

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.005

# 汽油机进气过程燃油喷射挥发速率影响因素分析\*

纪少波<sup>1</sup> 程勇<sup>1</sup> 马宗正<sup>2</sup> 黄万友<sup>1</sup>

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

**摘要:** 通过可视化试验方法研究了进气流速对燃油喷雾的影响, 结果表明进气流速增大时, 可以有效促进燃油的空间挥发。数值分析结果表明, 燃油落点位置改变时, 进气流动对喷雾挥发的影响存在差异, 对研究用机型而言, 当燃油落点在进气门背面与进气道交界处时, 会有更多的燃油在进气流动作用下直接进入气缸。当喷射距离增大时, 油束前端面积增加, 进气流动作用下, 直接进入气缸的燃油量增多。高温的回流与油束作用能够促进喷雾的空间挥发。在进气门打开前喷射燃油时, 油束碰壁反射后与进气流动相互作用, 能够增加燃油的空间挥发量。

**关键词:** 汽油机 进气冲程 挥发速率 影响因素

**中图分类号:** TK411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0025-06

## Influence Factor Analysis of Fuel Evaporation in Intake Stroke

Ji Shaobo<sup>1</sup> Cheng Yong<sup>1</sup> Ma Zongzheng<sup>2</sup> Huang Wanyou<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Visualization technique was adopted to study influence of intake air velocity on fuel injection. Results showed that evaporation of fuel could be promoted by increasing velocity of intake air. Influence of intake air on evaporation of spray was different if spray angle was changed. For the engine used in study, more fuel can enter cylinder directly if fuel was injected on the back of intake valve and inlet. With increasing distance of fuel injection, front end area of spray increased and more fuel would enter cylinder directly. Evaporation of spray can be promoted by high temperature back flow. Fuel injected before intake stroke would reflect against the inlet and intake valve, evaporation of reflected fuel could be promoted by intake air.

**Key words:** Gasoline engine Intake stroke Volatilization rate Influence factor

### 引言

采用进气道喷射方式的电控汽油机, 喷射的燃油会在壁面形成附壁油膜, 部分液态燃油在进气门打开时随气流进入气缸, 造成发动机的 HC 排放增加<sup>[1]</sup>。在进气过程喷射燃油时, 进气流动会对燃油的挥发产生影响, 国内外学者对进气过程中的喷射燃油进行了研究。文献[2]认为在进气门开启情况下喷射有助于减小附壁油膜厚度, 大部分喷射的燃油会以液态形式进入气缸。文献[3]认为进气过程

喷射燃油有助于改善燃油挥发速率, 同样也认为大部分燃油会以液态形式进入气缸, 并且部分燃油在点火时仍然未挥发完毕, 从而产生 HC 排放过高的问题。文献[4]认为进气过程喷油时, 直径较小的燃油粒子在气流作用下发生偏转, 部分燃油以液态形式进入气缸, 在缸套壁面和活塞顶部形成油膜。文献[5]认为在进气门开启后立即喷油, 燃油会随高速气流进入气缸, 而不会出现严重的油膜附壁现象, 但如果喷射时刻过晚, 则燃油落点仍主要集中在气道壁面上。文献[6]对进气流速及进气道形状与

收稿日期: 2012-05-02 修回日期: 2012-07-27

\* 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目和天津大学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: 纪少波, 副教授, 博士, 主要从事内燃机工作过程及测控技术研究, E-mail: jobo@sdu.edu.cn

通讯作者: 程勇, 教授, 博士生导师, 主要从事内燃机工作过程及测控技术研究, E-mail: cysgd@sdu.edu.cn

喷雾偏转间关系进行研究,认为进气过程喷油,油束会受到进气流速及进气道形状的影响而发生偏转,较高的进气流速有助于减少燃油碰壁现象的发生;文献[7]认为进气过程喷射燃油时,大部分燃油直接喷入缸内并随即蒸发,对于增加缸内气态燃油量更为有利。文献[8]认为进气门开启时喷油,气流的作用将部分燃油粒子带入气缸,附壁油膜主要集中在气缸壁上。文献[9]采用可视化技术研究了进气过程喷射燃油时,进气流速对燃油空间挥发及附壁油膜挥发的影响。

进气过程喷射燃油的空间雾化及附壁油膜的挥发速率受到进气气流的流速、燃油落点位置、喷射距离、进气回流及喷油时刻等因素的影响,本研究在前期研究的基础上,采用可视化方法及数值模拟方法对各因素的影响规律进行研究。

## 1 进气流速影响规律可视化试验

采用可视化试验方法对不同流速时的燃油喷雾进行研究,试验在稳流气道试验台上进行,通过设定试验台的流量改变流速,试验所用设备包括供油系统、光源系统及高速摄影系统,试验台示意图如图1所示,各部件型号及参数如表1所示。

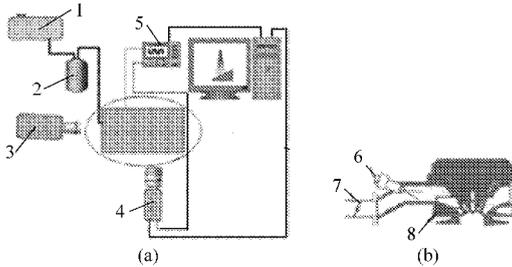


图1 可视化试验台示意图

Fig.1 Structural diagram of testing bed

(a) 试验台布置 (b) 局部放大图

1. 油箱 2. 油泵 3. 光源 4. CCD相机 5. 控制系统 6. 喷嘴  
7. 进气道 8. 观察窗

表1 试验设备

Tab.1 Experiment equipment and parameter

试验台部件	参数
光源	150 W 氙灯
相机(Basler 601AC)	快门:1/50 000 s
镜头(Avenir TVSL 08551)	$f$ : 8.5 ~ 51 mm, F1.2
喷嘴	单孔喷嘴,直径0.2 mm

采用散射法对喷雾过程进行测试,在进气道的一侧开孔,将光源引入进气道,最大限度保证不影响进气道的流场,在光路的垂直方向上布置 CCD 相机,CCD 相机得到的图像通过 IEEE 1394 接口送入计算机进行处理。

试验中设定进气流速为 0、10、20、25、30、35、

40、45 m/s。图2为不同进气流速时采用单孔喷油器时的喷雾图像,粗虚线为进气道的轮廓线,细虚线为油束的分布范围。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;当进气流速大于35 m/s时,油束到达壁面之前被进气气流吹散,变成细小的油粒,由此可见,进气气流有助于促进燃油的空间挥发,减少附壁油膜附壁量。

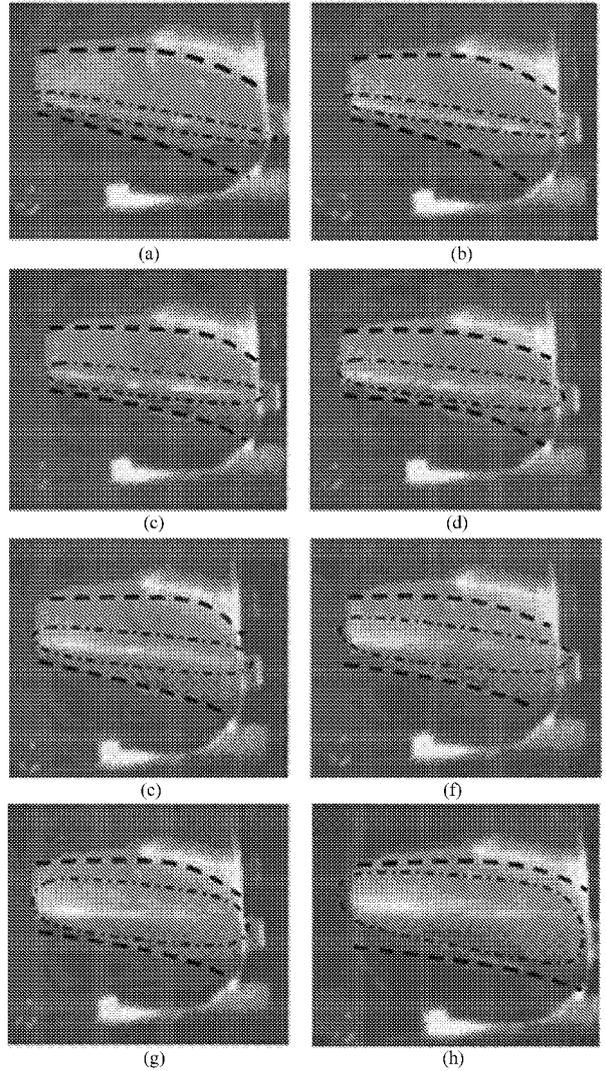


图2 不同进气流速时喷雾图像

Fig.2 Spray photograph with different intake velocities

(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

## 2 燃油挥发影响因素数值分析

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,无法得到喷雾碰壁过程的全部信息;此外,通过试验方法研究各因素的影响规律时,各影响因素调整困难,为此,采用流体力学软件模拟分析燃油落点位置、喷射距离、进气回流及喷射时刻等因素的影响规律。

### 2.1 计算模型的建立

根据发动机实际尺寸建立实体模型,将建立的实体模型输入 CFD 软件 FIRE 中生成体网格。主要研究进气过程喷油时燃油的空间雾化及附壁油膜的挥发情况,建立的模型主要包括进气道、进气门及燃烧室 3 部分,图 3 为生成的网格模型。

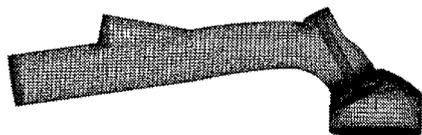


图 3 网格模型  
Fig. 3 Mesh model

气体在气道内的流动是三维可压缩黏性流动,气道内气体流动的数学模型采用连续性方程、动量守恒方程、热力学状态方程及标准  $k-\epsilon$  湍流模型。采用有限容积法对流动控制方程进行离散,并用中心差分格式求解。本文最主要的模型是喷雾模型和壁面油膜模型,采用离散型油滴模型模拟燃油喷雾碰壁过程,即把燃油喷雾看成是由离散的具有代表

性的计算“质点”组成。蒸发模型采用 Dukowicz 模型,破碎模型采用 TAB 模型,粒子交互模型采用 Schmidt 模型,碰壁后的油膜发展过程采用 Mundo Sommerfeld 模型模拟。采用激光纹影法实测了喷雾及碰壁过程,与相同条件下模型计算的结果进行对比,结果表明所建模型可以用于对进气过程喷油时影响燃油挥发的各因素的影响规律进行研究<sup>[10]</sup>。

基于该模型研究了燃油落点位置、喷射距离、进气回流及喷射时刻等因素对喷射燃油空间挥发及附壁油膜挥发的影响规律。分析时设定发动机转速为 1 000 r/min,喷油压力为 0.3 MPa,膨胀上止点设定为 0°CA,喷油时刻设置为 40°CA,进气门开启时刻为 330°CA,喷油量为 2.63 mg,喷射距离 60 mm。实测了发动机运行时的壁面温度及进气门背面温度,据此设定计算的边界条件及初始条件<sup>[10]</sup>。

### 2.2 燃油落点位置的影响

研究中设置了 3 种不同燃油落点位置,3 种落点位置油膜分布示意图如图 4 所示,图中实线为油束中心线。

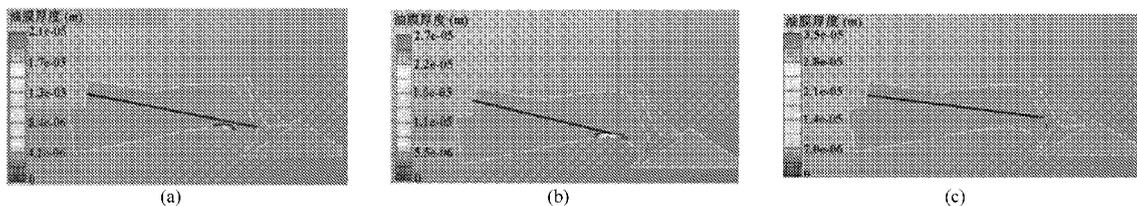


图 4 不同落点位置油膜分布图

Fig. 4 Fuel film in different location

(a) 进气门背面 (b) 进气道底部 (c) 进气门背面上部与进气道交界处

图 5 为燃油落点位置不同时,空间雾化及附壁油膜挥发对比曲线。由图 5a 可见,进气门开启后,从 370°CA 时刻开始,在进气流动的作用下,燃油空间挥发量迅速增加,而从总体看,燃油落点分布在进气道底部时空间挥发量最大,约为 0.60 mg,而燃油落点为进气门背面上部与进气道交界处只有约 0.40 mg。对此的解释见图 6,该图显示了 3 种落点位置时,380°CA 时刻时的喷雾及油束分布图,由图

可知,燃油落点为进气门背面上部与进气道交界处时,大量燃油随气流进入气缸,燃油粒子直径较大,且与气流的相对速度较小,喷射过程的空间挥发量较小;而其它两种落点位置时,油束与进气道壁面或者进气门相互碰撞,碰撞后产生的燃油粒子直径小,且与进气流的相对速度大,使得空间挥发效果较好。

由图 5b 可见,燃油落点分布在进气门背面上部与进气道交界处时,附壁油膜挥发量最大,而分布在

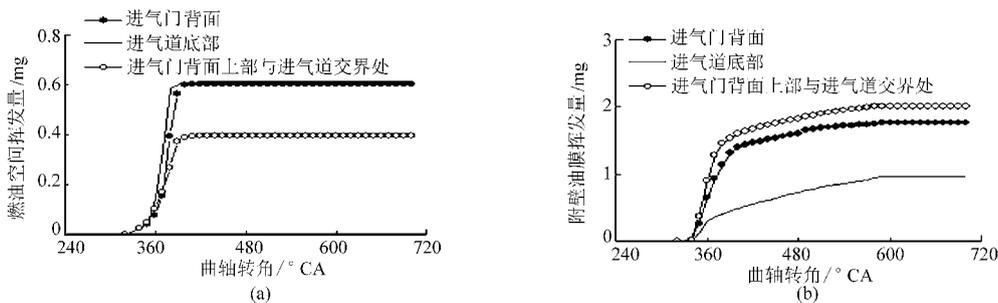


图 5 不同喷油落点对比曲线

Fig. 5 Contrast curves in different fuel film location

(a) 空间雾化对比 (b) 附壁油膜挥发对比

进气道底部时,挥发量最小,这与空间雾化量正好相反。这是因为燃油落点处的温度对附壁油膜的挥发有重要影响,落点位置的温度越高,挥发量越大。相

对而言,进气门背面上部与进气道交界处的温度相对最高,所以挥发量最大,而进气道底部的温度相对最低,所以挥发量最小。

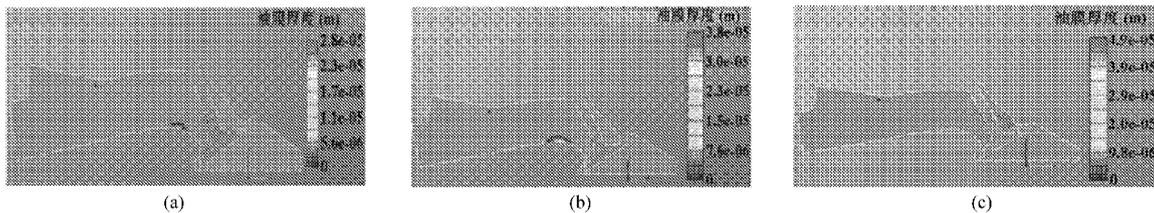


图6 不同落点位置时油束分布对比

Fig. 6 Contrast of spray in different fuel film locations

(a) 进气门背面 (b) 进气道底部 (c) 进气门背面上部与进气道交界处

### 2.3 燃油喷射距离的影响

燃油喷射距离增加时,油束的前端分布面积增大,进气气流会对燃油的挥发产生影响。对研究用发动机进气道的结构进行分析,除了采用60 mm的喷射距离外,还对100 mm的喷射距离进行了研究,喷射距离改变时,喷油角度保持不变,油束中心都是进气门背面上部与进气道交界处。图7a为不同喷射距离时空间雾化量对比曲线,由图可见,喷射距离

为60 mm时燃油空间挥发油量为0.62 mg,喷射距离为100 mm时燃油空间挥发油量则为0.16 mg。对此的解释见图8,该图显示了不同喷射距离时的油束分布图,由图可见,喷射距离增加时,油束前端分布面积增大,部分燃油不与进气门背面碰撞而直接进入气缸,空间挥发油量较小。喷射距离为60 mm时,燃油与进气门碰撞,碰撞后的燃油粒子直径较小,与空气气流的相对速度较大,因此空间挥发量较大。

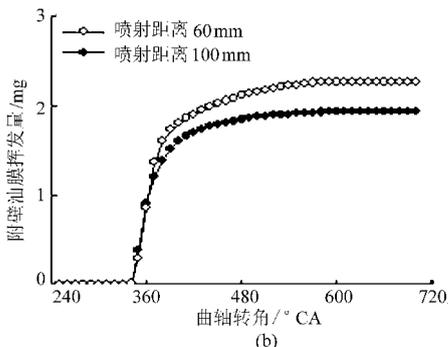
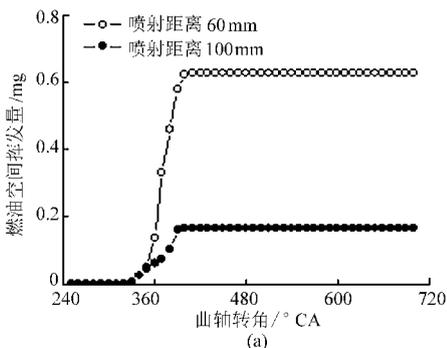


图7 不同喷射距离对比曲线

Fig. 7 Contrast curve in different injection distances

(a) 空间雾化对比 (b) 附壁油膜挥发对比

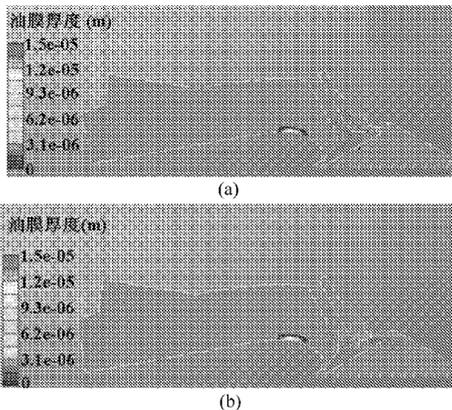


图8 不同喷射距离油膜分布对比

Fig. 8 Contrast of fuel film in different injection distances

(a) 喷射距离 60 mm (b) 喷射距离 100 mm

图7b显示了不同喷射距离时附壁油膜挥发量随曲轴转角的变化曲线,由图可见,喷射距离为

60 mm时附壁油膜挥发量要高于100 mm的情况。研究中边界条件设置时,将进气道的壁面温度设定为30℃,当喷射距离增大时,油束前端分布面积增大,部分燃油落在温度偏低的进气道底部,这部分燃油的挥发速度慢,从而使得喷射距离增大时,附壁油膜的挥发速度降低。

### 2.4 进气回流的影响

燃油喷射过程中,回流的高温气体对油束及附壁油膜的挥发产生影响,图9a为有、无回流时喷射油束空间挥发量对比曲线,由图可见,有回流时空间挥发量明显高于无回流的情况。对此的解释见图10,该图为有、无回流时,380°CA时刻的喷雾及油束分布图,由图可见,有进气回流时,气缸内部的高温燃气回流,并与喷雾相互作用,能够促进燃油的空间挥发,而无进气回流时进气道温度低,燃油粒子

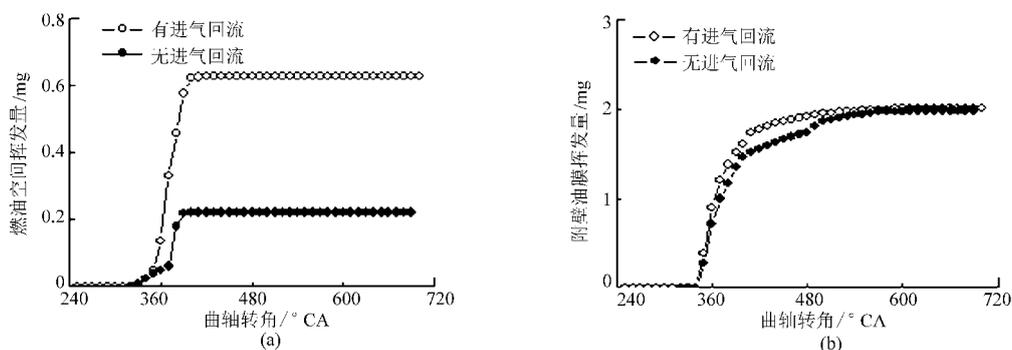


图 9 有、无回流时对比曲线

Fig. 9 Contrast curve with and without back-flow

(a) 空间雾化对比 (b) 附壁油膜挥发对比

与周围空气的相对速度低,导致空间挥发油量较少。

图 9b 为有、无进气回流时附壁油膜挥发量的对比曲线,由图可见,总体而言有进气回流时,附壁油膜挥发量要高于无回流时。分析认为,回流的高温燃气一定程度上提高了燃油落点处的温度,从而促进了附壁油膜的挥发。

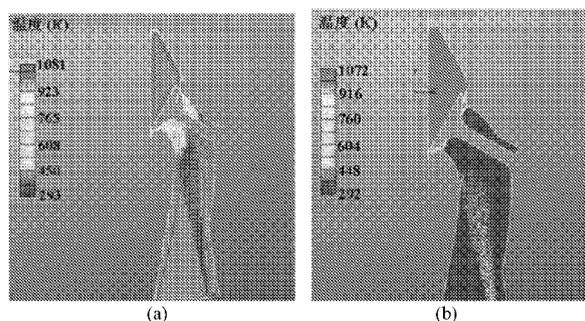


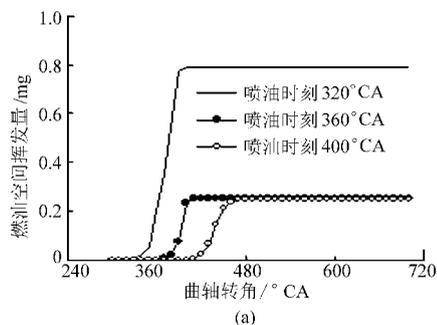
图 10 有、无回流时温度场及喷油对比

Fig. 10 Temperature filed and spray with and without back-flow

(a) 有回流 (b) 无回流

### 2.5 燃油喷射时刻的影响

研究用发动机进气门开启时刻为  $330^\circ\text{CA}$ , 为此设定了 3 种不同的喷油时刻:  $320^\circ\text{CA}$ 、 $360^\circ\text{CA}$  及  $400^\circ\text{CA}$ , 其中,  $320^\circ\text{CA}$  情况下, 燃油在进气门开启之前即已经开始喷射, 并持续到进气门开启后。图 11a 为不同喷油时刻时燃油空间雾化对比曲线,



由图可见,  $320^\circ\text{CA}$  时刻喷油对应的空间雾化量最大。对此的解释见图 12, 该图为不同时刻喷油时, 油束分布示意图, 由图可见,  $320^\circ\text{CA}$  时喷油, 气门仍处于关闭状态, 燃油到达壁面或气门背面后会产生反射, 部分燃油粒子重新回到进气道内部, 这部分燃油粒子与进气气流的相对速度较大, 有助于增加空间挥发量, 而  $360^\circ\text{CA}$  及  $400^\circ\text{CA}$  的情况下, 进气门处于开启状态, 部分燃油粒子产生偏转, 随进气气流进入气缸, 这部分燃油与空气的相对速度较小, 导致总体的空间挥发油量较小。

图 11b 为不同喷油时刻时附壁油膜挥发量对比曲线, 由图可见,  $360^\circ\text{CA}$  BTDC 时刻喷油对应的附壁油膜挥发量最大, 分析认为此时刻喷油时, 燃油到达壁面时, 对应的进气气流的速度较大, 能够加快附壁油膜的挥发速度。  $320^\circ\text{CA}$  BTDC 时刻喷油对应的附壁油膜挥发量次之, 分析认为, 该时刻喷油时, 燃油的空间挥发量较大, 使得最终附壁油膜的质量少, 导致附壁油膜挥发量要小于  $360^\circ\text{CA}$  BTDC 时刻喷油的情况。  $400^\circ\text{CA}$  BTDC 时刻喷油时, 相比其它两种情况而言, 进气流动速度有所降低, 气流作用减弱使得附壁油膜挥发最慢。

### 3 结论

(1) 通过散射法对不同流速时的喷雾情况进行

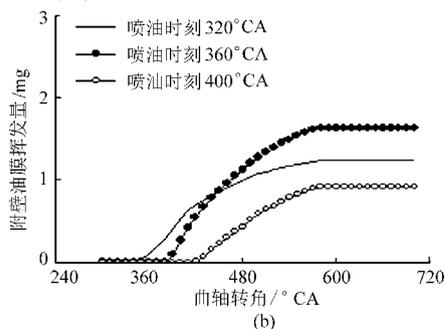


图 11 不同喷油时刻对比曲线

Fig. 11 Contrast curve in different injection timing

(a) 空间雾化对比 (b) 附壁油膜挥发对比

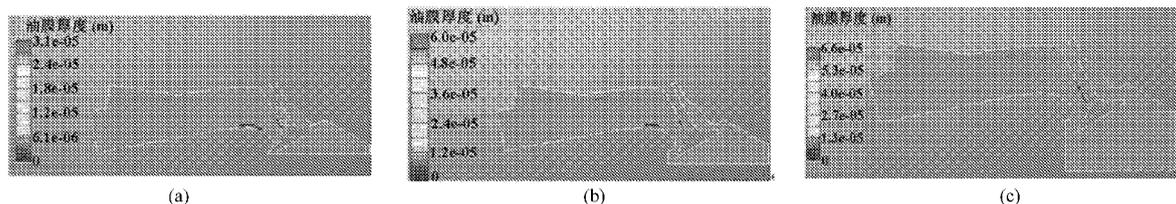


图 12 不同喷油时刻油膜分布对比

Fig. 12 Contrast of fuel film in different injection timing

(a) 320°C (b) 360°C (c) 400°C

研究表明,随着进气气流流速的增大,进气气流对喷射燃油的雾化产生明显的促进作用,有助于减少附壁油膜量。

(2) 燃油落点位置改变时,进气流动将部分燃油直接带入缸内,对研究用机型而言,当油落点在进气门背面与进气道交界处,该现象较明显。

(3) 随着喷射距离的增加,油束前端分布面积增大,在进气气流的作用下,更多的燃油直接进入

气缸。

(4) 气门叠开期间,有进气回流时,回流的高温气体与喷射的油束相互作用,能够促进燃油的空间挥发。

(5) 气门开启前喷油时,油束与气门撞击反射,当进气门打开时,部分燃油粒子与进气气流相互作用,能够促进燃油的空间挥发。

#### 参 考 文 献

- 1 Cho H, Min K. Measurement of liquid fuel film distribution on the cylinder liner of a spark ignition engine using the laser induced fluorescence technique[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(7): 975 ~ 982.
- 2 Hongming Xu. Control of A/F ratio during engine transients[C]. SAE Paper 1999-01-1484, 1999.
- 3 Zughyer J, Zhao F Q, Lai M C, et al. A visualization study of fuel distribution and combustion inside a port-injection gasoline engine under different start conditions [C]. SAE Paper 2000-01-0242, 2000.
- 4 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.
- 5 Werlberger P, Rokita R, Chmela F. Observation of fuel injection and combustion by use of an endoscopic video system[C] // Proceedings of ImechE Seminar—Measurement and Observation Analysis of Combustion in Engines, London, 1994.
- 6 Pirault J P, Quissek F, Rokita R, et al. Development of fuel preparation for petrol engines[C] // 1997 IMechE Seminar, 1997: 229 ~ 233.
- 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: Nature Science Edition, 2007, 35(6): 92 ~ 95. (in Chinese)
- 8 Stanglmaier R S, Matthew J, Matthews R D. In-cylinder fuel transport during the first cranking cycles in a port injected 4-valve engine[C]. SAE Paper 970043, 1997.
- 9 马宗正, 程勇, 纪少波, 等. 进气流动对 PFI 汽油机燃油喷雾碰壁过程的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 10 ~ 15.  
Ma Zongzheng, Cheng Yong, Ji Shaobo, et al. Influences of intake flow on spray and wall-film for port fuel injection gasoline engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 10 ~ 15. (in Chinese)
- 10 马宗正. 摩托车汽油机进气到附壁油膜研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.  
Ma Zongzheng. Research on intake-port wall-film of motorcycle gasoline engine with intake-port injection system [D]. Ji'nan: Shandong University, 2010. (in Chinese)

(上接第 40 页)

- 8 Ulli Drescher, Dieter Bruggemann. Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 223 ~ 228.
- 9 顾伟. 低品位热能有有机物朗肯动力循环机理研究和实验验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- 10 Wang J L, Zhao L, Wang X D. An experimental study on the recuperative low temperature solar Rankine cycle using R245fa[J]. Applied Energy, 2012, 94: 34 ~ 40.
- 11 Schuster A, Karellas S, Kakaras E, et al. Energetic and economic investigation of organic Rankine cycle applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8 ~ 9): 1 809 ~ 1 817.