

基于光学分析的纳米泡状流柴油燃烧及碳烟生成历程研究

王涵¹², 郭亮¹², 蔡宁宁³, 宣榕¹², 孙万臣¹², 李德刚¹², 杨凯棋¹², 陈艳玲¹², 张峻峰¹²

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022;

2. 吉林大学长沙汽车创新研究院, 长沙 410000;

3. 吉林大学商学与管理学院, 长春 130012)

Study on Combustion and Soot Generation Process of Nanobubble Flow Diesel Based on Optical Analysis

WANG Han¹², GUO Liang¹², CAI Ningning³, XUAN Rong¹², SUN Wanchen¹², LI Degang¹²,
YANG Kaiqi¹², CHEN Yanling¹², ZHANG Junfeng¹²

(1.College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Changsha Automobile Innovation Research Institute of Jilin University, Changsha 410000,China;

3. School of Business and Management, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Based on the combustion visualization engine test platform, the effect of nanobubble concentration on the combustion process and soot generation process of nanoscale bubble flow diesel was studied. The image of engine combustion flame was obtained by high-speed photography technology, and the flame temperature field and KL factor field distribution were obtained by two-color analysis, and the development of combustion flame and soot generation process were analyzed by combining engine combustion characteristic parameters. The results show that with the increase of bubble concentration, the fuel combustion hysteresis period is shortened, the combustion duration period is shortened, the combustion center of gravity is advanced, which shows that the increase of nanobubble concentration is helpful to improve the ignition performance of fuel. Different concentrations of nanobubble diesel can reduce the combustion flame area, reduce the spatially integrated natural luminosity, reduce the average combustion temperature, reduce the flame combustion temperature gradient, reduce the KL factor, which shows that the addition of nanobubble has a positive effect on improving the flame temperature field distribution and inhibiting soot emissions.

摘要: 基于燃烧可视化发动机试验平台, 研究了纳米气泡浓度对纳米尺度泡状流柴油燃烧过程及碳烟生成历程的影响。通过高速摄影技术获取发动机燃烧火焰图像, 并利用双色法解析获得火焰温度场及 KL 因子场分布, 结合发动机燃烧特性参数对燃烧火焰发展过程及碳烟生成历程进行分析。研究表明, 随气泡浓度的增加, 燃料燃烧滞燃期缩短, 燃烧持续期缩短, 燃烧重心提前, 纳米气泡浓度的提升有助于改善燃料的着火性能; 不同浓度纳米气泡柴油均可使燃烧火焰面积减小, 综合自然发光度减小, 燃烧平均温度降低, 火焰燃烧温度梯度降低, KL 因子降低, 纳米气泡的加入对改善火焰温度场分布、抑制碳烟排放具有积极的作用。

关键词: 纳米气泡; 光学发动机; 泡状流; 火焰发展历程; 温度场; KL 因子场

Key words: nanobubble; optical engine; bubble flow; flame development history; temperature field; KL factor field

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 自然科学基金项目 (20220101205JC, 20220101212JC); 吉林大学长沙汽车创新研究院自由探索项目 (CAIRIZT20220202); 吉林大学研究生创新研究计划项目 (2023CX071)

作者简介: 王涵 (1996-), 男, 博士生, 主要研究方向为能源多元化与新型动力总成, E-mail:599312228@qq.com;

郭亮 (联系人), E-mail:liangguo@jlu.edu.cn.

中图分类号: TK421

文献标识码: A

0 引言

随着全球对环境问题重视程度的提高, 继续改善发动机的燃烧及排放性能是当前内燃机重要的发展方向之一, 而改善发动机机燃烧及排放性能的本质就是优化燃料燃烧全过程, 促进燃料在发动机内的有限时间空间内的燃烧可控性, 从而实现发动机效率的提升及污染物排放的降低。

大量研究从燃料预处理方向进行了多种尝试, 以促进燃料破碎雾化效果、改善发动机燃烧并减少污染物生成^[1]。黄震在早期探讨了燃料溶解二氧化碳或空气对发动机燃烧及排放的影响, 溶解空气可以有效降低碳烟及 CO 的排放; 溶解二氧化碳不仅可以增强燃料雾化, 还可以在在一定程度上减少碳烟和 CO 排放的同时, 显著降低 NO_x 排放^{[2][3]}。Rashkovan 等人也在研究中指出, 预先将气体与燃料混合不仅可以降低喷射后燃料液滴的索特平均直径, 还可以改善液滴的体积分数分布^{[4][5]}。也有研究指出溶气对于粘度更高的柴油雾化效果的提升要优于粘度较低的汽油^[6], 也同样证实了气液相预混对燃料雾化及燃烧的积极作用。

随着研究的深入, 一种与宏观泡状流性质有很大差异的纳米尺度泡状流引起了学者的注意。纳米气泡具有更大的气相比表面积^[7]、更高气相溶解性^[11]和更高的气相稳定性^[8], 还具备 OH 自由基的激发特性^[9]。韩国学者 Seung 在研究中发现将氢纳米气泡加入汽油, 在 40% 负荷下汽油的功率提高了 4%, 且有效燃油消耗率降低了 7.4%, 可以有效提升发动机的经济性^[10]。日本学者 Nakatake 也得到了同样的结论, 纳米气泡柴油在 8 个不同负荷工况下平均比油耗降低 3.6%, 且碳烟排放也有所降低^[11]。此外, 多项研究也同样表明纳米气泡的加入有助于改善发动机的燃烧性能, 降低污染物排放^{[12][13]}。然而, 相关实验研究以发动机性能测试为主, 未能揭示纳米气泡加入对燃烧过程及污染物生成的影响机理, 对于上述作用的成因和机理还有待深入研究。

本文在上述研究的基础上, 进一步探索纳米尺度泡状流燃料对柴油机燃烧过程的影响规律, 利用燃烧可视化发动机试验平台, 探究纳米气泡加入对燃烧火焰发展及碳烟生成历程的影响, 从而为纳米气泡燃料的燃烧提供更完善的理论支持, 深入挖掘

纳米气泡燃料对发动机燃烧及碳烟生成的改善潜力。

1 试验系统及方法

1.1 试验设备

试验在所搭建燃烧可视化发动机试验平台上进行, 平台结构如图 1, 包含有光学发动机、外部驱动电机、自行改造的进气系统、控制系统及数据采集系统等。

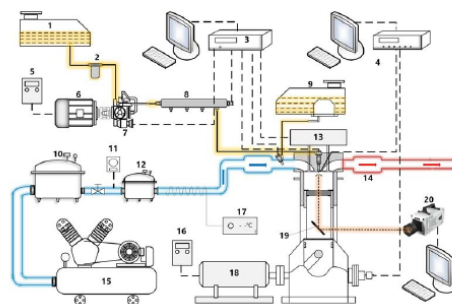


图 1 燃烧可视化发动机试验平台

实验核心装置-光学发动机由单缸汽油机改造而成, 采用“Bowditch 型”加长活塞, 即在原有发动机活塞基础上连接了具备透明活塞顶的加长活塞, 保证火焰图像可以透过透明活塞并经由下置式 45° 镜被高速相机接收, 光学发动机主要参数如表 1 所示。

表 1 光学发动机参数

参数	数值
发动机型式	四冲程、单缸、水冷、立式
缸径/mm×行程/mm	105×114.3
几何压缩比	13
连杆长度/mm	190
排量/L	0.99
气门升程/mm	2-11
气门数	4
配气机构	气门正时全可变
冷却方式	机油和冷却水预热

光学发动机由外部驱动电机驱动, 经由控制系统调节, 保障发动机可稳定运行在测试转速 1000 r/min。由于燃烧室结构的限制, 光学发动机的压缩

比较低, 为了保证进气入口边界条件的及燃烧的稳定性, 采用改造的进气系统, 利用稳压罐降低进气管内气流的波动并通过热电偶对进气进行加热, 实时监测进气温度及压力闭环控制实现进气温度、压力的稳定调节。供油系统采用模拟增压, 通过 NI 直喷驱动系统实现喷油次数、喷油时刻、喷油量的精确可控。

数据采集系统分为图像采集系统和热力学参数采集系统。图像采集系统采用高速摄影直接拍摄法使用 Phantom v611 高速相机采集燃烧火焰的图像, 相机分辨率为 800*600, 曝光时间选择 4 μ s。高速摄影直接拍摄利用燃烧火焰在可见光波段的热辐射, 直接获取火焰信息, 可以得到完整的火焰发展历程随曲轴转角的变化。同时, 热力学参数采集系统可通过燃烧分析仪 CA3004A8 实时记录缸内压力的变化。

1.2 试验方案

为获得不同浓度且粒径分布集中的纳米气泡柴油, 制备方法选择多孔膜渗透法。其原理是高压气体在经由多孔膜管上分布的微纳米级小孔进入液相中时, 气体受到剪切力作用会细化破碎成细小气泡, 气泡之间会发生碰撞、合并、生长, 宏观气泡会上浮最终到达上液面破碎, 而纳米气泡由于自身高稳定性可一直稳定在液相当中。试验选取 100 nm 孔径氧化铝多孔膜管在 0.5 MPa 的进气压力条件进行目标燃料的制备, 设备可以稳定的制备纳米气泡柴油。气泡平均粒径可以稳定在 200 ~ 250 nm 之间, 气泡浓度随制备时长增加先增加后稳定, 如图 2、图 3 所示。

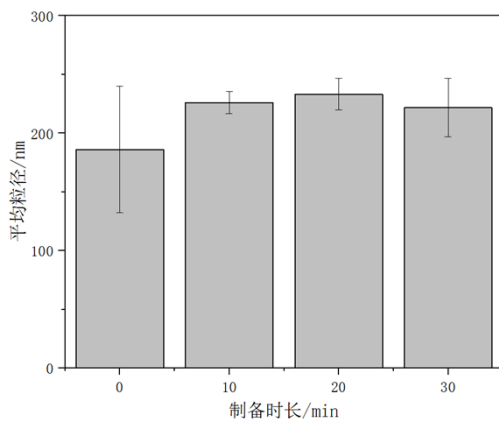


图 2 纳米气泡柴油平均粒径随制备时长变化规律

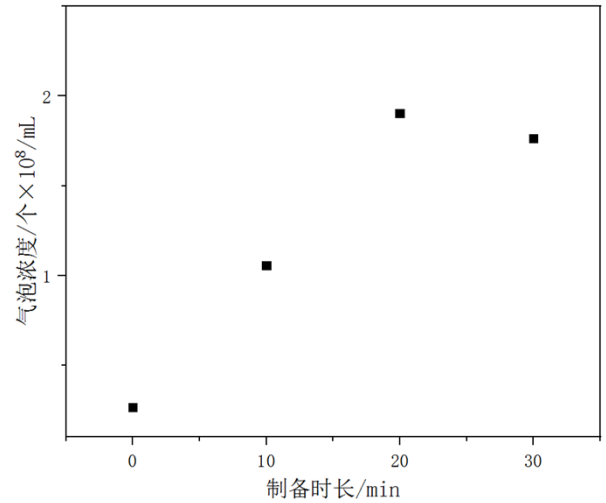


图 3 纳米气泡柴油气泡浓度随制备时长变化规律

试验方案见表 2。为探究不同气相状态的纳米气泡柴油对发动机燃烧过程的影响, 选取未经处理的国 VI 0#柴油作为对照组; 由于纳米气泡浓度随制备时长增加先增加后趋于稳定, 且制备时长为 10min 和 30min 的目标燃料具有更接近的平均粒径, 故选取相应制备时间分别为 10min, 30min 的纳米气泡柴油作为不同气相浓度的对比组, 分别记为 M10, M30。获取火焰发展历程图像, 通过分析火焰面积、综合自然发光度 (SLNL)、缸内温度场、缸内 KL 因子场并结合缸压, 揭示不同气相浓度对发动机燃烧过程及碳烟排放的影响。

表 1 试验方案

项目	参数
目标燃料	常规柴油、M10、M30
发动机转速	1000 r/min
循环喷油量	34 mg
喷油提前角	9 °CA BTDC
喷油压力	100 MPa

火焰面积和综合自然发光度通过将高速相机所获得火焰图像进行标准化处理, 并将图像每一像素点的 RGB 值转化为灰度值, 基于设定的阈值确定火焰像素点位置, 即可获得每一曲轴转角下对应的火焰面积占比, 火焰综合自然发光度通过公式 (1) 获得。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

式中, Y 表示图像亮度, 即 SLNL 的值, R 、

G 、 B 分别表示高速相机捕捉到的 RGB 三元色的强度信号。

缸内的温度场和 KL 因子场利用双色法测温间接得出。燃料在气缸内燃烧过程中，火焰中高温碳烟会释放出大量的热辐射，利用双色法根据相关辐射学理论公式 (2) (3) 即可推算出辐射强度及碳烟温度，认为碳烟温度等同于其周围燃烧场的温度，将所获得的温度代入公式即可获得可反映碳烟体积分数的 KL 因子^[14]。

$$\left[1 - \exp\left\{-\frac{c_2}{\lambda_1}\left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right]^{a_{\lambda_1}} = \left[1 - \exp\left\{-\frac{c_2}{\lambda_2}\left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right]^{a_{\lambda_2}} \quad (2)$$

其中， $c_1 = 1.191 \times 10^8 w \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ 为第一普朗克常数， $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 为第二普朗克常数。 λ_1 、 λ_2 为所取波长。 T 为真实温度， T_{a1} 、 T_{a2} 为对应 $I(\lambda, T)$ 的亮度温度，系数 a 在特定波长区间上是常数，由于本研究只涉及可见光范围所以系数 a 取值 1.38^[15]。

$$\text{KL} = -\lambda^a \text{Ln} \left[1 - \exp\left\{-\frac{c_3}{\lambda}\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right] \quad (3)$$

本研究选取火焰图像的 R 和 G 两通道波长及通道值进行计算，并利用经高温黑体炉标定试验数据验证过的双色法 MATLAB 图像处理软件得到缸内温度场及 KL 因子场，进而进一步分析纳米气泡加入对缸内热氛围及碳烟生成的影响。

2 试验结果及分析

2.1 不同气泡浓度对燃料燃烧过程的影响

对比分析了不同气泡浓度的纳米气泡柴油与常规国 VI 柴油的发动机燃烧特性，以探究纳米气泡的加入对压燃式发动机燃烧过程的影响。试验选取喷油时刻为 9°CA BTDC ，喷油压力为 100 MPa ，循环供油量热值控制在 1438 J ，以保障边界条件的稳定。图 4 为三种目标燃料对应的发动机缸压及放热率曲线。通过对比三种燃料的缸压及放热率曲线可以明显看出，纳米气泡的加入可以使发动机的着火始点明显提前，且纳米气泡柴油具有更高的缸压峰值，常规柴油的缸压峰值为 3.3857 MPa ；M10 的缸压峰值为 3.5129 MPa ，较常规柴油提高 3.8% ；M30 的缸压峰值在 3.5116 MPa 较常规柴油提高 3.7% 。三种燃料的对应的压力升高曲线如图 5 所示，纳米气泡柴油的压力升高率高于常规柴油，有

助于提高燃烧循环的定容度，且随着纳米气泡浓度的提升最大压力升高率对应的曲轴转角更为提前。这是由于纳米气泡的加入促进了燃料的破碎雾化，使燃料混合更加均匀，加快了燃烧放热速率，使得缸内燃烧放热峰值升高，缸内最大爆发压力升高。

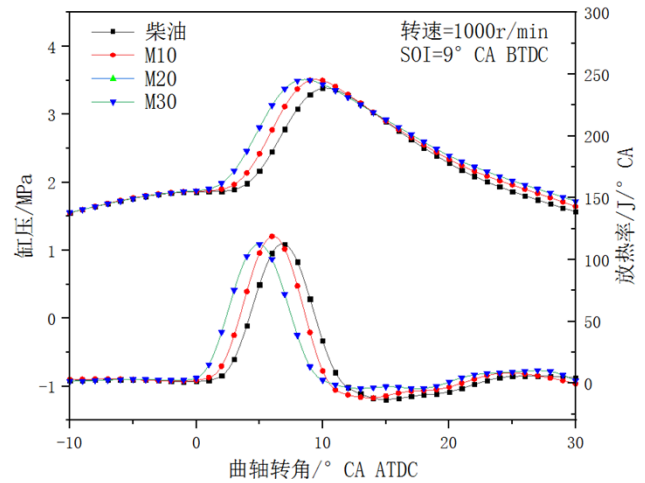


图 4 缸压及放热率随曲轴转角的变化规律

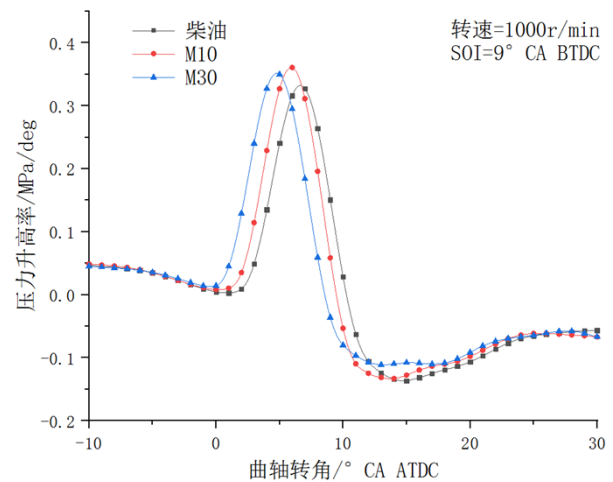


图 5 压力升高率随曲轴转角的变化规律

图 6、图 7 揭示了随纳米气泡浓度增加柴油的滞燃期、燃烧持续期以及燃烧重心变化规律。随着纳米气泡浓度的增加，滞燃期缩短、燃烧持续期缩短、燃烧重心提前。M10、M30 相对于常规柴油滞燃期分别缩短 0.8°CA 和 1.6°CA ；燃烧持续期缩短了 3.8°CA 和 4.6°CA 。以上结果可归因于纳米气泡的加入提高了燃料反应活性，纳米气泡使柴油内部空气量增加，在燃烧反应初期促进柴油氧化，促进燃料燃烧反应初期链式反应的进行，从而缩短了滞燃期；同时，对比不同气泡浓度纳米气泡柴油对发动机性能的影响，可以发现 M30 高浓度气泡浓度对发动机着火的促进效果更加明显。

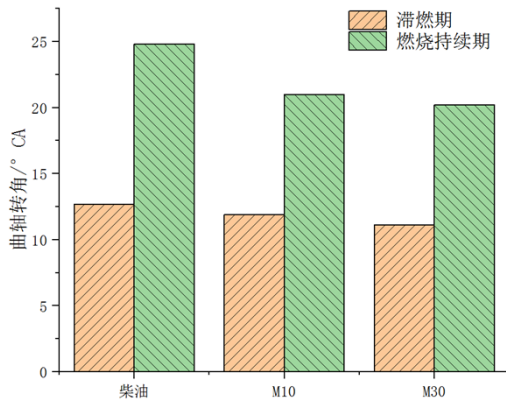


图6 目标燃料燃烧对应的滞燃期及燃烧持续期

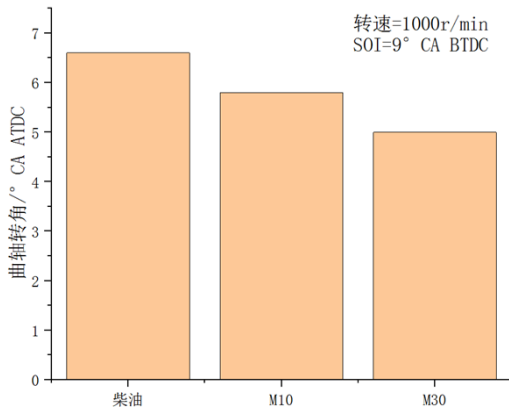


图7 目标燃料燃烧对应的燃烧重心

2.2 不同气泡浓度对燃料燃烧火焰发展历程的影响

根据缸压及放热率变化规律，选取燃料快速燃烧的上止点 0° 到 16° 范围内的 10 张火焰图像进行对比分析，可以清晰地观察到燃料从着火、主燃烧期到后燃期的各个阶段火焰的发展历程。图 8 对比了常规柴油、M10 和 M30 的火焰形态发展历程。燃料燃烧火焰发光主要由化学发光和碳烟辐射发光组成，且碳烟辐射发光在火焰发光过程中起主导作用，因此火焰发光强度可以一定程度上表征碳烟的生成量。常规柴油燃烧过程中可以观察到伴随着从喷油器喷入气缸的 7 条油束与空气的混合，火焰先在油束前锋面边缘着火，并随着油束扩散产生明亮的火焰，整个燃烧过程以扩散燃烧为主，燃料混合均匀性较差，缸内温度及碳烟生成量较高。随着纳米气泡的加入，可以观察到火焰的亮度明显降低，这表明纳米气泡的加入可以改善燃料混合均匀性，减少混合过程中的燃料过浓区，有助于降低碳烟的生成，减少碳烟颗粒发光。随气泡浓度的增加，高气泡浓度的 M30 具有更稳定的燃烧火焰，且喷油末期油束末端在喷油器喷嘴附近由于雾化不良产生的局部火焰亮度明显降低，说明喷油器喷嘴附近的雾化不良导致的过浓区得以改善，进一步证明

增加纳米气泡浓度有助于促进燃料混合。

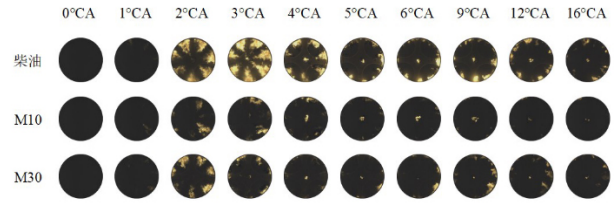


图8 三种燃料燃烧的火焰形态发展历程

图 9、图 10 为火焰发展历程经量化处理得到目标燃料火焰面积占比和综合自然发光度随曲轴转角变化规律。可以更直观的看出，M30 和常规柴油最大火焰面积和最大综合自然发光度对应的曲轴转角接近，且可以观察到明显的后燃火焰；纳米气泡柴油的火焰面积和综合自然发光度明显低于常规柴油，随着气泡浓度的增加火焰面积和综合自然发光度略有提升。M10 与 M30 的最大火焰面积占比相对于常规柴油分别降低 71.9% 和 36.5%，最大综合自然发光度相对于常规柴油降低 91% 和 49.1%，由火焰发光强度与碳烟生成对应的关系可知，纳米气泡柴油火焰面积和综合自然发光度的降低说明了纳米气泡的加入有助于降低碳烟的生成。

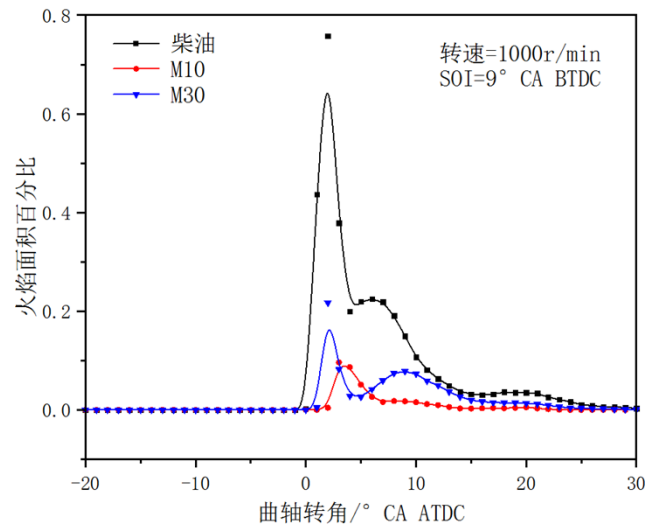


图9 火焰面积百分比随曲轴转角的变化规律

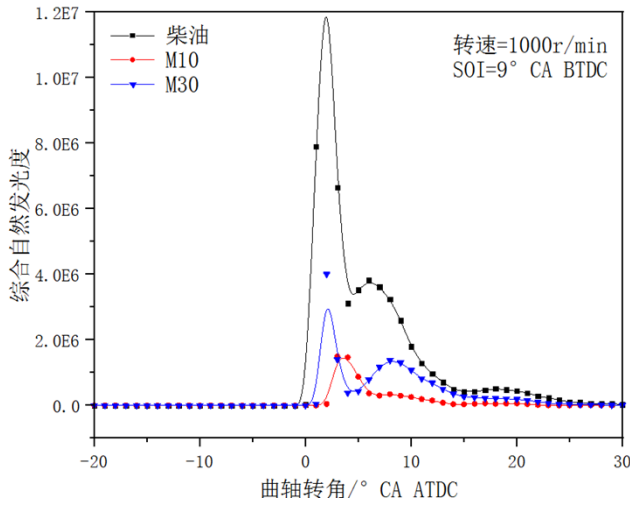


图 10 综合自然发光度随曲轴转角的变化规律

2.3 不同气泡浓度对温度场及 KL 因子场的影响

避免柴油混合不均匀导致的碳烟排放是促进压燃式发动机高效清洁燃烧的重要内容，从前文可知，纳米气泡的加入有助于降低燃烧过程中碳烟生成趋于的面积，为揭示纳米气泡柴油对降低碳烟生成的作用原因，采用双色法计算获得了缸内的温度场及 KL 因子场并进行了进一步的分析。图 11 和图 12 分别为三种燃料燃烧过程温度场分布云图和温度场分布累计直方图。

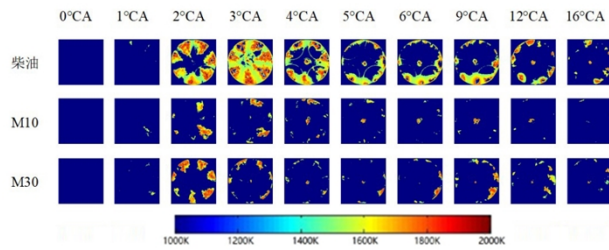


图 11 温度场分布云图

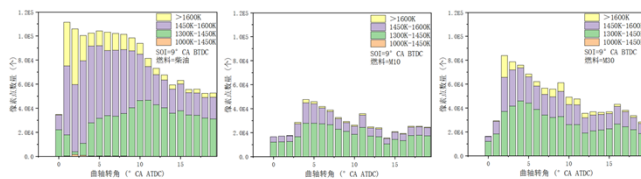


图 12 温度场分布累计直方图

从温度场分布云图可以看出，常规柴油在 2°CA ATDC 扩散燃烧产生的火焰外围颜色较深呈橘红色，温度较高；油束中心部分由于缺乏与新鲜空气混合，燃烧不充分，火焰温度偏低。常规柴油的火焰存在大量的高温区域，且温度梯度较大；随着纳米气泡的加入，缸内空气量增加，同时因纳米尺度泡状流燃料在喷射瞬间发生的气泡析出和微爆，使得燃料液滴与空气的混合更加均匀，且纳米气泡量的增加有助于局部空气量更大，缸内燃烧温度及

燃烧梯度明显降低。从温度场分布累计直方图可以看出，纳米气泡柴油的火焰 >1600 K 的高温区减少，1300 K-1600 K 的低温区显著增加。说明纳米气泡的加入在改善燃料着火性能的同时，可以起到较好的降低燃烧平均温度，缩小温度梯度的作用，这对降低污染物排放具有积极的作用。

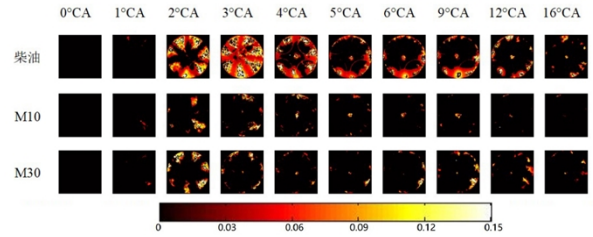


图 12 KL 因子场分布云图

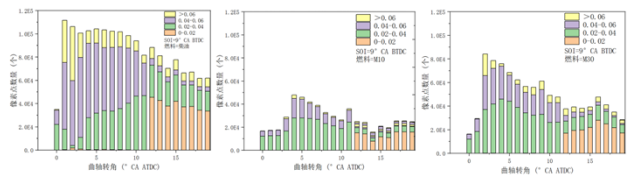


图 13 KL 因子场分布累计直方图

图 12 和图 13 分别为三种燃料燃烧过程的 KL 因子场分布云图和 KL 因子场分布累计直方图。对比 KL 因子场分布云图和温度场分布云图，发现 KL 因子与温度具有一定关联性，高 KL 因子即碳烟生成剧烈的区域均出现在高温区。纳米气泡使柴油燃烧平均温度降低的同时，也有助于降低 KL 因子总数。同时，KL 因子总数的降低也可能受到纳米气泡在燃烧反应初期增加了柴油中的空气量，促进了燃烧反应初期柴油的氧化，促进了链式反应的进行从而抑制碳烟产生。对比三种燃料的 KL 因子场分布累计直方图可知，纳米气泡柴油在燃烧过程中 >0.06 的高 KL 因子分布区域相应的降低，0.02-0.06 范围内的低 KL 因子分布区域占比增加，可得出与前文一致的结论。KL 因子总数随纳米气泡的加入明显降低，随气泡浓度的增加略有升高，适量的纳米气泡加入有助于改善燃烧过程中碳烟的生成。

3 结论

本文基于燃烧可视化发动机试验平台，研究了不同气泡浓度的柴油对发动机燃烧过程及碳烟生成历程的影响，对发动机性能参数、火焰发展形态进行了深入的分析，并采用双色法对火焰图像进行处理分析，得到了火焰的温度场分布和 KL 因子场分布，试验结论如下：

1. 纳米气泡的加入促进了燃料的破碎雾化，燃

料混合更均匀,有助于改善压燃式发动机的燃烧特性。纳米气泡柴油具有更高的缸压峰值、放热率峰值,且压力升高率更高有助于提高燃烧循环的定容度,提高热效率。随气泡浓度的增加,燃料燃烧滞燃期缩短,燃烧持续期缩短,燃烧重心提前,纳米气泡浓度的提升有助于改善燃料的着火性能。

2. 不同浓度纳米气泡柴油均可使纳米气泡柴油燃烧火焰面积减小,自发光度减小,燃烧平均温度降低,火焰燃烧温度梯度降低,同时KL因子降低。纳米气泡柴油可以有效减少火焰的>1600K的高温区域,KL因子场分布表现出与温度场分布有很强的关联性,纳米气泡的加入对改善火焰温度场分布、抑制碳烟排放具有积极的作用。

参考文献:

- [1] 孙万臣,解方喜,孟德军,刘忠长. GTL/柴油混合燃料对直喷式柴油机排放特性的影响[J]. 内燃机工程, 2010, 31(05): 87-91+96.
Effects of GTL/Diesel Blend Fuel on Emissions from DI Diesel Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(05): 87-91+96.
- [2] 黄震,张顺元,张连方. 燃油溶气喷射对柴油机燃烧和排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 1996(04): 299-306
Huang Z. Evaluation of the effect of injection of fuel containing dissolved gas on diesel combustion and emissions[J]. Journal of Combustion Science and Technology (China), 1996, 2(4). : 299-306
- [3] Jin X, Zhen H, Xinqi Q, et al. The effect of CO₂ dissolved in a diesel fuel on the jet flame characteristics[J]. Fuel, 2008, 87(3): 395-404.
- [4] Rashkovan A, Sher E. Flow pattern observations of gasoline dissolved CO₂ inside an injector[J]. Atomization and sprays, 2006, 16(6).
- [5] Rashkovan A, Kholmer V, Sher E. Effervescent atomization of gasoline containing dissolved CO₂[J]. Atomization and Sprays, 2004, 14(4).
- [6] Ju D, Jia X, Huang Z, et al. Comparison of atomization characteristics of model exhaust gas dissolved diesel and gasoline[J]. Fuel, 2016, 182: 928-934.
- [7] Aybers N M, Tapucu A. Studies on the drag and shape of gas bubbles rising through a stagnant liquid[J]. Wärme-und Stoffübertragung, 1969, 2(3): 171-177.
- [8] Oh S H, Kim J M. Generation and stability of bulk nanobubbles[J]. Langmuir, 2017, 33(15): 3818-3823.
- [9] Takahashi M, Chiba K, Li P. Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2007, 111(6): 1343-1347.
- [10] Oh S H, Yoon S H, Song H, et al. Effect of hydrogen nanobubble addition on combustion characteristics of gasoline engine[J]. International journal of hydrogen energy, 2013, 38(34): 14849-14853.
- [11] Nakatake Y, Kisu S, Shigyo K, et al. Effect of nano air-bubbles mixed into gas oil on common-rail diesel engine[J]. Energy, 2013, 59: 233-239.
- [12] Gobinath S, Senthilkumar G, Beenkumar N. Air nanobubble-enhanced combustion study using mustard biodiesel in a common rail direct injection engine[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019, 41(15): 1809-1816.
- [13] Alias E A, Hagos F Y, Ishak M I, et al. Performance and Emission characteristics of microbubble-enhanced fuels in a diesel engine[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(3): 2630-2638.
- [14] Kawamura K, Saito A, Yaegashi T, et al. Measurement of flame temperature distribution in engines by using a two-color high speed shutter TV camera system[J]. SAE Transactions, 1989: 434-441.
- [15] Hampson G J, Reitz R D. Two-color imaging of in-cylinder soot concentration and temperature in a heavy-duty DI diesel engine with comparison to multidimensional modeling for single and split injections[J]. SAE transactions, 1998: 659-682.