

气门正时对直喷氢内燃机性能影响的数值模拟

王忠恕¹, 阿帝雅¹, 杜耀东¹, 李 潜^{2,3}, 汤雪林², 邓 伟², 解方喜¹

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022; 2. 重庆长安汽车股份有限公司 动力研究院, 重庆 401133; 3. 重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 以一台 1.5 T VVT 缸内直喷氢内燃机为原型机搭建一维 GT-POWER 模型, 研究进排气门正时变化对发动机的换气过程、动力性及经济性的影响。发动机转速为 2 700 r/min, 外特性工况时保持氢气量一致, 采用稀薄燃烧模式, 进气门正时提前、排气门正时推迟策略可使进气质量流量增大, 有效热效率由 40.8% 提高到 41.07%, 有效燃气消耗率下降。发动机转速为 5 500 r/min, 外特性工况时保持过量空气系数一致, 进排气门同时推迟策略可使缸内气体质量增多, 泵气损失降低, 功率提高 12.7%, 有效燃气消耗率小幅降低。其中, 排气门正时变化对直喷氢内燃机动力性及经济性的影响较进气门更为显著。

关键词: 动力工程及工程热物理; 氢内燃机; 缸内直喷; 气门正时

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2162-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231121

Numerical simulation of effect of valve timing on performance of in-cylinder direct-injection hydrogen internal combustion engine

WANG Zhong-shu¹, A Di-ya¹, DU Yao-dong¹, LI Qian^{2,3}, TANG Xue-lin², DENG Wei², XIE Fang-xi¹

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Powertrain R&D Institute, Chongqing Changan Automobile Co., Ltd., Chongqing 401133, China; 3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A one-dimensional GT-POWER model was built with a 1.5 T VVT in-cylinder direct-injection hydrogen internal combustion engine, and the effects of inlet and exhaust valve timing changes on the engine's air exchange process, power performance and economy were studied. When the engine speed is 2 700 r/min, the lean combustion strategy is adopted to keep the pulse width of hydrogen injection consistent under the full-load condition, and the inlet valve timing is advanced and the exhaust valve timing is delayed, the intake mass flow rate is increased, the effective thermal efficiency is increased from 40.8% to 41.07%, and the effective gas consumption is decreased. The engine speed is 5 500 r/min, the excess air coefficient is the same under the full-load condition, the inlet and exhaust valve delay strategy can increase the gas mass in the cylinder, reduce the pump gas loss, increase the power by 12.7% and slightly reduce the break specific

收稿日期: 2023-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52372383); 吉林省科技发展计划项目(20220508015RC).

作者简介: 王忠恕(1977-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 气体机高效清洁燃烧技术. E-mail: wangzhongshu@jlu.edu.cn

通信作者: 杜耀东(1989-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 发动机工作过程优化及控制, 低碳零碳动力系统.

E-mail: duy2021@jlu.edu.cn

gas consumption. The influence of exhaust valve timing on the power performance and economy of in-cylinder direct-injection hydrogen combustion engine is more significant than that of intake valve.

Key words: power engineering and engineering thermophysics; hydrogen internal combustion engine; in-cylinder direct injection; valve timing

0 引言

传统内燃机多以汽油、柴油、天然气等化石燃料作为动力来源,汽车工业的迅猛发展使石油资源消耗和因尾气排放造成的污染问题日趋严重。因此,寻找新型清洁替代燃料,改善内燃机燃烧排放问题是汽车发动机领域急需解决的问题。氢能因为来源多样、清洁低碳、灵活高效、应用场景丰富等优点,被视为21世纪最具发展潜力的清洁能源。

根据氢气喷射位置,氢气发动机分为进气道喷射和缸内直喷两种。相比于进气道喷射氢发动机,缸内直喷避免了氢气占据气缸容积导致功率下降、氢气回流导致回火等问题。此外,在相同工况下,缸内直喷可以采取更稀薄的燃烧方式,从而降低泵气损失,提升热效率^[1,2]。

作为发动机的重要子系统之一,配气机构负责根据发动机的点火顺序和实际工作循环在合理时刻开闭进排气门,以保证较高充气效率的同时尽可能多地排出废气。充气效率与发动机性能紧密相关,进气过程实际进入缸内新鲜充量的多少直接影响充气效率,进而决定了发动机动力性能的优劣^[3]。可变气门正时技术是指在不改变气门升程曲线的前提下,通过改变凸轮轴的装配相对位置,对气门升程曲线进行整体前移或推迟以改变进排气门开启和关闭正时,其气门驱动机构足够灵活,使发动机可以在多种工况下具有合理的配气相位,从而获得更好的燃油经济性、更佳的动力性和更低的排放。Ji等^[4]采用一台1.5 L VVT四缸直喷氢发动机研究了进排气门正时对换气过程、充气特性、燃烧及排放性能的影响。在1 400 r/min小负荷工况下采用过量空气系数1.8及氢气晚喷策略,提前进气门正时将减小空气质量流量及氢气体积流量,容积效率降低;进气门关闭时刻及排气门开启时刻对NO_x排放有重要影响。Xin等^[5]研究了可变气门正时对富氢氨发动机性能的影响。在1.5 L VVT直喷氢发动机上保持1 500 r/min、60%节气门开度,当量燃烧氢体积份额占比

70%。试验发现,进气门正时提前5 °CA时,COV_{pmax}迅速由6%增至25%,燃烧稳定性变差,有效热效率由32.8%降至30%;推迟排气门正时可使缸内平均指示压力(IMEP)和平均有效压力(BMEP)分别提高8%和16%。Luo等^[6]研究了米勒循环对涡轮增压氢内燃机性能的影响。他们比较采用稀燃的奥托循环、当量燃烧+EGR+奥托循环和米勒循环3种方案对涡轮增压氢发动机性能的影响。结果表明,在2 800 r/min转速下,米勒循环的功率更高、燃料消耗率(BSFC)最低,但随着转速的提高经济性有所下降。他们提出,在发动机低转速、低NO_x排放工况下采用涡轮增压米勒循环是提高功率密度及控制NO_x排放的最佳方式。Wang等^[7]提出了包括米勒循环气门正时、氢体积分数和EGR率在内的爆震调节、燃烧和排放控制多参数协同优化方法。研究结果表明,进气门晚关20 °CA时在爆震极限内表现出更好的燃烧性能,同时NO排放量略有增加。与原机相比,结合进气门晚关20 °CA、加氢5%和17%的EGR可使指示热效率提高1.89%,在爆震极限内减少11.47%的NO排放。Hong等^[8]通过合理优化运行参数提出了适用于直喷氢发动机的两种渐进式爆震抑制策略,使直喷氢发动机在大节气门开度和多种稀燃条件下实现无爆震燃烧。过量空气系数提高、推迟喷氢时刻可缩短氢气射流的扩散时间,提高混合物的非均质性;提前进气门正时通过降低压缩冲程末段缸内温度、提高残余废气系数,减弱缸内热氛围对混合气自燃的积极影响。Tavakoli等^[9]采用有限体积法分析了一台四冲程12缸米勒循环增压天然气发动机的性能和排放特性。应用米勒循环后,与原气门正时对比,进气门关闭正时提前30 °CA时NO_x等污染物排放降低了一半;米勒循环导致压缩比的降低有助于缸内最大燃烧压力降低近15%。Shu等^[10]基于一台柴油机改装的天然气发动机分析了不同转速耦合不同负荷下进气门关闭时刻对发动机缸内流动、燃烧和排放性能的影响。Patyckuk等^[11]研究了米勒循环气门正时对重型直喷天然气发动机排放特性

的影响。结果表明,当负荷低于 50% 时,提前进气门正时可减少 70% 的 NO_x 排放。

如上所述,优化发动机气门正时可以有效改善发动机的换气过程,提升动力性、降低油耗率。目前,针对缸内直喷氢燃料内燃机气门正时的研究成果及文献较少,因此采用传统汽柴油机可变气门正时研究结果分析缸内直喷氢燃料内燃机气门正时变化带来的影响显然不甚合适。此外,由于氢气不同于汽柴油的特殊理化性质,气门正时对缸内直喷氢燃料内燃机的影响也应不同于传统发动机。与汽油相比,氢气的理论空燃比较高,同等升功率下需要更多的新鲜空气混合得以完全燃烧释放能量,进而影响涡轮增压能力;氢气的辛烷值较高,采用比汽油机更高的压缩比来提高有效热效率所带来的爆震问题则需要大量空气参与抑制;受到愈加严格排放法规限制,直喷氢内燃机需要采用较大的过量空气系数来控制 NO_x 排放。因此,传统汽油机的配气控制策略已难以准确评判缸内直喷氢燃料内燃机较大的空气需求,需要重新研究适用于直喷氢内燃机配气策略。

简言之,在直喷氢内燃机中使用可变气门正时技术研究其带来的不同影响是必要的。本文针对一台 1.5 T 直喷氢内燃机展开研究,针对不同的工况点分别设计以提高有效热效率、提高功率为目标的喷氢策略及配气策略,探究进排气门正

时提前及推迟对发动机换气过程和燃烧过程的影响,为直喷氢内燃机性能优化提供新的策略参考。

1 模拟平台搭建及模拟方案

1.1 模拟平台搭建

本研究使用的氢燃料内燃机是由一台缸内直喷火花点火汽油机改制而成,该发动机进气门开启正时范围为-12~48 °CA BTDC,排气门关闭正时范围为-13~47 °CA ATDC。发动机的具体参数如表 1 所示。

表 1 试验发动机技术参数
Table 1 Engine specifications

发动机参数	数值
排量/L	1.494
缸径×行程/(mm×mm)	73.5×88
型式	直列 4 缸 4 冲程 4 气门 水冷
压缩比	13:1
进气型式	涡轮增压
最大净功率/kW	105
最大净扭矩/(N·m)	230

基于该发动机结构参数搭建相应的一维 GT-POWER 模拟平台。该模拟平台的传热模型选择 Woschni GT 模型,喷氢器选择 InjAFSeq-Conn 模型,缸内燃烧模型选择 EngCylCombSI-Wiebe 模型。模拟平台如图 1 所示。

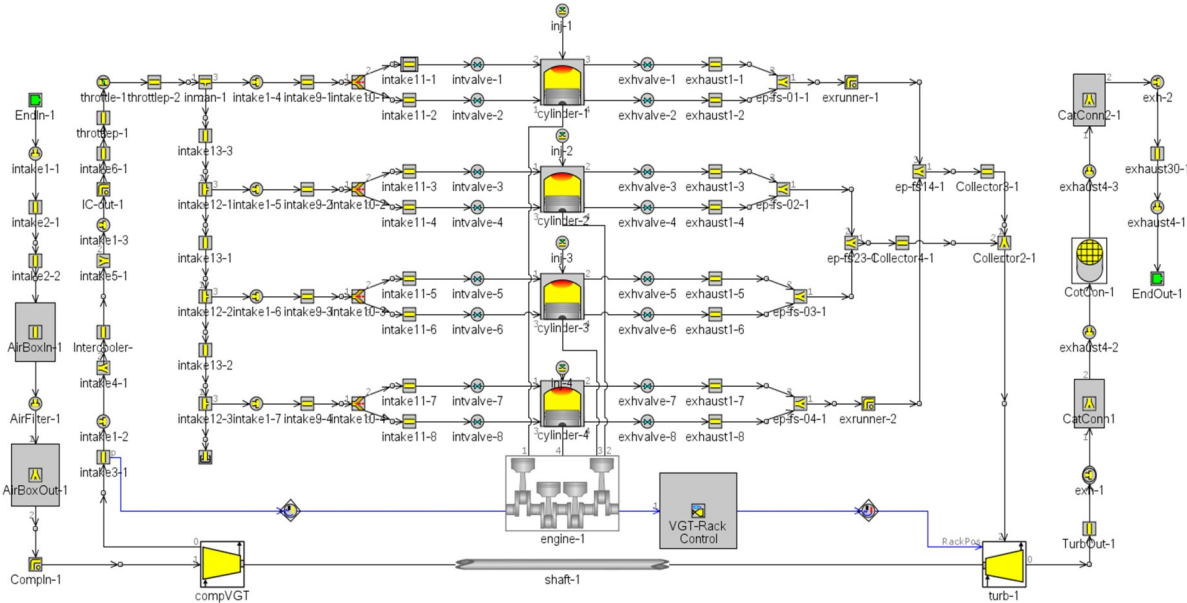


图 1 模拟平台搭建

Fig. 1 Simulation platform construction

GT-POWER 采用有限容积法对热流体进行模拟计算,其使用的计算流体状态的基本控制方

程如下^[3]:
连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho c}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{4f}{D} \frac{c^2}{2|c|} = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho}{\partial t} + c \frac{\partial \rho}{\partial x} - \alpha^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} - \alpha^2 c \frac{\partial \rho}{\partial x} - \\ & (k-1)\rho \left[q + c \frac{4f}{D} \frac{c^2}{2|c|} \right] = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ 为进口处流体密度; c 为进口处流体流速; F 为进排气管截面积; f 为摩擦因数; D 为当量直径, $D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}$; α 为声速; k 为热传导系数; p 为进口处流体压力; q 为单位质量流体的传热率

1.2 模型验证

为了验证仿真模型的准确性,选择 2 700 r/min

和 5 500 r/min 外特性工况点试验台架数据与仿真数据进行验证。由图 2 可知,仿真数据与试验台架数据吻合度良好,其中 2 700 r/min 外特性工况下缸压的最大相对误差为 2.48%, 5 500 r/min 外特性工况下缸压的最大相对误差为 2.2%, 二者的相对误差均在 5% 以下,故可认为仿真模型可以用于模拟缸内直喷氢燃料内燃机运行,可信度高。

1.3 模拟方案选取

经过试验研究,2 700、5 500 r/min 外特性工况分别为该款缸内直喷氢内燃机的最大有效热效率及额定功率点。因此,本文选取 2 700、5 500 r/min 两个转速外特性工况点,通过变换进排气门正时,探究气门正时对缸内直喷氢内燃机扫气、燃烧性能的影响。GT-POWER 中通过定义气门升程曲线中最高点为正时基准点,进气门原正时为 230° CA 凸轮转角,排气门原正时为 118° CA 凸轮转角。如图 3 所示,模拟计算中以 5° CA 凸轮转角为

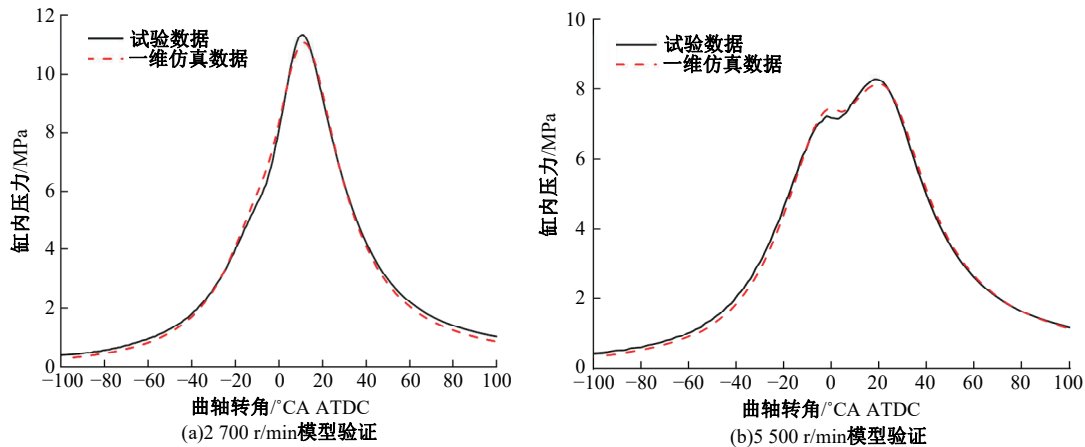


图2 模型验证

Fig. 2 Model validation

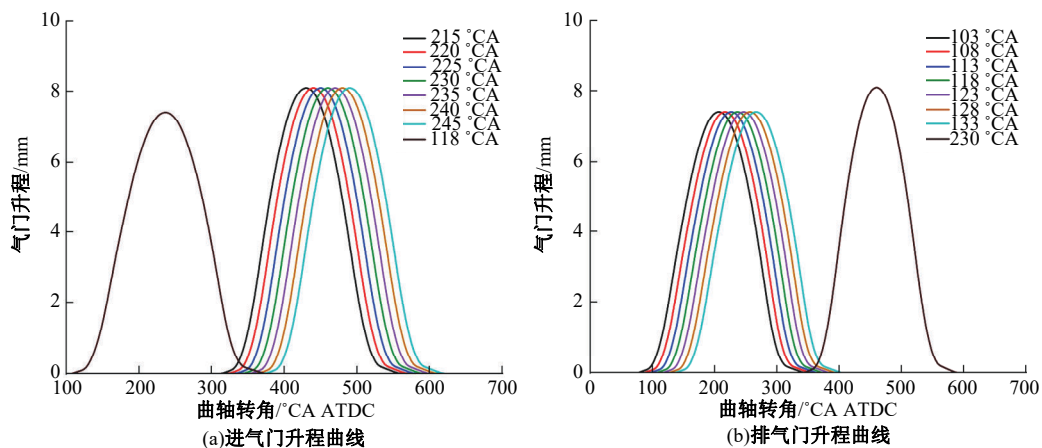


图3 气门升程曲线

Fig. 3 Valve-lift curve

步长,不改变气门开启持续期,分别对进排气门正时进行提前、推迟。

气门升程曲线见图 3,具体的模拟方案见表 2。

表 2 模拟方案
Table 2 Modeling scheme

转速/(r·min ⁻¹)	喷氢脉宽/ms	过量空气系数	进气门正时/°CA	排气门正时/°CA
2 700	1.79	1.72~1.9	215,220,225,230,235,240,245	118
2 700	1.79	1.48~1.98	230	103,108,113,118,123,128,133
5 500	2.12~2.72	1.55	215,220,225,230,235,240,245	118
55 00	1.88~2.88	1.55	230	103,108,113,118,123,128,133

2 2 700 r/min 工况模拟结果分析

模拟仿真中,2 700 r/min 外特性工况点保持相同的喷氢脉宽以保证喷氢量一致,在原配气正时的基础上通过进排气门分别提前、推迟 15°CA,确保换气、燃烧性能仅由于气门正时的变化致使进气量不同而发生改变。

气门正时变化对进气质量流量的影响如图 4 所示。图 4(a)为进气门正时变化对进气质量流量的影响。随着进气门正时推迟,进气门关闭时刻推迟,在进气惯性下进气质量流量呈现增加趋势,当进气门正时推迟 15°CA 时达到最大。图 4(b)为排气门正时变化对进气质量流量的影响。随着排气门正时的提前,排气门关闭时刻逐渐提前,排气管内废气倒吸入气缸的气体质量流量逐渐增多。排气门关闭正时推迟,在进排气及缸内废气压差作用下部分回流废气占排出的废气量小,排出废气量增加,推动涡轮做功增多,压气机端增压能力提升,进气质量流量增加。

图 5 为气门正时对缸内气体质量的影响。图 5(a)为进气门正时变化引起缸内气体质量的变化示意图。缸内气体质量随进气门正时的推迟呈现先增多后减少的趋势,原正时下达到最大。进气门正时提前角度过大时,气门重叠角较大导致缸内残余废气较多,同时过早关闭进气门会减少进入气缸内的新鲜工质质量;进气门正时提前角过小时,进气门关闭角过迟,进气压力下降,混合气回流量增加,充气效率下降,导致气缸内气体质量减少。图 5(b)为排气门正时变化引起缸内气体质量的变化示意图。与进气门不同,缸内气体质量随排气门正时的推迟呈现增多的趋势。排气门正时推迟导致气门重叠角增大,在进排气管及缸内压差作用下,气流运动正向扫气效率得到增加,泵气损失降低;同时,由于排气门关闭正时的推

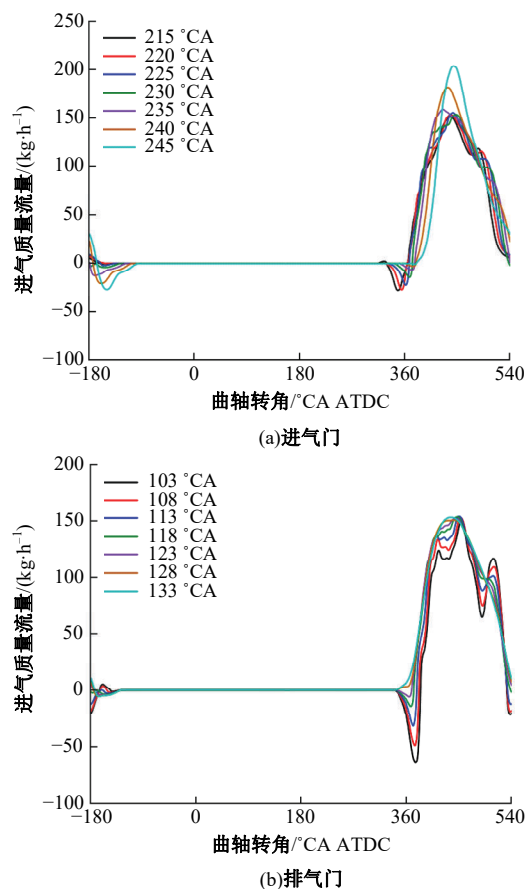


图 4 气门正时对进气质量流量的影响

Fig. 4 Effect of valve timing on inlet mass flow

迟,一部分排气在排气管和气缸的压差作用下回流入气缸内,滞留在缸内的气体质量得到增加。

图 6 为 2 700 r/min 工况气门重叠角对缸内残余废气系数的影响。进气门正时迟后导致气门重叠角减小,进排气门及缸内压差、进气气流运动综合作用下所带来的扫气效果得到削减,因此残余废气系数随气门重叠角减小时变化不大。与之相反,排气门正时变化形成的气门重叠角对残余废气系数的影响较显著。随着排气门正时推迟,气门重叠角逐渐增大,在进排气管压差作用下正向

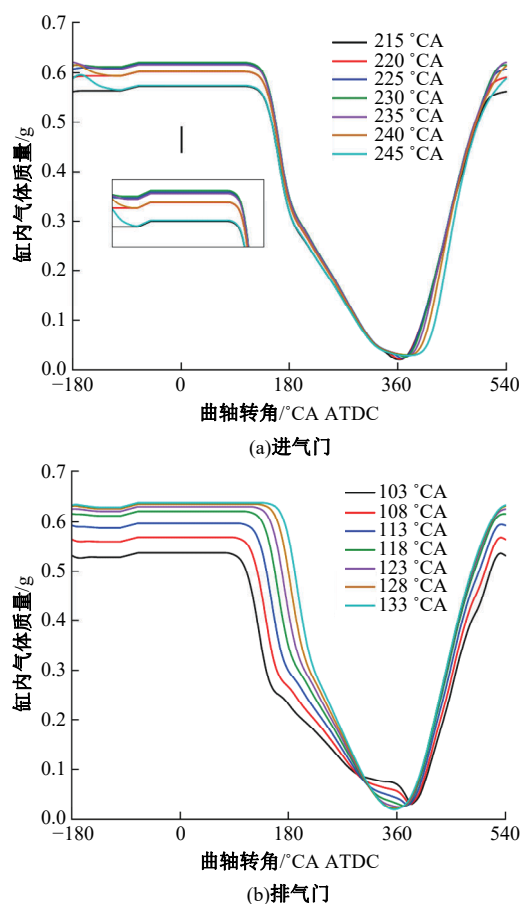


图5 气门正时对缸内气体质量的影响

Fig. 5 Effect of valve timing on gas quality in cylinder

扫气效果逐渐增强,缸内残余废气随之减少。从减小缸内残余废气系数、提升正向扫气效果的角度出发,排气门配气正时对扫气效果的影响更明显,它不仅关系到发动机换气效率的高低,还关系着燃烧效果的好坏。因此,高热效率工况区间内应适当提前进气门正时,推迟排气门正时以改善换气。

如图7所示为气门正时对缸内最大燃烧压力及最大燃烧温度的影响。如前所述,进排气门正时变化对缸内气体质量的影响呈现不同的趋势。随着进气门正时的推迟,缸内气体质量先减少后增多,参与燃烧的气体质量的多少直接影响最大燃烧压力;同理,随着排气门正时的推迟,缸内最大燃烧压力呈现增大的趋势。缸内最大燃烧温度方面,呈现与压力相反的趋势。由于仿真过程中保持氢气量一致,当空气质量达到最大时,混合气的过量空气系数最大,即混合气浓度最稀,燃烧释放的热量最少,最大燃烧温度最低。此外,气门正时变化导致的稀薄燃烧还有助于提高燃烧效率、降低缸内热负荷、减少气耗等。

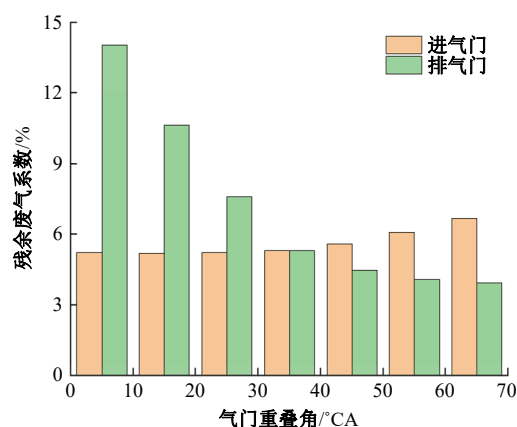


图6 气门重叠角对缸内残余废气系数的影响

Fig. 6 Effect of valve overlap angle on coefficient of residual exhaust gas in cylinder

有效热效率和有效燃气消耗率表征了发动机的经济性,2700 r/min外特性工况点作为该发动机高热效率工况点,气门正时变化和发动机换气过程具有较强的直接相关性,进而影响燃烧过程的好坏。如图8所示为气门正时对有效热效率和

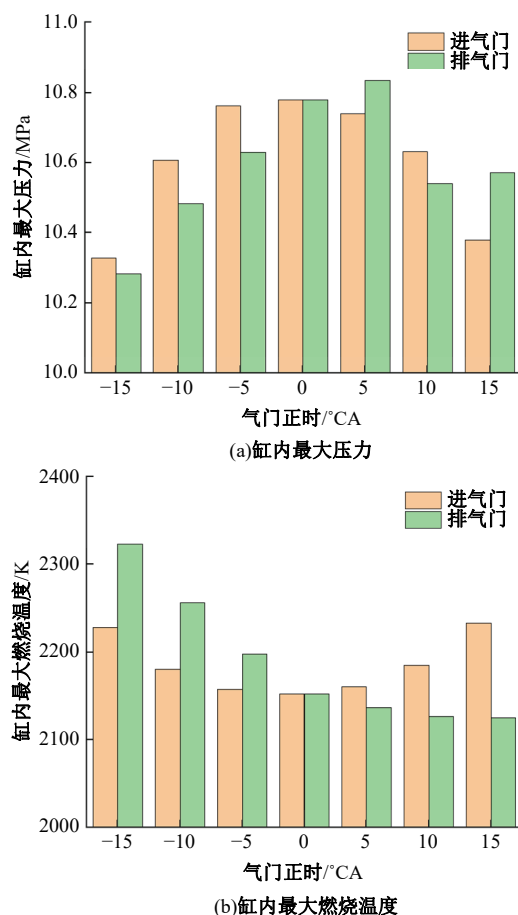


图7 气门正时对缸内最大压力及最大燃烧温度的影响
Fig. 7 Effect of valve timing on maximum pressure and maximum combustion temperature in cylinder

有效燃气消耗率的影响。可以看到,有效热效率随进排气门正时的推迟呈现不同的变化规律:从提高有效热效率的目标出发,需要适当提前进气门正时、推迟排气门正时。相比于原机配气相位下有效热效率的 40.8%,采用进气门正时提前,排气门正时推迟策略可使有效热效率最大提高至 41.07%。这可能是因为进排气门正时通过进气质量流量和氢气体积流量的变化影响点火时刻下混合气的分布。此外,高热效率点分布在进排气门变化导致空气质量较高的时刻,此时的过量空气系数最大,稀燃程度最高,进而导致有效热效率得到提高。有效热效率的提高是多种因素叠加作用的结果,可燃混合气的分层、燃烧过程的好坏、充气效率、传热损失、燃烧损失等方面因素共同影响有效热效率。因此,气门正时对有效热效率的影响较为显著,结合发动机实际运行工况同时优化进排气正时可能有益于有效热效率的进一步提高。

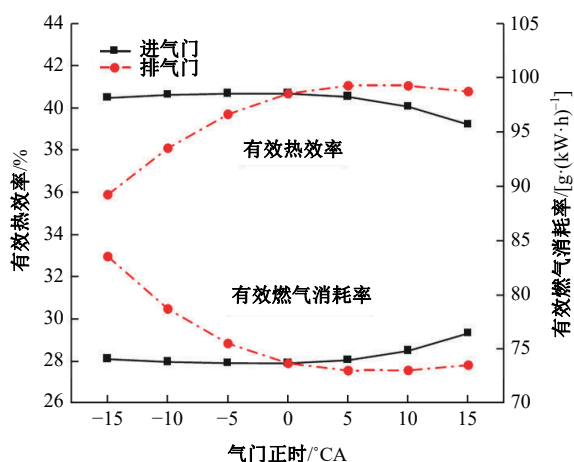


图8 气门正时对有效热效率和有效燃气消耗率的影响

Fig. 8 Effect of valve timing on effective thermal efficiency and BSFC

2 700 r/min 外特性工况点选择了氢气量一定的试验策略,因此进排气门正时导致进气量的变化,进而影响了过量空气系数的大小。图9为2 700 r/min 工况下气门正时对过量空气系数和扭矩的影响。进气门正时推迟导致空气质量先增多后减少,由此过量空气系数呈现相同趋势。进气门正时影响下的过量空气系数降低导致缸内稀燃程度降低,可燃混合气浓度分布不均,有效热效率下降,输出功减少。排气门正时的推迟导致过量空气系数由 1.5 增加至 1.98,扭矩同步增加。过量空气系数的提高有益于形成稀薄燃烧模式,

提高有效热效率的同时可有效降低 NO_x 排放。

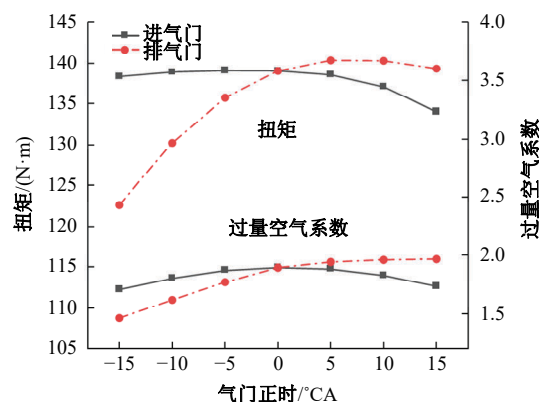


图9 气门正时对过量空气系数和扭矩的影响

Fig. 9 Effect of valve timing on excess air coefficient and torque

3 5 500 r/min 工况模拟结果分析

5 500 r/min 外特性工况点保持相同的过量空气系数,通过气门正时的变化引起空气量和氢气体积绝对值的改变,探究进排气门正时变化对缸内直喷氢内燃机气流运动、燃烧及动力表现的影响。

图10为5 500 r/min 工况下气门正时对进气质量流量的影响。进气门正时提前会导致气门重叠角增加,在进排气门及气缸压差作用下部分废气回流由排气管倒吸至缸内,在进气冲程中回流至进气管,随后在新鲜工质的带动作用下重新回到气缸内,形成内部EGR。排气门关闭时刻逐渐提前,排气管内废气倒吸入气缸的气体质量流量逐渐增多。比较2 700 r/min 外特性工况,高转速下气流运动速度更快,气体的压力波动和惯性效应使高速下充气效率更高,回流量增多。由于氢气较传统燃料有特殊的理化特性,在保持相同的升功率下,其空燃比较高,通常采用稀燃等方式实现。较高的空燃比及稀燃策略就要求相同的燃料量下更多的空气量。从图10中可知,进气门正时推迟时空气质量流量得到增多,回流量较小。排气门正时推迟同理。

图11为5 500 r/min 工况下气门正时对缸内气体质量的影响。与2 700 r/min 外特性工况点不同,5 500 r/min 外特性工况下进排气门正时对缸内气体质量的影响保持相同的变化趋势,即随着气门正时的推迟,缸内气体质量呈增多的趋势,缸内最大气体质量分别在进排气门正时推迟 15° CA 时达到。这是因为进气门正时推迟,气门重叠期减小,扫气效应减弱,更多的气体质量滞留在缸

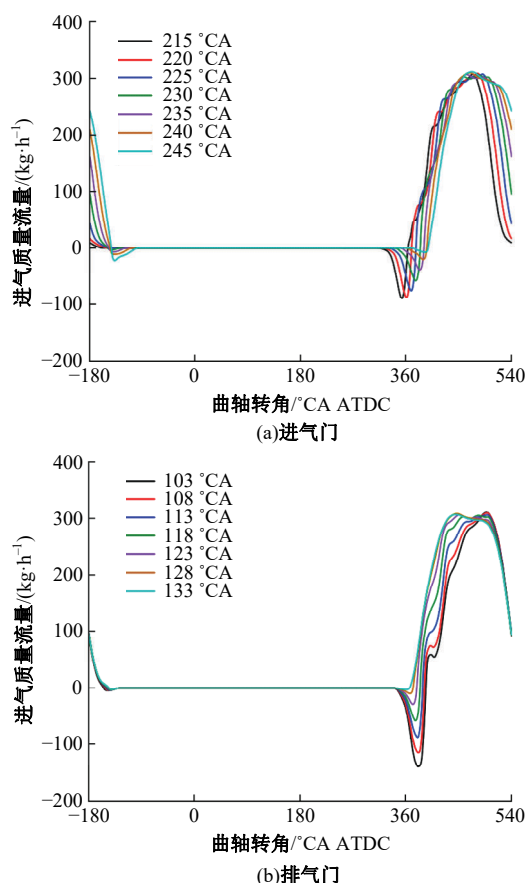


图10 气门正时对进气质量流量的影响

Fig. 10 Effect of valve timing on inlet mass flow

内。排气门正时推迟导致气门重叠角增大,排气管及缸内压差作用配合高速气流运动效应,进气量增多,泵气损失降低。因此,采用进排气门正时推迟策略可使直喷氢内燃机在5 500 r/min外特性工况下能够获得理想的进气过程,提高了氢气机的充气效率。

图12为5 500 r/min工况下气门正时对缸内最大压力及最大燃烧温度的影响。从图12中可以看出,随着气门正时的推迟,进排气门变化影响下的缸内最大压力及最大燃烧温度均增大。进排气门正时的推迟均使缸内新鲜空气质量增大,缸内最大燃烧压力提高;当保持过量空气系数一致时,新鲜空气质量流量的增大导致相应的氢气量增大,更多的氢气参与燃烧放出大量热量,致使缸内最大燃烧温度提高。此外,缸内燃烧温度较高可以间接表明燃料燃烧放出的热量转化为有用功的部分增多,表现在扭矩、功率输出增大,动力性得到增强。

5 500 r/min外特性工况是该款缸内直喷氢内燃机额定功率点。图13为5 500 r/min外特性

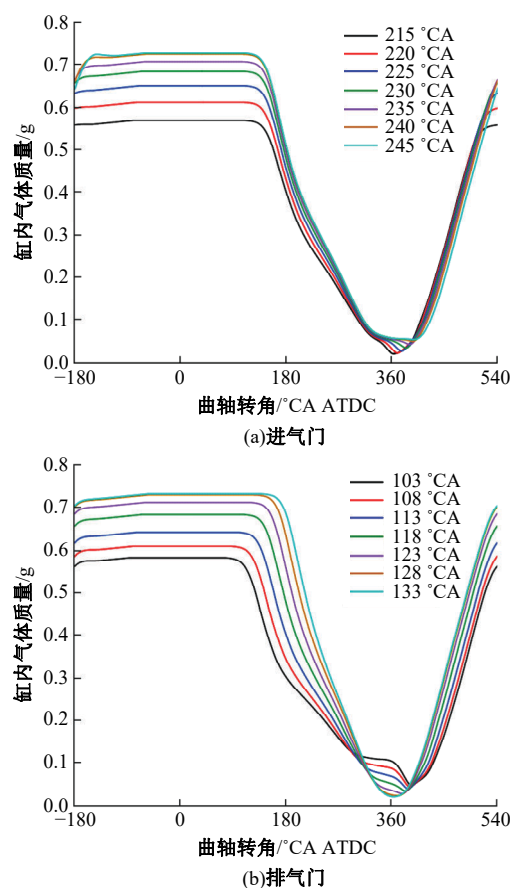


图11 气门正时对缸内气体质量的影响

Fig. 11 Effect of valve timing on gas quality in cylinder

工况点气门正时对氢内燃机动力性及经济性的影响。随着气门正时的推迟,进排气门影响下的功率输出均呈现增大的趋势。排气门正时变化的影响作用较进气门更为明显,当排气门正时推迟10 °CA时功率达到95 kW,较原正时下功率提高12.7%;有效燃气消耗率呈现先减小后小幅增加的趋势,从101.53 g/(kW·h)减小到86.64 g/(kW·h)。该工况采用定过量空气系数的策略,随着气门正时的推迟空气量增大,氢气量随之增大,混合气完全燃烧放出的热量转化为有用功输出的部分增多,功率提高;排气门正时推迟形成的气门重叠期增大,高速气流运动时缸内残余废气的扫除更加彻底,混合气完全燃烧释放的热量可以更高效地转化为指示功,有效燃气消耗率得以降低。因此,以动力输出为主要目标的直喷氢内燃机高速端可以适当推迟进排气门正时,提高进气量、减小负功消耗;同时考虑到经济性的影响,进排气门正时不可以线性推迟,需要全面考虑动力性、经济性、安全可靠等方面因素的影响

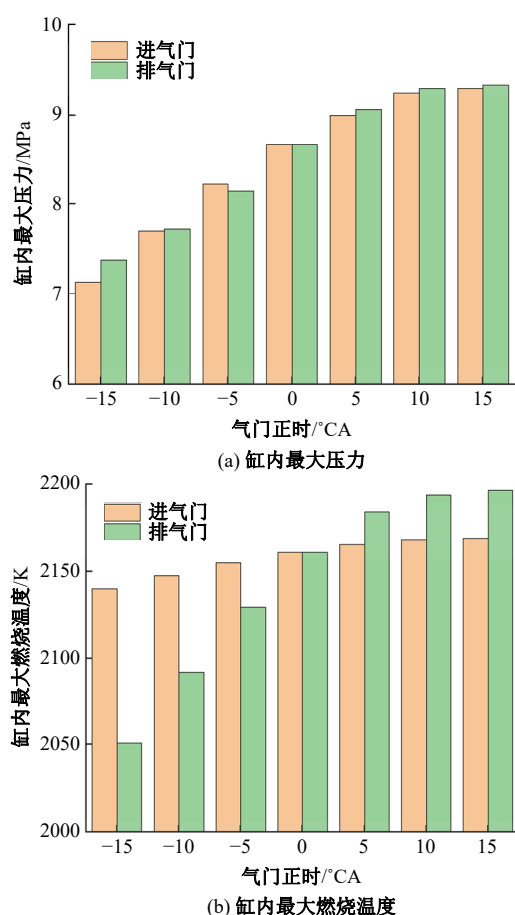


图 12 气门正时对缸内最大压力及最大燃烧温度的影响

Fig. 12 Effect of valve timing on maximum pressure and maximum combustion temperature in cylinder

制订配气策略。

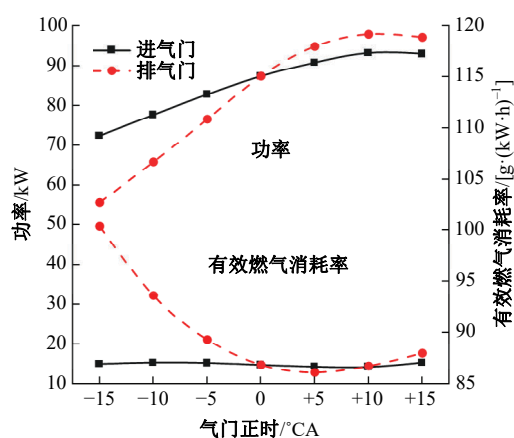


图 13 气门正时对动力性及经济性的影响

Fig. 13 Effect of valve timing on power performance and economy

4 结 论

(1) 2 700 r/min 外特性工况下保持氢气流一致, 进气门推迟导致缸内气体质量先增多后减少,

原正时下达到最大值; 残余废气系数小幅降低; 最大缸压先增大后减小, 最大缸温则先降低后提高。排气门正时推迟导致缸内气体质量增多, 推迟 15 °CA 时达到最大值; 残余废气系数大幅降低; 最大缸压提高, 最大缸温则持续降低。

(2) 5 500 r/min 外特性工况下保持过量空气系数一致, 进气门正时提前会导致部分废气回流入进气管, 排气门正时提前则会导致较大的内部 EGR 率; 进排气门正时的推迟导致缸内气体质量持续增多, 当推迟 15 °CA 时达到最大值。同样的过量空气系数下, 较大的空气质量流量使氢气流量增大, 推迟气门正时同样会导致缸内最大燃烧压力及最大燃烧温度的提高。

(3) 为了提高氢发动机的有效热效率, 2 700 r/min 外特性工况进气门提前 5 °CA 凸轮转角、排气门推迟 10 °CA 凸轮转角, 即进气门正时为 225 °CA, 排气门正时为 128 °CA 时有效热效率由 40.8% 提高到 41.07%。从平衡动力性及经济性角度出发, 缸内直喷氢内燃机 5 500 r/min 外特性工况进排气门分别推迟 10 °CA 凸轮转角, 即进气门正时为 240 °CA, 排气门正时为 128 °CA 时, 功率提高 12.7%, 有效燃气消耗率小幅降低。

参考文献:

- [1] 孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺. 缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 265-278.
Sun Bo-gang, Bao Ling-zhi, Luo Qing-he. Development and trends of direct injection hydrogen internal combustion engine technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(3): 265-278.
- [2] Xi W, Sun B G, Luo Q H, et al. Visualization research on hydrogen jet characteristics of an outward-opening injector for direct injection hydrogen engines[J]. Fuel, 2020, 280: No. 118710.
- [3] 王若平, 余云飞, 洪森. 采用 GT-POWER 仿真的发动机进气性能优化[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2017, 31(10): 1-5.
Wang Ruo-ping, Yu Yun-fei, Hong Sen. Optimization of engine intake performance based on the simulation of GT-POWER[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(10): 1-5.
- [4] Ji C W, Hong C, Wang S F, et al. Evaluation of the variable valve timing strategy in a direct-injection hy-

- drogen engine with the Miller cycle under lean conditions [J]. *Fuel*, 2023, 343: No. 127932.
- [5] Xin G, Ji C W, Wang S F, et al. Experimental study of the effect of variable valve timing on hydrogen-enriched ammonia engine[J]. *Fuel*, 2023, 344: No. 128131.
- [6] Luo Q H, Sun B G. Effect of the Miller cycle on the performance of turbocharged hydrogen internal combustion engines[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 123: 209-217.
- [7] Wang Y J, Long W Q, Dong P B. Numerical investigation on combustion regulation for a stoichiometric heavy-duty natural gas engine with hydrogen addition considering knock limitation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48:18498-18513.
- [8] Hong C, Ji C W, Wang S F, et al. Progressive strategies to avoid and exploit knock limit for optimal performance and stoichiometric operation of a DI hydrogen engine with high CR at WOT conditions[J]. *Fuel*, 2024, 357: No. 1298949.
- [9] Tavakoli S, Jazayeri S A, Fathi M, et al. Miller cycle application to improve lean burn gas engine performance[J]. *Energy*, 2016, 109: 190-200.
- [10] Shu J, Fu J Q, Zhao D. Numerical investigation on the effects of valve timing on in-cylinder flow, combustion and emission performance of a diesel ignition natural gas engine through computational fluid dynamics[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 198:No. 111786.
- [11] Patychuk B, Ning W, McTaggart-Cowan G, et al. Intake and exhaust valve timing control on a heavy-duty direct-injection natural gas engine[J]. *SAE Technical Papers*, 2015, 1: No. 0864.