

甲醇缸内直喷发动机的燃烧特性

李本正¹, 宫艳峰², 刘圣华¹, 宋睿智¹, 黄勇成¹, 周龙保¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 一汽集团技术中心发动机部, 130011, 长春)

摘要: 在一台四缸柴油机改造的复合导流分层燃烧缸内直喷火花点火甲醇发动机上, 开展了燃烧特性的试验研究. 研究表明: 该甲醇发动机的最大压力位于上止点后 $14^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 的位置, 离上止点较近, 燃烧定容性好, 热效率高; 最大压力升高率低, 发动机工作柔和, 燃烧噪声低; 燃烧放热率曲线的形状与传统汽油机预混燃烧单峰形状相似, 没有出现扩散燃烧导致的双峰放热现象; 在宽广的转速和负荷范围内, 平均指示压力的循环变动不超过 10%, 燃烧稳定性好.

关键词: 缸内直喷; 甲醇发动机; 复合导流; 燃烧特性

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1372-05

Combustion Characteristics of a Direct-Injection Spark-Ignition Methanol Engine

LI Benzhen¹, GONG Yanfeng², LIU Shenghua¹, SONG Ruizhi¹,
HUANG Yongcheng¹, ZHOU Longbao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Engine Research and Development Center, First Automobile Works, Changchun 130011, China)

Abstract: A complex-guided stratified charge combustion system for a direct-injection spark-ignition (DISI) methanol engine was developed. The test engine was retrofitted from a 4-cylinder diesel engine. The experiment of the engine combustion characteristics was conducted and analyzed. The results show that the maximum cylinder pressure occurred from 14° CA ATDC to 17° CA ATDC, yielding a good constant volume and a higher thermal efficiency. The maximum rate of pressure rise was lower and then the combustion noise decreased. The curves of the heat release rate of the developed DISI methanol engine had single peaks without diffusion burning, similar to those of the PFI engine. The cyclic variations of imep were lower than 10% in a wide range of operating conditions, which shows a stable stratification combustion.

Keywords: direct injection; methanol engine; complex-guided; combustion characteristics

缸内直喷(GDI)发动机比传统进气道喷射(PFI)发动机在提高燃油经济性和降低排放等方面有显著优势^[1-2]. 缸内直喷分层燃烧是依靠燃烧室内的壁面引导、喷雾引导、气流引导作用, 使燃油在点火瞬时火花塞周围形成由浓到稀的可燃混合气. 甲醇含氧, 辛烷值高, 燃烧速度快, 是一种优良的代用燃料. 甲醇的应用不仅可以降低发动机的排放, 而且对实现能源多样化具有重要的意义.

西安交通大学采用火花塞助燃法, 将醇类燃料应用于缸内直喷发动机上, 开发了国内首台周向分层(DICSC)燃烧系统的灵活燃料发动机^[3-4]. 本文借鉴 GDI 燃烧系统和 DICSC 燃烧系统的匹配方法, 在一台 4102QB 型柴油机上, 依据原机进气涡流的特点, 综合甲醇燃料的喷雾和蒸发特点, 设计了缸内直喷复合导流分层燃烧系统, 研究了该甲醇发动机的燃烧特点, 为缸内直喷发动机的进一步研究

和甲醇燃料在发动机中的高效利用做有益的探索。

1 试验装置

试验用发动机由 4102QB 柴油机改装而成,其参数见文献[5]。改装发动机所采用的缸内直喷复合导流分层燃烧系统如图1所示(θ 为喷雾锥角, α 为油束中心向火花塞偏斜的角度, Ψ 为油束 1 与缸盖底面的夹角)。通过不同孔径、孔数和喷油夹角的多孔油嘴与其他分层燃烧参数的优化匹配,使在压缩冲程后期直接喷入气缸的甲醇油束,借助燃烧室导流面引导的进气涡流和油束射流本身的共同作用,将可燃混合气引向火花塞,使点火时刻火花塞附近的混合气较浓,较远处依次变稀,外围为空气,从而形成易于点燃和火焰传播的分层混合气。复合导流分层燃烧系统各参数的优化匹配参数见表 1^[6]。

2 燃烧特性分析

分层充量燃烧发动机的可燃混合气在燃烧室的不同空间有不同的空燃比,所以燃烧特性会随着火焰前端经过燃烧室不同位置而发生变化。本试验所设计的甲醇缸内直喷燃烧系统利用喷雾油束的空间合理布置和壁面导流与蒸发相结合的形式,实现了混合气的分层分布,可燃混合气靠火花点燃并以火焰传播方式燃烧。

2.1 气缸压力和压力升高率

图 2 为不同转速下发动机 100 个循环的平均压力曲线,工况点编号见表 2。由图 2 可见,压力曲线形状及趋势基本相同,在各工况下,甲醇发动机的最大压力所对应的曲轴转角基本相同,发生在上止点后 $14^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 的位置,离上止点较近,因而燃烧定容性好,热效率高。

由图 3 可见:在不同转速工况下,压力升高率随负荷的增加而增加;在试验的 8 个工况点下,最大压力升高率所对应的曲轴转角分布在上止点后 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 之间,最高压力升高率低,与汽油机的水平相当,工

表 1 甲醇缸内直喷发动机系统参数优化结果

系统参数	优化结果
燃烧室直径/mm	70
燃烧室深度/mm	15
导流面高度 h /mm	13
导流面与燃烧室垂直活塞销中心的夹角 $B/(^{\circ})$	32
导流面角度 $A/(^{\circ})$	50
压缩比	14
涡流比	1.1
喷油嘴孔数	6
孔径/mm	0.31
$\theta/(^{\circ})$	90
$\alpha/(^{\circ})$	30
$\Psi/(^{\circ})$	20
油泵柱塞直径/mm	10
供油提前角(上止点前)/ $(^{\circ})$	36
喷油器启喷压力/MPa	14
火花塞形式	三极
火花塞伸出缸盖高度/mm	4.5

作柔和,燃烧噪声低。

2.2 滞燃期和急燃期

由于甲醇缸内直喷燃烧系统采用火花点火,所以按照点燃式发动机燃烧过程的划分方法,本燃烧系统的燃烧过程可以分为滞燃期、急燃期和后燃期 3 个阶段。这里将滞燃期定义为从火花开始点火开始到累积放热率达 10% 之间的曲轴转角,急燃期定义为累积放热率从 10% 到 90% 之间的曲轴转角。

图 4 所示是甲醇发动机的滞燃期和急燃期所对应的曲轴转角。从图 4a 可以看到,在发动机转速相同时,滞燃期会随着负荷的增加而变小。这是因为缸内温度和混合气的浓度是影响滞燃期大小的 2 个重

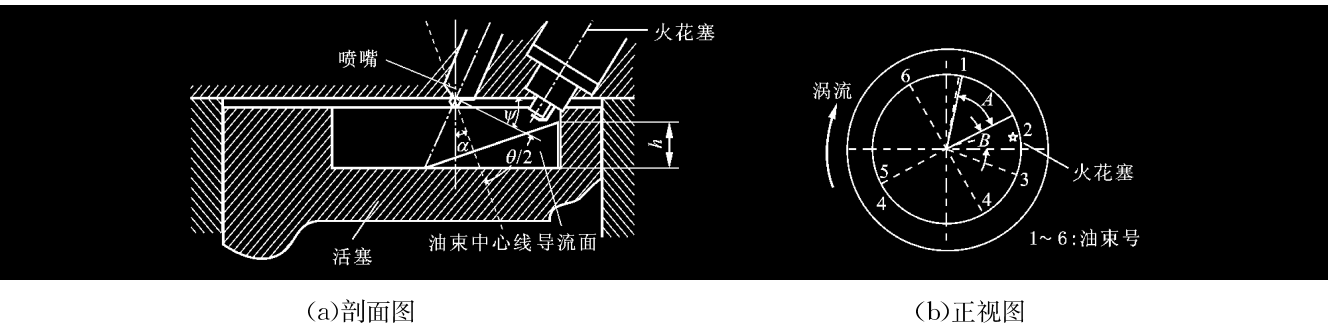


图 1 复合导流分层燃烧系统示意图

表2 发动机试验工况参数

工况编号	$n/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	p_{me}/MPa
1	1 500	0.45
2	1 500	0.32
3	2 000	0.39
4	2 000	0.28
5	2 500	0.38
6	2 500	0.27
7	3 000	0.33
8	3 000	0.21

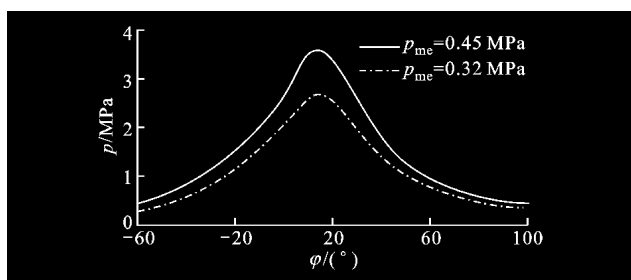
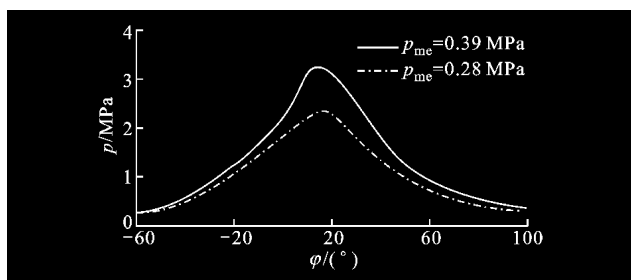
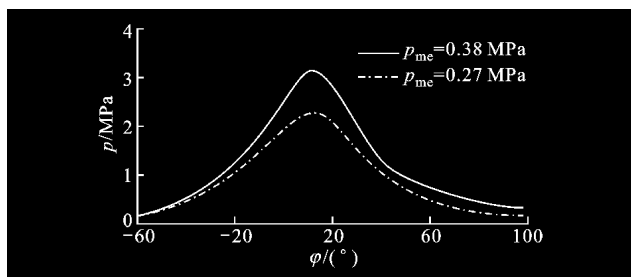
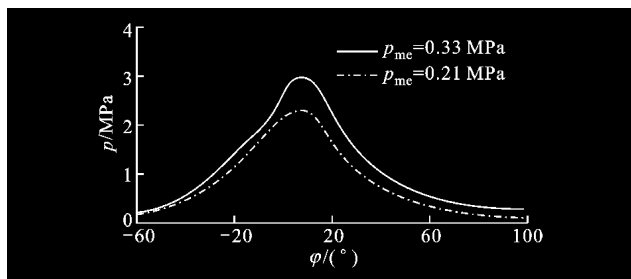
(a) $n=1\,500\text{ r/min}$ (b) $n=2\,000\text{ r/min}$ (c) $n=2\,500\text{ r/min}$ (d) $n=3\,000\text{ r/min}$

图2 分层燃烧发动机的压力曲线

要因素,随着发动机负荷的增加,发动机的循环油量增加,缸内混合气浓度变大,所以滞燃期变小.从图4a还可以看到,滞燃期会随着发动机转速的增加而

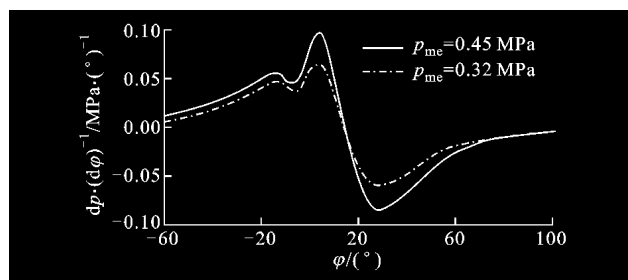
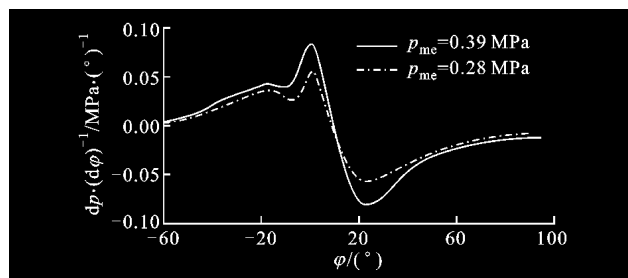
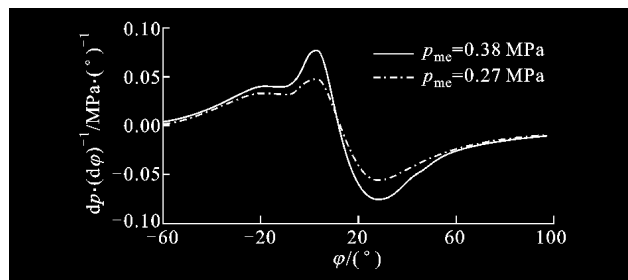
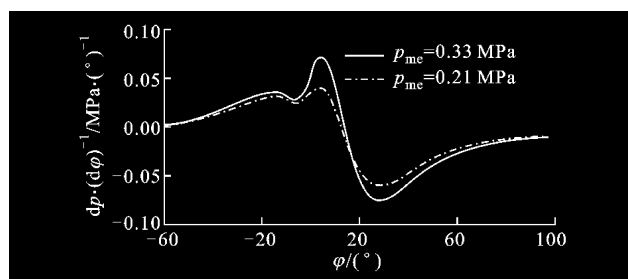
(a) $n=1\,500\text{ r/min}$ (b) $n=2\,000\text{ r/min}$ (a) $n=2\,500\text{ r/min}$ (b) $n=3\,000\text{ r/min}$

图3 分层燃烧缸内压力升高率

变大,这主要是燃烧室内涡流增强所致.虽然较强的涡流有利于可燃混合气的形成和火焰的传播,但强的涡流也使混合气更加均匀且使混合气的浓度变小,不利于分层燃烧.因此,以曲轴转角计的滞燃期随转速的升高而增加,但是增加的幅度不大.工况1对应的滞燃期最短,为 13° ,工况8对应的滞燃期最长,为 15° ,相差只有 2° ,这说明甲醇缸内直喷燃烧系统的参数可以满足发动机的转速范围要求.从图4b可以看到,甲醇发动机的急燃期随负荷和转速的变化与滞燃期相似,随着负荷的增加而变小,随着转速的升高而略有增加.甲醇发动机的喷油时刻要远

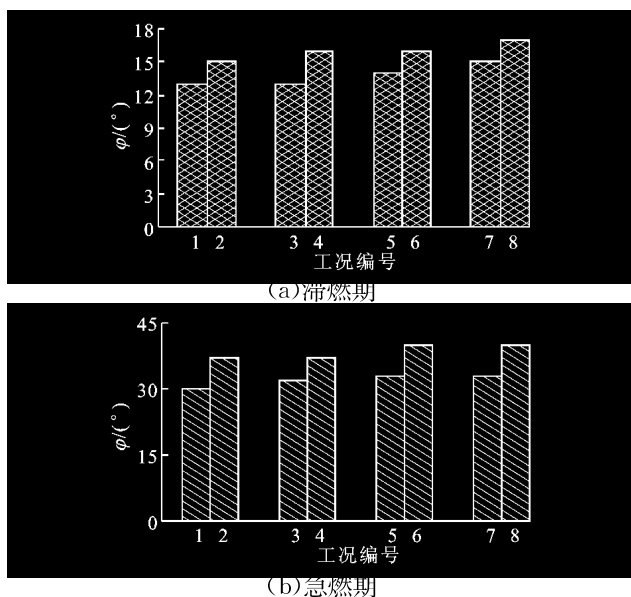


图4 分层燃烧的滞燃期和急燃期

早于点火时刻,因此影响急燃期的主要因素是火焰传播速度而非喷油持续期,在相同转速时,混合气的浓度会随着负荷的增加而增加,使火焰的传播速度提高,所以急燃期变小,这与柴油机的急燃期随负荷的变化趋势相反。当转速增加时,使以曲轴转角计的急燃期变大,但在高转速时的强涡流可以提高可燃混合气的混合速度和火焰传播速度,使急燃期变小。因此,在不同的转速下,急燃期相差不大,工况1对应的急燃期最短,为 30° ,工况8对应的急燃期最长,为 32° 。

2.3 放热规律

图5中燃烧放热率曲线形状与传统的汽油机预混燃烧单峰形状相似,并没有出现扩散燃烧导致的双峰放热现象。这个结果说明,甲醇缸内直喷燃烧系统主要以火焰传播燃烧为主,在点火以前,通过燃烧室壁面导流和进气涡流作用,实现混合气的良好分层和火焰的稳定传播。在相同转速时,高负荷时放热速率变快,燃烧持续时间缩短,这是因为混合气随着负荷的增大而变浓,火焰传播速度随之加快,使得燃烧持续期变小。

燃烧始点定义为燃烧10%燃油量对应的曲轴转角。从图5还可以发现,虽然甲醇发动机在不同工况下的滞燃期不同,但分层充量的燃烧始点差别很小,说明分层混合气在进气涡流、喷雾射流、导流面的共同作用下可稳定燃烧,燃烧系统显示出良好的性能。

2.4 燃烧循环变动

燃烧循环变动是火花点火式发动机燃烧过程的

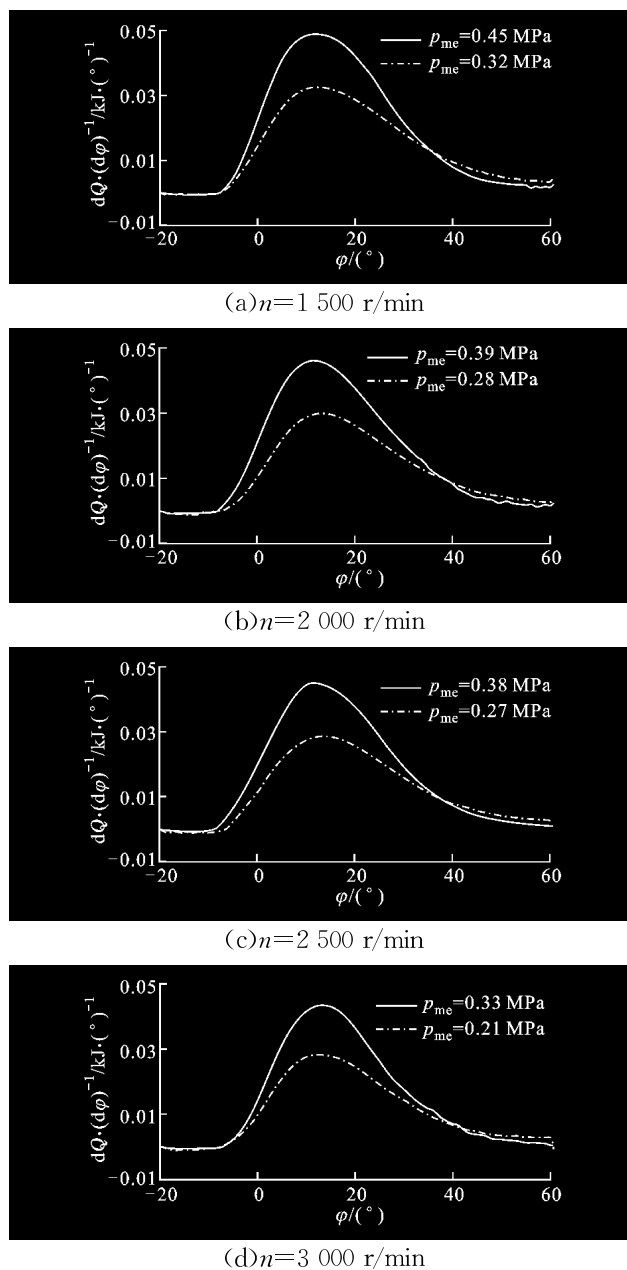


图5 瞬时代热率

一大特征。其定义为:在发动机以某工况稳定运转时,这一循环和下一循环的燃烧过程不断变化。

本文选用平均指示压力循环变动系数(δ_{imep})来评价甲醇发动机燃烧的循环变动情况,其表达式为

$$\delta_{imep} = \frac{\sigma_{p_{mi}}}{\bar{p}_{mi}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{p_{mi}}$ 为平均指示压力的标准偏差; $\bar{p}_{mi}$ 为平均指示压力的平均值,计算公式为

$$\sigma_{p_{mi}} = \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (p_{mi}(j) - \bar{p}_{mi})^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\bar{p}_{mi} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_{mi}(j) \quad (3)$$

式中: m 为循环数; $p_{mi}(j)$ 为 j 循环的平均指示压

力。 δ_{imep} 是评价燃烧稳定性和车辆驱动性的主要参数,一般认为此值不应超过10%。由图6可见, δ_{imep} 在各转速下都低于10%。在转速相同的情况下, δ_{imep} 随负荷的减小而增加,这主要是因为小负荷时燃烧室内的混合气浓度和温度都较低,燃料的滞燃期延长,使 δ_{imep} 变大。 δ_{imep} 随发动机转速的增加而升高,这是因为随着转速的升高,燃烧室内的气流运动增强,虽然较强的气流运动有助于混合气的形成和火焰的传播,但是较大的气流运动也会使混合气的浓度变稀,火花塞间隙附近的气流速度升高,这必然会导致发动机循环变动的增加。

由图7可见:当平均有效压力为0.45 MPa和0.32 MPa时, δ_{imep} 分别为4.62%和7.62%,横线代表平均指示压力的平均值。平均指示压力均匀地分布在平均值的两侧,说明本文开发的甲醇缸内直喷发动机燃烧稳定,循环变动小。从平均指示压力的大小也可以明显看到发动机在连续的100个工作循环中,没有失火现象发生。

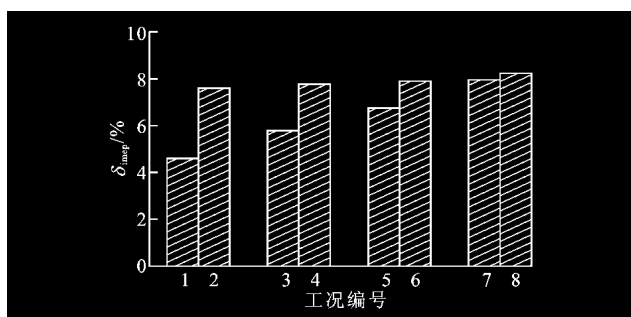


图6 平均指示压力的循环变动

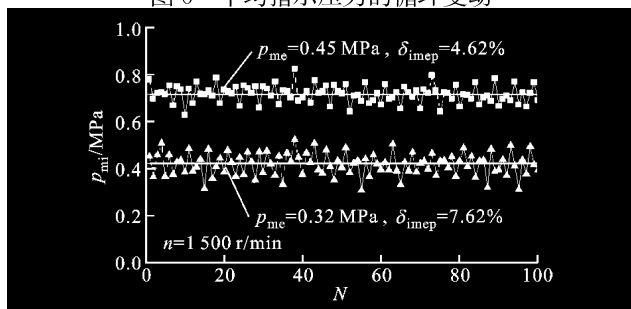


图7 平均指示压力随循环次数N的分布图

3 结 论

(1)首次在一台柴油机改造的四缸机上实现了甲醇缸内直喷分层燃烧,掌握了影响燃烧系统性能参数的匹配和优化方法。

(2)甲醇缸内直喷分层燃烧发动机的最大压力

所对应的曲轴转角基本相同,位于上止点后 $14^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 的位置,离上止点近,燃烧定容性好,热效率高。最大压力升高率分布在上止点后 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 的位置,最高压力升高率低,与汽油机的水平相当,工作柔和,燃烧噪声低。

(3)在相同的转速下,滞燃期和急燃期都会随负荷的增加而减小,燃烧放热率曲线呈单峰形状,没有出现扩散燃烧造成的双峰放热现象。转速对滞燃期和急燃期影响不大,表明燃烧系统参数匹配获得了稳定的分层效果。

(4)在宽广的转速和负荷范围内甲醇发动机平均指示压力的循环变动不超过10%,燃烧稳定,车辆驱动性好。

参考文献:

- [1] ZHAO F, LAI M C, HARRINGTON D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25 (5): 437-562.
- [2] KATO S, ONISHI S. New mixture formation technology of direct fuel injection stratified combustion SI engine(OSKA), SAE 871689 [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1987.
- [3] ZHOU Longbao, ZHANG Yuyin, HAN Zhiyu. An experimental study on the working stability and combustion characteristics of a direct injection diesel engine operating on multifuels, SAE 901568 [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1990.
- [4] 黄勇成. 缸内直喷灵活燃料发动机的性能和燃烧特性的理论与试验研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2001.
- [5] 李本正, 陈岳, 宫艳峰, 等. 甲醇缸内直喷复合导流分层燃烧系统的优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (1): 27-31.
- [6] LI Benzhen, CHEN Yue, GONG Yanfeng, et al. Optimization of complex-guided stratified charge combustion system for direct injection methanol engine[J]. Journal of Xi'an jiaotong University, 2008, 42(1): 27-31.
- [6] 宫艳峰. 甲醇缸内直喷发动机复合导流分层燃烧系统的研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.

(编辑 王焕雪)