] 2000-06-26; 修回日期 2000-08-21

[作者简介] 孙玲玲(1967-), 女, 山东威海市人, 山东工业大学机械工程学院讲师, 硕士

表 1 混合燃料的组成 (体积) 及主要理化性质

Table 1 Composition and the principal property of the light oil-based fuel

燃料编号	0	2	3	4
轻油/(V/V)	0	70	50	60
甲醇/(V/V)	0	15	0	10
酚溶剂油/(V/V)	0	0	50	30
MTBE/(V/V)	0	15	0	0
汽油/(V/V)	100	0	0	0
相对密度/ d_{4}^{20}	0.735	0.693	0.812	0.75
质量低热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	43.932	37.17	40.41	38.67
体积低热值/ $\text{MJ}\cdot\text{L}^{-1}$	32.29	26.13	32.81	29.00
理论混合气热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.948	2.671	2.936	2.838
混合气稀释度/ $\Delta\alpha$	0	0.128 9	0.139 8	0.149 4
辛烷值/MON	76	77.2	85.0	81.0

由表 1 可知：与 70 号汽油相比，轻油基混合燃料辛烷值较高，使发动机可采用较高压缩比稳定工作，但在发动机供油系统等不作相应调整的前提下，由于 2、4 号混合燃料体积低热值较低，将使发动机动力性低于燃用汽油，同时，由于轻油基混合燃料中甲醇、酚溶剂油和 MTBE 均属含氧调和剂，使轻油基混合燃料-空气混合气相对于燃用汽油时变稀，其稀释程度取决于混合燃料中氧含量，通常以过量空气系数的增加量 $\Delta\alpha$ 表示^[2]：

$$\Delta\alpha = [l_0 / (l_{01}X_1 + l_{02}X_2 + \dots + l_{0n}X_n) - 1] \times 100\%$$

式中 l_0 —汽油的理论空燃比，kg 空气/kg 燃料

l_{0n} —混合燃料各组分理论空燃比，kg 空气/kg 燃料

X_n —混合燃料各组分比例，% (V)

由表 1 可知：轻油基混合燃料-空气混合气稀释度大，若发动机点火、供油系统等不作相应调整，必将影响发动机性能。

本文通过对燃用轻油基混合燃料及汽油的汽油机缸内过程参数的测试分析，弄清轻油基燃料品质变化对发动机性能的影响及其作用机理，对进一步改善轻油基混合燃料发动机性能具有重要意义。

2 缸内过程参数的测量

缸内过程参数的测量采用图 1 所示的测试系统。试验机型为 CA10C 汽化器式发动机，压缩比

$\epsilon = 6.4$ ，缸径为 101.6 mm，行程为 114.3 mm，测试气缸为发动机第 6 缸。为便于分析比较，燃用轻油基混合燃料时发动机供油、点火系统等不作任何调整。

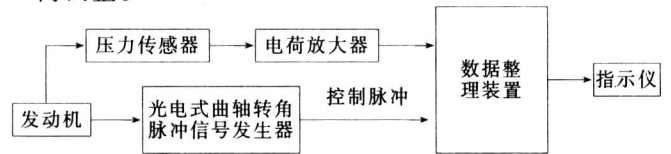


图 1 缸内过程参数测试系统示意图

Fig. 1 The system for testing process parameter in cylinder

测试系统采用南通测试仪器厂、江苏工学院及奥地利柯姆公司合作生产的 JY-Pi-4 型平均指示压力测定仪。这种电子式测定仪在连续测录 m 个循环 (本文取 $m = 2^6$) 的示功图后，自动进行统计分析，求出缸内过程参数的算术平均值与循环变动的标准偏差。与其他测量仪器相比，该仪器输入量较多，对输入量的精度要求高，容易受输入误差影响。为此，试验前对上止点位置进行精确标定，并对高压导线及传感器连接导线等进行屏蔽保护，以避免或减小由于上止点位置误差和测量仪器的漂移及噪声信号的混入而影响测量精度。

3 试验结果分析

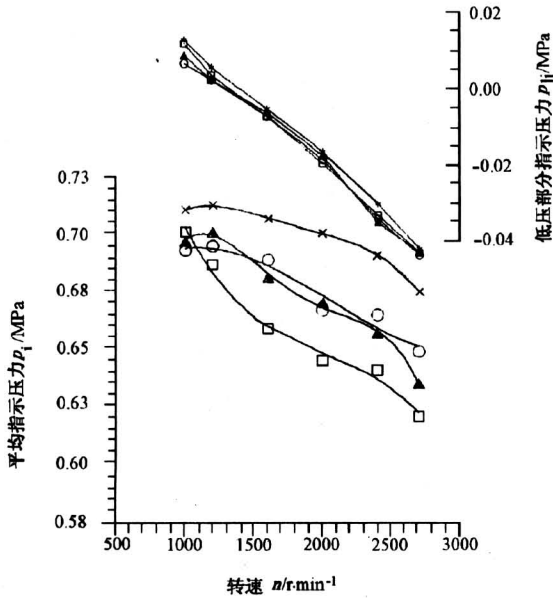
3.1 平均指示压力

平均指示压力是从实际循环的角度来评价发动机动力性的重要指标。对于四冲程活塞式发动机，平均指示压力 p_{li} 等于低压部分指示压力与高压部分指示压力的代数和^[3]。由图 2 可知：

1) 相同工况，发动机燃用轻油基混合燃料时低压部分指示压力稍低于燃用汽油。一方面，由于混合燃料中甲醇、轻油等汽化潜热较汽油高，使混合燃料在汽化过程中吸收大量热量，降低了混合气温度及压力，减少了充气过程功；另一方面，在发动机供油及点火时刻不作相应调整的前提下，由于轻油基混合燃料的稀释效应及着火温度高等原因造成燃烧滞后，使排气阀开启时气缸压力增大，增加了泵气损失，因而发动机燃用轻油基混合燃料时 p_{li} 低于燃用汽油。

2) 由 $p_{li}-n$ 曲线可看出：随转速提高， $p_{li}-n$ 曲线近似于线性变化，且当转速 $n \leq 1400$ r/min 时， p_{li} 为正值。这是由于转速降低后，进、排气节

流损失减小, 消耗的指示功减小。而转速较低时, 进、排气管内气体动力效应改善了换气过程, 使 $p_{li} > 0$ 。



×—0号燃料 □—2号燃料 ○—3号燃料 ▲—4号燃料
图2 发动机外特性缸内过程参数变化 ($\epsilon = 6.4$)

Fig.2 Comparison of p_{li} and p_i of different fuels at different speeds ($\epsilon = 6.4$)

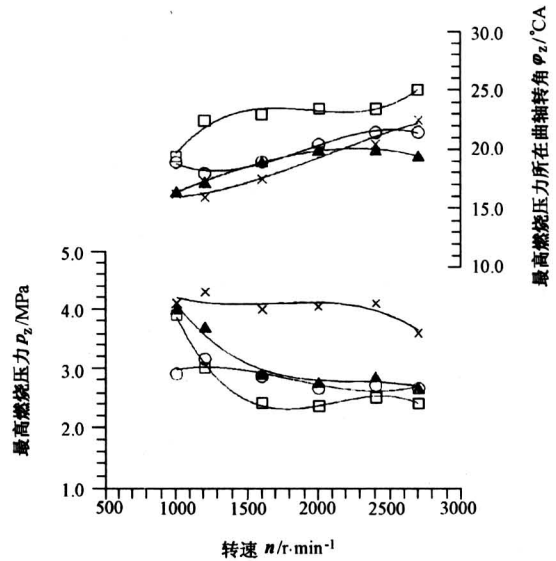
3) 由于相同工况下发动机燃用轻油基混合燃料时 p_{li} 与燃用汽油相当, 故 $p_i - n$ 曲线变化趋势和幅度与 $p_{li} - n$ 曲线一致, 本文取 $p_i - n$ 曲线进行分析。在相同工况, 发动机燃用轻油基混合燃料时, 平均指示压力低于燃用汽油, 其中2号混合燃料比燃用汽油低2%~8%。发动机动力性主要取决于混合气热值, 而2、4号混合燃料体积低热值较低, 其中2号混合燃料体积低热值比汽油低19%, 是造成平均指示压力低的根本原因。此外, 轻油基混合燃料-空气混合气的稀释效应也使平均指示压力降低。尽管3号混合燃料体积低热值较高, 但燃料中酚油含量高, 由于酚油重馏分含量较多, 使混合燃料50%馏分中大多为热值低的轻油, 造成发动机急燃期释放出的热量减少, 也引起发动机动力性下降。因此, 若根据混合燃料组成及理论空燃比, 适当调整发动机功率量孔及点火提前角, 可获得与燃用汽油相近的平均指示压力。由于3号燃料辛烷值较高, 可使发动机采用较高压缩比工作, 从而显著提高热效率。

4) 随转速提高, $p_i - n$ 曲线呈下降趋势, 且 $n = 1000 \text{ r/min}$ 时, p_i 最大。 $p_i - n$ 曲线的这种变化趋势和幅度与发动机外特性扭矩变化曲线 $M_e - n$ 一致。

3.2 最高燃烧压力及其曲轴转角

在汽油机燃烧过程中, 最高燃烧压力及曲轴转角与平均指示压力有关, 能准确地显示出混合比等的变化对发动机功率和经济性的影响^[4]。由图3可知:

1) 发动机燃用汽油时, $p_z = 3.5 \sim 4.2 \text{ MPa}$; 相同工况, 发动机燃用轻油基混合燃料时 p_z 明显低于燃用汽油, 其中2号混合燃料比燃用汽油低20%~38%。这是由于轻油基混合燃料体积低热值低, 急燃期燃烧产生热量较燃用汽油时下降, 使燃烧最高压力下降, 引起平均指示压力降低。 $p_z - n$ 曲线与 $p_i - n$ 曲线变化趋势和幅度基本一致, 说明发动机无爆震时, p_z 越高, 指示功越大, 燃烧状态越好。



×—0号燃料 □—2号燃料 ○—3号燃料 ▲—4号燃料
3 发动机外特性上缸内过程参数变化 ($\epsilon = 6.4$)

Fig.3 Comparison of p_z and φ_z of different fuels at different speeds ($\epsilon = 6.4$)

2) 发动机燃用汽油时, 最高燃烧压力对应的曲轴转角 $\varphi_z = 16 \sim 21^\circ \text{CA}$ (曲轴转角 Crank Angle); 相同工况, 发动机燃用轻油基混合燃料时 φ_z 值均大于燃用汽油, 其中2号燃料的 φ_z 值比燃用汽油滞后1~5°CA。 φ_z 值与燃料组成和性质、点

火时缸内气体压力和温度以及混合气浓度等有关。轻油基混合燃料性质变化、混合气稀释效应以及汽化潜热大引起混合气温度、压力下降，均可造成点火后滞燃期延长， φ_z 变大， p_z 下降。其中 2 号燃料中含有 15 % 的甲醇，由于甲醇汽化潜热为汽油的 3.7 倍，使混合气温度显著下降，着火滞燃期较燃用汽油明显增大，这是引起循环变动的主要原因。而适当加大发动机点火提前角或点火能量，可改善燃烧过程、提高热效率^[5]。

3) 随转速提高，发动机燃用不同燃料时， φ_z 均呈增大趋势。这是由于转速提高后，燃料微团的着火准备时间（以曲轴转角计）增大，使最高燃烧压力出现时刻滞后，即 φ_z 增大。

4) $p_z - n$ 、 $\varphi_z - n$ 曲线波动明显，这种现象在 $\frac{dp}{d\varphi}|_{\max} - n$ 、 $\alpha \frac{dp}{d\varphi}|_{\max} - n$ 等曲线中更明显（见图 4）。经分析，其主要原因在于：**a.** 由于进、排气系统的动力效应，使气缸充量不均匀；**b.** 由于点火提前角离心调节器的局限性，无法使点火提前角在各个工况下均保持最佳；**c.** 过量空气系数变化等^[6]。尽管如此，以上曲线仍可作为定性分析的依据。

3.3 最大压力升高率及其曲轴转角

最大压力升高率代表发动机工作粗暴程度、振动和噪声水平，与火焰传播速度密切相关。由图 4 可知：

1) 相同工况，发动机燃用轻油基混合燃料时，最大压力升高率明显低于燃用汽油；而最大压力升高率出现时刻滞后于燃用汽油。在发动机供油系统不调整的前提下，由于轻油基混合燃料-空气混合气较稀，使火焰传播速度低于汽油-空气混合气，引起最大压力升高率下降，出现时刻滞后。若适当调整功率量孔及点火提前角，可改善燃烧过程，提高动力性、经济性。

2) 发动机燃用轻油基混合燃料时最大压力升高率出现于最高燃烧压力点之前，即 $\alpha \frac{dp}{d\varphi}|_{\max} \leq \varphi_z$ 。由此可断定：发动机工作过程中无爆震燃烧，充分说明轻油基混合燃料品质优良、抗爆性好。

3.4 缸内过程参数标准偏差分析

汽油机工作过程中存在循环之间的燃烧变动。减少循环变动，可改善工作粗暴程度，扩大爆震界限，提高燃油经济性。在发动机结构及运行条件不变的前提下，由于轻油基混合燃料组成和性质变化，将影响汽油机燃烧状态。

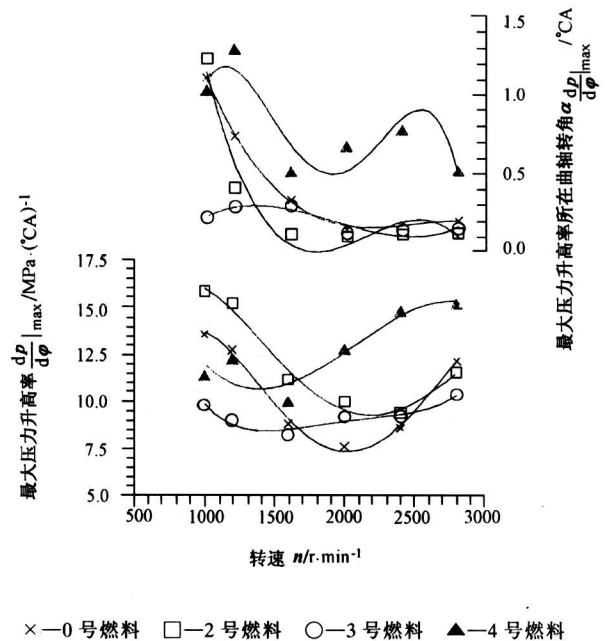


图 4 发动机外特性上缸内过程参数变化 ($\epsilon = 6.4$)

Fig.4 Comparison of $\frac{dp}{d\varphi}|_{\max}$ and $\alpha \frac{dp}{d\varphi}|_{\max}$ of different fuels at different speeds ($\epsilon = 6.4$)

本文采取平均指示压力标准偏差 σ_{p_i} 、最高燃烧压力及其曲轴转角的标准偏差 σ_{p_z} 和 σ_{φ_z} 、最大压力升高率及其曲轴转角的标准偏差 $\sigma_{\frac{dp}{d\varphi}|_{\max}}$ 和 $\sigma_{\alpha \frac{dp}{d\varphi}|_{\max}}$ 分析对比汽油机燃用轻油基混合燃料和汽油的循环变动，考察轻油基混合燃料的抗爆性。由图 5、6、7 可知：

1) 相同工况，发动机燃用轻油基混合燃料时缸内过程参数标准偏差大多小于燃用汽油，其中 σ_{p_z} 和 $\sigma_{\frac{dp}{d\varphi}|_{\max}}$ 明显低于燃用汽油，表明轻油基混合燃料燃烧过程稳定性较好。

2) 汽油机按外特性运行时，随转速提高，在缸内形成强烈的紊流和旋流，使最高燃烧压力和最大压力升高率的变动呈下降趋势，如图 5、6 所示。但由于点火提前角调节的局限性，使最高燃烧压力出现时刻的变动随转速提高而增大，如图 5 所示，进而使平均指示压力的变动幅度增大。

3) 相同工况，发动机燃用 4 号混合燃料时的 σ_{p_z} 和 $\sigma_{\frac{dp}{d\varphi}|_{\max}}$ 较大。由表 1 可知：若发动机供油系统不调整，4 号混合燃料-空气混合气稀释度 $\Delta\alpha$ 最大，引起火焰传播变动较大。

4) 相同工况，2 号混合燃料最高燃烧压力及

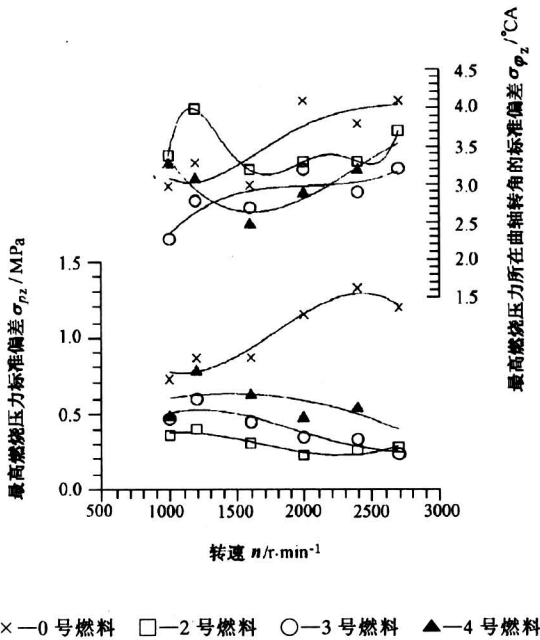


图5 发动机最高燃烧压力及其出现位置的标准偏差 ($\epsilon = 6.4$)

Fig.5 Comparison of σ_{p_z} and σ_{φ_z} of different fuels at different speeds ($\epsilon = 6.4$)

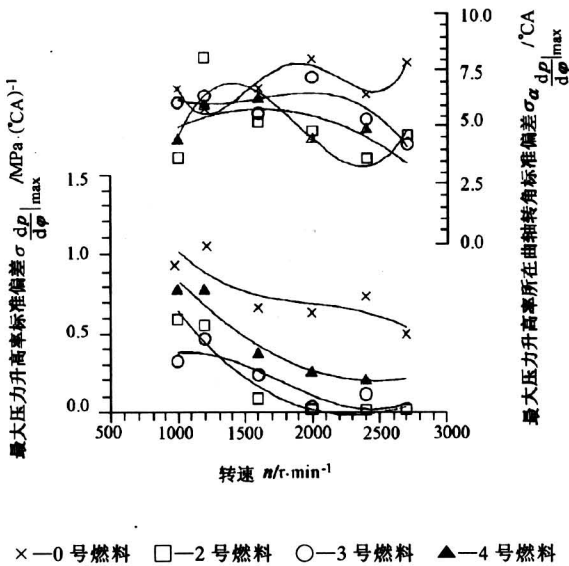


图6 发动机最大压力升高率及其出现位置的标准偏差 ($\epsilon = 6.4$)

Fig.6 Comparison of $\sigma_{\frac{dp}{d\varphi}|_{max}}$ and $\sigma_{\varphi_{\frac{dp}{d\varphi}|_{max}}}$ of different fuels at different speeds ($\epsilon = 6.4$)

最大压力升高率变动相对于3、4号混合燃料较小,但由于2号混合燃料着火延迟期较大,使最高燃烧压力出现时刻大幅度变动,最终导致2号混合燃料平均指示压力变动最大,如图7所示。

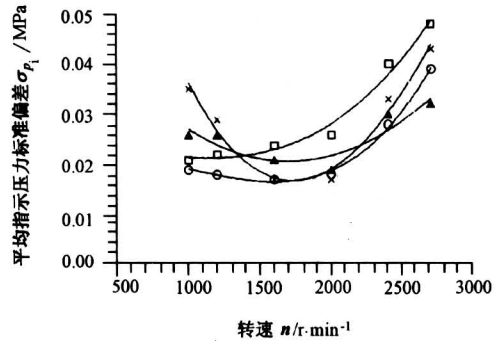


图7 发动机平均指示压力标准偏差 ($\epsilon = 6.4$)

Fig.7 Comparison of σ_{p_i} of different fuels at different speeds ($\epsilon = 6.4$)

由以上分析可知:最高燃烧压力出现时刻的循环变动对平均指示压力变动有极为显著的影响。

4 结论

汽油机燃用轻油基混合燃料时缸内过程参数及其标准偏差分析表明:

1) 轻油基混合燃料的体积低热值低是造成平均指示压力低的根本原因,而3号混合燃料50%馏分中大多为热值低的轻油,也使发动机最高燃烧压力下降,平均指示压力明显低于燃用汽油。

2) 轻油基混合燃料的稀释效应及汽化潜热较汽油高,使着火滞燃期增大,燃烧效率降低,也是最高燃烧压力及平均指示压力低的重要因素。

3) 2号混合燃料汽化潜热较高,使着火延迟期增大,是造成发动机最高燃烧压力出现时刻及平均指示压力大幅度变动的主要原因。

4) 根据轻油基混合燃料理化性质,适当调整发动机功率量孔和点火提前角,或采用高能点火系统,可改善燃烧过程,提高动力性。

5) 发动机燃用轻油基混合燃料时燃烧过程稳定,表明轻油基混合燃料品质优良,可成为汽油机的新型燃料。

参考文献

- [1] 施密特 K H. 煤、石油、天然气化学与工艺 [M]. 潘德慧, 董伟波译. 北京: 化学工业出版社, 1992
- [2] 崔心存. 内燃机代用燃料 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [3] 奥林 A C, 克鲁戈罗夫 M Г. 活塞式及复合式发动机原理 [M]. 罗远荣, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [4] 何学良. 内燃机燃烧学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [5] Huang Jingdang, Crookes R J. A comparison of spark ignition engine performance fueled with gasoline and simulated biogas [J]. 内燃机学报, 1998, 16 (4): 412~420
- [6] 孙玲玲. 轻油基混合燃料在火花点火发动机上的试验研究 [D]. 济南: 山东工业大学, 1993

The Parameter Analysis of the Process in Cylinder for Light Oil-based Fuel in Gasoline Engine

Sun lingling

(College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Jinan 250061, China)

[Abstract] A kind of new fuel suitable for gasoline engine is developed in this paper. To check its quality, a series of tests on process parameter in cylinder are done. The test results show that the power of engine with light oil-based fuel is close to that with gasoline and the standard errors of process parameter in cylinder with light oil-based fuel are lower than that with gasoline. This proves that the light oil-based fuel has good quality and is suitable for gasoline engine.

[Key words] light oil; gasoline engine; process parameter in cylinder; antiknock property

欢迎订阅 《农业技术经济》

《农业技术经济》是由中国农业技术经济研究会和中国农业科学院农业经济研究所共同主办, 国内外公开发行的学术性期刊, 是全国农业经济类的核心期刊。

《农业技术经济》突出“技术与经济、理论与实践”两个结合的办刊宗旨, 坚持为科研、教学服务, 为经济主战场服务, 为政府宏观决策服务的办刊方针。主要设有“理论方法及其应用”、“科技政策与科技进步”、“效益评价”、“产业经济与区域经济”等栏目, 适合农村产业政策研究、农业技术推广、农业资源区划、经济理论研究部门的各级领导干部和专家学者以及经济类高等院校的广大师生阅读参考。

《农业技术经济》为双月刊, 16 开本, 64 页。国内统一刊号: CN11—1883/S; 国际标准刊号: ISSN1000—6370。2001 年国内定价每期 4.00 元, 全年定价 24 元。北京报刊发行局总发行, 国内邮发代号: 82—257, 全国各地邮局均可订阅, 如当地邮局订阅困难, 可直接向编辑部订阅。国外读者可通过中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱) 订阅, 国外代号: BM673。

本刊地址: 北京中关村南大街 12 号 中国农科院农经所《农业技术经济》编辑部, 邮编 100081, 联系电话: 010—68919783, 联系人: 贺晓丽。