

低压 EGR 对汽油机高速全负荷的燃烧及排放特性的仿真研究

Simulation study on combustion and emission of gasoline engines by LP

EGR to high speed and full load condition

丁宁，徐政，陈明，张小矛，杨洋，陈曦，林长林

(上海汽车集团股份有限公司技术中心/上海市汽车动力总成重点实验室，上海 201804)

摘要：为了深入研究低压 EGR 技术对汽油机高速全负荷缸内燃烧及排放的影响。利用 Converge 软件模拟了 5500 r/min 外特性这个典型工况。对比分析了 EGR 对于缸内流动、燃烧及污染物排放的影响。结果表明：EGR 对于流动影响比较小；燃烧反应速度降低，点火滞燃期和燃烧持续期显著增加。同时，可以减少燃油加浓量，有利于 HC 和 PN 的排放。

关键词：低压 EGR；燃烧；排放；点火滞燃期；燃烧持续期

Abstract: In order to study on the influence of LP EGR to the combustion and emission of gasoline engines. The typically work condition (5500 r/min, WOT) are simulated by converge code and In-cylinder flow, combustion and emission are compared. The results indicate that EGR has very little influence on in-cylinder flow; it could reduce the combustion rate and enlarge the ignition delay and combustion duration evidently. At the same time, it could decrease the fuel consumption, it's better to HC and PN emissions.

Key words: LP EGR; combustion, emission, ignition delay, combustion duration

1 概述

近年来，面对着能源危机、环境问题的日益严重，同时新能源技术也带来了巨大的冲击，汽油机的油耗和排放越来越受到业界的广泛关注。目前如果不增加新技术，仅仅通过台架标定等传统方法的调整已经不能够满足日益严格的油耗和排放法规。EGR（废弃再循环）作为以往在柴油机上广泛使用的技术，逐渐开始在汽油机上研究和应用^[1-5]。按照其布置方式的不同，又可以分为高压 EGR 技术和低压 EGR 技术，两种技术又各有其特点。

我国最早通过 CFD 方法进行汽油机缸内燃烧研究的主要是各大高校。其中吉林大学利用 Fire 软件对一台带有 EGR 系统的 GDI 汽油机自进气冲程开始至排气门打开阶段进行了数值仿真，研究了均质燃烧条件下 EGR 率和 EGR 条件下过量空气系数 λ 对缸内燃烧及排放的影响^[6]；上海交通大学利用 Fire 软件模拟了某国产发动机的燃烧与排放，分析了 EGR 对发动机燃烧与排放的影响^[7]；同济大学进行了进气 VVT 对低压 EGR 汽油机油耗影响的研究^[8]；天津大学基于内燃机缸内压力波动方程研究了 EGR 对汽油机爆震特性的影响^[9]。这些工作虽然对 EGR 的缸内燃烧研究起到了一定的推动和指导作用，但是研究多偏重于单一工况的机理研究。本文着重对采用低

压 EGR 的汽油机两个特征工况进行 CFD 对比研究，特别分析了是否引入 EGR 对于每个工况下汽油机缸内流动、燃烧、排放特性的影响。为提高汽油机的燃油经济型，减少泵气损失，降低 NO_x 和碳烟排放提供了重要理论指导。

2 仿真平台建立

2.1 几何模型与网格划分

本文所研究的均质直喷汽油机排量是 1.5L，该机为直列 4 缸、增压水冷、电控共轨、中置喷射汽油机，其喷射压力为 350bar，压缩比为 11.5，喷孔数为 6 个。该发动机燃烧系统几何模型如图 1 所示。计算所采用的基础网格是 1mm，对缸内的速度场、温度场采用了自适应加密技术，最大网格量是 80 万。同时对于进气道、缸壁、活塞、进排气气门、火花塞、喷雾油束等区域进行网格加密。

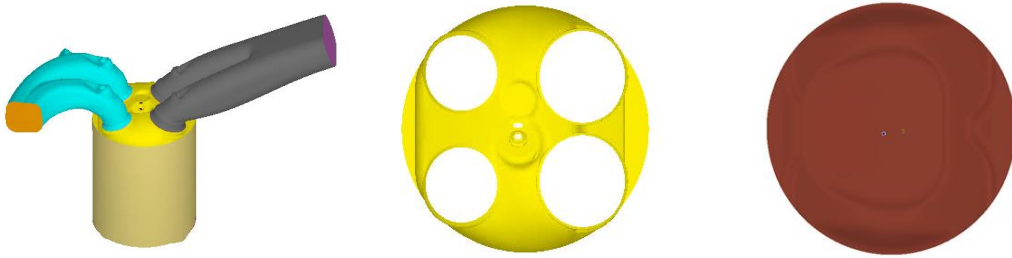


图 1 发动机燃烧系统几何模型

2.2 边界条件与模型设置

本文三维缸内计算的研究范围主要是直喷汽油机的进气、压缩、燃烧冲程，即从进气门打开开始到排气门打开结束。计算的进、排气压力温度瞬态边界条件来自于 GT_Power 软件。三维 CFD 计算采用了通用流体软件 Converge2.3，软件中计算模型的设置见表 1。

表 1 计算模型设置

项目	类型
湍流模型	Standard k-ε Model
喷雾破碎模型	KH-RT Model
液滴蒸发模型	Frossling Model
碰壁模型	Wall Film Model
燃烧模型	SAGE detailed chemistry solver
NO _x 排放模型	Extended Zeldovich NO _x Model
Soot 排放模型	Hiroyasu Soot Model

3 研究方案建立

3.1 研究工况

选取了低压 EGR 在发动机运行当中的重要特征点进行针对性的分析，分别采用 EGR 率是 0%和

6.45%的方案进行了缸内流动、油气混合、燃烧及污染物生成过程的 CFD 仿真研究，并开展了对比分析，具体的研究方案设置如表 2 所示。

表 2 研究方案

项目	方案 1	方案 2
转速/(r.min ⁻¹)	5500	5500
负荷/MPa	外特性	外特性
EGR 率	0%	6.45%
喷油量/mg	-	-16.7
Lambda	-	+13.8%
喷油起始角/°CA ATDC	380	380
喷油持续期/°CA ATDC	555	524.3
点火时刻/°CA ATDC	-10.44	-14.32

3.2 试验验证

表3为各方案的CFD模拟计算缸压最大值与发动机台架试验缸压最大值的比较。各方案偏差均控制在5%以内，这说明CFD模拟可信度比较高。

表 3 试验验证

项目	方案 1	方案 2
仿真缸压/MPa	83.91	81.44
试验缸压/MPa	83.19	80.57
偏差/ %	0.86	1.07

4 仿真结果及分析

4.1 EGR 对流动的影响

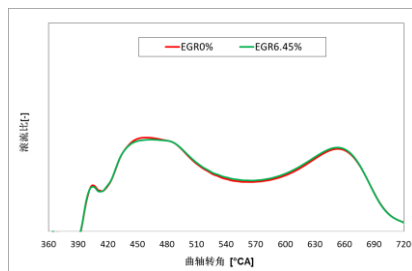


图 2 缸内滚流比曲线

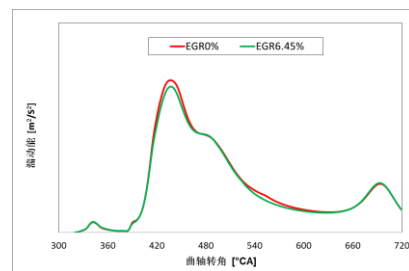


图 3 缸内湍动能曲线

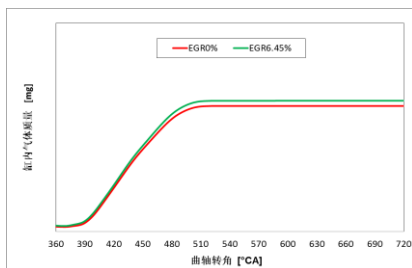


图 4 缸内气体质量曲线

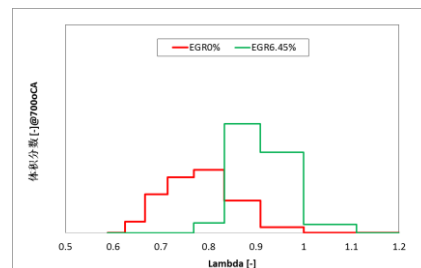


图 5 缸内混合气体积分数

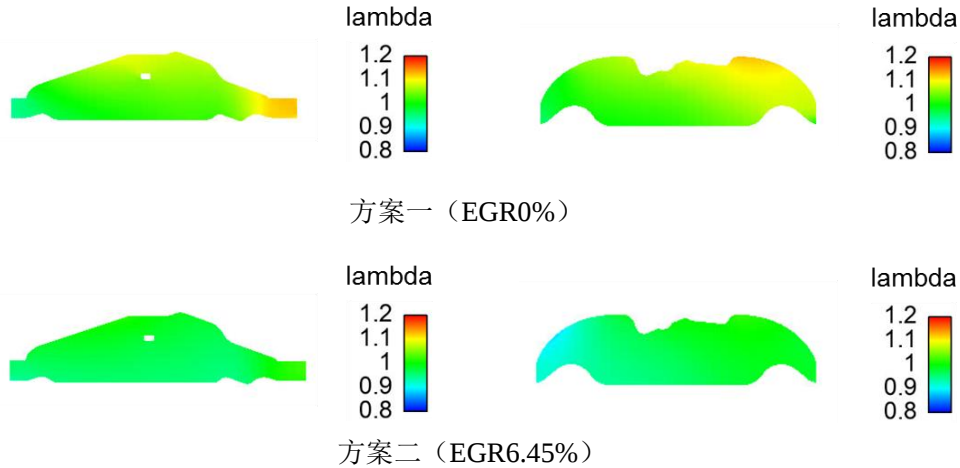


图 6 缸内气体混合均匀度 (700°CA)

由图 2 和图 3 可知, 在相同的工况下, EGR 率的变化对于缸内的滚流比和平均湍动能影响较小。缸内的流动特性主要受燃烧系统的设计影响。在发动机的功率点, 通常采用缸内燃油加浓的方法来控制发动机燃烧和排气温度。考虑到 EGR 对降低缸内温度的效果, 可以减少加浓量。本文 EGR0%的燃油循环喷射量为 60.623mg, EGR6.45%的燃油循环喷射量为 50.508mg, 加浓量明显减少了。由图 4 可知, 在压缩行程, EGR0%的缸内气体量为 729mg, EGR6.45%的缸内气体量为 753mg。除去废气, 实际进入缸内的新鲜空气量 EGR0%为 722mg, EGR6.45%反而少, 为 700 mg, 这就和加浓量的趋势吻合。由图 5 可知, EGR6.45%的缸内气体油气混合更均匀, 主要是由于进气量增加促进了缸内流动, 使得混合加强, 还有加浓量减少, 燃油更容易扩散。图 6 为点火时刻附近过火花塞截面的 Lambda 分布对比图。从图中可知, EGR6.45%的缸内气体油气混合更均匀, 应证了图 5 的结论。

4.2 EGR 对燃烧的影响

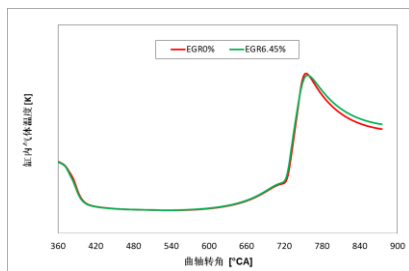


图 7 缸内气体温度

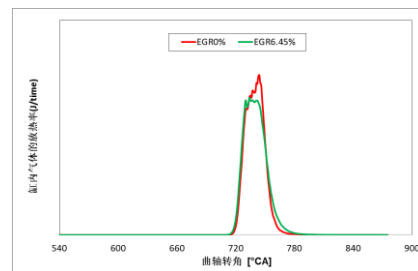


图 8 缸内气体的放热率

由图 7-8 及表 4 可知, 缸内气体压力方面, EGR0%和 EGR6.45%的相差不多; 缸内气体温度方面, 虽然 EGR6.45%比 EGR0%燃烧最高温度低了 26K, 但是燃烧平均温度却是 EGR6.45%高。通入 EGR 对于缸内温度降低没有起到明显作用, 主要是因为 EGR6.45%的加浓量较小, 燃油汽化吸热量减少, 抵消了 EGR 的作用。缸内气体的放热率方面, 很显然 EGR6.45%点火早, 放热早, 放热率的峰值略小于 EGR0%。

图 9 为高速全负荷工况的缸内火焰传播对比。由于点火早，在 -5°CA ATDC 时，EGR6.45%的火核发展的比较大；但是由于其传播速度慢，到 5°CA ATDC 时，EGR0%和 EGR6.45%火焰面就基本一致了。

由表 4 可知，EGR0%的点火时刻在上止点前 10.5°CA ，而 EGR6.45%的点火时刻相应的提前，在上止点前 14.3°CA ，加入 6.45%的 EGR 气体可以提高燃烧稳定性。EGR6.45%的燃烧滞燃期比 EGR0%长 2.6°CA 。关于 C10-C50 的燃烧，EGR6.45%与 EGR0%相当；而 C50-C90 的燃烧，EGR0%为 11.3°CA ，EGR6.45%为 14°CA ，主要是因为 EGR 气体阻滞火焰的传播。

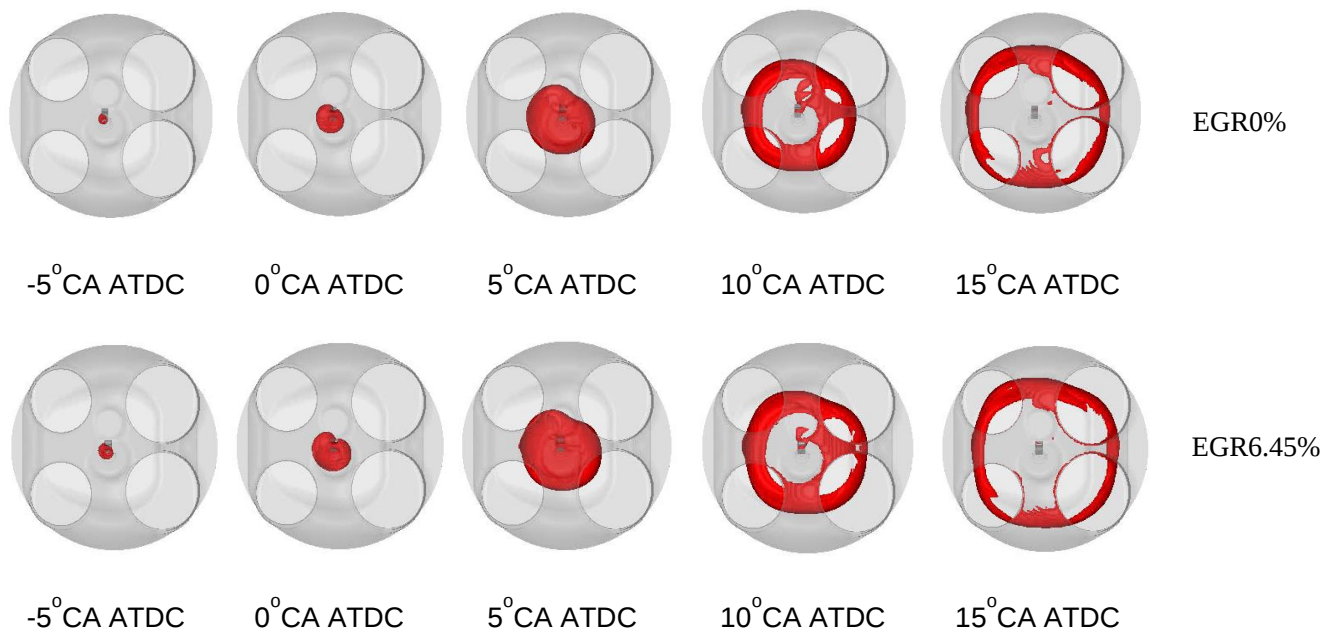


图 9 高速全负荷工况的缸内火焰传播对比

表 4 高速全负荷工况的燃烧对比

	EGR0%	EGR6.45%
点火时刻 ($^{\circ}\text{CA}$)	-10.5 ATDC	-14.3 ATDC
C10 ($^{\circ}\text{CA}$)	7.2 ATDC	6 ATDC
C50 ($^{\circ}\text{CA}$)	18.5 ATDC	18 ATDC
C90 ($^{\circ}\text{CA}$)	29.8 ATDC	32 ATDC
Ign-C10 ($^{\circ}\text{CA}$)	17.7	20.3
C10-C50 ($^{\circ}\text{CA}$)	11.3	12
C50-C90 ($^{\circ}\text{CA}$)	11.3	14
最大缸压 (bar)	83.91	81.44
最大温度 (K)	2303	2277

4.3 EGR 对排放的影响

表 5 高速全负荷工况的排放对比

	EGR0%	EGR6.45%
HC@EVO (mg)	0.144	0.01
NO _x @EVO (mg)	0.0596	0.24
Soot@EVO (mg)	0.135	0.099

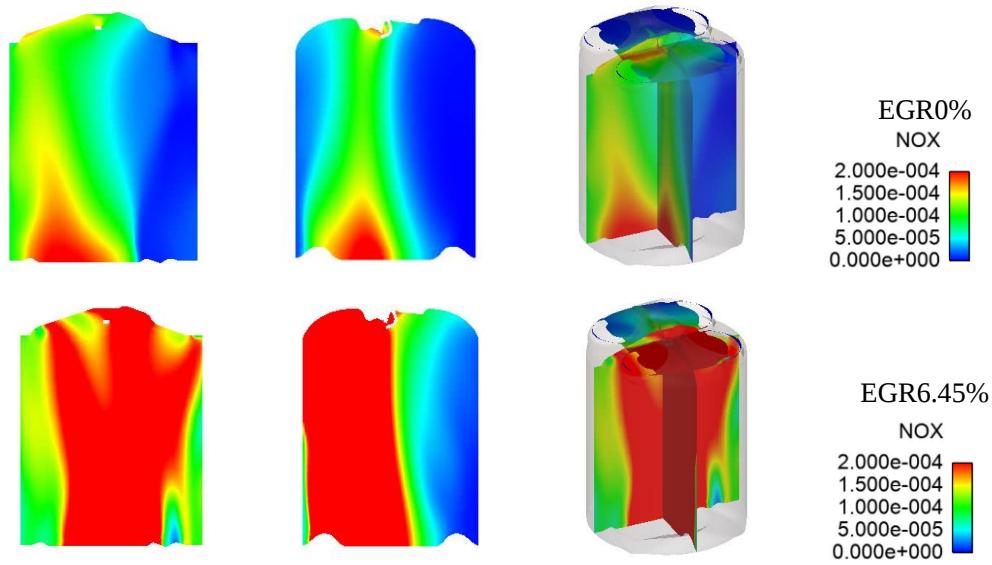


图 10 缸内 NO_x 的分布对比（质量分数）

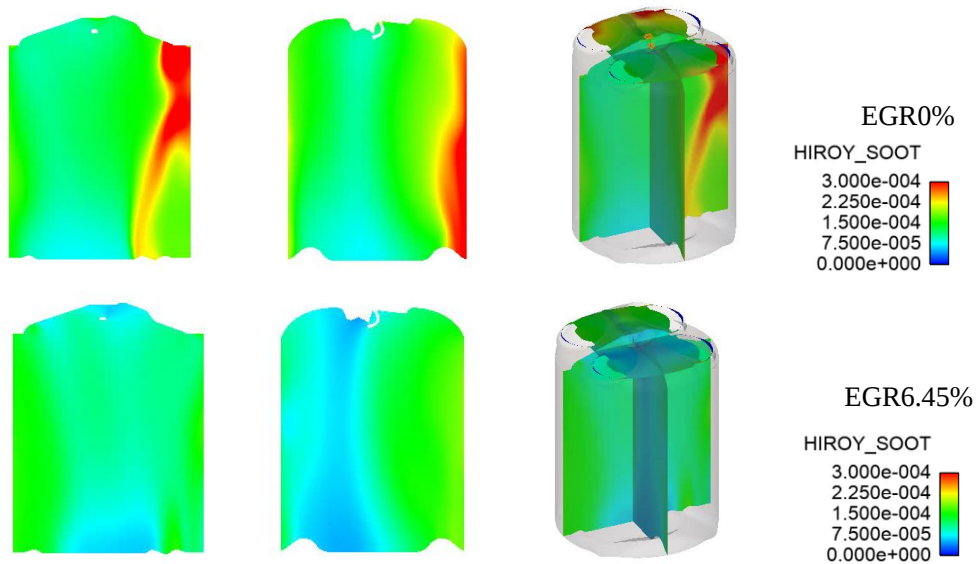


图 11 缸内 Soot 的分布对比（质量分数）

通过 CFD 方法进行排放分析，可以通过趋势上对比各方案的优劣。在 5500rpm 外特性点（功率点）本文研究了排气门打开时，缸内的污染物排放。如表 5 和图 10-11 所示，EGR6.45%比 EGR0% ， HC 和 Soot 的排放明显降低了，主要是由于 EGR6.45%的加浓量减少了，同时油气混合均匀度显著提高。由于 EGR6.45%的缸内燃烧平均温度较高，所以其产生的 NO_x 排放也相对要高。

5 小结

(1) 在缸内流动方面, EGR 率的变化对于该工况缸内的滚流比和平均湍动能影响较小; EGR6.45%缸内整体的油气混合均匀度有大幅度的改善。

(2) 在缸内燃烧方面, 对缸内气体压力, EGR0%和 EGR6.45%的相差不多; 对缸内气体温度, 虽然 EGR6.45%比 EGR0%燃烧最高温度低了 26K, 但是燃烧平均温度却是 EGR6.45%高; 对缸内气体的放热率, EGR6.45%的峰值略高。

(3) 在缸内污染物方面, EGR6.45%比 EGR0% , HC 和 Soot 的排放明显降低了, NO_x 的排放显著升高。

本项研究工作得到了上海市科学技术委员会的资助, 资助课题编号为 14DZ2260600, 课题名称为上海市汽车动力总成重点实验室。

6 参考文献

- [1] 沈照杰. 车用柴油机燃烧过程分析及 EGR 分层研究:[博士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2013
- [2] 裴毅强, 张少哲, 李云龙, 等. EGR 对 Atkinson 循环汽油机性能的影响. 燃烧科学与技术, 2014, 20 (2) :121-127
- [3] Li T, Wu D, Xu M. Thermodynamic analysis of EGR effects on the first and second law efficiencies of a boosted spark-ignited direct-injection gasoline engine. Energy Conversion and Management, 2013, 70:130-138
- [4] Mohsen K, Shahram K, Arash N. A numerical investigation on the influence of EGR in a supercharged SI engine fueled with gasoline and alternative fuels. Energy Conversion and Management, 2014, 83:260-269
- [5] 曾契, 沈凯, 张振东, 等. 高/低压 EGR 对汽油机和增压器影响的试验研究. 内燃机工程, 2018, 39 (4) :33 -38
- [6] 于秀敏, 商震, 张岳韬, 等. 废气再循环对直喷汽油机燃烧及排放影响的仿真. 吉林大学学报, 2016, 46 (4) :1109-1117
- [7] 陶一凯, 邓康耀, 王真, 等. 采用 EGR 技术降低低速机排放的三维仿真研究. 柴油机, 2015, 37 (3) :9 -13
- [8] 张光攀, 陆海峰, 李超, 等. 进气 VVT 对低压 EGR 汽油机油耗影响研究. 内燃机工程, 2017, 38 (5) :102 -107
- [9] 舒歌群, 潘家营, 卫海桥, 等. 基于缸内压力振荡的冷 EGR 对汽油机爆震特性的影响. 天津大学学报, 2014, 47 (6) :551 -557