

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.006

生物柴油发动机燃烧火焰与放热过程特性研究*

梅德清¹ 袁银男² 孙平¹ 王忠¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 南通大学机械工程学院, 南通 226019)

【摘要】 为研究生物柴油与柴油燃烧及放热过程的差异,应用高速摄影采集了柴油机燃用豆油甲酯和柴油的缸内燃烧火焰图像,实测了缸内压力示功图。以直接的火焰辉度图像结合放热规律分析,揭示了生物柴油和柴油缸内燃烧的历程。在未调整发动机燃烧系统参数的前提下,生物柴油因弹性模量大和十六烷值高的综合贡献,使着火时刻较柴油提前 1.5°CA ,其中生物柴油开始喷油时刻较柴油提前 0.7°CA ;在速燃期生物柴油燃烧火焰最亮辉度和持续时间均低于柴油。在燃烧的最后阶段,没有明显火焰的化学反应释放出的热量仅占 $2\% \sim 3\%$ 。

关键词: 柴油机 生物柴油 燃烧火焰 放热过程

中图分类号: TK428.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0026-05

Features of Burning Flames and Heat Release Process of Biodiesel Engine

Mei Deqing¹ Yuan Yinnan² Sun Ping¹ Wang Zhong¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract

With the aim to reveal the difference of combustion and heat release process in cylinder of engine fueled with soya methyl ester and petroleum diesel, high speed photography was used to catch combustion flame images in cylinder and thereafter the pressure indicator diagram was collected to compute the heat release rate. The combustion processes of biodiesel and petrolic diesel were illustrated in the crank angle coordinate with the direct flame images combined with analysis of heat release. Due to the contribution of bigger bulk modulus and higher cetane number of biodiesel, the beginning of injection for biodiesel was 0.7°CA earlier than that for diesel, and the ignition time of biodiesel occurred earlier 1.5°CA than that of diesel, under the unimproved conditions of fuel supply system. During the rapid combustion period, both the brightness and its lasting time of biodiesel were less than that of diesel. The heat released by the chemical reactions without obvious flame at the end of combustion only accounted for $2\% \sim 3\%$ of the total cycle heat energy released by fuel.

Key words Diesel engine, Biodiesel, Combustion flame, Heat release process

引言

生物柴油的燃料理化特性因与石化柴油更为接近,大量使用可以减少温室气体排放,目前已被广泛接受用作石化柴油的代用燃料^[1-4]。生物柴油能以任何比例和柴油掺混或者直接柴油机上使用,不需对柴油机做较大调整。此外,生物柴油还具有不

含硫和芳香烃、十六烷值较高和可生物降解等特点。

柴油机的喷雾与燃烧过程直接决定了燃料能量利用的效率与燃烧产物的排放性能。为了得到发动机缸内喷油和着火时刻、火焰发展与瞬时放热率等特征参数,可采用光学技术对发动机缸内油气混合、雾化和燃烧过程进行诊断^[5-7]。直接图像法是光学诊断系统中的一种方法,即通过内窥镜接收缸内的

收稿日期: 2012-05-10 修回日期: 2012-05-22

* 国家自然科学基金资助项目(51076069)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2011]6号)

作者简介: 梅德清,副教授,主要从事发动机工作过程与新能源研究, E-mail: meideqing@ujs.edu.cn

光然后形成图像,对缸内工作过程进行最直接的观察。本文结合放热规律计算,对柴油机燃烧过程中的火焰发光与放热现象在曲轴转角坐标系内作一综合描述,并研究含氧的酯基燃料在喷射特性、着火时刻、火焰辉度、放热速率等方面与石化柴油的差异,以确定生物柴油应用于柴油机的适应性。

1 试验装置与方法

喷油过程中没有燃烧发生,为了能够同时获取油束和火焰图像,向燃烧室中引入光源,因此在缸盖上布置 2 个内窥镜,一个引入光源,另一个接收光源。由于内窥镜不能经受高温,因此引入水流来冷却。

试验用发动机为 490 型直喷式自然吸气柴油机,高速摄影装置为 AVL 513 Engine Video System,气缸压力采集装置为 Dewetron2000。试验前先用频闪仪确定出发动机的上止点位置,设定火焰照片间隔角为 1.0°CA ,精度为 0.1 ms 。火焰照片的拍摄范围为上止点前 20°CA 到上止点后 48°CA ,包括了从喷油开始到看不到明显火焰(亮光)为止的持续时间。

发动机起动后,待目标工况稳定后即开始拍摄。在每拍摄一个工况后,取出内窥镜石英窗去除积碳后再次使用,避免因石英窗积碳而导致图像不清晰。更换燃料时,将整个低压油路和高压油路中积存的燃油全部放完,以免影响燃料的燃烧特性。在完成缸内燃烧图像拍摄后,采集了缸内压力示功图,并进行了放热规律计算。试验燃料为生物柴油(豆油甲酯 SME)和 0 号柴油,燃料的物性参数见表 1。

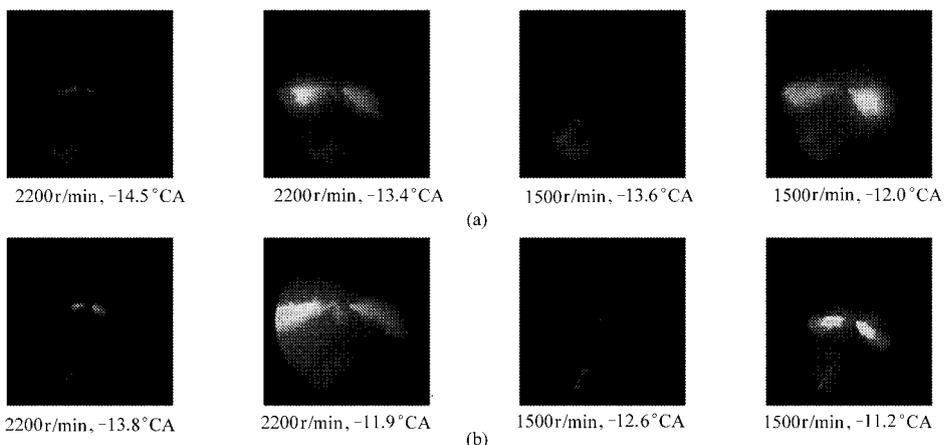


图 1 燃油喷射过程缸内影像

Fig. 1 Images in cylinder during fuel injection

(a) 生物柴油 (b) 0 号柴油

对于喷油延迟期的差异,需要从燃料在高压下的物理特性参数对输运特性的影响来解释。燃油的绝热压缩和运动粘度对燃油喷射过程有重要影响。图 2 表明了生物柴油和柴油弹性模量随温度和压力

表 1 燃料的物性参数

Tab. 1 Physical and chemical properties of fuels

参数	0 号柴油	SME
密度 (15°C)/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.834	0.881
粘度 (15°C)/ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	2.40	4.47
闪点/ $^\circ\text{C}$	55	178
十六烷值	>45	51.2
化学分子式		$\text{C}_{53}\text{H}_{101}\text{O}_6$
计量空燃比	14.30	12.55
C 质量分数/%	87.0	76.4
H 质量分数/%	12.6	12.1
O 质量分数/%	0.4	11.5
低热值/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	42 500	37 273

2 缸内燃烧过程分析

2.1 喷油过程

以生物柴油和 0 号柴油作为燃料供给柴油机时,发动机的燃油供给系统未作调整,两者的开始供油时刻一致。图 1 为柴油机燃用生物柴油和 0 号柴油可见油束的缸内影像图片。当发动机在转速 $n = 2\ 200\text{ r/min}$, $p_{me} = 0.54\text{ MPa}$ 工况下,燃用生物柴油的可见喷油时刻为 -14.5°CA ,燃用 0 号柴油的可见喷油时刻为 -13.8°CA ,两者相差约 0.7°CA 。从 $n = 1\ 500\text{ r/min}$, $p_{me} = 0.45\text{ MPa}$ 工况下油束经过一段时间发展后的影像可以看出,两者相差 0.8°CA 。从两个转速下燃油喷射时刻的影像图片可以判断出生物柴油的喷油时刻略早一些,即喷油延迟期缩短。

的变化关系,该图的数据源自文献[8~9]提供的公式。随着压力增加或温度下降,弹性模量将增加,生物柴油和柴油两者的弹性模量曲线的斜率不一致。生物柴油燃料结构中含有氧,其密度增加,在

高压下的压缩性能较0号柴油低,弹性模量大。因而,在高压状态的输油管路中,生物柴油的输运延迟较短。

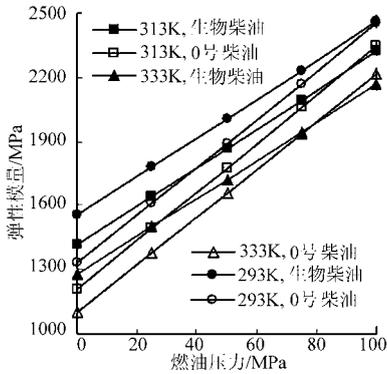


图2 生物柴油与柴油的弹性模量曲线

Fig. 2 Bulk modulus of biodiesel and petrolic diesel

2.2 着火过程

在油束的边缘区域,燃料与空气形成较浓的混合气,燃空当量比为 $2 \sim 4$ ^[10]。在柴油机燃烧室内经过低温多阶段着火,随后在蒸气区观察到化学发

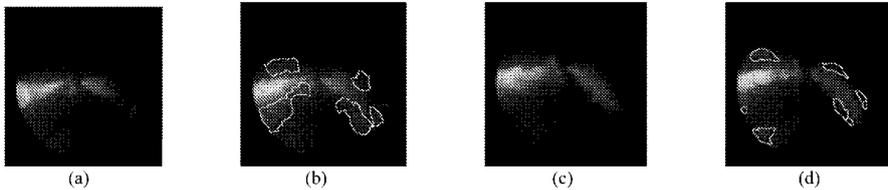


图3 柴油机燃用生物柴油与0号柴油可见明显火焰

Fig. 3 Ignition flame images of biodiesel and petrolic diesel

(a) 生物柴油, -5.2°CA (b) 生物柴油, -4.3°CA (c) 0号柴油, -3.5°CA (d) 0号柴油, -2.8°CA

2.3 燃烧过程

该发动机的涡流方向为顺时针方向。涡流对混合的促进作用使得沿涡流方向的油气混合最快,更先形成可燃混合气,火焰最先在这里产生并开始传播。随着燃烧的推进,预混阶段的可燃混合气迅速烧尽,转而进入扩散燃烧阶段,并在燃油蒸气与空气混合的浓区发现少量碳烟生成。这时尽管缸内的较高温度促使燃油快速气化,但空气与燃料相互之间的扩散和混合速度有限,因而在高温条件下油束周围的过浓混合气中出现碳烟^[11-12]。喷油后期,喷油速率低,喷孔处油滴破碎和蒸发很慢;且靠近气缸中心,涡流运动速度很低,燃油与空气的混合不好,因此在喷孔附近的油气混合速度最慢,扩散燃烧火焰最后传播到喷孔附近。

图4列举了缸内燃烧过程中炙热火焰的区段。两者相比较可以看出生物柴油炙热火焰发生时刻为 $4.0^{\circ}\text{CA} \sim 8.8^{\circ}\text{CA}$,而柴油的炙热火焰发生时刻为 $3.6^{\circ}\text{CA} \sim 10.8^{\circ}\text{CA}$ 。且在这一区段内,柴油燃烧火焰图片的辉度要比生物柴油的燃烧火焰的辉度强,也说明柴油尽管着火时刻比生物柴油略晚,但着火

光,火焰最先出现在混合气浓度合适的区域。从燃烧过程的系列图像可见,燃料的自然发生在液态喷注周端边缘处,并且随温度的升高自燃点向喷孔处靠近。

图3为柴油机燃用生物柴油与0号柴油可见明显火焰时刻的比较。生物柴油在 -4.3°CA (BTDC)就可观察到明显的火焰,而0号柴油在 -3.5°CA (BTDC)还不明显,在油束边缘已可见少量颜色变化,直至 -2.8°CA 才观察到明显的火焰,且着火区域相对较小、可见光的亮度相对较弱。前面分析得知由于弹性模量的差异,生物柴油比柴油提前 0.7°CA 喷入气缸。再加上生物柴油比柴油十六烷值高、着火性能好的贡献,使得生物柴油的着火时刻比柴油提前 1.5°CA 。此外,生物柴油和柴油的化学计量空燃比分别为12.55和14.30。假设缸内油束对空气的卷吸率相同,则生物柴油燃料形成的混合气和柴油燃料相比含氧率更高。因此生物柴油燃烧开始阶段可见火焰区域更大、可见光亮度更强。

以后的燃烧放热速率更快。

从燃料化学的角度看,燃料中的C和H是决定放出热量的关键元素,O的作用是作为氧化剂参与反应。生物柴油与柴油相比较,燃料中带入整个反应系统的氧,随着反应容器内温度的升高,吸收一部分热量使得其内能提高,因而含氧的生物柴油火焰温度比柴油低。此外,生物柴油的平均分子量比0号柴油大,其运动粘度较大。而粘度将影响燃油喷射的油粒直径及与空气的混合速度。和0号柴油相比,生物柴油尽管在进入气缸后早先着火,但在初期放热结束之后因其粘度较高,油气混合的速度比柴油燃料低,因此燃烧放热速度下降。表现在缸内火焰图片上,生物柴油的炙热火焰持续时间以及火焰辉度都较0号柴油有所减弱。

3 放热过程综合分析

在发动机分别燃用生物柴油和0号柴油情况下,利用Dewetron2000采集 $n = 2200 \text{ r/min}$ 、 $p_{me} = 0.54 \text{ MPa}$ 稳定运行工况的气缸压力,并依据热力学第一定律计算得到燃烧放热规律,如图5所示。

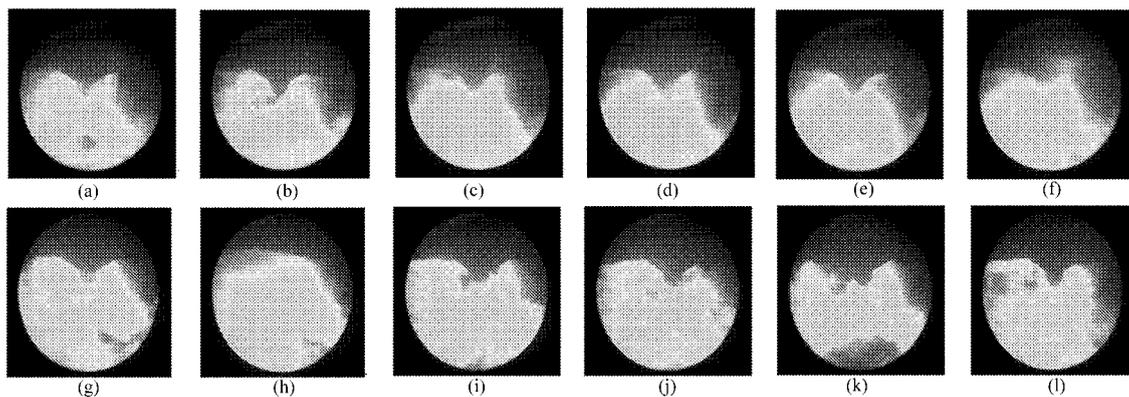


图 4 柴油机燃用生物柴油与柴油炙热火焰区段

Fig. 4 Glowing flame images of biodiesel and petrolic diesel

- (a) 生物柴油, 4.0°CA (b) 生物柴油, 5.1°CA (c) 生物柴油, 6.1°CA (d) 生物柴油, 6.9°CA
 (e) 生物柴油, 7.6°CA (f) 生物柴油, 8.8°CA (g) 0号柴油, 3.6°CA (h) 0号柴油, 4.9°CA
 (i) 0号柴油, 6.3°CA (j) 0号柴油, 7.7°CA (k) 0号柴油, 9.2°CA (l) 0号柴油, 10.8°CA

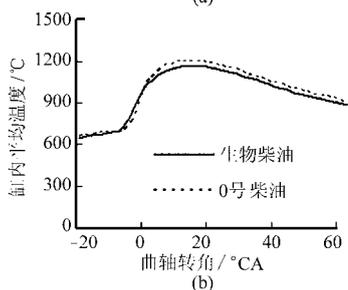
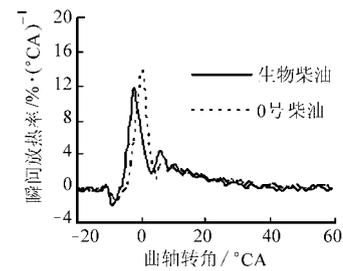


图 5 柴油机燃用生物柴油和 0 号柴油的放热规律

Fig. 5 Heat release of diesel engine fueled with biodiesel and petrolic diesel
 (a) 放热率 (b) 缸内温度

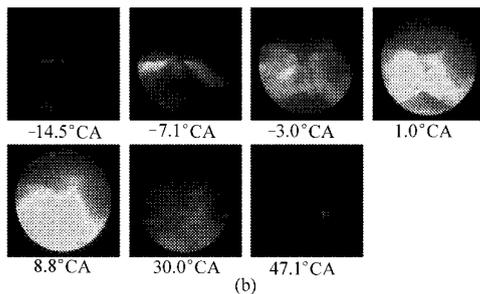
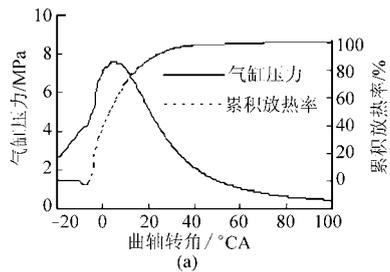


图 6 柴油机燃用生物柴油的缸内燃烧过程

Fig. 6 Combustion process in cylinder of engine fueled with biodiesel

(a) 气缸压力与累积放热率曲线 (b) 各时刻燃烧图像

柴油机燃用生物柴油和 0 号柴油的缸内燃烧过程与气缸压力、放热率曲线见图 6 和图 7。图 6b 和图 7b 中系列图片的曲轴转角分别对应于最先可见的喷油束、放热始点、初期放热率尖峰、初期放热率结束、火焰亮度最亮、累积放热率达 95% 和最后可见光。各特征标记对应时刻可由前述燃烧过程图像分析及瞬时放热规律(图 5)得到。

柴油机燃用生物柴油的放热始点为 -7°CA , 在 -3°CA 达到初期放热率峰值, 对应的累积放热率为 22.3%, 在 1°CA 预混燃烧期结束, 对应的累积放热率为 43.6%。柴油机燃用 0 号柴油的放热始点为 -5°CA , 随后在 -1°CA 达到初期放热率峰值, 对应的累积放热率为 23.1%, 在 4°CA 预混燃烧期结束, 对应的累积放热率为 53.4%。

柴油机燃用生物柴油的火焰亮度最亮出现在 $4.0^{\circ}\text{CA} \sim 8.8^{\circ}\text{CA}$ 之间, 而 0 号柴油对应的火焰亮度最亮的出现在 $3.6^{\circ}\text{CA} \sim 10.8^{\circ}\text{CA}$ 之间。生物柴油的火焰亮度较 0 号柴油暗一些, 缸内平均温度的计算结果也显示柴油机燃用生物柴油缸内温度有所降低。

上止点后 47.1°CA , 在燃烧过程后期, 此时的气缸瞬时容积已很大, 燃烧生物柴油和 0 号柴油的燃烧室中都可观察到最后的可见光。在 50°CA 后, 燃烧室中不再观察到明显的亮光, 但这并不表示燃烧已经结束, 仍存在不发光的缓慢化学反应。

生物柴油在 30°CA 时燃料燃烧释放的热量达到 95%, 相应地 0 号柴油在 33.5°CA 时累积放热量占 95%。两者最后的可见光都出现在 47.1°CA , 完

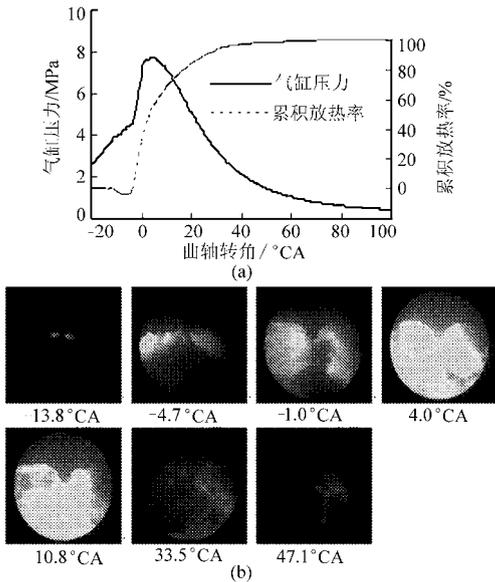


图7 柴油机燃用0号柴油的缸内燃烧过程

Fig.7 Combustion process in cylinder of engine fueled with petrolic diesel

(a) 气缸压力与累积放热率曲线 (b) 各时刻燃烧图像

全燃烧对应的角度同为 73°CA 。最后的5%热量的释放占据了 40°CA ，在燃烧的最后阶段，没有明显火焰的化学反应释放出的热量仅占2%~3%。

4 结论

(1)在未调整发动机供油系统的前提下，通过直接观察和放热过程综合分析，发现生物柴油因弹性模量大、十六烷值高和含氧特性等，造成的燃油喷入气缸时刻较早、着火延迟期短、放热时刻较早但后期缸内温度降低等燃烧过程特性。尽管与柴油略有差异，但生物柴油可以实现对柴油的替代。

(2)柴油机缸内燃烧过程的高速摄影表明，生物柴油的喷油开始时刻较0号柴油早 0.7°CA 。柴油机燃用生物柴油的火焰辉度最亮出现在 $4.0^{\circ}\text{CA} \sim 8.8^{\circ}\text{CA}$ 之间，而0号柴油对应的火焰辉度最亮的出现在 $3.6^{\circ}\text{CA} \sim 10.8^{\circ}\text{CA}$ 之间。生物柴油的火焰亮度较0号柴油略暗一些，从缸内平均温度也可见柴油机燃用生物柴油后缸内温度有所降低。

(3)生物柴油在 30°CA 时燃料燃烧释放的热量达到95%，相应地0号柴油在 33.5°CA 时累积放热量占95%。两者最后的可见光都出现在 47.1°CA ，完全燃烧对应的角度同为 73°CA 。最后5%热量的释放占据了 40°CA ，在燃烧的最后阶段，没有明显火焰的化学反应释放出的热量仅占2%~3%。

参 考 文 献

- 车长波,袁际华.世界生物质能源发展现状及方向[J].天然气工业,2011,31(1):104~106.
Che Changbo, Yuan Jihua. Developing trend of biomass energy sources in the world[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(1): 104~106. (in Chinese)
- 袁银南,陈汉玉,张春丰,等.生物柴油喷雾特性试验[J].农业机械学报,2008,39(7):1~4.
Yuan Yinnan, Chen Hanyu, Zhang Chunfeng, et al. Experimental on the spray characteristics of biodiesel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):1~4. (in Chinese)
- 何邦全,王建昕,阎小光.柴油机含氧燃料的研究进展[J].农业机械学报,2003,34(1):134~138.
He Bangquan, Wang Jianxin, Yan Xiaoguang. Review of the progress in oxygenated fuels for diesel engines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1):134~138. (in Chinese)
- Yamane K, Ueta A, Shimamoto Y. Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine[C]. SAE Paper 2002-01-1631, 2002.
- Keun-young Ryu, Jong-suk Ha, Soo-young No. The influence of oxygenated fuels on spray characteristics from plain-orifice atomizers[C]//Proc. ILASS-Europe 2000, Darmstadt, Germany, 2000.
- Lukasz P Wyszynski, Robert Aboagye, Richard Stone. Combustion imaging and analysis in a gasoline direct injection engine[C]. SAE Paper 2004-01-0045, 2004.
- 吕兴才,黄震,张武高,等.用光学可视化方法研究乙醇柴油混合燃料的燃烧特征[J].中国公路学报,2004,17(2):109~112.
Lü Xingcai, Huang Zhen, Zhang Wugao, et al. Optical visualization of combustion characteristics of diesel engine fueled with ethanol diesel blend fuel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2):109~112. (in Chinese)
- Rodriguez-Anton L M, Casanova-Kindelan J. High pressure physical properties of fluids used in diesel injection systems[C]. SAE Paper 2000-01-2046, 2000.
- Valentin G Baonza. The spinodal as a reference curve for the high-pressure volumetric behavior of liquids[J]. Chemical Physics Letters, 1994, 228(1~3):137~143.

量最高,达到了 3.10×10^{-4} , 碳烟质量分数最低,其最大值为 2.78×10^{-4} ; 154° 喷孔夹角的 NO 质量分数最低,为 1.48×10^{-4} 。由于 154° 喷孔夹角油束到达喉口导向面时动能相对较低,喷雾贴近燃烧室壁面无法卷吸足够的空气,形成过浓区,使得碳烟排放较高。 146° 喷孔夹角喷雾在燃烧室中形成的混合气分布最均匀,油粒与空气接触面积较大,因而碳烟排放量最低。在燃烧初期, 146° 喷孔夹角的碳烟质量分数大于其他两者, 154° 喷孔夹角的碳烟质量分数最低。主要是因为 146° 喷孔夹角油雾最早接触并碰撞到凸台表面,油气未能充分混合,导致碳烟排放量高,但碳烟质量分数最大值在燃烧中后期,从高到低依次为: 154° 、 150° 、 146° 。

3 结论

(1) 由于喷孔夹角不同导致在燃烧室内喷雾落点不同,使得喷雾发展历程和流场也发生相应变化。从当量比总体分布来看,采用 146° 喷孔夹角时混合气最均匀。

(2) 在上述研究中, 154° 喷孔夹角的 NO 排放量最低,而 146° 喷孔夹角的碳烟排放量最低。

(3) 燃烧涡流和逆挤流对速燃期的燃烧室内温度分布有较大的影响。

(4) 在 30° CA ATDC 以后, 154° 喷孔夹角的高温区比其他两种的明显减少,而 146° 与 154° 喷孔夹角的高温区范围较大,主要分布在主燃烧室中。

参 考 文 献

- 1 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:422~451.
- 2 赵昌普,宋崇林,李晓娟,等. 燃油系统参数对柴油机燃烧及排放影响的研究[J]. 内燃机学报,2008,26(6):505~512.
Zhao Changpu, Song Chonglin, Li Xiaojuan, et al. Influence of fuel injection system parameters on combustion and emissions of a diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2008,26(6):505~512. (in Chinese)
- 3 舒歌群,马维忍,许世杰,等. 喷雾夹角对柴油机性能影响的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2008,29(7):1239~1242.
Shu Gequn, Ma Weiren, Xu Shijie, et al. Simulation of the effect of spray angle on diesel performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008,29(7):1239~1242. (in Chinese)
- 4 石秀勇,李国祥,胡云萍. 喷雾夹角影响柴油机混合气形成与燃烧的 CFD 研究[J]. 车用发动机,2007(1):19~23.
Shi Xiuyong, Li Guoxiang, Hu Yunping. Influence of spray angle on mixture formation and combustion of diesel engine based on CFD research [J]. Vehicle Engine, 2007(1):19~23. (in Chinese)
- 5 蒋炎坤. CFD 辅助发动机工程的理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2004:109~130.
- 6 Wei S L, Long W Q, Feng L Y, et al. Study of spray impingement and squish combustion system for diesel engines [J]. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 2010, 224(1):117~124.
- 7 魏胜利,杜宝国,冯立言,等. 直喷式柴油机涡流室柴油机燃烧系统的模拟与实验研究[J]. 内燃机工程,2008,29(4):19~22.
Wei Shengli, Du Baoguo, Feng Liyan, et al. Simulation and experimental research of DI. diesel engine swirl chamber combustion system [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008,29(4):19~22. (in Chinese)
- 8 魏胜利,王忠,倪培永,等. 单缸直喷柴油机涡流室燃烧系统外部增压的实验研究[J]. 汽车工程,2011,39(8):649~652.
Wei Shengli, Wang Zhong, Ni Peiyong, et al. An experimental research on external supercharging in DI. diesel engine with swirl chamber combustion system [J]. Automotive Engineering, 2011,39(8):649~652. (in Chinese)
- 9 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 2版. 大连:大连理工大学出版社,2005.
- 10 AVL List GmbH. AVL FIRE 2008 manual-spray [M]. Graz, Austria: AVL List GmbH, 2008.

(上接第 30 页)

- 10 王锡斌. 柴油机燃用多种燃料的喷雾和燃烧过程多维数值模拟的研究[D]. 西安:西安交通大学,2003.
Wang Xibin. Research of multidimensional numerical simulation of spray and combustion process of diesel engine fueled with different fuels [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- 11 Schraml S, Heimgartner C, Fettes C, et al. Investigation of in-cylinder soot formation and oxidation by means of two-dimensional laser-induced incandescence [C] // 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2000.
- 12 Charles J Mueller, William J Pitz, Lyle M Pickett. Effects of oxygenates on soot processes in DI diesel engines: experimental and numerical simulations [C]. SAE Paper 2003-01-1791, 2003.