

# 汽油机缸内直喷周向分层燃烧系统的试验研究

李 维, 黄勇成, 周龙保

(西安交通大学 能源与动力学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:**开发了一台采用缸内直喷周向分层燃烧系统的汽油机,对喷嘴型式、火花塞与油束相对位置、供油提前角、喷油压力、进气涡流比、喷油泵柱塞直径和压缩比等燃烧系统的主要参数进行了优化,得到了发动机燃用汽油时的最优参数。采用缸内直喷周向分层燃烧系统后,汽油机的热效率与柴油机的大致相当。

**关键词:**汽油机;缸内直喷;周向分层;燃烧

**中图分类号:**TK413 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)03-0030-05

汽油机由于受到爆燃限制,压缩比和柴油机相比较低,加上负荷采用变量调节方式,存在节流损失,所以汽油机的热效率较低。因此,研制综合汽油机和柴油机的优点的发动机,一直是内燃机工作者追求的目标。缸内直喷式汽油机综合了传统柴油机与汽油机的优点,它具有热效率高、排放低、动力性好等诸多优点,已引起各国内燃机界的关注<sup>[1]</sup>。但缸内直喷的若干技术问题尤其是燃烧系统参数对发动机性能的影响还有待于进一步研究。

## 1 试验装置

试验原机为四冲程单缸、立式、自然吸气、强制水冷直接喷射式柴油机。由于原机无点火装置,在试验中采用 CA1092 汽油机的磁感应式无触点高能点火系;原柴油机的进气道为螺旋式进气道,对于汽油机来说,进气涡流比过大,所以对进气道进行了改进,采用阀片式涡流控制机构实现涡流比的调整;另外,汽油机受到爆燃的限制,压缩比不能太高,因此在燃烧室设计时加大了活塞顶凹坑容积,同时考虑到原机燃烧室中凸台的特殊作用,仍采用原机的  $\omega$  型燃烧室。发动机改装前后的主要技术参数见表 1。

表 1 发动机的主要技术参数

	调整前	调整后
发动机型号		TY1100
发动机型式	单缸、立式、自然吸气、水冷、四冲程发动机	
缸径 × 冲程/mm <sup>2</sup>		100 × 115
排量/mL		903
标定功率/kW		11(2 300 r · min <sup>-1</sup> )
喷油泵柱塞直径/mm	8.5	8.5 ~ 9.5
燃烧室		$\omega$ 型燃烧室
压缩比	18	14
进气涡流比	2.3	0 ~ 1.7(可变)
喷嘴型式	4 × 0.3 mm	多种
喷嘴起喷压强/MPa	19	7 ~ 19(可变)
供油提前角/(°)CA	25	37
点火系统	无	Model JFD663
燃料	柴油(0 <sup>#</sup> )	汽油(RON90 <sup>#</sup> )

收稿日期:2002-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(29976024)

作者简介:李 维(1965-),男,陕西长安人,博士生,主要从事内燃机工作过程研究。

## 2 燃烧系统主要参数的优化

缸内直喷分层燃烧系统的性能主要取决于喷嘴结构、供油提前角、火花塞位置等参数。试验中,作者以热效率为优化目标,合理安排了参数的优化次序,对多个参数进行了优化,并使其相互匹配。发动机的热效率  $\eta_{ei}$  采用下式计算<sup>[2]</sup>

$$\eta_{ei} = \frac{3.6 \times 10^6}{b_e H_u}$$

式中  $b_e$  为有效燃油消耗率,  $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ ;

$H_u$  为试验所用汽油的低热值,  $J \cdot kg^{-1}$ 。

### 2.1 喷嘴结构参数

决定充量分层发动机性能的关键是能否得到一个理想的混合气浓度分布场,而 DICSC 系统缸内混合气浓度场的分布主要取决于喷嘴油孔的分布。本试验中,设计了 5 种不同结构的喷嘴,孔数为 6~10 个,孔径为 0.2~0.3 mm,其中 9 孔、10 孔的两种由于孔数较多,孔径不能太大,仅设计了孔径为 0.2 mm 的一种,喷嘴油孔布置如图 1 所示。所加工的喷嘴油束锥角与原柴油机的相同,均为  $150^\circ$ ,为了保证在任何工况下,火花塞电极附近具有较浓的混合气,减小了火花塞附近油束夹角,并在火花塞上游布置 2~3 根油束。喷嘴油孔分布及喷嘴油孔直径对发动机热效率的影响见图 2、图 3。可以看出,在较宽广的负荷范围内,采用  $8 \times 0.25$  mm 的喷嘴时,由于孔数和孔径较为适中,油束雾化质量较好,发动机具有较高的热效率。

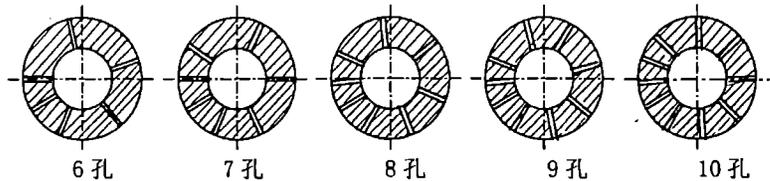


图 1 喷油嘴油孔分布方案示意图

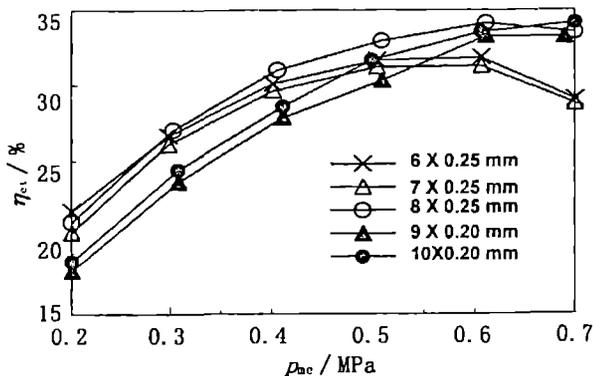


图 2 喷油嘴油孔分布对热效率的影响  
( $n = 1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )

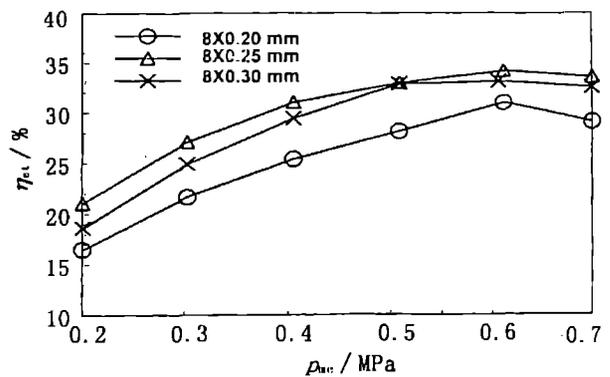


图 3 喷油嘴油孔分布对热效率的影响  
( $n = 1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )

### 2.2 火花塞位置

采用 DICSC 系统时,气缸内混合气浓度分布极不均匀,且随时间不断变化。为了保证火核稳定生成,提高火焰传播速度,火花塞位置的选取尤为重要。火花塞的布置决定于四个方面:径向相对位置(相对于燃烧室中心的距离)、周向相对位置(与油束的夹角)、轴向相对位置(火花塞电极与喷嘴沿汽缸轴线方向的距离)。在试验中,当火花塞径向距离为 27 mm、周向与油束夹角为  $13^\circ$ 、轴向相对位置为 2.5 mm、电极平面与油束方向垂直时,发动机的热效率最佳。

### 2.3 供油提前角

发动机采用 DICSC 燃烧系统时,混合气必须依靠火花点火才能燃烧,燃烧方式为预混燃烧,因此要在火花点火之前喷油,保证油束与空气混合。适当提前供油,有利于油束在缸内充分蒸发,与空气充分混合,从而有利于着火并加快火焰传播。但喷油提前角不易过大,一方面由于低负荷时混合气形成的时间过长,混合气趋于均匀而使火花塞附近的混合气浓度变稀,不利于点火,发动机工作不稳;另一方面,喷油过分提前时,喷油背压低,雾化质量差,且大负荷时燃油喷到燃烧室壁面,影响混合气的形成。所以,存在最佳的喷油提前角,使得发动机具有较高的热效率。从图 4 可以看出,中速中负荷最佳喷油提前角为  $37^\circ\text{CA}$ 。

### 2.4 喷嘴开启压力

喷油压力对油束的雾化质量、喷雾锥角、及贯穿距离有较大的影响。喷油压力越高,油束雾化质量越好,蒸发形成可燃混合气的时间也越短,有利于着火及传播火焰。但过高的喷油压力会导致油束贯穿距离过大,燃油喷射到燃烧室的壁面上,空气的利用程度降低<sup>[3]</sup>。此外,喷油压力过高时,油束流动的速度过大,在火花塞电极附近引起较大的气流扰动,影响着火的稳定性。图 5 给出了发动机热效率随喷油压力的变化曲线,当喷油压力为  $8 \sim 10\text{ MPa}$  时,发动机具有较高的热效率。

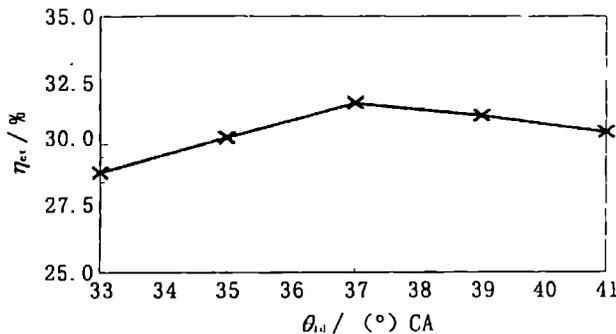


图 4 供油提前角对热效率的影响  
( $n = 1800\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p_{me} = 0.5\text{ MPa}$ )

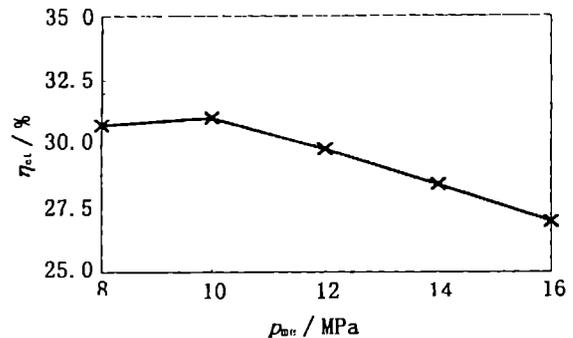


图 5 喷嘴启喷压力对热效率的影响

### 2.5 进气涡流比

在直接喷射式发动机中,合理组织燃烧的关键是实现燃油喷射、气流运动和燃烧室形状三者之间相互匹配。DICSC 系统中,进气涡流是实现稳定周向分层的关键。在进气涡流比一定时,气缸内的涡流强度随发动机转速的增加而增大,这必然影响到周向分层的稳定性,从而使发动机的工作区域变窄。为了能够在较宽广的转速范围内获得较理想的充量分层,有必要采用可变涡流进气系统。试验中采用阀片式变涡流控制机构以保证在不同转速下,发动机均具有较佳的涡流比。图 6 给出了不同转速下,发动机热效率随涡流比的变化曲线。在转速一定时,涡流比过大或过小都会引起发动机热效率下降。从图 6 可以看出,发动机最佳涡流比在  $0.7 \sim 1.3$  之间。

### 2.6 燃烧室结构尺寸

因受火花塞布置及活塞强度的限制,加工了两种口径不同的燃烧室。试验结果如图 7 所示。在转速较低时,采用小口径的燃烧室,发动机的热效率较高,而在高转速时采用大口径的燃烧室较好。这主要是由于发动机采用  $\omega$  型燃烧室,具有较大的挤气涡流,同时又有较强的进气涡流,而火花塞刚好布置在挤流流入燃烧室的通道口上,且点火的瞬间,又正好处于气流急剧变化的时候,挤流对火核的稳定形成影响较大。在高转速时,挤流和涡流都比较强,这时的主要矛盾是火核的稳定形成,采用大口径的燃烧室,使得涡流强度相对变弱,对火核的吹熄作用减小,有利于火核的稳定形成。在低转速时,涡流和挤流都较弱,对火核的吹熄作用小,采用小口径的燃烧室有利于加强燃烧室空气涡流及压缩挤流,提高燃油与空气的混合速率,对提高燃烧速度有利<sup>[4]</sup>。从整个外特性上看,两种燃烧室的平均热效率基本接近,A 型为  $32.8\%$ ,B 型为  $32.5\%$ 。在本系统中,火核的稳定形成是至关重要的,因此,选用较大口径的 A 型燃烧室。

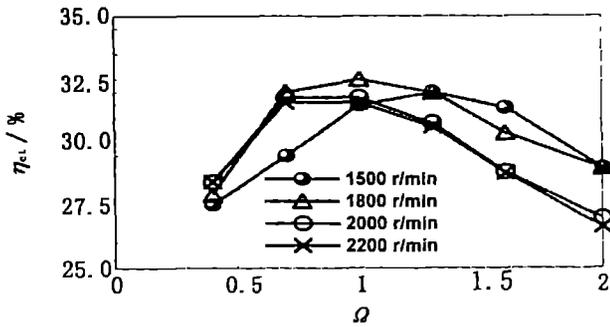


图6 不同转速下涡流比对热效率的影响 (p<sub>me</sub> = 0.5 MPa)

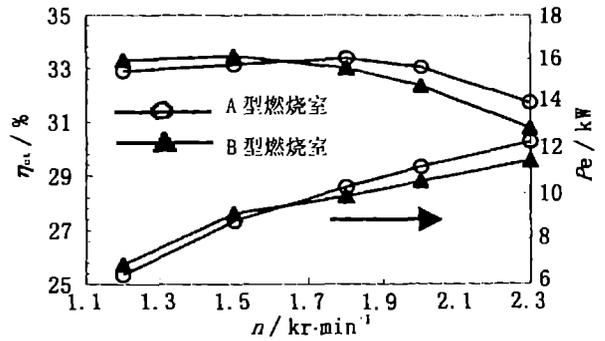


图7 燃烧室结构尺寸对发动机性能的影响 (全负荷)

### 2.7 喷油泵柱塞直径

由于汽油粘度较低,泵油时的泄漏较柴油大一些。在柱塞行程相同的条件下,只有加大柱塞直径,才能恢复发动机的功率。图8为柱塞直径分别为8.5 mm和9.0 mm时,发动机热效率随负荷的变化曲线,可以看出,柱塞直径增大后,发动机在高负荷区的热效率明显增大,而在低负荷区有所降低。若进一步加大柱塞直径,发动机在低负荷区的热效率下降较为明显。这主要是由于加大柱塞直径导致喷油持续时间缩短,燃油与空气混合的时间长,使得火花塞附近混合气变稀,着火稳定性变差,同时火焰传播速度也有所下降。图8表明,柱塞直径为9.0 mm时比较合适。

### 2.8 压缩比

对汽油机来说,压缩比的选取直接关系到发动机热效率的高低,但压缩比的提高受到爆燃的限制。从图9看出,当压缩比提高到14后,发动机爆燃严重,动力性和经济性均有所下降。兼顾到发动机的动力性及燃烧噪音,压缩比取13.5比较合适。

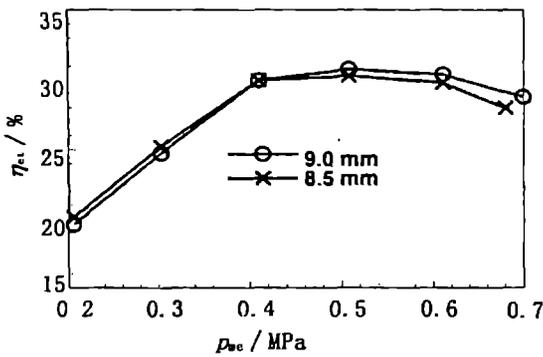


图8 喷油泵柱塞直径对热效率的影响 (n = 1 800 r · min⁻¹)

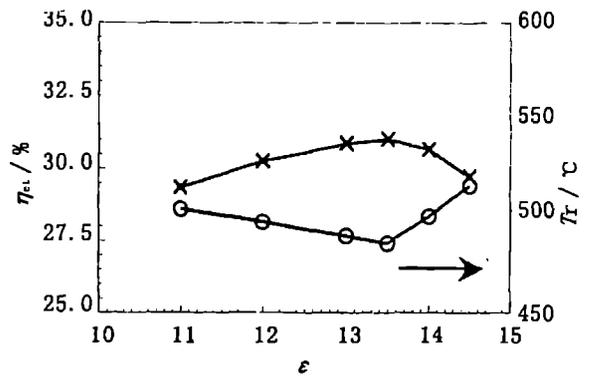


图9 压缩比对发动机性能的影响 (n = 1 200 r · min⁻¹, 全负荷)

## 3 发动机改装前后热效率的比较

图10给出了发动机改装前后热效率的曲线,可以看出,采用缸内直喷周向分层的汽油机的热效率虽低于原柴油机的热效率,但两者相差不大,在低负荷区,火花点火发动机的热效率大约低1个百分点;在高负荷区,大约降低0.4个百分点。

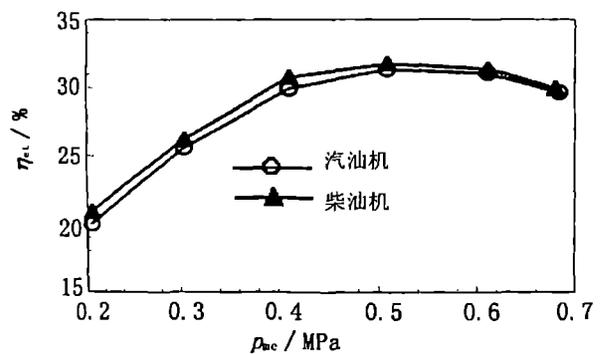


图10 发动机改装前后热效率比较

## 4 结论:

- 1) 采用 DICSC 燃烧系统的发动机可靠着火、平稳

运转的关键在于处理好油束的分布、油束在燃烧室中与火花塞的相对位置、火花塞间隙、进气涡流比、燃烧室结构、喷油定时及点火定时等主要参数之间的配合。

2) 以发动机热效率为优化指标,对 DICSC 燃烧系统燃用汽油时主要参数进行了优化,优化后的发动机能在宽广的转速和负荷范围内平稳运转,其热效率与原柴油机的相当。

#### 参考文献:

- [1] 周龙保,刘翼俊,高宗英,等. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [2] 何学良. 内燃机燃烧学[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [3] 朱永新. 柴油机燃料特性及其应用[M]. 北京:人民交通出版社,1989.
- [4] 张玉银. 在直喷式柴油机上燃用多种燃料的着火稳定性和燃烧特性的研究[D]. 西安:西安交通大学,1989.

(编辑:田新华)

## Experimental Study on Parameters of Direct Injection Circularly Stratified – Charge Combustion System

LI Wei, HUANG Yong – cheng, ZHOU Long – bao

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

**Abstract:** A new type of gasoline engine that adopts Direction Circularly Stratified – Charge combustion System is developed, and the optimum parameters of the DICSC combustion system are obtained by studying the effects of main parameters such as the nozzle type, the location of fuel spray relative to the spark plug, the fuel delivery advanced angle, the injection valve opening pressure, the air swirl ratio, the plunger diameter and compression ratio. The thermal efficiency of the new gasoline engine is roughly the same as the original diesel engine.

**Key Words:** gasoline engine; direct injection; circularly stratified – charge; combustion

(上接第 23 页)

#### 参考文献:

- [1] 吴学仁. 飞机结构金属材料力学性能手册(第一卷)[M]. 北京:航空工业出版社. 1996.
- [2] 赵名泮. 应变疲劳分析手册[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [3] 吴富民. 结构疲劳强度[M]. 西安:西北工业大学出版,1985.
- [4] 西安飞机工业公司. 某型飞机载荷谱分析论证报告[R]. 西安:西安飞机工业公司,1986.

(编辑:姚树峰)

## Multi – holed Plate Fatigue Life Analysis under Wing Loading Spectra

LI Shu – lin, ZHU Jia – yuan, ZHAO Gang

(The Engineering Institute, air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** This paper applies finite element approach to establishing multi – holed plate finite element mode and analyzing the stress of wing longeron web with several radius holes or openings. And then it determines the general stress concentration factor considering the difference of apertures and the spacing between holes. Furthermore, the paper translates the realistic centrobaric loading spectra into the spectra of wing spar web on the basis of test data and modifies curves of  $\delta_{\max} - N$  and  $\varepsilon_{\text{eq}} - N_f$  under low wing loading spectra. And then, it applies Miner's rule and local stress – strain approach respectively to calculating fatigue life of the plate and analyzes the results of the two approaches.

**Key Words:** multi – holed plate; stress concentration factor; fatigue life; wing loading spectra