

HCDI 燃烧模式在高压直喷天然气发动机中的应用

The application of HCDI combustion mode in high-pressure direct-injection natural gas engines

李孟涵 咸凯 张强

(山东大学能源与动力工程学院)

摘 要: 为了进一步提高高压直喷天然气发动机的效率并降低排放, 应用三维 CFD 模拟软件 Converge 研究了预混直喷 (HCDI) 燃烧模式下不同喷射策略的对发动机燃烧过程和排放影响。通过对三维计算结果的分析, 得出了 HCDI 燃烧模式的放热率、缸内温度分布以及排放物变化规律, 并对比了 HCDI 燃烧模式和高压直喷 (HPDI) 燃烧模式及均值压燃 (HCCI) 燃烧模式在放热规律和排放物生成方面的区别。

关键词: 高压直喷天然气发动机、预混直喷、均值压燃、Converge

Abstract: In order to improve the combustion and reduced the emissions of high pressure direct injection natural gas engine, the effects of injection strategy on the combustion and emissions of HCDI combustion pattern were investigated by the three-dimensional software package Converge. By analyzing the calculation results, the heat release rate, in-cylinder temperature distribution as well as the changing regularity of emissions of HCDI combustion pattern were obtained and compared with the corresponding results of HPDI and HCCI combustion pattern.

Key words: high pressure direct injection natural gas engine, HCDI, HCCI, Converge

1. 引言

高压直喷天然气发动机采用较先进的天然气高压直喷扩散燃烧技术, 避免了传统天然气发动机的爆震问题, 可以在保证热效率的前提下降低排放, 是目前天然气发动机的研究热点。高压直喷天然气发动机一般采用微量柴油引燃的着火方式, 柴油和天然气由同一喷射器的两组不同的喷嘴喷入气缸并由两个电磁阀分别控制, 因此, 喷射策略的制定比较灵活^[1-3]。通过对高压直喷天然气发动机喷射策略的优化可以实现高压直喷 (High Pressure Direct Injection, HPDI)、均值压燃 (Homogenous Charge Compression Ignition, HCCI)、预混直喷 (Homogenous Charge Direct Injection, HCDI) 多种燃烧模式, 从而达到进一步优化发动机性能的目的^[4]。本文的主要研究内容为基于化学反应动力学和 CFD 软件 Converge 对 HCDI 燃烧模式在高压直喷天然气发动机上的应用方法和优化效果的探索。

2. 高压直喷天然气发动机 CFD 模型建立

由于本文的研究对象为高压直喷天然气发动机, 模拟过程中涉及高压天然气的喷射过程, 因此对计算资源消耗较大, 为了提高计算效率, 模拟仅进行进排气门关闭状态下的工作过程。由于研究对象为由柴油机改装而来, 进气流场的初始化可以通过涡流比的设置完成。

2.1 研究对象

本文的研究对象为船用双共轨电控高压天然气发动机, 发动机的主要参数如表 1 所示。

表 1 发动机主要参数

参数名称/单位	参数值
燃烧室	折返式
缸径/mm	150
行程/mm	150
连杆长度/mm	300
压缩比	15.7

2.2 网格划分

本文中的计算基于 Converge 软件，利用 Converge 的自动划分网格功能进行计算网格的划分。对于所研究的 1/9 燃烧室，网格划分时采用的基础尺寸为 2mm，柴油喷束和天然气喷孔位置细化为基础网格的 1/8，燃烧室壁面边界部分网格细化为基础网格的 1/2，并同时对速度和温度梯度较大的区域进行 1/4 和 1/2 的局部加密。

2.3 模型的设置和验证

采用 RNG k- ϵ 湍流模型模拟缸内流场，修正的 KH-RT 模型模拟柴油的破碎过程，Frossling 蒸发模型模拟柴油液滴的蒸发过程，O'Rourke 模型模拟柴油液滴的碰撞过程，碳烟模型选取了利用 C₂H₂ 计算碳烟生成的 Hiroyasu 两步法碳烟模型。计算燃烧时，选取正庚烷为柴油的表征燃料、甲烷为天然气表征燃料，正庚烷机理部分采用了 ERC 的正庚烷简化机理，甲烷机理部分选取了 AramcoMech 1.3 的简化机理，NO_x 机理采用了 12 步简化机理。由于高压直喷天然气发动机工作过程中涉及天然气的高压喷射，对计算资源的消耗较大。因此，将 1/9 燃烧室与循环边界条件相结合进行三维模拟计算。对所建立高压直喷天然气发动机的三维 CFD 仿真模型缸压的验证如图 1 所示，排放的验证如图 2 所示。如缸压和排放的验证图所示，所建立的三维模型可以较好的预测高压直喷天然气发动机的缸压以及排放数值和排放趋势，并可以较为可靠的进行不同喷射策略下高压直喷天然气发动机的计算。

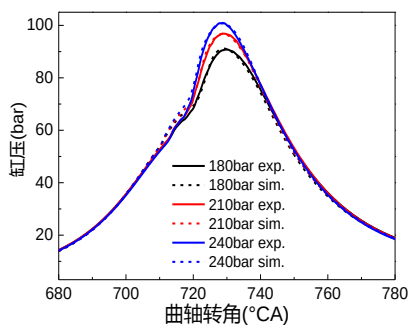


图 1 三维模型缸压验证

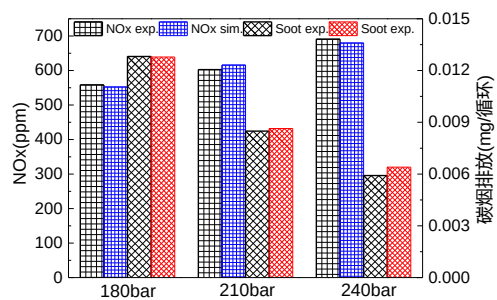


图 2 排放验证

2.4 算例设置

为了探索 HCDI 燃烧模式在高压直喷天然气发动机上的应用，本文针对 HCDI 燃烧模式的不同喷射策略对燃烧和排放的影响进行了研究，并与 HPDI 燃烧模式和 HCCI 燃烧模式进行了对比。不同燃烧模式的喷射策略示意如图 3 所示。如图所示，HPDI 燃烧模式的实现方式为在引燃柴油喷射结束后

喷射全部天然气；HCDI 燃烧模式在高压直喷天然气发动机上的实现方式为在引燃柴油喷射前后各喷射部分天然气；HCCI 燃烧模式的实现方式为在引燃柴油喷射前足够长的时间喷射全部天然气。在进行 HCDI 燃烧模式计算时，在引燃柴油喷射前喷射天然气的比例（Percentage of the First Gas Injection, FGP）分别设置为 10%、30%、50%、70%、90%，剩余的天然气在第二次天然气喷射时引入气缸，计算过程中保持初始和边界条件不变。

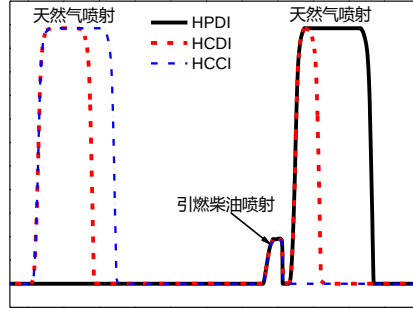


图 3 喷射策略示意

3. 计算结果及分析

3.1 燃烧放热过程分析

图 4 为不同燃烧模式下的缸压和放热率曲线。如图所示，随着在第一次天然气喷射中喷射燃料的增加，缸内压力峰值呈升高趋势。这主要是由天然气被引燃的速度决定的，第一次天然气喷射中喷射的天然气越多，柴油喷入气缸时缸内的天然气/空气混合气越浓，可燃混合气形成所需要的时间越短，柴油引燃天然气所需的时间越短。由不同燃烧模式下的放热率曲线可知，不同燃烧模式下放热率均出现两个放热阶段。在 HPDI 燃烧模式和第一次天然气喷射比例较小的 HCDI 燃烧模式下，第一个放热阶段主要是柴油的放热阶段，因此随着第一次天然气喷射比例的升高，第一个放热阶段的峰值变化较小。随着第一次天然气喷射比例的增加和天然气/空气预混气当量比的增加，第一个放热阶段包含了柴油和天然气两种燃料的燃烧过程，因此第一个放热阶段的峰值增加。第二个放热阶段的峰值由于受第二次天然气喷射的预混比例和第一次天然气喷射后形成的天然气/空气混合气当量比分布影响，在第一次天然气喷射比例较小时高于 HPDI 燃烧模式相应峰值，在第一次天然气喷射比例大于 50% 时，与 HPDI 燃烧模式相应峰值的差别不大。

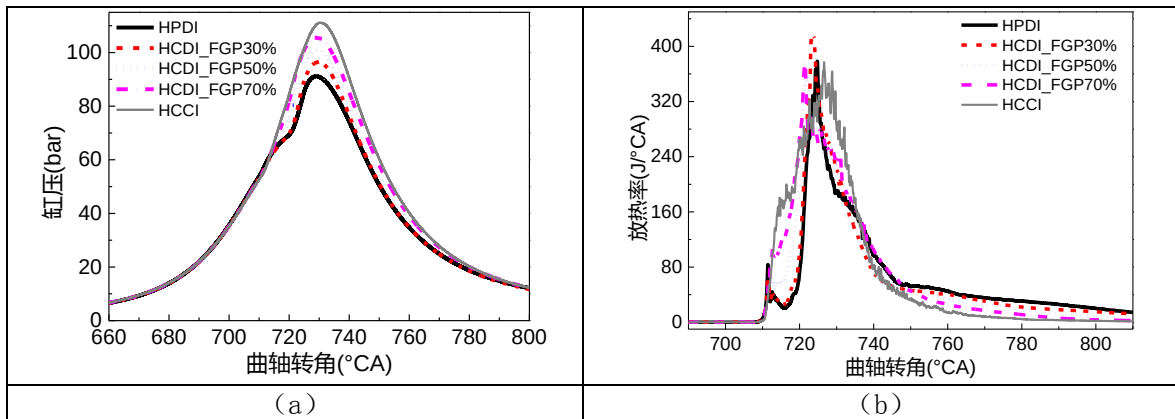


图 4 不同燃烧模式下的缸压和放热率

图 5 为不同燃烧模式下的指示热效率。从图中可以看出，由于燃烧相位的提前和燃烧完善程度的改善，HCDI 燃烧模式可以达到高于 HPDI 燃烧模式的指示热效率，但由于燃烧完善程度和火焰传播

速度比 HCCI 燃烧模式低，HCDI 燃烧模式的指示热效率低于 HCCI 燃烧模式。图 6 为不同燃烧模式下的温度分布云图。如图所示，在柴油着火后的燃烧初期，HPDI 燃烧模式火焰向四周传播的速度最慢，HCCI 燃烧模式火焰向四周传播的速度最快。天然气被引燃后，由于 HPDI 和 HCDI 燃烧模式存在柴油喷射后的天然气直喷阶段，因此在天然气燃烧阶段火焰主要从天然气喷束附近向四周传播，受天然气扩散过程的影响；而 HCCI 燃烧模式主要是一个预混火焰的传播过程。由于本文中的 HCCI 燃烧模式并未达到低温燃烧的运行条件，因此并未实现低温燃烧且燃烧相位相对提前，整个燃烧过程中高温区的分布范围大于 HPDI 和 HCDI 燃烧模式。

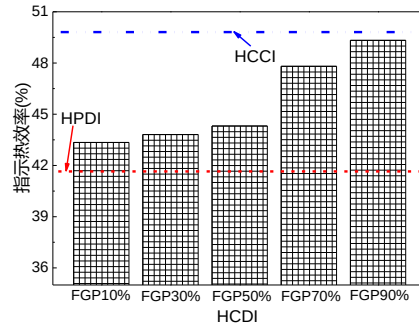


图 5 不同燃烧模式下的指示热效率

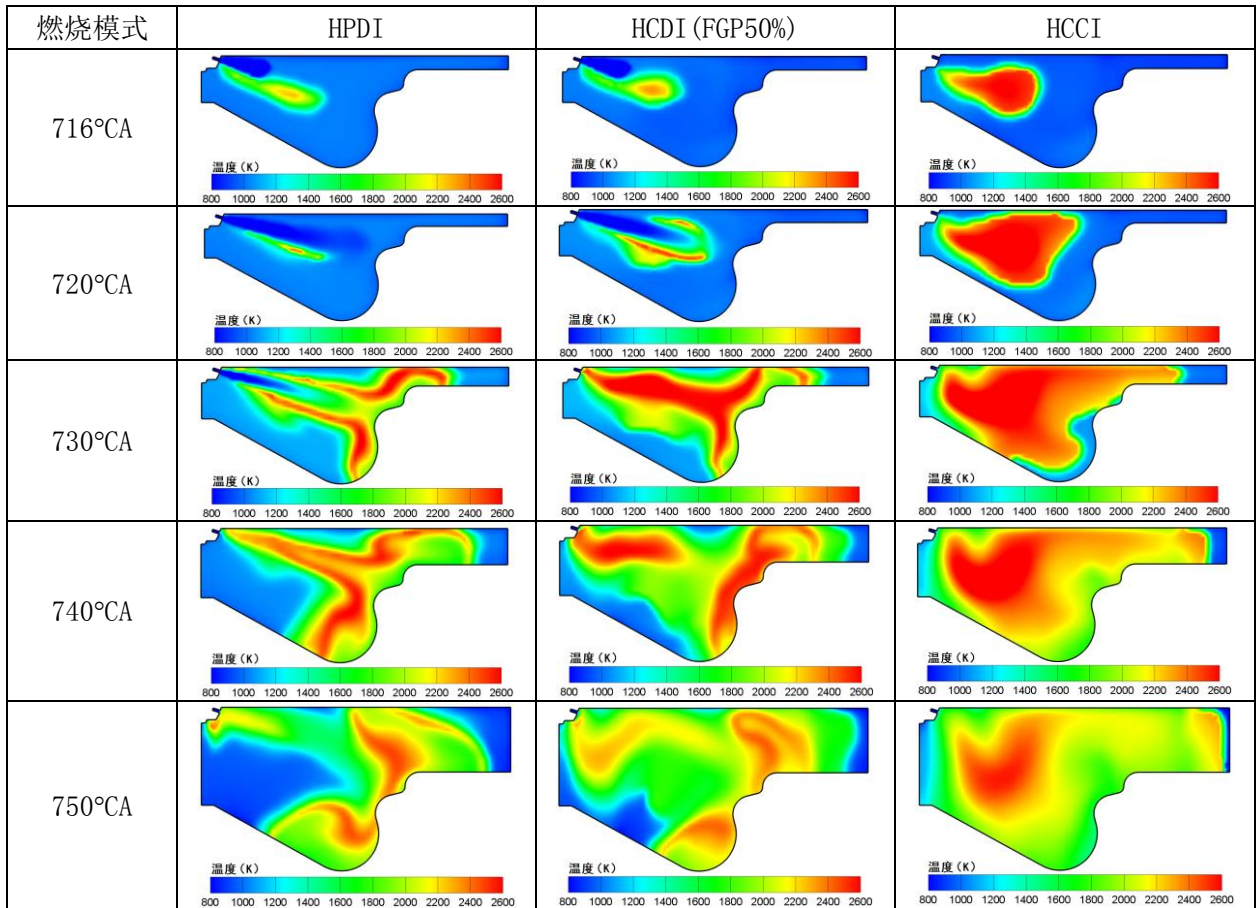


图 6 不同燃烧模式下的温度分布云图

3.2 排放分析

本文中研究的主要是对后处理装置要求较高的 NO_x 和碳烟排放，这两者同时也是 HPDI 燃烧模式排放控制的重点。图 7 为不同燃烧模式下的 NO_x 和碳烟排放。如图所示，HCCI 燃烧模式的 NO_x 排放最高，HCDI 燃烧模式的 NO_x 排放随着第一次天然气喷射比例的增加呈增加的趋势，在第一次天然气喷射比例较低时低于 HPDI 燃烧模式，第一次天然气喷射比例达到 30% 以后高于 HPDI 燃烧模式。碳烟排放的趋势与 NO_x 有所不同，HCCI 燃烧模式由于形成过浓区域的倾向较小，碳烟排放最低，HCDI 燃烧模式的碳烟排放随第一次天然气喷射比例的增加而降低，第一次天然气喷射比例较小时，HCDI 燃烧模式的碳烟排放出现大于 HPDI 燃烧模式的情况，当第一次天然气喷射比例达到 30% 以后，碳烟排放低于 HPDI 燃烧模式。

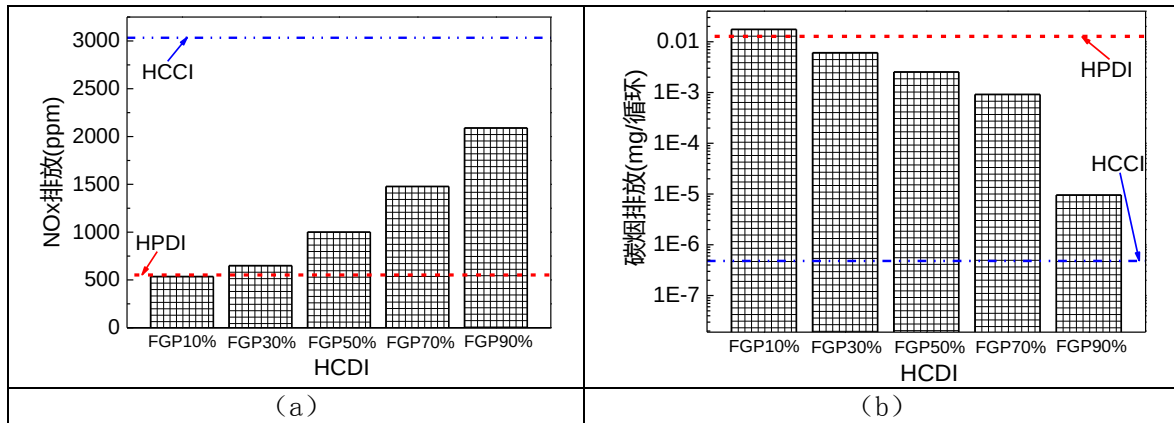


图 7 不同燃烧模式下的 NO_x 和碳烟排放

图 8 为不同燃烧模式下的 NO_x 摩尔分数曲线和缸内平均温度。如图所示，在天然气燃烧阶段， NO_x 排放开始进入较为迅速的升高阶段，且快速升高阶段开始的时刻与缸内温度开始快速升高的时刻一致。随着温度升高开始时刻的提前， NO_x 摩尔分数曲线开始升高的时刻提前，升高速度越快且最终达到的排放值也越高。另外，HCDI 燃烧模式第一次天然气喷射比例达到 70% 之后，继续增加第一次天然气喷射的比例会导致缸内平均温度的大幅度升高和局部高温区域的增加，继而造成 NO_x 排放的大幅升高。

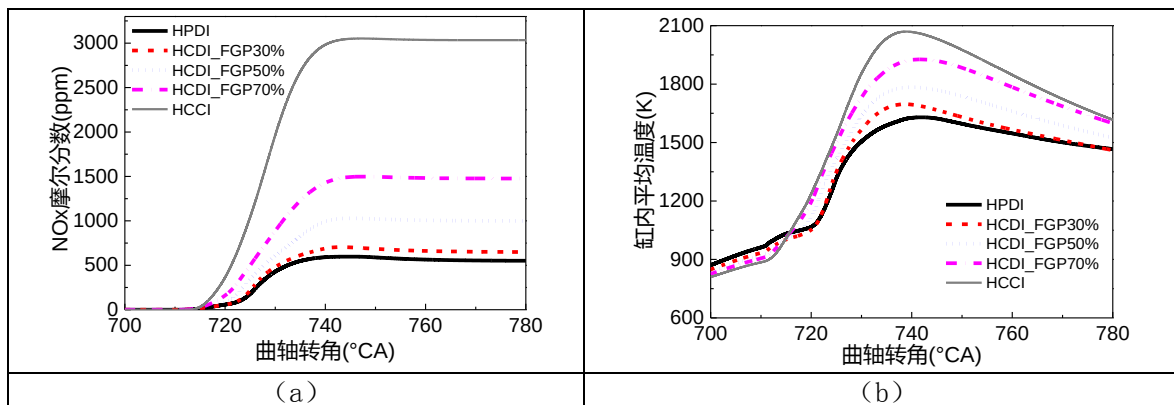


图 8 不同燃烧模式下的 NO_x 摩尔分数曲线和缸内平均温度曲线

图 9 为不同燃烧模式下的碳烟质量变化曲线和 C_2H_2 摩尔分数曲线。如图所示，发动机以 HPDI 和 HCDI 燃烧模式运行时，天然气燃烧阶段产生的 C_2H_2 和碳烟峰值远大于引燃柴油燃烧阶段，因此，对于这两种燃烧模式，天然气的燃烧过程是碳烟排放的主要来源；发动机以 HCCI 燃烧模式运行时，由

于天然气的预混程度较大，在天然气燃烧阶段并未形成明显的 C_2H_2 和碳烟峰值，柴油燃烧过程是碳烟排放的主要来源。如图 10 中不同燃烧模式的当量比分布云图可见，HPDI 模式的燃烧过程中消耗的大部分天然气是柴油着火后喷入气缸的，在整个燃烧过程中容易形成较多的过浓区域，更容易生成更大的 C_2H_2 和碳烟峰值。HCDI 燃烧模式由于有部分燃料在燃烧过程开始前就处于较均匀的当量比小于 1 的稀薄状态，第二次天然气喷射结束后，燃料过浓区域小于 HPDI 燃烧模式。HCCI 燃烧模式由于全部的天然气均在柴油喷射前引入气缸，在整个燃烧过程中仅在柴油喷入的部分出现当量比大于 1 的区域，有效的抑制了碳烟的生成。然而，HCCI 燃烧模式在近壁面处容易形成当量比相对较大的区域，增加了爆震发生的可能性，燃烧过程的不稳定性增加。

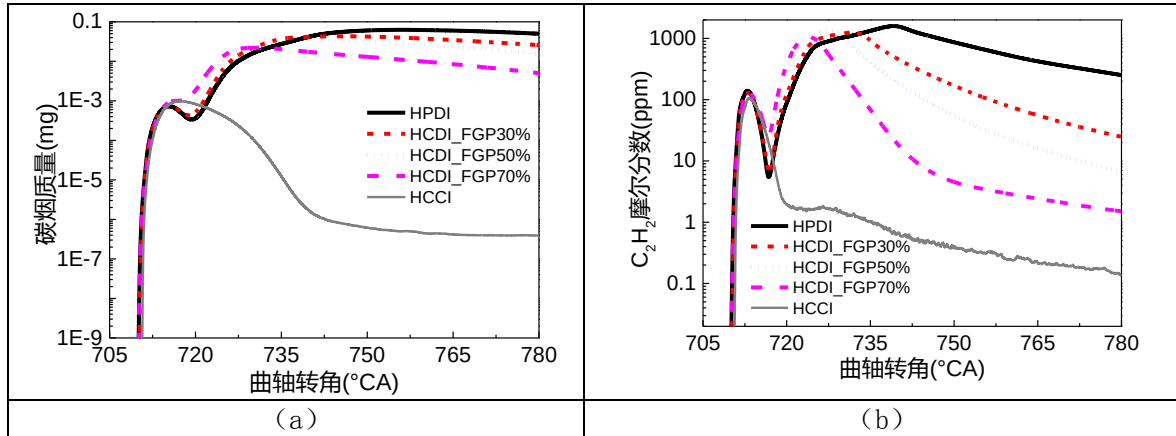


图 9 不同燃烧模式下的碳烟质量变化曲线和 C_2H_2 摩尔分数曲线

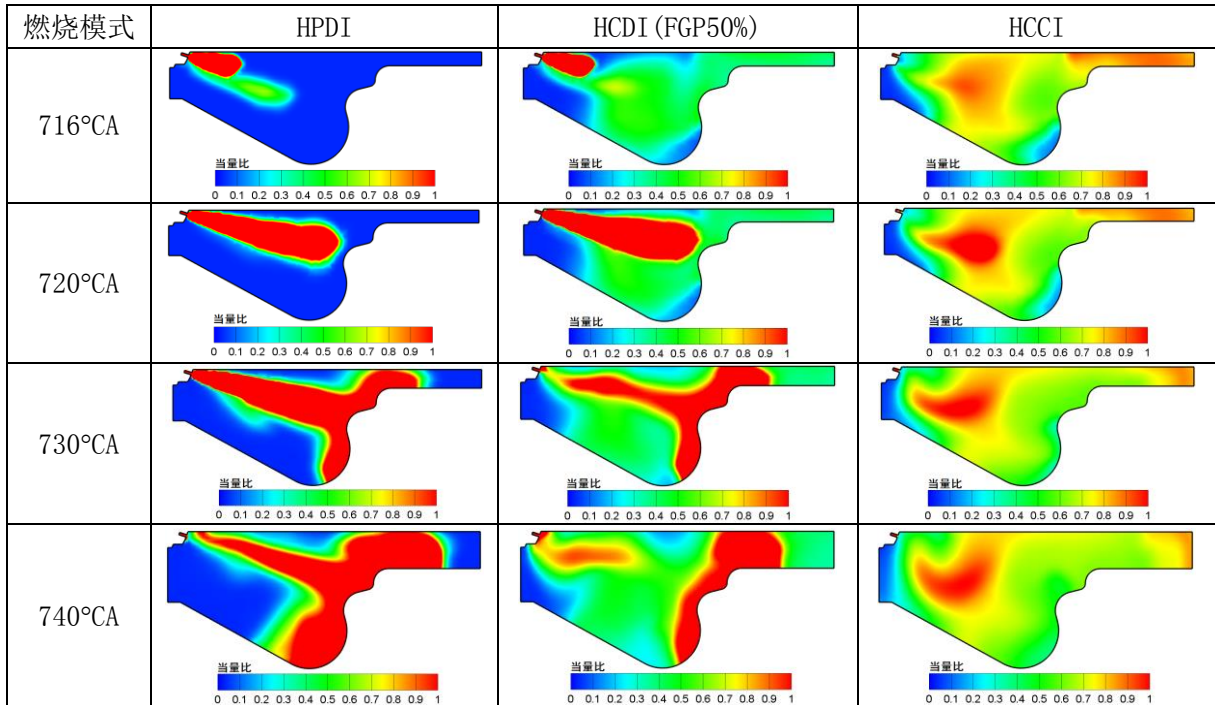


图 10 不同燃烧模式下的当量比分布云图

3.3 EGR 对 HCDI 燃烧模式的影响

由之前的计算结果可知，第一次天然气喷射达到 50% 之后，碳烟排放值小于原来的 20%，可以达到较好的碳烟减排效果，因此本节中对 EGR 率影响的研究主要针对第一次天然气喷射大于等于 50% 的情况。图 11 为不同燃烧模式下指示热效率随 EGR 率的变化。如图所示，不同燃烧模式下的指示热效率均随 EGR 率的升高而降低。添加 EGR 率达到 20% 后，第一次天然气喷射比例为 90% 的 HCDI 燃烧模式和 HCCI 燃烧模式由于缸内浓度梯度较小，火焰传播较慢，热效率降低较为显著。图 12 为不同燃烧模式下 NO_x 和碳烟排放随 EGR 率的变化。如图所示，不同燃烧模式下 NO_x 排放随 EGR 率的升高而降低，碳烟随 EGR 率的升高而升高，而 HCCI 燃烧模式排放的变化幅度大于 HCDI 燃烧模式。

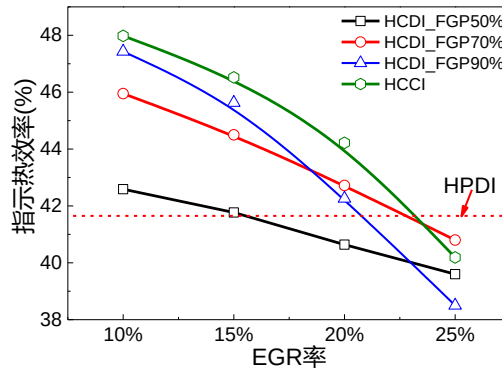


图 11 EGR 对指示热效率的影响

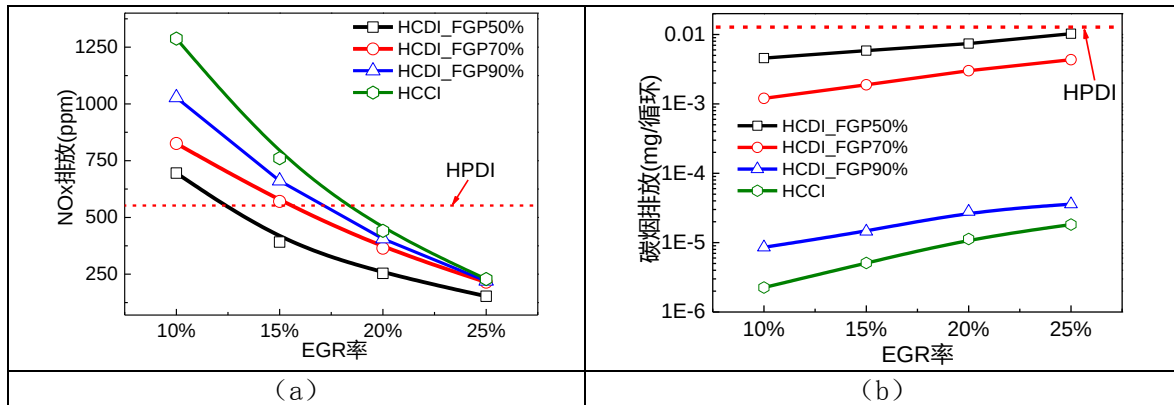


图 12 EGR 对 NO_x 和碳烟排放的影响

图 13 为 HCDI 燃烧模式放热率和缸内平均温度曲线随 EGR 率的变化。如图所示，随着 EGR 率升高第一阶段放热率减缓、第二阶段开始的时刻滞后，这是因为添加 EGR 的比例增加，柴油引燃火焰的强度降低、天然气引燃所需的能量增加，增大了天然气引燃的难度和天然气的引燃时间。同时，缸内平均温度曲线降低，减少了 NO_x 的生成。

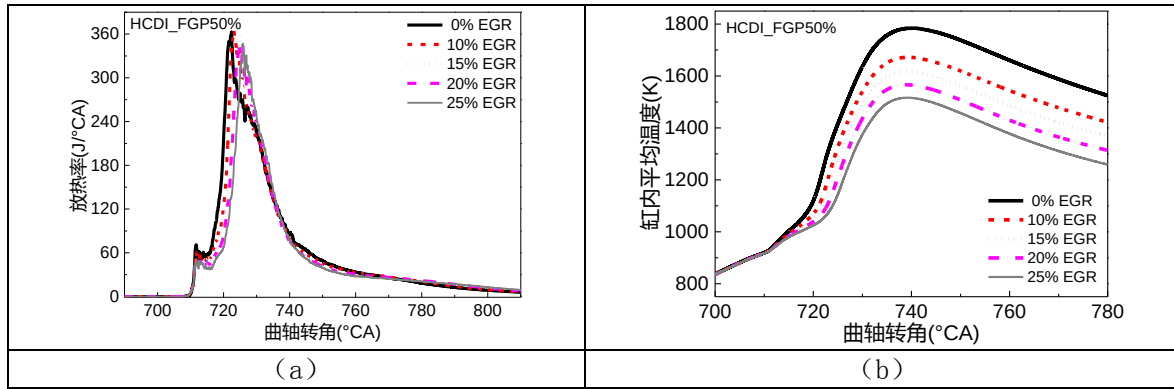
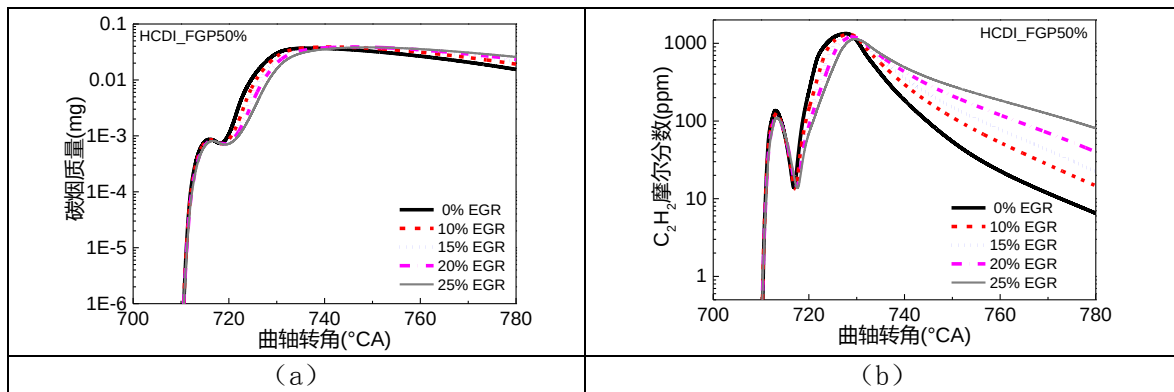


图 13 EGR 对放热率和缸内平均温度变化曲线的影响

图 14 为 HCDI 燃烧模式碳烟质量和 C_2H_2 摩尔分数曲线随 EGR 率的变化。如图所示, 碳烟和 C_2H_2 摩尔分数在两个燃烧阶段形成的峰值随 EGR 率的变化不大, 但是开始两种物质开始氧化的时刻滞后、氧化的时间缩短、氧化的速度也降低, 因此 HCDI 燃烧模式的碳烟排放随 EGR 率的升高而增加。

图 14 EGR 对碳烟质量变化曲线和 C_2H_2 摩尔分数曲线的影响

4. 结论

- 1) 所建立的三维模型可以较准确的预测高压直喷天然气发动机的燃烧过程、 NO_x 排放和碳烟排放的值以及两种排放物的变化趋势。
- 2) HCDI 燃烧模式的缸压峰值小于 HCCI 燃烧模式大于 HPDI 燃烧模式, 第一个放热阶段的峰值随着第一次天然气喷射比例的增加而增加, 第二个放热阶段的峰值呈先增加后降低的趋势, 且随着第一次天然气喷射比例的增加, 天然气的引燃提前。
- 3) 在不同的第一次天然气喷射比例下, HCDI 燃烧模式的 NO_x 排放小于 HCCI 燃烧模式, 在第一次天然气喷射比例较小时, NO_x 排放低于 HPDI 燃烧模式, 第一次天然气喷射比例达到 30% 后, NO_x 排放高于 HPDI 燃烧模式; 在不同的第一次天然气喷射比例下, HCDI 燃烧模式的碳烟排放大于 HCCI 燃烧模式, 在第一次天然气喷射比例较小时, 碳烟排放出现高于 HPDI 燃烧模式的情况, 第一次天然气喷射比例达到 30% 或更高时, 碳烟排放小于 HPDI 燃烧模式。
- 4) HCDI 燃烧模式的热效率高于 HPDI 燃烧模式, 低于 HCCI 燃烧模式。
- 5) 利用添加 EGR 的方式可以降低 HCDI 和 HCCI 燃烧模式的 NO_x 排放, 高 EGR 率下采用第一天燃气喷

射比例合适的 HCDI 燃烧模式,可以改善缸内燃料/空气混合气的浓度梯度分布,继而起到提升指示热效率的作用。

5. 参考文献

- [1] McTaggart-Cowan G P, Rogak S N, Munshi S R, et al. The influence of fuel composition on a heavy-duty, natural-gas direct-injection engine[J]. Fuel, 2010, 89(3):752-759.
- [2] McTaggart-Cowan G, Mann K, Wu N, et al. An efficient direct-injection of natural gas engine for heavy duty vehicles[C]// SAE World Congress & Exhibition. USA: Detroit, 2014, 2014-01-1332.
- [3] Patychuk B, Wu N, McTaggart-Cowan G, et al. Intake and Exhaust Valve Timing Control on a Heavy-Duty, Direct-Injection Natural Gas Engine[C]// SAE 2015 World Congress & Exhibition. USA: Detroit, 2015, 2015-01-0864.
- [4] Munshi S R, McTaggart-Cowan G P, Huang J, et al. Development of a Partially-Premixed Combustion Strategy for a Low-Emission, Direct Injection High Efficiency Natural Gas Engine[C]// ASME 2011 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. 2011, ICEF2011-60181.