

EGR 对汽油发动机油耗和排放影响的研究与验证

Research and verification on the effect of fuel consumption and emissions of EGR gasoline engine

张学恩¹, 龙永生², 王伟民³, 姜楠⁴

(东风汽车公司技术中心)

Zhang XueEn¹, Long YongSheng², Wang WeiMin³, Jiang Nan⁴

摘 要: 利用一维仿真分析软件 GT-power 对某款双顶置凸轮轴、带有进气 VVT 的汽油机在不同转速和负荷下的经济性和排放性能进行了仿真分析, 并对发动机在不同 EGR 率下的经济性和 NOx 排放进行了预测。最终在台架试验中对分析的工况点进行试验验证。结果表明: 采用 EGR 后可以降低发动机的油耗, 而且对于中负荷的工况效果较为明显(最高可节油 6g/kw*h), 并能大幅度降低 NOx 排放。

关键词: EGR; GT-power; 经济性; 排放

Abstract: The fuel consumption and emissions of a DOHC and in-VVT gasoline engine in different speed and load were predicted in different EGR ratio by using the 1D simulation software GT-Power. All cases were verified on test bench after EGR was used. Experimental results showed that the fuel consumption can be reduced especially in middle load case (max: 6g/kw*h), and emissions can also be reduced.

Key words: EGR; GT-power; fuel consumption; emissions

1 前言

废气再循环(EGR)是将一部分废气引入进气系统, 与新鲜空气混合后一起进入气缸燃烧的工作模式。引入 EGR 后可以改善燃烧过程, 使燃烧更加柔和。由于在特定工况下减小了泵气损失, 因此达到了节油的效果。而且由于废气中含有比热容较大的水蒸气和二氧化碳等三原子气体分子, 可以吸收较多的反应热, 有效地降低气缸内的最高燃烧温度, 最终减少 NOx 的生成^[1]。

本文在一台汽油发动机上进行了五种典型工况下不同 EGR 率的动力性和 NOx 排放的预测研究及试验验证, 最终通过仿真与试验相结合的方式, 从泵气功、燃烧特性和缸内温度等方面解释了 EGR 技术对汽油发动机油耗和 NOx 排放影响的原因。

2 研究对象与工具

2.1 研究对象

本文的研究对象为一台双顶置凸轮轴、带有进气 VVT 的汽油机, 主要参数、指标如表 1 所示。

表 1 试验发动机的基本技术参数

类型	四冲程汽油机
排量/L	1.556
燃烧室	屋顶型
压缩比	10.3
缸径×行程/mm×mm	74×90.5
额定功率/kw/rpm	85/6000
最大扭矩/N·m/rpm	145/4200
全负荷最低油耗/g/kw·h	265

2.2 系统结构

系统结构如图 1 所示，从排气总管处引出废气，经过 EGR 冷却器后再引入进气系统。引出的废气量通过 ECU 控制执行机构来实现。使用 Horiba 7100DEGR 设备对排放进行测量。

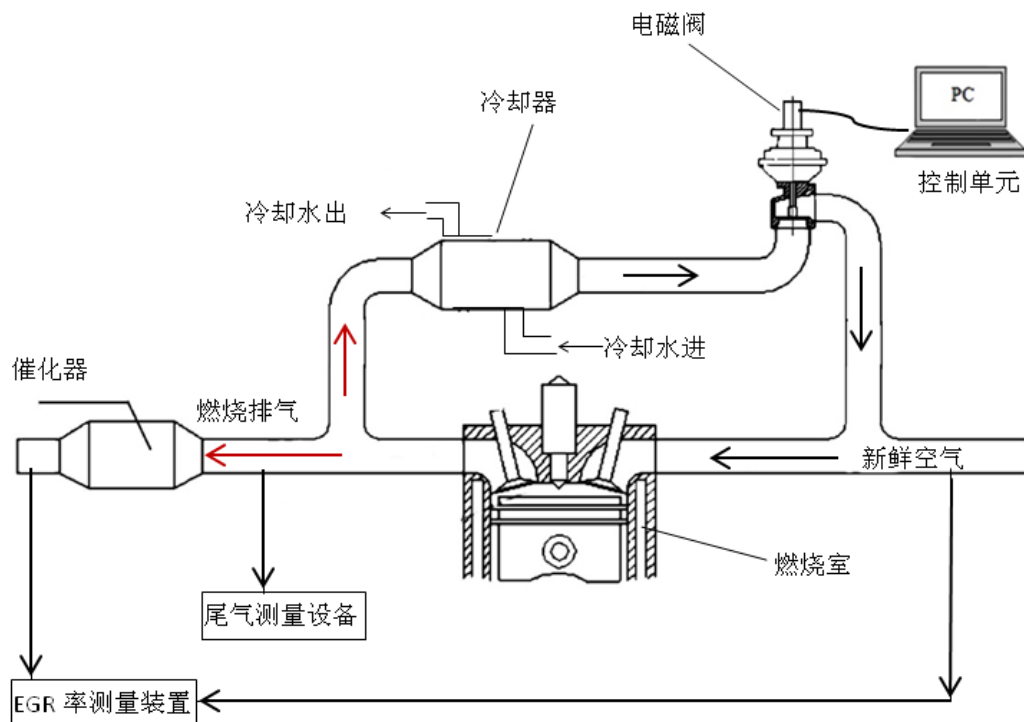


图 1 EGR 回路结构

2.3 仿真模型

使用仿真软件 GT-power 建立的一维模型如图 2 所示。左侧为进气侧，右侧为排气侧，中间为进、排气门和四个气缸。

模型中的进、排气歧管根据三维几何结构简化而来，进、排气门升程和型线与实际值相同。由于本文的研究内容主要是 EGR 对性能的影响，因此没有对 VVT 的角度进行多方案的对比，进气 VVT 角度使用的是未添加 EGR 模块时发动机的最优 VVT 角度。

模型中使用了较为准确的预测型燃烧模型 SiTurb 模型，该模型可以在一维模型中添加燃烧室的 3D 几何文件，如图 3 所示，从而更加准确地预测发动机的燃烧状况。该燃烧模型的主要输入参数为

点火时刻, 由于不同的 EGR 率会对燃烧状况产生不同的影响, 因此需根据不同的 EGR 率, 调整点火时刻, 使得最高燃烧压力出现在上止点后 $12\sim 15^\circ$, 这样得到的发动机燃油消耗率最低^[2]。

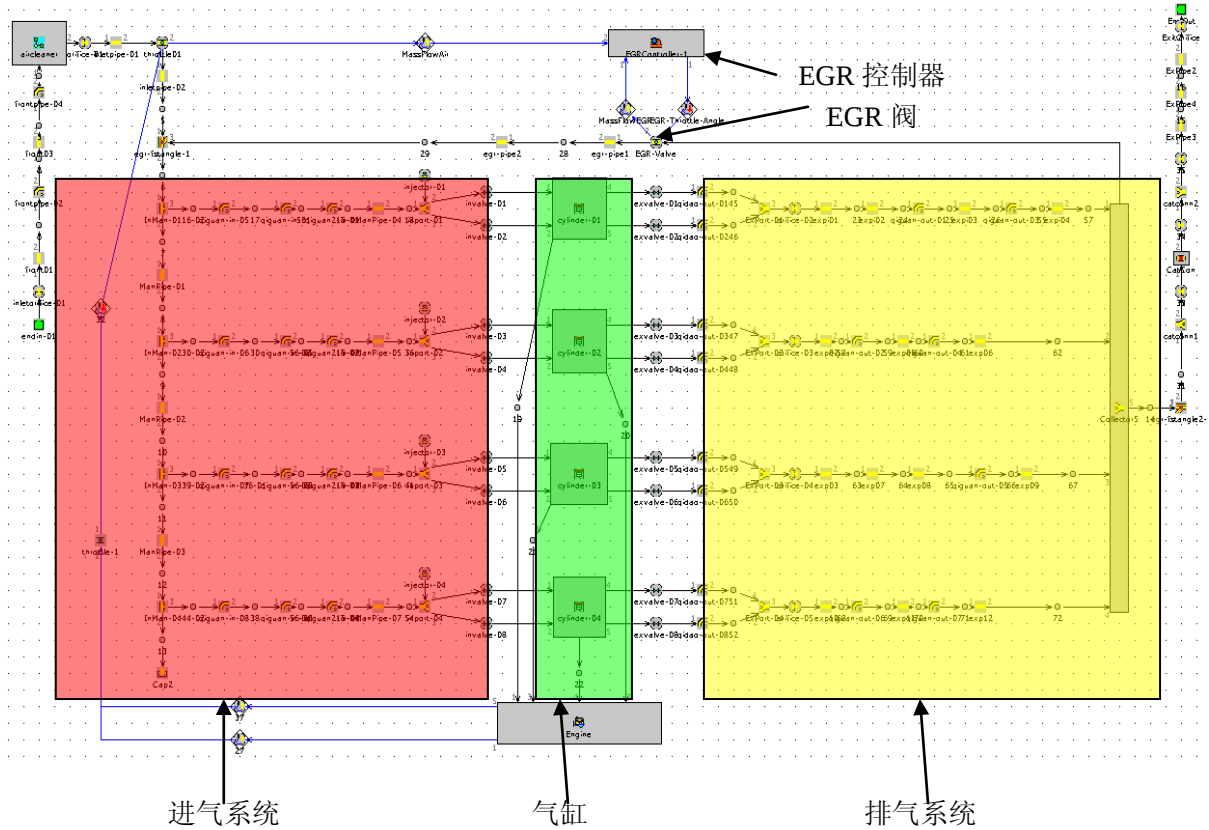


图 2 带 EGR 发动机的一维仿真分析模型

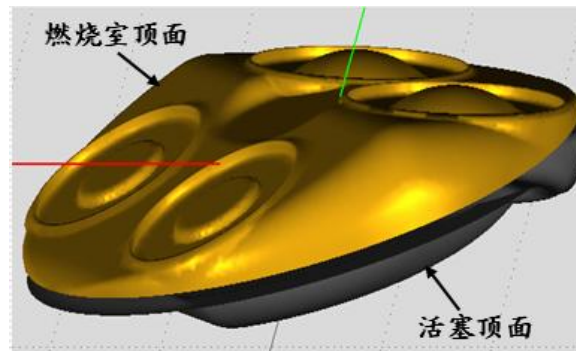


图 3 燃烧室几何形状

2.4 试验工况

根据发动机常用转速及负荷, 分别选取四种工况进行研究, 具体如表 2 所示, 试验现场如图 3 所示。在研究中为了避免 EGR 率过大时对发动机燃烧产生不稳定的影响, 所分析的 EGR 率均在 15% 以下。

EGR 率的定义为^[3]:

$$EGR率 = \frac{M_{egr}}{M_{egr} + M_{air}}$$

其中： M_{egr} 为重新进入进气系统的废气质量流量，kg/s；

M_{air} 为通过节气门进入气缸的新鲜空气，kg/s；

表 2：研究工况列表

工况	转速/rpm	负荷/bar
工况 1	2000	2
工况 2	2000	5
工况 3	3000	3
工况 4	3000	11

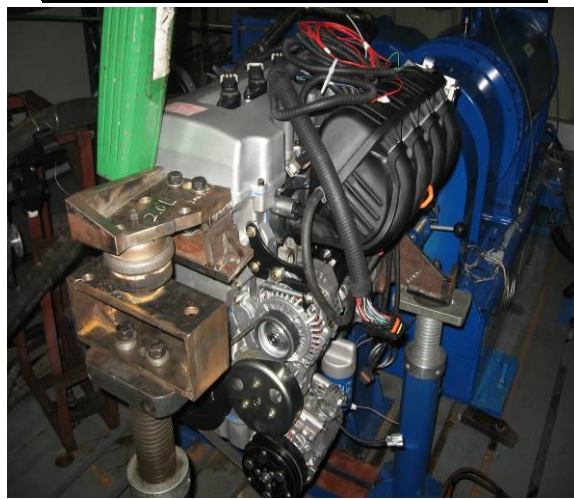


图 4 试验现场图片

3 EGR 对油耗的影响

仿真预测的不同工况下的比油耗随 EGR 率变化的趋势如图 5 中的点-方块线所示，图中也显示了实验测量的结果，用点-三角线表示。从此结果可以看出，仿真预测结果与试验结果绝对值有所差别，但整体趋势及拐点出现的位置完全一致。产生差异的原因经分析认为是由于实际发动机上部分负荷的机械摩擦比外特性时要小，而仿真计算时由于缺乏发动机在不同热负荷下的机械摩擦数据，因此模型中部分负荷的机械摩擦假定和外特性时一样，导致仿真预测的油耗偏大。而且负荷越低，机械摩擦所占的比重越大，仿真与试验值的差别也越大。

随着 EGR 率的增加，可以适当降低发动机的比油耗。所研究的工况中以 2000rpm/5bar 的工况的油耗改善情况最为显著，可以降低 6g/kw·h，约 3%的比油耗。在低负荷和高负荷的工况下，加入 EGR 对油耗也有所改善，但效果不甚明显。

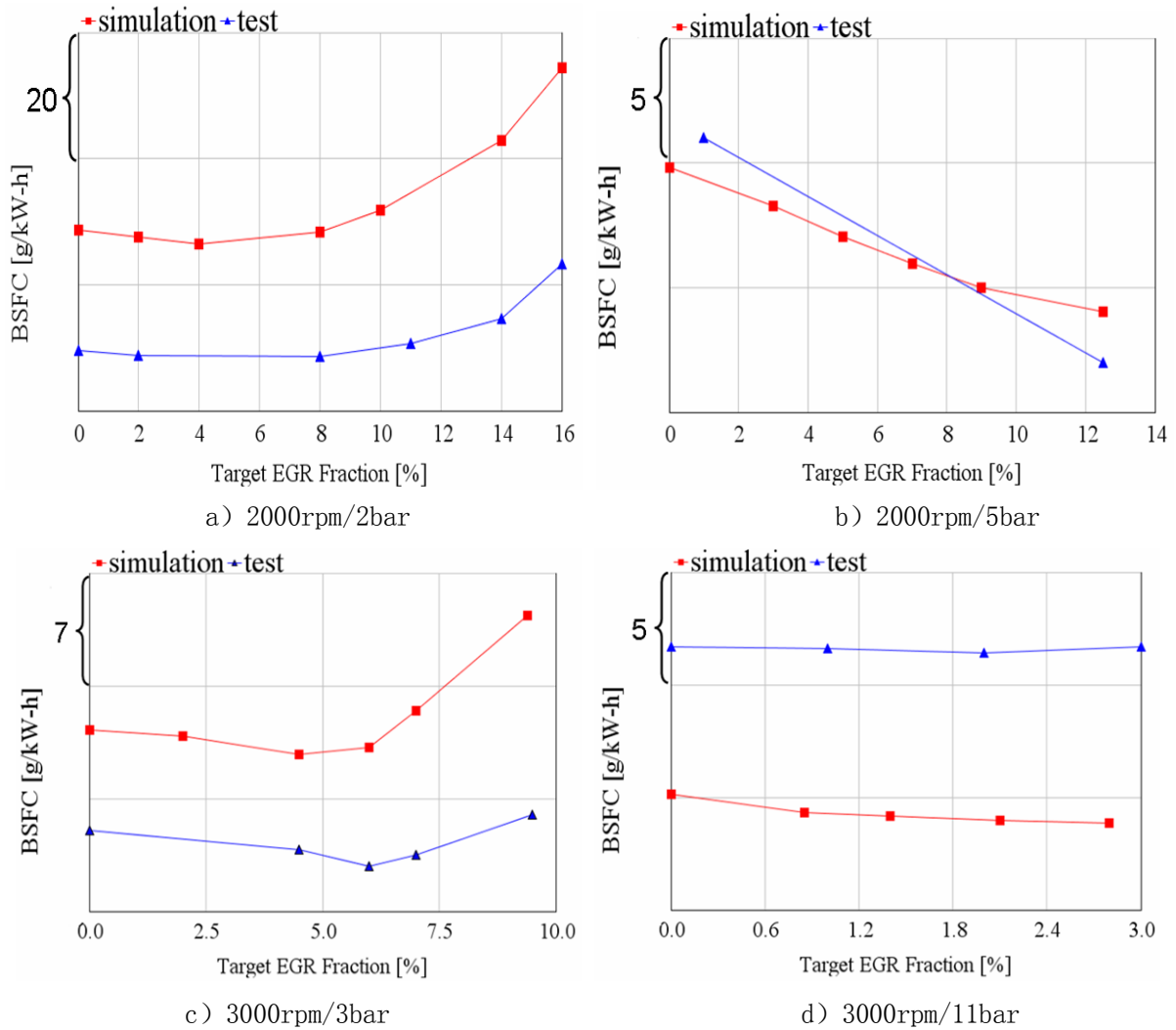


图 5 不同工况下 EGR 率对比油耗的影响

以 2000rpm/5bar 的工况为例，分析 EGR 对经济性有利的原因。从图 6 可以看出，随着 EGR 率的增加，废气在进气系统中所占的比重也逐渐增加，为了保证相同的动力输出，需要加大节气门开度，最终降低了泵气损失，如图 7 所示。

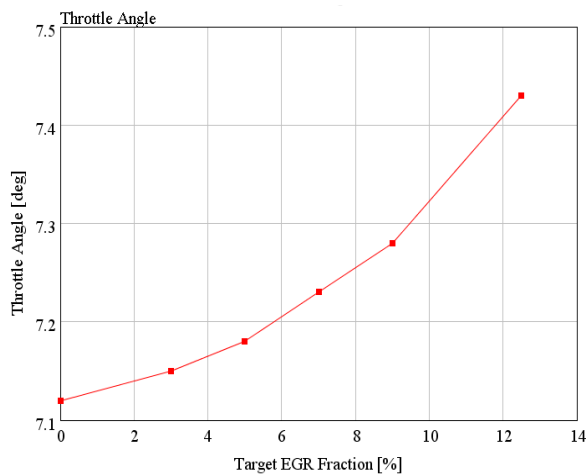


图 6 不同 EGR 率下的节气门开度

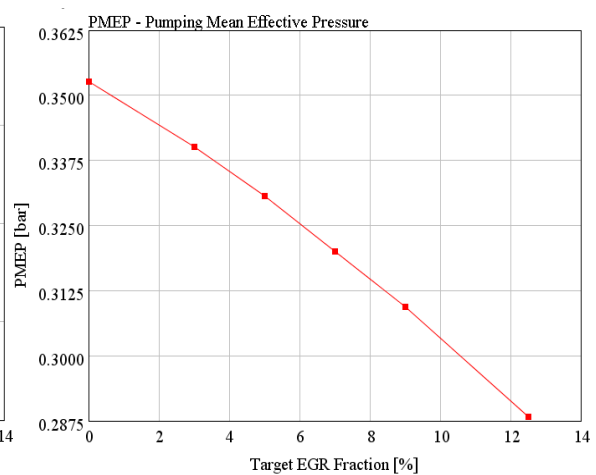


图 7 不同 EGR 率下的泵气损失

随着 EGR 率的增加, 废气所占的比重也逐渐增大, 减缓了燃烧反应速率, 为保证最大缸内压力出现的时刻在上止点后 $12\sim 15^\circ$ 范围内, 通过调整点火时刻来实现, 最终达到降油耗目的。

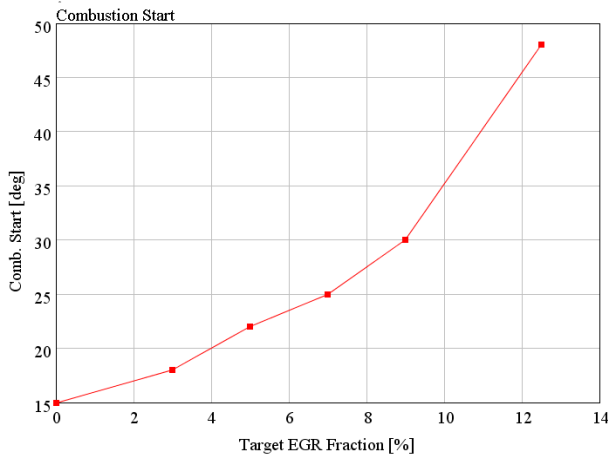


图 8 点火时刻变化趋势

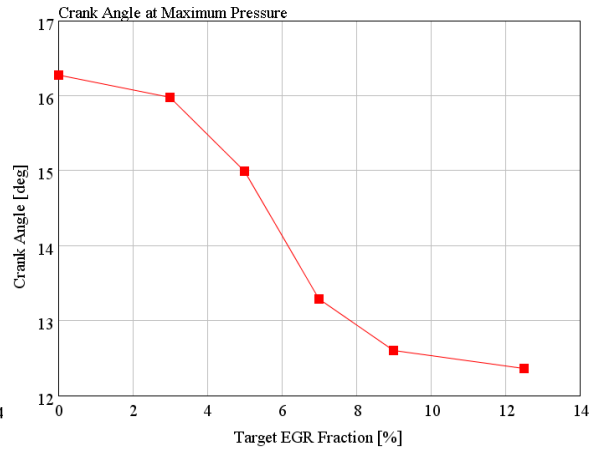


图 9 最大缸内压力出现时刻变化趋势

4 EGR 对 NO_x 排放的影响

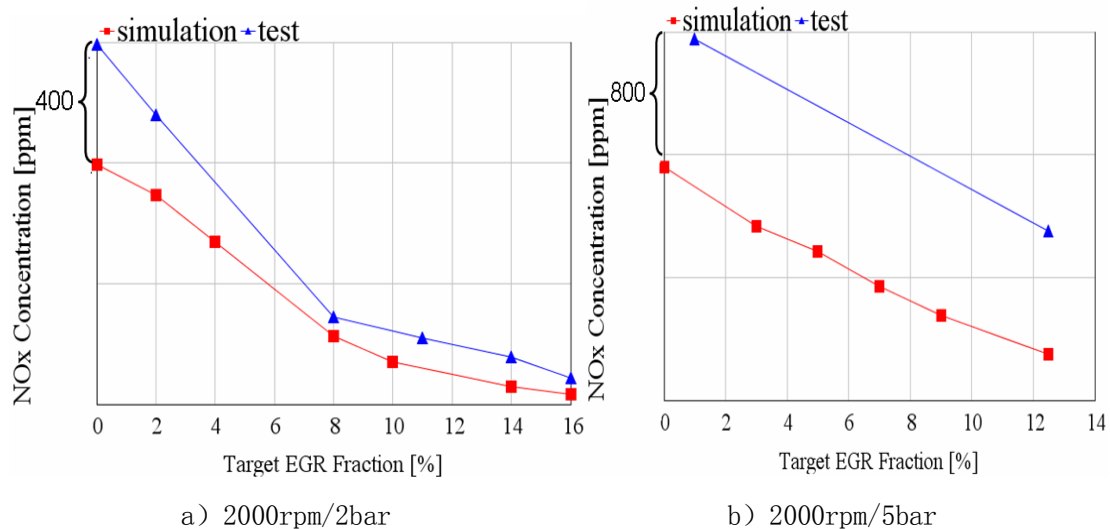
仿真预测的 NO_x 排放的趋势与试验结果一致, 但绝对值均小于试验结果, 两者对比如图 10 所示。这是由于仿真模型中 NO_x 的生成机理只有一种^[4]:



影响以上反应速率和数量的因素主要是温度和压力, 随着温度和压力的降低, NO_x 的生成也会逐渐降低。

然而真实发动机上 NO_x 的形成机理却不只一种, 因此在相同的条件下得到的试验值较大。3000rpm/11bar 的工况由于设备问题没有试验值, 仅将仿真结果列出。

随着 EGR 率的增加, NO_x 排放逐渐降低, 由仿真分析结果可认为主要是由于缸内最高温度逐渐降低所致, 如图 11 所示。



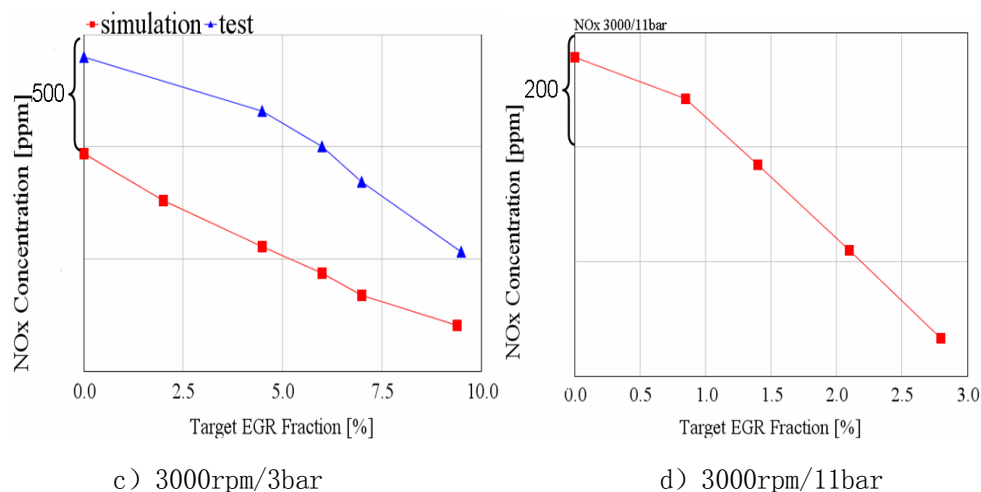


图 10 不同 EGR 率下 NOx 的排量

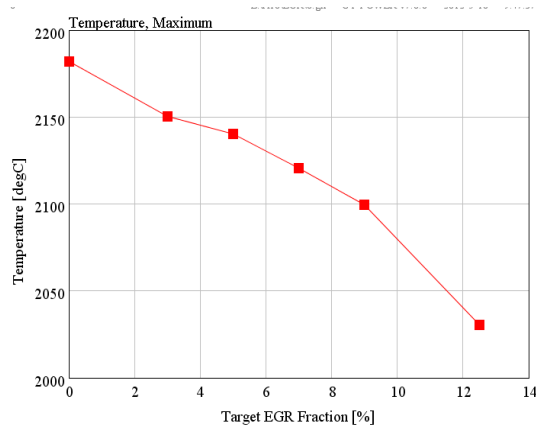


图 11 缸内最高温度变化趋势

5 结论

- (1) 采用 EGR 有利于降低发动机油耗，在中负荷时的效果最为明显，在本研究所使用的发动机上可实现最高降低 3% 的油耗。
- (2) 采用 EGR 后降低油耗的机理是通过减小泵气损失，并改善燃烧特性，改善冷却损失，降低排气背压。
- (3) 采用 EGR 后降低了缸内最高温度，可有效降低 NOx 的排放。

参考文献

- [1] 姚春德 敬章超等. 冷却废气再循环对发动机性能影响的试验研究. 汽车工程, 2003, 6: 537 ~ 540.
- [2] 周龙保. 内燃机学. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [3] 李从跃, 张志永, 董光宇, 李理光. EGR 和增压对 HCCI 汽油发动机燃烧影响的数值模拟. 中国内燃机学会 2009 年学术年会暨中小功率柴油机分会、基础件分会联合学术年会论文集. 同济大学出版社, 2009. 518 ~ 523.
- [4] GT-SUITE User Guide, 2006.