

模拟海拔高度对柴油机燃烧影响的可视化试验

王成官, 楼狄明, 谭丕强, 房 亮

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 在定容燃烧弹内模拟一款重型柴油机喷油时刻的缸内热力学状态, 基于高速摄影开展了不同海拔高度下柴油燃烧的可视化试验研究。结果表明, 海拔高度对着火延迟、着火距离、升举长度、卷吸空气比率以及火焰亮度等都有显著的影响, 海拔从 0 m 升高到 4 500 m 时, 着火延迟由 0.67 ms 延长至 1.04 ms, 着火距离由 22.09 mm 增大到 37.03 mm; 升举长度由 23.1 mm 增大到 34.5 mm; 卷吸空气比率由 12.0 % 增大到 14.0 %; 空间积分火焰亮度峰值减小, 且空间积分火焰亮度峰值的变化幅度和卷吸空气比率的变化幅度都随海拔升高而减小; 时间积分火焰亮度减小, 碳烟生成总量减少。

关键词: 柴油机; 海拔; 定容燃烧弹; 升举长度; 碳烟

中图分类号: TK421

文献标志码: A

Visualization Experiment of Effect of Simulated Altitudes on Diesel Combustion

WANG Chengguan, LOU Diming, TAN Piqiang, FANG Liang
(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Experiments of diesel flame propagation and soot formation characteristics at different simulated altitudes were conducted in a constant volume combustion vessel reproducing diesel-like thermodynamic conditions of a heavy-duty diesel engine. The results show that with the increase of altitude from 0 m to 4 500 m, the ignition delay becomes longer from 0.67 ms to 1.04 ms and the ignition distance from 22.09 mm to 37.03 mm. Besides, the lift-off length increases from 23.1 mm to 34.5 mm, making the stoichiometric air ratio increase from 12.0 % to 14.0 %. Moreover, the peak value of spatially integrated natural luminosity decreases, showing the same trend of variation with the stoichiometric air ratio. Furthermore, the time integrated natural luminosity decreases, which implies that the soot formation is reduced.

Key words: diesel engine; altitude; constant volume combustion chamber; lift-off length; soot

柴油机具有输出扭矩大、燃油消耗低、可靠性高等优点, 因而广泛应用于交通运输、军事装备等领域, 但是柴油机在高海拔地区运行时会出现动力性和经济性下降、热负荷增大等问题^[1-3]。世界上高海拔地区面积广阔, 以中国为例, 高海拔地区面积达 250 万 km², 运行在该地区的车辆超过 600 万辆, 其中柴油车占了很大一部分^[4]; 而且我国第六阶段排放标准增加了高海拔地区实际道路驾驶工况的测试^[5]。因此, 亟需改善柴油机在高海拔地区的性能和排放。研究不同海拔条件下的柴油机燃烧特性是解决上述问题的基础。Benjumea 等^[6]比较了柴油机在海拔 500 m 和 2 400 m 的燃烧特性, 发现随着海拔升高, 滞燃期增大, 预混燃烧阶段和燃烧持续期均延长。Wang 等^[7]使用移动测试台架实地开展海拔 0 m、1 600 m、3 300 m 和 4 500 m 的柴油机试验研究, 详细分析了热效率随海拔升高而减小的可能原因。Szedlmayer 等^[8]开展了模拟海拔 0 m、1 524 m、3 048 m 和 4 572 m 的柴油机性能和燃烧特性试验, 结果表明, 放热率峰值和当量比都随海拔升高而增大, 海拔低于 1 524 m 时变化不明显, 海拔高于 3 048 m 后变化显著。有学者通过采用含氧燃料^[9]、增压匹配^[10-11]、先进的喷油策略^[12]等措施, 改善柴油机燃烧, 提升其变海拔适应性。

这些研究大多集中于柴油机台架试验, 对不同海拔条件下柴油机燃烧过程的可视化研究较少。柴油机结构复杂, 难以布置光学视窗, 而且柴油机工作循环变大, 不易精确控制边界条件。因此, 在实际柴油机上实现对喷雾燃烧过程的直接观测和分析都十分困难。为此, 以美国 Sandia 国家实验室预混燃烧加热式定容燃

收稿日期: 2019-06-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(613252)

第一作者: 王成官(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为高原柴油机喷雾燃烧过程。E-mail: wcg@tongji.edu.cn

通信作者: 楼狄明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为发动机排放控制技术。

E-mail: loudiming@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

烧弹为代表的光学诊断系统是目前较为成熟、适用工况范围较广的内燃机喷雾燃烧模拟装置,而且Dec^[13]在该定容燃烧弹上结合先进的光学成像技术开展了一系列的柴油机喷雾燃烧可视化试验,提出了柴油机燃烧概念模型,指出柴油机的工作过程是一个涉及燃油雾化、蒸发、油气混合、着火和燃烧的复杂过程。需要注意的是,定容燃烧弹的内腔体积大于实际柴油机燃烧室体积,而且燃烧弹内难以实现实际柴油机的缸内流场特性,但是在定容燃烧弹上开展可视化研究,可以对实际柴油机喷雾燃烧过程的主要因素进行解耦,聚焦于柴油喷雾燃烧的物理化学过程本身,以深化对喷雾燃烧过程的认识。海拔高度的变化引起柴油机燃烧室内环境密度的变化,Naber等^[14]和Pei等^[15]的研究表明,柴油喷雾燃烧过程强烈地依赖于环境密度,因此有必要在定容燃烧弹内开展相关的可视化研究,以直观地获得不同海拔条件下柴油机燃烧火焰的发展过程。

笔者基于已完成的不同海拔高度对柴油喷雾和

油气卷吸过程影响的研究^[16],继续使用喷雾燃烧可视化试验平台,结合减光直拍成像技术,在定容燃烧弹内再现了一款重型柴油机运行在海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下喷油时刻的缸内热力学状态,开展了柴油燃烧的可视化试验,分析了不同海拔高度对火焰发展形态、着火过程、火焰升举长度和碳烟生成特性的影响,以期变海拔柴油机燃烧机理的完善和燃烧模型的改进提供可靠的基础数据,并为变海拔柴油机燃烧过程的改善提供指导方向。

1 试验设备和试验条件

1.1 可视化试验台架

图1为燃烧可视化试验台架示意图。其主要由预混燃烧加热式定容燃烧弹、压力采集系统、配气和点火系统、电控共轨喷油系统、同步控制系统和高速成像系统等组成。

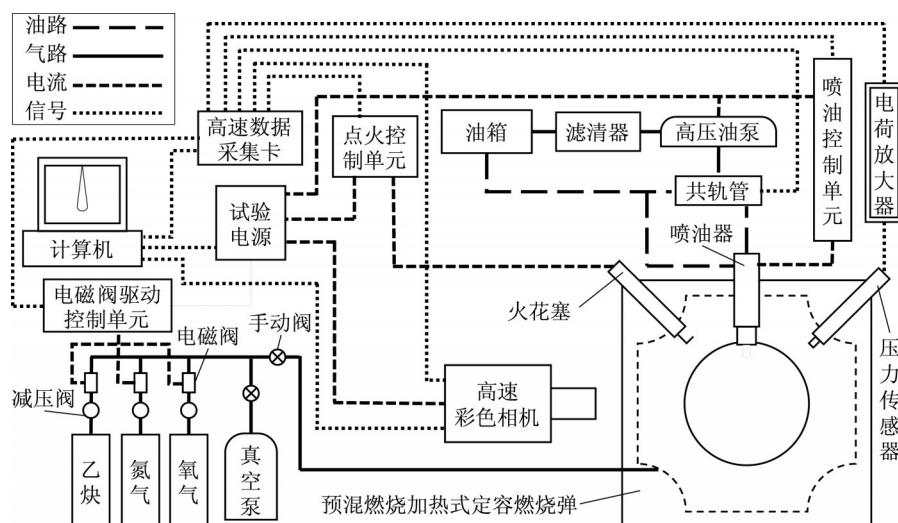


图1 燃烧可视化试验台架示意图

Fig.1 Schematic of optical combustion diagnose system

定容燃烧弹用于模拟实际柴油机喷油时刻的缸内热力学状态,并提供光学诊断通道。采用预混合燃烧加热的方式在定容燃烧弹内建立高温、高压的试验环境,图2给出了该定容燃烧弹的工作原理。首先,配气系统调节充入乙炔、氮气、氧气等组分的总量和比例,点火系统点燃预混合气;随后,定容燃烧弹内压力会因预混合气的快速燃烧而上升(对应图中的预混燃烧阶段),弹内压力达到峰值后,由于弹体壁面的冷却作用而开始下降(对应图中的燃烧弹冷却阶段);最后,当压力采集系统监测到弹内压力降低至目标压力时,控制系统同步触发喷油器喷

油和相机拍摄,保证试验在预设的环境压力、环境温度等热力学状态下进行。在垂直于喷雾轴线方向的2个对称的可视化窗口内各安装有1块可视直径130 mm、厚度50 mm的JGS3远红外光学石英玻璃,形成光学诊断通道。此外,定容燃烧弹外表面覆盖硅胶加热板和保温材料,采用电加热方式,并在PID(比例-积分-微分)控制器的调节下保持弹体温度稳定在 (383 ± 1) K,避免弹内水蒸气受冷凝结在石英玻璃上,以保证良好的光学观测。

电控共轨喷油系统通过控制油泵来保持共轨管内的油压恒定。使用BOSCH CRIN2电流驱动型电

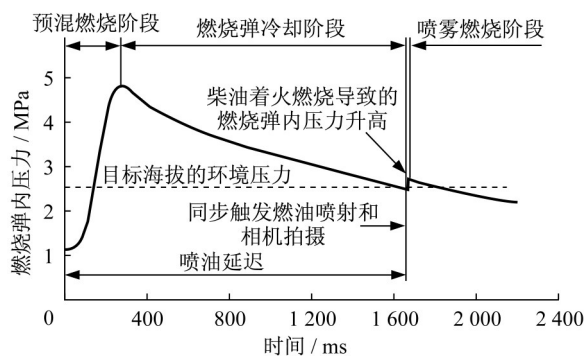


图2 预混燃烧加热式定容燃烧弹的工作原理

Fig.2 Principle of premixed combustion heated constant volume combustion bomb

控单孔喷油器,喷孔位于喷油器轴线上,用显微法实测喷孔出口直径为0.32 mm。喷油持续期设定为2.0 ms,确保可视化试验过程中喷雾和火焰能充分发展。

1.2 可视化成像技术

本文采用减光直拍成像技术实现柴油燃烧过程的可视化。表1给出了具体的参数设置。

表1 成像技术设置

Tab.1 Properties of camera	
参数	说明及数值
相机	PCO Diamx S1 高速彩色相机
镜头	Tokina 100 mm (f/2.8)
光源	—
滤镜	ND8 型中性减光镜
帧速/(幅·s ⁻¹)	16 000
曝光时间/μs	4
图像分辨率	768×320
空间分辨率/(μm·像素 ⁻¹)	174

柴油燃烧过程中火焰发出的亮度主要有化学发光和碳烟炽光两种,而且后者的亮度要远高于前者^[17-18]。强烈的碳烟炽光不仅损伤高速相机的感光器件,而且会使火焰图像过饱和。为此,本文联合使用高速彩色相机和1片ND 8型中性减光镜直接拍摄燃烧过程中的火焰发展形态。图3给出了光路示意图。采用该型中性减光镜可以把拍摄所得图像中的火焰亮度降低至原始亮度的1/8,此时可以认为只有碳烟颗粒热辐射发出的强烈炽光被保留在火焰图像中。

1.3 试验条件

本文根据一款低压缩比增压中冷重型柴油机确定试验条件。基于该机型在高原环境模拟试验系统上开展的台架试验,选取海拔0 m(平原)、3 000 m和4 500 m条件下该机型在标定工况下喷油时刻的缸内压力和温度作为定容燃烧弹内的热力学状态,具

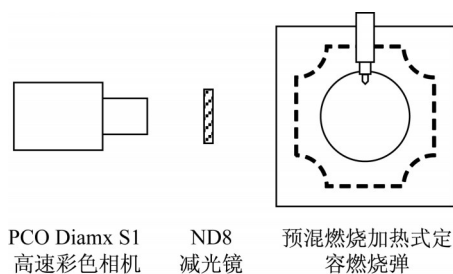


图3 减光直拍成像技术的光路示意图

Fig.3 Optical arrangement with high speed imaging technique

体的试验条件见表2。台架试验时不同海拔条件下中冷后进气温度稳定在 $(80\pm 5)^\circ\text{C}$,使得喷油时刻缸内温度保持在800 K左右。因此,本试验中海拔的变化通过缸内压力即缸内介质密度的变化来体现。每次试验重复5次并将数据平均,以排除随机误差。

表2 试验条件

Tab.2 Experimental conditions

参数	说明及数值		
燃油	0号柴油		
喷油器	单孔		
孔径/mm	0.32		
喷油压力/MPa	90		
喷油持续期/ms	2.0		
环境温度/K	800		
环境压力/MPa	3.7	3.0	2.6
环境密度/(kg·m ⁻³)	16.1	13.3	11.3
模拟海拔/m	0	3 000	4 500

2 试验结果和分析

2.1 不同海拔高度对火焰形态的影响

图4为海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下火焰发展形态的时间序列图像。为便于比较3个海拔高度下的火焰发展规律,选取喷油后0.500~5.500 ms之间的火焰图像进行对比。其中,喷油持续期(2.000 ms)内,以喷油开始后1.000 ms为界,前半段(0.500~1.000 ms)火焰图像的时间间隔为0.125 ms,后半段(1.000~2.000 ms)图像的时间间隔为0.250 ms;喷油结束后的主燃阶段(2.000~3.500 ms)内,图像的时间间隔为0.500 ms;尾燃阶段(3.500~5.500 ms)内图像时间间隔为1.000 ms。

喷油开始后,在喷射动量的驱动下柴油喷雾向下游贯穿,越来越多的环境空气被卷吸进入油束内部,混合气当量比沿着喷雾轴向逐渐减小^[16],在喷油器下游出现适合着火的混合气区域。由于油气混合

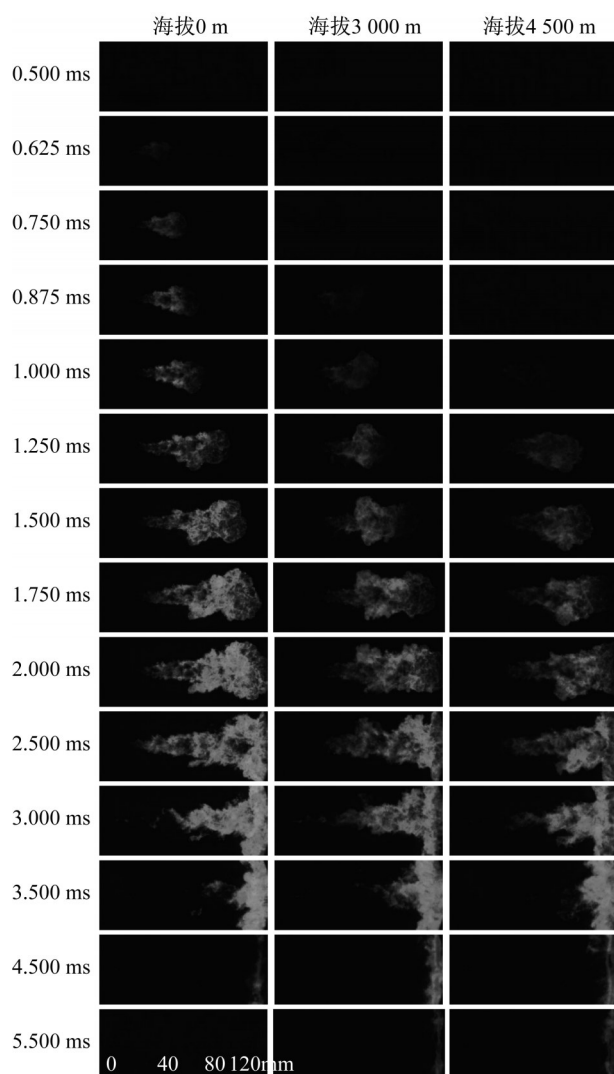


图4 不同海拔高度对自然火焰发展形态的影响

Fig.4 Effects of altitude on flame propagation

质量随海拔升高而降低,着火的物理准备时间延长,因此火焰出现的时刻明显滞后;而且随海拔升高,弹内环境密度减小,喷雾贯穿速率增大,火焰出现的位置也逐渐远离喷油器。随后,在喷油系统提供的轴向动量和燃烧反应提供的扩散动量的共同驱动下,燃烧的火焰区域快速向喷雾下游方向传播,火焰面积和火焰亮度都随之增大,这是由于在火焰内部形成了大量的碳烟云团。火焰刚开始出现时亮度较低而且亮度分布较为均匀,表明燃烧初期的火焰为预混燃烧火焰;随着时间的发展,喷雾轴线附近的火焰出现亮度较低的暗斑,火焰内部出现明显的亮度梯度,表明燃烧火焰已经由初期的预混燃烧火焰转变为扩散燃烧火焰。在喷油结束前,火焰最上游稳定在某一位置,呈现明显的升举火焰形态^[19]。喷油结束后的主燃阶段内,由于燃油喷射动量突然消失,火焰在继续向喷雾下游方向传播的同时也向喷雾上游

方向传播,但是受限于定容燃烧弹的内腔空间,火焰前锋向下游传播时会与正对喷油器方向的定容燃烧弹内腔壁面接触并在壁面上沿着喷雾径向继续传播。尾燃阶段内,由于没有后续燃油喷射进入,燃烧的火焰区域迅速向内腔壁面收缩,火焰结构逐渐变成细长条带状,而且可以看出,随海拔升高,火焰消失的时刻明显滞后,燃烧持续期延长。

2.2 不同海拔高度对着火过程的影响

确定着火时刻的方法有很多,比如通过燃烧压力或燃烧温度上升、直接的火焰亮度或火焰的化学发光等^[20]。本文将火焰首次出现的时刻定义为着火时刻,喷油时刻和着火时刻之间的时间间隔定义为着火延迟,着火时刻的火焰区域与喷油器之间的轴向长度定义为着火距离。

图5给出了不同海拔高度的着火延迟和着火距离。从图中可知,海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下,着火延迟分别为0.67 ms、0.87 ms和1.04 ms,着火距离分别为22.09 mm、27.50 mm和37.03 mm。可见,随海拔升高,着火延迟延长,着火距离增大,高海拔对柴油的着火过程有明显的抑制效果。这主要是因为随海拔升高,环境密度减小,卷吸空气质量减小,混合气的当量比增大^[16],油气混合需要更长的时间才能适合着火;与此同时,气液相互作用力减小,喷雾贯穿速度增大,再加上着火准备时间延长,最终导致适合着火的混合气分布更加趋向于喷雾下游区域。

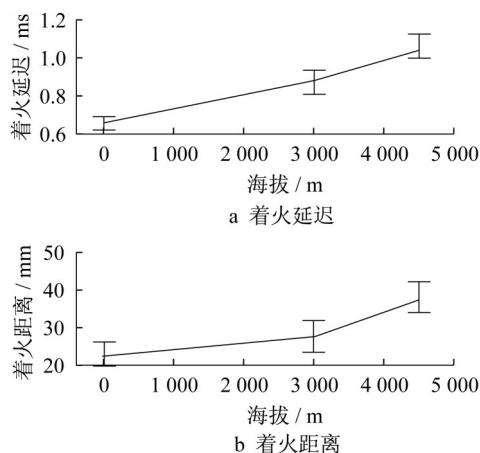


图5 不同海拔高度对着火延迟和着火距离的影响

Fig.5 Effects of altitude on ignition delay and distance

2.3 不同海拔高度对火焰升举长度的影响

根据图4的分析可知,火焰经过初期的预混燃烧火焰转变为扩散燃烧火焰后,呈现升举形态火焰

的最上游稳定在某一位置,此时定义从喷油器到火焰最上游的轴向距离为火焰的升举长度。升举长度是评价柴油进入燃烧区域前与环境空气混合的一个重要参数,显著影响下游火焰的燃烧和碳烟生成过程^[19,21]。

图6给出了不同海拔高度的升举长度和卷吸空气比率。从图6中可知,海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下的升举长度分别为23.1 mm、29.1 mm和34.5 mm,即随海拔升高,升举长度增大。根据升举火焰稳定机制^[22]可以推测,随海拔升高,环境密度减小,气体阻力减小,喷雾贯穿速度和火焰前锋速度达到平衡时的轴向位置与喷油器之间的距离增大,升举长度增大。这也意味着在升举火焰上游区域内为油气混合预留的空间范围随海拔升高而扩大。

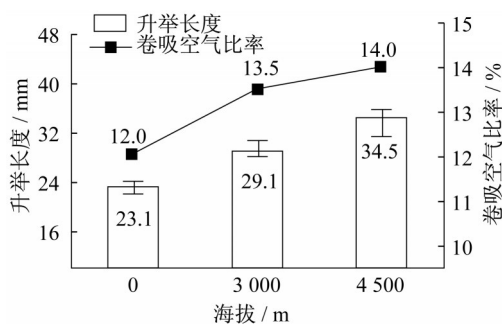


图6 不同海拔高度对升举长度和卷吸空气比率的影响

Fig.6 Effects of altitude on lift-off length and stoichiometric air ratio

为了定量分析升举火焰上游区域内的油气混合质量,文献[19]根据文献[14]提出的燃油射流理论模型,计算得到柴油喷雾在升举长度位置处的当量比,并将该当量比的倒数(乘以100,以%为单位)定义为卷吸空气比率,即升举火焰上游区域内卷吸空气总量占已喷射燃料完全燃烧所需空气总量的百分比,计算公式为

$$\zeta = 100 / \bar{\phi}(L) = 100 \left[\left(\sqrt{1 + 16(L/x^+)^2} - 1 \right) / 2f_s \right] \quad (1)$$

式中: ζ 为卷吸空气比率,%; $\bar{\phi}(L)$ 为当量比; L 为火焰的升举长度; x^+ 为喷雾特征尺寸; f_s 为化学计量空燃比。详细的计算过程可参考文献[16]。

从图6中可知,海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下的卷吸空气比率分别为12.0 %、13.5 %和14.0 %。可见,卷吸空气比率随海拔升高而增大,这个现象可以通过升举长度和环境密度的综合作用来解释。具体来说,随海拔升高,环境密度减小,一

方面会导致卷吸速率减小,油气混合质量变差,沿着喷雾轴线同一位置处的当量比增大^[16],另一方面也会导致升举长度增大,升举火焰上游区域内用于空气卷吸和油气预混合的空间范围扩大。因此,高海拔条件下变差的油气混合质量会由于升举长度的增大而得到补偿,最终导致高海拔条件下柴油喷雾在升举长度位置处的卷吸空气总量增加,当量比减小,使得卷吸空气比率随海拔升高而增大。

此外,从图6中还可以看出,海拔从0 m升高到3 000 m,卷吸空气比率的增幅为12.5%,而海拔从3 000 m升高到4 500 m,增幅减小为3.7%。这表明,随海拔升高升举长度对油气混合质量的补偿效果减弱,高海拔对卷吸空气比率的影响随之减小。

2.4 不同海拔高度对碳烟生成特性的影响

如前所述,柴油燃烧时的火焰亮度主要来源于化学发光和碳烟炽光,而本文基于减光直拍成像技术获得的火焰图像中只保留了碳烟颗粒热辐射的强烈炽光,因此可以用图像的火焰亮度来表征碳烟的生成特性。

2.4.1 空间积分火焰亮度

将火焰图像中所有像素点的亮度值进行空间积分,得到空间积分火焰亮度,可以直观地揭示火焰发展过程中碳烟的瞬时生成量^[23-24]。图7为海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下的空间积分火焰亮度曲线。从图中可见,3个海拔高度下的空间积分火焰亮度都呈现先增大后减小的三角形分布。随海拔升高,空间积分火焰亮度的峰值明显减小,这个现象可以根据Dec^[13]提出的柴油机燃烧概念模型进行解释,即随海拔升高,升举长度位置处的卷吸空气比率增大,即升举火焰上游区域内卷吸的空气量增大,导致升举火焰下游的预混燃烧区域内生成的碳烟前驱物减少,而碳烟前驱物在下游输运过程中合成多环芳香烃并形成碳烟,进而扩散火焰区域内的碳烟生成量减少。与此同时,火焰亮度峰值出现的时刻随海拔升高而明显滞后,这主要归因于着火延迟的延长。

此外,从图7中还观察到,海拔从0 m升高到3 000 m,火焰亮度峰值的降幅为26.4 %;而海拔从3 000 m升高到4 500 m,降幅仅为9.6 %。结合图6可以得出结论,火焰亮度峰值和卷吸空气比率的降幅都随海拔升高而减小,这不仅与Dec^[13]的柴油机燃烧概念模型的描述一致,而且表明了不同海拔高度下柴油燃烧升举火焰上游的卷吸特性和碳烟的生成特性密切相关。

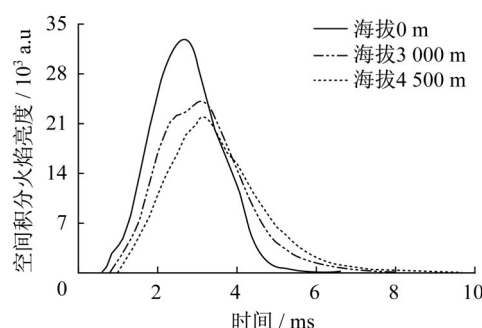


图7 不同海拔高度对空间积分火焰亮度的影响

Fig.7 Effects of altitude on spatial integrated natural luminosity

2.4.2 时间积分火焰亮度

将空间积分火焰亮度累积计算得到时间积分火焰亮度,用以更直观地定量比较在整个火焰发光持续期内的碳烟生成总量^[23-24]。图8为海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下的时间积分火焰亮度。从图中可见,和时间积分火焰亮度类似,时间积分火焰亮度也随海拔升高而减小,表明了在整个火焰发光持续期内的碳烟生成总量随海拔升高而减小。这也是由于火焰的升举长度和升举火焰上游区域的卷吸空气比率都随海拔升高而增大造成的。

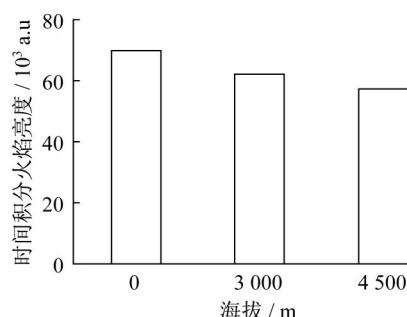


图8 不同海拔高度对时间积分火焰亮度的影响

Fig.8 Effects of altitude on time integrated natural luminosity

但是需要注意的是,海拔变化时,火焰亮度表征的碳烟生成量水平并不等同于实际柴油机最终的碳烟排放水平。余林啸等^[25]使用柴油机在高原现场的试验研究表明,碳烟排放量随海拔升高而增加,而本文中空间积分火焰亮度峰值和时间积分火焰亮度都随海拔升高而减小。结论不一致的原因推测如下:随海拔升高,定容燃烧弹内火焰的升举长度和卷吸空气比率增大,导致火焰的预混燃烧区域内生成的碳烟前驱物减少,因而扩散火焰区域内的碳烟生成量降低^[13];同时,从图7中可以看出,燃烧后期碳烟的氧化速率随海拔升高而明显减小,因此对于实际

柴油机而言,这就意味着在排气门开启后缸内生成的碳烟没有被有效氧化,而是直接排出气缸进入排气管^[26],因此整机试验测得的碳烟排放随海拔升高而增加。

3 结论

(1) 随海拔升高,着火延迟延长,着火距离增大。海拔高度从0 m升高到4 500 m,着火延迟从0.67 ms延长到1.04 ms,着火距离从22.09 mm增大到37.03 mm,表明海拔高度对着火过程有明显的抑制效果。

(2) 火焰的升举长度和火焰升举长度位置处的卷吸空气比率都随海拔升高而增大。海拔0 m、3 000 m和4 500 m条件下的升举长度分别为23.1 mm、29.1 mm和34.5 mm,升举长度增大使得升举火焰上游区域内为油气混合预留的空间范围随海拔升高而扩大。因此,随海拔升高而变差的油气混合质量会由于升举长度的增大而得到补偿,最终使得柴油喷雾在升举长度位置处的卷吸空气总量随海拔升高而增加,计算得到海拔高度从0 m升高到4 500 m,卷吸空气比率从12.0 %增大到14.0 %。

(3) 海拔从0 m升高到3 000 m,卷吸空气比率增幅和空间积分火焰亮度峰值降幅分别为12.5 %和26.4 %;而海拔从3 000 m升高到4 500 m,卷吸空气比率增幅和空间积分火焰亮度峰值降幅分别减小为3.7 %和9.6 %。可见,卷吸空气比率和空间积分火焰亮度峰值的变化幅度都随海拔升高而减小,揭示了升举火焰上游的卷吸特性和碳烟的生成特性密切相关。

(4) 随海拔升高,定容燃烧弹内火焰亮度表征的柴油燃烧的碳烟生成总量减小。这与实际柴油机的碳烟排放量随海拔升高而增大的趋势相反。这主要归因于燃烧后期碳烟的氧化速率明显减小,因此,高海拔条件下实际柴油机在排气门开启后,缸内生成的碳烟没有被有效氧化而是直接排出气缸,造成碳烟排放量增大。

参考文献:

- [1] 刘瑞林,刘宏威,秦德.涡轮增压柴油机高海拔(低气压)性能试验研究[J].内燃机学报,2003,21(3):213.
LIU Ruilin, LIU Hongwei, QIN De. An experimental study on performance of turbocharged diesel engines at high altitude (low air pressure) [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21

- (3):213.
- [2] BERMÚDEZ V, SERRANO J R, PIQUERAS P, *et al.* Analysis of the role of altitude on diesel engine performance and emissions using an atmosphere simulator [J]. *International Journal of Engine Research*, 2017, 18(1/2): 105.
- [3] 周广猛, 刘瑞林, 董素荣, 等. 高压共轨柴油机高海拔燃烧温度特性 [J]. *内燃机学报*, 2016, 34(4):296.
ZHOU Guangmeng, LIU Ruilin, DONG Surong, *et al.* Combustion temperature characteristics of a common rail diesel engine under high altitude conditions [J]. *Transactions of CSICE*, 2016, 34(4):296.
- [4] WANG X, GE Y, YU L, *et al.* Comparison of combustion characteristics and brake thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine fueled with diesel and biodiesel at high altitude [J]. *Fuel*, 2013, 107(2): 852.
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[EB/OL]. [2019-05-01]. http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqdywrwpfbz/201612/t20161223_369476.shtml.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Limits and measurement methods for emissions from diesel fuelled heavy-duty vehicles (CHINA VI) [EB/OL]. [2019-05-01]. http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqdywrwpfbz/201612/t20161223_369476.shtml.
- [6] BENJUMEA P, AGUDELO J, AGUDELO A. Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine [J]. *Fuel*, 2009, 88(4): 725.
- [7] WANG X, GE Y, YU L, *et al.* Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine [J]. *Energy*, 2013, 59(1): 543.
- [8] SZEDLMAYER M, KWEON C B M. Effect of altitude conditions on combustion and performance of a multi-cylinder turbocharged direct-injection diesel engine [R]. Detroit: SAE, 2016.
- [9] YU L, GE Y, TAN J, *et al.* Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes [J]. *Fuel*, 2014, 115(1): 220.
- [10] LI H, ZHANG G, ZHANG H, *et al.* Equivalent matching model of a regulated two-stage turbocharging system for the plateau adaptability [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, 2016, 230(12): 1654.
- [11] CARLUCCI A P, FICARELLA A, LAFORGIA D, *et al.* Supercharging system behavior for high altitude operation of an aircraft 2-stroke diesel engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 101(1): 470.
- [12] ZHU Z, ZHANG F, LI C, *et al.* Genetic algorithm optimization applied to the fuel supply parameters of diesel engines working at plateau [J]. *Applied Energy*, 2015, 157(1): 789.
- [13] DEC J E. A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging [R]. Detroit: SAE, 2007.
- [14] NABER J D, SIEBERS D L. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays [R]. Detroit: SAE, 1996.
- [15] PEI Y J, DAVIS M J, PICKETT L M, *et al.* Engine combustion network (ECN): global sensitivity analysis of spray a for different combustion vessels [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(6): 2337.
- [16] WANG C, LOU D, TAN P, *et al.* Experimental study on diesel spray characteristics at different altitudes [R]. Detroit: SAE, 2018.
- [17] GAYDON A. The spectroscopy of flames [M]. New York: Halsted Press, 2012.
- [18] DEC J E, ESPEY C. Chemiluminescence imaging of autoignition in a DI diesel engine [R]. Detroit: SAE, 1998.
- [19] SIEBERS D L, HIGGINS B. Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions [R]. Detroit: SAE, 2001.
- [20] BARDI M, PAYRI R, MALBEC L M, *et al.* Engine combustion network: comparison of spray development, vaporization, and combustion in different combustion vessels [J]. *Atomization & Sprays*, 2012, 22(4): 807.
- [21] PICKETT L M, SIEBERS D L. Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 138(1): 114.
- [22] PETERS N. Turbulent combustion [M]. London: Cambridge University Press, 2000.
- [23] 胡江涛, 姚春德, 耿培林, 等. 空气和甲烷/空气氛围中喷油压力对柴油燃烧特性的影响 [J]. *内燃机学报*, 2017, 35(4):289.
HU Jiangtao, YAO Chunde, GENG Peilin, *et al.* Effects of injection pressure on combustion characteristics of diesel fuel in air and premixed methane/air mixture atmosphere [J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35(4):289.
- [24] 姚春德, 胡江涛, 银增辉, 等. 喷油压力对高压共轨柴油机燃烧影响的可视化研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):355.
YAO Chunde, HU Jiangtao, YIN Zenghui, *et al.* Visualization on combustion characteristics of common rail diesel engine at different injection pressures [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):355.
- [25] 余林啸, 葛蕴珊, 谭建伟, 等. 重型柴油机在不同海拔地区的燃烧与排放特性 [J]. *内燃机学报*, 2013, 31(6): 507.
YU Linxiao, GE Yunshan, TAN Jianwei, *et al.* Combustion and emission characteristics of a heavy-duty diesel engine at different altitudes [J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(6): 507.
- [26] TREE D R, FOSTER D E. Optical measurements of soot particle size, number density, and temperature in a direct injection diesel engine as a function of speed and load [R]. Detroit: SAE, 1994.