

某增压发动机主动预燃烧室 CFD 仿真分析研究

CFD analysis for active pre-chamber of turbo-charged engine

庄林毅 李春芳 邹婷 崔天宇 张静

(北京汽车研究总院)

摘 要: 本文应用 CONVERGE 软件对某增压汽油发动机的主动预燃烧室进行仿真分析研究, 建立主预燃烧室发动机 CFD 仿真分析模型, 研究不同预燃烧室结构参数(喷孔直径/角度/个数)、不同进气道(高低滚流比)、预燃烧室内不同喷油策略等对主/预燃烧室内的流动、油气混合、火焰发展及传播过程的影响规律, 深入探究及可视化高热效率燃烧技术特性。

关键词: 增压发动机 主动预燃烧室 缸内燃烧 高低滚流比进气道、喷油策略

Abstract: It is used the software of CONVERGE to analyze the active pre-chamber. Using CFD method to research active per-chamber different orifice diameters, angles, numbers, intake ports, and injection strategies, it can be seen the difference for tumble ratio, mixture, flame propagation of the main chamber and pre-chamber which can be studied the high efficiency combustion technology.

Key Words: Turbocharged engine; Active pre-chamber; Combustion; High and low tumble intake ports; Injection strategies

1. 引言

近年来, 传统内燃机不断受到油耗法规、排放法规和新能源发展的挑战。目前, 主流量产汽油机的有效热效率为 38~41%, 未来, 45%乃至更高的有效热效率成为内燃机的发展方向^[1]。为了达到这一目标, 需要从汽油机能量分配的角度, 即摩擦、泵气、传热、燃烧和排气这几个途径来提升热效率。主动预燃室能够实现快速而稳定的燃烧, 配合米勒循环、EGR 和稀燃等技术, 可以显著地降低泵气、传热和燃烧的损失, 近年来在汽油机上的研究和应用逐渐广泛, 被认为是未来汽油机最有希望的技术路线之一^[2-3]。

采用 CONVERGE 软件, 针对最佳热效率点, 建立主动预燃烧室增压发动机 CFD 仿真分析模型, 研究不同预燃烧室结构参数(喷孔直径/角度/个数)、不同进气道及喷油策略对主/预燃烧室内的流动、油气混合、火焰发展及传播过程的影响规律。

2. 计算模型与模型标定

2.1 建立模型

应用 CONVERGE 软件建立预燃烧室增压发动机缸内燃烧计算模型, 发动机排量为 1.499L, 压

缩比为 13，主燃烧室采用 PFI 喷射，实现 λ 大于 2 的稀燃，预燃烧室内采用直喷，实现 λ 等于 1 附近的燃烧。仿真模型中主燃烧室采用均匀混合气进入，只考虑预燃烧室内的喷油过程。单缸仿真模型如图 1 所示，对预燃烧室喷孔、火花塞、喷油位置等处进行局部的网格加密。

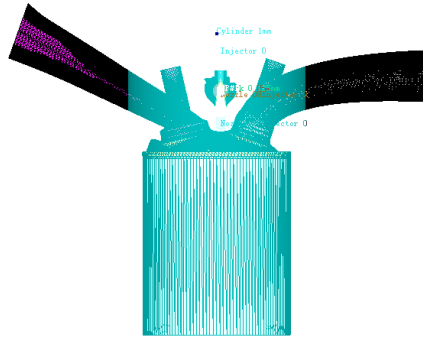


图 1 CONVERGE 燃烧计算模型

2.2 模型标定

根据相关试验结果标定 GT 模型，从 GT 模型中提取 BTE 点（最佳热效率点）的边界放入 CONVERGE 软件中，基于预燃烧室孔径 1.1mm、孔数 6 个、涡流角度 60° 标定调试 CONVERGE 仿真模型，最终缸压标定结果如图 2 所示。预燃烧室内喷油量（ λ 值）对主/预燃烧室内缸压影响较大，喷油量增加，预燃烧室及主燃烧室内缸压增大，最终 BTE 点预燃烧室内 699° CA 点火， λ 值标定为 1.23 时，CONVERGE 仿真缸压结果与试验、GT 的一致。

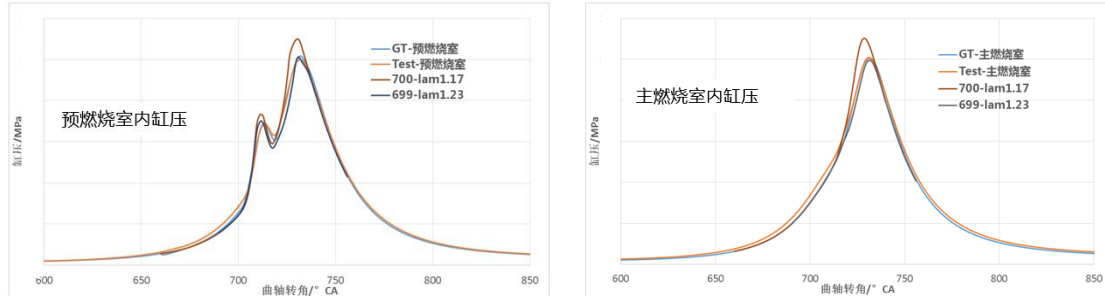


图 2 CONVERGE 缸压标定结果

3. 预燃烧室结构参数仿真分析

3.1 预燃烧室不同孔径仿真分析结果

保持预燃烧室其他结构参数一致，只改变预燃烧室喷孔直径，本文研究喷孔直径 0.9mm、1.1mm、1.3mm、1.5mm 对缸内流动及燃烧的影响。流动结果如图 3 所示。不同孔径对主燃烧室的流动基本无影响；不同孔径对预燃烧室内 X/Y 方向的流动影响不大；孔径越小，预燃烧室内 Z 方向的涡流越大。不同孔径对主燃烧室内流动过程的湍动能基本无影响。孔径越小，预燃烧室内点火时刻湍动能越大，越有利于火焰初期传播。

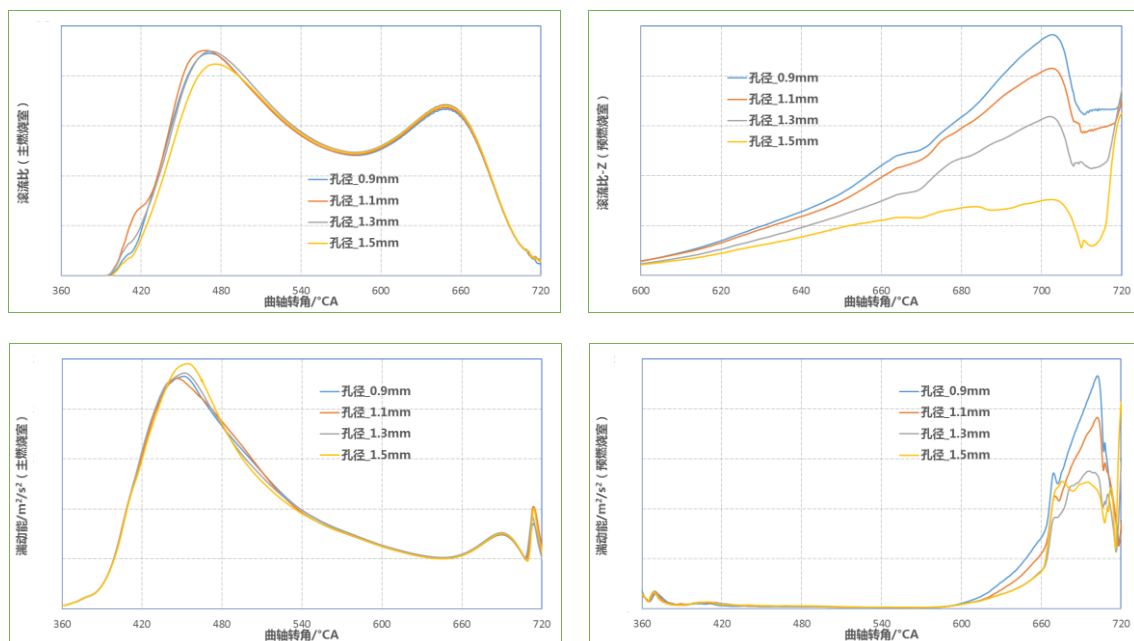
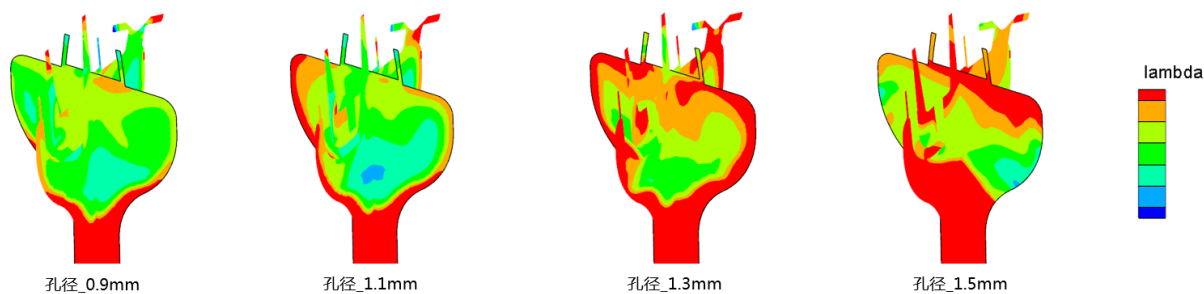
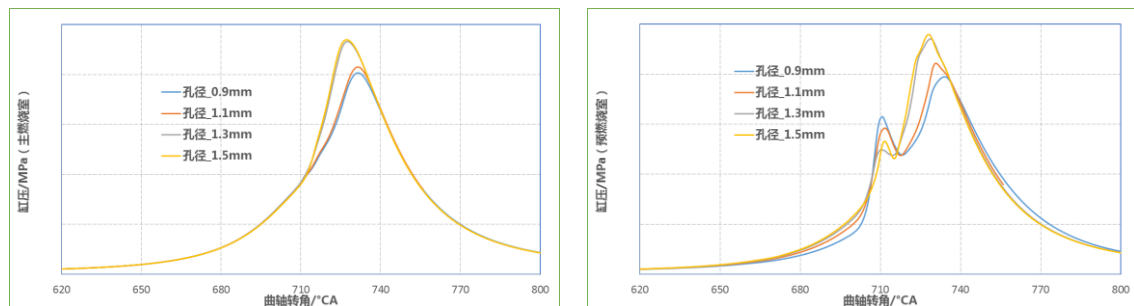


图3 不同孔径滚流比与湍动能

孔径越小，预燃烧室内点火时刻 λ 值越小（见图4所示），油气混合偏浓，有利于点火及火焰初期传播。

图4 预燃烧室内 λ 值分布

预燃烧室孔径越大，主燃烧室内燃烧越快，缸内燃烧压力及温度越大。预燃烧室孔径越小，预燃烧室内燃烧越快，第一个峰值燃烧压力越大，燃烧温度越高；预燃烧室孔径越小，预燃烧室内第二个燃烧峰值越小。



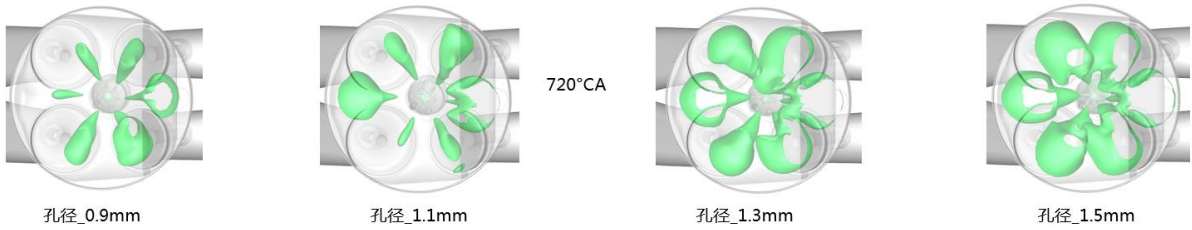


图 5 不同孔径缸内燃烧压力及燃烧过程

3.2 预燃烧室不同孔数仿真分析结果

保持预燃烧室其他结构参数一致，只改变预燃烧室喷孔个数，本文研究喷孔个数 5、6、7、8 对缸内流动及燃烧的影响。流动结果如图 6 所示。不同孔数对主燃烧室的流动影响不大；对预燃烧室内 X/Y 方向的流动影响不大；孔数越少，预燃烧室内 Z 方向的涡流越大。不同孔数对主燃烧室内流动过程的湍动能基本无影响。燃烧过程中，孔数 6 的湍动能峰值最大，孔数 8 的次之；孔数越少，预燃烧室内点火时刻湍动能越大，越有利于火焰初期传播。

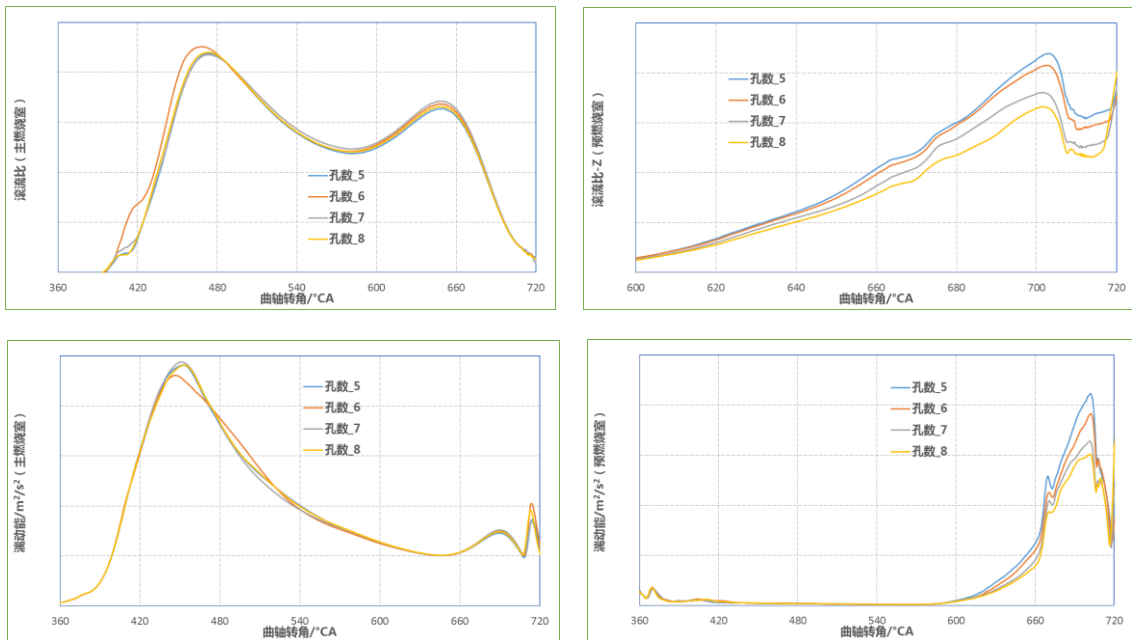
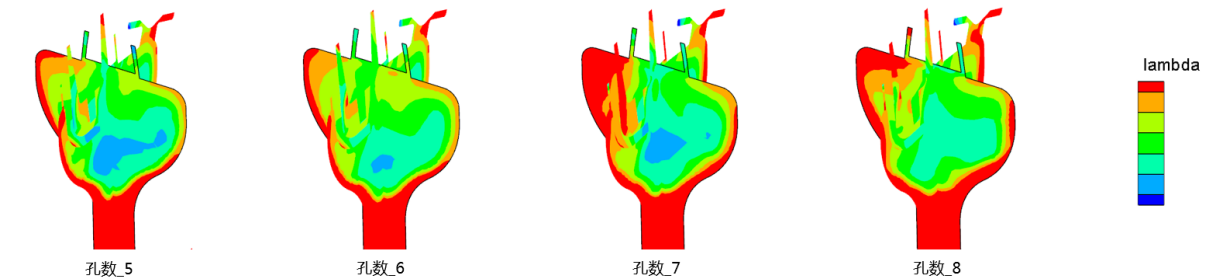


图 6 不同孔数滚流比与湍动能

孔径越小，预燃烧室内点火时刻 λ 值越小（见图 7），油气混合偏浓，有利于点火及火焰初期传播。

图 7 预燃烧室内 λ 值分布

预燃烧室孔数越多，主燃烧室内缸内压力峰值越大，燃烧效率越快，燃烧温度越高。预燃烧室

孔数越少，预燃烧室内缸压第一个峰值越大，燃烧温度越高，燃烧放热越快，提供主燃烧室点火能量越大；预燃烧室孔数越多，预燃烧室内缸压第二个峰值及温度越高。

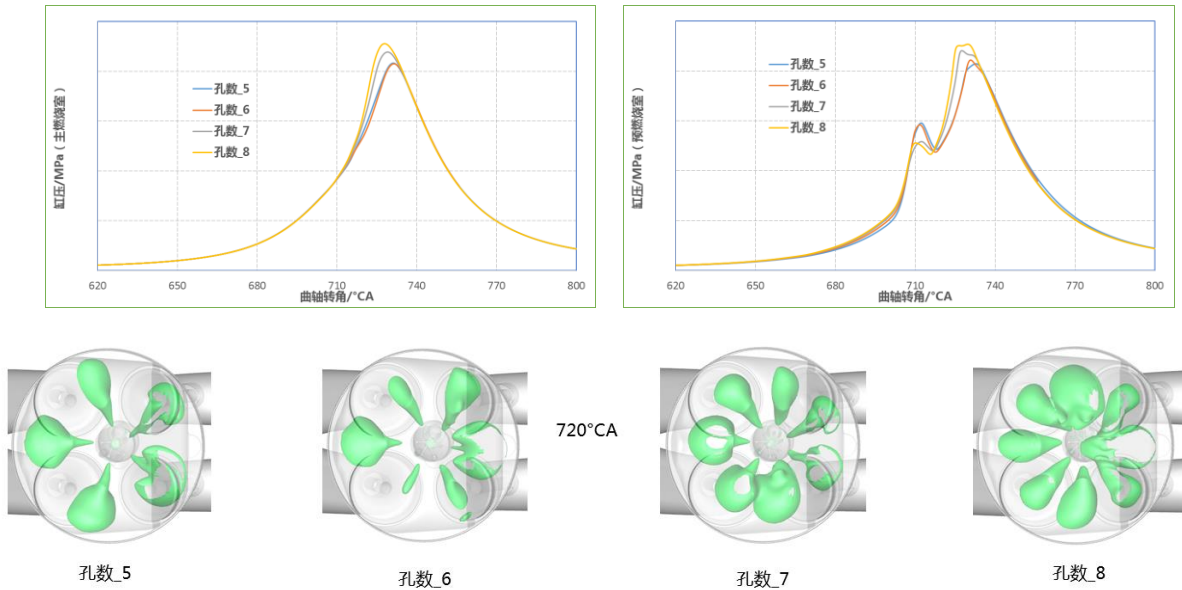


图 8 不同孔数缸内燃烧压力及燃烧过程

3.3 预燃烧室不同喷射角度仿真分析结果

保持预燃烧室其他结构参数一致，只改变预燃烧室喷孔喷射角度，本文研究喷射角度 30° 、 45° 、 60° 、 75° 对缸内流动及燃烧的影响。流动结果如图 9 所示。不同角度对主燃烧室的流动影响不大；对预燃烧室内 X/Y 方向的流动影响不大。角度越大，预燃烧室内 Z 方向的涡流越大。不同角度对主燃烧室内流动过程的湍动能基本无影响。角度越大，预燃烧室内点火时刻湍动能越大，越有利于火焰初期传播。

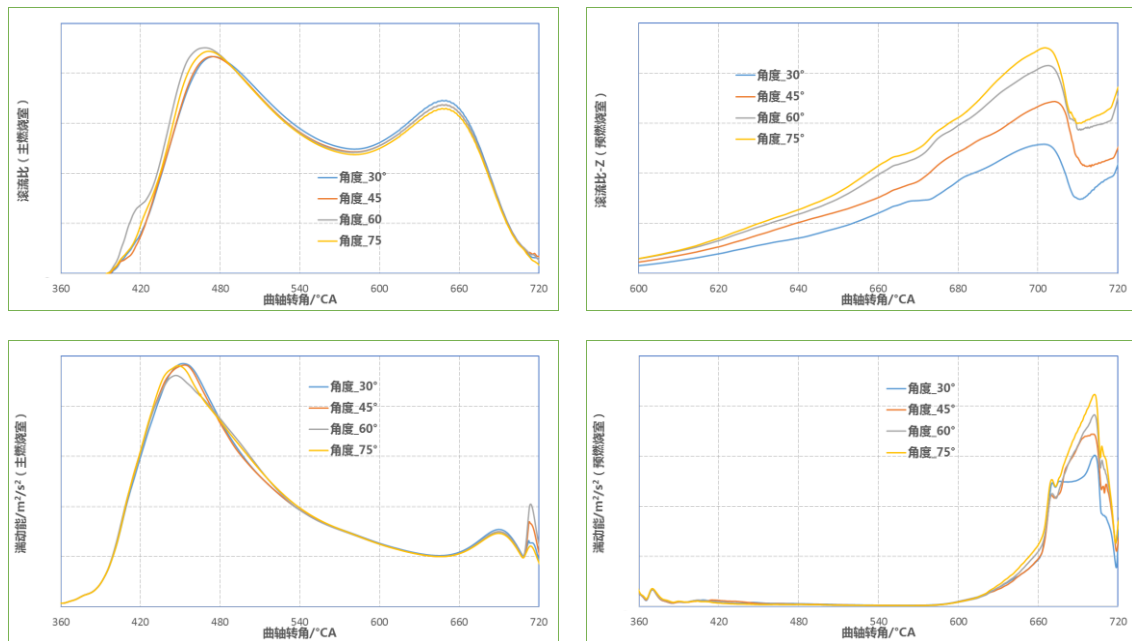


图 9 不同孔数滚流比与湍动能

不同角度对预燃烧室内点火时刻 λ 值影响较小（见图 10），角度 60° 及 75° 时油气混合略微偏

浓。

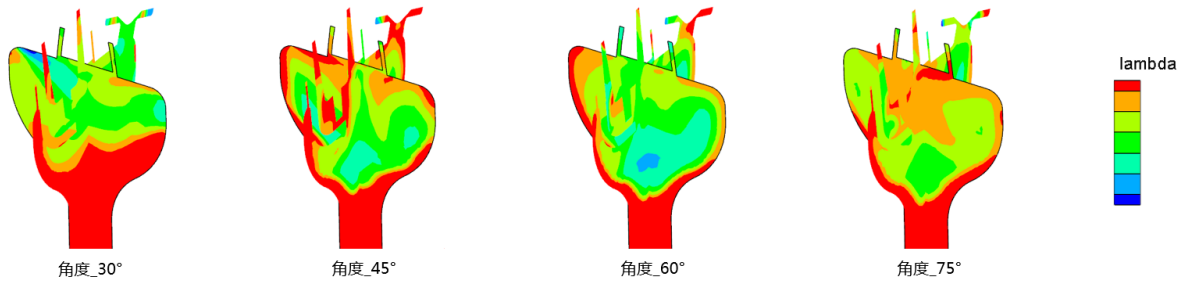


图 10 预燃烧室内 λ 值分布

与其他喷射角度方案相比，角度 60° 时，主燃烧室内缸内压力峰值最大，燃烧效率最高；不同角度时，预燃烧室内燃烧压力及燃烧温度相近，提供主燃烧室点火能量相近（除角度 30° 略微偏低）。

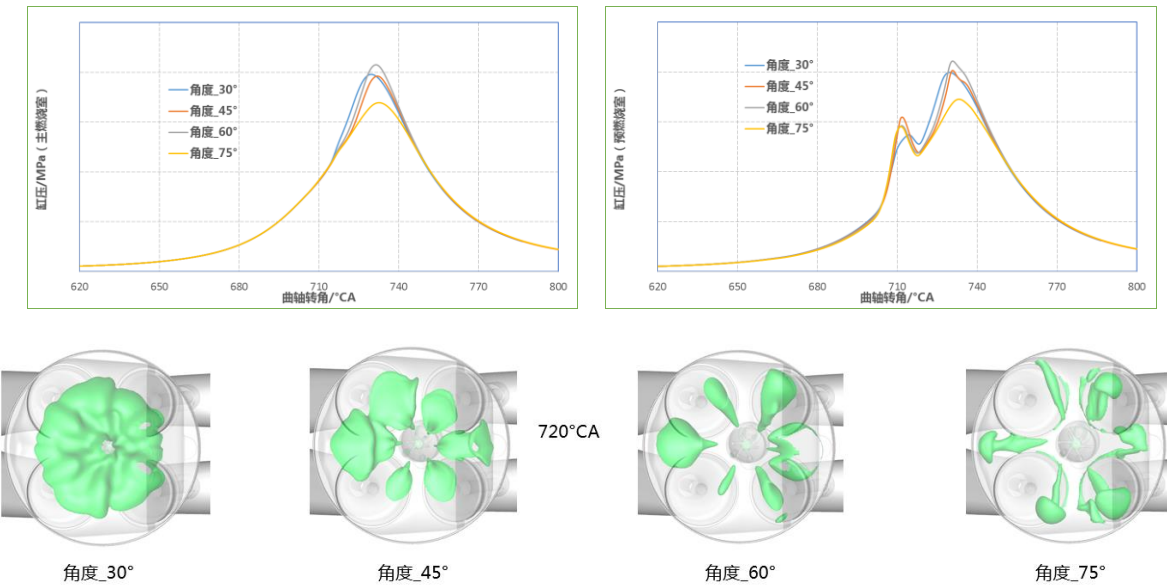
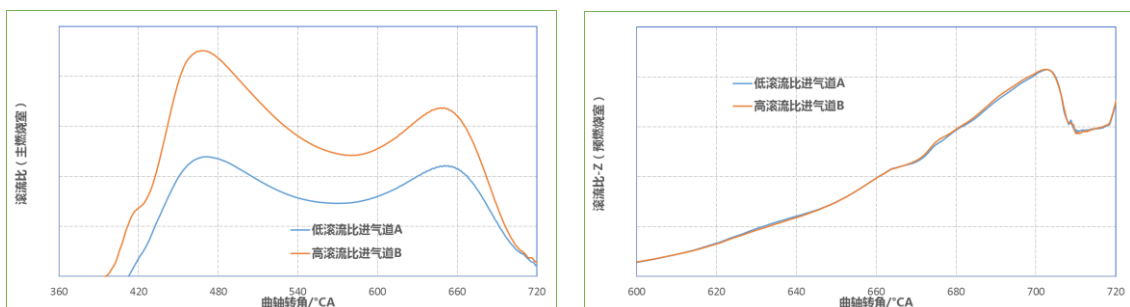


图 11 不同喷射角度缸内燃烧压力及燃烧过程

4. 不同进气道及预燃烧室喷射策略仿真分析

4.1 不同进气道仿真分析结果

保持预燃烧室相同结构参数，本文研究高低滚流比进气道对缸内流动及燃烧的影响。流动结果如图 12 所示。不同进气道对主燃烧室的流动影响较大；对预燃烧室内 X/Y 方向的流动略有影响，对 Z 方向的涡流无影响。不同进气道对主燃烧室内流动过程的湍动能影响很大，高滚流比进气道 B 可以产生较大的湍动能，有利于主燃烧室的火焰传播。不同进气道对预燃烧室内流动过程的湍动能基本无影响。



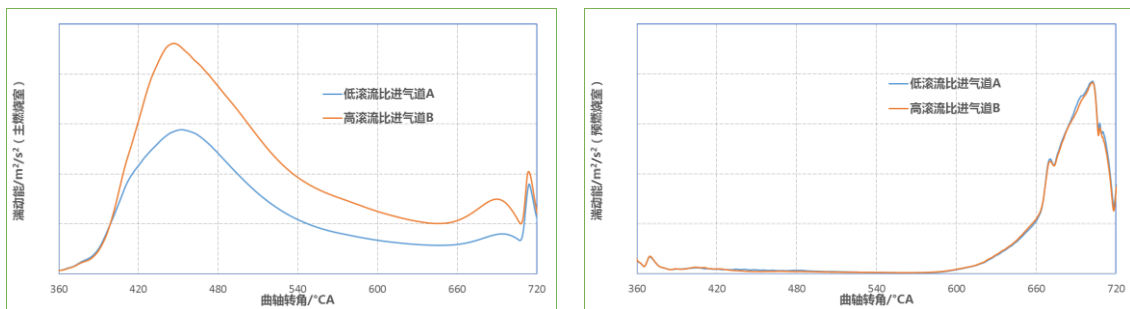
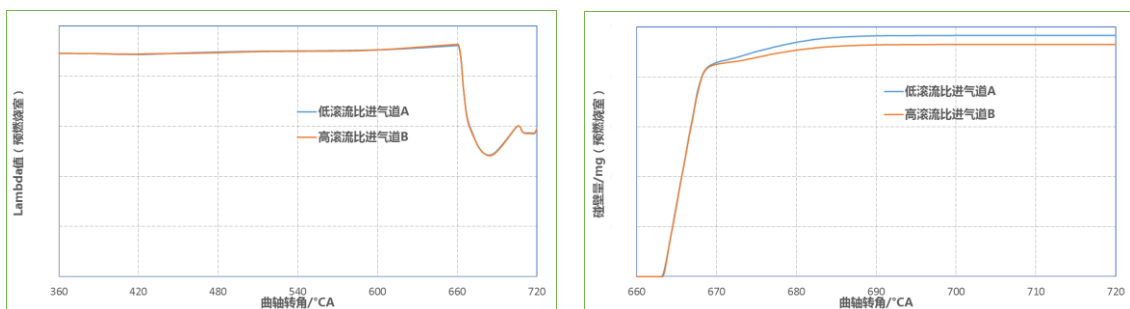
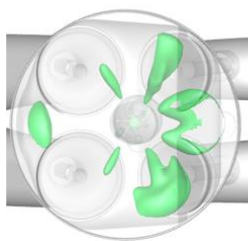
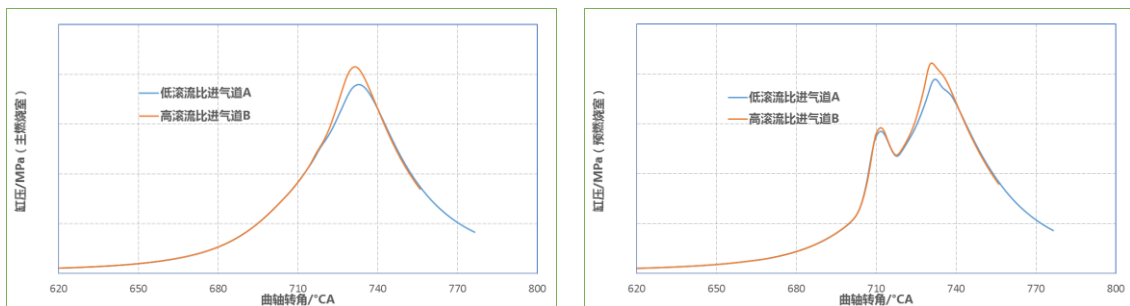


图 12 不同进气道滚流比与湍动能

不同进气道对预燃烧室内平均 λ 值基本无影响。低滚流比进气道 A 的燃油碰壁量略微偏高，见图 13 所示。

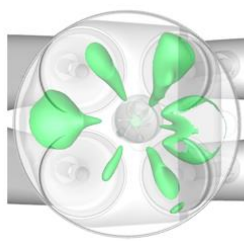
图 13 预燃烧室内 λ 值及燃油碰壁量

高滚流比进气道 B 的主燃烧室内缸内压力峰值大，燃烧放热率快，燃烧温度高。不同进气道对预燃烧室内缸压第一个峰值及燃烧温度影响较小；高滚流比进气道 B 的预燃烧室内缸压第二个峰值及燃烧温度较高。



低滚流比进气道A

720°CA



高滚流比进气道B

图 14 不同进气道缸内燃烧压力及燃烧过程

4.2 预燃烧室不同喷射时刻仿真分析结果

保持预燃烧室相同结构参数, 本文研究预燃烧室不同喷油时刻对缸内流动及燃烧的影响。滚流比结果如图 15 所示。不同喷油时刻对主燃烧室的流动无影响; 对预燃烧室内 X/Y 方向喷油过程的流动影响较大; 喷油时刻越靠前, 预燃烧室内 X/Y 滚流比越大。不同喷油时刻对预燃烧室内 Z 方向的流动基本无影响。

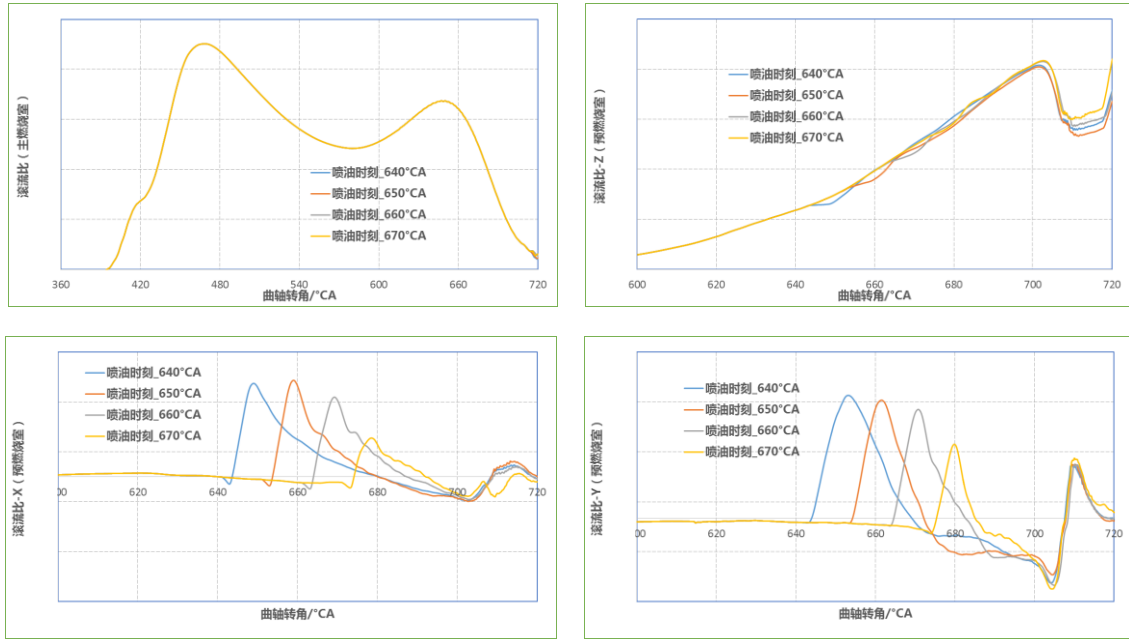


图 15 预燃烧室不同喷射时刻的滚流比

不同喷油时刻对主燃烧室内的湍动能及预燃烧室内点火时刻的湍动能影响较小, 见图 16 所示。

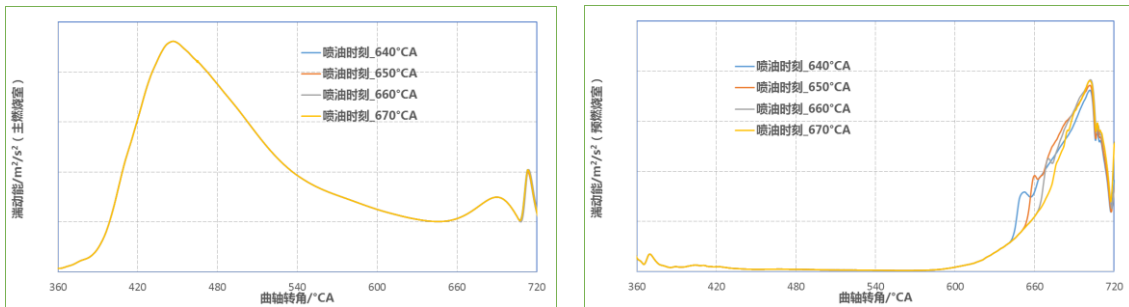


图 16 预燃烧室不同喷射时刻的湍动能

不同喷油时刻对预燃烧室瞬态的 λ 值有影响; 对预燃烧室点火时刻的平均 λ 值基本无影响。

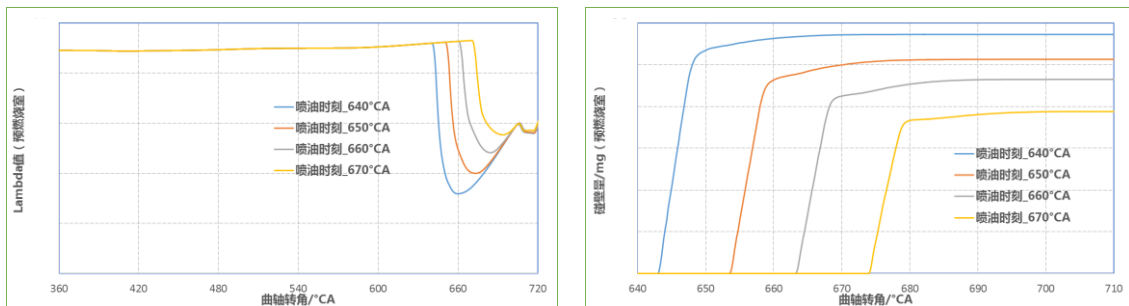


图 17 预燃烧室内 λ 值及燃油碰壁量

喷油时刻越靠前，燃油碰壁量越高，见图 17 所示。

640/650/660° CA 喷油时，主/预燃烧室缸内燃烧压力及燃烧温度差异较小；推迟喷油至 670° CA 时，主/预燃烧室缸内压力峰值最大、燃烧温度最高。因此，过度推迟喷油会导致燃烧压力升高率增加，燃烧粗暴，燃烧噪音增大。

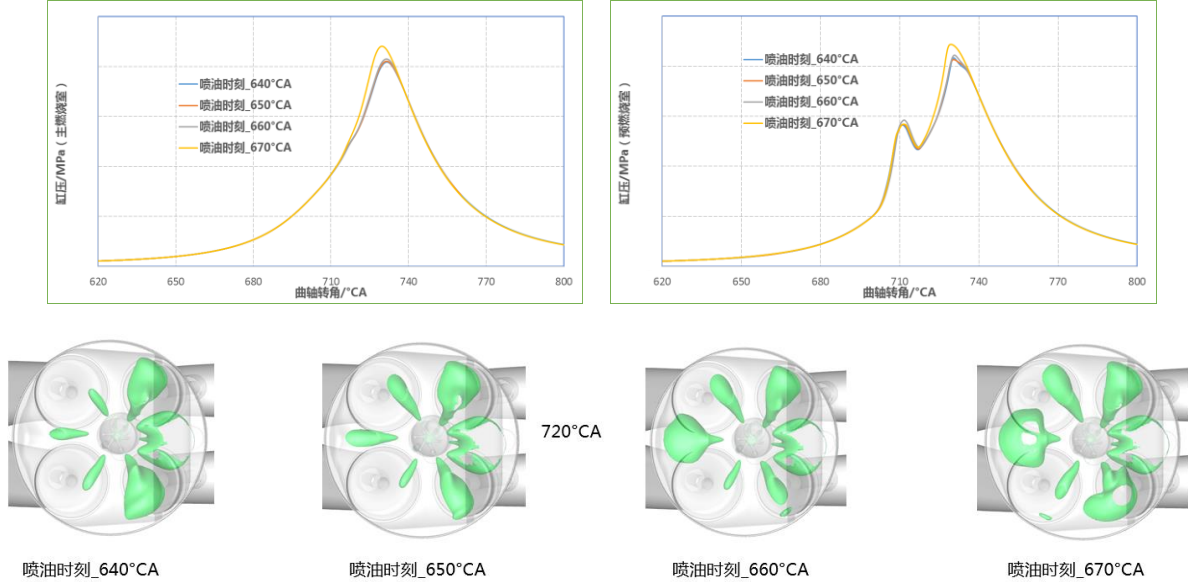


图 18 预燃烧室不同喷射时刻的缸内燃烧压力及燃烧过程

4.3 预燃烧室不同喷射压力仿真分析结果

保持预燃烧室相同结构参数，本文研究预燃烧室不同喷射压力对缸内流动及燃烧的影响。滚流比结果如图 19 所示。不同喷油压力对主燃烧室的流动无影响；对预燃烧室内 X/Y 方向的流动影响较大；30bar 喷油压力时，预燃烧室内喷油过程中 X/Y 滚流比较低。不同喷油压力对预燃烧室内 Z 方向的流动基本无影响。

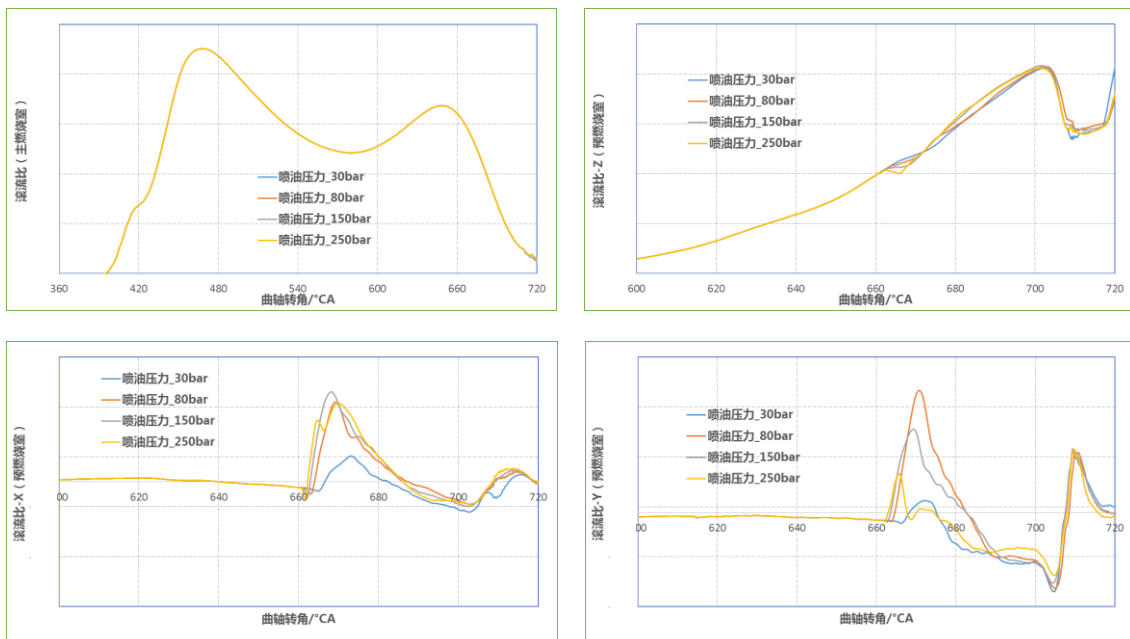


图 19 预燃烧室不同喷射压力的滚流比

不同喷油压力对主燃烧室内的湍动能无影响。不同喷油压力对预燃烧室内喷油过程中湍动能有影响，点火时刻湍动能相近，见图 20 所示。

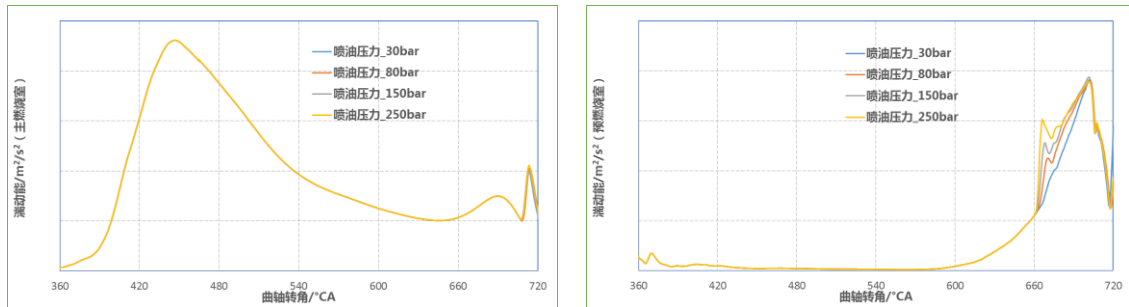


图 20 预燃烧室不同喷射压力的湍动能

不同喷油压力，对瞬态 λ 值有影响；对点火时刻的 λ 值影响较小。不同喷油压力下燃油碰壁量都较高，30bar 喷油压力下碰壁量略微偏低，见图 21 所示。

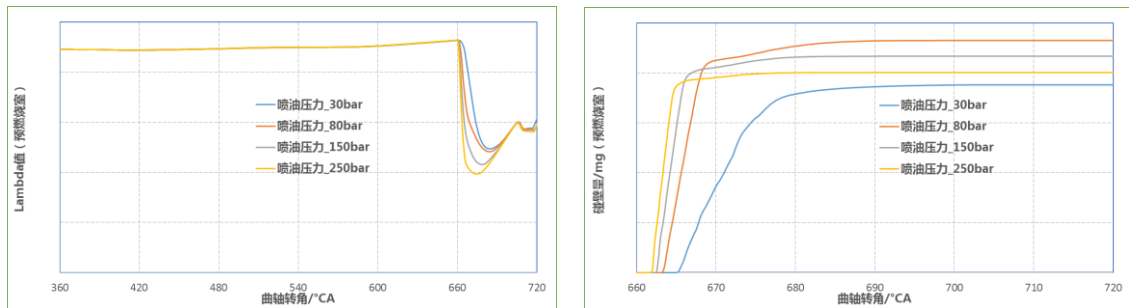


图 21 预燃烧室内 λ 值及燃油碰壁量

80/150/250bar 喷油压力时，主燃烧室缸内燃烧压力及燃烧温度差异较小；使用 30bar 较低喷油压力时，主燃烧室缸内压力峰值最大、燃烧温度最高。使用 30bar 较低喷油压力时，预燃烧室缸内第二个压力峰值最大、燃烧温度最高。因此，过低喷油压力会导致燃烧压力升高率增加，燃烧粗暴，燃烧噪音增大。

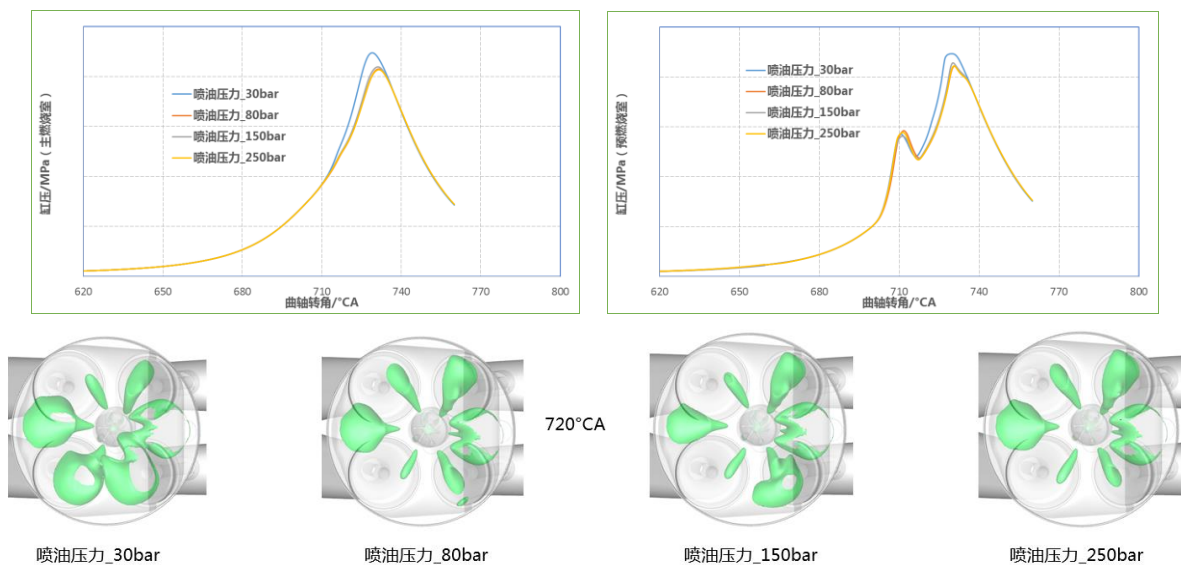


图 22 预燃烧室不同喷射压力的缸内燃烧压力及燃烧过程

5. 总结

本文应用 CONVERGE 软件对某增压汽油发动机的主动预燃烧室进行仿真分析研究，主要的仿真规律如下：

1) 预燃烧室喷孔直径越小：预燃烧室内 Z 方向的涡流越大；预燃烧室内点火时刻湍动能越大，有利于点火及火焰初期传播；预燃烧室内点火时刻 λ 值越小，油气混合偏浓，有利于点火及火焰初期传播；预燃烧室内燃烧越快，第一个峰值燃烧压力越大，燃烧温度越高，燃烧噪音及热负荷越大；主燃烧室内燃烧越慢，缸内燃烧压力及温度越小。

2) 预燃烧室喷孔个数越少：预燃烧室内 Z 方向的涡流越大；预燃烧室内点火时刻的湍动能越大，有利于点火及火焰初期传播；预燃烧室内点火时刻 λ 值越小，油气混合越浓，有利于点火及火焰初期传播；预燃烧室内燃烧越快，缸压第一个峰值越大，压力升高率越大，燃烧温度越高，提供主燃烧室点火能量越大；预燃烧室孔数越少，导致喷入主燃烧室内的点火能量少；因此，孔数越多，主燃烧室内燃烧越快，燃烧效率越高，同时，缸内燃烧压力峰值越大，燃烧温度越高。

3) 预燃烧室喷孔角度越大：预燃烧室内 Z 方向的涡流越大；预燃烧室内点火时刻的湍动能越大，有利于点火及火焰初期传播；预燃烧室内点火时刻 λ 值略微偏小，油气混合略微偏浓，有利于点火及火焰初期传播；不同角度时，预燃烧室内燃烧压力、燃烧温度相近，提供主燃烧室点火能量相近（除角度 30° 略微偏低）；角度 60° 时，主燃烧室内缸内压力峰值最大，燃烧效率最高。

4) 不同进气道方案（低滚流比进气道 A/高滚流比进气道 B）：对主燃烧室内流动影响较大，对预燃烧室内流动基本无影响；对主燃烧室内湍动能影响较大，对预燃烧室内湍动能基本无影响；高滚流比进气道 B 在主燃烧室内产生较大的湍动能，有利于主燃烧室内的火焰传播；对预燃烧室内的平均 λ 值及分布基本无影响；对预燃烧室内的缸压第一个峰值及燃烧温度影响不大；受主燃烧室内燃烧状况的影响，高滚流比进气道 B 的预燃烧室内缸压第二个峰值及燃烧温度较高；高滚流比进气道 B 的主燃烧室内缸内压力峰值大，燃烧温度高。

5) 预燃烧室内不同喷油时刻（ $640/650/660/670^\circ$ CA）：对主燃烧室内流动无影响，对预燃烧室内 Z 方向流动基本无影响，对预燃烧室内 X 及 Y 方向流动有影响；对主燃烧室内湍动能无影响，对预燃烧室内点火时刻的湍动能基本无影响；对预燃烧室内点火时刻的平均 λ 值基本无影响，对 λ 值分布略有影响；推迟喷油至 670° CA 时，预燃烧室缸内第二个压力峰值最大，燃烧温度最高； $640/650/660^\circ$ CA 喷油时，预燃烧室缸内第二个压力峰值，燃烧温度相近；推迟喷油至 670° CA 时，主燃烧室缸内压力峰值最大，燃烧温度最高； $640/650/660^\circ$ CA 喷油时，主燃烧室缸内压力峰值及燃烧温度相近。

6) 预燃烧室内不同喷油压力（ $30/80/150/250^\circ$ CA）：对主燃烧室内的流动无影响，对预燃烧室内 Z 方向流动基本无影响，对预燃烧室内 X 及 Y 方向流动有影响；对主燃烧室内湍动能无影响，对预燃烧室内点火时刻的湍动能基本无影响；对预燃烧室内点火时刻的平均 λ 值基本无影响，对 λ 值分布略有影响；30bar 较低喷油压力时，预燃烧室缸内第二个压力峰值最大，燃烧温度最高；80/150/150bar 喷油时，预燃烧室缸内压力峰值，燃烧温度相近。30bar 较低喷油压力时，主燃烧室缸内压力峰值最大，燃烧温度最高；80/150/150bar 喷油时，主燃烧室缸内压力峰值及燃烧温度相近。

参考文献

- [1] 刘耀东, 宫艳峰, 李金成, 陈海娥. 汽油机预燃室技术的研究及发展前景[J]. 汽车文摘, 2019 (11): 11-15.
- [2] Michael Bunce, Hugh Blaxill. Sub-200 g/kWh BSFC on a Light Duty Gasoline Engine [J]. SAE Technical Paper 2016-01-0709, 2016, doi:10.4271/2016-01-0709.
- [3] Marc Sens, Emanuel Binder, Paul- Benjamin Reinicke, et al. Pre- Chamber Ignition and Promising Complementary Technologies [C]. 8th Aachen Colloquium China Automobile and Engine Technology, Beijing, 2018.