

进气门相位和进气门升程对缸内流动和物质组分分布耦合控制作用的仿真研究

A Study on the Effect of Intake Valve Timing and Lift on In-cylinder Flow and RGF Distribution

申孟芹 谢辉

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室)

摘要: 利用全可变气门机构实现基于内部残余废气的 HCCI 燃烧, 通过调节进排气门的升程和相位, 可以改变换气过程, 进而影响缸内流场分布, 最终造成压缩后期残余废气及温度分布的差异。本研究根据汽油 HCCI 发动机上的全可变气门机构, 在固定排气门升程和相位的前提下, 选取了 4 组不同的进气门升程/相位组合, 并应用 STAR-CD 软件对气体流动进行计算, 研究进气门升程和相位对缸内滚流运动及物质组分分布的耦合控制作用。CFD 仿真结果显示: 不同进气门升程和相位耦合可以获得相似的缸内状态。比较而言, 进气门开启定时对缸内的物质组分分布变化的影响较明显。进气过程中滚流比峰值出现的时刻与进气门升程、进气门关闭时刻无关, 只跟进气门开启时刻相关——开启时刻越早峰值出现时刻越早。随着进气门开启时刻的推后进气门升程对缸内流场及物质分布的影响减弱, 升程变化范围较小时, 进气门开启时刻的影响占主要地位。大的进气门升程下, 进气过程中排气门侧缸内滚流的搅动范围增大, 使接近压缩终了时残余废气浓区中心向进气门侧移动。

关键词: STAR-CD, 滚流比, 废气浓区, 高温区

Abstract: Variable valve system can be employed to flexibly adjust the valve lifts and timings and trap proper amount of in-cylinder residuals, which is an effective way to promote gas mixing and auto-ignition of gasoline and control the following HCCI combustion process. In this research, simulation was carried out based on four intake valve lift/timing combinations selected at a fixed exhaust valve lift/timing out of the operating range of a 4VVAS (4 Variable Valve System) equipped on a single-cylinder experimental HCCI gasoline engine, and Star-CD is utilized to investigate the flows within the ports as well as in the cylinder. Results reveal that different intake valve timings combining with different intake valve lifts lead to similar distribution of RGF and temperature in the cylinder. IVO has a great effect on the inhomogeneity of residuals. The timing of maximum tumble ratio value during gas mixing has no relationship with IVL and IVC and only appears earlier when IVO gets earlier. As IVO gets later, the effect of IVL on the in-cylinder flow and distribution of RGF gets weaker. The greater IVL with higher range of flow under exhaust valve results in high-RGF region moving to the direction of intake valve.

Keywords: STAR-CD, tumble ratio, high-RGF region, high-temperature region

1 引言

HCCI 汽油机燃烧过程受缸内混合气热物性和流动特性的影响,可变气门机构能够通过调节气门运动特性来控制进排气过程。排气门参数决定了缸内残余废气量的多少以及进气门开启时刻的缸内压力,影响再循环的缸内混合气热物性以及进气过程。不同的进气门升程以及进气门定时的组合可以进一步影响换气过程和进气过程中的流动特性,进而影响新鲜充量与缸内残余废气的混和过程,影响和控制汽油机 HCCI 燃烧。英国 Brunel 大学的 Hua Zhao、Li Cao 等人^[1]应用 KIVA 软件针对若干组不同的进气门相位下 HCCI 混合气形成以及燃烧的影响进行研究表明进气门相位对缸内混合速度,残余废气率和温度均匀性存在影响。作者课题组的前期工作也显示,改变进气门的开启定时和升程,会对缸内进气过程流动,压缩终了残余废气及温度的分布造成一定的影响^[2],且这种不均匀性分布会对 HCCI 自燃及燃烧过程产生影响^[3]。

利用汽油机全可变 4V 机构上,固定排气门参数,固定进气门最大升程时刻 IVP 调节进气门升程 VVL,以及同时调节进气门相位 VVT 和进气门升程 VVL 两种方式皆可调节进气过程。本研究采用 STAR-CD 软件对进气以及压缩冲程中气道以及缸内的流场进行模拟,在固定排气门控制参数的前提下,选取进气门升程和相位不同组合,主要关注不同进气门升程耦合不同进气门开启相位,得到相似缸内流场的变化及残余废气率等,初步探索进气门升程和相位的耦合控制的规律。

2 计算模型与条件

2.1 几何模型

表 1 发动机模型基本参数

缸径(mm)	冲程(mm)	压缩比	转速(r/min)	Lambda	进气压力	节气门开度
90	87	10.23	2000	1	自然吸气	WOT

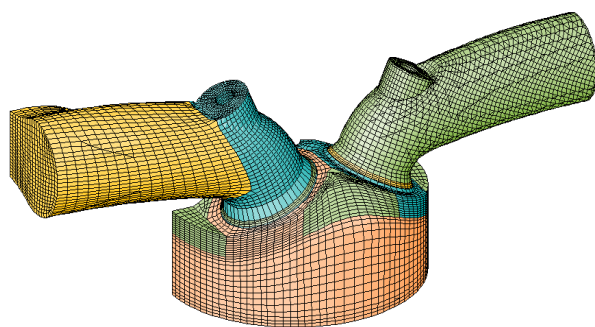


图 1 发动机网格

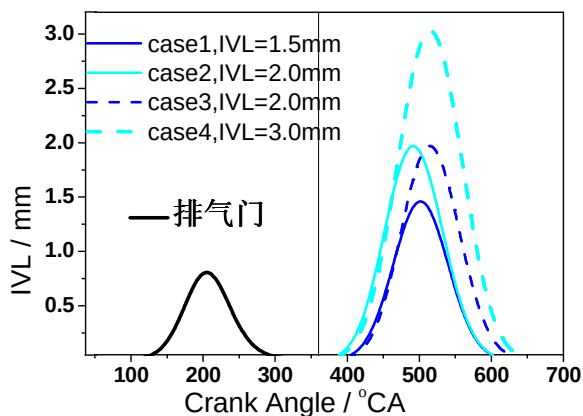


图 2 配气相位

本研究的计算对象以天津大学开发的 HCCI/SI 双模式汽油机原理性样机为原型。仿真中所使用的发动机为蓬顶/四气门汽油发动机,计算网格来源于 ES-ICE 工具包,最大网格数大约 78000,计算

区域分为汽缸体进气道和排气道等三部分，可以反映进气前回流和后回流的详细情况^[2]。汽缸体、气道形状以及发动机部分参数如图 1 和表 1 所示。实际用到 4 组型线如图 2 所示。IVO 和 EVC 分别表示进气门开启时和排气门关闭时所对应的曲轴转角（相对于排气上止点），IVL 和 EVL 分别表示进气门和排气门的最大升程。其中，一组算例中固定 IVP，逐渐增大 IVL；另一组固定 IVC，逐渐增大 IVL，两组算例中对应相同的进气门升程下的进气持续期是相同的。气门控制参数见表 2。

表 2 配气参数

case	排气门相位 (EVC)	排气门升程 (EVL)	进气门相位 (IVO)	进气门升程 (IVL)
1	69°CA BTDC	0.8mm	48°CA ATDC	1.5mm
2			30°CA ATDC	2.0mm
3			48°CA ATDC	2.0mm
4			30°CA ATDC	3.0mm

2.2 数学模型

计算采用 STAR-CD，对进排气过程进行了简化计算，认为缸内气体流动是三维可压缩的粘性湍流运动，采用瞬态计算，开始于缸内最大压力出现时刻，截止于压缩上止点。根据参考文献^[4]，湍流模型采用了 k- ϵ /High Reynolds Number 模型；密度计算采用理想气体状态方程；比热计算采用多项式差值方法；整个计算过程中没有引入喷油以及燃烧模型。

2.3 初始、边界条件

气缸、进气道、排气道三部分的初始温度压力来源于基于 GT 的一维仿真计算结果，并对气体成分进行了简化：缸内和排气道内为均匀分布的残余废气，进气道内均匀分布着过量空气系数 $\lambda=1$ 的汽油-空气混合物。缸壁、气道壁、活塞顶部、缸头均为恒温边界，温度分别为 500K、370K、550K，不考虑壁面辐射；进、排气道截面为压力边界^[4]，进气道入口假设有 $\lambda=1$ 的混合气流入，排气道出口假设有均匀的残余废气。

3 计算结果及分析

3.1 缸内新鲜充量及残余废气率变化

从下图可以看到，case1 与 case3 的进气量以及缸内残余废气率近似，而调节进气门升程和相位后可以得到 case2 和 case4 的进气量，缸内残余废气率近似，即不同进气门升程和相位耦合可以获得相似的缸内总体参数。本文的目的主要是以以上四个 case 为对象，初步研究进气门升程和进气门相位耦合的控制作用。

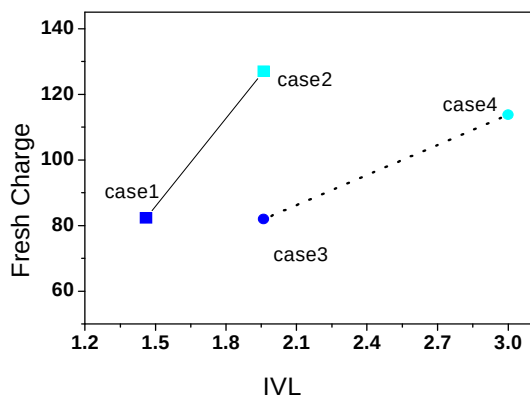


图3 不同配气相位下缸内新鲜充量变化

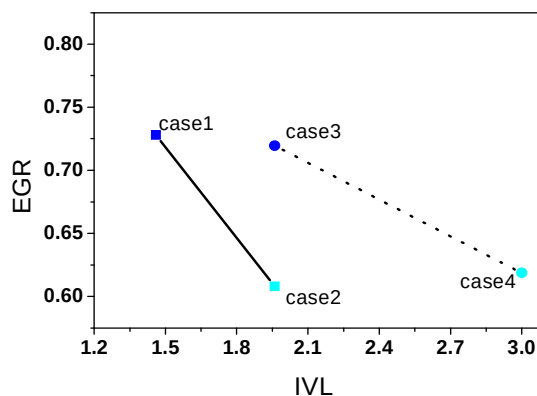


图4 不同配气相位下缸内残余废气率变化

3.2 缸内流场总体参数变化

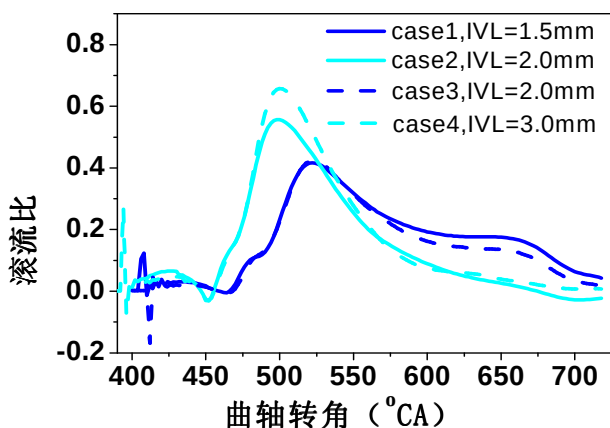


图5 缸内滚流比变化规律

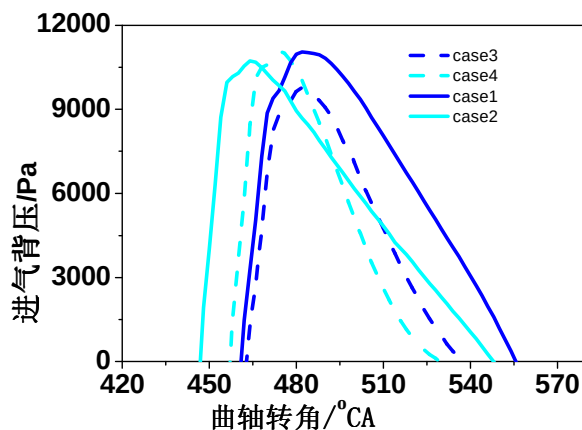


图6 进气被压变化规律

如图5所示, case2和case4, case1和case3缸内残余废气量和进气量近似, case1和case3缸内滚流比^[5]变化规律相似。但是相比对比 case2和case3, 进气门升程相同时, 进气门开启时刻推迟, 进气过程中滚流比峰值出现时刻推迟且滚流比峰值减小。进气门开启时刻相同时, case2和case4进气过程中的滚流比峰值出现的时刻近似, 但明显 case4峰值高于 case2: 进气门升程增大, 峰值增大; 进一步推迟进气门开启时刻, 对比 case1和case3, 小进气门升程下的 case1的滚流比峰值稍大。即进气门开启时刻不同时, 进气门升程对滚流比变化的作用有所不同。

进气门参数调整过程中, 基于 IVC 不变的方式中: 从 case1 到 case2, 升程增大 0.5mm, 进气门

开启时刻提前 18CA，滚流比峰值出现时刻提前 24CA，峰值增大 33.7%；而基于 IVP 不变的方式中：从 case3 到 case4，进气门升程增大 1mm，进气门开启时刻也提前 18CA，结果滚流比峰值出现时刻提前 24CA，但峰值增大 55.34%。在此种进气门调节方式下，即便进气门相位改变相同，进气门升程需要调整的范围更大才能获得与基于 IVC 的调整方式相同的缸内残余废气率及进气量。

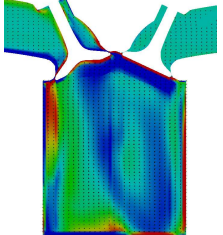
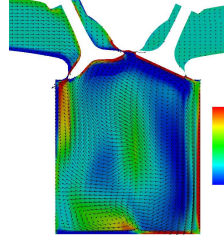
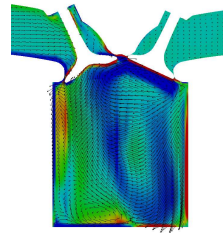
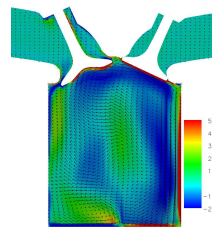
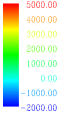
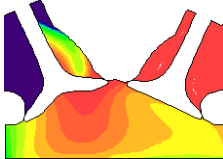
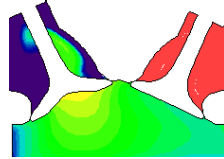
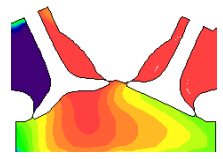
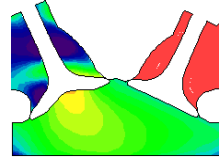
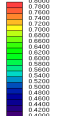
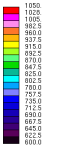
在图 5 中，对比 case2 和 case3 进气门开启时刻推后，滚流比峰值减小且出现时刻推后。对比 case1 和 case3，进气门开启时刻相同时，进气门升程增大，滚流比峰值稍稍降低；随着进气门开启时刻提前，对比 case2 和 case4，进气门升程增大，滚流比峰值反而增大。相比较进气门相位的影响占主要地位，故 case1 和 case2 相比，case3 和 case4 相比，虽然进气升程增大，但进气门开启时刻提前，因而大进气门升程下的 case2，case4 的滚流比峰值反而变大。

综上所述，相比较而言，进气门相位对缸内流场变化的影响比进气门升程的影响大，故基于 IVC 不变的进气门调节方式可以在更小范围内调节进气门升程改变缸内流动及物质组分分布情况。进气过程中滚流比峰值出现的时刻与进气门升程、进气门关闭时刻无关，只跟进气门开启时刻相关——开启时刻越早峰值出现时刻越早；而滚流比峰值大小受升程以及进气门开启时刻的耦合控制：进气门开启时刻较早时，进气门升程增大，滚流比峰值增大；随着进气门开启时刻的退后，滚流比峰值随进气门升程增大反而减小。进气门开启时刻推后，进气门升程的影响减弱，升程变化范围较小时，进气门开启时刻的影响占主要地位。

在图 6 中，从下图不同算例下进气背压的变化可以看出，对比 case2 和 case3，相同进气门升程下，推迟进气门开启时刻，实际进气持续期变短，进气背压也减小，缸内滚流比强度减弱；对比 case2 和 case4，在此相同的进气门开启时刻下，增大进气门升程，实际开始进气时间推后，进气背压最大值增大，进气过程剧烈，滚流比增大；而对比 case1 和 case3，升程增大反而进气背压最大值减小，主要是因为这组算例中进气门开启时刻推后。

3.3 缸内滚流对缸内废气浓区及高温区分布的影响

表 3 是不同进气参数下，进气下至点时缸内流场和压缩后期温度及残余废气分布。如图所示 case1 和 case3，case2 和 case4 缸内流场分布相似，最终缸内温度及物质组分分布也相似。Case2 与 case3 相比，推迟进气门开启时刻，进气下至点时刻缸内滚流的搅动范围减小，压缩后期残余废气浓区分布面积较大；而升程增大，排气门侧缸内滚流的搅动范围增大，浓区中心向进气门侧移动。相比较而言高温区的变化不是很明显。

	Case1	Case2	Case3	Case4	
流场变化 (涡度场 [6])					 5000.00 4000.00 3000.00 2000.00 1000.00 0.00 -1000.00 -2000.00
残余 废气分布					 0.80000 0.75000 0.70000 0.65000 0.60000 0.55000 0.50000 0.45000 0.40000 0.35000 0.30000 0.25000 0.20000 0.15000 0.10000 0.05000 0.00000
温度分布					 1050 1020 1000 980 960 940 920 900 880 860 840 820 800 780 760 740 720 700 680 660 640 620 600

废气浓区定义：某一曲轴转角时刻下网格按残余废气率降序排列，取高残余废气率网格体积之和占网格总体积 10%时对应的部分网格，定义为废气浓区。

高温区定义：某一曲轴转角时刻下网格按温度降序排列，高温网格体积之和占网格总体积 10% 时对应的部分网格，定义为高温区。

废气浓区几何中心 $P_C (x,y,z)$:

$$x_{c-top5} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad y_{c-top5} = \frac{\sum y_i}{n}, \quad z_{c-top5} = \frac{\sum z_i}{n} \quad (1)$$

高温区几何中心 $P_T(x,y,z)$:

$$x'_{t-top5} = \frac{\sum x'_i}{n'}, \quad y'_{t-top5} = \frac{\sum y'_i}{n'}, \quad z'_{t-top5} = \frac{\sum z'_i}{n'} \quad (2)$$

其中, x_i , y_i , z_i 为废气浓区中第 i 个网格单元的坐标值, n 为废气浓区网格的数目, x'_i , y'_i , z'_i 为高温区中第 i 个网格单元的坐标值, n 为高温区网格的数目。图 7 是四组配气相位下, 40°CA BTDC 时刻缸内残余废气浓区和高温区分布位置的比较。

虽然 case1 和 case3, case2 和 case4 的缸内流场及压缩终了缸内温度和物质组分分布相似, 但从图 7 中可以看到有一些不同。增大进气门升程时, 残余废气浓区及局部高温区更偏向燃烧室顶部, 同时也向进气门侧移动, 主要是因为排气门侧缸内滚流的搅动范围增大导致。开启时刻推迟, 中心向中间移动, 但是增大进气门升程会使残余废气浓区及高温区往进气门侧移动, 同时移向燃烧室顶部。对比残余废气浓区和高温区的中心位置可以看到, 在压缩冲程后期, 壁面的传热作用使缸内高温区分布和残余废气的分布的关系减弱。配气相位的变化对缸内高温区位置的影响不明显。

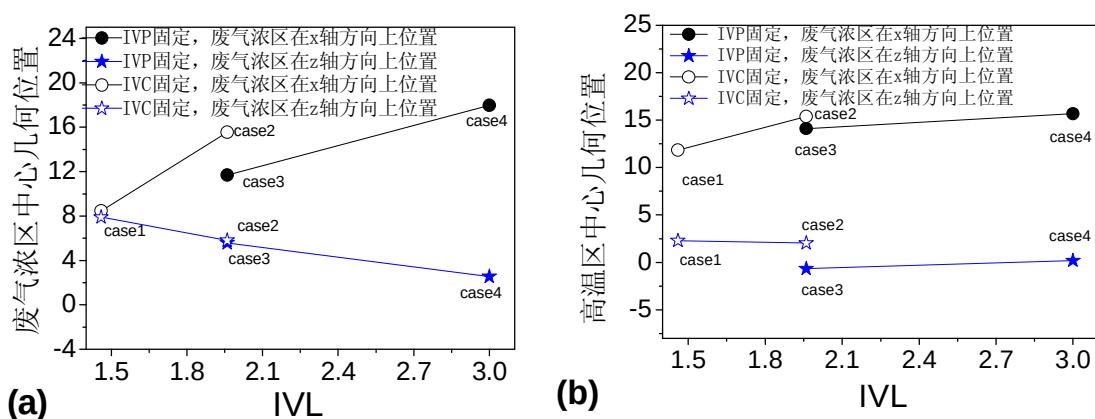


图 7 40°CA BTDC 时刻废气浓区及高温区中心位置的变化

4 结论

应用 Star-CD 对汽油机小气门升程及负气门重叠角情况下的进气以及压缩冲程中缸内流场进行模拟。初步研究了固定进气门最大升程时刻, 改变进气门开启时刻以及固定进气门开启时刻改变进气门升程两种进气门控制模式对缸内流动和残余废气分布的影响。结果表明, 可以通过改变不同的进气门控制参数来获得期望的缸内温度和残余废气分布; 受不同进气门相位和进气门升程耦合控制的原因, 两种进气门控制模式对缸内流场的调控能力大小不同。

(1) 固定排气门参数, 不同的气门升程耦合不同的进气相位可以获得相似的缸内进气量, 残余废气率以及缸内流动变化过程。

(2) 在两种气门的调节方式下, 在进气门参数调整过程中, 基于 IVC 不变的方式可以更快的调节缸内流动和物质组分分布情况。

(3) 滚流比峰值出现的时刻与进气门升程、进气门关闭时刻无关, 只跟进气门开启时刻相关——开启时刻越早峰值出现时刻越早; 而峰值大小受进气门升程以及进气门开启时刻的耦合控制: 进气门开启时刻推迟, 滚流比峰值随进气门升程的增大而减小。

(4) 不同进气相位下, 调整进气门升程, 可以获得相同的缸内流动分布, 大的进气门升程下, 由于进气过程中排气门侧缸内滚流的搅动范围增大导致残余废气浓区及高温区往进气门侧移动, 同时移向燃烧室顶部。

5 参考文献

- [1] Li Cao, Hua Zhao, Xi Jiang and Navin Kalia, Brunel University, Effects of Intake Valve Timing on Premixed Gasoline Engine with CAI Combustion, SAE2004-01-2953
- [2] Zhihua Li, Hui Xie and Hua Zhao, Studies of the Control of In-cylinder Inhomogeneities in a 4VVS Gasoline Engine ,SAE paer, 2008-01-0052
- [3] Nan Li, Hui Xie¹, Mengqin Shen, Hua Zhao, CFD study on effects of thermal and residual gas inhomogeneous distribution on auto-ignition of gasoline HCCI combustion, SAE Paper 2010-01-0160
- [4] The es-ice User Manual-Version1.0, adapco, New York, June 5, 2002
- [5] 王天友 刘大明 张学恩 张东明 刘书亮 赵华, 可变气门升程下汽油机缸内气体流动特性的研究,《内燃机学报》, 2008 年 26 卷第 5 期
- [6] 吴望一, 流体力学(上册), 北京: 北京大学出版社, 1998