

氨/氢燃料射流点火船用发动机燃烧特性

魏胜利, 张绍邦, 严书哲, 张志成, 倪士栋

(江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏镇江, 212013)

摘要: 为突破氨在发动机中的燃烧局限性, 促进氨燃料高效快速燃烧, 提出了一种利用氢气射流火焰点燃氨燃料的方案。通过向主动式预燃室供给氢气, 进气道内预混氨/氢燃料, 实现氨在大缸径船用发动机上的稳定高效燃烧。基于数值模拟计算方法, 在改进了 Otomo 氨/氢机理基础上, 探究了进气温度、掺混氢气的质量分数和主燃室当量比对氨/氢燃料着火与燃烧特性的影响。研究结果表明, 射流火焰可以在主燃室形成燃烧所需的热力学环境和高活性热射流。在当量比为 0.4、不掺混氢气的条件下, 450 K 进气温度可以实现氨燃料发动机的稀薄燃烧, 在掺混氢气的质量分数较低时, 射流点火对火焰发展促进作用更显著; 掺混氢气的质量分数提高至 10.0% 可以使燃烧相位提前 18° , 但爆震风险增加; 在进气温度为 320 K 和掺混氢气的质量分数为 2.5% 条件下, 主燃室在当量比最小为 0.45 时可正常着火, 但随着更接近理论空燃比的燃烧, 指示热效率略有提升, 主动预燃室氢射流点火的燃烧模式在实现氨发动机高效快速燃烧方面具有良好的潜力。

关键词: 氨/氢燃料; 船用发动机; 预燃室; 射流点火; 燃烧特性

中图分类号: TK432 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202405012 **文章编号:** 0253-987X(2024)05-0124-09

Study on the Combustion Characteristics of Ammonia/Hydrogen Fuel Jet Ignition in Marine Engines

WEI Shengli, ZHANG Shaobang, YAN Shuzhe, ZHANG Zhicheng, NI Shidong

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: To break through the limitations of ammonia combustion in engines and promote efficient and rapid combustion of ammonia, a method for igniting ammonia fuel using a hydrogen jet flame is proposed. By supplying hydrogen to the active pre-combustion chamber and premixing ammonia/hydrogen fuel in the inlet tract, stable and efficient combustion of ammonia in a large bore marine engine is achieved. The effects of inlet gas temperature, hydrogen addition ratio and main combustion chamber equivalent ratio on the ignition characteristics of the ammonia-hydrogen fuel are investigated based on numerical simulation methods and improved Otomo ammonia/hydrogen mechanism. Results show that jet flames can develop the thermodynamic environment and high active heat jets required for combustion in the main combustion chamber. At an equivalence ratio of 0.4 and no hydrogen addition, thin combustion of ammonia-fueled engines can be achieved at an inlet temperature of 450 K. Jet ignition has a more significant effect on flame development at lower hydrogen addition ratios; increasing the hydrogen addition ratio to 10.0%

收稿日期: 2023-11-13。 作者简介: 魏胜利(1978—)男, 教授, 硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52206148); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2018]87号)。

网络出版时间: 2023-12-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231222.1130.002>

advances the combustion phase by 18° , but there is an increased risk of detonation; at an inlet temperature of 320 K and a hydrogen addition ratio of 2.5%, the main combustion chamber can ignite normally at a minimum equivalence ratio of 0.45, but there is a slight increase in indicated thermal efficiency as combustion approaches the theoretical air-fuel ratio. The combustion mode of active pre-combustion chamber hydrogen jet ignition shows promising potential for achieving efficient and fast combustion in ammonia engines.

Keywords: ammonia/hydrogen fuel; marine engine; pre-chamber; jet ignition; combustion characteristics

面对全球日益严峻的气候变化问题,各国积极响应,纷纷出台了碳中和时间表。在能源动力领域,学者们提出了各种减少碳排放的策略,例如引入低碳、零碳^[1-3]或碳中性燃料^[4-9]等,这些燃料作为主要或者辅助燃料参与燃烧,从而减少碳排放。

氢燃料是零碳燃料中最有前景的替代燃料之一。尽管热值仅约为柴油的 1/3,但由于较低的理论空燃比,可以在同样的进气量下提高氨气的喷射总量,提供更多的能量,能够满足船用动力特别是远洋船舶较大的功率输出需求。尽管当前氨燃烧面临火焰温度低、层流燃烧速度慢、点火能量高和燃烧极限窄等挑战,但作为氢能的优质载体,其可以实现在线裂解制氢。在减轻氢储运成本的同时,利用氢点火能量小、燃烧速度快、扩散性好等特点实现对氨火焰的强化。

射流点火是加快船用大缸径发动机火焰传播速度的优选方案,预燃室体积仅为主燃室的 5%,所需氢气流量小,在不另外附加储氢设备的情况下,氨气在线重整可以满足多种工况下缸内燃烧所需的氢气流量。Comotti 等^[10]在双缸火花点火发动机上进行了氨/氢燃烧实验,其中进气管中掺入的氢气由氨气裂解产生,展现了在点火发动机上使用氨/氢融合燃料的可行性。

稀薄燃烧具有减少气缸壁热损失、增加工作流体的绝热指数以及减少部分工况下泵气损失的优点,是未来船用气体燃料发动机提高热效率、减少 CO₂ 排放的最具吸引力的解决方案^[11-13]。然而,由于更稀薄条件下混合气的层流火焰速度降低,燃烧过程中火焰核生长和火焰传播速度减慢,这会导致更长的燃烧持续期、不完全燃烧和更高的周期变动,不利于发动机良好的性能表现。因此采用高能点火方案,尤其是在大缸径船舶发动机内,布置预燃室式射流点火系统以提高点火能量是一种较好的解决方案。可以减轻爆震风险并同时实现当量比为 0.4 附近的稀薄燃烧^[14]。同时,高能点火系统还可以缩短点火延迟期,允许更接近上止点(TDC)的点火正时,并可以更好地适应气流运动带来的混合气均匀性的变化^[15]。

目前对于氨在不同工况下燃烧特性的研究尚不

充分,氨在发动机领域的应用仍然面临各种挑战。为揭示氢气射流点火对大功率氨发动机燃烧与排放特性的影响,以预燃室式天然气发动机为原型,搭建了氢气射流点火氨燃料发动机的计算模型,模拟了不同进气温度、掺混氢气的质量分数和当量比下缸内流动、着火和燃烧产物的生成,借此为船用零碳燃料发动机系统研究提供借鉴。

1 模型建立及验证

1.1 三维模型

所提出的船用氨/氢燃料发动机射流点火燃烧系统如图 1 所示,氨气在进气道内预混进入主燃烧室,其当量比低于 1;氢气直喷进入预燃室,当量比为 1 左右,在火花塞点火后形成射流火焰引燃主燃烧室内的氨/氢混合气。

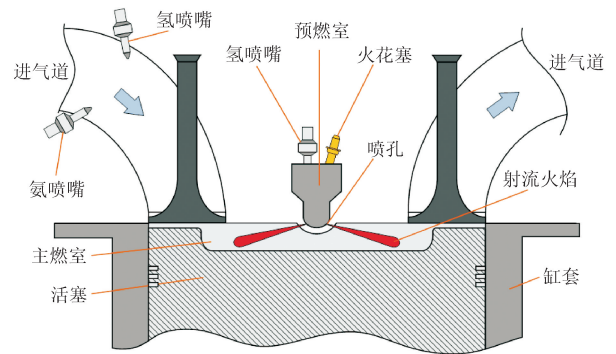


图 1 氨/氢射流点火发动机燃烧系统

Fig. 1 Ammonia/hydrogen jet ignition engine combustion system

本模拟研究以 6ACD320G 大功率船用中速天然气发动机为模型。将原机预燃室内的燃料喷嘴替换为氢气喷射系统,构建了主动式预燃室氢气射流火焰引燃氨气的燃烧系统。

发动机基本参数见表 1,图 2 给出了发动机的几何模型,模型涵盖了进排气道以及主/预燃烧室。预燃室上方布置了一个氢气喷嘴,预燃室容积为压缩余隙容积的 2%,通过 8 个直径为 2 mm 的射流通道与主燃烧室相连,射流方向与预燃室中轴呈 70°夹角。

表 1 发动机基本参数

Table 1 Basic parameters of the engine

参数	数值
缸径/mm	320
行程/mm	420
连杆长度/mm	920
压缩比	12.5
每缸气门数	4
标定功率/kW	2 430
标定转速/(r·min ⁻¹)	750

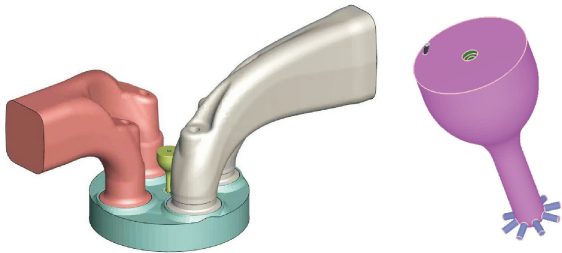


图 2 发动机的几何模型

Fig. 2 Geometry model of the engine

1.2 计算模型

将建立好的几何模型导入 Converge 软件中,选择标定转速(750 r/min)进行仿真。本文将进气上止点定义为 360°,计算了一个完整的工作周期(300°~1 020°),共计 720°,氢气喷射压力为 30 MPa,在发动机曲轴转角为 599°~615°范围内喷氢,点火时刻为 704°。计算的初始条件见表 2。

表 2 计算的初始条件

Table 2 Initial conditions for calculation

区域	温度/K	压力/MPa
进气道	320	0.38
排气道	695	0.35
预燃室	800	0.39
主燃室	707	0.30

采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对缸内流动进行描述、并用 SAGE 详细化学反应动力学求解器进行计算。采用了基于 Otomo 等^[16]的化学反应改进机理,该机理包含了 34 个组分和 286 步反应,利用零维模型对该机理进行了验证^[17],其缸压曲线以及平均温度曲线的试验值与模拟值吻合良好,可以较好地满足三维计算的需要。

为确保计算精度并合理考虑计算成本,采用局部网格自适应加密方法划分模拟计算网格。在进行网格无关性验证的基础上,确定了 10 mm×10 mm×10 mm 的基础尺寸并对三维模型整体进行了网格划

分,又以温度和流动速度两种指标对缸内进行了动网格自适应加密的设定,最后针对一些重要物理区域提高了固定加密等级。为精确捕捉火花电极附近的迅速而复杂的点火过程,在电火花电极处设置了 6 级球形区域的固定加密。预燃室喷孔处产生的分布式射流对发动机内流动和燃烧过程非常重要^[18],故在点火正时左右对产生分布式射流的几处柱状空间设置了 3 级固定加密。

1.3 模型验证

当前在大缸径主动预燃室式发动机上使用氢气射流引燃氨的研究欠缺,实验条件下氨燃料的应用难以展开,本研究首先在模拟中使用压缩天然气(CNG)作为燃料并将其缸内压力及放热率进行了对比,如图 3 所示。模拟计算所得结果与实验结果^[19]在压缩和燃烧阶段一致性良好,数值差异小于 3%,可以认为本模型设定准确。

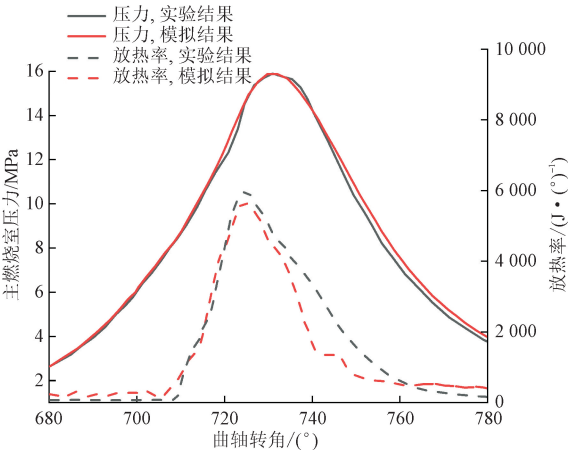


图 3 气缸压力和放热率模拟与实验结果的对比

Fig. 3 Comparison of simulated and experimental cylinder pressures and exothermic rates

1.4 计算方案

为探索氢气射流点火应用于大缸径氨发动机的着火特性,首先对原机缸内燃烧进行了模拟,对比主燃烧室内压力和放热率曲线,验证了模型的可行性。以此为基础,在进气道和预燃室中的燃料分别替换为氨和氢,进气温度从 350 K 到 500 K,每隔 50 K 为一个算例;在进气道内设置氨/氢混合气,在氢气质量分数为 2.5%、5.0%和 10.0%,主燃烧室当量比为 0.4、0.5 和 0.6 的条件下进行计算。

2 计算结果分析

2.1 氨预混合气进气温度对点火特性的影响

为单独了解纯氨燃料的着火特性,本节进气道

内进入的是纯氨与空气的混合物,未混合氢气。

改变反应过程的温度是最常见的强化传热传质手段。图 4 和图 5 分别为不同进气温度条件下主燃烧室压力及放热率曲线和预燃室压力曲线,在进气温度为 350 K 和 400 K 时,缸内温度和压力没有大幅提高,放热率曲线表明氢气射流只实现了主燃烧室内氨的局部燃烧。进气温度提高到 450 K 时,可实现充分燃烧,继续提高到 500 K 时,燃烧效率显著提高。

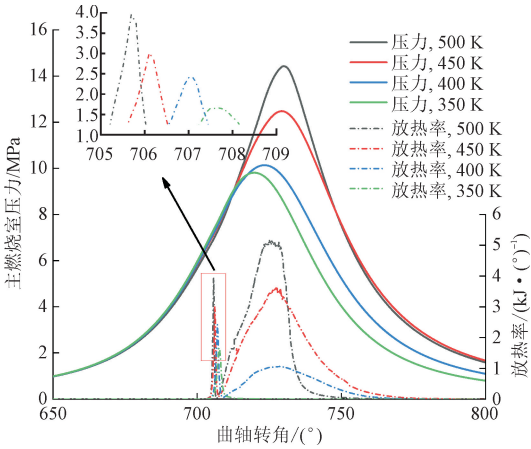


图 4 不同进气温度下主燃烧室缸内压力和放热率
Fig. 4 In-cylinder pressures and heat release rates of the main chamber at different inlet temperatures

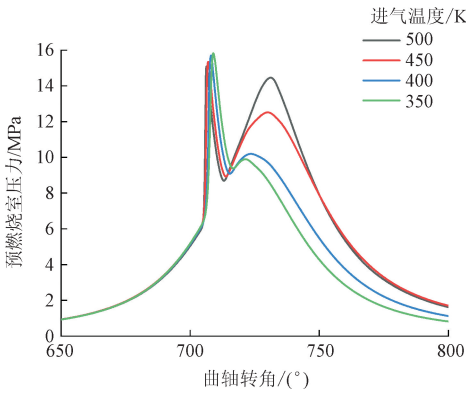


图 5 不同进气温度下预燃室内压力
Fig. 5 Pressures in the pre-combustion chamber at different inlet temperatures

图 6 展示了主预燃室压力差,在点火后,预燃室内压力先于主室升高,在 705°附近超过主燃烧室,预燃室内的不完全燃烧混合气在压力差的作用下形成高活性热射流,通过 8 个射流通道开始喷入主燃烧室。随着氢混合气的燃烧和热射流的喷射,预燃室压力逐渐下降,在 712°附近主预燃烧压力差为 0;随后,主燃烧室内氨混合气燃烧加剧,压力上升超过预燃室;在做功行程中,预燃室的压力相位略晚于主

燃烧室,但二者压力都在达到峰值后下降且数值相近。

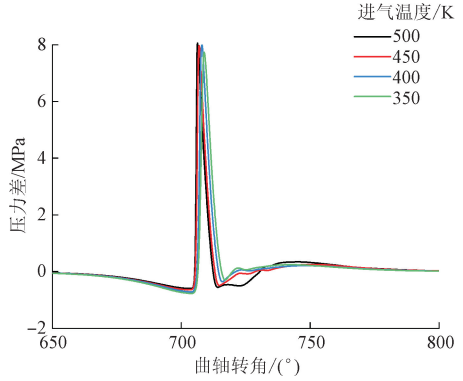


图 6 主燃烧室与预燃室压力差
Fig. 6 Difference in pressure between main combustion chamber and pre-combustion chamber

在进气温度为 450 K 和 500 K 条件下,预燃室射流都成功诱导了主燃烧室氨气的燃烧,更高的进气温度下,放热更迅速,放热率峰值更高,初步显现了氢射流点火模式促进氨燃烧的潜力。

2.2 氨预混合气掺混氢气的质量分数对点火特性的影响

由于纯氨燃料点火燃烧困难,大部分对氨内燃机的研究均在双燃料系统中进行,利用其他高反应活性燃料进行辅助,实现燃烧室内氨的稳定燃烧。Mørch 等^[20]的研究结果表明,氢气掺混比 $w(H_2)$ 在 10% 附近,发动机的效率和平均有效压力会达到最大值,过高的掺氢量会导致热损失增加。本节在进气温度为 500 K 条件下,分别讨论了 $w(H_2)$ 分别为 2.5%、5.0% 和 10.0% 对燃烧的影响情况。

图 7 给出了不同 $w(H_2)$ 下缸内放热率曲线,3 种条件下累计放热量相近,放热率峰值随着 $w(H_2)$ 的提高而增大,并且峰值出现的相位提前。此外,此

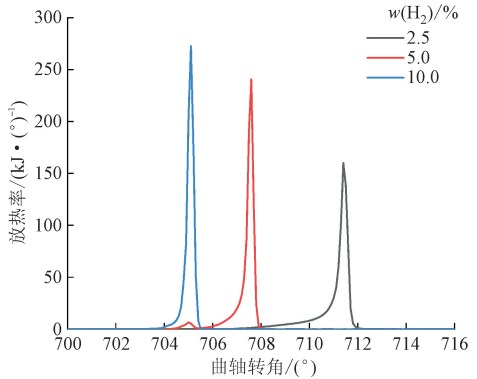


图 7 不同 $w(H_2)$ 下缸内放热率
Fig. 7 Exothermic rates in cylinder with different hydrogen doping ratios

燃烧模式下放热率呈现先缓后急的特征,不同于传统柴油机燃烧后先急后缓和汽油机燃烧后产生近似左右对称的放热特征。这是由于氨气的低反应活性,在缸内燃烧后期,在氢气热射流的热传导和热辐射作用下,部分氨气燃烧改善了缸内未燃混合气的热力学条件,后段燃烧才得以加速,放热率急剧上升。

图8给出了不同掺混氢气的质量分数时缸内温度分布云图,在掺混氢气的质量分数为2.5%时可以清晰地观察到射流火焰发展,缸内的火焰主要由

高速湍流火焰射流驱动。随着 $w(\text{H}_2)$ 的增加,缸内的燃烧相位提前,已燃区域的温度也有所增加,尽管氨燃料发动机中掺氢可能增加热力型 NO_x 排放,但是显著增加了火焰温度和火焰传播速度。另外,在705°和706°时, $w(\text{H}_2)$ 为10.0%和5.0%的方案下在缸套区域分别表现出了局部高温,这是末端氨/氢混合气在高进气温度下发生异常自燃产生的^[21],说明在提高氨进气温度后,过高的氢气掺混比会导致缸内的爆震倾向。

图9为不同 $w(\text{H}_2)$ 下缸内的速度场分布,主燃

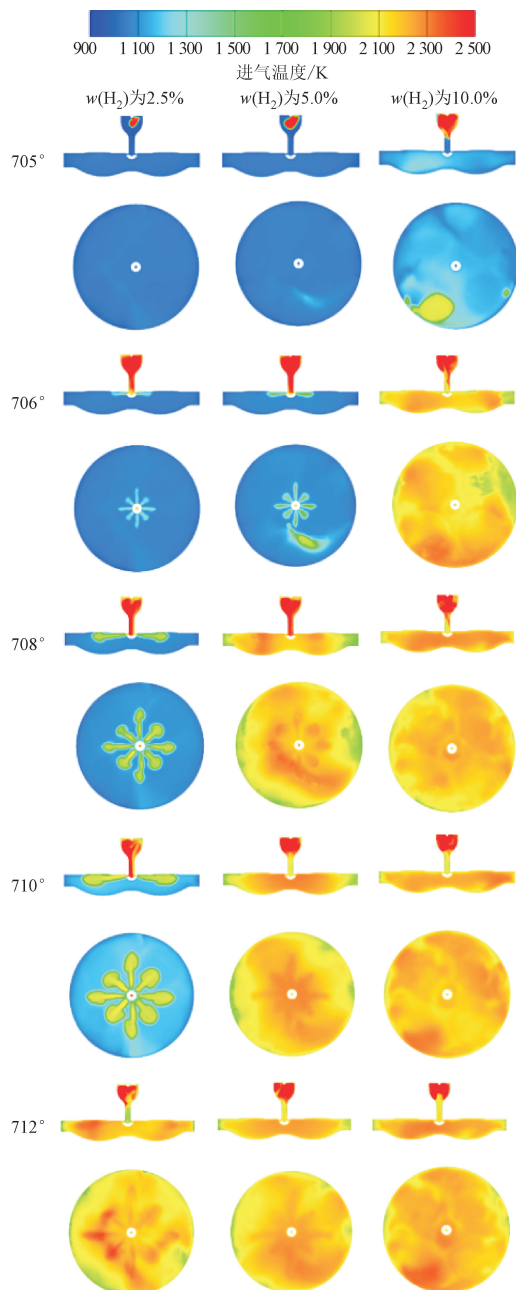


图8 不同 $w(\text{H}_2)$ 时缸内温度分布

Fig. 8 Temperature distribution in the cylinder at different hydrogen doping ratios

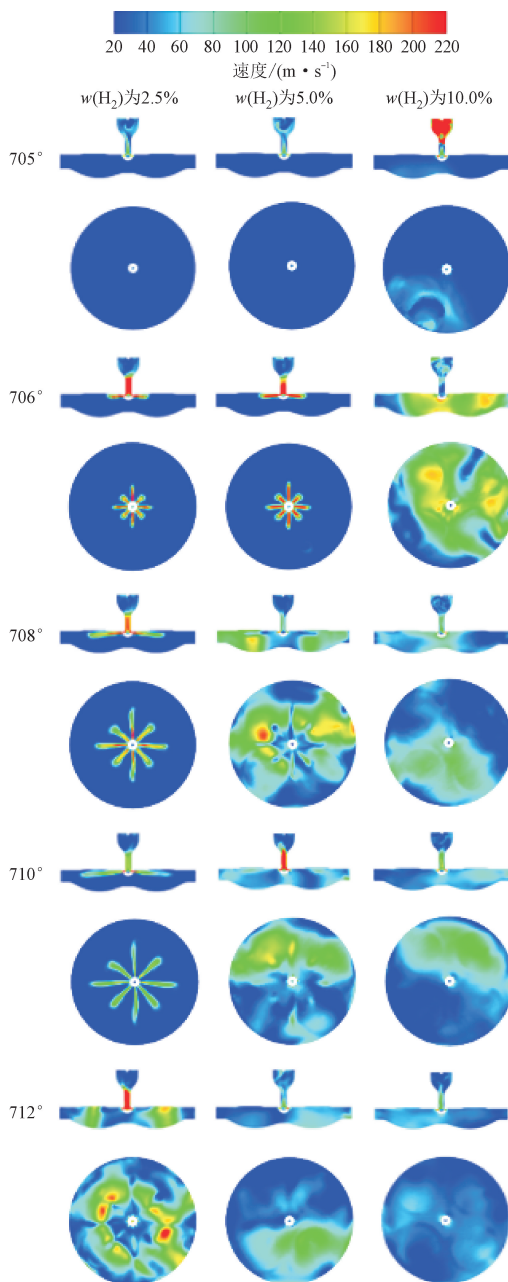


图9 不同 $w(\text{H}_2)$ 时缸内速度场分布

Fig. 9 Velocity field distribution in the cylinder at different hydrogen doping ratios

烧室较高的 $w(\text{H}_2)$ 对预燃室燃烧依旧有着显著影响。在压缩阶段,活塞上行时将主燃烧室内更高活性的氨/氢混合气压入预燃室,主燃烧室 $w(\text{H}_2)$ 为 10.0% 的方案最先在预燃室出现高反应活性物的高速运动。预燃室中燃烧的中间产物(如 O、OH 等活性自由基)在预燃室内迅速升高的压力驱动下,与火焰一起,沿着喷孔轴线方向快速传播,在主燃烧室内形成高速湍流射流。不只是预燃室火焰向主燃室的传热加速了氨气的燃烧,O 和 OH 等自由基对促进氨火焰发展与传播更为重要^[22]。

4 种掺混氢气的质量分数下热效率分别为 45.42%、48.47%、49.03% 和 50.39%,其中相较于主燃室纯氨气燃烧,在主燃室掺氢的情况下/热效率提升明显,并随着 $w(\text{H}_2)$ 的增加逐步提高。

2.3 氨预混合气 $w(\text{H}_2)$ 对排放的影响

图 10 展示了不同 $w(\text{H}_2)$ 时的 NO_x 累计排放量。在掺氢方案下, NO_x 的生成可以分为两个阶段,一是在缸内混合气快速燃烧阶段, NO_x 生成速率较快;另一个是燃烧后期, NO_x 生成速度较慢。前者是含有 N 元素的 NH_3 与混合气中的氧充分反应,形成以燃料型为主导的 NO_x ;后者是燃烧结束之后,缸内高温条件下热力型为主导的 NO_x 生成,伴随着做功冲程活塞向下运动,燃烧室内混合气膨胀,温度降低,排放物生成速率也显著下降。

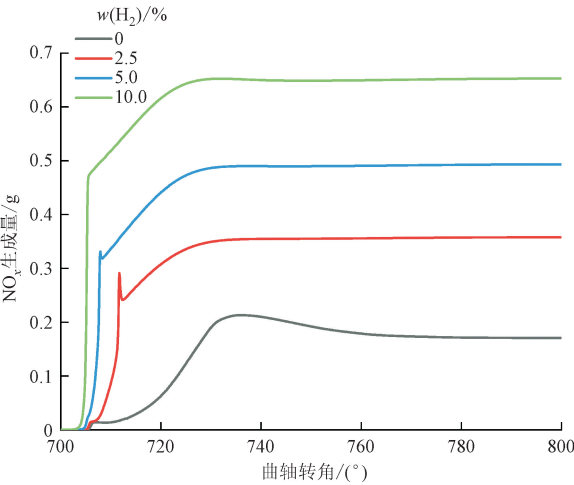


图 10 不同 $w(\text{H}_2)$ 时 NO_x 生成量随曲轴转角的变化
Fig. 10 NO_x generation as a function of crankshaft angle for different mass fractions of doped hydrogen

随着 $w(\text{H}_2)$ 的增加, NO_x 生成量的变化趋势与掺氢天然气发动机中的趋势^[23]一致,但是氨燃料发动机中 NO_x 的排放要远远高于天然气发动机。在不同 $w(\text{H}_2)$ 下,由于主燃烧室内的稀薄燃烧条件,

混合气中氧气含量充足,随着 $w(\text{H}_2)$ 的提高,火焰温度以及已燃区域的温度升高,导致 NO_x 生成量也几乎呈线性趋势升高,达到不掺氢方案下的 3.8 倍。

2.4 氨预混合气当量比对点火特性的影响

在进气温度 320 K、 $w(\text{H}_2)$ 为 2.5% 的条件下,研究了不同氨预混合气当量比的缸内燃烧过程,缸内压力与放热率曲线如图 11 所示。

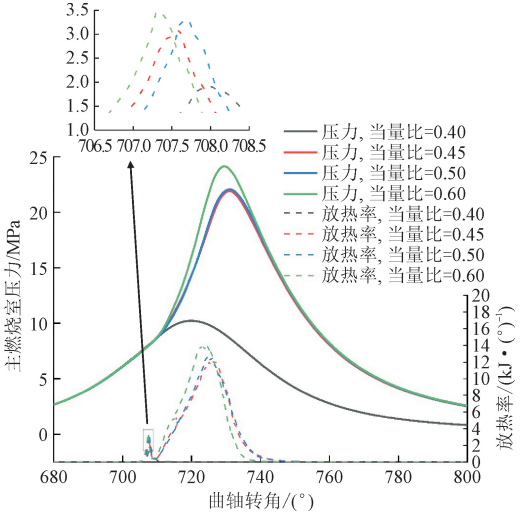


图 11 不同氨预混合气当量比的缸内压力与放热率
Fig. 11 In-cylinder pressures and heat release rates for different ammonia premix equivalence ratios

在 320 K 进气温度下,当量比为 0.4 的工况未能成功着火,随着氨预混合气当量比增加,燃烧重心前移,点火延迟期略有缩短,放热率增加,爆发压力上升。在稀薄燃烧工况下,随着预混合气当量比的增加,更高的氢气质量分数提高了混合气的化学反应活性,氢气对燃烧的主导作用更显著,但是在成功着火的几种当量比下,缸内爆压最高达到 24 MPa,这对发动机机体机械强度提出了很高的要求。

图 12 展示了氨混合气不同当量比下缸内的温度分布情况。结合图 8 易见,与 Chinnathambi 等^[24]的研究结果一致,预燃室内的高温较热区域无法渗透到主室中。因此,高温边界被限制在预燃室内,主室反应在较低温度下进行。Distaso 等^[25]将从预燃室喷射到主室的射流分成了 3 个阶段:第 1 阶段是冷喷射阶段,未燃混合物在已燃混合物的压力下离开预燃室;第 2 阶段中高温中间产物从预燃室喷出,然后点燃主室的混合物;第 3 阶段的特征是喷出混合物的温度显著降低。

在当量比为 0.4 的工况下,射流在 710°左右形成,但是在射流发展过程中出现了局部淬熄,并进一步导致了整体淬熄,缸内未能成功着火。这是由于

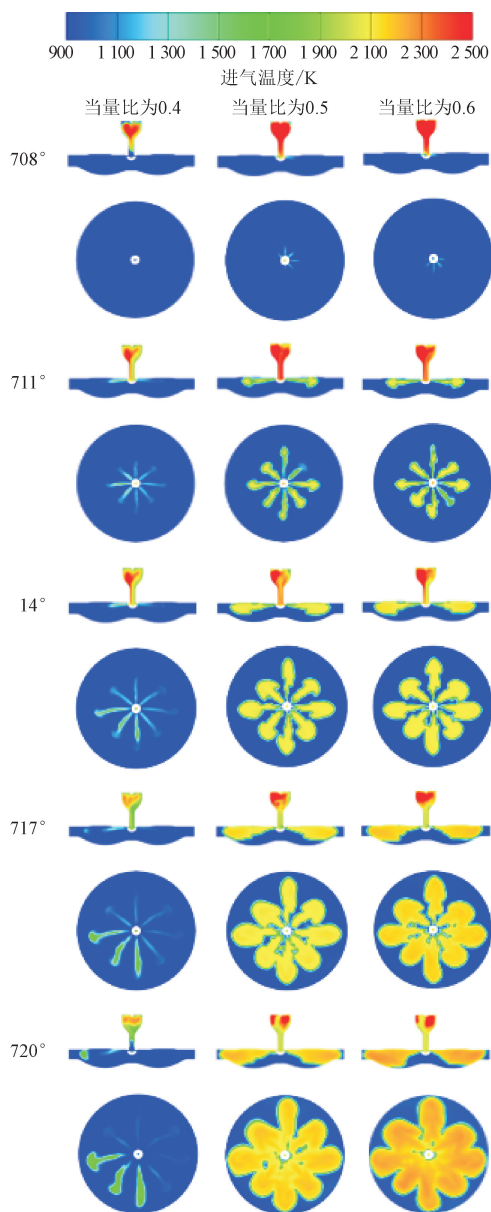


图 12 不同当量比时缸内温度分布

Fig. 12 In-cylinder temperature distribution at different equivalence ratios

在低温和不适的当量比条件下,预燃室的燃烧产物与主室中冷的未燃烧混合物的强烈混合引起的^[26],超稀薄燃烧情况下射流边界的热化学和湍流条件阻碍了火焰的传播。

Yamamoto 等^[27]在开展 OH 自由基对层流火焰速度影响的研究中发现,OH 自由基质量分数与火焰传播速率线性相关。图 13 给出了不同当量比下缸内 OH 自由基质量分数。当量比为 0.4 的条件下,缸内 OH 自由基质量分数较低,火焰只在局部较高区域传播。随着当量比提高,缸内 OH 自由基

质量分数大于 2×10^{-2} 的高浓度区域显著增加,并进一步加速化学反应中的基元反应。结果显示,在氨/氢射流点火条件下,提高当量比同样也增加了 OH 等自由基质量分数,进而加速缸内火焰传播。

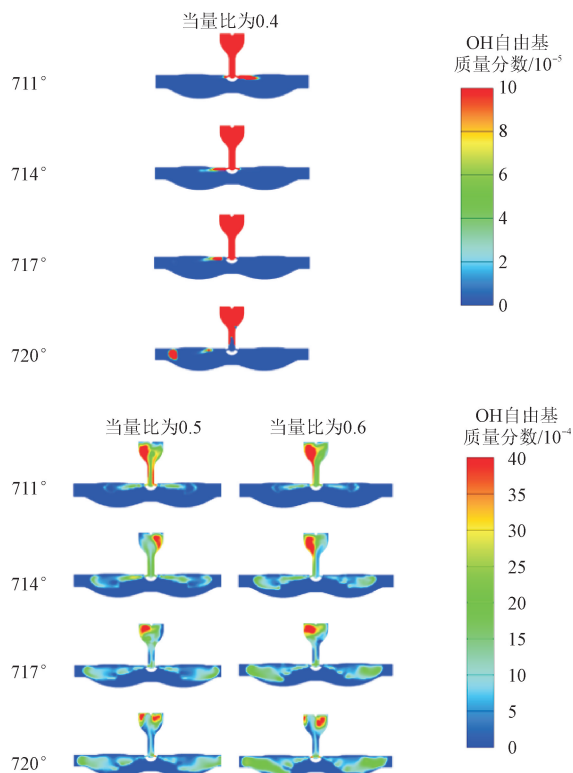


图 13 不同当量比时缸内 OH 自由基质量分数

Fig. 13 Mass fraction of OH radicals in the cylinder at different equivalence ratios

当量比为 0.6 较 0.5 的工况下表现出了更高的射流温度,并呈现出更高的压升率,这也验证了祝佩^[28]等的研究。当量比为 0.5 和 0.6 条件下指示热效率分别为 51.74% 和 51.38%,在更接近当量比 1 燃烧的条件下,射流外部的热力学和湍流条件更有利于火焰的传播,但考虑到高当量比会导致更高的缸压峰值,因此在初始燃烧条件时需在发动机机械强度允许范围之内选择更接近当量比的燃烧。

3 结 论

本文提出了船用氨/氢燃料发动机氢气射流点火方案。基于数值模拟计算方法,探究了进气温度、掺混氢气的质量分数和主燃室当量比对氨/氢燃料着火特性的影响,主要结论如下:

(1) 氢气射流点火模式对促进氨气的着火,加强氨气高效快速燃烧有着显著作用,进气温度为 450 K 的情况下可以实现氨燃料发动机在稀薄工况下

的正常燃烧。

(2)提高主燃烧室内氢气掺混比可以进一步提高预燃室的高能点火能量,提高主燃室内燃料反应活性并增强预燃室氢气热射流对主燃烧室火焰发展的促进作用,使得燃烧相位提前 18° 。同时在稀薄燃烧工况下,提高主燃烧室内燃料掺混氢气的质量分数会影响火焰温度及已燃区域的温度升高,导致 NO_x 排放增大至不掺氢方案下的 3.8 倍。

(3)在 320 K 进气温度和 2.5% 掺混氢气的质量分数时,主燃室可以在最小当量比为 0.45 的情况下正常着火,当量比为 0.5 条件下,指示热效率可以达到 51.74%,氢射流点火的燃烧模式在实现氨发动机燃烧方面具有良好的潜力。

参考文献:

- [1] BAO Lingzhi, SUN Baigang, LUO Qinghe, et al. Experimental study of the polytropic index of the compression stroke for a direct injection hydrogen engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(52): 28196-28203.
- [2] LIU Xinyu, SRNA A, YIP H L, et al. Performance and emissions of hydrogen-diesel dual direct injection (H2DDI) in a single-cylinder compression-ignition engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(1): 1302-1314.
- [3] AL-ABOOSI F Y, EL-HALWAGI M M, MOORE M, et al. Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2021, 31: 100670.
- [4] VARUVEL E G, MRAD N, TAZEROUT M, et al. Experimental analysis of biofuel as an alternative fuel for diesel engines [J]. *Applied Energy*, 2012, 94: 224-231.
- [5] ODZIEMKOWSKA M, MATUSZEWSKA A, CZARNOCKA J. Diesel oil with bioethanol as a fuel for compression-ignition engines [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 1264-1272.
- [6] GONG Changming, LIU Zilong, SU Hang, et al. Effect of injection strategy on cold start firing, combustion and emissions of a LPG/methanol dual-fuel spark-ignition engine [J]. *Energy*, 2019, 178: 126-133.
- [7] KURCZYNSKI D, ŁAGOWSKI P. Performance indices of a common rail-system CI engine powered by diesel oil and biofuel blends [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2019, 92(6): 1897-1913.
- [8] HUANG Guan, LI Zilong, ZHAO Wenbin, et al. Effects of fuel injection strategies on combustion and emissions of intelligent charge compression ignition (ICCI) mode fueled with methanol and biodiesel [J]. *Fuel*, 2020, 274: 117851.
- [9] MENG Xiangyu, ZHANG Mingkun, ZHAO Chenhan, et al. Study of combustion and NO chemical reaction mechanism in ammonia blended with DME [J]. *Fuel*, 2022, 319: 123832.
- [10] COMOTTI M, FRIGO S. Hydrogen generation system for ammonia-hydrogen fuelled internal combustion engines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(33): 10673-10686.
- [11] SERRANO D, ZACCARDI J M, MÜLLER C, et al. Ultra-lean pre-chamber gasoline engine for future hybrid powertrains [C]//14th International Conference on Engines & Vehicles. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2019: 607-622.
- [12] TANG Qijun, LIU Jingping, ZHAN Zhangsong, et al. Influences on combustion characteristics and performances of EGR vs. lean burn in a gasoline engine [C]//SAE 2013 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2013: 2013-01-1125.
- [13] SCARCELLI R, MATTHIAS N, WALLNER T. Numerical investigation of combustion in a lean burn gasoline engine [C]//11th International Conference on Engines & Vehicles. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2013: 2013-24-0029.
- [14] WANG Yang, ZHOU Xiaohu, LIU Long. Theoretical investigation of the combustion performance of ammonia/hydrogen mixtures on a marine diesel engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(27): 14805-14812.
- [15] WANG Yang, ZHOU Xiaohu, LIU Long. Feasibility study of hydrogen jet flame ignition of ammonia fuel in marine low speed engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(1): 327-336.
- [16] OTOMO J, KOSHI M, MITSUMORI T, et al. Chemical kinetic modeling of ammonia oxidation with improved reaction mechanism for ammonia/air and ammonia/hydrogen/air combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(5): 3004-3014.
- [17] YU Zhiqing, LI Xiang, ZHAO Jianhui, et al. Development of ammonia reaction kinetic mechanism under engine-relevant conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(1): 728-741.
- [18] 冷先银, 何东泽, 何志霞, 等. 点燃型预燃室在大缸

- 径甲醇发动机上的应用 [J]. 内燃机工程, 2021, 42(5): 60-69.
- LENG Xianyin, HE Dongze, HE Zhixia, et al. Application of ignition pre-chamber in a large-bore methanol engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2021, 42(5): 60-69.
- [19] 冷先银, 葛琪琪, 何志霞, 等. 预燃室式天然气掺氢发动机燃烧及排放模拟 [J]. 内燃机学报, 2021, 39(1): 26-33.
- LENG Xianyin, GE Qiqi, HE Zhixia, et al. Numerical study on the combustion and emission characteristics of a pre-chamber engine fueled with hydrogen enriched compressed natural gas [J]. Transactions of CSICE, 2021, 39(1): 26-33.
- [20] MØRCH C S, BJERRE A, GØTTRUP M P, 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.
- [21] 葛琪琪. 预燃室式天然气掺氢发动机燃烧及排放特性的模拟研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [22] SAGAR S M V, AGARWAL A K. Knocking behavior and emission characteristics of a port fuel injected hydrogen enriched compressed natural gas fueled spark ignition engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 42-50.
- [23] 常铭, 苗海燕, 刘岩, 等. 高温高压下掺氢天然气的燃烧特性 [J]. 内燃机学报, 2010, 28(6): 481-487.
- CHANG Ming, MIAO Haiyan, LIU Yan, et al. Combustion characteristics of hydrogen-enriched natural gas under elevated temperature and pressure [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(6): 481-487.
- [24] CHINNATHAMBI P, BUNCE M, CRUFF L. RANS based multidimensional modeling of an ultra-lean burn pre-chamber combustion system with auxiliary liquid gasoline injection [C]//SAE 2015 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2015: 2015-01-0386.
- [25] DISTASO E, AMIRANTE R, CASSONE E, et al. Experimental and numerical analysis of a pre-chamber turbulent jet ignition combustion system [C]//14th International Conference on Engines & Vehicles. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2019: 2019-24-0018.
- [26] KYRTATOS P, BARDIS K, BOLLA M, et al. Transferability of insights from fundamental investigations into practical applications of prechamber combustion systems [C]//Ignition Systems for Gasoline Engines: 4th International Conference. Tübingen, Germany: Expert-Verlag, 2018: 442-459.
- [27] YAMAMOTO K, OZEKI M, HAYASHI N, et al. Burning velocity and OH concentration in premixed combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1227-1235.
- [28] 祝佩, 田华, 孟相宇, 等. 射流温度对高温气体射流控制压缩着火的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1729-1735.
- ZHU Pei, TIAN Hua, MENG Xiangyu, et al. Effects of jet temperature on high temperature gas jet controlled compression ignition [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(7): 1729-1735.

(编辑 武红江)