

柴油-丙烷发动机不同喷油提前角时的燃烧和排放特性

马志豪^{1,2}, 黄佐华¹, 李冲霄¹, 王锡斌¹, 苗海燕¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 471003, 河南 洛阳)

摘要: 在一台单缸直喷式柴油机上开展了不同喷油提前角下燃用柴油和柴油-丙烷混合燃料时的燃烧和排放特性研究. 研究表明: 柴油-丙烷混合燃料的燃烧与排放参数随喷油提前角的变化趋势与燃用纯柴油时基本相同; 对于给定的平均有效压力, 柴油-丙烷混合燃料的放热率峰值和 NO_x 排放随喷油提前角的推迟而减小, 而总燃烧持续期、CO、HC 和碳烟排放随喷油提前角的推迟而增加; 对于给定的平均有效压力和喷油提前角, 放热率峰值和 NO_x 排放随混合燃料中丙烷含量的增加而增大, 而总燃烧持续期、CO、HC 和碳烟排放随丙烷含量的增加而减小.

关键词: 喷油提前角; 丙烷; 柴油; 混合燃料; 发动机; 燃烧; 排放

中图分类号: TK411.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0532-05

Effects of Fuel Injection Timing on Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fuelled with Diesel-Propane Blends

MA Zhihao^{1,2}, HUANG Zuohua¹, LI Chongxiao¹, WANG Xibin¹, MIAO Haiyan¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Vehicle & Motive Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan, 471003, China)

Abstract: Effects of fuel injection timing on combustion and emission characteristics of a single-cylinder diesel engine fuelled with diesel and diesel-propane blends were studied. The results show that the influences of fuel injection timing on the performances of the engine exhibited the similar trends for the diesel and diesel-propane operations. For a given engine load and speed, the maximum heat release rate and NO_x emission decreased with the postponement of the fuel injection timing while the total combustion duration, CO, HC and soot emissions increased with advancing the fuel injection timing. For a given engine load, speed and fuel injection timing, the maximum heat release rate and NO_x emission increased with the increase of propane proportion in diesel-propane blends. However, the total combustion duration, CO, HC and soot emissions decreased with the increase of propane proportion in diesel-propane blends.

Keywords: fuel injection timing; propane; diesel; blends; engine; combustion; emissions

丙烷作为气体燃料的一种,已经越来越广泛地应用于发动机. 目前,美国有 19 万辆汽车和 45 万台叉车以丙烷作为燃料,世界范围内有约 900 万辆汽车以丙烷为燃料,成为排在汽油和柴油之后的第 3 种车用燃料. 柴油机由于热效率高、应用广泛等优点

而普遍受到青睐,国内外许多研究者长期致力于柴油发动机的研究,然而柴油的供给和价格时常受到国际国内原油市场波动的冲击,这就迫使人们研究和开发柴油的替代燃料,在保持柴油机优势的同时尽量减少柴油的消耗^[1-5].

收稿日期: 2007-09-03. 作者简介: 马志豪(1965—),男,在职博士生,河南科技大学副教授;黄佐华(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576070);优秀国家重点实验室基金资助项目(50323001);自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目(5052604).

与柴油相似,丙烷属于烷烃,在相对较低的压力(27 °C、1 MPa)下即可液化,可以以任意比例与柴油进行混合,因此研究柴油-丙烷混合燃料具有重要意义:一方面可以减少柴油的消耗,另一方面可以利用丙烷的沸点低、表面张力小、黏度小等特性改善雾化,促进燃烧,可以降低发动机对燃料供给系统的要求,也就是不需要提高喷射压力就能达到高喷射压力的效果.我国柴油中的含硫量比较高,这就使柴油机排放中的颗粒排放不易满足国家越来越高的排放标准.如果在柴油中加入一定比例的丙烷,就可减小柴油的消耗量,从而降低颗粒的排放量.因此,我们选取了在常温常压下沸点较低的丙烷作为溶质,在常温下加压使其液化后,按不同的比例溶入柴油,获得多种比例的柴油-丙烷混合燃料来进行发动机的试验研究.

1 燃料的主要理化性能

由表1可知,丙烷的十六烷值较低,这会导致柴油-丙烷混合燃料的十六烷值有所降低,因此丙烷的掺混比例不宜太高.本研究制备了丙烷质量分数 $\omega=0\%$, 6% , 14% , 25% 共4种柴油-丙烷混合燃料.

表1 柴油和丙烷的物性

物性参数	柴油	丙烷	
		液	气
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	860.0	489.3	21.7
动力黏度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$1.723^{-3} \sim 6.883^{-3}$	95.131^{-6}	8.823^{-6}
汽化潜热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	260	426	0
定压比热容/ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	1.87	2.77	2.07
自燃温度/K	483	763	763
可燃极限/%	1.5~7.6	2.2~9.5	2.2~9.5
理论空燃比	14.3	15.6	15.6
十六烷值	40~65	5~10	5~10
低热值/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	42 560	46 330	46 330

注:丙烷的密度、黏度、比热容等物性参数在压力和温度分别为0.997 8 MPa和300 K条件下得到.

2 试验装置和燃料制备

表2给出了试验用发动机的基本参数.

缸内压力传感器和角标器以及电荷放大器均采用瑞士KISTLER公司的产品, CO 、 HC 、 CO_2 含量由Horiba MEXA-554J Series排放分析仪测量, NO_x 含量由Horiba MEXA-720排放分析仪测量,烟度由AVL Disomke 4000不透光烟度计测量,信号采集采用YOKOGAWA公司DL750数据采集系

统,NLM-1针阀升程仪由河南科技大学制造.

表2 发动机参数

型号	TY1100
型式	立式、水冷、四冲程、直喷
气缸数	1
缸径/mm	100
冲程/mm	115
连杆长度/mm	190
燃烧室形状	ω 型
压缩比	18.4
标定功率/kW	10
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	2 200
喷油器孔径/mm	0.32
喷油器孔数目	4
喷油器开启压力/MPa	17.6

柴油-丙烷混合燃料的制备:将一定量的柴油加入一个高压容器内,用高压氮气先将丙烷液化,再将其压入装有柴油的高压容器.根据需要,可以按不同的比例加入柴油和丙烷.用氮气将高压容器内的压力调整到2 MPa(此时环境温度为20 °C)使丙烷保持液态,以便与柴油充分混合.实验时供给发动机燃料的压力维持在1.5 MPa以上,以保证丙烷仍为液态.在实验过程中发现,使用 $\omega=25\%$ 的燃料时,燃料供给系统发生严重气阻,使得发动机根本无法启动,所以仅对前3种燃料进行了试验研究.

一般情况下,提前角的选取要兼顾到发动机的标定工况和最大扭矩工况的动力、经济性和排放特性,所以试验时,调整了3个动态喷油提前角,保持高低转速的2个工况时的喷油提前角为上止点前 15° 、 17° 和 19° ,喷油提前角以针阀开启时刻为准.

3 试验结果与分析

从图1可以看出,2个工况下的滞燃期均随喷油提前角的减小而减小,随混合燃料中丙烷含量的增加而增大.这是由于随着喷油提前角的减小,开始喷油时的缸内温度升高,燃料喷入燃烧室后,能够在更短的时间内吸热并汽化,使开始燃烧前的物理和化学准备时间缩短,因此滞燃期缩短.随着丙烷掺入量的增加,不但减小了混合燃料的十六烷值,而且还减小了混合燃料的密度、黏度和表面张力,这有利于燃料滴的破碎、雾化和蒸发,而丙烷的蒸发潜热又比柴油高64%,因此在蒸发过程中吸收更多的热量,使燃料喷射的初期缸内温度降低,这都延长了滞燃期.

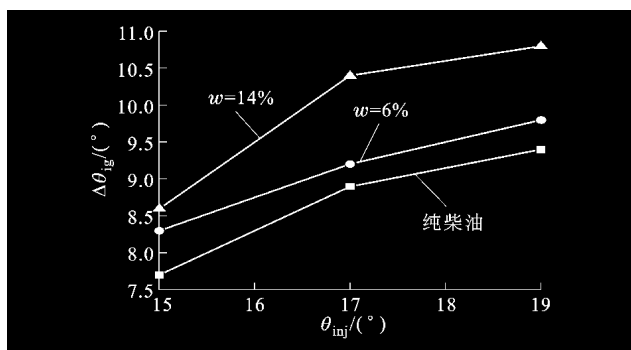
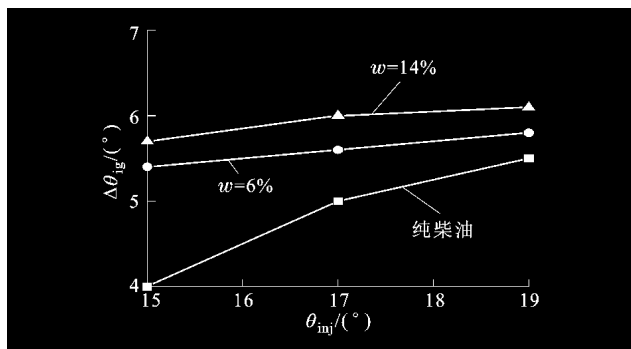
(a) $n=2200$ r/min $p_e=0.58$ MPa(b) $n=1400$ r/min $p_e=0.7$ MPa

图1 滞燃期随喷油提前角的变化

由图2可以看出,放热率峰值均随喷油提前角的推迟而减小,随柴油中丙烷含量的增加而增大.这是由于随着喷油提前角的推迟,在开始喷油时刻气缸内空气压缩温度相应提高,会缩短着火滞燃期并减小在着火滞燃期内的喷油量,使着火滞燃期内形

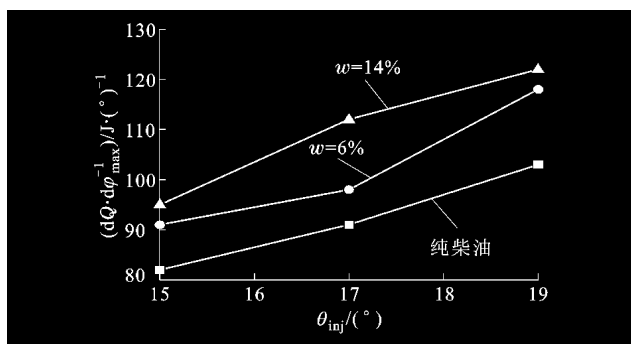
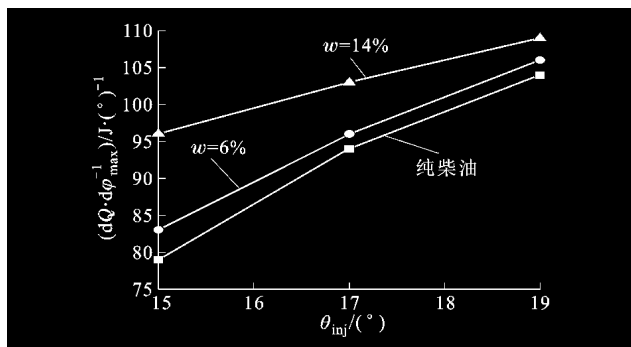
(a) $n=2200$ r/min $p_e=0.58$ MPa(b) $n=1400$ r/min $p_e=0.7$ MPa

图2 最大放热率随喷油提前角的变化

成的可燃混合气减少,预混燃烧量占总燃烧量的比例减小,从而减小了放热率峰值.随着丙烷的加入,延长了滞燃期并增加了滞燃期内可燃混合气的量,使预混合燃烧量增大,最终使放热率峰值增大.

从图3可以看出,燃烧持续期随喷油提前角的推迟而增加,随混合燃料中丙烷含量的增加而减小.这是因为随着喷油的推迟,预混合燃烧量占总燃烧量的比例减小,相应的扩散燃烧所占的比例增加,而扩散燃烧受到燃料与空气混合速度的控制,柴油-丙烷混合燃料在相同喷油提前角下增大了预混燃烧的量,减小了扩散燃烧的量.由图3还可以看出,混合燃料中丙烷对燃烧持续期的影响要远大于喷油提前角对燃烧持续期的影响.

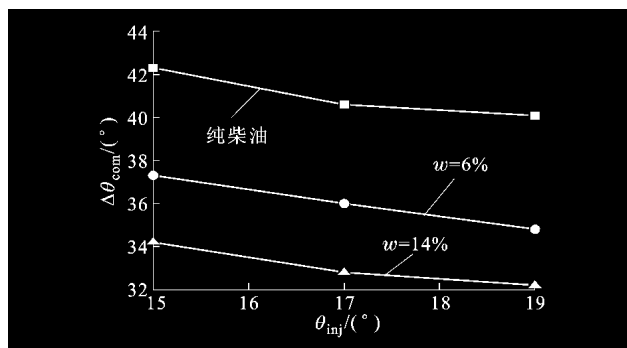
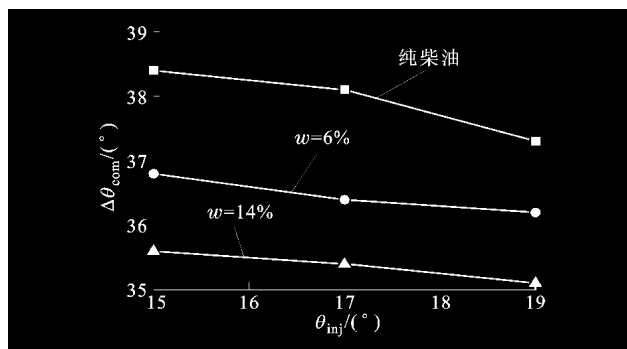
(a) $n=2200$ r/min $p_e=0.58$ MPa(b) $n=1400$ r/min $p_e=0.7$ MPa

图3 燃烧持续期随喷油提前角的变化

从图4可以看出,2个工况下的HC排放均随喷油提前角的减小而缓慢增加,随混合燃料中丙烷含量的增加而减小.这是因为HC主要是由于混合气的过浓或过稀生成的,但过浓的混合气在随后与空气混合后会进一步氧化^[6].当柴油中加入丙烷后,使燃烧的各阶段形成可燃混合气速率加快并且更加均匀,减少了过浓和过稀混合气的产生,燃烧持续时间缩短,缸内平均燃烧温度随丙烷比例的增加而升高,这都有利于燃料及其中间产物的进一步氧化.另外,与柴油相比,丙烷分子组成简单,更易被氧化.随着混合燃料中丙烷比例的增加,HC排放量减少.

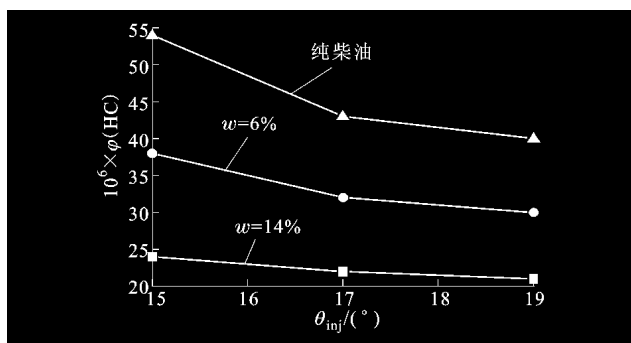
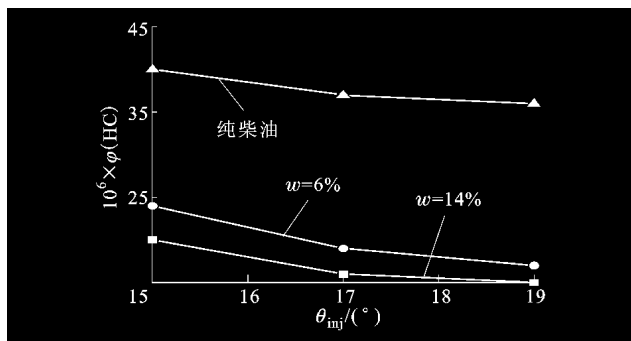
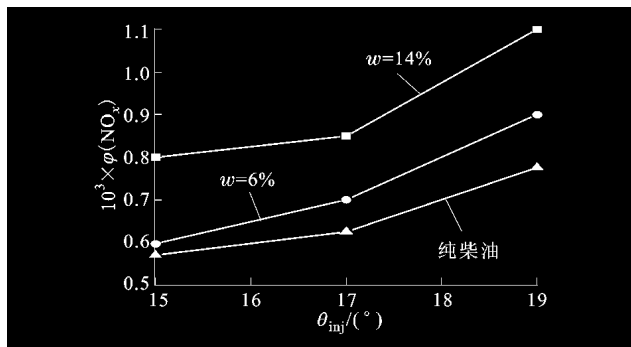
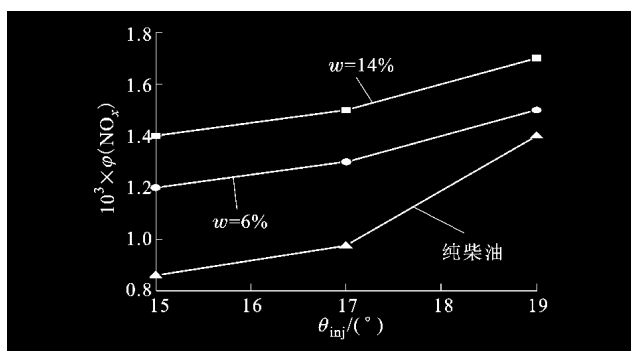
(a) $n=2\ 200\ \text{r/min}$ $p_e=0.58\ \text{MPa}$ (b) $n=1\ 400\ \text{r/min}$ $p_e=0.7\ \text{MPa}$

图4 HC排放量随喷油提前角的变化

从图5可以看出,喷油提前角和燃料中丙烷的含量对发动机 NO_x 排放的影响非常显著.2个工况下 NO_x 的排放量均随喷油提前角的推迟而减小,随丙烷含量的增加而增大.原因是随着喷油提前角的推迟,滞燃期缩短,预混合燃烧所占比例减少,而扩

(a) $n=2\ 200\ \text{r/min}$ $p_e=0.58\ \text{MPa}$ (b) $n=1\ 400\ \text{r/min}$ $p_e=0.7\ \text{MPa}$ 图5 NO_x 排放量随喷油提前角的变化

散燃烧所占比例增加,使得缸内最高平均燃烧温度降低,从而抑制了 NO_x 的生成.随着丙烷比例的增加,燃料的雾化得到改善,在很短的时间内会有更多的燃料吸热而蒸发,使滞燃期延长,这又为 NO_x 的生成创造了条件.因此,燃料中丙烷含量的增加,会导致 NO_x 排放量增加.

由图6可见,CO的排放随喷油提前角的推迟而增加.因为喷油提前角推迟后,预混合燃烧所消耗的燃料量减少,扩散燃烧消耗的燃料量增加,尽管此时缸内温度很高,但已经处于缺氧状态,并且处于膨胀阶段,这就无法使CO进一步氧化成 CO_2 ,所以喷油提前角推迟,CO排放量增加.由图6还可以看出,CO的排放量随丙烷含量的增加而减少.因为:①丙烷的含碳量是0.82,而柴油的含碳量是0.87,丙烷的含氢量是0.18,而柴油的含氢量是0.13,所以丙烷比例越高,燃料的含碳量相对于柴油来讲就越少;②加入丙烷后,燃料的物性也发生了一定的改变,黏度、密度和表面张力稍有减小,有利于喷雾液滴的破碎,促进了油束的雾化,混合气更加均匀,使得燃烧更加完善,丙烷比例越多效果就越明显;③柴油-丙烷混合燃料在缸内燃烧时的温度较高,这也为CO继续氧化成 CO_2 创造了条件,最终的结果使CO的排放量减少.

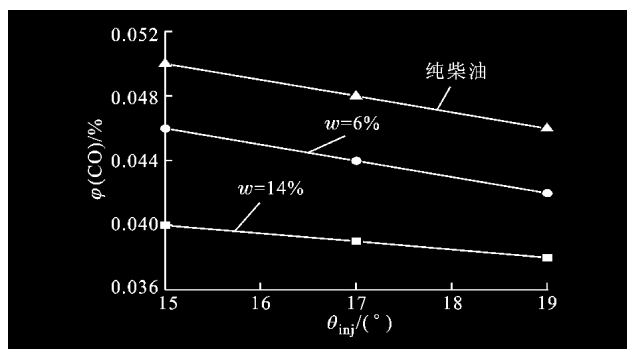
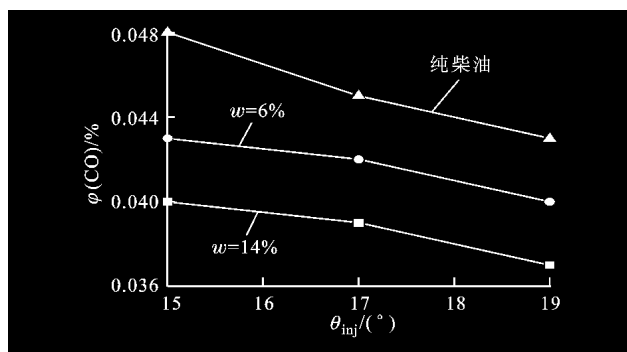
(a) $n=2\ 200\ \text{r/min}$ $p_e=0.58\ \text{MPa}$ (b) $n=1\ 400\ \text{r/min}$ $p_e=0.7\ \text{MPa}$

图6 CO排放量随喷油提前角的变化

本文用消光系数来衡量碳烟排放量的大小,由图7可见:柴油中掺入少量的丙烷,就会对碳烟排放的影响非常显著.随着丙烷含量的增加,碳烟排放逐渐减少,但影响逐渐减弱;3种燃料的碳烟排放均随提前角的推迟而稍有增加.原因是,一方面加入丙烷后,消耗的柴油量减小,这就使得燃料中的芳香烃和硫含量减少,而这些成分在燃料中的含量增加会导致碳烟排放增加,特别是柴油中的硫含量对碳烟排放的影响更为显著.另一方面,丙烷的加入使混合燃料的密度、黏度和表面张力相应减小,有利于燃料滴的破碎和迅速蒸发,从而与空气快速形成更加均匀的混合气.碳烟主要是在扩散燃烧阶段生成,因为此时缸内处于缺氧和高温状态.随着喷油提前角的推迟,扩散燃烧所占比例增加,碳烟排放量就会增大.

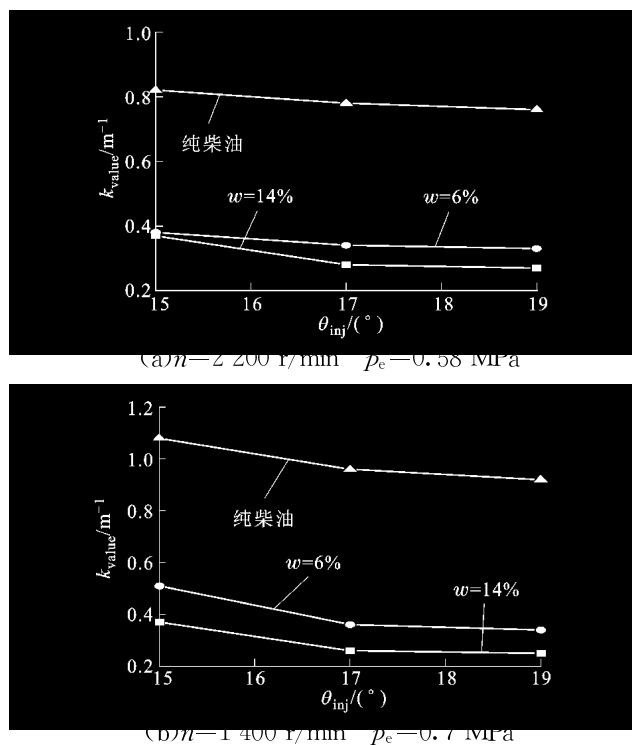


图7 碳烟排放量随喷油提前角的变化

4 结 论

(1)柴油机燃用柴油-丙烷混合燃料发动机的燃烧和排放参数随喷油提前角的变化趋势与燃用纯柴油时的相同.

(2)混合燃料的滞燃期和放热率峰值随喷油提前角的推迟而减小,随混合燃料中丙烷含量的增加而升高.

(3)混合燃料中 HC、CO 和碳烟排放随喷油提前角的推迟而增加,NO_x 排放随喷油提前角的推迟而减少.对于给定的平均有效压力,HC、CO 和碳烟排放随混合燃料中丙烷含量的增加而减少,NO_x 排放随混合燃料中丙烷含量的增加而增加.

参考文献:

- [1] HUANG Zuohua, WANG Hewu, CHEN Hongyan, et al. Study on combustion characteristics of compression ignition engine fueled with dimethyl ether[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering: Part D, 2000, 213 (3): 647-652.
- [2] 黄佐华, 卢红兵, 蒋德明, 等. 柴油机燃用柴油/甲醇混合燃料时的燃烧特性研究 [J]. 内燃机学报, 2003, 21 (6): 401-410.
HUANG Zuohua, LU Hongbin, JIANG Deming, et al. Study on combustion characteristics of a DI diesel Engine operating on diesel/methanol blends [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(6): 401-410.
- [3] HUANG Zuohua, JIANG Deming, ZENG Ke, et al. Combustion characteristics and heat release analysis of a compression ignition engine fueled with diesel-dimethyl carbonate blends [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering: Part D, 2003, 217 (7): 595-606.
- [4] QI Donghui, BIAN Yaozhang. Engine operation on LPG/diesel mixing fuel in DI diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(6): 428-434.
- [5] HUANG Zuohua, LU Hongbing, JIANG Deming, et al. Performance and emissions of a DI diesel engine operating on diesel-methanol blends [J]. Transactions of CSICE, 2004, 22 (1): 7-16.
- [6] 刘巽俊. 内燃机的排放与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

(编辑 王焕雪)