

VVT 策略与高压压缩比对直喷氢内燃机效率及动力性影响

赖丰羽¹, 孙柏刚^{1, 2}, 张诗蔚¹, 王康达¹, 罗庆贺^{1, 2}, 包凌志¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学重新创新中心, 重庆 401121)

The effects of variable valve timing strategy and compression ratio on attaining high efficiency and power performance in a DI hydrogen engine

Feng-yu Lai¹, Bai-gang Sun^{1, 2}, Shi-wei Zhang¹, Kang-da Wang¹, Qing-he Luo^{1, 2}, Ling-zhi Bao¹

(1 School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2 Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing, 401121, China)

Abstract: With the higher demand for H2ICE power performance and thermal efficiency, numerous techniques are employed to attain higher desired targets. Among these techniques, The Miller cycle and high compression ratio are two effective ways to increase thermal efficiency among these methods. In this research, the effects of VVT and CR (compression ratio) on a 2.0 L DI H2ICE performance were studied. The results indicate the optimized VVT increases BTE (brake thermal efficiency) from 38.8% to 40.7% at medium loads @ 2500rpm. The advanced IVO (intake valve opening) leads to higher thermal efficiency and the retarded EVC (exhaust valve closing) improves the power performance by increasing air flow. The VVT is necessary to be changed to attain high thermal efficiency and power performance at overall states, thus two VVT settings of H2ICE are employed after the investigation of the effect of IVO and EVC. At last, the highest BTE reaches 42.57%. In addition, the max torque and power attain 326.4 N·m at 2500rpm and 124.8 kW at 4500rpm which is a respectable performance. However, knock combustion limits the maximum torque and power to 271.7 Nm at 1500 rpm and 99.5 kW at 4500 rpm, and the highest BTE is only 42.52% when CR climbs from 12.5 to 13. The research shows the higher cooling loss and mixture distribution, which is might close to the cylinder wall, may relate to the decrease of BTE, thus the high CR is necessary along with a well-matched mixture distribution in the process of improving BTE and power performance. The conclusions can be valuable in the development of H2ICE to achieve high efficiency and high power.

摘要: 随着对氢内燃机性能的要求越来越高, 研究者采用了多种技术来达到预期目标。其中, 米勒循环和高压压缩比是提高热效率的两种有效方法。本研究研究了可变气门正时和压缩比对 2.0 L 直喷氢内燃机性能的影响。结果表明, 在 2500 r/min 中负荷时, 优化后的气门正时将有效热效率 (BTE) 从 38.8% 提高到 40.7%。提前 IVO (进气门开启时刻) 可以提高热效率, 而推迟 EVC (排气门关闭时刻) 可以通过增加空气流量来提高动力性能。在研究 IVO 和 EVC 的影响后, 采用了两种 VVT 设置, 以在全工况获得较高的热效率和动力性能。最高 BTE 达到 42.57%。此外, 在 2500r/min 时, 最大扭矩为 326.4 N·m, 最大功率在 4500r/min 时达到 124.8 kW。然而, 当压缩比从 12.5 升至 13 时, 爆震燃烧将发动机的最大扭矩限制在 271.7 Nm, 最大功率为 99.5 kW, 且最高 BTE 仅为 42.52%。研究表明, 较高的冷却损失和混合气分布可能与 BTE 的降低有关, 混合气分布可能靠近缸壁, 因此在提高 BTE 的过程中, 需要高压压缩比和良好匹配的混合气分布。

关键词: VVT; 压缩比; 氢内燃机; 有效热效率; 高动力性能

Key words: VVT; compression ratio; hydrogen internal combustion engines; BTE; high power performance

中图分类号: TK463

文献标识码: A

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52206228); 北京理工大学青年教师学术启动计划基金项目 (2 2050205-XSQD-202103007);

作者简介: 赖丰羽 (1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为氢内燃机, E-mail:807246100@qq.com;

孙柏刚 (联系人), E-mail:sunbg@bit.edu.cn。

0 概述

由于气候变化、全球温室效应和化石资源的匮乏,开发替代清洁能源是当前一项重大课题[1]。氢作为一种可再生的清洁载体,其利用研究受到了全球的广泛关注,并将成为未来能源的重要组成部分[2]。一般来说,利用氢能的主要技术有两种,即氢内燃机和氢燃料电池。氢内燃机功率密度高,制造成本低,对燃料纯度要求低[3-5]。此外,氢气作为内燃机的燃料,具有点火限宽、燃烧速度快、热效率高、热值高等优点[5,6]。

氢内燃机主要有两种类型,即进气道喷射(PFI)和直接喷射(DI)。PFI氢内燃机燃料从汽油机中转化出来更加容易,成本也更低[7],但DI是未来硫化氢燃料的发展趋势。一方面,PFI氢内燃机中通常会出现回火和预燃现象,制约了功率的提高[8,9]。另一方面,由于氢的密度较低,氢在化学计量比下约占圆柱体体积的30%[10]。因此,PFI氢内燃机的输出功率降低了约30%。相比之下,DI氢内燃机可以弥补功率损失。此外,DI还可以实现延迟SOI(喷射开始时刻)和分层混合,以提高热效率。

现阶段,更高的功率密度、更高的热效率和更低的 NO_x 排放一直是研究人员所追求的目标。如包凌志等人[11]的最大功率为120 kW,最大扭矩为340 N·m,最大有效热效率(BTE)为42.63%。在本研究中采用了各种技术手段,如稀燃,米勒循环和涡轮增压以达到最大BTE。米勒循环在提高热效率方面发挥着重要作用,可以通过可变气门正时(VVT)来实现。

目前,VVT在传统发动机中得到了广泛的应用,而在新燃料发动机中,VVT的影响也得到了广泛的研究。Kim等[12]报道,根据1.35 L PFI涡轮增压天然气发动机的试验结果,由于排放的废气产生负压,提前进气门开启时刻(IVO)导致空气流量增加。此外,当气门重叠角显著增加时,未燃甲烷量也会增加,导致热效率下降。Lee等[13]通过0.5 L PFI增压氢内燃机的实验结果说明了VVT对性能的影响。当氢内燃机功率增加到汽油机水平时,可采用推迟的IVO控制回火,正常工作时的过量空气系数(λ)可达1。该发动机带有电增压器和推迟的VVT设置后,最大平均有效压力(BMEP)为0.912 MPa。Xin等[14]对1.5 L PFI氢氨发动机的VVT影响进行了研究,结果表明气门重叠角的增加降低了混合气的燃烧速率。当进气门正时提前 5° CA时,BTE从32.8%下降到30%。此外,进气门正时提前 5° CA将使气缸

峰值压力循环变化系数从9.8%迅速攀升至25%。Verhelst等人[15]在1.78 L PFI双燃料氢/汽油发动机上测试了不同的进气门正时。结果表明,由于回火,该发动机在过于提前的进气门正时时,过量空气系数不能达到1。较高的气门重叠角在中低速时带来更高的体积效率。然而,在高速工况下,在提前进气门正时来使用废气惯性和与推迟进气门正时来使用新鲜充量惯性之间进行折衷是必要的。Park等[16]指出一台2.36 L PFI自然吸气式H2ICE的排气门正时与泵送损失有关,因回火导致的进气门正时推迟降低了输出扭矩。

根据之前的研究可以得出结论,PFI氢内燃机的VVT设置,特别是进气门正时受到回火和燃料未燃泄露的限制,因此输出功率性能的进一步提高总是有限的。相比之下,DI消除了这些限制,DI氢内燃机可以获得更高的BTE。包凌志等[11]研究了2.0 L直喷式涡轮增压H2ICE的VVT影响。优化后的VVT可使BTE提高约1.8%,最大BTE为42.63%。此外,在接近零排放的情况下,2000r/min和2500r/min的最大BTE可达到41.2%[17]。进气门开启越早,空气流量越小,进气门的最佳开启时刻为 -20° CA。排气门的最佳关闭时刻设置在 -20° CA,以平衡膨胀损失和排气过程中的泵气损失。纪常伟等[18]研究了1.5 L DI自然吸气H2ICE的VVT定时效应,通过优化VVT后BTE可以达到42.22%。由于混合气分布和残余气体分数的变化,IVO和EVC改变了燃烧持续时间和循环变化。此外,排气门正时是补偿氢内燃机动力性能的重要方式。Hong等[19]研究表明,1.5 L DI自然吸气H2ICE测试后,BTE最高可达43.15%。通过IVC和EVO控制泵气损失和快速稳定燃烧是实现高热效率的重要因素。在以往的研究中,以最高BTE为目标的VVT设置是通过系统测试来研究的。然而,随着对氢内燃机性能要求的提升,需要同时实现高功率性能和热效率。适合全工况的VVT设置策略有必要进行研究。

尽管不同类型的氢内燃机通常都会发生爆震,但由于高辛烷值的氢气具有较高的抗爆震性[20],因此氢内燃机的压缩比一般高于汽油机。Rahmouni等[21]提出应使用甲烷数(MN)来表示气态燃料的爆震倾向。氢气的MN为0,说明氢气燃烧过程中容易发生爆震。因此,在增加压缩比的过程中,爆震燃烧一直是要防止的问题。Li等[22]发现压缩比比火花正时对爆震燃烧的影响更为显著。另一方面,压缩比是提高氢内燃机热效率的关键参数,部分研

研究者也对其进行了研究。根据 Sadiq Al-Baghdadi 的模拟研究[23], 当压缩比为 9.5 ~ 11, 氢气浓度小于 0.7 时, 指示热效率可达 46% 以上。压缩比进一步增加到 12, 指示热效率降低到约 40% Dinesh 等[24] 报道, 将 0.66 L PFI 氢/氢燃料发动机的压缩比从 14 增加到 16, 点火正时从 18° CA 提前至 32° CA, 功率和 BTE 分别增加 36.82% 和 25.11%。Mogi 等人[25] 对 1.0 L DI H2ICE 进行了测试, 研究表明, 将压缩比提高到 20, 并采用羽流点火燃烧, 其最大指示热效率为 53.0%。他们指出, 在高压压缩比的燃烧过程中, 气缸压力振荡很明显, 但强度水平较低。Salvi 等[26] 对氢燃料 PFI 发电机进行了实验, 压缩比为 4.5 ~ 7.2。结果表明, 较高的压缩比提高了 BTE, 同时由于残余气体分数的降低而减少了回火的发生, NOx 排放量也随之增加。Pandey[27] 等人将 0.66 L PFI H2ICE 的压缩比从 10 提高到 15。结果表明, 压缩比为 15 时的快速燃烧降低了冷却损失。然而, 值得注意的是, 当氢气浓度大于 0.9 时, 压缩比为 15 时的 BTE 比压缩比为 14 时的 BTE 更低。Li 等[28] 通过模拟研究了高压压缩比的影响。压缩比从 11 增加到 17.5。结果表明, 高压压缩比显著放大氢气浓度对爆震强度的影响。当氢气浓度小于 0.4 时, 当压缩比为 17.5 时, 爆震强度超过 1 MPa 时, 指示热效率降低 20.9%。H2ICE 在 11 压缩比下性能更稳定, 且可以在更高的氢气浓度下工作。

根据以往的工作, 可以发现提高压缩比有利于提高热效率, 是实现高经济性的有效技术。但随着压缩比的增大, 热效率有可能降低。因此, 需要深入分析压缩比的不利影响。在本研究中, 对 2.0 L 直喷涡轮增压氢内燃机进行了测试。本文主要研究米勒循环和压缩比对氢内燃机性能的影响。在分析了 IVO 和 EVC 的影响后, 采用了两种不同的 VVT 设置, 以获得高功率和高热效率。当压缩比从 12.5 上升到 13 时, 对 BTE 的不利影响也进行了研究。

1 试验设备与方法

测试发动机为 2.0 L 四缸直喷式涡轮增压氢内燃机, 由汽油发动机改造而成, 采用了侧置喷嘴。原压缩比为 10.2, 初步提高到 12.5。IVO 和 EVC 的变化范围均为 45° CA, 即 35° CA bTDC(上死点前) 至 10° CA aTDC(上死点后)。以下简称为 -35° CA 和 10° CA。氢内燃机的规格参数如表 1 所示。发动机测试系统和数据采集系统均与试验样机正确连接。发动机测试系统包括一台 CW250 电涡流测功机,

水温油温控制器, 空调和 ToCeil20N 热线空气流量计等。CW250 电涡流测功机的最大工作能力为 250 kW, 最大转速为 8000 r/min。发动机内机油以及冷却水的温度由温油温控制器控制。空气流量由 ToCeil20N 热线空气流量计测量得到, 同时氢气流量由艾默生 CMF025 科氏流量计测得。数据采集系统采用了 Kibox 燃烧分析仪, 缸压和曲轴转角信号分别由 Kistler 6117B 传感器和 Kistler 2613B 传感器采集。各测量参数的不确定度如表 1 所示。

表 2 测试发动机参数

参数	单位	数值
缸数		4
缸径	mm	80.5
冲程	mm	98
排量	L	2.0
气门数量		4
压缩比		10.2
IVO 范围	°CA	35 bTDC-25 aTDC
EVC 范围	°CA	35 bTDC-10 aTDC

表 3 测量数据的不确定度

参数	不确定度	测量范围
转速	± 0.1%	0-10000 r/min
扭矩	± 0.4%	0-1100 N · m
曲轴转角	± 0.02 °CA	
压力	± 0.8%	0-20 MPa
空气流量	± 1% Full Scale	0-450 kg/h
氢气流量	± 0.1% Full Scale	0-6.5 kg/h

在正式试验前, 机油与冷却水的温度分别达到 90 °C 和 80 °C。试验转速取 1500 r/min 至 4500 r/min, 发动机转速稳定后开始试验。在不同转速负荷的条件下通过试验得到最大扭矩点火角(MBT), 其他实验均在 MBT 条件下进行。当氢内燃机在现有工况下稳定运行两分钟后, 测量并记录该工况下 220 个循环测数数据的平均值。试验测试结果的误差大小可通过均方根误差方法来计算[29], 如式(1)所示:

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \Delta x_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

式中, ΔR 为计算结果的不确定度; R 为计算结果; x_1, x_2, x_n 为不同的测量参数; $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_n$ 为不同测量参数的不确定度。

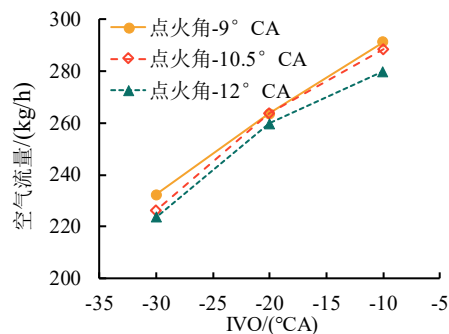
2 结果与讨论

2. 1VVT 对氢内燃机影响研究

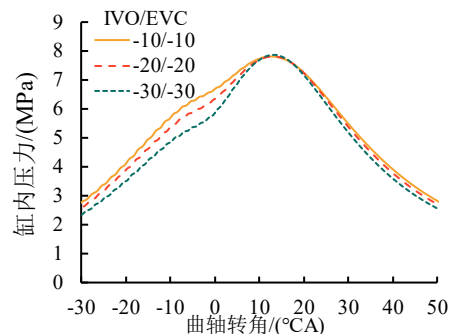
2. 1. 1 不同 IVO 对氢内燃机燃烧与性能影响

IVO 可以改变米勒循环的强度。为了研究不同 IVO 对氢内燃机燃烧和性能的影响,在相同氢气流量 2.87 kg/h 和点火角条件下进行了实验。在此状态下, BMEP 为 0.94 MPa 左右。在相同的气门重叠角时,如图 1 (a)所示,随着 IVO 的提前,空气流量急剧降低,当点火角为 -9°CA 时,空气流量从 291.4kg/h 减少到 232.4 kg/h, IVO 从 -10°CA 提前到 -30°CA ,同时,它也可以找到点火角影响空气流量,这是因为涡轮前温度和涡轮功率随着点火角的推迟而增加。当点火角为 -9°CA 时,根据图 2 (b)中气缸压力的变化,提前 IVO 后在压缩行程的气缸压力相比于其他条件更低,但最大气缸压力几乎相同。此外,随着 IVO 从 -10°CA 提前到 -30°CA , λ 从 2.97 下降到 2.36,导致图 1 (c)中 HRR(放热率)和最大燃烧温度的增加,同时最大 HRR 更接近上死点。如图 1 (d)和(e)所示,作者对 BD0 -10(滞燃期)和 BD10 -90(燃烧持续期)进行了进一步的研究。结果表明,当点火角为 -9°CA 时,随着 IVO 的提前, BD10 -90 从 30.7°CA 降低到 23.8°CA , BD0 -10 从 14.0°CA 降低到 11.9°CA 。这提高了最大 HRR,并通过改善等容度增加了 BTE。当点火角从 -9°CA 提前到 -12°CA 且 IVO 设置在 -10°CA 时, BD10 -90 从 30.7°CA 下降到 26.5°CA , BD0 -10 从 14.0°CA 下降到 12.6°CA 。这些变化可能与混合分布有关。当点火角推迟时,混合气更加均匀,局部混合气过浓的现象减少。

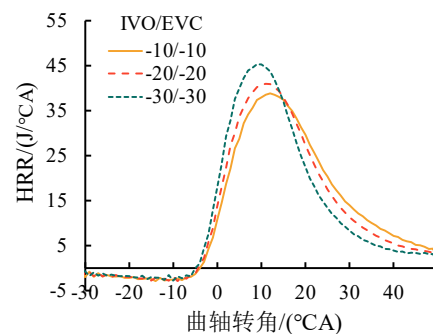
此外讨论了 IVO 对氢内燃机性能的影响。如图 2 (a)所示,当 IVO 提前时, BSFC(有效燃料消耗率)显著降低。当点火角为 -9°CA 时, BSFC 从 84.6g/kWh 下降到 82.2g/kWh, BSFC 与点火角连接,且随着点火角的提前,对 BSFC 的影响减弱。然而,当点火角从 -10.5°CA 提前到 -12°CA 时,当 IVO 设置为 -30°CA 时, BSFC 从 81.3g/kWh 增加到 82.3g/kWh。这是因为点火角太提前,导致压缩损失增加。从图 2 (b)的结果可以看出,在不同的 VGT(可变截面涡轮)开度下, BSFC 几乎随着 IVO 的提前而不断减小。因此, Miller 循环大大提高了氢内燃机的 BTE, 点火角也对 BTE 产生了重大影响。涡轮前温度受 λ 的影响,如图 2 (c)所示, λ 随着 IVO 的提前而升高。因此, Miller 循环大大提高了氢内燃机



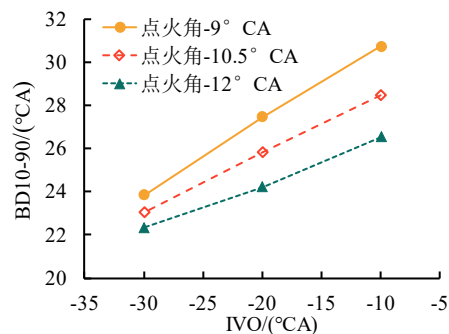
a) 空气流量



b) 缸内压力



c) 放热率



d) BD10-90

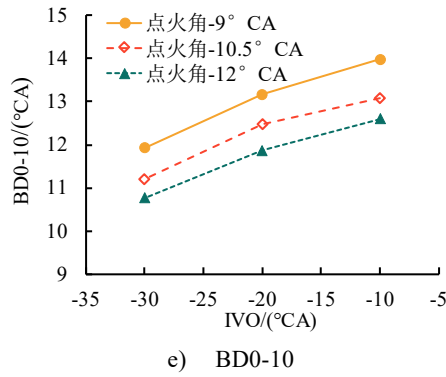


图 1 不同 IVO 下氢内燃机燃烧参数变化

的 BTE, 点火角也对 BTE 产生了重大影响。涡轮前温度受 λ 的影响, 如图 2 (c)所示, λ 随着 IVO 的提前而升高。另外, 由于 BTE 的升高和涡轮功率的降低, 在点火角的提前过程中, 涡轮前温度下降。然而, 如图 2 (d)所示, 随着 λ 的减小和缸内燃烧温度的升高, NO_x 排放量迅速增加。此外, 随着 VGT 开度的降低, NO_x 排放量增加。因此, 在采用提前的 IVO 时, 需要合理调整 λ 以防止排放性能变差。

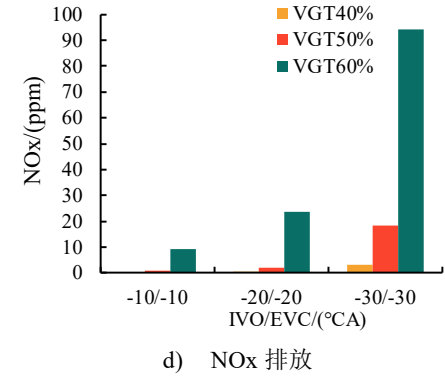
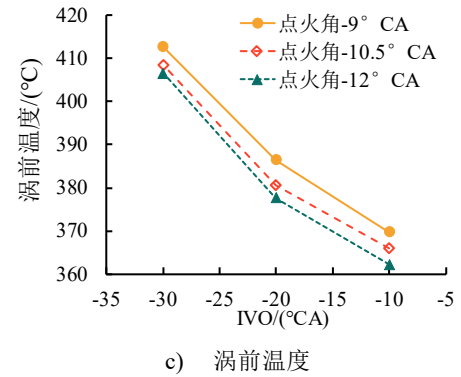
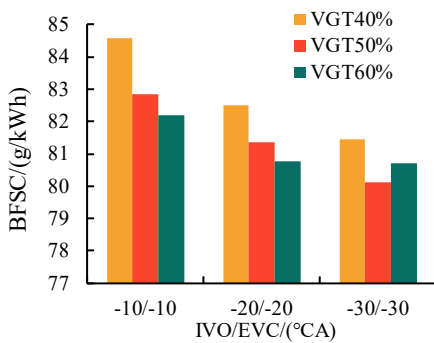
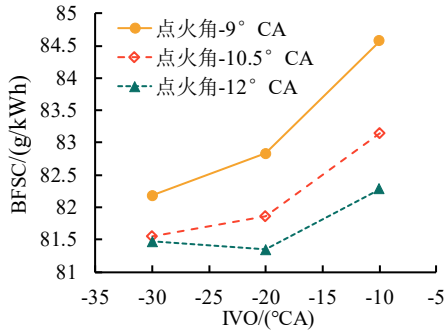
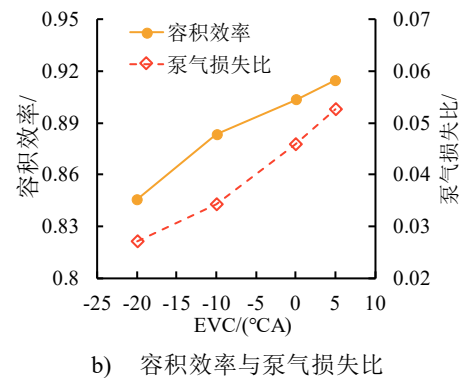
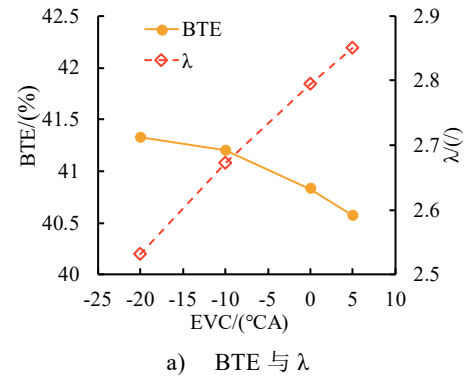


图 2 不同 IVO 下氢内燃机性能参数变化

2. 1. 2 不同 EVC 对氢内燃机燃烧与性能影响

当 IVO 确定时, EVC 会影响气门重叠角, 进而影响 H2ICE 的性能。如图 3 (a)所示, 在同一 IVO 下, EVC 显著影响空气流量和 BTE。



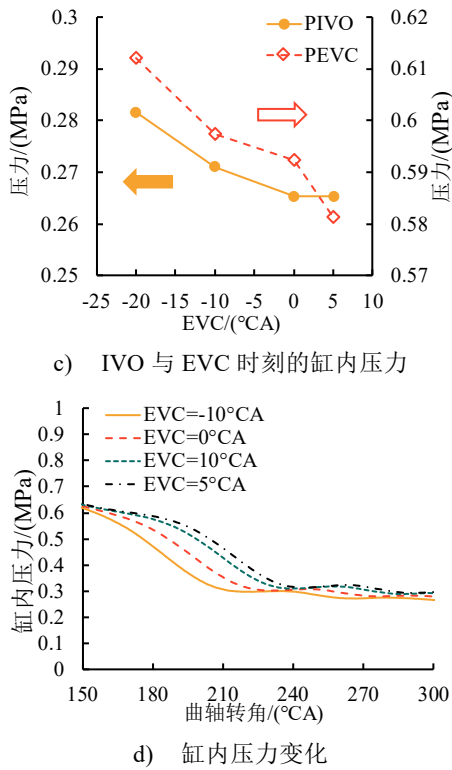


图 3 不同 EVC 下氢内燃机不同参数变化

当 IVO 设置在 -10°CA 时, 随着 EVC 从 -20°CA 延迟到 5°CA , BTE 从 41.3% 下降到 40.6%, λ 从 2.53 增加到 2.83。进一步研究容积效率和泵气损失 (PEMP), 如图 3 (b) 所示, 容积效率从 0.845 上升到 0.915, 泵气损失比 (PEMP/IMEP) 从 0.027 同时上升到 0.053。从图 3 (c) 可以看出, 随着 EVC 从 -20°CA 延迟到 5°CA , IVO 的缸压 P_{IVO} 从 0.282 MPa 逐渐下降到 0.265 MPa, 有利于减少缸内残余气量, 提高容积效率。因此, 推迟的 EVC 带来更高的空气流量。同时, 随着 EVC 的减速, EVC 处的气缸压力 P_{EVC} 也从 0.612 MPa 不断下降到 0.581 MPa。另一方面, 较高的 P_{EVC} 可以减少强制排气中的气体流量, 减少泵气损失。从图 3 (d) 可以看出, 当 EVC 为 -10°CA 时, 气缸压力的下降速度比其他条件下更快。

2. 1. 3 全范围 VVT 分析

为了分析整体 VVT 在不同负荷下的影响, 在 2500 r/min 下分别进行了低负荷 (BMEP = 0.63 MPa @ VGT = 100%) 和中负荷 (BMEP = 0.91 MPa @ VGT = 40%) 的一系列实验扫略全范围的 VVT, 研究氢内燃机性能的变化。从图 4 (a) 的 BTE 变化可以看出, 高级 IVO 在低负荷时对 BTE 的提升效益更大, 通过优化 VVT, BTE 从 37.3% 提升至 38.9%。以往的研究结论表明, 稀燃策略有助于提高 H2ICE BTE。从图 4 (b) 泵气损失比的变化可以看出, EVC 对泵气损失比的影响很大, 推迟 EVC 导致泵气损失增大。此

外, 如图 4 (c) 所示, 推迟 EVC 带来更多的空气流量。BTE 的变化受泵气损失、 λ 和米勒循环强度的影响。从图 4 (d) 可以看出, 过于提前的 IVO 和 EVC 由于缺乏空气流量, 导致 NOx 排放量大幅增加。

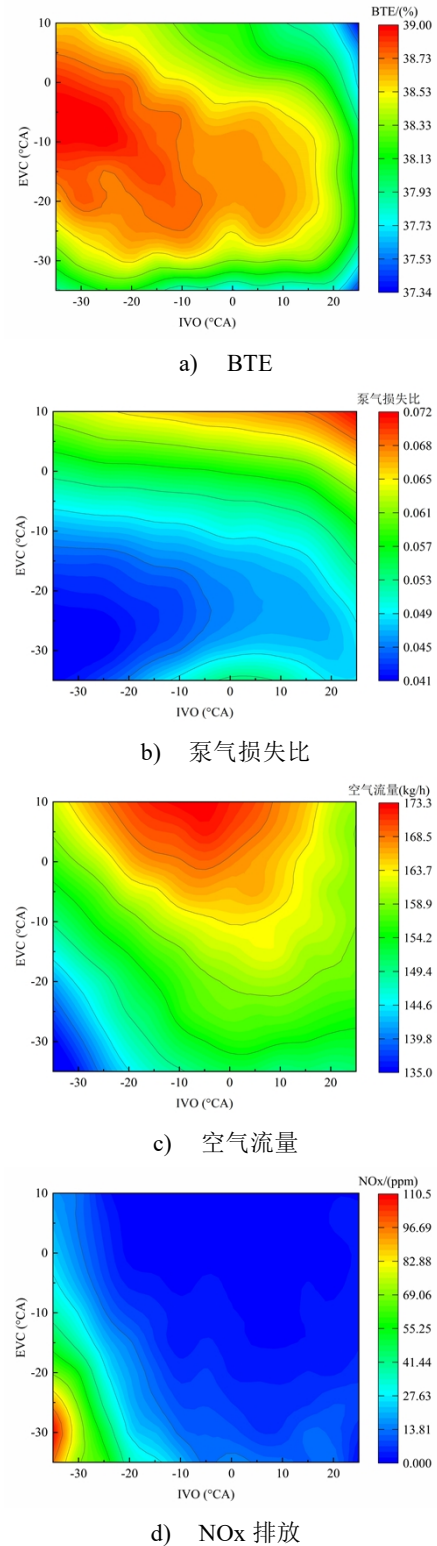
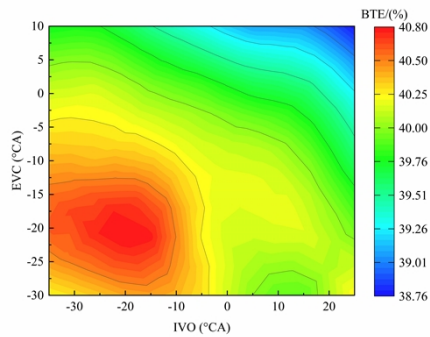


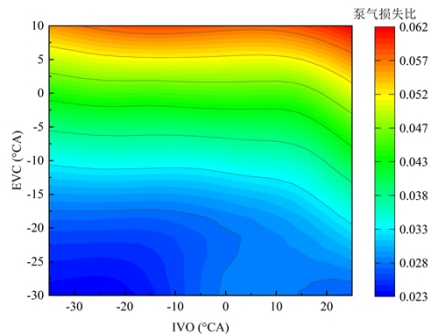
图 4 2500r/min 小负荷氢内燃机不同参数变化

当 BMEP 达到 0.91 MPa 时, 由于 VGT 开度减小, 涡轮增压能力增加。因此, 即使氢气流量增加, λ

仍然大于 2。如图 5 (a)所示, H2ICE 的 BTE 在中等负载下从 38.8%上升到 40.7%。然而, 最高的 BTE 并不是在最提前的 IVO 达到的, 而是在略微推迟的 IVO 达到的。图 5 (b)和(c)中 λ 和泵气损失比的变化可以看出当 IVO 和 EVC 分别为 -15° CA 和 -20° CA 时, 泵气损失比仅为 2.66%, λ 为 2.33, 处于理想的稀薄燃烧状态。对比中、低负荷的泵气损失比可以看出, 中负荷的泵气损失比明显较低, 这是由于 IMEP 快速上升造成的。如图 5 (d)所示, 中、低负荷下的排放性能变化相似, NO_x 排放量与 λ 密切相关。当 IVO 提前时, 推迟排气门正时有助于增加空气流量, 降低燃烧温度, 以减少 NO_x 排放。



a) BTE



b) 泵气损失比

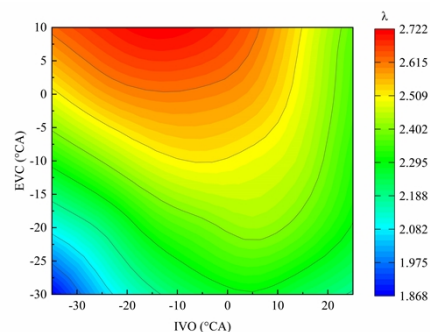
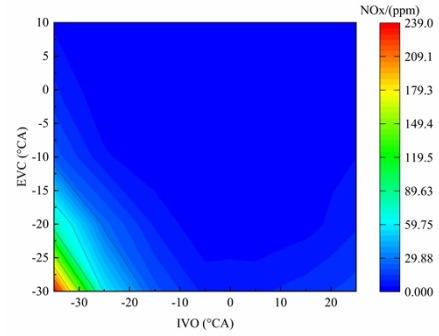
c) λ d) NO_x 排放

图 5 2500r/min 中负荷氢内燃机不同参数变化

从比较中可以看出, 高 BTE 和高 λ 状态之间的气门正时设置是不同的。高 BTE 通常通过先进的 IVO 来实现足够的米勒循环, 而提前的 EVC 通常用于降低 PMEP。而缓速排气门正时则有助于减少缸内残余废气, 提高容积效率。随着 BMEP 的进一步增大, λ 不断减小。在不同转速下采用两种 VVT 设置, 防止低 λ 引起爆震现象。在中低负荷采用更提前的 IVO 和 EVC 用于提高热效率。而为了在高负荷增加空气流量, 使用稍提前的 IVO 和推迟的 EVC。H2ICE 在不同工况下的 VVT 设置始终遵循这两个原则。大功率区间 VVT 设置也考虑热效率, 但它更倾向于增加空气流量。

最后, 根据一系列实验结果, 按照 VVT 的初步设置得到氢内燃机负荷特性图(如图 6 所示)。通过优化 VVT, BTE 和 λ 可以达到平衡, 通过协调 VVT 和 VGT, H2ICE 可以获得较高的热效率和功率性能。如图 6 所示, 最高 BTE 达到 42.57%。最大扭矩和功率分别达到 $326.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ (2500r/min) 和 124.8 kW (4500 r/min)。此外, 在 1500-2500 r/min 时, 扭矩超过 $320 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。当 BMEP 提升至 λ 小于 2 的工况时, 气门正时更换为适合大功率性能的 VVT 设置。同时结果表明, 当 VVT 设置改变时, BTE 显著降低。此外, 最高 BTE 对应的工况点包含在适合高热效率的 VVT 设置区域。

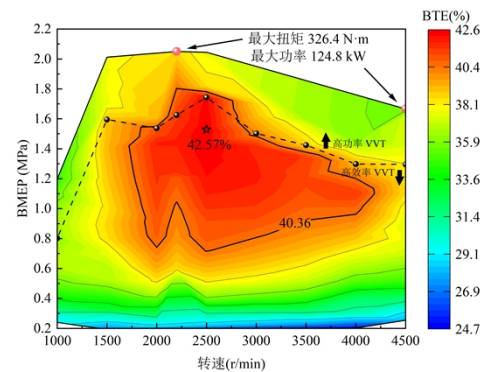


图6 氢内燃机负荷特性

2. 2 压缩比对氢内燃机影响研究

除了米勒循环外,增加压缩比是提高BTE的直接技术方法。初始压缩比为12.5,普遍高于汽油机。为了研究进一步增加压缩比对BTE的影响,还测试了压缩比为13的H2ICE的性能,并对结果进行了比较。从图7中压缩比13的负荷特性可以看出,H2ICE高负荷区受到明显限制,这是爆震燃烧造成的。BTE最高可达42.52%,与压缩比12相当。但40%以上的高热效率区域大大缩小。与12.5压缩比R相比,最大扭矩和功率分别限制在271.7 N·m和99.5 kW,相比于图6显著降低。

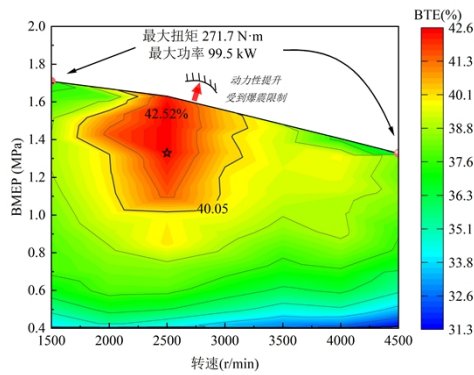
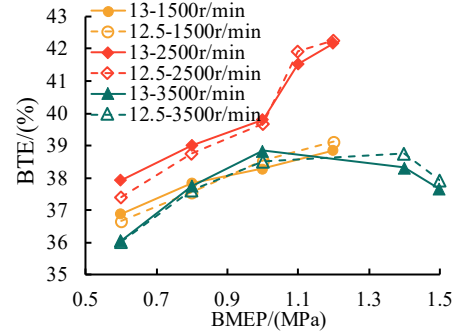


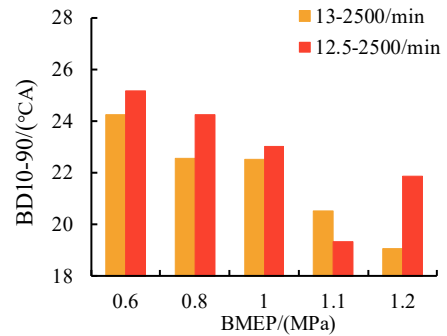
图7 压缩比13 氢内燃机负荷特性

从图8(a)中两种压缩比在不同车速下的BTE对比可以看出,较高的压缩比有利于提高低负荷时的BTE。而两者之间的差距逐渐缩小。最后,压缩比12.5的BTE高于压缩比13。如图8(b)所示,在1500r/min时,由于燃烧室体积的减小,BD10-90明显减小,这有助于提高指示热效率。对最大燃烧温度和冷却损失比进行了进一步的研究。在低负荷,它可以发现13压缩比的冷却损失比低于12.5压缩比,这是由于增加压缩比后减少了传热面积。根据图8(c),随着BMEP不断增加,冷却损失比不断下降,但13压缩比的冷却损失比逐渐超过12.5压缩比。如图8(d)所示,13压缩比的最高燃烧温度始终高于12.5压缩比。在2500r/min和3500r/min时,冷却损失比和最大燃烧温度的变化趋势与1500r/min类似。冷却损失比与混合气的分布有关,混合气的分布几乎接近气缸壁。在低负荷时由于燃烧温度低,冷却损失比的差异不明显。燃烧温度随着BMEP的提升而升高,换热量也随之增大,BTE的增加受到限制。此外,当BMEP升至1.4 MPa至1.7 MPa时,会发生轻微爆震燃烧,这限制了H2ICE动力性能的提高。从图9可以看出,当BMEP为1.31 MPa,转速为4500r/min时,第157循环气缸压力急剧上升,

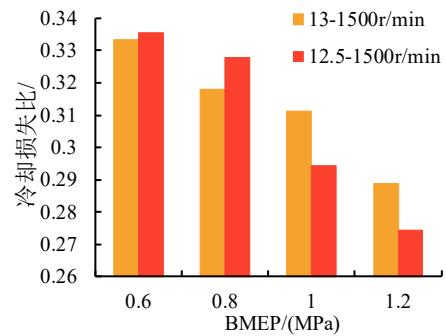
最大气缸压力比上一个循环高25.7%,表明燃烧的稳定性受到了显著影响。同时,表观压力出现振荡,热效率降低。因此,无限制地增加压缩比并不总是有利于改善BTE。为了获得高热效率,高压压缩比是必要的,同时气缸内的混合物分布匹配良好。分层混合气可以降低冷却比,并尽量减少端部混合气的局部富集,防止爆震燃烧。



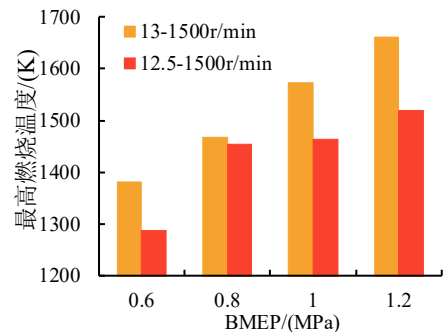
a) 不同压缩比下 BTE 对比



b) 2500r/min 不同压缩比下 BD10-90



c) 1500r/min 不同压缩比下冷却损失比



d) 1500r/min 不同压缩比下最高燃烧温度

图8 压缩比 13 与 12.5 各参数对比

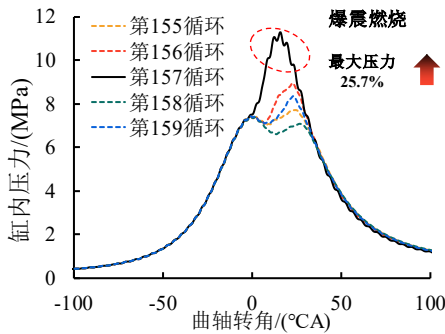


图9 压缩比 13 氢内燃机高转速高负荷工况爆震现象

3 结论

(1) 在 BMEP 为 0.94 MPa 条件下, 米勒循环大大提高了热效率。当点火角设置为 -9° CA 时, 随着 IVO 从 -10° CA 提前到 -30° CAB, BSFC 从 84.6g/kWh 下降到 82.2g/kWh, 此外适当的点火角可以获得更高的热效率。但米勒循环强度越高, 空气流量越低, 从 291.4 kg/h 下降到 232.4 kg/h。随着 IVO 的推进, NO_x 排放量增加。

(2) 排气门正时在 IVO 确定时也会影响热效率, 当 IVO 设定在 -10° CA 时, 当 EVC 从 -20° CA 推迟 5° CA 时, 热效率从 41.3% 下降到 40.6%。排气门正时影响是通过容积效率和 PEMP 产生的。随着 EVC 的推迟, 容积效率从 0.845 上升到 0.915, 泵气损失比从 0.027 增加到 0.053。

(3) 根据全范围 VVT 分析, 高负荷时需要更换的 VVT 设置。更提前的 IVO 和 EVC 用于实现最高的 BTE, 在中低负荷下提高经济性能。略微先进的 IVO 和推迟的 EVC 用于在高负荷增加空气流量和防止爆震燃烧。最后, 实现了可观的 H2ICE 性能, 最高 BTE 达到 42.57%。最大扭矩和功率分别达到 326.4 N·m 和 124.8 kW。

(4) 当压缩比从 12.5 进一步增加到 13 时, 对 H2ICE 性能产生不利影响。当压缩比为 13 时, 热效率最高达到 42.52%, 相比于 12.5 压缩比没有明显变化, 但 40% 以上的高热效率区大大缩小, 随着 BMEP 在不同转速下从 0.6 MPa 提升至 1.2 MPa, 压缩比 12.5 的热效率逐渐超过压缩比 13。根据两种压缩比的冷却损失比, 热效率的提高可能与混合分布有关, 因此, 压缩比的进一步提高需要与匹配良好的混合分布相协调, 以减少冷却损失比。此外由于爆震燃烧, 动力性能限制在 271.7 N·m 和 99.5 kW。

参考文献:

- [1] Yu S, Zheng S, Li X. The achievement of the carbon emissions peak in China: The role of energy consumption structure optimization. *Energy Economics* 2018;74:693 – 707.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.017>.
- [2] Abe JO, Popoola API, Ajenifuja E, Popoola OM. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019;44:15072 – 86.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>.
- [3] Verhelst S. Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014;39:1071 – 85.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.102>.
- [4] Keller J, Lutz A. Hydrogen Fueled Engines in Hybrid Vehicles, 2001, p. 2001-01 – 0546.
<https://doi.org/10.4271/2001-01-0546>.
- [5] Verhelst S, Wallner T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 2009;35:490 – 527.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>.
- [6] Dimitriou P, Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017;42:24470 – 86.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>.
- [7] Dennis PA, Dingli RJ, Abbasi Atibeh P, Watson HC, Brear MJ, Voice G. Performance of a Port Fuel Injected, Spark Ignition Engine Optimised for Hydrogen Fuel, 2012, p. 2012-01 – 0654.
<https://doi.org/10.4271/2012-01-0654>.
- [8] Wang L, Yang Z, Huang Y, Liu D, Duan J, Guo S, et al. The effect of hydrogen injection parameters on the quality of hydrogen-air mixture formation for a PFI hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017;42:23832 – 45.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.086>.
- [9] Reichel TG, Paschereit CO. Interaction mechanisms of fuel momentum with flashback limits in lean-premixed combustion of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017;42:4518 – 29.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.018>.
- [10] Xu P, Ji C, Wang S, Cong X, Ma Z, Tang C, et al. Effects of direct water injection on engine performance in engine fueled with hydrogen at varied excess air ratios and spark timing. *Fuel* 2020;269:117209.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117209>.
- [11] Bao L, Sun B, Luo Q, Li J, Qian D, Ma H, et al. Development of a turbocharged direct-injection

- hydrogen engine to achieve clean, efficient, and high-power performance. *Fuel* 2022;324:124713. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124713>.
- [12] Kim S, Park C, Jang H, Kim C, Kim Y. Effect of boosting on a performance and emissions in a port fuel injection natural gas engine with variable intake and exhaust valve timing. *Energy Reports* 2021;7:4941 – 50. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.073>.
- [13] Lee J, Lee K, Lee J, Anh B. High power performance with zero NOx emission in a hydrogen-fueled spark ignition engine by valve timing and lean boosting. *Fuel* 2014;128:381 – 9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.010>.
- [14] Xin G, Ji C, Wang S, Hong C, Meng H, Yang J, et al. Experimental study of the effect of variable valve timing on hydrogen-enriched ammonia engine. *Fuel* 2023;344:128131. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128131>.
- [15] Verhelst S, Demuyneck J, Sierens R, Huyskens P. Impact of variable valve timing on power, emissions and backfire of a bi-fuel hydrogen/gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010;35:4399 – 408. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.022>.
- [16] Park C, Park W, Kim Y, Choi Y, Lim B. Effect of Valve Timing and Excess Air Ratio on Torque in Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine for UAV. *Energies* 2019;12:771. <https://doi.org/10.3390/en12050771>.
- [17] Bao L, Sun B, Luo Q. Optimal control strategy of the turbocharged direct-injection hydrogen engine to achieve near-zero emissions with large power and high brake thermal efficiency. *Fuel* 2022;325:124913. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124913>.
- [18] Ji C, Hong C, Wang S, Xin G, Meng H, Yang J, et al. Evaluation of the variable valve timing strategy in a direct-injection hydrogen engine with the Miller cycle under lean conditions. *Fuel* 2023;343:127932. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127932>.
- [19] Hong C, Ji C, Wang S, Xin G, Wang Z, Meng H, et al. Assessment of a synergistic control of intake and exhaust VVT for airflow exchange, combustion, and emissions in a DI hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2023;48:20495 – 506. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.002>.
- [20] Luo Q, Sun B. Inducing factors and frequency of combustion knock in hydrogen internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy* 2016;41:16296 – 305. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.257>.
- [21] Rahmouni C, Brecq G, Tazerout M, Le Corre O. Knock rating of gaseous fuels in a single cylinder spark ignition engine. *Fuel* 2004;83:327 – 36. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00245-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00245-X).
- [22] Li H. Knock in spark ignition hydrogen engines. *International Journal of Hydrogen Energy* 2004;29:859 – 65. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.09.013>.
- [23] Sadiq Al-Baghdadi MAR. Effect of compression ratio, equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel. *Renewable Energy* 2004;29:2245 – 60. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.04.002>.
- [24] Dinesh MH, Kumar GN. Experimental investigation of variable compression ratio and ignition timing effects on performance, combustion, and Nox emission of an ammonia/hydrogen-fuelled SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2023;S0360319923025879. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.219>.
- [25] Mogi Y, Oikawa M, Kichima T, Horiguchi M, Goma K, Takagi Y, et al. Effect of high compression ratio on improving thermal efficiency and NOx formation in jet plume controlled direct-injection near-zero emission hydrogen engines. *International Journal of Hydrogen Energy* 2022;47:31459 – 67. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.047>.
- [26] Salvi BL, Subramanian KA. Experimental investigation on effects of compression ratio and exhaust gas recirculation on backfire, performance and emission characteristics in a hydrogen fuelled spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2016;41:5842 – 55. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.026>.
- [27] Pandey JK, Kumar GN. Effect of variable compression ratio and equivalence ratio on performance, combustion and emission of hydrogen port injection SI engine. *Energy* 2022;239:122468. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122468>.
- [28] Li Y, Gao W, Zhang P, Fu Z, Cao X. Influence of the equivalence ratio on the knock and performance of a hydrogen direct injection internal combustion engine under different compression ratios. *International Journal of Hydrogen Energy* 2021;46:11982 – 93. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.031>.
- [29] Gürbüz H, Akçay İH, Buran D. An investigation on effect of in-cylinder swirl flow on performance, combustion and cyclic variations in hydrogen fuelled spark ignition engine. *Journal of the Energy Institute* 2014;87:1 – 10. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2012.03.001>.

