

文章编号:1000-582X(2010)06-091-05

基础燃料均质压燃燃烧特性的数值计算

张庆峰, 郑朝蕾, 何祖威, 王 迎

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:结合详细化学反应动力学机理,利用 CHEMKIN 软件计算了基础燃料均质压燃燃烧(HCCI)的过程,并与单缸 HCCI 燃烧试验作出对比。研究了燃料成分、压缩比、燃空当量比、初始温度、初始压力对 HCCI 发动机燃烧的影响。计算结果表明:随着燃料辛烷值的增加,着火延迟期增加;压缩比、当量比、初始温度、初始压力的变化对燃烧着火时刻有显著影响,同时不难看出,基础燃料 HCCI 燃烧运行工况范围是有限制的。

关键词:基础燃料;内燃机;均质充量压燃;参数;着火延迟期

中图分类号:TK464

文献标志码:A

Numerical study on the characteristics of HCCI combustion process of primary reference fuels

ZHANG Qing-feng, ZHENG Zhao-lei, HE Zu-wei, WANG Ying

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. P. China)

Abstract: The combustion process of HCCI engine fueled by primary reference fuels is simulated using the CHEMKIN software, and the results are compared with a combustion experiment of a HCCI engine. The authors study the influence of various factors, including fuel composition, compression ratio, equivalence ratio, initial temperature and initial pressure, on HCCI engine fueled with PRF. The results indicate that the ignition delay increases along with the increase of the octane number. The initial temperature, initial pressure, compression ratio, equivalence ratio have significant effects on the ignition timing. The operating range of the combustion on HCCI engine is limited.

Key words: primary reference fuels; IC engine; HCCI; parameter; ignition delay

均质压燃燃烧(HCCI)结合了传统汽油机和柴油机的优点,可以获得较高的燃油经济性及热效率,同时产生非常低的氮氧化物和颗粒物排放^[1-3]。HCCI 燃烧是通过压缩缸内均匀燃油和空气的混合气在发动机上止点附近实现自燃。

HCCI 燃烧研究的焦点是着火时间和燃烧速率的控制,其主要受燃料和化学反应动力学的影响^[4-5]。因此点火或喷油控制燃烧的方法不能直接应用于控制 HCCI 燃烧,只能利用间接的方法,如通过压缩比、当量比等来控制燃烧^[6-8],但目前对基础燃料 HCCI 的研究多限于实验研究^[9-11]。

Westbrook C K 等^[12]国际燃烧界著名专家指出,HCCI 在短时间内从概念变为现实,计算燃烧数值模拟是一个主要的推动因素,HCCI 模拟研究的

收稿日期:2010-01-29

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2009BAG13B01);内燃机燃烧学国家重点实验室资助项目(SKLE200901)

作者简介:张庆峰(1983-),男,重庆大学博士研究生,主要从事燃机燃烧数值模拟方向研究,(Tel) 023-65102513;
(E-mail)zhangqingfeng_cq@163.com。

重要性是不可替代的。鉴于此,有必要用化学动力学来模拟 HCCI 燃烧过程,进行变参数的研究,对探索控制 HCCI 着火和燃烧速率的技术有重要的意义。

大多数燃料的 HCCI 燃烧过程具有两阶段着火特性,而燃料着火成功以第二阶段着火为标志^[5]。目前,正庚烷和异辛烷作为汽油和柴油替代混合物基础组分,已被普遍接受^[13-15]。利用详细的化学反应动力学模型,对多工况下基础燃料 HCCI 燃烧进行数值计算,分析了各种参数变化对 HCCI 燃烧过程的影响,为更好地控制燃烧提供依据。

1 计算模型

采用美国 Sandia 国家实验室开发的 CHEMKIN-4.1 软件,其中利用到内燃机燃烧模块,非常适合 HCCI 燃烧的计算模拟。运用该模块结合详细化学反应动力学机理模拟基础燃料 HCCI 燃烧过程,计算中对控制方程采取了如下假设:燃烧室内的温度、压力及各组分的浓度分布均匀;整个燃烧室为绝热系统、且室内质量保持不变;所有气体组分均为理想气体,忽略气体的动能和势能。

采用的基础燃料化学反应动力学机理是由美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 Curran H J 等^[16]提出,其中包括大约 990 种组分、4 060 个反应。

2 模型验证

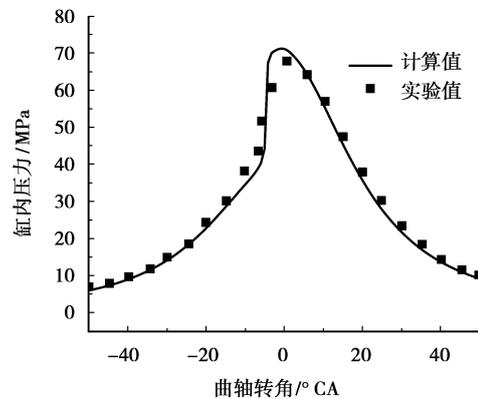
计算和试验所用的是一台单缸四冲程发动机。表 1 给出了该发动机的主要结构参数,试验系统详见文献^[17]。

表 1 发动机基本结构参数

| 参数项 | 数值项 |
|-------|----------|
| 缸径 | 82.6 mm |
| 冲程 | 114.3 mm |
| 排量 | 612 cc |
| 连杆长 | 254 mm |
| 排气阀开启 | 140 ATDC |
| 排气阀关闭 | 15 ATDC |
| 进气阀开启 | 10 ATDC |
| 进气阀关闭 | 146 BTDC |

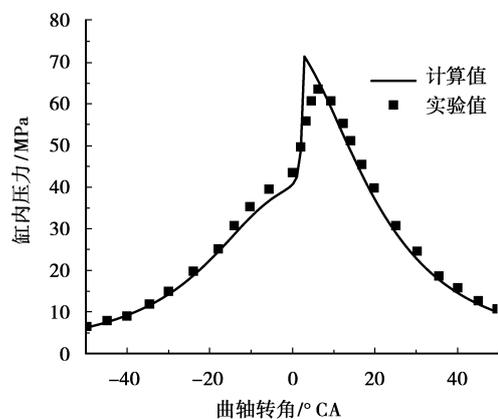
计算过程中考虑了完整的压缩和膨胀冲程,设定计算始点为进气阀关闭点,计算终点是排气门开启点,并以压缩冲程终点作为曲轴转角的零点。选取工况:压缩比为 16.55,初始温度为 430 K,初始压

力为 0.1 MPa,转速为 900 r/min。燃料为正庚烷和异辛烷的混合物,例如 R70,表示该燃料由体积分数分别为 30%正庚烷和 70%异辛烷组成。通过计算,正庚烷和异辛烷的理论空燃比分别为 15.19 和 15.14。



注: 燃料: R70, 当量比: 0.25

图 1 计算与实验^[17]情况对比



注: 燃料: PRF91.8, 当量比: 0.29

图 2 计算与实验^[17]情况对比

图 1、2 是 2 种基础燃料不同工况下计算与实验结果的比较。由此看出,计算与试验结果达到了较好的吻合。低温反应阶段进行较为平缓,当温度达到满足高温反应要求后,高温反应迅速进行,压力升高明显。由图可知,计算燃烧反应缸内最大压力高于试验测得压力,这是由于单区模型作了绝热和均匀性假设,忽略了缸内传热和漏气损失。总体而言,Curran H J 等人提出的基础燃料详细化学动力学机理对该发动机数值模拟是令人满意的。

3 参数变化对 HCCI 燃烧的影响

各发动机运行参数在计算中均可独立变化,以便对各参数的影响进行分析比较。

3.1 燃料辛烷值对 HCCI 燃烧的影响

为探讨不同辛烷值燃料对 HCCI 缸内燃烧的影响,选取 RON 值为 0、30、50、70 和 100 的燃料燃烧情况进行计算分析,见图 3。

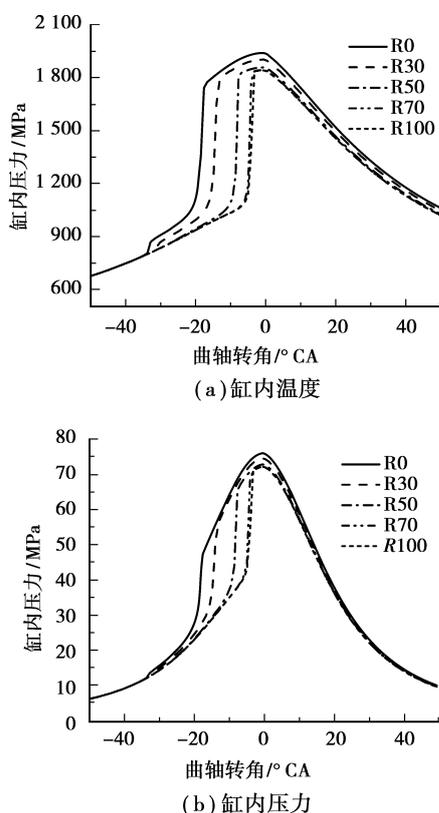


图 3 燃料辛烷值对缸内燃烧的影响

选取压缩比 16.55, 当量比 0.25, 初始温度 430 K, 初始压力 0.1 MPa, 发动机转速 900 r/min 下的工况。从图 3(a) 易见, 着火延迟期的变化主要受到第一阶段着火延迟期的影响。正庚烷的着火延迟期最短, 随着辛烷值的增大, 着火延迟期变长; RON=50 混合气、异辛烷着火时刻分别比正庚烷延迟了 8.5°CA、13°CA。由图 3(b) 图可知, 混合气的最高压力相差不大, 燃烧异辛烷所达到的最高压力比燃烧正庚烷高出 0.4 MPa。造成上述现象的原因分析如下: 异辛烷的脱氢反应和异构化反应都不易发生, 低温阶段所释放出的热量也就低于正庚烷, 所以达到的最高压力偏小, 同时异辛烷燃烧对未燃混合气的预热较少, 比正庚烷难于自燃, 需要更长的着火延迟期。

通过图 3 不难看出, 在该发动机条件下燃料 RON=70 混合气在上止点附近着火, 燃烧表现良好。为更好地分析变参数对 HCCI 燃烧的影响, 下面统一选用 RON=70 燃料来计算分析基础燃料。

3.2 压缩比的影响

图 4 显示了发动机转速为 900 r/min, 燃空当量比 0.25, 初始温度 430 K, 初始压力为 0.1 MPa 时压缩比对缸内燃烧的影响。如图 4 所示, 当压缩比为 12 时缸内没有发生着火, 压缩比从 14 提高到 18 时, 着火时刻提前了 12°CA。

随着压缩比的增大, 气缸温度升高越快, 而化学反应速率与温度有密切的关系, 从而加速了化学反应的进行, 导致更多自由基的产生, 进而引起较高的反应速率, 缸内最高温度、压力都随之增大, 压力升高较为明显, 着火时刻提前, 说明着火延迟期受压缩比影响很大。

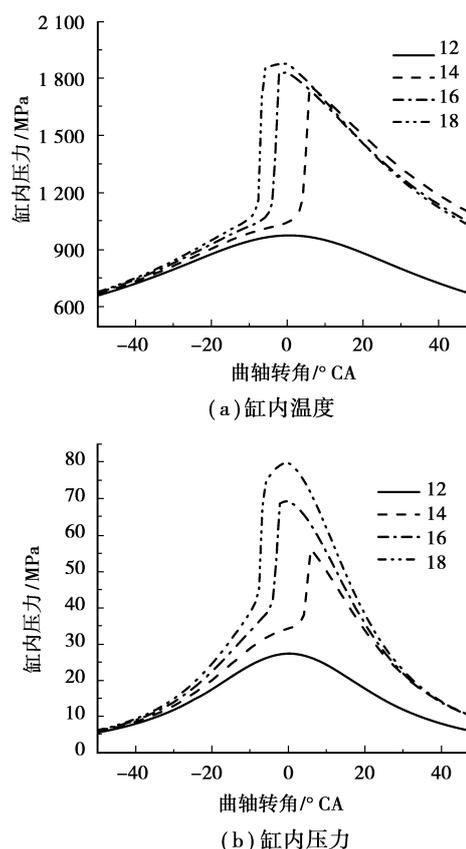


图 4 压缩比对缸内燃烧的影响

3.3 燃空当量比的影响

HCCI 发动机一般通过改变燃空当量比实现负荷的变化。图 5 是改变当量比对缸内燃烧的变化情况。计算工况为: 发动机转速为 900 r/min, 压缩比为 16.55, 初始温度为 430 K, 初始压力为 0.1 MPa。

随着当量比增加, 燃空混合物比热率降低, 减少了压缩冲程产生的热量; 另一方面, 随着当量比增加, 相对增多了燃料的量, 强化了反应率的提高, 使得着火时刻提前。由图可见, 当量比从 0.1 提高到

0.25, 延迟期相应地有大幅度缩短。即在贫燃条件下, 随着当量比增大, 着火时刻提前, 缸内最高温度、压力均有明显提高。

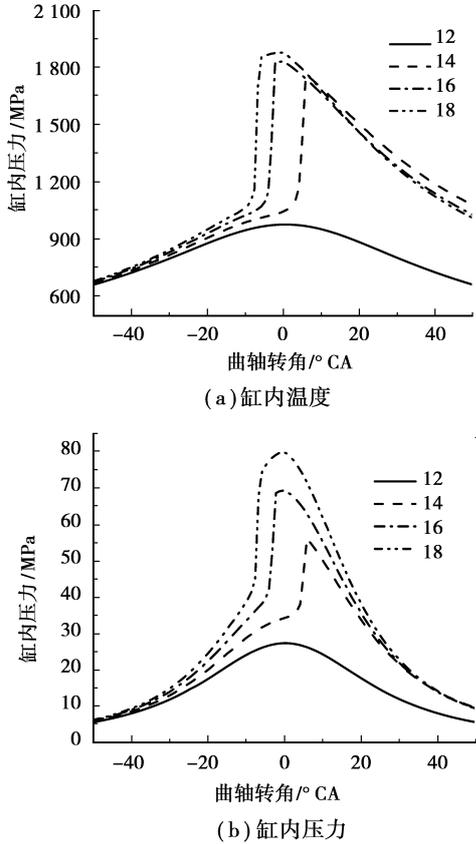


图 5 当量比对缸内燃烧的影响

3.4 初始温度的影响

图 6 显示了改变初始温度对缸内燃烧温度的影响。发动机转速 900 r/min, 当量比 0.25, 初始压力 0.1 MPa, 压缩比 16.55。初始温度为 380 K 时, 缸内最高温度未达到最终着火反应所需要的温度, 因此没有发生着火。从 390~430 K, 提高初始温度 40 K, 着火时刻会有 16 °CA 的提前。

随着初始温度的增加, 气缸的峰值温度升高, 根据分子反应动力学, 燃料分子的碰撞几率提高, 加速了基元反应的进行, 致使着火时刻提前。由图可知, 初始温度对 HCCI 着火的影响集中表现在使燃料第一阶段的着火时刻发生变化; 随着初始温度的升高, 着火时刻提前, 从而使得着火延迟期减少。

3.5 初始压力的影响

在发动机转速为 900 r/min, 压缩比为 16.55, 当量比为 0.25, 初始温度为 430 K 工况下, 图 7 是改变初始压力对缸内燃烧温度的变化情况。

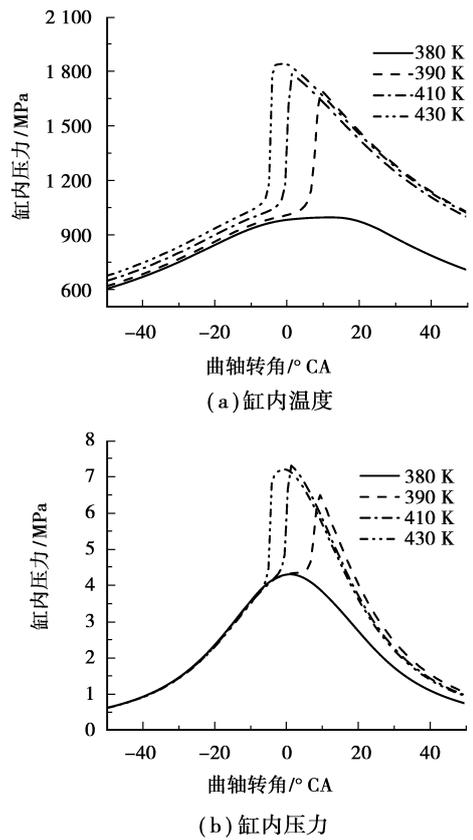


图 6 初始温度对缸内燃烧的影响

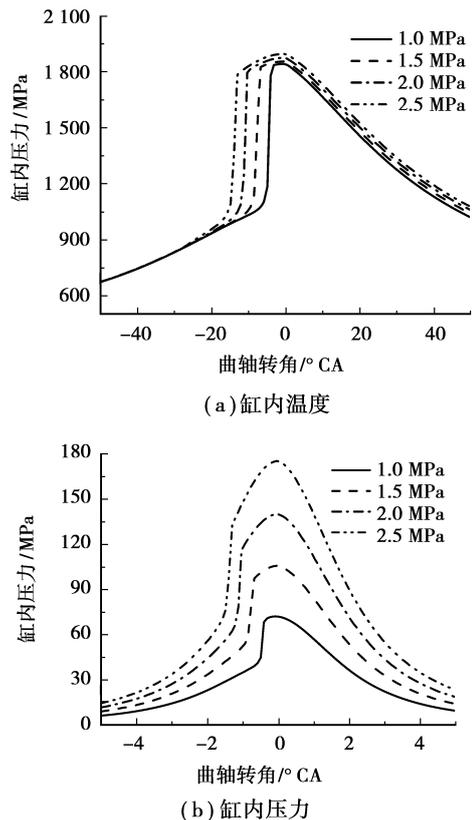


图 7 初始压力对缸内燃烧的影响

初始压力提高 0.15 MPa,着火时刻相应地提前 10°CA。可见,初始压力越高,着火延迟期越短。这是由于初始压力增大,说明进气量增多,导致燃空混合物密度增加,从而产生更多自由基并加大了自由基的碰撞几率,最终加速了燃烧的进行,同一压缩比下,压缩压力增大,致使着火点提前。

最大燃烧温度和燃烧的完善度有较大的关系,对于 HCCI 燃烧方式来说,燃烧应该还是比较充分了。所以随着初始压力的提高,缸内燃烧最高温度变化不大,这可维持一定的热效率,同时使受温度影响较大的氮氧化物的排放可以控制在一定范围内;增压加大进气量,相当于变相地增加压缩比,所以增压使得缸内最高压力明显升高,相比之下最高燃烧温度变化不大,见图 4。对发动机强度提出了更高的要求,这又限制了 HCCI 燃烧进气增压的应用。所以,不要盲目通过增压提高热效率,要针对发动机的实际情况来优化发动机的运行。

4 结 论

1) 单区模型结合详细化学反应动力学能较准确地预测 HCCI 燃烧情况;由于模型的假设条件,计算压力比试验结果略高。

2) 基础燃料辛烷值越高,着火延迟期越长,燃烧所达到最高温度、压力有所降低。

3) 随着压缩比的增大,缸内最高温度、压力都随之增大,压力提高较为明显,着火时刻明显提前。

4) 当量比的变化对燃料燃烧着火延迟期也略有影响。随着当量比的增大,混合物燃料的着火延迟期缩短,达到最高温度、压力升高。

5) 随着初始温度、压力的升高,着火时刻提前,从而着火延迟期减少。随着初始温度的增大,缸内温度、压力均有升高;但对于初始压力的提高,缸内最高压力升高明显。

参考文献:

- [1] NAJT P M, FOSTER D E. Compression-ignited homogeneous charge combustion[C]. SAE830264, 1983.
- [2] NOGUCHI M, TANAKA Y, TANAKA T, et al. A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion[C]. SAE790840, 1979.
- [3] LIDA N. Alternative fuels and homogeneous charge compression ignition combustion technology [C]. SAE972071, 1997.
- [4] U. S. Department of energy efficiency and renewable

energy office of transportation technologies, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Technology [R]. A Report to the U. S. Congress, 2001.

- [5] WESTBROOK C K, DRYEL F L. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion[J]. Prog. Energy Comb. Sci, 1984,10:1-57.
- [6] CHISTENSEN M, HULTQVIST A, JOHANSSON B. Demonstrating the multi-fuel capability of a homogeneous charge compression ignition engine with variable compression ratio [C]. SAE1999-01-3679,1999.
- [7] CHISTENSEN M, JOHANSSON B. Supercharged homogeneous charge compression ignition(HCCI) with exhaust gas recalculation and pilot fuel[C]. SAE2000-01-1835,2000.
- [8] OLSSON J O, TUNESTAL P, ULFVIK J, et al. The effect of cooled EGR on emission and performance of a turbocharged HCCI engine [J]. SAE2003-01-0743,2003.
- [9] 尧命发,郑尊清,沈捷,等. 辛烷值对均质压燃发动机燃烧特性和性能的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(3):244-249.
- YAO MING-FA, ZHENG ZUN-QING, SHEN JIE, et al. Experimental study on the influence of fuel octane number on combustion characteristics and performance of HCCI engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10 (3): 244-249.
- [10] 张波,尧命发,郑尊清,等. 运行工况对基础燃料均质压燃燃烧过程影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(4):308-314.
- ZHANG BO, YAO MING-FA, ZHENG ZUN-QING, et al. Experimental study on the effect of operating conditions on the HCCI combustion characteristics[J]. Transactions of CSICE,2006,24(4):308-314.
- [11] 刘海峰,郑尊清,张波,等. 燃料特性对 HCCI 发动机燃烧和工况范围影响[J]. 内燃机学报, 2009, 27 (3): 215-223.
- LIU HAI-FENG, ZHENG ZUN-QING, ZHANG BO, et al. The influence of fuel property on combustion and operating range of a HCCI engine[J]. Transactions of CSICE, 2009,27(3):215-223.
- [12] WESTBROOK C K, MIZOBUCHI Y, POINSOT T J, et al. Computational combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2005,30(1):125-157.

(下转第 105 页)

- (05):389-396.
- [5] 赵丽, 万柏坤, 高扬. 独立分量分析方法在脑电信号预处理中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(1): 496-498.
- ZHAO LI, WAN BO-KUN, GAO YANG. The applying research of independent component analysis on the preprocessing of EEG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(1): 496-498.
- [6] 周仲兴, 明东, 朱誉环, 等. 基于扩展 Infixmax ICA 的站起想象动作脑电特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(03): 459-464.
- ZHOU ZONG-XING, MING DONG, ZHU YU-HUAN, et al. EEG feature extraction for imaginary standing up based on extended infixmax independent component analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(03): 459-464.
- [7] WEI L, RAJAPAKSE J C. Approach and Applications of Constrained ICA[J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 2005, 16(1): 203-212.
- [8] VALENTE G, DE MARTINO F, BALSÌ M, et al. Optimizing ICA using generic knowledge of the sources [J]. Research in Microelectronics and Electronics, 2005, 2: 206-209.
- [9] BARBATI G, SIGISMONDI R, ZAPPASODI F, et al. Functional source separation from magnetoencephalographic signals[J]. Human Brain Mapping, 2006, 27: 925-934.
- [10] BARBATI G, PORCARO C, HADJIPAPAS A, et al. Functional source separation applied to induced visual gamma activity[J]. Human Brain Mapping, 2008, 29: 131-141.
- [11] 海韦里恩(芬). 独立成分分析[M]. 周宗潭译. 北京: 电子工业出版社, 2007, 108-201.
- [12] 王正林, 龚纯, 何倩. 精通 Matlab 科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 343-360.
- [13] MICHAEL T, JURKIEWICZ, WILLIAM C, et al. Post-movement beta rebound is generated in motor cortex: Evidence from neuromagnetic recordings[J]. NeuroImage, 2006, 32: 1281-1289.
- [14] 邓勇. 长方形矩阵的广义逆矩阵的计算方法[J]. 绵阳师范学院学报, 2008, 27(2): 34-37.
- DENG YONG. A calculation method for generalized inverse matrix of rectangular matrix [J]. Journal of Mianyang Normal University, 2008, 27(2): 34-37.
- [15] 孙吉林, 吴杰, 李素敏, 等. 应用脑磁图对人脑初级体感皮质功能定位的研究[J]. 中国医学影像技术, 2002, 18(04): 307-310.
- SUN JI-LIN, WU JIE, LI SU-MIN, et al. Functional localization of the human primary somatosensory cortex: A neuromagnetic study [J]. China Journal of Medical Imaging Technology, 2002, 18(04): 307-310.

(编辑 陈移峰)

(上接第 95 页)

- [13] MACHIRAFI H, CAVADIAS S, GILBERT P. An experimental and numerical analysis of the HCCI auto-ignition process of primary reference fuels, toluene reference fuels and diesel fuel in an engine, varying the engine parameters [J]. Fuel Processing Technology, 2008(89):1007-1016.
- [14] FIKRI M, HERZLER J, STARKE R, et al. Autoignition of gasoline surrogates mixtures at intermediate temperatures and high pressures [J]. Combustion and Flame, 2008 (152):276-281.
- [15] LENHERT D B, MILLER D L, CERNANSKY N P, et al. The oxidation of a gasoline surrogate in the negative temperature[J]. Combustion and Flame, 2009 (156):549-564.
- [16] CURRAN H J, PITZ W J, WESTBROOK C K, et al. Oxidation of automotive primary reference fuels at elevated pressures[C]// 27th International Symposium on Combustion. The Combustion Institute, 1998, 379-387.
- [17] AROONSRIOPON T, SOHM V, WERNER P, et al. An investigation into the effect of fuel composition on HCCI combustion characteristics [C]. SAE2002-01-2830, 2002.

(编辑 陈移峰)