



EGR 对柴油机燃烧影响模拟

王立群, 闫 民

北京林业大学工学院, 北京 100083

摘要 废气再循环(EGR)作为控制缸内 NO_x 生成的一项技术已广泛应用在现代直喷柴油发动机上。但 EGR 对氮氧化合物(NO_x)、碳烟(Soot)排放的影响原因尚未被完全理解。为了全面分析 EGR 的特性,建立了基于 GT-POWER 的柴油机仿真模型。根据柴油机的基本结构,该模型为带有 EGR 系统的增压直喷柴油机一维流体动力学循环仿真模型。在分别固定进气压力和空燃比两种情况下,对 EGR 影响柴油机燃烧的特性进行了研究。结果表明,在恒定进气压力和 EGR 温度的情况下,随着 EGR 率的升高,缸内压力升高率减小,最高缸内爆发压力降低,燃烧放热始点推迟,燃烧峰值放热率升高。EGR 导致 Soot 升高燃油经济性降低。在恒定进气空燃比和 EGR 温度的情况下,随着 EGR 率的升高,缸内压力的升高使燃烧放热始点提前,废气的情性气体特性延缓燃烧成为次要因素。EGR 的加入使燃烧恶化放热率降低。缸内的燃烧温度降低,减少了 NO_x 的生成。小 EGR 率可以改善 Soot 的排放情况。所以在不同的边界条件下引入 EGR 的作用不同,在 EGR 控制策略中,利用控制进气空燃比的 EGR 控制方法并没有完全利用 EGR 特性,应该形成分别控制空气质量流量和 EGR 率的气路控制策略。在恒定 EGR 率的情况下,EGR 温度的升高缩短了燃烧滞燃期,燃烧始点提前放热率峰值降低。最终缸内气体温度升高, NO_x 排放升高,Soot 有轻微的改善,表明为了更好控制 EGR 系统,应对 EGR 温度进行控制。

关键词 废气再循环;仿真;燃烧;排放

中图分类号 TK421+.5

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)03-0100-05

Modeling of the Effects of EGR on Combustion of a Diesel Engine

WANG Liqun, YAN Min

School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Exhaust Gas Recirculation (EGR) is a common way to control in-cylinder NO_x production and is used in most modern direct injection diesel engines. However the influence of EGR on NO_x and Soot is not perfectly understood. In order to analyze the characteristics of EGR, a model of diesel engine based on the GT-POWER is established. Based on the basic structure of diesel engine, the model is a 1D fluid-dynamic engine cycle simulation model of TDI diesel engine with EGR system. The influences of EGR on combustion of the diesel engine are investigated in a constant inlet boost pressure and constant inlet air fuel ratio condition. In the condition of constant inlet boost pressure and constant EGR temperature, along with the rise of the EGR ratio, the rise ratio of the in-cylinder pressure reduces, the highest in-cylinder pressure drops, the start of combustion delays, the peak rate of heat release becomes higher. The EGR makes the Soot lifts and the Brake Specific Fuel Consumption comes down. In the condition of constant air fuel ratio and the EGR temperature, in the wake of the rise of EGR ratio, the in-cylinder pressure becomes higher, which makes the start of heat release shifting to an early time. The delay of heat release due to EGR is compensated by the rise of in-cylinder pressure. The characteristics of the inert gases in the exhaust gases become a secondary factor. EGR reduces the combustion efficiency. The rate of heat release becomes lower. The combustion temperature of in-cylinder comes down. The small EGR ratio can improve the emission. So, the effect of EGR at different boundary conditions is different. The control strategy of EGR with air fuel ratio as the controlling target is defective. One should adopt the control strategy with both inlet air mass flow and EGR ratio as controlling targets. In the condition of constant EGR ratio, the rise of EGR temperature shortens the ignition delay. The start of combustion shifts to an early time, and the rate of heat release comes down. The in-

收稿日期: 2009-09-21

作者简介: 王立群, 硕士研究生, 研究方向为林用车辆系统研究与设计, 电子信箱: w-l-q-175@163.com; 闫民(通信作者), 副教授, 研究方向为林用车辆系统研究与设计, 电子信箱: hoffmen@gmail.com

cylinder temperature and the emission of NO_x rise, however, the emission of Soot improves. Dynamic property and economical efficiency deteriorate. In order to make a perfect EGR control system, the EGR temperature should also be controlled.

Keywords exhaust gas recirculation; simulation; combustion; emission

随排放法规越来越严格,将要求柴油机制造商能够极大地降低 NO_x 和 PM 的排放。虽然后处理设备有了较大进步,但缸内净化技术仍是排放净化的重点方向。废气再循环 (Exhaust Gas Recirculation,EGR)作为一个被普遍关注的缸内减少 NO_x 的方法,提供了降低缸内燃烧温度的可能^[1-2]。由于 EGR 在排放控制方面的特殊作用,EGR 对排放的影响已经得到了广泛研究^[3-5]。

EGR 作为控制缸内 NO_x 生成的一项技术已广泛应用在现代直喷柴油发动机上。但 EGR 对缸内燃烧和排放有不同的影响以至于很难区分,例如对进气温度、氧浓度、放热延迟、缸内压力等。

EGR 对 NO_x 和 Soot 排放的影响原因尚未被完全理解。本研究运用仿真软件分析 EGR 对缸内燃烧状态参数的影响(如缸内压力、放热率等),进而得出对 NO_x 和 Soot 的作用机制。

1 实机模型的建立

1.1 实机参数

GT-POWER 建模的原型发动机是 VM R425DOHC,基本技术参数如下所述:型号为 VM R425DOHC,布置形式为直列

4 缸涡轮增压中冷柴油机,缸径 92mm,行程 94mm,排量 2.499L。最大功率 4000r/min 时为 105kW,最大扭矩 2000r/min 时为 340N·m,燃烧系统为高压共轨直接喷射系统,压缩比为 17.5:1。

1.2 计算模型建立

GT-POWER 是美国 Gamma Technologies 公司推出的一维空气动力学的仿真软件,广泛应用于发动机稳态和瞬态的仿真计算。该软件是一个模块化的仿真软件,包括发动机传热模型、燃烧模型、发动机的各个组成部分,适合于模拟分析各种发动机性能。本研究应用 GT-POWER 软件建立的模型包括发动机进排气管路、4 气门、涡轮增压系统、中冷系统、喷油器、汽缸和曲轴箱和发动机增压反馈 PID 控制系统,图 1 所示。

进行 EGR 仿真之前,必须对模型的准确性进行校准,校准的方式是与实验数值进行对比。通过对进气空气质量流量、发动机转矩、有效燃油消耗率等参数与实验值对比,误差控制在 5% 范围以内,满足了工程应用的要求。实验值与模拟计算值的校准对比如图 2~图 4 所示。可以看出,GT-POWER 软件能够准确模拟柴油机的工作状态,满足下一步的仿真分析。

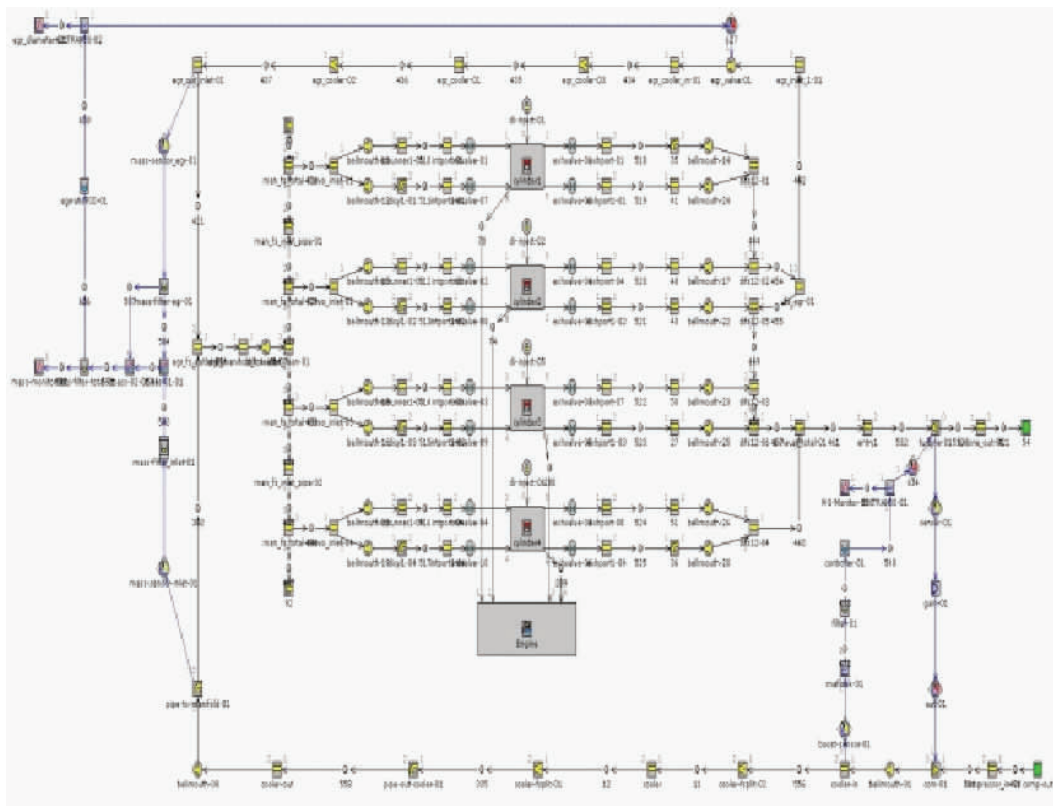


图 1 GT-POWER 模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of GT-POWER Model

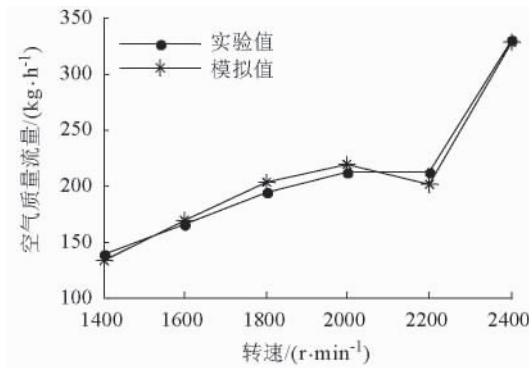


图2 进气流量对比

Fig. 2 Comparison of intake mass flow rate

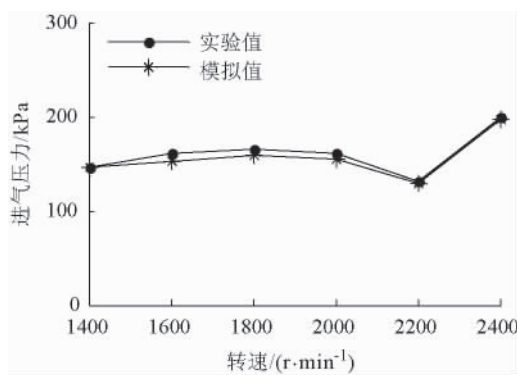


图3 转矩对比

Fig. 3 Comparison of torque

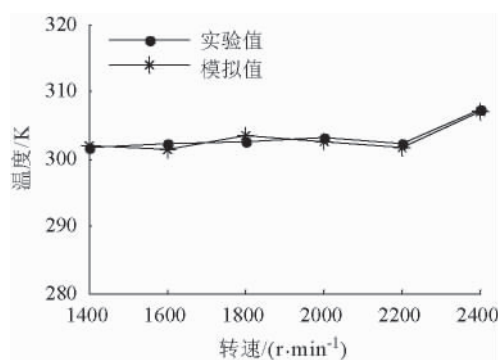


图4 有效燃油消耗对比

Fig. 4 Comparison of BSFC

2 计算结果及分析

在恒定转速和每循环供油量条件下对 EGR 进行了仿真计算,分析了分别固定进气压力、进气空气流量两种情况下,不同 EGR 率和 EGR 温度对缸内压力、放热率、 NO_x 、Soot 等的影响。

2.1 恒进气压力下 EGR 对燃烧的影响

根据模型 PID 调节控制器,控制涡轮增压器喷嘴截面,通过改变涡轮喷嘴的截面传递功率驱动增压器保持恒定的进气压力 p 。利用在恒定进气压力 p 的情况下,分析不同 EGR 率

和 EGR 温度对燃烧的影响。

2.1.1 恒 EGR 温度下 EGR 率对燃烧的影响

首先分析在恒定 EGR 温度条件下,不同 EGR 率对燃烧的影响。实际上,随着 EGR 率的升高,EGR 温度因废气量的升高而升高。为了分别研究 EGR 率和 EGR 温度,利用仿真软件调节 EGR 中冷器的参数,实现 EGR 温度的恒定。

图 5、图 6 给出了在恒进气压力和 EGR 温度条件下,选取 EGR 率为 0%、6%、12%、18%、24% 5 种条件下的缸内放热率曲线和缸压曲线。从图 5、图 6 可知,随着 EGR 率的升高,缸内压力升高率减小,最高缸内爆发压力降低,燃烧放热始点推迟。EGR 的加入降低了进气的 O_2 浓度,减缓了燃油和空气的混合。由于 EGR 率的升高导致燃烧的滞燃期变长,预混合燃烧部分增大燃烧峰值,放热率升高。但由于 EGR 中含有大量的三原子分子(CO_2 、 H_2O),这些分子相对具有较高的比热容,致使缸内有一个较低的燃烧温度,降低了局部火焰温度,同时抑制了 NO_x 的生成,而温度降低、油气混合减缓,使燃烧不充分,导致 Soot 升高、燃油经济性降低(图 7、图 8)。

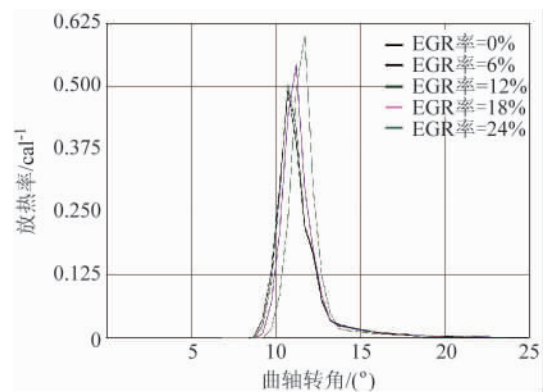


图5 恒增压压力、不同 EGR 率下的放热率曲线

Fig. 5 ROHR for different EGR rates, constant boost pressure

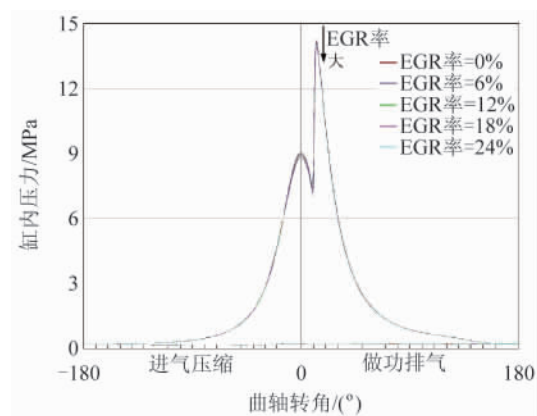


图6 恒增压压力、不同 EGR 率下的缸压曲线

Fig. 6 In-cylinder pressure for different EGR rates, constant boost pressure

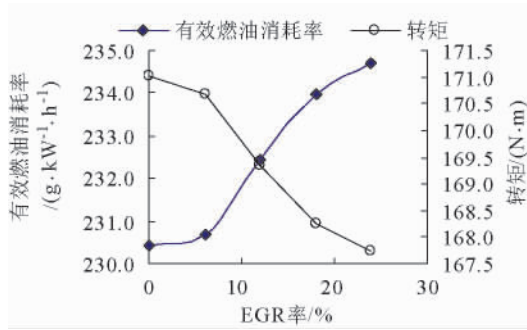


图 7 恒增压压力、不同 EGR 率下有效燃油消耗率和转矩

Fig. 7 BSFC and torque for different EGR rates, constant pressure

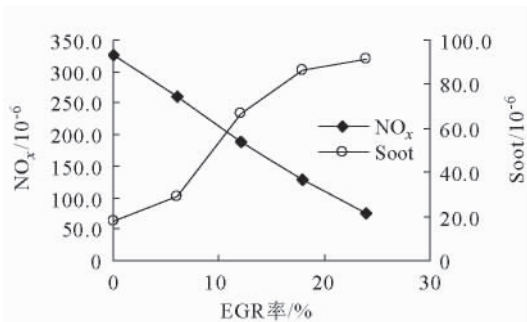


图 8 恒增压压力不同 EGR 率下的 NO_x 和 Soot 排放

Fig. 8 NO_x and Soot emissions for different EGR rates, constant pressure

2.1.2 恒定 EGR 率条件下 EGR 温度对燃烧的影响

使用模型的 PID 控制器调节 EGR 率保持恒定, 分析 EGR 温度在 350、380、410、440、47K 变化过程中, 相应的燃烧放热率情况、压力升高率和最高缸压的变化情况, 分析对应的发动机动力性和经济性变化。

如图 9、图 10 所示, 随着 EGR 温度的升高油气混合加速, 缩短了燃烧滞燃期, 减小了预混合燃烧阶段燃烧的燃油比例, 燃烧始点提前、放热率峰值降低。升高的温度降低了缸内空气的密度, 减少了与燃油和空气的混合, 降低了放热率。由于减少了与燃油混合的空气和滞燃期的缩短, 缸内压力升

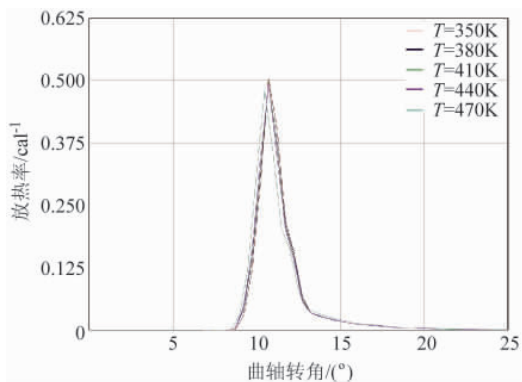


图 9 恒 EGR 率不同 EGR 温度下的放热率曲线

Fig. 9 ROHR for different EGR temperatures, constant EGR rates

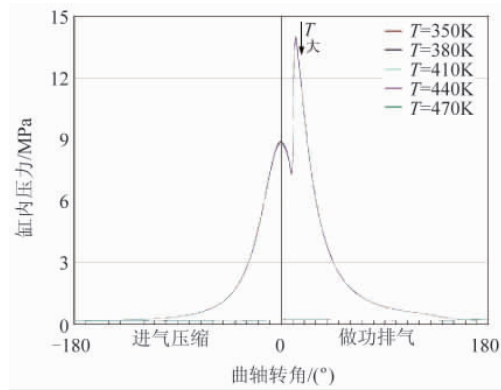


图 10 恒 EGR 率、不同 EGR 温度下的缸压曲线

Fig. 10 In-cylinder pressure for different EGR temperatures, constant EGR rates

高率降低、最高爆发压力下降。如图 11、图 12 所示, 由于 EGR 温度的升高提高了最终缸内气体温度, 导致 NO_x 排放升高, Soot 有轻微的改善, 同时动力性、经济性有轻微的恶化。

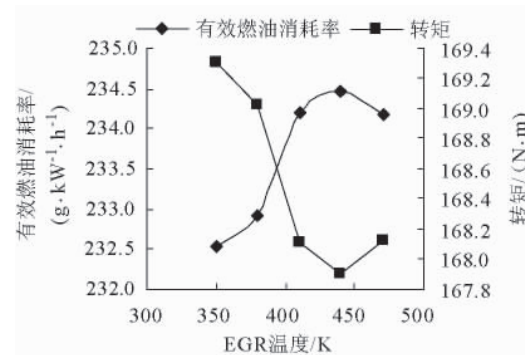


图 11 恒 EGR 率、不同 EGR 温度下有效燃油消耗率和转矩

Fig. 11 BSFC and torque for different EGR temperatures, constant EGR rates

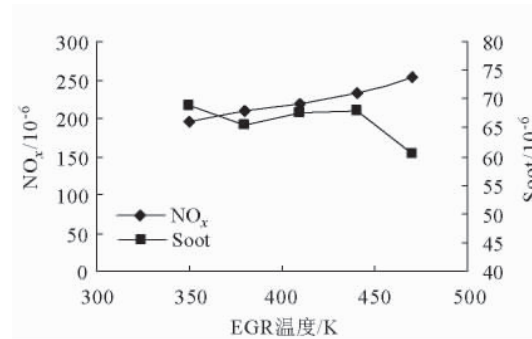


图 12 恒 EGR 率、不同 EGR 温度下的 NO_x 和 Soot 排放

Fig. 12 NO_x and Soot emissions for different EGR temperatures, constant EGR rates

2.2 恒定空燃比情况下 EGR 对燃烧的影响

建立恒定空燃比的仿真模型, 分析不同 EGR 率对燃烧的影响。选取 EGR 率分别为 0%、6%、12%、18%、24% 5 种条件下的缸内放热率曲线和缸压曲线(图 13、图 14)。可以看出, 在恒空燃比的情况下随着 EGR 率的升高, 缸内气体量增大, 压力升高。缸内压力的升高使燃烧放热始点提前, 补偿了由于

EGR 惰性引起的燃烧滞后,废气的惰性气体特性延缓燃烧成为次要因素。峰值放热率降低,由于 EGR 的加入使燃油和氧气的混合程度减小,燃烧恶化放热率降低。图 16 显示,EGR 率升高后, NO_x 有一个明显的降低,表明缸内的燃烧温度由于

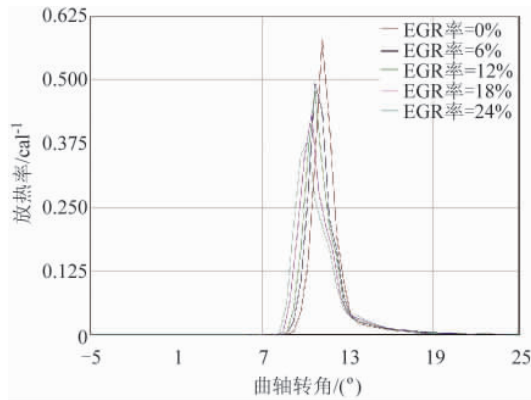


图 13 恒空燃比、不同 EGR 率下的放热率曲线
Fig. 13 ROHR for different EGR rates, constant AFR

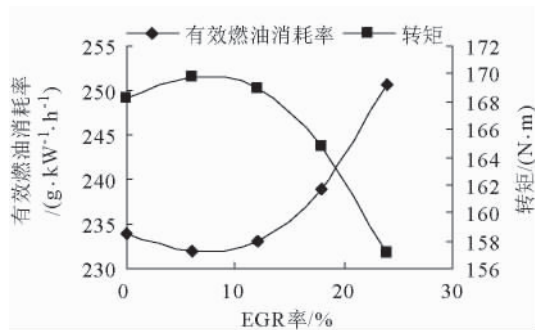


图 15 恒空燃比、不同 EGR 率下有效燃油消耗率和转矩
Fig. 15 BSFC and torque for different EGR rates, constant AFR

3 结论

建立的柴油机 EGR 系统一维模型能够对柴油机在不同转速、不同负荷时的工作情况进行模拟,与无 EGR 柴油机工作过程的模拟结果进行对比发现,其分析结论与柴油机 EGR 台架试验的结论相符。通过采用不同的 EGR 研究策略分析了 EGR 对燃烧和排放的影响。

1) 分别固定进气压力、进气空燃比两种情况下不同 EGR 率对燃烧影响的分析可知,EGR 对进气有稀释作用,对燃烧温度有降低作用,大幅改善了 NO_x 的排放,降低了发动机动力性经济性。小 EGR 率对 Soot 的影响较小,并在一定程度上改善 PM 的排放。

2) 在现在的 EGR 控制策略中,利用 EGR 稀释进气氧浓度控制空燃比改善排放的控制方法,并没有完全利用 EGR 惰性气体降低缸内燃烧温度的特性,应形成分别控制空气质量流量和 EGR 率的气路控制策略。

3) EGR 温度对燃烧的影响呈现不同于废气的特性,如提前燃烧始点,因此在发动机设计和标定过程中应对 EGR 的温度加以控制。

大比热容 EGR 的引入而降低,减少了 NO_x 的生成。而 Soot 随着 EGR 率升高有一个下降的趋势后保持不变,表明在固定空燃比的情况下,小 EGR 率可以改善 Soot 的排放情况。图 15 显示,EGR 的引入导致了动力性经济性的降低。

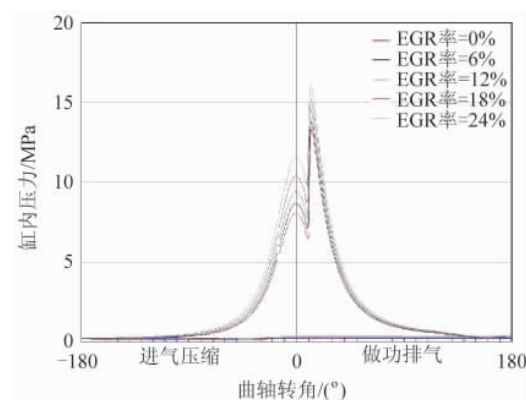


图 14 恒空燃比、不同 EGR 率下的缸压曲线
Fig. 14 In-cylinder pressure for different EGR rates, constant AFR

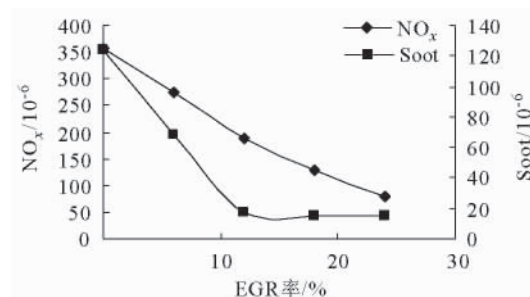


图 16 恒空燃比、不同 EGR 率下的 NO_x 和 Soot 排放
Fig. 16 NO_x and Soot emissions for different EGR rates, constant AFR

参考文献 (References)

- [1] Heywood J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [2] Zheng M, Reader G T, Hawley J G. Diesel engine exhaust gas recirculation—A review on advanced and novel concepts [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45: 883–900.
- [3] Jacobs T, Assanis D, Filipi Z. The impact of exhaust gas recirculation on performance and emissions of a heavy-duty diesel engine [R]. SAE Technical Paper Series, No 2003-01-1068. Warrendale, PA: SAE International, 2003.
- [4] 张煜盛, 常汉宝, 陆艺红. 排气再循环对柴油机性能影响的计算研究 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2001, 30(4): 1–4.
Zhang Yusheng, Chang Hanbao, Lu Yihong. *Small Internal Combustion Engine and Motorcycle*, 2001, 30(4): 1–4.
- [5] 陈上华, 王忠, 袁银南. EGR 对柴油机循环波动及燃烧过程的影响 [J]. 汽车工程, 2006, 28 (4): 343–345.
Chen Shanghua, Wang Zhong, Yuan Yunnan. *Automotive Engineering*, 2006, 28(4): 343–345.

(责任编辑 陈广仁)