

## 乙醇汽油缸内燃烧的仿真研究

## Numerical Simulation Research on In-cylinder Combustion of Ethanol Gasoline

陈曦, 张小矛, 陈明, 徐政, 杨洋, 林长林, 丁宁

(上海汽车集团股份有限公司乘用车公司技术中心, 上海 201804)

**摘要:** 本文针对一台 2.0L GDI 增压发动机建立了三维 CFD 模型, 对 E85 乙醇汽油的喷雾和燃烧特性进行了仿真研究。首先通过台架试验验证了仿真模型, 然后研究了 5000rpm 节气门全开(WOT)工况下 E0 和 E85 燃料的喷雾和燃烧特性, 进一步对不同点火时刻下两种燃料的爆震特性进行了分析。研究发现 E85 燃料由于较高的辛烷值和汽化潜热, 抗爆震性能好, 点火可大幅提前, 其燃烧热效率较高; HC、CO 排放低, NO<sub>x</sub> 排放高, SOOT 排放低。

**关键词:** 乙醇汽油; 燃烧; 爆震

**Abstract:** In this paper, a three-dimensional CFD model is established based on a 2.0 liter GDI turbo engine, and the spray and combustion character of E85 ethanol gasoline is studied numerically. Firstly the CFD model is validated by test bench result, and then the spray and combustion character of E0 and E85 is studied under 5000rpm WOT condition. Furthermore, knock character under different spark timing is analyzed. Results show that as the high octane number and latent of vaporization of E85, good anti-knock performance of E85 can lead to advanced spark timing and high combustion thermal efficiency. HC, SOOT and CO emission of E85 is low, but NO<sub>x</sub> emission is high.

**Key words:** Ethanol gasoline, Combustion, Knock

随着油耗和排放法规的日益严格, 乙醇燃料作为一种清洁、高效的可再生燃料, 在全球范围内被越来越广泛的使用。其中, 巴西, 泰国, 美国, 中国等逐渐扩大使用乙醇燃料。相比于汽油, 乙醇燃料具有较高的汽化潜热, 较大的辛烷值, 更快的火焰传播速度和较小的当量比等诸多优点。同时, 乙醇是含氧燃料, 能够促进混合气燃烧, 使燃烧更加完全, 提高燃烧效率, 在改善发动机动力输出的同时降低排放<sup>[1]</sup>。

针对乙醇/汽油燃料的特点, 许多科研工作者做了大量的研究。其中, 乙醇燃料的高汽化潜热具有冷却效应可以提高发动机的充气效率和抗爆震能力: Ahn 等人通过缸内压力的变化来展示乙醇燃料的冷却效果<sup>[2]</sup>。Kasseris 等人使用爆震起始点来确定不同乙醇/汽油比例混合燃料的充气冷却效应<sup>[3,4]</sup>。乙醇燃料高辛烷值特性是乙醇燃料被用来改善性能的另一个重要因素。Ford 公司 Anderson 等人<sup>[5]</sup>发现高辛烷值燃料可以使用更高的压缩比, 采用更高增压压力、小型化和点火正时从而带来更高的热效率; 高辛烷值燃料能够有效地抑制末端混合气自燃, 提高抗爆震特性, 进一步汽油机强化水平<sup>[6]</sup>。相关的研究表明, 汽化潜热和辛烷值对抑制爆震, 提高热效率具有相当的能力<sup>[7]</sup>。除此之外, 相比于汽油, 乙醇燃料较快的火焰传播速度进一步提高了发动机燃烧效率, 改善了燃烧稳定性。Dirrenberger 等人和 Jerzembeck 等人测试了不同初始条件下乙醇和汽油燃料的初始火焰速度, 发现乙醇的层流火焰速度比汽油更快<sup>[8,9]</sup>。Catapano 等人<sup>[10]</sup>在一台直喷 SI 光学发动机上进一步对比研究了乙醇和汽油的喷雾和火焰传播过程, 发现乙醇燃烧出现更少扩散燃烧火焰, 导致更少的碳烟。由于乙醇燃料更快的火焰传播速度, 发动机采用乙醇燃料可以提高点火时刻、爆震点火时刻以及进气流量的鲁棒性<sup>[11,12]</sup>。因此为了进一步研究乙醇燃料对发动机燃烧和爆震的影响, 本文对 E0 和 E85 燃料缸内喷雾燃烧过程进行了仿真。

1 研究对象

研究对象为 4 冲程 4 气门直喷汽油机。燃烧系统模型如图 1 所示。研究采用辛烷值为 92 的 E0 汽油，以及 85%（体积分数）乙醇掺混 15% E0 汽油的 E85 乙醇汽油。发动机的基本参数见表 1 所示。

表 1 发动机主要参数

| 名称    | 主要技术参数      |
|-------|-------------|
| 型式    | 4 缸，4 气门汽油机 |
| 缸径/mm | 88          |
| 行程/mm | 82          |
| 压缩比/- | 10          |

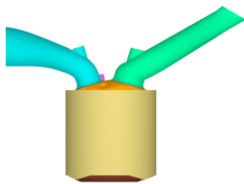


图 1 燃烧系统模型

2 缸内燃烧模型验证

首先对该汽油机 5000rpmWOT 工况进行了缸内燃烧模拟。

2.1 网格建立

采用 CONVERGE 软件的自适应网格技术（Adaptive mesh refinement），对于计算网格时间和空间上进行分区加密设置，能够在保证计算精度前提下节省计算时间。基本网格尺寸设置为 4mm，对进气道和气缸采用针对速度和温度梯度的自适应加密，针对模型关键区域（气门阀座）进行分区加密，计算最大网格数为 150 万。

2.2 初始和边界条件

进出口边界为进气道入口和排气道出口，分别赋予瞬态压力值和温度值，与试验条件一致。计算模型的温度边界采用固定壁温，按边界分区赋予工程经验值，包括缸盖、缸壁、活塞、进气道、进气阀、排气道和排气阀。计算初始时刻为换气上止点。

进气道内初始组分为空气，包含氧气、氮气，喷油量根据台架试验空燃比确定；气缸内和排气道内初始组分为燃烧废气，包含二氧化碳、氮气和水蒸气，其比例按照过量空气系数计算得出。

2.3 物理模型

模拟分析包含流动和燃烧过程，具体模型如表 2 所示，其中燃烧模型采用 SAGE 模型，为详细化学反应动力学模型，相对于传统经验燃烧模型，无需指定经验的火焰速度关系，且能够更加准确的对化学反应过程进行模拟。为节省计算时间，使用简化的化学反应机理，包含 48 种组分，152 个反应步。同时，应用多区（Multi-zone）建模的加速算法，能够在保证精度的前提下使详细化学反应计算的速度显著提升。

表 2 模型设置

|                      |                                    |
|----------------------|------------------------------------|
| 湍流模型                 | RNG k-ε                            |
| 燃烧模型                 | SAGE Detailed Chemistry            |
| 壁面传热模型               | O'Rourke and Ameden                |
| NO <sub>x</sub> 排放模型 | Extended Zeldovich NO <sub>x</sub> |
| Soot 排放模型            | Hiroyasu Soot                      |

## 2.4 燃料组分

E0 汽油组分采用异辛烷和正庚烷的质量分数配比 92: 8, E85 乙醇汽油组分采用 85% (体积分数) 乙醇掺混 15% E0 汽油, 如表 3 所示。从表中可以看出, E85 含有更多的氧, 乙醇自身携带一个氧原子, 使发动机燃烧更充分, 在一定程度上可提高发动机功率, 过量氧元素, 也有利于改善 HC 和 CO 的排放特性。E85 热值小, 理论空燃比小于 E0 汽油, 为了使混合气热值与 E0 相同, 可通过加大喷油量, 实际在发动机标定过程中, 为达到与 E0 相同功率扭矩, E85 喷油量是 E0 的 1.4 倍左右。E85 气化潜热大, 较大气化潜热会使缸内温度降低, 提高充量系数, 但不利于低温冷启动时燃料蒸发, 燃烧和排放特性变差。E85 的辛烷值高。E85 的抗爆性更好, 因此可以采用更靠前的点火角或更高的压缩比, 以获得更好的经济性和动力性。

表 3 燃油性质

|             | 分子式                                                                                                   | 碳含量<br>C% | 氢含量<br>H% | 氧含量<br>O% | 低热值<br>(MJ/kg) | 密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 空燃比  | 气化潜<br>热<br>(kJ/kg) | 研究法<br>辛烷值 |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------------------|------|---------------------|------------|
| E0 汽油       | IC <sub>8</sub> H <sub>18</sub><br>C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>                                     | 86.1      | 13.1      | 0.8       | 43.6           | 750                        | 14.7 | 350                 | 91-98      |
| E85<br>乙醇汽油 | IC <sub>8</sub> H <sub>18</sub><br>C <sub>7</sub> H <sub>16</sub><br>C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | 57.9      | 13.6      | 28.5      | 29.2           | 771                        | 9.9  | 841                 | 105-109    |

## 2.5 模拟结果验证

为验证模型的准确性, 将模拟计算结果与试验结果进行了对标。图 1 为 5000rpm WOT 工况时分别采用 E0 和 E85 燃料模拟与试验缸压曲线的对比。

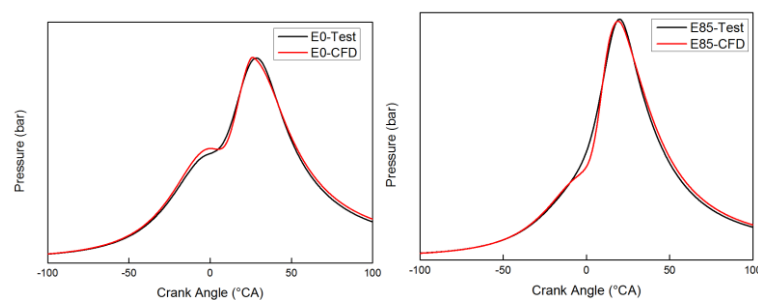


图 1 缸压模拟值与试验值对比

## 3 模拟分析结果

本文首先对 E0 和 E85 的缸内喷雾燃烧过程进行了仿真研究, 进一步研究了不同点火时刻下两种燃料的爆震倾向。

### 3.1 缸内喷雾混合

E0 和 E85 燃料在 5000rpm WOT 工况下喷雾混合过程缸内压力和温度如图 3 所示, E85 由于更大的气化潜热, 蒸发过程吸热较多, 喷雾混合过程缸内压力和温度较低。因此相比 E0 燃料, E85 蒸发速度更慢, 但由于喷雾混合过程缸内温度较低且点火可以提前 (抗爆性更好), E85 燃烧后的排温较低, 因此在该工况混合气不用加浓, 最终形成缸内混合气更接近  $\lambda=1$ , 如图 4 所示。

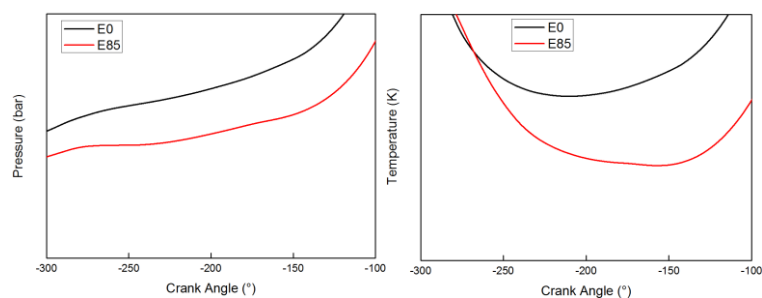


图 3 喷雾过程缸内压力与温度

| lambda<br>0.50 1.00 1.50<br>0.75 1.25 | 侧视图 |     | 主视图 |     |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                       |     |     |     |     |
| -280° CA                              |     |     |     |     |
| -180° CA                              |     |     |     |     |
| -80° CA                               |     |     |     |     |
| -15° CA                               |     |     |     |     |
|                                       | E0  | E85 | E0  | E85 |

图 4 缸内喷雾混合过程

### 3.2 缸内燃烧及排放

E0 和 E85 燃料在 5000rpm WOT 工况下燃烧过程缸压和放热率曲线如图 5 所示。相比 E0，E85 未加浓因此累计放热量较低，但由于提前点火且乙醇燃料火焰传播速度更快，所以最大爆发缸压更高，放热速度较快。图 6 是两种燃料缸内火焰传播速度的示意图，红色是温度等值面用来代表火焰前锋面，可以看出 E85 早于 E0 点火，两者在火花塞处形成火核后火焰传播速度基本相当。在放热率峰值附近，即 E0 从上止点后 20° 到 30° 以及 E85 从上止点后 10° 到 20° 间隔内，E85 的火焰传播速度略快于 E0。

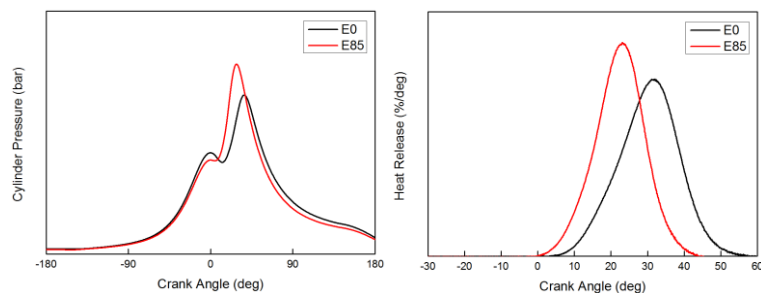


图 5 缸压和放热率对比

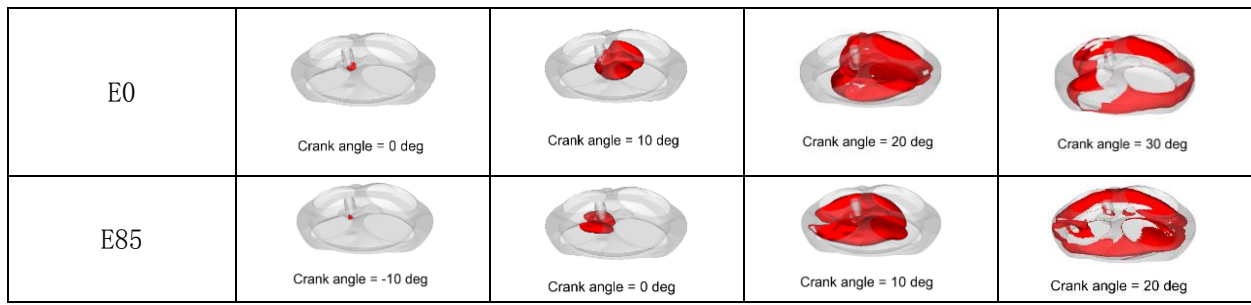


图 6 缸内火焰传播示意图

本文进一步研究了 E0 和 E85 燃烧过程的排放物水平。相比 E0 燃料，由于 E85 燃料碳含量较低而氧含量较高，且放热速率较快，因此其燃烧过程未燃碳氢，碳烟和一氧化碳的排放水平均较低，而氮氧化物排放水平较高，如图 7 所示。

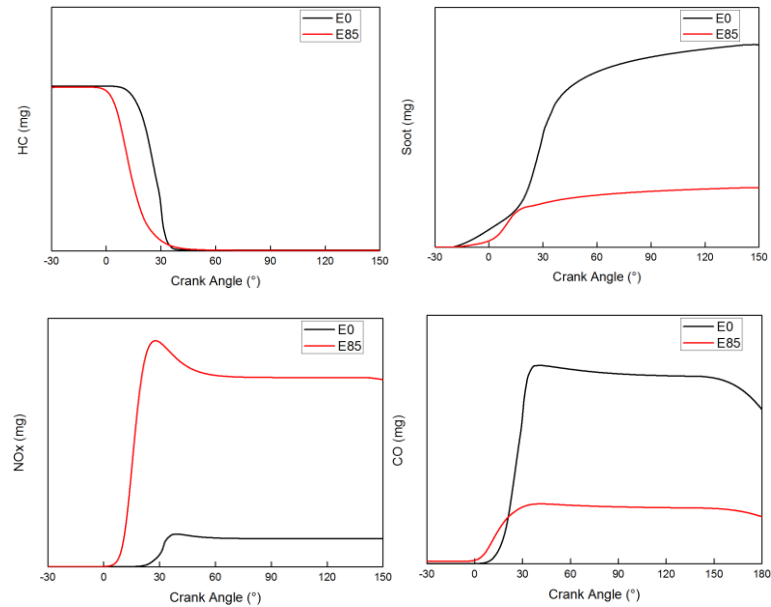


图 7 E0 和 E85 燃烧过程排放的对比

### 3.3 不同点火时刻下爆震倾向

按照自燃学说的观点，发动机爆震就是末端混合气在主火焰到达之前发生自燃的结果，而末端混合气自燃特性主要取决于当地混合气的温度和压力以及抗爆性等参数，即式 1<sup>[13]</sup>。为了将发动机爆震特性和燃料的自燃结合在一起，Livengood 和 Wu 基于发动机和快速压缩机的内在联系提出了一种爆震预测方法，即 Livengood-Wu 积分方法<sup>[14]</sup>，如式 2 所示。如果在时间  $t$  内积分值  $I$  达到 1 时，主火焰还没有到达末端混合气，则发动机有可能发生爆震，反之，发动机不会发生爆震。

$$\tau = 17.68 \left( \frac{RON}{100} \right)^{3.402} p^{-1.7} \exp \left( \frac{3800}{T} \right) \quad \text{式 1}$$

$$I = \int_0^1 \frac{1}{\tau} dt \quad \text{式 2}$$

基于此理论，本文在燃烧室末端布置 24 个监控点，通过检验主火焰到达监控点位置时积分值  $I$  是否到 1，评估该监控点是否发生自燃；进一步统计发生自燃监控点所占比例，评估发动机在该工况下发生爆震的倾向，如图 8 所示。

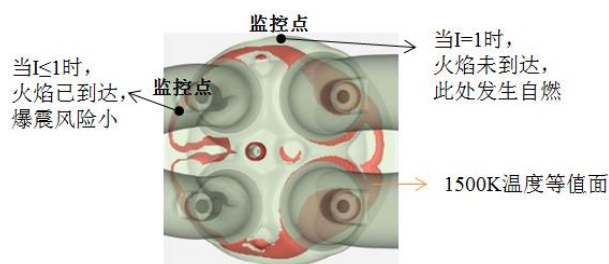


图 8 t 时刻火焰面位置示意图

通过对 E0 和 E85 燃料在 5000rpm WOT 工况下不同点火时刻缸内燃烧进行仿真分析, 得到监测点自燃的比例随点火时刻变化的散点图, 进一步对各点进行线性拟合得到监测点自燃比例随点火时刻变化的关系, 如图 9 所示。从图中可以看出, 由于 E85 燃料具有较好的抗爆性, 达到相同监测点自燃比例时, E85 的点火时刻较 E0 晚 8-10° CA。本文将监测点自燃比例作为评估发动机该工况下爆震倾向的指标, 通过与发动机爆震台架试验结果对比发现, 当点火时刻对应自燃点比例 0.5 时, 发动机出现轻度爆震现象, 且对于 E0 和 E85 燃料均适用。因此可以将监测点自燃比例作为评价爆震倾向的指标。

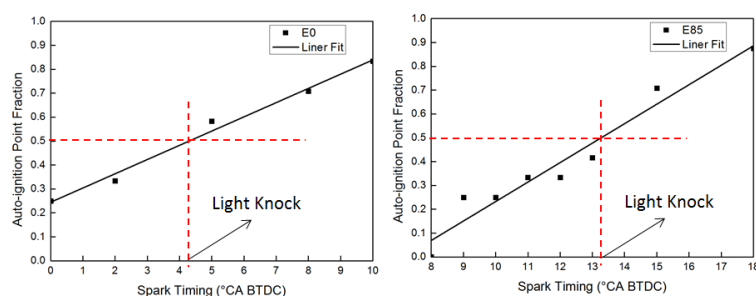


图 9 自燃点比例随点火时刻变化

## 4 结论

本文对缸内直喷增压汽油机进行了三维 CFD 仿真, 研究了 E85 乙醇汽油缸内喷雾、燃烧、排放和爆震特性:

- (1) E85 乙醇汽油高气化潜热特性使得喷雾混合过程缸内温度较低, 抗爆性好特性使得高速全负荷工况点火提前, 避免燃油加浓。
- (2) E85 乙醇汽油火焰传播速率较 E0 汽油更快, 未燃碳氢, 碳烟和一氧化碳的排放水平较低, 氮氧化物排放水平较高。
- (3) E85 乙醇汽油的抗爆性较好, 相同点火时刻下燃烧室末端监测点发生自燃的比例较 E0 小, 爆震倾向更小。监测点发生自燃的比例可作为评估爆震倾向的指标。

## 5 参考文献

- [1] 黄御寒. 乙醇直接喷射加汽油进气道喷射点燃式发动机燃烧过程研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 博士学位论文, 2016.
- [2] Ahn K H, Stefanopoulou A, Jiang L, et al. Ethanol Content Estimation in Flex Fuel Direct Injection Engines with Fault Detection Under Fuel Injector Drifts [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(7):123-130.
- [3] Kasseris E, Heywood J. Charge cooling effects on knock limits in SI di engines using gasoline/ethanol blends: Part 1-quantifying charge cooling [J]. SAE Technical Papers,

- 2012, 5(2):844-854.
- [4] Kasseris E, Heywood J B. Charge Cooling Effects on Knock Limits in SI DI Engines Using Gasoline/Ethanol Blends: Part 2-Effective Octane Numbers [J]. SAE Technical Papers, 2012, 5(2):844-854.
- [5] Anderson J E, DiCicco D M, Ginder J M, et al. High octane number ethanol - gasoline blends: Quantifying the potential benefits in the United States [J]. Fuel, 2012, 97(7):585-594.
- [6] 沈义涛, 汪建忠, 帅石金, 等. 辛烷值对汽油机性能的影响 [J]. 内燃机工程, 2008, (05):52-56.
- [7] Milpied J, Jeuland N, Plassat G, et al. Impact of Fuel Properties on the Performances and Knock Behaviour of a Downsized Turbocharged DI SI Engine-Focus on Octane Numbers and Latent Heat of Vaporization [J]. SAE International Journal of Fuels & Lubricants, 2009, 2(1):118-126.
- [8] Dirrenberger P, Glaude P A, Bounaceur R, et al. Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol [J]. Fuel, 2014, 115(1):162-169.
- [9] Jerzembeck S, Peters N, Pepiot-Desjardins P, et al. Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: Experimental and numerical investigation [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(2):292-301.
- [10] Catapano F, Sementa P, Vaglieco B M. Optical characterization of bio-ethanol injection and combustion in a small DISI engine for two wheels vehicles [J]. Fuel, 2013, 106:651-666.
- [11] Sementa P, Maria Vaglieco B, Catapano F. Thermodynamic and optical characterizations of a high performance GDI engine operating in homogeneous and stratified charge mixture conditions fueled with gasoline and bio-ethanol [J]. Fuel, 2012, 96:204-219.
- [12] Daniel R, Tian G, Xu H, et al. Ignition timing sensitivities of oxygenated biofuels compared to gasoline in a direct-injection SI engine [J]. Fuel, 2012, 99:72-82.
- [13] V. Bevilacqua, M. Boeger. Knock Tendency Prediction in Highly Charged SI Engines [J]. SAE Technical Papers, 2017-32-0130
- [14] Livengood J C, Wu P C, Correlation of autoignition phenomena in internal combustion engines and rapid compression machines, Symposium (International) on Combustion, 1955, 5(1): 347~356.