

气缸润滑油自燃诱发低速二冲程氢气发动机早燃实验研究

王自鑫¹, 赵华志¹, 宋湄葭¹, 卢耀¹, 冯立岩¹
(大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116024)

Experimental Investigation of Pre-ignition Induced by the Auto-ignition of Cylinder Oil Droplets in Low-speed Two-stroke Hydrogen Engines

WANG Zixin¹, ZHAO Huazhi¹, SONG Meijia¹, LU Yao¹, FENG Liyan¹

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, 116024, China)

Abstract: Cylinder lubricating oil is considered the main responsible for the pre-ignition in low-speed two-stroke hydrogen engines. To understand the characteristics of the pre-ignition induced by cylinder oil, experimental research was carried out under in-cylinder conditions of low-speed two-stroke hydrogen engines based on an RCM. The optical experiment verified that the auto-ignition of single oil droplets could induce hydrogen pre-ignition under engine-like thermodynamic conditions. Compared with natural gas engines, the pre-ignition of hydrogen engines has the characteristics of earlier occurrence time, higher maximum combustion pressure, and faster flame propagation. And the pre-ignition is usually accompanied by an engine knock. The reduction of excess air coefficient (λ) promotes the occurrence of pre-ignition accompanied by varying degrees of engine knock. To avoid the accompanying knock in pre-ignition, the excess air coefficient of 2.5~3.0 is appropriate, under the condition of satisfying the thermal efficiency. And these findings are beneficial to understanding the characteristics and mechanisms of pre-ignition induced by the auto-ignition of cylinder oil droplets.

摘要: 气缸润滑油自燃被认为是低速二冲程氢气发动机早燃发生的主要原因。基于快速压缩机 (RCM) 在低速二冲程氢气发动机缸内工况下进行了实验研究。验证了在类似发动机的热力学条件下, 单油滴的自燃可以诱导氢气早燃。与天然气发动机相比, 氢气发动机的早燃发生时刻更早、最大燃烧压力更高、火焰传播速度更快。并且早燃通常伴随着发动机爆震。过量空气系数(λ)的减小促进了早燃的发生, 并伴有不同程度的发动机爆震。在满足热效率的条件下, 为避免早燃时产生爆震, 过量空气系数为 2.5~3.0 为宜。这些研究结果有助于进一步掌握气缸油自燃引发氢气机早燃机理。

关键词: 氢气发动机; 气缸润滑油; 早燃; 爆震; 快速压缩机; 实验研究

Key words: hydrogen engines; cylinder lubricating oil; pre-ignition; engine knock; RCM; experiment

中图分类号: TK4*** (请查阅中图分类法第 5 版)

文献标识码: A

0 概述

内燃机在未来 20 - 30 年仍将是航运业的主导力量^[1]。相反, 2018 年全球航运业的二氧化碳排放量约占全球人为二氧化碳排放量的 2.89%^[2]。低碳气体燃料在船用发动机上的应用, 可以有效地减少温室气体的排放。使用最广泛的气体燃料主要是

天然气(低碳燃料)和氢气(零碳燃料)。由于预混合燃烧的应用, 低速二冲程船用气体燃料发动机的排放可以达到国际海事组织(IMO) III级标准^[3]。然而, 异常燃烧现象制约了该类发动机动力性能的提高。在不同类型的异常燃烧中, 由气缸润滑油(气缸油)自燃引发的早燃^[4]是最复杂的一种。二冲程发动机气缸油通过设置在气缸壁上的注油器直接注

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52071061); 中央高校基本科研业务费(DUT22GJ202);

国家重点研发项目(2019YFE0196100)

作者简介: 王自鑫(1994-), 男, 博士生, 主要研究方向为发动机燃烧, E-mail:13283027187@163.com;

冯立岩(联系人), E-mail:fengli@dlut.edu.cn。

入气缸^[5,6]，导致缸内存在大量的游离的润滑油油滴。此外一部分润滑油可以通过扫气口被吹入气缸^[7]。这些进入气缸的润滑油在气缸内扫气旋流的作用下可能形成潜在的自燃点。由于氢气和天然气在低速二冲程燃气发动机中具有相同的燃烧模式，因此通常将天然气发动机的早燃特性直接应用于氢气发动机中，以开发氢气早燃机理。然而与天然气相比，氢气具有更宽的可燃性极限(体积比为 0.04-0.75)，更高的自燃温度(858K)和更高的火焰传播速度(2.6-3.2 m/s)^[8]。此外，氢气极低的点火能量(0.02mJ，天然气为 0.28mJ)、较高的燃烧速度(200cm/s，天然气为 41cm/s)、较短的淬灭距离(0.64mm，天然气为 2.5mm)等特性也可能诱发不同于天然气发动机早燃特性的缸内早燃^[9,10]。因此，对缸内油滴自燃引发的氢气早燃特性进行详细研究，对于低速二冲程船用氢发动机的研制具有重要意义。

1 实验方法

近年来，许多学者已经证明，快速压缩机(RCM)燃烧室条件可以用来代替发动机的实际气缸条件。对于低速二冲程船用发动机，由于 RCM 能量密度较低，化学反应性较高，也足以揭示气缸油滴自燃引起的早燃特性^[11]。本文采用自主研发的 RCM 在氢气氛围下开展了低速二冲程氢气发动机缸内热力学条件下的气缸油滴自燃引发氢气早燃特性研究。

研究工况条件选用了一种缸径为 340mm、转速为 150r/mm 的氢/柴油双燃料发动机。图 1 显示了气门相位图，其中包括扫气间隔和气缸喷注润滑油(注油)时刻。扫气结束时刻约为上止前 160ms，注油时刻约为上止前 120ms。这意味着气缸中的润滑油滴有足够的时间蒸发和自燃，从而引燃缸内预混合气，发生早燃。

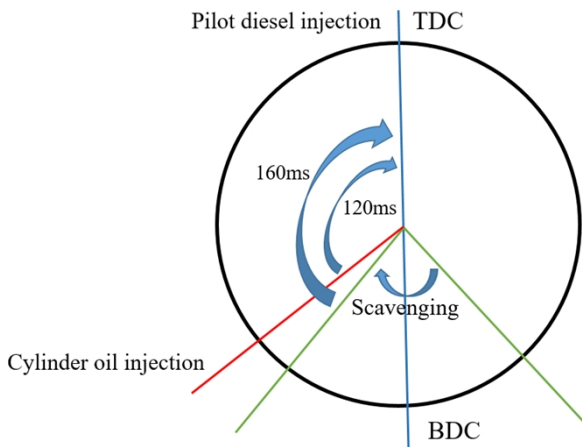


图 1 氢气发动机相位图

1.1 实验装置和可视化测量

实验采用了基于光学原理的双高速摄像机技术。图 2 显示了实验装置的原理图。在燃烧室(燃烧室直径为 50.8mm)中，将一油滴用石英纤维丝(纤维直径为 0.02mm)悬挂在燃烧室中心。两个对称的点光源灯为燃烧室内提供光线。高速摄像机记录了油滴自燃和氢气燃烧过程。由于采用了半透镜面，105mm 镜头的摄像机可以在一个方向上记录油滴自燃和燃烧室内氢气燃烧的过程，用远距离显微镜的摄像机可以在另一个方向上记录油滴大小的变化过程以及油滴周围的蒸气着火过程。图 3 分别是用 105mm 镜头拍摄的油滴自燃引燃氢气着火过程与远距离工作镜头记录的油滴直径的例子。

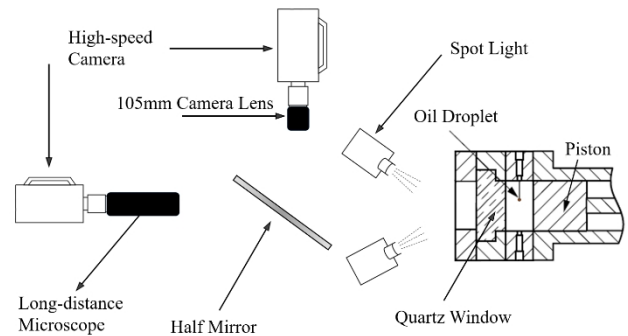


图 2 实验装置原理图

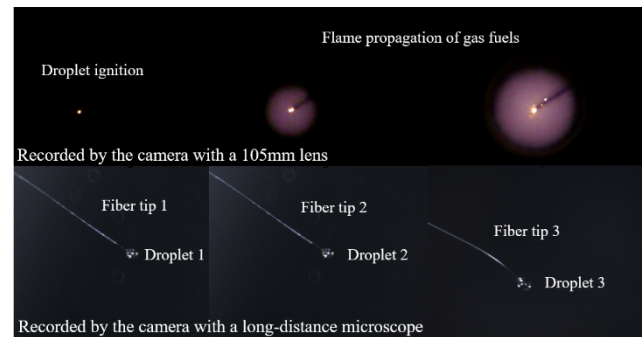


图 3 油滴自燃引发氢气燃烧过程与油滴直径

1.2 可视化图像处理

油滴初始直径的图像由远距离显微镜镜头拍摄。图 4 为油滴初始直径的图像处理程序示意图。图像处理程序包括几个步骤。首先，通过 MATLAB 代码读取原始图像，根据像素数提取油滴所在区域；其次，采用二值化方法得到二维灰度图像；然后，去除图像中的油滴挂丝，并对图像中的边界进行不规则优化。最后利用体积换算法得到油滴直径。由于油滴悬浮在单个纤维上，由于表面张力的作用，我们认为垂直于纤维方向的油滴直径是相同的(图中 $b=c$)。油滴引燃氢气火焰传播过程由 105mm 镜头拍摄。与油滴初始直径图像处理相同，获取各个

时刻的氢气火焰面积，然后与火焰扩散到气缸壁时的面积对比得到的比值命名为相对火焰面积。相对火焰面积曲线的斜率大小做为火焰传播速度快慢的特征值。

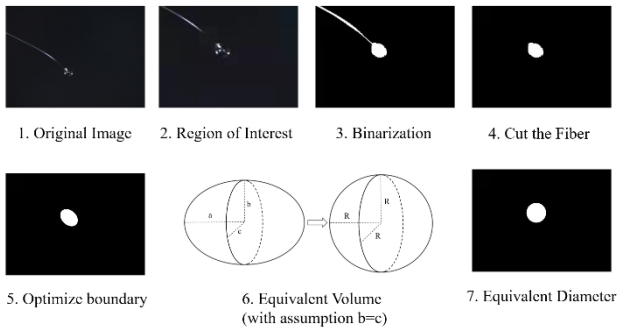


图 4 油滴初始直径测定处理流程图

1.3 实验条件

许多学者对气缸油引起的天然气早燃进行了研究，总结了早燃的一些特点。通常，将其作为氢气发动机早燃特性进行相关研究。然而，氢气的点火能量较低，燃烧速率较高，淬灭距离较短。由此可以推断，氢气早燃具有一些不同于天然气早燃的特点。因此，基于 RCM 进行了气缸油油滴引发的氢气早燃实验，并与天然气早燃实验进行了对比。压缩上止点温度 830-900K，压力 20-35bar。对于天然气为了避免异常燃烧和失火，低速二冲程天然气发动机的过量空气系数(λ)控制在 2.0 到 2.4 之间。因此，作为对比实验，天然气预混合气所采用的 λ 为 2.2。低速二冲程氢气发动机过量空气系数的选择也是参考天然气发动机，考虑到其有别于天然气的特性，并且为了探究过量空气系数对早燃的影响，实验中氢气预混合气过量空气系数为 1.5-3.0。

2 结果与讨论

2.1 氢气发动机早燃特性

图 5 为压缩结束后单个油滴自燃诱导的天然气早燃过程。压缩上止点温度为 900K，压力为 32bar。油滴直径为 0.1mm。图中的时间值为上止点后的时间。在上止点后 20ms，观察到一个明亮的黄色火焰，这是由油滴周围的油蒸气自燃引起的。在上止点后 27ms，在燃烧的油滴周围观察到淡蓝色火焰，说明油滴自燃可以引发天然气的早燃。然后可以观察到淡蓝色火焰为球形层流火焰，

以燃烧的油滴为中心，向未燃烧区域扩散。在上止后 40ms，可以观察到淡蓝色火焰到达气缸壁面。在之前的工作^[12]中可以看到更多其他热力学条件的油滴自燃引发天然气早燃的例子。

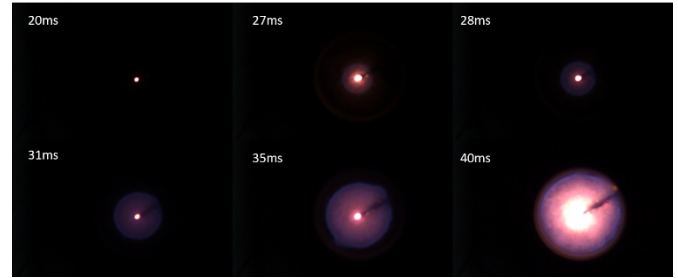


图 5 油滴自燃引发天然气预混合气早燃过程
($T=900K$ $p=32bar$ $D_0=0.1mm$)

图 6 为压缩结束后单个油滴自燃引发的氢气早燃过程。压缩上止点温度、压力、油滴直径与图 5 一致。不同的是在上止后 11ms，即观察到油滴自燃产生的明黄色火焰。在上止点后 11.4ms，在燃烧的油滴周围观察到淡蓝色火焰，说明油滴自燃可以引发氢气的早燃。然而，仅 0.8ms 后，氢气早燃火焰就扩散到气缸壁周围。这表明在氢气气氛中油滴的着火延迟时间比在天然气气氛中短，氢气早燃的火焰扩散速度更快。因此，低速二冲程氢气发动机气缸油滴自燃引起的早燃具有发生时刻早、火焰传播快的特点。

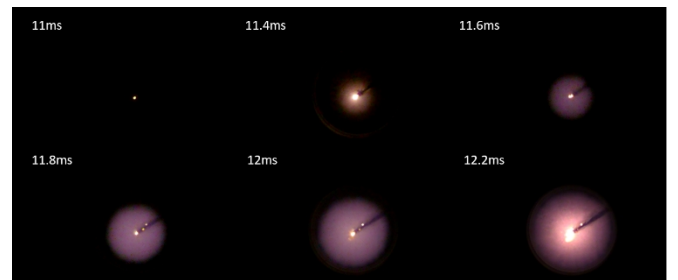


图 6 油滴自燃引发氢气预混合气早燃过程
($T=900K$ $p=32bar$ $D_0=0.1mm$)

在一些相同条件下的实验中，由于 RCM 活塞运动产生的震动，单个液滴可以形成小尺寸的子油滴或者多个小油滴组成的油滴群。图 7 显示了三种单油滴初始直径相同的子油滴自燃情况。上止点温度和压力分别为 900K 和 35bar。单个油滴直径为 0.15mm。(a) 表示单油滴在上止点后的着火延迟为 17.8ms，而由于 RCM 运动震动的子液滴引发早燃情况如 (b) 所示，在上止点后的着火延迟仅为 6.8ms。另外，子油滴群 1(c) 和子油滴群 2(d) 的着火延迟时刻分别为上止点后 0.8ms 和上止点前 1.0ms。可以看出，单个油滴形成的子油滴着火延

迟时间较短，油滴群甚至可以在上止点前发生自燃，从而引发更早时刻的早燃。虽然震动形成的子油滴的着火延迟是没有规律的，但足以说明将单个大尺寸油滴分解成由小尺寸油滴组成的油滴群可以大大缩短着火延迟。

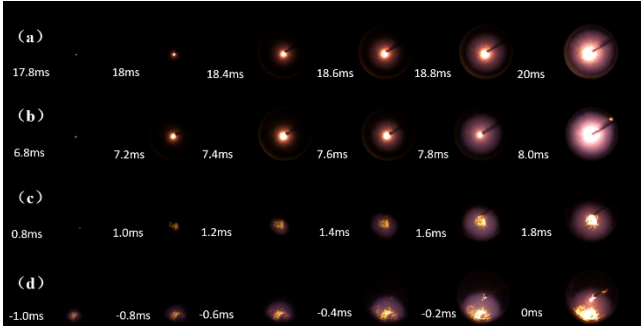


图7 油滴自燃引发氢气预混合气早燃过程
($T=900\text{K}$ $p=35\text{bar}$)

(a) $D_0=0.1\text{mm}$ (b)子油滴 (c)油滴群1 (d)油滴群2

油滴自燃引起的氢气早燃情况下缸内压力变化曲线如图8所示。这些曲线对应于图7中的情况。其中，蓝色曲线和红色曲线分别为子油滴群1和子油滴群2自燃引起的氢气早燃缸内压力变化曲线。可以看出，最大燃烧压力更高，压力波动更剧烈。而压力的剧烈波动通常会引起发动机爆震，甚至是超爆震^[13-17]。这种压力波动可能是由油滴爆炸引起的^[18,19]。因为氢气是由油滴群中一些油滴的自燃引燃的，所以剩余的油滴可能被氢气火焰点燃而发生爆炸。然而，根据之前的工作^[12]，相同过量空气系数下，由油滴自燃引起的天然气早燃并不伴随着压力的剧烈波动。即使在由子油滴群的自燃而引起的早燃情况下，也没有观察到这种压力的剧烈波动。另一方面，图中单液滴自燃引起的早燃缸内压力曲线也有轻微的波动。所有氢气早燃工况($\lambda=2.2$)的压力曲线都伴有不同程度的波动。这是因为爆炸发生在未燃烧区域，由于高能量密度。因此，氢发动机过量空气系数的选择不能与天然气发动机相同。与天然气发动机相比，氢能发动机的缸内油滴自燃引发的早燃伴随着爆震。

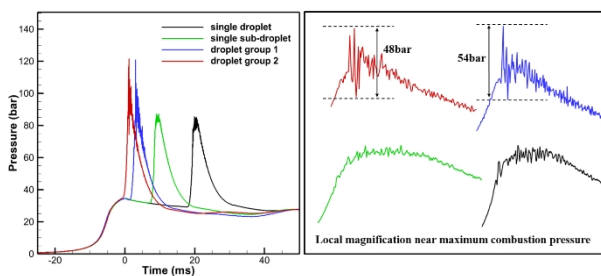


图8 油滴自燃引发氢气早燃缸内压力变化曲线

综上所述，气缸油滴的自燃能引发低速二冲程

氢发动机的早燃。油滴群比单个大油滴具有更小的着火延迟，导致时刻更早的早燃和更剧烈的燃烧压力波动。此外，与低速二冲程天然气发动机相比，氢气发动机由气缸油滴自燃引起的早燃具有发生时间更早、最大燃烧压力更高、早燃火焰传播速度更快等特点，并且通常伴随着爆震。

2.2 初始油滴直径对早燃的影响

本节讨论了初始油滴直径对早燃的影响。初始油滴直径由 $0.1\text{mm} - 0.5\text{mm}$ 。压缩上止点温度为 840K ，压力为 32bar 。不同直径的单油滴自燃引燃天然气和氢气的气缸压力变化曲线如图9所示。这些实验具有相同的压缩过程，初始直径较小的油滴的自燃显著促进了气体燃料的早燃。可以看出，气体燃料着火时刻随着油滴初始直径的减小而提前。我们还可以发现，同样直径的油滴自燃引燃氢气，其最大燃烧压力更大。

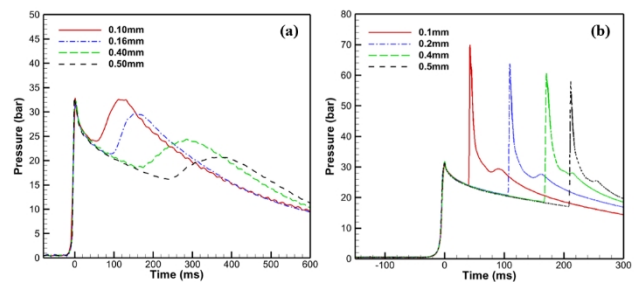


图9 油滴自燃引发天然气、氢气早燃压力变化曲线

此外还比较了不同直径油滴自燃时氢气火焰传播的图像。图6为直径为 0.1mm 的单个油滴自燃引发的早燃过程。作为对比，直径为 0.2mm 的单个油滴自燃引发的早燃过程如图10所示。在这两种情况下，从油滴自燃时刻到氢气火焰达到气缸壁周围时刻仅为 1.2ms 。因此，无法从图像中收集到更多的细节。因此，还比较了不同直径油滴自燃引燃天然气的早燃过程，如图5和图11所示。可以看出，在这两种情况下，天然气燃烧火焰从气缸中心向气缸壁扩散所花费的时间大致相同。还计算了相对火焰面积变化率，可以反映火焰的传播速度^[20]。图12显示了相对火焰面积(火焰面积与气缸可视窗口面积之比)，并突出显示了在上止点(TDC)后火焰随时间的传播。可以发现，油滴自燃引燃的初始火焰的传播速度比稳定燃烧的传播速度快。此外，油滴直径仅影响火焰的初始传播，对稳定层流火焰的传播影响不大。

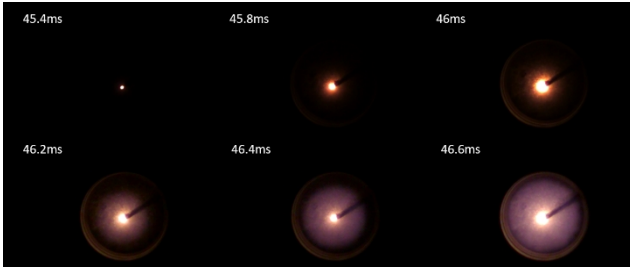


图 10 油滴自燃引发氢气预混合气早燃过程
($T=900\text{K}$ $p=32\text{bar}$ $D_0=0.2\text{mm}$)

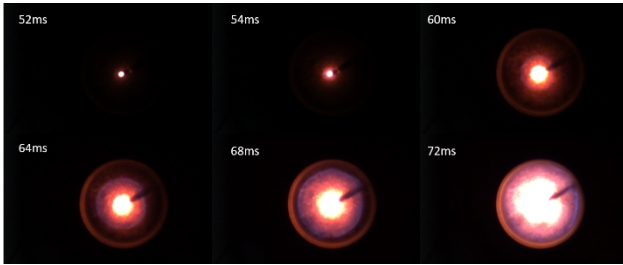


图 11 油滴自燃引发天然气预混合气早燃过程
($T=900\text{K}$ $p=32\text{bar}$ $D_0=0.2\text{mm}$)

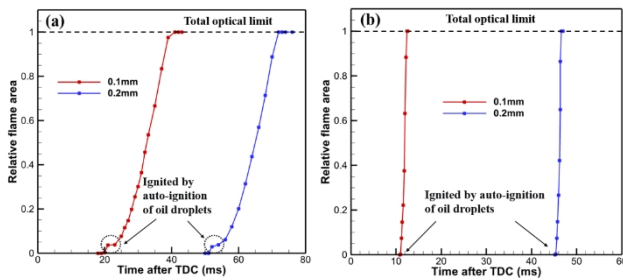


图 12 不同直径油滴自燃引发天然气、氢气早燃的相对火焰面积 (a)天然气(b)氢气

综上所述，油滴的着火延迟时间随着油滴初始直径的减小而减小。也就是说，初始直径越小的油滴，其着火延迟时间越短，其引发的早燃现象越强烈。油滴直径对油滴自燃引燃气体燃料的初始火焰传播有影响，而对稳定层流火焰传播影响不大。与天然气相比，油滴自燃和引燃氢气之间的时间很短。具有较大点火能量的大油滴对引燃氢气的初始火焰传播影响较大，但其着火延迟时间远长于小油滴。因此，小油滴的自燃问题更值得关注。

2.3 压缩上止点温度、压力对早燃的影响

为了解释压缩上止点温度和压力的影响，本文以 TDC 的热力学状态为参考。通过调节压缩比，控制压缩结束时气缸的压力和温度。初始油滴直径为 0.1mm。上止点温度范围 780 - 940k，压力范围 15 - 35bar。不同上止点条件下部分情况下气缸压力变化曲线如图 13 所示。可以看出，随着上止点温度和压力的升高，氢气早燃时刻提前。且在最大燃烧压力附近，所有的压力曲线都伴有不同程度的压力振荡。

再次证实了氢发动机由油滴自燃引起的早燃通常伴随着发动机爆震。随着上止点温度和压力的降低，这种压力振荡现象不那么明显。

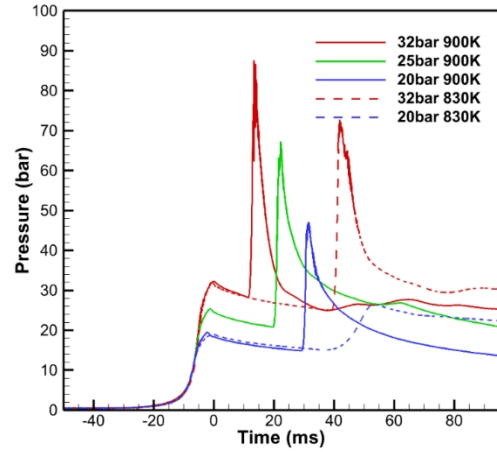


图 13 不同压缩上止点条件下油滴自燃引发氢气早燃缸内压力变化曲线

对比不同上止点条件下油滴自燃引燃氢气火焰传播图像，如图 6 和图 14-图 16 所示。从图 6、图 14、图 15 可以看出，上止点压力越高，氢气早燃早燃时刻越提前。虽然氢气早燃火焰从气缸中心传播到气缸壁周围的时间间隔几乎相同，但高压下的传播速度略慢。从图 6 和图 16 可以看出，上止点温度越高，氢气早燃时刻越提前。在上止点温度为 830K 时，氢气早燃火焰从气缸中心扩散到气缸壁周围需要 2ms，而在上止点温度为 900K 时，仅需要 1.2ms。

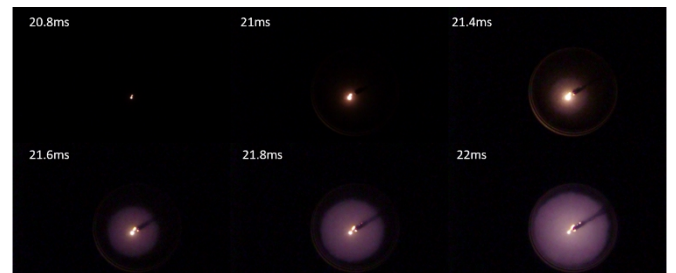


图 14 油滴自燃引发氢气预混合气早燃过程
($T=900\text{K}$ $p=25\text{bar}$ $D_0=0.1\text{mm}$)

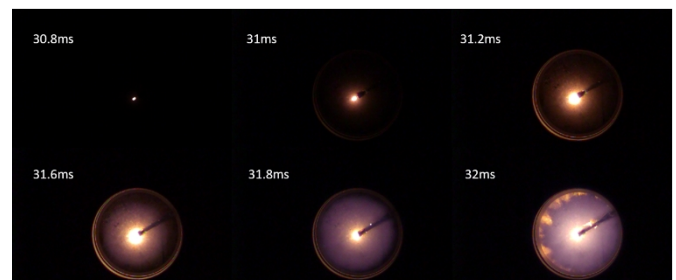


图 15 油滴自燃引发氢气预混合气早燃过程
($T=900\text{K}$ $p=20\text{bar}$ $D_0=0.1\text{mm}$)

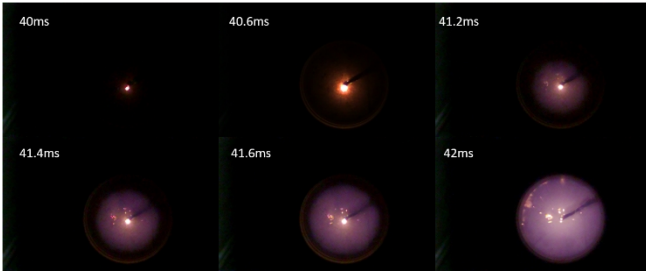


图 16 油滴自燃引发氢气预混合气早燃过程
($T=830\text{K}$ $p=32\text{bar}$ $D_0=0.1\text{mm}$)

图 17 显示了不同上止点条件下的相对火焰面积，并突出显示了 TDC 后火焰随时间的传播细节。为了更好地显示细节，图中的曲线使用了不同的水平轴(V1、V2、V3 和 V4)。可以看出，温度的升高提高了氢气早燃火焰传播速度。油滴着火延迟时间的缩短和引燃氢气火焰传播速度的加快都加剧了早燃的发生趋势。压力的增加使氢气的早燃火焰传播速度略有降低。相反，随着压力的增大，油滴的着火延迟时间明显减小。因此，压力的增加加剧了早燃的发生。

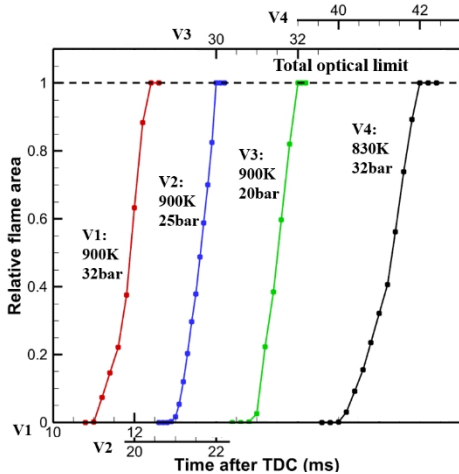


图 17 不同上止点条件下油滴自燃引发氢气早燃的相对火焰面积

综上所述，随着温度和压力的升高，氢气早燃后压力振荡更为明显。温度的升高不仅缩短了油滴的着火延迟时间，而且提高了氢气早燃火焰的传播速度。压力的增加也缩短了油滴的着火延迟时间，但略微降低了氢气早燃的火焰传播速度。因此，温度的升高和压力的升高都加剧了氢气发动机早燃的发生趋势。

2.4 过量空气系数对早燃的影响

内燃机可以有效地利用氢气，因为它的可燃性极限很宽(体积比为 4 - 75%)^[8]。也就是说，在过量空气系数 0.2 - 10 的范围内，氢气可以被利用。许多学者^[21-25]研究了过量空气系数对氢气发动机性能

的影响。考虑到失火、爆震和排放等问题，我们参照低速二冲程天然气发动机推测低速二冲程氢气发动机的过量空气系数为 2.0 - 2.5 比较合适。因此，为了更详细地研究过量空气系数对早燃的影响，研究了过量空气系数为 1.5 - 3.0 的氢气预混合气。在实验中，研究了在压缩上止点 $T=900\text{K}$, $p=30\text{bar}$ 条件，不同过量空气系数下油滴自燃引发的氢气早燃现象。而在 $\lambda=1.5$ 条件下，由于爆震压力较高，为了安全起见，上止点压力为 25bar。

图 18 为不同氢气过量空气系数条件下油滴自燃引燃氢气的气缸压力变化曲线。可以发现，在不同氢气过量空气系数条件下，油滴的着火延迟时间随着过量空气系数的减小而略有缩短。油滴引燃氢气的自燃延迟时间也相应缩短。早燃最大燃烧压力随过量空气系数的减小而增大。压力波动随过量空气系数的减小而增大，即爆震频率增大。可以看出，当过量空气系数为 1.5 时，最大燃烧压力最高，尽管与其他情况相比，上止点压力仅为 25 bar。但压力波动阶段的最大压差甚至大于 60 bar。

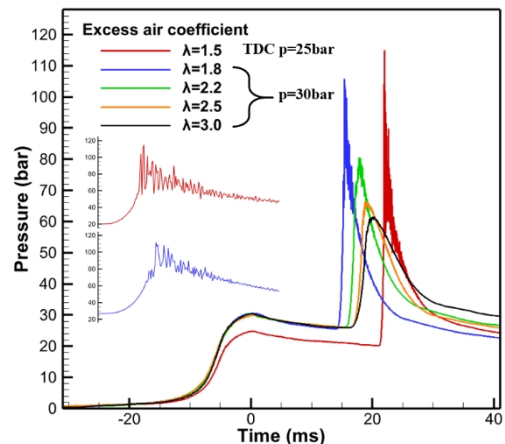


图 18 不同过量空气系数下油滴自燃引发氢气早燃缸内压力变化曲线

图 19 为不同过量空气系数下油滴自燃引起的氢气早燃过程。所有的实验中，都包括了一个稳定的层流火焰传播过程(从被油滴引燃开始到火焰扩散达气缸壁周围)，即使在某些情况下发生爆震。该稳定层流火焰的传播时间随着过量空气系数的减小而缩短。在 $\lambda=1.5$ 条件下，氢气早燃火焰从气缸中心向气缸壁扩散只需要 0.6ms，而在 $\lambda=3.0$ 条件下则需要 2.6ms。图 20 显示了计算的相对火焰面积，并突出显示了 TDC 后火焰随时间的传播细节。结果表明:随着过量空气系数的减小，氢气早燃的初始火焰和稳定层流火焰传播速度均增大。

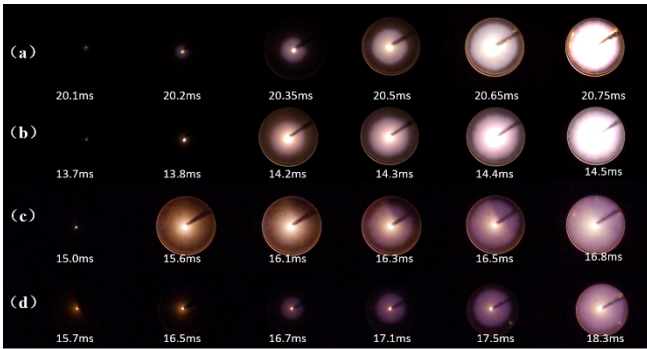


图 19 油滴自燃引发不同过量空气系数的氢气预混合气早燃过程

(a) $\lambda=1.5$ (b) $\lambda=1.8$ (c) $\lambda=2.5$ (d) $\lambda=3.0$

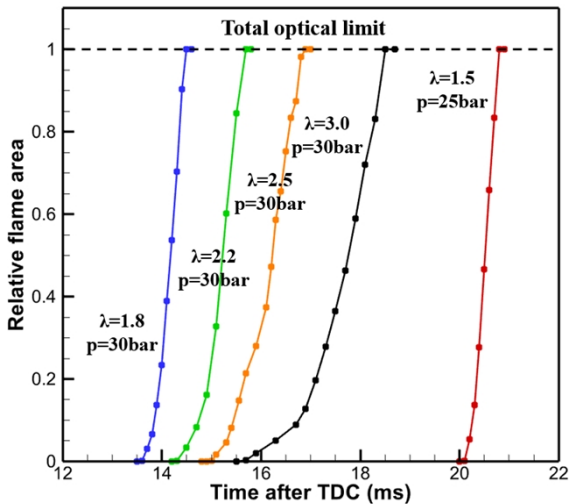


图 20 不同过量空气系数条件下油滴自燃引发氢气早燃的相对火焰面积

在过量空气系数为 1.5 和 1.8 的所有实验中，早燃都伴随着重度以上爆震。在所有过量空气系数为 2.2 的情况下，早燃都伴有轻微爆震。在所有的情况下，当空气系数为 3.0 时，早燃不会产生爆震。值得注意的是，在过量空气系数为 2.5 的早燃情况下，偶尔会发生轻微爆震。图 21 为不同过量空气系数的氢气早燃工况最大燃烧压力曲线附近的放大图。

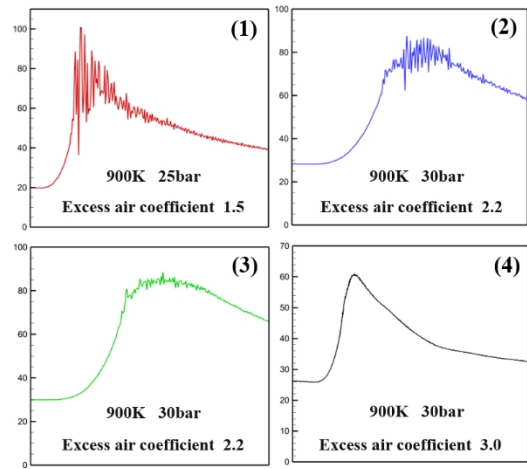


图 21 不同过量空气系数下油滴自燃引发氢气早燃缸内最大燃烧压力曲线波动的局部放大图

(a) 重度爆震 (b) 重度爆震 (c) 轻度爆震 (d) 无爆震

图 22 显示了不同氢气过量空气系数条件下的氢气早燃过程（伴随不同程度爆震）。这四种情况中的每一种都对应于图 21 中的四种情况。图中 a 和 b 图像属于氢气早燃的稳定层流火焰传播过程。图像 c 和 d 属于氢气早燃的压力波动过程。在情形(1)和情形(2)中，当火焰在气缸壁附近扩散时，未燃混合气发生剧烈爆轰，在图 c 中产生明亮的光。爆轰引起压力波动，这是激波、气缸壁和反应锋面相互作用的结果。在情形(3)中，当火焰扩散到气缸壁附近时，局部未燃混合气发生轻微爆震。因此，尽管过量空气系数以及上止点温度、压力相同，但情况(3)的早燃压力波动小于情况(2)。在情形(4)中，图像中没有未燃混合气的爆轰。表现在压力曲线上就是着火前压力曲线不存在压力波动，即早燃不伴随爆震。

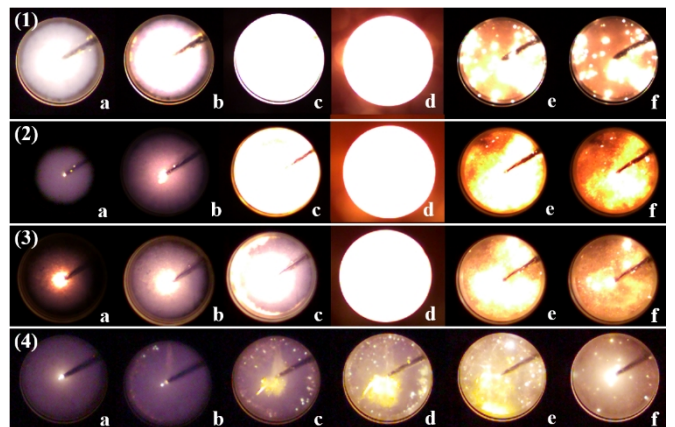


图 22 油滴自燃引发不同过量空气系数的氢气预混合气早燃过程

(a) $\lambda=1.5$, 重度爆震 (b) $\lambda=2.2$, 重度爆震 (c) $\lambda=2.2$, 轻度爆震 (d) $\lambda=3.0$, 无爆震

过量空气系数的减小促进了油滴自燃引起的早燃现象的发生。 $\lambda < 2.0$ ，早燃伴随着重爆震。 $2.0 < \lambda < 2.5$ ，早燃伴有轻微爆震。爆震程度取决于未燃混合气的爆震程度。因此，在满足热效率的条件下，为避免早燃发生时伴随的爆震，过量空气系数为 2.5~3.0 为宜。

2.5 气体燃料性质对早燃的影响

氢气的物理参数不同于空气中的成分，如传热系数、扩散系数、临界温度、临界压力等。另一方面，由于氢气的存在，油滴周围的氧气浓度降低，一些氢气会参与化学反应。因此，本节讨论了加氢气对着火延迟的影响。

在我们之前的工作^[12]中，研究了油滴在空气和天然气环境中的着火延迟(λ 约为 2.2)。图 23 为油滴自燃引燃氢气早燃的气缸压力变化曲线。并给出了天然气早燃的气缸压力变化曲线进行比较。油滴的着火时间绘制在这些曲线上。可以看出，油滴首先在含氢气的环境中自燃。此外，天然气的加入能在一定程度上抑制油滴的自燃，而氢气的加入则能促进油滴的自燃。这也表明氢气发动机比天然气发动机更容易发生由油滴自燃引起的早燃，且早燃通常伴随着发生时刻早、最大燃烧压力高以及伴随爆震等特点。

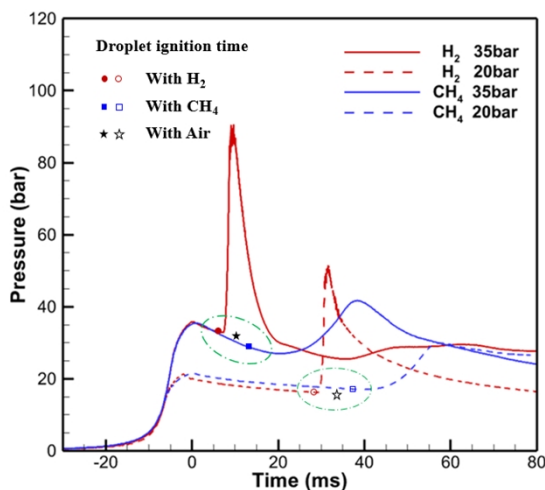


图 23 油滴自燃引发天然气、氢气早燃压力变化曲线
($T=900\text{K}$, $D_0=0.1\text{mm}$)

3 结论

采用基于 RCM 的实验研究方法，研究了低速二冲程氢气发动机缸内油滴自燃引起的早燃问题。分析了影响早燃的几个关键参数。根据实验结果，

可以得出以下结论：

- (1) 单油滴的自燃可以引发氢气早燃。与天然气发动机相比，氢气发动机的早具有发生时间早、最大燃烧压力高、火焰传播速度快等特点，且早燃通常伴随着发动机爆震。
- (2) 初始直径越小的油滴着火延迟时间越短，早燃现象越强烈。油滴直径对早燃火焰的初始传播有影响，而对稳定层流火焰的传播影响不大。具有较大点火能量的大油滴，虽然影响了初始火焰的传播，但其着火延迟时间远长于小油滴。此外，由油滴群自燃引起的早燃，通常伴随着严重的爆震。
- (3) 温度的升高不仅缩短了油滴的着火延迟时间，而且提高了氢气早燃的火焰传播速度。压力的增加也缩短了油滴的着火延迟时间，但略微降低了氢气的早燃火焰传播速度。因此，温度和压力的升高都加剧了氢气发动机早燃的发生趋势。
- (4) 过量空气系数的减小促进了油滴自燃引起的早燃现象的发生。 $\lambda < 2.0$ ，早燃伴随着重爆震。 $2.0 < \lambda < 2.5$ ，早燃伴有轻微爆震。而爆震的程度取决于未燃混合气的爆燃程度。因此，在满足热效率的条件下，为避免预点火时伴随爆震，过量空气系数为 2.5~3.0 为宜。

综上所述，本工作对低速二冲程氢气发动机气缸油滴自燃引起的早燃特性进行了分析。它可以对早燃的特点和机理提供参考，从而为减轻氢气发动机的早燃提供建议。

参考文献：

- [1] <https://www.dnvgl.com/expert-story/maritimeimpact/index.html>.
- [2] <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/GHG-Emissions.aspx>.
- [3] N. Ingemar, O. Marcel, Development of a Dual Fuel Technology for Slow-speed engines, 25th CIMAC Congress (2013), paper 284.
- [4] S. Yasueda, T. Kuboyama, M. Matsumura, The examination on the main contributing factors of lube oil pre-ignition, 26th CIMAC Congress (2016), Paper 147.
- [5] M. Stark, A.D. Risi, M. Giangreco M, Design and experiments to investigate spray and impingement characteristics of a common rail type lubrication system, 28th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (2017).
- [6] Christensen, Cylinder lubrication of two-stroke crosshead marine diesel engines, Wärtsilä Technical Journal (2010) 2.

- [7] M Pan, L. Y. Feng, Z. Gong, Z. R. Yu, H. J. Sun, Z. X. Wang, Experimental study of cylinder oil stripping behavior at the scavenge port of a low-speed two-stroke engine, SAE Technical Paper (2019), paper 2019-01-2335.
- [8] R. A. Erren, W. H. Campbell, Hydrogen: a commercial fuel for internal combustion engines and other purposes, *Inst. Fuel* 6 (1933) 277.
- [9] K. K. Rana, S. Natarajan, S. Jilakara, Potential of hydrogen fuelled IC engine to achieve the future performance and emission norms, 2015.
- [10] R. Sivabalakrishnan, Study of knocking effect in compression ignition engine with hydrogen as a secondary fuel, *Chin. J. Eng.* 102390 (2014) 1–82014.
- [11] Z. Gong, M. Hu, Y. Fang, Mechanism study of natural gas pre-ignition induced by the auto-ignition of lubricating oil, *Fuel* 315 (2022) 123286.
- [12] Z. Wang, D. Zhang, Y. Fang, Experimental and numerical investigation of the auto-ignition characteristics of cylinder oil droplets under low-speed two-stroke natural gas engines in-cylinder conditions, *Fuel* 329 (2022) 125498.
- [13] A. Andrews, R. Burns, R. Dougherty, D. Deckman, Investigation of engine oil base stock effects on low speed pre-ignition in a turbocharged direct injection SI engine, *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 9 (2016) 400–407.
- [14] K. Fujimoto, M. Yamashita, S. Hirano, K. Kato, Engine oil development for preventing pre-ignition in turbocharged gasoline engine, *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 7 (2014) 869–874.
- [15] Z. Wang, H. Liu, T. Song, Y. Qi, X. He, Relationship between super-knock and pre-ignition, *Int. J. Engine Res.* 16 (2014) 166–180.
- [16] Z. Wang, Y. Qi, H. Liu, Y. Long, J. Wang, Experimental Study on Pre-Ignition and Super-Knock in Gasoline Engine Combustion with Carbon Particle at Elevated Temperatures and Pressures, SAE International 2015.
- [17] Z. Wang, Y. Qi, X. He, Analysis of pre-ignition to super-knock: Hotspot-induced deflagration to detonation, *Fuel* 144 (2015) 222–227.
- [18] S. Fei, Z. Wang, Y. Qi, Ignition of a Single Lubricating Oil Droplet in Combustible Ambient Gaseous Mixture under High-Temperature and High-Pressure Conditions, *Combust. Sci. Technol.* 191.11 (2019) 2033-2052.
- [19] Y. Long, Z. Wang, Y. Qi, S. Xiang, Zeng, Effect of Oil and Gasoline Properties on Pre-Ignition and Super-Knock in a Thermal Research Engine (TRE) and an Optical Rapid Compression Machine (RCM), SAE International 2016.
- [20] L. Chen, X. Zhang, R. Zhang R. Cycle-resolved visualization of lubricant-induced abnormal combustion in an optical natural gas/hydrogen engine, *Fuel* 21 (2022) 124053.
- [21] D. Nguyen, Y. Choi, C. Park, Effect of supercharger system on power enhancement of hydrogen-fueled spark-ignition engine under low-load condition, *Int. J. Hydrogen Energy* 46 (2021) 6928-6936.
- [22] A. Wimmer, T. Wallner, J. Ringler, H₂-direct injection—a highly promising combustion concept SAE technical paper 2005.
- [23] L. M. Das, Exhaust emission characterization of hydrogen-operated engine system: Nature of pollutants and their control techniques, *Int. J. Hydrogen Energy* 16 (1991) 765-775.
- [24] W. Thomas, S. M. Nicholas, S. Riccardo, Evaluation of the efficiency and the drive cycle emissions for a hydrogen direct-injection engine, *P. I. MECH. ENG. D-J. AUT.* 227 (2013) 99-109.
- [25] S. Natarajan, M. Abraham, M. Rajesh, Delhy 3w-hydrogen fuelled Hy-Alfa three wheeler, SAE Technical paper 2013.