

预燃室喷孔参数对船用氨/氢射流点火 发动机燃烧特性的影响

曾亚杰¹, 魏胜利¹, 严书哲¹, 于志清², 李元辰¹, 敖成成¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江;

2. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对主动射流点火系统中预燃室结构参数对射流和燃烧特性的影响规律尚未明晰的问题, 构建了耦合 RANS RNG 湍流模型与氨/氢燃料化学反应动力学机理的船用射流点火发动机数值模型, 探究了预燃室喷孔参数对预燃室内混合气发展过程的影响规律, 阐明了不同喷孔参数影响下发动机的燃烧特性。研究表明: 喷孔直径对预燃室混合气质量与射流能量传递效率影响显著, 直径过小易因节流效应产生淬熄现象, 直径过大会稀释混合气, 降低燃烧效率; 喷孔个数直接影响着射流火焰的传播与相互作用, 过少时火焰传播不充分, 过多则导致射流相互干扰、能量衰减和穿透速度下降; 喷孔夹角过小或过大均会导致火焰分布不均或传播速度下降; 对于本研究中的预燃室结构, 选取喷孔直径为 3 mm、喷孔个数为 8、喷孔夹角为 140° 的方案时, 射流火焰能量最高, 主燃室单位曲轴转角下的放热率峰值达 22.7 kJ, 燃烧效率最高。该研究可为船用发动机预燃室射流点火系统的优化设计提供理论依据及实际参考。

关键词: 船用发动机; 氨/氢燃料; 预燃室; 喷孔参数; 射流火焰

中图分类号: TK432 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202606015 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0177-11

Influence of Pre-Chamber Nozzle Parameters on the Combustion Characteristics of a Marine Ammonia/Hydrogen Jet Ignition Engine

ZENG Yajie¹, WEI Shengli¹, YAN Shuzhe¹, YU Zhiqing², LI Yuanchen¹, AO Chengcheng¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: As the influence law of the pre-chamber's structural parameters on jet and combustion characteristics in the active jet ignition system remains unclear, a numerical model for a marine jet ignition engine was established by coupling the RANS RNG turbulence model with a chemical reaction kinetics mechanism of ammonia/hydrogen fuel. With this model, the influence law of pre-chamber nozzle parameters on the mixture development process inside the pre-chamber was explored, and combustion characteristics of the engine under different nozzle parameters were clarified. Study results showed that the nozzle diameter significantly affected the mass of the mixture in the pre-chamber and the efficiency of jet energy transfer, that is, too small diameters

收稿日期: 2025-09-04。 作者简介: 曾亚杰(1999—), 男, 硕士生; 魏胜利(通信作者), 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)。

网络出版时间: 2025-11-17

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20251114.1200.004>

tended to induce quenching due to throttling effects, whereas too large diameters caused mixture dilution, thus reducing combustion efficiency. The number of nozzles directly influenced jet flame propagation and interaction, too few nozzles produced insufficient flame spread, while too many induced mutual interferences between jets, energy attenuation, and reduced penetration speed. Nozzle angles that were either too small or too large led to uneven flame distribution or slowed propagation. For the pre-chamber structure in this study, a configuration with a 3 mm nozzle diameter, 8 nozzles, and a 140° nozzle angle, produced the highest jet flame energy, with the peak heat release rate per unit crank angle in the main combustion chamber reaching 22.7 kJ, yielding the highest combustion efficiency. These findings may serve as both theoretical basis and practical reference for the optimized design of pre-chamber jet ignition systems used in marine engines.

Keywords: marine engines; ammonia/hydrogen fuel; pre-chamber; nozzle parameters; jet flames

过度使用化石燃料引发的全球性污染问题日益严峻^[1],日趋严格的排放法规正制约着航运业发展。开发可持续清洁能源是应对能源需求增长和环境挑战的重要路径^[2]。中国提出“双碳”目标,并与美、欧等主要经济体共同推进能源转型战略及可再生能源发展^[3]。氨和氢作为无碳清洁燃料,是内燃机重要的替代能源。尽管对氢燃料的研究进展显著,但其基础设施不足、储运复杂和安全隐患仍制约着实际应用^[4]。相比之下,氨具备优异的抗爆性能、更高的体积能量密度和便捷的储运优势,但其单独燃烧存在困难^[5]。掺混高可燃性燃料(如氢)可改善氨的着火与燃烧特性^[6]。此外,可通过氨分解制氢,为氨/氢发动机提供燃料。

预燃室射流点火是一种高能点火技术,可实现稀薄燃烧,从而减少燃料消耗和污染物排放^[7]。高能火焰射流能够引发剧烈湍流^[8],燃烧强度指数高达 1.7^[9],点火能力显著增强,燃烧持续时间明显缩短^[10-12]。预燃室点火技术与氨/氢燃料的协同作用,可有效扩展船用发动机的稀薄燃烧极限,并改善氨燃料在大空间尺度下燃烧缓慢的问题。

预燃室火焰传播速度、喷孔参数和主燃室混合气浓度等共同主导着主燃室湍流火焰发展^[13]。预燃室多孔射流结构通过冷流形成的扰动区维持射流火焰速度,显著提升了稀薄极限附近的点火概率,增强了火焰均匀性并加速燃烧^[14]。相较于直射流,倾斜射流可提高主燃室燃烧速率并缩短燃烧持续期^[15-16]。稀薄燃烧条件下需减小喷孔直径以产生高速强射流实现可靠点火^[17],但持续缩小出口面积将降低热射流的穿透速度^[18]。这表明可能存在着最佳喷孔直径。王梅^[19]的研究表明,喷孔个数显著影响双室火焰传播特性,过少将延长周向传播时间,

过多则削弱径向传播强度,优化后的方案可提升放热率峰值并缩短燃烧持续期。

当前预燃室点火发动机的研究中,对预燃室结构参数的研究多局限于单一变量分析,且成果集中于定容弹实验,针对大缸径预燃室发动机的结构设计研究尚显不足。本文建立了船用氨/氢燃料发动机预燃室结构多参数优化体系,分析了预燃室喷孔参数(喷孔直径、个数及夹角)对预燃室混合气形成、射流火焰传播和主燃室燃烧特性的影响,为船用预燃室射流点火系统的喷孔参数设计提供了理论依据及参考。

1 三维模型的建立及验证

1.1 三维模型建立

为实现船用氨/氢射流点火发动机的稳定着火与快速燃烧,本课题组提出了预燃室直喷氢气引燃主燃室氨/氢混合气的方案^[20]。如图 1 所示,将体积比为 9:1 的氨和氢预混合气经进气道供给主燃室(当量比为 0.5),将当量比为 1.0 的氢气经预燃室喷嘴喷入预燃室,预燃室内的混合气被点燃后生成射流火焰,经喷孔进入主燃室引燃预混合气。

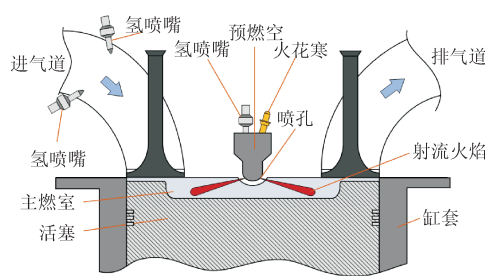


图1 氨/氢预燃室点火发动机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ammonia/hydrogen pre-chamber ignition engine system

本文研究对象为 6ACD320G 大功率船用预燃室天然气发动机,其主要参数如表 1 所示。将原机预燃室内的天然气喷嘴替换为氢气喷嘴,构建主动预燃室射流点火系统。采用 CONVERGE 软件对其中 1 个工作循环进行仿真模拟。

表 1 6ACD320G 预燃室天然气发动机的主要参数
Table 1 Main parameters of the 6ACD320G pre-chamber natural gas 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
气缸数	6
额定功率/kW	2 430
标定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	750

图 2 为预燃室点火发动机的几何模型。在进气道设置氨/氢燃料的喷射器,在预燃室上方设置喷氢嘴,预燃室容积为发动机余隙容积的 2.5%,预燃室下方有 8 个直径为 3 mm 的喷孔与主燃室相连,喷孔射流方向与中轴线夹角为 70° 。采用 RANS RNG 湍流模型模拟缸内流动情况;采用 SAGE 详细化学反应动力学求解器计算氨/氢燃料的燃烧反应过程;采用 Yu 等^[21]优化的氨/氢化学反应机理来准确预测燃烧特性,该机理包含 34 个组分和 286 步反应。

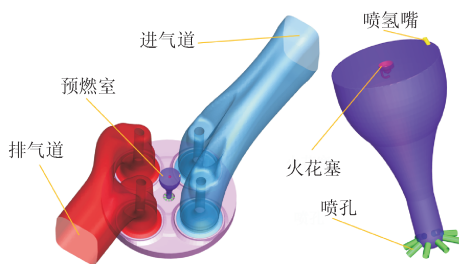


图 2 发动机三维几何模型

Fig. 2 3D geometric model of the engine

1.2 初始和边界条件

在转速为 750 r/min、转矩为 $27.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的工况下,对缸内燃烧过程开展模拟计算。本文中,将压缩上止点对应时刻的曲轴转角定义为 0° ,从上循环排气门开启时刻曲轴转角为 -420° 开始,到当前工作循环排气门开启时刻曲轴转角为 300° 结束,点火时刻的曲轴转角为 -16° ,喷氢时刻的曲轴转角为 $-120^\circ \sim -105^\circ$ 。数值模拟的初始条件和边界条件如表 2 所示。

表 2 数值模拟的初始条件和边界条件

Table 2 Initial and boundary conditions for numerical simulation

条件	区域	温度/K	压力/MPa
初始条件	进气道	318	0.35
	排气道	1 000	0.35
	预燃室	1 200	0.39
	主燃室	1 200	0.39
边界条件	进气口	318	0.35
	排气口	1 000	0.35
	预燃室壁面	700	
	气缸盖底面	623	
	缸套壁面	520	
	活塞顶面	620	

1.3 模型验证

研究选用 Yu 等基于鲍威尔算法和遗传算法优化后的氨/氢化学反应机理^[21]。经验证,在本文当量比为 1.0 的工况下,优化后机理的点火延迟时间和层流火焰速度与实验结果的偏差均在 5% 以内,仿真精度较好。在确保模型计算精度的前提下,综合考虑计算成本,最终选择基础网格尺寸为 10 mm,并基于温度、流动速度指标对进气道、主燃室和预燃室进行自适应加密,并对一些重要物理区域进行固定加密。如:在火花塞电极处设置 5 级球形加密和边界层加密;对点火时刻后射流孔区域设置 3 级柱形加密;为准确识别火焰在预燃室和主燃室中的传播过程,在燃烧过程中对气缸进行 2 级加密。

图 3 给出了主燃室压力和放热率的模拟结果与实验结果^[22]对比。

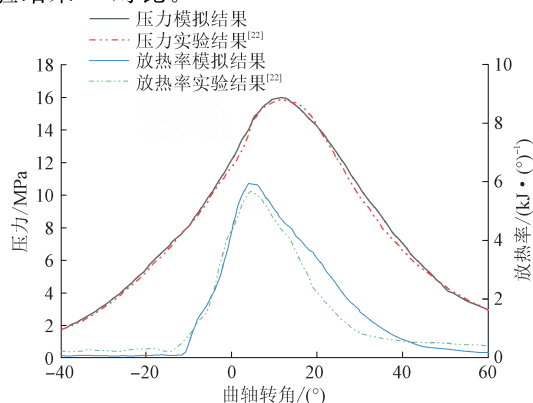


图 3 主燃室压力和放热率的模拟结果与实验结果^[22]对比

Fig. 3 Comparison of simulation results and experimental results^[22] of the main combustion chamber pressure and heat release rate

模型验证时采用的是天然气燃料,虽与本文研究的燃料不同,但缸内过程涉及的流动、喷雾、分子混合等问题的物理本质是相同的。由图3可见,对于压力、放热率峰值和峰值相位,模拟结果与实验结果之间的误差均小于3%,能够满足仿真模拟计算的要求。因此,本研究在进气道、预燃室中将燃料分别替换为氨/氢混合气、氢气。

1.4 数值模拟方案

基于原机预燃室结构(喷孔直径为3 mm、喷孔个数为8),对喷孔参数进行调整,设计了如下方案:
①当喷孔个数为8时,喷孔直径分别为1、2、3、4 mm;
②在保持喷孔总横截面积与预燃室喉部横截面积之比不变的前提下,当喷孔个数为4、6、8、10时,对应的喷孔直径分别为6.0、4.0、3.0、2.4 mm。由此确定最优喷孔直径和喷孔个数后,再进一步研究喷孔夹角为 120° 、 130° 、 140° 、 150° 和 160° 时对混合气形成和射流特性的影响。

2 结果分析

2.1 喷孔直径的影响

喷孔直径是预燃室发动机设计中较为敏感的参数,对燃烧性能和稀薄燃烧极限影响显著,其影响权重通常高于80%^[23]。较小的喷孔直径能够提高射流的湍流强度,加快火焰传播速度,增强燃烧放热率和稳定性,但直径过小可能导致射流受阻、火焰淬灭和周向火焰传播不充分^[24];较大的喷孔直径虽然能改善气体交换和射流稳定性,但直径过大会导致火焰射流穿透速度较慢,径向火焰传播不充分,影响燃烧效率^[25]。

2.1.1 混合气形成与分布特性

图4给出了不同喷孔直径下预燃室当量比的分布云图。由图可见,喷孔直径为2 mm或3 mm时,预燃室内的混合气分布呈现较好的空间均匀性。其中,当孔径为3 mm时,火花塞附近形成当量比略大于1.0的富燃混合气层,显著提升了点火可靠性,并为火焰初期传播创造了有利条件。当孔径减小至1 mm时,由于流通截面积不足,预燃室和主燃室间气体交换效率下降,导致预燃室内局部区域出现混合气浓度过高现象,未燃烧的氢气因扩散受限形成浓度梯度滞留。反之,当孔径增大至4 mm时,主燃室的稀薄混合气(整体当量比低于预燃室)通过大流通截面积快速逆向扩散,导致预燃室混合气的整体浓度显著降低。

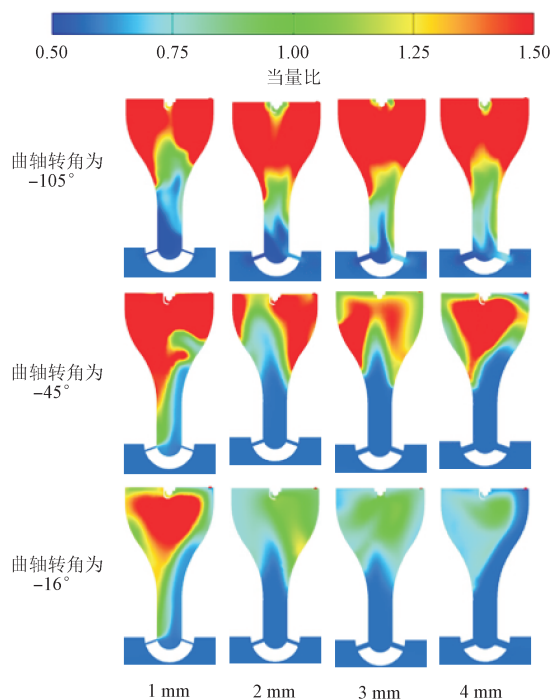


图4 不同喷孔直径下预燃室内混合气的当量比分布

Fig. 4 Distribution of mixture equivalence ratios of the pre-chamber under different nozzle diameters

2.1.2 燃烧室温度场分布特性

图5给出了本研究采用的预燃室和主燃室的剖面示意图。不同喷孔直径下,预燃室A-A剖面和主燃室B-B剖面的温度场分布如图6所示。由图可见,当喷孔直径为3 mm和4 mm时,因流通截面积适中,在曲轴转角为 -12° 时即可实现射流火焰有效穿透至主燃室。当曲轴转角为 4° 时,火焰前锋面已基本覆盖整个主燃室,高温区域面积占比最大,体现了射流能量传递效率和火焰传播速率的协同优化。当孔径为2 mm时,虽然流速提升使得预燃室内火焰传播速度加快,但受限于总流量不足,主燃室火焰至曲轴转角为 4° 时仍未能抵达边缘,表明射流流动能总量对燃烧扩展存在约束。当孔径为1 mm时,严重的节流效应导致射流质量流量急剧衰减,高温产物无法突破主燃室背压,呈现淬熄现象。

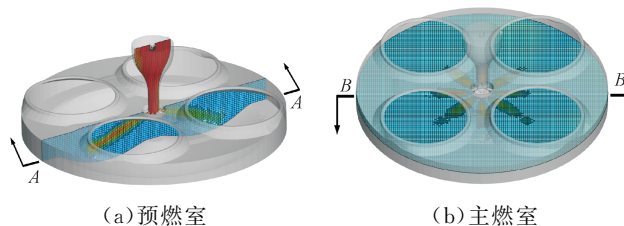


图5 预燃室和主燃室的剖面示意图

Fig. 5 Cross-sectional schematic diagram of pre-chamber and main combustion chamber

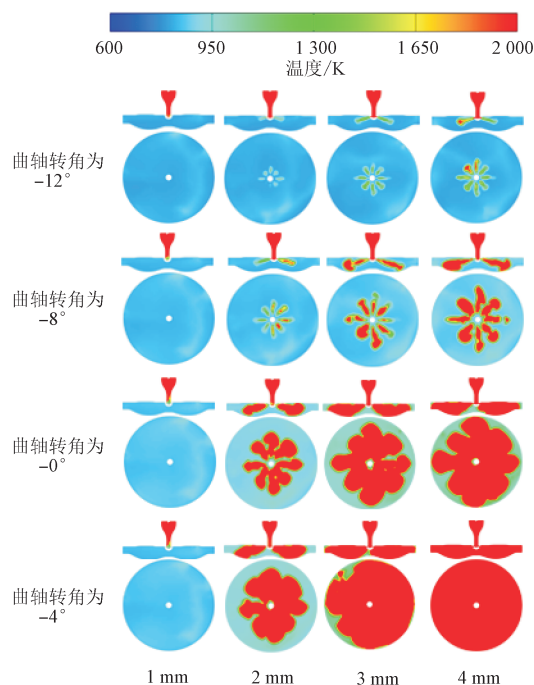


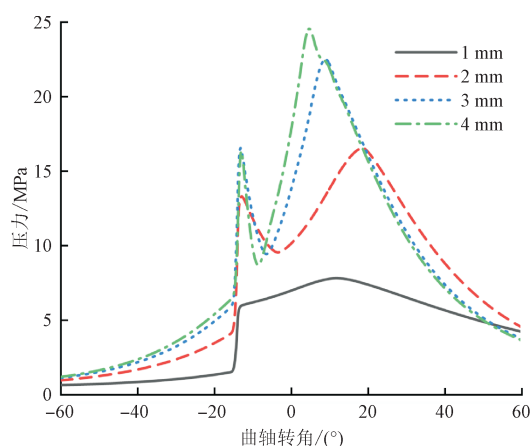
图6 不同喷孔直径下预燃室和主燃室的温度场分布

Fig. 6 Temperature field distribution of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle diameters

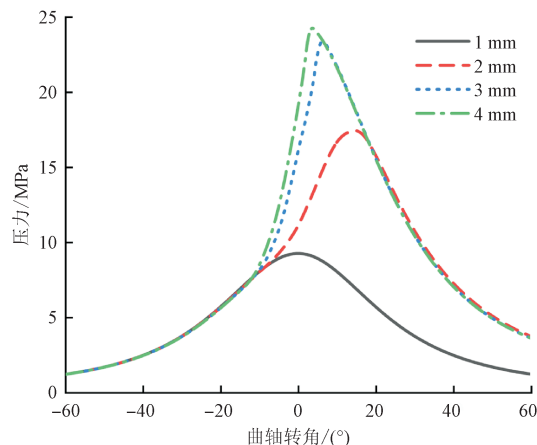
综上,喷孔直径通过调节射流初始速度与流通量的动态平衡,直接影响着主燃室燃烧和火焰传播均匀性,其中3 mm和4 mm的喷孔直径在抑制节流损失和维持射流能量方面展现出最佳的综合性能。

2.1.3 燃烧特性

图7展示了不同喷孔直径下预燃室和主燃室的压力分布。由图7(a)可见,孔径为1 mm时,预燃室压力最低;当孔径增大到2 mm时,因燃烧初期能量释放缓慢,压力上升平缓且峰值较低,相位滞后。当孔径为3 mm时,预燃室第一峰值压力为16.6 MPa,曲轴转角为-13.1°。4 mm孔径时,预燃室的峰值



(a) 预燃室



(b) 主燃室

图7 不同喷孔直径下预燃室和主燃室的压力分布

Fig. 7 Pressure distribution of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle diameters

压力最高,为24.5 MPa,此时的曲轴转角为4.4°。由图7(b)可见,当孔径为3 mm时,主燃室的峰值压力为22.5 MPa,曲轴转角为8.6°。

综上,大的喷孔直径能够增强燃料喷射动能,显著提高燃烧初期的压力梯度,使得峰值压力更高且相位提前。

图8给出了不同喷孔直径下预燃室和主燃室的放热率。由图可见,当孔径为1 mm时,由于产生淬熄现象,放热率峰值最低。随着孔径增大,预燃室内混合气的均匀性得到改善。当孔径为3 mm时,滞燃期进一步缩短,单位曲轴转角下的放热率峰值最高,达到3.03 kJ,峰值相位的曲轴转角为

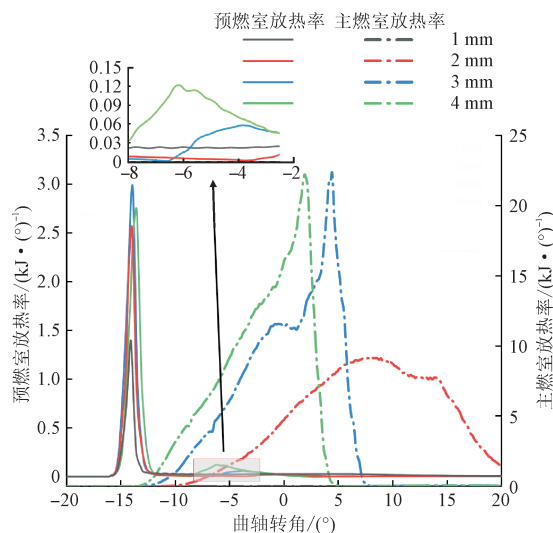


图8 不同喷孔直径下预燃室和主燃室的放热率分布

Fig. 8 Distribution of heat release rates of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle diameters

-13.8°,燃烧过程集中且剧烈,放热率曲线陡峭,表明燃烧充分性和动力性能的平衡较优。4 mm 孔径时,放热率峰值略有降低且峰值相位滞后,曲轴转角为-13.5°,与孔径为 3 mm 时相比,燃烧开始滞后。

由图 8 还可以看出,孔径为 1 mm 时,主燃室的放热率为 0,印证了淬熄现象。4 mm 孔径时,主燃室的峰值压力最高且出现时刻最早,表明此孔径下主燃室出现射流的时刻最早,与图 6 三维云图的结果相一致。当孔径为 3 mm 时,主燃室单位曲轴转角下的放热率峰值最高,达到 22.7 kJ,相较 4 mm 孔径时提高了 1.5%,对应相位的曲轴转角为 4.4°。孔径为 2 mm 时,由于孔径较小产生了节流效应,导致主燃室的峰值压力和峰值放热率均较低且相位靠后,出现了明显的燃烧滞后现象。

综上,喷孔直径需在气体交换效率和混合气浓度分布间寻求平衡,小孔径易导致混合气局部富集和换气不足,大孔径虽然促进了预燃室和主燃室间气体交换,但过度稀释预燃室内混合气会造成预燃室内当量比明显下降。因此,选择孔径为 3 mm 能够兼顾混合气均匀性、点火性能和燃烧稳定性。

2.2 喷孔个数的影响

2.2.1 混合气形成与分布特性

不同喷孔个数下点火时刻预燃室内合速度矢量和流线轨迹的分布如图 9 所示。其中,N-4、N-6、N-8、N-10 方案分别表示 4、6、8、10 个喷孔,合速度表示流体在该点处的实际流动速度,是 x 、 y 、 z 方

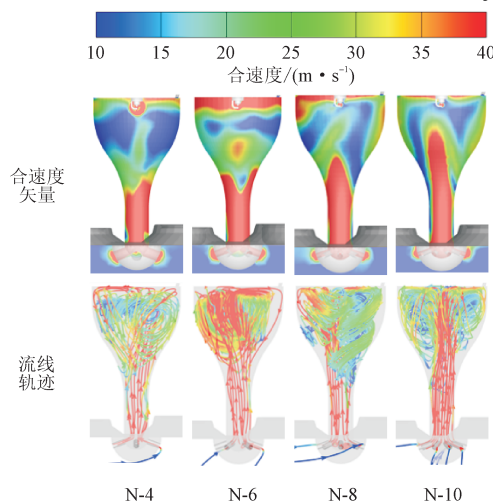


图 9 不同喷孔个数下点火时刻预燃室的流场分布
Fig. 9 Flow field distribution of the pre-chamber at ignition time under different nozzle numbers

向上速度分量平方和的平方根。由图 9 可见,N-4 方案下,预燃室内存在大面积低速流动区,导致混合气分布非均匀性增强;N-6 方案下呈现明显的流动分层结构,表明气体分布不均且存在流动动能耗散;N-8 和 N-10 方案下,预燃室中部形成剧烈速度梯度,显著增强了湍流强度,有效促进了混合气的均匀化。

从喷氢时刻结束到点火时刻开始时,预燃室的当量比分布如图 10 所示。由图可见,在点火时刻,N-8 和 N-10 方案下预燃室混合气的均匀性显著,其当量比约为 1.0;而 N-4 和 N-6 方案下,仍存在局部高浓度混合气区,且整体当量比较低。这表明,孔的个数减少会导致单孔截面积增大,压缩行程中更多主燃室的低当量比混合气被压入预燃室,整体当量比减小。

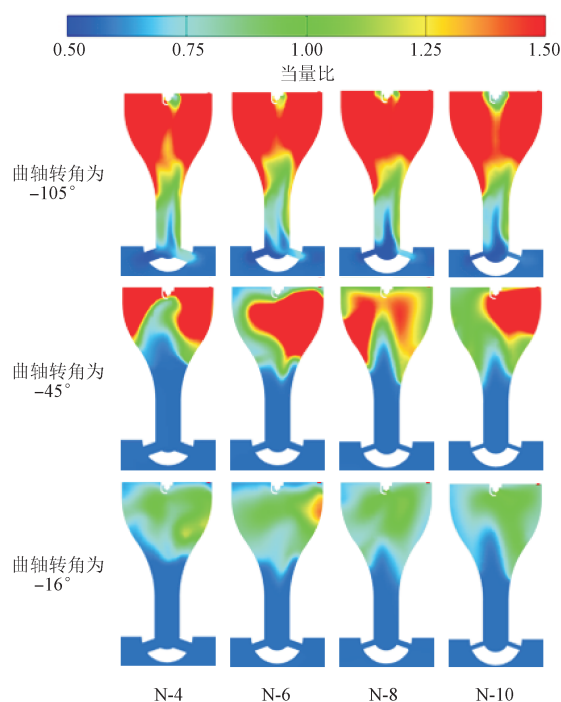


图 10 不同喷孔个数下预燃室内混合气的当量比分布
Fig. 10 Distribution of mixture equivalence ratios in the pre-chamber under different nozzle numbers

2.2.2 燃烧室温度场分布特性

图 11 给出了不同喷孔个数下预燃室和主燃室温度场的分布云图。由图可见,在曲轴转角为-12°时,所有方案均形成射流火焰,其中 N-4 方案因喷孔个数较少导致单孔射流能量集中,火焰温度最高。至曲轴转角为 0°时,各方案主燃室均已着火,N-4 方案下火焰前锋面的传播速度最快,N-10 方案最慢,N-6 方案前锋面的面积最大。至曲轴转角

为 4° 时,N-6、N-8方案下前锋面的面积显著大于N-4和N-10方案,且主燃室燃烧效率更高;N-10方案因喷孔过多,进而引发射流火焰相互干扰,抑制了主燃室燃烧。上述结果表明,N-6和N-8方案能够产生高能射流火焰,且具备更充分的主燃室燃烧特性。

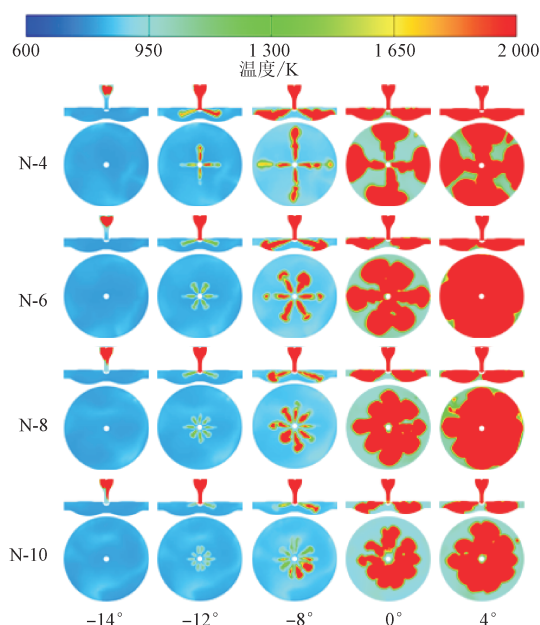
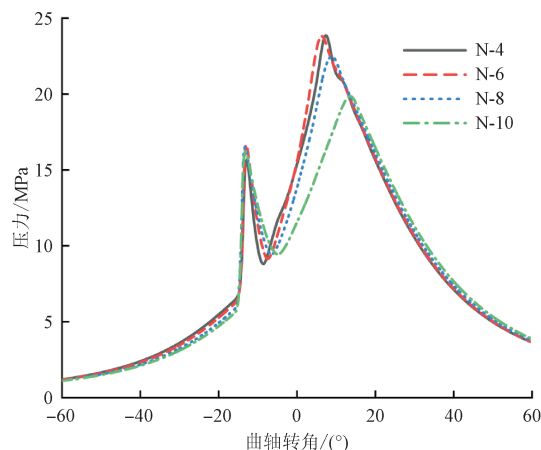


图 11 不同喷孔个数下预燃室和主燃室的温度场分布

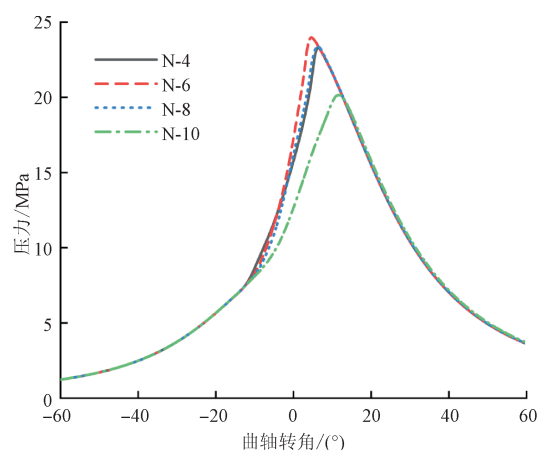
Fig. 11 Temperature field distribution of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle numbers

2.2.3 燃烧特性

图 12 展示了不同喷孔个数下预燃室和主燃室的压力分布。由图可见,N-6 方案下,预燃室第一峰值压力最高,为 16.7 MPa,对应相位的曲轴转角为 -12.8° ,其次是 N-8 和 N-10 方案,N-4 方案下的压力最低。



(a) 预燃室



(b) 主燃室

图 12 不同喷孔个数下预燃室和主燃室的压力分布

Fig. 12 Pressure distribution of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle numbers

不同喷孔个数下预燃室和主燃室的放热率如图 13 所示。由图可见,在曲轴转角为 -13.9° 时刻处,N-8 方案预燃室单位曲轴转角下的放热率峰值为 3.02 kJ,相较 N-10 方案提高了 6%。虽然 N-4 方案下主燃室的放热率较 N-8 方案高,但 N-4 方案下主燃室出现了点火延迟,表明 N-4 方案下预燃室的射流火焰形成较晚,混合气质量较差。

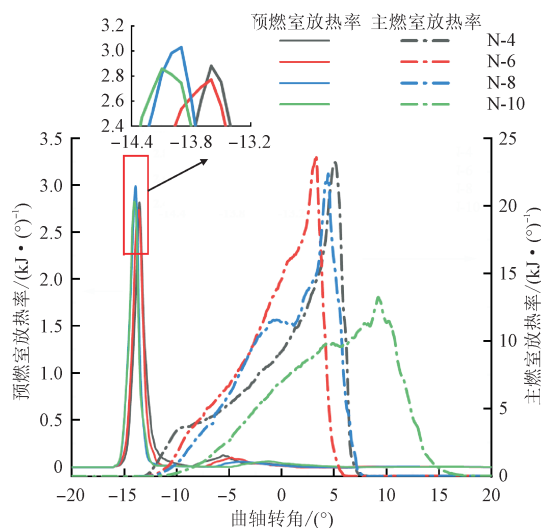


图 13 不同喷孔个数下预燃室和主燃室的放热率分布

Fig. 13 Distribution of heat release rates of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle numbers

综上所述,当喷孔个数较多时,能够缩短火焰传播路径,加快燃烧速度,且主燃烧室内的着火点更多,燃烧更均匀;当喷孔个数较少时,单个喷孔的流速升高增大了湍流强度,增加了射流贯穿距更大的强火

焰,但可能会加剧火焰分布的不均匀性,导致燃烧速度下降和局部未燃混合气残留。因此,喷孔个数的设计需在燃烧速度、火焰分布均匀性、射流湍流强度等因素之间寻求平衡。N-8 方案的预燃室结构在各项性能指标上表现均较好,故选定该方案开展后续研究。

2.3 喷孔角度的影响

2.3.1 混合气形成与分布特性

不同喷孔角度下,预燃室内混合气的当量比分布如图 14 所示。其中,A120、A130、A140、A150、A160 方案分别对应喷孔夹角为 120° 、 130° 、 140° 、 150° 和 160° 。由图 14 可见,在点火时刻,A140 方案下预燃室内混合气形成较为均匀,且当量比约为 1.0;其次是 A120 和 A150 方案;A130 和 A150 方案下,预燃室的混合气分布极不均匀。

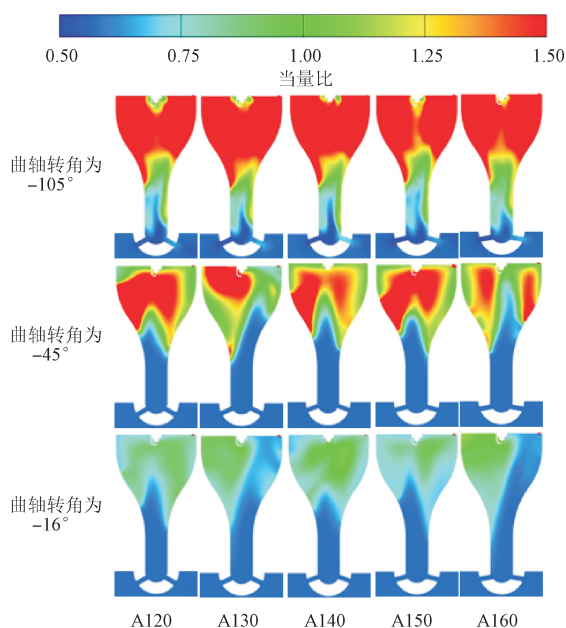


图 14 不同喷孔角度下预燃室内混合气的当量比分布
Fig. 14 Distribution of mixture equivalence ratios in the pre-chamber under different nozzle angles

2.3.2 燃烧室温度场分布特性

不同喷孔角度下,预燃室和主燃室温度场的分布如图 15 所示。由图可见,在曲轴转角为 -14° 时,A140 与 A160 方案下预燃室的火焰传播速度最快,已覆盖至预燃室喉部,射流形成最早。至曲轴转角为 -8° 时,A120 方案因角度过小导致相邻射流火焰相互干扰,显著抑制了主燃室点火与燃烧,其火焰前锋面的面积最小、传播速度最慢。活塞抵达曲轴转角为 0° 时,除 A120 方案外,其他 4 种方案下的火焰传播速度趋于相同,其中 A140、A150、A160 方案下火焰前锋面的面积显著扩大。至曲轴转角为 4° 时,A140 方案下主燃室的燃烧比较充分,而 A120 方案下的燃烧最不完全。

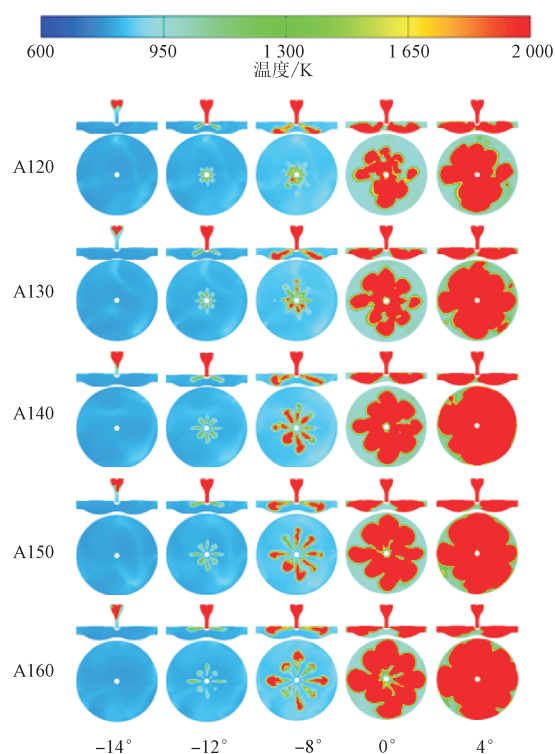
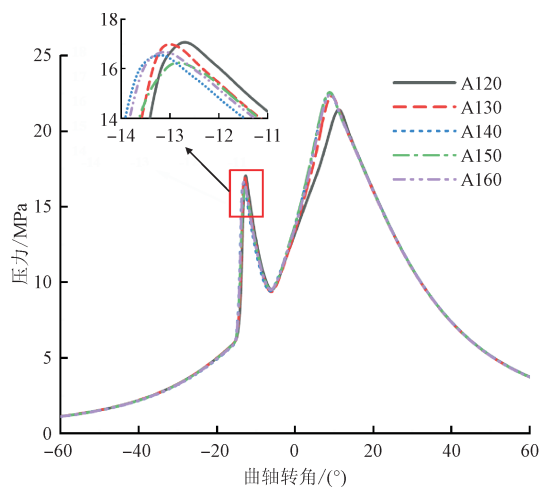


图 15 不同喷孔角度下预燃室和主燃室的温度场分布
Fig. 15 Temperature field distribution of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle angles

2.3.3 燃烧特性

图 16 给出了不同喷孔角度下预燃室与主燃室的压力分布。由图可见,预燃室第一峰值压力最高的是 A120 方案,为 17.1 MPa,出现在曲轴转角为 -12.7° 处,其次是 A130、A140 和 A150 方案。A140 方案下,主燃室压力峰值最高,达 23.38 MPa,相较 A120 方案提升了约 8%。同时,A140 方案下的放热率峰值出现时刻最早,点火延迟期最短,在主燃室内的燃烧更完全。



(a) 预燃室

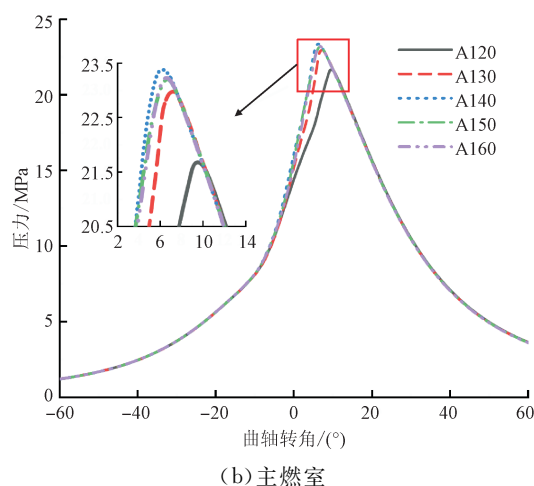


图16 不同喷孔角度下预燃室和主燃室的压力分布

Fig. 16 Pressure distribution of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle angles

不同喷孔角度下,预燃室和主燃室的放热率分布如图17所示。由图可见,A120方案下预燃室的单位曲轴转角放热率最高,为3.3 kJ,出现时刻的曲轴转角为 -13.4° 。虽然A120方案下预燃室的第一峰值压力和放热率均最高,但由于其滞燃期较长,两者出现的时刻均最晚。A140方案下第一峰值压力出现最早,表明预燃室燃烧启动最快。A120方案下的放热率曲线与其他方案的变化趋势不同,主要归因于射流火焰之间的相互作用,导致主燃室火焰传播速度受限,燃烧不充分。此外,A130方案的主燃室放热率峰值虽高,但出现明显的滞燃期。

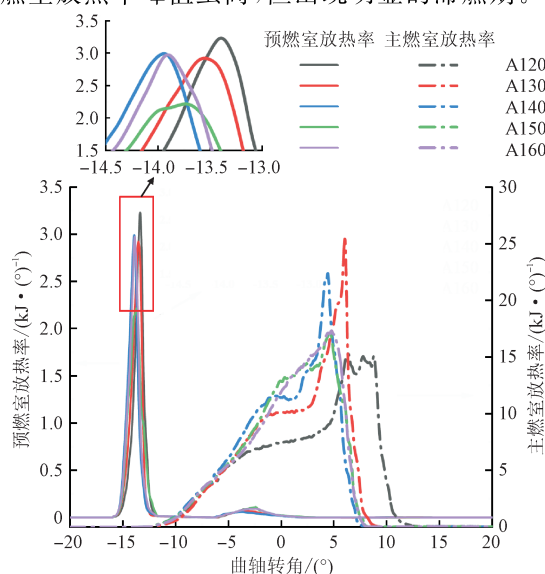


图17 不同喷孔角度下预燃室和主燃室的放热率分布

Fig. 17 Distribution of heat release rates of the pre-chamber and main combustion chamber under different nozzle angles

以上分析表明,喷孔角度过小时,大缸径条件下的射流火焰传播距离有限,可能会出现主燃室内火焰分布不均匀的现象;喷孔角度过大时,主燃室轴向方向的混合气不易被点燃。因此,A140方案即两喷孔间夹角呈 140° 时,预燃室结构在各项性能指标上表现均较好。

3 结 论

本文针对预燃室喷孔参数对混合气形成和射流火焰的影响开展了系统性研究,通过数值模拟方法分析了喷孔直径、喷孔个数、喷孔角度对预燃室混合气的形成以及预燃室和主燃室燃烧的调控机制,得到了喷孔的最优设计方案。研究得到主要结论如下。

(1)喷孔直径过小会导致明显的节流效应,射流火焰难以进入主燃室,产生淬熄现象;喷孔直径过大会稀释预燃室混合气,降低燃烧效率。直径为3 mm的喷孔在混合气均匀性方面表现最佳,射流能量传递效率高,主燃室的放热率峰值相较4 mm方案提高了1.5%。

(2)喷孔个数过少,相邻射流火焰之间缺乏火焰传播,导致主燃室的燃烧效率下降;喷孔个数过多,则会引发主燃室内的射流火焰相互干涉,射流火焰能量下降,导致主燃室内火焰传播速度变慢。喷孔个数为8时,预燃室单位曲轴转角下的放热率峰值最高达3.02 kJ,相较10孔方案提高了约6%。

(3)喷孔角度过小或过大都会导致主燃室内的火焰分布不均或火焰传播速度下降。喷孔夹角为 140° 时,主燃室峰值压力达到最高23.38 MPa,相较夹角为 120° 的方案提升了约8%。此时,主燃室的火焰前锋面面积最大,燃烧最为充分。

研究通过改变预燃室的喷孔参数,对各个方案进行对比分析,确定了最佳喷孔方案:喷孔直径为3 mm,喷孔个数为8,喷孔夹角为 140° 。此方案下,预燃室的射流火焰能量最高,主燃室的缸内压力和放热率峰值最高,燃烧效率最高。

参考文献:

- [1] HARUNA A, TANIMU G, IBRAHIM I, et al. Mitigating oil and gas pollutants for a sustainable environment: critical review and prospects [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 416: 137863.
- [2] MARIYAM S, SHAHBAZ M, AL-ANSARI T, et al. A critical review on co-gasification and co-pyrolysis

- for gas production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 161: 112349.
- [3] CUI Lianbiao, LI Rongjing, SONG Malin, et al. Can China achieve its 2030 energy development targets by fulfilling carbon intensity reduction commitments? [J]. *Energy Economics*, 2019, 83: 61-73.
- [4] QI Yunliang, LIU Wei, LIU Shang, et al. A review on ammonia-hydrogen fueled internal combustion engines [J]. *eTransportation*, 2023, 18: 100288.
- [5] XING Hui, SPENCE S, CHEN Hua. A comprehensive review on countermeasures for CO₂ emissions from ships [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110222.
- [6] ROY M M, TOMITA E, KAWAHARA N, et al. Comparison of performance and emissions of a supercharged dual-fuel engine fueled by hydrogen and hydrogen-containing gaseous fuels [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(12): 7339-7352.
- [7] JAMROZIK A. Lean combustion by a pre-chamber charge stratification in a stationary spark ignited engine [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(5): 2269-2278.
- [8] ADAMS T G. Torch ignition for combustion control of lean mixtures [C]//1979 Automotive Engineering Congress and Exposition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1979: 790440.
- [9] WU Han, WANG Lili, WANG Xi, et al. The effect of turbulent jet induced by pre-chamber sparkplug on combustion characteristics of hydrogen-air pre-mixture [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(16): 8116-8126.
- [10] SHAH A, TUNESTAL P, JOHANSSON B. Investigation of performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine operated with pre-chamber spark plug and dilution with excess air and EGR [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2012, 5(4): 1790-1801.
- [11] JAMROZIK A, TUTAK W. A study of performance and emissions of SI engine with a two-stage combustion system [J]. *Chemical and Process Engineering*, 2011, 32(4): 453-471.
- [12] CHEN D Y, GHONIEM A F, OPPENHEIM A K. Experimental and theoretical study of combustion jet ignition [EB/OL]. (1983-03-01) [2025-05-10]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19840001987>.
- [13] ZHOU Lei, LIU Peilin, ZHONG Lijia, et al. Experimental observation of lean flammability limits using turbulent jet ignition with auxiliary hydrogen and methane in pre-chamber [J]. *Fuel*, 2021, 305: 121570.
- [14] ZHOU Lei, SONG Yuntong, HUA Jianxiong, et al. Effects of different hole structures of pre-chamber with turbulent jet ignition on the flame propagation and lean combustion performance of a single-cylinder engine [J]. *Fuel*, 2022, 308: 121902.
- [15] BISWAS S, QIAO Li. Ignition of ultra-lean premixed H₂/air using multiple hot turbulent jets generated by pre-chamber combustion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 102-114.
- [16] GUO Xinpeng, LI Tie, CHEN Run, et al. Effects of the nozzle design parameters on turbulent jet development of active pre-chamber [J]. *Energy*, 2024, 306: 132568.
- [17] GENTZ G, THELEN B, GHOLAMISHEERI M, et al. A study of the influence of orifice diameter on a turbulent jet ignition system through combustion visualization and performance characterization in a rapid compression machine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 81: 399-411.
- [18] GHOLAMISHEERI M, THELEN B C, GENTZ G R, et al. Rapid compression machine study of a premixed, variable inlet density and flow rate, confined turbulent jet [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 169: 321-332.
- [19] 王梅. 预燃室式天然气发动机流动和燃烧的数值模拟 [D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [20] 魏胜利, 张绍邦, 严书哲, 等. 氨/氢燃料射流点火船用发动机燃烧特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(5): 124-132.
- WEI Shengli, ZHANG Shaobang, YAN Shuzhe, et al. Study on the combustion characteristics of ammonia/hydrogen fuel jet ignition in marine engines [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(5): 124-132.
- [21] 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.
- [22] 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.

- [23] WANG Bin, XIE Fangxi, HONG Wei, et al. The effect of structural parameters of pre-chamber with turbulent jet ignition system on combustion characteristics of methanol-air pre-mixture [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 274: 116473.
- [24] QIN Fei, SHAH A, HUANG Zhiwei, et al. Detailed numerical simulation of transient mixing and combustion of premixed methane/air mixtures in a pre-chamber/main-chamber system relevant to internal combustion engines [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 188: 357-366.
- [25] ZHENG Hongtao, LIU Shizheng, ZHAO Ningbo, et al. Numerical simulation of hot jet detonation with different ignition positions [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(21): 4607.

(编辑 李慧敏)