

喷油开始时刻对缸内直喷汽油机性能的影响

韩文艳^{1,2}, 许思传¹, 周岳康³, 任健康³

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051; 3. 上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海 201804)

摘要: 通过对某涡轮增压缸内直喷汽油机缸内流动、混合气形成及燃烧过程的数值模拟, 并借助发动机台架试验中获得的油耗、排放及燃烧数据, 研究了喷油开始时刻对发动机性能的影响。结果显示, 对于 $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况, 喷油开始时刻为 400° 曲轴转角是混合气雾化混合的最佳方案, 此时混合气分布比较均匀且点火时刻火花塞附近具有较高的湍动能, $10\%\sim 90\%$ 燃烧持续期最短且 HC 排放较低, 从而使其具有最佳的燃油经济性与燃烧稳定性。而 $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况的最佳喷油开始时刻推迟了 30° 曲轴转角。喷油提前, 壁面油膜量增加, 混合气当量比下降及火花塞附近较低的湍动能使得燃烧速率降低, 因此 HC 排放、燃油经济性及燃烧稳定性均会变差。同样的情况也出现在推迟喷油中, 由于混合不充分使得点火时刻混合气均匀度下降, 从而使发动机性能恶化。

关键词: 喷油开始时刻; 汽油缸内直喷; 喷雾; 燃烧; 排放

中图分类号: TK412

文献标志码: A

Start of Injection Impacts on Performance of a Direct-injection Spark-ignition Engine

HAN Wenyan^{1,2}, XU Sichuan¹, ZHOU Yuekang³, REN Jiankang³

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. SAIC Motor Technical Center, Shanghai 201804, China)

Abstract: A numerical simulation was carried out on cylinder flow, mixture formation and combustion process of a turbo-charged gasoline direct injection engine, and then on the basis of the test data about the break specific fuel consumption, emission and combustion, an analysis was made of the best time to start the injection on engine performance. The results show in the case of $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, the injection started at 400° crank angle obtains an optimal mixture formation, when it presents the best fuel economy and combustion stability with distribution, the higher turbulence kinetic energy around the spark plug at spark time and the shortest $10\%\sim 90\%$ burning duration as well as the lower HC emission. While the

best time to start the injection is retarded at 30° crank angle with $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. When the injection starts in advance, the wall film increases, and the decreased equivalence ratio and the lower turbulence kinetic energy around spark lead to a lower burning rate, so HC emissions, fuel economy and combustion stability may go bad. The same situation occurs in a delayed injection, the mixture uniformity worsens at spark time because of insufficient mix, consequently engine performance is deteriorated.

Key words: start of injection; gasoline direct injection; spray; combustion; emission

近年来,随着汽车保有量急剧增长,化石能源危机与环境污染问题日益严峻,发展高效率低排放的内燃机已是大势所趋。汽油机作为乘用车的主要动力源,已成为内燃机研究的重点之一。为了在尽量少牺牲汽车驾驶性的基础上实现燃油经济性的改善,越来越多的新技术如汽油缸内直喷、可变气门正时以及涡轮增压等受到人们的广泛关注,这些新技术的应用也使得汽油机性能得到显著改善^[1]。

缸内直喷汽油机在带来显著经济效益的同时,也面临着各种挑战。燃油湿壁问题便是直喷汽油机中普遍存在的问题之一^[2-3]。壁面燃油流入曲轴箱会稀释机油,影响零部件润滑,缩短发动机寿命,并且增加了非常规气体排放;燃油蒸发从壁面吸热,使得充量冷却作用减缓,充气效率改善的潜力被削弱;由于壁面燃油蒸发较慢,因此在排气过程中仍有部分燃油未参与燃烧而被排出,使发动机原排放中未燃 HC 排放增加,燃油经济性下降。而对于缸内直喷汽油机排放来说,燃油湿壁并不是唯一的影响因素,由于燃油直接喷入气缸,用于燃油雾化混合的时间非常有限,点火时刻缸内混合气的均匀度也对排放有着显著影响^[4]。

收稿日期: 2012-10-15

第一作者: 韩文艳(1981—),女,博士生,主要研究方向为动力机械及工程。E-mail: hwy0613@nuc.edu.cn

通讯作者: 许思传(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为动力机械及工程。E-mail: scxu@tongji.edu.cn

多项研究表明,缸内气流运动及喷雾的相互作用对燃油湿壁和点火时刻缸内混合气分布有显著影响,而这又主要取决于喷油开始时刻(start of injection, SOI)^[5-7]. 因此,本文针对某缸内直喷汽油机的混合气形成及燃烧过程进行了仿真与试验研究,分析了 SOI 对发动机缸内过程及性能的影响.

1 发动机参数及边界条件

准确的边界条件是保证缸内仿真精度的必要条件之一,下面对所研究发动机进行了一维热力学工作过程仿真并对其模型进行了标定,为缸内流动计算提供了边界条件.

1.1 发动机参数

所研究发动机为一涡轮增压缸内直喷汽油机,采用可变气门正时机构(VVT),早喷均匀混合模式,喷油器靠近火花塞居中布置,发动机具体参数列于表 1.

表 1 发动机参数

Tab.1 Engine specifications

发动机参数	参数值
发动机排量/L	2.0
缸径/mm	88
行程/mm	82
额定功率/kW	170(5 000 r·min ⁻¹)
最大扭矩/(N·m)	360(2 000 r·min ⁻¹)
燃烧室形状	屋脊型
发动机型式	直列四缸、增压中冷、每缸四气门

1.2 模型标定及压力边界

使用 AMESim 软件搭建整机热力学仿真模型并进行了模拟计算,计算选取全负荷额定功率转速为 5 000 r·min⁻¹ 工况,通过实测缸压曲线对其数值模型进行了标定,结果如图 1 所示. 由图 1 可知,计算结果与实验值吻合度较高. 因此,该模型计算结果可靠,可为缸内计算提供边界条件. 缸内瞬态 CFD

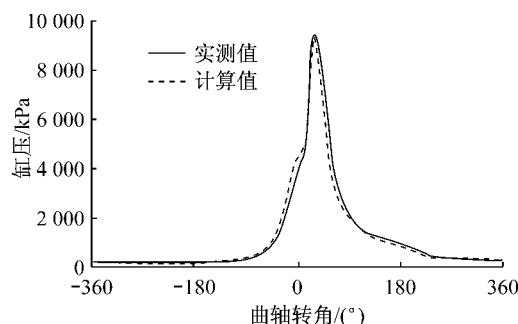


图 1 实验与计算缸压对比

Fig.1 Cylinder pressure of calculation and test

(computational fluid dynamics)计算以进气道入口、排气道出口压力作为边界条件,其值如图 2 所示.

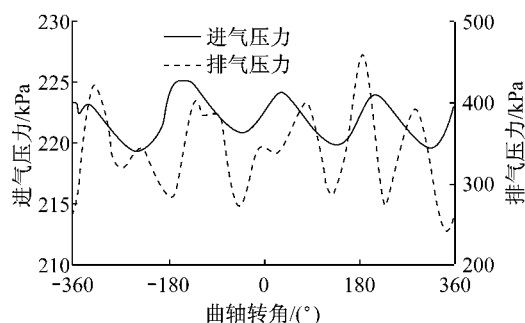


图 2 进、排气边界压力

Fig.2 Pressure at inlet and outlet boundary

2 喷雾模型标定

为研究 GDI(gasoline direct injection)发动机的喷雾发展过程,首先在 FIRE 软件中模拟了定容喷雾并对喷雾模型进行了定容弹实验标定. 图 3 为喷雾模拟所用网格,采用中心密外围疏的网格布置. 所研究喷油器为 6 孔非均匀分布喷油器,其油束分布如图 4 所示,喷孔直径均为 0.2 mm,单注油束锥角为 18°. 数值模拟中喷雾模型采用离散液滴模型,包含喷雾粒子的蒸发、破碎、交互碰撞聚合、湍流扩散等子模型. 计算中选用 K-Epsilon 湍流模型,标准壁面方程,破碎模型选用 HuhGosman,油滴间相互作用使用 Nordin 模型(该模型具有较低的网格密度敏感性).

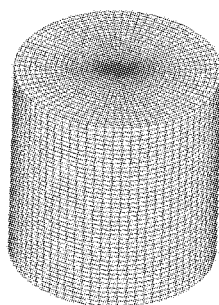


图 3 喷雾模拟所用网格
Fig.3 Constant volume mesh
for spray simulation

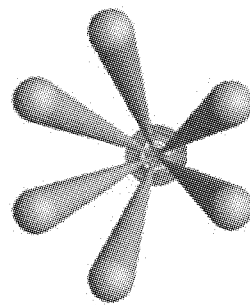


图 4 油束空间分布
Fig.4 Fuel beam
distribution

图 5 对喷油压力为 10 MPa,定容室压力为 0.1 MPa,燃油温度为 20 °C 的喷雾计算结果与定容弹试验结果进行了对比. 可以看出,不同时刻的喷雾贯穿距和喷雾形状模拟结果与实验吻合较好,说明喷雾模型能够较准确地模拟该喷油器喷雾特性,因此选用该喷油器参数及相应喷雾模型对缸内混合气形成

进行了模拟分析。

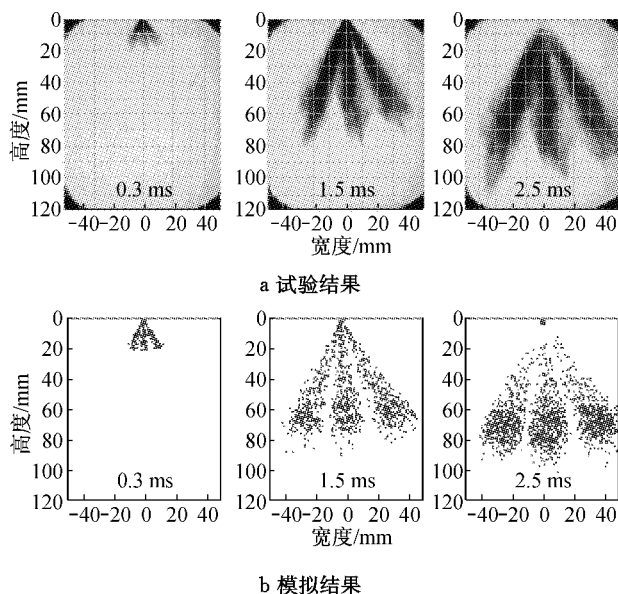


图5 喷雾模拟与定容弹实验结果对比

Fig.5 Comparison between simulation and spray test

3 缸内过程 CFD 分析

对于均匀混合缸内直喷汽油机来说,理想状况下要求在缸内形成均匀混合气,而在火花塞附近一定区域内形成稍浓的混合气,以利于火核的形成。同时,应尽量减少燃油湿壁以减少 HC 排放。尤其是在高速高负荷工况,由于喷油时间长,喷油量大,而用于雾化的时间较短,为了保证燃油的充分雾化混合,就需要对喷油开始时刻进行合理调整,并辅之以适当的气流运动以促进混合气的形成。另外,详细了解空燃混合过程对更好的燃烧过程控制也是非常重要的。因此本文对 $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 全负荷工况的缸内过程进行了数值模拟,喷油压力为 15 MPa,喷油持续时间 4.97 ms,空燃比 11.72,点火时刻为 713° 曲轴转角。计算中点火模型采用 Spherical Model 进行模拟,燃烧过程采用 Extended Coherent Flame Model 进行模拟,分析了喷油开始时刻对混合气形成及燃烧过程的影响。计算以第一缸压缩上止点为 0° 曲轴转角,所研究发动机为单次早喷均匀混合模式,计算方案设置如表 2 所示。

表2 计算方案

Tab.2 Calculation cases

方案编号	1	2	3	4	5
喷油开始时刻/ $^\circ$	380	400	420	440	460

注:表中单位“ $^\circ$ ”为喷油开始时刻对应的曲轴转角度数。下文为表述方便,用“SOI 380”代表方案 1,即喷油开始时刻为 380° 曲轴转角,其余 4 种方案依此类推。

3.1 气流运动分析

对于四气门屋脊型燃烧室的汽油发动机来说,滚流是缸内气流运动的主要方式。增强滚流可提高点火时刻火花塞周围的湍流强度和平均气流速度,促进混合气快速混合。滚流越强,燃烧速度越快且越稳定,有利于发动机性能改善。本文所研究发动机采用高滚流比气道,FEV 方法测得其 90% 最大气门升程时滚流比约为 1.6。在进气过程后期,缸内形成大尺度的逆向单滚流,并且在压缩过程中滚流得到加强,直至压缩后期破碎成小尺度湍流(图 6)。

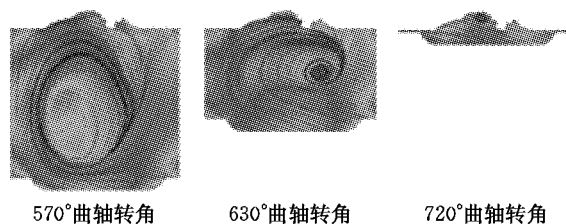


图6 缸内气流速度分布

Fig.6 Velocity distribution in cylinder

文献[8]等揭示了对于进气行程喷油的发动机来说,进口气流对喷雾的影响非常明显。由于进气过程中进气流体的动量不断变化,而喷雾与气流的相互作用又取决于 SOI,因此,首先对不同 SOI 下气流与喷雾的相互作用进行了分析。

图 7 所示为喷油开始时刻对缸内滚流比的影响,可以看出,SOI 380 喷雾所引起的气流运动阻碍了缸内旋转运动的发展,与纯气流运动相比,其缸内滚流比明显降低,这对混合气形成是不利的。而其他 4 种较晚喷油方案对缸内滚流比的影响并不显著,与纯气流运动相比,这 4 种方案在 $490^\circ\sim 630^\circ$ 曲轴转角期间的滚流比略有提高。但是,无论是提前喷油还是推后喷油,随着压缩后期滚流的耗散与破碎,所研究方案的滚流比最终与纯气流方案基本趋于一致。

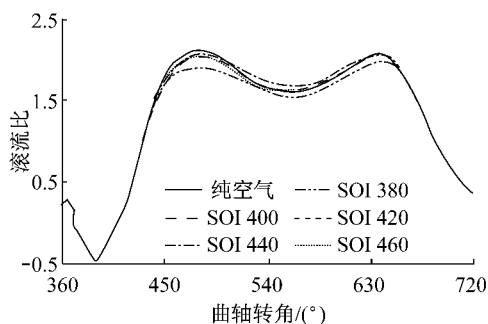


图7 SOI对滚流比的影响

Fig.7 Effects of SOI on the tumble ratio

图 8 为喷油开始时刻对点火时刻火花塞附近及

缸内平均湍动能(turbulence kinetic energy, TKE)的影响,图中所示为与纯气流运动相比,5种方案的湍动能变化百分比。虽然进气过程喷雾动量的输入使得缸内充量的湍流水平有所提高,但随着压缩过程的耗散,缸内平均湍动能变化趋势与滚流比相似,点火时刻其值基本趋于一致,与纯气流运动相差均在2.5%以内。而由于不同 SOI 的气流及喷雾发展过程并不相同,因此点火时刻火花塞附近湍动能差别比较明显,其中 SOI 380 变化较大,其余 4 种方案变化均在 5.0% 以内,且随着喷油推迟,其值逐渐增大。火花塞附近较高的湍动能有利于初期火核的快速传播,保证点火成功,而缸内较高湍动能可提高燃烧速率,改善发动机燃烧稳定性。

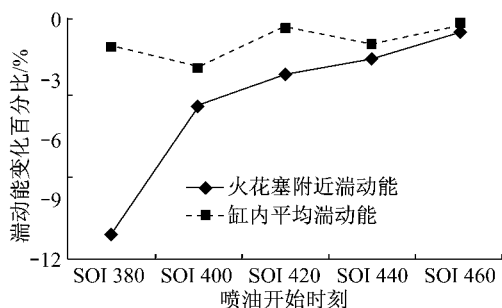


图 8 SOI 对点火时刻湍动能的影响

Fig.8 Effects of SOI on the TKE at spark time

3.2 混合气形成分析

均匀混合缸内直喷汽油机由于采用进气过程喷射,SOI 直接影响到燃油液滴在缸内的分布和混合气形成时间。喷油过早,活塞靠近气缸盖,燃油容易喷射到活塞顶上,在活塞头部形成油膜,而喷油开始时刻较弱的缸内气流运动也不利于燃油的雾化混合;喷油过晚,在进气门关闭前燃油没有足够的时间蒸发,不能有效降低缸内充量的温度以提高充量系数,而且均匀的混合气浓度分布有利于提高燃烧效率并减少尾气排放^[4],不合理的浓度分布会导致燃烧不稳定、燃油经济性下降和排放恶化。

文献[9]用实验方法研究了缸内直喷汽油机燃油碰壁位置与未燃 HC 排放之间的关系,分析认为,壁面油膜是导致 HC 排放的主要原因之一,其中排气侧气缸壁湿壁时 HC 排放量最大,活塞顶面次之。而高滚流发动机与反滚流、涡/滚流发动机相比,燃油碰撞排气侧壁面的几率更高^[10],因此更需合理调整 SOI 以减少燃油碰壁量。

图 9 为缸内进气质量与点火时刻缸内温度与纯气流运动相比的变化量。由于所研究发动机为进气过程喷射,燃油蒸发使缸内温度降低,因此充量随

之增大。随着喷油推迟,进气过程燃油蒸发吸热量下降使得充气量增大的优势逐渐削弱。另外,由于推迟喷油使得燃油碰壁量减少,燃油蒸发更多从充量吸热而非壁面吸热,因此充量温度也会进一步降低。

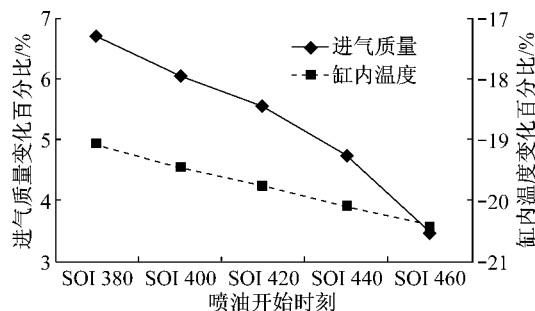


图 9 进气质量及点火时刻缸内温度

Fig.9 Intake mass and mean cylinder temperature

随着喷油推迟,燃油蒸发量逐渐增大,SOI 460 的燃油蒸发量比 SOI 380 增加约 1.7%。这主要是由于提前喷油使得燃油碰壁量增大(图 10),从而增加了壁面油膜形成的概率,而壁面油膜的蒸发比较困难,导致早喷燃油蒸发量较低。另外,燃油湿壁容易引起机油稀释及机油蒸发燃烧带来的非常规气体排放,因此应尽量推迟喷油以减少燃油碰壁。

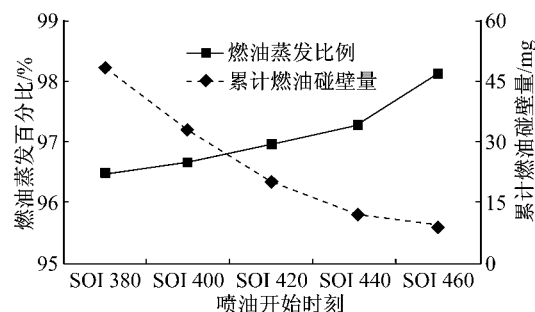


图 10 燃油蒸发比例与累计燃油碰壁量

Fig.10 Fuel evaporation proportion and cumulative impinged mass

图 11 为点火时刻缸内混合气当量比分布,分别取气缸中心纵截面和横截面进行分析,可以看出,SOI 380 的较浓混合气主要集中于气缸中心位置且混合气较均匀,随着喷油推迟,用于燃油混合的时间越来越短,其混合气均匀性也逐渐下降,且喷油开始时刻在 420°曲轴转角之后气缸壁面附近的较浓混合气逐渐增多,这势必会增大燃油蒸汽遇冷壁面后冷凝及火焰淬熄的可能,并且加大了壁面传热损失,这些对发动机排放及燃油经济性都非常不利。

3.3 燃烧过程分析

汽油机的燃烧过程受到混合气均匀度、当量比

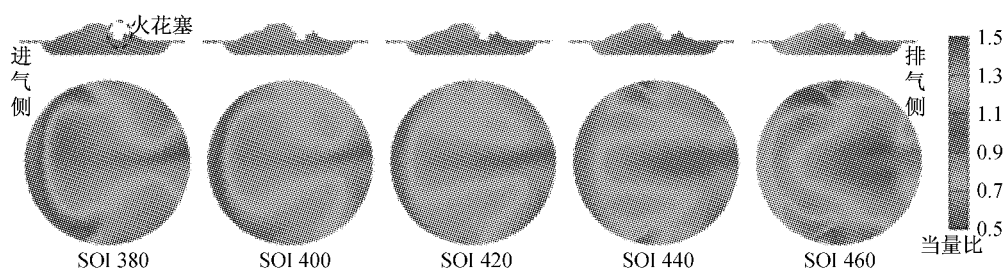


图11 点火时刻缸内混合气当量比分布

Fig.11 Mixture formation equivalence ratio distribution at spark time

以及湍流水平等多个因素的影响,由于不同喷油开始时刻使得缸内充量运动发生改变,其流动结构及混合气分布也不尽相同,这必然会影响到燃烧过程. 图12为不同喷油开始时刻的燃烧放热率对比,在燃烧过程前期,SOI 380的放热率明显偏低,其余4种方案比较接近,主要原因之一是点火时刻火花塞附近较低的湍动能使得初始火核扩散较慢. 当燃烧进行到 740° 曲轴转角以后,SOI 460的放热率逐渐下降且低于其余4种方案,这主要是由于混合气分布不均所致. 由图13可以看出,由于燃烧过程不同使得缸内最高爆发压力也有所差别,其中SOI 400最高,约比SOI 460高出2.5%. 由图12也可看出SOI 400在燃烧的前期和中期均保持较高的燃烧放热率.

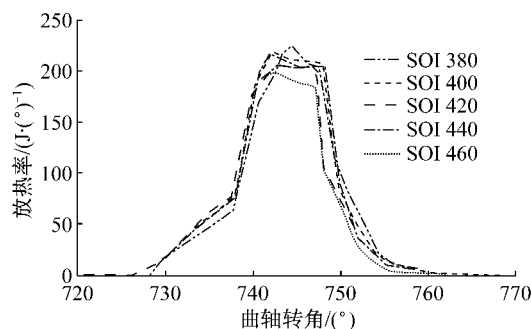


图12 燃烧放热率

Fig.12 Heat release rate

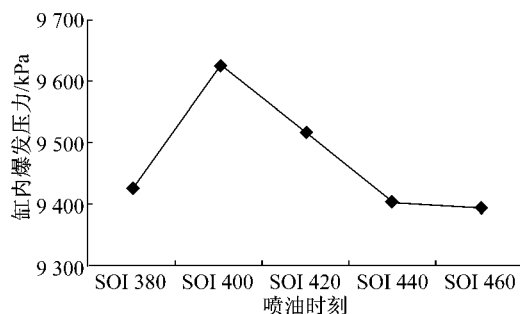


图13 缸内爆发压力

Fig.13 Peak fire pressure in cylinder

4 实验结果分析

在发动机台架上进行试验研究. 待发动机运转稳定后,调整喷油开始时刻,对低速($2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)和高速($5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)全负荷工况的燃油经济性、燃烧和排放进行分析,结果如图14~16所示.

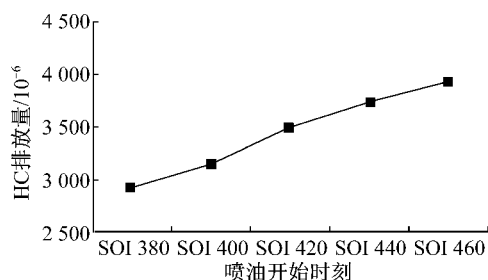
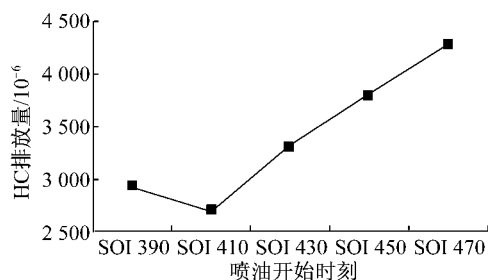
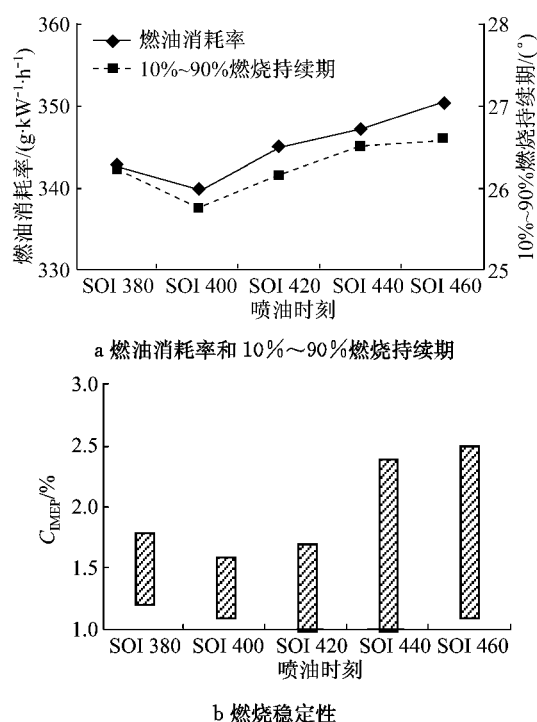
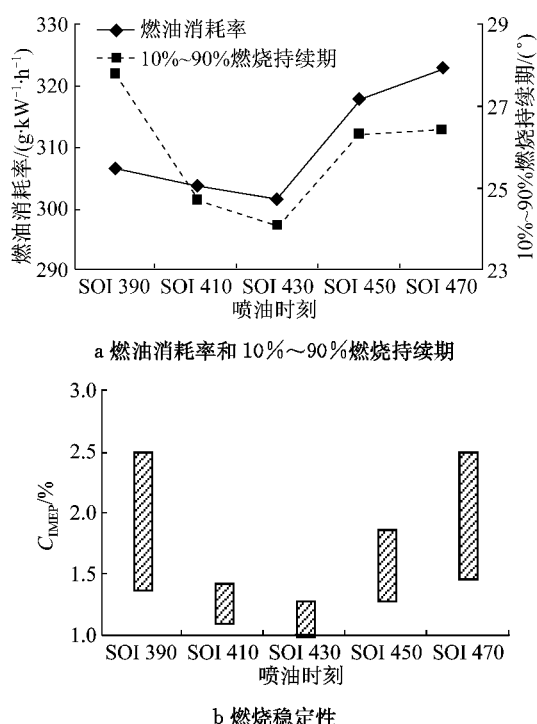
a $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况b $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况

图14 HC排放量

Fig.14 HC emissions

由图14可以看出, $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的HC排放随着喷油推迟逐渐增大,这主要是由于推迟喷油使得缸内混合不均匀,过浓或过稀区域的燃烧不充分使得HC排放增加. 而对于SOI 380来说,虽然其燃油碰壁量较大,但从蒸发量来看其壁面油膜量与其他方案相差不大,同时其较好的混合均匀性及壁面附近浓混合气较少使其燃烧更充分且壁面淬熄较少,因而HC排放较少. 与 $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 相比, $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况由于缸内气流运动相对较弱,喷

图 15 5 000 r·min⁻¹ 实验结果Fig. 15 5 000 r·min⁻¹ test results图 16 2 000 r·min⁻¹ 实验结果Fig. 16 2 000 r·min⁻¹ test results

油过早会使壁面油膜增加且不易蒸发,并且混合过程也较慢,因此在 SOI 390 时 HC 排放高于 SOI 410。

由图 15a 可以看出,5 000 r·min⁻¹ 的 10%~90% 燃烧持续期与燃油消耗率具有相同的趋势,喷

油开始时刻为 400° 曲轴转角时燃烧最快且油耗也最低,提前和推迟喷油都会导致燃油消耗率的增加,SOI 460 比 SOI 400 的 10%~90% 燃烧持续期增大了约 1° 曲轴转角而燃油消耗率增加了 3.15%。这与燃烧过程分析的结果(图 13 和图 14)也非常吻合。图 16a 显示 2 000 r·min⁻¹ 的趋势与 5 000 r·min⁻¹ 一致,只是其最佳喷油开始时刻推迟了 30° 曲轴转角。主要原因有两个:一是由于低速时活塞运动较慢增加了燃油碰壁的可能,而缸内气流运动较弱又不利于燃油雾化和油膜蒸发;二是由于低速时喷油持续时间相对较短,因此用于雾化的时间较长,此时可适当推迟喷油以减少壁面沾湿。

通常对燃烧稳定性的分析采用指示平均有效压力循环变动系数(C_{IMEP})来表示。图 15b 和 16b 为实验所测 300 个循环下 C_{IMEP} 的变化范围,可以看出,5 000 r·min⁻¹ 时 SOI 400 和 2 000 r·min⁻¹ 时 SOI 430 的燃烧稳定性最好,其最大 C_{IMEP} 分别为 1.6% 和 1.7%,提前或推迟喷油都会使燃烧稳定性下降,这与燃油充分雾化混合密不可分。提前喷油,燃烧稳定性变差,主要原因可能是燃油湿壁量增大,燃油蒸发较慢所致;推迟喷油,混合气形成时间不够充分,缸内混合气分布不均,因此其燃烧稳定性也会下降。

5 结论

本文通过对缸内混合气形成、燃烧、燃油消耗率及排放等的分析研究,阐述了喷油开始时刻对均匀混合缸内直喷汽油机性能的影响。数值模拟与实验结果表明:

(1) 随着喷油开始时刻的变化,喷雾与气流运动之间的相互作用变化显著。其中,喷油开始时刻对滚流比的影响较小,对点火时刻火花塞附近湍动能的影响尤为显著。SOI 380 与纯气流方案相比点火时刻火花塞附近的湍动能降低了约 11%,随着喷油推迟,其值逐渐增大。点火时刻火花塞附近较高的湍动能有利于初始火核的快速传播。

(2) 喷油开始时刻对混合气形成及燃烧的影响也非常显著。SOI 460 与 SOI 380 相比燃油碰壁量降低了约 81%,而燃油湿壁量的增大加大了机油稀释的可能,同时也不利于燃油经济性和燃烧稳定性的改善;SOI 400 燃烧速率最快且油耗最低,随着喷油推迟,混合气均匀性逐渐变差,由于燃烧不充分使得油耗增大且燃烧稳定性恶化。

(下转第 582 页)