

# 中低负荷下喷油策略对柴油机燃烧的影响分析

## The inject strategy effect analysis on diesel combustion based on medium and low load

李春芳<sup>1,2</sup>, 张德胜<sup>1,2</sup>, 张竟<sup>1,2</sup>

1. 长城汽车股份有限公司技术中心, 河北保定市

2. 河北省汽车工程技术研究中心, 河北保定市

**摘要:**本文是在中低负荷下, 模拟二次、三次、四次喷油策略对柴油机燃烧的影响, 主要是从排放、油耗及压力升高率去分析。结果显示, 多次喷油在降低压力升高率及排放方面具有一定优势, 但是针对油耗还是需要折中考虑。

**关键词:**喷油策略、燃烧、排放、油耗、仿真分析

**Abstract :**Based on the medium and low load ,simulate the effect of two inject times、three inject times and four inject times ,mainly attention the emission、fuel consumption、and the rate of pressure rise .The result shows that repeated injection to reduce the pressure rise rate and emissions has certain advantages ,but the reduction of fuel consumption has been considered.

**Key words:** injection strategy、combustion、emission、fuel consumption、simulation analysis

### 1 介绍

凭借在动力性、经济性和可靠性等方面的优势, 柴油机在商用车和乘用车得到广泛应用。柴油机燃烧属于扩散燃烧, 燃烧过程主要依赖于燃油与空气的混合过程。由于喷雾与空气的混合时间很短, 导致燃烧过程中的温度与浓度分布极其不均匀。在高温富氧区域产生大量的 NO<sub>x</sub>, 在高温过浓区, 由于缺氧又生成大量碳烟。由于柴油机非均质燃烧的固有性质, 使得柴油机存在碳烟和 NO<sub>x</sub> 排放的最低极限<sup>[1, 2]</sup>。为降低 NO<sub>x</sub> 排放, 目前多采用引入 EGR 方式。但是相关文献<sup>[3]</sup> 中研究结果表明, 随着 EGR 率的增加, 碳烟前驱体呈现二次曲线变化趋势。同时也有文献表明由于引入大量的废气会使得缸内气体的比热容增加, 使得燃烧过程滞后和放热量减少, 为保证燃烧过程的顺畅进行和提高做功效率, 喷油正时必须调整。本文在中低负荷下, 研究不同次数的喷油策略对燃烧过程的影响, 找到最适合的一种喷油模式。

### 2 模型建立

#### 2.1 模型建立

计算模型采用 CONVERGE 自动生成的部分模型计算, 很好地保持了几何型线, 同时计算时间可以大大降低。计算区间是从进气门关闭到排气门开启的压缩与燃烧过程。在网格控制策略上, CONVERGE 自带的网格自适应功能加密, 可根据几何表面, 或根据速度、温度梯度加密, 可以处理

非常复杂的几何（比如火花塞），也可以很好的捕捉火焰面；而且网格数少，计算快，精度高。本文主要是设置了速度和温度的自适应加密，来精确捕捉喷油及燃烧过程。同时计算过程中发现，引入了 Multi-Zone 加速算法，在保持精度的情况下大幅度减少详细反应计算时间，非常方便地适用于工程计算。

## 2.2 喷雾及燃烧模型介绍

喷雾破碎 KHRT 模型主要是由 KH 和 RT 两个模型构成：KH 模型是基于液体与气体界面上的沿流动方向（切向）扰动波的不稳定分析，即 KH 波不稳定性增长。对于高压流体的射流，是起主要作用的。但是对于离散液滴的分裂雾化，在气液界面的法向也存在着由于两相之间密度的巨大差别而产生的惯性力，即 RT 扰动波，是分裂雾化的另一个重要原因。柴油机中，喷雾的初始速度很高，同时受到很大的空气阻力，液滴所受惯性力较大，RT 不稳定性波的作用不可以忽略，必须与 KH 波同时考虑。因此本次计算采用的喷雾模型是 KHRT 模型，模型参数选择是根据定容弹试验结果，喷射速率曲线基于位移-升程法测量不同喷油压力、不同喷油脉宽下的喷射速率，准确反映了喷油器特性。燃烧模型是利用 CONVERGE 自带的详细化学反应求解 SAGE，无需多次修改模型参数，就可以准确地反应燃烧过程。如图是最终计算的缸内燃烧压力与试验压力的对比，准确程度都是比较高的。

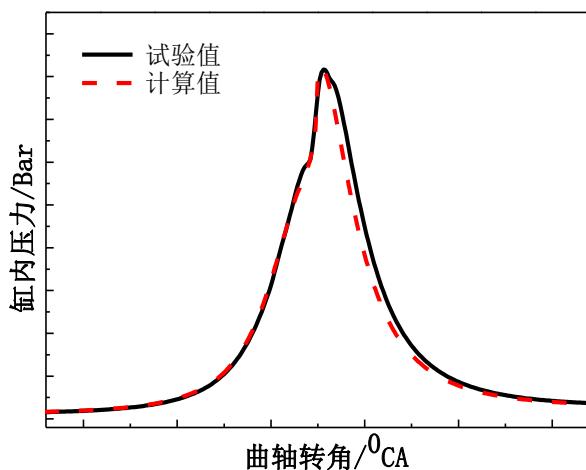


图 1 燃烧压力对比

## 3 结果分析

本文一共采用三种喷射方案来分析不同喷油策略对柴油机燃烧过程的影响：第一种为预喷+主喷模式的二次喷油策略；第二种是预喷+主喷+后喷的三次喷油策略；第三种是两次预喷+主喷+后喷的四次喷油策略。简要的喷射策略示意图如下图所示。

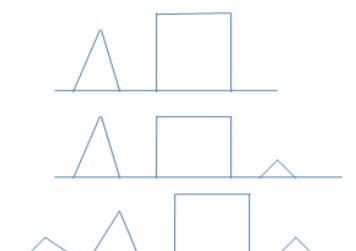


图 2 喷油策略示意图

### 3.1 不同喷油策略对排放及油耗的影响

在柴油机燃烧中过程，废气再循环（EGR）是重要的控制手段，通过 EGR 提高进气的热容比从而延长滞燃期，使燃油与空气混合更加充分。另一方面，EGR 降低氧浓度，降低燃烧温度，从而能够在混合气较浓的情况下降低有害排放。

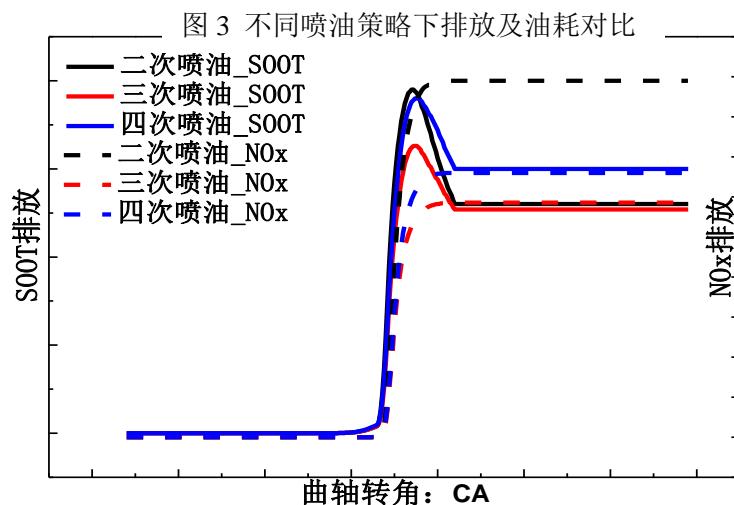
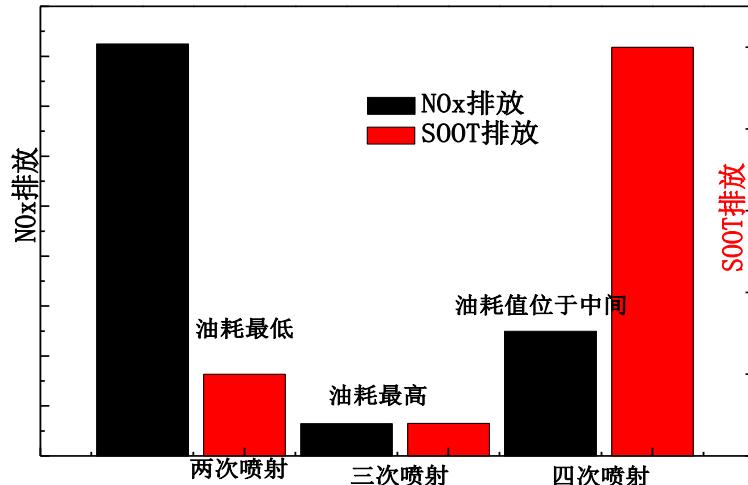


图 4 SOOT 及 NOx 排放

如图 3 和图 4，引入 EGR 后不同喷射策略下的 NOx 和 SOOT 排放都能够得到有效的降低。对比不同喷油次数下排放物的生成与油耗情况。可以看到采用预喷+主喷+后喷时，两种排放物均是较低的，但是油耗却是最高的。油耗与排放之间的 trade-off 关系也是说明了在设计阶段，喷油策略的选择是依据一定的设计目标，合理地在油耗与排放之间选择。

采用二次喷射时，大量的油在上止点之前喷入，此时缸内气体经过压缩过程，压力、温度已经达到较高水平，柴油喷入后混合时间很短，就会导致扩散燃烧的发生，缸内燃烧温度瞬间上升，造成大量 NOx 生成；同时由于较短的油气混合时间造成局部当量比过浓，不均匀燃烧也造成了 SOOT 生成的大量增加。同时对比二次和四次喷油策略发现，虽然二者在燃烧初期 SOOT 的生成量基本相

同，但是二次喷油由于其较强烈的燃烧过程，燃烧后期缸内的温度及当量比分布利于 SOOT 的进一步氧化，SOOT 的氧化速率明显高于四次喷油，所以造成最终在排气门开启时刻四次喷油策略下 SOOT 排放较二次喷油高。采用三次喷射时，由于将二次喷油策略下的一部分主喷油量放到后喷进行喷射，减缓了扩散燃烧的程度，燃烧温度降低，NOx 生成量是最低的。

### 3.2 不同喷油策略对燃烧过程影响

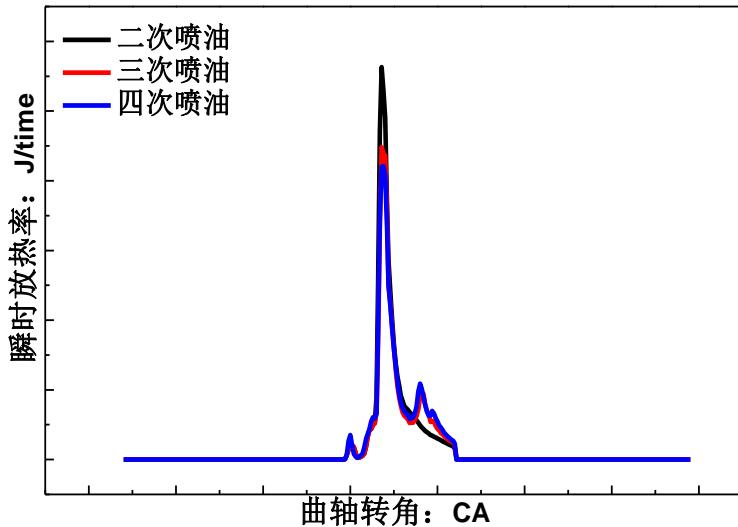


图 5 瞬时放热率对比

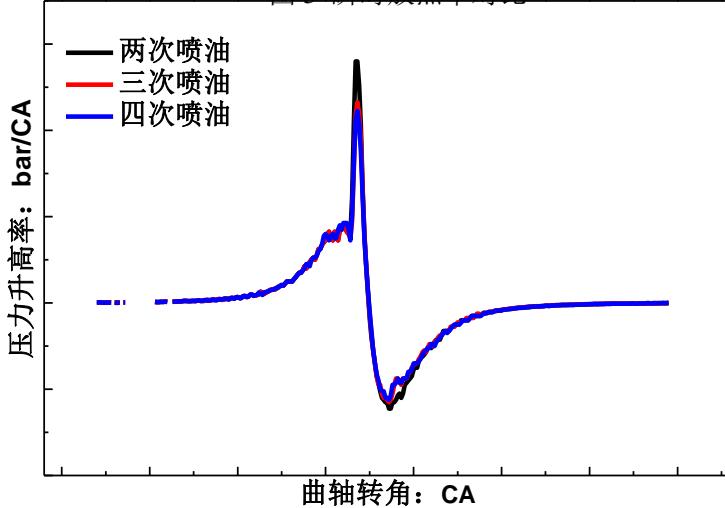


图 6 压力升高率对比

对比不同喷油策略的压力升高率及放热率曲线，发现采用多次喷射时，是可以明显降低压力升高率的，整个燃烧过程变得平缓可控。同时由于预喷及后喷的加入，也可以在一定范围内控制燃烧噪声。但是对比四次喷油，虽然油耗较三次喷油降低，但是排放均有所增加。

如图 7，不同喷油策略下的燃烧重要参数结果统计，发现三种喷油策略下的燃烧起始时刻及燃烧重心基本相同，但是由于三次及四次喷射策略采用后喷，导致燃烧持续期明显加大，这对于提高柴

油机热效率，减低油耗是不利的，可见在选择喷油策略时，是需要折中某些方面的。

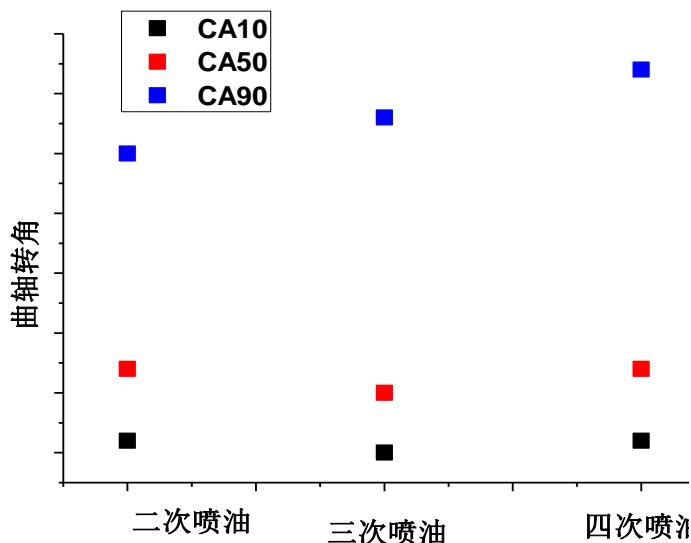


图 7 燃烧过程重要参数

## 4 总结

基于中低负荷，本文通过模拟不同喷油策略下的柴油机缸内燃烧过程，比较了最终的排放、油耗及放热率等情况，说明了多次喷射在降低压力升高率及排放方面是有一定优势的，但是后喷的加入会导致燃烧持续期加长，也会对热效率产生影响。因此，在实际工程中，喷油策略的选择还是需要折中多方面进行权衡考虑。三次和四次喷油策略对比，发现在三次喷油策略的基础上，有继续优化的潜力，可以结合试验找出最优的三次喷油方案。

## 5 参考文献

- [1] Dickey D w, Ryan T W. NOx control in Heavy-Duty Diesel Engines—what is the limit? [C]. SAE Paper 980174.
- [2] Ryan T W, Callahan T J. Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel [C]. SAE Paper 961160.
- [3] Zhao H, Xie H, Peng Z. Effect of recycled burned gases on homogeneous charge compression ignition combustion [J]. Combustion Science and Technology, 2005, 177(10): 1863