

基于 CONVERGE 的车用柴油机缸内燃烧及排放的仿真研究

王宏达¹, 许俊峰¹, 张鑫华¹, 魏福祥¹, 马天翔¹, 李玉峰²

(1. 中北大学 能源动力工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中国北方发动机研究所, 山西 大同 037001)

摘要: 针对某型车用高强化柴油机, 研究了进气加湿对 NO_x 、碳烟生成的作用机理及油耗的影响, 提出采用进气道喷水的方式对进气加湿, 运用仿真软件 CONVERGE 研究了不同油水比对柴油机缸内燃烧及排放的影响, 获得了在特定时刻下 NO_x 和当量比在缸内的分布情况, 分析比较了不同油水比对缸内温度及压力的影响情况。结果表明: 随着油水比的不断下降, 缸内温度以及压力均下降, 峰值最大降幅分别为 6.26%、4.05%, 燃烧重心 CA50 相位后移, NO_x 生成质量及油耗下降, 但碳烟排放情况有所恶化。

关键词: 进气道喷水; 数值模拟; 高强化柴油机; 燃烧; 排放

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)02-0091-04

Simulation Research on In-cylinder Combustion and Emission of Vehicle Diesel Engine Based on CONVERGE

WANG Hongda¹, XU Junfeng¹, ZHANG Xinhua¹, WEI Fuxiang¹, MA Tianxiang¹, Li Yufeng²

(1. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. China North Engine Research Institute, Datong 037001, China)

Abstract: For a certain type of high-enhanced diesel engine, the mechanism of air intake humidification on the formation of NO_x and soot and the effect of fuel consumption are studied. The method to humidify the intake air by spraying water into the intake port is proposed. The simulation software CONVERGE is used to study the influence of different oil-water ratios on the combustion and emissions of the diesel engine cylinder, and the distribution of NO_x and equivalent ratio in the cylinder at a specific time is obtained. The influence of different oil-water ratios on the temperature and pressure in the cylinder is analyzed and compared. The results show that as the oil-to-water ratio keeps decreasing, the temperature and pressure in the cylinder decrease. The maximum peak drops are 6.26% and 4.05%, respectively. The CA50 phase of the combustion center of gravity shifts backward, and the quality of NO_x production and fuel consumption decrease, but soot emissions deteriorate.

Keywords: inlet water injection; numerical simulation; high-strength diesel engine; combustion; emission

0 引言

2020 年以后, 内燃机排放法规日益严格, 使得原始设备制造商有必要寻找经济高效的解决方案来提高内燃机效率并降低其排放。高效燃烧发动机可以受益于冷却外部废气重新计算和进气加湿等技术。在这些技术中, 进气加湿可以作为一种有前途的方法来减轻爆震和显著减少二氧化碳及氮氧化物排放。进气加湿不是新技术^[1-3], 早在第二次世界大战之前, 水喷射到燃烧室这一概念就已经用于军用飞机活塞发动机, 以便在需要高推力时, 如起飞或空战, 在短时间内增加功率输出。喷水主要用于航空工业^[4], 只有少数带有增压器或涡轮增压器的高性能汽车配备了喷水系统。进气加湿具体机理有以下三点: 1) 混合气体中的氧浓度可被加水有效降低; 2) 水有比较大的蒸发潜热以及较高的比热容; 3) 水分子可以在高温下发

生化学反应分解生成 O_2 和 H_2 。因此, 可以提升燃烧效率, 反应的具体化学式为 $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 。这三种效应分别被称为加水策略的稀释效应、热效应和化学效应^[5]。

一些研究表明, 进气加湿对降低柴油发动机中的氮氧化物和碳烟排放有显著效果。文献[6]分析了进气加湿对增压汽油直喷发动机热平衡的影响, 探讨了进气加湿提高发动机热效率的原因。进气加湿可以显著降低工质温度, 使得废气中所含能量变少, 从而降低排气损失。文献[7]研究了进气加湿对发动机排放的影响, 在中负荷和高负荷下, 通过向混合物中加水和提前点火时间, 可以显著降低粒子排放。文献[8]通过实验重点研究了进气加湿的冷却及稀释效应, 并与 EGR 技术在减排能力上进行对比, 发现在高负荷和 PM 排放较少时, 进气加湿更能有效降低 NO_x 的排放。文献[9]探讨了进气加湿结合米勒循环, 在进气门晚关 10°CA 以及水油比为 0.3 时, 可以有效降低 NO_x 的排放, 但是 HC、CO 以及油耗增加。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605447); 山西省应用基础研究计划项目(201601D021085)

第一作者简介: 王宏达(1997—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向为内燃机燃烧模拟。

现阶段下,关于发动机进气加湿的研究主要集中在对燃烧及排放产物的参数定性分析以及注水后对发动机爆震的影响上,而在不同注水情况下对缸内温度分布、当量比分布、湍动能、燃烧重心以及有害排放物影响方面的研究较少。本文将采用 CONVERGE 软件进行三维 CFD 数值模拟,研究不同注水量对内燃机缸内燃烧的影响以及排放产物减少的内在机理、量化减排程度,为车用柴油机的减排设计提供理论依据。

1 计算模型的基本参数及验证

1.1 仿真模型的建立

本文以某型车用高强化柴油机为研究对象,在 Pro/e 中建立模型见图 1。前期已完成对模型的标定。在进气道设置水喷嘴一个,喷水过程在进气前结束。

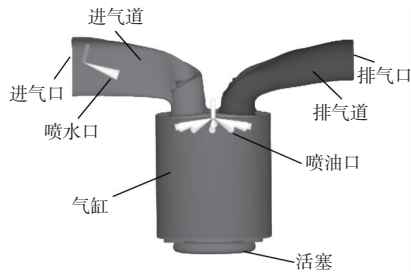


图 1 喷嘴位置示意图

运用 CONVERGE 软件进行三维数值模拟,柴油机具体参数如表 1 所示。

表 1 高强化柴油机的基本参数

参数	数值
缸径/mm	110
燃烧室类型	ω 型
压缩比	13.4
喷孔数	13
喷油夹角/(°)	157
连杆长度/mm	183
活塞行程/mm	110
发动机转速/(r·min ⁻¹)	3 800

1.2 计算模型的选用及条件

在模拟过程中,计算模型选用的湍流模型使用雷诺平均(RANS)的重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 模型;喷雾破碎模型选用 KH-RT 组合模型;碰撞模型选用 O'Rourke 模型;碰壁模型选用 Slide/Rebound 燃油碰壁模型;蒸发模型选用 Frossling 经验公式和 Chiang 经验公式来计算液滴直径变化率,选用 SAGE 燃烧模型;排放模型基于调用“mech.dat”文件,结合激活的燃烧模型计算得出相关排放物,其中包含的碳烟(Soot)和氮氧化物(NO_x)子模型。

本文研究主要是针对高强化柴油机在全负荷(100%负荷、转速为 3 800 r/min)情况下进行的瞬态模拟,模拟计

算范围为 $0^\circ\text{CA} \sim 720^\circ\text{CA}$ 。计算从进气冲程时开始,随着排气冲程的结束而结束,喷水从 50°CA 时刻开始,在 169°CA 时刻结束,历时 119°CA ;喷油从 348°CA 时刻开始,结束时刻为 384.5°CA ,喷油持续期为 36.5°CA ,喷油量为 206.7 mg ,喷孔直径为 0.22 mm ,燃油温度 313 K 。将进气压力 0.461 MPa 和缸内温度 343 K 作为计算起始条件。利用 CONVERGE 自带的网格诊断以及自适应加密技术,对该模型进行网格处理,网格加密方案如图 2 所示。

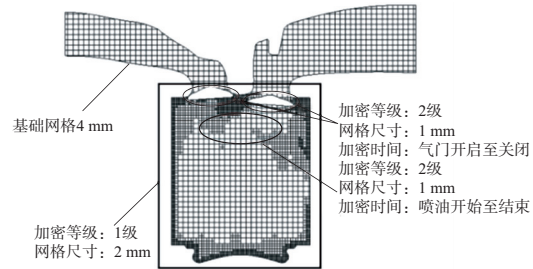


图 2 网格加密方案

1.3 计算模型的验证

在单缸机试验台,转速 $3\ 800 \text{ r/min}$ 、全负荷工况下,测得了充气量、 NO_x 排放量及缸压曲线等数据,如图 3(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)、表 2 所示。为了验证模型的有效性,将实验与模拟重要参数进行对比,图 3 是实验与模拟缸压对比图,在 368.96°CA 时刻,实验缸内峰值压力为 20.31 MPa ,模拟缸内峰值压力在 368.70°CA 时达到 20.24 MPa 。二者相比模拟较实验峰值相位提前 0.26°CA ,峰值压力偏差 0.34% 。通过表 2 得知,模拟值与实验值在 NO_x 的排放、充气量两项分别偏差 0.48% 、 1.59% ,三者均在工程允许误差范围内,证明模拟结果是可信的,模型是可靠的。

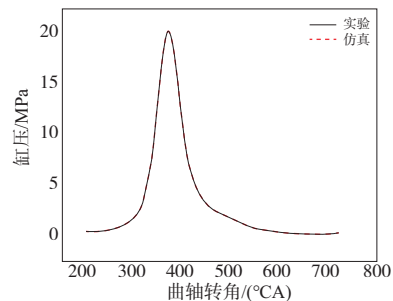


图 3 实验与模拟缸压对比图

表 2 模拟值与实验值关键参数对比 单位:kg

项目	模拟值	实验值
NO_x 排放量	2.30×10^{-6}	2.29×10^{-6}
充气量	5.11×10^{-3}	5.03×10^{-3}

1.4 油水比的定义

为了研究喷水量的大小对柴油机缸内燃烧的影响,直观地表征加湿程度,引进了油水比(缸内喷油量与进气道

喷水量的比值)的概念。设计了6种仿真方案,进气道未喷水工况及5种不同油水比工况:0.583、1.17、1.78、2.40、3.05。在仿真过程中,保持转速、负荷、喷油质量不变。

2 模拟结果及分析

2.1 油水比对缸内燃烧的影响

图4是油水比从0.583增加到3.05时,缸内压力随曲轴转角的变化图。随着油水比的不断增加,缸内峰值压力先降低再升高,并在油水比0.583时缸内峰值压力达到最低,为19.42 MPa,与进气道未喷水工况比较,降低0.82 MPa,降幅为4.05%。这种趋势表明缸内压力随着油水比的不断增加而升高,其内在原因是,进气中水蒸气含量的不断下降增加了等容燃烧程度,从而升高了缸内压力。在油水比为1.78时,缸内峰值压力为19.80 MPa,峰值相位提前 0.8°CA ,燃烧相位优化,缸内压降较未喷水工况降幅为2.03%。

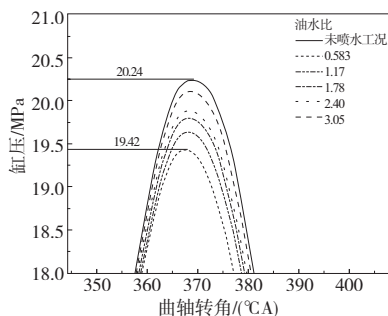


图4 油水比对缸内压力的影响

图5是在不同油水比时,缸内温度随曲轴转角的变化图。由图可知,缸内温度峰值为1523.3 K,存在于未喷水工况下,随着喷水量的不断增加,缸内平均温度逐渐降低,峰值温度降低为油水比0.583时的1427.9 K,较未喷水工况下降95.4 K,降幅为6.26%。这表明,进气道喷水对降低缸内温度效果明显,可有效降低缸内爆震爆燃趋势。发动机燃烧相位优化,且利于低温燃烧的进行,有助于降低有害物质的排放。当油水比逐渐降低, <1.78 时,由于水的冷却和稀释作用,使得燃烧速率减缓,缸内温度大幅下降,对燃烧相位的负面影响超过了点火时刻提前带来的积极影响。

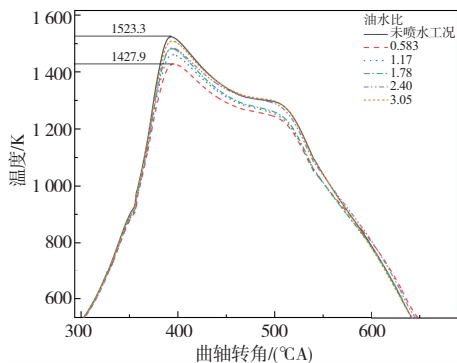


图5 油水比对缸内平均温度的影响

图6为油水比对燃烧重心CA50的影响,由图可知,随着油水比的提高,燃烧重心CA50相位逐渐提前。这是由于进气中水的占比不断下降,在进气完成后,氧含量不断上升,在缸内发生燃烧反应时,燃料获得足够的氧气来发生燃烧反应,使得燃烧速率上升,从而提前了燃烧重心。

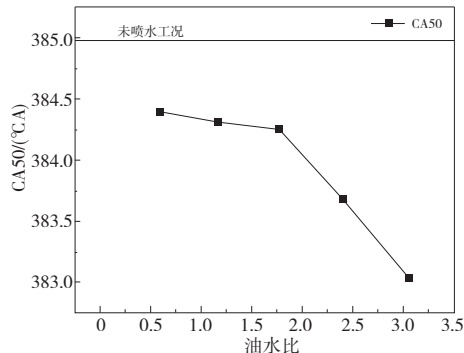


图6 油水比对燃烧重心CA50的影响

2.2 油水比对油耗的影响

图7所示为油水比对油耗率的影响。图中可见,在油水比不断提高的过程中,油耗率先降低后升高,并在油水比为1.78时,油耗率降幅最高,为10.5%,其主要原因是由于燃烧相位的优化,使得发动机热效率有了提升。

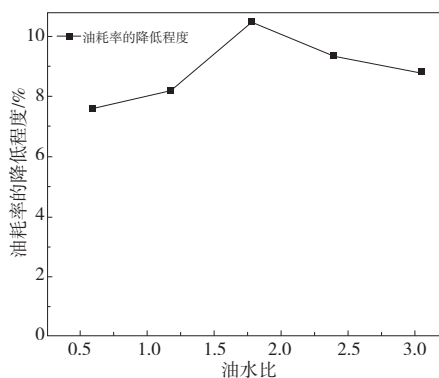


图7 油水比对油耗率的影响

2.3 油水比对排放的影响

图8所示为排放特性随油水比的变化图。图中可见,随着油水比的不断提高, NO_x 的峰值排放量不断上升。在进气道未喷水时, NO_x 峰值排放量最大,为 $2.3 \times 10^{-6} \text{ kg}$,将油水比提高到0.583, NO_x 峰值排放量大幅下降,此时排放量为 $3.5 \times 10^{-7} \text{ kg}$,较前工况降幅为84.8%。高温型NO是 NO_x 的主要来源,喷水量占比不断提高,导致缸内峰值火焰温度不断降低,且降幅越来越大,有利于抑制高温型NO的生成,从而使得 NO_x 生成质量下降。随着油水比的不断降低,峰值排放量由未喷水工况时的 $9.55 \times 10^{-6} \text{ kg}$ 提升至油水比为0.583时的 $1.07 \times 10^{-5} \text{ kg}$,升幅为12%。在油水比为1.78时,较未喷水工况, NO_x 排放量下降61.7%、碳烟排放量上升4.7%。

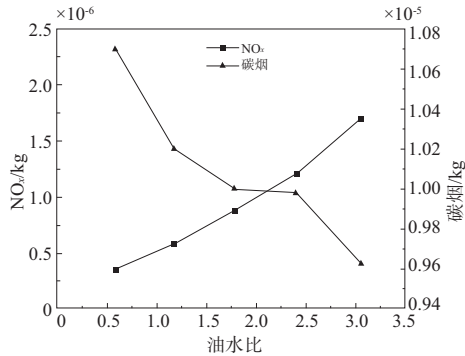


图8 油水比对 NO_x、碳烟排放的影响

图9为CA50时刻,不同油水比情况下NO_x在缸内的分布。从云图中可以看出,NO_x分布的区域主要存在于靠近气门处的挤气区以及ω型燃烧室的凹坑内。主要原因是油束从喷油口喷出后,撞击燃烧室壁面后向周围扩散,扩散区域具有NO_x生成的良好条件,因而在燃烧反应过后,此区域产生大量的NO_x。随着喷水量占比的不断提高,NO_x在此区域的浓度下降十分明显,说明进气加湿导致的缸内低温燃烧对NO_x减排效果十分明显。

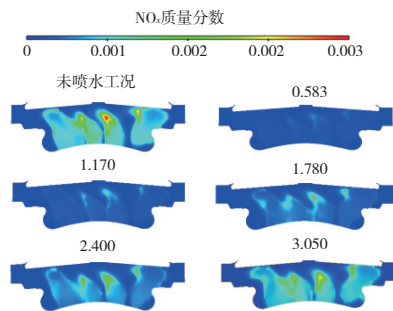


图9 不同油水比 CA50 时刻缸内 NO_x 分布

图10为CA50时刻,不同油水比对缸内当量比分布的影响。从当量比分布云图可以看出,当量比分布区域主要存在于挤气区以及ω型燃烧室的凹坑内。在此区域内高当量比分布面积随着油水比的提高略有增加,浓度也有所提高,这会使得碳烟排放进一步增加。进气道喷水量的提高减少了进气中的氧含量以及降低了缸内的燃烧温度,使得碳烟后期的氧化能力下降,导致碳烟排放恶化。

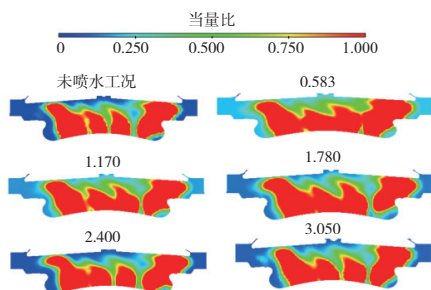


图10 不同油水比 CA50 时刻缸内当量比分布

3 结语

通过建立某型车用柴油机三维仿真模型,对模型进行网格划分以及局部网格加密,确定了进气道喷水的仿真条件。设计了6种仿真方案,并采用CFD三维数值模拟软件CONVERGE模拟了进气道喷水对缸内燃烧及排放的影响过程。仿真结果证明,进气道喷水对柴油机的减排及热效率的提升有一定的效果。具体结论如下:

1)随着油水比的不断提高,缸内峰值压力及缸内峰值温度先降低后升高,峰值相位出现先提前后推迟的规律,燃烧重心CA50相位前移。

2)随着进气道喷水量不断提升,点火时刻提前,燃烧相位得以优化,发动机热效率提高,油耗水平下降。当油水比为1.78时,发动机油耗率最低,燃油可节省10.5%。

3)进气道喷水会导致缸内温度降低,高温型NO_x的排放大幅减少,但碳烟排放量有所上升。采用最佳油水比1.78,可使总体排放量保持在较低水平。

参考文献:

- [1] HOPPE F, THEWES M, SEIBEL J, et al. Evaluation of the potential of water injection for gasoline engines [J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(5): 2500-2512.
- [2] ROHIT A, SATPATHY S, CHOI J, et al. Literature survey of water injection benefits on boosted spark ignited engines [C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2017.
- [3] THEWES M, HOPPE F, BAUMGARTEN H, et al. Water injection for gasoline combustion systems [J]. MTZ Worldwide, 2015, 76(2): 10-15.
- [4] DAGGETT D L, ORTANDERL S, EAMES D, et al. Water injection; disruptive technology 1 to reduce airplane emissions and maintenance costs [C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2004.
- [5] LARBI N, BESSROUR J. Measurement and simulation of pollutant emissions from marine diesel combustion engine and their reduction by water injection [J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(6): 898-906.
- [6] CHEN B, ZHANG L, HAN J L. An investigation on the effect of intake air humidification on the thermal balance of a turbocharged gasoline direct injection engine [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 21: 100719.
- [7] O'ROURKE P J, BRACCO F V. Modeling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiments [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1980, 9: 101-106.
- [8] TAUZIA X, MAIBOOM A, SHAH S R. Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine [J]. Energy, 2010, 35(9): 3628-3639.
- [9] GONCA G, SAHIN B, PARLAK A, et al. The effects of steam injection on the performance and emission parameters of a Miller cycle diesel engine [J]. Energy, 2014, 78: 266-275.

收稿日期: 2021-03-12