

文章编号: 1000-8055(2025)00-20250347-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250347

预燃室结构参数对氢氨摆盘发动机的性能影响研究

蒋显渝¹, 柳平^{1,2}, 邓涛^{1,2}

(1. 重庆交通大学 航空学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 绿色航空技术研究院, 重庆 400074)

摘 要: 为提高摆盘发动机的循环热效率和输出功率, 建立预燃室氢射流点燃氨的摆盘发动机仿真模型, 分析预燃室关键结构参数对预燃室内热射流和发动机性能参数的影响。结果表明: 适当的增大截面比, 可使热射流起始时间提前, 且热射流贯穿长度增加; 当截面比达到 0.225 时, 缸内火焰传播速度更快, 综合效果最好。随着预燃室容积的增大, 射流火焰的贯穿距离和分布面积呈现先增后减的趋势; 当容积比为 1% 时, 射流火焰贯穿距离更大, 分布面积更大, 使得发动机在该工况下的动力输出与经济性达到最佳平衡。喷孔直径对于摆盘发动机性能的影响同样呈现随喷孔直径增加先增大后较小的趋势; 喷孔直径为 1 mm 时, 主燃烧室火焰传播速度更快, 分布面积更大, 综合性能更优。为摆盘发动机的预燃室结构优化设计及氢氨燃料的高效应用提供了理论参考与技术支持。

关 键 词: 摆盘发动机; 预燃室; 氢/氨燃料; 射流点火; 燃烧特性

中图分类号: V243

文献标志码: A

Research on performance impact of pre-chamber structural parameters on performance of hydrogen-ammonia swashplate engines

JIANG Xianyu¹, LIU Ping^{1,2}, DENG Tao^{1,2}

(1. School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. The Green Aerotechnics Research Institute,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To improve the cycle thermal efficiency and output power of the swashplate engine, a simulation model of a swashplate engine with pre-chamber hydrogen jet igniting ammonia was established. The influences of key structural parameters of the pre-chamber on the thermal jet in the pre-chamber and the engine performance parameters were analyzed. The results showed that appropriately increasing the cross-sectional ratio can advance the start time of the thermal jet and increase the penetration length of the thermal jet; when the cross-sectional ratio reached 0.225, the flame propagation speed in the cylinder was faster, and the comprehensive effect was the best. With the increase of the pre-chamber volume, the

收稿日期: 2025-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(52275051); 重庆市技术创新与应用发展专项重大项目(CSTB2024TIAD-STX0018);

重庆市教育委员会科学技术研究重大项目(KJZD-M202400703); 重庆交通大学自然科学类揭榜挂帅项目(XJ2023000701);

重庆市研究生导师团队建设(JDDSTD2022007);

重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2022001, JDLHPYJD2023002)

作者简介: 蒋显渝(2001—), 男, 硕士生, 研究方向为氢氨转子发动机。E-mail: 1297878383@qq.com

通信作者: 邓涛(1982—), 男, 教授, 博士, 研究方向为新能源动力系统研究。E-mail: d82t722@cqjtu.edu.cn

引用格式: 蒋显渝, 柳平, 邓涛. 预燃室结构参数对氢氨摆盘发动机的性能影响研究[J]. 航空动力学报, 2025, 41(X): 20250347. JIANG Xianyu, LIU Ping, DENG Tao. Research on performance impact of pre-chamber structural parameters on performance of hydrogen-ammonia swashplate engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 41(X): 20250347.

penetration distance and distribution area of the jet flame first increased and then decreased; when the volume ratio was 1%, the jet flame had a larger penetration distance and a larger distribution area, enabling the engine to achieve optimal balance between power output and economy under this working condition. The influence of the orifice diameter on the performance of the Swashplate engine also showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of the orifice diameter; when the orifice diameter was 1mm, the flame propagation speed in the main combustion chamber was faster, the distribution area was larger, and the comprehensive performance was better. This could provide theoretical reference and technical support for the optimal design of the pre-chamber structure of the swashplate engine and the efficient application of hydrogen-ammonia fuel.

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

近年来,全球碳排放快速增长对气候变化的影响日益显著,氢气和氨燃料因其在生产、储存和使用过程中的低碳或零碳特性,被认为是实现碳中和的重要解决方案^[1]。氢燃料具有高达 120 MJ/kg 的比能量,可为内燃机提供更高的能量密度。氨燃料则以其优异的储运性能和相对低成本成为氢的补充和拓展^[2],但单一氨燃料因燃烧速率较慢,燃烧效率较低,因此通常与氢气混合使用^[3]。Mørch 等^[4]在研究中发现,氢含量为 10% 的氢氨混合燃料在燃烧过程中能够显著提升热效率,还可以提高发动机的压缩比,提高发动机的循环热效率和输出功率,表明氢氨混合燃料通过合理配比可有效平衡高效与低污染。

引入预燃室射流点火技术能够进一步提升氢氨燃料的燃烧效率和稳定性^[5],减少氮氧化物(NO_x)的排放^[6-7],提高燃烧过程的整体效率和热功转换率^[8-11]。目前预燃室射流技术研究成为当前国际研究的热点领域。王罗玺等^[12]使用预燃室氢射流火焰引燃氨预混气体,重点分析了不同喷嘴直径对燃烧压力、射流速度和火焰传播的影响。张孚等^[13]研究了氨燃料内燃机中预燃室氢气喷射参数对燃烧性能的影响。Liu、Zhong 等^[14-15]研究了在氢气和甲烷的预混燃料中,预燃室射流点火技术的燃烧特性,重点分析了不同喷嘴孔径对点火特性和燃烧过程的影响。Wang 等^[16-17]研究使用不同 CO/H₂ 配比的合成气作为预燃室燃料时,对主燃烧室点火延迟和燃烧过程的影响。点火延迟时间随着预燃室燃料中 CO 比例的增加显著延长。Luo、Wu 等^[18-19]探究预燃室火花塞模式对氢气混合物燃烧特性的影响,在恒体积燃烧室中使用预燃室火花塞模式和普通火花塞模式进行研究。

摆盘发动机凭借其紧凑的结构,节能减排的优势有望成为航空业实现低碳转型的有力助推器。为进一步提升摆盘发动机性能,研究者开展了深入研究。梁伟阁等^[20]从力学角度出发,研究了连杆力矩的简谐特性,提出采用“8”字导槽结构可有效降低发动机振动与噪声水平。张雷等^[21]通过构建多参考系模型,深入解析了摆盘章动运动的本质,指出约束结构的关键作用在于限制摆盘绕驱动轴的自由度。魏振航等^[22]利用解析法与空间坐标变换,分析了不同参数下摆盘、活塞与连杆的运动规律,指出实际质心偏移会导致摆盘边缘轨迹呈“水滴”形,进一步揭示了摆盘倾角与发动机性能间的关联。

预燃室射流技术在传统活塞发动机中已得到了较为广泛应用,使用预燃室氢射流引燃氨气的燃烧特性与摆盘发动机的高压缩比、高燃烧速率等要求高度契合。本文以团队研发的摆盘发动机为研究对象,利用 Converge 软件建立了预燃室射流燃烧的仿真模型,在相同初始压力、温度等条件下,进一步研究预燃室截面比、容积、喷孔直径对热射流发展和发动机性能参数的影响,为氢射流预燃室在摆盘发动机上的应用提供理论依据。

1 摆盘发动机

1.1 摆盘发动机工作原理

创新设计的圆周阵列活塞布局的摆盘发动机构型,气缸呈梅花状圆周阵列布局,整机呈圆柱体。利用三维摆盘在约束结构限制下的章动与连杆活塞的往复运动结合,从而构建活塞往复运动与主轴周转动相互转换的新型活塞驱动机构。摆盘三维模型如图 1 所示。当协同轴按圆周对称分布时,协同轴约束摆盘做章动运动同时,传递

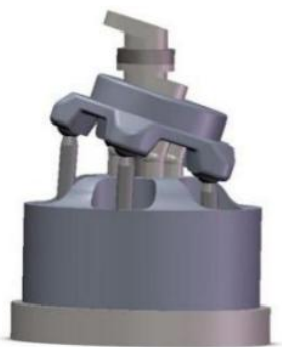


图 1 摆盘三维模型

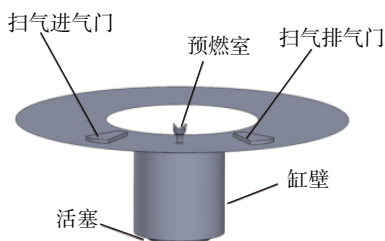
Fig. 1 Three-dimensional model of plate arrangement

摆盘章动运动在缸体平面的对称力矩,使得缸体转动,气缸上气门与气缸盖上进排气门反复重合,完成气门的开合,进而实现发动机的差速配气。

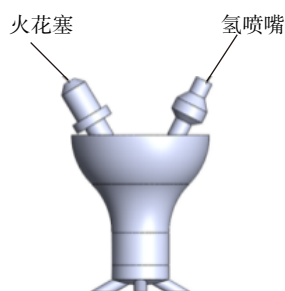
1.2 摆盘发动机燃烧室仿真模型建立

以航空摆盘发动机为研究对象,结合三维 CFD 软件进行不同燃烧室结构参数的燃烧过程分析,氢氨混合气在进气道内预混通过进气门进入主燃烧室,其当量比低于 1;氢气则直接喷入预燃室,使预燃室内当量比维持在 1,在火花塞点火后形成射流火焰引燃主燃烧室内的氢氨混合气^[23-24]。研究聚焦于发动机的单个活塞的燃烧室,其几何模型如图 2(a)所示,包括预燃室、活塞顶部、气缸壁、汽缸盖、进气门^[25]。

预燃室模型如图 2(b)所示,其容积比为 1%。该预燃室上半部分为直径 12 mm 的半球形结构,



(a) 发动机燃烧室几何模型



(b) 预燃室模型

图 2 摆盘发动机三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of the combustion chamber of swashplate engine

经圆滑过渡连接至下半部分吼道,其直径为 5.56 mm,长度为 6.5 mm。下方为 4 个连接主燃室的直径 1 mm 的喷孔,喷孔间的夹角为 120°。发动机主要技术参数如表 1 所示。通过 Converge 软件对该航空摆盘发动机在转速 1 200 r/min 的缸内工作过程进行仿真计算。

表 1 发动机主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the engine

参数	数值
缸径/mm	76
行程/mm	64.2
气缸数	5
主轴转速 ω /(r/min)	1 200
连杆长度/mm	180
压缩比	10

1.2.1 物理模型与化学模型

采用 RNG(renormalization group) $k-\varepsilon$ 模型进行湍流的模拟^[26],其计算精度高,耗时少,能够准确地预测湍流特性。流体动力学主要由雷诺平均 Navier-Stoke(RANS)方程控制,RANS 能够对发动机整体流动趋势进行定性预测,模拟结果具有很好的一致性。燃烧模型的选取会直接影响到缸内压力和温度变化,采用 SAGE(simulation of aviation gas emissions)燃烧模型精细化学动力学求解器与多区模型相结合,能够较好地预测湍流射流特性^[27]。采用 NH_3/H_2 燃烧简化机理^[28],预燃室内通过 Source/Sink modeling 模型模拟火花塞点火过程。

1.2.2 网格敏感性分析

设置 4 组基础网格进行试验,分别采用 4、5、6 mm 和 7 mm 的基础网格进行主燃烧室压力计算,结果如图 3 所示。随着网格尺寸的减小,缸内压力的变化范围也在不断缩小,为确保计算精度,将计算模型基础网格大小设置为 4 mm。为了增强计算精度并且减少计算时间,对火花塞附近进行 5 级固定加密,预燃室喷孔附近进行 3 级固定加密,对气缸进行 1 级加密并对发动机整体设置 3 级自适应加密。

1.2.3 模型验证

目前在摆盘发动机上采用预燃室射流点火的试验报道甚少,其本质上仍是往复式活塞发动机,因此采用与摆盘发动机缸径相同的活塞发动机进行模型验证,保证缸内所涉及的边界条件、喷雾

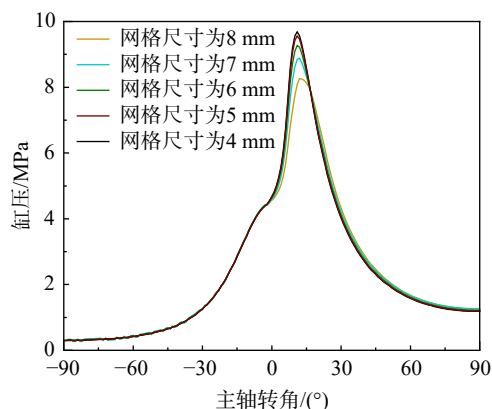


图 3 不同网格尺寸下主燃室的压力变化

Fig. 3 Pressure variations in the main combustion chamber under different grid sizes

和点火模型、化学反应等相同。图 4 为两种发动机缸压和放热率变化曲线对比,可知缸内压力和放热率峰值与出现位置略有差异,摆盘发动机在点火后缸压和放热率曲线上升更快,更快到达峰值,但变化趋势基本一致。可以认为采用活塞发动机辅助模型验证数据吻合良好,验证了本研究所用计算模型的可靠性。

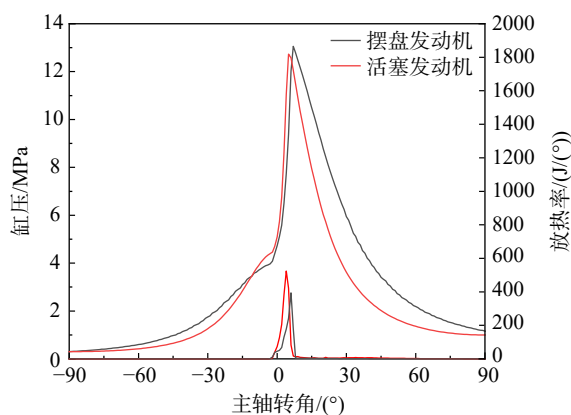


图 4 摆盘发动机与活塞发动机缸压和放热率对比

Fig. 4 Comparison of cylinder pressure and heat release rate between swashplate engine and piston engine

2 预燃室结构参数对射流及燃烧特性影响研究

2.1 预燃室截面比对射流及燃烧特性影响研究

截面比定义为预燃室喷孔截面积与预燃室下部圆柱截面积的比值。合适的截面比能够保证预燃室内的燃烧过程稳定,使热射流以稳定的状态进入主燃烧室,从而使主燃烧室的燃烧也更加稳定。本文保持预燃室容积比为 1%,喷孔结构不变,仅仅改变预燃室圆柱通道的高度和直径大小,设

计了 5 组不同截面比的预燃室分别为 0.15、0.175、0.2、0.225、0.25。

图 5 为不同截面比下发动机气缸压力和放热率变化曲线。由图可知,随着截面比的增大,气缸压力先增大后减小,在截面比为 0.225 时为最大值,放热率有同样的变化规律。随着截面比从 0.15 增大到 0.225,使放热开始时间提前,瞬时压力与放热峰值增加,最大峰值压力可达 13 MPa,瞬时放热峰值最大为 619 J/(°),位于主轴转角为 5°时,同时放热率曲线呈现先急后缓的特征,峰值出现的相位提前,集中了放热。随着截面比增加到 0.25,峰值压力下降到 9.8 MPa,放热开始时间延后且降低了放热率峰值,放热率曲线也变得平缓,峰值相位也延后。

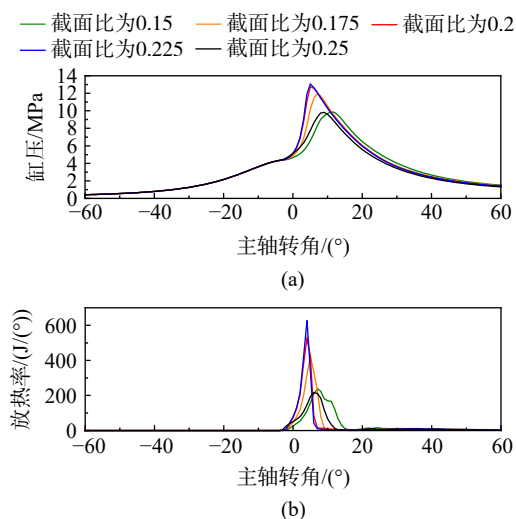


图 5 不同截面比的缸压及放热率变化曲线

Fig. 5 Curves of cylinder pressure and heat release rate variations with different cross-sectional ratios

图 6 为不同截面比下燃烧室温度分布云图,由图可知,在截面比 0.225 之前,随着截面比增加,射流开始时间越早,且热射流贯穿长度越长,主燃烧室火焰传播面积越大。具体表现为:在主轴转角为 -2°时,截面比为 0.15 的预燃室中热射流火焰刚离开喷孔向主燃烧室内传播,而截面比 0.225 的预燃室中热射流已经达到活塞顶部并向四周开始燃烧传播。当截面比增至 0.25 时,火焰贯穿距离不增反降,这是因为截面比增加伴随着下部圆柱长度增加,火焰在预燃室中传播距离变长会导致燃烧效果变差。主轴转角为 0°之后,截面比为 0.225 的燃烧室中火焰发展面积更大,且高温区域占比更多。

图 7 显示了不同截面比对发动机指示热效率

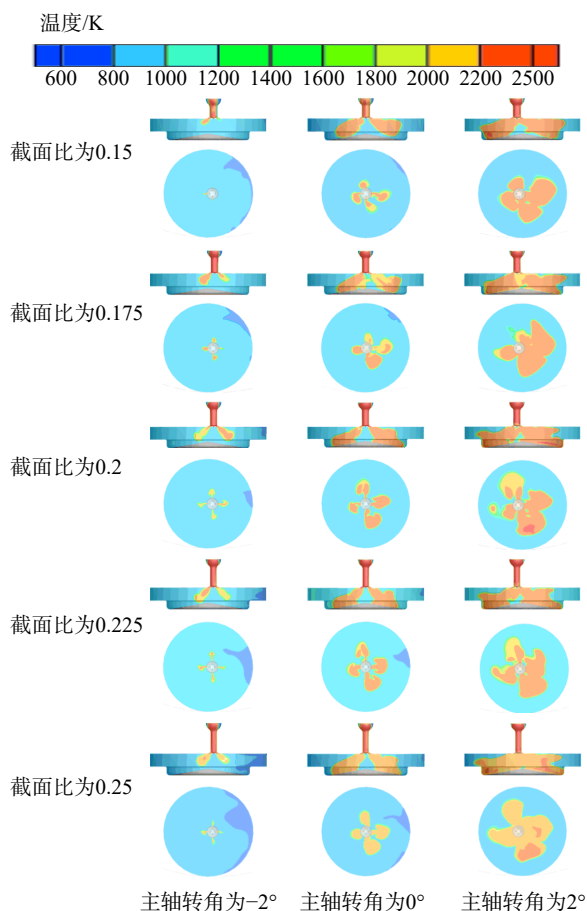


图 6 不同截面比的燃烧室温度分布云图

Fig. 6 Cloud maps of temperature distribution in combustion chambers with different cross-sectional ratios

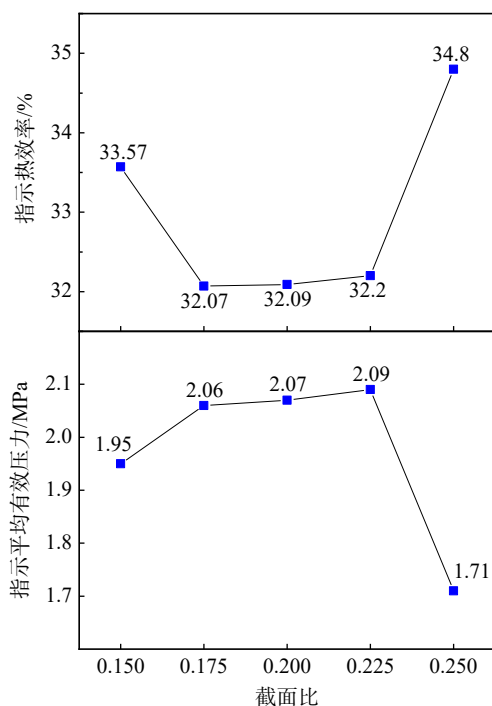


图 7 不同截面比的指示平均有效压力和指示热效率

Fig. 7 Indicated average effective pressure and indicated thermal efficiency at different section ratios

和指示平均有效压力的影响。由图可知随着截面比增大, 指示平均有效压力呈现出先增大后减小的趋势, 在截面比为 0.225 时达到峰值为 2.09 MPa, 相比于截面比为 0.25 时指示平均有效压力 1.71 MPa 增加了 0.38 MPa。这是因为随着截面比的增加, 预燃室射流的贯穿距离增加, 火焰传播速度更快, 燃烧重心越来越远离上止点之后, 大量燃烧放热做出有效功使得发动机的平均指示压力增加。但是当截面比增大到 0.25 时, 由于缸内燃烧温度和缸压下降导致平均指示压力下降。随着截面比增大, 指示热效率呈现先减小后增加的趋势, 截面比为 0.25 时, 指示热效率最高达到了 34.8%, 相比截面比为 0.175 时指示热效率 32.07%, 提升了约 8.5%。结果表明, 合适的截面能够提高气缸内燃烧效率, 增强发动机性能, 截面比为 0.225 时燃烧速度最快, 综合效果最好。

2.2 预燃室容积对射流及燃烧特性影响研究

预燃室容积大小影响着火焰传播速度和燃烧效率等, 进而影响着发动机性能。容积过小时, 预燃室内混合气少, 火花塞点火后形成的高温高压燃气团能量不足, 射流强度低导致主燃室火焰传播速度慢, 燃烧持续期延长, 指示热效率降低; 容积过大则会增加火焰从预燃室向主燃室传播的延迟时间, 同时增大预燃室壁面的散热损失, 降低整体热效率。在截面比为 0.225 的基础上, 保持其余结构参数不变, 设定预燃室容积分别为 0.5%、1%、1.5%、2% 的 4 组方案展开研究。

图 8 呈现不同预燃室容积对发动机缸内压力

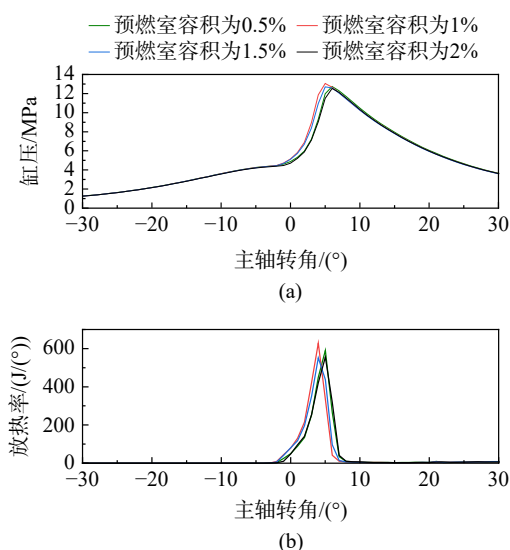


图 8 不同容积的缸压及放热率变化曲线

Fig. 8 Curves of cylinder pressure and heat release rate variations of different volumes

及放热率的影响规律。通过对曲线的对比分析可知,当预燃室容积从 0.5% 逐步增大至 1.5% 的过程中,缸内峰值压力与放热率呈现出“先升高、后降低”的变化趋势,同时两者的相位均有所提前。而当预燃室容积继续增大时,缸内峰值压力和放热率峰值均随之减小,且其相位出现延后现象。具体而言,当预燃室容积达到 2% 时,相较于容积为 1.5% 的工况,峰值压力下降幅度约为 0.5 MPa,同时瞬时放热峰值明显降低,且放热相位也显著延后,反映出预燃室容积过大时,对燃烧过程的推进作用减弱,不利于缸内高效燃烧的组织。

图 9 为不同容积预燃室的燃烧室温度分布云图。由图可知,随着容积的增大,射流火焰的贯穿距离和分布面积呈现先增大后减小的趋势。在主轴转角为 -2° 时,当预燃室容积为 0.5% 时,预燃室内热射流处于刚离开喷孔的初始阶段。而容积为 1% 和 1.5% 的预燃室,其内部热射流已经离开喷孔进入主燃烧室开始燃烧,此时射流的贯穿长度更长,火焰传播速度更快。但容积增大到 2% 时,射流贯穿长度明显减小,射流能力减弱,反映出过大的容积会抑制射流火焰发展。到主轴转角为 0° 时,容积为 2% 的预燃室对应的主燃烧室内火焰分布面积更大,传播更快。这是因为改变容

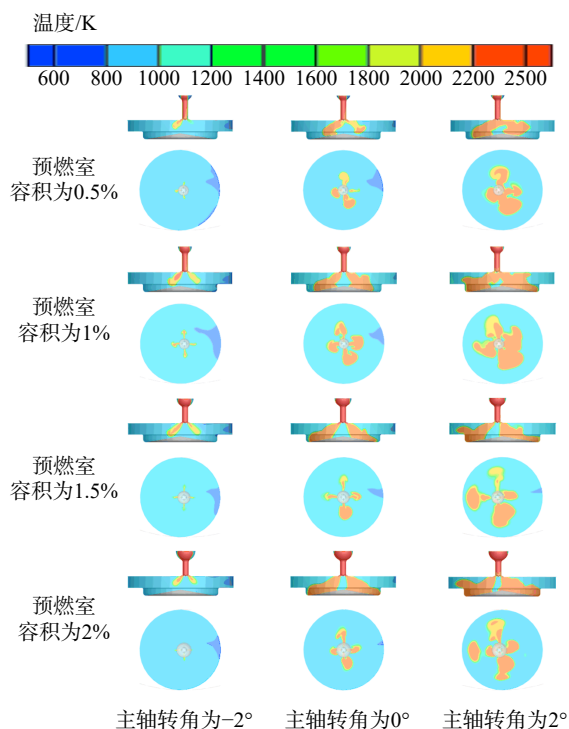


图 9 不同容积的燃烧室温度分布云图

Fig. 9 Cloud maps of temperature distribution in combustion chambers of different volumes

积同时也改变了预燃室的面容比,而较小的面容比,热量损失更少,能为热射流火焰提供更有利的能量环境,能够带来更大的射流贯穿距离。

图 10 显示了不同预燃室容积对发动机指示热效率和指示平均有效压力的影响。通过对曲线及数据的分析可知,随着容积逐步增大,指示热效率和指示平均有效压力先增大后减小。当预燃室容积为 1% 时,两者均达到最大值。相较于容积为 1.5% 的工况,容积为 1% 时指示平均有效压力为 2.09 MPa 提升了 0.05 MPa;与容积为 2% 的工况相比,容积为 1% 时指示热效率更高,增幅达到 0.46%。这是因为在主轴转角为 2° 时,容积为 1% 的预燃室对应的主燃烧室内火焰分布面积更大,燃烧反应进行更充分,使得缸内温度更高能量释放更高效,进而推动指示热效率与指示平均有效压力提升。综合燃烧过程中射流火焰的发展特征来看,容积为 1% 时,射流火焰贯穿距离更大,在主燃烧室内的分布面积更广,燃烧速度最快,能够让燃料能量更充分、更及时地释放,从而在指示热效率和指示平均有效压力这两个关键性能指标上,展现出最优的综合效果。

2.3 预燃室喷孔直径对射流及燃烧特性影响研究

预燃室喷孔直径直接决定了预燃室内燃烧产物向主燃室的喷射特性与能量传递效率。喷孔直径过小时,会使火焰在孔口时熄灭,射流中热燃

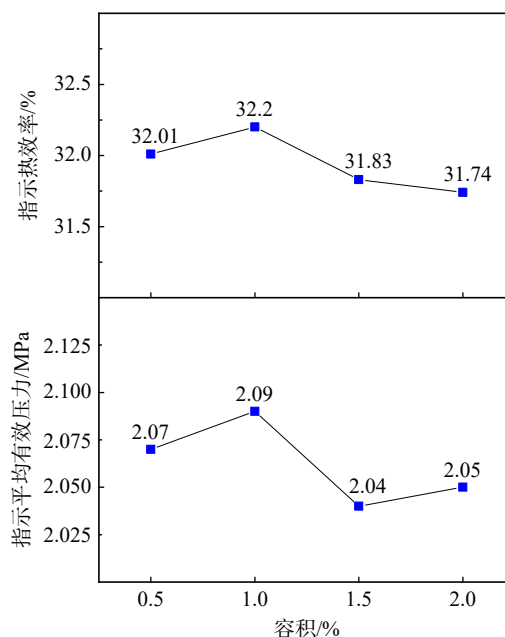


图 10 不同容积的指示平均有效压力和指示热效率

Fig. 10 Indicated average effective pressure and indicated thermal efficiency of different volumes

烧产物点火, 燃烧过程延长; 喷孔直径过大, 喷射动能减弱, 火焰穿透深度降低, 可能导致主燃室局部燃烧不充分。在前文的基础上保持其余参数不变, 仅对喷孔直径对发动机性能影响进行研究。设定 3 组直径为 0.75、1、1.25 mm 的预燃室进行研究, 命名为方案 1、方案 2、方案 3, 其喷孔夹角为 120° , 喷孔数量为 4。

图 11 显示了不同预燃室喷孔直径对发动机缸压和放热率的影响规律。由图可知, 方案 1 的缸压峰值为 13.15 MPa, 压力上升曲线斜率更大, 上升过程更为迅速。随着喷孔直径增大, 缸压峰值呈现先降低后回升的趋势, 即从方案 1 的 13.15 MPa 下降至 13 MPa, 后续又回升到 13.05 MPa。从放热率曲线变化来看, 其整体随喷孔直径增大而呈现降低态势。方案 1 的放热率峰值最高, 达 $640 \text{ J}/(^{\circ})$; 随着直径增大, 放热率峰值依次降低, 分别降至 $619 \text{ J}/(^{\circ})$ 和 $582 \text{ J}/(^{\circ})$ 。

图 12 为不同喷孔直径预燃室的燃烧室温度分布云图。由图可知, 在主轴转角为 -2° 时刻方案 3 的射流火焰温度更高。这是由于较小喷孔直径产生显著节流效应, 导致高温射流产物进入主燃烧室的速度减缓, 而大孔径喷孔虽射流速度较低, 却能携带更多高温燃烧产物进入主燃烧室。到主轴转角为 0° 时, 方案 2 的主燃烧室火焰分布面积更大且传播速度更快, 展现出良好的燃烧扩散特性。而方案 3 的主燃室内火焰仅传播到活塞顶部。整体来看, 较小孔径的喷孔形成的射流具有更强的贯穿能力, 能够深入主燃烧室, 其火焰

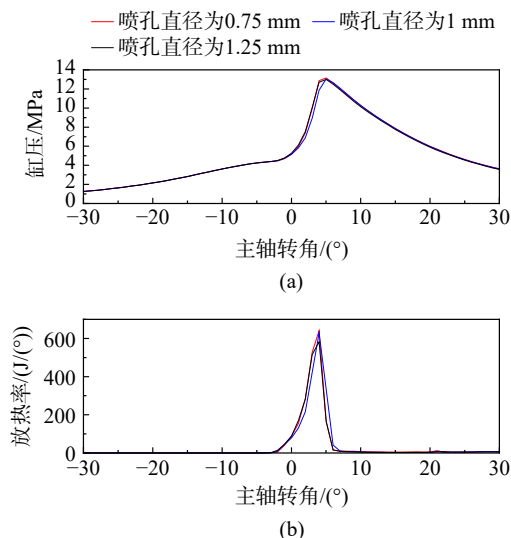


图 11 不同喷孔直径的缸压及放热率变化曲线

Fig. 11 Curves of cylinder pressure and heat release rate variations with different nozzle diameters

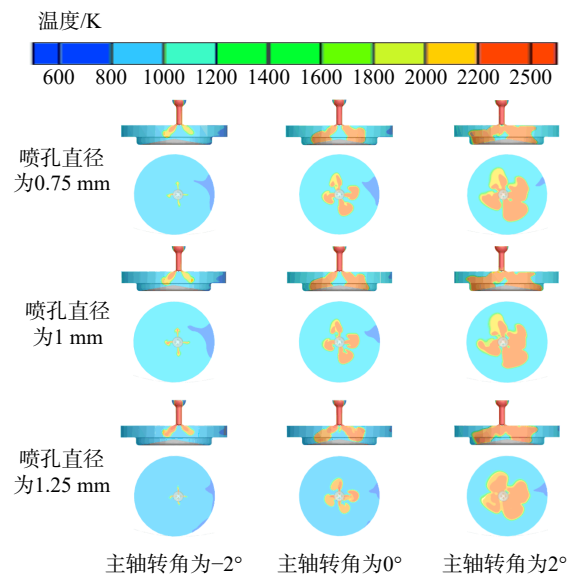


图 12 不同喷孔直径的燃烧室温度分布云图

Fig. 12 Cloud maps of temperature distribution in combustion chambers with different nozzle diameters

传播速度更快, 能够更有效地促进燃烧进程的推进与火焰扩散。

图 13 显示了不同预燃室喷孔直径对发动机指示热效率和指示平均有效压力的影响。由图可知随着喷孔直径增大, 指示热效率和指示平均有效压力呈现出先增大后减小的趋势, 其中方案 2 性能指标达到峰值。因为在主轴转角为 2° 时, 方案 2 主燃烧室内火焰传播面积最大, 高温燃烧区

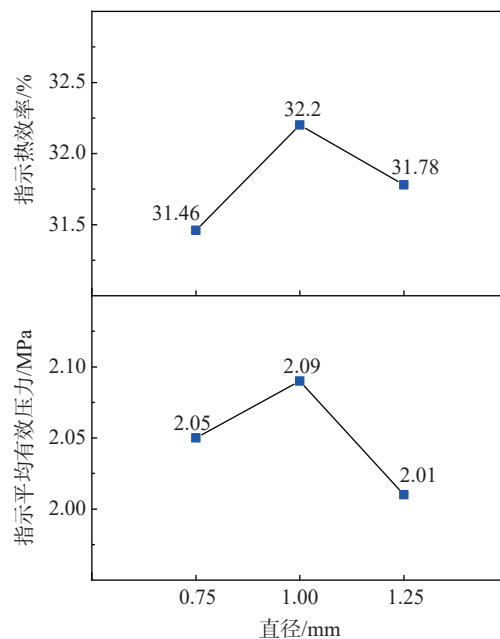


图 13 不同喷孔直径的指示平均有效压力和指示热效率

Fig. 13 Indicated average effective pressure and indicated thermal efficiency for different nozzle diameters

域更多,使高温射流产物以最佳流量与速度进入主燃烧室,有效促进了混合气快速、充分燃烧。这种高效火焰传播特性,确保了燃烧过程中能量充分释放,进而提升了指示热效率与指示平均有效压力,最终使得方案 2 在各项工况中展现出最优的综合性能。

3 结 论

本文提出一种应用于摆盘发动机的预燃室氢气射流点火方案。基于数值模拟计算方法,系统研究了预燃室截面比、容积、喷孔直径对射流发展特性及发动机性能的影响,主要结论如下:

1) 随着截面比的增大,发动机缸内压力与放热率曲线均呈现出先上升后下降的趋势,在截面比为 0.225 时达到峰值,其带来的射流火焰贯穿距离与传播面积更大,有效提升了燃烧效率。值得注意的是,随着截面比增大,燃烧重心逐渐向后推移,远离上止点时刻,大量燃烧放热做出有效功使得发动机的平均指示压力和指示热效率增加。

2) 随着容积增大,缸内压力、放热率、指示热效率、指示平均有效压力、射流火焰的贯穿距离和分布面积呈现先增大后减小的趋势。研究发现,当预燃室容积占比为 1% 时,射流贯穿距离达到最大,发动机各项性能指标均处于最优状态,表明该容积参数下预燃室与主燃烧室间的能量传递效率最佳,能够实现最理想的燃烧过程。

3) 喷孔直径对于摆盘发动机性能的影响同样呈现随喷孔直径增加先增大后较小的趋势。当喷孔直径较小时,明显的节流效应使得高温射流产物进入主燃烧室的速度减缓,影响燃烧效率;而大直径喷孔虽然射流速度较低,但能够携带更多的高温燃烧产物进入主燃烧室。当喷孔直径为 1 mm 时,射流特性与主燃烧室燃烧过程达到最佳匹配,能够产生更强的燃烧动力,使发动机获得最优的综合性能表现。研究表明,当预燃室截面比为 0.225,容积比为 1%,喷孔直径为 1 mm 时,这一参数组合可有效地提高燃烧室的燃烧效率与压力,提升氢氨摆盘发动机的整体性能。

参考文献:

[1] 汪琦,张慧芬,俞红啸,等. 燃烧氢氨能源的清洁环保供热及减少碳排放量[J]. 染整技术, 2025, 47(1): 28-31.
WANG Qi, ZHANG Huifen, YU Hongxiao, et al. Combustion of hydrogen ammonia energy clean and environmentally friendly heating and reduce carbon emissions[J]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2025, 47(1): 28-31. (in Chinese)

[2] 肖丽,邹毅,雷鸣,等. 预混氢气对氨气燃烧过程的加速机理研究[J]. 节能技术, 2024, 42(5): 411-417.
XIAO Li, ZOU Yi, LEI Ming, et al. Mechanistic study of accelerated characterization of ammonia combustion process by premixed hydrogen gas[J]. Energy Conservation Technology, 2024, 42(5): 411-417. (in Chinese)

[3] DINESH M H, KUMAR G N. Effects of compression and mixing ratio on NH_3/H_2 fueled SI engine performance, combustion stability, and emission[J]. *Energy Conversion and Management: X*, 2022, 15: 100269.

[4] 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.

[5] 高源鑫,冯永明,王煜淞,等. 氨燃料部分预裂解对预燃室射流点火氨发动机燃烧及温室气体排放的影响[J]. 内燃机工程, 2025, 46(3): 55-68.
GAO Yuanxin, FENG Yongming, WANG Yusong, et al. Effects of partial pre-decomposition of ammonia fuel on combustion and greenhouse gas emissions in a pre-chamber jet ignition ammonia engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2025, 46(3): 55-68. (in Chinese)

[6] DINESH M H, PANDEY J K, KUMAR G N. Study of performance, combustion, and NOx emission behavior of an SI engine fueled with ammonia/hydrogen blends at various compression ratio[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(60): 25391-25403.

[7] XIN Gu, JI Changwei, WANG Shuofeng, et al. Effect of different volume fractions of ammonia on the combustion and emission characteristics of the hydrogen-fueled engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(36): 16297-16308.

[8] MENG Xiangyu, ZHAO Chenhan, CUI Zechuan, et al. Understanding of combustion characteristics and NO generation process with pure ammonia in the pre-chamber jet-induced ignition system[J]. *Fuel*, 2023, 331: 125743.

[9] LIU Zongkuan, ZHOU Lei, WEI Haiqiao. Experimental investigation on the performance of pure ammonia engine based on reactivity controlled turbulent jet ignition[J]. *Fuel*, 2023, 335: 127116.

[10] ZHANG Xiaolei, TIAN Jiangping, CUI Zechuan, et al. Visualization study on the effects of pre-chamber jet ignition and methane addition on the combustion characteristics of ammonia/air mixtures[J]. *Fuel*, 2023, 338: 127204.

[11] 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.

[12] 王罗玺,任飞,李卓航,等. 预燃室氢射流火焰引燃氨预混气火焰发展及着火特性数值研究[J]. 内燃机工程, 2023, 44(5): 24-32.
WANG Luoxi, REN Fei, LI Zhuohang, et al. Numerical investigation on the flame development and ignition characteristics of ammonia premixed gas ignited by hydrogen jet flame in a pre-chamber[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2023, 44(5): 24-32. (in Chinese)

[13] 张孚,陈海娥,李骏,等. 预燃室内氢喷射参数对氨内燃机燃烧的影响[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2024: 1-10. (2024-08-15) [2025-06-22]. <https://link.cnki.net/doi/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240533>.
ZHANG Fu, CHEN Haie, LI Jun, et al. Influence of hydrogen injection parameters in pre-chamber on combustion characteristics of

- ammonia fueled internal combustion engines[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024: 1-10. (2024-08-15) [2025-06-22]. <https://link.cnki.net/doi/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240533>. (in Chinese)
- [14] LIU Peilin, ZHONG Lijia, ZHOU Lei, et al. The ignition characteristics of the pre-chamber turbulent jet ignition of the hydrogen and methane based on different orifices[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(74): 37083-37097.
- [15] ZHONG Lijia, LIU Peilin, HUA Jianxiong, et al. Experimental study on combustion characteristics and pressure oscillations of turbulent jet ignition in a confined space[J]. *Combustion Science and Technology*, 2023, 195(5): 958-981.
- [16] WANG Nana, LIU Jinxiang, CHANG W L, et al. Ignition kinetics of a homogeneous hydrogen/air mixture using a transient hot jet[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(33): 16373-16385.
- [17] WANG Nana, LIU Jinxiang, CHANG W L, et al. A numerical study on effects of pre-chamber syngas reactivity on hot jet ignition[J]. *Fuel*, 2018, 234: 1-8.
- [18] LUO Qinghe, SUN Baigang, GAO Yongli, et al. The effect of equivalence ratio, temperature and pressure on the combustion characteristics of hydrogen-air pre-mixture with turbulent jet induced by pre-chamber sparkplug[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(36): 20470-20481.
- [19] 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.
- [20] 梁伟阁, 张振山, 朱锐. 周转斜盘发动机动力学分析与优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 26-30.
- LIANG Weige, ZHANG Zhenshan, ZHU Rui. Dynamic analysis and optimization of swash-plate engine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 26-30. (in Chinese)
- [21] 张雷, 徐海军, 张湘, 等. 高紧凑性交叉斜盘式功率传输机构的特性[J]. 中国机械工程, 2021, 32(18): 2165-2174. (in Chinese)
- ZHANG Lei, XU Haijun, ZHANG Xiang, et al. Characteristics of high compact power transmission mechanisms of crossed swash-plates[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(18): 2165-2174. (in Chinese)
- [22] 魏振航, 王世宇, 夏春花. 基于相位调谐的旋转摆盘发动机驱动机构运动与受力分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(3): 109-119.
- WEI Zhenhang, WANG Shiyu, XIA Chunhua. Motion and forces analysis of the drive mechanism of rotary wobble-plate engine based on phase tuning[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(3): 109-119. (in Chinese)
- [23] 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: 江苏大学, 2020.
- GE Qiqi. Numerical researches on combustion and emission characteristics of a hydrogen enriched natural gas engine with pre-chamber[D]. Zhenjiang Jiangsu: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
- [24] 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. (in Chinese)
- [25] 杨舟, 王忠恕, 刘强, 等. 一种适于双燃料发动机的燃烧室设计[J]. 车用发动机, 2018(6): 71-77.
- YANG Zhou, WANG Zhongshu, LIU Qiang, et al. Design of combustion chamber for dual fuel engine[J]. *Vehicle Engine*, 2018(6): 71-77. (in Chinese)
- [26] 郭浩. 船用双燃料低速机预燃室富燃反应机理及性能优化策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- GUO Hao. Research on the fuel-rich combustion reaction mechanism in pre-chamber and performance optimization strategy for a marine LP-DF engine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [27] SENECA P K, RICHARDS K J, POMRANING E, et al. A new parallel cut-cell Cartesian CFD code for rapid grid generation applied to in-cylinder diesel engine simulations: SAE Technical Paper 2007-1-0159 [J]. Warrendale, US: SAE (Society of Automotive Engineers) International, 2007.
- [28] 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.

(编辑: 王碧琚)