

EGR 对 SI 缸内直喷发动机性能的影响机理研究

Influence of EGR on the SI Gasoline direct injection Engine

吴达

上海交通大学汽车工程研究院发动机所

摘 要: 本文深入研究了 EGR 对缸内直喷点燃式发动机中负荷的影响机理。本研究先依据台架试验数据, 调试 GT-power 仿真模型, 最后使得仿真结果与试验数据吻合, 然后根据仿真结果, 分别从热力学第一定律与热力学第二定律来分析 EGR 对缸内直喷点燃式发动机中等负荷时的影响机理。研究结果表明: 在中等负荷, EGR 使得缸内传热损失减小, 理论热效率增加, 等容度先减小后增加, 泵气损失减小, 同时从热力学第二定律的分析可以看到燃烧不可逆损失有所减少。

关键词: EGR、GT-SUITE、热效率、热力学第二定律

Abstract: Effects of EGR on the SI Gasoline direct injection Engine at different loads are studied. We validate the simulation model by the experiment data then analyze the impact of EGR on the engine at medium load using first law of thermodynamics and second law of thermodynamics. The results show that: at medium load, EGR causes the improvement of theoretical thermal efficiency and less heat loss, the degree of constant volume first decreases then increases, the pumping loss decreases, in the mean time the combustion irreversibility decreases from the analysis of second law of thermodynamics.

Key word: EGR; GT-SUITE; thermal efficiency; second law of thermodynamics

1 引言

缸内直喷点燃式发动机越来越受到重视, 它们的潜力仍待得到进一步开发。提高发动机功率和转矩, 同时进一步降低燃油消耗和排放是缸内直喷汽油机未来发展的必然趋势。

废弃再循环(EGR)是用来有效降低汽油机和柴油机 NOX 排放的技术。EGR 在改善排放的时候同时也提高了发动机的性能, EGR 的引入可以减少泵气损失, 同时使得缸内燃烧温度降低, 降低传热损失, 国内外对 EGR 的技术已经做了很多的研究。本文通过对某台 SI 缸内直喷汽油机建立 GT-Power 仿真模型, 对其 3000RPM, 200NM 的工况进行了热力学第一定律和热

力学第二定律的分析, 从而了解 EGR 改善发动机性能的机理。

2 仿真模型介绍与模型验证

2.1 仿真模型

本研究主要基于 GT-power 对发动机的进气、压缩、膨胀、排气整个工作循环进行了仿真模拟, 模型中燃烧模型采用 SI Wiebe 燃烧模型, 缸内传热模型采用 WoschniGT 模型, 通过考虑进气成分来考虑 EGR 的影响, 仿真模型建立发动机的子模型, 从压气机之后到涡轮机之前。仿真模型如图 1 所示

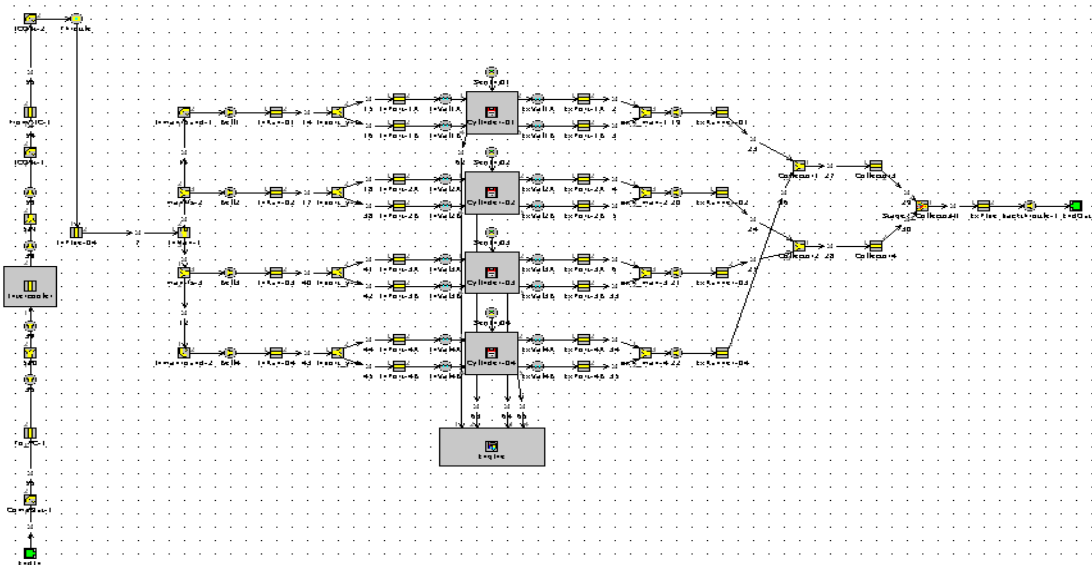
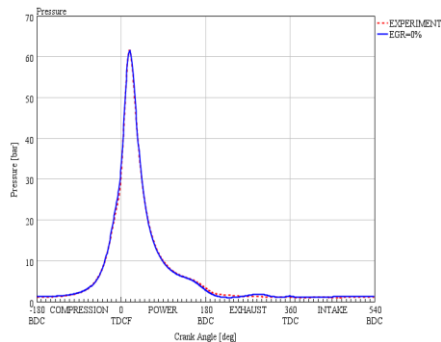


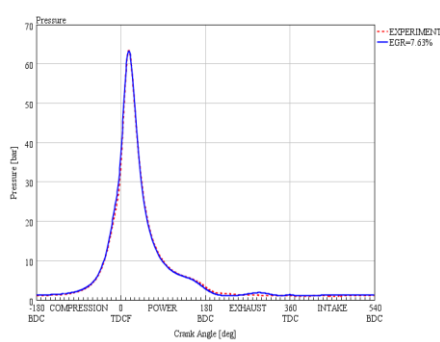
图 1 GT-power 仿真模型

2.2 模型验证

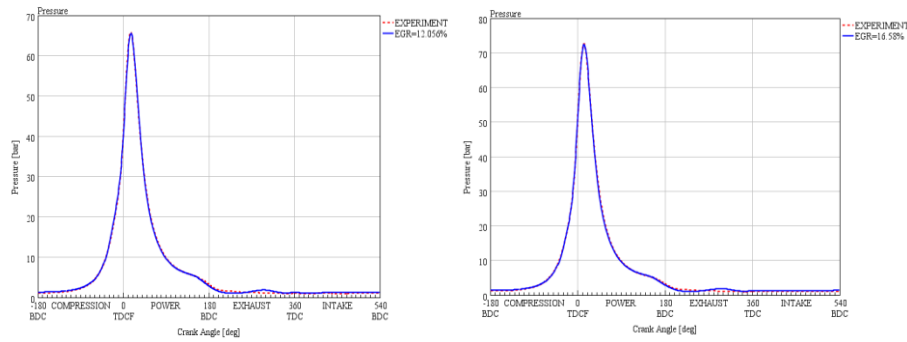
首先保证进气歧管, 排气歧管处的温度压力与实验数据吻合, 同时保证空气流量与试验数据在一定的误差范围内, 最后依据实验测得的燃烧相位标定燃烧模型, 使得最后的缸压曲线与实验数据能够吻合, 本次研究采用 EGR 率分别为 0%、7.67%、12.056%、16.58%, 分别调试仿真模型, 使模型的缸压曲线与实验室数据吻合, 4 种 EGR 率的模型的缸内压力验证如图 2 所示。



2a EGR 率=0%



2b EGR 率=7.67%



2c EGR 率=12.056%

2d EGR 率=16.58%

图2 不同 EGR 率下缸内压力验证

3 热力学第一定律与热力学第二定律

3.1 热力学第一定律

能量守恒与转换定律是自然界的一个基本规律。它指出：自然界中一切物质都具有能量。能量既不可能被创造，也不可能被消灭，而只能从一种形式转变为另一种形式。在转换中，能的总量保持不变。

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热力学中的应用，它确定了热能与其它形式能量相互转换时在数量上的关系。热力学第一定律是热力学的基本定律，它适用于一切工质和一切热力过程。

基于热力学第一定律，发动机循环满足下面的热平衡方程式：

$$Q = Q_e + Q_w + Q_r + Q_b + Q_p + Q_f$$

上式中为燃油完全燃烧的热量； Q_e 为转变为有效功的热量； Q_w 为缸内传热损失； Q_r 为废气带走的热量； Q_b 为不完全燃烧的热量损失； Q_p 为泵气损失； Q_f 为摩擦损失。

3.2 热力学第二定律

热力学第二定律是揭示热力过程方向、条件与限度的定律，自然的过程是不可逆的，显然发动机循环也是一种不可逆的过程。热力学第二定律分析法也称作可用能分析法。

基于热力学第二定律，发动机循环对于进排气门都关闭期间，可以把发动机内工质看作一个孤立的系统，与外界没有物质交换，且满足下面的可用能平衡方程：

$$E_s = E_q + E_w + E_r + E_b + I$$

上式中 E_s 为起始时缸内工质的可用能总和； E_q 为与外界的传热损失； E_w 为指示功部分； E_r 为燃烧结束时缸内工质的可用能总和， E_b 是不完全燃烧损失部分； I 为燃烧不可逆损失。

E_s 包括工质热机械有用能 E_{th} 与燃料可用能 E_{ch} 两部分。

$$E_s = E_{th} + E_{ch}$$

$$E_{th} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$

对于燃料 C_xH_y ，参考有关文献可得燃料的可用能为：

$$E_{ch} = [1.04224 + 0.011925(y/x) - 0.042/x]mH$$

对于汽油而言， $E_{ch} = 1.082mH$

上式中：为内能；为熵；下标表示环境状态时的对应值，H 为汽油的低热值。

工质指示功可以表达为：

$$E_w = \int (P - P_0) dV$$

与外界的传热损失可以表达为：

$$E_q = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ$$

4 结果分析

4.1 热力学第一定律分析结果

a) 缸内传热损失结果：缸内传热损失随着 EGR 率的增加而减小，如图 3 所示，这也是大量研究所公认的事实，当残余废气引入到缸内燃烧，尾气中大量的 CO_2 不参与燃烧，但却吸收了大量的热量，起到了稀释燃烧的作用，导致最后燃烧温度变低，使得工质与气缸壁面温差减小，最后导致缸内传热损失大幅度减小。

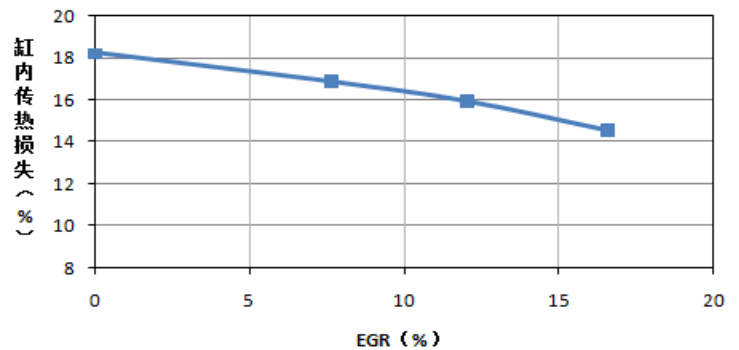


图 3 缸内传热损失

b) 泵气损失与摩擦损失结果：发动机的摩擦损失与泵气损失随

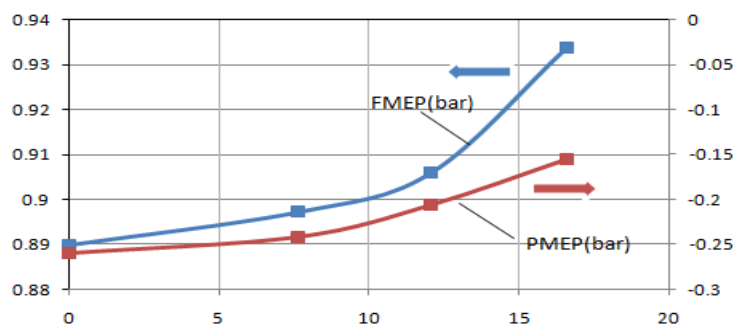


图 4 泵气损失及摩擦损失

着 EGR 率的增加的变化趋势如图 4 所示。当 EGR 引入到进气歧管后，为了保证一定的负荷，所以必须保证一定的新鲜空气量，所以必须增加节气门的开度，从而导致泵气损失的减小，然而 EGR 的引入，使得缸内气体量增多，最后导致缸内压力增加，从而使得摩擦损失增加。这两者间是一对竞争的关系。

c) 指示效率与有效效率结果：

指示效率与有效效率随着 EGR 率的增加的变化趋势如图 5 所示，随着 EGR 率的增加，由于缸内传热损失的减小，泵气损失的减小使得发动机的指示效率和有效效率都有了较大的改善，这也论证了 EGR 技术可以改善汽油机性能的观点。

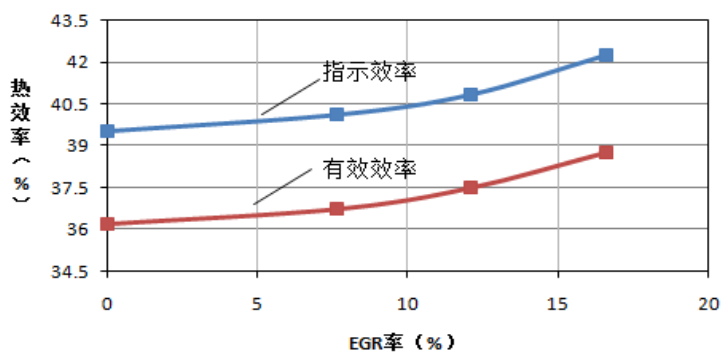


图 5 热效率

d) 热平衡结果：发动机循环的热平衡结果如图 6 所示。热平衡结果是对上述分析的总结，我们可以发现，发动机热效率的增加主要是归功于缸内传热损失的减小，在 EGR 率达到 16.58% 的时候，有效效率提高了 2.55 个百分点，能对发动机油耗的比较大的改善。

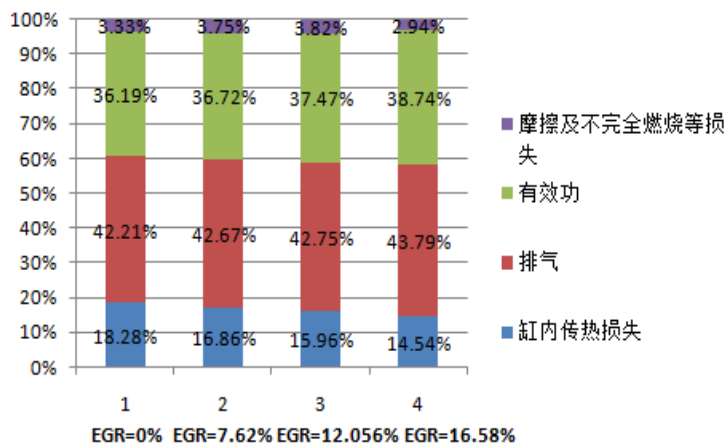


图 6 发动机循环热平衡

4.2 热力学第二定律分析结果

发动机的可用能平衡结果：如图 7 所示，从图中我们可以发现，传热损失随着 EGR 率的增加而减小，然而随着 EGR 率的增加，燃烧的不可逆损失随之增加，这主要由于 EGR 的增加，使得燃烧温度降低，使得燃烧不可

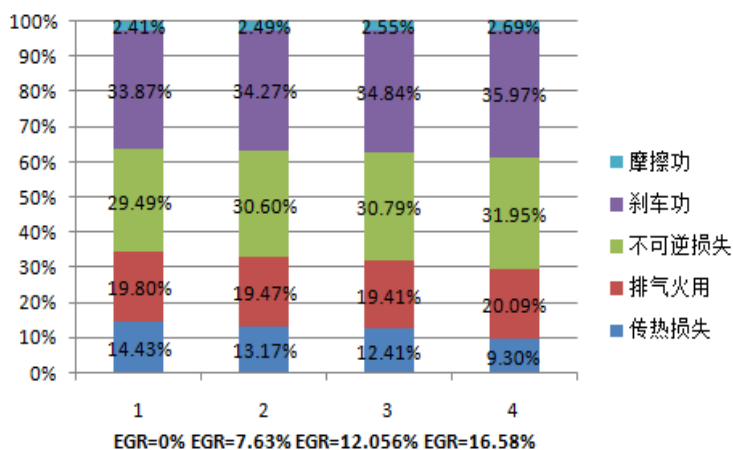


图 7 发动机循环可用能平衡

逆损失增加, 值得指出的是这与 R G Shyani and J A Caton 的研究结果一致。

5 结论

本文通过对某台点燃式缸内直喷汽油简历 GT-power 模型, 并使得模型与试验数据吻合, 然后根据仿真计算的结果分析了 EGR 对发动机中等负荷时性能改善的机理。

这些结果可以总结为如下几点。

1. 随着 EGR 率的增加, 缸内传热损失减小。
2. 随着 EGR 率的增加, 泵气损失减小, 然而摩擦损失增加。
3. EGR 的引入将使得燃烧的不可逆损失增加。
4. EGR 技术提升发动机的油耗, 当 EGR 率达到 16.48% 时, 发动机的热效率提高了 2.55 个百分点。

6 参考文献

- [1] 冯洪庆, 杨肖曦, 邵长彬, 李会杰 《基于双区模型的汽油机燃烧过程可用能及不可逆损失分析》燃烧科学与技术 2010
- [2] R G Shyani and J A Caton 《A thermodynamic analysis of the use of exhaust gas recirculation in spark ignition engines including the second law of thermodynamics》*Journal of Automobile Engineering* 2009
- [3] 朱明善《工程热力学》清华大学出版社 1994
- [4] 毕小平, 林德群 《汽油机燃烧过程的能量可用性和不可逆性变化率分析》内燃机学报 2000