

天然气发动机爆震仿真分析与研究

CFD simulation and investigation of knocking combustion in a natural gas engine

曾丽丽¹ 周维顺¹ 董伟¹ 李军成¹ 李之华¹ 王沛²

(1 广西玉柴机器股份有限公司 2 天津大学)

摘要: 本文采用 converge 软件中 G 方程耦合化学反应机理的方法对爆震燃烧进行仿真分析, 采用 G 方程捕捉湍流火焰前锋的发展, 运用 139 步的简化机理模拟火焰前方末端混合气的自燃现象; 对不同点火正时下的爆震强度进行模拟, 并与试验结果进行对比, 结果显示: 随着点火正时提前, 发生爆震的趋势增强, 不同燃烧室方案下的爆震余量和气耗水平与试验结果趋势一致。

关键词: CONVERGE 天然气发动机 火焰传播 爆震强度

Abstract: The G-equation model incorporating the chemical reaction mechanism was used to predict knocking combustion using CONVERGE software. The G-equation was used to track the development of flame front surface, the 139-species skeletal mechanism was employed to capture auto-ignition in the end-gas ahead of the flame front. The influence of spark timing on knocking combustion was studied based on the numerical analysis. The predicted trends were found to be in good agreement with the available experimental data under the different piston bowls sketch.

Key words: CONVERGE, natural gas engine, flame propagation, knocking intensity

1. 概述

爆震由末端混合气自燃引起, 爆震的自燃理论得到了研究者的广泛认可^[1]。国六天然气发动机(以下简称气体机)采用当量燃烧路线后, 缸内温度比稀燃路线下的温度高, 爆震边界变窄; 气体机增压、降速使其向高功率密度和高负荷方向发展, 加重了爆震倾向, 爆震限制了气体机热效率的进一步提升^[2]。为了满足经济性指标, 对气体机燃烧室的设计提出了更高的要求。应用 CFD 仿真分析方法, 对不同燃烧室下的湍流燃烧和爆震现象进行模拟, 为燃烧室的选型和设计优化提供指导。本文以某六缸气体机为研究对象, 建立气体机燃烧系统的 CFD 模型, 通过 CONVERGE 软件完成进气和燃烧过程的仿真分析, 提出爆震强度指标限值^[3], 评价不同燃烧室在限值条件下的爆震余量和气耗水平, 并且与试验结果进行对比, 评估计算对气体机燃烧性能的预测能力。

2. 计算模型及边界条件

某国六气体机的技术参数如表 1 所示, 三维燃烧模型如图 1 所示, 包含进气道、进气门座圈、进气门、进气门导管、缸垫、燃烧室、火花塞围成的流体域; 本文总共计算两个燃烧室方案, SF1 为缩口型燃烧室, SF2 为直筒型燃烧室。计算工况为爆震边界较窄的最大扭矩高转速点 1500r/min, 外部 EGR 率约 20%, 计算所用物理模型见表 2。

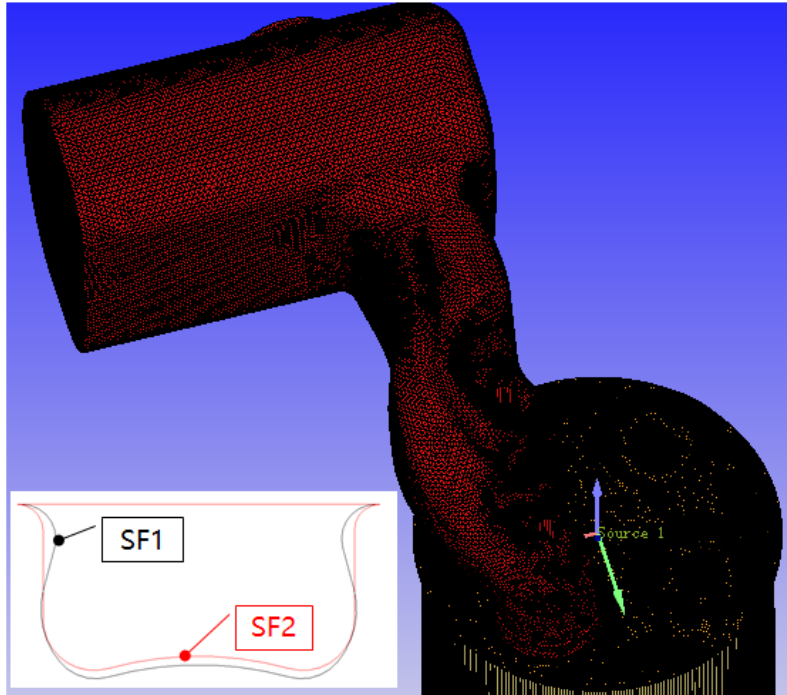


图 1 计算模型

表 1 某天然气发动机技术参数

参数	值
型式	直列六缸、增压
缸径×冲程/(mm)	129×165
排量/L	12.939L
燃烧方式	当量燃烧
标定功率/转速/ (kW/(r/min))	338/1900
最大扭矩/转速/ (Nm/(r/min))	2100/1050-1500

表 2 燃烧计算所用物理模型

模型	类型
湍流模型	RNG κ - ϵ
壁面模型	Standard wall
传热模型	O'Rourke and Amsden
点火模型	energy
燃烧模型	G 方程耦合化学反应机理

进行三维燃烧计算需要一维热力学模型提供瞬态边界条件，由于不计算排气过程，只展示进口边界条件，如图 2 所示。

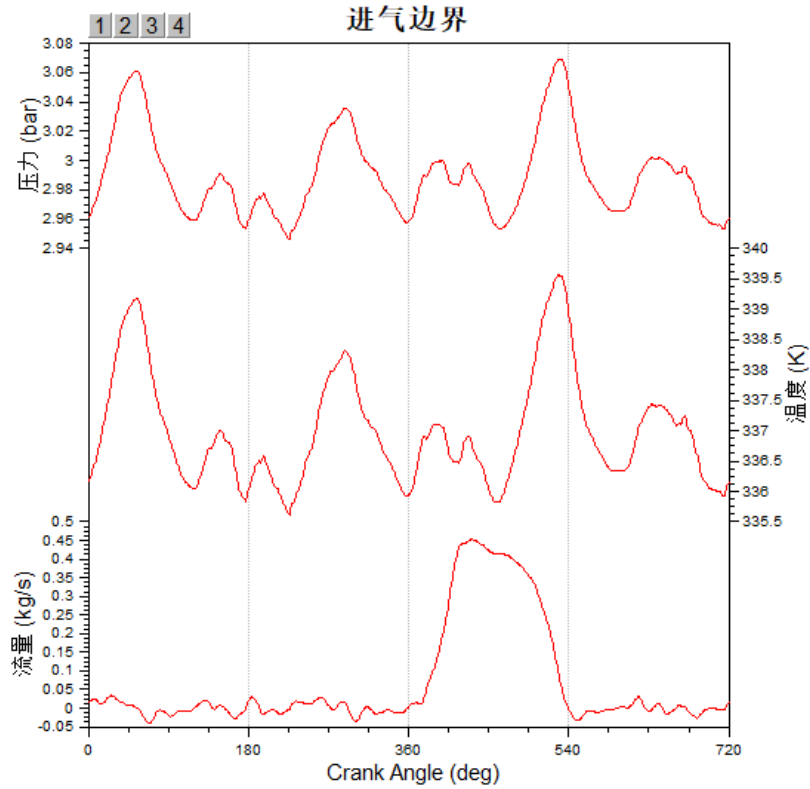


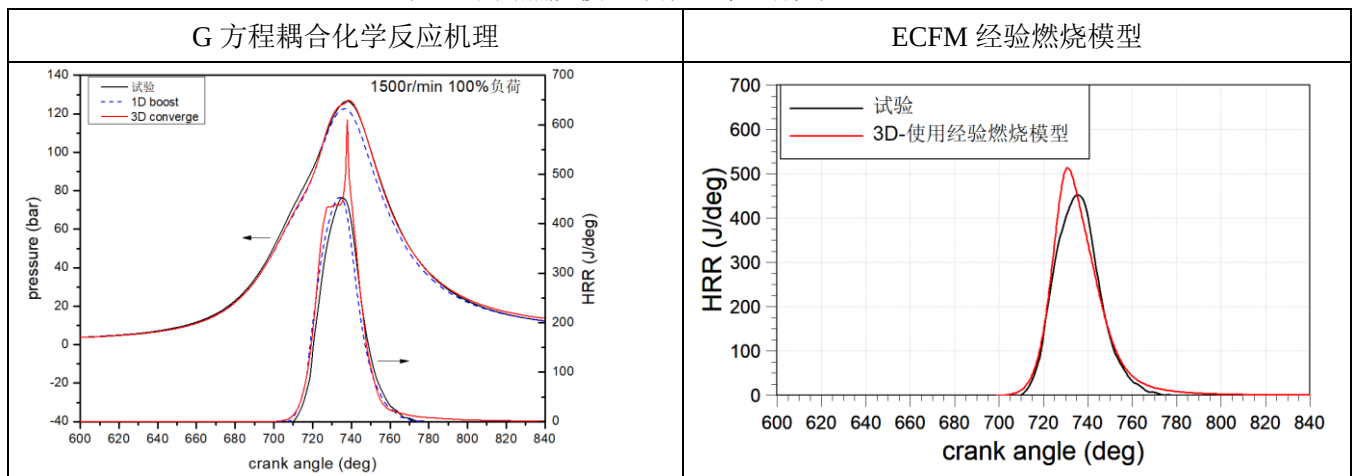
图 2 进口边界条件

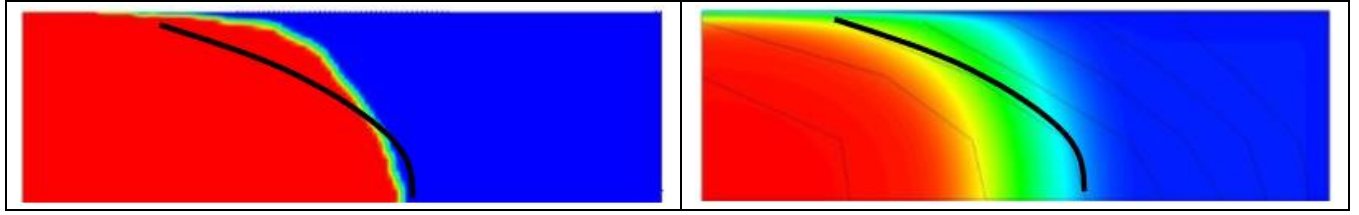
3. 计算结果及分析

3.1 燃烧室 SF1 模型标定结果

本文采用 G 方程捕捉火焰面，采用化学反应机理模拟末端混合气自燃过程^{[4]~[5]}。该反应机理包含 40 种组分，139 个方程，由天津大学开发。表 3 展示了采用化学反应机理和 ECFM 时放热率曲线的差异，当采用化学反应机理时，放热率曲线会出现一个尖峰，采用 ECFM 燃烧模型时，放热率曲线比较光滑。这是因为化学反应机理对应的火焰前锋面比 ECFM 薄，不会像使用 ECFM 那样对前锋面做平均处理，除此之外，三维计算得到的缸压和放热率与试验及一维结果吻合。

表 3 不同燃烧模型下放热率差别对比





3.2 燃烧室 SF1 爆震强度计算

如图 3 所示,沿曲轴方向,对称布置 6 个测点,分别位于进气门和排气门外侧以及进排气门之间。取 4 号测点的压力曲线进行分析,如图 4 所示,当点火正时提前,局部压力曲线波动增强,压力震荡曲线的振幅变大,采用傅里叶变换和带通滤波器(4-20KHz)处理压力信号,然后再通过傅里叶逆变换获得爆震对应的震荡压力,把对应的震荡压力最大值的绝对值提取出来,定义为 $|P_{max}|$ 。采用相同的方法对其余测点进行处理,得到各个测点位置的震荡压力,如图 5 所示,进气门附近测点的压力震荡峰值略高于排气门附近测点的压力震荡峰值。取其中的测点 1 和 4 进行分析,如图 6 的湍动能云图可知,靠近测点 1 (右侧区域) 的缸内湍动能比靠近测点 4 的高, (左侧区域); 另外,排气门盘面附近的高温区域范围大,高温使得分子热运动加快,一定程度上促进火焰传播,所以靠近测点 1 的火焰传播速度比测点 4 快 (图 7), 测点 4 附近由于火焰传播速度慢,未燃区域容易自燃,所以在相同点火正时下对应的压力震荡峰值高。

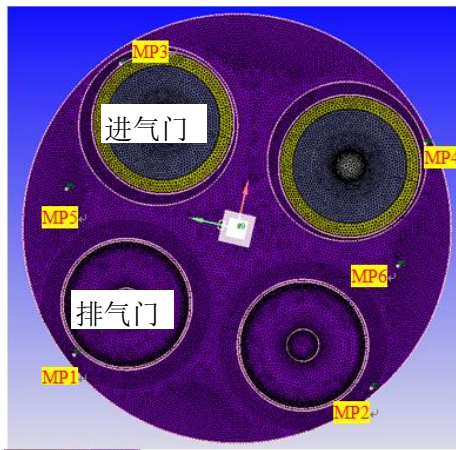


图 3 爆震监控测点位置

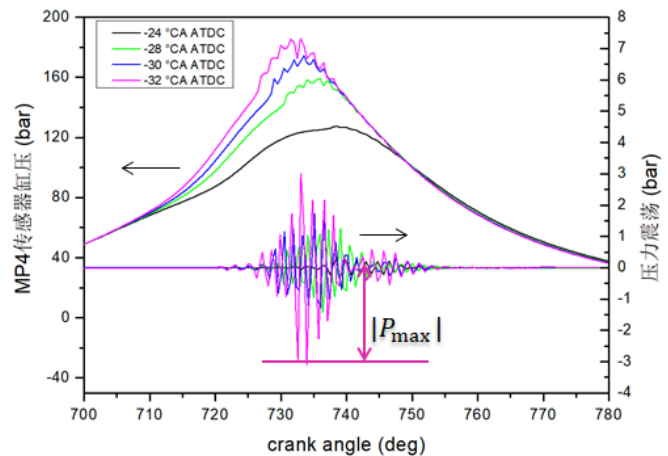


图 4 不同点火正时下 4 号传感器缸压和带通滤波压力震荡情况

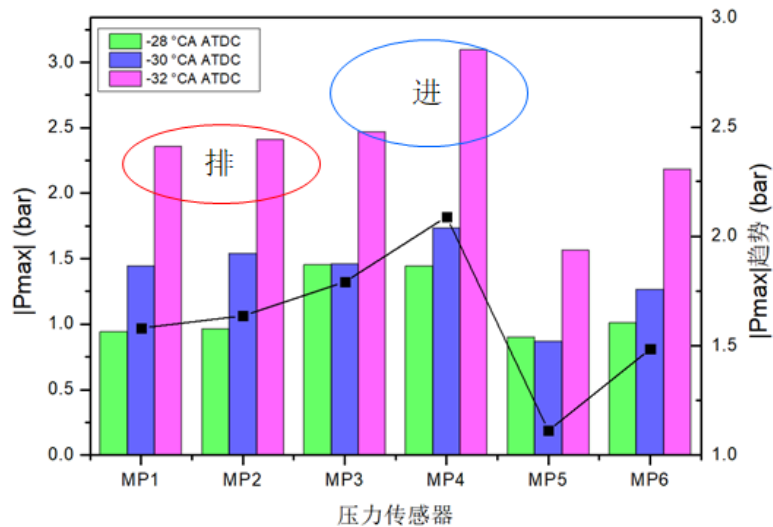


图 5 不同压力传感器测点的 $|P_{max}|$ 差异

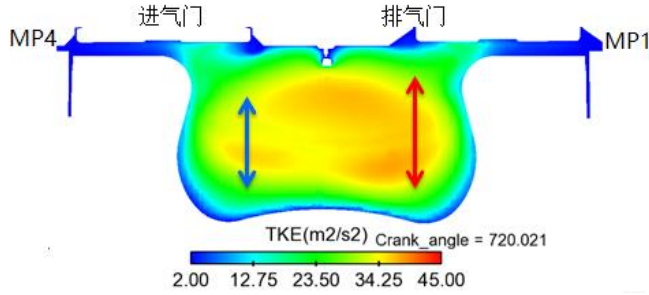


图 6 测点 1 和 4 切面位置湍动能

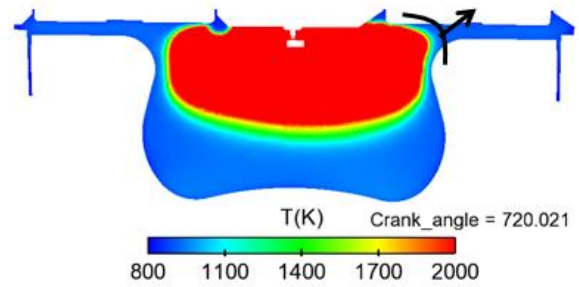


图 7 测点 1 和 4 切面位置温度场

由于不同测点对应的压力震荡的峰值不同，本文把爆震强度定义为 6 个测点压力震荡峰值的算术平均值，图 8 为燃烧室 SF1 在不同点火正时下的爆震强度，随着火花点火时刻的提前，爆震强度 KI 逐渐增加，即发生爆震的趋势逐渐增强。试验显示，燃烧室 SF1 在点火正时超过 $-30^{\circ}\text{CA ATDC}$ 时，发生爆震。本文把对应的 $KI=1.38\text{bar}$ 定义为该工况下的爆震强度限值。

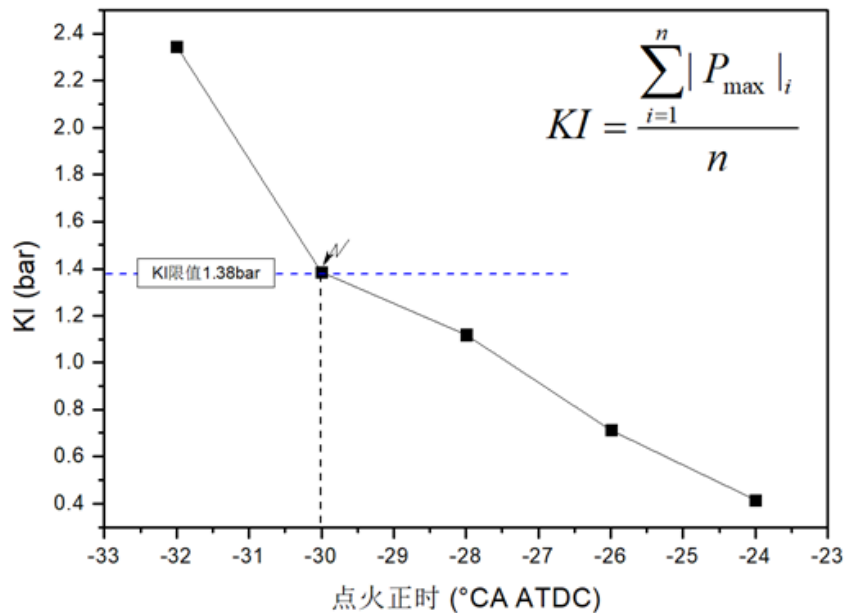


图 8 SF1 燃烧室在不同点火正时下的爆震强度

3.3 不同燃烧室方案的试验验证

采用相同的计算流程，开展第二个燃烧室 SF2 的计算，对比这两个燃烧室方案在爆震限值内的气耗水平，并与试验进行对比。图 9 为两个燃烧室方案 HPISFC 随着点火正时的变化曲线，计算结果显示：在爆震限值 $KI=1.38\text{bar}$ 条件下，燃烧室 SF1 在 $-30^{\circ}\text{CA ATDC}$ 爆震，燃烧室 SF2 在 $-28^{\circ}\text{CA ATDC}$ 爆震，说明燃烧室 SF2 的爆震边界比 SF1 窄；在相同电控参数条件下，燃烧室 SF2 的气耗优于 SF1。图 10 为试验测试的两个燃烧室方案的 BSFC 对比图，试验结果显示，燃烧室 SF2 的气耗低于燃烧室 SF1，计算结果趋势与之吻合。

图 11~图 12 为两个燃烧室方案的缸内湍动能对比图，燃烧室 SF2 中间区域的湍动能高于 SF1，可以加快燃烧初期的火焰传播速度，改善气耗，所以 SF2 方案的气耗比 SF1 好。两个方案都显示挤流区域的湍动能较低，不利于燃烧后期的火焰传播，SF2 燃烧初期的燃烧速度较快，缸内温度和压力上升快，末端混合气持续压缩和加热的程度高，所以 SF2 燃烧室的爆震边界较窄。

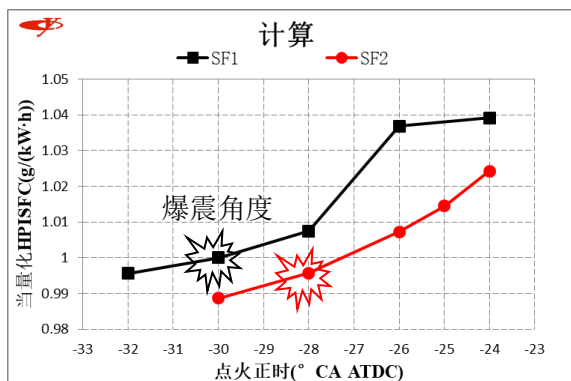


图 9 SF1 和 SF2 燃烧室 HPISFC 对比 (计算)

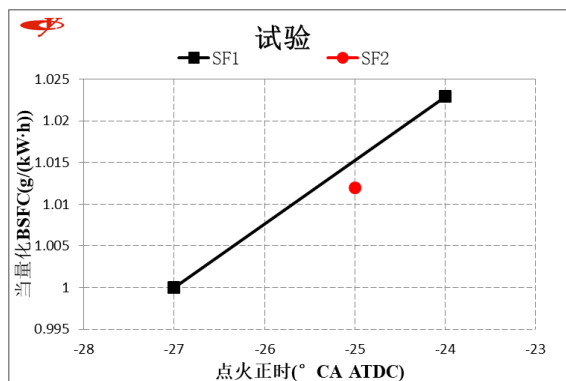


图 10 SF1 和 SF2 燃烧室 BSFC 对比 (试验)

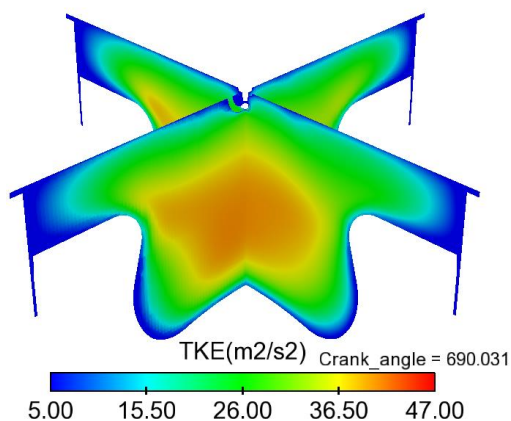


图 11 SF1 燃烧室湍动能

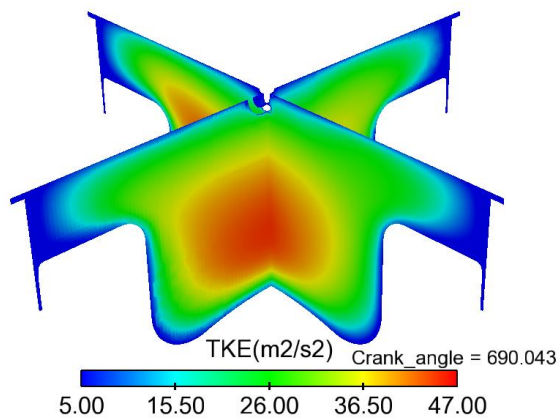


图 12 SF2 燃烧室湍动能

4. 结论

- (1) 采用 G 方程耦合化学反应机理的方法, 对末端混合气未燃区域的自燃过程进行模拟, 能够捕捉到由于末端混合气局部放热造成的压力陡升对湍流火焰传播的影响。火焰传播速度较慢的方向, 压力传感器测点对应的压力震荡峰值大;
- (2) 将缸内 6 个位置的压力波动曲线进行傅里叶变换和带通滤波后, 将其压力震荡最大峰值的绝对值求算术平均, 作为爆震强度评价指标, 随着火花点火时刻的提前, 爆震强度 KI 逐渐增加, 即发生爆震的趋势逐渐增强;
- (3) 结合试验数据提出爆震强度限值, 作为燃烧室性能优化的阈值条件; 不同燃烧室在爆震强度限值内的爆震余量和气耗水平的计算值与试验测试结果的趋势吻合, 验证了建模流程和方法的合理性。

5. 致谢

本研究由国家重点研发计划新能源汽车重点专项《高性价比商用车混合动力系统开发与整车集成》(编号 2018YFB0105900) 支持。

6. 参考文献

- [1] 周龙保, 刘忠长等. 内燃机学(第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] Pinaki Pal, Multi-Dimensional CFD Simulations of Knocking Combustion in a CFR Engine, Proceedings of the ASME 2017 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 2017.
- [3] 王方, 直喷增压汽油机火焰传播及爆震燃烧过程的多维数值模拟[D], 清华大学, 2015.

- [4] J. Huang, P. G. Hill, et al, Shock-tube study of methane ignition under engine-relevant conditions: experiments and modeling [J], combustion and flame, 2004:25-42.
- [5] Omer L. Gulder. Correlations of Laminar Combustion Data for Alternative S. I. Engine Fuels. SAE paper 841000.