

喷水对氩气循环天然气发动机爆震及热效率的影响分析

杨豪, 梁兴湖, 邓俊, 金少也, 丁伟奇, 李理光

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于一台汽油/天然气两用燃料的涡轮增压三缸发动机, 建立 GT-Power 仿真模型, 研究喷水对准氩气动力循环发动机工作过程的影响。结果表明, 在低负荷工况下, 喷水后缸内的温度和压力都下降; 增大水气比 (水和甲烷的质量比) 和推迟点火则传热损失减少但排气损失增加, 存在热效率提升的较宽水气比范围和最优的水气比, 推迟点火时刻和喷水对于爆震有良好的抑制作用。在大负荷爆震工况下, 喷水能够显著抑制爆震, 提前点火时刻可以得到更优的燃烧效率, 喷水可使制动平均有效压力 (Brake Mean Effective Pressure, BMEP) 为 0.6 MPa 时指示热效率提高 0.2%、有效热效率提高 0.1%, 0.8 MPa 工况的指示热效率提高 0.4%、有效热效率提高 0.2%, 1.2 MPa 工况的指示热效率提高 1.2%、有效热效率提高 0.8% (水气比为 1 工况相对于水气比为 0.4 工况)。结合低负荷工况和高负荷工况的表现, 发现喷水能有效抑制发动机的爆震, 并能提升发动机的热效率。

关键词: 氩气动力循环; 喷水; 爆震; 热效率

中图分类号: U464.9 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.05.14

Effect of Water Injection on Knock and Thermal Efficiency of Argon Power Cycle Natural Gas Engine

YANG Hao, LIANG Xinghu, DENG Jun, JIN Shaoye, DING Weiqi, LI Liguang

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A GT-power simulation model is established for a turbocharged three-cylinders engine using gasoline/natural gas to study the influence of water injection on the working process of the quasi argon power cycle engine. The results show that under low load, the temperature and pressure in the cylinder decrease after water injection. Increasing the water-gas ratio (the mass ratio of water to methane) and delaying ignition reduce heat transfer loss and increase exhaust loss. There are a wide range of water-gas ratio and the optimal water-gas ratio with the improved thermal efficiency. The retarded spark timing and water injection lead to knock suppression. When engine knock occurs during heavy-load conditions, water injection can significantly inhibit knock. In addition, spark advance results in better combustion efficiency. Other important results are listed as follows: water injection can increase the indicated thermal efficiency by 0.2% and the brake thermal efficiency by 0.1% when BMEP is 0.6 MPa; the indicated thermal efficiency is increased by 0.4% and the brake thermal efficiency is increased by 0.2% under the condition of 0.8 MPa; the

收稿日期: 2022-05-23 改稿日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51576141)

参考文献引用格式:

杨豪, 梁兴湖, 邓俊, 等. 喷水对氩气循环天然气发动机爆震及热效率的影响分析[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(5): 677-685.

YANG Hao, LIANG Xinghu, DENG Jun, et al. Effect of Water Injection on Knock and Thermal Efficiency of Argon Power Cycle Natural Gas Engine[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(5): 677-685. (in Chinese)



indicated thermal efficiency is increased by 1.2% and the brake thermal efficiency is increased by 0.8% under the condition of 1.2 MPa. Considering the performance under both low-and high-load conditions, we have found that water injection can effectively inhibit engine knock and improve the thermal efficiency of the engine.

Keywords: argon power cycle; water injection; knock; thermal efficiency

我国承诺力争在2030年实现碳达峰,在2060年实现碳中和^[1],使内燃机可持续发展面临巨大的挑战。氩气动力循环发动机搭配碳中性燃料或氢燃料便可以实现高效、零碳和零污染排放,具有很大的发展潜力。

氩气动力循环发动机是一种以氩气(Ar)为循环工质的闭式循环发动机^[2]。由于使用氩气代替氮气,从根本上杜绝了NO_x的生成^[3]。根据奥托循环效率公式可知,高比热比的循环工质可以获得更高的热效率。而氩气作为单原子分子,其比热容比为1.67,能显著提高循环工质的比热容比,实现更高的热力循环效率。氩气动力循环发动机可以采用天然气和氢气作为燃料。其中,天然气易于储存和运输,已经是当前的主要可供燃料,其主要成分是甲烷,碳强度相对较低,具有良好的抗爆性^[4],可以实现更高的压缩比。配合二氧化碳捕集装置,氩气动力循环天然气发动机亦可实现零碳和近零排放。

根据KILLINGSWORTH等^[5]的研究,由于受到爆震的影响,氩气发动机的热效率在压缩比为5.5的时候即达到最优。因此,有必要尝试采用抑制爆震的方法来提升发动机的热效率。常见的抑制爆震的方式有EGR^[6]、喷水^[7-8]、改变配气相位等。目前,喷水技术应用于汽油机减缓爆震已得到广泛的研究。水作为惰性工质,可以通过稀释可燃混合气和降低缸内温度抑制末端混合气自燃,从而缓和爆震。BERNI等^[9]分析了喷水作为燃油加浓的替代手段对爆震的影响,分析表明,在某些条件下,喷水能抑制爆震,从而能改善燃油消耗率。NETZER等^[10]用CFD耦合化学反应动力学的方法,仿真分析喷水对汽油机燃烧和热力学过程的影

响。结果表明喷水会降低层流火焰速度、引入汽化潜热、影响化学平衡、引入水蒸气热容等。其中层流火焰速度对爆震影响最大,其次是汽化潜热,紧接着是化学平衡和水蒸气热容。

结合氩气循环发动机和喷水技术,从效率的角度看,水的汽化潜热和水蒸气的高比热容可以降低缸内温度而具有减少传热损失和抑制爆震的潜力,但是水蒸气的低比热比又会降低理论热效率,由此喷水对于氩气循环发动机是一个复杂的影响过程。喷水对于氩气循环发动机爆震及热效率的影响值得进一步探索和分析。

本文将基于氩气循环发动机,使用甲烷作为燃料,结合喷水技术,通过仿真研究喷水对抑制氩气循环发动机爆震、改善热效率的潜力,同时关注喷水的影响机理。

1 台架设置

试验所用的发动机是基于一台汽油/天然气两用燃料的涡轮增压三缸发动机改造而来的,天然气和汽油均为进气道喷射,原机基本参数见表1。主要改动是将原来的进气管路改造为氩氧供给系统,对排气系统的一些管路重新布置,为燃料供给系统新增了一套甲烷供给管路,将点火系统中中间气缸的火花塞改为了火花塞式缸压传感器;对于冷却系统,将节温器旁通,改为试验室内冷却恒温系统控制冷却水温度,将涡轮增压器旁通,将原机ECU改为自主开发的可变参数控制系统,并增加了各种传感器和自主开发的数据采集系统,图1为准氩气循环发动机试验台架布置示意图。此外,也进行了部分进气为空气的试验,此时则是把氩氧混合气断开,直接流进空气。

表 1 发动机主要参数^[11]

参数	值
缸径/mm	73.4
冲程/mm	78.6
压缩比	12.5
最大扭矩/Nm	180 (3 000~3 500 r/min)
最大功率/kW	85 (6 000 r/min)
缸内峰值压力/MPa	12

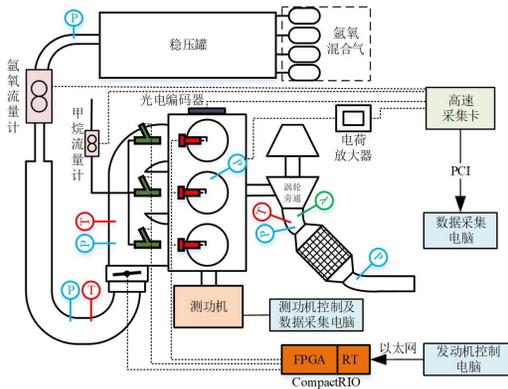


图 1 准氩气循环发动机试验台架示意图

2 GT-Power 仿真模型验证

2.1 热力学仿真模型介绍

热力学仿真是基于 GT-Power 开展，仿真模型见图 2 所示。图中左侧对应进气管路，右侧对应排气管路，中间为气缸和曲柄连杆部分。与流动/流量相关的包括甲烷喷嘴、进气管路和排气管路等，与燃烧放热相关的是气缸，与发动机结构相关的包括气缸和曲柄连杆部分。GT-Power 模型中的结构参数采用与试验发动机相同的参数，边界条件也是采用试验中数据采集程序的实测值，包括进气流量、进气温度和压力、排气温度和压力、甲烷温度、过量氧气系数 λ 等。此外，模型中采取节气门闭环控制，通过调节节气门开度，将模型中的进气流量控制在与试验值 0.5% 相对误差范围内。

本文还标定了爆震模型，爆震模型的判断依据为诱导时间积分。爆震通常被认为是末端混合气在火焰传播到达前自燃的结果，描述自燃过程的模型为诱导时间经验公式，如式 (1) 所示^[12]。

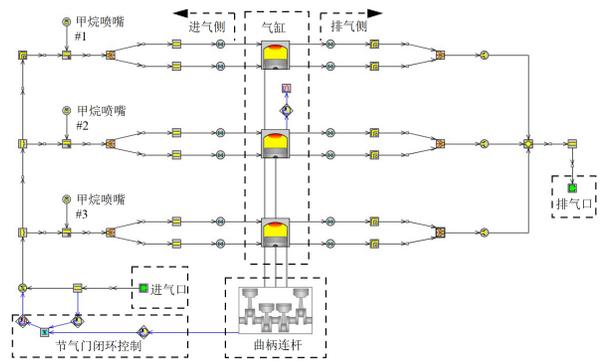


图 2 GT-Power 热力学仿真模型

$$I(t) = \int_0^t \frac{dt}{\tau} \quad (1)$$

式中： $I(t)$ 为诱导时间积分； t 为末端混合气从开始被压缩到当前时刻所经过的时间； τ 为混合气在瞬时温度和压力下的诱导时间（也是末端混合气发生自燃所需要的时间），通常表示为 Arrhenius 公式，如式 (2) 所示。

$$\tau = Ap^n \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (2)$$

式中： A 、 n 、 B 为与燃料相关的参数，其也能表示为：

$$\tau = 17.68 \left(\frac{ON}{100}\right)^{3.402} p^{-1.7} \exp\left(\frac{3800}{T}\right) \quad (3)$$

式中： ON 为燃料的辛烷值； p 为绝对压力； T 为开尔文温度。

2.2 GT-Power 仿真模型验证

如表 2 所示，选用了两种工况进行标定，其中氩氧混合气的体积比例为 (85% : 15%)，两种氛围对应试验中的转速相同、制动平均有效压力接近。由于空气氛围中试验不受爆震限制，所以空气氛围对应的 GT-Power 模型未标定爆震模型。而在氩氧氛围中，所标定的工况为试验确定的临界爆震点，爆震模型标定是将对应工况的诱导时间积分标定至 1 附近，作为爆震临界判据。

图 3 分别为 GT-Power 仿真模型在空气氛围和氩氧氛围中的缸压对比，由图可知，试验和仿真的缸压总体上较为吻合。相应的，如表 3 所示，IMEP

(指示平均有效压力)、ITE (指示热效率)、BMEP (制动平均有效压力)、BTE (有效热效率) 的试验和仿真误差都在 5% 以内。因此, 认为模型正确, 可以进入仿真计算阶段。

表 2 两种试验工况

变量	具体条件	
转速/(r·min) ⁻¹	1 000	
燃料	甲烷	
进气氛围	空气	氩氧混合气
BMEP/MPa	0.620	0.600
过量氧气系数λ	1.00	0.98
节气门后压力/MPa	0.096	0.096
排气压力/MPa	0.105	0.103
节气门后温度/K	294	288
排气温度/K	610	465
点火时刻/°CA ATDC	-15	-5

表 3 主要参数的试验和 GT-Power 仿真误差 单位: %

氛围	IMEP	ITE	BMEP	BTE
空气	0.8	0.4	-2.8	-2.5
氩氧	1.4	0.5	-0.1	-0.2

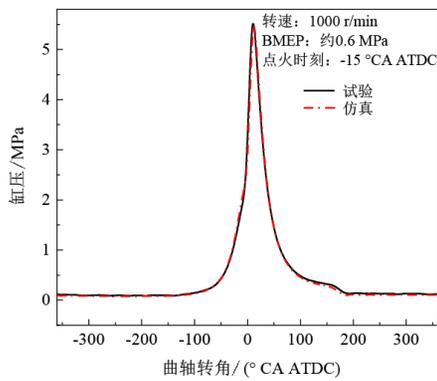
3 喷水对氩气动力循环发动机的影响

3.1 低负荷工况下喷水对热效率的影响分析

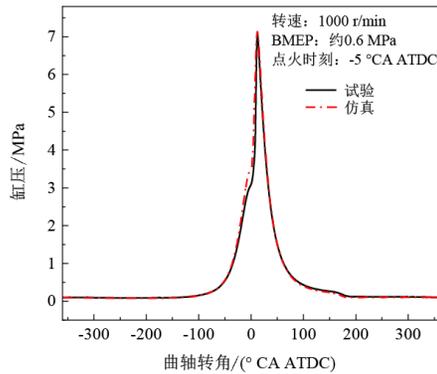
本文将基于标定模型时所使用的氩氧氛围工况对喷水所带来的影响进行研究, 计算工况为: 转速为 1 000 r/min, 氩氧体积比例为 85% : 15%。通过改变水气比, 点火时刻从温度、压力、做工、热效率等角度分析喷水对发动机的影响。其中, 水气比为水与甲烷的质量比。

3.1.1 喷水对缸内压力和温度的影响

图 4 为氩氧氛围中水气比对缸内压力和温度的影响。对于缸内压力, 水气比的影响主要集中在压缩上止点附近, 提高水气比能显著降低缸内峰值压力。而对于缸内温度, 从喷水时刻 (-180°ATDC) 起至该循环结束, 喷水都能显著降低缸内温度。

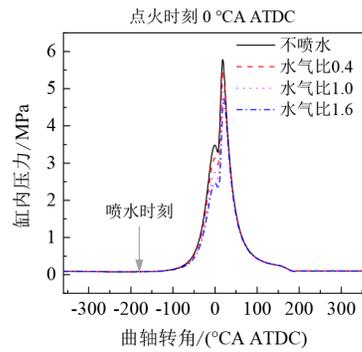


(a) 空气氛围中的 GT-Power 缸压对比

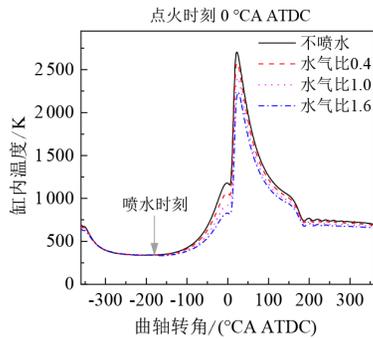


(b) 氩氧氛围中的 GT-Power 缸压对比

图 3 GT-Power 缸压标定结果



(a) 氩氧氛围中的缸内压力



(b) 氩氧氛围中的缸内温度

图 4 喷水对缸内压力和温度的影响

3.1.2 喷水对发动机能量分布的影响

如图 5 所示，水的加入势必会引起循环工质比热比的减小。根据奥托循环效率公式，比热比的减小会导致热效率的降低，所以水的加入会使发动机热效率变低。但由于实际状况中，发动机并非是绝热的，即一般都存在传热损失，且存在排气损失，所以发动机的表现还需要从具体的能量分布来判断。在能量分布上，燃料化学能的去向为指示功、传热和排气。喷水后，水汽化吸热，水蒸气也是做功工质，根据 3.1.1，缸内燃烧温度也发生了变化，最终影响燃料化学能的去向。

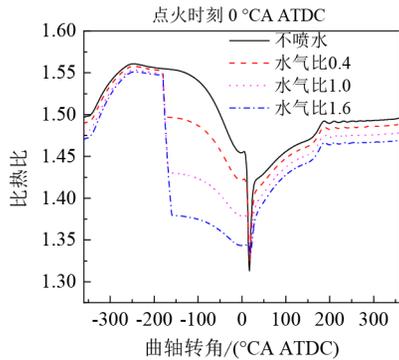
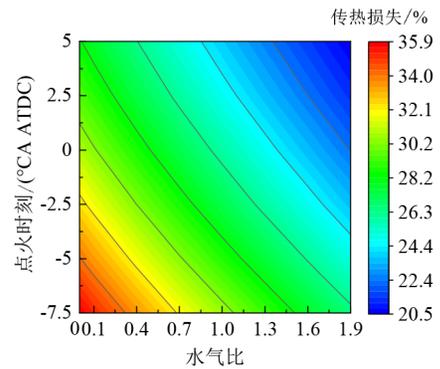


图 5 喷水对比热比的影响

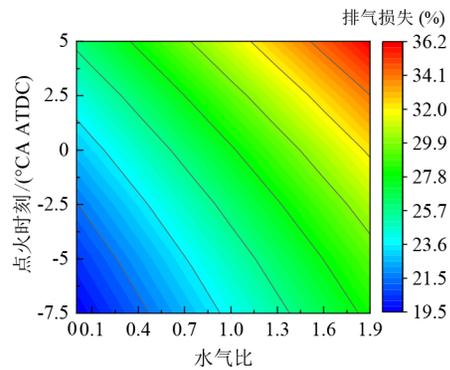
图 6 为氩氧氛围中的传热损失和排气损失随水气比和点火时刻的变化。传热损失与排气损失的变化规律相反，增大水气比和推迟点火使得传热损失减少但使得排气损失增加。喷水会降低缸内温度而减少传热损失，但水蒸气作为工质会携带部分能量成为排气损失的一部分。因此，合适的喷水量和对应的点火时刻则是十分重要。

3.1.3 喷水对发动机热效率的影响

由 3.1.2 可以得出，应该存在最优的喷水量和点火时刻使得热效率最高。图 7 为氩氧氛围中的指示平均有效压力 IMEP 和指示热效率 ITE 随水气比和点火时刻的变化。图 7b 中黑色方框代表不喷水工况的最高指示热效率，蓝色方框为最优水气比下的最高指示热效率，虚线为不喷水工况最高指示热效率的等值线。由此可知，存在较宽的水气比范围(约为 0~1.2)会使指示热效率不受三原子工质水蒸气



(a) 氩氧氛围中的传热损失

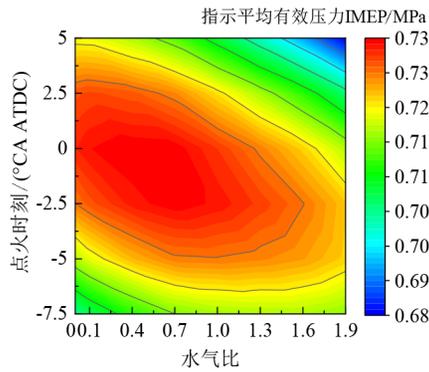


(b) 氩氧氛围中的排气损失

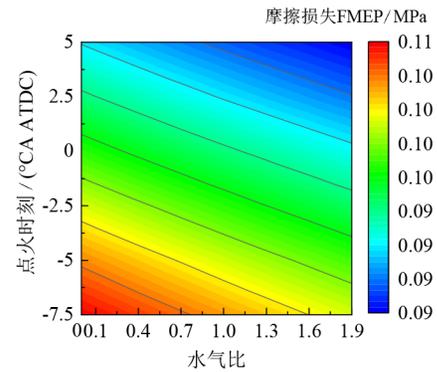
图 6 喷水对传热损失和排气损失的影响

的负面影响。与氩氧氛围不喷水工况相比，最高指示热效率最高提高了 0.2%，与标定模型的空气氛围不喷水工况相比，最高指示热效率最高提高了 9%。

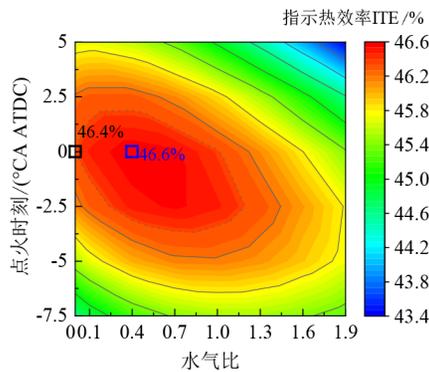
从指示功到有效功之间，存在摩擦损失。图 8 为摩擦损失和有效热效率随水气比和点火时刻的变化。喷水能降低缸内压力从而能降低摩擦损失。有效热效率的变化规律类似于指示热效率，但由于摩擦损失的缘故，有效热效率的最佳点火时刻更为滞后。图中黑色方框代表不喷水工况的最高有效热效率，蓝色方框为最优水气比下的最高有效热效率，虚线为不喷水工况最高有效热效率的等值线。由此可知，亦存在较宽的水气比范围(约为 0~1.1)使得有效热效率不受水蒸气的负面影响。与氩氧氛围不喷水工况相比，最高有效热效率最高提高了 0.1%，与标定模型的空气氛围不喷水工况相比，最高有效热效率最高提高了 7.9%。



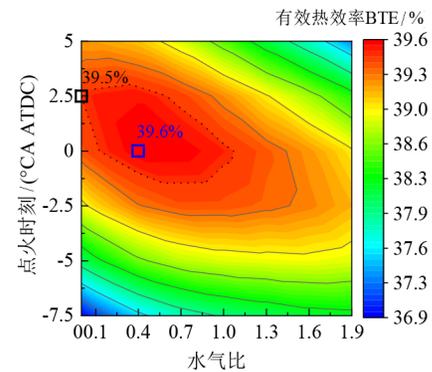
(a) 氩氧氛围中的 IMEP



(b) 氩氧氛围中的 FMEP



(b) 氩氧氛围中的 ITE



(d) 氩氧氛围中的 BTE

图 7 喷水对 IMEP 和 ITE 的影响

图 8 喷水对 FMEP 和 BTE 的影响

尽管本节的计算工况均未发生爆震（除了部分点火时刻过度提前的工况），但也能通过分析未燃区温度和诱导时间积分来分析爆震倾向。图9为氩氧氛围中未燃区温度和诱导时间积分随水气比和点火时刻的变化。由图可知，喷水能够有效降低未燃区温度并减小诱导时间积分，有利于抑制爆震。也就是说，喷水能在很宽的水气比范围内抑制爆震，且不影响指示热效率。

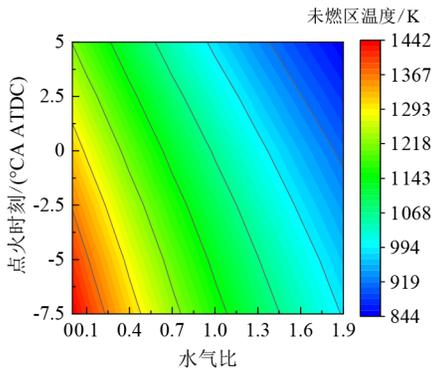
3.2 高负荷工况下喷水对爆震抑制和热效率提升的影响

在 3.1 中，基于氩氧氛围下低负荷状况，分析得出一定的喷水量有利于抑制爆震且不降低热效率的结论。本节将对比不同负荷下，即当爆震发生时，喷水对改善氩气循环天然气机的潜力。

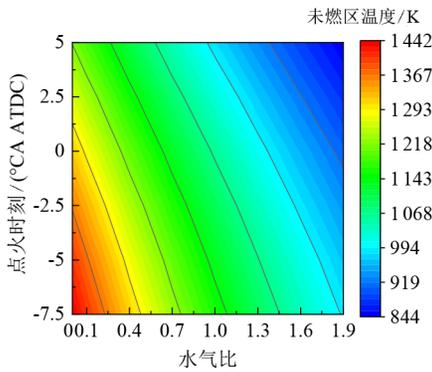
图 10 为不同负荷下，未喷水工况的未燃区温度和诱导时间积分随点火时刻的变化。图中的 0.6

MPa、0.8 MPa 和 1.2 MPa 分别表示对应的制动平均有效压力 BMEP 约为 0.6 MPa、0.8 MPa 和 1.2 MPa，后续图中的含义与此相同，同时本节计算中的转速依然保持为 1 000 r/min。在点火时刻为 0 °CA ATDC 之前，未燃区温度随着负荷增大而增大。然而在点火时刻为 0 °CA ATDC 之后，0.8 MPa 工况的未燃区温度最大。诱导时间积分随着负荷增大而单调增大。对于 1.2 MPa 工况，即使点火时刻推迟至 5 °CA ATDC，诱导时间积分值仍大于 1，也就是在大负荷工况下需采取爆震抑制措施。

图 11 分别为氩氧氛围中 BMEP 约为 0.8 MPa 和 1.2 MPa 工况中的诱导时间积分随水气比和点火时刻的变化。由于 0.6 MPa 工况不受爆震影响，所以仅展示 0.8 MPa 和 1.2 MPa 工况的诱导时间积分。由图可知，推迟点火能减小诱导时间积分而有利于抑制爆震。在相同的点火时刻下，从不喷水到逐渐



(a) 氩氧氛围中的未燃区温度



(b) 氩氧氛围中的诱导时间积分

图 9 喷水对未燃区温度和诱导时间积分的影响

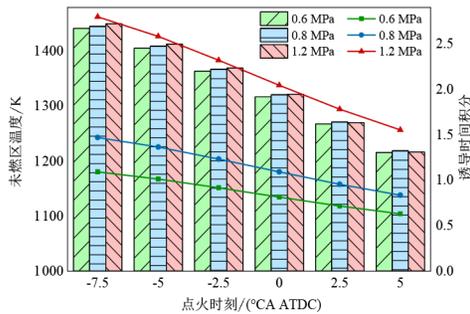
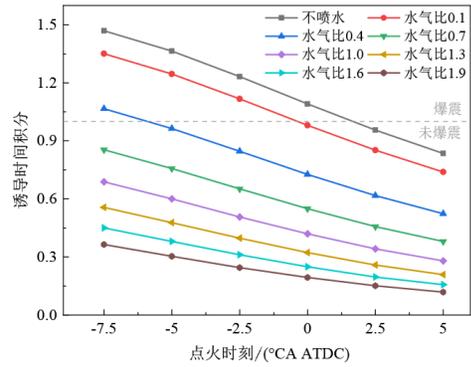


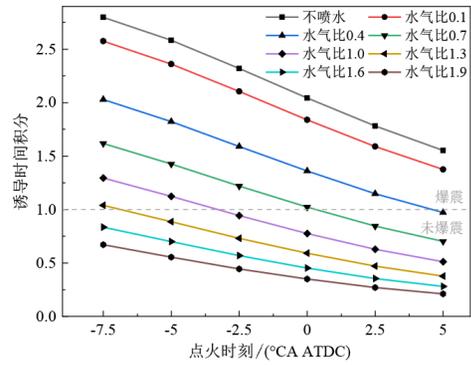
图 10 不同负荷下未喷水工况的未燃区温度(柱状图)和诱导时间积分(点线图)随点火时刻的变化

增大水气比, 诱导时间积分显著减小, 这说明喷水也有利于抑制爆震。负荷增大会使得诱导时间积分增大。当负荷从 0.8 MPa 到 1.2 MPa, 要想抑制爆震, 其所需的水气比更高。

图 12 为氩氧氛围中不同负荷下的指示热效率 ITE 随水气比的变化。点火时刻对应为使得指示热效率最高或者是不爆震的时刻, 灰色圆圈表示为该工况受爆震限制而将点火时刻推迟至使得诱导时间



(a) BMEP=0.8 MPa



(b) BMEP=1.2 MPa

图 11 诱导时间积分随水气比和点火时刻的变化

积分小于 1。1.2 MPa 工况下, 在不喷水和水气比为 0.1 的时候, 尽管点火时刻推迟至 5 °CA ATDC 仍然不能使诱导时间积分降至 1 以下, 因此没有展示相应的数据。不同负荷下, 当水气比增大, 指示热效率先是逐渐升高, 然后到达峰值, 最后过多的水使得热效率下降。与诱导时间积分变化趋势类似, 1.2 MPa 工况的爆震更为严重, 其对应的最优水气比也比 0.8 MPa 工况的大。喷水后, 0.6 MPa 工况的最高指示热效率提高了 0.2%, 0.8 MPa 工况的最高指示热效率提高了 0.4%, 1.2 MPa 工况的最高指示热效率提高了 1.2% (水气比 1 工况相对水气比 0.4)。由于 0.6 MPa 工况不受爆震限制, 所以指示热效率改善较小, 而 0.8 MPa 和 1.2 MPa 工况最高指示热效率得到了明显的提升。

图 13 为氩氧氛围中不同负荷下的有效热效率 BTE 随水气比的变化, 点火时刻为使得有效热效率最

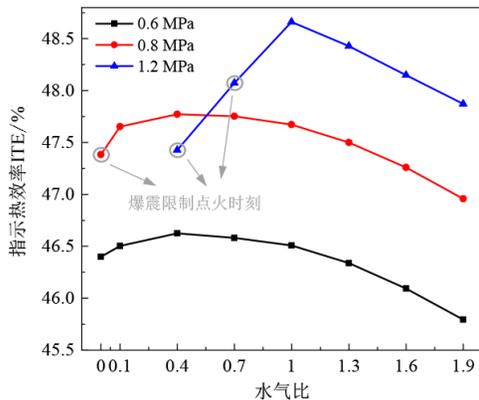


图 12 不同负荷下 ITE 随水气比的变化

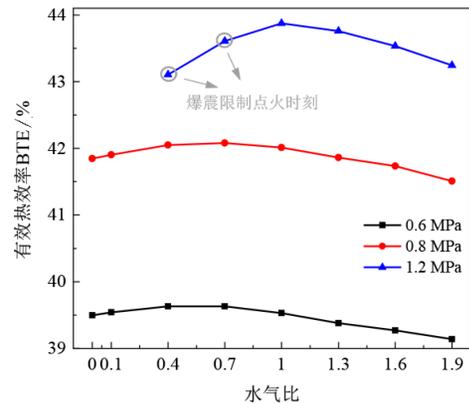


图 13 不同负荷下 BTE 随水气比的变化

高或者是不爆震的时刻,灰色圆圈含义同上。总体上,有效热效率与指示热效率的变化趋势较为类似,但是由于点火时刻会影响缸内峰值压力继而影响摩擦平均有效压力(Friction Mean Effective Pressure, FMEP)和BMEP,从而使BTE最优的点火时刻偏离ITE的最优点火时刻。喷水后,0.6 MPa工况的最高有效热效率提高了0.1%,0.8 MPa工况的最高有效热效率提高了0.2%,1.2 MPa工况的最高有效热效率提高了0.8%(水气比1工况相对水气比0.4)。由此可知,当爆震发生时,喷水有利于改善有效热效率。

4 结论

(1) 喷水可以明显降低氩气循环发动机的爆震倾向,结合合适的点火时刻,喷水还能提高发动机的热效率。

(2) 低负荷工况下,喷水能够显著降低缸内峰值压力和缸内温度;增大水气比和推迟点火,使传热损失减少但排气损失增加;在一定水气比下通过改变点火提前角不降低或提高发动机的热效率;相对于标定模型时所使用的空气不喷水工况,氩氧氛围中的最高有效热效率最高提升了7.9%,最高指示热效率提升更大,最高可达9%。

(3) 大负荷工况与氩氧氛围不喷水工况相比,不发生爆震的前提下BMEP为0.6 MPa工况的最高指示热效率提高0.2%、最高有效热效率提高0.1%;0.8 MPa工况的最高指示热效率提高0.4%、最高有效热效率提高0.2%;1.2 MPa工况的最高指示热效率提高1.2%、最高有效热效率提高0.8%(水气比为1的工况相对于水气比为0.4的工况)。

参考文献 (References)

- [1] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”? [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.
DENG Xu, XIE Jun, TENG Fei. What is Carbon Neutrality? [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107-113 (in Chinese)
- [2] 邓仁杰, 邓俊, 金少也, 等. 基于遗传算法的喷水对氩气循环发动机热力学循环效率及爆燃影响分析 [C]// 2021 中国汽车工程学会年会论文集, 上海. 2021: 141-146.
DENG Renjie, DENG Jun, JIN Shaoye, et al. Effect of Water Injection on Thermodynamic Cycle Efficiency and Detonation of Argon Cycle Engine Based on Genetic Algorithm [C]// Proceedings of the 2021 China-SAE Congress, Shanghai. 2021: 141-146. (in Chinese)
- [3] 金少也, 邓俊, 龚学海, 等. 氩气循环发动机热力学循环效率影响因素的热力学分析 [J]. 内燃机学报, 2020, 38(4): 351-358.
JIN Shaoye, DENG Jun, GONG Xuehai, et al. Thermodynamic Analysis on Factors Influencing the Thermal Conversion Efficiency of the Argon Power Cycle Engine [J]. Neiranji Xuebao/Transactions of CSICE (Chinese Society for Internal Combustion Engines), 2020, 38(4):

- 351-358.
- [4] JIN Shaoye, DENG Jun, LI Liguang. Thermodynamic and Chemical Analysis of the Influence of Working Substances on the Argon Power Cycle: SAE World Congress [C]//SAE WCX Digital Summit, United States .2021.
- [5] KILLINGSWORTH N J, Rapp V H, Flowers D L, et al. Increased Efficiency in SI Engine with Air Replaced by Oxygen in Argon Mixture [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2):3141-3149.
- [6] 陈歆叶, 林富鹏, 刘寅童, 等. 外部 EGR 对增压直喷汽油机 HCCI 工况范围的影响 [C]// 2016 中国汽车工程学会年会论文集. 2016:441.
CHEN Xinye, LIN Fupeng, LIU Yintong, et al. Effect of External EGR on HCCI Operating Range of Supercharged Direct Injection Gasoline Engine [C]//Proceedings of the 2016 China-SAE Congress, Shanghai. 2016: 441. (in Chinese)
- [7] BOZZA F, BELLIS V D, TEODOSIO L. Potentials of Cooled EGR and Water Injection for Knock Resistance and fuel Consumption Improvements of Gasoline Engines [J]. Applied Energy, 2016, 169:112-125.
- [8] 吴静涛, 吴志军, 李理光, 等. 喷水对天然气发动机性能影响的数值模拟 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12):1809-1816.
WU Jingtao, WU Zhijun, LI Liguang, et al. Numerical Simulation of Impacts of Water Injection on Performance of Natural Gas Engines [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12):1809-1816.
- [9] D'ADAMO A, BERNI F, BREDA S, et al. A Numerical Investigation on the Potentials of Water Injection as a Fuel Efficiency Enhancer in Highly Downsized GDI Engines [C]//SAE Technical Papers, 2015-01-0393, 2015.
- [10] NETZER C, FRANKEN T, MAUSS F, et al. Numerical Analysis of the Impact of Water Injection on Combustion and Thermodynamics in a Gasoline Engine Using Detailed Chemistry [C]// SAE Technical Papers, 2018-01-0200, 2018.
- [11] YANG Chen, LI Weixin, YIN Jiandong, Port Fuel Injection of CNG for Downsized 1-Liter 3-Cylinder Turbocharged Engine with High Efficiency: International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting [C]//SAE Technical Papers, 2017-01-2275, 2017.
- [12] HEYWOOD J B. Internal Combustion Engine Fundamentals [M]. USA: McGraw Hill College, 1988.

作者简介



杨豪 (1998-), 男, 河南周口人, 学士, 主要研究方向为氩气动力循环发动机。

Tel: 15211017891

E-mail: yanghaotongji@tongji.edu.cn