

缸内直喷发动机的燃烧和爆震仿真分析

Combustion and knocking analysis of GDI Engine

丁宁 徐政 陈明 张小矛 杨洋 林长林 陈曦

1. 上海汽车集团股份有限公司技术中心 2. 上海市汽车动力总成重点实验室

摘 要: 为了提高缸内直喷发动机的燃烧和爆震仿真分析的准确度, 运用 Converge 软件进行了定容弹内的喷雾光学标定。其喷雾的形态、贯穿度和粒径均和试验有较好的吻合度。针对两种不同的喷雾方案进行了燃烧和爆震仿真分析, 结果表明: 方案二产生的爆震倾向相对于方案一更小。

关键词: 燃烧; 爆震; 定容弹; 贯穿度

Abstract: In order to improve the accuracy of in-cylinder combustion and knocking analysis, converge code was using to calibrate spray in the constant volume bomb. The spray image, penetration length and SMD were match very well with experiment. Besides that, the combustion and knocking analysis were done to compare different spray pattern. The results show that spray pattern two can induce more knocking tendency than spray pattern one.

Key words: combustion; knocking; constant volume bomb; penetration length

1 概述

随着时代的发展, 缸内直喷发动机不断追求更高的低速扭矩、更高的整机功率和更低的污染物排放。大多数都采用了涡轮增压技术, 而且增压器的压比很大。这些措施都将导致发动机缸内爆震趋势的增加。爆震是缸内的末端混合气在主火焰到达之前发生的自燃现象, 它将导致发动机结构的破坏。通过三维 CFD 模拟分析可以在开发阶段更快地预测到爆震发生的位置和强度, 因此具备很好的实用性^[1-3]。

2 喷雾的光学标定

通过定容弹的光学标定可以显著提高缸内燃烧及爆震分析的准确性, 因此是本人研究的一个重要环节。本文研究的直喷发动机喷油器为 6 孔菱形喷油器, 喷油器设置在圆柱网格模型的上顶面中心处。因为喷雾在发展过程中往往受到内部湍流和表面空气剪切等作用的共同影响, 在其边缘会出现很多不规则区域, 应用喷雾锥角来描述其空间分布会产生较大误差, 因此应用喷雾图像和喷雾贯穿度来进行喷雾的校核是比较好的方法。图 1 是喷雾的光学标定, 从中可以发现喷雾的 CFD 仿真结果与试验结果在喷雾的形态和贯穿度上比较吻合。图 2 是 50mm 平面上的喷雾的 SMD, 稳定后该值约为 $6.5 \mu\text{m}$, 与试验测量结果吻合很好, 可以支持 CFD 计算。

表 1 分析工况

流体种类	燃油压力 (bar)	气体压力 (bar)	燃油温度 (°C)	气体温度 (°C)	喷射脉宽 (ms)
n-heptane	350	1	20	20	3

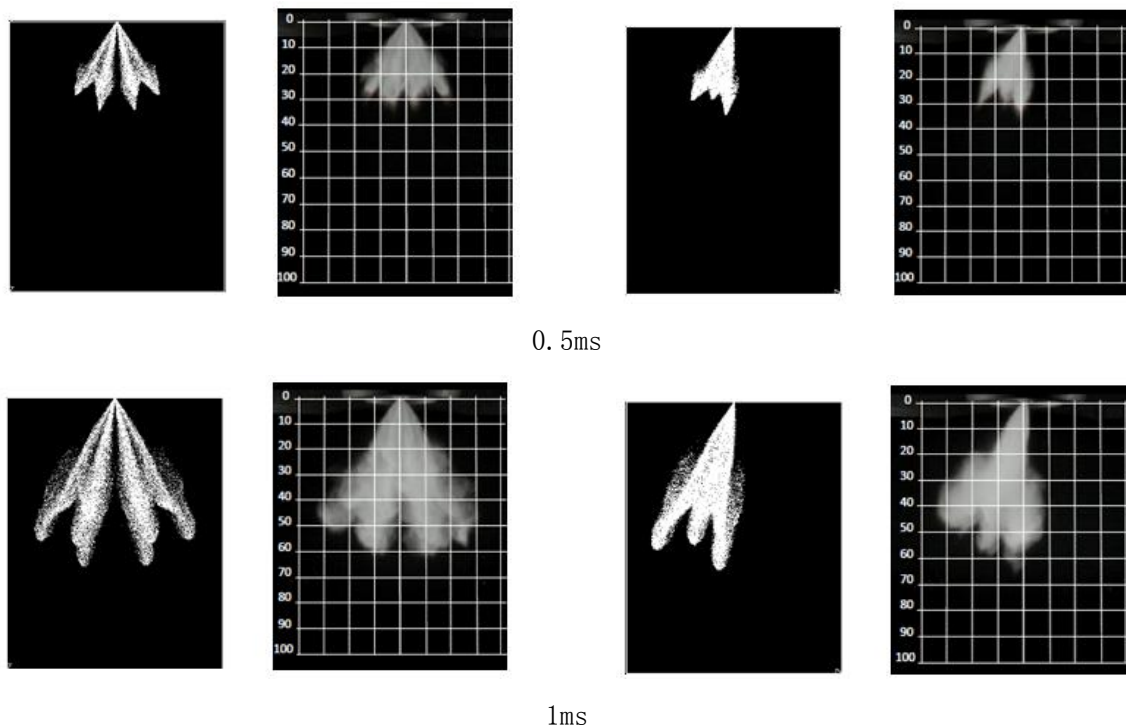


图 1 喷雾的光学标定

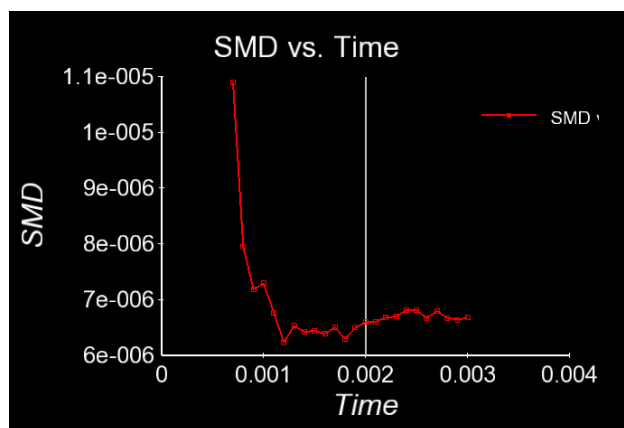


图 2 50mm 平面上的喷雾的 SMD

3 研究方案及计算设置

3.1 研究方案

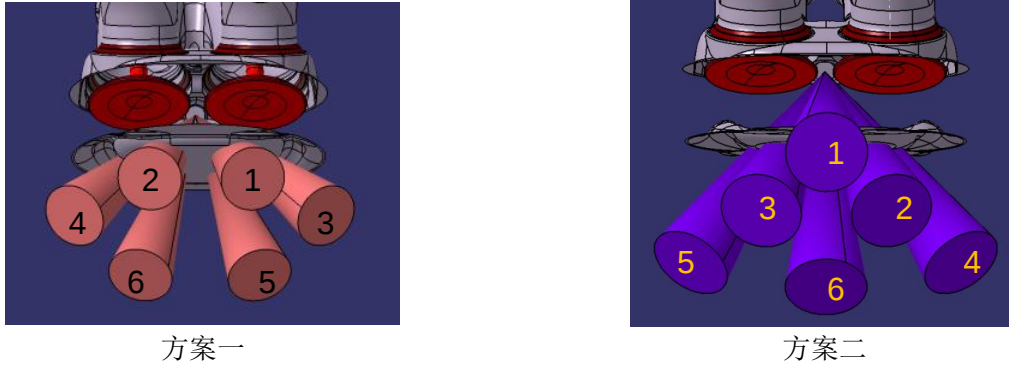


图 3 两种不同的油束设计方案

本文基于某排量为 2.0L 的增压直喷发动机，另外设计了喷雾。研究了不同喷雾设计对于爆震的影响。两种方案均为 6 孔方案，其中方案一为 6 孔菱形方案，方案二为 6 孔树形方案，且两方案均为均匀孔径。

3.2 计算模型的设置

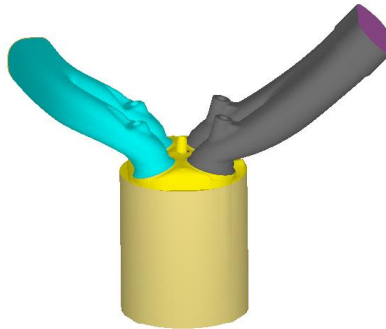


图 4 燃烧室的几何模型

表 2 计算模型设置

项目	类型
Fuel	IC8H18 (mass fraction: 90%), C7H16 (mass fraction: 10%)
Turbulence model	Reynolds Averaged Navier-Stokes (Rapid Distortion RNG k-ε)
Break-up model	KH(Kelvin-Helmholtz)-RT(Rayleigh-Taylor) Model
Parcel distribution	Distribute parcels evenly throughout cone
Injection drop distribution	Rosin-Rammler (based on SMD)
Drop Evaporation Model	Frossling Model
Combustion model	SAGE + Detailed chemistry model (48 species, 152 reactions)

3.3 计算的边界条件

本文针对 2000WOT 全负荷工况进行了缸内瞬态分析, 研究范围主要是该直喷汽油机的进气、压缩、燃烧冲程。图 5 为来自 GT-Power 的进排气压力、温度边界条件, 图 6 为发动机的进、排气升程曲线和相位。

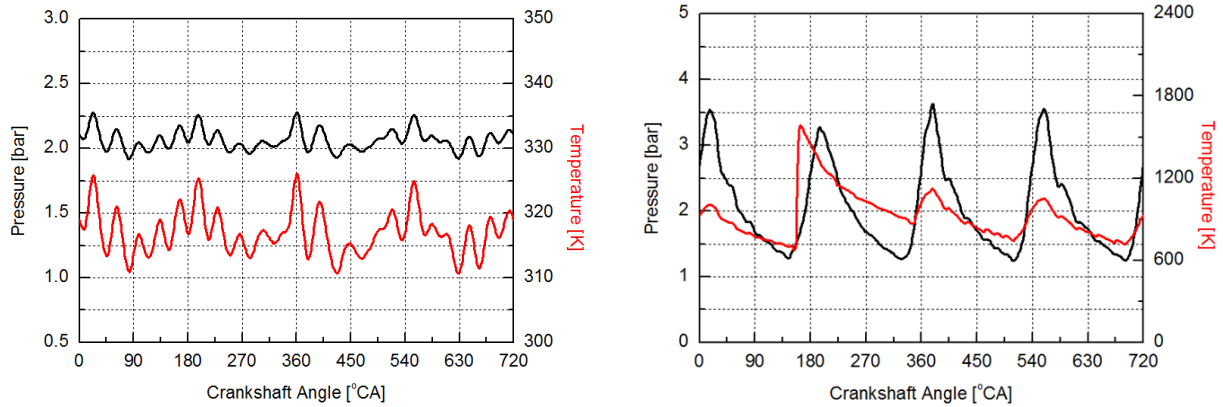


图 5 进排气压力、温度边界条件

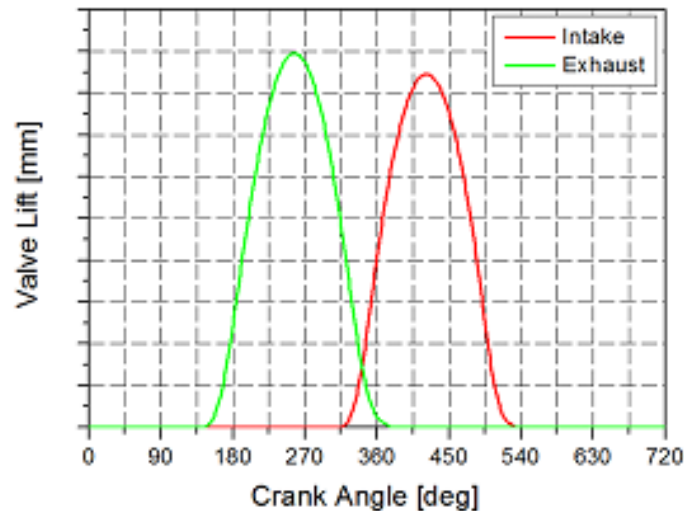
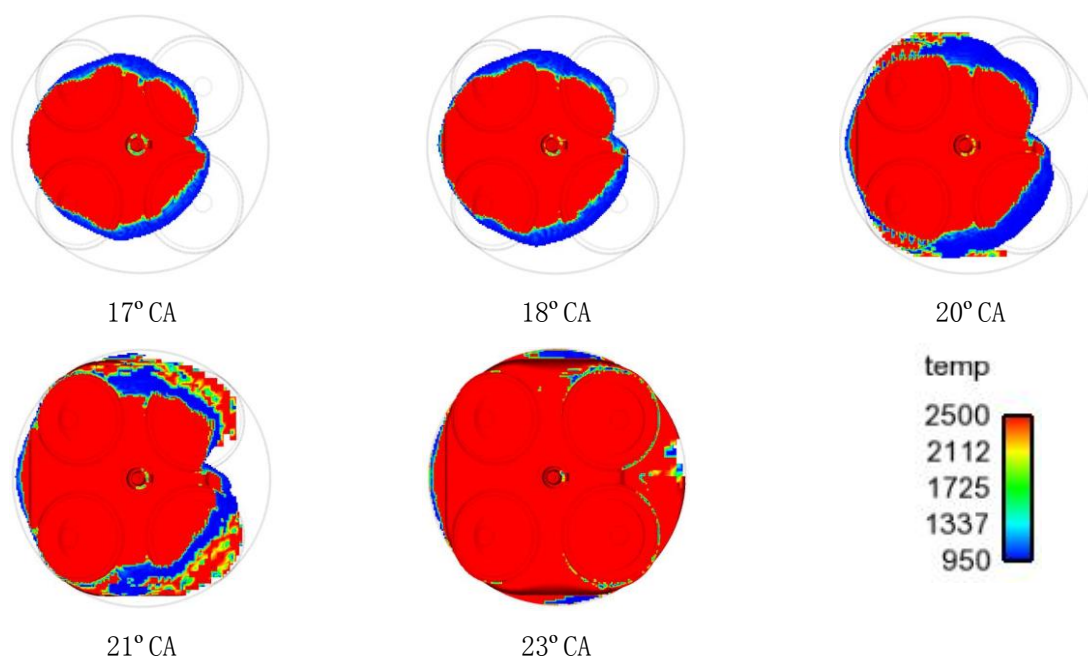


图 6 进、排气配气相位

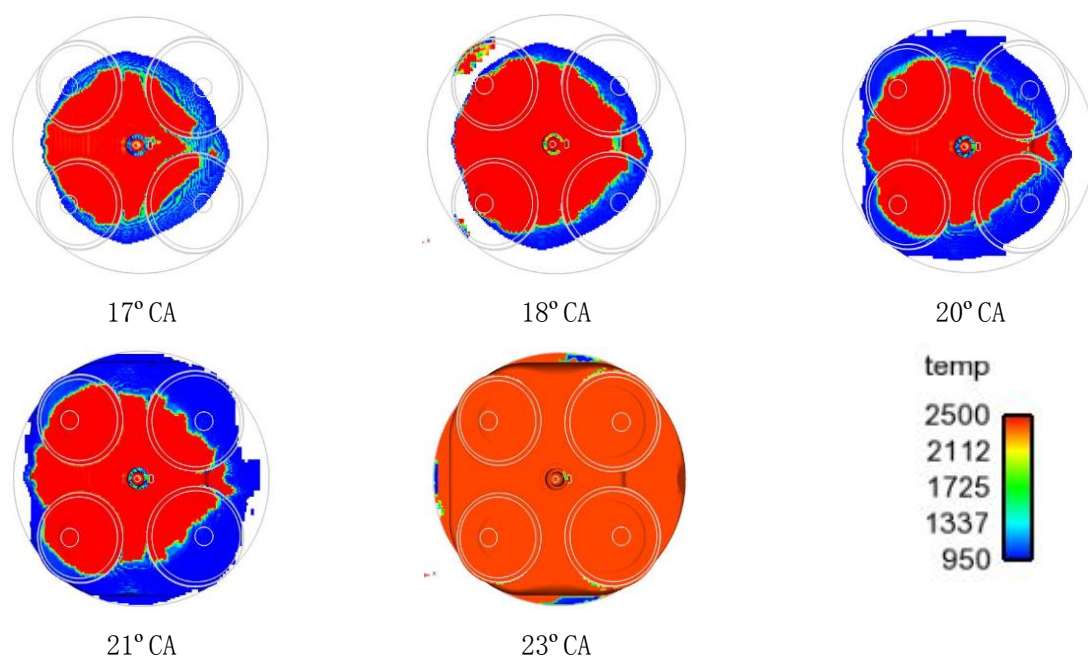
4 仿真结果及分析

图 7 为两个方案的爆震图像对比, 其中点火时刻均设置在上止点前 2 度。由方案一的爆震图像可知, 从点火开始到 18 度曲轴转角, 缸内火焰传播比较正常。是由火花塞处的火核开始, 一直向周围发展, 其中向排气侧的发展速度更快一些。在 20 度曲轴转角时, 可以明显的发现在排气侧高温火焰面尚未到达的区域出现了高温反应区域, 这就是爆震的开始。到了 21 度曲轴转角时, 发现出现爆震的区域已经明显的增加了, 主要是沿着缸壁已经由排气侧区域扩展到进气侧的区域。在 23 度曲轴转角时, 除了很少的区域以外, 火焰面基本上传播到缸套的四周。

方案二对应的爆震图像与方案一有明显的不同。以火花塞为中心, 该火焰面的传播在各个方向上更加均匀。在 18 度曲轴转角时, 排气侧出现了局部的爆震点, 但是出现爆震的位置比较小。随着火焰的传播, 爆震区域没有进一步扩大。



1) 方案一的爆震图像



2) 方案二的爆震图像

图 7 发动机的爆震图像

为了进一步详细研究发动机的爆震特性，在气缸内设置了 8 个监测点，就是沿着气缸的四周每隔 45 度曲轴转角设置一个监测点，其测点的布置如图 8 所示。利用监测点可以获得局部的缸压信号，通过傅里叶变换并对 6 千赫兹到 2.4 万赫兹的区域进行滤波处理。滤波之后，可以取得缸压最大值和最小值之差 PPmax，如图 9 所示。那么发动机的爆震指数 KI (Knocking Index) 就是缸内所有的

监测点的 PPmax 的平均值，见公式 1 所示。

$$KI = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N PP_{max,n} \quad (1)$$



图 8 缸内监测点的布置

表 3 各测点的 PPmax 和 KI 值

	$PP_{max,0}$	$PP_{max,1}$	$PP_{max,2}$	$PP_{max,3}$	$PP_{max,4}$	$PP_{max,5}$	$PP_{max,6}$	$PP_{max,7}$	KI
Case1	26.01	12.88	14.86	15.71	45.85	18.28	18.46	24.36	22.05
Case2	3.791	6.22	6.71	5.57	8.54	3.81	4.29	2.53	5.18

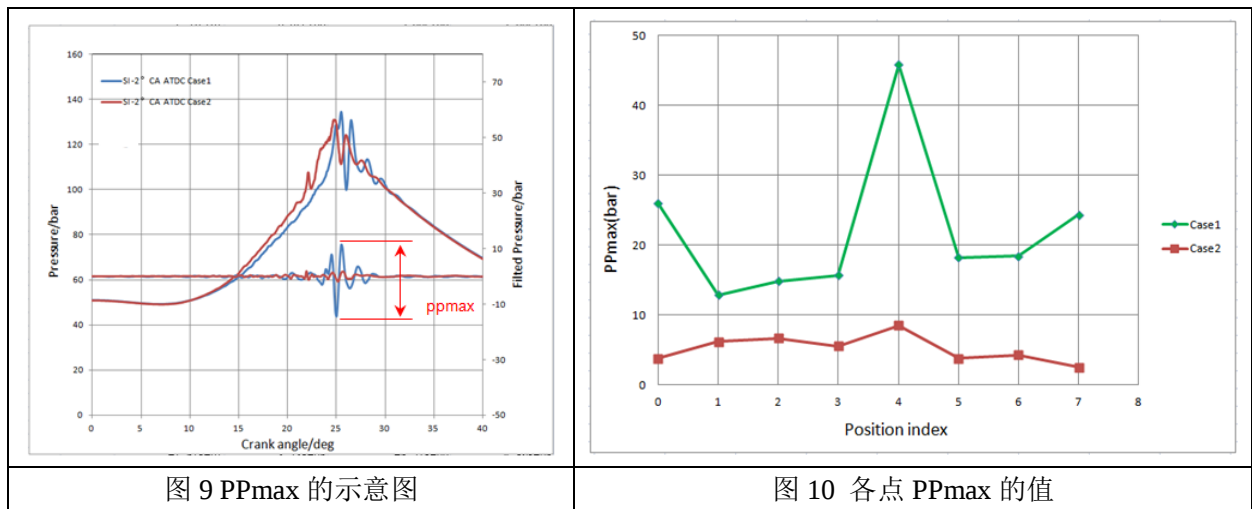


表 3 为各测点的 PPmax 值和 KI 值。从中可以发现方案一对应各测点的 PPmax 值均高于方案二对应的 PPmax 值。相应的 KI 值方案一为 22.05，而方案二为 5.18。这从数据的方面也证明了方案一的爆震倾向要明显高于方案二。

5 小结

为了提高缸内直喷发动机燃烧和爆震仿真分析的准确度，运用了 Converge 软件进行了 35MPa 下的定容弹内的喷雾光学标定。其喷雾的形态、贯穿度和粒径均和试验有较好的吻合度。在 2000WOT 工况下，针对两种不同的喷雾方案进行了燃烧和爆震仿真分析，结果表明了方案二产生的爆震倾向

明显小于方案一。

6 参考文献

- [1] Shinrak Park, Tetsuji Furukawa. Validation of Turbulent Combustion and Knocking Simulation in Spark-Ignition Engines Using Reduced Chemical Kinetics [C]. SAE Paper 2015-01-0750, 2015.
- [2] Alessandro D'Adamo, Sebastiano Breda, Stefano Fontanesi, et al. A RANS-Based CFD Model to Predict the Statistical Occurrence of Knock in Spark-Ignition Engines [C]. SAE Paper 2016-01-0581, 2016.
- [3] Sebastiano Breda, Alessandro D'Adamo, Stefano Fontanesi, et al. CFD Analysis of Combustion and Knock in an Optically Accessible GDI Engine[C]. SAE Paper 2016-01-0601, 2016.