

# 高压压缩比主动射流点火氨氢发动机燃烧特性研究

王巍, 齐运亮, 王志\*

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

## Investigation of Combustion Characteristics of Active Jet Ignition in Ammonia-Hydrogen Engine with High Compression Ratio

WANG Wei, QI Yunliang, WANG Zhi

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The effects of the active/passive jet ignition mode, engine compression ratio, pre-chamber injection pressure and hydrogen mixing ratio on the combustion characteristics of the jet ignition ammonia-hydrogen engine were investigated by numerical simulation. The results show that increasing the engine compression ratio has little effect on the combustion rate of the mixture in the cylinder under high ammonia mixing ratio and passive jet ignition mode. Compared with the passive jet ignition mode, the active jet ignition can obviously improve the ignition ability and mixture combustion speed of the engine under the condition of high ammonia content. Increasing the active injection pressure can accelerate the combustion rate of the mixture in the cylinder and shorten the combustion duration, but too high active injection pressure will lead to local concentration of hydrogen in the cylinder and reduce the combustion efficiency of hydrogen. Increasing the hydrogen blending rate of the inlet mixture can improve the combustion efficiency of ammonia and hydrogen, increase the flame intensity of the flame jet and accelerate the combustion in the cylinder. Under the same working condition, the indicated thermal efficiency can be increased by 3.1 percentage by the lower compression ratio of the high compression ratio ammonia-hydrogen active jet ignition engine.

**摘要:** 本文通过数值模拟研究了主动/被动射流点火模式、发动机压缩比、主动喷射压力和掺氢率对射流点火氨氢发动机燃烧特性的影响。结果表明, 高掺氢率和被动射流点火模式下, 提高发动机压缩比对缸内混合气燃烧速度的影响较小。相比于被动射流, 主动射流点火可以明显提高发动机在高掺氢率条件下的点火能力和混合气燃烧速度。增大主动喷射压力, 能够加快缸内混合气燃烧速度, 缩短燃烧持续期, 但主动喷射压力过高会导致缸内氢气局部过浓, 氢气燃烧效率降低。提高进气道混合气的掺氢率, 可以提高氨氢的燃烧效率, 提高射流火焰强度, 加速缸内燃烧。在相同工况下, 高压压缩比氨氢主动射流点火发动机较低压缩比可提升指示热效率 3.1 个百分点。

**关键词:** 主动射流; 高压压缩比; 掺氢率; 主动喷射压力; 燃烧特性

**Key words:** active jet ignition; high compression ratio; ammonia blending ratio; pre-chamber injection pressure; combustion characteristic

中图分类号: TK411.2

文献标识码: A

### 0 概述

在碳中和的背景下, 传统燃油车面临严峻的挑战, 汽油、柴油等化石燃料会产生大量的碳排放, 不利于“双碳”目标的实现, 因此必须开发绿色、

低碳的替代燃料革新发动机技术, 在低碳基础上保证发动机的动力性和经济性。

氢气是一种清洁的零碳燃料, 其燃烧产物为水, 具有点火能量低、燃烧速度快、可燃极限范围广等优点<sup>[1]</sup>。但是纯氢发动机存在较多技术难题,

收稿日期: 2023-09-14

作者简介: 王巍 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为氨氢融合内燃机高效低排技术, E-mail:wangw20@mails.tsinghua.edu.cn  
王志, E-mail:wangzhi@tsinghua.edu.cn

比如氢气虽然燃烧速度快，但是容易发生爆震，对大缸径发动机的动力限制大，而且氢气的存储和运输成本高，加氢站等基础设不完善，以上都限制了纯氢发动机的应用推广。氨气是一种良好的氢能载体，它不仅燃烧不产生碳排放，并且相比于氢气，氨气在常温 0.9 MPa 的压力下即可实现完全液化，液氨的体积热值远超过液氢<sup>[2]</sup>，并且液氨的制备成本低、储存和运输条件完善，这使得将氨气作为发动机燃料的成本要低于氢气，并且使用更加方便。然而氨气具有点火难、燃烧慢等缺点，将其作为单一燃料在发动机中很难燃烧，这不仅会降低发动机的燃烧效率和热效率，同时也会产生大量的未燃氨排放。因此需要改善氨燃料燃烧慢的特性，同时配合高能点火技术，促进氨气在缸内快速稳定燃烧，获得高热效率的同时，提高氨气的燃烧效率，降低未燃氨排放。

由于氢气具有较高的化学反应活性，燃烧速度快且易点燃，因此将氢气和氨气掺混以提高氨气的化学反应活性，是提高氨气在发动机中燃烧速度的有效方法。Leng 等<sup>[3]</sup>基于 6ACD320G 发动机模型，使用三维数值模拟研究了天然气中掺混不同比例的氢气对发动机燃烧和排放特性的影响。结果表明，随着氢气比例的提高，燃烧速度加快，热效率提高，但 NO<sub>x</sub> 排放上升。

基于传统火花点火发动机（SI）采用氨氢掺混燃烧的研究较为普遍。Morch 等人<sup>[4]</sup>在一台可变压缩比单缸发动机上进行了氨氢双燃料试验研究，氨气和氢气均在进气道喷射，混合后进入气缸。结果表明，纯氨工况熄火的倾向大，无法稳定运行，纯氢气工况在低压缩比条件下即产生剧烈的压力振荡，而掺氨可有效抑制发动机爆震，许用压缩比提高至 13.56。Frigo 等人<sup>[5]</sup>基于一台 2 缸发动机进行了氨氢试验研究，结果表明，当氨氢混合气中氢气的能量占比低于 10% 时，发动机的循环波动

（COV）迅速升高，燃烧恶化，这个结论在 Mounaim 的<sup>[7]</sup>研究中也得到了证实。Lhuillier 等人<sup>[6]</sup>研究了氨氢掺混比例、过量空气系数等对 SI 发动机燃烧和排放性能的影响。结果表明，氨气比例越高，混合气燃烧速度越慢，发动机的稀燃极限越窄，只有氢气比例较高时才能在稀燃工况下稳定运行；掺氨率越高，未燃 NH<sub>3</sub> 排放越高；发动机的指示热效率随着混合气中氢气比例的增大先升高后降低，在 20% 的氢气比例条件下热效率最高。Ji 等人<sup>[8-10]</sup>研究了氢发动机中掺混少量的氨气在不同混

合气浓度条件下发动机的燃烧和排放特性，试验结果表明，掺混氨气后，峰值缸压和放热率下降，燃烧持续期延长，添加少量氨气（2.2%）对指示热效率影响较小，当掺氨率提高到 10% 时，由于混合气的燃烧速度变慢，指示热效率下降明显。

现有国内外氨气发动机的研究大多基于传统 SI 发动机，其点火能量低，发动机必须依赖较高比例的氢气才能稳定运转，并且由于混合气燃烧速度慢，现有研究中氨氢发动机的指示热效率不高于 34%，发动机的经济性有待提高。相比于传统火花点火，射流点火是一种高能点火技术，比传统火花塞的点火能量高 2~3 个数量级，因此氨氢发动机结合射流点火技术，有望实现高掺氨率条件下缸内快速稳定燃烧，而目前国内外有关研究较少。本文基于一台射流点火氨氢发动机模型，开展了压缩比、主动喷射压力和掺氨率对发动机燃烧特性的仿真研究，旨在为氨氢发动机设计提供指导。

## 1 参数设置

### 1.1 几何模型

三维仿真基于一台标定后的射流点火氨氢发动机模型，发动机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 发动机技术参数

参数	数值
气缸数	1
缸径 / mm	123
冲程 / mm	156
连杆长度 / mm	228
压缩比	11.5, 22
点火方式	射流点火
射流室孔数	6
射流室孔径 / mm	1.2
射流孔锥角 / °	60

图 1 示出了发动机的三维几何模型和射流室的结构图，其中左侧是主动喷射器，用于向射流室内喷射引燃燃料，实现射流室内混合气的主动加浓。射流点火模式有两种：主动射流和被动射流，其区别在于是否向射流室内喷射引燃燃料。图 2 示出了本文所用两种压缩比活塞的结构图

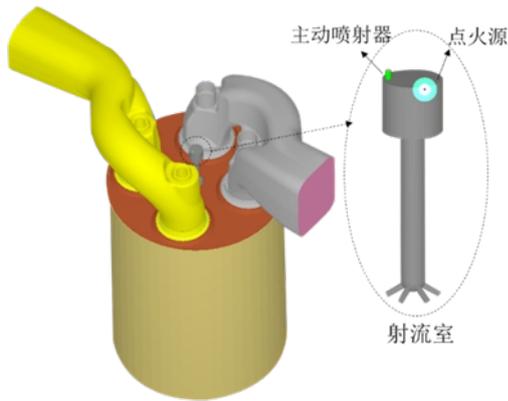


图1 仿真模型和射流室结构图

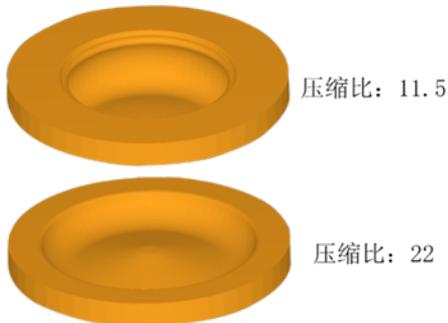


图2 两种压缩比活塞的结构图

仿真网格的基础尺寸为 4 mm, 采用自适应动态加密和固定加密算法, 提高关键时间节点和重要空间位置的化学反应、温度、速度等参数的计算精度, 对点火源和结构比较复杂的射流孔等区域设置了 5 级固定加密。使用 SAGE 详细化学反应求解器来计算缸内的燃烧过程, 燃烧过程计算采用化学反应机理 GRI-mech3.0, 该机理包含 53 组分和 325 步化学反应, 能完整描述  $H_2$  和  $NH_3$  的反应过程。湍流模型采用重整化群 RNG  $k-\varepsilon$  模型。

## 1.2 工况设置

本研究分成两部分, 第一部分为 11.5 压缩比下主动喷射压力对射流点火氨氢发动机燃烧特性的影响; 第二部分为 22 压缩比下进气道中掺氢率对射流点火氨氢发动机燃烧特性的影响。发动机的转速固定为 800 r/min, 进气压力为 0.1 MPa, 进气温度为 300 K。其中, 低压压缩比条件下, 进气组分为氨气-氢气-空气的预混合气, 氢气的能量占比固定为 20%, 进气过量空气系数 ( $\lambda$ ) 固定为 1.2, 点火时刻为  $-14^\circ$  CA ATDC。此外, 由主动喷射器向射流室内喷射氢气作为引燃燃料, 喷射正时为  $-90^\circ$  CA ATDC, 喷射脉宽为  $10^\circ$  CA, 在此基础上改变主动喷射压力, 变化范围为 0.15~10 MPa。高压压缩比条件下, 主动喷射压力固定为 1.0 MPa, 喷射正时和喷射脉宽和前述保持一致。改变进气道中掺氢率, 变化范围为

0~20%。两部分研究的工况设置分别见表 2 和表 3。

表2 低压压缩比氨氢射流点火工况设置

参数	数值
压缩比	11.5
转速 / r/min	800
进气组分	$H_2+NH_3$
进气 $\lambda$	1.2
进气压力 / MPa	0.1
进气温度 / K	300
进气道氢气能量比例 / %	20
点火时刻 / $^\circ$ CA ATDC	-14
主动喷射燃料	$H_2$
主动喷射压力 / MPa	0.15~10
主动喷射正时 / $^\circ$ CA ATDC	-90
主动喷射脉宽 / $^\circ$ CA	10

表3 高压压缩比氨氢射流点火工况设置

参数	数值
压缩比	22
转速 / r/min	800
进气组分	$H_2+NH_3$
进气 $\lambda$	1.2
进气压力 / MPa	0.1
进气温度 / K	300
进气道氢气能量比例 / %	0-20
点火时刻 / $^\circ$ CA ATDC	-14
主动喷射燃料	$H_2$
主动喷射压力 / MPa	1.0
主动喷射正时 / $^\circ$ CA ATDC	-90
主动喷射脉宽 / $^\circ$ CA	10

## 2 结果分析和讨论

### 2.1 高掺氢率下主动-被动射流燃烧效果对比

图 3 示出了在相同掺氢率和点火时刻下, 发动机在主动和被动射流点火两种模式下的缸压和放热速率对比。其中黑色线条代表低压压缩比 (11.5) 工况, 红色线条代表高压压缩比 (22) 工况。由图可知, 当混合气的掺氢率为 80% 时, 采用被动射流点火模式无法实现发动机正常运转, 在低压压缩比下甚至无明显燃烧现象, 提高压缩比至 22 时仍无法使发动机正常运转。采用主动射流点火模式时, 由于射流室存在氢气作为引燃燃料, 低压压缩比条件下发动机仍能正常运转, 而在高压压缩比条件下, 燃烧速度明显加快, 峰值缸压和峰值放热速率均较高。这表明提

高压压缩比和采用主动射流点火模式，是实现高掺氨率条件下氨氢发动机稳定运转的有效方法。

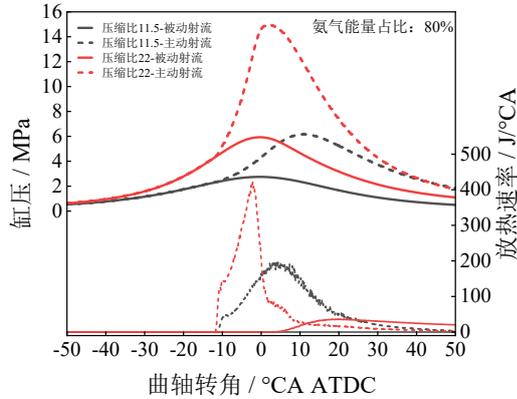
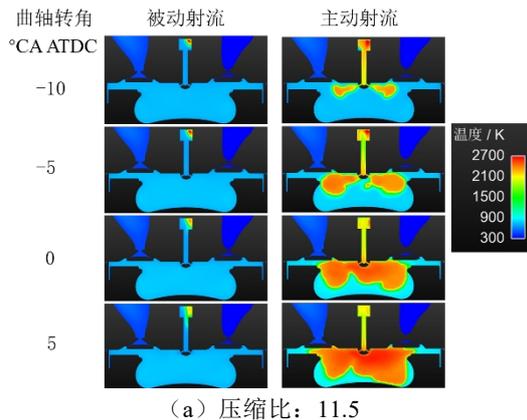
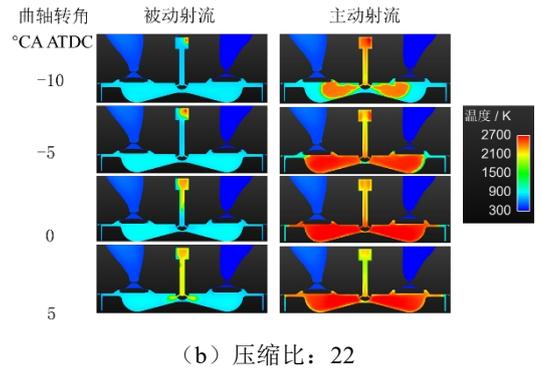


图3 氢气/氨氢混合气被动射流缸压和放热率对比

图4 (a)和图4 (b)分别示出了压缩比为11.5和22条件下,两种射流点火模式对应的燃烧室内温度场变化。可以看出,在低压缩比和被动射流点火工况下,燃烧室内只有点火位置附近有燃料被点燃,火焰无明显传播。而采用主动射流点火模式后,从点火时刻起经过 $4^\circ\text{CA}$ 即有射流火焰从射流孔中喷出,火焰逐渐传播并引燃主燃室内的混合气。在高压压缩比和被动射流点火工况下,相比于低压缩比,火花点火后射流室内起燃明显,并且有射流火焰经过射流孔喷入主燃室,但整体燃烧速度慢,后燃严重。而在主动射流点火工况下,燃烧速度明显提升,在 $-5^\circ\text{CA ATDC}$ 时火焰几乎拓展至整个燃烧室。相比于低压缩比,高压压缩比主动射流点火不仅射流火焰传播速度快,而且火焰整体温度更高,点火能力更强。



(a) 压缩比: 11.5



(b) 压缩比: 22

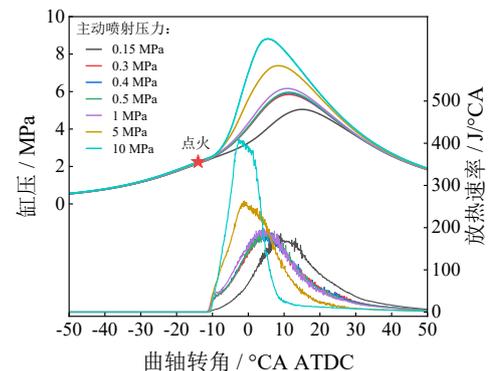
图4 两种压缩比下主动/被动射流模式对比

## 2.2 低压缩比下不同主动喷射压力的燃烧特性

由前可知,在低压缩比下,主动射流点火对氨氢发动机的燃烧速度增益很大,因此需要探究主动射流参数对燃烧效果的影响,其中一个重要参数是主动喷射压力,它不仅影响引燃燃料量,同时也会影响燃料在射流室和主燃室的分布。

图5 (a)和图5 (b)分别示出了主动喷射压力对主燃室和射流室内压力和放热率的影响。可以看出,随着主动喷射压力从 $0.15\text{ MPa}$ 提高至 $10\text{ MPa}$ ,主燃室峰值压力和放热率逐渐提高,燃烧相位提前,表明增大主动喷射压力可以提高主燃室燃烧速度,有利于提高等容度。从射流室的燃烧压力和放热率曲线可以看出,无论喷射压力,射流室压力均呈现两阶段:点火后,射流室内燃料燃烧形成高温高压氛围,产生第一阶段压力小高峰;接着射流火焰进入主燃室,引燃主燃室的混合气,射流室和主燃室的压力趋于一致。

值得注意的是,当主动喷射压力从 $0.15\text{ MPa}$ 提高至 $0.5\text{ MPa}$ 时,射流室第一阶段峰值压力提高,相位提前,表明射流火焰速度加快,能量提高。当主动喷射压力提高至 $1\text{ MPa}$ 时,第一阶段峰值压力未显著增加,同 $0.5\text{ MPa}$ 时相近。随着主动喷射压力继续提高至 $5\text{ MPa}$ 以上,第一阶段峰值压力反而降低,且相位推迟,表明主动喷射压力过高,会导致射流室内混合气过浓,抑制火焰传播。



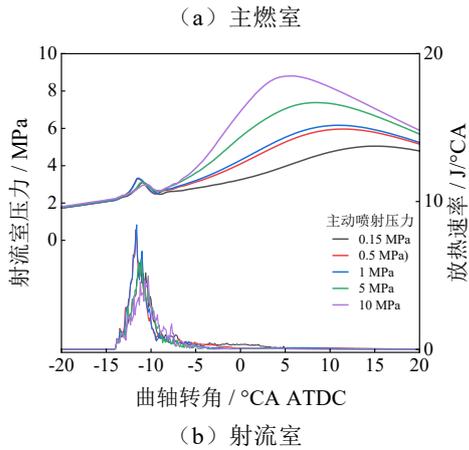


图 5 不同主动喷射压力下燃烧室压力和放热率

图 6 示出了主动喷射压力分别为 0.2 MPa、1.0 MPa 和 5.0 MPa 时燃烧室的温度场，其中点火时刻为  $-14^\circ$  CA ATDC。可以看出，主动喷射压力由 0.2 MPa 提高至 1.0 MPa 时，相同曲轴转角下，射流火焰的长度和面积均更大，主燃室的火焰传播范围更广，这表明提高主动喷射压力能够增强射流火焰，更有效引燃主燃室混合气。当主动喷射压力进一步提高到 5.0 MPa 时，在  $-10^\circ$  CA ATDC 时，射流火焰强度减弱，这是由于主动喷射压力过高，射流室内局部过浓，影响火焰传播，同时过高的喷射压力加剧了射流室内部的浓度不均匀性，射流火焰发展呈现不对称性。虽然主动喷射压力过高会导致射流火焰强度降低，但是由于更多的辅助喷射燃料（氢气）通过射流孔进入主燃室，在射流孔周围形成富氢混合气，射流火焰进入主燃室后先点燃这部分富氢混合气，燃烧速度加快，因此在相同曲轴转角下，主燃室的燃烧速度明显更快，燃烧温度也明显更高。图 7 示出了相同点火时刻三种主动喷射压力对应的射流室内混合气当量比分布，可以看出当主动喷射压力提高到 5.0 MPa 时，火花塞附近的混合气局部过浓，导致了过高主动喷射压力下射流火焰强度降低。

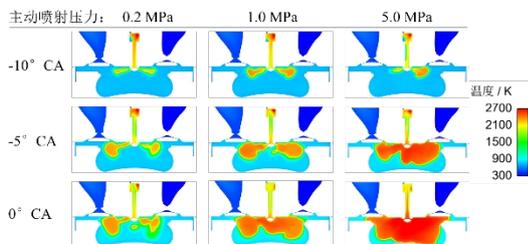


图 6 不同主动喷射压力下燃烧室的温度场

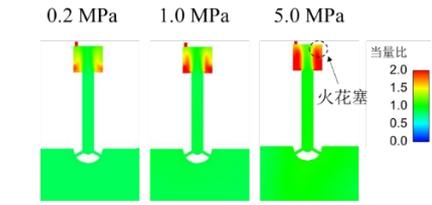


图 7 不同主动喷射压力下射流室的当量比分布

图 8 示出了主动喷射压力对燃烧持续期的影响。可以看出，随着主动喷射压力的提高，燃烧持续期缩短，这一方面是由于较高主动喷射压力能提高射流火焰强度，增大火焰贯穿距和火焰面积，更快速地引燃主燃室的混合气；另一方面，高压喷射使射流室的氢气通过射流孔进入主燃室，在射流孔附近形成富氢混合气，进一步加速了主燃室内的火焰传播。

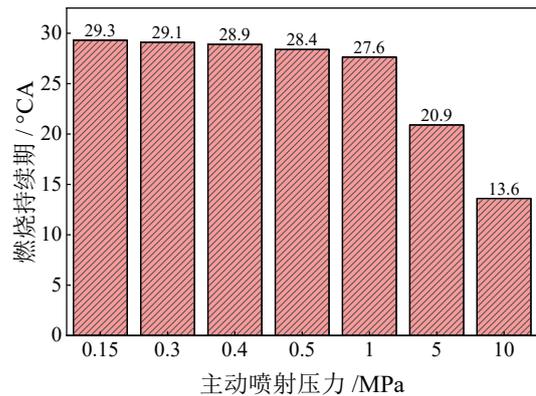


图 8 不同主动喷射压力下的燃烧持续期

图 9 示出了不同主动喷射压力下氢气和氮气的燃烧效率。可以看出，无论喷射压力，氢气和氮气的燃烧效率均高于 97%。随着主动喷射压力的提高，氢气的燃烧效率逐渐降低，喷射压力为 10 MPa 时明显降低，而氮气的燃烧效率则随着主动喷射压力的提高而升高，这是由于喷入燃烧室的氢气增多，混合气的化学反应活性提高，有助于氮气更充分燃烧，而氢气由于存在局部过浓，燃烧效率随着喷射压力提高而逐渐降低。

图 10 示出了不同主动喷射压力下发动机的指示热效率。可以看出，随着主动喷射压力的提高，发动机的指示热效率先升高后降低，在主动喷射压力为 1.0 MPa 时热效率达到最大值。这是因为主动喷射压力提高，混合气燃烧速度加快，燃烧持续期缩短，循环等容度提高，因此发动机的指示热效率提高。而进一步提高主动喷射压力，一方面由于氢气局部过浓导致氢气燃烧效率降低，另一方面，由于点火时刻固定在  $-14^\circ$  CA ATDC，因此燃烧相位

过于提前，发动机指示热效率降低。因此为了得到更高的发动机热效率，主动喷射压力不能过高，避免局部混合气过浓，同时也要匹配合适的点火时刻，优化燃烧相位。

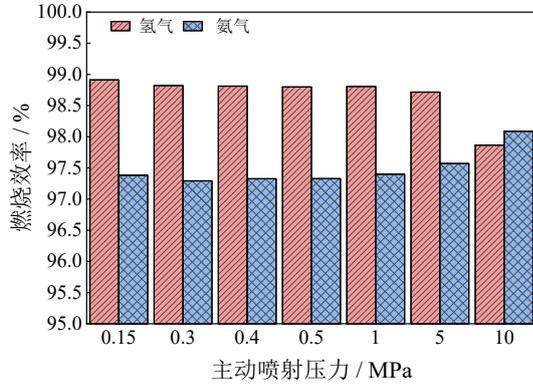


图9 不同主动喷射压力下氢气和氨气的燃烧效率

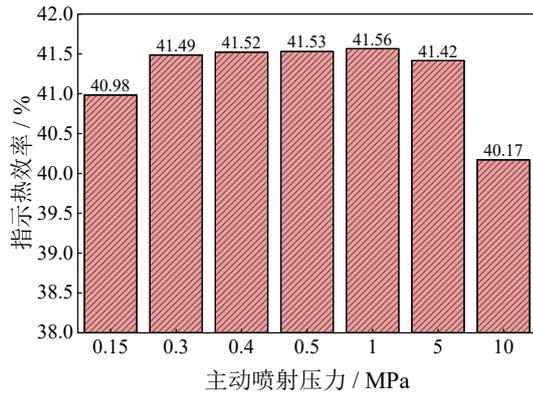


图10 不同主动喷射压力下发动机指示热效率

### 2.3 高压比下不同掺氢率的燃烧特性

提高压缩比能够增强高掺氢率条件下氢氨发动机的燃烧性能，因此在高压比条件下，进气的掺氢率可适当降低，控制发动机热负荷。

图11示出了高压比(22)条件下掺氢率对主燃室压力和放热率的影响，其中发动机采用主动射流点火模式，主动喷射燃料为氢气，喷射压力为1.0 MPa，喷射脉宽为 $-10^{\circ}$  CA，点火时刻为 $-14^{\circ}$  CA ATDC。进气道为氨氢预混合气，氢气的比例依次设置为0%、5%、10%、15%和20%。可以看出，在相同的点火时刻下，随着掺氢率的增大，缸内峰值压力和放热率提高，燃烧相位提前。当进气道混合气中氢气比例为0%时，发动机的后燃现象严重，这会导致发动机热效率降低，随着掺氢率增大，后燃问题减轻。这说明在进气道中掺混一定比例的氢气，可以加快混合气的燃烧速度，对发动机热效率的提高有促进作用。

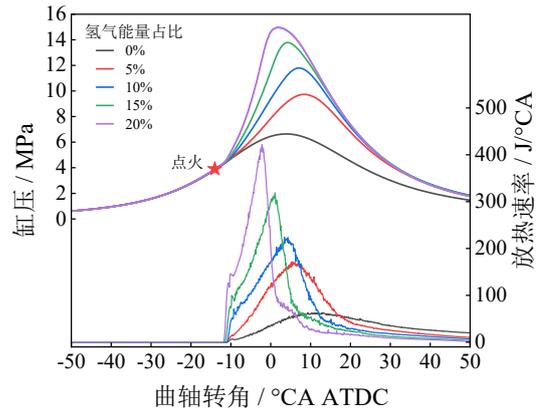


图11 不同掺氢率下燃烧室压力和放热速率

图12示出了不同掺氢率下燃烧室的温度场分布。可以看出，当氢气比例为0%时，射流火焰的温度较低，贯穿距离短且呈不对称发展趋势，导致主燃室混合气燃烧速度慢。随着氢气比例提高，射流火焰贯穿距变长且温度提高，更快速更稳定地引燃主燃室的混合气，并且由于主燃室的混合气中掺氢率较高，因此主燃室的燃烧速度明显提升，射流火焰未出现明显的不对称发展现象，有利于缸内混合气整体快速燃烧。

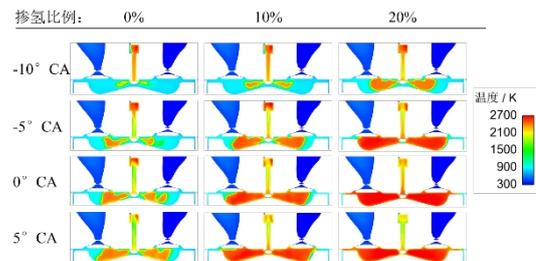


图12 不同掺氢率下燃烧室温度场

图13和图14分别示出了掺氢率对燃烧相位和燃烧持续期的影响，其中CA10、CA50、CA90分别表示缸内混合气燃烧放热量达到总放热量的10%、50%和90%时对应的曲轴转角。可以看出，在相同的点火时刻下，随着进气道混合气中掺氢率的提高，燃烧相位逐渐提前，燃烧持续期逐渐缩短，混合气燃烧速度加快。在未掺氢时，发动机燃烧相位过于滞后，燃烧持续期过长，燃烧不稳定。掺氢率为20%时，虽然燃烧持续期缩短，但是燃烧相位提前过多，CA50在上止点之前，同样不利于发动机热效率提高。

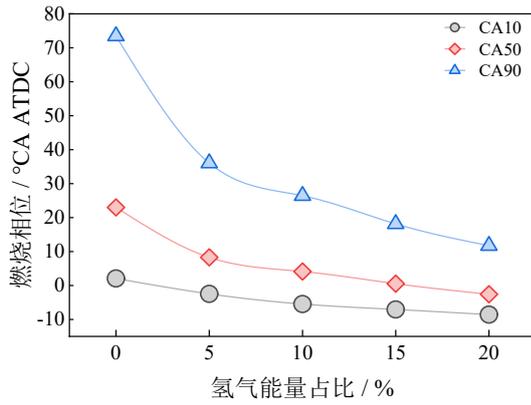


图 13 掺氢率对燃烧相位的影响

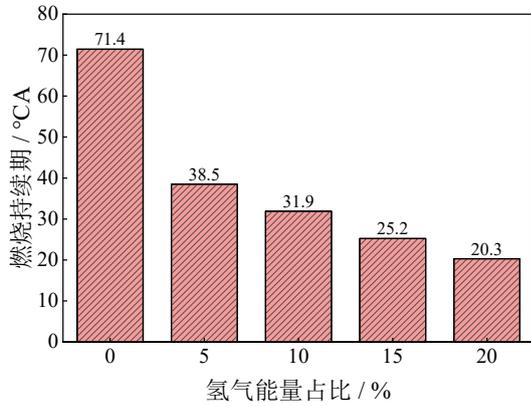


图 14 掺氢率对燃烧持续期的影响

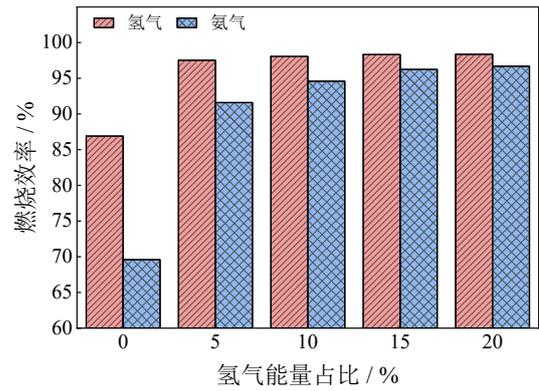


图 15 不同掺氢率下的燃烧效率

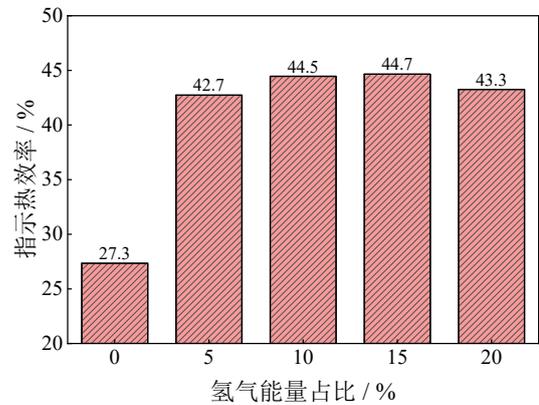


图 16 不同掺氢率下的发动机指示热效率

图 15 示出了不同掺氢率下氨气和氢气的燃烧效率。可以看出，未掺氢时，氢气和氨气的燃烧效率均很低，这是由于氨气的化学反应活性低，低的射流火焰强度使射流火焰进入主燃室后难以引燃主燃室混合气，导致氢气和氨气的燃烧效率均不高，氨气的燃烧效率甚至低于 70%。当掺氢率为 5% 时，氢气的燃烧效率提高至 97.5%，而氨气的燃烧效率也提高至 91.6%。进一步增加掺氢率，氢气的燃烧效率基本不变，而氨气的燃烧效率逐渐升高，混合气以氨气为主，因此混合气整体的燃烧效率持续提升，这有利于提高发动机热效率。

图 16 示出了掺氢率对发动机指示热效率的影响。可以看出，随着掺氢率提高，指示热效率先升高后降低，在掺氢率为 15% 时，热效率达到最高 44.7%，随着掺氢率继续升高，指示热效率降低。这是由于适当提高掺氢率能够提高总燃烧效率，提前燃烧相位，缩短燃烧持续期，提高燃烧等容度，但过高的氢气比例使燃烧相位过于提前，总燃烧效率变化较小，导致指示热效率降低，因此，高掺氢率工况，应适当推迟点火提前角，维持高热效率。

### 3 结论

本文基于氨氢射流点火单缸发动机模型进行三维数值模拟，研究了主动/被动射流点火模式、发动机压缩比、主动喷射压力和掺氢率对氨氢发动机燃烧特性的影响，得到如下结论：

(1) 主动射流点火可以显著提升高掺氢率工况下氨氢发动机的点火能量和燃烧速度，而被动射流点火的高掺氢率工况，无论压缩比高低，发动机均无法正常运转。

(2) 提高主动喷射压力能够加速主燃室混合气燃烧，提高指示热效率。但主动喷射压力过高，会导致射流室内混合气局部过浓，抑制射流室内火焰传播，降低射流火焰强度。

(3) 高压压缩比、主动射流点火模式下，发动机可在更高的掺氢率条件下稳定工作，进气道中 5% 的掺氢率即可使缸内混合气快速燃烧。

(4) 提高掺氢率可加速缸内混合气燃烧，提高氨气和氢气的燃烧效率，进而提高指示热效率。相同工况下，相较于低压压缩比，高压压缩比氨氢主动射流点火发动机的指示热效率提高了 3.1 个百分点。

**参考文献:**

- [1] Verhelsf S , Wallner T . Hydrogen-fueled internal combustion engines[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2009, 35(6):490-527.
- [2] 帅石金, 王志, 马骁, 等. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(4):23.
- [3] Leng X Y, Huang H Q, Ge Q Q, et al. Effects of hydrogen enrichment on the combustion and emission characteristics of a turbulent jet ignited medium speed natural gas engine: A numerical study [J]. Fuel, 2021, 290.
- [4] Morch C S, Bjerre A, Schramm J et al. Ammonia hydrogen mixtures in an SI engine: engine performance and analysis of a proposed fuel system [J]. Fuel, 2011,90(2):854-864.
- [5] Frigo S, Gentili R. Analysis of behavior of a 4-stroke SI engine fueled with ammonia and hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3):1607-1615.
- [6] Lhuillier C, Brequigny P, Mounaim C et al. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions [J]. Fuel, 2020, 269.
- [7] Mounaim C, Brequigny P, Houille S et al. Operating limits for ammonia fuel spark-ignition engine [J]. Energies, 2021,14(14).
- [8] Ji C W, Xin G, Wang S F et al. Effect of ammonia addition on combustion and emissions performance of a hydrogen engine at part load and stoichiometric conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(80):40143-40153.
- [9] Xin G, Ji C W, Yang J X, et al. Effect of ammonia addition on combustion and emission characteristics of hydrogen-fueled engine under lean-burn condition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(16):9762-9774.
- [10] Xin G, Ji C W, Yang J X, et al. Effect of different volume fractions of ammonia on the combustion and emission characteristics of the hydrogen fueled engine [J]. International