

# 正时策略对进气道喷射氢气发动机混合气形成、性能与排放的影响

胡志远<sup>1</sup>, 殷力<sup>1</sup>, 张允华<sup>1</sup>, 楼狄明<sup>1</sup>, 谭丕强<sup>1</sup>, 刘登程<sup>2</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804, 2. 南昌智能新能源汽车研究院, 南昌 330038)

## Effect of timing strategy on mixture formation, performance and emission of inlet injection hydrogen engine

Hu Zhiyuan<sup>1</sup>, Yin Li<sup>1</sup>, Zhang Yunhua<sup>1</sup>, Lou Diming<sup>1</sup>, Tan Piqiang<sup>1</sup>, Liu Dengcheng<sup>2</sup>

(1.School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China, 2.Nanchang Automotive Institute of Intelligence & New Energy, Nanchang 330038)

**Abstract:** In order to study the factors that affect the performance and emission of the Port Fuel Injection hydrogen engine (PFI-H2ICE), a four-cylinder intake jet hydrogen engine model was established using the one-dimensional software GT-POWER, and the effects of different excess air coefficients and timing strategies (intake valve opening timing, injection timing and ignition timing) on the formation, performance and emission of the hydrogen engine mixture were analyzed. The results show that the thin burn limit of the hydrogen engine based on Isuzu JE4N28 is 2.0-2.5. Opening the intake valve 20°CA in advance is conducive to improving the thermal efficiency of the hydrogen engine and reducing NOx emission, with a maximum reduction of 20.6%, and opening the intake valve in advance can reduce the influence of hydrogen injection timing on the performance of the hydrogen engine. The outside/inside mixture formation time of hydrogen engine is proportional to the performance, and the NOx emission is inversely proportional. The outside mixing time has a greater impact on thermal efficiency, while the inside mixing time has a greater impact on NOx emission. The effect of ignition timing, hydrogen injection timing and intake valve opening timing on the performance and emission of hydrogen engine decreases successively.

**摘要:** 为了研究影响进气道喷射氢气发动机性能与排放的因素, 利用一维软件 GT-POWER 建立四缸进气道喷射氢气发动机模型, 分析了不同过量空气系数与正时策略(进气门开启正时、喷射正时以及点火正时)对氢气发动机混合气形成、性能与排放的影响。结果表明: 基于五十铃 JE4N28 的氢气发动机稀燃极限在过量空气系数 2.0-2.5 之间; 提前 20° CA 打开进气门有利于提升氢气发动机热效率、减少 NOx 排放, 最高减幅可达 20.6%, 且提前打开进气门可以减弱喷氢正时对氢气发动机性能的影响。氢气发动机缸外/内混合气形成的时间与性能成正比、NOx 排放成反比, 缸外混合时间对热效率的影响更大, 而缸内混合时间对 NOx 排放的影响更大。喷氢正时、点火正时、进气门开启正时对氢气发动机性能与排放的影响依次降低。

**关键词:** 进气道喷射氢气发动机; 正时策略; 混合气形成; 性能; NOx 排放

**Key words:** port-fuel-injection hydrogen engine; timing strategy; mixture formation; performance; NOx emission

中图分类号: TK463 (请查阅中图分类法第 5 版)

文献标识码: A

## 0 概述

收稿日期: 2023-07-18

基金项目: 重型商用车用氢气发动机关键技术研究——22dz1206402; 商用车氢燃料发动机关键技术研究——20223BBE51014; 轻型商用车氢燃料发动机研发——TPD-TC202303-08

作者简介: 胡志远 (1970-), 男, 博士生导师, 主要研究方向为汽车能源技术、汽车低排放设计技术, E-mail:huzhiyuan@tongji.edu.cn;

张允华 (联系人), E-mail: zhangyunhua@tongji.edu.cn。

第七十五届联合国大会上习近平主席提出的“2030年碳达峰，2060年碳中和”的双碳目标<sup>[1]</sup>，预计我国碳达峰排放量约110亿吨，比2020年增加10%；预计碳中和时排放量20亿吨，比2030年下降82%<sup>[2]</sup>。内燃机作为目前交通动力领域主要的承载对象，占据中国车用动力销量的70%以上，同时排放问题也迫在眉睫。在这样的背景下，加速达成双碳目标、寻找低碳/零碳燃料成为内燃机技术摆脱困境的必经之路。

作为零碳替代燃料的氢气具有来源丰富、质量轻、能量密度高、储存方式与利用形式多样等诸多优点，在全球应对气候变暖、世界经济衰退风险上升、能源供给形势复杂多变的大背景下，已被多个国家和地区规划定位为未来战略产业及重要能源品种<sup>[3]</sup>。我国于2022年发布了《氢能产业发展中长期规划（2021-2035）》，明确了氢的能源属性<sup>[4]</sup>，确定氢能是我国战略性新兴产业重点方向<sup>[5]</sup>，并将成为我国未来能源体系的组成部分，推动加快落实国家碳达峰碳中和战略。使用氢燃料的氢气发动机不仅具有依托现有内燃机产业的低成本优势，在稀燃条件下更能显著提高发动机的性能、降低排放<sup>[6]</sup>。

与缸内直喷（DI）氢气发动机相比，进气道喷射（PFI）氢气发动机的混合时间更丰富，氢气喷射多角度优化，改装现有的内燃机更方便的优势<sup>[7]</sup>，但发动机性能易受到异常燃烧（早燃、回火等）的影响<sup>[8]</sup>。现有研究表明，在稀薄燃烧（过量空气系数约为2.5）条件下，涡轮增压能够提升PFI氢气发动机约2%的制动热效率<sup>[9]</sup>，同时降低NO<sub>x</sub>排放<sup>[10]</sup>，保持燃烧的稳定性，实现对回火的控制<sup>[11]</sup>。冯等人对大排量PFI氢气发动机涡轮增压器匹配过程进行了研究，提出了选型计算方法，显著改善了大排量PFI氢气发动机性能<sup>[6]</sup>，针对PFI氢气发动机性能与排放的综合性研究较少。

数值模拟方法是目前氢气发动机正时研究的重要手段，经过校准后的模型可靠性高，能够大量减少发动机新技术开发初期的时间和成本。Liu等采用CFD模拟方法，研究了不同转速和当量比条件下喷射正时对PFI氢气发动机混合气形成的影响，提出了PFI氢气发动机的喷油终点限值<sup>[12]</sup>，在EGR率50%时，采用合适的喷射策略可以使NO<sub>x</sub>排放浓度低于百万分之150<sup>[13]</sup>。Ma等通过数值模拟和理论分析研究了点火正时对PFI氢气发动机NO<sub>x</sub>排放的影响<sup>[14]</sup>，点火提前角对氢气发动机的影响与过

量空气系数有关，在一定范围内减小点火提前角能在不明显影响热效率的前提下降低NO<sub>x</sub>排放<sup>[15]</sup>。

本文基于五十铃JE4N28发动机，利用GT-power建立一维PFI氢发动机仿真模型，研究了过量空气系数、点火正时、喷射正时以及进气门正时等参数对氢发动机性能及排放的影响程度，对比了缸外/内混合气体形成长对氢气发动机的影响。旨在丰富PFI氢气发动机性能与排放影响因素的研究，为后续的三维模型建立与实验研究提供依据与基础。**1 仿真模型的建立与验证**

### 1.1 仿真模型的建立

本文以江西五十铃JE4N28天然气发动机作为原型机搭建仿真模型，发动机的基本特性参数以及部分外特性试验结果如表1所示。该发动机为直立式水冷四冲程的四缸天然气发动机，采用进气道多点喷射的喷射方式，进气方式为增压中冷，进排气曲线、点火时刻与进气时刻如图1所示。

表1 JE4N28 发动机基本参数

参数	数值
排量	2.776 L
缸径×冲程	94×100 mm
连杆长度	115 mm
压缩比	11.5:1
气缸数量	4
气缸工作顺序	1-3-4-2
进气门直径	34.5 mm
排气门直径	31 mm
额定功率	100 kw (3200 r/min)
最大扭矩	350 N·M (2000 r/min)
怠速	750±50 r/min

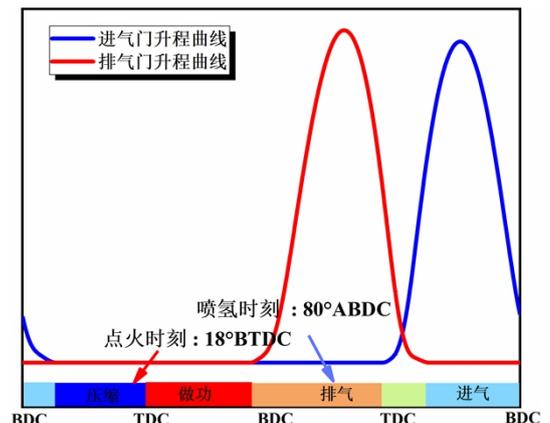


图1 发动机进排气曲线、点火时刻与进气时刻

采用GT-POWER将上述发动机确定的几何结构参数（进排气系统、曲柄连杆机构、配气机构等）

输入并建立一维模型，如图 2 所示。为确保仿真结果的可靠性，本文采用 WoschniGT 传热模型、EngCyFlow 气缸内流动模型和 EngCylCombSITurb 湍流火焰燃烧模型以调整阀门打开瞬间的传热系数，考虑气缸内混合气体的漩涡和湍流以及预测发动机缸内的燃烧速率爆震发生率。选择 Zeldovic 机理模拟发动机内 NO<sub>x</sub> 的生成与排放。

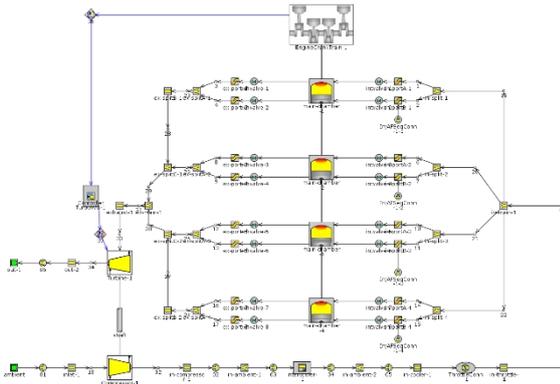


图 2 GT-POWER 一维 JE4N28 发动机模型

## 1.2 仿真模型的验证

模型验证采用重庆凯瑞燃气汽车有限公司提供的 JE4N28 天然气发动机试验数据，设定模拟工况参数与试验参数一致，在表 2 所示的边界条件下进行仿真设置。

表 2 JE4N28 发动机仿真边界参数设置

参数	数值
燃料	天然气
转速	2000 r/min
进气压力	0.15 MPa
进气温度	300 K
缸盖温度	570K
活塞温度	600K
缸壁温度	480K

将结果与试验结果的缸压曲线进行标定，如图 3 所示。试验和仿真的缸压曲线结果吻合较好，最大误差不超过 5%，认为此仿真模型具有较高的预测精度和可信度。

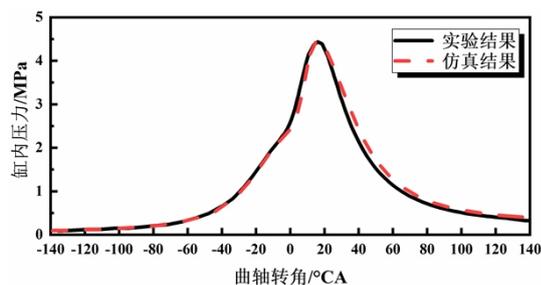


图 3 模型验证结果

本文将上述经过仿真试验标定验证的模型燃料由天然气替换为氢气，并更改相应仿真设置以研究不同过量空气系数与正时策略（进气门开启正时、喷射正时以及点火正时）对氢气发动机混合气形成、性能与排放的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 过量空气系数对氢气发动机性能与排放的影响

为了研究过量空气系数对氢气发动机性能与排放的影响，探索 JE4N28 改制氢气发动机的稀燃极限，在原发动机基础上调整喷射氢气的脉冲宽度（喷氢速率为 19kg/h），实现不同的过量空气系数。

图 4 比较了在 0.15 MPa 涡轮增压时怠速（750 r/min）、最大扭矩转速（2000 r/min）以及额定功率转速（3200 r/min）条件下，不同过量空气系数对热效率的影响，其中 2000 r/min 和 3200 r/min 条件下氢发动机工作范围较小，仅能在 1.0-2.0 之间顺利点火，750rpm 下工作范围较其他转速更广泛，可以将氢发动机的稀燃极限提高至约 2.5，但是随着稀薄燃烧的进一步加强，氢发动机的热效率下降愈加明显。三种工况下均在过量空气系数为 1.5 时热效率达到最高，其中 2000 r/min 时热效率达到约 40%。

图 5 则比较了三种转速条件下 NO<sub>x</sub> 排放随过量空气系数的变化情况，发现转速不改变 NO<sub>x</sub> 排放的趋势，但是会影响 NO<sub>x</sub> 的峰值浓度<sup>[16]</sup>。在  $\lambda = 1-1.5$  时排放较高，NO<sub>x</sub> 排放随转速升高而增加，当过量空气系数大于 1.5 时，NO<sub>x</sub> 排放浓度会稳定在百万分之 1000 附近。根据 Zeldovic 机理，当氧气浓度足够氢燃烧时，NO<sub>x</sub> 的生成随温度随燃烧温度的升高呈指数增长<sup>[17]</sup>，稀薄燃烧提供了足够的氧气，因此在该仿真条件下 NO<sub>x</sub> 的生成主要由反应温度决定，随转速升高，发动机缸内温度逐渐升高，3200 r/min 时 NO<sub>x</sub> 排放最高。

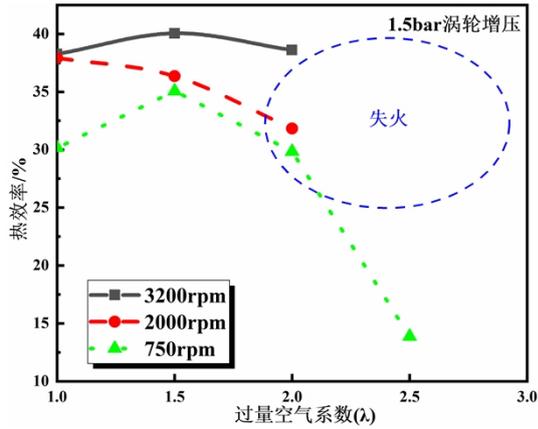


图4 过量空气系数对氢气发动机热效率的影响

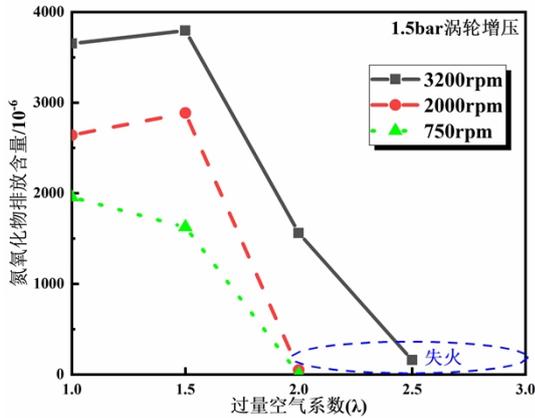


图5 过量空气系数对氢气发动机 NOx 排放的影响

为更清晰地比较后续仿真结果的对比，本文选择热效率与排放均比较高的  $\lambda = 1.5$  和 2000 r/min 作为仿真研究边界条件，其中热效率 36.58%，NOx 排放体积分数为  $2884e-6$ ，并以此归一化后续所有参数，在此基础上探究提高氢气发动机性能、减少 NOx 排放的影响因素，对比不同参数对氢气发动机性能与排放的影响程度。

## 2.2 进气门开启时刻对氢气发动机性能与排放的影响

为了研究进气门开始时刻对氢发动机燃烧与排放的影响，对进气门开启时刻进行延迟/提前处理，以  $20^\circ$  BTDC 时开启进气门为原始对照 IVO 组，提前/延迟各  $25^\circ$  CA（每  $5^\circ$  CA 为一个仿真方案），图 6 所示为延迟  $15^\circ$  CA，即方案 R15 的进排气门曲线图，其他进气门开始时刻调整方案及具体开启时刻如表 3 所示。

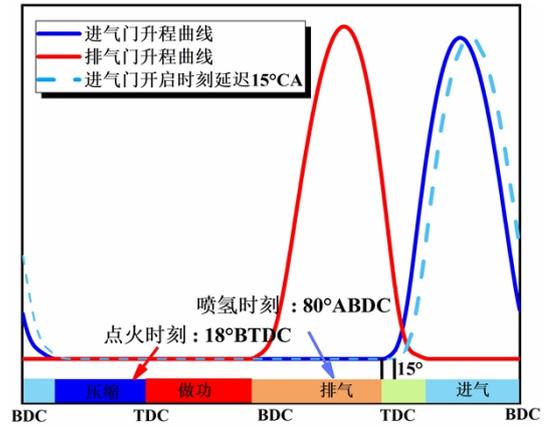


图6 排气门开启时刻延迟  $15^\circ$  CA 示意图

表 3 进气门开启时刻提前/延迟参数设置

仿真方案	进气门开始时刻
A25	$45^\circ$ BTDC
A20	$40^\circ$ BTDC
A15	$35^\circ$ BTDC
A10	$30^\circ$ BTDC
A5	$25^\circ$ BTDC
IVO	$20^\circ$ BTDC
R5	$15^\circ$ BTDC
R10	$10^\circ$ BTDC
R15	$5^\circ$ BTDC
R20	TDC
R25	$5^\circ$ ATDC

如图 7 和图 8 所示为不同进气门开启时刻对氢气发动机性能的影响，可知小幅提前打开进气门可以提高缸内压力峰值，大幅提前打开进气门或延迟打开进气门均会导致缸内压力峰值的降低；提前/延迟打开进气门整体会使氢气发动机放热率提高，缸内着火时刻推迟。

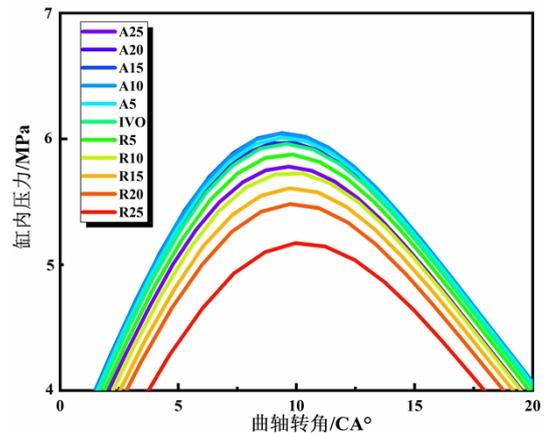


图7 不同进气门开启时刻对缸压的影响

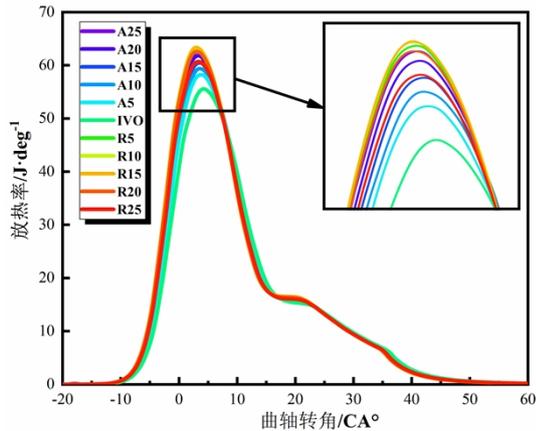


图 8 不同进气门开启时刻对峰值放热率的影响

分析图 9 可以看出随着进气门开启时刻的逐渐延迟, 热效率总体呈现下降趋势且随着延迟时刻的增压下降幅度逐渐增大; 小幅度提前打开进气门能够有效降低氢气发动机 NO<sub>x</sub> 排放, 过早或延迟打开进气门均会导致 NO<sub>x</sub> 排放增加。分析认为, 提前打开进气门可以延长进气道内氢气与空气的混合时间, 从而使混合气体更易达到均质条件, 使得缸内燃烧更为充分, NO<sub>x</sub> 排放降低。随着进气门打开时间的进一步提前, 进气门与排气门重叠时间进一步加长, 导致由缸内反流出的高温废气增多, 影响进气效率, 同时, 高温的反流气体增加了混合气体早燃的可能性, 导致燃烧稳定性下降, NO<sub>x</sub> 排放增加。

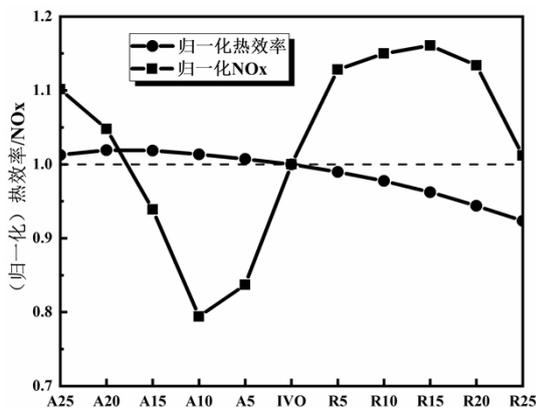


图 9 进气门开启时刻对氢气发动机性能与排放的影响

提前打开进气门能够实现热效率的提升, 在本文的仿真方案中, 提前 15° CA 和 20° CA 打开进气门可以分别提升热效率 (归一化后) 1.85% 和 1.91%, 提前 10° CA 打开进气门减少 NO<sub>x</sub> 排放效果最佳, 减幅达到 20.6%。

### 2.3 喷氢时刻对氢气发动机性能与排放的影响

为了研究氢气喷射时刻对氢发动机的影响, 对  $\lambda = 1.5$  (以 19kg/h 的质量流量持续喷氢 80° CA), 2000 r/min, 进气门开启时刻分别为 20° BTDC

(IVO) 和 40° BTDC (A20) 的两种工况下的氢气喷射时刻进行了延迟/提前调整, 仿真方案及具体喷氢时刻如表 4 所示。

表 4 喷氢时刻提前/延迟参数设置

仿真方案	喷氢时刻 (SOI)
60A	20° ABDC
40A	40° ABDC
20A	60° ABDC
SOI	80° ABDC
20R	80° BTDC
40R	60° BTDC
60R	40° BTDC

图 10 为不同进气门开启时刻喷氢时刻对氢发动机性能的影响, 可以看出随喷氢时刻的提前氢气发动机的热效率呈现先上升后略微下降的趋势, 在原进气门开启时刻, 提前 20° CA 喷氢能够提升热效率 (归一化后) 约 7%; 在两种进气门开启时刻延迟喷氢对热效率的影响均较小。提前打开进气门能够减小喷氢时刻对热效率的影响, 喷氢时刻对氢气发动机热效率的影响要远大于进气门开启时刻的影响, 同样提前 20° CA 的条件下点火时刻对热效率的提高率可以达到后者的近 3 倍。

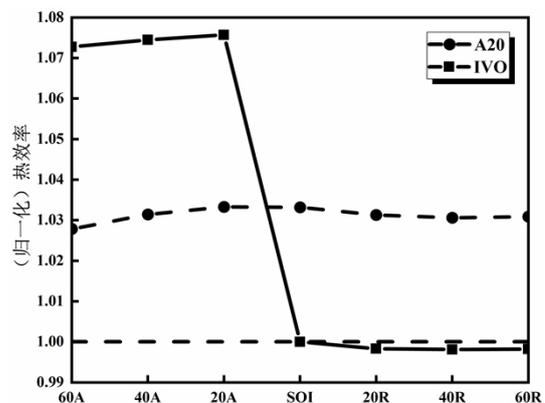


图 10 不同进气门开启时刻喷氢时刻对氢气发动机性能的影响

图 11 所示为不同进气门开启时刻喷氢时刻对氢发动机排放的影响, 可以发现随喷氢时刻的延迟, NO<sub>x</sub> 排放总体呈现增加趋势, 与提前开启进气门对比, 提前喷氢对 NO<sub>x</sub> 排放的影响更大, 提前开启进气门不会改变喷氢时刻对 NO<sub>x</sub> 排放的影响趋势。

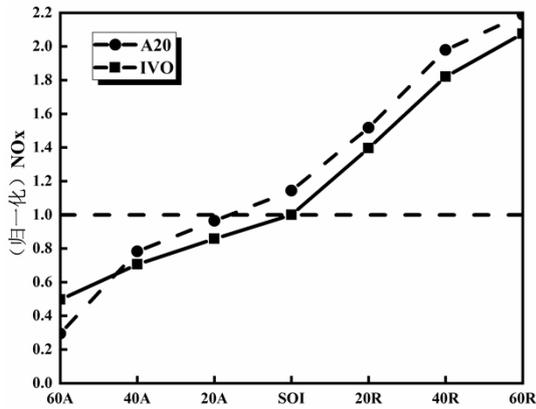


图 11 不同进气门开启时刻喷氢时刻对氢气发动机排放的影响

分析上述现象可以认为，提前喷氢能够延长在进气管道中氢气与空气的混合时间，适当的提前喷氢能够在避免早燃的情况下提高氢气发动机的热效率，减少 NOx 的排放；适当提前打开进气门能够延长气缸内气体混合的时间，同样能使得混合气体更接近均质状态，燃烧更为充分，得到更高的热效率和更低的 NOx 排放，从图 12 可以看出，虽然提前进气缩短了气体在气道内的混合时间，但仍能对氢气发动机起到正向的影响作用，分析认为，混合气体在气缸内由于缸内气体湍流作用混合效果要比进气管道内混合效果更好，对氢气发动机性能与排放的影响更为显著。同时提前进气门开启时刻与喷氢时刻能够对 NOx 达到最好的抑制效果，但会带来热效率的衰减。

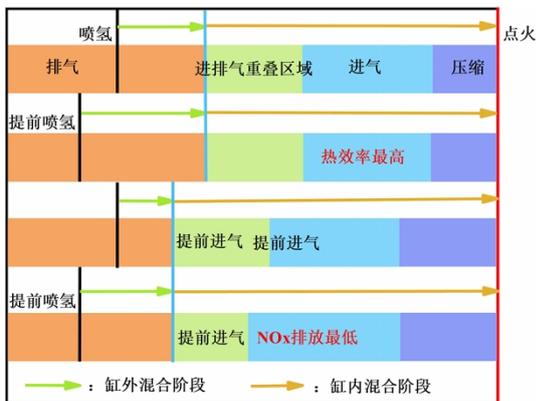


图 12 不同进气、喷氢策略下混合气形成阶段示意图

## 2. 4 点火时刻对氢气发动机性能与排放的影响

为了研究点火时刻对氢发动机的影响，在 2000 r/min, IVO=20° BTDC, SOI=80° ABDC, 进气压力 1.5MPa 工况下对点火时刻（原点火提前角=20°）进行了延迟/提前处理，其中点火提前角与相应点火时刻对照表如表 5 所示。

表 5 点火时刻提前/延迟参数设置

仿真方案（点火提前角）	点火时刻
40	40° BTDC
35	35° BTDC
30	30° BTDC
25	25° BTDC
20	20° BTDC
15	15° BTDC
10	10° BTDC
5	5° BTDC
0	TDC

如图 13 所示，随着点火提前角的以相同的步长增大，一次压力峰值与峰值放热率逐渐提前且增大，增幅在点火提前角为 20° 时达到最大后逐渐变小，当点火提前角小于 10° CA 时出现明显的二次压力峰值，放热率出现明显的第二阶段，分析可知，当点火提前角过小时，氢气发动机膨胀负功增加，动力性能变差，而当点火提前角增大到一定程度时又会导致压缩负功逐渐增加，不利于氢气发动机性能的提升。

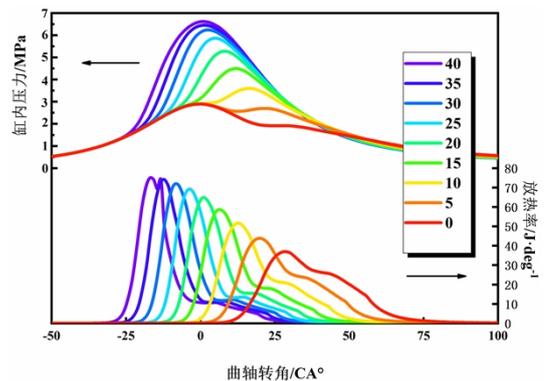


图 13 不同点火时刻的缸压与峰值放热率

如图 14 所示，随着点火提前角的增加，热效率呈现先增加后减少的趋势，点火提前角过小或过大都会导致负功的出现，从而影响氢气发动机的性能，但总体影响较小；一定条件下推迟点火可以有效降低火焰温度和压力上升率，从而抑制 NOx 的生成 [16]。当点火提前角小于 5 度时可以实现近零排放，但相应热效率（归一化）损失最高可达 25%。

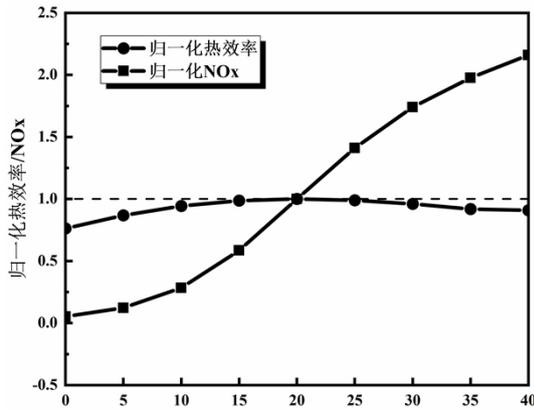


图 14 不同点火时刻对氢气发动机性能与排放的影响

### 3 结论

文基于五十铃 JE4N28 的氢气发动机,利用 GT-power 建立一维 PFI 氢发动机仿真模型,研究了过量空气系数、进气门开启正时、点火正时、喷射正时对氢气发动机与排放的影响程度及对比得到结论如下:

(1) 基于五十铃 JE4N28 的氢气发动机稀燃极限在过量空气系数 2.0-2.5 之间,当过量空气系数大于 2.0 时,氢气发动机存在明显的性能衰减,过量空气系数大于 2.5 时,产生失火现象。

(2) 小幅度 (小于  $20^{\circ}$  CA) 提前打开进气门能够有效提升氢气发动机性能,减少 NOx 排放,提前  $15^{\circ}$  CA 和  $20^{\circ}$  CA 打开进气门可以分别提升热效率 (归一化后) 1.85% 和 1.91%,提前  $10^{\circ}$  CA 打开进气门减少 NOx 排放效果最佳,减幅达到 20.6%。

(3) 提前打开进气门能够减弱喷氢正时对氢气发动机性能的影响,同等步长下喷氢时刻对氢气发动机热效率的影响要远大于进气门开启时刻的影响,同样提前  $20^{\circ}$  CA 的条件下点火时刻对热效率的提高率可以达到后者的近 3 倍。与提前开启进气门对比,提前喷氢对 NOx 排放的影响更大。

(4) 混合气形成时间与氢气发动机性能与排放密切相关,混合时间越长氢气发动机性能与排放表现越好;同等混合时间下,缸外混合时间对热效率的影响较大,缸内混合时间对 NOx 排放的影响更大。

(5) 点火提前角对氢气发动机性能与排放的影响最大, $20^{\circ}$  点火提前角时热效率与 NOx 排放增加速率最高。

参考文献:

- [1] ELZEN M D, FEKETE H, HÖHNE N, et al. Greenhouse gas emissions from current and enhanced policies of China until 2030: Can emissions peak before 2030? [J]. Energy Policy, 2016, 89: 224-36.
- [2] 严刚, 郑逸璇, 王雪松, et al. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 309-19.
- [3] PAL A, KAKRAN S, KUMAR A, et al. Powering squarely into the future: A strategic analysis of hydrogen energy in QUAD nations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023.
- [4] 国家能源局 国. 氢能产业发展中长期规划 (2021-2035) [Z]. 2022-03-23
- [5] LIU F, ZHAO F, HAO H, et al. The Review of Present and Future Energy Structure in China [Z]. SAE Technical Paper Series. 2019.10.4271/2019-01-0612
- [6] LAI F-Y, SUN B-G, XIAO G, et al. Research on optimizing turbo-matching of a large-displacement PFI hydrogen engine to achieve high-power performance [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023.
- [7] DENNIS P A, DINGLI R J, ABBASI ATIBEH P, et al. Performance of a Port Fuel Injected, Spark Ignition Engine Optimised for Hydrogen Fuel [Z]. SAE Technical Paper Series. 2012.10.4271/2012-01-0654
- [8] WANG L, YANG Z, HUANG Y, et al. The effect of hydrogen injection parameters on the quality of hydrogen-air mixture formation for a PFI hydrogen internal combustion engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(37): 23832-45.
- [9] NAKAJIMA Y, YAMANE K, SHUDO T, et al. Research and Development of a Hydrogen-Fueled Engine for Hybrid Electric Vehicles [Z]. SAE International. 2000. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0993>
- [10] NGUYEN D, CHOI Y, PARK C, et al. Effect of supercharger system on power enhancement of hydrogen-fueled spark-ignition engine under low-load condition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(9): 6928-36.

- 
- [11] GAO J, WANG X, SONG P, et al. Review of the backfire occurrences and control strategies for port hydrogen injection internal combustion engines [J]. *Fuel*, 2022, 307.
- [12] LIU X, LIU F, ZHOU L, et al. Backfire prediction in a manifold injection hydrogen internal combustion engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(14): 3847–55.
- [13] KIM J, RAJOO S. A Numerical Study on Turbocharging System for PFI-SI Type Hydrogen Combustion Engine [Z]. SAE International. 2021. <https://doi.org/10.4271/2021-24-0094>
- [14] MA F, LIU H, WANG Y, et al. Combustion and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition timings [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(2): 816–22.
- [15] LEE J, LEE K, LEE J, et al. High power performance with zero NOx emission in a hydrogen-fueled spark ignition engine by valve timing and lean boosting [J]. *Fuel*, 2014, 128: 381–9.
- [16] MA D-S, SUN Z Y. Progress on the studies about NOx emission in PFI-H<sub>2</sub>ICE [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(17): 10580–91.
- [17] BORETTI A. Stoichiometric H<sub>2</sub>ICE with water injection and exhaust and coolant heat recovery through organic Rankine cycles [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(19): 12591–600.