

基于 GT-Power 的 HCCI 汽油机热力学 循环能量效率的仿真分析

A Simulation Study of Energy Effect in a HCCI Gasoline Engine Based on GT-Power

李楠 谢辉

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室)

摘 要：近年来HCCI燃烧方式被认为是提高汽油机效率的最有潜力的方法之一，关于HCCI节油机理的认识，大部分研究者认为是由于其燃烧过程更接近于理想奥托循环，较低的燃烧温度减少了传热损失，取消节气门减少泵气损失等因素综合作用的结果。本文利用GT-Power软件建立全可变气门机构的HCCI单缸发动机模型和SI单缸发动机模型，通过仿真研究，对比HCCI与SI燃烧模式下各种因素影响。研究基于内部残余废气的汽油HCCI燃烧的节油机理，通过与SI燃烧模式相对比，分析各种因素对于HCCI节油的贡献，包括废气能量、传热损失、泵气损失以及燃烧速率的影响。

关键词： HCCI，能量损失与利用，节油机理，内部残余废气，GT-power

Abstract： HCCI is one of the most potential methods to improve the efficiency of a gasoline engine. The reasons for the economization of fuel of HCCI are believed that HCCI combustion is more like Otto cycle, lower combustion temperature reduces the heat transfer losing, avoidance of throttle lesson the pump losing and so on. In this paper, a single HCCI engine with the fully variable valve and a single HCCI engine was set up, and the cause of the fuel economization of HCCI was researched by simulation. Compared with the SI combustion, the contribution of each factor was estimated, such as the using of exhaust gas energy, the losing of heat transfer ,the losing of pumping and heat release correlation.

Key words: HCCI , Losing and Using of Energy , Economization of Fuel , Internal EGR, GT-power

1、前言

发动机在将燃料化学能转化为机械能的过程中，伴随有各种损失，如机械损失、传热损失、泵气损失、高温排气带走的能量损失，普通汽油机效率在 20% - 30%，柴油机为 30% - 40%。均质压燃着火（Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI）被证明是提高汽油机的燃烧效率、实现汽油机的超低排放的有效途径，也是国际内燃机界目前研究的热点之一。实现汽油机均质压燃有多种方式：1) 直接进气加热，2) 提高压缩比，3) 使用更容易自燃着火的燃料，4) 使用 EGR 或内部残余废气。目前，内部残余废气再循环策略被认为是四冲程汽油机上实现 HCCI 燃烧最为简单、可行的方法^[1]。此外，利用内部残余废气再循环

可以在理论空燃比的条件下实现 HCCI 燃烧,并可以使用目前汽油机上广泛使用的成熟高效的三元催化器来进行排气后处理。本文主要研究基于内部残余废气的 HCCI,研究影响其效率的关键因素,并分析各因素对于 HCCI 燃烧节油的贡献。

本文针对天津大学开发的基于全可变气门机构的 HCCI 原理性样机,利用仿真计算软件 GT-Power 搭建其仿真试验平台。通过在此平台上研究稳态工况下 HCCI 燃烧、传热、换气等过程,并将结果与 SI 燃烧相对比,分析 HCCI 节油机理。

2、基于 GT-Power 的 HCCI 原型机模型

利用一维发动机循环模拟软件 GT-Power 对装有全可变气门机构的试验 HCCI 发动机建模。发动机模型主要包括:进气管道、空气滤清器、节气门、进气道、喷油器、进气门、排气门、气缸、曲轴箱、排气道、排气管以及传感器和监视器等。模型中重要参数,如发动机基本结构参数、管道尺度、流动特征值、气门参数等,与试验相一致,所建模型如图 1。

建立发动机流动模型以后,需要设定合理的放热率模型、气缸传热模型。试验研究发现汽油 HCCI 燃烧呈现较为明显的双阶段放热,即低温预燃烧放热阶段和高温主燃烧放热阶段,本文选用由大量试验数据总结的双阶段 HCCI 放热率模型^[2]。气缸传热模型选用 Woschni 换热模型。

为了模拟试验用全可变气门机构,还建立了全可变气门机构模型^[3]。

为了将 HCCI 仿真试验结果与 SI 燃烧模式对比,可将模型中的 HCCI 放热率模型换成描述火花点火发动机均匀混合气燃烧的 Wiebe 模型,该发动机模型就可以模拟火花点火式汽油机的工作过程。这样可以将两种燃烧模式的发动机工作过程相对比,深刻了解 HCCI 燃烧模式节油机理。

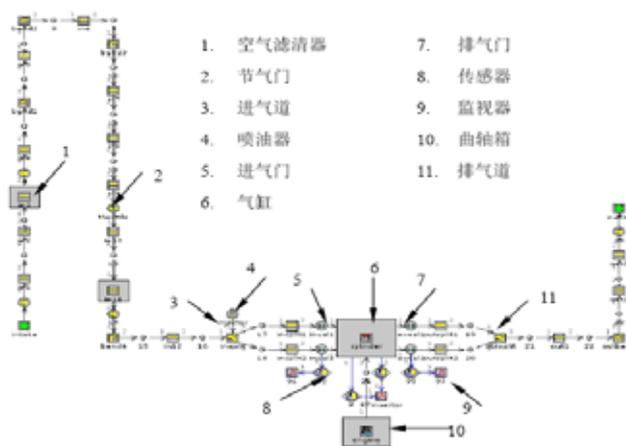


图 1 一维发动机模型

3、HCCI 和 SI 燃烧工作循环能量效率的对比分析

考察相同工况点 ($n=2000\text{rpm}$, $\text{IMEP}=2\text{bar}$) HCCI 与 SI 燃烧模式的发动机工作过程,图 2 为循环压力和温度历程。从图中可以看出, HCCI 燃烧最高压力高于 SI, 而燃烧最高温度低

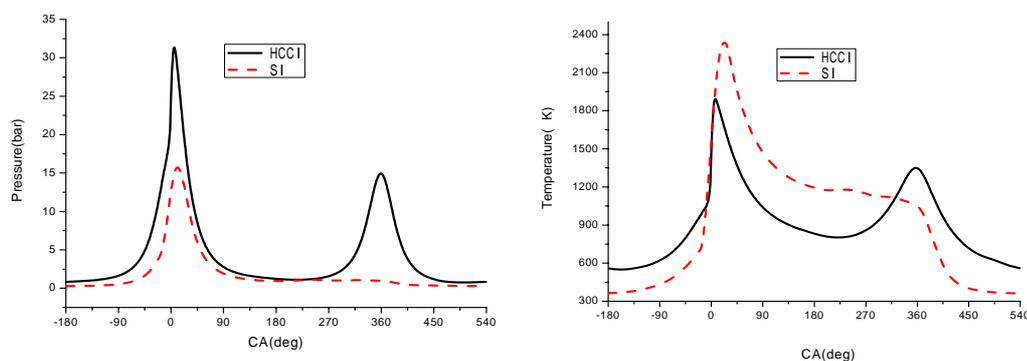


图 2 相同工况下 HCCI 与 SI 循环压力和温度历程

于SI燃烧；由于HCCI燃烧有大量残余废气留在缸内，致使HCCI进气、压缩过程的压力和温度均高于SI模式。

表 1 HCCI 与 SI 工作循环总能量损失与利用对比

工况	n=1000rpm, IMEP=2.8bar		n=2000rpm, IMEP=2bar		n=2000rpm, IMEP=3bar		n=3000rpm, IMEP=3bar	
	HCCI	SI	HCCI	SI	HCCI	SI	HCCI	SI
燃烧模式	HCCI	SI	HCCI	SI	HCCI	SI	HCCI	SI
内部残余废气率	56.7%	—	65%	—	52.7%	—	53.2%	—
循环排气质量	0.15485g	0.19664g	0.11131g	0.13238g	0.15883g	0.18853g	0.15432g	0.18313g
排气平均温度	827K	914K	847K	1040K	907K	1050K	948K	1150K
排出废气的焓*	87.9162J	130.194J	65.432J	106.616J	103.857J	154.238J	108.089J	170.676J
循环总传热损失	203J	249J	144J	128J	183J	177J	163J	147J
燃烧和排气过程传热损失	151J	217J	91J	117J	127J	159J	109J	130J
进气和压缩过程传热损失	52J	32J	53J	11J	56J	18J	54J	17J
泵气损失	0.34764	0.51086	0.42044	0.68407	0.36285	0.60048	0.36912	0.70397
	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
	17.382J	25.543J	21.022J	34.2035J	18.1425J	30.024J	18.456J	35.1985J
每循环燃料释放总能量	433.529J	554.514J	310.816J	373.269J	447.862J	531.49J	435.098J	516.347J
排出废气能量比*	20.3%	23.5%	21.1%	28.6%	23.2%	29%	24.8%	33.1%
燃烧和排气过程传热损失比*	34.8%	39.1%	29.3%	31.3%	28.4%	29.9%	25.1%	25.2%
进气和压缩过程传热损失比*	12%	5.8%	17.1%	2.9%	12.5%	3.4%	12.4%	3.3%
传热损失比*	46.8%	44.9%	46.3%	34.3%	40.9%	33.3%	37.5%	28.5%
泵吸损失比*	4%	4.6%	6.8%	9.2%	4.1%	5.6%	4.2%	6.8%
理论热效率	62%	48.3%	59%	40.9%	56.8%	44.3%	52.8%	40.8%
HCCI比SI多利用能量潜力比*	15.6%		16%		12.2%		13.9%	

*焓的计算参考温度 $T_0 = 298.15K$ 。

*能量比（损失比），是该能量（或损失）与每循环燃料释放总能量的比

3.1 HCCI和SI燃烧排气管废气带走能量的对比

发动机高温排气带走的能量占整个燃料释放总能量的很大比例，采用合理的方式减少这部分能量的损失或再次利用这部分能量，都会使发动机效率得到提高。

基于内部废气的汽油HCCI燃烧就是利用留在缸内的高温废气加热进气，看似利用了一部分废气能量；但实际情况是：在循环开始时，缸内留有一部分残余废气，如果发动机工作

在同一工况下，循环结束时，还要留下一部分于循环开始时状态与数量相同的残余废气，这样实际上是没有利用内残余废气的能量的；但是由于内部废气的作用，使HCCI燃烧温度降低，从而排气温度降低，与传统火花点燃式汽油机相比，排气带走能量减少，从而减少了高温排气造成的能量损失。表1给出相同工况下HCCI和SI燃烧从排气管排出的废气带走的能量与循环总能量对比。HCCI燃烧排出废气带走的能量占循环释放总能量的20.3%~24.8%，SI燃烧为23.5%~33.1%，由于排气温度降低，使得每循环排出废气带走能量减少3.2%~8.3%。

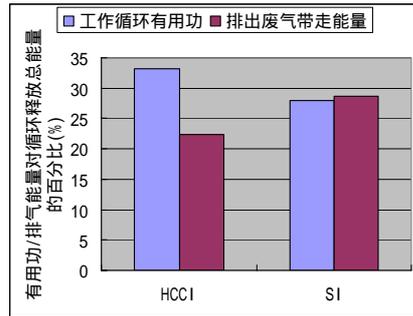


图3 HCCI与SI循环有用功与排出废气带走能量对比

3.2 工作循环过程中缸壁散热量的对比

图4为n=2000rpm, IMEP=2bar工况下，HCCI和SI燃烧循环累计传热损失和气缸瞬时传热率。该工况下，HCCI循环总传热损失为144J，SI循环总传热损失为128J，HCCI燃烧模式循环总传热损失与循环最高瞬时传热率均大于SI模式。

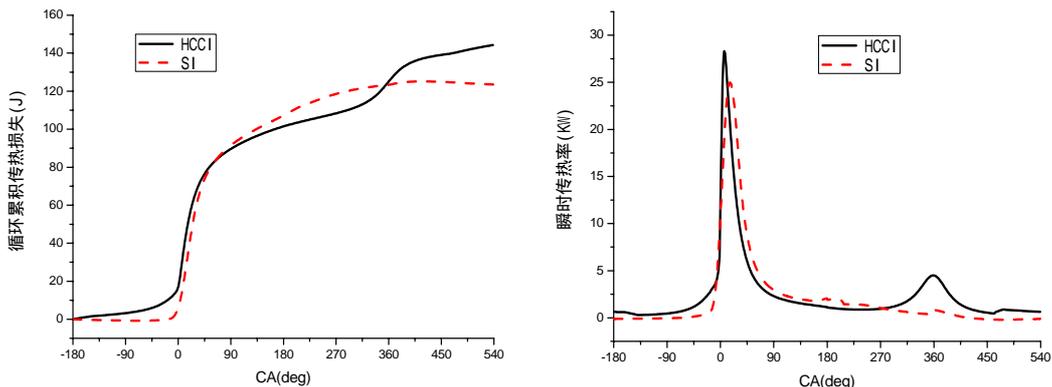


图4 相同工况下 HCCI 与 SI 循环传热损失与瞬时传热率对比

瞬时传热率用Woschni传热模型计算，该模型中传热系数是关于气缸温度和压力的增函数^[4]，虽然HCCI燃烧最高温度低于SI，但是由于HCCI缸内压力比SI燃烧大得多，所以造成HCCI最大瞬时传热率大于SI燃烧。

由于内部残余废气的存在，以及其对新鲜充量的加热作用，使得在进气和压缩过程中，HCCI传热损失增加。从表1可以看出，HCCI进气和压缩过程传热损失比为12%~17.1%，SI进气和压缩过程传热损失比为2.9%~5.8%。由于内部残余废气的作用，使得在进气和压缩过程中的传热损失增加6.2%~14.2%。

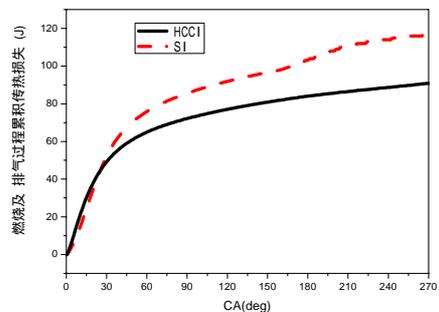


图5 相同工况下 HCCI 与 SI 燃烧做功冲程传热损失对比

如图5，在燃烧做功和排气过程中，HCCI传热损失小于SI。这是由于内部残余废气的热容作用，

使得HCCI燃烧温度较低,故其燃烧做功和排气过程传热损失较少。表1中,各不同工况下,HCCI模式在燃烧做功和排气过程中传热损失均小于SI。但是内部残余废气的热容作用,使HCCI在燃烧做功和排气过程中减少的传热损失并不能弥补在进气和压缩过程中增加的散热损失,造成HCCI循环总的传热损失增加。表1中各工况点下,HCCI传热损失比与SI燃烧相比,增加1.9%~12%。

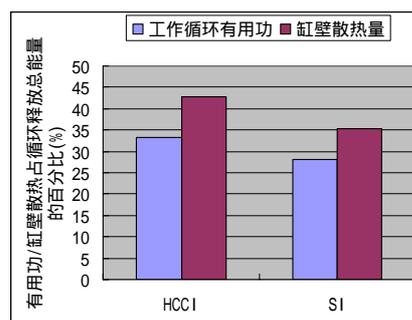


图6 HCCI与SI循环有用功与缸壁散热量对比

3.3 HCCI 燃烧模式下泵气损失的改善

传统汽油机由于节气门存在,在部分负荷时泵气损失较大,也是影响其燃油经济性的重要因素。HCCI 燃烧取消了节气门,减少了泵气损失,有利于提高汽油机燃油效率。

考察相同工况下,HCCI与节气门调节负荷的SI模式的循环泵气损失对于汽油机效率的影响。相同工况下($n=2000\text{rpm}$, $\text{IMEP}=2\text{bar}$),HCCI泵气损失为 0.420437bar ,节气门控制SI泵气损失为 0.684067bar ,即HCCI模式下循环泵气消耗的功为 21.02185J ,节气门调节负荷的SI模式需泵气功 34.20335J ,分别占循环释放总能量的6.8%和9.2%(节气门调节负荷SI燃烧循环释放总能量为 373.269J)。在该工况下,由于HCCI取消节气门,可减少泵气损失占循环释放能量的2.4%。如表1中各工况下,HCCI减少泵吸损失比0.6%~2.6%。

3.4 热力学循环改善所带来的热效率提高

由于HCCI燃烧放热速率快,更接近理想的奥托循环。与SI燃烧相比,其理论热效率大大提高。表1中,HCCI理论热效率为52.8%~62%,SI理论热效率为40.8%~48.3%,HCCI比SI提高12.5%~18.1%。

4、结论

- (1) HCCI燃烧由于排气温度降低,使得每循环排出废气带走能量减少3.2%~8.3%。
- (2) HCCI燃烧,通过缸壁的散热量与SI燃烧相比,增加1.9%~12%。
- (3) HCCI由于取消节气门,使泵吸损失比减少0.6%~2.6%。
- (4) HCCI更接近于理想奥托循环,热效率比SI提高12.5%~18.1%。
- (5) 综合以上因素,如果不考虑其他因素影响,在本文考察工况下,HCCI燃烧模式可以多利用燃料释放能量的12.2%~16%,折合成油耗,HCCI可比SI燃烧油耗降低30.3%~38.1%。

参考文献

- [1] Wolters, P., Salber, W., Geiger, J., Duesmann, M., et al. Controlled Auto Ignition Combustion Process with an Electromechanical Valve Train[C]. SAE Paper 2003-01-0032.
- [2] Jing Qin, Hui Xie, Yan Zhang and Hua Zhao, "A Combustion Heat Release Correlation for CAI Combustion Simulation in 4-Stroke Gasoline Engines", SAE paper 2005-01-0183.

- [3] 谢辉,张岩,李楠,秦静,赵华.“全可变气门机构动态调节特性对HCCI运行的影响”.烧科学与技术,2006年第3期.
- [4] John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, International Edition, 1988.