DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202502014

微量柴油引燃高压直喷天然气的碳烟体积分数分布

夏天峰[1]，陶文辉[2,3]，王晓艳[1]，樊　旭[1]，王定文[1]，董　全[1]
（1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院，哈尔滨 150006；2. 中国船舶集团有限公司第七一一研究所，上海 201108；3. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心，上海 200438）

摘要：在定容燃烧弹上采用双色-激光诱导炽光（TC-LII）法定量研究了不同引燃油量、油、气喷射间隔（STS）及环境温度工况下柴油引燃高压直喷天然气的碳烟体积分数 f_v 生成及分布特性. 结果表明：在定容燃烧弹背景压力为 3 MPa、环境温度为 800 K、油、气喷射压力为 32 MPa、31 MPa 及喷射间隔为 0.4 ms 条件下，微量柴油（8.104 mg）引燃高压直喷天然气（161.500 mg）产生的碳烟高浓区主要分布在射流火焰中部轴线两侧；增加引燃油量会提高油、气耦合燃烧火焰中的 f_v，但柴油燃烧强度的提升会使燃烧后期天然气射流火焰中的碳烟氧化速率加快，在引燃油喷射脉宽为 1.1 ms 下，天然气燃烧后期的碳烟低浓度分布区间占比高达 71%，随尾气排出的碳烟最少；当 STS = 0.4 ms 时，其碳烟体积分数最大值（v_{max}）和平均值（v_{mean}）的峰值相比于 STS = 0.8 ms 时 v_{max} 和 v_{mean} 的峰值，分别减小了 27.2% 和 28.1%，相比于 STS = 1.2 ms 分别减小了 9.3% 和 6.6%；环境温度的升高会导致 v_{max} 和 v_{mean} 都增大.

关键词：定容燃烧弹；高压直喷；天然气；碳烟体积分数
中图分类号：TK437　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）02-0117-10

Distribution of soot volume fraction of high pressure direct injection natural gas ignited by trace diesel

Xia Tianfeng[1]，Tao Wenhui[2,3]，Wang Xiaoyan[1]，Fan Xu[1]，Wang Dingwen[1]，Dong Quan[1]
(1. College of Power and Energy Engineering，Harbin Engineering University，Harbin 150006，China；2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute，Shanghai 201108，China；3. National Engineering Research Center for Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering，Shanghai 200438，China)

Abstract：The soot volume fraction f_v generation and distribution characteristics of high pressure direct injection natural gas were quantitatively studied on a constant volume combustion bomb under different fuel intake，oil/gas injection interval（STS）and ambient temperature using two-color laser induced incandescence（TC-LII）method. The results show that under the conditions of background pressure of 3 MPa，ambient temperature of 800 K，oil/gas injection pressure of 32 MPa，31 MPa and injection interval of 0.4 ms，the high concentration area of soot generated by trace diesel（8.104 mg）ignition of high pressure direct injection natural gas（161.500 mg）is mainly distributed on both sides of the middle axis of the jet flame. Increasing the amount of fuel increase the f_v in the oil/gas coupled combustion flame，but the increase of diesel combustion intensity can accelerate the oxidation rate of soot in the natural gas jet flame at the later stage of combustion. When the injection pulse width of fuel is 1.1 ms，the low concentration distribution interval of soot in the later stage of natural gas combustion is as high as 71%，and the soot discharged with the tail gas is the least. When STS = 0.4 ms，the peak values of maximum volume fraction（v_{max}）and average value（v_{mean}）of volume fraction decreased by 27.2% and 28.1%，respectively，compared with STS = 0.8 ms，and those decreased by 9.3% and 6.6% compared with STS = 1.2 ms. The increase of ambient temperature lead to the increase of both v_{max} and v_{mean}.

Keywords：constant volume combustion bomb；high pressure direct injection；natural gas；soot volume fraction

收稿日期：2024-04-05；**修回日期**：2024-07-27.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52371307）.
作者简介：夏天峰，硕士研究生，xia_tianfeng@163.com.
通信作者：董　全，博士，副教授，dong_quan@hrbeu.edu.cn.

内燃机是现代工业及交通运输领域最为广泛应用的一种动力装置，其中柴油机因其动力性和经济性在内燃机中脱颖而出，但随着柴油机的广泛使用，CO_2 及颗粒物（PM）等排放问题日趋严峻，同时为响应中国“双碳”战略，需积极寻找低碳和无碳燃料，并调整中国能源结构[1].

在低碳和无碳清洁燃料的探究过程中[2-4]，天然气因其资源丰富、低碳清洁以及价格低廉而受到学者们广泛重视. 天然气发动机可以降低 PM、CO_2 及 NO_x 等多种污染物的排放[5-7].

与其他燃烧模式相比，天然气高压直喷[8-9]发动机是以扩散燃烧为主的燃烧模式，其极大地削弱了预混燃烧模式存在的爆震现象以及未燃天然气逃逸问题，同时具备高压缩比和高热效率等特点[10]，但由于高压直喷天然气与引燃油之间存在强烈的耦合扩散燃烧，使得天然气高压直喷发动机的排放恶化. Patychuk 等[11]和李敬瑞等[12]通过整机试验和仿真计算研究了高压直喷天然气发动机的碳烟排放特性. 综上可知，不同喷射策略对高压直喷天然气的碳烟排放特性有显著影响，但缺乏对高压直喷天然气扩散燃烧瞬态过程碳烟分布特性及双直喷燃料耦合作用的影响研究.

双色-激光诱导炽光（TC-LII）法是一种可以定量测量火焰中二维碳烟体积分数分布的测量方法[13]，因其为非接触式，测量精度高且操作简单，现已被国内外学者广泛使用. Bladh 等[14]和 Maffi 等[15]采用 TC-LII 法在燃烧器上研究了乙烯与空气的预混燃烧火焰中碳烟的生成特性. Mannazhi 等[16]采用二维激光诱导炽光法测量了甲烷-空气扩散火焰中碳烟体积分数在燃烧器上方轴向的分布. Su 等[17]采用 TC-LII 法在光学直喷式火花点火发动机上测定了乙醇混合燃料（乙醇体积分数为 0、20%、40% 和 60%）的碳烟体积分数分布. 何旭等[18-19]通过搭建的二维激光诱导炽光测试系统获得乙烯扩散火焰的碳烟体积分数，并应用此方法研究了棉籽油掺混比对柴油层流扩散火焰碳烟生成的影响. 唐青龙等[20]基于 TC-LII 法研究了柴油缸内燃烧过程中碳烟的分布. 花阳等[21]应用 TC-LII 法测量了正戊醇/汽油层流扩散火焰中的二维碳烟体积分数分布. 可知，应用 TC-LII 法探究火焰中碳烟体积分数分布特性多集中于燃烧器试验和发动机缸内碳烟测量，而对定容燃烧弹内双直喷燃料耦合扩散燃烧过程中碳烟的分布特性研究则鲜见报道.

笔者基于定容燃烧弹可视化平台，采用 TC-LII 法探究不同引燃油量、喷射间隔及环境温度对微量柴油引燃高压直喷天然气射流火焰碳烟体积分数的影响，深入了解高压直喷天然气燃料燃烧过程中的碳烟生成及分布特性，以期为高压直喷天然气发动机降低碳烟的生成提供参考.

1 试验原理和试验系统

1.1 双色-激光诱导炽光法原理

TC-LII 法的原理为通过应用两个不同固定中心波长的滤光片收集激光激发碳烟后产生的炽光信号，再对收集到的两波段炽光信号做比值处理，从而获得碳烟温度及碳烟体积分数.

根据 TC-LII 测量碳烟体积分数[13,19,20]的研究可知，碳烟颗粒受到激光激发后的温度 T_p 为

$$T_p=\frac{(hc/k_B)(1/\lambda_2-1/\lambda_1)}{\ln\left[\dfrac{\eta_2 I_1\Delta f_2\tau_2\lambda_1^6 E(m_{\lambda_2})}{\eta_1 I_2\Delta f_1\tau_1\lambda_2^6 E(m_{\lambda_1})}\right]} \tag{1}$$

式中：h 为普朗克常数；c 为光速；k_B 为玻尔兹曼常数；λ 为滤波片中心波长，其中，下角标对应不同的滤波片，此处 1 对应波长为 410 nm，2 对应波长为 630 nm；η 为相机对中心波长 λ 的感光系数；I 为炽光的强度信号值；Δf 为带通滤波片半宽高；τ 为带通滤波片的最大通过率；$E(m_\lambda)$ 为碳烟吸收函数，根据 Snelling 等[13]的结论，碳烟吸收函数在可见光至近红外光波段范围内近似恒定为常值，其值为 0.26.

碳烟体积分数 f_v 可表示为

$$f_v=\frac{I_1 u_1^2\lambda_1^6\left\{\exp\left[(hc)/(k\lambda T_p)\right]-1\right\}}{12\eta_1\pi c^2 h M_1^2 A_p A_L\omega_b\Delta f_1\tau_1 E(m_{\lambda_1})} \tag{2}$$

式中：A_p 为 ICCD 相机每个像素点的平均面积；A_L 为相机镜头面积；ω_b 为激光片光厚度；M 为相机镜头的放大率，$M=u/v$，u 和 v 分别为相机镜头物距和像距，下角标 1 同式（1），对应波长为 410 nm 滤波片. 将碳烟吸收函数 $E(m_\lambda)=0.26$ 代入式（2）即可求得 f_v. 为减少人为误差并提高计算效率，图像处理和碳烟体积分数 f_v 的求解均通过软件编写的程序计算.

1.2 试验系统

图 1 为 TC-LII 法试验系统示意. 试验系统包括定容燃烧弹、激光测量系统、图像采集及时序控制系统、燃料供给及喷射系统.

定容燃烧弹可模拟内燃机缸内高温、高压状态，其结构简单，试验参数便于调节，可广泛地应用于喷雾和燃烧试验.

激光测量系统的主要设备有 Nd：YAG 激光器、片光器装置. 笔者选择便于试验调节的 532 nm 激光作为激发波长，同时选择波长为 410 nm 和 630 nm 的

带通滤波片，避免其他荧光信号干扰，其半带宽均为 15 nm；当激光能量过小时，则不足以加热碳烟颗粒；激光能量过大时，则易使碳烟加热速度过快从而导致碳烟颗粒快速汽化，影响测量精度，因而激光能量选为 0.22 J/cm^2[18,22]，柱状激光经片光器调整为片状激光，片状激光的入射方向与火焰和燃料喷射方向一致，片光厚度为 1 mm.

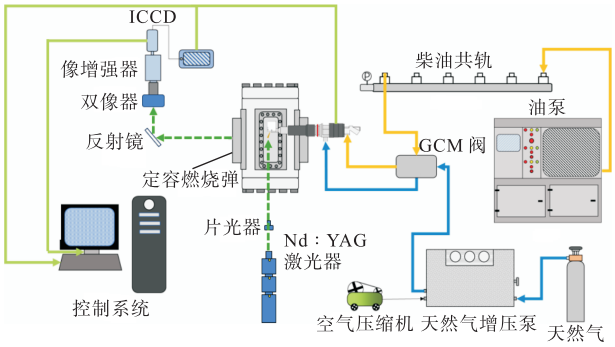


图 1　双色-激光诱导炽光法系统示意

Fig.1　Schematic of two-color laser induced incandescence system

图像采集及时序控制系统主要设备为双像器、带通滤波片、像增强器（IRO）、ICCD 相机以及集成控制柜，当燃烧过程生成的碳烟被激光激发后，炽光信号经过装在双像器前滤光片过滤后被 ICCD 相机收集.

燃料供给及喷射系统主要设备由高压燃油供给系统、天然气供给系统、气体控制装置（GCM）阀、天然气高压直喷（HPDI）喷射阀及多孔喷射器导流装置组成. 图 2 为天然气高压直喷喷射阀几何参数. 一方面，高压燃油供给系统提供燃油给 HPDI 喷射阀；另一方面，可提供燃油进入 GCM 阀，控制天然气压力始终比柴油压力低 1 MPa，天然气供给系统供给天然气到 GCM 阀，通过 GCM 阀控制压力后再进入 HPDI 喷射阀，HPDI 喷射阀前装有多孔喷射器导流装置，将多余的油、气射流遮挡，从而只对单束油、气射流进行研究. 表 1 为试验主要技术参数，引燃油为 0 号柴油.

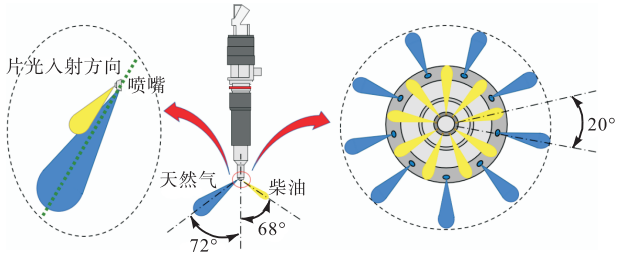


图 2　天然气高压直喷喷射阀几何参数

Fig.2　Geometric parameters of natural gas high-pressure direct injection valve

表 1　试验主要技术参数

Tab.1　Experimental main parameters

参数	数值
IRO 延迟/ns	50
IRO 门宽/ns	50
IRO 增益/%	75
油、气喷射压力/MPa	32，31
环境温度/K	800，850，900
环境压力/MPa	3
引燃油喷射脉宽/ms（实际喷射质量）	0.7（8.104 mg），0.9（10.738 mg），1.1（12.144 mg）
天然气喷射脉宽/ms（实际喷射质量）	1.2（161.50 mg）
油、气喷射间隔/ms	0.4，0.8，1.2

图 3 为引燃油与高压天然气射流之间的喷射间隔定义. 从柴油喷射开始到天然气喷射开始的间隔时间定义为 STS. 将各工况下高压天然气喷射的初始时刻（ASOI）定义为 0 点，每个试验工况测量 5 次，对图像处理后的数据取 5 次试验的平均值.

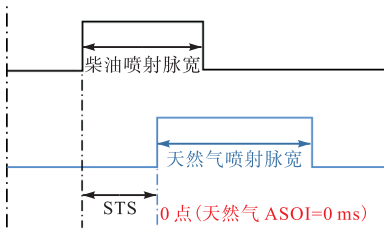


图 3　柴油、天然气喷射间隔

Fig.3　Injection interval of diesel and natural gas

应用 TC-LII 法定量测量碳烟体积分数，需对 ICCD 相机进行标定以获得其对辐射强度的感光系数. 标定试验采用高温黑体炉，该型高温黑体炉工作温度为 1 000 ~ 3 000 K，辐射有效发射率≥0.999，保持标定试验条件与后续试验条件一致（表 1）.

2　试验结果及分析

2.1　引燃油量对高压直喷天然气 f_v 分布的影响

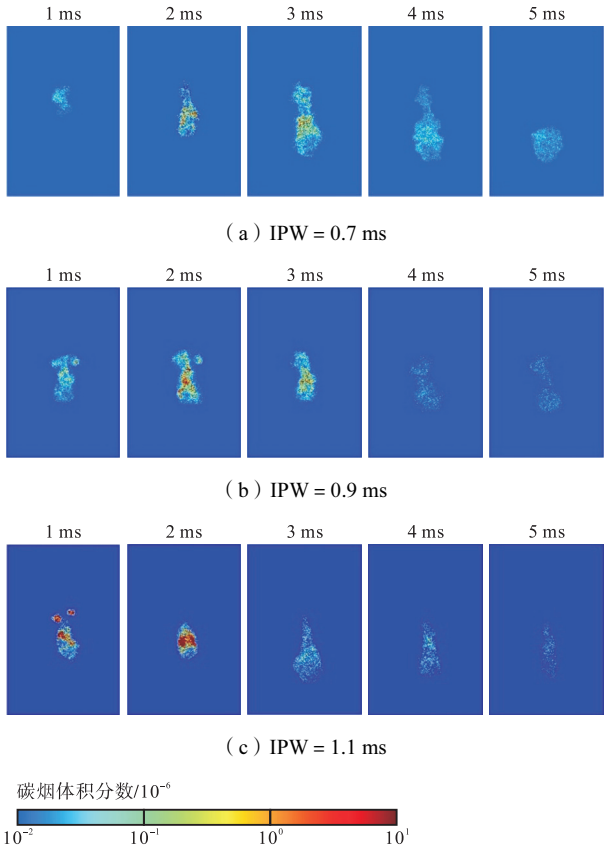
图 4 为油、气喷射压力为 32 MPa、31 MPa、环境温度为 800 K、背景压力为 3 MPa、油、气喷射间隔为 0.4 ms 且天然气喷射脉宽为 1.2 ms 条件下，不同引燃油喷射脉宽（IPW）时碳烟体积分数分布特性. 可知，碳烟的高浓区（红色区域）主要分布在射流火焰的轴线两侧，并随着时间推移，沿着射流火焰方向逐渐向下发展并减弱.

随着 IPW 增加，天然气射流火焰中、下部的引燃油火焰生成的碳烟体积分数急剧增大，而在 ASOI = 3 ms 之后，天然气碳烟体积分数在图像中所占区域面积和碳烟体积分数逐渐减小. 这是因为当 IPW 增

大，引燃油量的增加使得碳烟的生成量增大，并且引燃油量的增加导致周围环境中氧含量降低，天然气射流局部空燃比减小，同时，IPW 的增大使得引燃油喷雾纵向发展的能力增强，更多未燃烧引燃油向下发展，且由于后喷入定容燃烧弹内的高压天然气射流与引燃油相互卷吸、碰撞，因而导致在天然气射流火焰的两侧出现了明显的碳烟高浓度区；由于引燃油量的增加导致了柴油火焰燃烧强度提升，射流周围环境温度提高，反应活性增加，碳烟生成速度增加的同时也加快了碳烟的氧化速度，因而在 ASOI = 3 ms 之后，天然气的碳烟净生成量下降，天然气的碳烟体积分数在图像中所占区域面积和碳烟体积分数逐渐降低.

为了直观分析天然气的碳烟，引入碳烟体积分数最大值（v_{max}）及平均值（v_{mean}），v_{max} 定义为在该时刻高压直喷天然气射流火焰中通过计算程序得到的最大体积分数；v_{mean} 定义为在该时刻高压直喷天然气射流火焰通过计算程序得到所有像素点的体积分数之和除以火焰所占的像素点数量.

图 5 为不同引燃油喷射脉宽下的 v_{max} 和 v_{mean}. 可知，增加引燃油量使天然气射流火焰 v_{max} 和 v_{mean} 的峰值不断升高. 在 ASOI = 0.4 ms 时，与 IPW = 0.7 ms 相比，IPW = 0.9 ms 下 v_{max} 和 v_{mean} 分别增加了 59.2% 和 13.1%，IPW = 1.1 ms 下 v_{max} 和 v_{mean} 分别增加了 111.2% 和 53.4%.



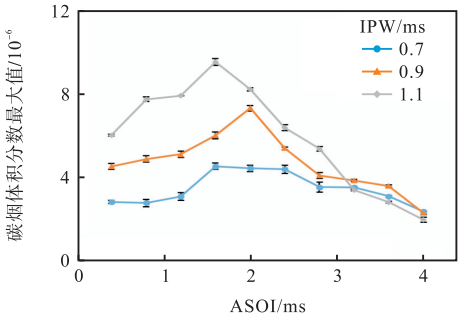
（a）IPW = 0.7 ms

（b）IPW = 0.9 ms

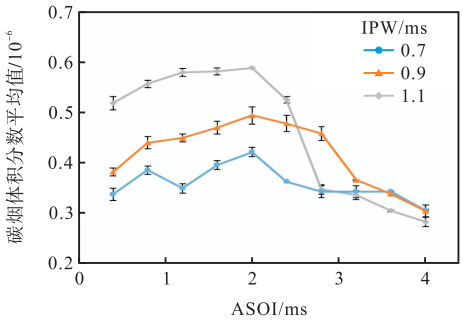
（c）IPW = 1.1 ms

图 4 不同引燃油喷射脉宽下的碳烟体积分数分布

Fig.4 Distribution of volume fraction of soot under different injection pulse widths of ignition diesel



（a）碳烟体积分数最大值 v_{max}



（b）碳烟体积分数平均值 v_{mean}

图 5 不同引燃油喷射脉宽下的 v_{max} 和 v_{mean}

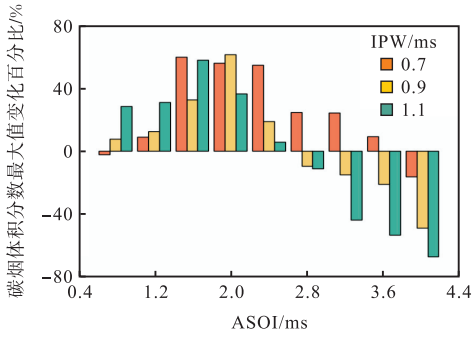
Fig.5 Maximum and average volume fraction of soot under different injection pulse widths of ignition diesel

由图 5 可知，IPW 增大使得 v_{max} 的增长速率也增加，v_{max} 出现的时刻提前；与 IPW = 0.7 ms 相比，在 IPW = 0.9 ms 时，v_{max} 和 v_{mean} 的峰值分别提高了 60.7% 和 17.3%；在 IPW = 1.1 ms 时，v_{max} 和 v_{mean} 的峰值分别提高了 108.8%、39.7%；在 ASOI = 2 ms 之前，IPW 的增大对于碳烟生成有显著促进作用，并随着引燃油量的增加而更明显.

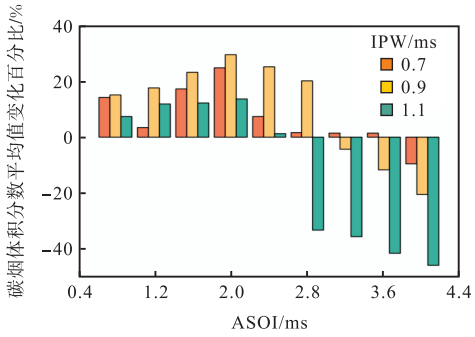
在双燃料耦合扩散燃烧过程中，定量分析天然气碳烟生成量的变化规律对深入探究不同喷射策略对天然气碳烟浓度的影响至关重要，引入碳烟体积分数变化百分比，定义为相比于初始观测时刻（ASOI = 0.4 ms）时不同观测时刻下的碳烟体积分数变化百分比.

图 6 为不同引燃油喷射脉宽下的碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比. 可知，在 ASOI = 2 ms 之后，不同 IPW 工况下的碳烟体积分数最大值和平均值都迅速减小，且随着 IPW 的增大，碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比逐渐增大，在 ASOI = 4 ms、IPW = 1.1 ms 工况下，碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比高达 66.6% 和 45.4%. 这是由于引

燃油量的增加导致了天然气射流火焰周围环境温度上升，加快了碳烟的氧化速率，使得天然气燃烧后期碳烟净生成量下降.



（a）碳烟体积分数最大值变化百分比



（b）碳烟体积分数平均值变化百分比

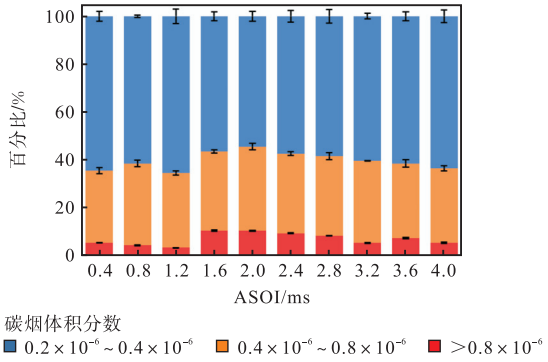
图 6　不同引燃油喷射脉宽下的碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比

Fig.6　Change percentage of maximum and average volume fraction of soot under different injection pulse width of ignition diesel

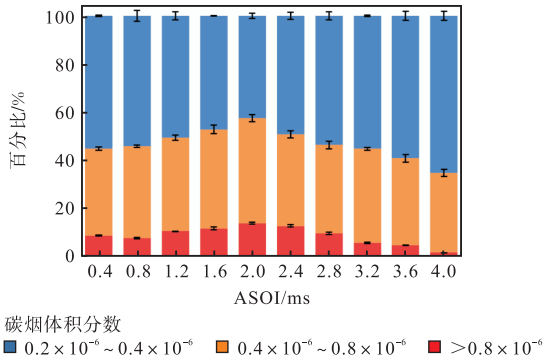
为更准确描述碳烟体积分数的分布，将碳烟体积分数分为 3 个区间，即大于 0.8×10^{-6}、0.4×10^{-6} ~ 0.8×10^{-6} 及小于 0.4×10^{-6} 的碳烟体积分数分布区间，简称为高、中和低碳烟体积分数区间，为避免试验噪点对结果的影响，在分析碳烟体积分数占比时将体积分数小于 0.2×10^{-6} 的数值过滤，随后计算每个碳烟体积分数分布区间的像素点数量在总碳烟体积分数分布区间的像素点数量占比.

图 7 为不同引燃油喷射脉宽下天然气的碳烟体积分数分布区间. 可知，IPW 的增大对碳烟高、低体积分数分布区间的影响最为显著. 在 IPW = 1.1 ms、ASOI = 2 ms 时，碳烟高体积分数分布区间的占比高达 24.0%，碳烟低体积分数分布区间的占比减小至 32.0%，与相同的观测时刻下 IPW = 0.7 ms 和 IPW = 0.9 ms 相比，碳烟高体积分数分布区间的占比分别增加了 120.2% 和 71.4%，碳烟低体积分数分布区间的占比分别减小了 40.7% 和 23.8%；而在 ASOI = 4 ms 时，IPW = 1.1 ms 下的碳烟低体积分数分布区间占比快速增大至 71.0%，相比于 IPW = 0.7 ms 和 IPW = 0.9 ms 下的碳烟低体积分数分布区间，分别增加了 12.7% 和 9.2%.

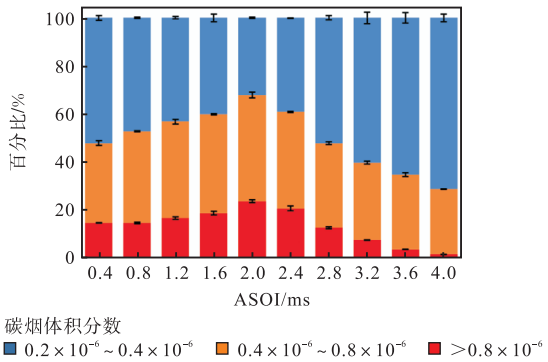
引燃油量的增加增大了柴油自身的碳烟生成量，同时，燃烧强度的提升使得射流周围的环境温度升高，天然气的碳烟生成速率和氧化速率增大，因而在 ASOI = 3 ms 前、后，碳烟体积分数随 IPW 增加分别呈增加和降低的相反趋势；在 IPW = 1.1 ms 工况下，天然气射流火焰燃烧后期的碳烟体积分数最低，随废气排出的碳烟最少.



（a）IPW = 0.7 ms



（b）IPW = 0.9 ms



（c）IPW = 1.1 ms

图 7　不同引燃油喷射脉宽下的天然气碳烟体积分数分布区间占比

Fig.7　Proportion of soot volume fraction distribution interval of nature gas under different injection pulse width of ignition diesel

2.2 不同喷射间隔对高压直喷天然气碳烟体积分数分布的影响

由于在引燃油 IPW = 0.7 ms 时，其碳烟的生成量是 3 个喷射脉宽中最小，因而选择 IPW = 0.7 ms 为试验引燃油喷射脉宽.

图 8 为不同 STS 下的碳烟体积分数分布特征. 可知，燃烧前期只有少量天然气被引燃，碳烟生成量较少，后续随着扩散燃烧，大量天然气被柴油引燃，碳烟生成量和碳烟体积分数迅速升高；与柴油燃烧产生的碳烟体积分数分布不同的是，微量柴油引燃高压直喷天然气燃烧产生的碳烟主要分布在天然气与引燃油的相邻区域，高体积分数碳烟产生的位置发生了偏移，呈天然气射流火焰两侧碳烟体积分数高、射流中心碳烟体积分数较低的趋势.

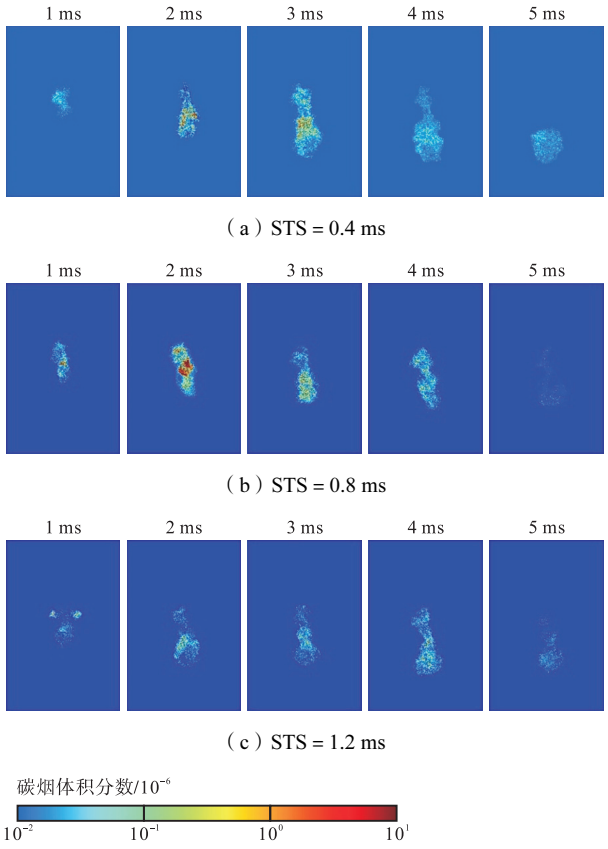


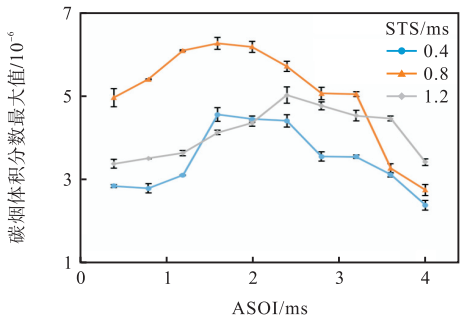
图 8 不同喷射间隔下的碳烟体积分数分布

Fig.8 Distribution of volume fraction of soot under different injection interval

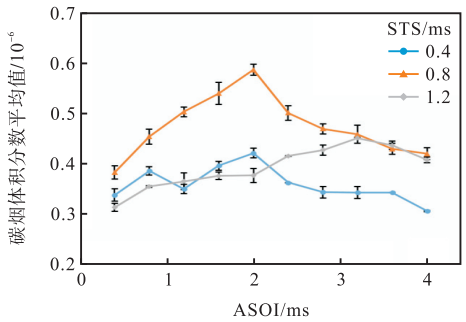
对比不同 STS 可知，在 ASOI = 2 ms、STS = 0.8 ms 时，此工况下的天然气射流火焰碳烟体积分数红色区域明显高于另外两个工况，即该工况下的碳烟体积分数更高. 在 ASOI = 3 ms 之后，STS = 0.4 ms 和 STS = 0.8 ms 时碳烟体积分数分布面积逐渐减小，但 STS = 1.2 ms 时碳烟体积分数分布面积继续增大，这是由于随着 STS 的增加，天然气的喷射时刻被延长，天然气射流的着火时刻被迫滞后，在 ASOI = 3 ms 之后，相同的观测时刻下，STS = 1.2 ms 时仍存在大量未燃天然气，因而在 ASOI = 4 ms、STS = 1.2 ms 时火焰面积仍继续增大，碳烟体积分数分布面积也随之增加.

图 9 为不同喷射间隔下的 v_{max} 和 v_{mean}. 可知，当 STS = 0.4 ms 时，其 v_{max} 和 v_{mean} 的峰值相比于 STS = 0.8 ms 时分别减小了 27.2% 和 28.1%，相比于 STS = 1.2 ms 分别减小了 9.3% 和 6.6%，表明 STS = 0.4 ms 时碳烟体积分数及生成量最小. 在 ASOI = 3 ms 之前，STS = 0.8 ms 工况下天然气射流火焰 v_{max} 和 v_{mean} 均大于 STS 为 0.4 ms 和 1.2 ms 工况，这是因为此 STS 下柴油的引燃效果较好，使得天然气射流火焰的传播速度更快，更多的燃料参与燃烧，从而导致了碳烟生成量的增加.

此外，在 ASOI = 2 ms 之前，STS = 0.4 ms 和 STS = 1.2 ms 两个工况下的 v_{max} 和 v_{mean} 曲线出现了多次交汇，并且在 ASOI = 2 ms 之后，STS = 1.2 ms 的 v_{mean} 逐渐增加，这是由于 STS 的增加使得天然气的喷射时刻被延长，引燃油燃烧进入后期，引燃油的火焰面积逐渐减小，从而导致天然气射流经过引燃油火焰时引燃效果降低，因而初始时刻碳烟体积分数的生成量减小，但随着天然气喷射量增加，大量的天然气被引燃，碳烟体积分数逐渐上升并超越 STS = 0.4 ms



（a）碳烟体积分数最大值



（b）碳烟体积分数平均值

图 9 不同喷射间隔下的碳烟体积分数最大值和平均值

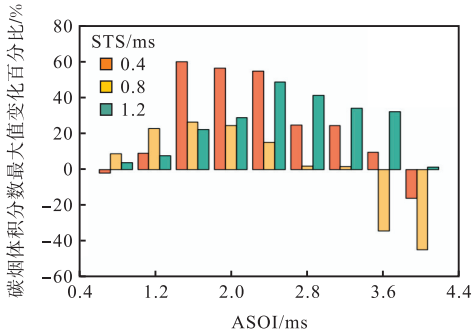
Fig.9 Maximum and average volume fraction of soot under different injection interval

工况下的碳烟体积分数.

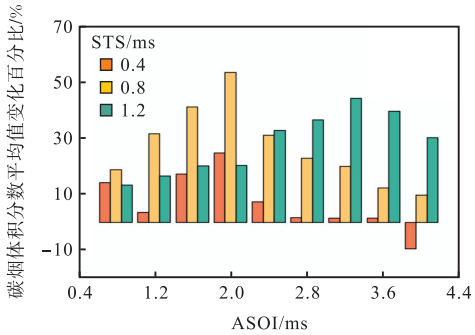
图 10 为不同喷射间隔下的碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比. 可知，STS = 0.8 ms 工况下的天然气 v_{max} 提升了 26.1%，但 v_{mean} 增大了 53.3%，整个碳烟体积分数场的平均体积分数出现了较大的提升；STS = 1.2 ms 工况下的天然气 v_{max} 提升了 48.4%，v_{mean} 增大了 43.9%，且其碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比在燃烧后期一直维持为 20.0% ~ 50.0%.

图 11 为不同喷射间隔下的碳烟体积分数分布区间占比. 可知，STS = 0.8 ms 工况下，其中高碳烟体积分数分布区间的占比最大为 52.0%，相比于其他工况，该工况下天然气射流火焰的碳烟体积分数提升最为明显. 在 ASOI = 2 ms 之后，STS = 0.4 ms 工况下的天然气射流火焰的低碳烟体积分数分布区间占比始终小于 STS = 0.8 ms 和 STS = 1.2 ms 工况下的低碳烟体积分数分布区间，因而 STS = 0.4 ms 工况下的碳烟生成量最小，采用 0.4 ms 的油、气喷射间隔可以最大程度地降低碳烟的生成.

喷射间隔的改变直接影响到引燃油的引燃效果，进而影响到天然气的着火时刻，因而通过控制油、气的喷射间隔可改变天然气碳烟的生成分布特性，以达到降低天然气碳烟生成的目的.



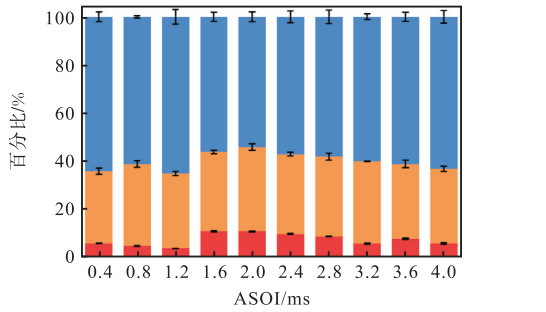
（a）碳烟体积分数最大值变化百分比



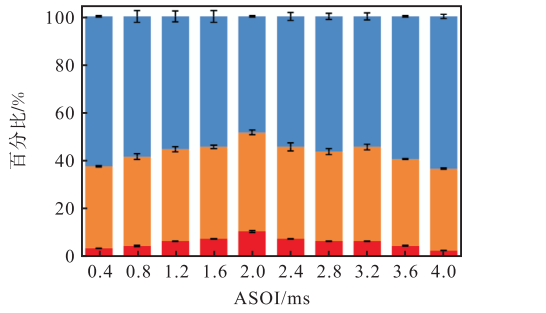
（b）碳烟体积分数平均值变化百分比

图 10　不同喷射间隔下的碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比

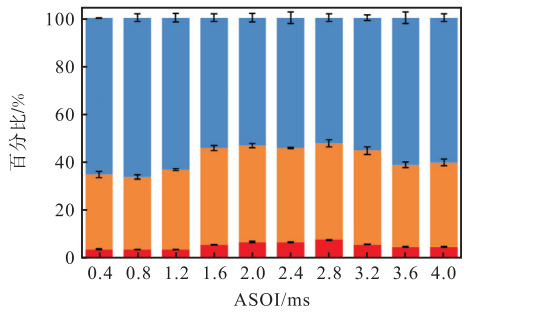
Fig.10　Change percentage of the maximum and average volume fraction of soot under different injection interval



（a）STS = 0.4 ms



（b）STS = 0.8 ms



（c）STS = 1.2 ms

图 11　不同喷射间隔下的碳烟体积分数分布区间占比

Fig.11　Proportion of soot volume fraction distribution interval under different injection interval

2.3　不同环境温度对高压直喷天然气碳烟体积分数分布的影响

由于在引燃油 IPW = 0.7 ms、STS = 0.4 ms 时，其碳烟的生成分布特性最佳，因而选择该工况为试验工况.

图 12 为不同环境温度下的碳烟体积分数分布特征. 可知，环境温度的升高使得整个天然气燃烧过程的碳烟体积分数都增大，天然气射流火焰的高碳烟体积分数区域出现的观测时刻提前，在 ASOI = 2 ms 左右时达到峰值，并且高碳烟体积分数的分布区域扩大，面积增加. 相比于引燃油喷射脉宽和油、气喷射间隔对柴油引燃效果的影响，环境温度的升高增强了

柴油的引燃效果，使得双燃料耦合扩散燃烧过程中的碳烟生成分布特性恶化.

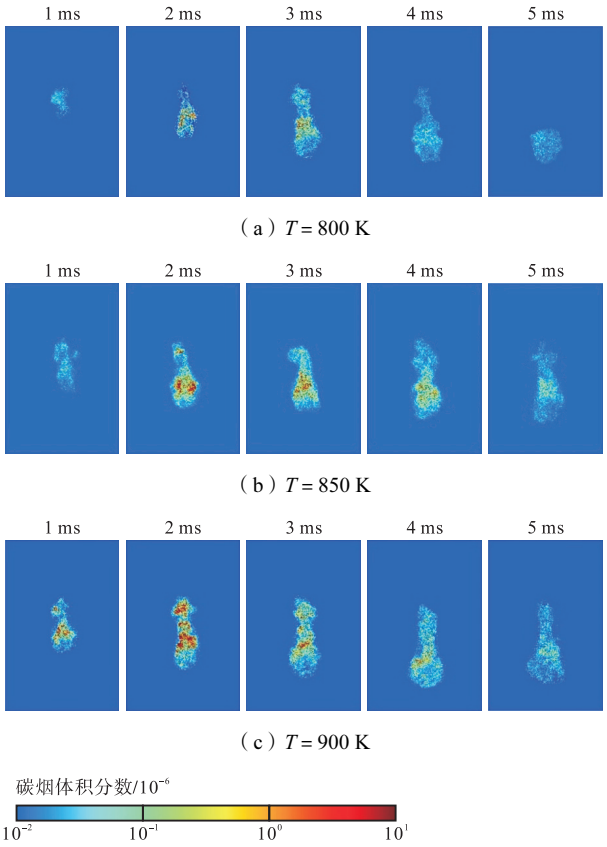


图 12 不同环境温度下的碳烟体积分数分布

Fig.12 Distribution of volume fraction of soot under different ambient temperature

环境温度的升高使得引燃油着火时刻提前，随后大量的引燃油参与燃烧，高碳烟体积分数区域出现的时刻提前；当环境温度升高时，引燃油喷雾和天然气喷雾之间的卷吸碰撞加强，两种燃料之间的相互扩散加剧，并且由于环境温度升高，使得高压天然气射流的体积膨胀速率增大，燃料的活性增强，火焰传播速度加快，相同时刻内更多的燃料参与燃烧且火焰扩散的范围更大，因而生成了大量的碳烟，且在 ASOI = 3 ms 之后，天然气射流火焰的碳烟体积分数依然随着环境温度的升高而增大.

图 13 为不同环境温度下的 v_{max} 和 v_{mean}. 环境温度的升高使得 v_{max} 和 v_{mean} 分布范围整体增大，即天然气射流火焰的碳烟峰值和体积分数都增加. 相比于环境温度为 800 K 时，在环境温度为 850 K 的工况下，v_{max} 和 v_{mean} 的峰值分别提高了 43.3%和 11.2%；在环境温度为 900 K 工况下，v_{max} 和 v_{mean} 的峰值分别提高了 57.1%和 35.2%，环境温度的升高促进了碳烟的生成.

图 14 为不同环境温度下的碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比. 可知，环境温度为 900 K 时，其碳烟体积分数的最大值变化百分比为 97.4%，碳烟

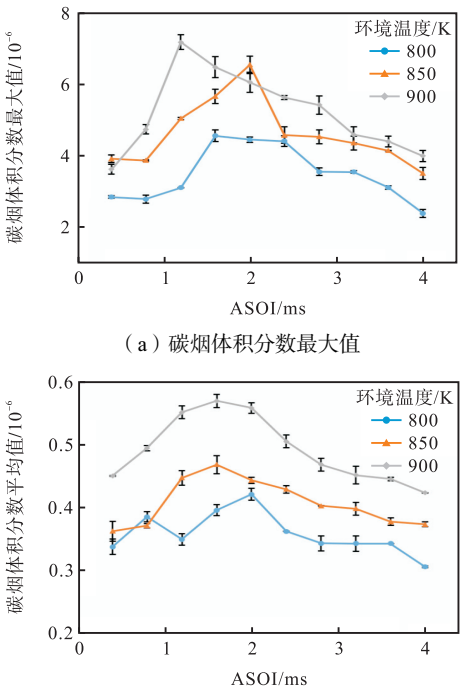


图 13 不同环境温度下的碳烟体积分数最大值和平均值

Fig.13 Maximum and average volume fraction of soot under different ambient temperature

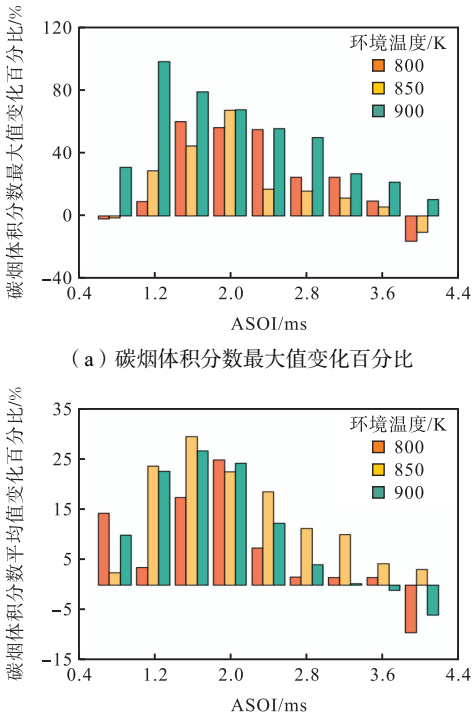
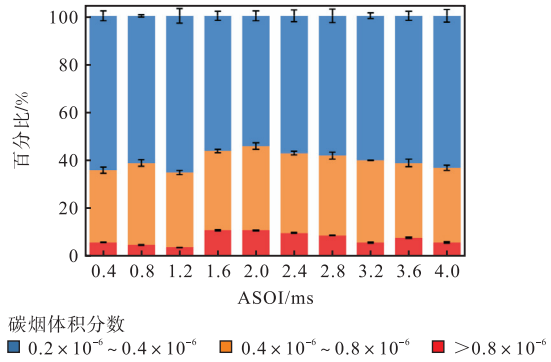


图 14 不同环境温度下的碳烟体积分数最大值和平均值变化百分比

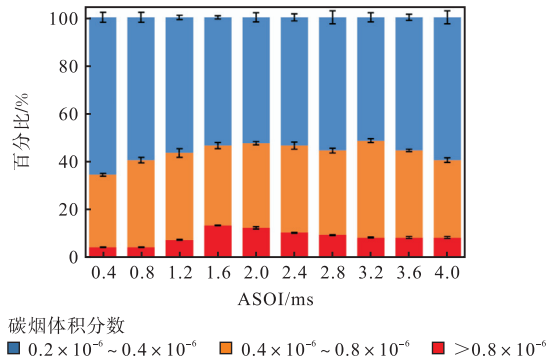
Fig.14 Change percentage of the maximum and average volume fraction of soot under different ambient temperature

体积分数相比于初始时刻提升近一倍，在整个燃烧反应过程中碳烟体积分数最大值相较于初始时刻始终处于增长状态，而其他两工况下燃烧后期碳烟体积分数最大值相较于初始时刻都有所减小；环境温度为 850 K 时，碳烟体积分数的平均值变化百分比均为正值，即天然气射流火焰的整体碳烟体积分数始终大于初始时刻的整体碳烟体积分数.

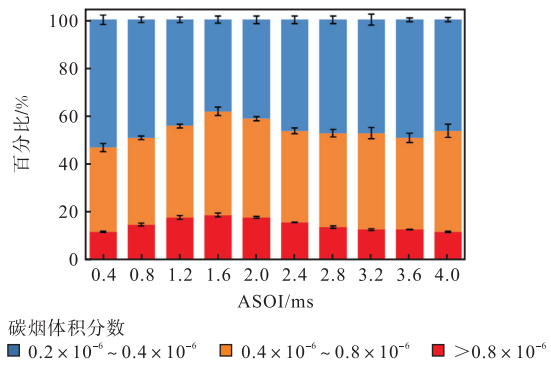
图 15 为不同环境温度下的碳烟体积分数分布区间占比. 可知，环境温度升高，中、高碳烟体积分数的分布区域面积逐渐增大，即相较于环境温度为 800 K 的工况，环境温度为 850 K 和 900 K 两个工况下的中、高碳烟体积分数分布区间明显升高，且随着温度的升



（a）环境温度为 800 K



（b）环境温度为 850 K



（c）环境温度为 900 K

图 15　不同环境温度下的碳烟体积分数分布区间占比

Fig.15　Proportion of volume fraction of soot distribution interval under different ambient temperature

高，占比逐渐增大；当环境温度为 900 K、ASOI = 1.6 ms 时，高碳烟体积分数分布区间的面积占比高达 19.0%，而在相同时刻下，800 K 和 850 K 的高碳烟体积分数分布区间面积占比分别为 11.0%、14.0%；此外，环境温度为 900 K 时，该工况低体积分数分布区间比环境温度为 850 K 的工况低体积分数分布区间平均减小了 9.8%，比环境温度为 800 K 的工况平均减小了 14.2%，该工况下碳烟体积分数平均值始终高于另外两个工况.

综上可知，环境温度的升高使得整个燃烧过程中碳烟的生成量增加，环境温度为 800 K 工况下碳烟生成量最小，因而在 3 个温度工况下，可采用降低引燃环境温度来减小碳烟的生成.

3　结　论

（1）柴油引燃高压直喷天然气射流火焰产生的高碳烟体积分数区出现在 ASOI = 2 ms 左右，主要分布在射流火焰的中心轴线两侧区域，并随着时间推移沿着射流火焰方向逐渐向下发展并减弱.

（2）在不同 IPW 工况下，天然气 v_{max} 和 v_{mean} 总体分布范围为 $2.0\times10^{-6}\sim9.6\times10^{-6}$ 和 $0.25\times10^{-6}\sim0.60\times10^{-6}$；随着 IPW 的增大，天然气碳烟体积分数的分布范围分别增大了 131.8% 和 245.5%，且 v_{max} 和 v_{mean} 明显增大，但天然气射流火焰燃烧后期的碳烟体积分数降低，碳烟生成量减小.

（3）在不同 STS 工况下，天然气 v_{max} 和 v_{mean} 的总体分布范围为 $2.4\times10^{-6}\sim6.3\times10^{-6}$ 和 $0.30\times10^{-6}\sim0.59\times10^{-6}$；STS = 0.4 ms 时，天然气射流火焰的 v_{max} 和 v_{mean} 峰值相比于 STS = 0.8 ms 分别减小了 27.2% 和 28.1%，相比于 STS = 1.2 ms 分别减小了 9.3% 和 6.6%，STS = 0.4 ms 工况下的碳烟生成量最小.

（4）在不同环境温度工况下，天然气 v_{max} 和 v_{mean} 总体分布范围为 $2.4\times10^{-6}\sim7.2\times10^{-6}$ 和 $0.30\times10^{-6}\sim0.57\times10^{-6}$；随着环境温度从 800 K 升高到 900 K，v_{max} 和 v_{mean} 的峰值和谷值都逐渐增大，天然气射流火焰的碳烟整体体积分数提升了 37.0%，碳烟的生成量增加；在 IPW = 0.7 ms、STS = 0.4 ms 且环境温度为 800 K 时，天然气的碳烟生成分布特性最佳.

参考文献：

[1]　帅石金，王志，马骁，等. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报，2021，12(4)：417-439.

[2]　董全，蔡志勇，宋恩哲，等. 基于激波结构的天然气发动机燃气高压喷射特性[J]. 内燃机学报，2017，

35(1)：44-52.

[3] Yin X J，Li W，Duan H，et al. A comparative study on operating range and combustion characteristics of methanol/diesel dual direct injection engine with different methanol injection timings[J]. Fuel，2023，334(1)：158-164.

[4] Bao L Z，Sun B G，Luo Q H. Experimental investigation of the achieving methods and the working characteristics of a near-zero NO_x emission turbocharged direct-injection hydrogen engine[J]. Fuel，2022，319(1)：23-36.

[5] 张纪鹏，高青，王立军，等. 天然气替代柴油率对双燃料发动机排放的影响[J]. 燃烧科学与技术，2000，6(3)：267-269.

[6] Cordiner S，Gambino M，Iannaccone S，et al. Numerical and experimental analysis of combustion and exhaust emissions in a dual-fuel diesel/natural gas engine[J]. Energy and Fuels，2008，22(3)：1418-1424.

[7] Rossokhin A V，Vasiliev A O，Valiev A R，et al. The ability of natural gas to reduce soot content in diesel exhaust gases[J]. Journal of Physics：Conference Series，2021，5：052057.

[8] Ni Z，Dong Q，Wang D W，et al. Visualization research of natural gas jet characteristics with ultra-high injection pressure[J]. International Journal of Hdrogen Energy，2022，47(76)：32473-32492.

[9] 李徐程，张尊华，毛立通，等. 天然气/柴油双燃料发动机燃料喷射及着火特性[J]. 内燃机学报，2021，39(1)：34-43.

[10] Faghani E，Kirchen P，Rogak S N. Application of fuel momentum measurement device for direct injection natural gas engines[C]// SAE Paper. Detroit，Michigan，USA，2015，2015-01-0915.

[11] Patychuk B，Rogak S. Particulate matter emission characterization from a natural gas fuelled high pressure direct injection engine[C]// ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference，Vancouver，B C，Canada，2012，2012-92170.

[12] 李敬瑞，王解托，刘海峰，等. 天然气后喷对高压直喷天然气船机燃烧和排放的影响研究[J]. 内燃机工程，2020，41(6)：1-10.

[13] Snelling D R，Thomson K A，Smallwood G J，et al. Spec trally resolved measurement of flame radiation to determine soot temperature and concentration[J]. AIAA Journal，2002，40(9)：1789-1795.

[14] Bladh H，Johnsson J，Olofsson N E，et al. Optical soot characterization using two-color laser-induced incandescence(2C-LII) in the soot growth region of a premixed flat flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute，2011，33(1)：641-648.

[15] Maffi S，Iuliis S，Cignoli F，et al. Investigation on thermal accommodation coefficient and soot absorption function with two-color TiRe-LII technique in rich premixed flames[J]. Applied Physics B，2011，104(2)：357-366.

[16] Mannazhi M，Török S，Gao J，et al. Soot maturity studies in methane-air diffusion flames at elevated pressures using laser-induced incandescence[J]. Proceedings of the Combustion Institute，2020，38(1)：1217-1224.

[17] Su Y，Zhang Y，Xie F，et al. Influence of ethanol blending ratios on in-cylinder soot processes and particulate matter emissions in an optical direct injection spark ignition engine[J]. Fuel，2022，308：121944.

[18] 何旭，马骁，王建昕. 用激光诱导炽光法定量测量火焰中的碳烟浓度[J]. 燃烧科学与技术，2009，15(4)：344-349.

[19] 何旭，张志鹏，吴昊，等. 基于二维激光诱导炽光法的棉籽油扩散火焰碳烟生成特性[J]. 北京理工大学学报，2019，39(3)：235-240，326.

[20] 唐青龙，张鹏，刘海峰，等. 利用激光诱导炽光法定量测量柴油机缸内燃烧过程碳烟体积分数[J]. 物理化学学报，2015，31(5)：980-988.

[21] 花阳，刘福水，吴晗，等. 正戊醇/汽油层流扩散火焰碳烟生成动力学[J]. 内燃机学报，2018，36(5)：422-430.

[22] Dustin W，Katsufumi K，Gokul V，et al. Evaluation of the sooting properties of real fuels and their commonly used surrogates in a laminar co-flow diffusion flame[J]. Combustion and Flame，2013，160(6)：1129-1141.