

内外部 EGR 对柴油 HCCI 燃烧控制的仿真研究

翟兆亮,熊 锐,李广耀

(广东工业大学 机电工程学院,广东 广州 510006)

摘要: 基于分段韦伯函数燃烧放热率模型,通过耦合一维流体动力学软件 GT-Power 与化学动力学软件 Chemkin,建立了均质混合气压燃烧技术(HCCI)柴油发动机仿真试验平台,准确模拟了 HCCI 单缸试验样机的工作过程,研究了内外部废气再循环(EGR)对柴油 HCCI 燃烧控制的影响. 仿真结果表明:内外部 EGR 对 HCCI 燃烧具有不同的控制作用,考虑内外部 EGR 的综合因素效应,可以实现燃烧相位的有效控制

关键词: 废气再循环(EGR); 柴油机; 均质混合气压燃烧技术(HCCI); 燃烧控制; 仿真

中图分类号: TK421

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2011)02-0051-05

控制着火时刻和燃烧反应速率以及扩展运行工况范围是发动机实现均质混合气压燃烧(HCCI)的关键和难点,废气再循环技术(EGR)是被公认有效的控制 HCCI 燃烧的手段之一^[1]. 国内外采用内部 EGR 技术或外部 EGR 技术对 HCCI 燃烧的控制已经进行了不少的研究^[2-4],而本文通过分段韦伯函数燃烧放热率模型和化学动力学计算软件 Chemkin,建立了 ChemWeb-HCCI 燃烧模型,运用一维流体动力学软件 GT-Power 进行进排气系统热力过程模拟,进而建立了 HCCI 柴油发动机仿真试验平台,最终实现了 HCCI 燃烧发动机的循环模拟,准确模拟了内外部 EGR 及其综合因素对柴油 HCCI 燃烧过程控制的影响.

1 基本理论

1.1 分段韦伯函数燃烧放热率模型

HCCI 燃烧方式具有明显的两阶段放热:低温冷焰放热阶段和高温主放热阶段. 在柴油 HCCI 燃烧的试验中,低温冷焰反应放热只占总放热量的很小一部分(<5%)^[5]. 为提高 HCCI 燃烧实际放热率曲线的拟合精度,本文采用分段韦伯函数^[6]对燃烧放热率进行模拟,用 Matlab 软件编制程序来模拟 HCCI 燃烧的高温放热过程,定义第一阶段燃烧始点瞬时转角为 φ_{01} ,燃烧转角持续期为 φ_{z1} ;第二阶段燃烧始点瞬时转角为 φ_{02} ,燃烧转角持续期为 φ_{z2} ,由此得到分段韦伯放热函数表达式:

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \begin{cases} c_1 \frac{Q_{g1}}{\varphi_{z1}} (m+1) \left(\frac{\varphi - \varphi_{01}}{\varphi_{z1}} \right)^m \exp \left[-c_1 \left(\frac{\varphi - \varphi_{01}}{\varphi_{z1}} \right)^{m+1} \right] & \varphi \in (\varphi_{01}, \varphi_{z1} - \varphi_{01}) \\ c_2 \frac{Q_{g2}}{\varphi_{z2}} (m+1) \left(\frac{\varphi - \varphi_{02}}{\varphi_{z2}} \right)^m \exp \left[-c_2 \left(\frac{\varphi - \varphi_{02}}{\varphi_{z2}} \right)^{m+1} \right] & \varphi \in (\varphi_{02}, \varphi_{z2} - \varphi_{02}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, φ 为瞬时曲轴转角; m 为燃烧品质指数; c_1 、 c_2 分别为分段韦伯函数第一阶段和第二阶段的系数,其值由燃空当量比等参数来确定; Q_{g1} 、 Q_{g2} 分别为第一、第二阶段的燃烧放热值,高温放热始点 φ_{02} 由 Chemkin 程序计算得到.

1.2 ChemWeb-HCCI 燃烧模型

ChemWeb-HCCI 燃烧模型采用化学动力学计算与分段韦伯函数放热率模型结合的方式进行 HCCI 燃烧过程的模拟,化学动力学软件 Chemkin 计算模拟 HCCI 燃烧的低温放热过程和高温放热始点,而高温反应放热率采用了第二阶段韦伯函数拟合得到的燃烧模型模拟,从 Chemkin 软件计算出的高温放热始点开始计算一直到燃烧结束.

1.3 基于正庚烷机理的化学动力学模型

进行化学动力学计算所必需的反应机理为正庚烷化学动力学机理,正庚烷燃料辛烷值为 0,十六烷值为 56,与目前使用的柴油燃料十分接近,故采用由美国 Lawrence Livermore 国家实验室 Curran H J 教授发展的正庚烷化学动力学机理. 为了减少计算时间,本文正庚烷机理采用包括 159 种反应物的简化模型^[7].

收稿日期: 2011-03-05

作者简介: 翟兆亮(1981-),男,硕士研究生,主要研究方向为汽车节能与排放控制.

2 仿真试验平台的建立

以一台单缸柴油机试验机为原型,建立了 HCCI 柴油发动机仿真试验平台,本文模拟所用柴油机的主要技术参数如表 1 所示.

表 1 模拟柴油机的主要技术参数

发动机形式	缸径/mm	行程/mm	标定功率/kW	标定转速/(r·min ⁻¹)	喷油压力/MPa	曲柄连杆比	压缩比
水冷直喷四冲程	135	150	15.8	1 500	80	0.25	14.8

为了分析内外部 EGR 对柴油 HCCI 燃烧过程控制的影响,将 ChemWeb-HCCI 燃烧模型与进排气系统热力过程模拟相结合,实现了 HCCI 燃烧发动机的循环模拟,计算过程如图 1 所示.

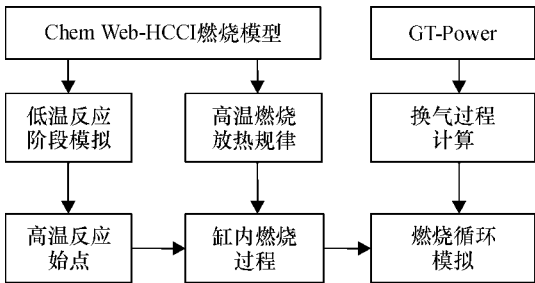


图 1 基于 ChemWeb-HCCI 燃烧模型的 HCCI 燃烧循环模拟计算过程

计算从 GT-Power 开始,采用有限体积法求解一维流体动力学问题,进行发动机排气过程、换气过程和进气过程的模拟.从燃烧结束时刻计算到进气门关闭时刻,主要计算缸内的温度、压力以及残余废气量等参数.当计算到进气门关闭角时,将此时缸内的温度、压力和缸内的组分传递给本文所建立的燃烧模型.低温放热过程和高温放热始点的预测由化学动力学计算完成,其根据由 GT-Power 计算得到的进气门关闭时刻的缸内温度、压力、进气成份和燃空当量比数据进行封闭体积内的化学动力学模拟计算,从进气门关闭计算到高温放热开始.高温燃烧过程模拟采用 Matlab 软件编程对燃烧放热率进行计算,从 Chemkin 软件计算得到的高温放热始点开始计算一直到燃烧结束,并将计算结果返回 GT-Power 作为下一个循环的初始条件,如此反复迭代后,直至计算结果收敛于一稳定值.

3 仿真结果及分析

3.1 仿真模型的验证

图 2 为转速 $n = 1\ 500\ \text{r/min}$ 、循环油量 $m = 0.050\ \text{g/循环}$ 、进气温度 $T_0 = 300\ \text{K}$ 、进气压力 $P_0 = 0.99\ \text{MPa}$ 、燃空当量比为 0.3 的条件下,采用该仿真

模型计算得到的气缸压力与实测柴油 HCCI 燃烧气缸压力进行了对比.从图 2 中可以看出,计算与实验^[9]吻合较好,模拟计算的缸压值、着火时刻、压力升高率等试验结果均得到了很好的吻合.气缸压力最大值时仿真值相对于试验值的误差有 3.47%.从仿真的结果来看,建立的仿真试验平台能够用于 HCCI 燃烧过程的模拟.

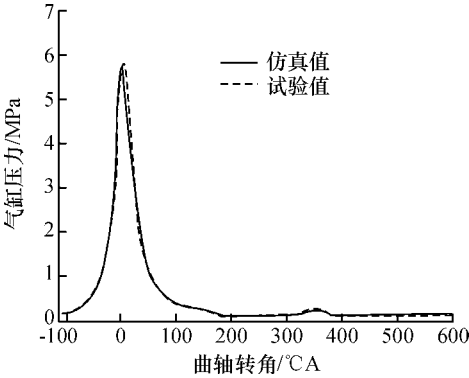


图 2 仿真计算与实测气缸压力对比

3.2 内外部 EGR 率的计算

内部 EGR 主要根据 GT-Power 中气门机构模型来实现,可以很方便地实现配气正时、升程和持续期的变化.本文选择排气门关闭角度依次为上至点前 0 °CA、5 °CA、15 °CA、25 °CA、和 40 °CA,进气门开启角度依次为上至点后 0 °CA、15 °CA、25 °CA、35 °CA 和 40 °CA,进行内部 EGR 的仿真计算.

外部 EGR 率的模拟是通过控制进气 CO₂ 浓度实现的,假设导回的废气在进气管中与新鲜空气是均匀混合. EGR 率的计算公式:

$$\text{EGR}(\%) = \frac{(\text{CO}_2)_{\text{intake}} - (\text{CO}_2)_{\text{ambient}}}{(\text{CO}_2)_{\text{exhaust}} - (\text{CO}_2)_{\text{ambient}}}, \quad (2)$$

式中, $(\text{CO}_2)_{\text{intake}}$ 表示进气总管中 CO₂ 体积分数, $(\text{CO}_2)_{\text{ambient}}$ 表示环境大气中 CO₂ 体积分数, $(\text{CO}_2)_{\text{exhaust}}$ 表示排气中 CO₂ 体积分数.文中选择 EGR 率依次按 0%、10%、20%、30%、40% 和 50% 进行仿真计算.

3.3 内部 EGR 的影响

模拟计算参考工况为 $n = 1\ 500\ \text{r/min}$,循环油量 $m = 0.050\ \text{g/循环}$,进气温度 $T_0 = 300\ \text{K}$,进气压力 $P_0 = 0.99\ \text{MPa}$.图 3 所示为内部 EGR 对 HCCI 燃烧的气缸温度和放热率的影响.

随着气门重叠期的增大,压缩上止点和排气上止点处的缸内温度都升高,燃烧相位提前,放热率不断升高.当气门重叠期从 0 变化到 -80 °CA 时,排气上止点处的缸内温度从 540 K 升高到 1 050 K,排气上止点处温度的升高有利于该时刻喷入燃油的蒸发,促进均匀混合气的形成;同样的气门重叠期变化

下,由于平均进气温度升高使燃烧相位提前,高温放热始点提前了 8°CA ,放热速率大幅增加,最终导致缸内燃烧的峰值温度从 $1\,730\text{ K}$ 升高到 $2\,008\text{ K}$.

图4为排气门关闭角度(EVC)和进气门开启角度(IVO)对发动机指示热效率 η_{it} 的影响.最高的指示热效率 η_{it} 发生在排气门晚关和进气门早开的工况下,此工况范围也是充气效率较高的区域.缸内残余废气量较小,进入缸内的新鲜充量较多,残余废气对进气加热的作用最小,使进入缸内的新鲜充量温度较低,从而使燃烧相位推迟,压缩功减小,故有利于提高指示热效率.

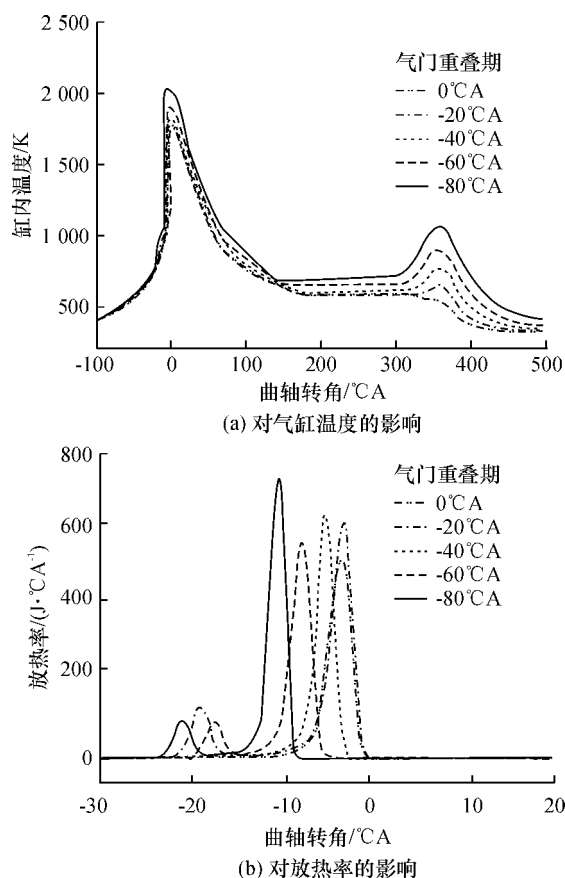


图3 内部 EGR 对 HCCI 燃烧的气缸温度和放热率的影响

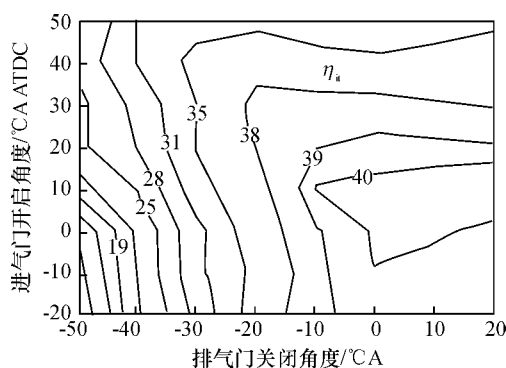


图4 排气门关闭角度和进气门开启角度对发动机指示热效率(η_{it})的影响

图5为不同气门正时对 HCCI 燃烧的低温放热始点(SOLTR)和高温放热始点(SOC)的影响.如图5(a)所示,随着排气门关闭角的提前,低温放热始点提前.因为低温放热始点主要受缸内温度的影响,排气门提前关闭使缸内残余大量高温废气,起到了对新鲜充量的加热作用,初始缸内温度的升高,低温放热始点提前.如图5(b)所示的高温放热始点的变化较为复杂,因其受到缸内充量初始温度、低温反应放出热量以及充气效率造成的当量比变化的共同影响.从图5中可以看出,在相同循环油量下,高温放热始点分布与低温放热始点分布有较大的相似性,说明其也受缸内温度的影响较大,在上止点前 90°CA 温度最高处,其放热始点最早,在温度较低区域,放热始点推迟.

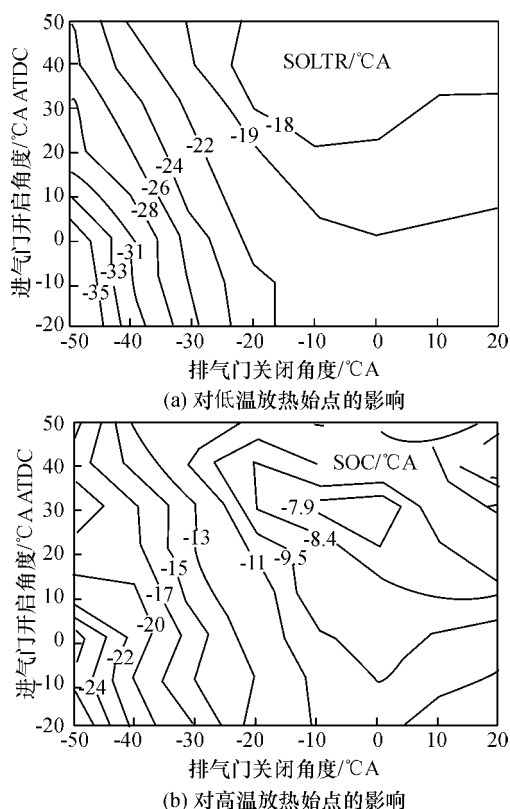


图5 不同气门正时对 HCCI 燃烧的低温放热始点(SOLTR)和高温放热始点(SOC)的影响

3.4 外部 EGR 的影响

由于燃空当量比 ϕ 和进气温度 T_0 对高温反应始点的影响较大,因而模拟计算中采用了固定燃空当量比和固定进气温度.计算中,转速维持在 $1\,500\text{ r/min}$,燃空当量比为 0.3 ,进气温度为 300 K ,进气压力为 0.99 MPa .

图6为 EGR 率对 HCCI 燃烧缸内温度和放热率的影响.如图6所示,在转速、当量比一定的情况下,

EGR 率对 HCCI 燃烧相位有明显的推迟作用,随着 EGR 率的增加,低温和高温放热始点均推迟,这说明 EGR 技术可以有效控制柴油 HCCI 燃烧过早的燃烧相位. 同时,固定燃空当量比使循环油量随着 EGR 率增加而减小,从而使放热率峰值降低.

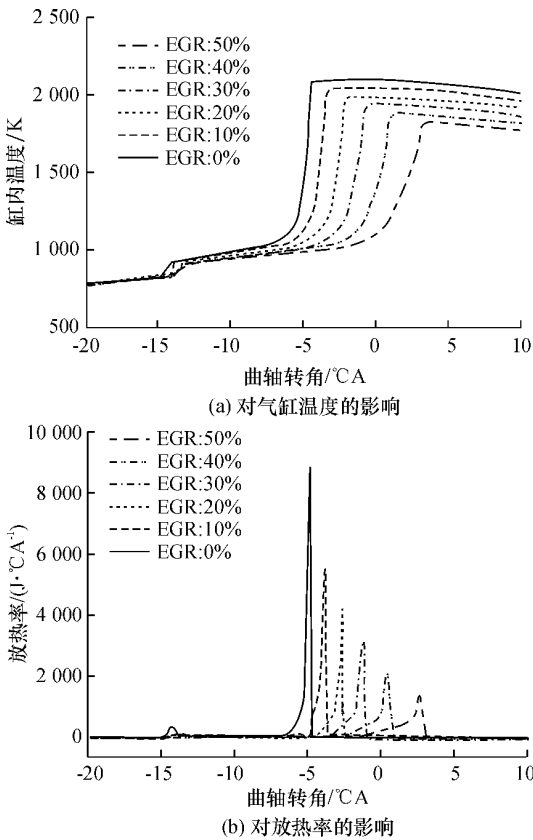


图 6 EGR 率对 HCCI 燃烧缸内温度和放热率的影响

图 7 为外部 EGR 率对 HCCI 燃烧低温放热始点和高温放热始点的影响. 如图 7 所示,EGR 和燃空当量比 ϕ 对低温放热始点和高温放热始点的影响不同: 由于燃空当量比增加使混合气吸热增多并造成缸内温度略有降低,所以随着燃空当量比增加,低温反应始点略有推迟; 而高温反应始点随燃空当量比增加而明显提前; 在相同燃空当量比下,EGR 率的增大使低温和高温放热始点均呈现推迟的趋势,其对高温反应的推迟作用要明显的多,当 EGR 从 0 变化到 60% 时,低温放热始点仅推迟不到 1 °CA,而高温反应则推迟 5 °CA 左右. 主要是因为外部 EGR 率的增大使整个混合气的比热增加,氧浓度降低,使滞燃期加长,反应速率减慢.

4 综合效应研究

考虑发动机实际运行工况,有效地控制柴油 HCCI 燃烧效率,拓宽发动机负荷运行范围,需要同时考虑发动机转速、气门重叠期、外部 EGR 等因素

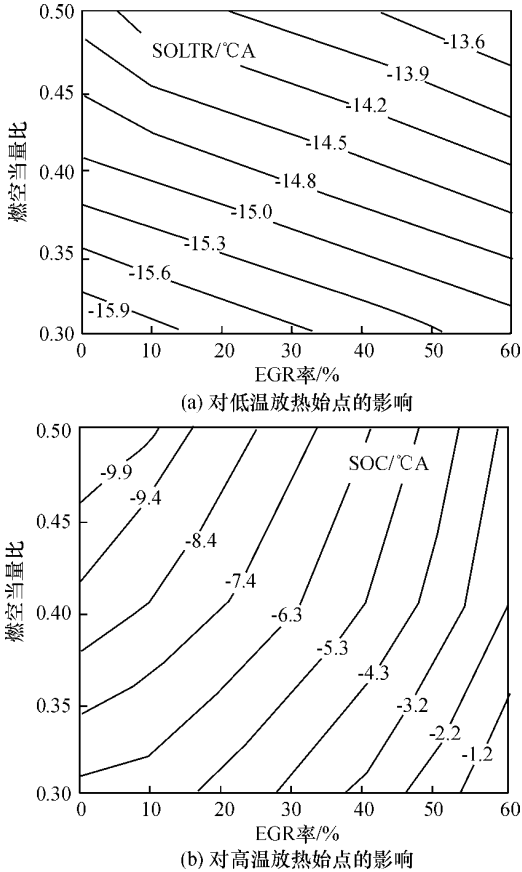


图 7 外部 EGR 率对 HCCI 燃烧低温放热始点 (SOLTR) 和高温放热始点 (SOC) 的影响

的影响,本研究工况固定转速 $n = 1\ 500\ \text{r/min}$,循环油量 $m = 0.050\ \text{g/循环}$,模拟气门重叠期、外部 EGR 对柴油 HCCI 燃烧高温放热始点控制的综合效应.

图 8 为气门重叠期和外部 EGR 对高温放热始点 (SOC) 控制的综合效应的模拟结果. 如图 8 所示,较大的气门重叠期和较小的外部 EGR,可以实现燃烧始点在压缩上止点之前,尤其当小负荷运行时,可以保证 HCCI 燃烧的稳定运行,扩展 HCCI 燃烧运行的负荷下限; 当逐渐减小气门重叠期和增大外部

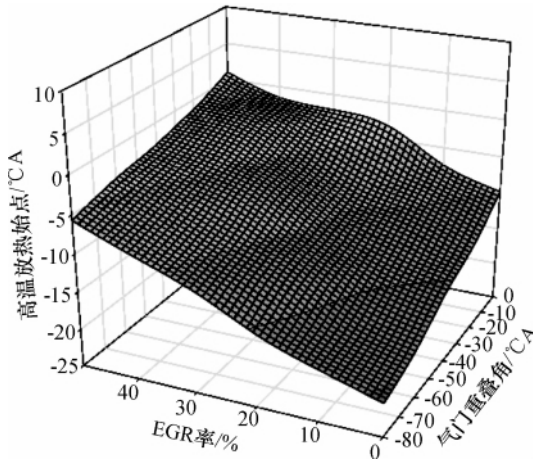


图 8 气门重叠期和外部 EGR 率对高温放热始点的综合效应

EGR 时,可以实现燃烧始点逐渐接近压缩上止点,尤其当大负荷运行时,可以保证燃烧相位得到有效控制,抑制燃烧爆燃的发生,并且获得更高的指示热效率,扩展 HCCI 燃烧运行的负荷上限.

5 结论

1) 所建立的 GT-Power 和 Chemkin 耦合仿真模型可以准确地模拟内部 EGR 和外部 EGR 对 HCCI 燃烧具有不同的作用,为实现柴油 HCCI 燃烧关键控制提供了理论分析依据.

2) 内部 EGR 影响缸内残余废气量和缸内温度,内部 EGR 增大,缸内温度增加,燃烧相位提前,放热速率也大幅增大,有利于扩展 HCCI 燃烧运行的负荷下限.

3) 外部 EGR 可以有效控制燃烧相位,在相同燃空当量比 ϕ 下,外部 EGR 对低温放热始点推迟影响不明显,但可以明显推迟高温放热始点和大幅降低燃烧速率,并降低压缩终点缸内温度,从而有利于扩展 HCCI 燃烧运行的负荷上限.

燃烧模拟研究表明内部 EGR 和外部 EGR 对 HCCI 燃烧具有不同的作用,为了实现燃烧相位的有效控制,可考虑内外 EGR 的结合效应影响,在 HCCI 燃烧的低负荷运转下,可以采用较大的内部 EGR 和较小的外部 EGR 保证燃烧的稳定运行,随着负荷的

增加,逐步减小内部 EGR 和增大外部 EGR,实现燃烧相位的有效控制,获得较高的指示效率.

参考文献:

- [1] Zhao Hua, Peng Z, Williams J. Understanding the effects of recycled burnt gases on the controlled autoignition (CAI) combustion in four-stroke gasoline engines [EB/OL]. <http://papers.sae.org/2001-01-3607>, 2001-09-24/2010-05-25.
- [2] Law D. Controlled Combustion in an IC-engine with a Fully Variable Valve Train [EB/OL]. <http://subscription.sae.org/content/2001-01-0251>, 2001-03-05/2010-05-25.
- [3] 王桢, 崔毅, 邓康耀. 柴油机内部 EGR 的数值模拟分析 [J]. 柴油机, 2007, 29(3): 13-16.
- [4] 孟彬, 沈季胜. EGR 对于控制 HCCI 燃烧着火时刻的仿真模拟 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 304-307.
- [5] Matsuo Odaka, Hisakazu Suzuki, Noriyuki Koike, 等. 均匀充量柴油燃烧的优化控制方法的研究 [J]. 国外内燃机, 2001, 33(5): 42-49.
- [6] 罗伟欢, 熊锐. 分段韦伯函数拟合 HCCI 燃烧放热规律的研究 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37(3): 15-18.
- [7] Seiser R, Itch H, Seshadri K, et al. Extinction and autoignition of n-heptane in counterflow configuration [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(20): 29-37.

Simulation of EGR Effects on Diesel HCCI Combustion Control

Zhai Zhao-liang, Xiong Rui, Li Guang-yao

(Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the Partition Webie Function, with the GT-Power and Chemkin software, a simulation test platform was set up for HCCI engines. The working process of single-cylinder HCCI test engines was simulated. Effects of internal and external EGR on Diesel HCCI Combustion were accurately researched. Experimental results show that internal and external EGR have different effects on Diesel HCCI Combustion and that the HCCI combustion phase can be effectively controlled if the factors of internal and external EGR are combined.

Key words: exhaust gas recirculation(EGR); diesel engine; homogeneous charge compression ignition(HCCI); combustion control; simulation