

柴油喷雾燃烧火焰内部碳烟采集与分析

邓鹏¹ 丁红元¹ 邓磊¹ 孟宪超² 黄荣华²

(1. 武汉第二船舶设计研究院, 武汉 430064; 2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为研究碳烟颗粒在柴油喷雾火焰内部的演变规律,在可视化定容弹喷雾燃烧系统中增加一种基于热泳原理的碳烟颗粒采集装置,获得了喷雾燃烧火焰内部的碳烟颗粒样本,并在高倍透射电镜下获得样本中不同尺度的碳烟形态图像。根据图像中碳烟宏观和微观形态结构特征分析了碳烟生成、聚合等演变历程。通过自行开发的图像处理程序,分析得到碳烟颗粒尺寸参数随喷射距离的变化特征。研究表明,该方法实现柴油机缸内高温高压特征环境下碳烟颗粒的采集与高倍电镜分析技术的有机结合,有效获取柴油喷雾火焰内部碳烟颗粒微观信息,为减少柴油机碳烟排放提供了重要研究手段和基础研究信息。

关键词: 柴油; 喷雾燃烧; 碳烟; 热泳探针; 定容燃烧弹; 高倍透射电镜

中图分类号: TK421.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0364-05

Capture and Analysis of Soot Formed inside Combustion Diesel Spray Flame

Deng Peng¹ Ding Hongyuan¹ Deng Lei¹ Meng Xianchao² Huang Ronghua²

(1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China

2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to investigate the evolution principle of soot formed inside the diesel spray flame, a soot trapping device was developed based on the thermophoretic phenomenon. The device was applied to a constant-volume combustion chamber to capture the soot formed during the combustion process of diesel spray. The soot captured was then observed and imaged by the high-resolution transmission electron microscopy. Soot images were taken at 200 nm and 10 nm scales to investigate their overall and local detailed features. The evolution of soot was analyzed according to its macro and micro structure characters. Furthermore, the soot particle size along the spray flame axial was investigated by image processing program based on Matlab. The result showed that the production of primary particles formed inside the flame promoted the aggregation of soot, the number of primary particles was increased at 60 mm and 80 mm downstream of the spray, and then it was decreased at 80 mm and 100 mm downstream of the spray. Meanwhile, the number of aggregated soot particles was increased along the spray axis. The diameter of the primary particles was about 30 nm, and the diameter of soot aggregation particles was no larger than 100 nm. In addition, the internal arrangement of the primary particles trended to be less chaos. The carbon coated copper gird survived the extreme environments inside the chamber without being burnt, warped, melted or oxidized. The device works well and it provides a new experimental method for the soot formation mechanism research at typical high pressure and high temperature environment inside the modern diesel engine.

Key words: diesel fuel; spray combustion; soot; thermophoretic probe; constant-volume combustion bomb; high-resolution transmission electron microscopy

引言

为减少柴油机碳烟排放,需了解碳烟在柴油机缸内的演变历程^[1-2]。为此国内外学者研发出多种测量碳烟的方法:激光炽光法 LII^[3-4]、消光法等^[5-6]。基于激光的测量技术可以获取喷雾燃烧火焰不同时刻下碳烟颗粒的空间浓度分布特性;而使用低压撞击器采集^[7]并用高倍电镜观测^[8-9]的方法则可以获得柴油机经历完整工作历程后的碳烟的尺寸分布和形态特征。尽管这些技术为解释碳烟的演变历程提供了大量有用信息,但这些方法都缺少燃油喷雾着火过程中碳烟生成的具体形态数据。因此喷雾火焰内部碳烟的实际演变过程成为当前研究热点^[10]。

柴油机缸内复杂恶劣的环境使这一研究遇到极大挑战^[8],但定容弹可以模拟高温高压的缸内燃烧环境,避免缸内采样的诸多不便^[11],为这一问题的研究提供了有利条件。本文充分借鉴 Nerva 等^[12]和 Lee 等^[13]在燃烧器火焰中采集碳烟的方法,利用热泳原理,设计一种在定容燃烧弹内采集柴油喷雾燃烧火焰中碳烟颗粒的热泳探针。利用该探针在柴油喷雾火焰不同位置进行碳烟样本的采集,然后用高倍电镜对所采集的碳烟样本进行成像。最后通过图像分析碳烟的形态演变特征,并利用自编程序对碳烟尺寸分布进行分析。

1 试验原理

热泳现象是指在温度梯度不为零的气体或悬浮体中,粒子在分子热运动作用下向较冷区域运动的现象,其本质是粒子高温侧分子热运动对粒子的撞击合力大于低温侧的撞击合力。热泳现象的驱动力为高温流体与冷壁面附近的温度梯度。本文通过热泳探针与喷雾火焰的温度梯度来捕获喷雾火焰内部的碳烟颗粒。

2 试验装置与方法

2.1 定容燃烧弹

本文使用的可视化定容弹喷雾燃烧试验系统^[14]采用预混燃烧方式加热,能模拟出内燃机气缸内高温高压的喷雾燃烧环境。该定容弹(CVCB)内部为边长 136 mm 的正方形燃烧室,柴油喷雾的自由行程为 130 mm。碳烟采样设备整体置于定容弹内,避免了密封难题。燃油系统采用博世电控高压共轨喷油系统^[15],其最高喷油压力为 200 MPa。喷油器头部为实测直径 0.234 mm 的单孔喷嘴,喷孔轴线与喷油器轴线重合。如图 1 所示,热泳探针固

定在采样装置上,并位于喷雾轴线平面,正对单孔喷嘴进行碳烟采集。

整个试验过程高温持续时间不足 3 s,可认为热泳探针和采样装置的温度与定容弹壁面温度一致,约为 383 K。定容弹喷雾燃烧系统的具体结构、工作原理和试验方法参见文献^[14]。

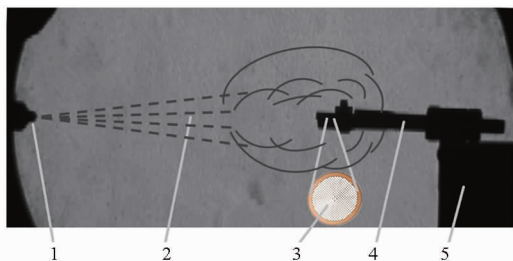


图 1 定容弹内碳烟采样装置与喷嘴位置关系

Fig. 1 Relative position between nozzle tip and soot sampling device inside CVCB

1. 单孔喷嘴 2. 喷雾 3. $\phi 3$ mm 铜支持膜 4. 热泳探针 5. 取
样装置

2.2 热泳探针

如图 2 所示,碳烟采样装置由基座、滑轨、热泳探针和紧固盖板组成。基座采用固定高度,保证喷雾轴线位于采样平面内,基座底部设定位孔,确保基座轴线与喷雾轴线位于同一平面,基座宽度比定容弹内腔略小,以方便安装和调整滑轨。为减少对喷雾的影响,基座设计为 U 型结构。在滑轨特定位置加工有热泳探针安装孔,以精确定位取样点与喷雾轴线的距离。滑轨可沿基座滑槽移动,配合本文相机测距,可精确调节热泳探针与喷嘴的距离。

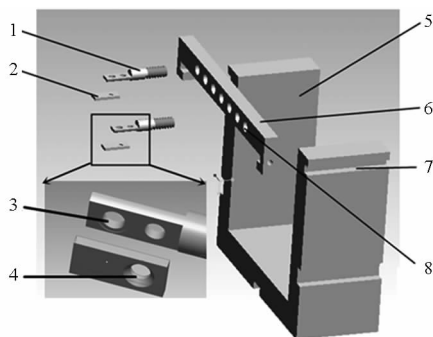


图 2 碳烟采样装置示意图

Fig. 2 Diagram of soot sampling device

1. 热泳探针 2. 紧固盖板 3. 采样孔 4. 紧固螺钉孔 5. 基座
6. 滑轨 7. 滑槽 8. 热泳探针安装孔

热泳探针位于采样装置的头部,其核心零件是用于电镜分析的直径 3 mm 铜支持膜。支持膜由热泳探针和紧固盖板配合固定,通过 M2 紧固螺钉锁紧。热泳探针头部为铣刀加工的 1.5 mm 薄片结构,尾部为与热泳探针安装孔相配的 M5 外螺纹。在薄片结构前部加工直径 2.2 mm 的通孔作为采样

通道,该孔与紧固盖板安装浅坑正对。由于支持膜极其轻薄,当安装配合面存在缝隙时,支持膜会被气流带走,因此热泳探针和紧固盖板的配合面均用铣刀加工平整,保证表面粗糙度不超过 $R_a 1.6$ 。为防止支持膜受力破损,用铣刀在紧固盖板上加工直径 3.5 mm、深 0.05 mm 的安装浅坑。

在保证采集到足够碳烟样本的前提下,铜支持膜暴露在高温火焰中的时间需控制,使其温度保持在较低状态。考虑到喷雾滞燃期、喷雾燃烧持续时间、碳烟淬息时间等因素,采样通孔深度取 1.5 mm^[13]。

当喷雾火焰经过热泳探针的取样面时,碳烟在热泳力作用下进入探针头部采样孔。由于热惯性,热泳探针温度远低于喷雾火焰温度,促使粘附到支持膜上的碳烟颗粒停止一切化学反应,保持碳烟在喷雾火焰中的原始形态^[13]。若要在喷雾燃烧时间轴线上确定所采碳烟的生成时间,则还需要测出采集碳烟过程中该装置的温度变化历程,从而计算出热泳力和碳烟的冷却时间。

2.3 高倍电镜

试验用 Tecnai G2 20 型高倍透射电镜(HRTEM),属于当今较先进的 200 kV 分析电镜,具有较高的亮度和分辨率,能快速有效地采集和处理信号。为观测到碳烟颗粒内部细节特征,试验中采用的最高分辨率为 0.248 nm(点),0.144 nm(线)。

HRTEM 使用的铜支持膜(图 1),其直径为 3 mm,厚度仅 40 nm。为采集碳烟,需要将铜支持膜直接暴露在温度高达 900~2 000 K 的喷雾火焰中,铜支持膜存在变形、氧化、烧蚀和熔化的风险,为此本文专门设计制作用于夹持铜支持膜的热泳探针。

2.4 碳烟图像处理方法

比对不同观测尺度的碳烟样本电镜图像,发现观测尺度在 200 nm 级别时可以较好地反映颗粒级别的碳烟特征,而观测尺度在 10 nm 级别时可以较好地反映原子级别的碳烟特征。由于图像特征和测量目标不同,两类图像需要使用不同的图像处理方法。

200 nm 级碳烟图像上记录有多个碳烟颗粒,适合用于分析碳烟颗粒形态特征和统计碳烟粒径分布特征等颗粒级别的特征。图像中碳烟粒子基本为稀疏的离散状态,颗粒边界较为清晰且与背景的色差较大。针对这些特点,采用 Matlab 软件编写专用处理程序得到视场内碳烟颗粒数及其尺寸分布。

200 nm 级碳烟图像处理步骤为:①用局部阈值法^[16]对图像进行二值化。先统计图像的灰度直方图,用波形分析法确定每一帧图像的局部分割阈值,实际操作中,灰度直方图一般呈双峰分布,高

亮背景对应于高灰度的波峰,碳烟颗粒对应于低灰度的波峰。敏感性分析表明当分割阈值取为 2 个波峰灰度的 25%~75% 时对结果的影响非常小^[17],本文取 2 个波峰灰度的平均值作为分割阈值,其灰度约为 110,将灰度超过分割阈值的点灰度设为 255,灰度低于分割阈值的点灰度设为 0。②对图像进行去噪声处理^[18]。二值化后的图像中存在均匀分布的小噪声点。对比原图后发现这类噪声点面积远小于碳烟颗粒,即二值化图像中像素数小于 50 的联通区域是噪声点,而像素数大于 300 的联通区域才是碳烟颗粒。③识别离散碳烟边界^[19],去除噪声点后,只保留各联通区域的边界信息以便于计算。④根据识别出来的碳烟颗粒边界,统计碳烟颗粒数目与粒径分布,每个联通区域的回转半径作为碳烟粒径。

10 nm 级碳烟图像上只有团聚态碳烟颗粒上的一个碳球,从图像中可以看出碳球内部结构细节特征。碳球内部表现出层层堆积的结构,局部外形呈现出较为规则的圆球状。

2.5 试验条件与流程

试验条件见表 1。试验所需的高温高压环境,通过在定容弹内燃烧体积分数比例为 24.7:4.0:71.3 的氧气/乙炔/氮气混合气体产生。预混气体燃烧后环境氧浓度为 15%,以模拟较高 EGR 率环境。为防止铜支持膜被高温火焰烧蚀,环境气体温度取 900 K,环境气体密度取 7.5 kg/m³。试验过程使用的燃料为普通柴油。

表 1 定容弹内碳烟采样工况条件

Tab. 1 Experimental conditions of soot sampled inside CVCB

参数	数值
燃油	普通柴油
环境气体温度 T_a/K	900
环境气体密度 $\rho_a/(kg \cdot m^{-3})$	7.5
氧浓度/%	15
喷嘴型式	单孔喷嘴
喷油压力 p_{inj}/MPa	150
喷油持续时间 τ/ms	2.5
喷嘴直径 d_{noz}/mm	0.234
采样距离 S/mm	60、80、100

整个试验流程如下:①在进行柴油喷雾火焰中碳烟采样试验前,对该试验条件下预混气体燃烧过程进行碳烟采集分析试验,以了解该条件下乙炔燃烧是否会产生和残留碳烟,验证铜支持膜是否能够在高温火焰环境下保持稳定。②定容弹内不放置碳烟采集装置,对柴油喷雾燃烧过程进行可视化的试验研究和模拟分析,掌握燃烧过程中关键参数,如燃

空当量比分布规律等。③在定容弹内放置碳烟采集装置,利用热泳探针采集喷嘴下游 60、80、100 mm 处的碳烟样本。④在电镜下观测采集到的碳烟样本,在适宜的观测尺度下抓拍观测图像^[20]。⑤利用自编图像分析软件对电镜下拍摄的碳烟图像进行处理和分析。

3 试验结果分析

3.1 乙炔预混气燃烧过程分析

为排除乙炔燃烧对后续柴油燃烧过程碳烟取样的影响,先对乙炔燃烧过程进行碳烟采集试验。试验中预混合气体的试验参数与表 1 中保持一致,但电控高压共轨喷油系统不工作。多次采集试验证明乙炔燃烧过程中并无碳烟产生。因此可以认为乙炔燃烧不会对采样试验产生干扰。

预混燃烧过程持续了约 100 ms,铜支持膜在高于铜熔点的高温氧化环境中停留约 600 ms,试验表明铜支持膜未发生变形、熔化、氧化和烧蚀。

3.2 柴油喷雾燃烧过程分析

为确定热泳探针离喷嘴的距离,先在无采样装置的情况下对柴油喷雾燃烧过程进行研究。

如图 3 所示,图 3a 为未采集碳烟样本时,图 3b 为采集碳烟样本时柴油喷雾燃烧过程,图中粗实线为采样孔所在位置。从图中可以看出放置采样装置对采样位置处喷雾几乎无影响。

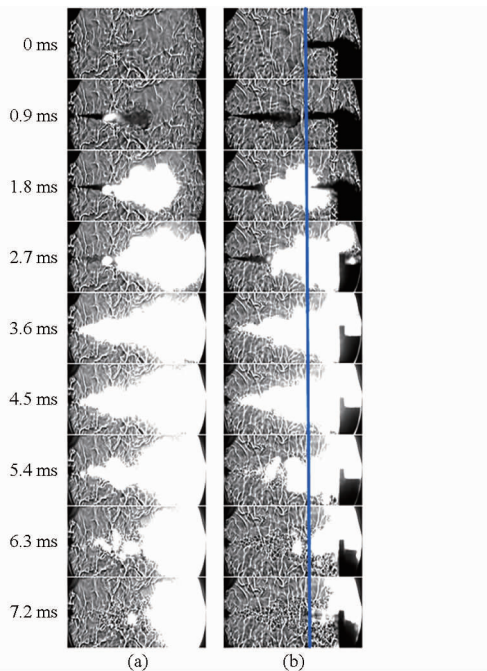


图 3 取样装置对喷雾燃烧过程影响

Fig. 3 Influence of sampling device on spray combustion process

通过高速纹影图像得出柴油喷雾的火焰升举长度为 37 mm,柴油喷雾燃烧过程持续仅 10 ms 左右。

因此将碳烟采样位置定为 60、80、100 mm 3 个位置,可以分析碳烟在柴油喷雾火焰内的生成和演化历程。该试验还表明柴油喷雾火焰也未给铜支持膜带来任何影响。

3.3 200 nm 级碳烟图像分析

在高倍电镜下将喷雾火焰中取得的碳烟样本放大至 200 nm 级别进行观测,其团聚态颗粒图像如图 4 所示,3 张图像分别为喷嘴下游 60、80、100 mm 处的碳烟样本。从图 5 中可以看出,在 60 ~ 100 mm 处都有大量的基元碳粒和一定数量的团聚态碳烟颗粒。在 60 mm 处颗粒尺寸较小,数量密度也较小。80 mm 处较 60 mm 处颗粒尺寸大,数量密度也明显增加。100 mm 处只有少量小粒径的碳烟颗粒,以及偶尔出现大尺寸碳烟颗粒。

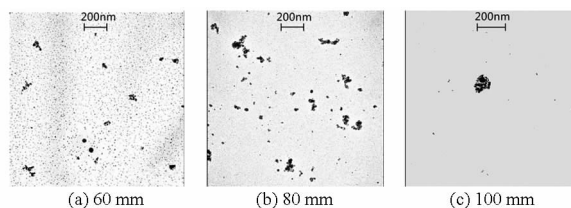


图 4 60、80、100 mm 处碳烟样本图像

Fig. 4 Pictures of soot particles sampled from 60, 80 and 100 mm downstream of nozzle tip (observed at 200 nm scale)

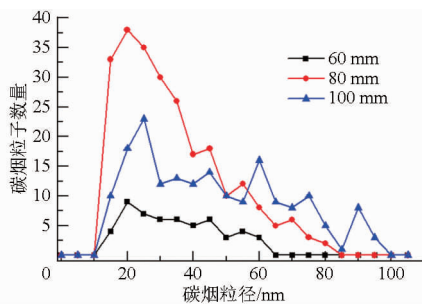


图 5 60、80、100 mm 处碳烟粒径分布

Fig. 5 Distribution of soot particle size sampled from 60, 80 and 100 mm downstream of nozzle tip

3 个采样位置处的碳烟粒径主要分布在 10 ~ 100 nm 之间。60 mm 处碳烟粒径不超过 60 nm,碳烟数量密度较低,各种粒径的碳烟数量密度较均匀。在 80 mm 处,各种粒径的碳烟数量密度极不均匀,粒径 20 nm 左右的碳烟数量显著增加,说明喷雾火焰从 60 mm 发展到 80 mm 的过程中,碳烟在快速生成,最大碳烟粒径增加到 80 nm 左右,粒径 40 nm 以上碳烟数量成倍增加,表明这一过程中碳烟在聚合生长,碳烟颗粒形成的速度要高于碳烟颗粒聚合的速度。在 100 mm 处,粒径分布变得平缓,20 nm 级颗粒明显减少,粒径分布范围也拓展至 100 nm 左右,表明这一阶段中碳烟的生成速度已经得到抑制,碳烟颗粒仍在继续聚合变大。

3.4 10 nm 级碳烟图像分析

如图6所示为在柴油火焰内部3个位置处碳烟颗粒内部碳球的显微结构。团聚态碳烟颗粒均由这些碳球聚合而成,碳球的粒径均为30 nm左右,说明碳球在聚合后,其外形轮廓基本趋于稳定。碳球内部均存在尺度约为3 nm左右的纤维状结构,但纤维状结构的纹理却呈现出不同特点。在60 mm处,碳球的纤维没有明显方向取向,呈随机堆叠状。在80 mm处,碳球外层纤维出现较为明显的方向取向,呈洋葱状纹理,而基元碳粒的中心区域纤维仍保持随机取向。在100 mm处,基元碳粒中纤维纹理呈稳定的洋葱结构。说明在聚合态碳烟的基元碳粒内

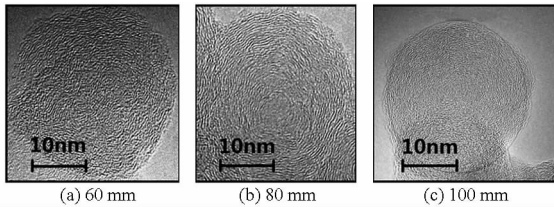


图6 60、80、100 mm处10 nm级单个碳烟微观结构

Fig.6 Microstructure of primary soot particles sampled from 60, 80 and 100 mm downstream of nozzle tip (observed at 10 nm scale)

仍有化学反应,随着反应的进行,其混乱度降低。

4 结论

(1) 采用热泳探针,对柴油喷雾火焰内部碳烟采样,是一种可行的碳烟采集方式。铜支持膜短暂暴露于高温火焰中不会发生变形、氧化、烧蚀或熔化。定容弹内热泳探针取样为研究喷雾火焰内部碳烟演变历程提供了样本来源,结合高倍电镜纳米级的观测能力,为分析柴油喷雾火焰内部碳烟的演变提供了重要技术手段。

(2) 喷雾火焰内部碳烟颗粒的生成促进了碳烟颗粒的聚合,但其粒径保持在百纳米量级。受湍流影响,碳烟碰撞聚合是随机过程,碳烟的形貌也因此随机变化,但是组成碳烟的碳球外形特征基本保持不变,碳球直径保持在30 nm左右。

(3) 单个碳球在喷雾火焰中形成后,其内部结构仍在持续变化,碳球内部存在特征长度3 nm左右的纤维状结构。随喷雾发展,单个碳球纤维状结构从颗粒外部到内部趋于有序化,结构逐渐稳定。通过改变燃烧环境条件,从源头上抑制碳球的形成是减少碳烟排放的重要途径。

参 考 文 献

- 1 汤东,李昌远,葛建林,等.柴油机掺烧生物柴油 NO_x 和碳烟排放数值模拟[J].农业机械学报,2011,42(7):1-4.
Tang Dong, Li Changyuan, Ge Jianlin, et al. NO_x and particulate emissions numerical simulation of diesel blended with biodiesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 1-4. (in Chinese)
- 2 许广举,王忠,毛功平,等.改性生物柴油碳烟与 NO_x 排放试验[J].农业机械学报,2011,42(1):8-11.
Xu Guangju, Wang Zhong, Mao Gongping, et al. Experimental on the smoke and NO_x emissions of modified biodiesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 8-11. (in Chinese)
- 3 Kuribayashi M, Ishizuka Y, Aizawa T. Sizing of soot particles in diesel spray flame—a qualitative comparison between TEM analysis and LII/scattering laser measurements [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013, 6(3): 641-650.
- 4 Menkiel B, Donkerbroek A, Uitz R, et al. Combustion and soot processes of diesel and rapeseed methyl ester in an optical diesel engine [J]. Fuel, 2014, 118: 406-415.
- 5 Wu Y, Huang R, Lee C F, et al. Effects of the exhaust gas recirculation rate and ambient gas temperature on the spray and combustion characteristics of soybean biodiesel and diesel [J]. Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 226(3): 372-384.
- 6 吴毅峰.大豆生物柴油在不同环境条件下燃烧与碳烟排放特性的研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
Wu Yifeng. Study on the combustion and soot emission characteristics of soybean biodiesel under different ambient conditions [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 7 鞠洪玲.柴油机碳烟颗粒生成规律和尺寸分布特性的研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
Ju Hongling. Study on formation laws and size distribution of soot in the diesel engines [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 8 Kook S, Zhang R, Szeto K, et al. In-flame soot sampling and particle analysis in a diesel engine [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013, 6(1): 80-97.
- 9 马志豪,张小玉,马凡华,等.生物柴油/柴油发动机排放颗粒电镜分析[J].农业机械学报,2012,43(7):19-23.
Ma Zhihao, Zhang Xiaoyu, Ma Fanhua, et al. HRTEM analysis of particles of diesel engine fuelled with biodiesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 19-23. (in Chinese)
- 10 Kondo K, Aizawa T, Kook S, et al. Uncertainty in sampling and TEM analysis of soot particles in diesel spray flame [C]. SAE Paper 2013-01-0908, 2013.
- 11 Kook S, Pickett L M. Soot volume fraction and morphology of conventional, fischer-tropsch, coal-derived, and surrogate fuel at diesel conditions [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2012, 5(2): 647-664.

- 11 Parush A, Pulsifer P, Philp K, et al. Understanding through structure: the challenges of information and navigation architecture in cybercartography[J]. *Cartographica*, 2006, 41(1):21-34.
- 12 Ding Liang, Gao Haibo, Deng Zongquan, et al. Foot-terrain interaction mechanics for legged robots: modeling and experimental validation[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(13): 1585-1606.
- 13 Saranli U, Buehler M, Koditschek D E. RHex: a simple and highly mobile hexapod robot[J]. *The International Journal of Robotics Research*,2001,20(7):616-631.
- 14 Holmes P, Full R J, Koditschek D, et al. The dynamics of legged locomotion: models, analyses, and challenges [J]. *Siam Review*, 2006, 48(2): 207-304.
- 15 李建桥,张晓冬,邹猛,等. 中华绒螯蟹平面运动三维观测和步态分析[J]. *农业机械学报*,2012,43(增刊):335-338.
Li Jianqiao, Zhang Xiaodong, Zou Meng, et al. 3-D surveying and gaits analysis of chinese mitten crab in smooth road[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 335-338. (in Chinese)
- 16 Mitchell S C, DeMont M E. Analysis of the mero-carpopodite joint of the American lobster and snow crab. II. Kinematics morphometrics and moment arms[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 2003,83(6): 1249-1259.
- 17 Chapple W. Kinematics of walking in the hermit crab, *Pagurus pollicarus*[J]. *Arthropod Struct & Development*, 2012, 41(2): 119-131.
- 18 张晓冬,李建桥,邹猛,等. 中华绒螯蟹平面运动三维观测和动力学分析[J]. *农业工程学报*,2013, 29(17): 30-37.
Zhang Xiaodong, Li Jianqiao, Zou Meng, et al. Three-dimensional observation and dynamics analysis of Chinese mitten crab's locomotion on smooth terrain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(17): 30-37. (in Chinese)
- 19 Martinez M M, Full R J, Koehl M A R. Underwater punting by an intertidal crab: a novel gait revealed by the kinematics of pedestrian locomotion in air versus water[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1998, 201(18): 2609-2623.
- 20 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2001.

(上接第 368 页)

- 12 Nerva J-G, Yamaguchi T, Iguma H, et al. Transmission electron microscopy of soot particles sampled directly from a biodiesel spray flame[C]. *SAE Paper 2011-01-2046*, 2011.
- 13 Lee J, Altman I, Choi M. Design of thermophoretic probe for precise particle sampling[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(5): 418-431.
- 14 邓鹏. 定容弹内低温燃烧条件下乙醇柴油喷雾和燃烧特性实验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014.
Deng Peng. Experimental research on ethanol-diesel spray and combustion under low temperature combustion conditions in a constant volume combustion bomb[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- 15 邓鹏,黄荣华,张永林,等. 一种预混燃烧加热式定容燃烧弹的研发[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2013, 41(8): 121-126.
Deng Peng, Huang Ronghua, Zhang Yonglin, et al. Development of a constant volume combustion bomb heated by premixed burning[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2013, 41(8): 121-126. (in Chinese)
- 16 王兆文,李浩,黄都,等. 基于 Matlab/GUI 的汽油机缸内直接喷雾图像处理方法[J]. *农业机械学报*, 2013,44(9):19-23.
Wang Zhaowen, Li Hao, Huang Du, et al. Digital image processing method of gasoline direct injection spray based on Matlab/GUI [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2013,44(9):19-23. (in Chinese)
- 17 Ma Y J, Huang R H, Deng P, et al. The development and application of an automatic boundary segmentation methodology to evaluate the vaporizing characteristics of diesel spray under engine-like conditions [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(4): 045004.
- 18 邓鹏,黄荣华,马寅杰,等. 强化混合条件下乙醇柴油和柴油的喷雾混合特性 [J]. *内燃机学报*, 2014, 32(2): 144-151.
Deng Peng, Huang Ronghua, Ma Yinjie, et al. Atomization and mixture formation characteristics of ethanol-diesel and diesel under intensified mixing conditions[J]. *Transactions of CSICE*, 2014,32(2): 144-151. (in Chinese)
- 19 Huang S, Deng P, Huang R, et al. Visualization research on spray atomization, evaporation and combustion processes of ethanol-diesel blend under LTC conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015,106:911-20.
- 20 赵洋,王忠,刘帅,等. 废气再循环气体成分对柴油机颗粒结构特征的影响[J]. *农业机械学报*,2015,46(7):280-285.
Zhao Yang, Wang Zhong, Liu Shuai, et al. Effect of gas composition in exhaust gas recirculation on structural feature of particulates from diesel engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(7):280-285. (in Chinese)