

基于预燃室湍流射流点火氨燃料着火燃烧过程研究

刘宗宽, 钟力嘉, 张晓军, 刘丰年, 周磊, 卫海桥
(天津大学, 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Study on the ignition and combustion process of ammonia with pre-chamber turbulent jet ignition (PTJI)

LIU Zongkuan, ZHONG Lijia, ZHANG Xiaojun, LIU Fengnian, ZHOU Lei, WEI Haiqiao
(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to investigate the ignition and combustion characteristics of ammonia under turbulent jet ignition (TJI) mode, in this work, a three-dimensional numerical model of the constant volume combustion bomb (CVCB) with a TJI system was built in the numerical simulation software CONVERGE. And the ignition and combustion of ammonia was studied under TJI mode fueled with hydrogen in the pre-chamber. The results showed that, impacted by the intake process of the main combustion chamber and pre-chamber combustion after ignition, the flow between main combustion chamber and pre-chamber can be divided into four stages. The pressure in the pre-chamber increases after the ignition and combustion of pre-chamber mixture, and a high-speed jet from the pre-chamber towards the main combustion chamber forms causing by the pre-chamber flame entrained the unburned mixture and combustion products. At spark timing, under the combined action of gas flow between the main combustion chamber and pre-chamber and hydrogen injection, the pre-chamber can be divided into three zones: over-rich mixture zone, homogeneous mixture zone and lean-mixture zone. Moreover, the overall combustion process can be divided into three stages: cold jet stage, jet flame ignition stage, and fast combustion stage in the main combustion chamber.

摘要: 为探究预燃室湍流射流点火模式下氨燃料的着火燃烧特性,本研究应用 CONVERGE 三维数值模拟软件,建立带有预燃室射流射流点火系统的定容燃烧弹三维数值模型,开展了预燃室喷射氢气射流点火模式下氨燃料着火燃烧过程的模拟研究。研究发现,在主燃烧室进气过程和点火后预燃室燃烧的影响下,主、预燃室之间的流动过程可分为四个阶段,预燃室内混合气着火后,压力迅速升高,火焰夹带着未燃混合气和燃烧产物形成由预燃室流向主燃烧室的高速射流;点火时刻,在主、预燃室之间气体流动与氢气喷束的共同作用下,预燃室内形成局部过浓区、均质混合气区和稀薄混合气区;整体着火燃烧过程分为三个阶段:冷态射流阶段、射流火焰点火阶段和主燃烧室快速燃烧阶段。

关键词: 氨燃料; 预燃室; 湍流射流点火; 燃烧; 内燃机

Key words: ammonia; pre-chamber; turbulent jet ignition; combustion; engine

中图分类号: TK431 (请查阅中图分类号第 5 版)

文献标识码: A

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (91641203);

作者简介: 刘宗宽 (1992-), 男, 博士生, 主要研究方向: 氨氢燃料燃烧, E-mail: liuzongkuan@tju.edu.cn;

钟力嘉 (联系人), E-mail: 1098809860@qq.com.

0 概述

“双碳目标”下,二氧化碳减排已成为全球面临的共同挑战。氨被认为是一种无二氧化碳排放的理想发动机替代燃料^[1]。然而,氨气的自燃温度高,最小点火能量高,燃烧范围小,且氨气的火焰传播速度慢(约为 50 cm/s),燃烧效率较低,使得氨气发动机的燃烧稳定性较差。着火和燃烧不稳定直接导致发动机动力性能和排放性能变差,并造成氨泄漏。研究证明,发动机燃用氨燃料时面临点火难度高,缸内燃烧稳定性差,发动机氮氧化物和未燃氨排放过高等问题^[2-5]。因此,对于氨燃料发动机,缸内稳定的着火与火焰传播过程对发动机燃烧过程优化、排放控制、安全性保障均具有重要意义。实现氨燃料稳定着火及高效燃烧是目前氨发动机研制面临的关键技术之一。

预燃室湍流射流点火(TJI, turbulent jet ignition)概念于 2010 年由马勒公司提出^[6,7],是一种实现点燃式发动机稀薄燃烧的预燃室结构,能够有效提升点火能量、解决发动机燃烧不稳定和燃烧不完全等问题^[8]。湍流射流点火系统主要包括火花塞、燃料喷射器和预燃室内腔等部分,由燃料喷射器向预燃室内腔供给燃料,以形成目标浓度的混合气,而后由火花塞点燃预燃室内腔混合气,预燃室火焰在射流孔的作用下形成射流火焰,最终点燃主燃烧室内混合气,发动机完成燃烧做功。相比传统火花塞点火(SI, spark ignition),TJI 系统可在缸内实现多点点火,促进快速燃烧,故发动机燃烧更加稳定^[9,10]。密歇根大学 Validi 等人^[11]及瑞士联邦技术学院的 Benekos 等人^[12]对湍流射流点火的基础燃烧特性进行了深入研究,发现 TJI 燃烧过程大致分为三个阶段:第一阶段为预燃室混合气的着火和燃烧过程,即在火花塞的作用下预燃室内混合气发生着火,火焰在预燃室内传播;第二阶段为射流火焰形成并引燃主燃室中混合气的过程,预燃室火焰在射流孔作用下形成湍流射流火焰,而后引燃主燃室中混合气;第三阶段为主燃室中火焰发展并形成湍流火焰的过程。基础研究方面,Gentz 等人^[13,14]运用快速压缩机探究了不同射流孔径对射流燃烧特性的影响,发现装有预燃室时燃烧持续期明显缩短,其中 1.5 mm 直

径喷孔的燃烧持续期最短。Biswas 等人^[15-17]使用定容弹对射流火焰燃烧特性进行可视化研究,发现喷射孔径不同时,主燃室存在两种不同的着火机制,分别为火焰引燃与活性物质引燃。Tanoue 等人^[18,19]研究了预燃室中不同点火位置对射流点火燃烧特性的影响,结果发现当点火位置远离喷嘴出口时,未燃烧气体会先喷入主燃室,随后高温的燃烧产物才会进入主燃室引燃混合气。

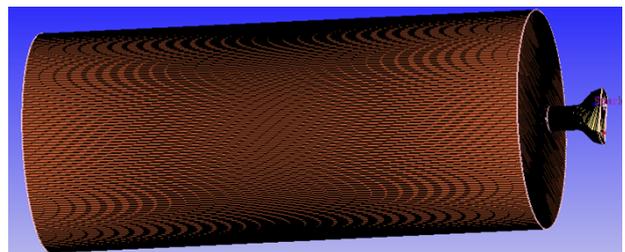
对于 TJI 点火系统在发动机中的应用研究,Attard 等人^[6,7]基于一台 SI 发动机进行改装,利于 TJI 系统实现稀薄燃烧后,发动机热效率从 SI 的 37.9% 提升到了 42.0%,同时实现了低 NO_x 排放(约 10 ppm)。Atis 等人^[20]采用向预燃室内同时喷燃料和空气的方式实现了 EGR (Exhaust Gas Recirculation) 率 40% 的稳定燃烧。Stadler 等人^[21]在研究中指出相较于 SI 燃烧模式,预燃室当量燃烧下,预燃室内腔的存在会导致传热损失的增加。

综上所述,本文在定容燃烧弹中加入预燃室湍流射流点火系统,并在预燃室中喷射氢气,以提高预燃室反应活性和着火能量。开展了预燃室射流点火模式下氨燃料着火燃烧过程的模拟研究。研究结果可为氨燃料发动机高效稳定燃烧技术方案的开发提供一定理论指导,助力实现零碳排放。

1 数值模型介绍

1.1 模型建立

本研究基于 CONVERGE 三维软件开展,其具有自动划分网格、网格自适应加密、运动边界处理方便及可支持多种后处理软件等功能和优点。定容燃烧弹主燃烧室的主体结构为圆柱体,其长度为 230 mm,直径为 100 mm,在 CONVERGE 中建立的三维数值模型如图 1 (a) 所示,主燃烧室右侧设置有预燃室射流点火装置,其实际结构如图 1 (b) 所示。

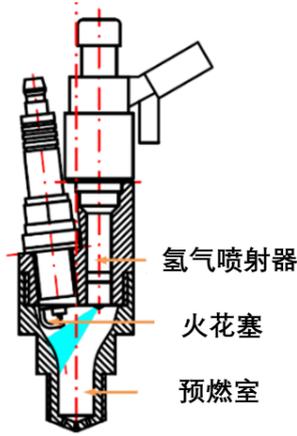


收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91641203);

作者简介: 刘宗宽(1992-),男,博士生,主要研究方向:氨氢燃料燃烧, E-mail: liuzongkuan@tju.edu.cn; 钟力嘉(联系人), E-mail: 1098809860@qq.com。

(a) 整体示意图



(b) 预燃室射流点火系统实际结构图

图1 定容燃烧弹三维模型和预燃室射流点火系统示意图

为准确的捕捉主燃烧室的流动、传质和传热特征, 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。Gholamisheeri 等^[22]指出该湍流模型可以准确描述射流点火系统的流动特征。燃烧模型为 G-equation 模型, 本研究用该模型旨在准确地捕捉火焰面的位置。发动机中燃烧模型准确性的关键是在于层流火焰速度的求解, 本文采用 Gulder^[23]提出的方法计算燃料与空气混合物的层流火焰速度。壁面传热模型为 O'Rourke-Amsden 模型。具体模型选用如表 1 所示。

表 1 计算模型选择

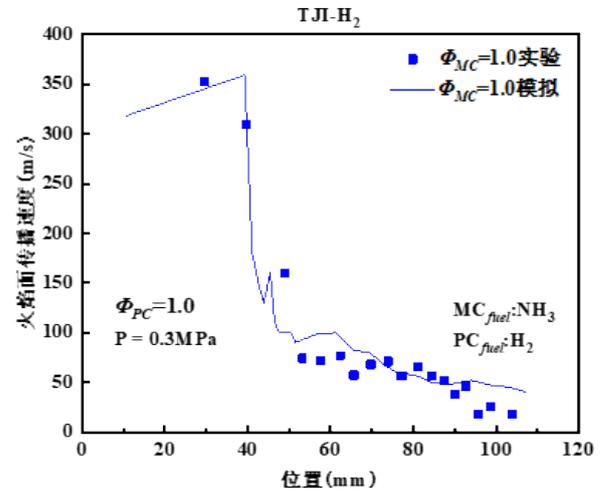
项目	参数
湍流模型	RNG $k-\varepsilon$
燃烧模型	G-equation
壁面传热模型	O'Rourke-Amsden

本文采用的基础网格尺寸为 4 mm。点火和预燃室区域处分别进行局部加密, 火花塞和预燃室附近的网格尺寸为 0.125 mm。在预燃室和主燃烧室内基于温度和速度梯度分别进行 4 级和 2 级的自适应加密, 以保证准确捕捉射流点火特征及后续燃烧过程。计算过程中最小时间步长为 1×10^{-8} s, 最大时间步长限制在 4×10^{-6} s 内。

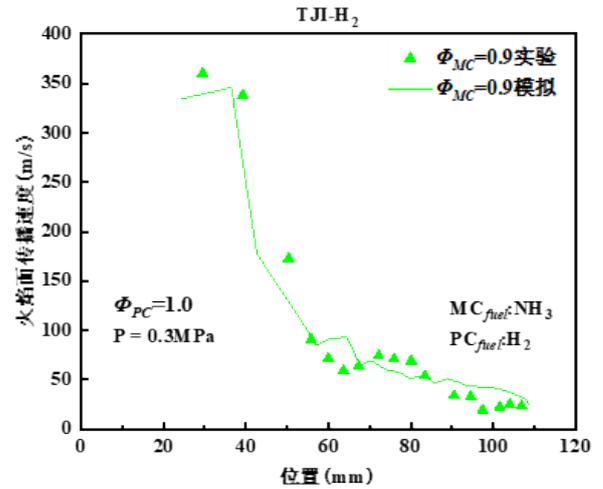
1.2 模型验证

模型搭建完成以后, 对该数值模型进行验证, 将不同时刻火焰面的传播速度和形态的模拟结果与实验值进行对比。图 2 展示了主燃烧室中火焰传播速度随位置的变化, 并将模拟结果和实验值进行了比较, 其中主燃烧室初始压力 P_i 为 0.3 MPa, 初始当量比 Φ_{MC} 为 1.0, 预燃室燃料 PC_{fuel} 为氢气, 由氢气喷射器喷入预燃室。可以发现, 火焰速度曲线的形态和实验数据点的吻合度较高, 偏差在误差允许的

范围内, 说明模拟结果可以较为准确的预测实验结果。



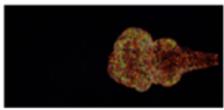
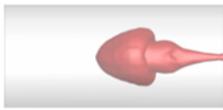
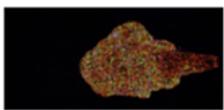
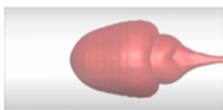
(a) 当量比 1.0



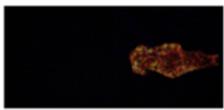
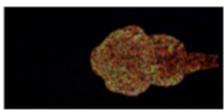
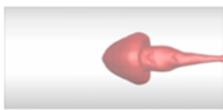
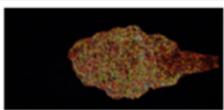
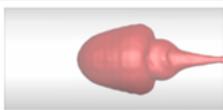
(b) 当量比 0.9

图 2 火焰传播速度模拟和实验值对比

进一步, 图 3 将火焰形态的模拟结果和实验图片进行了对比。选择 CONVERGE 中 G 方程输出项非反应标量 $G=0$ 时的火焰面位置来表示火焰前锋面的位置。通过对比, 发现火焰面形态的模拟结果可以与实验中实际火焰形态较好的吻合, 说明该数值模型可对预燃室射流火焰引燃氨气的燃烧过程进行准确可靠的模拟和预测。

TJI-H ₂ $\Phi = 1.0$		
时刻(s)	实验结果	模拟结果
0.01032		
0.01043		
0.01066		
0.01089		

(a) 当量比 1.0

TJI-H ₂ $\Phi = 0.9$		
时刻(s)	实验结果	模拟结果
0.01037		
0.01049		
0.01072		
0.01095		

(b) 当量比 0.9

图 3 火焰形态模拟结果和实验图片对比

基于上述模型，本文开展了预燃室喷氢燃烧模式下，预燃室射流火焰引燃主燃烧室氨燃料的模拟研究。主要探究了主、预燃室内的着火过程、射流火焰的形成和主燃烧室内湍流火焰的发展。

2 结果与分析

2.1 主、预燃室着火过程分析

预燃室内的燃料喷射过程中涉及到复杂的流体运动，会对预燃室混合气的形成与分布直接造成影响，本研究以主燃烧室混合气初始当量比为 0.9，初始压力 $P_i = 0.3$ MPa 的工况为例，预燃室喷射氢气，分析预燃室及主燃烧室的混合气的流动与分布情况。图 4 展示了不同时刻下预燃室与主燃烧室的流动速度与压力分布状况。根据不同时刻下主、预燃室间的速度和压力分布，可将流动过程划分为以下四个阶段：

第一阶段为预燃室内燃料喷射阶段，持续期为 0 s-0.00860 s。该阶段，氢气喷射器喷射氢气，预燃室内形成高速的氢气燃料喷束，形成对预燃室内部空气的卷吸，在预燃室内部形成两个滚流区域：滚流区域 1 和滚流区域 2。此时，高速氢气喷束导致部分预燃室内的空气被挤入主燃烧室。

第二阶段为预燃室燃料喷射结束到火花塞跳火，持续期为 0.00860 s-0.00920 s。此阶段，氢气喷束产生的影响并没有完全消失，由于惯性，卷吸和两个滚流区域也在持续发展，此时由于滚流区域 1 的流动，部分喷口和主燃烧室的混合气被吸入预燃室。

第三阶段为火花塞处火核形成，火焰开始在预燃室内传播，预燃室射流火焰逐渐形成，主燃烧室开始着火，该阶段持续期为 0.00920 s-0.01280 s。这一阶段由于火核形成，火焰主导的滚流区域 2 快速发展，滚流区域 1 逐渐消失。同时由于燃烧导致预燃室内压力迅速升高，故在此阶段预燃室混合气和燃烧产物从预燃室进入主燃烧室。

第四阶段为主燃烧室充分燃烧阶段，该阶段特点为主燃烧室到预燃室的反向流动出现，持续期为 0.01280 s 直到燃烧结束。这一阶段开始时，由于射流火焰已经结束，预燃室喷孔处的流向开始改变。此时主燃烧室内的压力略高于预燃室，出现了主燃烧室向预燃室的流动。

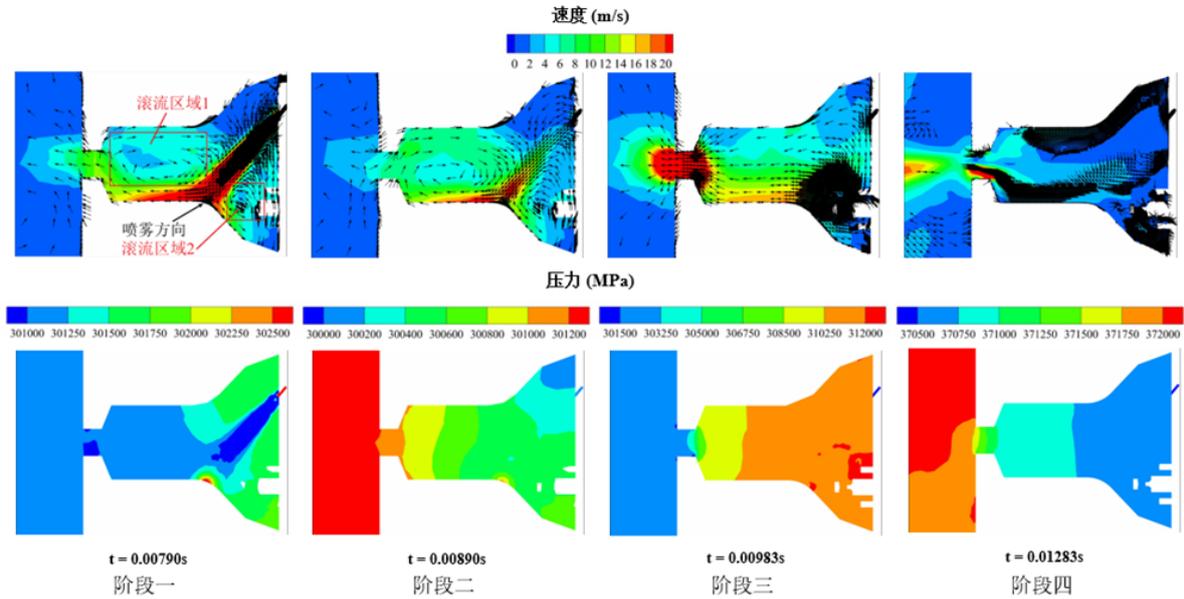


图 4 不同时刻预燃室与主燃烧室速度和压力分布云图

点火时刻预燃室内混合气的分布直接影响着火稳定性。为探究预燃室内的混合气状态对预燃室着火过程的影响，图 5 展示了点火时刻下预燃室内混合气当量比的分布特点。根据预燃室内部混合气状态，可将预燃室大致分为三个区域：局部过浓区、均质混合区和卷吸背部稀薄混合气区。局部过浓区域主要位于预燃室底部，其形成与预燃室内的氢气喷射方向有关。当量比为 1.0 的混合气均位于预燃室中心区域，由于燃料射流与空气发生卷吸，促进了燃料与预燃室内空气的混合。此外，火花塞附近形成过浓区域，混合气的当量比为 1.3-1.4 左右。对比图 4 中阶段一的气流运动可知，预燃室内当量比的分布与气体流动直接相关，两个滚流区域分别形成均质和过浓混合气，这主要由预燃室内滚流的范围和方向决定。研究表明，点火时刻下，预燃室内混合气处于偏浓状态时，可保证稳定着火燃烧。即使主燃烧室内为稀薄混合气，预燃室混合气点火成功后，形成的射流火焰也可以稳定点燃主燃烧室稀薄混合气。

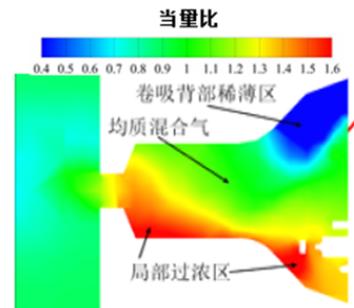


图 5 点火时刻（进气完成后 0.00050 s）下预燃室内当量比分布

2.2 主、预燃室火焰发展和传播过程

图 6 展示了预燃室和主燃烧室内火焰发展的过程，以及对应时刻下主、预燃室的速度分布云图。可以发现，预燃室点火以后，从预燃室着火到预燃室射流火焰引燃主燃烧室氢气的过程大致可分为三个阶段。

第一阶段，火花塞点燃预燃室内混合气，火焰在预燃室内产生并发展，将预燃室中的未燃冷态混合气推入主燃烧室，形成冷态射流(图 6 中 0.01010 s 时刻)。

第二阶段，预燃室内火焰不断发展，由于预燃室体积较小，其腔内压力快速升高，与主燃烧室产生压差，射流火焰夹带着未燃混合气和燃烧产物在

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (91641203) ;

作者简介: 刘宗宽 (1992-), 男, 博士生, 主要研究方向: 氢氨燃料燃烧, E-mail: liuzongkuan@tju.edu.cn; 钟力嘉 (联系人), E-mail: 1098809860@qq.com.

压差驱动下通过喷孔射入主燃烧室，火焰经喷孔加速后，速度最高可达约 400 m/s。同时，射流中携带大量燃烧产生的活性自由基，例如 OH、H 和 O 基团，其到达主燃烧室后可引发混合气链分支反应，促进快速着火，进而引燃主燃烧室中混合气（图 6 中 0.01060s 时刻）；在第二阶段末期，主燃烧室内混合气被引燃后，随着射流强度的减弱，主燃烧室与预燃室的火焰面出现分离。此时喷孔处未燃烧的混合气进入预燃室，形成了冷流的回流（图 6 中 0.01290 s 时刻）。

第三阶段，随着主燃烧室内燃烧进行，压力增大，主燃烧室火焰面通过喷孔进入预燃室，而后导致预燃室内压力升高，持续至燃烧结束（图 6 中 0.01410s 时刻）。

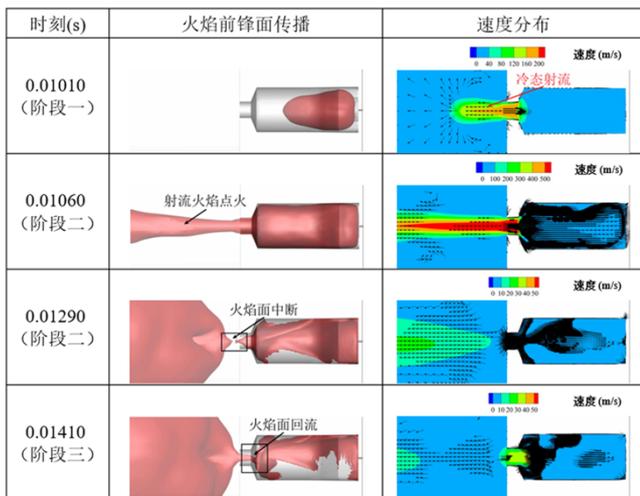


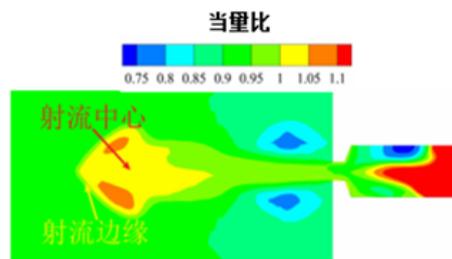
图 6 火焰发展过程和速度分布

为进一步探究预燃室射流火焰在主燃烧室内的发展过程，选取图 6 中第二阶段射流火焰引燃主燃烧室混合气的过程进行分析。图 7 展示了火焰发展至第二阶段（图 6 中 0.01060 s 时刻）时预燃室及主燃烧室当量比、温度和 OH 质量分数分布状态。

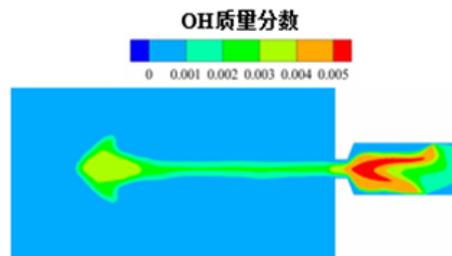
根据当量比分布可将射流火焰分为两个部分：射流中心区域和射流边缘区域。预燃室内火焰面处于当量比 1.1 左右，当射流火焰到达主燃烧室时，燃烧的发展和主燃烧室内混合气的稀释使射流中心区域当量比保持在 1.0 附近。射流火焰边缘当量比相对较低，这是由射流中心的扩散、冷态射流以及射流推动主燃烧室混合气的卷吸、掺混和聚集等作用共同造成。

由 OH 质量分数云图看出，预燃室中 OH 浓度较高，而主燃烧室中 OH 主要分布于射流中心区域，这说明火焰头部位置 OH 的生成速率较高，燃烧较为剧烈。在靠近喷孔的区域，过高的剪切力导致混合作用过强，影响燃烧发生，而在射流火焰前端，混

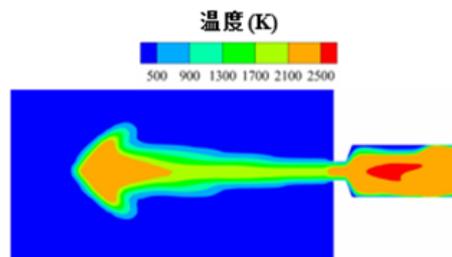
合作用逐渐减弱，使得燃烧率先在这部分区域发生。该区域在 OH 与射流边缘的混合气相互作用，再加上射流火焰的高温加热（大于 2500 K），火焰沿射流区域边缘持续传播。



(a) 当量比分布云图



(b) OH 分布云图



(c) 温度分布云图

图 7 预燃室和主燃烧室当量比、温度和 OH 质量分数分布

2.3 主、预燃室燃烧特性分析

为进一步探究射流点火燃烧模式下预燃室和主燃烧室的燃烧特性。图 8 给出了预燃室和主燃烧室内压力和放热率随时间的变化曲线。图中阶段一到阶段三的时间点选取与图 6 中保持一致。可以发现，在第一阶段中，火焰主要在预燃室内传播，预燃室内的压力和放热率显著升高，主燃烧室内压力和放热率无明显变化。

随着燃烧进行，预燃室内建立起高温高压的环境，在预燃室喷孔的作用下，射流火焰在第二阶段形成，且喷孔对于射流火焰的形成具有重要的加速作用，从而产生高速射流火焰。需要指出，第二阶段初期主燃烧室压力和放热率上升缓慢，这是由于射流进入到主燃烧室与混合气作用并引燃混合气需要一定的反应时间，而当主燃烧室混合气被引燃后，发生多点着火，继而剧烈燃烧，放热率急剧上升，

此时燃烧反应进入第三阶段。

第三阶段，由于预燃室射流火焰的作用逐渐减弱，火焰的发展主要靠火焰面内外的温差和化学势差。此阶段为主燃烧室燃烧放热的主要阶段。同时，此阶段主燃烧室和预燃室的压力基本保持相同状态，这时预燃室的燃烧已经逐渐减弱，主燃烧室内的燃烧放热主导预燃室区域的压力升高过程。

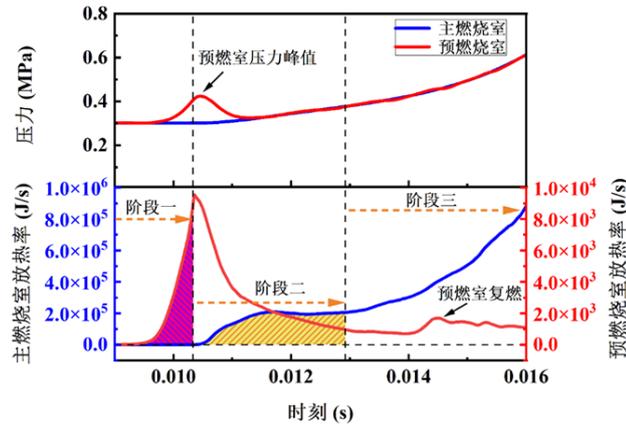


图 8 预燃室和主燃烧室压力和放热率曲线

图 9 给出了主燃烧室放热率相对于时间的一阶导数。可以发现，放热率导数曲线同样可以分析三个阶段，且阶段一到阶段三的时间点仍与图 6 中保持一致。第一阶段为预燃室点火时刻至主燃烧室放热率导数大于 0，此阶段燃烧仅在预燃室内进行，主燃烧室内放热率及其导数为 0。

第二阶段，主燃烧室内放热率导数呈现先上升后降低的趋势，导数数值由 0 增加至峰值后又降为 0。在此阶段内，射流火焰高速射出并引起主燃烧室内多点着火，湍流火焰快速形成，放热率快速升高使得放热率导数激增，但随着射流火焰作用逐渐减弱，放热率导数在到达峰值后又快速减小。

第三阶段为第二阶段终点至燃烧结束，该阶段为主燃烧室内混合气充分燃烧。在该阶段主燃烧室内放热率一阶导数再次上升，说明此时燃烧已经由射流点火引发的多点着火和湍流火焰逐渐转变为火焰前端在主燃烧室内的持续扩展。可以发现，基于放热率导数的变化趋势与火焰面位置和速度定义的射流点火阶段有很好的 consistency。

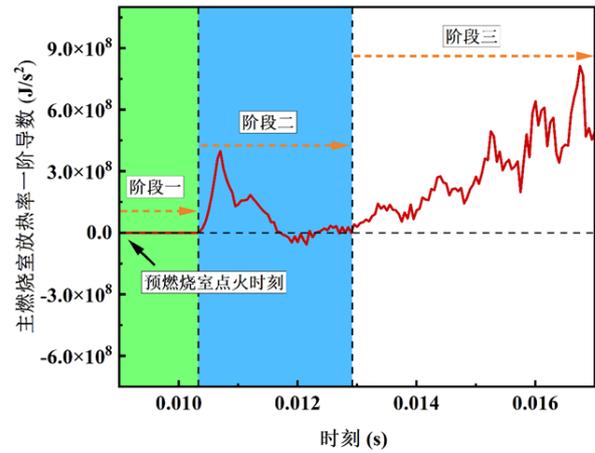


图 9 主燃烧室放热率一阶导数

3 结论

(1) 在预燃室氢气喷射和主、预燃室着火燃烧过程的影响下，预燃室与主燃烧室间的组分流动可分为四个阶段。第一、二阶段的流动是由主燃烧室进气过程造成的卷吸和滚流现象诱发。第三阶段为火花塞点火后，预燃室混合气开始着火燃烧，预燃室压力迅速升高，火焰夹带着未燃混合气和燃烧产物形成由预燃室流向主燃烧室的高速射流，产生射流火焰。随着主燃烧室火焰迅速发展，主燃烧室内压力高于预燃室，导致回流现象产生。

(2) 根据预燃室内混合气在点火时刻的状态，可将预燃室划分为三个区域：局部过浓区、均质混合气区和卷吸背部稀薄混合气区。这主要由主燃烧室与预燃室之间的气体流动与氢气喷束的共同作用造成。预燃室内较好的混合气状态和流动情况能够保证预燃室内着火成功，进而产生射流火焰。

(3) 基于射流点火过程火焰面的位置和主、预燃烧室间速度场分布可将着火燃烧过程分为三个阶段：冷态射流阶段、射流火焰点火阶段和主燃烧室充分燃烧阶段。在主燃烧室充分燃烧阶段，出现预燃室内的复燃。

参考文献:

- [1] Lloyds Register on how ammonia can be the ideal renewable marine fuel, Ship Technology, March 10, 2020.4.4.[C].
- [2] Mounaïm-Rousselle C, Bréquigny P, Dumand C, et al. Operating Limits for Ammonia Fuel Spark-Ignition Engine[J]. Energies, 2021, 14(14).
- [3] Westlye F R, Ivarsson A, Schramm J. Experimental

- investigation of nitrogen based emissions from an ammonia fueled SI-engine[J]. *Fuel*, 2013, 111: 239-247.
- [4] Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Combustion Characteristics of Ammonia in a Modern Spark-Ignition Engine[C]. SAE Technical Paper Series, 2019.
- [5] Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Performance and Emissions of an Ammonia-Fueled SI Engine with Hydrogen Enrichment[R]. SAE Technical Paper, 2019.
- [6] Attard W P, Parsons P. A normally aspirated spark initiated Combustion system capable of high load high efficiency and near zero NO_x emission in a modern vehicle powertrain[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2010, 3 (2): 269-287.
- [7] Attard W P, Fraser N, Parsons P. A turbulent jet ignition pre-chamber combustion system for large fuel economy improvements in a modern vehicle powertrain[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2010, 3 (2): 20-37.
- [8] Alvarez C E C, Couto G E, Roso V R, et al. A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines[J], 2018, 128: 107-120.
- [9] Pitt P, Ridley J, Clemilnts R. An ignition system for ultra lean mixtures[J]. *An Ignition System for Ultra Lean Mixtures*, 1983, 35(5-6): 277-285.
- [10] Tian J, Cui Z, Ren Z, et al. Experimental study on jet ignition and combustion processes of natural gas[J], 2020, 262: 116467.
- [11] Validi A A, Schock H, Jaber F J C, et al. Turbulent jet ignition assisted combustion in a rapid compression machine[J], 2017, 186(dec.): 65-82.
- [12] Benekos S, Frouzakis C E, Giannakopoulos G K, et al. Prechamber ignition: An exploratory 2-D DNS study of the effects of initial temperature and main chamber composition[J], 2020, 215: 10-27.
- [13] Gentz G R, Toulson E. Experimental Studies of a Liquid Propane Auxiliary Fueled Turbulent Jet Igniter in a Rapid Compression Machine[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2016, 9(2): 777-785.
- [14] 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.
- [15] Biswas S, Qiao L. Prechamber Hot Jet Ignition of Ultra-Lean H₂/Air Mixtures: Effect of Supersonic Jets and Combustion Instability[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2016, 9(3): 1584-1592.
- [16] Biswas S, Tanvir S, Wang H, et al. On ignition mechanisms of premixed CH₄/air and H₂/air using a hot turbulent jet generated by pre-chamber combustion[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 925-937.
- [17] Biswas S, Qiao L. 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.
- [18] Tanoue K, Kimura T, Jimoto T, et al. Study of prechamber combustion characteristics in a rapid compression and expansion machine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 64-71.
- [19] Yamashita R, Waku S, Mori D, et al. Effect of fuel property on the ignition and combustion characteristics of prechamber ignition[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2021, 16(2): JTST0014-JTST0014.
- [20] Atis C, Chowdhury S S, Ayele Y, et al. Ultra-Lean and High EGR Operation of Dual Mode, Turbulent Jet Ignition (DM-TJI) Engine with Active Pre-chamber Scavenging[C]. WCX SAE World Congress Experience, 2020-01-1117, 2020.
- [21] Stadler A, Sauerland H, Härtl M, et al. The Potential of Gasoline Fueled Pre Chamber Ignition Combined with Elevated Compression Ratio[C]. WCX SAE World Congress Experience, 2020.
- [22] Gholamisheeri M, Wichman I S, Toulson E. A study of the turbulent jet flow field in a methane fueled turbulent jet ignition (TJI) system[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 183: 194-206.
- [23] M G. Correlations of Laminar Combustion Data for Alternative S.I. Engine Fuels[J]. West Coast International Meeting and Exposition, 1984: 26.