

缸内直喷汽油机部分负荷燃烧特性试验*

杜维明¹ 李 君¹ 官艳峰² 陈海娥² 曲美兰² 李金成²
(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025; 2. 中国第一汽车集团公司技术中心, 长春 130011)

【摘要】 在一台 2.0 L 缸内直喷汽油机(GDI)上研究了中低转速、部分负荷的燃烧特性,并分析了进气滚流及喷油定时对燃烧特性的影响。结果表明,在转速为 1 000 r/min、平均有效压力为 0.1 MPa 工况时,加大进气滚流可增强缸内气流运动,提高混合气燃烧速度。而随着转速提高,滚流作用逐渐减弱,在转速为 3 000 r/min、平均有效压力为 0.3 MPa 工况时,加大滚流会引起燃烧过程恶化;喷油定时对 3 000 r/min 工况下的混合气形成和燃烧稳定影响大于 2 000 r/min 工况,且不同工况点的喷油定时均存在最佳值,在 300°CA ~ 320°CA BTDC 之间。

关键词: 直喷汽油机 部分负荷 燃烧特性 循环变动 试验
中图分类号: TK417+.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0016-05

Part-load Combustion Characteristics of a GDI Engine

Du Weiming¹ Li Jun¹ Gong Yanfeng² Chen Haie² Qu Meilan² Li Jincheng²
(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
2. R & D Center, FAW Group Corporation, Changchun 130011, China)

Abstract

The combustion characteristics were studied by using a 2.0 L GDI engine at medium and low speeds part-load. The effect of intake tumble and injection timing on combustion characteristics was analyzed. The results showed that increasing intake tumble could enhance airflow and combustion velocity at the operation condition of 1 000 r/min, 0.1 MPa brake mean efficient pressure (BMEP). However, the advantage of intake tumble reduced when engine speed increased. At operation condition of 3 000 r/min, 0.3 MPa BMEP, increasing intake tumble could cause combustion deterioration. The effect of injection timing has greater influence on mixture formation and combustion stability at operation condition of 3 000 r/min than operation condition of 2 000 r/min, and there is the best injection timing value between 300°CA BTDC and 320°CA BTDC at every operation condition.

Key words GDI engine, Part-load, Combustion characteristics, Cyclic variation, Experiment

引言

汽油缸内直喷分为分层燃烧和均质燃烧两种模式,由于均质燃烧模式可以使用传统的三元催化后处理系统控制排放而被广泛采用^[1~4]。但均质燃烧模式是在进气行程早期向缸内喷入燃油,过量空气系数远低于分层燃烧模式,导致部分负荷工况的燃油经济性大打折扣^[5~6]。本文研究部分负荷工况下均质直喷汽油机的燃烧特性,力求找出优化的最佳途径。

1 试验设备及试验方案

1.1 试验设备

试验是在一台 2.0 L 均质直喷汽油机上进行的,发动机的主要参数见表 1。发动机的台架布置方案如图 1 所示。试验用的仪器设备见表 2。

1.2 试验方案

进气滚流和喷油定时是影响直喷发动机性能的 2 个关键因素,为获得良好的性能指标,需对这些因素进行深入研究,并加以优化^[7~9]。本试验研究了

收稿日期: 2010-08-27 修回日期: 2010-10-12
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA110107)
作者简介: 杜维明,博士生,主要从事能源的多元化与新型动力总成研究,E-mail: duweiming@rdc.faw.com.cn

发动机部分负荷工况下进气滚流及喷油定时对燃烧特性的影响。进气滚流的控制原理如图 2 所示,在进气管出口处设置一翻板,当需要加强进气滚流时,翻板关闭,即图中所示状态,当不需要加强滚流时翻板打开,位置与进气流方向平行。翻板开、关时的气道流通特性如图 3 所示,可以看出翻板关闭后,滚流比 R_s 显著提高,但流量系数 C_f 降低,而发动机在中低转速部分负荷工况下需要的进气量较少,流量系数的降低不会影响发动机的充气效率。在研究喷油定时对燃烧特性影响时,油轨压力恒定为 8 MPa,只针对在进气行程的喷油始点时刻进行研究,并保持同一工况点的喷油持续期相同,简化变量参数。

表 1 发动机主要参数
Tab.1 Main parameters of engine

参数	数值
型式	直列 4 缸、4 冲程、全铝结构 自然吸气、缸内直接喷射
气门数	16
排量/L	1.994
压缩比	10.3
喷油压力/MPa	4 ~ 15
点火顺序	1-3-4-2
燃油	93 号汽油

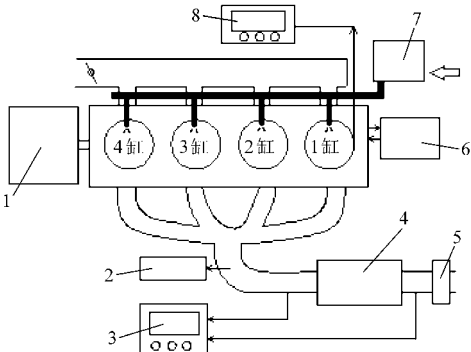


图 1 发动机试验台架布置方案
Fig.1 Arrangement design of engine test bed

1. 测功机 2. 排温检测 3. 排放分析仪 4. 三元催化 5. 消声器 6. 冷却系统 7. 油耗仪 8. 燃烧分析仪

表 2 试验用主要仪器设备

Tab.2 Main instruments and equipments in test

仪器	厂商
APA202/E/0525 型电力测功机	奥地利 AVL 公司
PUMA5.6.2 型控制系统	奥地利 AVL 公司
AVL735 型油耗仪	奥地利 AVL 公司
INDIMODUL621 型燃烧分析仪	奥地利 AVL 公司
MEXA7200 型排放分析仪	日本 HORIBA 公司

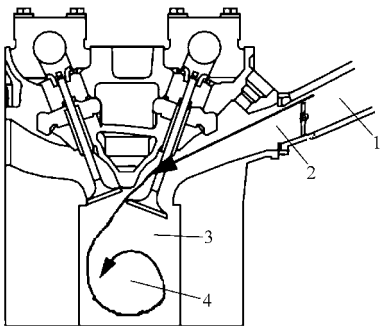


图 2 进气滚流控制系统

Fig.2 Intake tumble control system

1. 进气管 2. 翻板 3. 燃烧室 4. 进气滚流

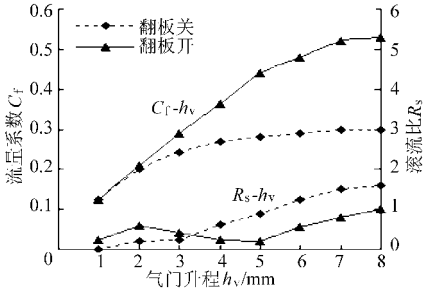


图 3 进气道流通特性

Fig.3 Intake port flow characteristics

2 试验结果及分析

2.1 进气滚流

分别测量了转速为 1 000 r/min、平均有效压力为 0.1 MPa,转速为 2 000 r/min、平均有效压力为 0.2 MPa 和转速 3 000 r/min,平均有效压力 0.3 MPa,3 种工况下不同滚流强度的缸内压力 p 和瞬时放热率 $\frac{dQ_f}{d\phi}$,结果如图 4 所示。可以发现,转速为1 000 r/min 时,加强滚流(翻板处于关闭状态)使得缸内气流运动加强,火焰传播速度加快,大大提高缸内燃烧压力和瞬时放热率。随着转速的提高,加强滚流对混合气形成和火焰传播的促进作用逐渐减弱。例如在 2 000 r/min 时,强滚流对缸内压力和燃烧放热率虽有一定的促进作用,但较之对 1 000 r/min 的影响已不明显,而当转速 3 000 r/min 时,加强滚流使得缸内压力明显偏低,燃烧速率下降,这说明此时缸内的滚流强度超出了火焰正常燃烧所需范围,使得燃烧开始恶化。

上述 3 种工况下测得的发动机累积放热率和燃烧持续期(本文定义燃烧持续期为累积放热率达到 5% 至累积放热率达到 90% 所经历的曲轴转角)如图 5 所示。可以发现,转速 1 000 r/min、平均有效压力为 0.1 MPa 工况时,翻板关闭状态比打开状态放热快而集中,50% 累积放热率在翻板关闭状态的位置为 5.3°CA,而打开状态的位置为 15.7°CA,并且

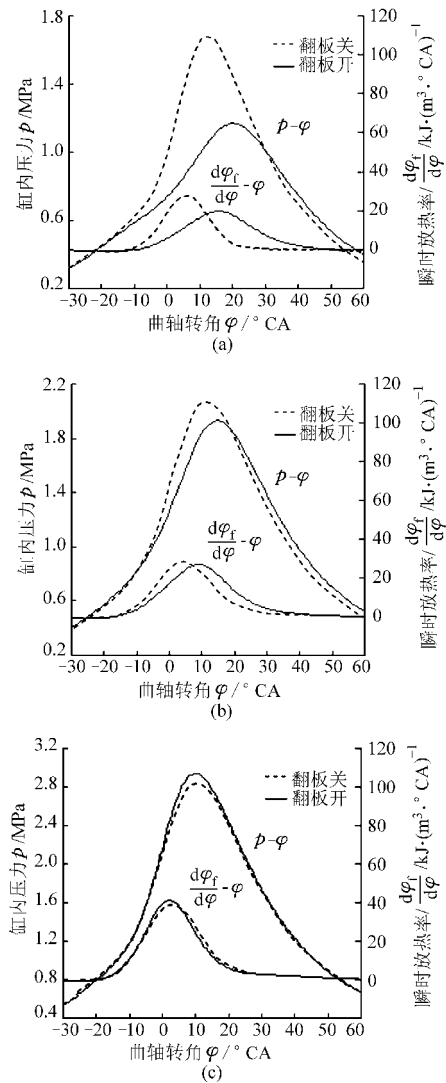


图4 进气滚流对缸内压力和瞬时放热率的影响
Fig.4 Effect of intake tumble on cylinder pressure and rates of heat release
(a) $n = 1000 \text{ r/min}, p_{\text{BMEP}} = 0.1 \text{ MPa}$ (b) $n = 2000 \text{ r/min}, p_{\text{BMEP}} = 0.2 \text{ MPa}$ (c) $n = 3000 \text{ r/min}, p_{\text{BMEP}} = 0.3 \text{ MPa}$

翻板关闭状态的燃烧持续期比打开状态大大缩短,缩短时间约为 10.2°CA ,这进一步说明翻板提高了滚流,而滚流作用加快了混合气的形成,使燃烧更加迅速。转速为 2000 r/min 工况时翻板关闭对应的累积放热率和燃烧持续期趋势与转速为 1000 r/min 工况类似,但影响的程度明显减弱,而到转速为 3000 r/min 工况时,累积放热率的差异已经很小,在 2°CA 以内。

转速为 2000 r/min 、平均有效压力为 0.2 MPa 工况下翻板开、关状态时,缸内滚流比、点火时刻缸内紊流强度分布及燃油浓度分布的 CFD 计算结果如图 6 所示。可以发现,翻板关闭时的缸内滚流比显著提高,并增强了气流运动,提高了点火时刻缸内紊流强度,翻板打开时平均紊流强度为 $14 \text{ m}^2/\text{s}^2$,而翻板关闭时平均紊流强度为 $17.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$,较强的紊

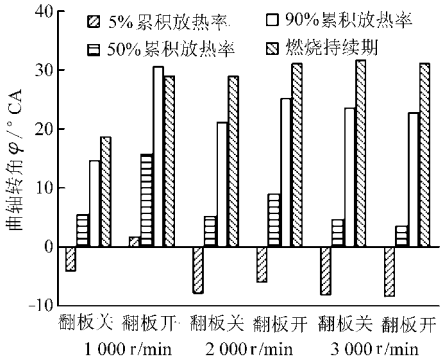


图5 进气滚流对累积放热率和燃烧持续期的影响
Fig.5 Effect of intake tumble on cumulative heat release rate and combustion duration

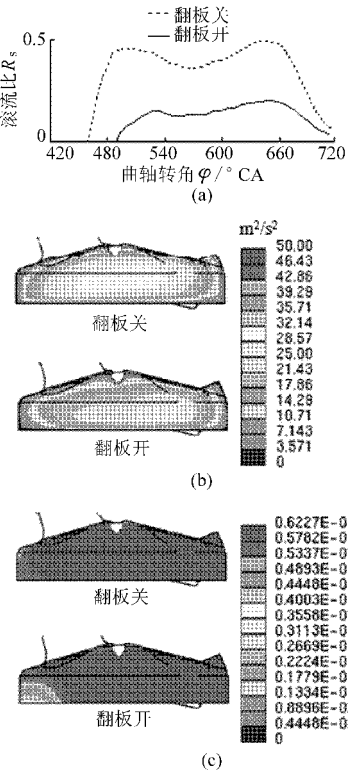


图6 缸内 CFD 计算结果
Fig.6 CFD results in cylinder
(a) 缸内滚流比 (b) 点火时刻缸内紊流强度
(c) 点火时刻缸内燃油浓度

流使得油气混合更加充分、均匀,保证了快速燃烧。

2.2 喷油定时

图 7 显示了转速为 2000 r/min 、平均有效压力为 0.2 MPa 及转速为 3000 r/min 、平均有效压力为 0.3 MPa 工况下不同喷油定时的缸内压力和瞬时放热率。可以发现,转速为 2000 r/min 工况下,不同喷油定时的缸内压力和瞬时放热率差异较大,且喷油定时存在最佳时刻,即为 315°CA ,此时的缸内燃烧压力较高,瞬时放热率也较快。这是因为喷油时刻过早,易出现油束撞击活塞而形成湿壁现象,造成燃烧室壁面温度低,油气混合速度变慢,燃烧热效率下降;而喷油时刻过晚,油气没有充分的时间混合,

均匀较差,燃烧恶化,热效率降低,并影响燃烧稳定性,即在最佳喷油时刻循环变动率最小,如图 8 所示。转速为 3 000 r/min 工况的缸内压力和瞬时放热率趋势与转速为 2 000 r/min 工况相似,最佳喷油定时为 300°CA。对比上述 2 种工况可以看出喷油定时对转速为 3 000 r/min 工况的影响略大于对转速为 2 000 r/min 工况,这是因为随着转速的增加,油气混合的时间相对缩短,同时缸内气流运动加强,影响混合气分布均匀度,加大循环变动率。从图 8 中还可看出,虽然不同喷油时刻的循环变动率有一定差异,但是循环变动率的变化保持在 3% 以内,这说明缸内直喷汽油机的燃烧较为稳定。

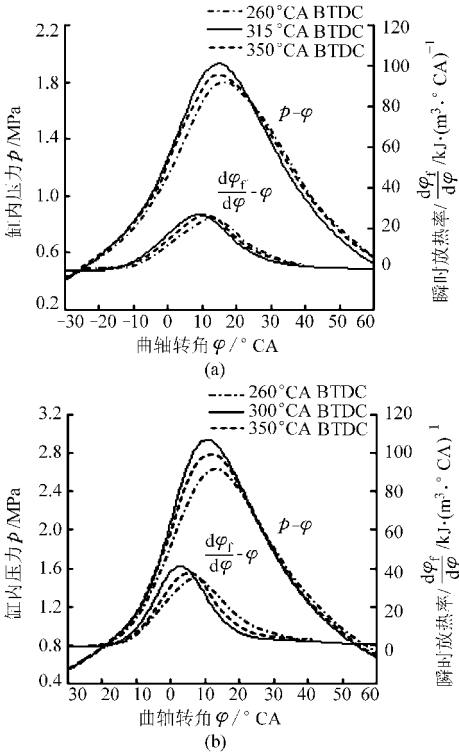


图 7 喷油定时对缸内压力和瞬时放热率的影响

Fig. 7 Effect of injection timing on cylinder pressure and rates of heat release

(a) $n = 2\,000\text{ r/min}$, $p_{\text{BMEP}} = 0.2\text{ MPa}$
(b) $n = 3\,000\text{ r/min}$, $p_{\text{BMEP}} = 0.3\text{ MPa}$

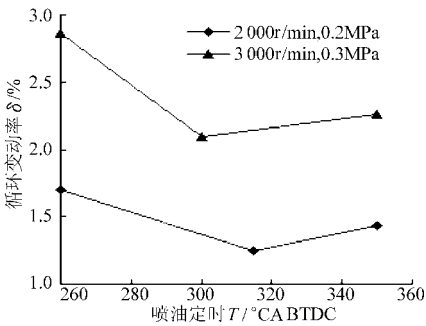


图 8 喷油定时对循环变动率的影响

Fig. 8 Effect of injection timing on cyclic variation

不同喷油定时下发动机的累积放热率和燃烧持续期如图 9 所示。可以发现,转速为 2 000 r/min 和转速为 3 000 r/min 工况下,中间喷油时刻(即最佳喷油定时),在达到 5%、50%、90% 累积放热率时间较快,对应的燃烧持续期较短。这是因为混合气的燃烧依赖于火焰传播,在中间喷油时刻油气混合充分,火焰的传播速度快,燃烧持续期缩短,因此燃烧迅速,等容度好,热效率高。这也正是图 7 中在最佳喷油定时的缸内燃烧压力高、瞬时放热率快的原因。

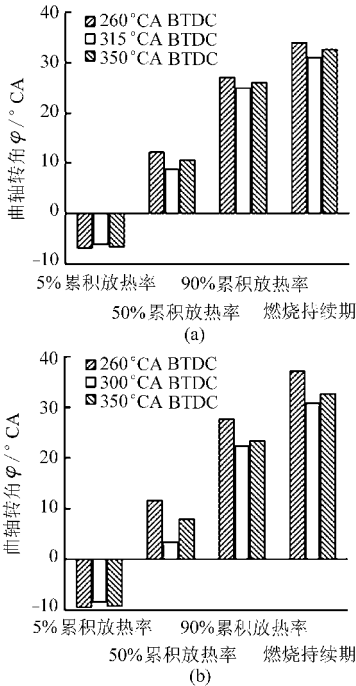


图 9 喷油定时对累积放热率和燃烧持续期的影响

Fig. 9 Effect of injection timing on cumulative heat release rate and combustion duration

(a) $n = 2\,000\text{ r/min}$, $p_{\text{BMEP}} = 0.2\text{ MPa}$
(b) $n = 3\,000\text{ r/min}$, $p_{\text{BMEP}} = 0.3\text{ MPa}$

图 10 显示了不同喷油定时下的有效燃油消耗率。可以发现,燃油消耗率随着喷油时刻的改变呈趋势性变化,喷油定时在 300°CA ~ 320°CA BTDC 之间油耗较低,并且最低燃油消耗率与各工况的最

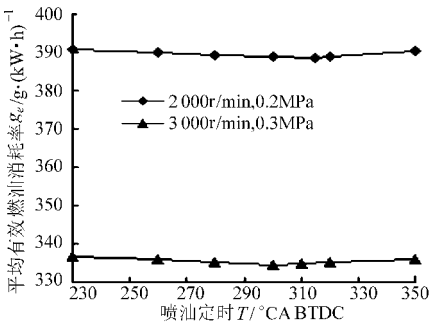


图 10 喷油定时对有效燃油消耗率的影响

Fig. 10 Effect of injection timing on BSFC

佳喷油定时相对应,喷油定时调节区间内的燃油消耗率降幅在1%~3%。这说明当进气行程的喷油时刻过晚,喷入缸内的燃油没有足够的时间混合,影响点火时刻缸内空燃比的均匀度,致使燃油消耗率上升,而喷油时刻过早,会出现湿壁现象,油耗也略有上升。

3 结论

(1) 进气翻板的使用可以提高发动机低转速、部分负荷的滚流强度和紊流强度,加大气流运动速

度,促进混合气的形成,加快燃烧,提高热效率。

(2) 随着转速和负荷的增加,增强进气滚流对燃烧的促进作用逐渐减弱,转速为3 000 r/min工况时,强滚流已不再适合混合气的形成,并使燃烧开始恶化,在标定开发时应加以关注。

(3) 喷油定时对直喷汽油机部分负荷工况的燃烧效率和燃烧稳定性有一定的影响,最佳的喷油时刻在300°CA~320°CA BTDC之间,并且在喷油定时区间内燃油消耗率呈趋势性变化,降幅在1%~3%,循环变动率变化在3%以内。

参 考 文 献

- 1 陈海娥,宫艳峰,李伟,等.缸内直喷汽油机的喷雾模拟[J].汽车技术,2010(3):12~15.
Chen Haie, Gong Yanfeng, Li Wei, et al. Spray simulation of gasoline direct injection engine[J]. Automobile Technology, 2010(3): 12~15. (in Chinese)
- 2 李骏,宫艳峰,李伟,等.汽油直喷发动机燃烧特性分析[J].西安交通大学学报,2010,44(7):9~13.
Li Jun, Gong Yanfeng, Li Wei, et al. Study on combustion characteristics of gasoline direct injection engine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 9~13. (in Chinese)
- 3 白云龙,王志,王建昕.利用废气滞留改善缸内直喷汽油机部分负荷性能的研究[J].内燃机学报,2009,27(4):328~332.
Bai Yunlong, Wang Zhi, Wang Jianxin. Study on improvement of part-load performance in a GDI engine using exhaust gas trap[J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(4): 328~332. (in Chinese)
- 4 赵靖华,洪伟,李学军,等.GDI汽车发动机怠速时滞依赖的 H_{∞} 控制[J].农业机械学报,2010,41(11):20~25.
Zhao Jinghua, Hong Wei, Li Xuejun, et al. Delay-dependent H_{∞} control of GDI engine under idling mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 20~25. (in Chinese)
- 5 Jiang Yankun, Xu Ningning. A study on ignition advanced angle control strategy of EFI gasoline engine[C]. SAE Paper 2010-01-0244, 2010.
- 6 Seoksu Moon, Jaejoon Choi, Essam Abo-Serie. The effects of injector temperature on spray and combustion characteristics in a single cylinder DISI engine [C]. SAE Paper 2005-01-0101, 2005.
- 7 Cornel Stan, Andrei Stanciu, Ralf Troeger. Theoretical and experimental analysis of the spray characteristics of a pressure pulse GDI system [C]. SAE Paper 2004-01-0538, 2004.
- 8 Li Yufeng, Zhao Hua, Nikolaos Brouzos, et al. Effect of injection timing on mixture and CAI combustion in a GDI engine with an air-assisted injector[C]. SAE Paper 2006-01-0206, 2006.
- 9 Thomas Pauly, Stefan Fransoschek, Ruediger Hoyer, et al. Cost and fuel economy driven after-treatment solutions-for lean GDI [C]. SAE Paper 2010-01-0363, 2010.