

高压喷射的高速直喷柴油机混合气形成及燃烧过程

林学东,李德刚,田 维

(吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室,长春 130022)

摘要:为了有效组织燃烧室内气流特性,改进了车用缩口直喷高速柴油机燃烧室结构,并在此基础上基于CFD商用软件FIRE对匹配不同轨压的喷雾特性时燃烧室内气液混合流的速度场、浓度场和温度场的动态分布特性进行了仿真计算分析。研究了高速直喷柴油机的混合气形成规律,并通过试验研究了这种混合气形成特性对燃烧过程及排放特性的影响。结果表明:通过对缩口直喷燃烧室内气流特性和轨压的优化匹配,可以有效地控制燃烧过程的滞燃期、预混合燃烧比例和扩散燃烧过程,从而控制高温燃烧持续期,在保证经济性的前提下,可以有效地降低 NO_x 和烟度排放。

关键词:动力机械工程;直喷柴油机;燃烧室;气流特性;喷射压力;匹配;燃烧过程;排放

中图分类号:TK421 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)06-1446-06

Air-fuel mixture formation and combustion process of a high-speed direct-injection diesel engine with high pressure injection

LIN Xue-dong, LI De-gang, TIAN Wei

(State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The reentrant combustion chamber shape of a high-speed direct-injection vehicle diesel engine was improved to form required airflow-characteristics in the chamber. The dynamics of in-cylinder flow field, the air-fuel ratio distribution, and the temperature field were simulated by commercial CFD software FIRE for the airflow matching the fuel spray characteristics by different injection pressures. The air-fuel mixture formation of the diesel engine was studied by simulation, and the effects of the obtained mixture formation behavior on the combustion and exhaust emissions were investigated experimentally. The results showed that the ignition delay, the premixed combustion proportion and the diffusion combustion process can be controlled by optimal matching between the airflow characteristics in the reentrant combustion chamber and the fuel injection pressure, thus to control the high temperature combustion duration. The optimization can effectively reduce the NO_x and soot emissions simultaneously without penalty on fuel economy.

Key words: power machinery and engineering; direct-injection diesel engine; combustion chamber; airflow characteristic; injection pressure; matching; combustion process; exhaust emission

收稿日期:2009-03-16.

基金项目:国家自然科学基金项目(59676028).

作者简介:林学东(1959-),男,教授.研究方向:内燃机工作过程优化及电控技术. E-mail:xdlin@jlu.edu.cn

高速柴油机直喷化的关键在于有效控制其混合气形成过程和速率。缩口直喷燃烧室的设计以及高压喷射技术的发展,为高速直喷柴油机的发展提供了技术前提。但高压共轨直喷柴油机上喷雾与燃烧室壁面和喷雾与喷雾之间的相互作用对放热率和排放物的形成过程有较大的影响^[1]。如果不能对燃烧室内的气流特性与喷雾特性进行合理匹配,就会造成喷雾与喷雾之间和喷雾与燃烧室空间之间不合理的匹配或碰撞,导致混合气形成不良,导致发动机性能恶化^[2]。而轨压是影响喷雾特性的重要参数,因此需要使之与燃烧室内的气流特性优化匹配,从而达到控制混合气形成过程以及燃烧室内混合气速度场、浓度场和温度场的分布特性的目的,以获得良好的燃烧过程。这是实现高压共轨直喷柴油机高效低排放的必经之路^[3-4]。

近年来,国内外以喷射系统参数对放热率或者示功图的影响为主要研究对象,分析不同喷射系统参数对发动机性能和排放特性的影响^[5-8];或者着重研究直喷式燃烧室内气流的三维流动特性^[9-12]。这充分表明喷射系统参数和燃烧室内的气流特性是控制直喷式柴油机混合气形成和燃烧过程的关键因素。

本文基于有效控制柴油机燃烧放热规律,以达到既节能又降低排放的目的,对国产车用高速直喷柴油机通过改进设计缩口型燃烧室结构,有效组织燃烧室内气流特性,并使之与燃油的轨压进行匹配,由此分析研究此时气缸内的气液混合流动的速度场、浓度场和温度场的分布特性,探讨缩口直喷式柴油机混合气形成特点,并通过试验研究混合气形成特性对燃烧过程和排放特性的影响。

1 试验设备和仿真条件

1.1 试验设备

试验样机是国产某 2.5 L 轻型车用直列 4 冲程增压中冷高速柴油机,采用 Bosch 第二代高压共轨喷射系统,最高轨压为 145 MPa,喷油器的喷孔数为 6,喷孔直径为 0.137 mm。发动机的主要技术参数如表 1 所示,试验用测试设备如表 2 所示。

1.2 计算条件及方法

图 1 为改进后的燃烧室结构图,燃烧室中部设置凸台,以便左右燃烧室内空气流集中,并且有

利于与喷注配合。取燃烧室缩口比为 $D_1/D_2 = 0.807$,径深比为 $D_2/h = 3.23$,由此通过挤流以有效组织燃烧室内的滚流。

表 1 试验用发动机的技术参数

Table 1 Test engine specifications

缸数	4
缸径/mm	93
冲程/mm	92
压缩比	17.5
排量/L	2.5
标定功率/转速,kW/(r·min ⁻¹)	75/3800
最大扭矩/转速,N·m/(r·min ⁻¹)	260/2000~2600

表 2 试验用测试设备表

Table 2 Test equipment specifications

设备名称	设备型号	生产厂家
测功机	2SD3-25. B-50L. V4-1BGN-F5Z	AVL
废气分析仪	AMA 4000 0.146833. 0.0	AVL
烟度计	OPACIMETER 4390 G004	AVL
油耗仪	733S. 18	AVL
燃烧分析仪	DEWE 800-CA-PROF	AVL
压力传感器	8862. 23. 2310	AVL LIST
缸内压力传感器	6055BBSP96 微型石英传感器	KISTLER

燃烧室内的三维气流特性是通过 CFD 商用软件 FIRE 计算的。计算模型主要采用标准模型、Wave 液滴破碎模型、Dukowicz 蒸发模型、Walljet1 撞壁模型、shell 着火模型、EBU 湍流控制燃烧模型、Enable 湍流扩散模型。

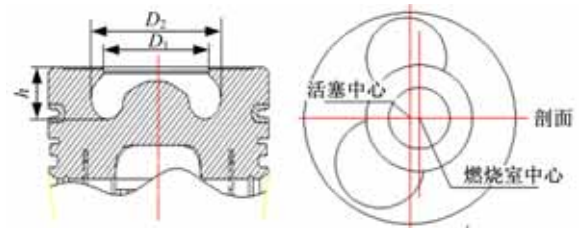


图 1 燃烧室结构布置示意图

Fig. 1 Chamber configuration and arrangement

作为计算初始条件,进气涡流比通过气道试验测定,试验结果进气涡流比为 $SN_0 = 1.8$,作为仿真模拟计算的初始值。计算所需的湍流动能 $TKE(m^2/s^2)$,湍流长度标尺 $TLS(m)$,根据公式(1)~(3)计算。作为计算边界条件,将燃烧室的边界分为气缸盖底面,活塞顶面(包括燃烧室凹坑)以及气缸壁面三个部分,其中活塞顶作为移动边界,设其边界温度为 553 K,气缸壁和气缸盖底面作为固定边界,其温度条件均设定为 403 K。

$$TKE = (3/2) \times u^2 \quad (1)$$

$$u = 0.7 \times 2 \times h \times (n/60) \quad (2)$$

$$TLS = h_w/2 \quad (3)$$

式中: h 为冲程长度, m ; n 为转速, r/min ; h_0 为气门最大升程, m 。

计算方法采用任意拉格朗日-欧拉法(简称 ALE 方法)。ALE 方法空间域划分的网格单元为非对称的任意六面体,速度矢量定义在单元的顶点上,热力学量 $Q(P, Q, T, D)$ 定义在单元的中心上,其差分网格可按速度运动,当网格按当地流体速度运动时,计算采用拉格朗日方式;当网格固定不动时,计算采用欧拉方式。气相控制方程在空间上的差分,在周向上采用隐式差分,其他方向采用显示差分,差分过程通过对控制方程在单元体积上积分实现。

1.3 模型验证

图 2 为采用本文所设计的燃烧室时试验测得的示功图和模拟计算结果的对比情况,试验或计算工况为额定功率点(3600 r/min, 100% 负荷)。对比结果表明,试验结果与仿真计算结果的误差均在 5% 之内,曲线基本吻合。证明仿真过程的数学模型、边界条件和计算方法准确,该模型可用于模拟柴油机的缸内燃烧过程和计算分析。

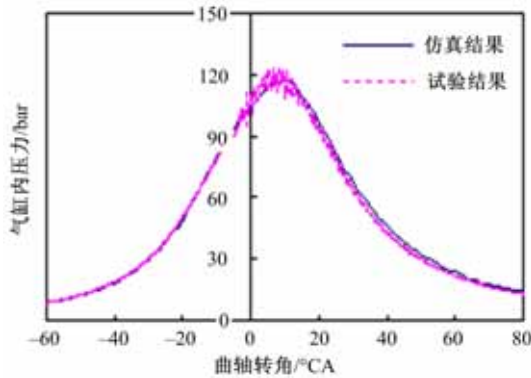


图 2 缸内压力实验值与计算结果的比较

Fig. 2 Comparison of computational and experimental in-cylinder pressure traces

2 缩口燃烧室轨压对混合气形成的影响

2.1 轨压对速度场、浓度场、温度场分布规律的影响

图 3 为改进设计的燃烧室在无喷雾情况下,转速为 2200 r/min 时燃烧室内气流特性的仿真结果。通过合理设计燃烧室缩口比 D_1/D_2 和径深比 D_2/h 后,在压缩和膨胀过程中燃烧室内形成的挤流和逆挤流强度均较大,且挤流强度保持性比较好,在 380°CA(360°CA 为上止点)时燃烧室内

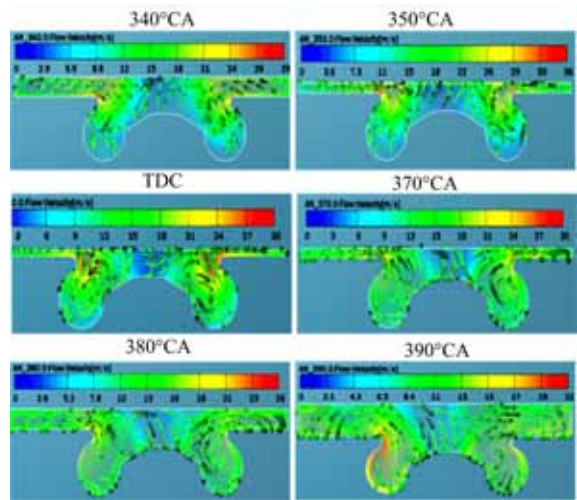


图 3 无喷雾匹配的燃烧室内气流特性

Fig. 3 Airflow characteristic without spray

气流还具有比较完整的涡旋运动;且活塞上行过程中压入燃烧室内的气体量大于活塞下行过程中流出燃烧室的气体量^[13]。这种良好的气流特性有利于控制混合气形成和扩散燃烧过程。

图 4~图 6 分别表示该燃烧室内气流特性与不同轨压匹配时速度场、浓度场和温度场的分布特性。试验条件:喷油量 $M=50$ mg, 喷油正时 $\theta=9^\circ CA(351^\circ CA)$, 轨压分别为 140 MPa 和 80 MPa, 发动机转速为 2200 r/min。

如图 4 所示,喷雾压力的提高,不仅使喷雾速率高,而且喷雾的贯穿距离以及喷雾所具有的动能也增大。在缩口燃烧室结构的导向作用下,燃烧室内喷雾与气流混合后的挤流强度越强,速度场的分布梯度越大,越有利于喷雾相对气流的扩散。因此有图 5 所示的在喷射初期以及膨胀过程

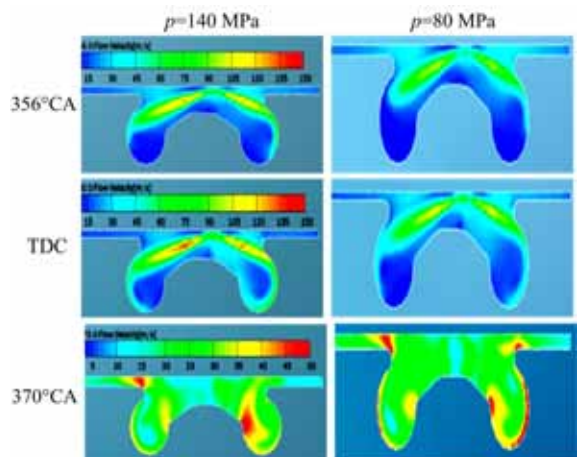


图 4 与不同轨压匹配的速度场

Fig. 4 Velocity field in the cylinder as the chamber matches different rail pressure

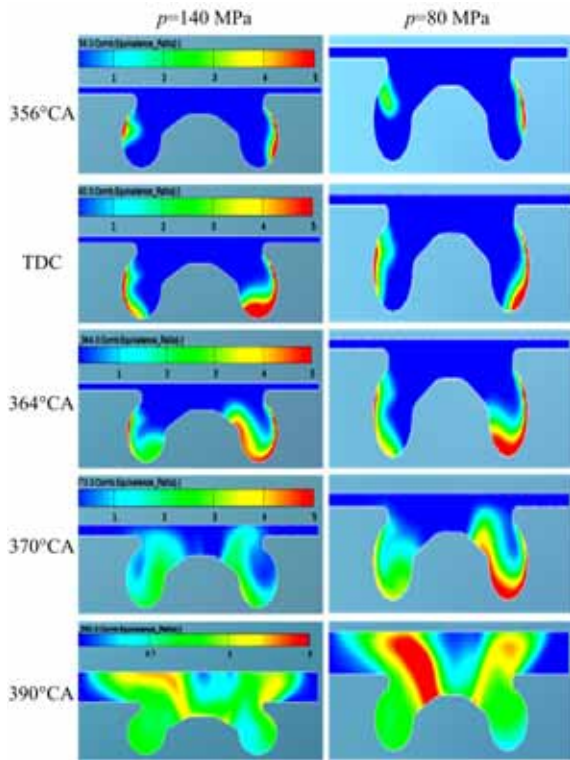


图 5 燃烧室内气流特性与不同轨压匹配的浓度场
Fig. 5 Equivalence ratio in the cylinder as the chamber airflow characteristic match different rail pressure

初期的预混合燃烧阶段,随轨压的提高,喷雾在燃烧室壁面和底部快速形成一层较浓的混合气,并利用燃烧室内较强的气流强度使油束内部快速卷入更多的空气,喷雾与空气的相对扩散速度的提高,会加大混合气的形成速率。而且在扩散燃烧阶段(370°CA 以后),由于充分利用燃烧室内的气流运动,混合气形成较均匀,有利于避免局部混合气浓的现象,有助于完全燃烧。

另一方面,喷油时刻一般在上止点之前,此时缸内温度相对较低,在这期间内喷入的燃油主要是靠气流运动和喷雾与壁面的碰撞形成混合气,因此当轨压高(140 MPa)时,燃烧室内混合气形成的能力强。燃烧室内混合气分布带的宽度比喷射压力为 80 MPa 时大,即快速形成适合于着火的混合气浓度区,使燃烧始点有所提前,缩短滞燃期。因此如图 6 所示,燃烧室内温度也提高,而且燃烧室空间温度梯度的分布特性依赖于混合气的浓度场分布特性。随轨压的提高,促进了混合气的形成和燃烧过程,所以燃烧室内的最高温度也有所提高。

2.2 轨压对放热规律的影响

在上述试验条件(喷油量为 $M=50 \text{ mg}$, 喷油

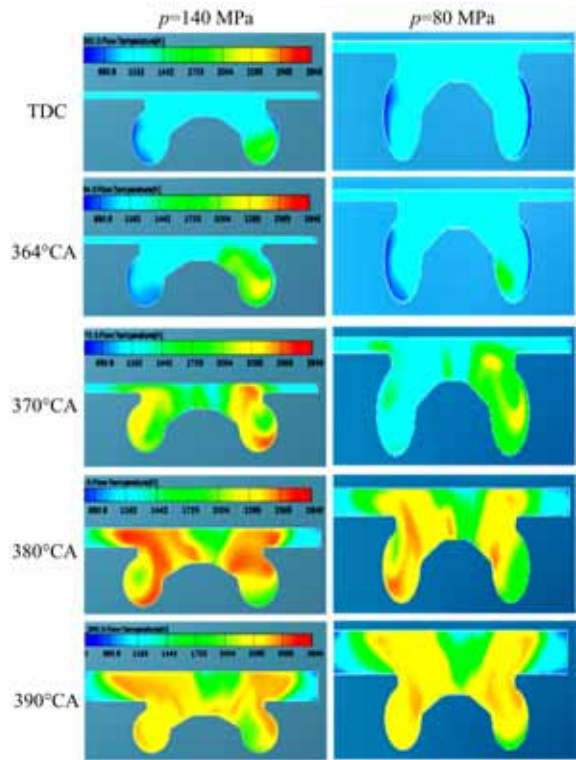


图 6 燃烧室内气流特性与不同轨压匹配的温度场
Fig. 6 Temperature field in the cylinder as the chamber airflow characteristic match different rail pressure

正时 $\theta=9^\circ \text{CA}$ (351°CA), $n=2200 \text{ r/min}$)下,不同轨压对燃烧放热规律的影响结果如图 7 所示,表 3 表示特定的累计放热率的统计规律。

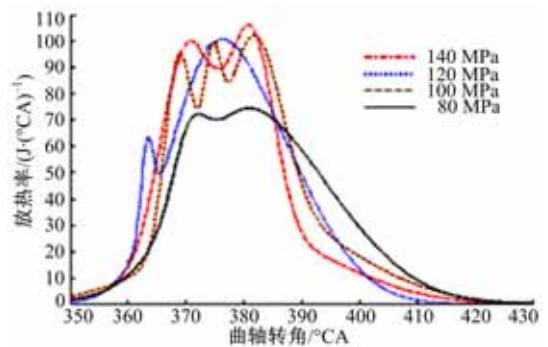


图 7 燃烧室内气流特性与不同轨压匹配时的放热率
Fig. 7 Variety of heat release rate as airflow match different rail pressure

随着轨压的高压化,不仅初期放热速率提高,累计放热率达 5% 所对应的曲轴位置提前,而且累计放热率达 50% (放热重心) 时刻以及累计放热率达 90% 的时刻都提前,说明轨压的提高不仅加快了混合气的形成,而且促进了扩散燃烧的速度,所以放热始点提前,燃烧持续期缩短。

在喷油正时相同的条件下,对一定的转速和

喷油量,当轨压过低(如 80 MPa)时,由于喷油速率低,更多的燃料是在上止点后活塞下行时喷入,此时燃烧室内的气流强度开始不同程度衰减,所以不仅燃料的扩散速度慢,而且卷入喷雾的air的流动强度也变弱,故混合气形成条件变差,形成速率也低。如图 7 所示,不仅初期放热速率缓慢,最高放热率低,而且整个燃烧放热持续期间变长。因此,轨压过低是降低热效率的直接原因之一。

表 3 匹配不同轨压时的放热率统计

Table 3 Statistic of heat release as airflow match different injection pressure

	轨压/MPa	累计放热率/%		
		5	50	90
对应各累	80	364	383	405
计放热率	100	364	380	396
的曲轴转	120	363	378	394
角/°CA	140	363	377	391

2.3 对排放特性及经济性的影响

在膨胀过程中,燃烧室内的气液两相流在逆挤流的作用下部分混合气流向活塞顶部的余隙容积内;此外,在燃料喷射过程中部分燃料在燃烧室壁面的撞击下直接飞溅到余隙容积中。由于余隙容积内空气不充足,所以这部分燃油不能与空气充分混合燃烧,易造成碳烟和 HC 排放。在相同试验条件下,当轨压降低时,由于喷射持续时间延长,更多的燃料因轨压低、雾化质量差而被喷入到余隙容积中,所以 CO 和 HC 排放量随轨压的降低而明显增多,如图 8 所示。同时由于轨压低,混合气形成速率和燃烧速率低,所以燃烧温度低,故 NO_x 排放量明显降低,经济性也相应地恶化,如图 9 所示。

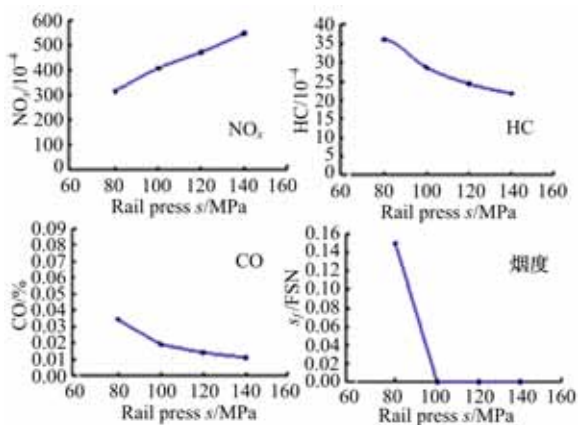


图 8 与不同轨压匹配时的排放变化

Fig. 8 Variety of NO_x and smoke emission as airflow match different rail pressure

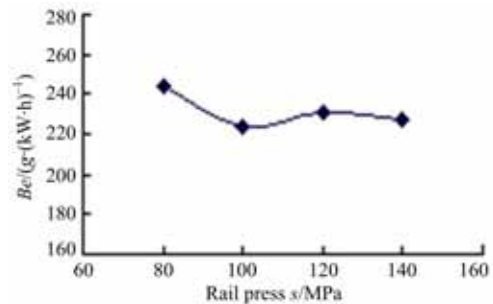


图 9 与不同轨压匹配的经济性变化

Fig. 9 Variety of BSFC as matches different rail pressure

3 结 论

(1)缩口型直喷燃烧室内所形成的气流运动具有逆挤流强度大、在膨胀过程中挤流保持性好的特点,适用于高速直喷柴油机,而且适当减小缩口比、增加挤气面积和提高喷射压力,可以改善混合气形成和着火过程,有利于缩短滞燃期和燃烧持续期。

(2)轨压的提高不仅改善了喷雾质量,同时促进了燃烧室内的气流强度及梯度分布,有利于混合气的快速形成,促进扩散燃烧速度,改善后燃过程。

(3)通过缩口燃烧室的结构参数和喷雾条件,可有效控制燃烧室内混合气的浓度梯度分布特性,从而可有效控制燃烧过程和排放特性。通过燃烧室内气流特性和燃油喷雾特性的优化匹配,在保证动力性和经济性的前提下,可同时减小 NO_x 排放和烟度,在一定程度上减弱了两者的权衡。

参考文献:

[1] Montorsi Luca, Magnusson Alf, Andersson Sven. A numerical and experimental study of diesel fuel sprays impinging on a temperature controlled wall [C]//SAE,2006-01-3333.

[2] 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 Xue-dong, Qian Yao-yi, Li Hong-zhou, 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.

[3] 王军,张幽彤. 4100QBZ 柴油机高压共轨系统喷嘴匹配及优化[J]. 内燃机工程,2005,26(4):28-31.
Wang Jun, Zhang You-tong. Optimization and match

- of injector nozzle of high pressure common rail system in diesel engine 4100QBZ[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 26(4): 28-31.
- [4] 王俊席,杨林,肖文雍,等. GD-1 燃油喷射系统喷油参数对发动机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2004, 25(2): 28-31.
- Wang Jun-xi, Yang Lin, Xiao Wen-yong, et al. Influence of injection parameters on the performance of a DI diesel engine with GD-1 fuel injection system[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(2): 28-31.
- [5] 谭丕强,陆家祥,邓康耀,等. 喷油提前角对柴油机排放影响的研究[J]. 内燃机工程, 2004, 25(2): 9-11.
- Tan Pi-qiang, Lu Jia-xiang, Deng Kang-yao, et al. The influence of fuel injection timing on exhaust emission from a diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(2): 9-11.
- [6] Mamoru Oki, Matsumoto Shuichi, Toyoshima Yoshio, et al. 180 MPa piezo common rail system[C]// SAE, 2006-01-0274.
- [7] Scott A Miers, Stephen A Ciatti. Effect of injector nozzle finish on performance and emissions in a HSDI, light-duty, diesel engine[C]// SAE, 2006-01-0200.
- [8] Zheng Ming, Kumar Raj, Graham T Reader. Adaptive fuel injection tests to extend EGR limits on diesel engines[C]// SAE, 2006-01-3426.
- [9] 朱坚,黄晨,尧命发. 燃烧室几何形状对柴油机燃烧过程影响的数值模拟研究[J]. 内燃机工程, 2007, 28(2): 14-18.
- Zhu Jian, Huang Chen, Yao Ming-fa. Numerical simulation on the effect of combustion chamber geometry on diesel engine combustion process[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(2): 14-18.
- [10] Allocca L, Auriemma M, Corcione F E, et al. Investigation of mixture formation process in a HDDI diesel engine by CFD and imaging technique[C]// SAE, 2005-01-1918.
- [11] Ryan K Guy, Blake R Teipel, Rudolf H Stanglmaier. Use of computational fluid dynamics (CFD) tools for high-performance engine tuning[C]// SAE, 2006-01-3666.
- [12] 张晓宇,苏万华,裴毅强. Bump 环强化柴油混合过程的数值模拟研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23(1): 1-9.
- Zhang Xiao-yu, Su Wan-hua, Pei Yi-qiang. CFD study of mixing enhancement by a bump ring in a combustion chamber[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 23(1): 1-9.
- [13] 林学东. 车用柴油机燃烧系统参数优化及其流动分析[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2004.
- Lin Xue-dong. Research on parameter optimization and flow analysis of combustion system for automotive diesel engine[D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2004.