

基于不同喷嘴旋角气流协同作用的主动预燃室射流火焰研究

胡俊楠¹, 安彦召¹, 赵德阳¹, 裴毅强¹

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津, 300072)

Study of active pre-chamber jet flames based on the synergy of airflow with different nozzle swirl angle

HU Jun-nan¹, AN Yan-zhao^{1*}, ZHAO De-yang¹, PEI Yi-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper aims to study active pre-chamber (APC) jet flame formation based on the synergy of airflow with different nozzle swirl angles. A single-cylinder gasoline direct injection Atkinson cycle engine with a compression ratio of 17 was used to operate the ultra-lean ($\lambda=2.5$) conditions. Different APC structures with nozzle swirl angles ranging from 0° to 30° were designed to produce different flow fields inside APC. The result showed that the change of nozzle swirl angle not only affects the state of fuel-air mixture in the center of spark plug electrode but also affects the overall mixture distribution inside APC. APC with larger nozzle swirl angle has less wall film and faster fuel-air mixing to form a more evenly mixture distribution in APC top region, which improve the uniformity of the flame jets from different APC nozzles with a smaller Variance of jet TKE and jet velocity. Tumble flow plays a dominant role in the APC with a small nozzle swirl angle and the relatively weak swirl flow field inside APC results in more locally rich mixture regions that reduce the ignition capability of jet flame.

摘要: 本文旨在研究基于不同喷嘴旋角气流协同作用的主动预燃室(APC)射流火焰的影响。本研究为一台采用阿特金森循环压缩比为 17 且运行在超稀薄 ($\lambda=2.5$) 条件下的单缸直喷汽油机, 设计了不同的 APC 喷嘴旋角。喷嘴旋角从 0° 到 30° , 在 APC 内产生不同的流场。结果表明, 喷嘴旋角的变化不仅影响火花塞电极中心的混合气的状态, 也影响 APC 内部的整体混合物分布。喷嘴旋角较大的 APC 壁面油膜较少, 燃油空气混合速度较快, 在 APC 顶部区域形成了较均匀的混合气分布, 改善了不同 APC 喷嘴射流火焰的均匀性, 使得 APC 各喷嘴之间的射流湍动能和射流速度的方差较小。滚流在喷嘴旋角较小的 APC 中起主导作用, APC 内部相对较弱的旋流场导致局部富混合区较多, 降低了喷射火焰的点火能力。

关键词: 湍流射流燃烧; 主动预燃室; 超稀薄燃烧; 喷嘴旋角

Key words: Turbulent jet ignition, Active pre-chamber, Ultra-lean combustion, Nozzle swirl angle

中图分类号: TK411

文献标识码: A

0 概述

超稀薄燃烧是混合动力发动机实现更高热效率和更低氮氧化物排放的关键技术。然而, 在超稀混合气条件下存在点火困难、火焰传播缓慢和燃烧不稳定的风险。APC 即湍流射流点火, 由于其热自由

基射流或火焰热射流传播快, 是一种很有前途的超稀薄混合物点火方法^[1]。

以往的许多研究侧重于金属 APC 发动机的性能, 而不是瞬态 APC 射流的形成和射流点火能力的评估^[2,3,4]。APC 喷嘴旋角在混合过程中起着关键作用, 影响 APC 内局部当量比和速度场的发展^[5,6,7]。Andreas^[3]

等人发现, 增大 APC 喷嘴旋角可以改善 APC 内混合物的形成, 在 $\lambda = 1.8$ 处实现稳定燃烧, 热效率可达到 40.2%。然而, 从主燃室 (MC) 和 APC 气流协同的角度分析 APC 喷嘴旋角大小对混合过程的影响尚无相关研究。作者在之前的研究^[8]中发现, APC 射流速度是由 MC 和 APC 之间的压差决定的。然而, 很少有研究从 MC 和 APC 之间气流协同的角度分析喷嘴旋角对 APC 中燃油-空气混合过程和射流火焰发展的影响。

本文的目的是定量评价喷嘴旋角对 APC 热射流火焰特性的影响。APC 发动机模型运行在超稀薄 ($\lambda=2.5$) 工况下, 模拟了 APC 和 MC 中的燃油-空气的混合过程、流场分布、放热过程以及热射流火焰演化过程。

1 实验装置和模拟设置

1.1 发动机设置

在本研究中使用了带有 APC 的四冲程单缸 SI 发动机。采用阿特金森循环技术在不同工况下获得合适的压缩比。发动机配置及工作情况见表 1。在进气冲程期间, 气缸主燃室燃油喷射时间设置为 -300CA aTDC, 以实现更好的燃油-空气混合过程。喷油器为 AVL HDEV6。将主燃室燃油喷射压力设置为 320 bar, 燃油喷射质量为 23.3 mg, 以实现缸内 λ 约为 2.5。在压缩行程期间, APC 燃油喷射时间设置为 -120 CA aTDC, 以保持 APC 内更多的燃油。APC 燃油喷射压力为 120 bar, 燃油喷射质量为 4.5 mg, λ 在 1.0 左右, 形成更强的火焰射流。APC 中的火花定时设置为 -20 CA aTDC。

表 1 发动机参数和运行工况

项目	参数
缸径 (mm)	75
冲程 (mm)	127.5
发动机转速 (rpm)	2000
压缩比	17:1
燃油	95# 汽油
燃油喷射方式	缸内直喷
过量空气系数 (主燃室)	2.5
过量空气系数 (预燃室)	1.0

表 2 主动预燃室参数

项目	参数
喷嘴数	4
预燃室容积 (ml)	2.49
喷嘴直径 (mm)	1.6
喷嘴旋角 (γ , °)	0°5°10°15°20°25°30°
顶部锥角 (α , °)	50
喷嘴夹角 (β , °)	60

喷射夹角 (δ , °)	45
导管长度 (L, mm)	11
导管直径 (D, mm)	7.4

1.2 数值方法和模拟设置

图 1 显示了 APC 的发动机模型。APC 参数如表 2 所示。为了显示局部射流火焰的发展, 在三维模型上展示了两个切片, 切片 1 平行于气缸轴线, 穿过火花塞与喷油器之间的中心线, 切片 2 垂直于切片 1, 穿过火花塞电极的中心。此外, 在火花塞电极中心设置监测点, 以显示局部混合过程。

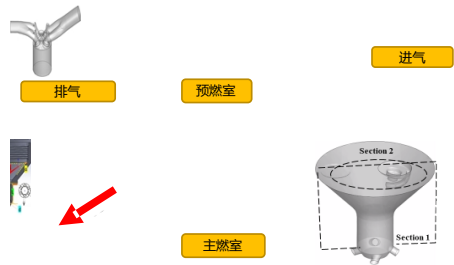


图 1 APC 发动机模型和 APC 结构

在 CONVERGE 软件中进行仿真计算。燃烧反应机理采用 KAUST-Mech(61 种物质, 270 种反应)对含乙醇的商用 RON 95 汽油进行燃烧。详细的 CFD 模型设置可以在我们之前的工作^[8]中找到。模型采用 SAGE 详细化学求解器对湍流射流点火过程进行了模拟。网格尺寸从 4mm 到 0.125mm 进行动态变化。具体区域, 如火花塞间隙, 油束区域, 和气阀底座被设为细化区域。实验采用的 APC 的喷嘴旋角为 15°。图 2 为 γ 为 15°时 APC 实验与模拟的气缸压力和放热率对比。虽然实验热释放率(HRR)的峰值较高, 但实验压力分布和 PC 与 MC 之间的压力差在当前发动机模型下可以很好地再现。

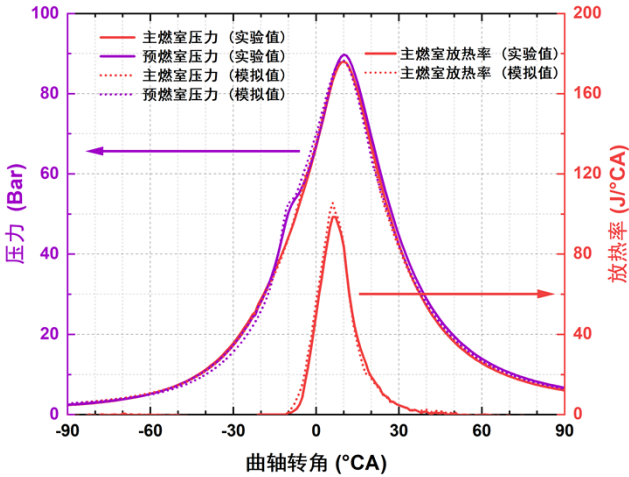


图 2 APC γ 为 15°时实验值和模拟值的气缸压力和放热率对比

2 模型结果分析

2.1 APC 油气混合过程

图3为火花塞电极中心处当量比随不同喷嘴旋角的变化情况。当喷嘴旋角 γ 小于 15° 时,在 -65°CA aTDC附近出现了相似的当量比单峰曲线,峰值随着旋角的增大而减小。然而,当喷嘴旋角 γ 从 15° 增加到 30° 时,当量比曲线呈现双峰特征,第一个峰集中在 -80°CA aTDC,第二个峰的位置从 -35°CA aTDC逐渐提前到 -55°CA aTDC。此外,随着旋角的增大,在 -100°CA - -80°CA aTDC范围内,火花塞电极中心处混合气当量比上升速率逐渐增大。

图4显示了不同喷嘴旋角下APC旋流比的变化。可以看出,喷嘴旋角越大,APC旋流比越大^[7],这一结果也解释了APC内部初始燃油/空气混合速率与喷嘴旋角成正比的现象。喷嘴旋角的变化不仅影响火花塞电极中心的混合气状态,而且影响APC内部整体混合气分布。随着APC喷嘴旋角的增大,旋流比逐渐增大。旋流比大于零,表明APC内部形成逆时针旋流;当喷嘴旋角为 0° 和 5° 时,APC内部流动以滚流为主,并伴有一定的顺时针旋流。APC内部火花塞点火后,形成火核并逐渐发展成射流火焰,通过APC喷嘴射流到MC中,导致在 -14°CA aTDC时的旋流比急剧下降;射流火焰点燃MC混合气后,MC内的压力高于APC内的压力,使MC内的混合气回流到APC内,从而在上止点附近形成旋流比曲线上的二次峰。

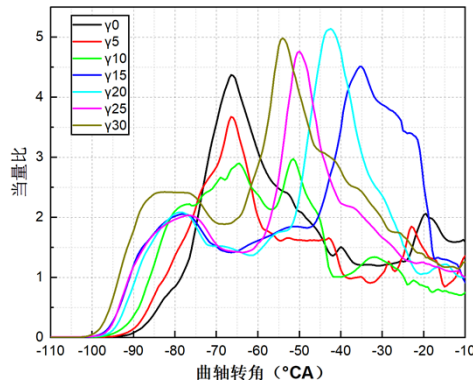


图3 不同喷嘴旋角下,火花塞电极中心当量比的变化

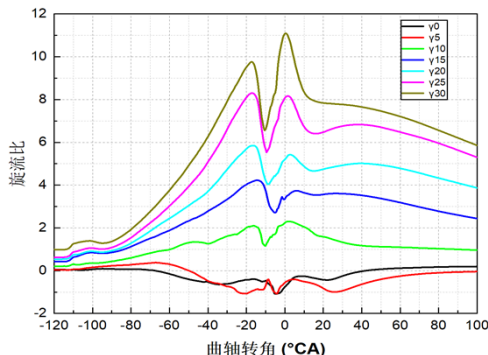


图4 不同喷嘴旋角下APC整体旋流比的变化

图5为 -20°CA aTDC点火时刻不同喷嘴旋角下APC内部当量比分布。大旋角($\geq 15^\circ$)的APC油气混合能力更强,形成两个浓度分布区域,当量比主要集中在 $1.0 - 1.4$ 范围内,占45.1%,有利于产生更强的射流火焰^[9]。另外,在当量比为 0.4 附近又形成了一个浓度区域,这与MC中混合物的浓度接近,说明较强的旋流效应使MC中的更多的稀混合气流入APC导管部分,促进了燃油的蒸发和混合。喷嘴旋角较小($< 15^\circ$)时,APC内部也存在两个不同的混合浓度区。当量比为 $0.6 - 0.9$ 的稀混合气所占比例约为30.5%,当量比为 $1.0 - 1.5$ 的富混合气所占比例达到33.5%,当量比为 $1.8 - 2.0$ 的富混合气所占比例为7%,说明燃油/空气混合过程不充分。

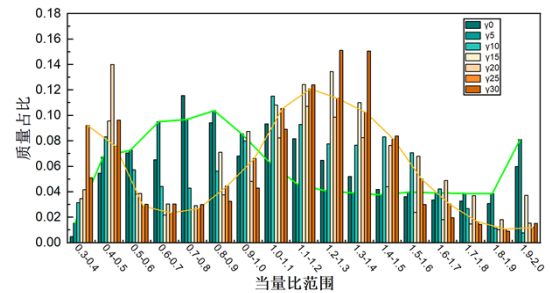


图5 -20°CA aTDC点火时刻下不同喷嘴旋角APC内部当量比分布

在APC燃油喷射的过程中,小容积空间内的喷雾撞击是不可避免的。图6显示了不同喷嘴旋角的APC内油膜质量的变化。可以清楚地看到,喷嘴旋角较大的APC,其壁面油膜质量较小,且旋流较强,油膜蒸发较快。这一结果证明,具有较大喷嘴旋角的APC可以加速喷雾撞击时附壁油膜的蒸发,并在有限的体积内促进燃料-空气混合过程^[3]。

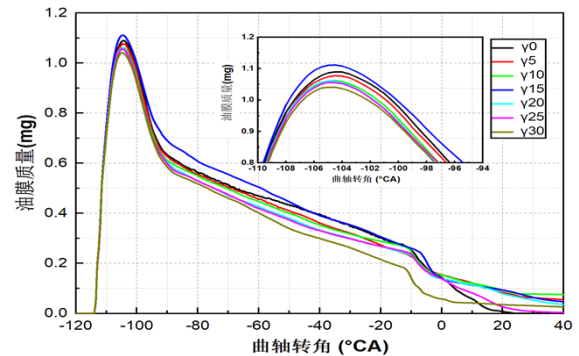


图6 不同喷嘴旋角下APC内部油膜质量的变化

APC内部当量比的空间分布如图7所示,以说明不同喷嘴旋角下MC与APC之间气流的协同作用。在APC燃油喷射过程中,喷雾撞击APC内壁,使部

分油雾从 APC 导管进入 MC。此外，较大喷嘴旋角的 APC 以较强的旋流加速 APC 顶部区域附近燃油的雾化和混合过程，使混合气浓度迅速上升，在 -80 CA aTDC 附近形成第一个浓度峰。在 -70 - -60 CA aTDC 范围内，随着更多的稀混合气从 MC 流入 APC，当量比逐渐降低到较低水平(图 3)。当活塞向上运动压缩缸内气体时，在较强的旋流(-75 CA aTDC)作用下，由喷雾撞击形成的壁面油膜继续蒸发并扩散到 APC 顶部，形成当量比剖面中的第二个浓度峰。在 -20 CA aTDC 点火时刻，APC 内形成了更强的旋流场，促进了燃料的分布，并在 APC 顶部几何中心形成了一个局部混合气富集区。APC 导管内的混合气与 MC 的混合气当量比接近，表明 MC 与 APC 之间气流协同相互作用。在喷嘴旋角较小的 APC 中，滚流占主导地位。随着活塞的向上运动，APC 管道上的壁膜在滚流的作用下不断被输送到 APC 顶部区域，从而在火花塞电极中心形成混合物浓度峰。此外，APC 内部相对较弱的旋流场导致了更多的局部混合气富集区。

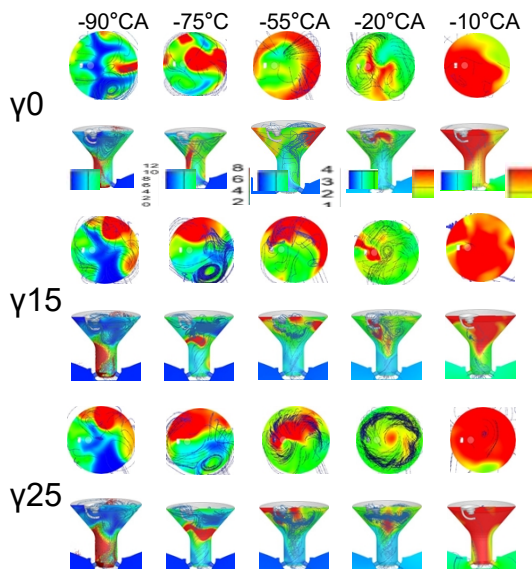


图 7 不同喷嘴旋角 APC 内部当量比空间分布。
上图：水平切面；下图：垂直切面。

2.2 APC 射流火焰发展

MC 和 APC 在不同旋角下的放热率和压差变化如图 8 所示。APC 放热率曲线中只有一个峰值。在 APC 射流点火下，MC 的放热率曲线呈典型的双峰分布。MC 中的超稀薄混合物首先被热射流火焰点燃，产生第一个放热率峰值，此时压差降至零以下。当射流火焰从 APC 中完全喷出时，由于超稀混合气的放热缓慢，MC 放热率下降到一定值之后，MC 混合气开始大规模湍流燃烧，达到第二个放热率峰值。

当喷嘴旋角为 15°时，APC 产生的放热率最小。喷嘴角为 25°时，APC 的压差峰值最高，峰值时刻出现最早，峰值持续时间最短，这表明 APC 的点火能力较强。

图 9 显示了不同喷嘴旋角下 APC 的射流湍动能和射流速度的方差变化。喷嘴旋角大于 15°时，APC 四个喷嘴之间的射流湍动能和射流速度的差异较小，说明较大的喷嘴旋角可以促进 APC 内部的燃油/空气混合过程，提高 APC 不同喷嘴射流火焰的均匀性。

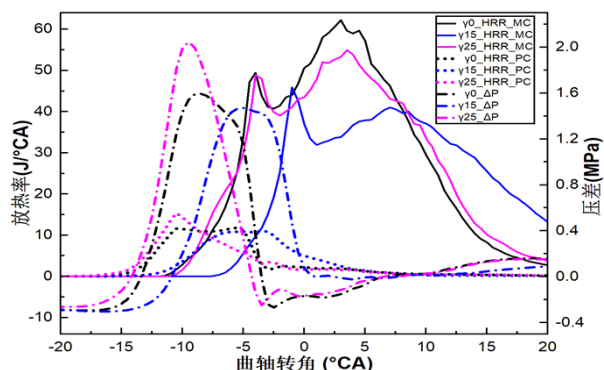


图 8 不同喷嘴旋角下 APC 的放热率和压力差的变化

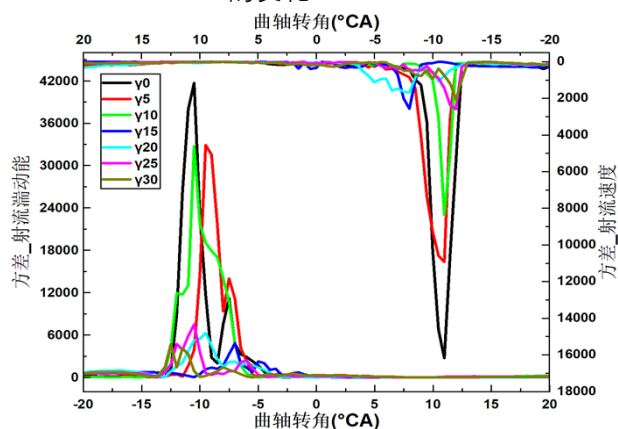


图 9 不同喷嘴旋角 APC 之间各喷嘴射流湍动能和射流速度的方差变化

在旋角为 25°的 APC 中，-10 CA aTDC 时火焰传播速度更快，并且 APC 顶部和导管区域内 OH 分布更广，如图 10 所示。此外，热射流发展过程中 OH 分布更加均匀，旋流效应更强，有利于射流火焰的快速形成和传播。图 11 展示了 -4 CA aTDC 时不同 APC 喷嘴旋角下发动机模型 1500K 火焰射流等温面的分布。喷嘴旋角大于 15°的 APC 形成的火焰射流较为均匀，喷嘴旋角小于 15°的 APC 形成的火焰射流不对称。造成上述结果的主要原因是由于 APC 内部混合气的形成和分布不同，较大的喷嘴旋角能够以较强的旋流加速燃油喷雾在 APC 顶部和导管区域的蒸发、雾化和混合过程，从而提高了不同 APC 喷嘴火焰射流的均匀性和点火能力。

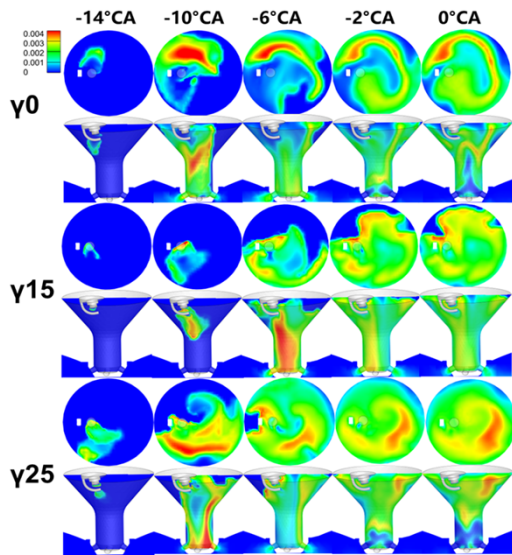


图 10 不同喷嘴旋角下 APC 内部的 OH 分布情况

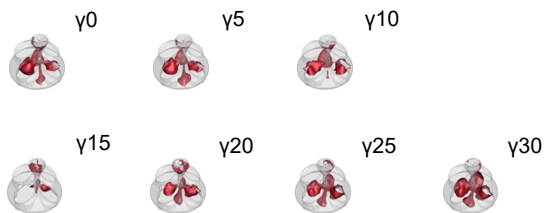


图 11 不同喷嘴旋角 APC 在 -4 CA aTDC 时 1500K 等温面的分布

3 结论

在本文中研究了 MC 与 APC 之间气流的协同作用，对点燃发动机气缸内超稀薄混合物的影响。具有不同喷嘴旋角的 APC 形成不同的滚流和旋流，影响了燃油/空气的混合和射流火焰的发展。本文主要研究结果如下：

(1) 喷嘴旋角可以促进 MC 和 APC 之间的气流协同作用。具有较大喷嘴旋角的 APC，可以产生更强的旋流，将喷射的燃油和 APC 导管上的附壁油膜夹带到 APC 顶部区域，并加强燃油/空气混合，形成更均匀的混合物分布。

(2) 射流火焰的形成和传播受 APC 气流协同作用的影响很显著。具有较大喷嘴旋角的 APC 可以促进火焰在 APC 内的传播，并产生对称性更好的射流火焰，从而迅速点燃超稀薄混合气，避免敲缸等现象的发生。

(3) 大喷嘴旋角带来的发动机气缸和 APC 之间

的燃料/空气混合协同效应可以指导 APC 结构的优化设计。设计更大的 APC 顶部容积有利于改善大喷嘴旋角的 APC 内部的燃油/空气混合。

参考文献：

- [1] Castilla, Alvarez, Carlos, et al. A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines. Applied Thermal Engineering Design Processes Equipment Economics, 2018.
- [2] Attard W P , Blaxill H . A Lean Burn Gasoline Fueled Pre-Chamber Jet Ignition Combustion System Achieving High Efficiency and Low NO_x at Part Load. Sae Technical Papers, 2012, 285.
- [3] Stadler A , Wessoly M , Blochum S , et al. Gasoline Fueled Pre-Chamber Ignition System for a Light-Duty Passenger Car Engine with Extended Lean Limit[J]. SAE International Journal of Engines, 2019, 12(3).
- [4] Xu G , Kotzagianni M , Kyrtatos P , et al. Experimental and numerical investigations of the unscavenged prechamber combustion in a rapid compression and expansion machine under engine-like conditions. Combustion and Flame, 2019, 204(JUN.):68-84.
- [5] Benajes J , Novella R , Gomez-Soriano J , et al. Evaluation of the passive pre-chamber ignition concept for future high compression ratio turbocharged spark-ignition engines. Applied Energy, 2019, 248(AUG.15):576-588.
- [6] Onofrio G , Napolitano P , Tunestl P , et al. Combustion sensitivity to the nozzle hole size in an active pre-chamber ultra-lean heavy-duty natural gas engine. Energy, 2021, 235.
- [7] Novella R , Gomez-Soriano J , Martinez-Hernandez P J , et al. Improving the performance of the passive pre-chamber ignition concept for spark-ignition engines fueled with natural gas. Fuel, 2021, 290:119971.

[8] Zhao Deyang, An Yanzhao, Pei Yiqiang, Shi Hao, Wang Kun. Numerical study on the asymmetrical jets formation from active pre-chamber under super-lean combustion conditions. Energy, 2023, 262(PA).

[9] Serrano D , Zaccardi J M , C Müller, et al. Ultra-Lean Pre-Chamber Gasoline Engine for Future Hybrid Powertrains. 14th International Conference on Engines & Vehicles. 2019.