



双燃料发动机SI/HCCI模式切换过程研究

张家博 毛克让 黄震 韩东

2017年8月20日



上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

1

背景介绍

2

实验设备及方法

3

计算模型设定和方法

4

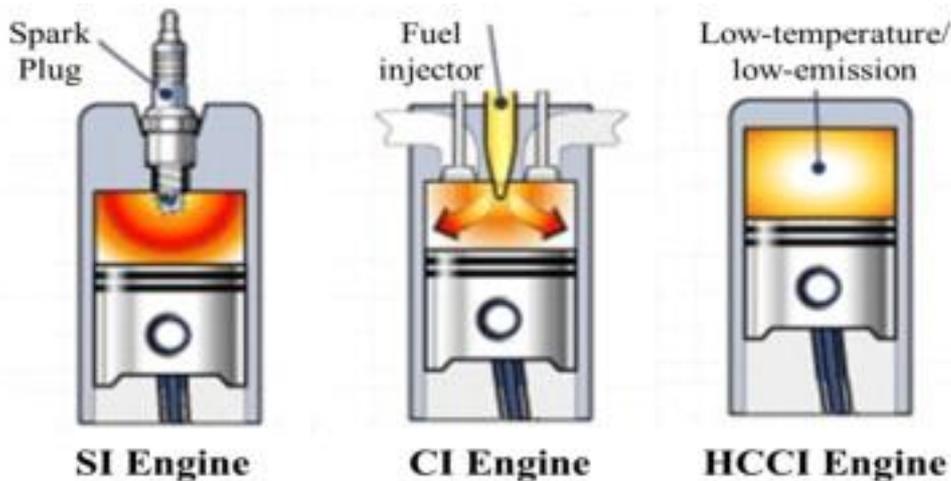
结果分析与讨论

5

结论



1.背景介绍



HCCI*发动机结合了压燃式 (CI) 和点燃式 (SI) 发动机的优点，可以在**提高燃油经济性的同时降低污染物的排放**。

局限性： HCCI运行工况狭窄。在低负荷低转速（比如启动工况）下，可能燃烧不充分，甚至出现**失火**的情况



解决办法： 应用SI/HCCI双燃烧模式。



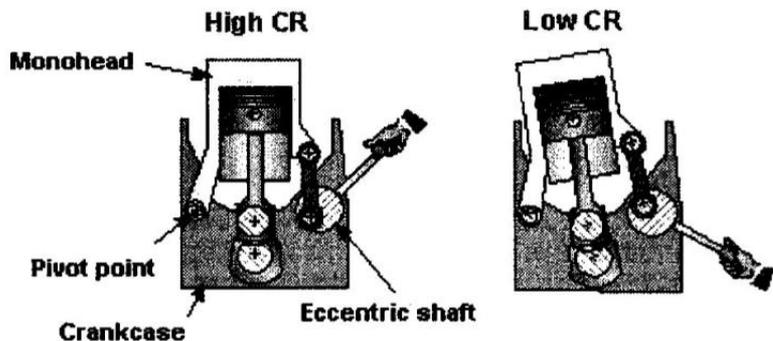
技术难点： 冷启动工况下的SI/HCCI切换过程如何做到快速且平稳。

主要燃烧模式控制参数特性对比

相关参数	响应时间	
喷油量	1~2个循环	响应最快
点火角	1~2个循环	
节气门开度	几个循环	稍慢，100ms左右
VVT角度	几个循环	
进气温度	几分钟	进气热惯性，响应最慢

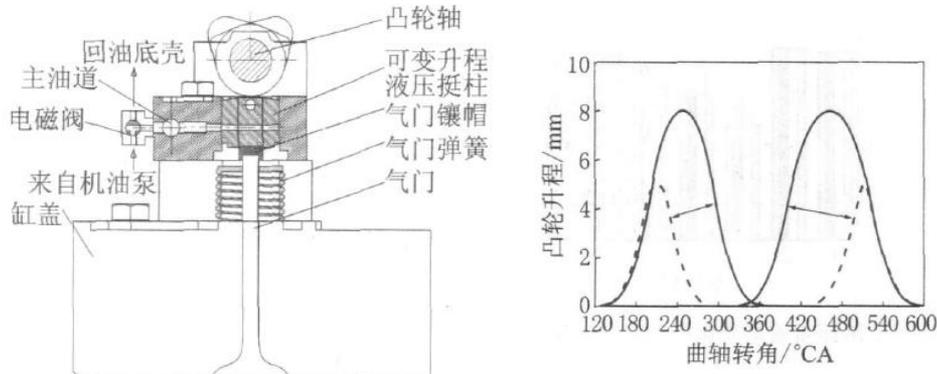
多方式协调控制SI/HCCI切换，使得输出的IMEP波动尽可能少，减少燃烧失火的循环，使得切换过程对于动力输出和排放的影响最小。

可变频压缩比*



* Haraldsson, G et al, SAE Technical Paper 2003-01-1830

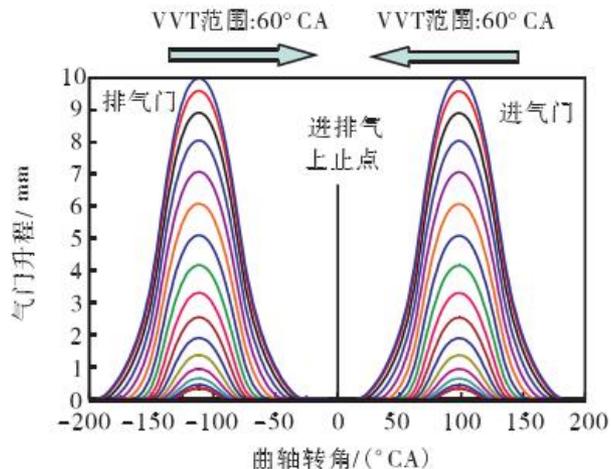
错位双凸轮机构 (配气相位)*



* 陈韬等, 天津大学学报, 2012 45 (4) : 367-372

SI/HCCI转换实现方法

全可变气门结构+EGR*



燃料设计模式转换*

	SI	HCCI
正庚烷喷射控制	各缸分别增加正庚烷喷油脉宽	→
汽油喷射控制	各缸分别降低汽油喷油脉宽	→
进气量控制	主节气门全开	→
点火控制	点火提前角推迟到上止点后	→

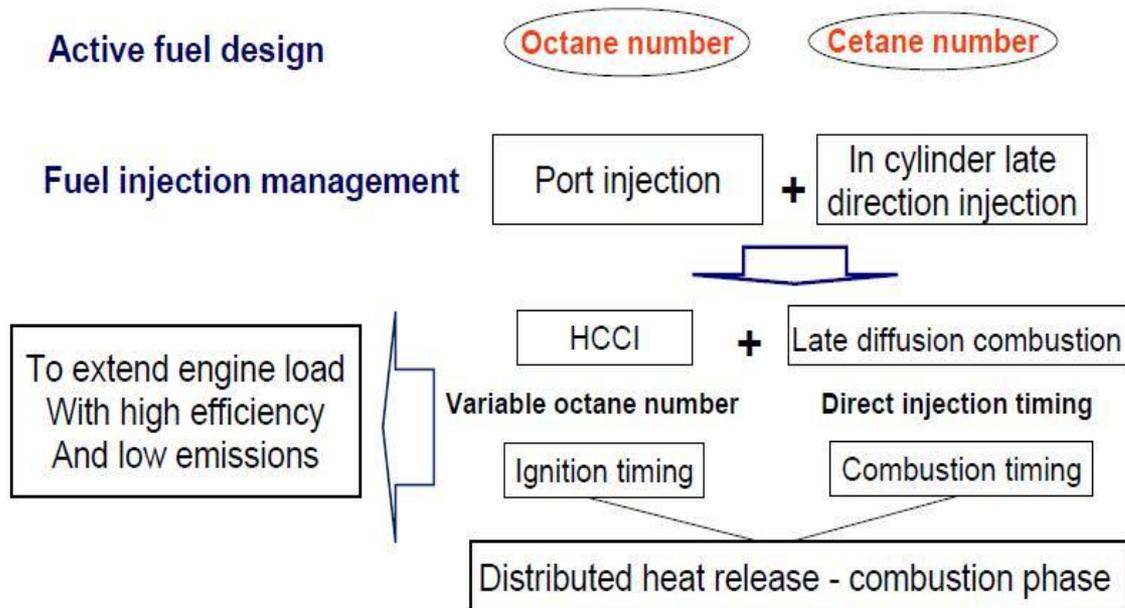
* 葛强强等, 内燃机工程, 2007 28 (6) : 16-19

* 李忠照. [博士学位论文]. 上海交通大学, 2014

燃料设计

选择**两种**化学性质截然相反的**燃料**进行组合，根据发动机运行工况并结合缸内燃烧过程和实际排放水平的反馈信息，实现比例优化的实时控制。

Active Fuel Design and Management for PCCI



通过掺混正庚烷和异辛烷等基础燃料，在不同负荷下使用不同的**掺混比例**并配合**EGR率**的使用，实现不同负荷下着火时刻和燃烧速率的优化控制。

1

背景介绍

2

实验设备及方法

3

计算模型设定和方法

4

结果分析与讨论

5

结论



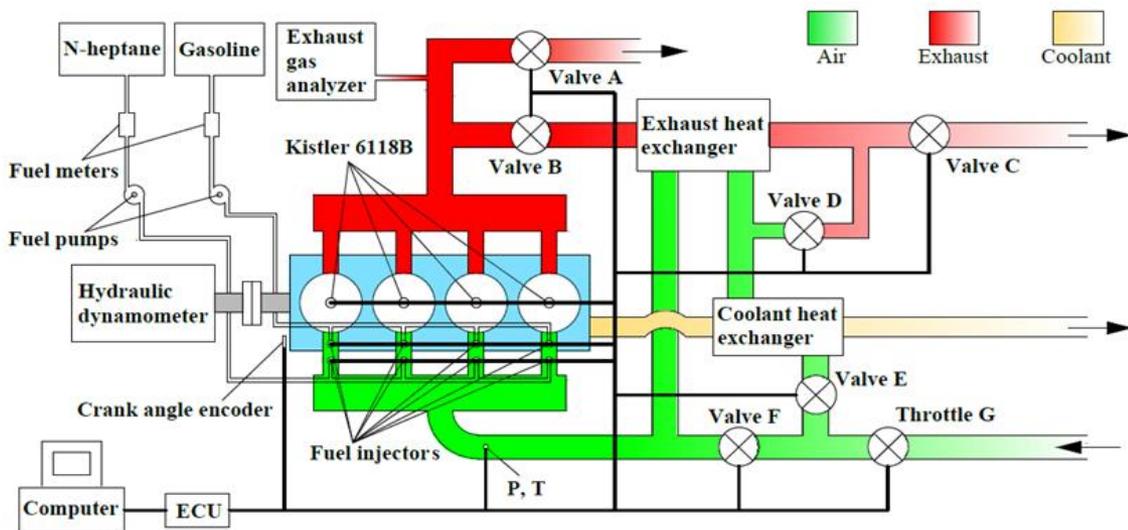
2. 实验设备及方法

实验所用发动机的基本参数

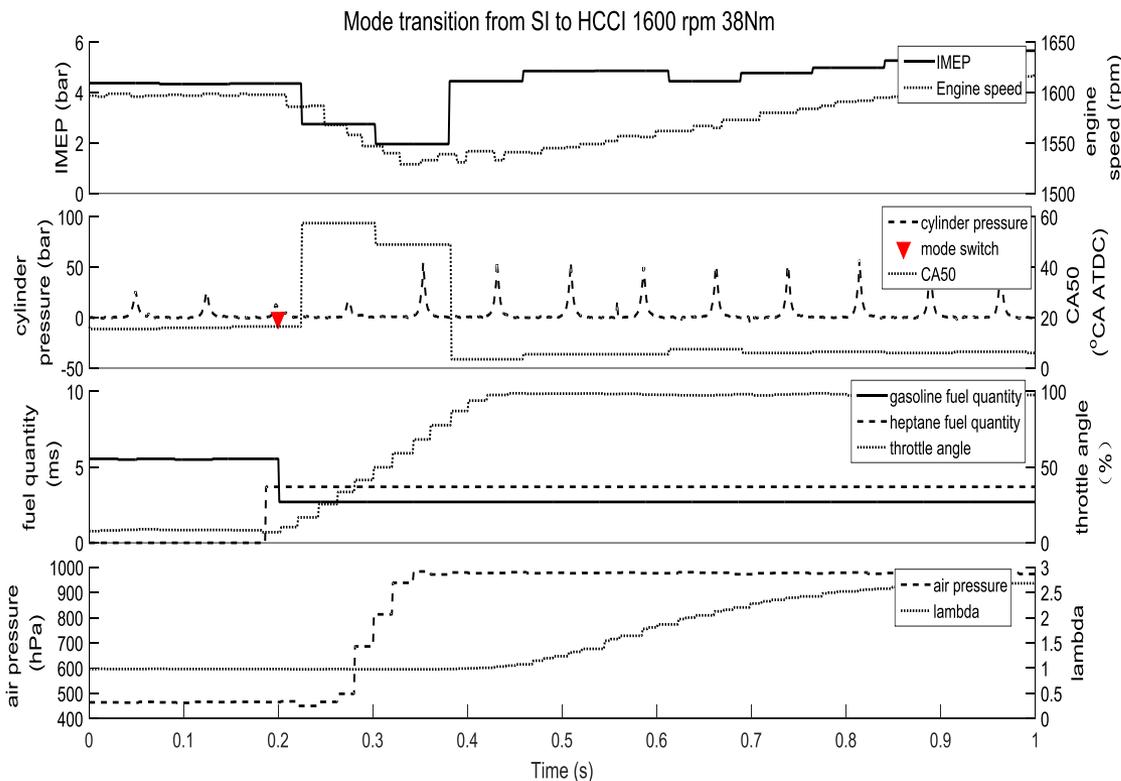
缸径×冲程/mm	75×84.8
排量/L	1.498
压缩比	13
连杆长度/mm	143.7
进气门开启/° CA ATDC	353
进气门关闭/° CA ATDC	-141
排气门开启/° CA ATDC	135
排气门关闭/° CA ATDC	-349

转换过程中，进气、冷却液或机油保持为常温，不需要加热。

实验采用一台正庚烷和汽油双燃料HCCI发动机进行了SI/HCCI模式转换过程的研究。切换过程中，ECU确定汽油和正庚烷比例和循环喷油量。之后，ECU控制节气门完全打开。切换过程中，火花点火是始终保持开启状态。



转速：1600rpm
转矩：38N·m



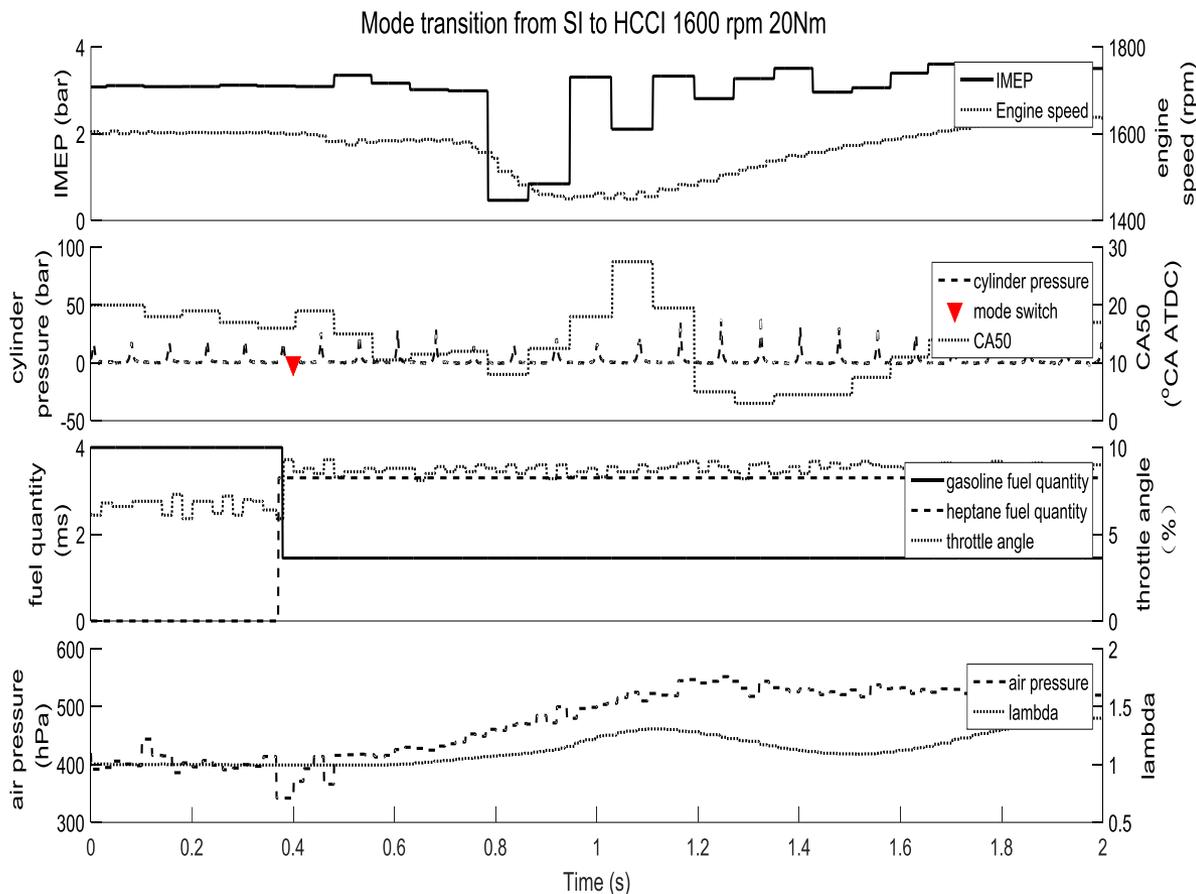
IMEP从SI模式下的4.36bar增加到HCCI模式下的4.45bar。转速波动在50rpm左右。

参数	SI	HCCI
节气门开度	8%	97%
进气压力	47Kpa	97Kpa
正庚烷喷油脉宽	0ms	3.7ms
异辛烷喷油脉宽	5.5ms	2.7ms

转速：1600rpm

转矩：20N·m

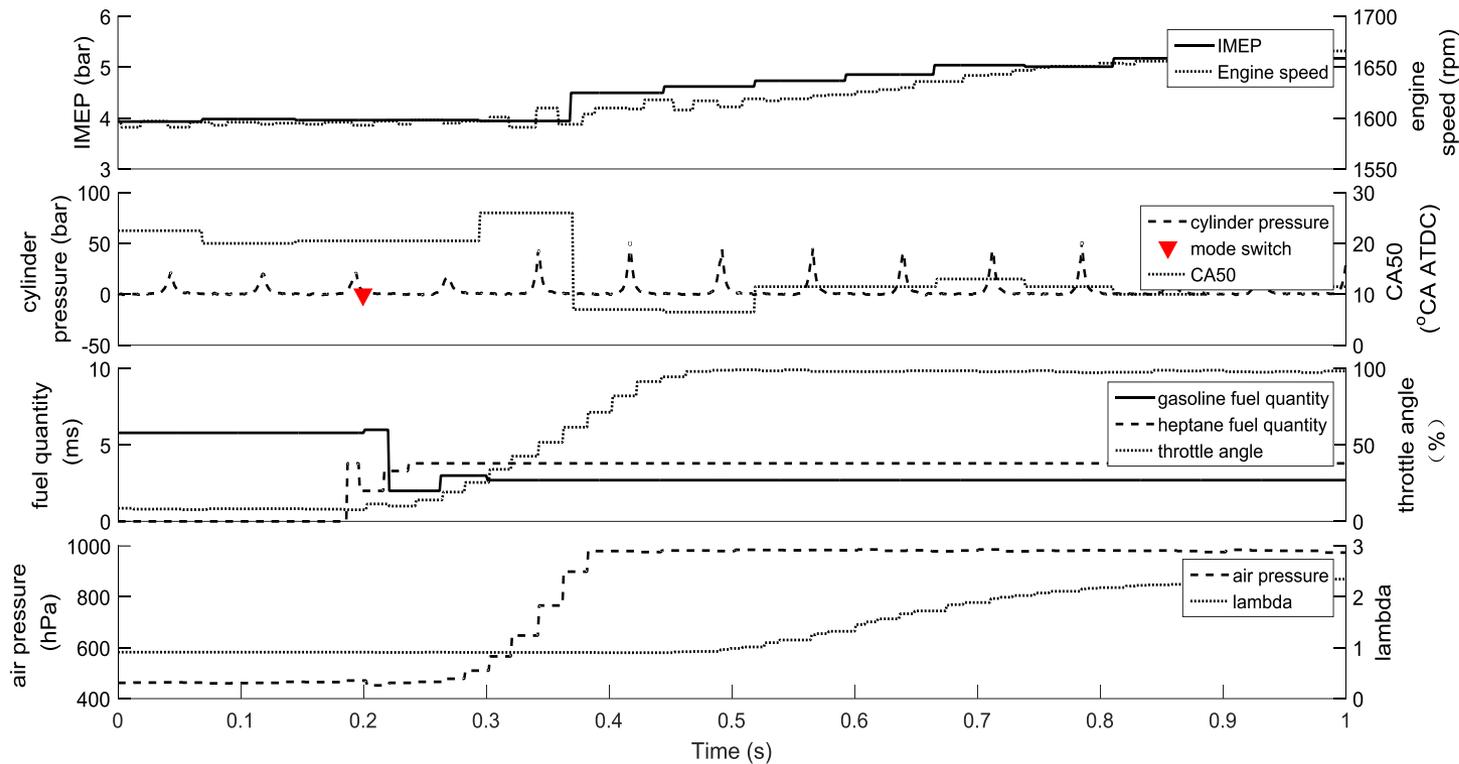
参数	SI	HCCI
节气门开度	6.4%	8.6%
进气压力	41Kpa	52Kpa
正庚烷喷油脉宽	0ms	3.3ms
异辛烷喷油脉宽	4ms	1.5ms



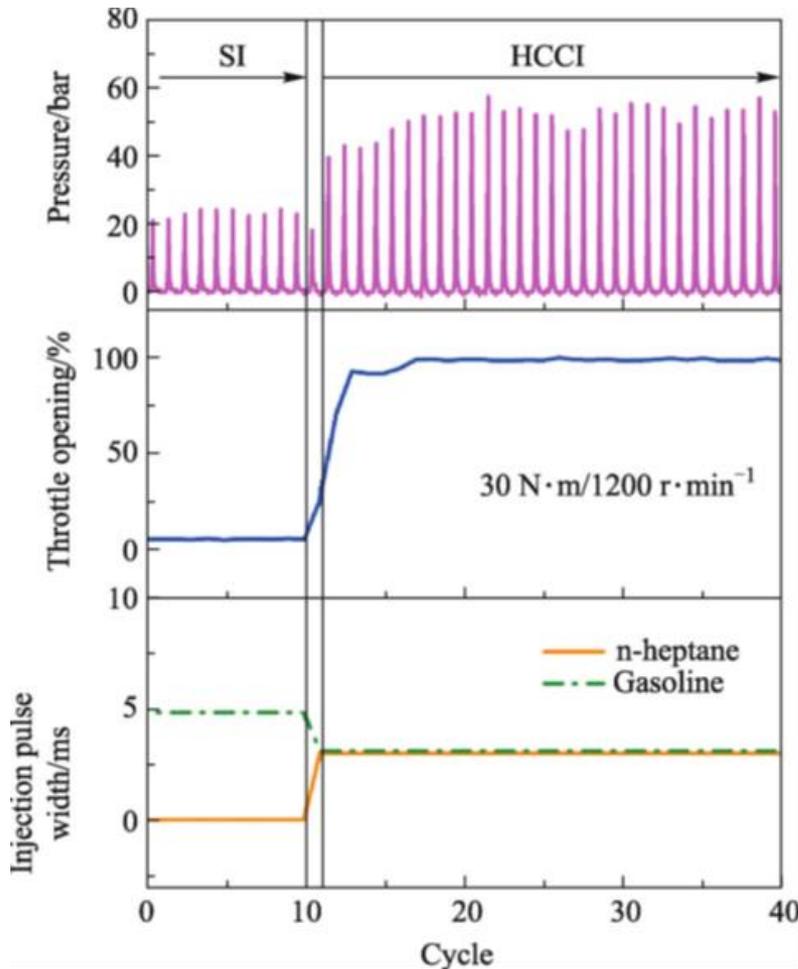
切换发生失火现象

进气道油膜效应：部分燃油冲击到进气歧管的壁面上，形成油膜，并且燃油随着进气歧管壁面的温度、转速和负荷的变化以不同的速率蒸发，蒸发的燃油参与混合，进入气缸内进行燃烧。

采用喷油脉宽的过渡变化以避免失火



汽油喷油脉宽经过3个循环从5.8ms下降到2.7ms，正庚烷喷射脉宽从0ms经过3个循环增加到3.8ms，汽油喷油脉宽减少的开始时刻晚于正庚烷开始增加的时刻，为正庚烷油膜的建立提供一些时间和余量。



计算采用工况的实验参数变化情况：

1. 转换前后发动机转矩保持为**30N·m**不变。转速波动约为**40r/min**，并会在10个循环内消失。
2. 节气门开度从SI模式的**5.5%**增长到HCCI模式的**99%**。
3. 汽油喷射量逐渐降低，喷油脉宽从**4.85ms**降低到**3.1ms**，喷油量变为**4.3mg/循环**。
4. 正庚烷喷射量逐渐升高，喷油脉宽从**0ms**增加到**3.2ms**，喷油量**4.77mg/循环**。

缸内燃料的化学
性质决定



CFD三维仿真

试验表明，基于燃料设计的模式切换**速度快**。辅以燃油喷射控制优化后，**一个循环**后就可以不再使用火花塞点火进入HCCI模式。

1

背景介绍

2

实验设备及方法

3

计算模型设定和方法

4

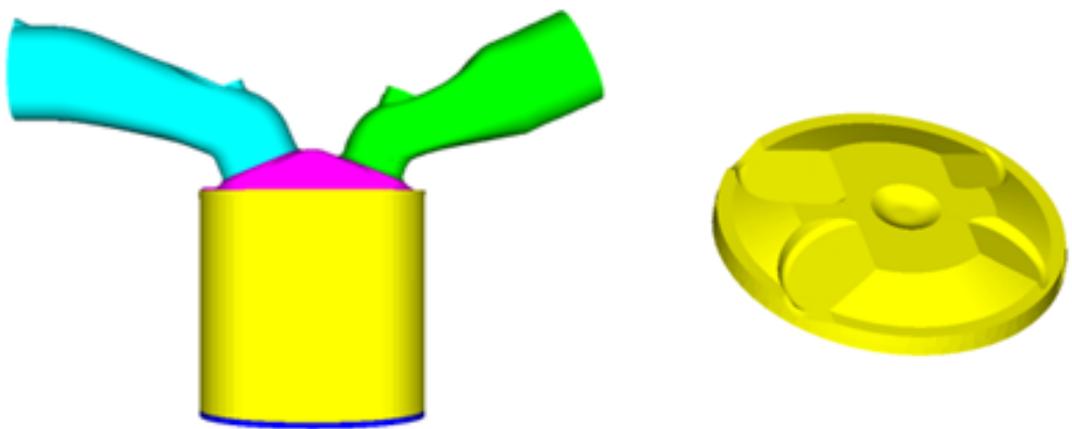
结果分析与讨论

5

结论

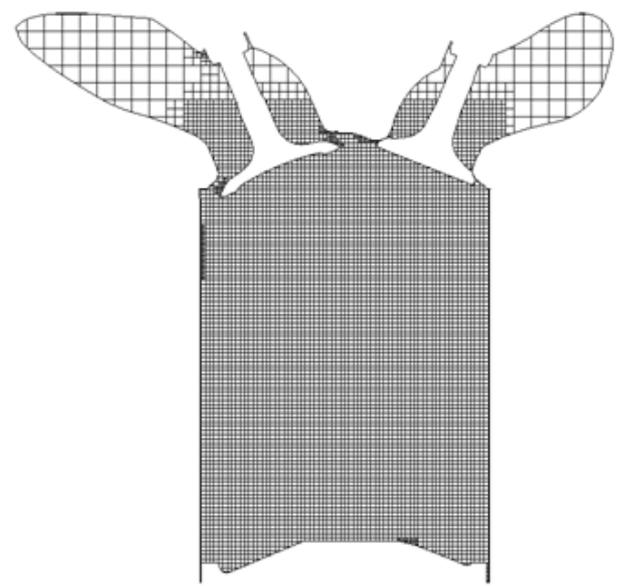


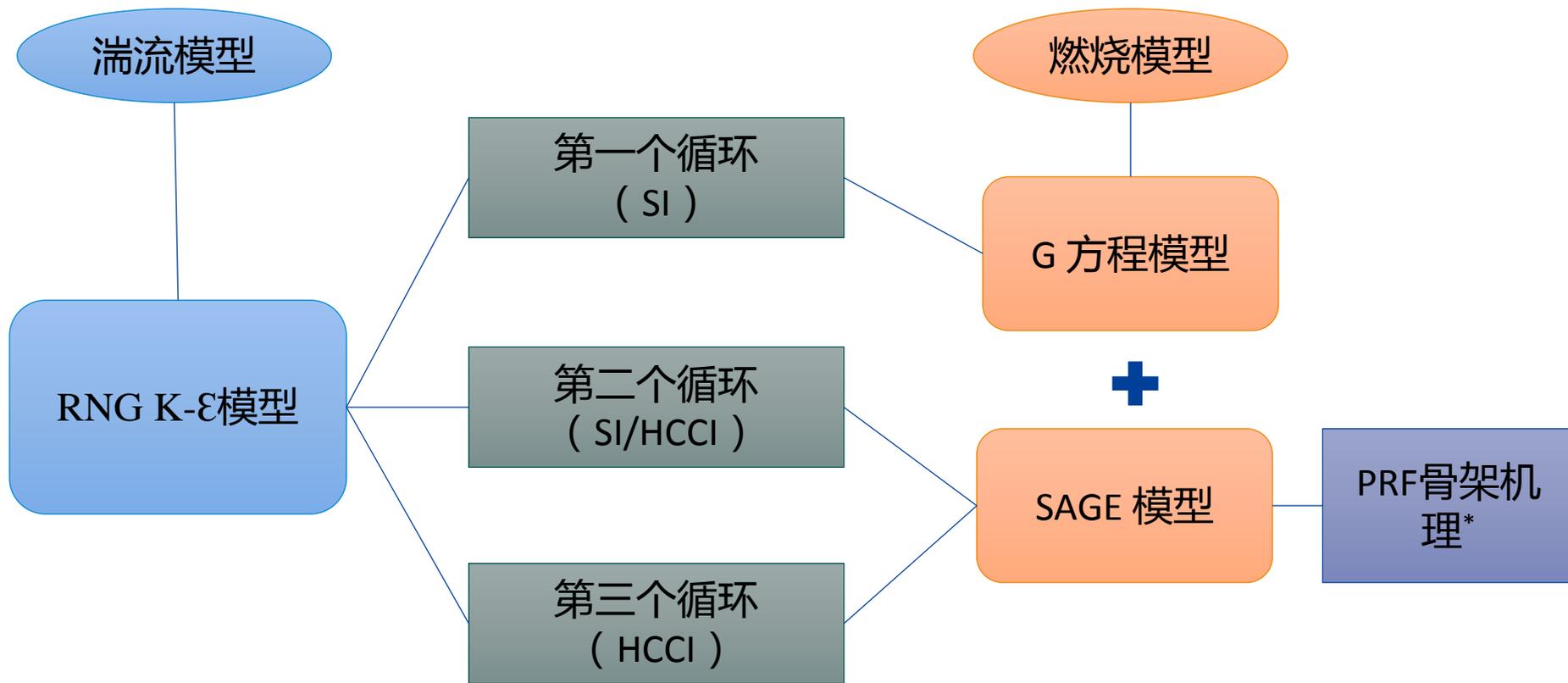
3. 计算模型设定和方法



模拟采用CONVERGE™软件，共计算了三个完整的发动机循环。经过网格无关系验证后，选择基础网格尺寸为4mm，并对局部进行了自适应网格加密。在整个计算过程中，网格数量从 1.5×10^5 到 1.2×10^6 之间变化。

加密位置	层数	加密后网格大小 (mm)	加密时期
气缸	2	1	全阶段
气门阀座	3	0.5	全阶段
火花塞	4	0.25	点火过程
温度/压力	3	0.5	AMR

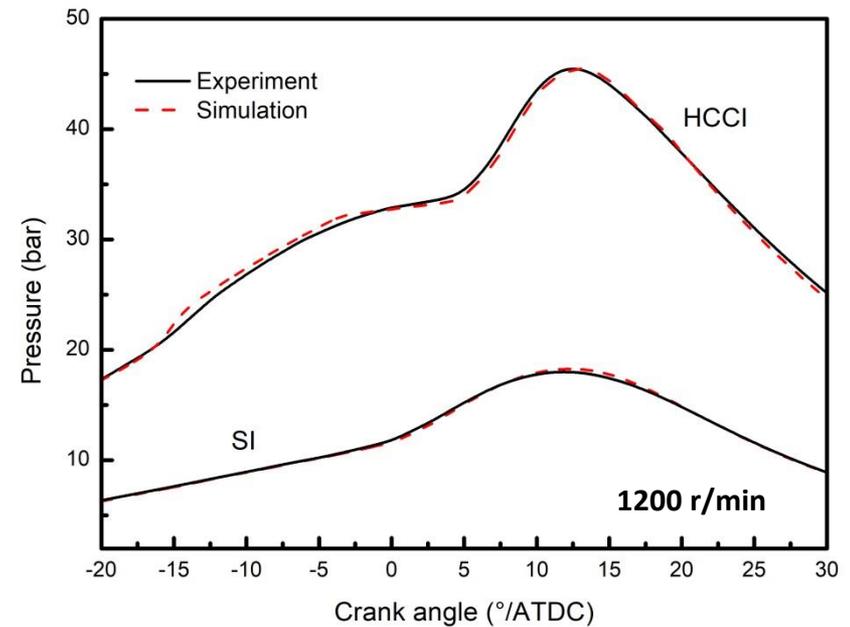
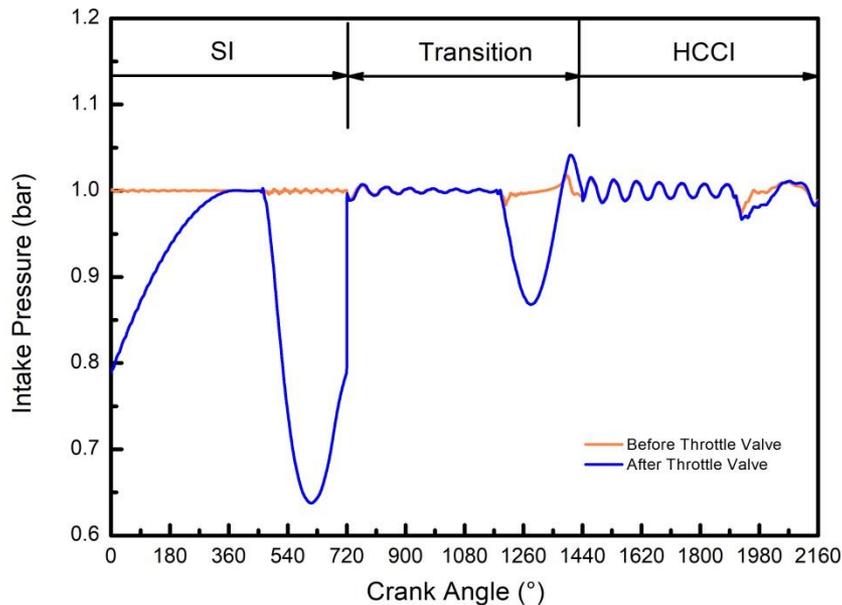




第一个循环为发动机点火循环，燃料喷射为汽油；**第二个循环**为SI/HCCI转换的循环，同时喷射汽油和正庚烷，且使用火花塞点火；**第三个循环**为HCCI循环，喷射汽油和正庚烷，依靠上止点附近的高温自着火。
三种计算工况都保持发动机转速为**1200r/min**。

由于所计算的三个循环内节气门开度是在逐渐变化的，所以本文耦合了GT-POWER对**节气门前后的压力**进行了模拟。其中红线为节气门前的压力；蓝线为节气门后的压力。

本文工作**仅对第一个循环的初始条件进行了设定**，缸壁壁面温度为420K，活塞表面温度为450K，燃烧室顶面温度为450K。**其余两个循环是将上个循环计算后的结果映射做为初始条件**，仅重新输入了边界条件（进气压力，流量，喷油量等）。



1

背景介绍

2

实验设备及方法

3

计算模型设定和方法

4

结果分析与讨论

5

结论

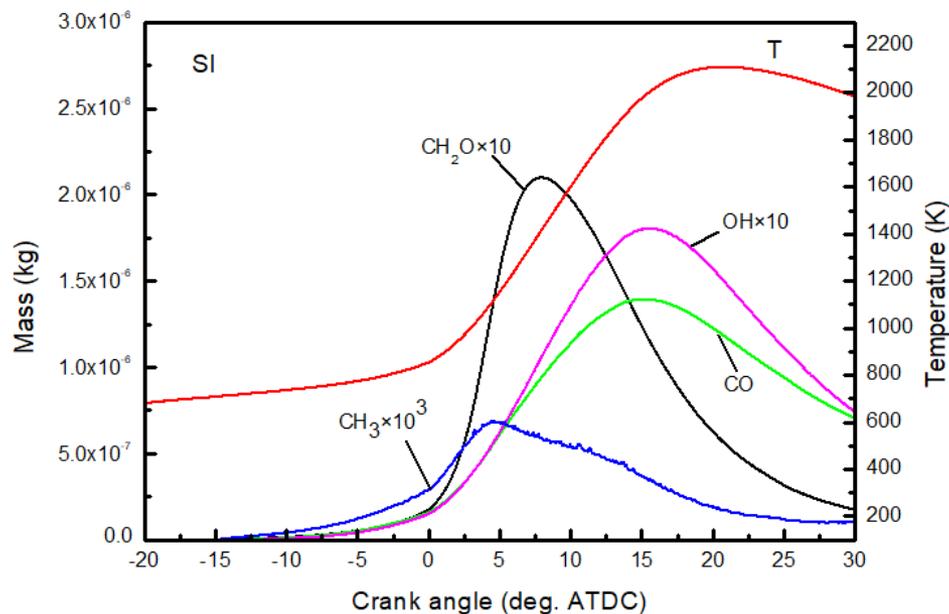
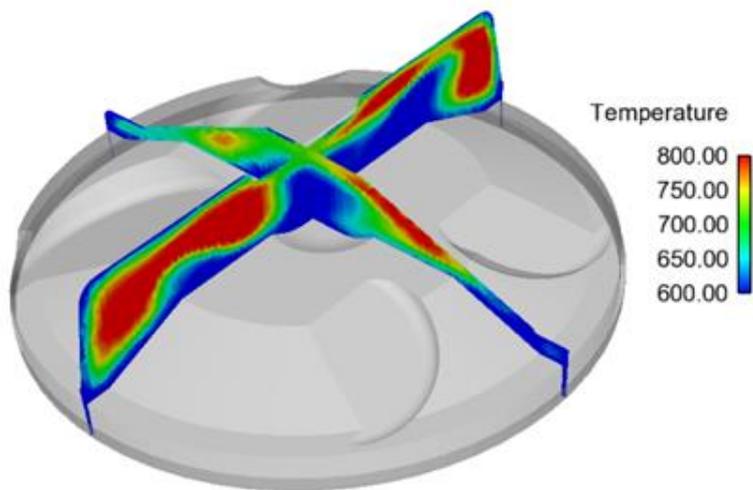


4.结果分析与讨论



SI工况

SI工况计算主要为后续的模拟工作提供初始条件。左图为燃烧结束后，下一循环的进气门开启时刻的缸内温度场分布。

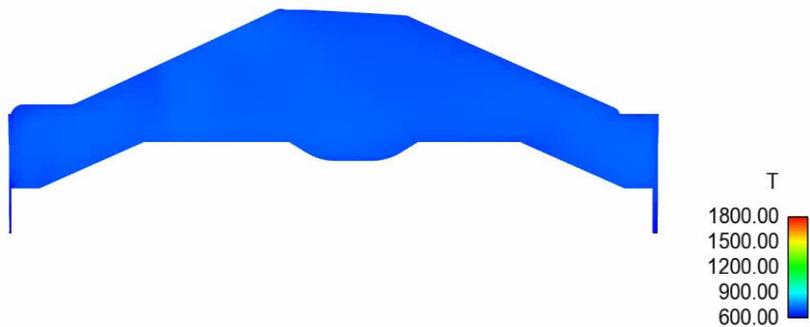


右图为SI循环燃烧过程中缸内温度与未完全燃烧产物CO，醛类（以CH₂O为例）和活性基团（OH,CH₃为例）的关系。

转换模式与HCCI模式温度云图

转换模式

Crank_angle = -25.9742

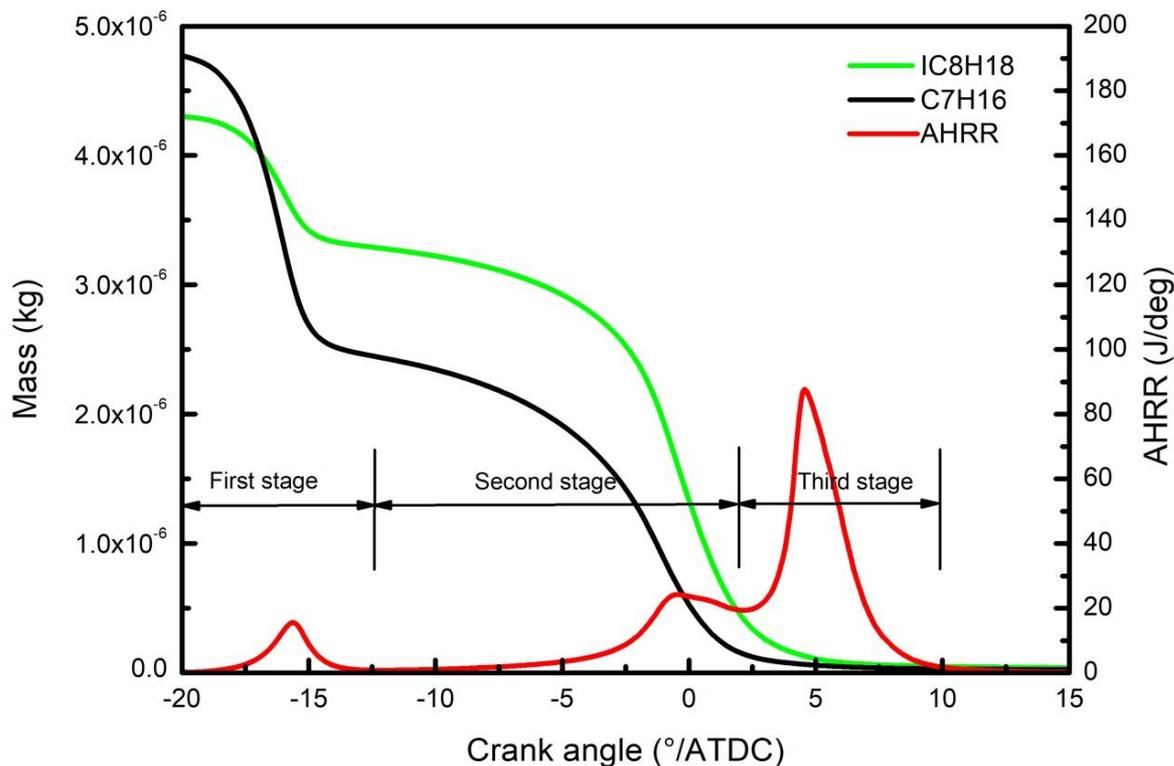


HCCI



温度场分析

与只喷射汽油的SI循环相比，转换过程多了第一阶段的低温放热，且第二、三阶段放热率曲线呈靴状。

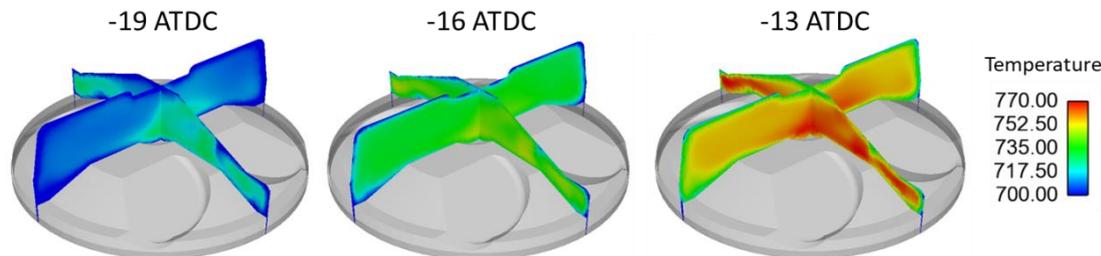


在低温放热阶段（-18.6°到-13°ATDC），约46.7%的正庚烷以及22.3%的汽油被消耗。

第二、三阶段放热为主燃烧阶段，主要是剩余的大量汽油以及少量正庚烷的燃烧。

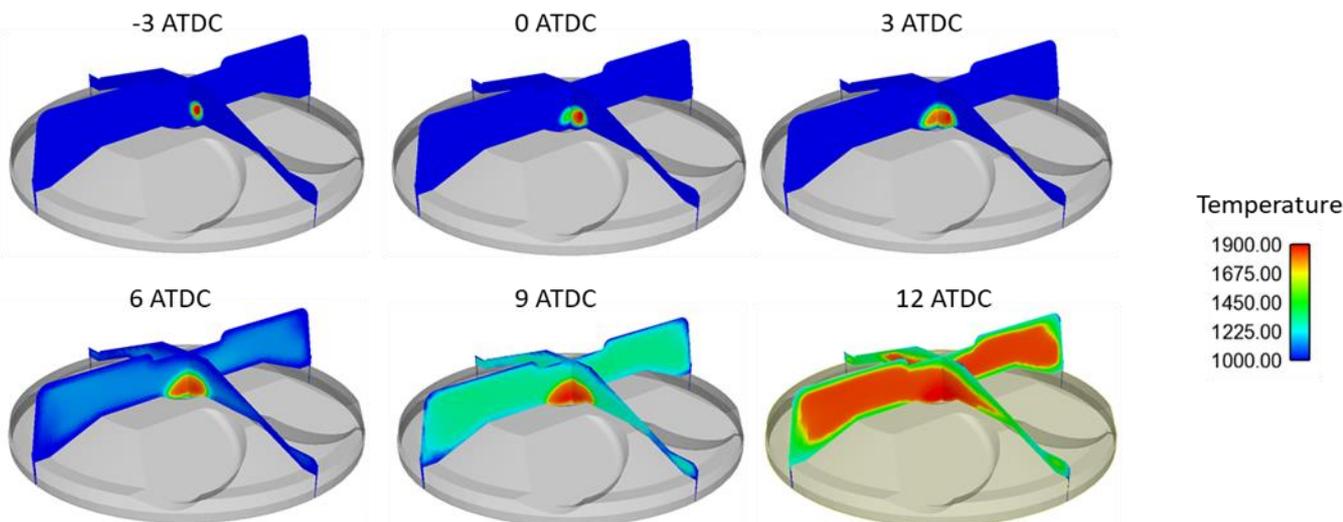
温度场分析

在**低温放热阶段**，缸内温度梯度很小，燃料（正庚烷为主）开始多点着火。



转换工况低温放热阶段缸内温度场分布

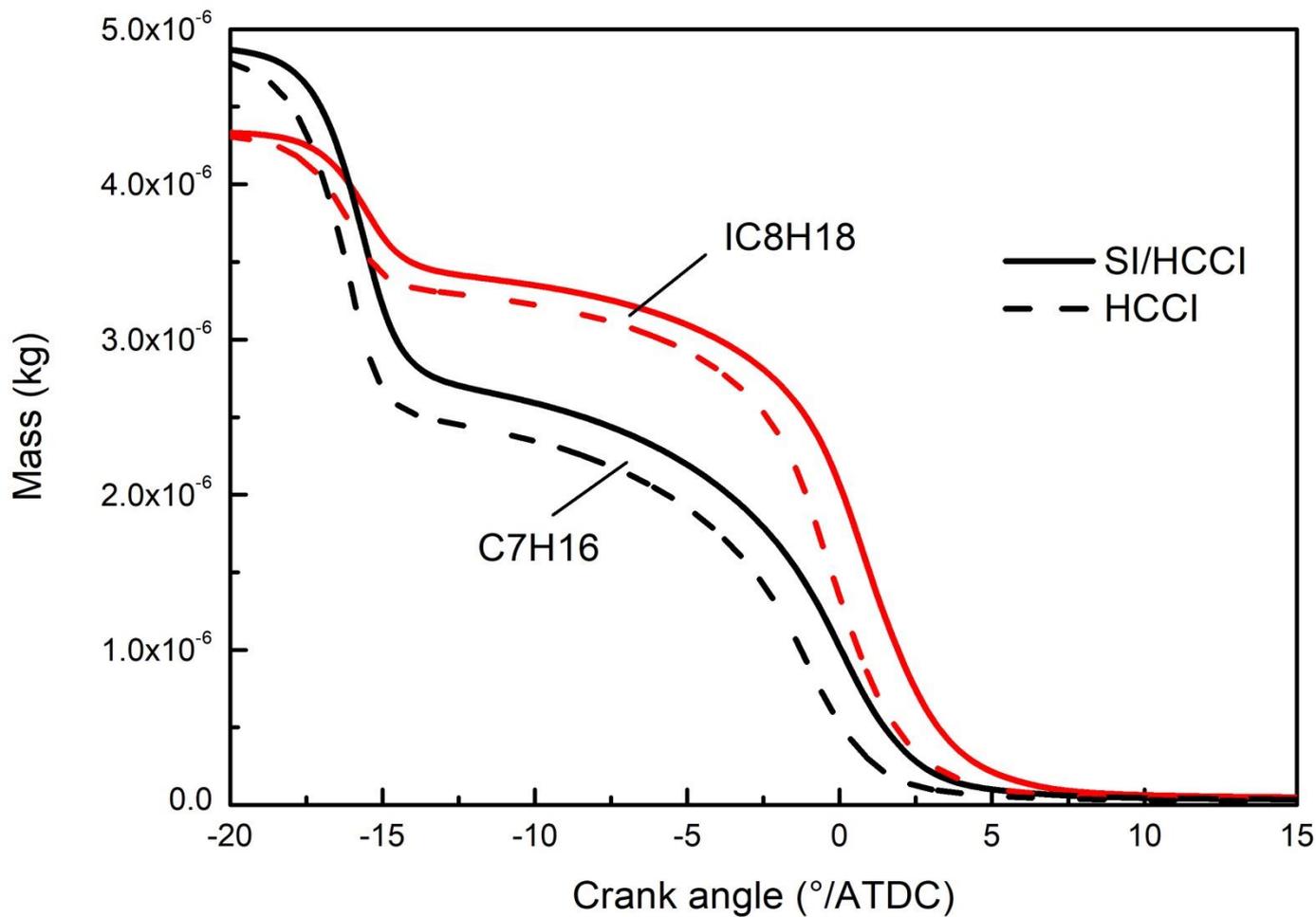
在**高温放热阶段**，-3ATDC时可以看到燃烧中心在火花塞附近产生。从6ATDC到12ATDC时，缸内的整体温度逐步提高。



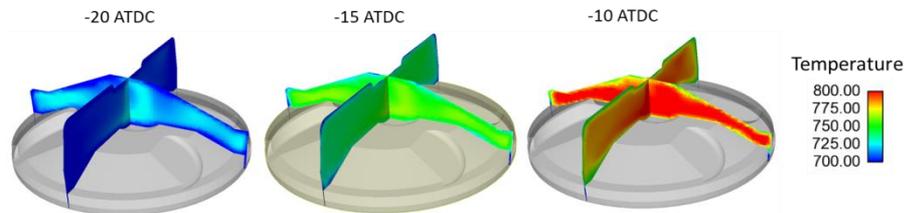
转换工况高温放热阶段缸内温度场分布

温度场分析

转换工况与HCCI工况的燃料消耗对比图



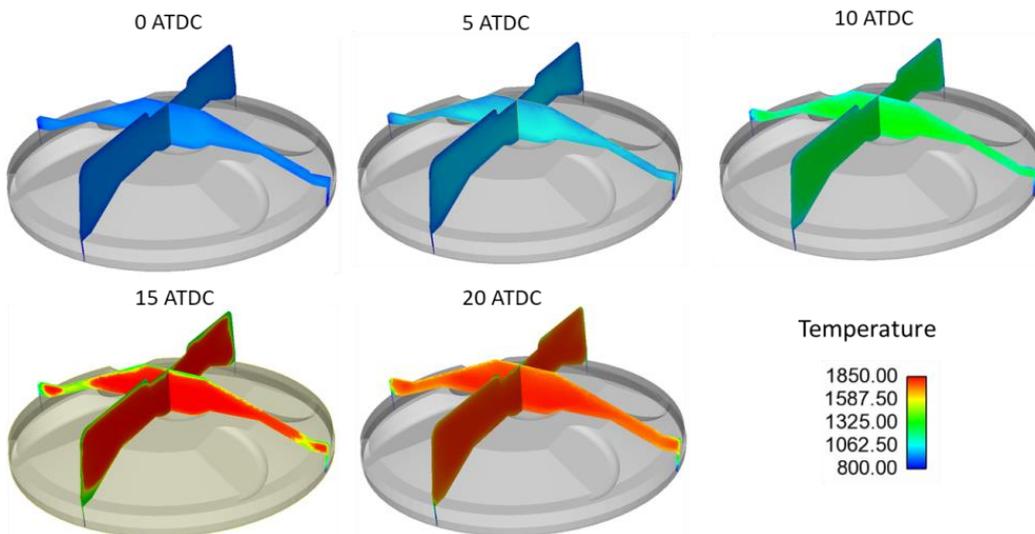
温度场分析



双燃料实现模式转换的原因一：

较SI/HCCI转换循环而言，HCCI模式低温放热阶段持续期增长，更多的燃料被消耗，使得低温放热结束后缸内平均温度提高了50K。

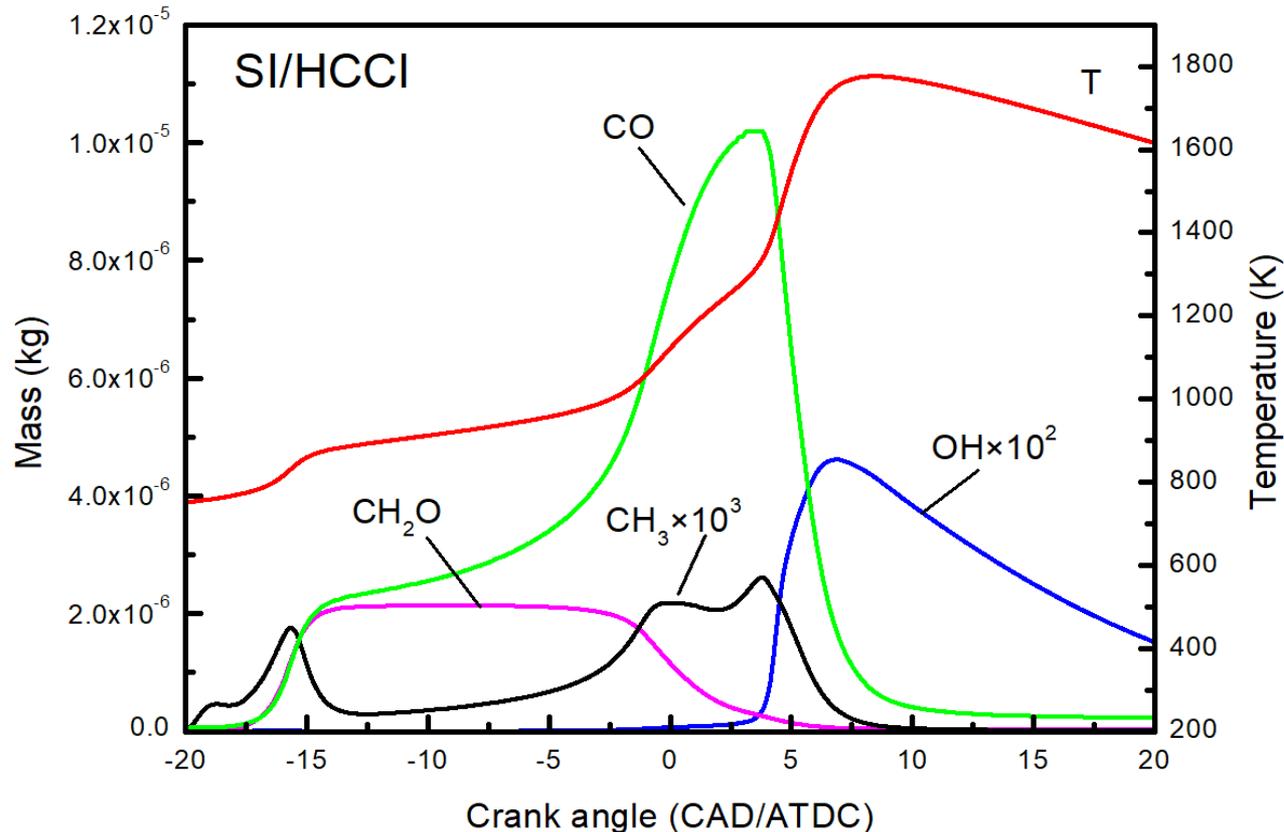
HCCI低温放热阶段缸内温度场分布



HCCI高温放热阶段缸内温度场分布

浓度场分析

SI/HCCI工况



HCCI模式下缸内未完全燃烧产物和活性基团生成的规律与SI/HCCI转换模式相同，但是CH₂O，CH₃，OH以及CO的峰值都较SI/HCCI模式有所下降

浓度场分析

PPM	CO	OH	CH ₂ O	CH ₃
SI	153.12	0.0021	3.08	0.0050
SI/HCCI	2039.60	0.75	11.33	0.095
HCCI	731.53	0.062	8.89	0.023

三种工况下缸内残留产物质量

双燃料实现模式转换的原因二：
主燃烧结束之后，SI/HCCI循环剩余的CO，
醛类（CH₂O等）和活性基团（OH，CH₃等）
较普通SI循环结束后高1-2个量级。

1

背景介绍

2

实验设备及方法

3

计算模型设定和方法

4

结果分析与讨论

5

结论



5. 结论



针对双燃料发动机SI/HCCI模式转换进行了实验和模拟研究，得到如下结论。

- (1) 经过试验验证，基于双燃料喷射的模式切换速度快，一个循环后就可以不再使用火花塞点火进入HCCI模式。
- (2) 在SI/HCCI转换模式中，放热分为低温放热和高温放热两个阶段。其中高温放热率曲线呈靴形，同时具有火花点火式的火焰传播特征与HCCI的多点着火特征。
- (3) HCCI模式没有失火的原因主要有两个：第一是较转换模式而言，低温放热持续期长导致更多的燃料被消耗，使得低温放热缸内平均温度提高了50K。第二是转换循环结束后，燃料燃烧并不十分完全，缸内残存着未完全燃烧产物（CO，CH₂O）以及微量的活性基团。

致谢



感谢上海汽车集团股份有限公司技术中心、上海汽车工业科技发展基金会（“高效汽油机关键技术研究”）对本文工作的资金支持。

感谢课题组成员对作者研究内容的帮助与建议。

谢谢！

