

进气涡流与油束夹角对柴油机燃烧性能的影响*

袁 野 李国岫 李洪萌

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

【摘要】 进气涡流与喷孔结构对柴油机缸内混合气分布有着决定性的影响,通过合理匹配二者可以优化缸内燃烧过程,从而获得更好的性能。对某小型高强度柴油机燃烧系统进行了多维仿真研究,综合分析了进气涡流与油束夹角的交互作用对缸内混合气分布、燃油蒸发、油气混合以及放热过程的影响机理,得到了二者对该机型的优化匹配准则。结果表明:增大和减小进气涡流和油束夹角可以分别增加上止点前后的燃油蒸发速率;涡流可以加速油气混合过程,而油束夹角过大则会减缓喷油中后期的油气混合速率;涡流比与油束夹角匹配得当时,缸内的混合气更均匀、索特平均直径更小,从而可以显著优化预混燃烧过程。

关键词: 柴油机 喷油系统 进气系统 交互作用

中图分类号: TK421.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0001-06

Effects of Intake Swirl and Spray Angle on Combustion Performance for Diesel Engine

Yuan Ye Li Guoxiu Li Hongmeng

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract

Multi-dimensional simulation was conducted on a small high intensified diesel engine. The influence mechanism of the interaction of intake swirl and spray angle on the in-cylinder mixture distribution, fuel evaporation, mixing and heat release processes was analyzed. Optimum matching criteria was finally acquired. The results showed that increasing and decreasing the intake swirl and spray angle could accelerate the fuel evaporation rate before and after TDC respectively. Swirl could accelerate the process of mixing fuel and air, but if spray angle was too large, the mixing rate in the later part of injection could be retarded. When the swirl ratio and spray angle were matched appropriately, the mixture would be more uniform and the SMD would be smaller, which could significantly optimize the premixed combustion process.

Key words Diesel engine, Fuel injection system, Intake system, Interaction

引言

柴油机燃烧系统决定了整机的总体性能,而喷油系统和进气系统参数对缸内燃烧有着决定性的影响,研究两种参数间交互作用对燃烧性能的影响机理,有助于指导柴油机燃烧系统的设计。

目前针对柴油机多参数交互作用已经有了广泛的研究,文献[1~2]研究了喷油和进气系统参数对柴油机性能的影响,文献[3~4]研究了喷油系统与燃烧室参数间的匹配对柴油机性能的影响,文献[5~6]基于燃烧室形状、进气和喷油系统等参数研究了柴油机燃烧系统参数的最优组合,文

收稿日期: 2011-12-13 修回日期: 2012-02-13

* 国家自然科学基金资助项目(51076008)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(M11JB00300)

作者简介: 袁野,博士生,主要从事柴油机燃烧过程仿真研究,E-mail: 10116322@bjtu.edu.cn

通讯作者: 李国岫,教授,博士生导师,主要从事内燃机燃烧与排放研究,E-mail: gxli@bjtu.edu.cn

献[7~11]分别对燃烧室、进气和喷油系统单方面参数的优化匹配进行了研究。

对于小型高强度柴油机,由于转速高、缸径小,其燃烧过程有许用时间短、许用空间小的特点,如何布置油束在缸内的分布关系到整个燃烧系统性能的好坏。本文针对某小型高强度柴油机,研究燃烧系统进气涡流与喷孔结构之间的交互作用对燃烧性能的影响,通过分析多种表征蒸发、混合与燃烧过程的中间参数,研究进气涡流与喷孔结构对燃烧系统性能的影响机理。

1 计算模型及研究方案

应用三维仿真软件 FIRE 对某单缸小缸径高转速大功率柴油机进行仿真计算。柴油机的压缩比为 14.5,无进气涡流,喷孔结构为 $8 \times \Phi 0.28\text{ mm}$,喷油提前角为 18°CA ,油束夹角为 155° ,喷油压力为 170 MPa(高压共轨)。

仿真始点为进气门关闭时刻(245°CA),终点为排气门开启时刻(465°CA)。出于计算成本的原因,没有考虑进排气过程,只模拟压缩和膨胀两个冲程的燃烧及作功情况。通过本机型大量的实验数据分析可知,进排气功占总功的比重小且与压缩膨胀功存在变化不大的比例关系,本文在近似估计进排气冲程作功的基础上,通过压缩和膨胀两个冲程的作功情况来评价总体的作功能力。

柴油机的燃烧系统为 8 个喷孔,为了减少计算时间,选取气缸的 1/8 区域作为计算域,图 1 为柴油机燃烧室的网格示意图。

原机模型经验证,压力曲线与实验对比如图 2 所示,误差在允许范围内,可以进行数值仿真。

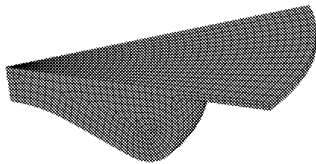


图 1 原型燃烧室的网格图

Fig.1 Computational mesh for combustion chamber

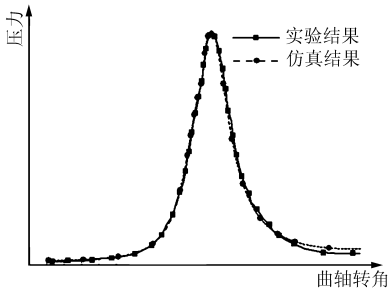


图 2 仿真模型校准曲线

Fig.2 Validation of simulation model

在仿真计算中,缸内湍流流动采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型,燃油射流分裂雾化采用 WAVE 模型,燃油蒸发采用 Dukowicz 模型,液滴碰壁采用 Walljet 模型,湍流燃烧采用 EBU 模型。

涡流比大小主要影响周向上气流的强弱,而油束夹角的大小则主要影响喷束在轴向和径向上的分布位置,两者的共同作用决定了最终的油束落点位置、缸内燃油分布的主要区域以及主燃区的位置,两者的交互作用在很大程度上影响着燃烧过程的进行。设置计算方案如表 1 所示。

表 1 涡流比与油束夹角匹配计算设置
Tab.1 Calculation set for simulation

涡流比	油束夹角/($^\circ$)
0	155、160、165、170、175
0.4	155、160、165、170、175
0.8	150、155、160、165、170
1.2	150、155、160、165、170
1.5	150、155、160、165、170
1.8	150、155、160、165、170

2 进气涡流与喷孔结构交互影响机理分析

为了揭示燃烧系统设计参数之间的内在匹配关系,量化研究了涡流比与油束夹角的交互作用对柴油机压缩、作功冲程中各子过程的影响。

2.1 混合气分布机理分析

图 3 为分别改变涡流比与油束夹角, 360°CA (上图)、 365°CA (中图)、 370°CA (下图)时缸内的混合气分布情况,由图可见,当有涡流比存在时,涡流的吹偏使混合气在缸内的周向分布范围更广,但同时也会造成燃油贯穿距离缩短以及相邻油束间相互干涉的情况;当油束夹角增大时,混合气上移,燃烧室上部的空气得到了利用,但在燃烧室上壁处出现燃油附壁的现象。因此在选择涡流比与油束夹角时,应兼顾二者对油气混合带来的有利和不利影响。

2.2 燃油蒸发机理分析

从燃油蒸发角度考虑,增大油束夹角可以使油束前端更接近喉口处的高速挤流区,而当有涡流存在时,高速挤流和涡流同时对油束的吹拂作用不仅能使燃油分布更广,加强蒸发表面的气流,还能促进较大油粒的分裂,从而加快燃油的蒸发。

图 4 显示了涡流比与油束夹角 6 种匹配情况下燃油蒸发速率的对比。由图可知,活塞上行阶段:当涡流比从 0 增加至 0.8 时,蒸发速率提升了约 13%,而当涡流比继续从 0.8 增加至 1.8 时,蒸发速率仅提升约 5%;当油束夹角由 155° 增加至 170° 时,

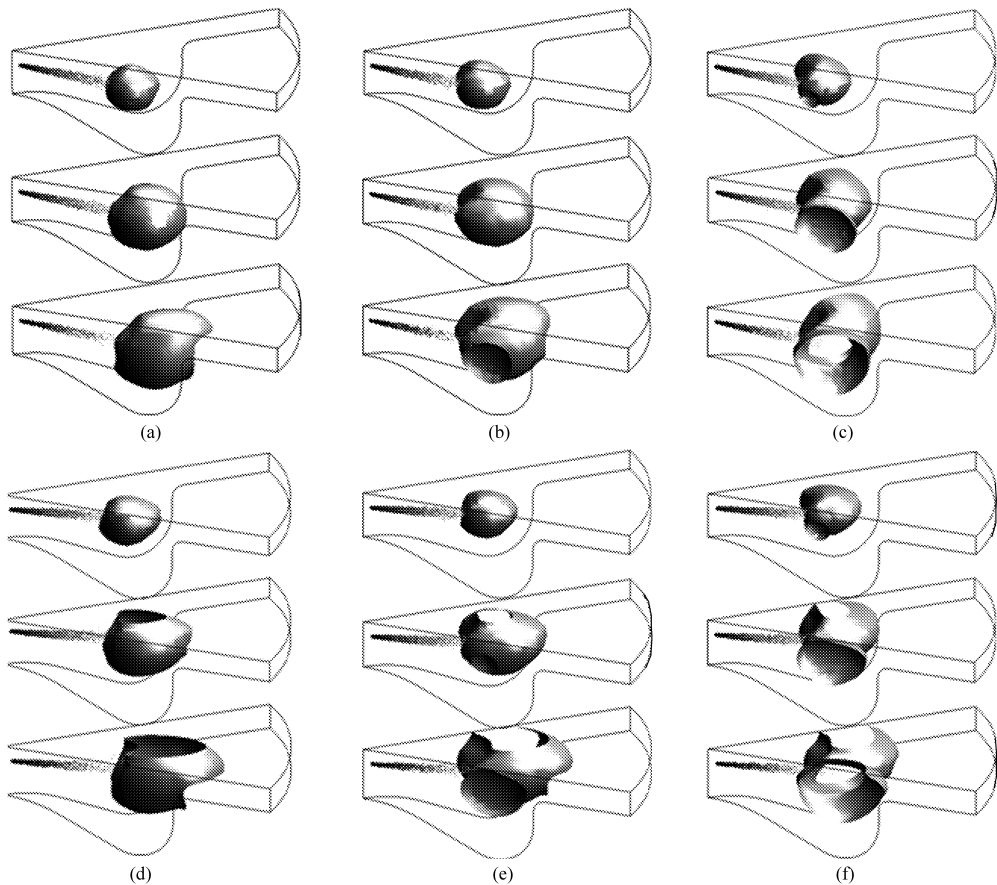


图 3 各时刻缸内混合气分布

Fig. 3 Distribution of mixture at each time

(a) 0, 155° (b) 0.8, 155° (c) 1.8, 155° (d) 0, 170° (e) 0.8, 170° (f) 1.8, 170°

蒸发速率提升了 10% ~ 20%。活塞下行阶段：随着混合气分布范围的扩大，增加涡流和油束夹角所带来的负面效应逐渐显现，油束间的干涉重叠和混合气附壁都抑制了燃油的蒸发，当涡流比从 0 增加至 0.8 时，蒸发速率减少约 6%，涡流比继续从 0.8 增加至 1.8 时，蒸发速率减少约 3%；当油束夹角由 155° 增加至 170° 时，蒸发速率减少约 10%。

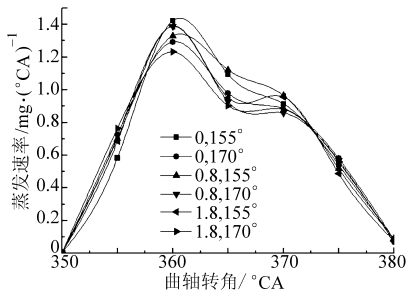


图 4 涡流比与油束夹角的交互作用对燃油蒸发速率的影响

Fig. 4 Effect of interaction of swirl ratio and spray angle on fuel evaporation rate

2.3 油气混合机理分析

为了揭示燃烧系统设计参数之间的内在匹配关系，量化研究了参数两两匹配对缸内燃油蒸发、混合

及燃烧过程的影响。基于对广义 EBU 模型的理解，湍流燃烧区化学反应过程的快慢取决于湍流混合过程的速率，即正比于湍流混合时间的倒数 ε/k ，将 ε/k 看作影响油气混合过程的因素之一；另外，考虑到油气混合过程与缸内燃油浓度的分布密切相关，而缸内混合气浓度方差的大小反映了混合气的均匀程度，因此，将缸内混合气浓度方差作为油气混合质量的另一个重要影响因素。综上，构建了定量描述油气混合过程的两个特征参数，湍流混合速率 Δ 和混合气浓度方差 Y^2 为

$$\Delta = \frac{\sum m_i \frac{\varepsilon_i}{k_i}}{\sum m_i} \quad (1)$$

$$Y^2 = \frac{\sum m_i (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum m_i} \quad (2)$$

式中 k ——湍流动能， m^2/s^2

ε ——湍流动能耗散率， m^2/s^3

Y_i ——第 i 个网格单元内燃油蒸气质量分数

$\bar{Y}$ ——所有网格单元内燃油蒸气质量分数均值

m_i ——第 i 个网格单元内所有组分的总质量

图5给出了涡流比与油束夹角的交互作用对湍流混合速率的影响,从图中可以看出,在喷油前期(喷油时刻至上止点时刻),油束尚未足够发展,此时涡流对缸内混合起主导作用,初始涡流比每增加约0.9,这阶段的混合速率加快约3.5%。在喷油的中后期(上止点以后),燃油的分布范围足够大,油束夹角决定了其在缸内的分布位置,从而开始影响该阶段油气混合速率,油束夹角由 155° 增加至 170° 使混合速率减少约8%,与此同时,由于燃油贯穿距离的增加,涡流比对混合速率的影响也逐渐增大,初始涡流比每增加约0.9,这阶段的混合速率加快约8.5%。所以仅从湍流混合速率考虑,大涡流匹配小油束夹角更利于油气混合的进行。

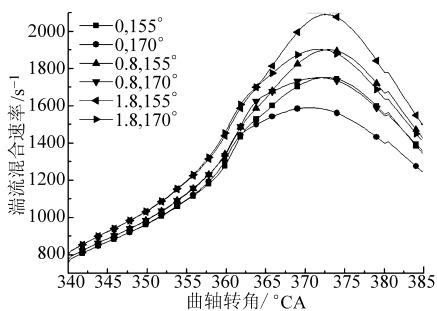


图5 涡流比与油束夹角的交互作用对混合速率的影响

Fig.5 Influence of interaction of swirl ratio and spray angle on mixing rate

从形成混合气的浓度方差考虑(如图6所示),涡流比越大,油气分布范围越广,缸内混合越强,混合气浓度方差越小,即混合气越均匀,最大涡流下的混合气浓度方差比无涡流时小约18%。当无涡流时,扩大油束夹角对混合气浓度方差基本无影响,涡流比分别为0.8和1.8时,油束夹角由 155° 扩大至 170° ,可以使 375°CA 前混合气浓度方差分别减小约10%和6%,而 375°CA 之后,扩大油束夹角反而使混合气浓度方差显著增大,这是由于涡流比越大,扩大油束夹角所造成的燃油附壁面积越大,从而造成了更大的过浓区域。

从图7中的索特平均直径可以看出,6种匹配方案下索特平均直径的差别在上止点附近($355^\circ\text{CA} \sim 365^\circ\text{CA}$)的短时间内比较明显,在此时间段内,无涡流和过大涡流都会造成过大的索特平均直径,适当的涡流比使其减小约16%,由此可见油束干涉重叠将明显影响索特平均直径大小。由于燃油附壁成膜不会影响对索特平均直径的统计,而部分油滴撞壁后存在反弹破碎现象,因此较大的油束夹角会在一定程度上减小缸内索特平均直径的大小(5%~15%不等)。

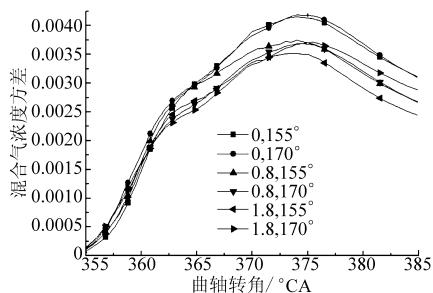


图6 涡流比与油束夹角的交互作用对混合气浓度方差的影响

Fig.6 Effect of interaction of swirl ratio and spray angle on the variance of mixture concentration

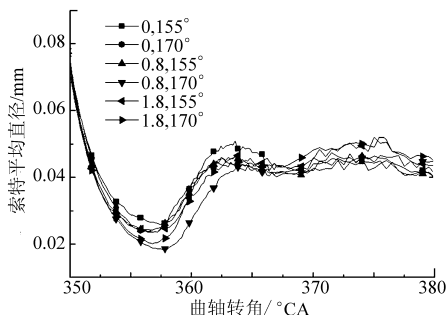


图7 涡流比与油束夹角的交互作用对索特平均直径的影响

Fig.7 Effect of interaction of swirl ratio and spray angle on SMD

2.4 缸内放热机理分析

由涡流比与油束夹角的交互作用对放热率的影响可以看出(图8),6种情况的燃烧始点大致相同,为 353°CA 左右。在预混燃烧阶段(第一峰),涡流比0.8匹配油束夹角 170° 方案的放热率与其余方案有明显不同:峰值最大(比其余方案大10%~20%)且出现时间最晚(比其余方案晚约 1.3°CA)、燃烧持续时间最久(比其余方案多约 2°CA)、上止点前的放热率最小(比其余方案小20%~90%)。在扩散燃烧阶段(第二峰),各方案放热率的差别小于20%,涡流比0.8匹配油束夹角 170° 方案的放热率处于平均水平。总体看来,当涡流比与油束夹角匹配得当时,可以显著优化预混燃烧阶段,减少压缩负功并且增大正功及作功时间,同时扩散燃烧阶段的作功能力也有保证。

3 进气涡流与喷孔结构的优化匹配结果

通过大量的仿真计算,得出涡流比与油束夹角的匹配对发动机指示功率比(以原机方案无涡流匹配 155° 油束夹角的指示功率为基准,其它条件下的指示功率与基准的比值定义为指示功率比)的影响,如图9所示。

从图中可以看出,对于同样的油束夹角,随着涡

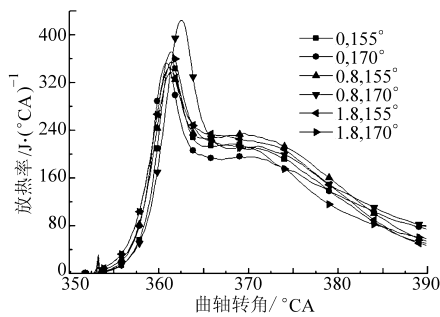


图 8 涡流比与油束夹角的交互作用对放热率的影响

Fig. 8 Effect of interaction of swirl ratio and spray angle on heat release rate

流比从 0 增加到 1.8,指示功率比先增加后减小,在涡流比为 0.8 时可以达到最大指示功率比。随着油束夹角的增大,指示功率比呈现先增大后减小的趋势,而且涡流比越靠近 0.8,指示功率比随油束夹角改变的斜率越大,即油束夹角匹配的范围也越小。由图可知,指示功率比峰值出现在涡流比 0.9 匹配油束夹角 170°时。

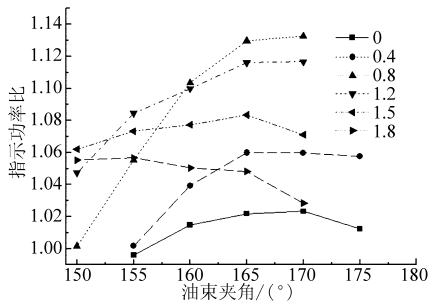


图 9 涡流比与油束夹角匹配对指示功率比的影响

Fig. 9 Effect of matching of swirl ratio and spray angle on indication power ratio

以指示功率比为优化目标,当涡流比或油束夹角一定时,另一个参数的选取准则如图 10 所示。从图中可以看出,当涡流比为 0.8 ~ 1.0、油束夹角为 165° ~ 170°时,可以取得较好的指示功率比,超出这一范围时功率将恶化,这充分表明,油束在缸内的分布存在一个最佳位置,涡流比与油束夹角适当匹配使油束处于该位置附近时,可以得到较好的指示功率比。

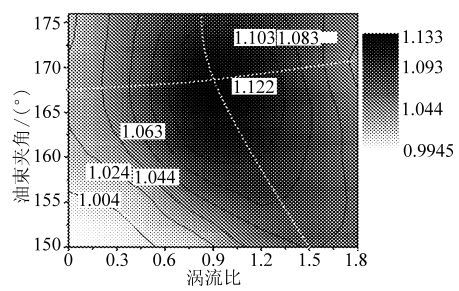


图 10 指示功率比为优化目标时涡流比与油束夹角的匹配准则图

Fig. 10 Matching criteria of swirl ratio and spray angle for optimizing the indicated power ratio

4 结论

- (1)较大的进气涡流和油束夹角可以增加上止点前的燃油蒸发速率,较小的进气涡流和油束夹角在上止点后有较高的燃油蒸发速率。
- (2)涡流的存在可以加速油气混合,且随着喷油过程的进行,涡流对混合速率的影响逐渐增大,较大的油束夹角将减缓喷油中后期的油气混合速率;涡流比越大,油气分布范围越广,缸内混合越强,混合气浓度方差越小,即混合气越均匀,当缸内无涡流时,油束夹角对混合气均匀程度基本无影响,当缸内有涡流时,扩大油束夹角可以减小混合气浓度方差。
- (3)涡流比和油束夹角交互作用对索特平均直径的影响主要体现在上止点附近时,适当的涡流比能使其显著减小,较大的油束夹角会在一定程度上减小缸内索特平均直径。
- (4)当涡流比与油束夹角匹配得当时,可以显著优化预混燃烧阶段,减少压缩负功并且增大正功及作功时间,同时扩散燃烧阶段的作功能力也有保证。
- (5)对本文研究的小缸径高强度柴油机而言,当涡流比为 0.8 ~ 1.0、油束夹角为 165° ~ 170°时,混合气在缸内的分布位于最佳位置附近,可以取得较好的指示功率,超出这一范围时功率将恶化。

参 考 文 献

1 Yu Shi, Rolf D Reitz. Optimization of a heavy-duty compression-ignition engine fueled with diesel and gasoline-like fuels[J]. Fuel, 2010, 89(11): 3 416 ~ 3 430.

2 Lee T, Rolf D Reitz. Response surface method optimization of a high-speed direct-injection diesel engine equipped with a common rail injection system[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(2): 541 ~ 546.

3 张元毅,刘德华,徐秀兰,等. 小缸径低旋流直喷式柴油机结构参数匹配[J]. 农业机械学报,1997,28(3):1 ~ 5. Zhang Yuanyi, Liu Dehua, Xu Xiulan, et al. A study on matching construction parameters of combustion system in small-bore low-swirl D. I. diesel engines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(3): 1 ~ 5. (in Chinese)

4 林学东,钱耀义,李红洲,等. 车用柴油机缩口型燃烧系统参数优化试验研究[J]. 农业机械学报,2004,35(1):41 ~ 43.

- Lin Xuedong, Qian Yaoyi, Li Hongzhou, et al. Investigation on parameter optimization of a reentrant combustion system for diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 41 ~ 43. (in Chinese)
- 5 赵鹏,李国岫,虞育松. 直喷式柴油机燃烧系统均匀优化设计的多维仿真研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(4): 689 ~ 692.
- Zhao Peng, Li Guoxiu, Yu Yusong. Multi-dimensional simulation of combustion system for a DI diesel by using uniform optimization design method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(4): 689 ~ 692. (in Chinese)
- 6 王平,唐斌,宋希庚,等. 共轨柴油机燃烧系统的匹配研究[J]. 热科学与技术,2008,7(3):252 ~ 255.
- Wang Ping, Tang Bin, Song Xigeng, et al. Matching analysis of diesel engine combustion system with common rail system [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2008, 7(3):252 ~ 255. (in Chinese)
- 7 David D Wickman. HSDI diesel engine combustion chamber geometry optimization[D]. Wisconsin:University of Wisconsin-Madison, 2003.
- 8 虞育松,李国岫,刘建英. 直喷柴油机喷油系统对燃烧和排放影响的三维模拟研究[J]. 热科学与技术,2006,5(1):64 ~ 68.
- Yu Yusong, Li Guoxiu, Liu Jianying. Three dimensional modeling of effect of injection systems on combustion and emission for DI diesel engine[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2006, 5(1):64 ~ 68. (in Chinese)
- 9 赵长禄,周磊,岳玉嵩,等. 通过进气道优化改进柴油机的性能[J]. 内燃机学报,2003,21(4):244 ~ 248.
- Zhao Changlu, Zhou Lei, Yue Yusong, et al. Improvement of diesel engine by intake system optimization[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(4):244 ~ 248. (in Chinese)
- 10 刘丽华. 2135 柴油机燃烧优化[D]. 大连:大连理工大学,2007.
- Liu Lihua. The optimization of the combustion in 2135[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 11 田春霞,王书庆,李来群. CA6DF2L-31 型柴油机性能优化的匹配试验研究[J]. 柴油机,2009,31(1):13 ~ 16.
- Tian Chunxia, Wang Shuqing, Li Laiqun. The matching experimental study for optimized performance of CA6DF2L-31 diesel engine[J]. Diesel Engine, 2009, 31(1):13 ~ 16. (in Chinese)

(上接第 25 页)

- 2 颜文胜,申立中,雷基林,等. 不同大气压力和乙醇/柴油混合掺比对柴油机性能和排放的影响[J]. 内燃机学报, 2007,25(6):539 ~ 544.
- Yan Wensheng, Shen Lizhong, Lei Jilin, et al. Effects on performance and emissions of a turbocharged diesel engine under different atmospheric pressures and diesel/ethanol fraction[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(6): 539 ~ 544. (in Chinese)
- 3 de Menezes E W, da Silva R, Cataluña R, et al. Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests [J]. Fuel, 2006, 85(5): 815 ~ 822.
- 4 Rakopoulos C D, Antonopoulos K A, Rakopoulos D C, et al. Multi-zone modeling of combustion and emissions formation in DI diesel engine operating on ethanol-diesel fuel blends[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(4): 625 ~ 643.
- 5 何超,葛蕴珊,韩秀坤,等. 直喷式柴油机燃用生物柴油的燃烧特性[J]. 内燃机工程, 2007,28(6):7 ~ 10.
- He Chao, Ge Yunshan, Han Xiukun, et al. Combustion characteristics of direct injection diesel engine fueled with biodiesel [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(6): 7 ~ 10. (in Chinese)
- 6 Zoeldy M. Ethanol-biodiesel-diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines [J]. Transport, 2011, 26(3): 303 ~ 309.
- 7 Canakci M. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(6): 1 167 ~ 1 175.
- 8 Szybist J P, Boehman A L, Taylor J D, et al. Evaluation of formulation strategies to eliminate the biodiesel NO_x effect [J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(10): 1 109 ~ 1 126.
- 9 Eloisa T J, Marta S J, Gregorc A, et al. Physical and chemical properties of ethanol-biodiesel blends for diesel engines[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(3): 2 002 ~ 2 009.
- 10 张学敏,裘博,谭建伟,等. 柴油机燃用乙醇-生物柴油-柴油的醛酮类排放物研究[J]. 农业机械学报,2012,43(7): 13 ~ 18.
- Zhang Xuemin, Qiu Bo, Tan Jianwei, et al. Carbonyl compounds emission from engine fueled with ethanol - biodiesel - diesel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7):13 ~ 18. (in Chinese)