

汽油 HCCI 发动机进气门控制参数对缸内残余废气分布不均匀性影响的仿真研究

A Simulation Study of the Influence of Intake Valve Control Parameters on the Inhomogeneity of In-cylinder Residuals

李之华 谢辉 赵华

天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室

摘要：通过全可变气门机构灵活改变气门升程和相位来捕捉适量的缸内残余废气，是促进汽油 HCCI 自燃，控制 HCCI 燃烧过程的有效方法之一。本研究根据汽油 HCCI 单缸试验机上的全可变气门机构的升程、相位调节范围，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。同时还引入了残余废气的空间分布率和不均匀度的概念，分析了进气门的相位和升程对缸内残余废气分布不均匀性的影响。结果表明，改变进气门的开启定时和升程，会对缸内残余废气的分布造成一定的影响。比较而言，进气门开启定时对缸内的残余废气不均匀度的影响比进气门开启升程的影响要大。进气门开启时刻越早，则上止点附近残余废气率不均匀度越小。

关键词：残余废气空间分布率，残余废气不均匀度，全可变气门机构，IVO，IVL，Star-CD

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 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. Also, the spatial proportion and inhomogeneity of in-cylinder RGF (Residual Gas Fraction) were introduced, on which the influences of intake valve lift and timing were analyzed. Results show that, the distribution of in-cylinder residuals varies with IVO (Intake Valve Opening) and IVL (Intake Valve Lift). IVO has a greater effect on the inhomogeneity of residuals than IVL. Later IVO leads to lower RGF inhomogeneity around TDC.

Key words: VVT, VVL, RGF spatial proportion, RGF inhomogeneity, Star-CD

1. 引言

均质充量压燃着火（HCCI）是一种有效降低 NOx 排放，提高燃油经济性的燃烧模式，但是也面临着着火时刻和燃烧放热率难以控制的问题。在众多实现汽油机 HCCI 的方法中，采用全可变气门机构，通过改变气门升程和相位获取适量缸内残余废气以控制自燃以及燃烧过程的方式已经在试验中得到验证。发动机三维仿真同时也成为解释全可变气门机构的控制原理的最有效的方法之一。英国 Brunel 大学的赵华、曹力等人^[1]曾经应用 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，发现进气门相位对缸内残余废气率和温度均匀性存在影响。德国 Karlsruhe 大学的研究^[2]则发现残余废气与新鲜充量在燃烧开始之前近乎均匀混合，并认为形成的局部高温区是着火的可能发生区域。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，引入了残余废气的空间分布率和不均匀度概念，在固定排气门控制参数的前提下，通过选取进气门升程和相位不同组合，研究了进气门升程和相位对进气混合过程中缸内残余废气分布情况的影响。

2. 模型建立

本研究以天津大学开发的 HCCI/SI 双模式汽油机原理性样机为原型。该发动机采用了一套全可变气门机构，可以独立连续调节进气门升程、相位和排气门的升程和相位。通过进排气门升程和相位的调节，管理缸内的残余废气，实现 HCCI 燃烧。

2. 1 几何模型

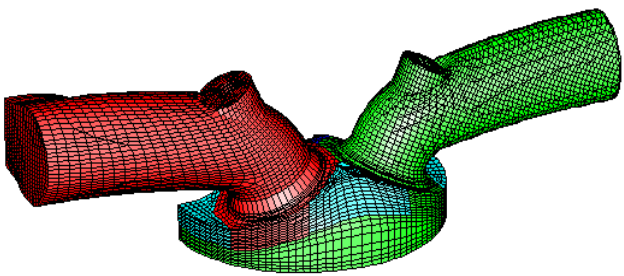


图 1 发动机网格

表 1 发动机模型基本参数

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

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，可计算区域分为三部分，包括半缸，以及进、排气道各一个，可以反映进气前回流和后回流的详细情况。汽缸体、气道形状以及发动机部分参数如图 1 和表 1 所示。所采用的气门型线取自汽油 HCCI 单缸试验机上的全可变气门机构的变化范围，气门控制参数见表 2。其中，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。

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	80°CA BTDC	1.5mm	40°CA ATDC	1.5mm
2			40°CA ATDC	2.0mm
3			80°CA ATDC	1.5mm
4			80°CA ATDC	2.0mm

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，认为缸内气体流动时三维可压缩的粘性湍流运动，采用瞬态计算，开始于排气门开启时刻前 5CA，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

发动机三部分的初始温度压力来源于 simulink 调用 GT 的计算结果，并对气体成分进行了充分简化：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 370K、395K、395K，进、排气道口温度分别稍低于进、排气道内初始温度，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 残余废气的空间分布特征以及不均匀度概念的提出

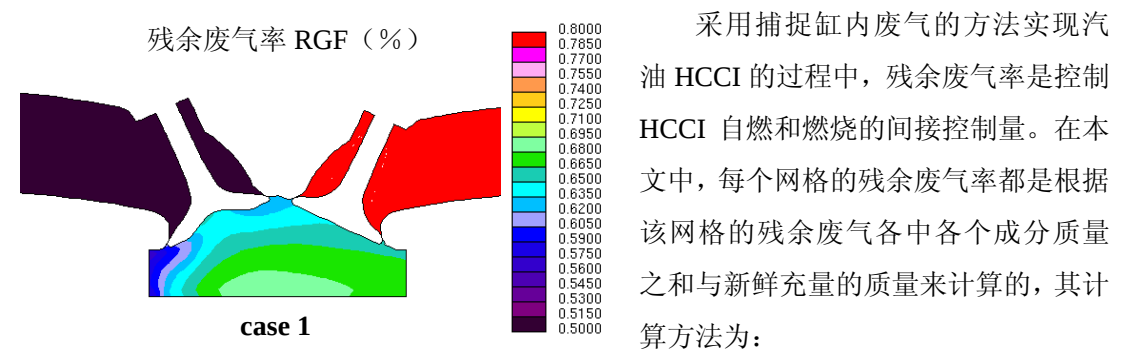


图 2 缸内残余废气分层形态

$$RGF = \frac{m_{residual}}{m_{residual} + m_{air} + m_{fuel}} \times 100\%$$

图 2 所示为 case 1 中压缩上止点附近缸内残余废气分层形态,可见此时残余废气与新鲜充量并没有完全均匀混合,而是在活塞顶部的中心处存在呈扁片状残余废气浓区,由此区域向外残余废气率的大小逐层递减。

为了量化某一个曲轴转角下缸内残余废气的分布情况,采用类似概率分布曲线的方法得到残余废气的空间分布率,描述缸内残余废气的分布特征,其计算方法为:将缸内残余废气率值的范围划分成连续的若干等级,残余废气率落在某等级内的所有网格的体积之和与该时刻汽缸的总体积的比值。

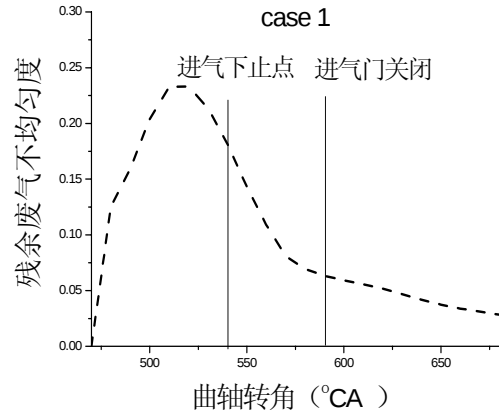
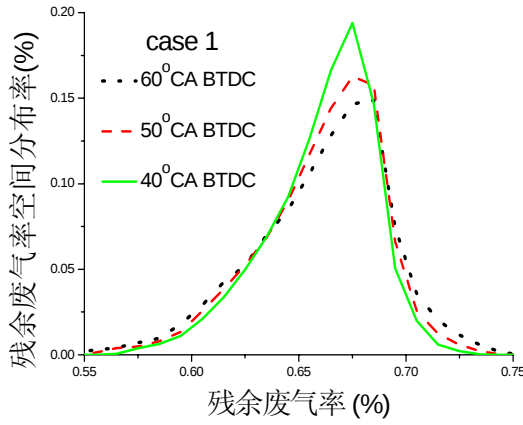


图 3 压缩上止点附近缸内残余废气分布率变 图 4 进气压缩过程中残余废气不均匀度的变

图 3 以 case 1 为例,反映了活塞运动接近上止点过程中的三个曲轴转角下残余废气空间分布率的变化情况。从中可以看出,混合气中残余废气率较低的部分和较高的部分同时减少,也就是随着活塞上行,混合气的残余废气逐渐均匀化。

此外,鉴于气体混合过程中,残余废气在缸内并未能够达到理想的均一化,采用不均匀度 S 表征缸内残余废气的均匀程度:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

n 为汽缸体的网格个数(不含气道), X_i 代表缸体单个网格的参与废气率, $\bar{X}$ 为缸内平均残余废气率。

图 4 表示的是 case 1 中缸内残余废气不均匀度随曲轴转角的变化过程。其中,残余废

气率不均匀度经历了先升高后降低并趋于平稳的变化过程。

3. 2 进气门相位和升程对缸内残余废气分布不均匀度的影响

图 5-a 表示的是 case 1~4 的进气过程中缸内残余废气不均匀度随曲轴转角的变化过程，图 5-b 表示的是 40°CA BTDC 时刻 case 1~4 的缸内残余废气的空间分布率，它们的形成都与进气过程有着密切的关系。

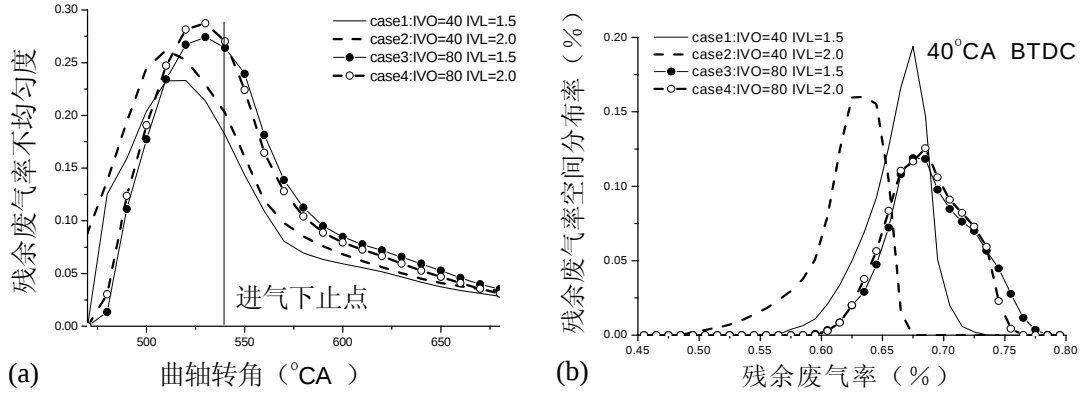


图 5 case 1~4 中残余废气率不均匀度变化趋势比较

采用捕捉残余废气方式时，进气过程主要分为三个阶段，共同影响混合过程。(1) 前回流：进气门开启初期，部分缸内残余废气流入进气管内并与新鲜充量预先混合，有利于在混合过程初期降低不均匀度。(2) 实际进气阶段。认为其持续时间越长，则在活塞压缩作用下，新鲜充量与残余废气相互剧烈作用时间越长，越有利于气体进一步混合。(3) 后回流：进气门关闭之前，部分混合汽流入进气管，进气门关闭后在缸内会形成较小尺度滚流，促进混合。

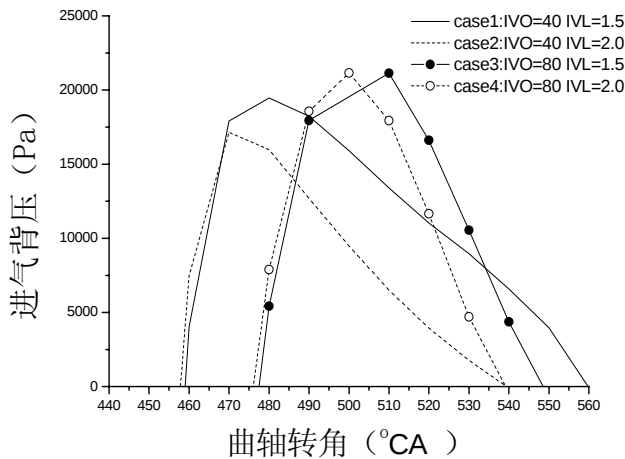


图 6 case1~case4 进气背压对比

图 6 对 case 1~4 中实际进气阶段的进气背压的变化情况进行了比较。其中，IVL 一定时，IVO 越早，前回流现象越明显（进气门开启后，进气背压正值出现得越晚），实际进气阶段持续时间越长，后回流量程度越小（进气门关闭前，进气背压较早降低至负值）。在图 5-a 中，IVL 相同时，case 1 和由于上述中的前两个过程对混合的促进作用较大，即使其后回流弱于 case 3，在接近压缩上止点时其残余废气不均匀度也较小。case 2 与 case 4 残余废气不均匀度相似，则是由于 case 2 的实际进气时间过短造成的。

IVO 一定时，IVL 对残余废气的不均匀度和空间分布率的影响程度受 IVO 的作用。在

图 5-a 中, 进气门早开时 (case 1/case 2), 采用大升程时残余废气不均匀度较高, 这主要也是因为 case 2 的实际进气时间过短; 相比之下, 在 IVO 同为 80° CA ATDC 时 (case 3/case 4), 升程越大残余废气不均匀度反而越低, 此时虽然实际进气持续期相差较小, 但是大升程下的后回流程度较大, 使混合越均匀。

4. 结论:

应用 Star-CD 对进气以及压缩冲程中缸内流场进行模拟, 研究了进气门相位和升程组合下缸内残余废气和温度分布情况。研究表明不同的进气门参数会对缸内残余废气和温度分布产生影响, 因此可以通过控制气门改变这两者的缸内分布不均匀度。

(1) 引入了残余废气率和温度的空间分布率和不均匀度的概念, 能够比较准确地反映残余废气率和温度的分布特征以及随时间变化的规律。

(2) 改变进气门配气参数会影响进气混合过程中的实际进气时间以及前、后回流的程度。相比于改变 IVL, 改变 IVO 会对缸内的残余废气率分布产生更大影响, 并且在同一 IVL 下, IVO 越早则上止点附近残余废气率不均匀度越小。IVL 的影响视所选取的相位不同而有所差别。

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] Michael Guenther, Werner Sauter, Frank Schwarz, Amin Velji and Ulrich Spicher, Institute of Reciprocating Engines, University of Karlsruhe (TH), A Study of the Ignition and Combustion Process in a Gasoline HCCI Engine Using Port and Direct Fuel Injection
- [3] Kengo Kumano and Norimasa Iida, Keio University, Analysis of the Effect of Charge Inhomogeneity on HCCI Combustion by Chemiluminescence Measurement, SAE 2004-01-1902
- [4] The es-ice User Manual-Version1.0, adapco, New York, June 5, 2002
- [5] CD adapco Group, STAR-CD Methodology (Version 3.22), Japan:Yokohama Computational Dynamics Limited,2004
- [6] CD adapco Group, STAR-CD User Guide (Version 3.22), Japan:Yokohama Computational Dynamics Limited,2004
- [7] CD adapco Group, STAR-CD Command (Version 3.22), Japan:Yokohama Computational Dynamics Limited,2004