

燃烧室背压对压力涡流喷嘴喷雾特性的影响^{*}

刘涛涛¹ 张武高¹ 陈晓玲¹ 顾根香² 郭晓宁² 黄震¹

(1. 上海交通大学燃烧与环境技术中心, 上海 200240; 2. 上海齐耀动力技术有限公司, 上海 201203)

【摘要】 采用高速摄影技术、激光测粒仪和 PIV 测试技术系统试验研究了燃烧室背压对斯特林发动机压力涡流喷嘴喷雾形成过程、贯穿距离增长规律、喷雾锥角、液滴粒径和喷雾流场的影响。结果表明, 燃烧室背压的增加使喷雾形状更加致密, 贯穿距离的增加变缓, 液滴平均速度增加, 索特平均直径增加。当燃烧室背压大于 1.0 ~ 1.5 MPa 之间的一个临界值时, 其对喷雾锥角没有影响, 小于此临界值, 燃烧室背压的增加会使喷雾锥角急剧降低。

关键词: 压力涡流喷嘴 斯特林发动机 喷雾锥角 索特平均直径 速度分布

中图分类号: TK421⁺.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)03-0021-05

Spray Characteristics of Pressure-swirl Nozzle at Different Ambient Pressures of Combustion Chamber

Liu Taotao¹ Zhang Wugao¹ Chen Xiaoling¹ Gu Genxiang² Guo Xiaoning² Huang Zhen¹

(1. Center for Combustion and Environmental Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Shanghai MicroPowers Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract

The spray characteristics of pressure-swirl nozzle used in Stirling engine was studied by way of the experiment under high ambient pressures (up to 2.8 MPa). The high-speed video imaging technique, FAM (Fraunhofer and Mie) laser drop size analyzer, and PIV (particle image velocimetry) test equipment were used for experimental measurements. Experimental results showed that the spray structure at higher ambient pressure was more compact. The vortex cloud was found at the leading edge at high ambient pressure. Spray cone angle was independent of ambient pressure after a value between 1.0 ~ 1.5 MPa. The Sauter mean diameter (SMD) and the drop velocity became larger at high ambient pressure conditions. Finally, a vortex was found in the center of the spray and this region moved to the downstream of the spray as the ambient pressure increased.

Key words Pressure-swirl nozzle, Stirling engine, Spray angle, SMD, Velocity distribution

引言

压力涡流喷嘴结构简单, 性能可靠, 具有良好的雾化性能。国内外学者对压力涡流喷嘴进行了大量理论以及试验研究, 燃烧室背压作为影响压力涡流喷嘴的关键因素, 很多学者在有关压力涡流喷嘴的研究中都有所提及^[1-3]。

对斯特林发动机用压力涡流喷嘴, 国内外的研

究并不多见。斯特林发动机由于其良好的能源适应性, 逐渐得到广泛的引用和关注。斯特林发动机通过一个持续燃烧过程来提供热量, 而压力涡流喷嘴将燃油连续喷射、雾化, 与进气装置配合而取得更高的燃烧效率。

本文采用高速摄影技术、激光测粒仪和 PIV 测试技术系统试验研究燃烧室背压对斯特林发动机压力涡流喷嘴喷雾形成过程、贯穿距离增长规律、喷雾

收稿日期: 2010-04-15 修回日期: 2010-06-21

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50776083)

作者简介: 刘涛涛, 硕士生, 主要从事燃料雾化及燃烧机理研究, E-mail: alchian@sjtu.edu.cn

通讯作者: 张武高, 副教授, 主要从事替代燃料发动机研究, E-mail: zhangwg@sjtu.edu.cn

锥角、液滴粒径和喷雾流场的影响。

1 试验

1.1 压力涡流喷嘴

研究的斯特林发动机压力涡流喷嘴结构如图 1 所示。在一定压力下,燃油进入喷嘴后,大部分经过螺旋流道,从而在缓冲腔内形成强烈的旋流然后再经由螺旋狭缝进入涡流室,形成强烈的涡流,燃油喷射出细孔时,既具有轴向速度,又具有切向速度,从而形成空心锥状喷雾。

1.2 试验台架

斯特林发动机喷雾可视化试验台如图 2 所示,主要由定容压力容器和燃油喷射系统组成。喷嘴安装在模拟斯特林发动机燃烧室的定容压力容器顶部,试验过程在燃烧室内充入氮气模拟真实燃烧室压力升高。定容压力容器设计的最高压力为 3.2 MPa,容器顶端还加装有压力传感器,实时监测容器内压力,即燃烧室背压。定容压力容器侧面的玻璃观察窗口能安全地对喷雾情况进行实时检测。为了得到稳定的喷油压力,往高压油罐中通入一定压力的氮气提高喷嘴出入口的压差来模拟实际所用的油泵。控制燃料流动的电磁阀离喷孔大约 40 mm,这与直喷式汽油机所用的针阀式喷嘴有所不同,因此二者的启动性能有很大区别。喷射信号由 PLC 系统通过 LabView 所编制的人机界面控制。燃烧室内的压力、温度、喷油压力和燃油温度等数据

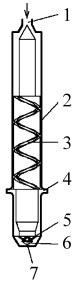


图 1 斯特林发动机压力
涡流喷嘴示意图
Fig.1 Schematic of
pressure-swirl nozzle

1. 燃料入口 2. 间隙流道
3. 螺旋流道 4. 缓冲槽 5. 旋
流槽 6. 涡流室 7. 喷孔

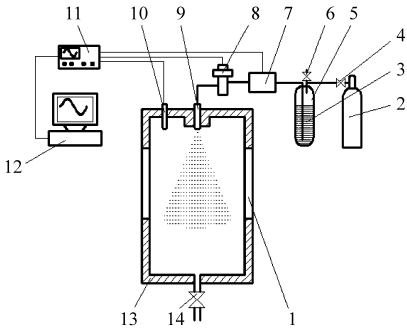


图 2 试验装置示意简图

Fig.2 Schematics of the experimental setup

1. 玻璃观察窗 2. 高压氮气瓶 3. 燃料 4. 进气球阀 5. 耐压
油罐 6. 泄压阀 7. 燃油流量计 8. 电磁阀 9. 喷嘴 10. 压
力传感器 11. 数据采集仪 12. 控制计算机 13. 定容压力容
器 14. 排气针阀

的读取和记录都可以通过软件实现。

1.3 试验测试条件

采用斯特林发动机实际使用的低硫柴油作为试验燃料,低硫柴油的物理性能如表 1 所示。在斯特林发动机常用工况条件下进行试验,对于斯特林发动机所用的压力涡流喷嘴,流量一定时,喷嘴入口和压力室之间的压差相同,即喷射压力相同,表 2 给出了常压(0.1 MPa)时,燃油流量所对应的喷射压力。

表 1 低硫柴油的物理性能

Tab.1 Properties of low sulfur diesel fuel

参数	密度 (20℃) /kg·m ⁻³	粘度 (20℃) /mm ² ·s ⁻¹	闪点 /℃	表面张力 /mN·m ⁻¹	含硫量 /mg·kg ⁻¹
数值	822.9	9.029	128	32.9	<1

表 2 试验测试工况条件

Tab.2 Experimental conditions

流量 /kg·h ⁻¹	喷射压力 Δp/MPa	流量 /kg·h ⁻¹	喷射压力 Δp/MPa
8	1.25	16	4.89
12	2.71	20	7.52

1.4 试验测试仪器

试验采用高速摄影系统测量背压对贯穿距离以及喷雾锥角的影响,测量系统包括 FASTCAM-ultima APX 120KC 型高速摄影机,NIKON 50 mm 镜头,以 GK6 型金卤灯作为光源,与相机垂直放置。拍摄帧频为 1 000 帧/s,图片分辨率为 512 × 1 024。试验采用 FAM 激光粒度分析仪^[4]测量喷雾粒径分布。FAM 激光粒度分析仪主要由低能激光发射器和光电探测器两部分组成,其专用分析软件可以采用 Rosin - Rammler 方法对粒径分布进行计算,给出喷雾液滴在各粒径区间的百分比及测量位置处的索特平均直径。试验采用 PIV 系统测试分析背压对喷雾流场的影响,PIV 测试设备包括 Dantec 高能激光器、IMPERX CCD 相机和 TAMRON 镜头、北京立方天地科技公司生产的同步器和 MicroVec 图像处理软件。在大流量的情况下,图片拍摄的跨帧延时(一组成对计算图片之间的时间间隔)采用 60 μs,在小流量的情况下采用 240 μs。计算得到的数据文件用 Tecplot10 处理。

2 试验结果及分析

2.1 背压对喷雾形成过程的影响

在低燃烧室背压(0.1 MPa)和高燃烧室背压(2.2 MPa)条件下,从开始喷雾到喷雾形成过程中喷雾照片如图 3 所示。在低燃烧室背压下,形成一

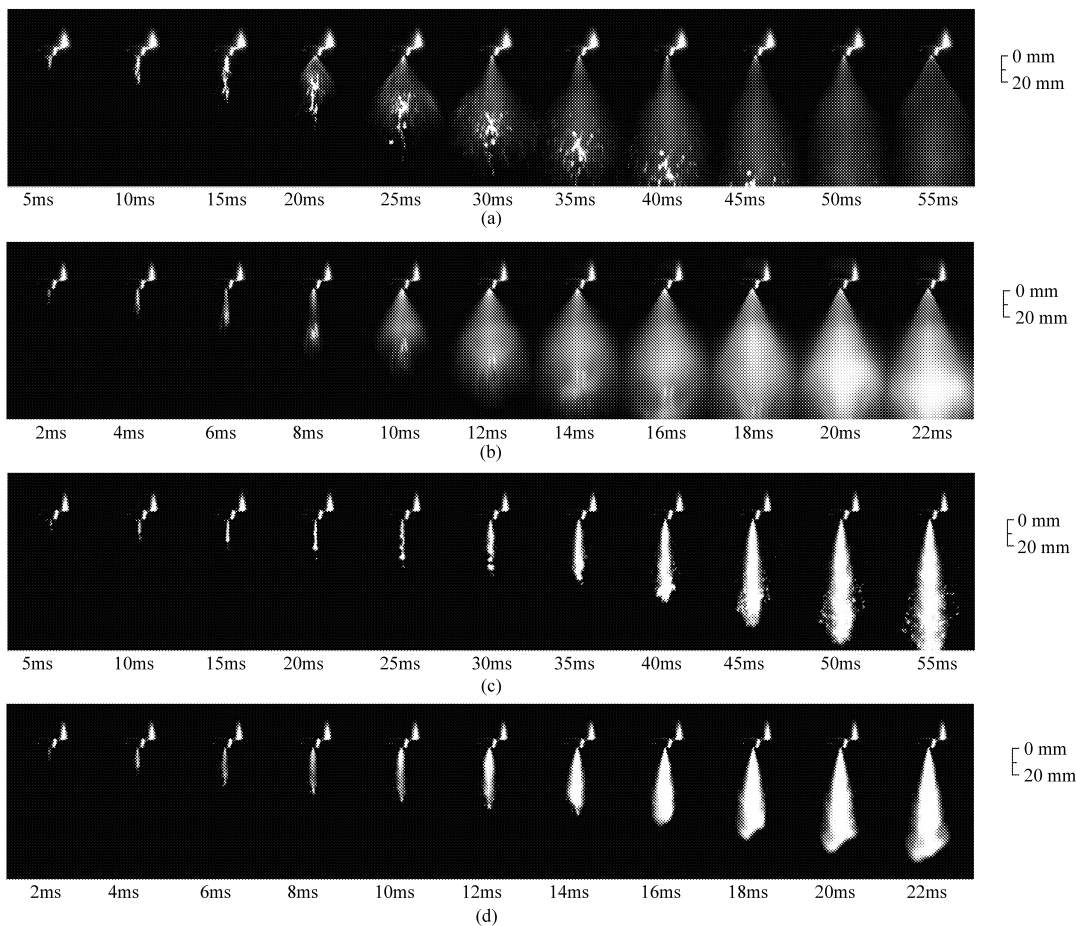


图 3 不同喷油压力时的喷雾形成过程

Fig. 3 Images of the spray development after the start of injection at different injector pressures

(a) $Q = 8 \text{ kg/h}$, $\Delta p = 1.25 \text{ MPa}$, $p_a = 0.1 \text{ MPa}$ (b) $Q = 20 \text{ kg/h}$, $\Delta p = 7.52 \text{ MPa}$, $p_a = 0.1 \text{ MPa}$
(c) $Q = 8 \text{ kg/h}$, $\Delta p = 1.25 \text{ MPa}$, $p_a = 2.2 \text{ MPa}$ (d) $Q = 8 \text{ kg/h}$, $\Delta p = 7.52 \text{ MPa}$, $p_a = 2.2 \text{ MPa}$

个喷雾锥角较大的空心锥喷雾,而在高燃烧室背压下,喷雾形状变得紧密。

从电磁阀得到开启信号,喷嘴出口处开始有液体流出,直到喷嘴出口处液体大到足够使液柱破碎雾化,这个时间间隔中流过喷孔的液体形成初始液柱。如初始液柱雾化质量不好,会使燃烧状况变差,在燃烧室内壁上积油,影响斯特林发动机的启动性能和传热性能。由图 3a、图 3b 的低燃烧室背压图片中,能明显观察到初始液柱,而且随初始液柱而来的主喷液滴的速度大于初始液柱,主喷液滴会追上初始液柱。由图 3c、图 3d 可见,喷雾显得非常致密,漩涡现象在高燃烧室背压以及高喷射压力更加明显,这是由于在燃烧室高背压时,较高的周围气体密度使得液滴的动能损失变大,从而轴向速度降低,较高的喷射压力会影响喷雾液滴的流动速度,从而加剧周围气体的旋转以及卷吸作用。

贯穿距离可以很好地反映喷雾形成过程喷雾形状的变化。低燃烧室背压时,从开始喷射到喷雾完全形成过程中有液柱出现,对贯穿距离的测量有所影响,本文在测量低燃烧室背压贯穿距离时,从可以

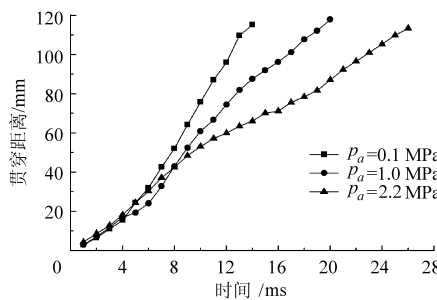


图 4 背压对喷雾贯穿距离的影响(流量 16 kg/h)

Fig. 4 Spray penetration with time at different ambient pressures ($Q = 16 \text{ kg/h}$, $\Delta p = 4.89 \text{ MPa}$)

明显分辨初始液柱和主要喷雾形状的时刻开始测量。如图 4 所示,在从开始喷射很短的时间内,贯穿距离的增长趋势在 3 种背压下表现得很一致,然后贯穿距离的增长在高背压时明显放缓,而且随着燃烧室背压的增加,贯穿距离增长更加缓慢。这主要是由于周围气体的密度增加对喷雾液滴的阻碍导致液滴的动能损失变大造成的,环境气体密度的增加对喷雾有一种压缩作用。

2.2 背压对喷雾锥角的影响

对于斯特林发动机,压力涡流喷嘴的作用是使

燃油连续喷射雾化,和内燃机相比,并没有经历频率很快的起喷和停止,因此,喷雾锥角是比贯穿距离更重要的衡量斯特林发动机雾化效果的参数。如图 5 所示,在各个燃烧室背压下,喷射压力的提高都使得喷雾锥角明显增加。但是在较低的燃烧室背压时,燃烧室背压是影响喷雾锥角的关键因素,喷雾锥角随着燃烧室背压的增加而减小。当燃烧室背压增长到临界值后,燃烧室背压对喷雾锥角的影响减弱,甚至没有影响。本文所用的斯特林发动机压力涡流喷嘴,如图 5 所示,这个临界值在 1.0 ~ 1.5 MPa 之间。喷射压力的减小使得喷雾液滴的速度降低,喷雾液滴和周围燃烧室气体的动量交换使得喷雾周围气体的动量减小,从而喷雾锥角降低。值得注意的是喷雾对空气的卷吸作用,当空气不断地从喷雾环境周围卷吸进入喷雾,对喷雾锥角具有增大作用,当燃烧室背压大于临界值时,这种空气的卷吸作用大于由于燃烧室气体密度上升对喷雾造成的压缩作用,变为影响喷雾锥角的主要因素。

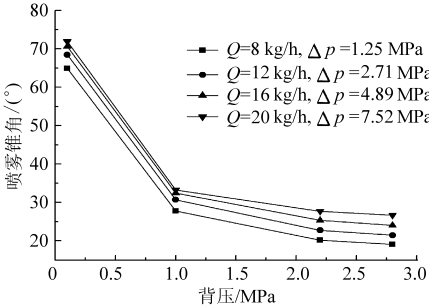


图 5 背压对喷雾锥角的影响
Fig. 5 Influence of ambient pressure on spray angle

2.3 背压对粒径分布的影响

试验采用激光测试仪测量激光束线上的粒径分布时,对压力涡流喷嘴粒径分布代表性的测试位置,并无严格的规定,一般观点认为:由于喷孔轴线上既包括喷雾核心的小粒子,也包括喷雾外围的大粒子,这一点应固定在喷雾轴线上。而太靠近喷嘴的区域,微小粒子的减速会使该区域的测量结果小于真实值。本试验根据稳定宏观喷雾的形状,以距离喷嘴正下方 112 mm 的位置为比较背压对喷雾粒径分布的影响。

图 6 用百分数对不同喷射压力的喷雾粒径分布进行描述。试验结果表明随着喷射压力的增加,喷雾的平均粒径减小,粒径分布曲线左移,最大喷雾粒径有所减小。喷射压力的增加也会使喷雾具有更大的初始速度,从而具有更大的能量克服液柱的表面张力而破碎雾化,这都会使喷雾的雾化效果更好。

图 7 所示为燃烧室背压对雾粒索特平均直径 (SMD) 的影响。由图可知,在两种燃烧室背压 (0.1、

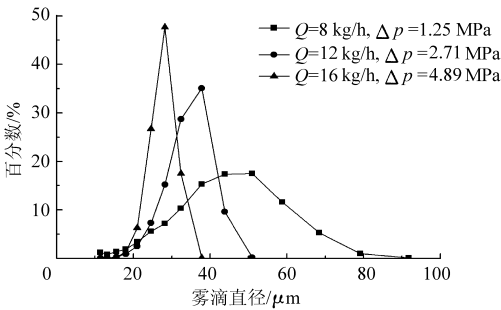


图 6 不同喷射压力的喷雾粒径分布 ($p_a = 1.0$ MPa)
Fig. 6 Drop size distribution under different nozzle pressures drop ($p_a = 1.0$ MPa)

1.0 MPa) 情况下,索特平均直径随着流量的增加和喷射压力的增加均有所减小。在各种流量下,或者在相同的喷射压力下,燃烧室背压对索特平均直径的影响主要有两方面,一是燃烧室气体密度的增加使得周围气体分子的运动更加剧烈,从而使得喷雾液滴和气体分子的动量交换,卷吸作用加剧,这使得液滴直径减小。但是,这种趋势也受到燃烧室背压升高导致喷雾锥角减小的影响,喷雾锥角的减小,增加了液滴之间互相碰撞融合的几率。由试验可知,对于斯特林发动机所用的压力涡流喷嘴,后一种的作用占据主要作用,从而总体上,燃烧室背压的升高对索特平均直径具有增大的作用。

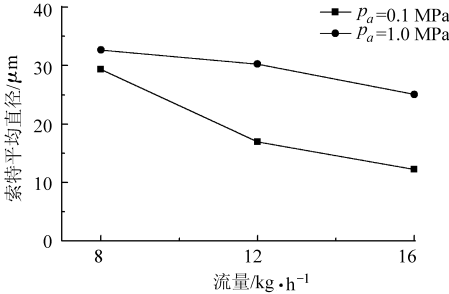


图 7 燃烧室背压对雾粒索特平均直径的影响
Fig. 7 Influence of ambient pressure on the SMD

2.4 背压对喷雾流场的影响

图 8 分别给出了背压在 1.0、2.2、2.8 MPa 条件下,16 kg/h 燃油流量时,根据 PIV 试验计算得到的喷雾速度云图和速度矢量图。测试区是距喷嘴正下方 15 mm 处一个宽 30 mm、高 150 mm 的长方形区域。速度场分布总体上显示出轴线附近速度大,外围区域速度低的特点。流场中心有一片区域粒子呈现湍流运动,速度要明显高于其他区域。由图可知,随着背压的升高,喷雾雾粒的平均速度减小,燃烧室气体压力的增加抑制了喷雾雾粒的扩散运动。中心湍流区域也随着背压的升高向远离喷嘴的方向偏移。从表征离子运动变化趋势的喷雾速度矢量图可知,背压提升时喷雾中的湍流区域向远离喷嘴的方向发展,速度场矢量图中湍流区 (粒子速度矢量线

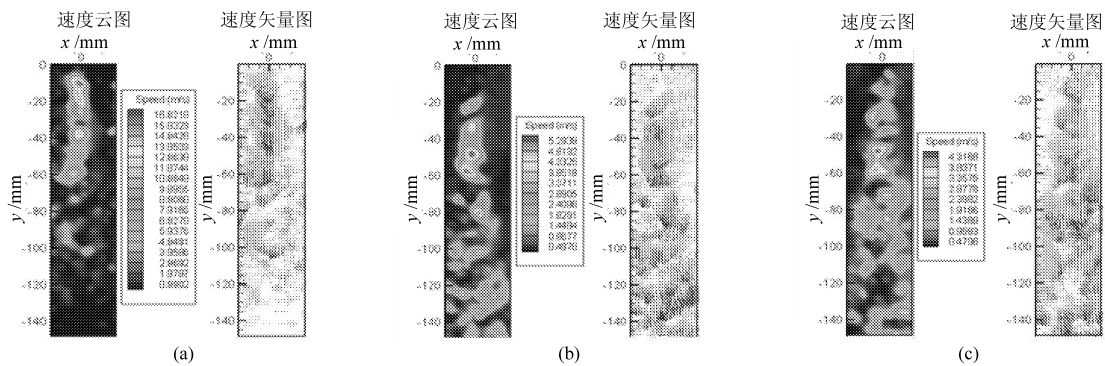


图 8 不同燃烧室背压喷雾微观流场图

Fig.8 Velocity field at different ambient pressures

(a) $p_a = 1.0 \text{ MPa}$ (b) $p_a = 2.2 \text{ MPa}$ (c) $p_a = 2.8 \text{ MPa}$

密集的地方)在较高背压的情况下出现在离喷嘴更远的地方。

3 结论

- (1) 在高燃烧室背压条件下,喷雾结构密集,初始液柱和随之而来的主喷没有明显的分离;在喷雾头部边缘有明显的漩涡;喷雾贯穿距离增长减缓。
- (2) 当燃烧室背压高于 1.0 ~ 1.5 MPa 之间的

某临界值时,燃烧室背压对喷雾锥角不再有影响,而在低于此临界值时,喷雾锥角随燃烧室背压的增大急剧减小。

- (3) 更高的喷射压力使得喷雾平均粒径变小,而索特平均直径会随着燃烧室背压的升高而减小。
- (4) 燃烧室背压的升高会使喷雾雾粒的运动速度减慢,喷雾中心湍流区的位置也会随着背压的升高向远离喷嘴的方向移动。

参 考 文 献

1 Guildenbecher D R, Rachedi R R, Sojka P E. Pressure-scaling of pressure-swirl atomizer cone angles[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008,130(6):061501.

2 Wang Xibin, Gao Jian, Jiang Deming, et al. Spray characteristics of high-pressure swirl injector fueled with methanol and ethanol[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(6):2 394 ~ 2 401.

3 Young-Sam Shim, Gyung-Min Choi, Duck-Jool Kim. Numerical and experimental study on hollow-cone fuel spray of high-pressure swirl injector under high ambient pressure condition [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(2):320 ~ 329.

4 王乃宁,虞先煌. 基于米氏散射及夫朗和费衍射的 FAM 激光测粒仪 [J]. 中国粉体技术,1996,2(1):1 ~ 6.

Wang Naining, Yu Xianhuang. Mraunhofer diffraction and Mie scattering based laser particle sizer [J]. China Powder Science and Technology, 1996, 2(1):1 ~ 6. (in Chinese)

5 胡怀礼,张武高,金永星,等. 斯特林发动机喷雾特性实验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(2):10 ~ 16.

Hu Huaili, Zhang Wugao, Jin Yongxing, et al. An experimental study of Stirling engine's fuel spray characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):10 ~ 16. (in Chinese)

(上接第 14 页)

6 Kumar P. Significance of the ratio of exhaust temperature to coolant temperature and its effect on various engine working parameters [C]//Proceedings of the Word Congress on Engineering, 2009.

7 刘永长. 内燃机原理[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2001.

8 马志超. 火花点火天然气发动机燃烧与排放特性研究[D]. 天津:天津大学, 2007.

9 邓义斌,黄荣华,王兆文,等. 发动机电控冷却系统建模设计与优化[J]. 农业机械学报,2011,42(1):31 ~ 34,38.

Deng Yibin, Huang Ronghua, Wang Zhaowen, et al. Modeling for electronic-control cooling system in engine and its optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):31 ~ 34,38. (in Chinese)