DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.003

# 进气流动对 PFI 汽油机燃油喷雾碰壁过程的影响*

马宗正[1,2]　程　勇[1]　纪少波[1]　杨永广[1]

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 河南工程学院机械系, 郑州 451191)

【摘要】 进气流动对进气道喷射式(PFI)汽油机燃油喷射过程有重要的影响,采用数值计算及台架试验的方法研究了进气流动对汽油喷雾碰壁过程的影响。研究表明:进气气流有助于燃油的空间雾化,减少以液态形式到达壁面的燃油;进气流动能够明显提高喷雾的贯穿性能,同时在进气流动方向上产生的偏转使附壁油膜的落点产生变化,使油膜的面积增大,有助于附壁油膜的蒸发;当机体温度较低时,进气流动对燃油蒸发的作用较为明显;当节气门开度较大时,由于温度较高,进气流动对发动机性能的改善效果不明显。

**关键词**: 汽油机　进气道喷射　进气流动　喷雾碰壁

**中图分类号**: TK411⁺.29　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2012)03-0010-06

# Influences of Intake Flow on Spray and Wall-film for Port Fuel Injection Gasoline Engine

Ma Zongzheng[1,2]　Cheng Yong[1]　Ji Shaobo[1]　Yang Yongguang[1]

(1. *School of Energy and Power Engineering*, *Shandong University*, *Ji'nan* 250061, *China*

2. *Department of Mechanical Engineering*, *Henan Institute of Engineering*, *Zhengzhou* 451191, *China*)

**Abstract**

The influences of intake flow on spray and wall-film were studied by using numerical simulation and test-bed experiment. Some results were received and they showed that the intake flow was useful for liquid fuel evaporation before impinged on the wall and could increases the spay penetration and deflect the spray in the direction of the intake flow. Meanwhile, the momentum of the spray droplets was strengthened and more small droplets could be received by the intake air flow which can enlarge the wall-film area and improve the evaporation of wall-film. If the engine body temperature was low, the effect of intake flow on engine performance was obvious while it had no difference under wide throttle open angle for high engine temperature.

**Key words**　Gasoline engine, Port fuel injection, Intake flow, Spray and wall-film

## 引言

采用进气道喷射的汽油机[1~3],燃油喷射可分进气门关闭时喷射和进气门开启时喷射两种方式。在进气门打开时进行燃油喷射,进气道内高速运动的气流会对喷雾过程产生重要影响。

Brenn 等通过 PDA 技术对简化气道内喷雾特性进行了研究[4],表明喷雾动态特性、燃油的蒸发及混合气形成过程取决于进气道内气体流动。Vannobel 等的研究结果表明[5],直径较小的粒子在进气流动的作用下会发生偏转,直径较大的粒子几乎不受影响;强的气流运动减少了湿壁现象。Whitelaw 等的研究表明[6],在进气门开启情况下喷油有助于减小附壁油膜厚度,并且会有大部分燃油以液态形式进入气缸。王晓瑜等运用三维瞬态数值模拟的方法分别计算了怠速工况下开阀喷射模式以

收稿日期: 2011-05-06　修回日期: 2011-06-24

* 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目和内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLE200908)

作者简介: 马宗正,博士生,河南工程学院讲师,主要从事发动机工作过程及数值计算研究,E-mail: zongzhengma@163.com

及闭阀喷射模式的油气混合过程[7]，计算结果表明该工况下采用开阀喷射方式可以提高进入缸内的燃油量，在此燃油喷射模式下，大部分燃油能直接喷入缸内并随即蒸发，更有利于增加缸内可燃混合气量。

采用可视化试验的方法对喷雾过程进行研究比较直观，但受到观察范围的限制，不能同时得到喷雾碰壁过程的全部信息。而大型流体力学软件的快速发展，使计算机数值模拟技术成为对发动机燃料喷射过程优化、缸内外流场分析、燃烧过程研究等最有效的方法之一[8~10]，本文采用可视化及数值计算两种方法研究进气流速对汽油喷雾碰壁过程的影响。

## 1　试验装置

试验中采用散射法对气道内燃油喷射过程进行了测试。光源直接通过进气道引入，这样只需在进气道的一侧开孔，从而可最大限度保证进气道流场的真实。

如图 1 所示，散射法试验系统分为 5 部分，即供油系统、电控喷油系统、光源系统、高速摄影系统和稳流气道试验台，所用设备具体参数见表 1。由于需要通过进气道引入光源，去掉了节气门体；进气流速通过稳流气道试验台调节流量实现；考虑到多孔喷嘴不同油束之间可能会产生相互影响，试验时采用了单孔喷嘴。

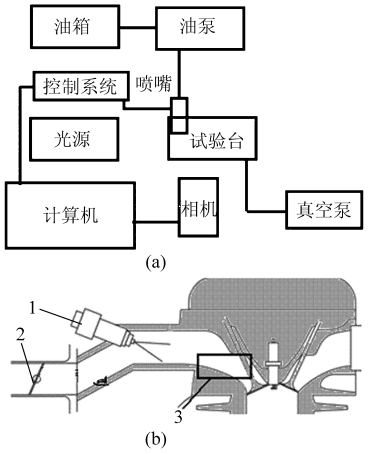


图 1　散射法系统示意图

Fig. 1　Diagram of schlieren method

(a) 整体示意图　(b) 局部示意图

1. 喷嘴　2. 进气道　3. 观察窗

**表 1　试验仪器参数与试验条件**

**Tab. 1　Specification of the experiment**

| 参数 | 光源 | 相机 | 镜头 | 喷嘴 | 喷油脉宽/ms | 喷射压力/MPa | 环境压力/MPa | 环境温度/℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 150 氙灯 | 快门:1/50 000 s，分辨率:656 × 490 | 焦距:8.5 ~ 51 mm，光圈:F1.2 | 单孔，孔径 $d$ = 0.2 mm | 3 | 0.3 | 0.1 | 20 |

试验时，通过进气道将光源引入，在光路的垂直方向上布置 CCD 相机，根据要观察的时刻，并结合 CCD 相机的延迟时间确定相机的开启时刻，得到的图像通过 IEEE 1394 接口送入计算机进行处理。

## 2　测试结果分析

受到所用试验台的限制，进气流速有一定的限值，选取了对应所研究发动机在节气门全开、转速为 4 000 r/min 时的几个点进行研究，图 2 为根据理论计算得到的进气道内气体流速变化曲线，以此为参考，在试验中流速分别设定为 45、40、35、30、25、20、10 和 0 m/s。同时，为使整个燃油过程在观察窗范围内比较完整且不出现碰壁后的反射情况，通过试验比较所得图像分别设定拍照时刻。

### 2.1　进气流速对喷雾空间雾化的影响

图 3 为不同进气流速时较为完整的喷雾图像，由图可知，当进气流速低于 30 m/s 时，喷雾油束几乎是以柱状形式到达壁面，在空气中基本没有雾化；

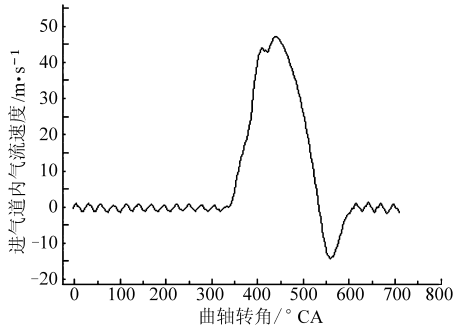


图 2　转速 4 000 r/min、节气门全开时的进气流速曲线

Fig. 2　Intake air velocity under wide throttle open angle

当进气流速大于 35 m/s 时，在油束到达壁面之前被进气气流吹散，变成细小的燃油颗粒。

由此说明，进气道喷射式发动机在工作时，喷雾雾化效果很差，燃油到达气道壁面或气阀背面之前几乎没有雾化[8]。

### 2.2　进气流速对喷雾偏转角的影响

由图 3 还可以看到，进气道内的空气流动对喷雾产生的另一个影响是喷雾会出现偏转，从而使燃油的落点位置发生变化。利用油束中心线与水平方

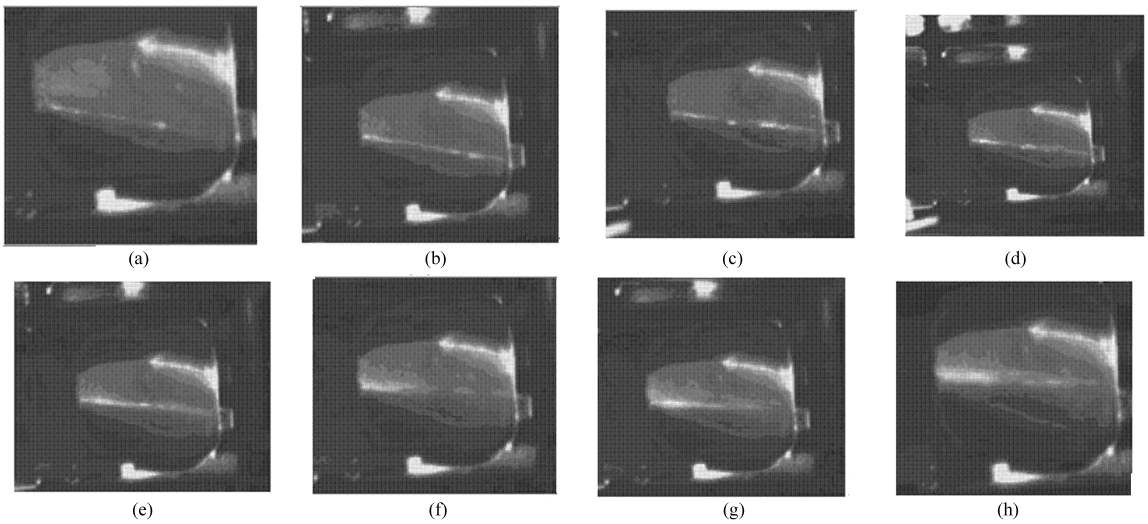


图 3 不同进气流速时喷雾图像

Fig. 3 Spray at different intake air velocity

(a) 0 m/s (b) 10 m/s (c) 20 m/s (d) 25 m/s (e) 30 m/s (f) 35 m/s (g) 40 m/s (h) 45 m/s

向的夹角反映燃油落点的变化情况,将该夹角称为喷雾偏转角。当流速 $v=45$ m/s 时空间雾化现象比较严重,已经无法测量,故分析结果中不包括此流速下的结果。

图 4 所示为喷雾偏转角随进气流速的变化图,由图可见,当不存在进气流动时,喷雾偏转角为 12.5°,随着进气流速的增加,喷雾偏转角不断减小,当进气流速为 40 m/s 时,偏转角变为 3.7°。即随流速增加,喷雾趋向于水平。

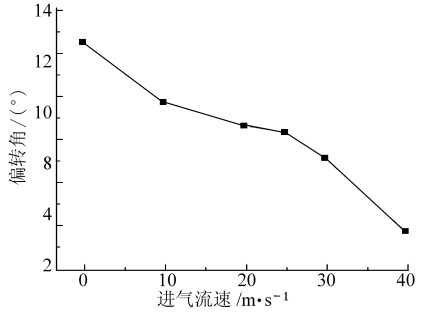


图 4 喷雾偏转角随进气流速的变化曲线

Fig. 4 Spray deflection at different intake air velocity

### 2.3 进气流速对喷雾贯穿距离的影响

当进气道内有空气流动时,另一个受影响的是油束的运动速度,而油束的运动速度可以用一定时间内的喷雾贯穿距离来反映。某一时刻的喷雾贯穿距离为喷孔出口中心点与喷雾油束距离的最大值,从而可以在确定喷孔出口中心点的前提下,通过喷雾油束最远点来计算喷雾贯穿距离。

图 5 为不同气流速度时喷雾贯穿距离随时间的变化曲线。由图可知,喷雾贯穿距离随气流速度的增加而增加,即进气流动的存在使得喷雾粒子的速度增加,进而提高了喷雾的贯穿性能。

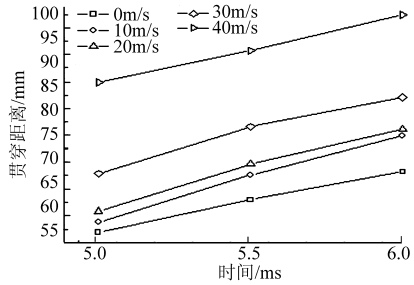


图 5 不同流速时喷雾贯穿距离随时间的变化曲线

Fig. 5 Penetration length at different intake air velocity

## 3 喷雾及碰壁过程的数值计算

为进一步了解进气流动对燃油喷射过程中的空间雾化及油膜分布的影响,采用数值计算的方法对不同流速下的喷雾过程进行研究。计算模型的建立及验证见文献[11]。

已有研究表明,当存在进气流动时会对喷雾过程及附壁油膜产生影响。根据燃油喷射过程中进气阀是否开启可分为闭阀喷射模式和开阀喷射模式,闭阀喷射模式是指当燃油全部到达壁面形成油膜时进气阀还未打开,开阀喷射模式是指在进气阀开启状态下进行燃油喷射。由于进气气流的存在,两种喷射模式存在明显的不同,为此对两种不同喷射模式进行比较。

发动机机体温度较低,燃油蒸发困难,研究此时燃油蒸发更具有针对性。为此对机体温度较低时的两种喷射模式进行比较。发动机转速为 5 000 r/min,喷油压力为 0.3 MPa,喷油量为 2.63 mg。0°CA 设定为膨胀上止点,闭阀喷射时燃油喷射时刻为 40 °CA,开阀喷射时为 330 °CA。为模拟发动机实际工况,在发动机台架上通过测量完成边界条件中的

温度设定，参考实测压力完成初始条件中的压力设定，参考模拟计算和实测排温，取排气终点残余废气温度为 800℃ 设定燃烧室工质温度，初始条件和边界条件设置见表 2。

**表 2　初始条件及边界条件设置**

**Tab. 2　Initial and boundary condition**

| | | |
|---|---|---|
| 边界条件 | 进气道壁面 | 30℃ |
| | 进气阀 | 80℃ |
| | 燃烧室壁面 | 100℃ |
| 初始条件 | 进气道工质 | 温度 20℃、压力 100 kPa |
| | 燃烧室工质 | 温度 800℃、压力 100 kPa |

为减少网格数量，减少计算时间，根据进气阀是否开启用 3 种不同的网格来描述，如图 6 所示，进气阀开启之前的状态利用进气道网格模型来模拟（图 6a），进气阀开启后利用进气道 + 燃烧室网格模型来模拟（图 6c），进气阀关闭后利用燃烧室网格模型来模拟（图 6b）。

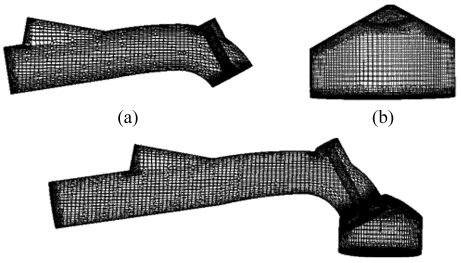


图 6　网格模型

Fig. 6　Mesh model

（a）进气道网格模型　（b）燃烧室网格模型

（c）进气道 + 燃烧室网格模型

### 3.1　进气流速对喷雾过程的影响

图 7 为闭阀及开阀两种不同模式下进行燃油喷射时落点的比较。由图可见，开阀喷射时由于进气流动的作用使得油束发生偏转，燃油的落点与闭阀喷射时有明显的区别，并且分布面积也增大。主要是由于进气流动使燃油粒子在进气流动方向上产生了分速度，使燃油沿着进气气流方向偏转，从而使燃油能够分布在更宽广的区域上。

### 3.2　进气流速对燃油空间蒸发量的影响

图 8 为闭阀喷射与开阀喷射时燃油空间蒸发量随曲轴转角的变化图。由图可见，闭阀喷射时，空间蒸发油量较小，在点火时刻只有 0.06 mg；开阀喷射时，在点火时刻燃油空间蒸发量为 0.54 mg，为闭阀喷射模式时的 9 倍。

开阀喷射时，燃油喷射在进气过程中进行，此时进气道内流速较高，使得燃油与气流的运动较剧烈，能够加速燃油的蒸发，因此进气阀开启状态下喷射

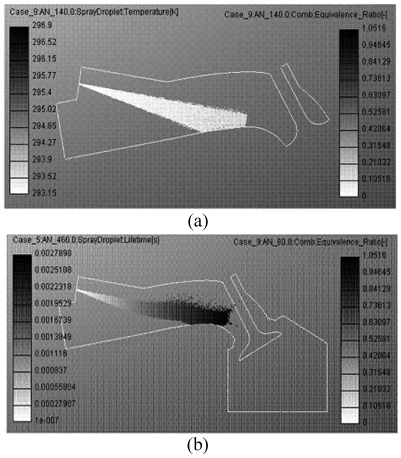


图 7　不同喷射模式时燃油落点比较

Fig. 7　Location of spray at different injection model

（a）闭阀喷射　（b）开阀喷射

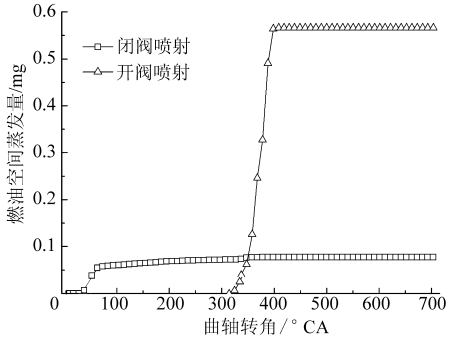


图 8　不同喷射模式时空间蒸发量比较

Fig. 8　Evaporation mass at different injection model

燃油的空间蒸发量大于进气阀关闭状态。

### 3.3　进气流速对附壁油膜蒸发量的影响

图 9 为不同喷射模式时附壁油膜蒸发量随曲轴转角变化的对比图。当采用闭阀喷射模式时，附壁油膜蒸发可以分为两个不同的阶段：进气阀开启之前和进气阀开启之后，在进气阀开启之前，附壁油膜蒸发量为 0.64 mg，当进气阀开启时，蒸发速率变快，在点火时附壁油膜蒸发量达到 1.45 mg；当采用开阀喷射模式时，在点火时附壁油膜蒸发量为 1.37 mg。

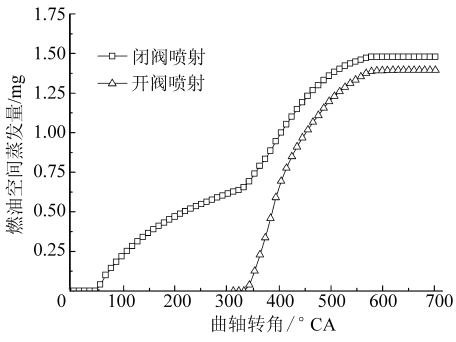


图 9　不同喷射模式时附壁油膜蒸发量比较

Fig. 9　Evaporation mass of wall-film at different injection model

采用闭阀喷射模式时,燃油依靠从壁面吸热实现蒸发,在进气阀开启之前,由于壁面温度较低,仅仅依靠吸热蒸发,附壁油膜蒸发速率较小;当进气阀开启后,进气气流与附壁油膜的相互作用加速附壁油膜的蒸发,使蒸发速度得到提高。而采用开阀喷射模式时,主要是依靠进气气流的相互作用实现油膜的蒸发,由不同喷射模式时附壁油膜分布面积对比可知(图 10),采用开阀喷射时附壁油膜分布面积比闭阀喷射时大数倍,因此在进气阀开启后附壁油膜蒸发量迅速增加,但由于开阀喷射时燃油蒸发时间短,在点火时附壁油膜蒸发量要小于闭阀喷射时的值。

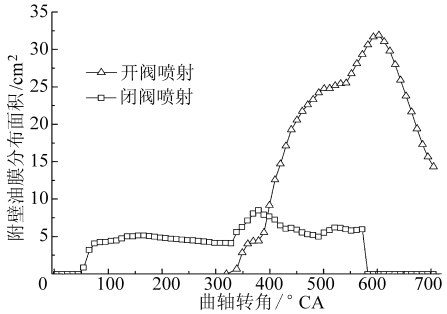


图 10 不同喷射模式附壁油膜分布面积比较

Fig. 10 Wall-film area at different injection model

最终能够参与燃烧的燃油必须以可燃混合气的形式存在,也就是说空间蒸发燃油与从附壁油膜蒸发的燃油,通过与空气的混合才能够最终得到利用,在点火前进入气缸的空间蒸发油量与附壁油膜蒸发油量的总和能够反映混合气浓度的不同。图 11 为空间蒸发油量与附壁油膜蒸发油量之和随曲轴转角的变化图。由图可知,采用开阀喷射点火时刻的值为 1.92 mg,而采用闭阀喷射时的值只有 1.52 mg。

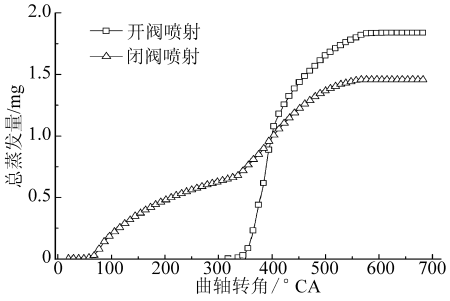


图 11 不同喷射模式附壁油膜蒸发量与空间蒸发量之和比较

Fig. 11 Evaporation sum mass at different injection model

通过不同喷射模式时附壁油膜质量的对比(图 12)可以看到,当进气阀关闭后,在进气道内部仍然存在一定量的附壁油膜,由于此时机体温度较低,在进气阀关闭期间,此部分燃油可能无法实现完全蒸发,在进气阀打开后会以液体形式进入气缸,从而使得发动机 HC 排放量升高。

由此可见,与闭阀喷射模式相比,开阀喷射模式能够充分利用与进气气流的相互作用,使得最终的燃油蒸发量较大。同时通过对比还可以发现,在机体温度较低时,进气流动对燃油蒸发的作用要大于通过传热实现燃油蒸发的作用。

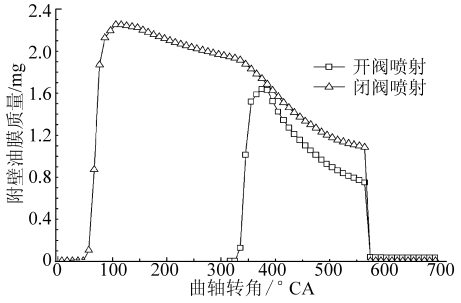


图 12 不同喷射模式时附壁油膜质量比较

Fig. 12 Wall-film mass at different injection model

## 4 试验验证

为验证数值分析结果的正确性,采用台架试验进行了相应的分析。进气阀处于关闭状态时有压缩和作功 2 个冲程,而进气阀开启状态下只有进气一个冲程,在进气阀开启状态下无法将燃油喷射完毕,为此将燃油分为两次喷射,即将所需的燃油分别在膨胀冲程和进气冲程进行喷射,从而分析进气流动对发动机性能的影响。同时为了便于比较,将燃油分两次喷射仍称为开阀喷射。

试验台架由 K157 FMI 型发动机(具体参数见表 3)、电涡流测功机(CW22)、测功机测控系统(FC2000)、宽域氧传感器(BOSH7200LSU)、计算机以及相关参数的测量装置和传感器组成,其中宽域氧传感器结合 Tech Edge 公司的 2CO 控制器可以实现空燃比测量,台架系统如图 13 所示。

**表 3 K157 FMI 型发动机参数**

**Tab. 3 Specification of K157 FMI engine**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 型式 | 单缸、4 冲程 |
| 行程 × 缸径/mm × mm | 56.5 × 49.5 |
| 总排量/mL | 124 |
| 标定功率(相应转速)/kW(r/min) | 7.0/(7 500) |
| 压缩比 | 9 |
| 冷却方式 | 风冷 |

电涡流测功机和测功机测控系统实现发动机的负荷控制及测量;通过计算机串口通信对自行开发的汽油机 ECU 的控制,实现喷油及点火参数的调整;利用进气压力及磁电机信号实现发动机相位判断,完成燃油喷射的相位控制。

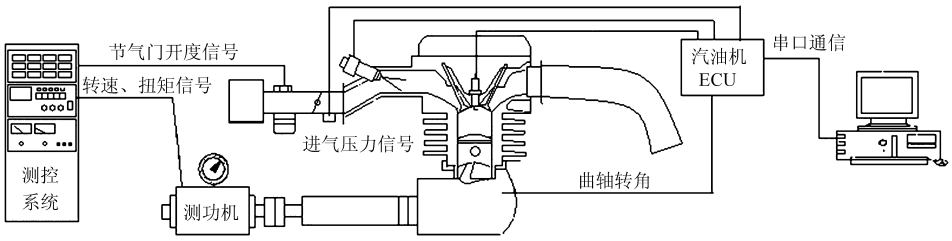


图 13　试验系统示意图

Fig. 13　Diagram of test bed experiment

表 4 为 5 000 r/min、不同节气门开度时，开阀喷射和闭阀喷射时发动机性能的比较。由表可知，当节气门开度为 40%、保持火花塞垫片温度为 150℃、采用闭阀喷油时发动机功率只有 2.44 kW，空燃比为 15.1，而采用开阀喷射时发动机功率可达到 2.55 kW，空燃比下降到 14.2；而当节气门开度为 100%、采用不同喷油方式时，发动机功率从 2.99 kW 升到 3.05 kW，空燃比从 13.7 降低到 13.2。

**表 4　不同喷油方式发动机性能比较**

**Tab. 4　Effects of injection model on engine performance**

| 喷射模式 | 膨胀冲程脉宽/ms | 进气脉宽/ms | 节气门开度/% | 功率/kW | 空燃比 |
|---|---|---|---|---|---|
| 闭阀 | 7.20 | 0 | 40 | 2.44 | 15.1 |
| 开阀 | 4.15 | 4.15 | 40 | 2.55 | 14.2 |
| 闭阀 | 8.70 | 0 | 100 | 2.99 | 13.7 |
| 开阀 | 4.90 | 4.9 | 100 | 3.05 | 13.2 |

由此可以表明，进气流动能够改善附壁油膜以液态形式进入气缸，从而改善发动机性能，同时验证了数值分析结果的正确性。

但是当节气门开度较大时，进气流动对发动机性能的改善效果不明显。这主要是因为汽油机采用节气门来调节进气量的多少，当处于大节气门开度时，进气量较大，此时可以喷射更多的燃油，使得发动机功率较大，由于是采用风冷冷却，而散热面积一定，故机体温度较高，附壁油膜以液态形式进入气缸的程度较差，从而使得改善效果不明显。

## 5　结论

（1）进气气流有助于燃油的空间雾化，增加燃油分布面积，减少以液态形式到达壁面的燃油，有助于减少附壁油膜现象。

（2）进气流动能够提高喷雾的贯穿性能，进气流速越大则喷雾的贯穿性能越好。

（3）当机体温度较低，进气流动对燃油蒸发的作用要大于吸热对燃油蒸发的作用。

（4）当节气门开度较大时，由于温度较高，进气附壁油膜以液态形式进入气缸的现象得到改善，进气流动对发动机性能的改善效果不明显。

## 参　考　文　献

1　张翠平，杨庆佛. 电控汽油机燃油喷射匹配的试验研究[J]. 农业机械学报，2004，35(2)：25～28.
Zhang Cuiping, Yang Qingfo. Experimental research of fuel injection matching for electronically controlled gasoline engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 25～28. (in Chinese)

2　赵弘志，曹林. CA6102 电控汽油机废气再循环性能研究[J]. 汽车工程，2005，27(2)：264～268.
Zhao Hongzhi, Cao Lin. A study on EGR performance of CA6102 electronically-controlled gasoline engine[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(2): 264～268. (in Chinese)

3　Shankar R, Udayakumar G, Sasikumar K. Advanced port injection solution for motorcycle application[C]. SAE Paper 2008－28－0031, 2008.

4　Brenn G, Domnick J, Dorfner V, et al. Unsteady gasoline injection experiments: comparison of measurements in quiescent air and in a model intake port[C]. SAE Paper 950512, 1995.

5　Vannobel F, Arnold A, Buschmann A, et al. Simultaneous imaging of fuel and hydroxyl radicals in an in-line four cylinder SI engine[C]. SAE Paper 932696, 1993.

6　Whitelaw J H, Brehm C, Sassi L, et al. Air and fuel characteristics in the intalze port of a SI engine[C]. SAE Paper 1999－01－1491, 1999.

7　王晓瑜，陈国华. PFI 汽油机油气混合过程三维瞬态数值模拟[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2007，35(6)：92～95.
Wang Xiaoyu, Chen Guohua. Three dimensional transient simulation of air-fuel mixture process in PFI gasoline engine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 35(6): 92～95. (in Chinese)

（下转第 27 页）

## 参 考 文 献


1 王建昕,傅立新,黎维彬. 汽车排气污染治理及催化转化器[M]. 北京:化学工业出版社, 2000: 298 ~ 299.

2 Yougen Kong, Chris Huffmeyer, Randy Johnson, et al. Applications of an active diesel particulate filter regeneration system [C]. SAE Paper 2004 - 01 - 2660, 2004.

3 中华人民共和国交通部公路司. 汽车排放污染物控制实用技术[M]. 北京:人民交通出版社,1999:156 ~ 158.

4 刘瑞祥,高希彦,杨德胜,等. 柴油机微粒陶瓷过滤器红外加热再生的优化[J]. 内燃机学报,2004,22(6):481 ~ 485.
Liu Ruixiang, Gao Xiyan, Yang Desheng, et al. Optimization of infrared regeneration exhaust particulate ceramic filter for diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(6): 481 ~ 485. (in Chinese)

5 宁智,张广龙,刘军民,等. 柴油机排气微粒过滤器微波再生试验研究(1)[J]. 内燃机学报,1997,15(1): 28 ~ 33.
Ning Zhi, Zhang Guanglong, Liu Junmin, et al. Experimental study on microwave regeneration for diesel exhaust particulate filter (1)[J]. Transactions of CSICE, 1997,15(1):28 ~ 33. (in Chinese)

6 吉林大学. 利用发动机进排气过程再生进排气过滤器系统:中国,200510119052.1[P]. 2008 - 03 - 12.

7 方显忠,李国良,许允,等. 利用进气反吹缸内燃烧再生的柴油机微粒过滤器[J]. 内燃机,2011(4): 43 ~ 46.
Fang Xianzhong, Li Guoliang, Xu Yun, et al. Bag-type diesel particulate filter regenerated by intake flow reverse blow and in-cylinder combustion of particulate[J]. Internal Combustion Engines, 2011(4):43 ~ 46. (in Chinese)

8 吉林大学. 辅助扫描反吹式分离排气微粒过滤器:中国,200910067532.6[P]. 2009 - 09 - 15.

9 肖福明,刘巽俊,季雨,等. 公共汽车柴油机袋式消烟器的开发[J]. 内燃机工程,1991,12(2): 36 ~ 39.
Xiao Fuming, Liu Xunjun, Ji Yu, et al. Development of a multi-bag particulate collecter for diesel buses[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1991,12(2):36 ~ 39. (in Chinese)


(上接第 15 页)


8 汪淼,王建昕,沈义涛,等. 汽油喷雾碰壁和油膜形成的可视化试验与数值模拟[J]. 车用发动机,2006(6):24 ~ 28.
Wang Miao, Wang Jianxin, Shen Yitao, et al. Visualization research of the gasoline spray-wall interaction and wall film formation and numerical simulation[J]. Vehicle Engine, 2006(6):24 ~ 28. (in Chinese)

9 Daniele Tamagna, Roberto Gentil, Youngchul Ra, et al. Multidimensional simulation of the influence of fuel mixture composition and injection timing in gasoline-diesel dual-fuel applications[C]. SAE Paper 2008 - 01 - 0031, 2008.

10 Daniele Tamagna, Youngchul Ra, Rolf Reitz. Multidimensional simulation of PCCI combustion using gasoline and dual-fuel direct injection with detailed chemical kinetics[C]. SAE Paper 2007 - 01 - 0190, 2007.

11 马宗正,程勇,纪少波. 汽油机起动工况附壁油膜挥发过程的计算分析[J]. 燃烧科学与技术,2010,16(6):503 ~ 507.
Ma Zongzheng, Cheng Yong, Ji Shaobo. Study on wall-film evaporation of gasoline engine during start[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(6):503 ~ 507. (in Chinese)