DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202504036

柴油引燃天然气着火燃烧特性的可视化

沈羽航[1]，赵　凯[2]，杨　康[1]，金　煜[1]，玄铁民[3]，何志霞[1]
（1. 江苏大学能源研究院，镇江 212013；2. 中汽研汽车检验中心（常州）有限公司，常州 213167；
3. 江苏大学能源与动力工程学院，镇江 212013）

摘要：基于一外部加热的高温、高压定容燃烧弹系统，采用自然发光法对柴油引燃天然气预混气燃烧过程开展光学诊断测试，研究不同天然气能量替代率（ESR）、柴油喷射压力 p_{inj} 以及柴油喷射质量 m_{inj} 对引燃过程着火和燃烧特性的影响. 结果表明：ESR 增大使得甲烷-空气当量比增加，由于甲烷比热容比空气大，ESR 增大对柴油着火起到促进作用；同时，氧含量下降使得 ESR 增大对柴油着火起到一个抑制作用. 当柴油喷射质量较小时，ESR 的增大对着火的抑制作用强于其对着火的促进作用；当柴油喷射质量较大时，则呈相反结果. 随着 ESR 增大，浓碳烟的占比升高，但在柴油喷射压力为 100 MPa、ESR 为 94% 条件下存在一个浓碳烟占比高的阶段. 当柴油喷射压力高于 100 MPa 时，柴油喷射压力对燃烧放热的增强作用减弱，甲烷被引燃量没有太大增加. 在 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 的喷射策略下，着火延迟期在 ESR 为 94%～96% 范围内呈很强的线性关系.

关键词：天然气；能量替代率；着火延迟期；碳烟
中图分类号：TK464　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）04-0314-08

Visualization of the ignition and combustion characteristics of natural gas ignited by diesel

Shen Yuhang[1]，Zhao Kai[2]，Yang Kang[1]，Jin Yu[1]，Xuan Tiemin[3]，He Zhixia[1]
（1. Institute for Energy Research，Jiangsu University，Zhenjiang 212013，China；
2. CATARC Automotive Test Center（Changzhou）Company Limited，Changzhou 213167，China；
3. School of Energy and Power Engineering，Jiangsu University，Zhenjiang 212013，China）

Abstract：Based on an externally heated high-temperature and high-pressure constant volume combustion chamber system，an optical diagnostic test on the combustion process of diesel-ignited premixed natural gas was carried out using the natural luminescence method. The effects of different natural gas energy substitution rate（ESR），diesel injection pressure p_{inj} and diesel injection mass m_{inj} on the ignition and combustion characteristics were studied. The results show that an increase in ESR leads to an increase in the equivalence ratio of methane to air. Since the specific heat of methane is greater than that of air，the increase in ESR has a promoting effect on diesel ignition. At the same time，the decrease in oxygen makes the increase in ESR，having an inhibitory effect. When the diesel injection mass is small，the increase of ESR has a stronger inhibitory effect on ignition than its promoting effect. When the diesel injection mass is large，the opposite result is presented. With the increase of ESR，the proportion of concentrated soot is increased，but under the diesel injection pressure of 100 MPa and the ESR of 94%，there is a stage with a high proportion of concentrated soot. When the diesel injection pressure is higher than 100 MPa，the enhancement effect of injection pressure on combustion heat release weakens，and there is no significant increase in the amount of ignited methane. Under the injection strategy of m_{inj}=10 mg，p_{inj}=80 MPa，the ignition delay exhibits a strong linear relationship with the ESR range of 94%—96%.

Keywords：natural gas；energy substitution rate；ignition delay；soot

收稿日期：2024-11-03；**修回日期**：2025-02-25.
基金项目：工信部船机重大专项资助项目；国家自然科学基金资助项目（52376113）；江苏省自然科学基金资助项目（BK20240861）.
作者简介：沈羽航，硕士研究生，2212206034@stmail.ujs.edu.cn.
通信作者：杨　康，博士，副研究员，yangkang@ujs.edu.cn.

相较于柴油，天然气具有低碳氢比、高辛烷值且低成本等优点，在发动机应用中可抑制碳排放，同时达到更高的压缩比，是一种发展前景广阔的清洁替代燃料. 目前得到实际应用的多为点燃式天然气发动机，相比于传统柴油机，功率显著下降. 相对较低的能量密度和火焰传播速度以及高自燃温度使得天然气不适合在柴油机中作为单一燃料使用，并且纯天然气压燃发动机会出现运行过程失火、冷起动困难等问题[1-3]. 因此，需要在压燃式发动机中采用少量的柴油作为高活性燃料去引燃相对低活性的天然气来解决这些问题[4-5].

目前，已有学者通过试验和数值计算方法对柴油/天然气双燃料发动机燃烧和排放性能进行了大量研究. 采用部分天然气预混燃烧和喷射正时延迟策略可以获得更好的性能[6]，且在轻微天然气预混模式下缩短喷射间隔可降低碳烟排放[7]；而喷射正时的提前导致柴油着火延迟期延长和燃烧持续时间缩短[8]；在柴油/天然气直喷发动机中，改变直喷的相对交角可以同时降低 NO 和碳烟排放，但对缸内平均压力的影响较小[9]；增加天然气能量替代率(ESR)会导致扩散燃烧的减少和着火延迟[10]；与单一柴油燃料相比，添加天然气可以降低 NO_x 和碳烟排放[11]. 然而，Zhu 等[12]也研究了天然气能量替代率对天然气/柴油双燃料发动机燃烧性能和排放特性的影响，结果表明：将天然气能量替代率从 0% 提高到 70% 可以减少烟尘体积分数和未燃碳氢(UHC)排放，但进一步将其提高到 85% 可能会使燃烧恶化. 因此，关于天然气能量替代率对于引燃过程的着火燃烧特性的影响有待进行深入研究.

目前，对柴油引燃天然气预混气的喷雾燃烧特性的相关研究较少. 周洋[13]通过定容燃烧弹，在环境压力为 2.8 MPa、环境温度为 743 K 条件下进行了可视化试验研究，发现柴油引燃天然气预混气的火焰投影面积变化速率随着当量比、喷射脉宽和柴油喷射压力的增加而增加，随预混时间的增加而减小. 郭能坤[14]基于 OH 可视化方法，研究了柴油喷射压力为 32 MPa、天然气喷射压力为 31 MPa、环境温度为 800 K 且环境背压为 3 MPa 条件下柴油点燃天然气的燃烧特性，发现燃烧过程首先发生在柴油机先导喷雾中，然后扩散到天然气喷雾中. 在天然气喷雾的燃烧过程中，没有类似于柴油喷雾的火焰升起长度. 李徐程[15]在预混甲烷当量比为 0.2、0.4 和 0.6 条件下对着火延迟期的影响进行了模拟，结果表明：甲烷含量增大导致正十二烷着火延迟期延长，以及随着喷油时长缩短，一阶段着火延迟期缩短，二阶段着火延迟期先缩短、后延长. Ishibashi 等[16]通过快速压缩机研究发现，相较于喷射压力为 100 MPa 的纯柴油模式，喷射压力为 60 MPa 预喷柴油引燃模式的放热率峰值略有减小，NO_x 和 CO 的生成量显著降低，但碳氢化合物显著增加. 然而，上述柴油引燃天然气预混气的着火燃烧特性研究对燃烧放热过程分析较少.

因此，为了探究柴油引燃天然气预混气的着火燃烧特性，笔者研究了 ESR 对着火延迟期、火焰发展、火焰面积、火焰亮度和燃烧压力等参数的影响.

1　试验装置及方案

1.1　试验装置

图 1 为柴油引燃天然气预混气可视化试验平台系统示意，主要包括供气系统、供油系统、光学测试系统和控制系统. 供气系统分为甲烷进气和空气进气，通过电磁阀进行进气. 供油系统通过气/液增压泵将柴油注入到柴油共轨，再连接到喷油器. 通过气/液增压泵提升压力到相应的柴油喷射压力. 光学测试系统包含定容燃烧弹、高速摄像机、压力传感器和示波器. 定容燃烧弹主体为圆柱形的腔体，有效容积为 1.29 L，定容燃烧弹采用外部电热丝加热，周围加装保温隔热层，环境温度最高可达 1 000 K. 在腔体两端对称布置 2 个直径为 100 mm 的视窗，以供光学路径通过.

试验中用甲烷来表征天然气. 定容燃烧弹通过外接空气和甲烷的高压储气瓶向腔体内充气，实现甲烷和空气的预混合气，定容燃烧弹内部压力最高可达 5 MPa. 通过控制电加热丝的温度和充入定容燃烧弹内气体的压力，模拟内燃机缸内压缩上止点时刻的高温、高压环境. 试验中采用引燃策略，即先通入空气到定容燃烧弹内达到空气所需要达到的分压力，使空

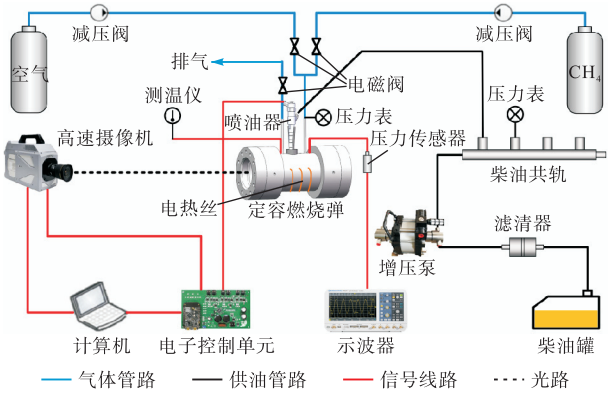


图 1　可视化试验平台系统示意

Fig.1　Schematic of the visualization experiment bench system

气均匀受热，在所需试验的环境压力下通入定量甲烷与空气进行混合，最后喷射柴油引燃甲烷与空气的预混气. 定容燃烧弹内的火焰发光通过视窗被高速摄像机捕获. 定容燃烧弹内的压力波动由安装在定容燃烧弹上方的压力传感器（西铁城 citizen 燃烧压力传感器 CAS-23A，受压面直径为 3.00 mm[17]）获得电信号，随后经过电荷放大器（西铁城 citizen 电荷放大器 PCA 2-E05），最后在示波器上显示信号波动. 控制系统主要由计算机和电子控制单元构成. 计算机发出相应指令，喷油器进行喷射，同时高速摄像机拍摄，压力传感器也同步采集信号.

1.2 试验方案

表 1 为试验条件，试验主要从 ESR、柴油喷射压力和柴油喷射质量 3 个方面对柴油引燃甲烷-空气预混气的燃烧特性进行分析. 试验用柴油为国Ⅳ柴油. 笔者所采用的试验条件是为了更好地观察柴油引燃天然气的着火燃烧过程，然后对其特性进行研究.

表 1 试验条件

Tab.1 Experimental conditions

参数	数值
环境压力/MPa	2.5
环境温度/K	800
柴油喷射压力 p_{inj}/MPa	80，100，120
能量替代率 ESR/%	94，95，96
柴油喷射质量 m_{inj}/mg	5，10
喷孔数	1
喷孔直径/mm	0.14

柴油喷射质量为 5 mg 相当于某型柴油引燃天然气发动机的最小引燃油量，而柴油喷射质量为 10 mg 相当于基本引燃油量. 将 10 mg 看作是柴油喷射质量较大的喷射策略，将 5 mg 看作是柴油喷射质量较小的喷射策略（柴油喷射质量较小还是较大只是相对而言）. 环境压力和环境温度保持不变，分别为 2.5 MPa 和 800 K. 在实际试验中发现，此环境压力和环境温度下容易同时达到柴油自燃而甲烷不自燃的试验工况. 在柴油喷射质量为 10 mg、柴油喷射压力分别为 80、100 和 120 MPa 且 ESR 分别为 94%、95% 和 96% 条件下进行试验；在柴油喷射质量为 5 mg 和 10 mg、柴油喷射压力为 80 MPa、ESR 为 94% 条件下进行试验. 当 ESR 达到 97% 以上时，由于甲烷量太大容易自燃（ESR 的高值为 96%）. 柴油喷射压力由气/液增压泵增压获得，提前进行柴油喷射压力、喷射脉宽和柴油喷射质量的标定以达到相同柴油喷射压力、不同柴油喷射质量的喷射脉宽及不同柴油喷射压力、相同柴油喷射质量的喷射脉宽. 摄像机拍摄速度设为 20 000 帧/s，快门速度设为 1/20 664 s. 每组试验重复 3 次，随后取平均值减小试验误差. 试验采用的喷油器为单孔喷嘴，喷孔直径为 0.14 mm.

ESR 定义为引燃柴油的能量一定、天然气能量占总能量的比率，1–ESR 为引燃柴油所占的能量比，能量指燃料完全燃烧所释放的能量.

根据理想气体状态方程，甲烷进气压力与 ESR 及引燃油量的关系可表示为

$$p_{CH_4}=\frac{m_d H_d RT}{M_{CH_4} H_{CH_4} V}\cdot\frac{\mathrm{ESR}}{(1-\mathrm{ESR})} \tag{1}$$

式中：m_d 为引燃油量；H_d 为柴油低热值，其值为 42 MJ/kg；M_{CH_4} 为甲烷的相对分子质量；H_{CH_4} 为甲烷低热值，其值为 50 MJ/kg；R 为气体常数，R = 8.314 J/（mol · K）；T 为环境温度；V 为定容燃烧弹内部容积.

2 试验结果与分析

2.1 ESR 的影响

图 2 示出柴油喷射压力为 80 MPa 时不同 ESR 的火焰分布，其中定容燃烧弹背压为 2.5 MPa，柴油喷射质量为 10 mg. ESR 分别为 94%、95% 和 96%，对应的甲烷当量比分别为 0.182、0.221 和 0.282. 将火焰图片中火焰灰度阈值最开始出现大于 10 的时刻作为着火时刻（IT）；喷油开始到 IT 定义为着火延迟期（ID）. 观察 IT、IT + 0.50 ms（代表 IT 之后的 0.50 ms）、IT + 1.00 ms、IT + 2.00 ms 和 IT + 3.00 ms 的火焰分布（从左到右）. 由于着火时刻的火焰亮度太低，所以将

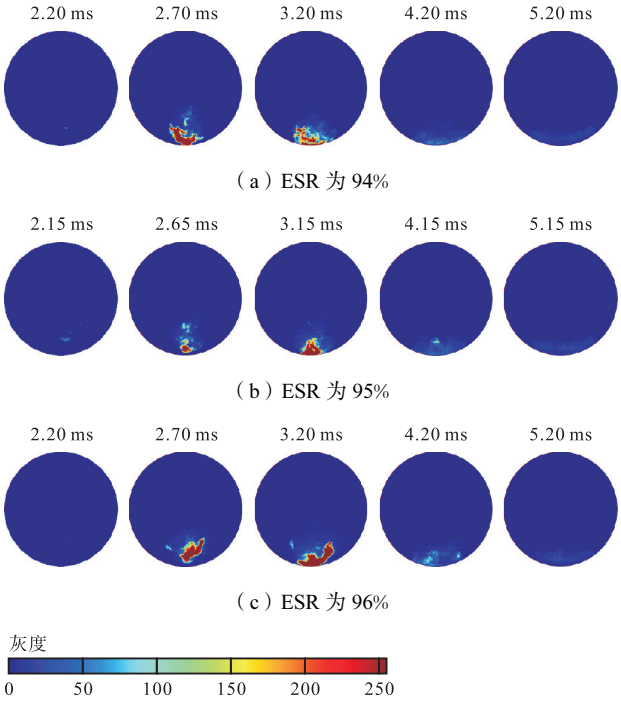


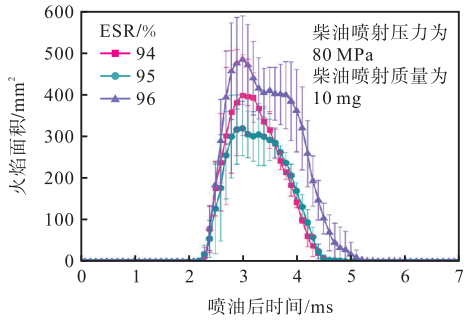
图 2 柴油喷射压力为 80 MPa 时不同 ESR 的火焰分布

Fig.2 Distribution of flame under different ESRs at the injection pressure of 80 MPa

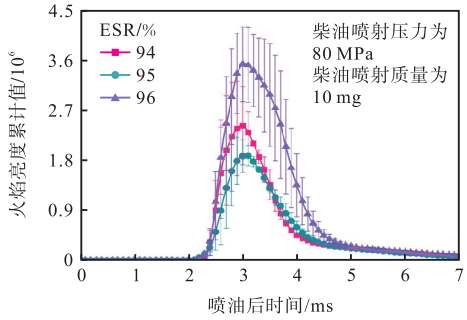
3 种 ESR 下的灰度上限调整为 20，由此可以比较清晰地观察到火焰.

由于采用自然发光法，柴油燃烧发出火焰亮光主要为碳烟自发光的亮光. 当高速摄像机拍到的火焰灰度大于 10 时即认为出现了火焰. 从图 2 中可以观察到，火焰主要出现在靠近壁面的区域. 这是由于柴油的 ID 比较长，燃烧始点贴近壁面，喷油器附近以及中间部分的柴油无法自燃[12]. 在 IT 和 IT + 0.50 ms 时可以观察到随着 ESR 的增加，火焰位置呈上移的趋势. 可能是 ESR 的增加使甲烷-空气当量比增加，而甲烷的比热容比空气大，使得定容燃烧弹内气体混合气的比热容增加，降低了由于柴油蒸发、吸热带来的温度下降值，从而使得混合气的温度更高、更易形成可燃混合气（甲烷的比热容为 1.441 kJ/(m^3 · ℃)，空气的比热容为 1.329 kJ/(m^3 · ℃)）. 随着 ESR 的增加，甲烷-空气当量比随之增加，会使得比热容的作用越来越明显. 在 IT + 1.00 ms 时，随着 ESR 的增加，相应的火焰亮度急剧增强. 这是由于 ESR 从 95% 增至 96% 所增加的甲烷-空气当量比比 ESR 从 94% 增至 95% 的要大，从而使得碳烟的生成量大幅增加. 同时，随着 ESR 增加，空气含量下降，柴油燃烧质量下降，从而生成更多的碳烟. 在 IT + 2.00 ms 和 IT + 3.00 ms 时，火焰面积和火焰亮度随着 ESR 的增加而增大，表明高 ESR 有更长的燃烧持续期. 在 ESR 为 94% 时，从 IT 到 IT + 1.00 ms (2.20 ~ 3.20ms)，火焰的亮度经历了先增强、后减弱的过程. 对于 ESR 为 95% 和 96%，从 IT 到 IT + 1.00 ms，火焰的亮度一直呈增强的趋势，直到 IT + 2.00 ms 时亮度减弱，说明 ESR 的增加延后了火焰亮度的峰值时间. ESR 从 95% 增至 96%，强亮度区域增加，意味着浓碳烟的比例在上升.

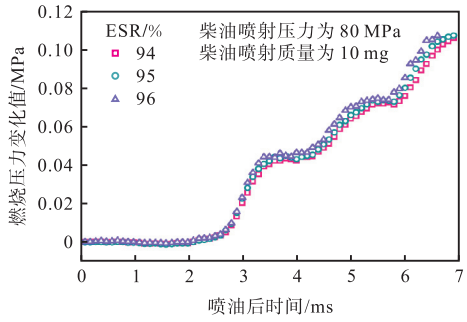
图 3 示出柴油喷射压力为 80 MPa 时火焰面积、火焰亮度累计值和燃烧压力变化值随 ESR 的变化. 其中，火焰亮度累计值是指火焰存在时的每一时刻下火焰面积内每一个像素点的灰度累计值. 图 3 (a) 为火焰面积随 ESR 的变化. ESR 从 94% 增至 96%，火焰面积整体上呈先下降、后增加的趋势. ESR 从 94% 增至 95%，空气含量略有下降，可燃混合气含量下降，使得柴油燃烧产生的碳烟下降. ESR 从 95% 增至 96%，空气含量大幅下降，可燃混合气质量下降，使得柴油燃烧产生的碳烟大幅上升. 同时，甲烷-空气当量比的大幅增加使得碳烟大幅上升. 随着 ESR 的增加，火焰面积较大区间的持续时间随之延长. 由图 3 (b) 可知，火焰亮度的总体变化趋势和火焰面积的变化趋势一致. 随着 ESR 增加，火焰亮度呈先减小、后增加趋势，但不同之处在于，ESR 从 94% 增至 95% 的火焰亮度相对下降幅度比火焰面积的相对下降幅度要小，表明 ESR 从 94% 增至 95%，浓碳烟占比在上升. ESR 从 95% 增至 96% 的火焰亮度相对增加幅度比火焰面积的相对增加幅度要大. 可知，ESR 从 95% 增至 96%，浓碳烟占比在上升，这与图 2 的结果一致. 图 3 (c) 为喷油开始后定容燃烧弹内部燃烧压力变化值. 笔者只关注燃烧放热压力上升的阶段. 图中的压力变化曲线是经过平滑处理之后的结果. 刚开始压力有一个小的下降阶段，这是因为柴油喷雾蒸发、吸热导致温度下降. 随着 ESR 的增加，燃烧压力变化值呈上升的趋势，即燃烧放热随之增强. 从



（a）火焰面积



（b）火焰亮度累计值



（c）燃烧压力变化值

图 3　柴油喷射压力为 80 MPa 时不同 ESR 的火焰面积、火焰亮度累计值及燃烧压力变化值

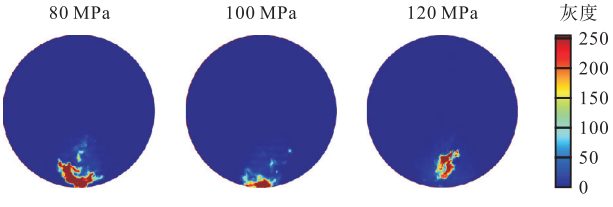
Fig.3　Flame area, cumulative value of flame luminosity and degree of combustion pressure under different ESRs at the injection pressure of 80 MPa

2.6 ms 开始，压力变化值开始急剧上升，这是由柴油扩散燃烧导致的. 从 3.0 ms 开始，3 种 ESR 下压力变化值的差距开始变大，这是由甲烷开始着火导致的，而随着 ESR 增加，甲烷-空气当量比增加，产生了更多的反应产物（如 CO_2、水蒸汽等）. 说明随着 ESR 增加，甲烷被引燃量增加. 值得注意的是，在压力变化值的上升过程中有两个缓慢上升的阶段. 这可能是由于位于定容燃烧弹上方的压力传感器反弹到达的压力波，抵消了一部分之后传来的压力波，但随着压力波越来越强，整体压力变化再次上升，而第 2 个压力缓慢上升阶段的时间随着定容燃烧弹内部的压力波越来越大而缩短.

2.2 柴油喷射压力的影响

图 4 示出 ESR 为 94% 时不同柴油喷射压力（80、100 和 120 MPa）在 IT + 0.50 ms 的火焰分布. 首先，由 3 种柴油喷射压力的相应时间可知，柴油喷射压力的增加缩短了 ID. 柴油喷射压力的增加提高了柴油的雾化质量，从而使得燃油喷雾更早形成可燃混合气. 火焰面积随着柴油喷射压力的增加而减小，且火焰亮度随着柴油喷射压力的增加而减弱. 表明柴油喷射压力的增加能够提升火焰浮起长度，减少驻留时间，降低碳烟的生成量. 随着柴油喷射压力增加，火焰较亮区域的面积下降. 同时，在柴油喷射压力为 80 MPa 和 100 MPa 条件下，火焰较亮区域主要集中在靠近壁面的区域，而 120 MPa 下的火焰较亮区域上移. 随着柴油喷射压力的增加，柴油动能增加，提高湍流强度，提高点火能量，火焰的空间分布更加广泛[12]. 这也表明柴油喷射压力的增加改善了柴油雾化质量，更早形成可燃混合气.

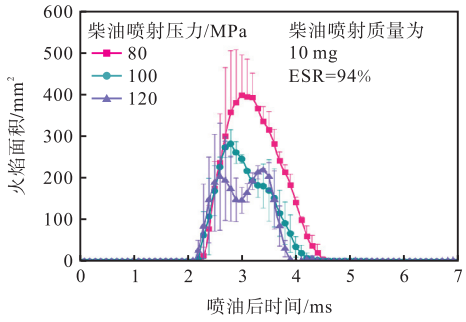
图 5 示出 ESR 为 94% 条件下火焰面积、火焰亮度累计值和燃烧压力变化值随柴油喷射压力的变化. 由图 5(a) 可知，随着柴油喷射压力的增加，火焰面积的总体趋势随之减小，表明高的柴油喷射压力能提高雾化质量，从而改善燃烧、降低碳烟的生成. 从燃烧初期可以看出，火焰面积随着柴油喷射压力的增加而增加. 这是由于柴油喷射压力高的条件下 ID 更短，柴油喷射压力越高则燃油燃烧得越早. 在柴油喷射压力为 120 MPa 下，火焰面积出现了两个峰值，且第 2 个峰值大于第 1 个峰值. 这是由于在柴油喷射压力为 120 MPa 下可燃混合气的区域更大，引燃更多周围的甲烷使得碳烟的生成量增加. 图 5(b) 为相应条件下火焰亮度的累计值. 柴油喷射压力为 80 MPa 的火焰亮度远远大于另外两种柴油喷射压力的火焰亮度. 柴油喷射压力为 100 MPa 和 120 MPa 的火焰亮度累计值相差不大. 与图 5(a) 不同的是，柴油喷射压力为 120 MPa 的火焰亮度没有出现两个峰值的现象. 在 3.20 ~ 3.60 ms、柴油喷射压力为 120 MPa 下的



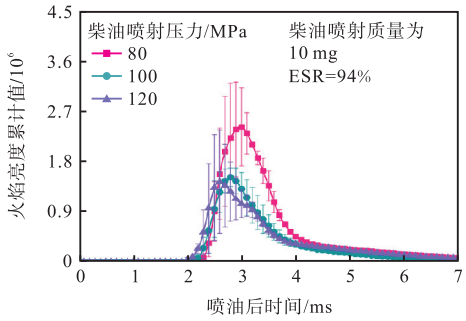
（a）2.70 ms （b）2.60 ms （c）2.45 ms

图 4 不同柴油喷射压力在 ESR 为 94% 时 IT + 0.50 ms 的火焰分布

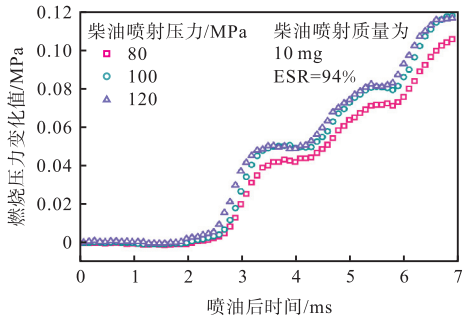
Fig.4 Distribution of flame at 0.50 ms after IT under different diesel injection pressure at 94% ESR



（a）火焰面积



（b）火焰亮度累计值



（c）燃烧压力变化值

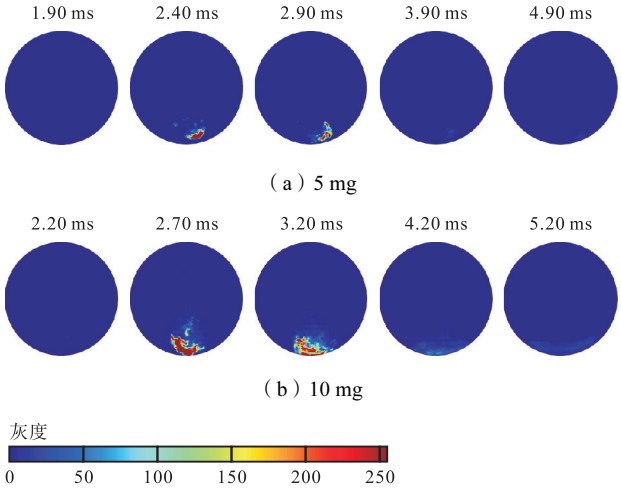
图 5 ESR 为 94% 条件下不同柴油喷射压力下的火焰面积、火焰亮度累计值及燃烧压力变化值

Fig.5 Flame area, cumulative value of flame luminosity and degree of combustion pressure under different diesel injection pressure at 94% ESR

火焰面积相对于 100 MPa 的火焰面积上升，但是相应的火焰亮度累计值却呈下降趋势. 说明在该阶段，p_{inj} 为 120 MPa 的浓碳烟占比下降. 反之，p_{inj} 为 100 MPa 相比于 p_{inj} 为 120 MPa，浓碳烟的占比升高. 除去 3.20 ~ 3.60 ms 阶段，其他阶段 p_{inj} 为 120 MPa 的火焰面积小于 100 MPa 的火焰面积. 但 p_{inj} 为 120 MPa 的火焰亮度却和 p_{inj} 为 100 MPa 的火焰亮度相近. 说明除去 3.20 ~ 3.60 ms 阶段，120 MPa 的浓碳烟占比升高. 由图 5(c)可知，随着柴油喷射压力的增加，ID 随之缩短. 同时，急剧上升的时间也随着柴油喷射压力的增加而提前，表明柴油扩散燃烧的时间也随着柴油喷射压力的增加而提前. 与图 3(c)一样，燃烧压力有两个上升缓慢的阶段. 随着柴油喷射压力的增加，燃烧变化值随之增加，但在 p_{inj} 为 100 ~ 120 MPa，燃烧压力的增幅并不明显，表明柴油喷射压力的增加可以增强燃烧放热，但当柴油喷射压力达到 100 MPa 以上时，燃烧放热的增幅不明显；同时也表明甲烷被引燃量相差不大.

2.3　柴油喷射质量的影响

图 6 为不同柴油喷射质量对火焰分布的影响. 从 IT 可以看到，随着柴油喷射质量的增加，ID 有明显的延迟. 这是由于柴油喷射质量的增加使得柴油的卷吸质量下降，从而使得 ID 延迟. 从 IT + 0.50 ms 可以明显地观察到，火焰位置随着柴油喷射质量的增加更加靠近壁面. 柴油喷射质量的增加使得喷雾贯穿距离增加，从而使得着火位置更靠近壁面. 柴油喷射质量的增加使得火焰面积和火焰亮度随之增大. 同时，柴油喷射质量的增加使得亮度较亮区域的面积随之增大. 从 IT + 2.00 ms 和 IT + 3.00 ms 可以看出，柴油喷射质量为 10 mg 条件下还能观察到明显的火焰，表明随着柴油喷射质量的增加，燃烧持续期随之延长.



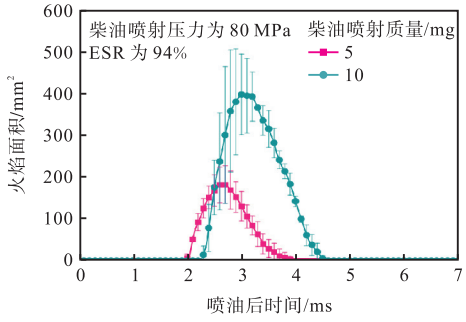
（a）5 mg

（b）10 mg

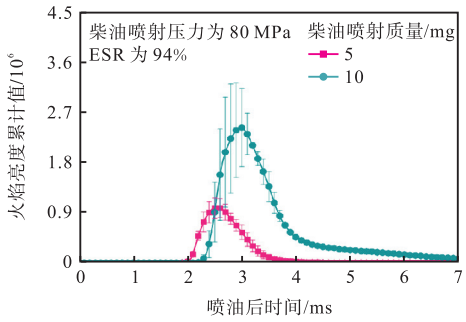
图 6　不同柴油喷射质量的火焰分布

Fig.6　Distribution of flame under different diesel injection mass

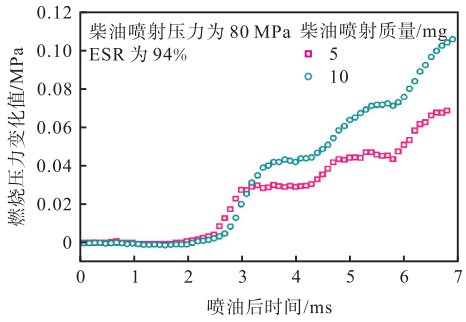
图 7 为火焰面积、火焰亮度累计值和燃烧压力变化值随柴油喷射质量的变化. 由图 7(a)可以看出，ID 随着柴油喷射质量的增加而延后，这与图 6 的结论一致. 火焰面积随着柴油喷射质量的增加而增大. 从图 7(b)的火焰亮度累计值也能够发现和图 7(a)相同的结论. 燃烧持续期也是随着柴油喷射质量的增加而延长. 柴油喷射质量为 10 mg 的火焰亮度在喷油后 2.5 ms 之后超过柴油喷射质量为 5 mg 的火焰亮度；而柴油喷射质量为 10 mg 的火焰面积也在喷油后 2.5 ms 之后超过柴油喷射质量为 5 mg 的火焰面积. 图 7(c)中，随着柴油喷射质量的增加，燃烧压力变化值增大[18-19]，表明随着柴油喷射质量的增加，燃烧放热增



（a）火焰面积



（b）火焰亮度累计值



（c）燃烧压力变化值

图 7　不同柴油喷射质量条件下的火焰面积、亮度累计值及燃烧压力变化值

Fig.7　Flame area，cumulative value of flame luminosity and degree of combustion pressure under different diesel injection mass

强. 与图 3、图 5 不同，柴油喷射质量的改变使得压力变化值间的差距在喷油后 3.0 ms 之后随着时间的推移而越来越大，表明柴油喷射质量的增加对燃烧放热的影响随着燃烧的进行而增强；同时表明甲烷被引燃量大大增加.

图 8 为不同试验条件下的 ID. 在柴油喷射质量和柴油喷射压力较小（m_{inj} 为 5 mg、p_{inj} 为 80 MPa）时，随着 ESR 的增加，ID 延后. 可能是由于甲烷的比热容比空气的大，使得定容燃烧弹内的气体混合气比热容增加，降低了由于柴油蒸发吸热带来的温度下降，从而使得混合气的温度更高、更易形成可燃混合气. 同时，甲烷-空气当量比的增加使得氧含量下降，从而对柴油着火起到了一个抑制作用[20-21]. 当柴油喷射质量为 5 mg 时，甲烷-空气当量比上升对柴油着火的抑制作用强于促进作用. 在柴油喷射质量为 10 mg 条件下，随着 ESR 的增加，ID 略有缩短，表明当柴油喷射质量为 10 mg 时，甲烷-空气当量比上升对柴油着火的促进作用强于抑制作用. 虽然 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 分别为 80、100 和 120 MPa 下各自的 ID 随着甲烷-空气当量比的上升略有缩短，但 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 100 MPa 和 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 120 MPa 的 ID 缩短程度略大. 从 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 100 MPa 和 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 120 MPa 误差棒体现的不确定度可以看出，随着柴油喷射压力的增加，可以弱化 ESR 增加对 ID 的影响. 对比 m_{inj} 为 5 mg、p_{inj} 为 80 MPa 和 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 的 ID，柴油喷射质量的增加延后了 ESR 为 94% 和 95% 的 ID. 但是 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 且 ESR 为 96% 的 ID 却比 m_{inj} 为 5 mg、p_{inj} 为 80 MPa 且 ESR 为 96% 的 ID 要短. 这是由于 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 且 ESR 为 96% 条件下所充入的甲烷-空气当量比远远大于 m_{inj} 为 5 mg、p_{inj} 为 80 MPa 且 ESR 为 96% 条件下所充入的甲烷-空气当量比. 当柴油喷射质量相同时，柴油喷射压力的增加缩短了 ID.

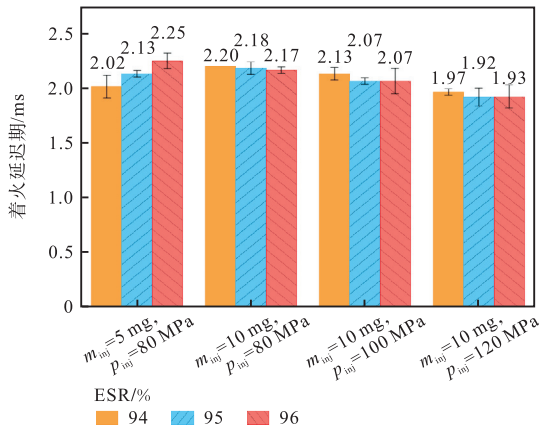


图 8 不同试验条件下着火延迟期的对比

Fig.8 Comparison of ignition delay under different experimental conditions

图 9 为压力曲线和火焰图片得到的 ID 对比. 可以看出，3 种 ESR 在 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 的喷射策略下压力曲线和火焰图片得到的 ID 相差很小（分别为 0.005、0.010 和 0.003 ms），吻合性很好. 但是压力曲线的 ID 较火焰图片的 ID 略有延迟. 这是因为压力传感器安装在定容燃烧弹的顶部，压力波动从火焰处传到压力传感器需要相应的时间. 可知，在 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 的喷射策略下，火焰图片得到的 ID 呈线性变化. 对于压力曲线得到的 ID，如果忽略压力波本身传播速度受到的一系列影响，也呈线性变化. 针对 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 的喷射策略，一定程度上可以通过线性变化来推测 ESR 从 94% 增至 96% 时其他 ESR 下的 ID.

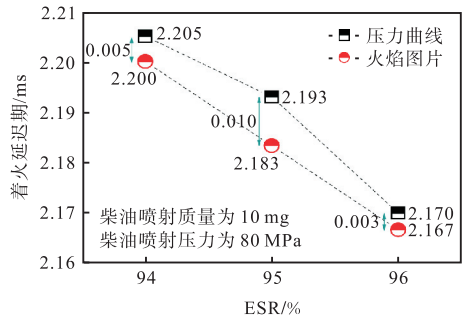


图 9 柴油喷射质量为 10 mg、柴油喷射压力为 80 MPa 下的压力曲线和火焰图片着火延迟期的对比

Fig.9 Comparison of ignition delay between the pressure curves and the flame images at the diesel injection mass of 10 mg and the diesel injection pressure of 80 MPa

3 结 论

笔者通过柴油引燃天然气预混气的可视化试验台，运用高速摄像机直接拍摄不同 ESR、柴油喷射压力和柴油喷射质量条件下柴油引燃天然气预混气的着火燃烧过程，得到的主要结论如下：

（1）ESR 的增加（甲烷-空气当量比的增加）对柴油的着火既有促进作用也有抑制作用；当柴油喷射质量较小时，ESR 的增加对柴油着火的抑制作用强于促进作用；柴油喷射质量较大时，ESR 的增加对柴油着火的促进作用强于抑制作用.

（2）柴油喷射压力的增加可以弱化 ESR 增加对 ID 的影响；柴油喷射压力达到 100 MPa 以上时，浓碳烟的占比并不是一成不变；比较柴油喷射压力为 100 MPa 和 120 MPa 可知，在 3.20 ~ 3.60 ms 阶段，

p_{inj} 为 100 MPa 下的浓碳烟占比更高，而在此阶段外，p_{inj} 为 120 MPa 的浓碳烟占比更高.

（3）ESR 增加则甲烷被引燃量增加；柴油喷射压力达到 100 MPa 以上，甲烷被引燃量没有太大增加；柴油喷射质量的增加使甲烷被引燃量大大增加.

（4）在 m_{inj} 为 10 mg、p_{inj} 为 80 MPa 的喷射策略下，ID 从 ESR 为 94% 增至 96% 时呈很强的线性关系；在该喷射策略下，一定程度上可以通过线性变化来推测从 ESR 为 94% 增至 96% 的其他 ESR 下的 ID.

参考文献：

［1］ Chen H，He J J，Zhong X L. Engine combustion and emission fuelled with natural gas：A review[J]. Journal of the Energy Institute，2019，92：1123-1136.

［2］ Xuan T M，Li H J，Wang Y T，et al. A conceptual model of polyoxymethylene dimethyl ether 3（PODE3）spray combustion under compression ignition engine-like conditions[J]. Combustion and Flame，2024，261：113296.

［3］ Korb B，Kuppa K，Nguyen H D，et al. Experimental and numerical investigations of charge motion and combustion in lean-burn natural gas engines[J]. Combustion and Flame，2020，212：309-322.

［4］ Hegab A，Rocca AL，Shayler P. Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance：Dual fuelling of diesel engines with natural gas[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2017，70：666-697.

［5］ Li M H，Wei Z N，Liu X R，et al. A numerical investigation on the effects of gaseous fuel composition in a pilot ignited direct injection natural gas engine[J]. Energy，2021，217：119467.

［6］ Liu H，Li J，Wang J，et al. Effects of injection strategies on low-speed marine engines using the dual fuel of high-pressure direct-injection natural gas and diesel[J]. Energy Science and Engineering，2019，7：1994-2010.

［7］ Chen G S，Wei F，Xiao R X，et al. Numerical analysis of performance and soot emissions of a natural gas engine operating in HPDI and SPC combustion modes[J]. Fuel，2022，327：125226.

［8］ Wang Z S，Zhang F Y，Xia Y，et al. Combustion phase of a diesel/natural gas dual fuel engine under various pilot diesel injection timings[J]. Fuel，2021，289：119869.

［9］ 韩丹，王谦，何志霞，等. 双燃料直喷发动机喷孔几何位置对燃烧排放的影响[J]. 内燃机学报，2017，37(3)：238-245.

［10］ Kim W，Park C，Bae C. Characterization of combustion process and emissions in a natural gas/diesel dual-fuel compression-ignition engine[J]. Fuel，2021，291：120043.

［11］ Imran S，Emberson D R，Diez A，et al. Natural gas fueled compression ignition engine performance and emissions maps with diesel and RME pilot fuels[J]. Applied Energy，2014，124：354-365.

［12］ Zhu Z J，Li Y K，Shi C. Effect of natural gas energy fractions on combustion performance and emission characteristics in an optical CI engine fueled with natural gas/diesel dual-fuel[J]. Fuel，2022，307：121842.

［13］ 周洋. 微量柴油引燃天然气燃烧过程可视化研究[D]. 大连：大连理工大学能源与动力学院，2019.

［14］ 郭能坤. 基于 OH 可视化的柴油引燃天然气燃烧特性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学动力与能源工程学院，2020.

［15］ 李徐程. 柴油引燃预混合天然气喷雾着火特性研究[D]. 武汉：武汉理工大学能源与动力工程学院，2021.

［16］ Ishibashi R，Tsuru D. An optical investigation of combustion process of a direct high-pressure injection of natural gas[J]. Journal of Marine Science and Technology，2017，22：447-458.

［17］ 日本西铁城 citizen 公司产品[EB/OL]. https：//cfd.citizen.co.jp/sensor/measurement，2024-05-31.

［18］ Poorghasemi K，Saray R K，Ansari E，et al. Effect of diesel injection strategies on natural gas/diesel RCCI combustion characteristics in a light duty diesel engine[J]. Applied Energy，2017，199：430-446.

［19］ Xu M，Cheng W，Li Z，et al. Pre-injection strategy for pilot diesel compression ignition natural gas engine[J]. Applied Energy，2016，179：1185-1193.

［20］ Abdelaal M M，Hegab A H. Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR[J]. Energy Conversion and Management，2012，64：301-312.

［21］ Abdelaal M M，Rabee B A，Hegab A H. Effect of adding oxygen to the intake air on a dual-fuel engine performance，emissions，and knock tendency[J]. Energy，2013，61：612-620.