

基于 CONVERGE 氢内燃机爆震影响因素研究

Study on the Factors Affecting the Knock of Hydrogen Internal

Combustion Engine Based on CONVERGE

李勇 高文志 叶奕翔

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室)

摘要:随着能源和环境问题的日益严峻,迫切需要寻求一种可再生的清洁能源来代替传统化石能源。氢气作为一种理想的可再生能源,对其在内燃机上的应用研究具有重要意义。本文利用计算流体力学商业软件 CONVERGE 主要研究了不同点火时刻和压缩比对氢内燃机的影响规律,尤其是对爆震发生的影响。结果表明,随着点火提前角的增加,爆震发生趋势逐渐明显;随着压缩比的增加,爆震发生强度逐渐剧烈。为进一步研究爆震产生机理奠定基础。

关键词: 氢内燃机, 爆震, CONVERGE, 点火时刻, 压缩比

Abstract: As energy and environmental issues become more acute, it is urgent to find a renewable clean energy source to replace traditional fossil energy. As an ideal renewable energy source, hydrogen is of great significance for its application in internal combustion engines. In this paper, the computational fluid dynamics commercial software CONVERGE is used to study the influence of different ignition timings and compression ratios on hydrogen internal combustion engines, especially the impact of knocking. The results show that with the increase of ignition advance angle, the occurrence trend of knocking is gradually obvious; the intensity of knocking is gradually increased with the increase of compression ratio. It will lay the foundation for further study of the mechanism of knocking.

Key words: hydrogen combustion engine, knock, CONVERGE, ignition timing, compression ratio

1. 引言

由于石油是储量有限的不可再生资源,我国石油资源严重依赖进口,存在很大的能源安全隐患。另外,全球变暖与环境污染等社会问题越来越突出。面对气候变化与能源安全的双重挑战,迫切需要寻求一种可再生的清洁能源。氢能作为一种理想的可再生能源,来源广泛,而且燃烧产物中无 CO_2 、 CO 、 HC 及颗粒物,接近零有害排放。氢气的热值为 120MJ/kg (汽油的热值为 43.5MJ/kg)^[1],与其他内燃机燃料比较,氢气具有很好的热量与质量传递特性,燃烧时火焰传播速度快,所需的点火能量低,约为汽油空气混合气的 $1/10$ 。氢气具有宽广的可燃界限,在体积分数为 4% 的稀薄情况下就可燃烧,有稀薄燃烧的优势^[2-4]。

同传统燃料一样,爆震依然是限制氢内燃机热效率进一步提高的主要障碍。有关氢燃料的爆震实验研究大多是在爆震管或者在快速压缩机中进行的^[5-7]。S. Szwaja 等人^[8]为了研究氢内燃机爆震,通过试验比较分析了气道喷射火花点火汽油机与氢内燃机的爆震燃烧特性,包括气缸压力波动与缸体表面振动频率、振动强度以及统计特性等。结果发现,氢内燃机与

汽油机爆震燃烧的形成条件有较大不同,与汽油机比较,氢内燃机对发动机的压缩比、点火时刻、稀燃混合气浓度等运行条件更敏感。Hailin.Li 等^[9]为了监测氢内燃机燃烧过程中末端混合气自燃现象,在单缸内燃机上研究了 900rpm 工况下不同发动机运行条件对氢内燃机爆震的影响规律,并在试验基础上建立了爆震二维预测模型。该预测模型设定一个无量纲爆震临界值,计算中将燃烧室分为已燃区与未燃区,利用化学动力学计算未燃混合气中间反应,分析空燃比、压力及温度等主要因素与爆震临界值的关系,预测爆震是否发生及爆震发生的条件。

王志等人^[10]采用三维 CFD 耦合化学反应模拟了火花点火激发的均质压燃燃烧过程,发现了火花点火激发均质压燃过程中存在多阶段着火。然而,由于三维问题的复杂性,该论文没有给出关于自着火现象的一般规律与特性。Ju 等人^[11]通过数值模拟研究了一维受限空间中正庚烷/空气预混火焰传播及其导致的均质压燃燃烧过程,发现不同初始温度会对应有不同的火焰区域。Martz 等人^[12, 13]结合零维和一维数值模拟研究了自着火与传播火焰的区别,揭示了化学组分和热量输运特性对自着火的影响规律。上述工作^[10-13]主要区分了常规燃料自着火过程与火焰传播过程的异同点,有关氢内燃机爆震的研究不多。

本文主要利用美国 CSI 公司开发的计算流体力学分析软件 CONVERGE^[14],模拟了氢内燃机的运行参数:点火时刻、压缩比对爆震的影响,并分析其爆震发生的原因,为进一步研究爆震发生机理奠定基础。

2. 计算模型

由于 CONVERGE 自动生成三维动网格,从而大大节省了前处理的时间,提高了整个计算效率。CONVERGE 具有强大的自适应网格加密功能 (AMR),以及 Multi-Zone 等加速算法,既能保证计算精度又能缩短计算时间。计算采用笛卡尔网格,基础网格尺寸为 4mm,缸体区域加密至 2mm,火花塞区域加密至 0.25mm,活塞和缸盖加密至 2mm,根据速度梯度和温度梯度最小加密到 0.25mm,喷气区域最小加密到 0.125mm。

考虑到经过压缩修正的 RNG $k-\varepsilon$ 模型对缸内流动的模拟比 $k-\varepsilon$ 更接近于实际,所以采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。对于氢气燃烧,需要考虑详细化学动力学特征,所以选用 SAGE 模型,配合氢气详细反应机理^[15],能够准确预测反应速率的空间分布。几何模型依据文献 16 中的 SANDIA 氢气直喷内燃机而建立的,包括进排气道和燃烧室,如图 1 所示,详细的发动机参数如表 1 所示^[16]。

表 1 发动机参数及运行条件

缸径 (mm)	92
冲程 (mm)	85
连杆长度 (mm)	166.6
压缩比	16-19
转速 (r/min)	1500
IVC (deg ATDC)	-140
EVO (deg ATDC)	130
喷气时刻 (deg ATDC)	-138
喷氢持续期 (deg)	19.5

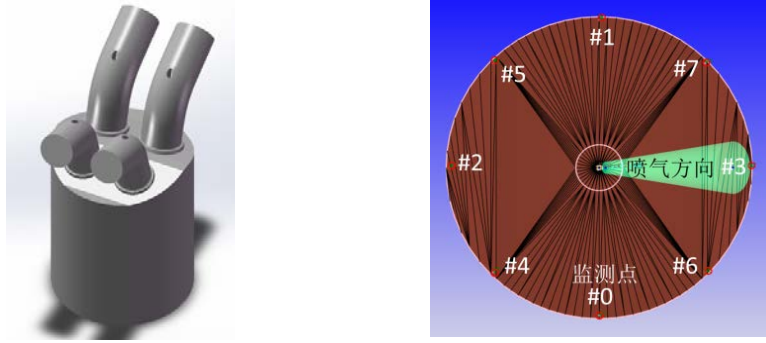


图 1 模型示意图图 2 压力监测点位置

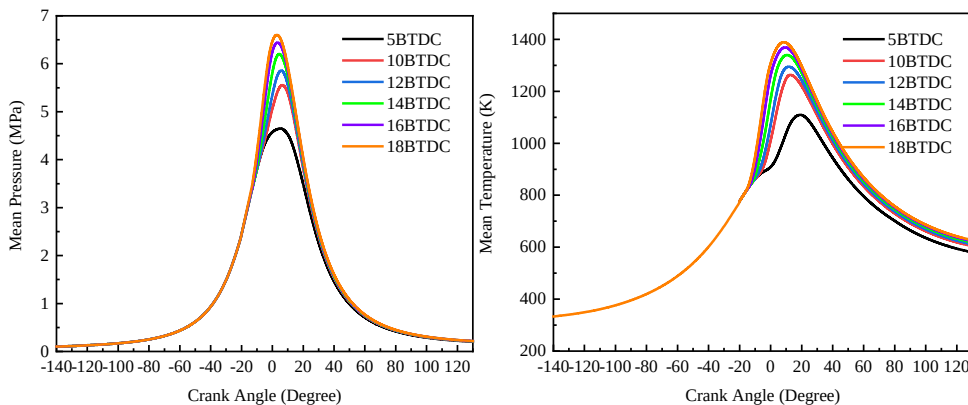
模拟过程分成两部分，第一部分从进气门开启之前开始，经过一个完整的工作循环，在第二个循环的进气冲程完成时停止（即进气门关闭时刻）；第二部分在第一部分的基础上，去掉模型的进排气道，计算从进气门关闭开始到排气门开启结束，从而能节省大量计算时间。为了更好地监测爆震发生，在模型中靠近气缸壁和气缸盖的圆周方向选取 8 个点来监测局部压力，如图 2 所示。为了能够更好地量化爆震的强度，采用一个爆震强度参数 KI ^[17]，即 N 个监测点的压力波动最大峰峰值的平均值，

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

3. 结果分析

3.1 点火时刻

本文模拟工况为高压压缩比稀燃，压缩比为 16、当量比为 0.25，设置了不同点火时刻（-5ATDC、-10ATDC、-12ATDC、-14ATDC、-16ATDC、-18ATDC）。图 3 为不同点火时刻气缸内平均压力和温度曲线。从图中可以明显看出随着点火提前角的提前，压力和温度不断增加，但是增大幅度随点火提前角的增大逐渐变小。从图 4 中看出，C50 的位置随着点火推迟不断后移，在 14BTDC 和 12BTDC 点火时，C50 在上止点偏后，这时的等容度最高，因此热效率最高。随着点火的继续提前，等容度下降，热效率也稍微有所下降。



a) 气缸平均压力 b) 气缸平均温度

图 3 气缸平均压力和温度

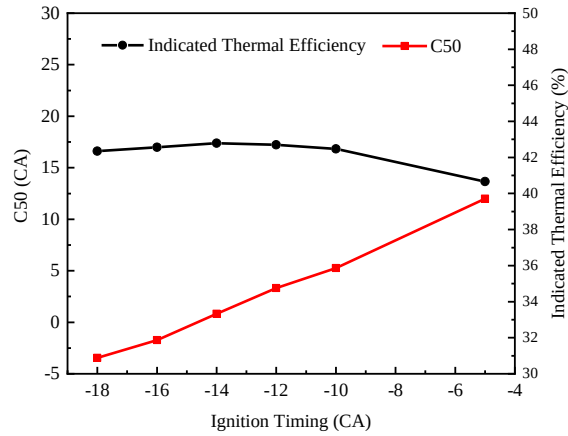
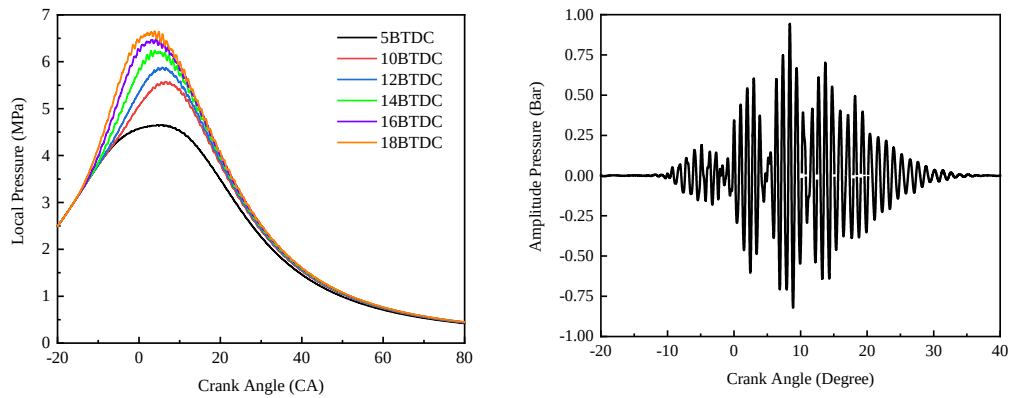


图 4 指示热效率和 C50

图 5a 为 3 号监测点压力曲线，可以看出随着点火提前，在最高压力附近逐渐出现“锯齿”状的波动。图 5b 为 16BTDC 点火提前角下 3 号监测点压力经过快速傅里叶变换(FFT)，然后通过带通滤波（3kHz-25kHz）后经过傅里叶逆变换（IFFT）得到压力波动曲线，可以通过最大峰峰值来判断爆震强度。



a) 3 号监测点压力 b) 3 号点 FFT 后压力曲线（16BTDC）

图 5 监测点压力

图 6 为爆震强度随点火提前角的变化规律。从图 6 中可以看出，随着点火的提前，爆震强度不断增加，直到点火提前到 14BTDC，KI 迅速增加，超过 0.8bar，虽然由于混合气的当量比较低，爆震强度整体较小，但是点火时刻对爆震影响趋势已经清晰可见。因此优化点火时刻对于氢内燃机也同样重要，不仅要保证较高的热效率，而且要避免爆震的发生。

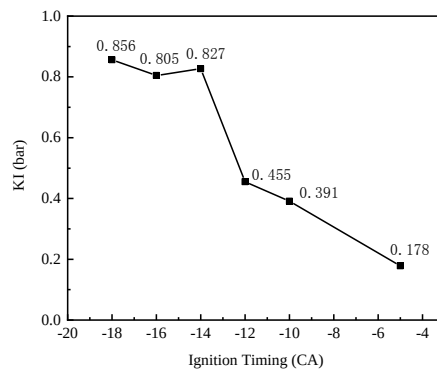
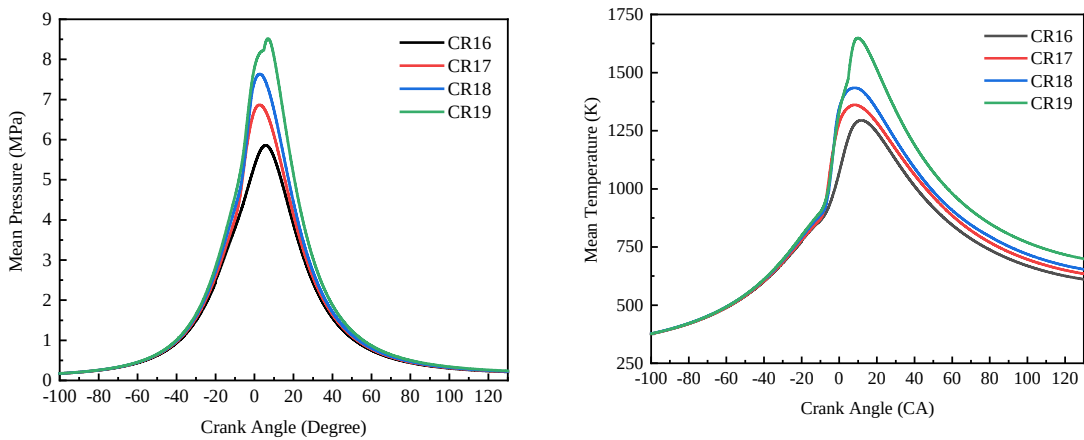


图 6 不同点火时刻的爆震强度 KI

3.2 压缩比

氢气的可燃界线宽，为了提高热效率，通常会采取较大的压缩比和较稀的混合气，为了进一步了解压缩比对氢内燃机爆震的影响，本文研究了在固定当量比（0.27）和点火时刻（12BTDC）前提下的不同压缩比（16、17、18、19）氢内燃机的爆震情况。

图 7 是不同压缩比下的平均气缸压力和温度曲线，随着压缩比的增加，温度和压力峰值都不断增加，而且峰值也逐渐前移。不同的是，当压缩比达到 19 后，气缸压力出现第二次升高，在放热率曲线中也出现了双峰值，如图 8 所示。在图 9 的当地缸压曲线中可以明显看出，随着压缩比增加，压力波动逐渐剧烈。进一步结合缸内温度分布云图，发现在上止点后 5°CA 的时候，在正常火焰前锋到达前，末端混合气出现了自燃点，迅速点燃缸内的未燃气体，导致爆震发生，也是缸压和放热率出现第二个峰值的原因。



a) 气缸平均压力

b) 气缸平均温度

图 7 气缸平均压力和温度

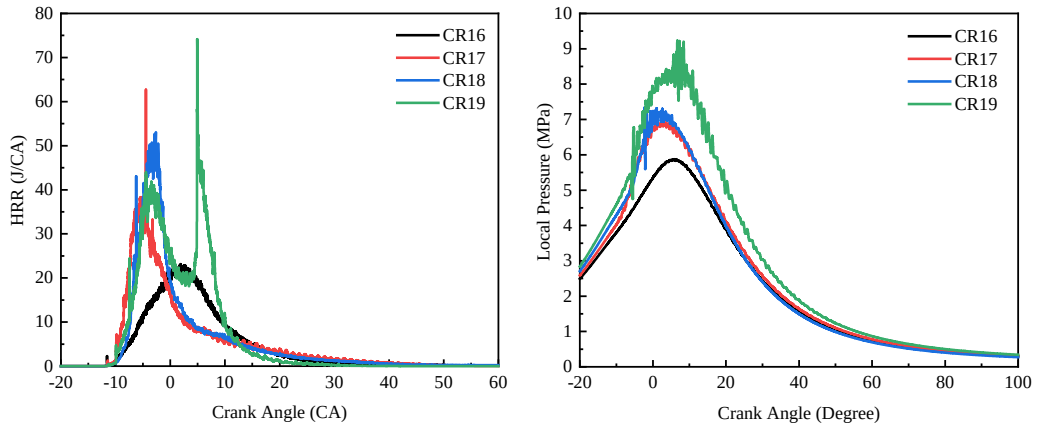


图 8 放热率曲线图 9 3 号监测点压力曲线

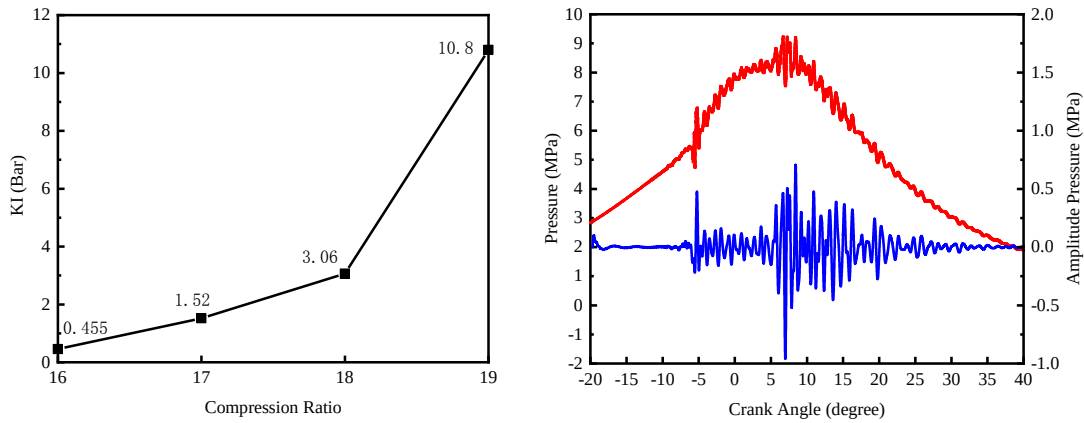


图 10 不同压缩比的爆震强度图 11 3 号监测点的压力及其波动幅值
(CR=19)

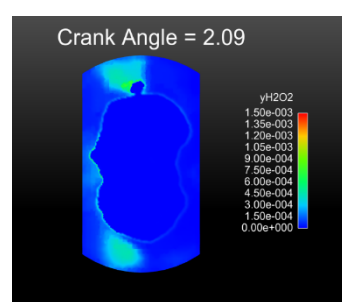
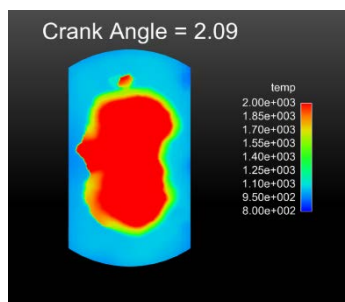
图 10 为不同压缩比下的爆震强度，随着压缩比增加，KI 不断增加，尤其是当压缩比达到 19 时，KI 达到 10.8bar，以 3 号监测点的压力为例，可以看出压力波动剧烈，震荡幅值最高近 1MPa。压力波在燃烧室内来回震荡，可能会损坏发动机的零部件，因此在实际中应该避免这种剧烈爆震的发生。

从表 2 的温度和 H_2O_2 质量分数的云图中可以直观地看到整个爆燃发生的过程，在 1.09CA 之前，火焰由火花塞处开始正常传播，但是在图中的 1、2 号区域已经产生了大量的 H_2O_2 ；在 2.09CA 时刻，1 号区域出现高温热点，表征自燃的发生，而且 1 号和 2 号的 H_2O_2 的质量浓度进一步增加；当到达 4.09CA 时，1 号区域的自燃火焰迅速扩散，点燃周围大量的未燃气体，这也是放热率第二次开始升高的原因；直到 5.09CA，2 号区域也出现自燃火焰，并迅速扩散与主火焰面汇合，此时缸内大部分区域已被点燃，放热率达到峰值。在高压压缩比的情况下，末端混合气受到正常火焰前锋的压缩和热辐射，在火焰前锋到达之前达到燃点，并短时间点燃周围大量未燃气体，造成气缸局部压力突然升高，并由于压力分布的不均匀性产生压力波在气缸内来回波动，所以在局部监测的压力会出现剧烈波动，如图 11 所示。

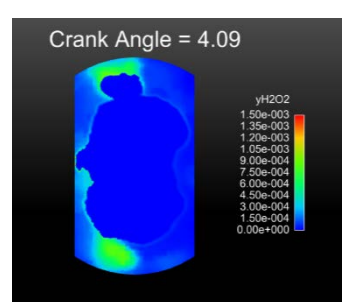
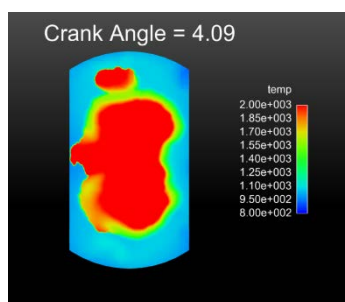
表 2 爆震时不同时刻气缸内温度和 H_2O_2 质量分数的分布 (CR=19)

曲轴转角/CA	温度	H_2O_2 质量分数
1.09		

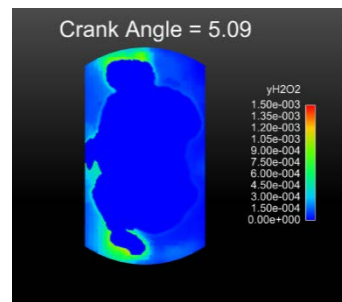
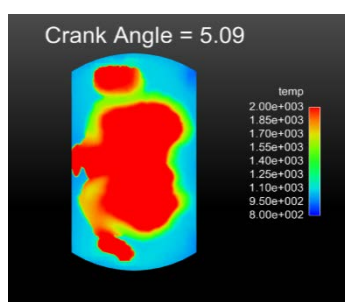
2.09



4.09



5.09



注：截面位置为垂直于气缸轴线且过火花塞位置。

随着压缩比的增加，氢气滞燃期缩短，火焰传播速率增大，另一方面末端混合气的自燃所需时间也缩短。但是由于后者对压缩比更敏感，所以随着压缩比增加，爆震趋势更明显，爆震强度更大。因此为了避免剧烈爆震的发生，氢内燃机的压缩比应该合理选择。

4. 结论

通过对氢内燃机燃烧爆震的模拟，得出点火时刻和压缩比等参数对其爆震影响规律，为进一步研究其爆震产生机理奠定基础。主要得出以下结论：

1、缸内压力波动可以反映出爆震的强度，因此可以根据压力波动幅值来判断爆震发生与否及其强度。

2、点火提前角对氢内燃机燃烧有重要影响，随着点火提前角的提前，整个燃烧相位会随着提前，导致末端混合气的温度和压力也逐渐增加，进而爆震强度逐渐增加。

3、压缩比是提高氢内燃机的效率的有效手段，但是也是导致爆震的主要因素。随着压

缩比的增加, 直接导致末端混合气的温度和压力的急剧增加, 直至在正常火焰到达前发生自燃, 导致爆震。

5. 参考文献

- [1] Aleiferis P G, Rosati M F. Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159 (7) :2500-2515.
- [2] 刘福水, 郝利君, Heitz Peter Berg. 氢燃料内燃机技术现状与发展展望[J]. *汽车工程*, 2006, 28 (07) :621-625.
- [3] 孙宁, 马凡华. 氢内燃机的发展现状和动向[J]. *车用发动机*, 2006 (02) :1-5.
- [4] Verhelst S. Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39 (2) :1071-1085.
- [5] Kawahara N, Tomita E. Visualization of auto-ignition and pressure wave during knocking in a hydrogen spark-ignition engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009 (34) :3156-3163.
- [6] Kawahara N, Tomita E, Sakata Y. Auto-ignited kernels during knocking combustion in a spark-ignition engine[J]. *Proceedings - 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, 2007, 31 (2) :2999-3006.
- [7] Ivanov M F, Kiverin A D, Yakovenko I S, et al. Hydrogen - oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38 (36) :16427-16440.
- [8] Szwaja S, Bhandary K R, Naber J D. Comparisons of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32 (18) :5076-5087.
- [9] Li H, Karim G A. Knock in spark ignition hydrogen engines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, 29 (8) :859-865.
- [10] 王志, 阳冬波, 帅石金, 等. 火花点火激发均质压燃燃烧过程的模拟研究[J]. *工程热物理学报*, 2010 (04) :705-708.
- [11] Ju Y, Sun W, Burke M P, et al. Multi-timescale modeling of ignition and flame regimes of n-heptane-air mixtures near spark assisted homogeneous charge compression ignition conditions[J]. *PROCEEDINGS OF THE COMBUSTION INSTITUTE*, 2011, 33 (1) :1245-1251.
- [12] Martz J B, Lavoie G A, Im H G, et al. The propagation of a laminar reaction front during end-gas auto-ignition[J]. *COMBUSTION AND FLAME*, 2012, 159 (6) :2077-2086.
- [13] Martz J B, Kwak H, Im H G, et al. Combustion regime of a reacting front propagating into an auto-igniting mixture[J]. *PROCEEDINGS OF THE COMBUSTION INSTITUTE*, 2011, 33 (2) :3001-3006.
- [14] Richards K, J. S P K, Pomraning E. CONVERGE (Version 2.3) Manual, Convergent Science, Inc., Middleton, WI, 2016[Z]. 2016.
- [15] Hong Z, Davidson D F, Hanson R K. An improved H₂/O₂ mechanism based on recent shock tube/laser absorption measurements[J]. *Combustion and Flame*,

- 2011, 158 (4) :633-644.
- [16] Moine J L, Senecal P K, Kaiser S A, et al. A Computational Study of the Mixture Preparation in a Direct - Injection Hydrogen Engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2014, 137 (11) :V2T-V6T.
- [17] Liang L, Reitz R D, Iyer C O, et al. Modeling Knock in Spark-Ignition Engines Using a G-equation Combustion Model Incorporating Detailed Chemical Kinetics [J]. 2007.