

# 掺氢对乙醇喷雾点火和燃烧特性的影响研究

葛睿涵, 胡二江, 矫健, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

## Effects of Hydrogen Enrichment on Ignition and Combustion Characteristics of Ethanol Spray

GERuihan, HU Erjiang, JIAO Jian, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, China)

**Abstract:** Based on the constant volume combustion vessel, the ignition and combustion characteristics of ethanol spray combustion at different ignition timings, injection pressures and hydrogen equivalence ratios were investigated. The experimental conditions are 353 K, standard atmospheric pressure, ignition timing (0-50 ms after start of injection), injection pressure (5, 15, 25 MPa), and hydrogen premixed equivalence ratio (0.05, 0.1, 0.2). The results show that ethanol direct injection combined with hydrogen enrichment can achieve successful ignition under ultra-lean condition (global equivalence ratio 0.15, 67% ethanol/33% hydrogen). In addition, with the delay of ignition timing, the probability of ignition increases first and then decreases; As the injection pressure and hydrogen ratio increase, the probability of ignition increases. However, under high injection pressure, liquid spray has a better evaporation effect, making the mixed fuel more uniform, leading to incomplete combustion in extremely lean areas. Hydrogen enrichment not only stabilizes the ignition process, but also improves the overall combustion characteristics. Stable ignition and combustion can be achieved at an earlier ignition timing (2-3 ms), moderate injection pressure (15 MPa), and a minimum global equivalence ratio of 0.2 (50% ethanol/50% hydrogen).

**摘要:** 基于定容燃烧装置探究了在不同点火时刻、喷射压力和氢气掺混当量比下, 乙醇喷雾非均质燃料的点火和燃烧特性。实验工况为 353 K, 标准大气压, 点火时刻(喷射开始后 0-50 ms)、喷射压力(5、15、25 MPa)和氢气预混当量比(0.05、0.1、0.2)。结果显示, 乙醇直喷联合掺氢能够在超稀燃(全局当量比 0.15, 67%乙醇/33%氢)工况下实现点火。此外, 随着点火时刻的延迟, 点火成功率先上升后下降; 随着喷射压力和氢比例的增加, 点火成功率提高。然而, 在高喷射压力下, 液体喷雾具有更好的蒸发效果, 使得混合燃料更加均匀, 因而导致在极贫区域的不完全燃烧。氢气掺混不仅能够稳定点火过程, 还可以改善整体的燃烧特性。在较早的点火时刻(2-3 ms)、喷射压力适中(15 MPa)、最小全局当量比为 0.2(50%乙醇/50%氢气)的条件下, 可以实现稳定的点火和燃烧。

**关键词:** 氢气; 定容燃烧装置; 非均质燃烧; 点火特性

**Key words:** hydrogen; constant volume vessel; inhomogeneous combustion; ignition characteristics

中图分类号: TK4\*\*\*文献标识码: A

## 0 背景

稀薄燃烧是一种提高内燃机热效率和降低排放的技术手段之一。然而, 稀薄燃烧条件下的燃烧速度极低, 发动机的循环变动较大<sup>[1, 2]</sup>。

缸内直喷火花点火发动机可以改善稀薄燃烧下的发动机性能。通过将燃料直接喷入点火位置附近

强制点火, 只需少量燃料即可实现点火位置的浓混合气。许多相关的内燃机的研究都证明了分层燃烧的积极作用: 可以提高压缩比和容积效率, 降低点火不稳定性<sup>[3, 4]</sup>。

Li 等人<sup>[1]</sup>研究了室温、当量比 0.6-1.0、点火时刻 10-50 ms 条件下的湍流非均质燃烧, 发现非均质

收稿日期: 202x-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51876163, 52176131)

作者简介: 葛睿涵(1995-), 女, 博士生, 主要研究方向为喷雾调控燃烧, E-mail: Stephanie\_nart@163.com;

胡二江(联系人), E-mail: hujiang@xjtu.edu.cn

有利于提高整体的稀薄燃烧火焰的稳定性。Bartolucci 等人<sup>[5]</sup>利用大涡模拟计算了天然气在定容燃烧装置中非均质燃烧，探究了燃烧过程中的机理，发现非均质燃烧火焰淬熄的主要原因是由局部高速流场导致。

因此，非均质燃烧可以降低点火的不稳定性。然而，火焰发展速度低时稀薄燃烧是另一个挑战。得益于氢气极小的最小点火能量和极强的反应活性，双燃料发动机通常掺混氢气，以提高点火稳定性和燃烧速度<sup>[2, 6, 7]</sup>。

Conte 等人<sup>[8]</sup>研究了在压燃式火花塞燃烧发动机中合成气 (21% $H_2$ /24% CO/55%  $N_2$ ) 富氢比例下的发动机特性，发现在稀燃条件下，富氢能够有效提升发动机机型。Li 等人<sup>[9]</sup>研究了稀燃条件下氢二次点火正时 (75-135 °CA BTDC) 对火花点火发动机性能的影响，结果表明通过直喷掺氢可控制分层条件，使燃料燃烧更彻底、更迅速。由于乙醇汽油在工业上的广泛应用，许多研究采用了乙醇和氢气双燃料。Ayad 等人<sup>[10]</sup>研究了一种涡轮增压乙醇发动机，探究了该发动机掺氢后在增压条件下和增压条件下的发动机特性。Greenwood 等人<sup>[11]</sup>研究了在超低油耗条件下，在部分节流、不同转速和 0%、15% 和 30% 氢燃料混合条件下，乙醇/氢气发动机的性能。

与实际发动机相比，定容燃烧装置受实验平台机械结构的限制较小，有助于将复杂的燃烧过程进行解耦，确定单一变量对燃烧的影响。然而，大多数掺氢贫燃燃烧研究都是基于实际发动机进行的。基于定容燃烧装置的喷雾燃烧实验主要集中在高压喷射自燃的柴油发动机<sup>[12-15]</sup>或喷射强制点火的汽油发动机上<sup>[3, 16, 17]</sup>。对喷雾燃烧，尤其是非均质液体燃料喷射燃烧的研究很少，而液体燃料喷雾燃烧在实际应用中应用更加广泛。因此，对液体燃料直接喷射和强制点火非均质稀薄燃烧的研究相对较为缺乏。

因此，由于直喷与掺氢均能改善稀燃特性，本研究采用了液体乙醇喷射燃烧与氢气掺混结合的方式，且不同的喷射和点火策略对燃烧特性有很大影响，本研究对不同掺混氢气含量、点火时刻和喷射压力下定容燃烧装置中超稀薄燃烧的影响进行了探究。

## 1 实验装置及数据处理

### 1.1 实验系统及工况

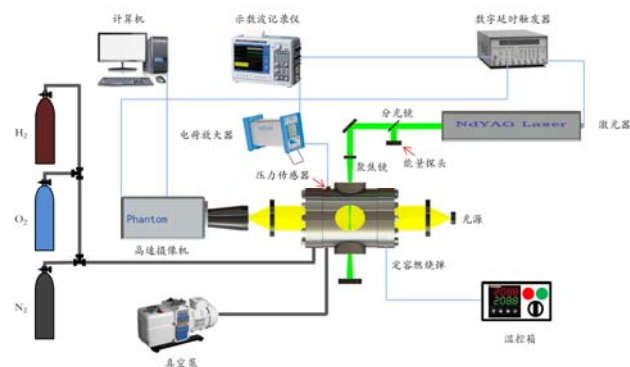


图 1 实验系统图

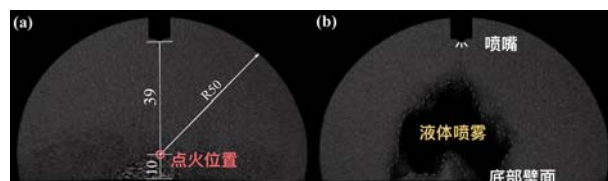


图 2 (a) 定容燃烧装置尺寸信息示意图；(b) 喷雾图

实验系统示意图如图 1 所示。该系统中使用的定容燃烧装置长度和直径均为 100mm，底部壁面与喷嘴之间的距离为 49 mm (图 2 (a))，点火位置位于扇形圆心处。图 2 (b) 是喷射过程中喷雾图片。阴影系统由光学系统和高速相机 (Phantom V2012, 分辨率  $640 \times 640$ , 采样率 10000 fps, 0.15 mm/像素) 组成。为减少接触式点火手段对液体喷雾形态的影响，实验选用了激光点火。点火系统由 Nd:YAG 激光器和光路系统组成，激光入射能量为 60 mJ/脉冲。数据采集系统由 Kistler 传感器、同步系统和 LabVIEW 软件组成。有关实验设备的详细介绍见参考文献<sup>[18]</sup>。

实验中使用的液体乙醇纯度 99.98%，不同喷射压力下的喷射入定容燃烧装置的乙醇质量保持不变，理论值为  $6 \pm 0.1$  mg。在实验环境条件下，预混 6mg 的乙醇当量比  $\phi_{C_2H_6O} = 0.1$ 。因此，当氢气预混当量比  $\phi_{H_2} = 0.05$  时，全局当量比为  $\phi_{C_2H_6O} + \phi_{H_2} = 0.1 + 0.05 = 0.15$ 。

喷射压力  $P_{inj} = 5$ 、15 和 25 MPa 下的喷射脉宽分别为 741、414 和 315  $\mu s$ 。采用分压法校准喷射脉宽的步骤如下。步骤 1：在实验环境温度和压力  $T_{amb} = 353$  K,  $p_{amb} = 0.1$  MPa 下，设定一定喷射脉宽 (最初为 2 ms) 向定容燃烧装置喷射乙醇，等待 1 分钟后观察定容燃烧装置压力变化，计算定容燃烧装置的压差变化。步骤 2：重复步骤 1，逐渐缩短喷射脉宽，使压差等于目标当量比下的理论分压，获得该喷射压力下的喷射脉宽。步骤 3：重复 10 次实

验，以确保测得的喷射脉宽的可靠性。实验系统中使用的压力传感器的误差为 $\pm 0.01$  kPa。

本文主要探究了稀薄工况下，不同喷射压力  $P_{inj}$ 、不同预混氢气当量比  $\phi_{H_2}$ 、不同点火时刻  $t_i$  下的燃烧特性。实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况表

$P_{inj}/\text{MPa}$	$\phi_{H_2}$	$t_i/\text{ms}$
15	0,0.05,0.1,0.2	0,1,2,3,5,10,20,50
5,25	0.1	0,1,2,3,5,10,20,50

不同设备的时序控制如图 3 所示。

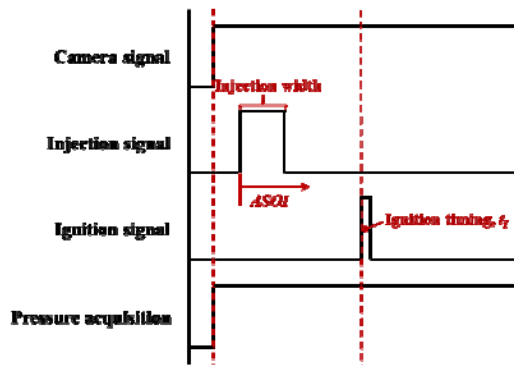
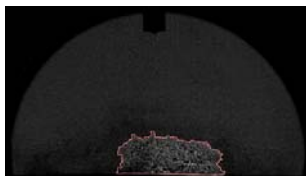


图 3 装置时序控制示意图

## 1.2 数据处理



(a) 原始图像



(b) 灰度图



(c) 火焰锋面

图 4 图像处理示意图

由于定容装置内非均质燃烧的相关研究较少，缺乏研究分层燃烧火焰形态的标准。因此，为了评估整体的火焰传播速度，采用火焰面积来计算火焰半径进行讨论：

$$\langle r \rangle = (S_f / \pi)^{0.5} \quad (2.1)$$

其中， $S_f$  为火焰面积。通过灰度图勾出火焰面（图

4 (b)) 导出锋面图（图 4 (c))，基于 MATLAB 进行二值化、腐蚀和去压缩获得火焰面积求出半径<sup>[19]</sup>。

在本实验中，在火焰撞击两侧壁之前，由于喷雾导致的临壁面乙醇浓度较高，火焰沿底壁向外扩散燃烧， $\langle r \rangle$ 可以说明燃烧速度的变化。但火焰发展至撞击两侧壁之后，火焰形态的分析变得极为复杂，因此只计算火焰撞击两侧壁之前的 $\langle r \rangle$ 。

点火成功率的方式如下：

$$\text{Probability of Ignition} = N_i / N \quad (2.2)$$

其中， $N_i$  为点火成功次数， $N$  为该工况下的实验重复次数。重复次数  $N$  是根据<sup>[20]</sup>提出的方法进行设计的，通常在 20-30 之间。

对实验中获得的压力曲线进行滤波光滑，获得压力峰值  $p_{max}$ ，从点火至压力峰值所经历的时间定义为燃烧持续期  $t_c$ ，对压力曲线求导获得压力升高率曲线  $(dp/dt)$ ，对应的最大值为压力升高率峰值  $(dp/dt)_{max}$ 。

在定容燃烧装置中，放热率可通过代表放热率 ( $RHR$ ) 来表示<sup>[21]</sup>，因此，代表累积放热量 ( $RAHR$ ) 可通过以下公式计算：

$$RAHR = a \times \int (dp/dt) dt \quad (2.3)$$

$$a = (C_v \times V) / R \quad (2.4)$$

其中， $a$  为常数， $C_v$  为燃料比热容， $V$  是定容燃烧装置容积， $R$  为理想气体常数。根据上述描述可知，代表累积放热量的值等于  $a \times p_{max}$ ；当环境和燃料条件相同时， $a$  也相同。因此，在定容燃烧装置中，同工况下，代表累积放热量可用压力值进行对比。

## 2 火焰形态

### 2.1 喷雾特性

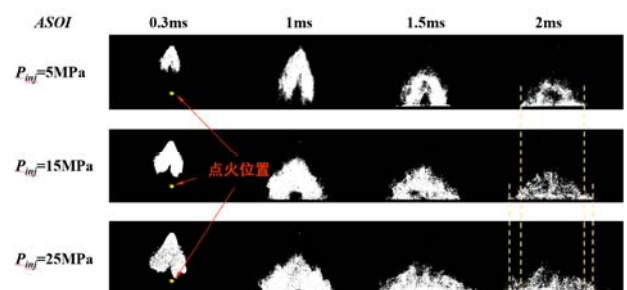


图 5 二值化喷雾宏观形态图

由于火焰特性受喷雾特性影响较大，因此在分析火焰形态之前对其喷雾特性进行了测量，喷雾特性测量系统及详细数据处理方法见参考文献<sup>[22, 23]</sup>。

图 5 为实验条件下喷雾在喷射开始后 ( $ASOI$ ) 0-2 ms 的二值化图像。表 2 列出了不同喷射压力下的喷雾锥角和索特平均直径 (SMD), 微观特性测量结果表明 15 MPa 和 25 MPa 时的雾化效果相似。

表 1 喷雾特性

$P_{inj}/\text{MPa}$	5	15	25
喷雾锥角/ $^\circ$	50.9	46.0	42.7
SMD/ $\mu\text{m}$	26.3	<10	<10

此外, 从图 5 的二值化图像也能够看出, 喷射速度随着喷射压力的升高而增加, 碰壁后的铺展半径更大。在较高喷射压力下, 液滴的分布更均匀。喷射压力升高会导致湍流扰动增大, 从而对液体喷雾的蒸发产生积极影响。

## 2.2 不同点火时刻

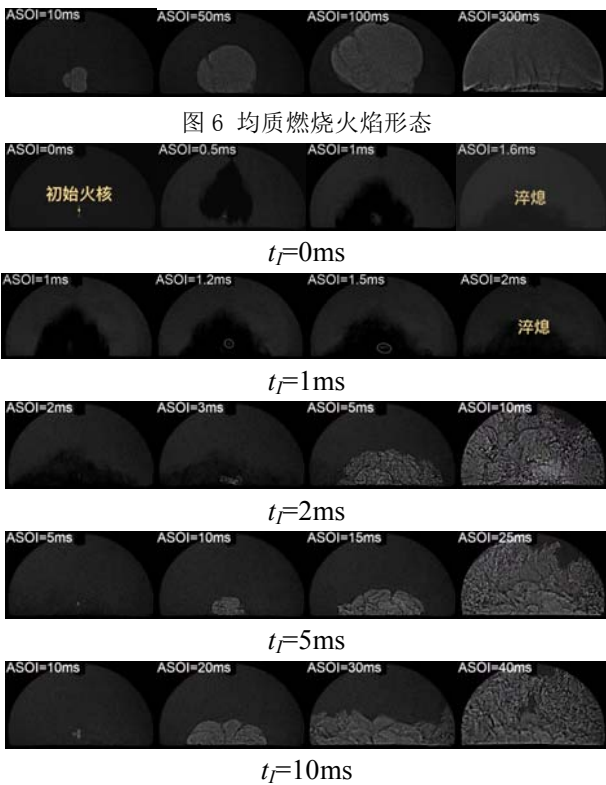


图 6 均质燃烧火焰形态

图 7 不同点火时刻下非均质燃烧火焰形态。为了对比不同点火时刻下火焰形态的特性, 选取了  $\phi_{H_2}=0.2$  条件下的图像进行对比。当点火时刻无限推迟, 混合气即为均质燃烧。该工况下均质混合气能够点燃, 其他工况下均不能成功点火。

不同点火时刻火焰形态随时间变化如图 8 所示。在  $\phi_{H_2}=0.2$  时, 乙醇/氢气预混气体能够实现稀薄稳定燃烧, 燃烧图像如图 6。由于不同的点火时刻下, 火焰的传播速度差别较大, 因此图 7 中展示的火焰图像时间间隔不同, 从图中可知, 在点火时刻  $t_I=0$  ms 和 1ms 工况下, 由于火核受到液体喷雾

扰动, 导致了点火失败。

此外, 实验中无论喷射压力与氢气预混当量比如何变化, 在点火时刻  $t_I=0$  ms 和  $t_I=1$  ms 时, 非均质混合气液燃料均不能点火成功。由于在这些条件下, 火核与液体喷雾重叠, 较大的湍流扰动导致火核破碎, 从而导致点火失败。当  $t_I \geq 2$  ms 时, 出现点火成功, 随着点火时刻的推迟, 火焰传播到壁面的时间增加。点火时刻越早、湍流扰动越强、火焰褶皱更加明显, 燃烧速度越快。

在不同点火时刻无法在点燃混合物的原因不尽相同。由于预混氢气为当量比 0.05-0.2 的混合气在实验条件下不可燃, 因此在  $t_I=0$  ms 时, 激光击穿产生的火核很快就消失了。因此, 点火失败的主要原因是点火位置附近的燃料浓度极低。在  $t_I=1$  ms 时, 虽然局部燃料浓度较高, 但由于湍流扰动较大以及液态乙醇蒸发造成的温度不均匀, 导致火焰核在底壁下沉并破裂, 随后熄灭。 $t_I=2-5$  ms 时点火失败的原因与  $t_I=1$  ms 时相似 (湍流扰动和液体蒸发), 而  $t_I > 10$  ms 时点火失败的原因与 0 ms 时相似 (点火位置燃料浓度低)。因此, 点火特性受局部燃料浓度和流场对初始火核拉伸的影响。

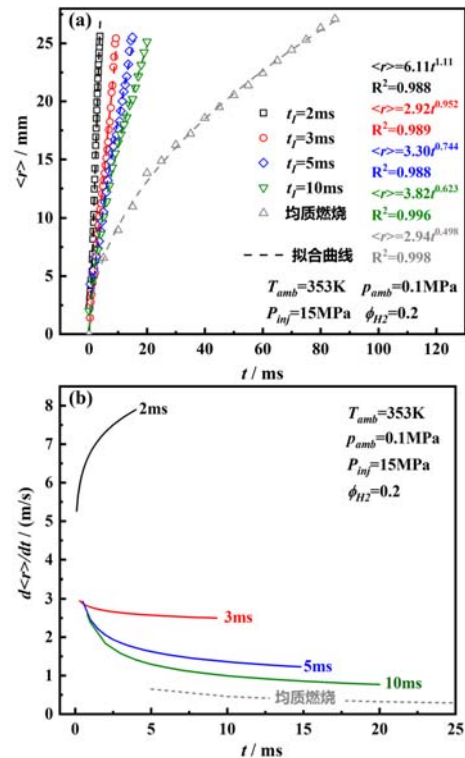


图 8 不同点火时刻燃烧火焰半径随时间的变化关系

预混燃烧可以视作点火时刻无限延迟后的结果, 从图 6 中可观察到预混燃烧的火焰形态类似于球形火焰, 其燃烧持续期比喷射条件非均质燃烧时间要长得多, 这表明缸内直喷对于加速混合气贫燃

速度具有较大促进作用。

图 8 (a) 为在图 6、图 7 对应工况下火焰半径随时间的变化, 其中  $t=0$  为点火时刻。在图 9 (a) 总虚线为基于幂函数拟合的半径随时间的变化, 图 9 (b) 是对其一阶求导的结果, 一定程度能够表明燃烧前期的火焰传播速度。可是明显的看出在喷射刚结束后进行点火, 由于点火位置更高的液体浓度分布, 可以使得燃烧速度具有非常明显的提升。当点火时刻推迟至 10 ms 之后, 其燃烧速度与均质燃烧较为接近。

如图 8 所示, 随着点火时刻推迟, 燃料混合更加均匀, 火焰的整体传播速度减小。燃烧后期, 随着时间燃烧速度缓慢下降, 燃烧速度下降主要是由于燃料浓度从富燃区变为贫燃区所导致。

### 2.3 不同掺氢含量

在不同氢含量下, 火焰传播速度随着氢当量比的增加而增加。氢当量增加时, 燃烧时间相同时火焰面积更大, 火焰锋面皱褶更多 (图 9)。由上述讨论可知, 在均质燃烧下,  $\phi_{H_2} = 0-0.1$  氢气与 6mg 乙醇预混后的均质混合气均不可燃, 采用缸内直喷方法扩大了稳定稀燃点火范围。

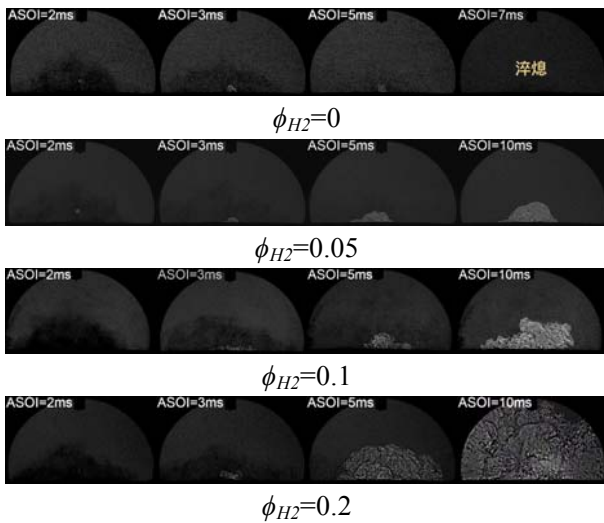


图 9 不同掺氢含量下非均质燃烧火焰形态

在  $\phi_{H_2} = 0.05$  的超稀薄条件下, 当火焰沿着底壁传播时, 可以识别出火焰锋面。在  $\phi_{H_2} = 0.05$  时的燃烧后期, 火焰锋面无法识别, 说明混合气未完全燃烧。例如, 在  $ASOI = 100$  ms 的图像中, 只能观察到火焰表面的中央部分, 这主要是因为底壁附近的燃料浓度较高。因此, 无法获得火焰半径随时间变化的数据。

在  $\phi_{H_2} = 0.2$  的条件下, 火焰前沿逐渐扩展。火焰撞壁后, 由于湍流夹带和燃烧室几何形状的影响,

火焰沿侧壁的传播速度增加。在不同的氢气预混比例下, 当喷射压力和点火时刻相同时, 超稀薄条件下火焰火核的发展和熄灭情况与 2.2 节相似。

### 2.4 不同喷射压力

许多研究人员都认为较高的喷射压力能够使得液体燃料雾化效果更好, 更强的湍流亦具有促进燃烧的作用, 尤其是在提高火焰速度方面。在本研究中,  $P_{inj}$  升高则导致点火后火焰速度降低 (图 11)。

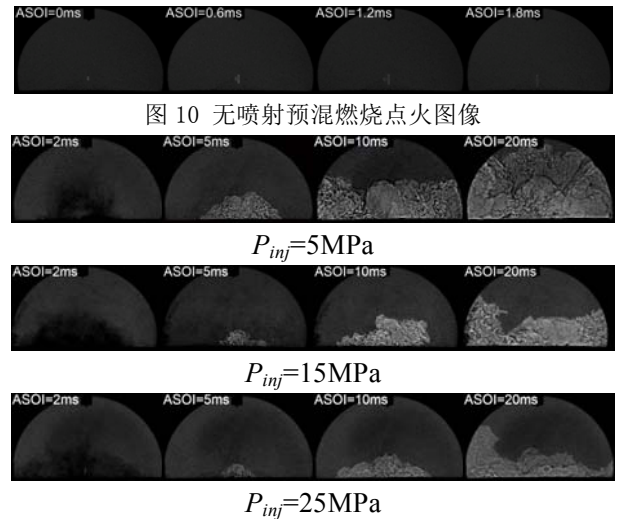


图 11 不同喷射压力下非均质燃烧火焰形态

图 12 展示了火焰半径随时间的变化。如 2.1 节所述, 喷射压力越高, 喷雾尖端速度越快。喷射产生的湍流一开始会增强火焰的传播, 从而导致在 15 MPa 时速度较高。然而, 高喷射压力下较大湍流也会加强液体燃料的混合, 导致点火位置周围的燃料浓度降低, 从而降低了 25 MPa 时的整体火焰传播速度。

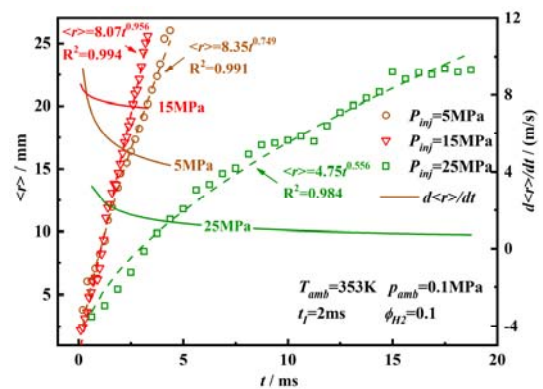


图 12 不同喷射压力非均质燃烧火焰半径随时间的变化关系

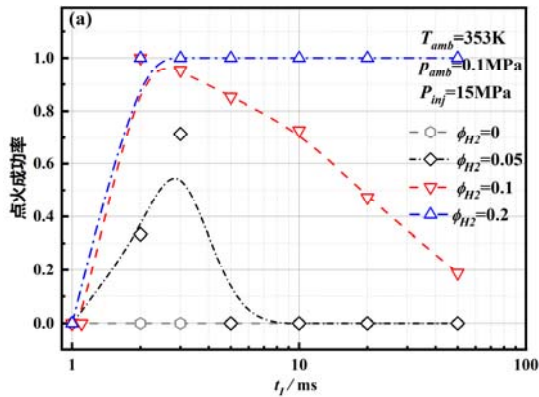
$P_{inj} = 5 \text{ MPa}$  和  $P_{inj} = 15 \text{ MPa}$  时的火焰褶皱相似, 而  $P_{inj} = 25 \text{ MPa}$  时的火焰褶皱不清晰。当湍流扰动过大时, 燃烧室中的燃料更接近于均匀混合气, 在超稀燃条件下, 这会抑制整体的燃烧强度。因此, 在超稀燃条件下, 喷射压力对燃烧的促进作用先增

大，然后随着喷射压力的升高而减小。

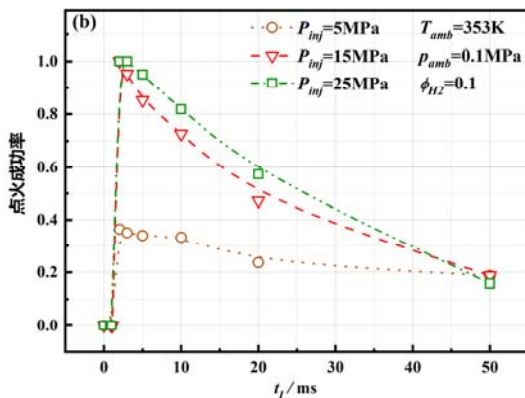
### 3 点火与燃烧特性

#### 3.1 点火特性

前面提到的一些实验条件会导致稀薄混合气更加容易点火，但另一些则不会。本节将对不同掺氢含量、喷射压力和点火时刻对点火特性的影响展开讨论。



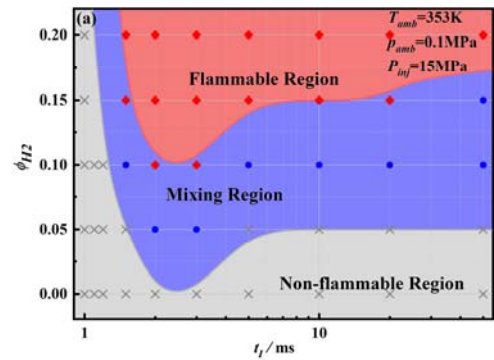
(a) 不同掺氢含量



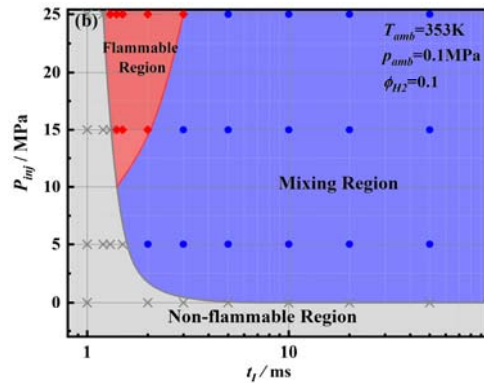
(b) 不同喷射压力

图 13 点火成功率随点火时刻变化关系

如 2.2 节所述，液体喷雾与火焰内核重叠，使混合物无法点燃。在图 13 (a) 和 (b) 中，无论其他变量如何变化，混合物在  $t_I=0-1$  ms 时都无法点火成功。由于氢气具有较低的最小点火能量，氢的加入能够提高了点火成功率。在实验工况下，纯氢的稀燃极限在当量比 0.2 附近，而纯乙醇的点火极限为 0.5；因此，当全局当量比为 0.15 时，掺混 33% 的氢，混合物就能够点燃（图 13 (a)）。因此，氢气的添加大大改善了液体喷雾的点火特性。图 13 (b) 显示，点火成功率随喷射压力的增加而增加，表 2 显示，在 15MPa 和 25MPa 时，SMD 相似，它们的点火成功率也相似，这表明雾化程度较好会增强点火成功率。



(a) 不同掺氢含量



(b) 不同喷射压力

图 14 不可燃域、混合区域与可燃域分布

为了进一步探索稳定稀燃极限的分布，在  $t_I=1$  ms 和  $t_I=1.5$  ms 之间以 0.1 ms 步长间隔增加了数个实验点。如果点火成功率等于 1，则被定义为可燃区 (Flammable Region)；如果点火成功率等于 0，则被定义为不可燃区 (Non-flammable Region)；否则，条件被定义为混合区 (Mixing Region)。可燃区的最终分布如图 14 所示。

从图中可以看出，随着  $\phi_{H_2}$  和  $P_{inj}$  的增加，点火变得更加容易，而  $t_I$  的延迟则会抑制点火。全局当量比为 0.2 时 (50% 氢/50% 乙醇)， $t_I=2$  ms,  $P_{inj}=15-25$  MPa，能够实现最少燃料量下的稳定稀薄燃烧。

当  $t_I=0-1$  ms 时，无论预混合氢的浓度如何，乙醇喷雾都是不可燃。从  $t_I=2$  ms 到 10 ms，乙醇喷雾的可燃性有所改善， $t_I=10$  ms 后，可燃性主要取决于  $\phi_{H_2}$ 。高喷射压力会降低超稀薄燃烧的整体燃烧稳定性，具体表现为火焰传播速度变小，燃烧更不稳定。然而，随着喷射压力的增加，点火稳定性会提高。因此，液体燃料直喷的燃烧特性是多变量耦合的结果。

#### 3.2 燃烧特性

图 15 为不同点火时刻、氢当量比和喷射压力下不同条件下的燃烧压力。不同点火时刻下燃烧压力曲线趋势相似，在预混均质燃烧下燃烧压力变化较

为缓慢，随着氢气添加量的增加，燃烧得到加强。

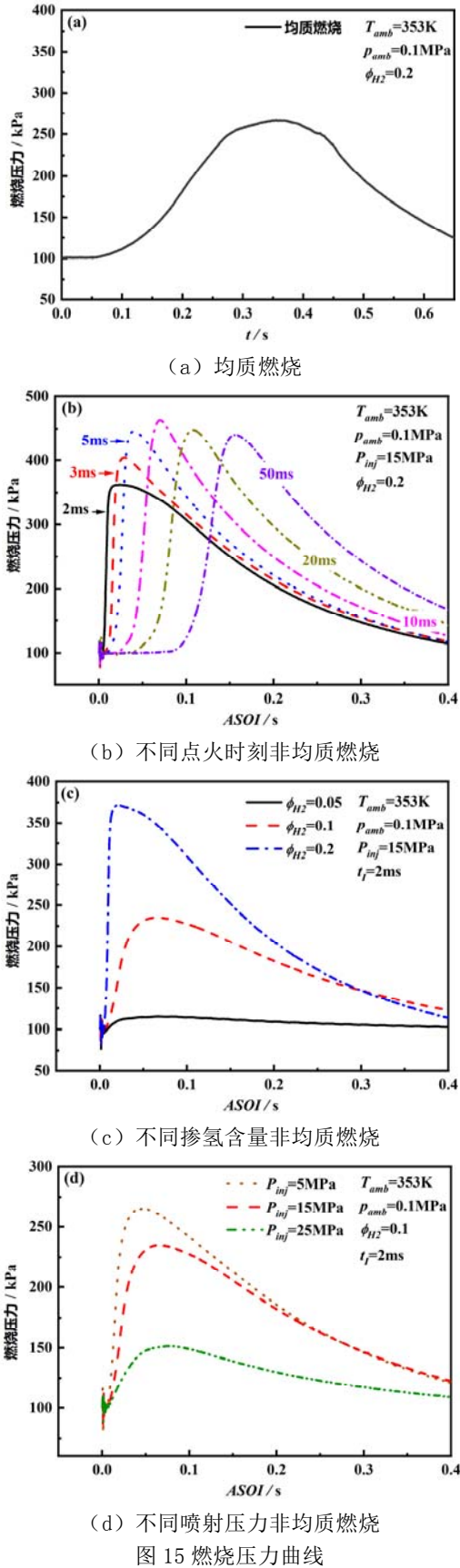


图 15 燃烧压力曲线

实验中获得峰值压力  $p_{max}$  值如图 16 所示。一般来说， $p_{max}$  会随着点火时刻的延迟而下降，只有

在  $\phi_{H_2} = 0.2$  时， $p_{max}$  才会在最初的 2-5 ms 内上升。在相同的  $t_I$  条件下， $p_{max}$  随  $\phi_{H_2}$  的升高而升高，随喷射压力的升高而降低。随着点火时刻的延迟， $p_{max}$  值逐渐变得相似，不同喷射压力下的周期变化也会减小。

如第 1.2 节所述， $p_{max}$  还可以表示代表累积放热量，可以用以表征燃烧中的完全燃烧的燃料量。

随着氢含量的增加， $p_{max}$  也大幅增加。因此，初始火焰燃烧速度增加，导致燃料稀燃区域释放更多热量并更容易点燃。图 16 (b) 显示，在所有条件下代表累积放热量都相近，但  $P_{inj} = 25$  MPa 条件下的曲线与其他条件下的曲线截然不同。如 2.1 节所述，15 MPa 和 25 MPa 时液体喷雾的 SMD 相似。主要区别在于  $P_{inj} = 25$  MPa 时的喷雾尖端速度更高，因此气液燃料混合更均匀，点火位置附近的燃料浓度更低。在  $t_I = 2$  ms 时，25 MPa 时的  $p_{max}$  是 15 MPa 时的 58%，这表明喷射压力为 25 MPa 时燃烧不完全。当点火时刻延迟时，喷射造成的湍流耗散，混合气体的浓度也会降低。

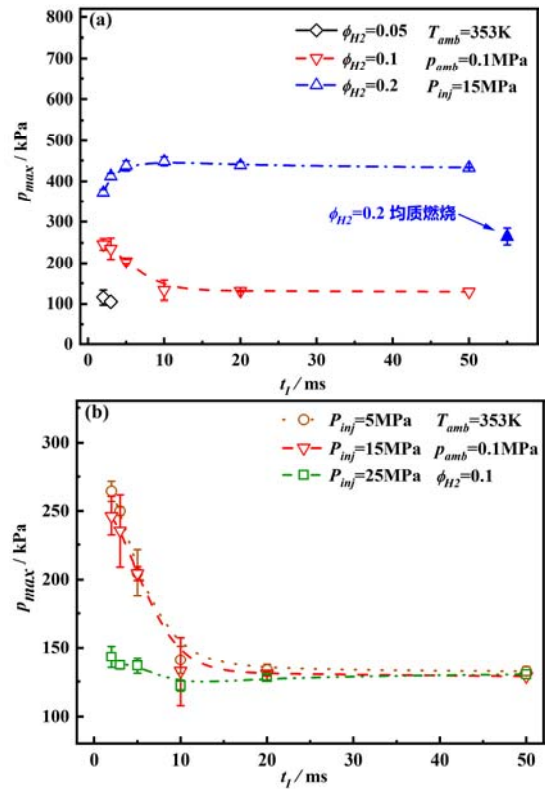


图 16 不同工况下压力峰值

不同条件下的燃烧持续期 ( $t_c$ ) 与整体燃烧速度密切相关 (即燃烧速度越高，燃烧持续期越短)。缸内直喷非均质燃烧条件下，整体燃烧过程比  $\phi_{H_2} = 0.2$  时的预混均质燃烧过程短，这证明了缸内直喷可以促进稀薄燃烧。随着点火时刻的延迟和喷射压力

的增加, 燃烧时间也在增加。如图 17 所示, 当燃料浓度降低和喷射压力增加时,  $t_c$  的重复性降低, 这与第 3.1 节显示的阴影图像中火焰锋面难以识别的条件相对应。因此, 在超稀薄燃烧中, 较大的湍流扰动会降低整体燃烧稳定性并导致不完全燃烧。

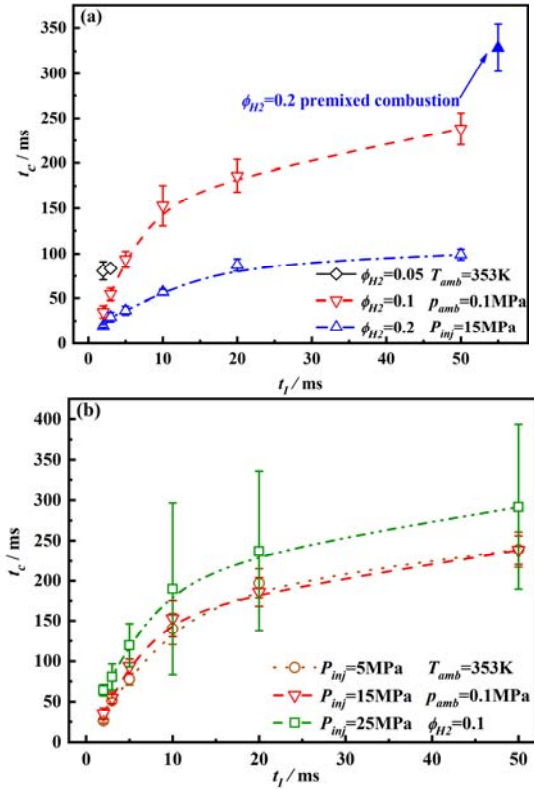
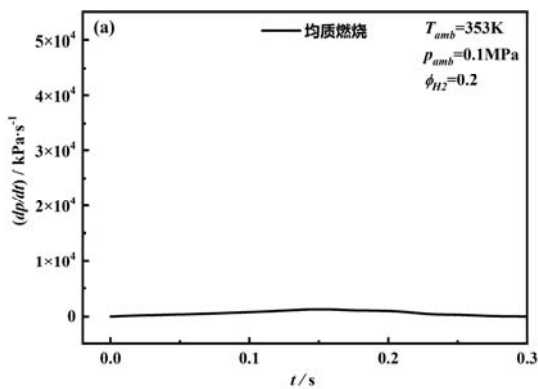
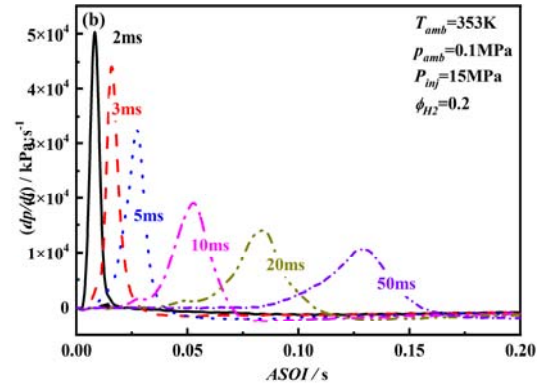


图 17 不同工况下燃烧持续期

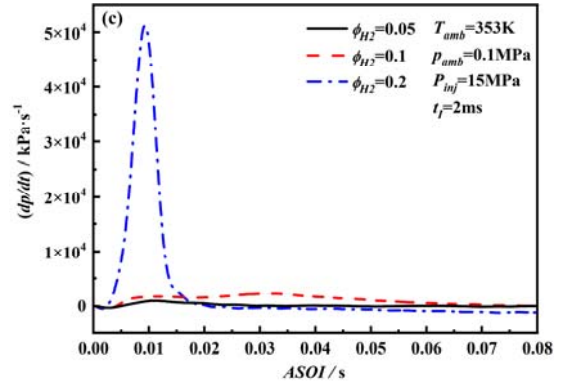
随着点火时刻延迟, 压力上升率曲线变得平滑。随着  $\phi_{H_2}$  的增加, 燃烧强度急剧增加。在  $\phi_{H_2}=0.05$  和  $\phi_{H_2}=0.1$  等超稀薄燃烧条件下的压力升高率明显低于  $\phi_{H_2}=0.2$  时的压力升高率。



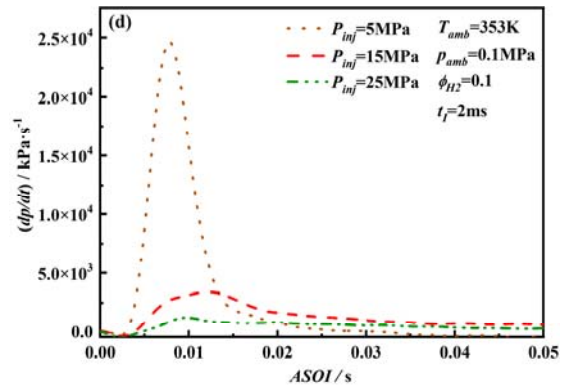
(a) 均质燃烧



(b) 不同点火时刻非均质燃烧



(c) 不同掺氢含量非均质燃烧



(d) 不同喷射压力非均质燃烧

图 18 压力升高率曲线

在不同的氢当量比和喷射压力下,  $(dp/dt)_{max}$  随着点火时刻的延迟而逐渐降低 (图 19)。这一趋势与  $p_{max}$  曲线相似。

在实际的 GDI 发动机中, 喷射引起的分层燃烧可在点火位置周围局部产生混合气富集区, 从而提高贫燃点火及燃烧稳定性。然而, 在全局当量比为 0.2 的超稀薄燃烧中, 较高的  $P_{inj}$  会带来更好的喷雾特性, 增加湍流扰动, 但同时也会降低点火位置的燃料浓度, 降低火焰传播速度。因此, 在部分混合气丰富的低  $P_{inj}$  条件下, 燃烧速度反而更高。



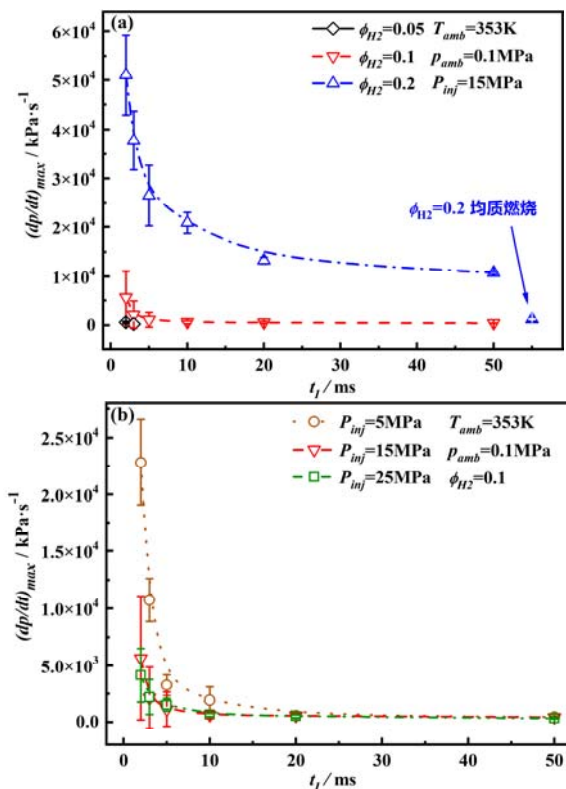


图 19 不同工况下压力升高率峰值

综上所述表明，预混均质燃烧速度比所有喷射点火条件下的燃烧速度慢得多。非均质燃烧在较早的点火时刻、适当的喷射压力和掺氢能有效促进稀薄点火及燃烧特性。

## 4 结论

本研究讨论了在超稀燃条件下，乙醇喷雾掺氢在不同点火时刻和喷射压力下的点火和燃烧特性。结果表明，在超稀燃条件下，较早的点火时刻和适中的喷射压力，可以获得较高的点火稳定性且实现完全燃烧。本研究的主要结论如下：

(1) 在掺氢和直接喷射的共同作用下，全局当量比为 0.15（33%氢/67%乙醇）时可实现燃烧，全局当量比为 0.2（50%氢/50%乙醇）时可实现稳定的稀燃点火成功。这说明了氢气富集和非均质燃烧在提高贫燃极限方面的有效性；

(2) 在喷射压力为 25 MPa 时，在喷射开始后 2 ms 达到最佳点火成功率。相比之下，延迟点火时刻或降低喷射压力会降低点火成功率。另一方面，氢气掺混含量的增加能够显著改善贫燃点火特性；

(3) 较高的喷射压力使得气液混合更加均匀，从而导致超薄混合物的不完全燃烧。在实验工况下，喷射压力为 25 MPa 时，相同燃料量的累积放热量

是 5 MPa 时的 58%。延迟点火时刻的效果与增加喷射压力的效果相似。

## 参考文献:

- [1] LI G., LONG Y., ZHANG Z., et al. Performance and emissions characteristics of a lean-burn marine natural gas engine with the addition of hydrogen-rich reformat[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (59), 31544-31556.
- [2] SOFIANOPOULOS A., ASSANIS D. N., MAMALIS S. Effects of Hydrogen Addition on Automotive Lean-Burn Natural Gas Engines: Critical Review[J]. Journal of Energy Engineering, 2016, 142 (2).
- [3] COSTA M., SORGE U., MEROLA S., et al. Split injection in a homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission[J]. Energy, 2016, 117, 405-415.
- [4] WANG J., HUANG Z., MIAO H., et al. Study of cyclic variations of direct-injection combustion fueled with natural gas - hydrogen blends using a constant volume vessel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33 (24), 7580-7591.
- [5] BARTOLUCCI L., CORDINER S., MULONE V., et al. Natural Gas Partially Stratified Lean Combustion: Analysis of the Enhancing Mechanisms into a Constant Volume Combustion Chamber[J]. Fuel, 2018, 211, 737-753.
- [6] SVETOVVOY V. B., SANDERS R. G., MA K., et al. New type of microengine using internal combustion of hydrogen and oxygen[J]. Sci Rep, 2014, 4, 4296.
- [7] VARGA T., NAGY T., OLM C., et al. Optimization of a hydrogen combustion mechanism using both direct and indirect measurements[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35 (1), 589-596.
- [8] CONTE E., BOULOUCHOS K. Influence of Hydrogen-Rich-Gas Addition on Combustion, Pollutant Formation and Efficiency of an IC-SI Engine[J]. Emissions, 2004, 1.
- [9] LI G., YU X., SHI W., et al. Effects of split injection proportion and the second injection timings on the combustion and emissions of a dual fuel SI engine with split hydrogen direct injection[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (21), 11194-11204.

- 
- [10] AYAD S. M. M. E., BELCHIOR C. R. P., DA SILVA G. L. R., et al. Analysis of performance parameters of an ethanol fueled spark ignition engine operating with hydrogen enrichment[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45 (8), 5588-5606.
- [11] GREENWOOD J. B., ERICKSON P. A., HWANG J., et al. Experimental results of hydrogen enrichment of ethanol in an ultra-lean internal combustion engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39 (24), 12980-12990.
- [12] CAO J., LENG X., HE Z., et al. Experimental study of the diesel spray combustion and soot characteristics for different double-injection strategies in a constant volume combustion chamber[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2020, 93 (1), 335-350.
- [13] HU Z., SOMERS L. M. T., DAVIES T., et al. A study of liquid fuel injection and combustion in a constant volume vessel at diesel engine conditions[J]. *Fuel*, 2013, 107, 63-73.
- [14] JI Z., FANG T. Spray Combustion of Biodiesel and Diesel in a Constant Volume Combustion Chamber[J]. *SAE Technical Papers*, 2011, 2011-011380.
- [15] ZHANG J., JING W., ROBERTS W. L., et al. Soot temperature and KL factor for biodiesel and diesel spray combustion in a constant volume combustion chamber[J]. *Applied Energy*, 2013, 107, 52-65.
- [16] BENAJES J., MOLINA S., GARCÍA A., et al. Performance and engine-out emissions evaluation of the double injection strategy applied to the gasoline partially premixed compression ignition spark assisted combustion concept[J]. *Applied Energy*, 2014, 134, 90-101.
- [17] TANG Q., LIU H., LI M., et al. Optical study of spray-wall impingement impact on early-injection gasoline partially premixed combustion at low engine load[J]. *Applied Energy*, 2017, 185, 708-719.
- [18] HU E., HUANG S., KU J., et al. Combustion characteristics of natural gas injected into a constant volume vessel[J]. *Fuel*, 2019, 235, 1146-1158.
- [19] DAI H., WANG J., CAI X., et al. Measurement and scaling of turbulent burning velocity of ammonia/methane/air propagating spherical flames at elevated pressure[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 242.
- [20] BERNARD S., LEBECKI K., GILLARD P., et al. Statistical method for the determination of the ignition energy of dust cloud-experimental validation[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23 (3), 404-411.
- [21] LI Y., ZHANG X., WANG Y., et al. Effect of inhomogeneous methane-air mixtures on combustion characteristics in a constant volume combustion chamber[J]. *Fuel*, 2023, 331.
- [22] FENG Z., ZHAN C., TANG C., et al. Experimental investigation on spray and atomization characteristics of diesel/gasoline/ethanol blends in high pressure common rail injection system[J]. *Energy*, 2016, 112, 549-561.
- [23] ZHAN C., TONG S., TANG C., et al. The spray vaporization characteristics of gasoline/diethyl ether blends at sub-and super-critical conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 164.