

汽油机进气道喷水抑制爆震影响的三维数值模拟

3D Numerical Simulation of Effect of Intake Port Water Injection on the Anti-knock for Gasoline Engine

林长林, 张小矛, 徐政, 陈明, 杨洋, 陈曦, 丁宁

1. 上海汽车集团股份有限公司乘用车公司技术中心 2. 上海市汽车动力总成重点实验室

摘要: 汽油机进气道喷水能够有效降低气缸内混合气的温度, 是未来进一步拓展发动机最大增压压力上限、提高大负荷工况下的热效率的重要技术。汽车研发工程师们对喷水技术有很大的兴趣, 但是对水和燃油相互作用的理论机理和缸内物理过程缺乏理解。本文对一台 1.5T 缸内直喷(GDI)汽油机在 3000r/min, IMEP 约为 15bar 的工况进行了进气道喷水模拟, 通过 CONVERGE 三维仿真软件建立了缸内直喷汽油、进气道喷水的双喷射发动机三维性能仿真模型, 研究了不同喷水时刻、喷水比例和点火时刻下的缸内油气混合、燃烧特性和排放特性的结果, 评估了进气道喷水对于抑制爆震、提高发动机效率以及降低排放的潜力, 为后续发动机喷水技术的应用提供了参考。研究结果表明, 为了避免进气道残留较多的水, 需要选择合适的喷水时刻, 使得进入缸内的水量最多。随着喷水比例的增大, 水对缸内末端混合气的冷却作用增强, 但是油气混合均匀性较差。喷射最大比例的水时, 末端混合气温度降低最多。在压缩比和 Lambda 相同且不发生爆震的前提下, 喷水结合提前点火时刻, 能够略微提高指示热效率, 较大幅度地降低 NOx 排放。

关键词: 汽油机; 进气道喷水; CONVERGE; 爆震

Abstract: Intake port water injection on gasoline engine represents an effective option of reducing the in-cylinder temperature with extending the upper limit of the boost pressure, and increasing the thermal efficiency at the high load. The automobile engineers are concerned about the water injection in the gasoline engine. However there are few researches revealing the mechanism and the physical interaction between the water and fuel in the cylinder. In this paper, the modeled 1.5T gasoline-direct-injection (GDI) and port-water-injection dual injection engine was operated on 3000 r/min, IMEP 15bar. The effect of water injection timing, the water injection ratio and the spark timing on the in-cylinder fuel-air mixing, the combustion characteristic and emissions were investigated by the CONVERGE software. Finally the potential of intake port water injection on the knock mitigation, the improvement of engine efficiency and the reduction of emissions were assessed. The numerical analysis can be used to design and conduct the application of the water injection. The main results of such study reveal that with suitable water injection timing, more water was trapped in cylinder while the intake port water wetting was reduced. With the increase of the water injection ratio, the cooling effect of water on the in-cylinder end-gas was enhanced while the homogeneity of the fuel-air mixing was worsen. With large quantity of the water to fuel ratio, the temperature of the end-gas was further reduced. On the premise of knock mitigation, the thermal efficiency was improved and the NOx emissions were reduced with large quantity of water injection and suitable spark advance.

Key words: Gasoline engine, Intake port water injection, CONVERGE, Knock

1. 引言

小型强化技术能够提高汽油机输出功率和燃油经济性, 降低泵气损失。但是随着压缩比和负荷的增加, 爆震倾向增大。爆震导致发动机内部零件损坏, 动力输出也会大大降低, 限制了发动机效率的进一步提升。传统发动机运行在大负荷及全负荷工况时, 为了避免爆震和降低排气温度, 通常采用燃油加浓或推迟点火的策略, 这将导致燃油经济性变差。由于水具有较高的汽化潜热(水, 2257 kJ/kg; 汽油 300 kJ/kg) 和比热容, 通过水的蒸发吸热效应和稀释效应, 能够有效降低缸内温度, 进而达到

抑制爆震和降低 NO_x 排放的效果。此外通过喷水策略可以避免过于加浓,使得发动机维持在化学计量当量比附近运转,提高燃油经济性的同时,也有利于三效催化剂的高效工作。喷水技术作为降低排放以及提高热效率的有效方法引起汽车行业的关注。早在 1962 年 Oldsmobile F85 3.5L V8 涡轮增压发动机便应用了水喷射技术,通过向增压空气加入水和甲醇的混合溶液,降低了进气温度,实现对爆震的抑制^[1]。Bellis^[2]等人通过试验和一维仿真分析方法,在一台 0.875L 涡轮增压发动机上研究进气道喷水对抑制爆震和燃油经济性的影响。研究发现,水油比例为 17%时,在全部负荷工况范围内均能实现抑制爆震,燃油经济性提高 15-20%。Cavina^[3]等人通过搭建一维 GT-Power 进气道喷水仿真模型,研究喷射位置、水油比例和喷水温度对于降低排气温度和抑制爆震的影响。该研究发现喷水是有效降低排温和抑制爆震的技术。通过该研究为涡轮增压发动机喷水参数设计提供了数据支撑。但是该模型对于喷水压力和喷水时刻的研究不敏感,需在试验台架上验证模型的准确性。Alessandro^[4]等人通过三维 CFD 仿真计算进气道喷水取代燃油加浓策略,实现燃油经济性的提高。研究发现喷水后,在 2000rpm、4000rpm 和 7000rpm 工况的油耗分别降低了 2%、10%和 22%。目前,由于进入气缸内的水与空气和燃油相互作用,通过试验或者一维仿真的方法无法有效分析水在缸内的分布状况以及喷水对于抑制爆震的深层机理,因此有必要通过三维 CFD 计算,研究水和燃油的相互作用,加深对喷水抑制爆震效果的理解,为喷水发动机开发提供理论依据。

2. 研究对象

研究对象为 4 冲程 4 气门缸内直喷涡轮增压发动机,进气道采用滚流对称式气道,燃烧室采用屋顶型式,发动机的基本参数见表 1 所示。燃烧系统模型如图 1 所示,其中,喷油器采用中置缸内喷射;两个 6 孔喷水器安装在进气道处,借鉴了传统汽油机 PFI 喷嘴设置。

表 1 发动机主要参数

名称	主要技术参数
缸径/mm	74
行程/mm	86.6
压缩比/-	11.5

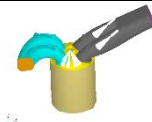


图 1 燃烧系统几何模型

3. 仿真模型验证

3.1 网格建立

采用 CONVERGE 软件自适应网格技术,对网格时间和空间上进行分区加密,在保证计算精度前提下节省计算时间。计算时,对进气道和气缸采用对速度和温度梯度的自适应加密,对关键区域(气门阀座)进行分区加密。

3.2 初始和边界条件

进出口边界为进气道入口和排气道出口,根据一维 GT-Power 软件计算得到瞬态压力值和温度值。计算模型的温度边界采用固定壁温,按边界分区赋予工程经验值,包括缸盖、缸壁、活塞、进气道、进气阀、排气道和排气阀。进气道内初始组分为混合气,包含氧气和氮气;气缸内和排气道内初始组分为燃烧废气,包含二氧化碳、氮气和 water 蒸气,其比例按照过量空气系数 0.9 计算得出。

3.3 物理模型

模拟分析包含喷雾、流动和燃烧过程,具体物理模型如表 3 所示,其中燃烧模型采用 SAGE 模型,为详细化学反应动力学模型,相对于传统经验燃烧模型,无需指定经验的火焰速度关系,且能够更加准确的对化学反应过程进行模拟。为节省计算时间,使用简化的化学反应机理,包含 48 种组分,152 个反应步,燃油组分采用异辛烷和正庚烷的质量分数配比 92: 8。同时,应用多区(Multi-zone)

加速算法，能够在保证精度的前提下使详细化学反应计算速度显著提升。

表 2 物理模型设置

湍流模型	RNG k-ε
喷雾破碎模型	KH-RT breakup length model
燃烧模型	SAGE Detailed Chemistry
壁面传热模型	O'Rourke and Ameden
NO _x 排放模型	Extended Zeldovich NO _x
Soot 排放模型	Hiroyasu Soot

3.4 缸内燃烧模型验证

为验证燃烧模型的准确性，将模拟计算结果与试验结果进行了对标。首先对该汽油机 3000rpm, IMEP 15bar 工况进行了缸内燃烧模拟。图 2 为模拟与试验缸压曲线的对比，可以看出两者一致性较好，故采用以上设置能够较好地对燃烧过程进行模拟分析。

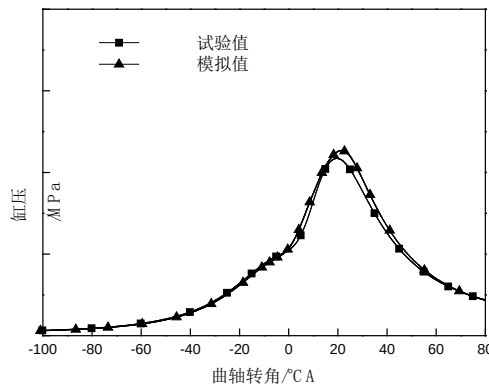


图 2 缸压模拟值与试验值对比

3.5 缸内爆震评价指标

为了评价发动机缸内爆震燃烧特性，在气缸内设置了如图 3 所示的 9 个监测点。利用监测点能够获取缸内局部区域的缸压信号，通过傅里叶变换和滤波处理，得到缸压最大值和最小值之差 PP_{max} 。通过对缸内所有监测点的 PP_{max} 取平均值，得到发动机爆震指数 KI (Knocking Index)，见公式 (1)，其中， N 表示监测点的编号^[5,6]。

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

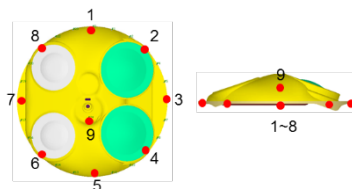


图 3 缸内爆震监测点的布置

4. 模拟分析结果

4.1 进气道喷水 and 外部 EGR 的燃烧特性对比

相对于外部 EGR，在进气道喷水过程中，喷射的液态水的蒸发会吸收热量，有助于降低混合气的温度。此外，液态水蒸发产生的水蒸汽具有更高的比热容，稀释效应更强。为了对比进气道喷水和

外部 EGR 对于缸内燃烧的影响，设置进气组分为空气和水蒸汽的混合气，用以表征进气道喷水时的闭阀喷射状态；设置进气组分为空气和 CO₂ 气体的混合气，用以表征进气道加入外部 EGR 的状态。相对于进气道加入外部 EGR，在实际的进气道喷水发动机中，采取开阀喷射水时，液态水的蒸发能够进一步降低进气道和缸内混合气的温度。在汽油的完全燃烧产物中，CO₂ 占据较大比例（CO₂ 占比 19%，H₂O 占比 8.8%），因此用 CO₂ 气体替代外部 EGR 气体。点火提前角相同。

图 4 为不同喷水和 EGR 比例的缸内温度变化，其中喷水比例（指喷水质量占燃油质量的比值）分别为 a%和 2a%；外部 EGR 比例（指 CO₂ 质量占燃油质量的比值）分别为 a%和 2a%。可以看出，随着喷水比例或外部 EGR 比例的增加，燃烧相位均推迟，最高燃烧温度均降低。相对于外部 EGR，喷水的最高燃烧温度降低更为明显（外部 EGR 降低 3.1%，喷水降低 7.3%）。这是由于 H₂O 相对于 CO₂ 具有更高的比热容，在相同的加热量的情况下，混合气的温升越低。图 5 为喷水和 EGR 比例均为 2a%时，在 80°CA ATDC 时刻的缸内混合气的温度、Lambda 和 NO_x 的分布。可以看出，高温富氧区域容易产生较多的 NO_x。EGR 比例为 2a%时，缸内燃烧温度较高，NO_x 浓度也较多。喷水比例为 2a%时，缸内高温区域减少，NO_x 浓度有所降低。

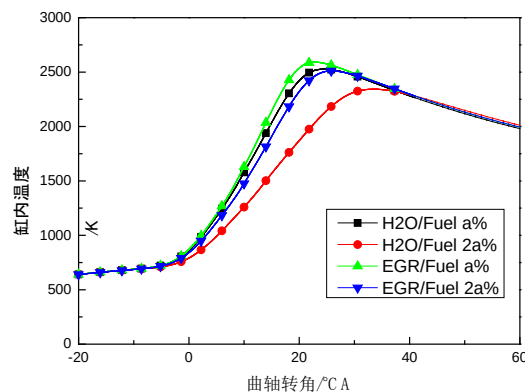


图 4 不同喷水和 EGR 比例的缸内温度变化

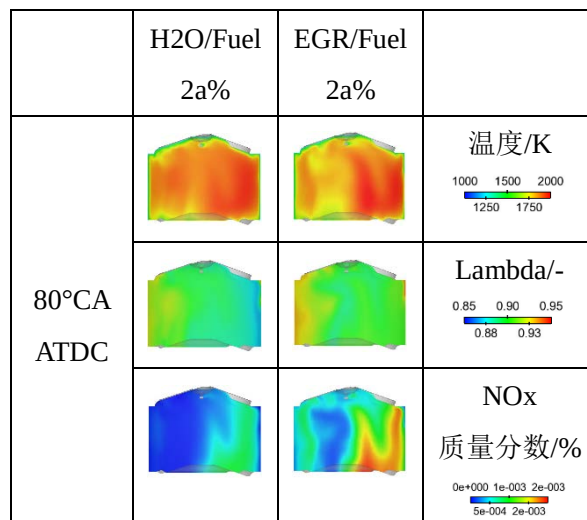


图 5 喷水和 EGR 在 80°CA ATDC 时缸内混合气的温度、Lambda 和 NO_x 分布的对比

4.2 喷水时刻对进入缸内水量的影响

水在进气道内喷射后进入缸内需要一定的发展时间。在一个计算循环内，不同喷水时刻（WIT，water injection timing）将影响进入缸内的总水量。固定喷水比例和点火时刻，研究采用四个不同喷水时刻，分别为 Case1、Case2、Case3 和 Case4，如图 6 所示。其中 Case1 的喷水时刻最早，Case4 的喷水时刻最晚。

图 7 不同喷水时刻在进气门临近关闭时水滴和油滴分布（蓝色表征水，红色表征燃油）。图 8 为进气门关闭时进入缸内的水的总质量。Case1 和 Case2 由于闭阀喷射，较多水喷射到进气阀门和气道壁面上，进入缸内的水较少。Case4 由于喷水时刻较晚，较多的水留在进气道，因此进入缸内的水最少。Case3 进入缸内水滴较多。因为开阀喷射期间喷射的水大部分直接进入缸内。为了减小残留在进气道的水量并有效利用喷入的水实现抑制爆震的效果，选择喷水时刻为 Case3 较为适合。

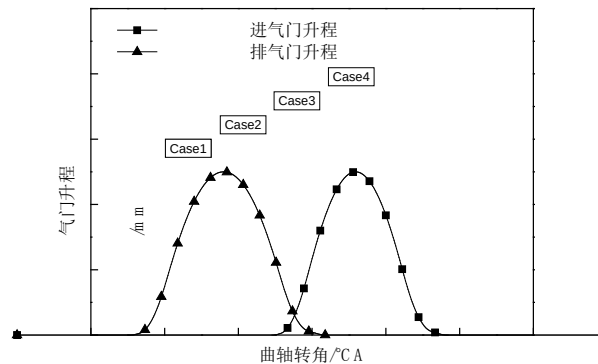


图 6 不同喷水时刻示意图

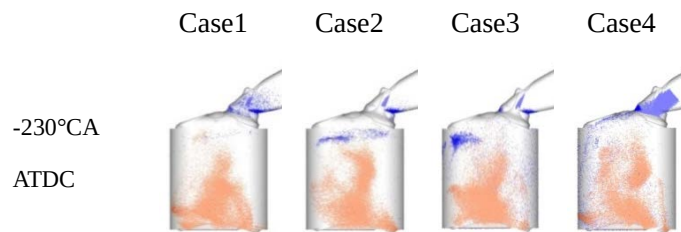


图 7 不同喷水时刻在进气门临近关闭时的水滴和油滴分布

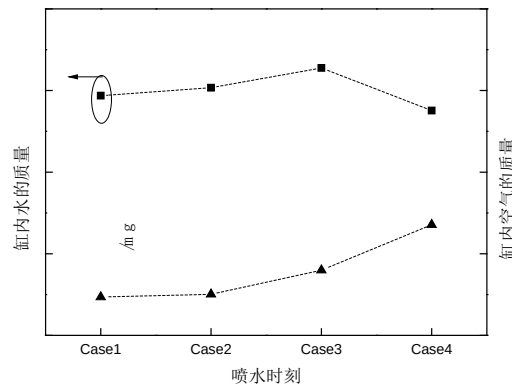


图 8 进气门关闭时刻缸内的水和空气的质量

4.3 不同喷水比例对缸内油气混合的影响

不同喷水比例将影响缸内的油气混合状态。根据上文计算结果，选择固定喷水时刻 Case3，改变喷水比例。表 3 为不同喷水比例和点火时刻算例参数设置，其中喷水比例（指喷水质量占燃油质量的比值）分别为 0%、a%和 2a%。点火时刻设置上，以跟试验对标的点火时刻 SA1（Spark Advance1）为 Base 点，不同喷水比例算例的点火时刻均提前到接近爆震状态。

图 9 为-20°C A TDC 时缸内 Lambda 体积分数分布，柱状图越集中，表征缸内均匀性更好。图 10 为-20°C A TDC 时缸内温度分布。可以看出，随着喷水比例的增大，缸内 Lambda 分布更为分散，缸内温度降低。喷水量的增多对未燃混合气的冷却作用明显，但是油气混合均匀性略微变差。

表 3 不同喷水比例和点火时刻算例参数设置

算例设置	H2O/Fuel 0%	H2O/Fuel a%	H2O/Fuel 2a%
喷水比例[%]	0	a	2a
喷水时刻[°CA ATDC]	Case3	Case3	Case3
点火提前角[°CA ATDC]	SA1, SA3	SA2, SA3	SA3, SA4, SA5

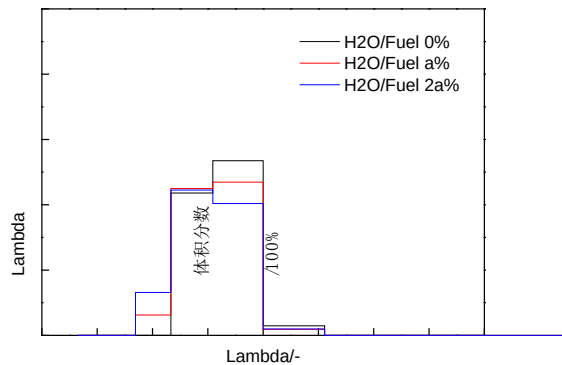


图 9 不同喷水比例在-20°C A TDC 的缸内 Lambda 均匀性分布

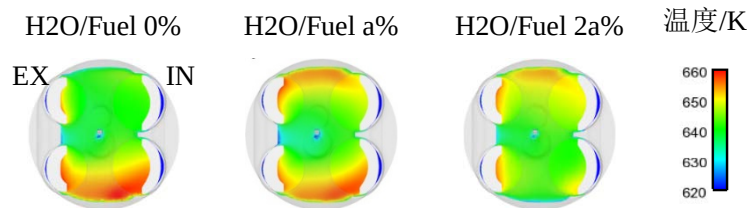


图 10 不同喷水比例在-20°C A TDC 的缸内温度分布

4.4 不同喷水比例和点火时刻的燃烧和排放特性

图 11 为不同喷水比例和点火时刻的爆震指数，爆震指数的定义见公式（1），其中水平线表征爆震阈值，爆震阈值以上的点表示发生爆震。图 12 为不同喷水比例在相同点火时刻时缸内高温区域和爆震点分布。可以看出，在相同的喷水比例下，随着点火时刻的提前，爆震指数逐渐增大，爆震倾向增大。在相同点火时刻 SA3，喷水比例为 0%和 a%时缸内均产生爆震。随着喷水比例增大，爆震指数下降，爆震倾向降低。喷水比例为 2a%时，尽管火焰传播速度慢了，但是末端混合气温度下降，未发现爆震自燃点，体现喷水抑制爆震的效果。

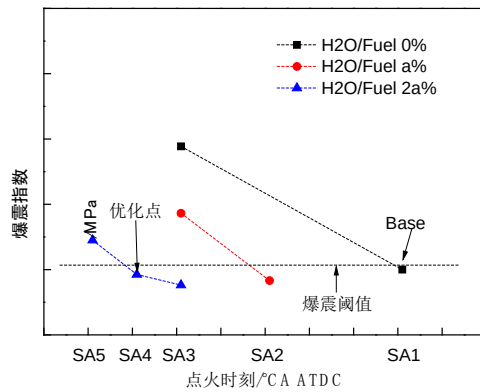
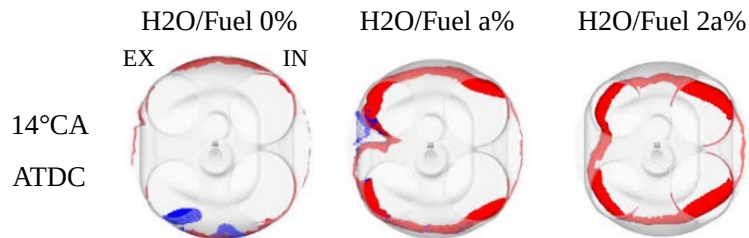


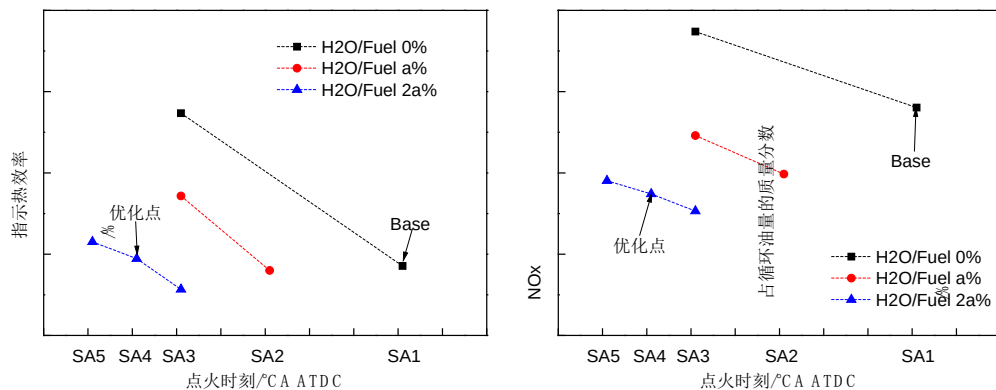
图 11 不同喷水比例和点火时刻的爆震指数



注：红色等值面表征高温火焰面；蓝色等值体表征局部爆点。

图 12 不同喷水比例在相同点火时刻 SA3 缸内高温区域和爆震点分布

图 13 为不同喷水比例和点火时刻的指示热效率和 NO_x 排放。可以看出，在相同喷水比例下，随着点火时刻的提前，指示热效率和 NO_x 排放均增大。在不发生爆震的前提下，相对于喷水比例为 0%、点火时刻为 SA1 的 Base 点，喷水比例为 2a%、点火时刻为 SA4 的优化点的指示热效率略微增加、 NO_x 排放降低明显。

图 13 不同喷水比例和点火时刻的指示热效率和 NO_x 排放

5. 结论模拟分析结果

本文建立了喷水发动机缸内三维 CFD 模型。该模型考虑了燃油和水的喷射，油、气和水的混合过程、液滴蒸发过程、燃烧过程和污染物生成。为喷水发动机的开发做了初步的探索工作。本文通过仿真分析发现，

- (1) 相对于外部 EGR，进气道喷水能够降低最高燃烧温度，减少 NO_x 的排放。
- (2) 合理的喷水时刻能增加进入缸内的水量，避免进气道残留较多的水。

(3) 随着喷水比例的增大, 水对缸内末端混合气的冷却作用增强, 但是油气混合均匀性略微变差。

(4) 在压缩比和 λ 相同且不发生爆震的前提下, 喷水结合提前点火时刻, 能够略微提高指示热效率, 较大幅度地降低 NO_x 排放。

6. 参考文献

- [1] LEWIS J, BURRELL G, BALL F, The oldsmobile F-85 jetfire turbo rocket engine[C], SAE Technical Paper, 1962, 620221.
- [2] BELLIS V, BOZZA F, TEODOSIO L, et al, Experimental and numerical study of the water Injection to improve the fuel economy of a small size turbocharged SI engine[J], SAE International Journal of Engines, 2017, 10(2017-01-0540):550-561.
- [3] CAVINA N, ROJO N, BUSINARO A, et al, Investigation of water injection effects on combustion characteristics of a GDI TC engine[J], SAE International Journal of Engines, 2017, 10(2017-24-0052).
- [4] ALESSANDRO A, FABIO B, SEBASTIANO B, A numerical investigation on the potentials of water injection as a fuel efficiency enhancer in highly downsized GDI engines[C], SAE Technical Paper, 2015, 10(2015-01-0393).
- [5] LONG L, ROLF D, et al, Modeling knock in spark-ignition engines using a G-equation combustion model incorporating detailed chemical kinetics[C], SAE Technical Paper, 2007, 10(2007-01-0165).
- [6] 丁宁, 徐政, 缸内直喷发动机的燃烧和爆震仿真分析, 2017 年 idaj 中国区用户年会, 2017
- [7] Shinrak P, Tetsuji F, Validation of turbulent combustion and knocking simulation in spark-ignition engines using reduced chemical kinetics[C], SAE Technical Paper, 2015, 10(2015-01-0750).