

不同排气门控制策略下缸内充量掺混过程的仿真研究

A CFD Study of Gas mixing with Different Exhaust Valve Control Strategy

王新颜 申孟芹 谢辉

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室)

摘 要: 在装有可变气门机构的四冲程汽油机上可以通过废气重压和废气重吸两种策略实现内部废气循环。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。本研究采用 STAR-CD 软件对排气门早关 (NVO), 排气门晚关及排气门重开三种排气门控制策略下缸内流动及压缩后期温度、残余废气分布进行研究。结果表明, 三种排气门控制策略下, 新鲜充量和缸内残余废气的掺混过程有着极大的不同。排气门早关时, 进气过程中排气侧滚流对新鲜充量和废气的掺混作用较大, 压缩后期残余废气浓区偏向进气门侧; 排气门晚关时, 重吸的废气阻碍了进气过程初期新鲜充量进入缸内, 造成缸内排气门侧混合较差; 进气过程中排气门重开时, 排气道废气重吸晚于进气道进气, 重吸的废气速度与新鲜充量进气速度一致, 极大地促进了新鲜充量和废气的混合。与采用废气重压缩策略相比, 后两种策略极大地拓展了气门对新鲜充量和残余废气相互作用和最终缸内残余废气和温度分布的调控能力。

关键词: 全可变气门机构 废气重压缩 残余废气不均匀度 STAR-CD

Abstract: Exhaust gas re-compression and re-absorption can be used to achieve internal circulation of exhaust gas on the four-stroke gasoline engine equipped with variable valve system. The parameters of exhaust valve determine the mass of residual gas and the cylinder pressure at the beginning of IVO (Intake Valve Opening) and affect the mixture's thermophysical properties and the intake process during the circulation. In this study, STAR-CD software is used to study the flow in cylinder, the post-compression temperature and the distribution of residual gas in three strategies: early exhaust valve closing (NVO), late exhaust valve closing and exhaust valve re-opening. The results show that the three control strategies of exhaust valve have different effect on the mixing process of fresh charge and residual gas. With the early EVC, the tumble in the exhaust side has great effect on fresh charge and exhaust gases during the intake process. High residual gas region inclines to the intake valve side at the end of compression. With the late EVC, re-absorption exhaust gas hinders the fresh charge entering into the cylinder at the beginning of the intake process and causes poor mixing at the exhaust valve side. With the re-opening of exhaust valve during the intake process, the re-absorption process of exhaust gas is later than intake process and they have the same speed. Compared with NVO, the later two strategies greatly extend the effect of valve on fresh charge and residual gas and the control on residual gas and temperature of cylinder.

Keywords: 4VVAS, NVO, RGF inhomogeneity, STAR-CD

1 引言

HCCI 燃烧方式能实现汽油机较高的燃烧效率以及较低的 PM、NO_x 排放,因而受到广泛的研究。然而 HCCI 的燃烧主要由化学反应动力学控制,这对 HCCI 的应用提出了挑战^[1]。根据目前的研究结果显示, HCCI 燃烧主要受到缸内热状态以及流动影响^[2]。目前在汽油机上发展了多种实现 HCCI 燃烧的方式,主要有进气加热、采用可变压缩比技术、采用不同混合燃料、废气再利用,最后一种方法也被认为是最成功可行的策略^[3]。在装有可变气门机构的汽油机上,可以通过不同气门控制方式对废气进行再利用,对缸内的混合气分布、热状态进行调节,进而影响燃烧过程实现可控自燃。目前有多种气门控制手段来实现对废气的利用。一种是废气再压缩,即排气门早关,利用负气门重叠角(NVO)实现内部废气再循环;另外是废气重吸策略,在进气过程中再次打开排气门或者是推迟排气门晚关至进气冲程,将排气管废气重吸回缸内。在这三种排气门控制策略中,废气再压缩策略是最简单可行的^[3],但是也存在一定的缺陷,即在大负荷时存在爆震现象。而废气重吸策略因为重吸的废气对新鲜混合气的冷却作用,可以有效拓展 HCCI 负荷上限^[3]。本文采用 STAR-CD 软件对四气门汽油机进气/压缩冲程中气道以及发动机缸内的流场进行 CFD 三维仿真模拟,研究了汽油机在小气门升程、三种排气门控制策略下新鲜充量和缸内残余废气的相互作用,重点分析了流场的变化过程及其最终造成缸内物质组分的不均匀分布。

2 计算模型与条件

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

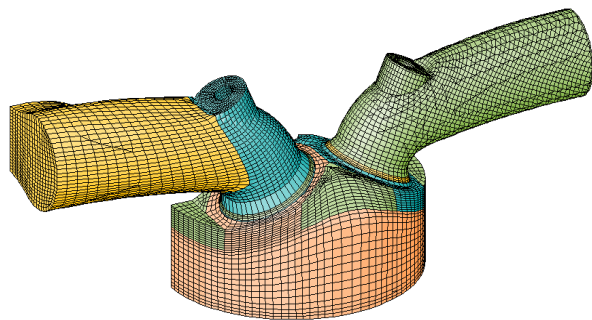


图 1 发动机网格

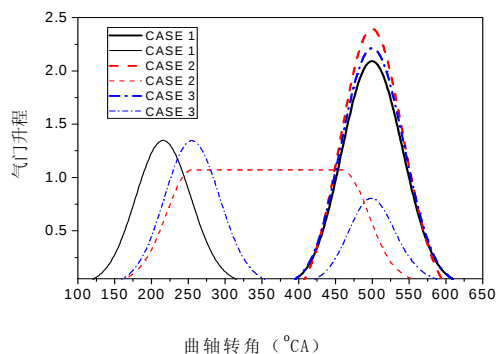


图 2 进排气门型线

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、进气道和排气道三部分,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。在整个研究工作中用到 3 组进排气门型线,具体如图 2 所示。图中 CASE 1 采用排气门早关(NVO)策略, CASE 2 采用排气门晚关

策略, CASE 3 采用排气门重开策略, 排气门在进气门开启一段时间后重开。

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^[5], 湍流模型采用了 $k-\varepsilon$ /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, 保证三组算例对应的发动机 IMEP 相等。CFD 计算中对气体成分进行了如下简化: 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、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 不同排气门控制策略对换气过程的影响分析

如图 3 所示, 排气门早关策略下, 进气背压相对较低, 进气速度相对要小, 且进气过程中存在较长时间的前回流以及后回流, 因此实际的进气持续时间较短。在排气门晚关策略下, 进气门开启时, 虽然进排气背压皆大于 0, 但此时排气门处于较大升程的开启状态, 排气道废气重吸入缸内的速度很大, 极大地阻碍了进气过程初期小进气门开启状态下新鲜充量进入缸内, 如表 2 中所示, 这也最终造成缸内排气门侧混合较差 (表 3)。进气过程中排气门重开时, 进气初期存在前回流, 部分缸

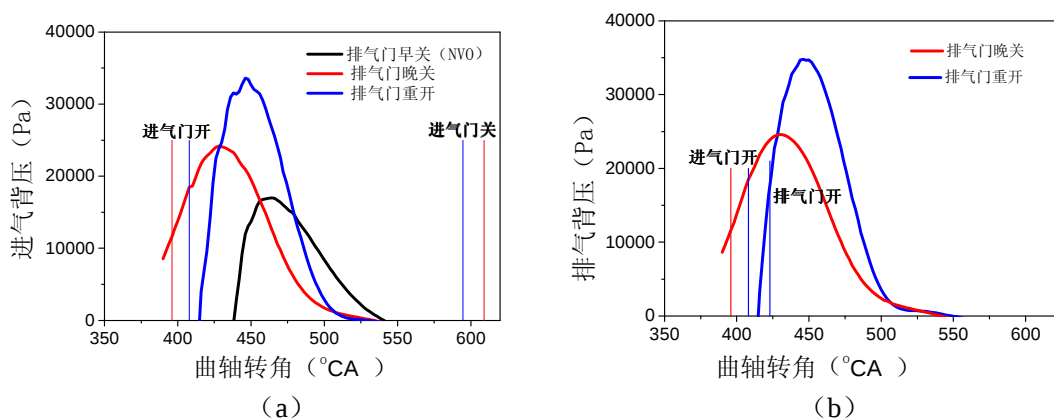


图 3 不同排气门策略下的进排气背压变化

内残余废气流入进气道内并与新鲜充量预先混合,有利于进气过程初期的混合。而排气道废气重吸晚于进气道进气时刻,且进排气被压都比较大,进气量大,进气速度也大,有利于新鲜充量和残余废气在缸内的掺混。

图 4-a 是三种排气门控制策略下进气及压缩冲程中缸内滚流比及无量纲湍流强度^[5]随时间的变化历程。排气门早关时,在进气过程中,随着进气门的开启,滚流比快速上升,达到最大值;随着进气门的关闭,进气过程中形成的大涡开始减弱,滚流比开始减小。然而值得注意的是,虽然在压缩过程中滚流比很小,但是湍流强度的衰减相对于其它两种并不是很快(图 4-b),压缩冲程后期湍流强度依然较大,有利于混合的进行。

排气门晚关时,进气门开启之前已经存在排气被压,随着活塞下行,缸内真空度下降很快,废气重吸进入气缸内速度很大,造成了重吸废气在缸内的滚流比逐渐增加。如图 4-a 所示。随着进气门的开启,燃烧室上部进气侧的新鲜充量与排气门重吸的废气两股气流相互冲击抵消,且沿进气门侧缸壁流入缸内的新鲜充量和沿排气门侧缸壁流入缸内的废气在气缸底部也互相冲击,如表 2 中所示,使得缸内滚流速度大大降低。随后排气门升程减小,进气门升程逐渐增大,进气侧气流逐渐占进气的主导地位,缸内滚流比值出现第二个峰值,但此时活塞已经上行,大涡开始减弱,滚流比峰值较小。

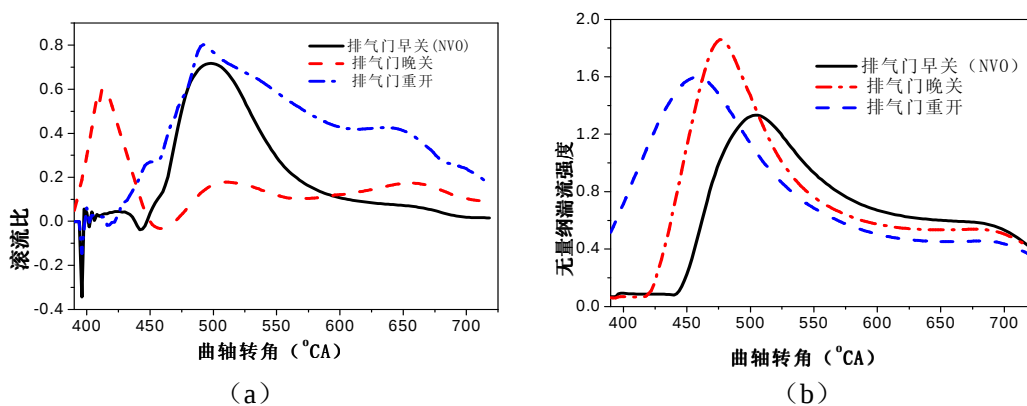
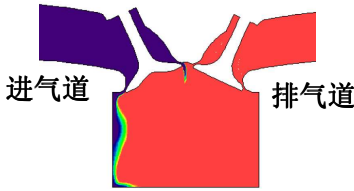
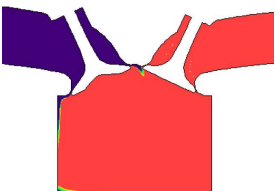
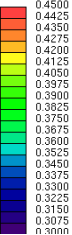
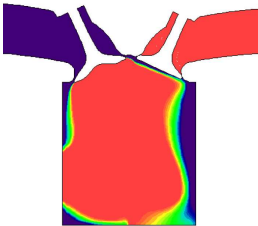
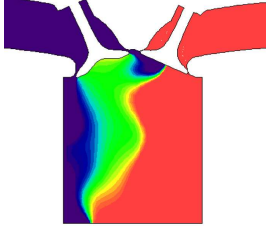
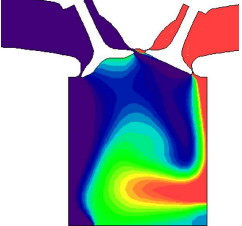


图 4 不同排气门策略下缸内滚流比及无量纲湍流强度

进气过程中排气门重开策略下,废气重吸晚于新鲜进气进入气缸,且进气门的升程远大于排气门重开的升程,新鲜充量的进气面积及进气速度远远大于排气侧的废气重吸。如下表中所示,受排气侧废气的影响,原先沿排气门侧缸壁流入缸内的废气改变方向,沿气门边缘进入气缸的中部;而重吸的废气主要是沿排气门侧缸壁流入气缸。与排气门早关的策略相比,大大加强了进气对气缸中部残余废气的搅动。另外,排气门侧重吸的废气速度与新鲜充量进气速度一致,使滚流长时间内维持较大速度,极大地促进了新鲜充量和废气的混合,即使缸内湍流强度较低,但前期充分的混合使压缩终了的缸内残余废气分布较均匀。

表 2 三种策略下进气过程中缸内新鲜充量和残余废气掺混

排气门早关 (NVO)	排气门晚关	排气门重开	RGF
			
进气上止点后 90 度缸内残余废气分布			
			
进气下止点缸内残余废气分布			

3.2 缸内滚流对缸内废气浓区及高温区分布的影响

图 5 中可以看到, 采用排气门晚关策略, 接近压缩终了的缸内残余废气及温度不均匀度^[5]要远远高于另外两种策略的, 主要原因是排气门晚关时, 缸内排气门侧新鲜充量与残余废气混合较弱, 存在残余废气率很高的浓区, 故残余废气及温度不均匀度很大。

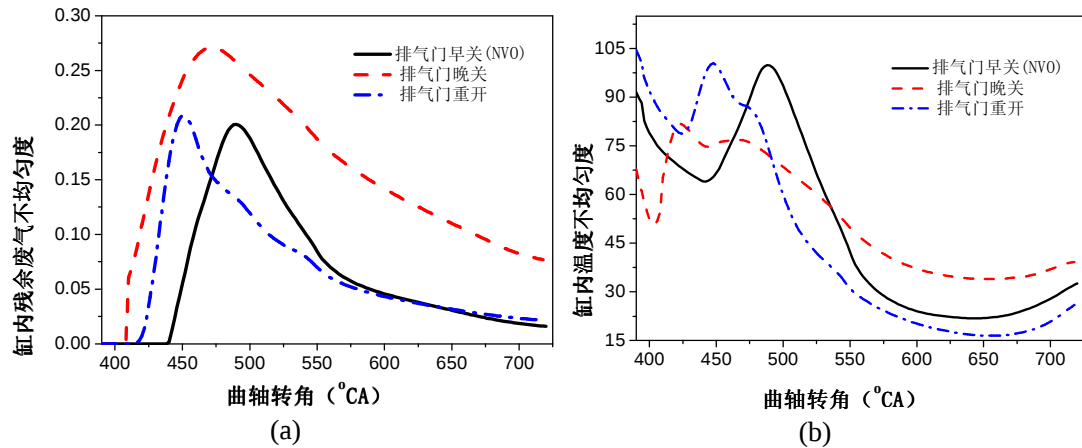
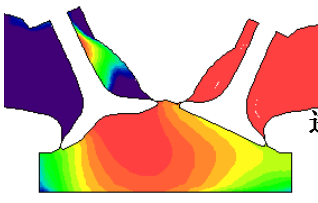
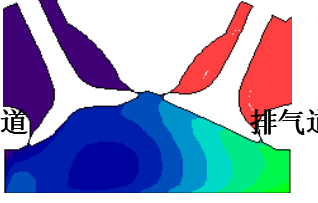
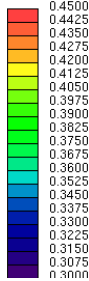
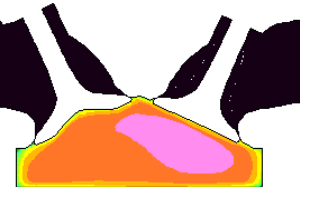
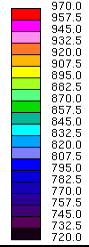


图 5 不同排气门策略下缸内残余废气不均匀度及温度不均匀度

对比排气门早关以及排气门重开策略, 排气门早关时, 压缩过程中虽然滚流比衰减很快, 但仍存在较大的湍流强度, 使得压缩上止点前残余废气不均匀度较低; 进气过程中排气门重开, 由以上分析可知, 进气过程中新鲜充量、重吸的低温废气与缸内残余的高温废气废气剧烈掺混, 使得残余废气不均匀度较低。但是, 排气门侧重吸的废气温度较低, 有利于新鲜充量和残余废气掺混中温度的传递, 故相对排气门重开的策略使得接近压缩终了缸内的温度不均匀度比排气门早关策略时更低,

如表 3 中所示。

表 3 三种排气门策略下压缩上止点前 40 度缸内残余废气及温度分布

排气门早关 (NVC)	排气门晚关	排气门重开	
压缩上止点前 40 度缸内残余废气分布			RGF
			
进气道	排气道		
余废气不均匀度: 0.02253	残余废气不均匀度: 0.09234	残余废气不均匀度: 0.02612	
压缩上止点前 40 度缸内温度分布			
			
温度不均匀度: 24.535K	温度不均匀度: 34.664K	温度不均匀度: 17.597K	

从表 2 中也已看到, 排气门早关时, 进气过程中排气侧滚流对新鲜充量和废气的掺混作用较大, 如上图所示, 压缩上止点前 40 度残余废气浓区以及局部高温区靠近进气门侧, 因为废气再压缩的原因, 缸内温度最高; 排气门重开策略下, 残余废气浓区在排气门侧, 靠近气缸壁。虽然进气之前也有废气再压缩, 但进气中重吸废气的冷却作用使缸内温度有所降低, 并且也使温度不均匀度降低。相比以上两种策略, 排气门晚关策略可以在缸内制造局部残余废气率非常高的浓区, 并且温度分层明显, 残余废气浓区以及局部高温区皆分布在排气门下方。

4 结论

应用 STAR-CD 对汽油机小气门升程下, 对排气门早关 (NVO), 排气门晚关, 进气中排气门重开三种排气门控制策略下进气以及压缩冲程中缸内流场进行模拟。初步研究了这三种策略下废气和新鲜充量不同的掺混过程。结果表明, 与采用废气重压缩策略相比, 后两种策略极大地拓展了气门对新鲜充量和残余废气相互作用和最终缸内残余废气和温度分布的调控能力。

- (1) 采用排气门早关和排气门重开策略时, 缸内滚流比最大值出现在进气过程中, 但不同的是, 由于重吸的废气速度与新鲜充量进气速度一致, 使滚流长时间内维持较大速度, 极大地促进了新鲜充量和废气的混合; 采用排气门晚关策略, 进气过程中新鲜气和重吸废气两股气流的相互抵消作用, 滚流比值较小。

- (2) 排气门早关时, 压缩后期残余废气浓区偏向进气门侧; 排气门晚关时, 压缩后期排气门下方存在局部残余废气率非常高的浓区; 排气门重开策略下, 新鲜充量和残余废气混合较好, 残余废气浓区在排气门侧, 靠近气缸壁。
- (3) 排气门早关时, 因为废气再压缩的原因, 缸内温度最高, 局部高温区和残余废气浓区分布位置相似; 排气门晚关策略, 由于重吸的废气冷却时间比较长, 缸内温度最低, 温度分层明显, 局部高温区和残余废气浓区分布位置也相似; 排气门重开策略下, 重吸废气的冷却作用降低了废气再压缩的升温作用, 使缸内温度有所降低, 也有利于降低温度不均匀度, 并且与前两种策略相比, 大大降低残余废气和温度分布的相关性。

5 参考文献

- [1]. David A. Rothamer, Jordan A. Snyder, Ronald K. Hanson, Richard R. Steeper, Russell P. Fitzgerald. Simultaneous imaging of exhaust gas residuals and temperature during HCCI combustion. *Proceedings of the Combustion Institute* 32 (2009) 2869–2876.
- [2]. Mingfa Yao, Zhaolei Zheng, Haifeng Liu, Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 35 (2009) 398–437
- [3]. 苏万华, 赵华, 王建昕等. 均质压燃低温燃烧发动机理论与技术. 北京: 科学出版社, 2010.
- [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]. Nan Li, Hui Xie, 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