

甲醇缸内直喷复合导流分层燃烧系统的优化研究

李本正, 陈岳, 宫艳峰, 刘圣华, 李彧, 黄勇成

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 综合缸内直喷发动机壁面引导、喷雾引导和气流引导分层燃烧系统的特点, 在一台柴油机改造的火花点火发动机上, 开展了甲醇缸内直喷复合导流分层燃烧的研究. 对影响燃烧系统性能的导流面位置、火花塞伸出缸盖的距离、涡流比、供油提前角、点火提前角、喷油器启喷压力、喷油嘴形式等主要参数进行了优化. 优化后的甲醇发动机可以实现过量空气系数为 2.23 的分层燃烧, 在 1 500 r/min 时扭矩为 135 N·m(是同工况下原柴油机的 65.5%), 热效率达到 29.7%, 较好地实现了分层燃烧系统的优化匹配.

关键词: 缸内直喷; 复合导流; 分层燃烧; 甲醇发动机

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0027-05

Optimization of Complex-Guided Stratified Charge Combustion System for Direct Injection Methanol Engine

LI Benzheng, CHEN Yue, GONG Yanfeng, LIU Shenghua, LI Yu, HUANG Yongcheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: On the basis of the wall-guided, spray-guided and air-guided technologies related with gasoline direct injection, the scheme of complex-guided stratified charge combustion system for direct-injection spark-ignited (DISI) methanol engine was developed. The test engine was retro-fitted from a 4-cylinder diesel engine. The major parameters were optimized, such as the location of the wall guider, the protruding distance of the spark plug, swirl ratio, injection and ignition timing, nozzle type, and needle valve open pressure. The DISI methanol engine can work with the excessive air/fuel ratio as high as 2.23 at a speed of 1 500 r/min. The engine torque is 135 N·m(65.5% of diesel engine torque) and the thermal efficiency reaches 29.7%. The test results indicate that the developed DISI methanol engine can realize a good match for the stratified charge combustion.

Keywords: direct injection; complex-guided; stratified charge combustion; methanol engine

缸内直喷(GDI)发动机的燃烧系统设计, 需要将燃油喷射、气流运动和燃烧室形状三者之间进行合理的优化配合. 根据混合气形成的方式不同, GDI发动机主要分为壁面引导、喷雾引导、气流引导三种燃烧系统. 壁面引导方式喷油器和火花塞的布置比较灵活, 可避免沾湿火花塞, 喷雾变形对循环变动影响较小, 因此目前应用较多, 但壁面引导中喷雾湿壁导致的燃烧室凹坑油膜会产生大量未燃 HC 和碳

烟. 喷雾引导在降低排放和油耗方面表现出很大的潜力, 但火花塞与油束之间的距离过近, 喷油正时与点火正时间隔太短, 很容易影响着火的稳定性, 同时火花塞容易被液态燃油沾湿而造成积炭和点火困难. 气流引导主要靠缸内有组织的气流运动与油束的相互作用在火花塞周围形成可燃混合气, 但气流运动的组织是此类燃烧系统设计的一个难点^[1-3].

西安交通大学采用火花塞助燃法, 开发了国内

首台周向分层(DICSC)燃烧系统的灵活燃料发动机,将醇类燃料应用于缸内直喷发动机上^[4].综合缸内直喷发动机壁面引导、喷雾引导、气流引导分层燃烧系统的特点和甲醇燃料的优点,借鉴 DICSC 系统,本文在一台四缸柴油机上研究开发了一种采用火花点火、缸内直喷、复合导流分层燃用甲醇的燃烧系统.

1 试验装置

试验用火花点火缸内直喷式甲醇发动机由 4102QB 型柴油机改装而成,参数见表 1. 主要调整如下:增加火花点火系统;由于燃烧是以火焰传播方式进行的,故不需要原柴油机那样高的涡流比,除采用低涡流比的缸盖外,还在进气道中加装扰流片来获得不同的进气涡流;燃烧室设计为斜坡碗型,压缩比降至 14;甲醇的热值比柴油低,为了恢复原机功率水平,需增加循环供油量,但受原机高压油泵安装空间位置的限制,油泵柱塞直径从 9 mm 只能增大到 10 mm;为使火花塞周围能形成理想的分层混合气,设计加工了不同孔数、孔径及油束夹角的喷油嘴;为使燃油在缸内有较长的时间蒸发混合,通过优化试验,供油提前角 θ_{fd} 从上止点前 14° 提前到上止点前 $30^\circ \sim 40^\circ$;静态点火提前角 θ_{ig} 确定在上止点前 $13^\circ \sim 20^\circ$ 范围进行匹配研究.

2 缸内直喷复合导流分层燃烧系统

缸内直喷复合导流分层燃烧系统如图 1 所示(图中: θ 为喷雾锥角; φ 为油束中心向火花塞偏斜的角度; β 为油束 1 与火花塞之间的周向夹角; Ψ 为油束 1 与缸盖的夹角). 试验设计使用了不同孔径、孔数和喷油夹角的多孔油嘴,在压缩冲程后期将甲醇直接喷入气缸,借助燃烧室导流面和进气涡流的引导以及喷雾射流的共同作用,将可燃混合气引向火花塞,使火花塞附近的混合气较浓,燃烧室其他部分的混合气较稀,从而形成易于点燃和火焰传播的分层混合气.

燃烧系统中的混合气浓度分布随着发动机工况变化而改变,故只有对喷雾特性、燃烧室形状、涡流比、喷油时刻和点火时刻等参数进行严格控制和优化匹配,才能保证该燃烧系统可靠点火并顺利进行火焰传播.

3 燃烧系统主要参数优化

在不同工况下,以热效率为评价指标,分别对导流面位置、火花塞伸出缸盖的距离、涡流比、供油提前角、点火提前角、喷油器启喷压力、喷油嘴形式等影响燃烧系统性能的主要参数进行优化. 初始的优化试验表明:当火花塞伸出缸盖的距离为 4.5 mm、

表 1 发动机参数

名称	直喷式柴油机	火花点火缸内直喷式甲醇发动机
型号		4102QB
形式		立式、直列、水冷、四冲程
缸径,行程/mm		102, 115
活塞总排量/L		3.76
额定功率/kW(转速/ $r \cdot \min^{-1}$)	66.2(3 000)	优化中
最大扭矩/ $N \cdot m$ (转速/ $r \cdot \min^{-1}$)	245(1 800~2 100)	优化中
燃烧室	直喷 ω 型燃烧室	斜坡碗型燃烧室
压缩比	17	14
喷油嘴孔数(直径/mm)	4(0.29)	6(0.31); 6(0.27)
启喷压力/MPa	19.1 ± 0.49	$(10 \sim 16) \pm 0.5$
油泵柱塞直径/mm	9	10
(上止点前) $\theta_{fd}/(^{\circ})$	14 ± 2	$(30 \sim 40) \pm 2$
点火系统	无	火花点火(三极火花塞)
(上止点前) $\theta_{ig}/(^{\circ})$		13~20
涡流比	3.4	0~1.8

喷油器启喷压力为 14 MPa 时,发动机的热效率最高. 点火提前角以获得发动机的最大扭矩为准,进行动态调整.

3.1 导流面位置的优化

受缸盖可加工火花塞孔空间的限制,火花塞的位置可变裕度较小. 数值模拟计算结果表明(见图 2),当燃烧室的直径 d_k 为 70 mm、燃烧室的深度 h_k 为 15 mm、导流面的高度 h 为 13 mm、导流面的角度 $\angle A$ 为 50° 、导流面与燃烧室中心的夹角 $\angle B$ 为 32° 、导流面位于火花塞顺涡流方向的上游(见图 3)时,发动机工作稳定性好,热效率高.

图 4 为上止点前 20° 时(θ_{fd} 为上止点前 35°),利

用 KIVA-3V 程序对缸内轴向截面上气流运动进行的数值模拟. 由图 4a 可看出:在进气涡流的作用下,气缸内形成的是规则的周向气流运动,在活塞运动的干扰下,旋转运动的强度随着与缸盖距离的增加而减小. 在导流面的上部,即截面到燃烧室底面的距离(活塞在下止点) $z=12.20$ cm 截面以上,气流运动几乎没有受到导流面的影响,涡流运动以燃烧室轴线为中心,向外逐渐增强,而在导流面所处的截面上,由于导流面的影响,气流运动的方向已发生了明显的改变,但气流的方向并没有在整个导流面上都向气缸上部偏转,在靠近燃烧室壁面的部位,气流会沿着导流面向上运动,而在靠近燃烧室中心的范围

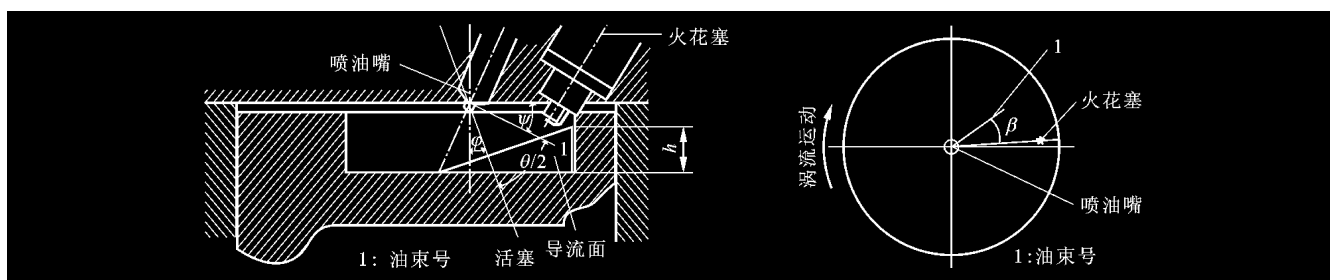


图1 燃烧系统示意图

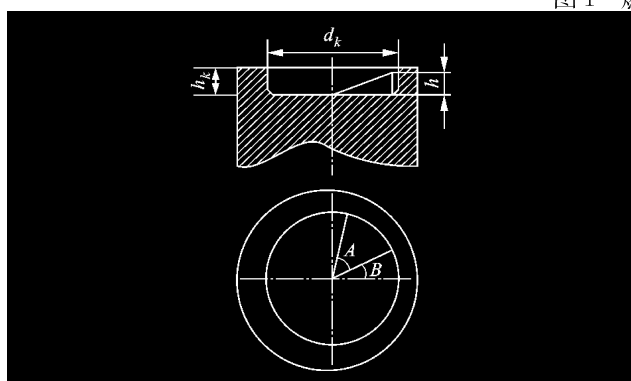
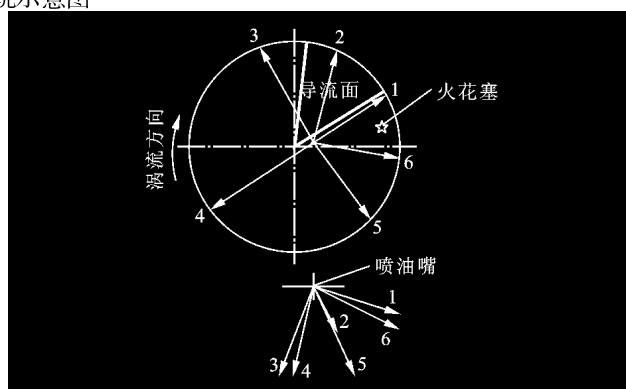


图2 斜坡碗形燃烧室



1~6:油束号

图3 导流面与火花塞位置示意图

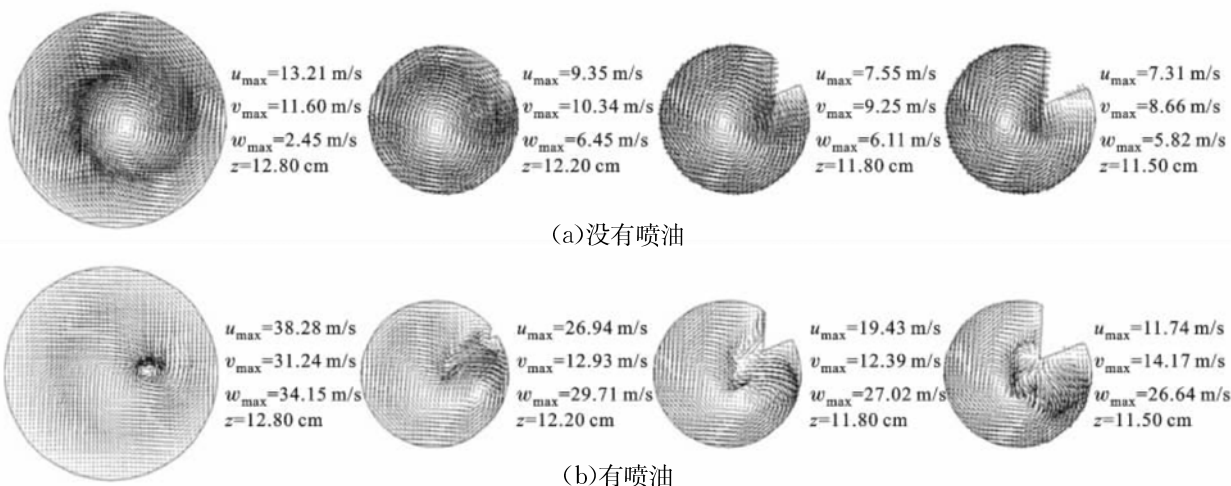


图4 轴向截面上气相速度的矢量图

内,气流由于受到导流面的阻挡而变向,流向了燃烧室的中心,这种现象在 $z=11.80$ cm 的截面上表现得比较明显.在导流面的背面,由于受到导流面的阻挡,气流运动的强度明显减弱.当有燃油喷入气缸时(见图 4b),由于燃油对空气的引射作用,缸内出现了明显的湍流运动,空气的卷吸会促进燃油的破碎、雾化并与空气混合,但气流在导流面上向 2 个方向分散运动的特点可能会导致可燃混合气在径向分布上的断层,从而影响火焰的连续传播,而将导流面设计在火花塞顺涡流方向的上游,既可以利用导流面对空气的阻挡作用保证点火的可靠性,又可以避免因可燃混合气断层而使火焰无法连续传播.

3.2 涡流比(Ω)的优化

优化试验所用喷油嘴为 6,直径为 0.27 mm, β 为 20° , Ψ 为 15° ;供油提前角为上止点前 36° ,发动机转速为 1 500 r/min,油门开度最大.

由图 5 可见,进气涡流运动对于混合气的稳定分层起重要作用:同一转速下涡流比过大或过小都会使发动机的热效率下降,涡流比太大会导致火花塞附近的气流运动太强,易吹灭火核,增加循环变动和失火率,涡流比太小则会造成油气混合与分层不良,发动机的热效率下降.在图 5 所示工况下,涡流比为 1.1 时,发动机的热效率最高.

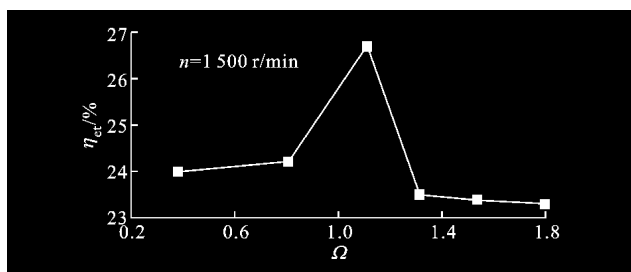


图5 涡流比对热效率的影响

3.3 供油提前角的优化

为使甲醇喷雾既有较充分的时间与空气混合形成良好的分层混合气,同时又能在适当的时刻将分层混合气输送到火花塞间隙,供油(喷油)提前角至关重要.过大的供油提前角会引起混合气过稀,推迟喷油又可能无法形成分层混合气.在图 6 所示工况下,供油提前角为上止点前 36° 时,发动机的热效率最高.

3.4 喷油嘴形式的优化

根据甲醇的物化特性,结合前期的甲醇喷雾试验^[5],设计加工了不同型式的喷油嘴共计 14 组,孔数为 6,主要参数见表 2.不同形式的喷油嘴对发动机热效率的影响如图 7 所示.从图 7a 可以看出,对

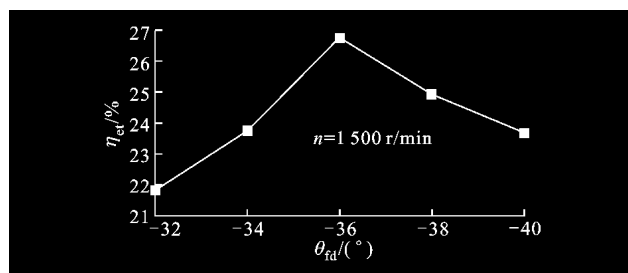
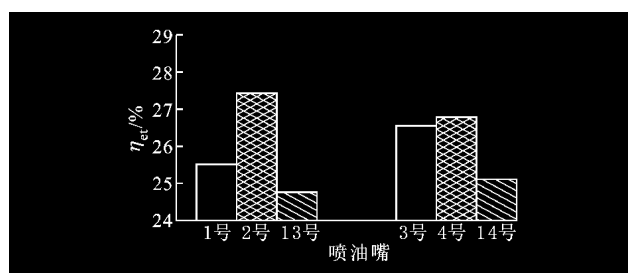


图6 供油提前角对热效率的影响

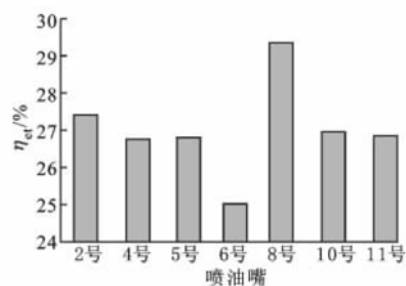
于喷雾锥角相同的喷油嘴,大孔径要比小孔径对应的热效率高.这是由于小孔径的喷油嘴油束贯穿距离不够,不能充分利用燃烧室内的空气,导致混合气形成不良.从图 7a 还可以看出,喷油嘴喷雾

表2 喷油嘴的主要参数

编号	$\theta/^\circ$	d_h/mm	$\Psi/^\circ$	$\beta/^\circ$
1	90	0.27	15	15
2	90	0.31	15	15
3	90	0.27	15	20
4	90	0.31	15	20
5	90	0.31	15	25
6	90	0.31	15	30
7	90	0.27	20	15
8	90	0.31	20	15
9	90	0.27	20	20
10	90	0.31	20	20
11	90	0.31	20	25
12	90	0.31	20	30
13	80	0.27	15	15
14	80	0.27	15	20



(a) 孔径及喷雾锥角对热效率的影响



(b) 喷油角度对热效率的影响

图7 喷油嘴形式对热效率的影响

锥角为 80° 时要比喷雾锥角为 90° 时对应的热效率低.其原因可能是由于喷雾锥角减小时,相邻油束之

间的重叠角变大,混合气容易出现过浓区域所致。

图7b所示是孔径和喷雾锥角相同、喷油角度不同的几种喷油嘴所对应的发动机热效率。从图7b可以得出,8号喷油嘴对应的热效率要明显高于其他几种喷油嘴,因此选用8号喷油嘴进行发动机的性能试验。

4 甲醇发动机的稀燃能力

良好的分层燃烧能力是 GDI 发动机在部分负荷时经济性提高的保证。由图8可见,随着负荷的变化,发动机过量空气系数 Φ_a 在 1.58~2.23 范围内变化,说明本文设计的燃烧系统经过参数优化后,较好地解决了着火可靠性问题,在宽广的转速和负荷范围内,能保证可燃混合气正常点燃和火焰稳定传播,通过分层燃烧的方式实现了发动机在部分负荷时燃用稀薄混合气,进而提高了发动机的经济性。

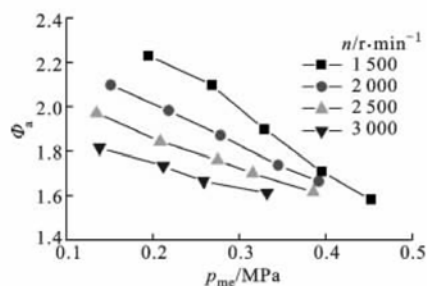


图8 过量空气系数的负荷特性

5 甲醇发动机的热效率

由图9可以看出:甲醇发动机的热效率在不同转速下都是随负荷的增加而逐渐增大的。甲醇的低热值仅为柴油的 46.4%,受原机高压油泵循环供油量的限制,甲醇发动机的动力性低于原机,热效率未能恢复到原机水平,但仍保持了较高水平,在 1500 r/min 时扭矩为 135 N·m(是同工况下原柴油机的 65.5%),此时发动机热效率达到 29.7%,高于一般汽油机水平。

理论计算表明,不考虑泄漏、回油损失等因素,当甲醇发动机的供油量为原机的 2.28 倍时,可达到与原机一样的输出功率。可以预测,若换用大供油量的高压油泵,甲醇发动机的动力性有望达到或超过原机水平,而发动机的热效率有望达到原机水平。

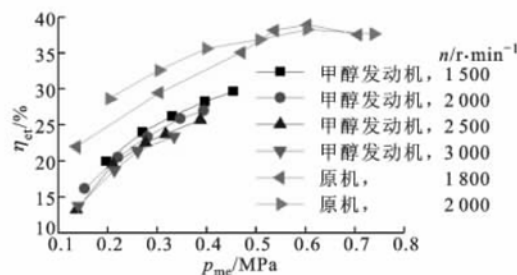


图9 甲醇发动机与原机热效率的对比曲线

6 结论

(1)本文开发了甲醇缸内直喷复合导流分层燃烧系统,将影响燃烧系统性能的导流面位置、火花塞伸出缸盖的距离、涡流比、供油提前角、点火提前角、喷油器启喷压力、喷油嘴形式等主要参数优化后,甲醇发动机在宽广的转速和负荷范围内能稳定运转。

(2)甲醇发动机可以实现过量空气系数为 2.23 的分层燃烧,有较强的稀燃能力。

(3)在转速为 1500 r/min 时甲醇发动机扭矩为 135 N·m(是同工况下原柴油机的 65.5%),此时热效率达到 29.7%,表明分层燃烧具有提高甲醇缸内直喷发动机动力经济性的巨大潜力。

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] HIDEAKI K, TETSUYA H, MASAOKI K. Improvement of center injection spray guided DISI performance, SAE Paper 2006-01-1001 [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc, 2006.
- [3] DRAKE M C, HAWORTH D C. Advanced gasoline engine development using optical diagnostics and numerical modeling [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 99-124.
- [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] 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)