



天津大学  
Tianjin University



内燃机燃烧学国家重点实验室  
State Key Laboratory of Engines  
Tianjin University

## 第一届青年燃烧会议

# SI发动机Low-speeding & Down-sizing 趋势下缸内非正常燃烧过程研究与控制

汇报人：卫海桥

单位：天津大学内燃机国家重点实验室

2015年09月19日

# 一、过去的工作

---

# 点燃式发动机不正常燃烧现象

## ✓ 现实意义

### 1、节能减排

- 石油消耗总量：60%
- CO<sub>2</sub>排放约占我国CO<sub>2</sub>排放的10%
- 汽油机市场保有量大，节能潜力很大

### 2、节能新技术

- 内燃机小型强化技术

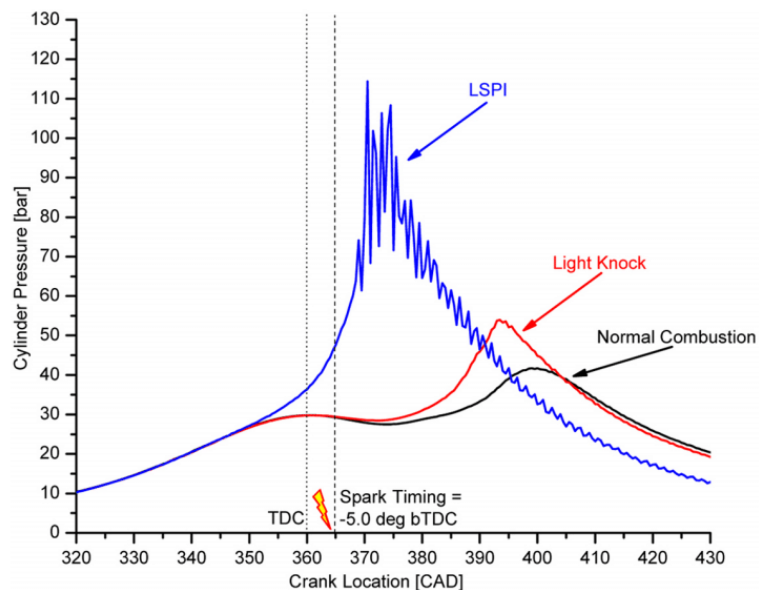
## ✓ 不正常燃烧现象

### 1、爆震燃烧

- 含义：火花塞点燃以后，末端未燃气体发生自燃
- 燃烧特征：强烈的压力振荡/冲击波存在
- 消除措施：延迟点火、降低压缩比等

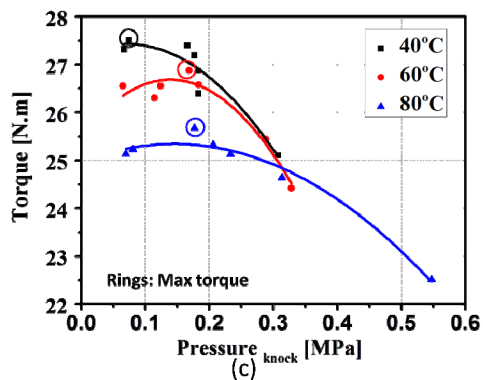
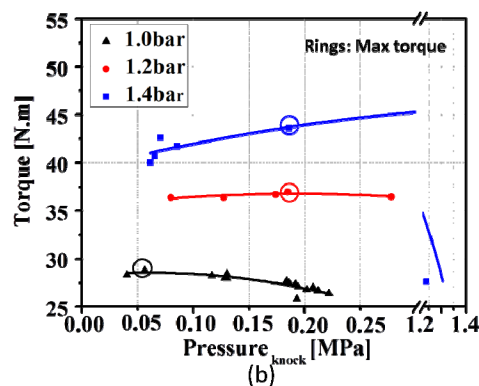
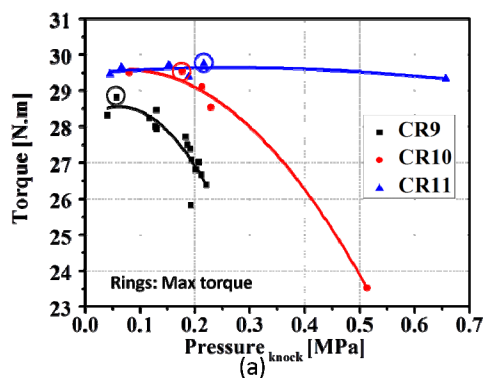
### 2、早燃

- 含义：火花塞点火之前的随机的自燃现象
- 燃烧特征：更加强烈的压力振荡
- 与爆震燃烧的区别：时空分布、强烈程度、形成机理、消除措施

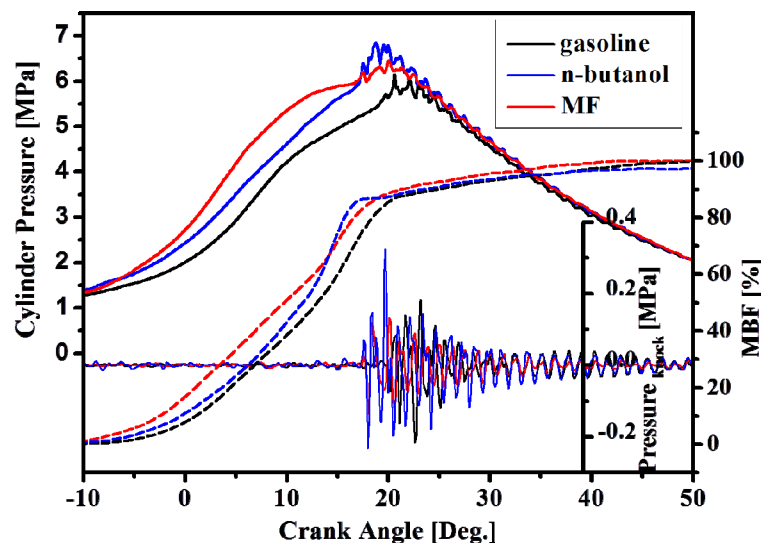


# (1) 爆震、早燃调控实验研究-1

- **关键控制参数爆震调控试验，研究发现：**轻微爆震时（ $<0.2\text{MPa}$ ）有效输出扭矩最大；相对进气压力、进气温度等控制参数，输出扭矩随爆震强度变化的敏感性受压缩比影响最为明显。
- **不同燃料（正丁醇、2-甲基呋喃等）爆震燃烧特性试验研究，发现：**末端未燃混合气自燃倾向和爆震强度主要取决于燃料辛烷值，燃料蒸发汽化潜热和燃烧速率对末端混合气温度、压力有显著影响。



不同压缩比、进气压力、进气温度下，发动机扭矩随爆震强度变化趋势

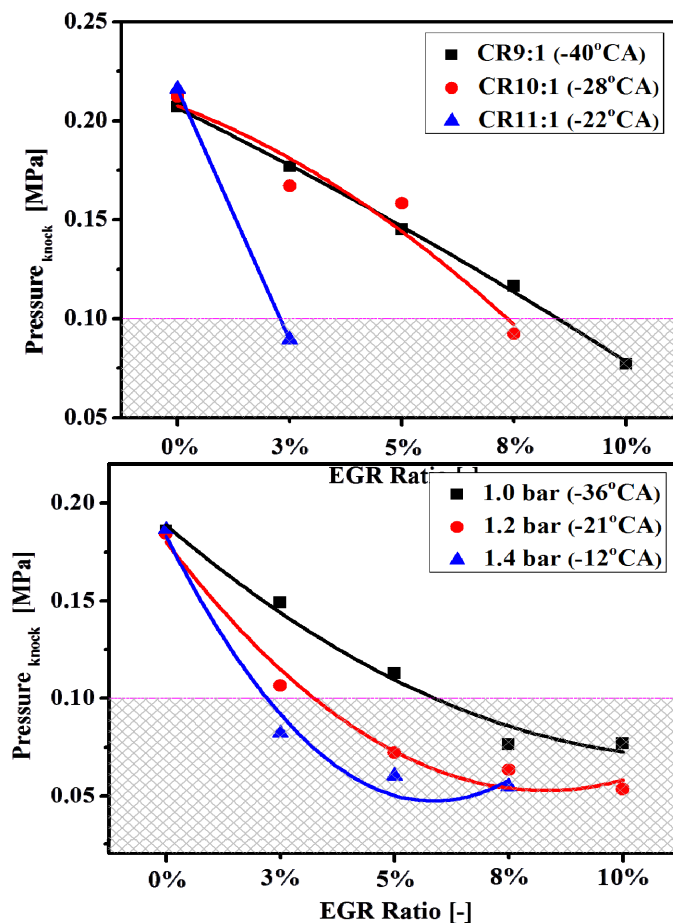
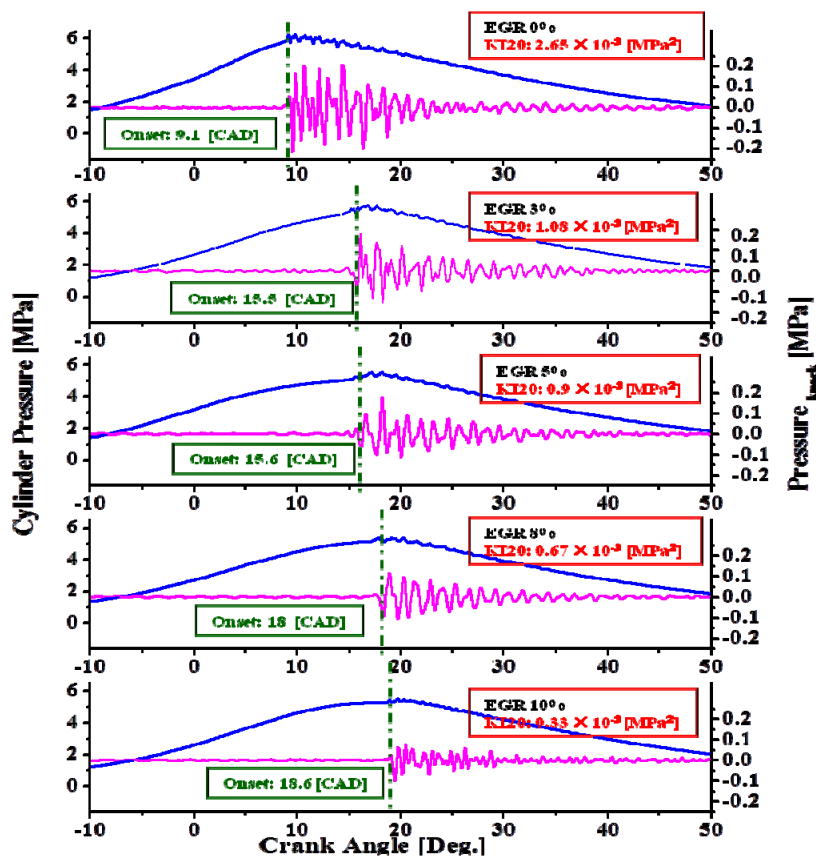


相同点火时刻下正丁醇、2-甲基呋喃和汽油爆震燃烧特性对比



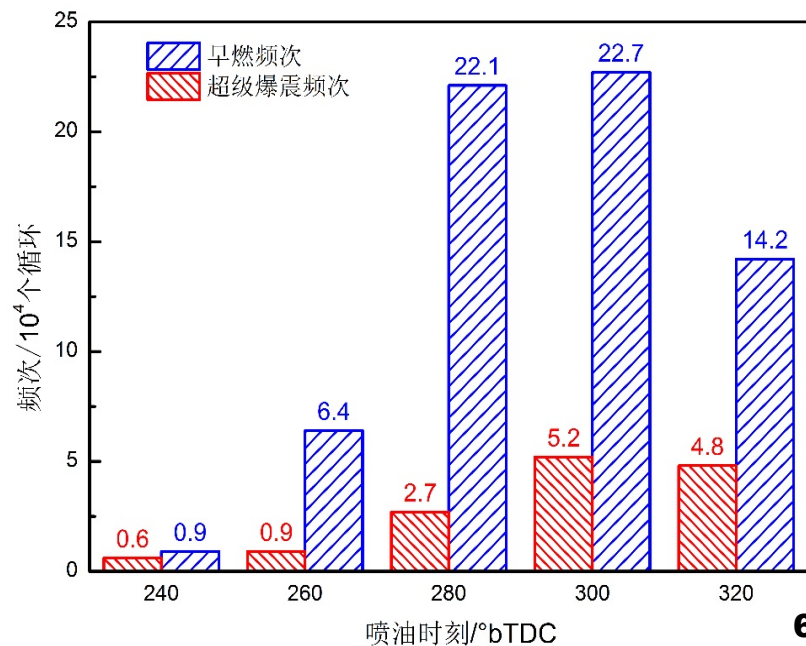
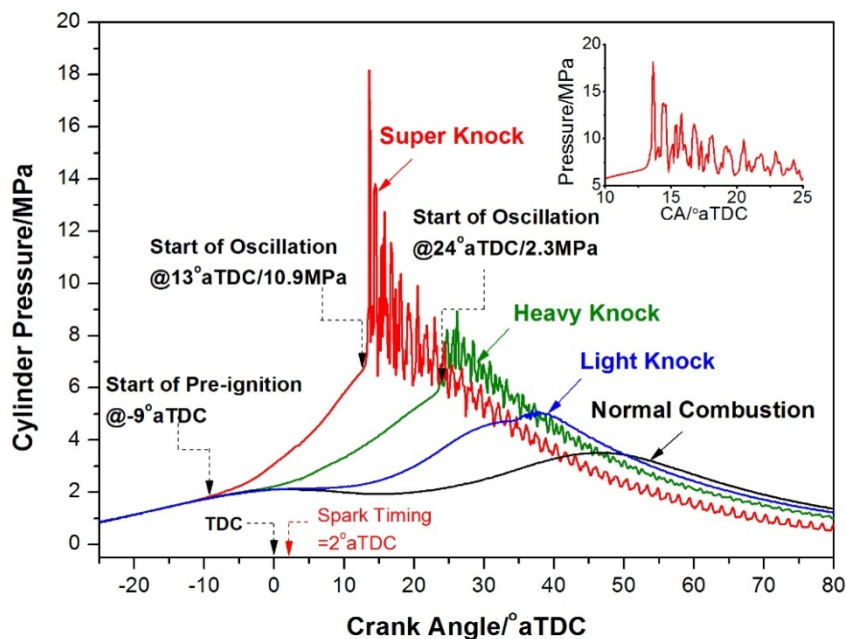
# (1) 爆震、早燃调控实验研究-2

- 废气再循环 (EGR) 爆震调控试验研究, 发现: 随EGR率增大, 自燃时刻推迟, 爆震强度显著降低; 基于相同爆震强度, 在高压压缩比和高进气压力下, EGR抑制爆震效果明显。

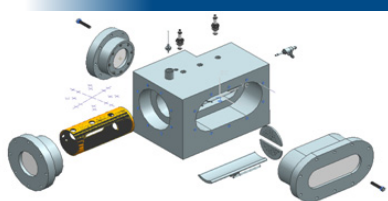


# (1) 爆震、早燃调控实验研究-3

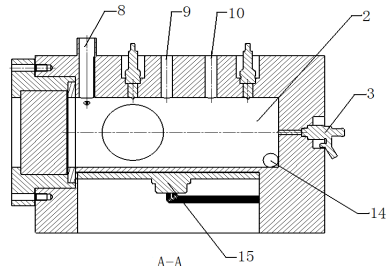
- 早燃特征试验研究**：早燃发生时**不一定**导致具有极高爆发压力和强烈压力振荡的“超级爆震”现象发生，**压力突变产生的时刻**对压力震荡强度及缸内燃烧过程有显著影响。
- 喷油策略的早燃抑制试验**：推迟喷油时刻，早燃和超级爆震的频次均呈现先增大后减小的趋势。喷油时刻推迟后燃油湿壁加重使得润滑油更容易进入燃烧室，但同时由于活塞顶面形成的燃油油膜减少而导致碳烟排放显著降低。由于早燃频次的改变并随喷油时刻变化呈线性关系，因此推测早燃热点的形成原因可能是**润滑油和高温碳烟颗粒物共同作用**的结果。



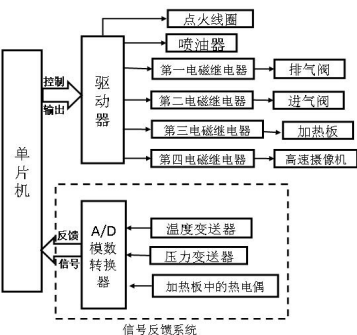
## (2) 基于定容燃烧弹的实验研究



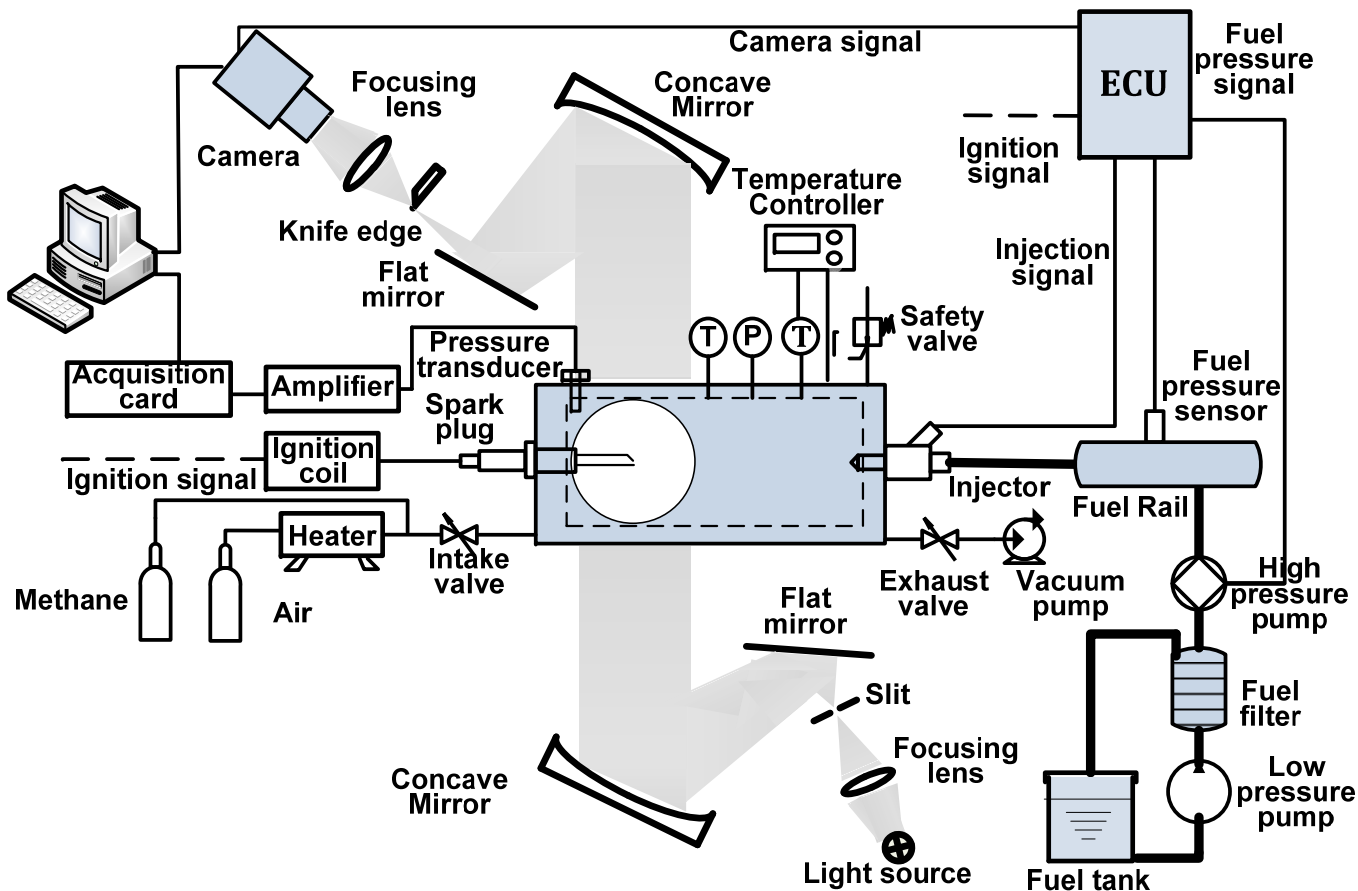
1. 三维模型



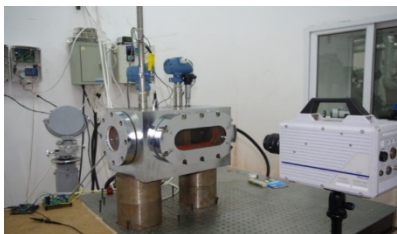
2. 二维剖视图



3. 控制部件组成示意图



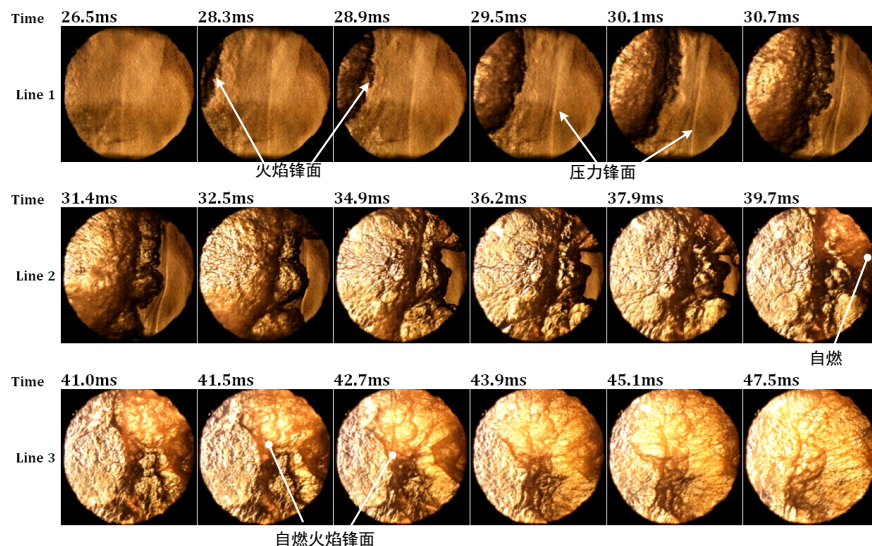
实验装置示意图



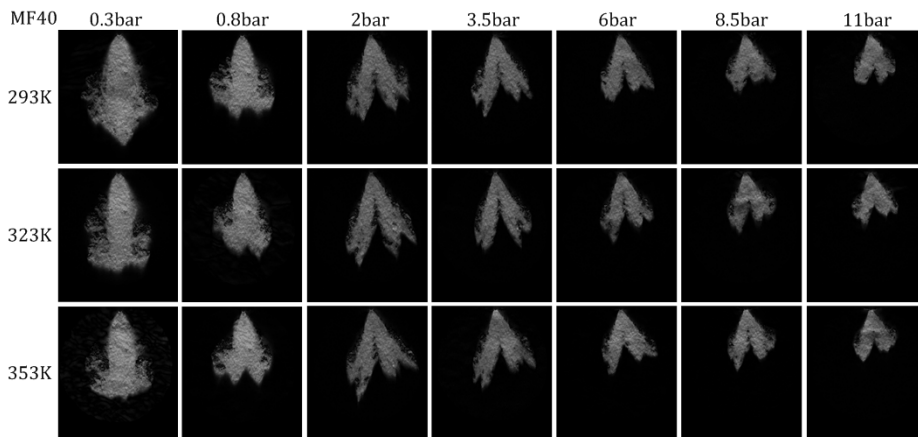
4. 实物图

- 不同燃料在多种初始条件下的层流、湍流火焰传播实验
- 不同环境背压和燃油温度下的喷雾实验
- 不同热力学状态、混合气成分下末端混合气自燃试验

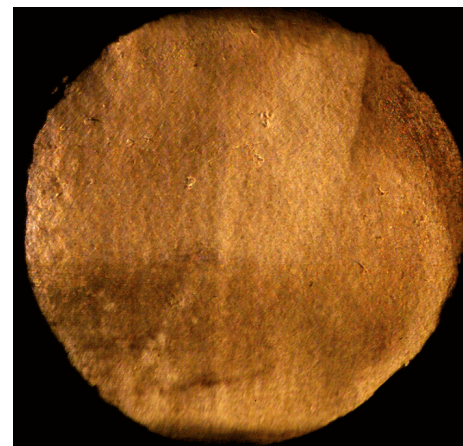
## 2-1 火焰传播、喷雾实验



穿孔板的湍流火焰传播试验

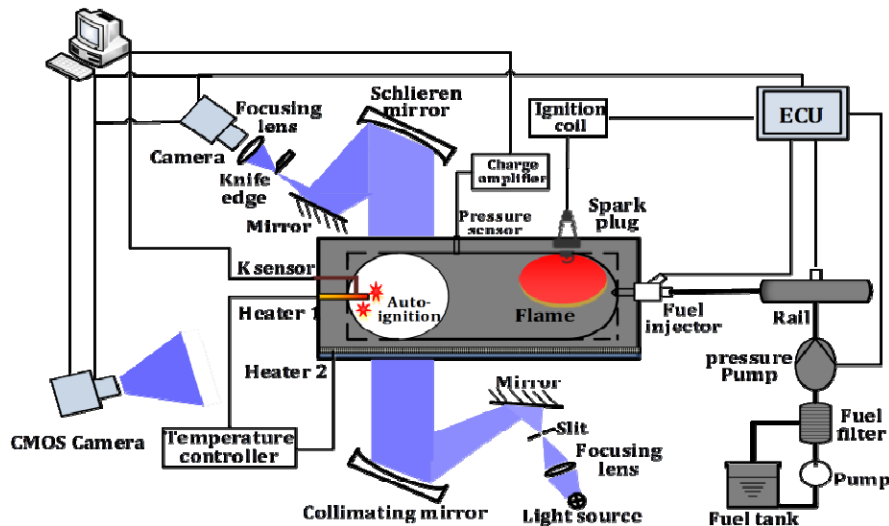


MF40在不同环境背压和燃油温度下的喷雾  
(喷油时刻1ms后)

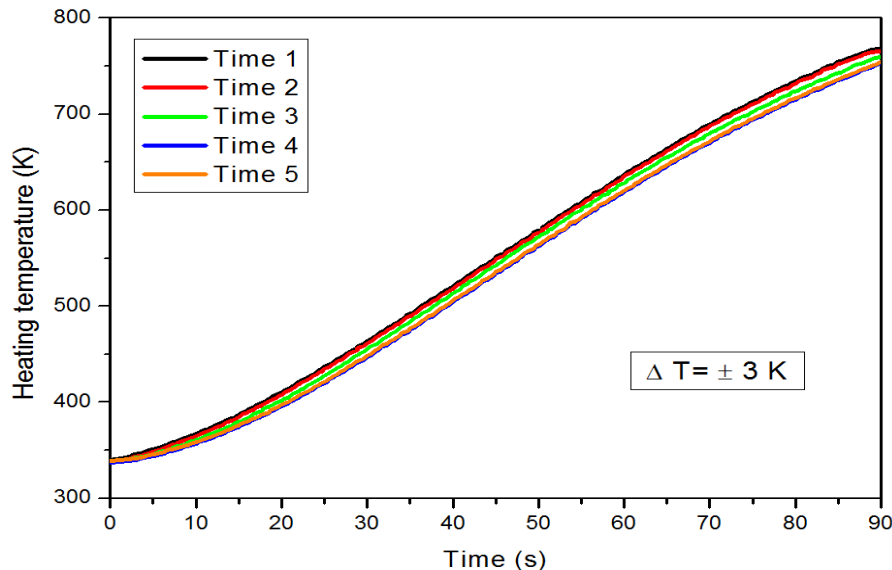




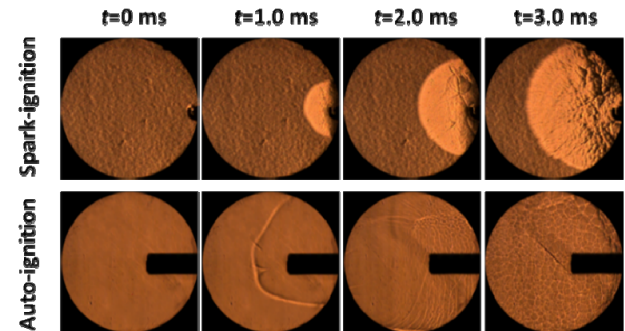
## 2-2 末端混合气自燃实验



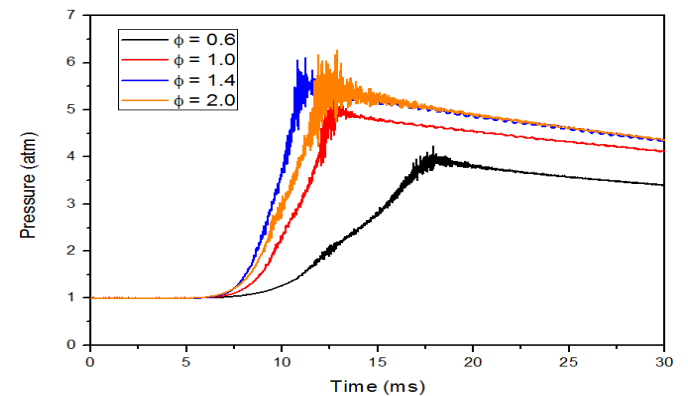
实验装置示意图



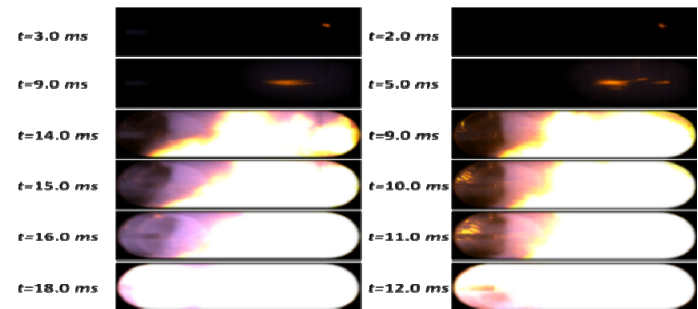
加热温度-时间变化



加热棒诱导末端自燃



不同当量比下容弹内压力-时间曲线

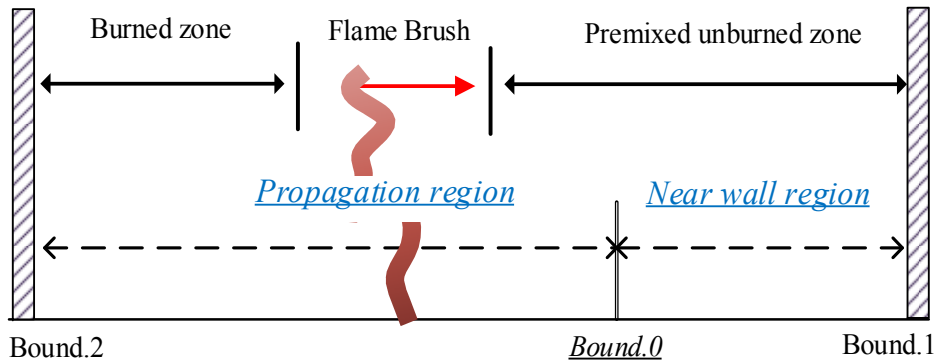


(a)  $P = 1 \text{ atm}, \phi = 0.6$  (b)  $P = 1 \text{ atm}, \phi = 1.0$

点燃及自燃火焰传播过程

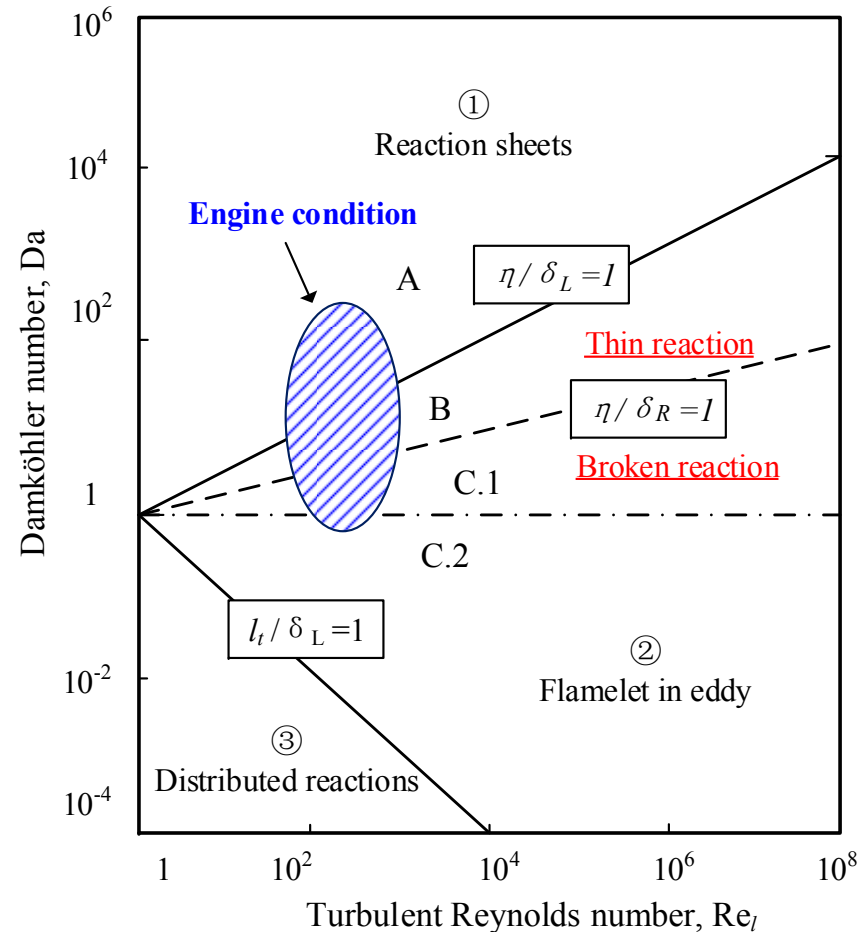
### (3) 封闭空间内湍流-燃烧相互作用

- SI发动机缸内的湍流燃烧模式处于反应火焰面与漩涡小火焰模式之间。
- 湍流涡团可能进入火焰结构，作用于**预热区的热量及组分输运过程**，故传统的flamelet model的适用性存在挑战。
- **Linear eddy mixing model** 研究湍流作用于缸内燃烧过程，包括末端的自燃过程以及主火焰的传播过程。



缸内燃烧过程

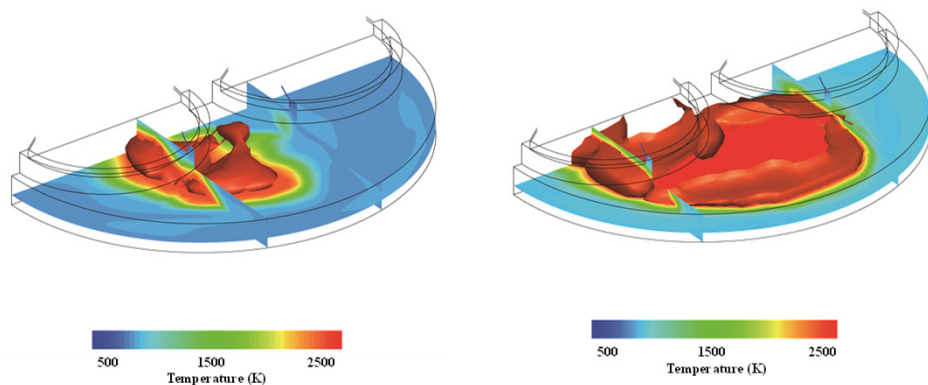
(包括主火焰传播与末端混合气的自发反应过程)



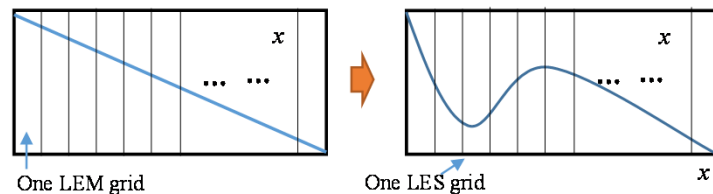
湍流燃烧区域

# 3-1 基于KIVA的LEM+LES

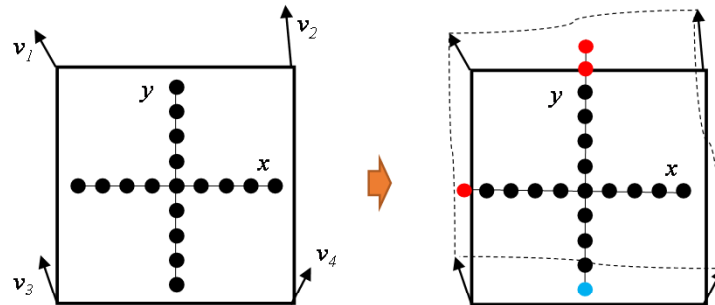
- 耦合LEM与LES 多维CFD程序，结合高效并行加速算法为定量研究内燃机缸内爆震及早燃燃烧过程中的湍流-燃烧相互作用（Turbulence combustion interaction）提供分析工具。
- 拟基于优化后的多维程序开展不同湍流尺度、湍流强度对火焰传播特性的影响，以及湍流作用下存在温度、组分不均匀分布的高碳链分子的自然过程的模拟研究。



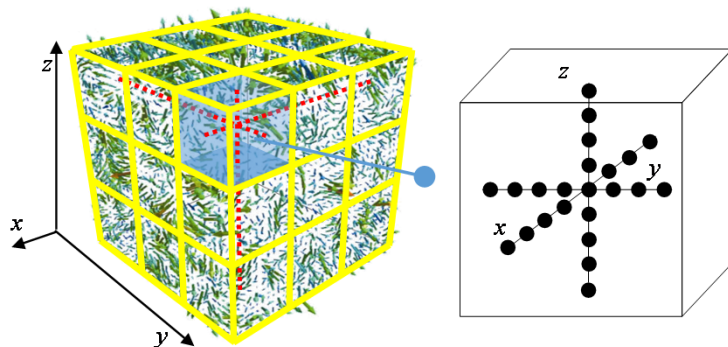
LES-LEM 多维模拟部分计算结果截图



(a) Triplet map in one 1-D LES grid



(b) Volume change-induced convection in one 2-D LES grid

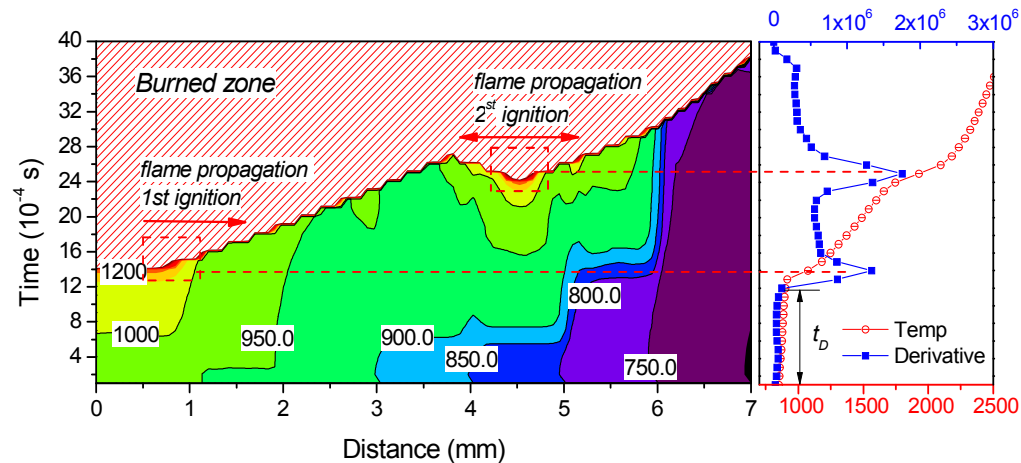
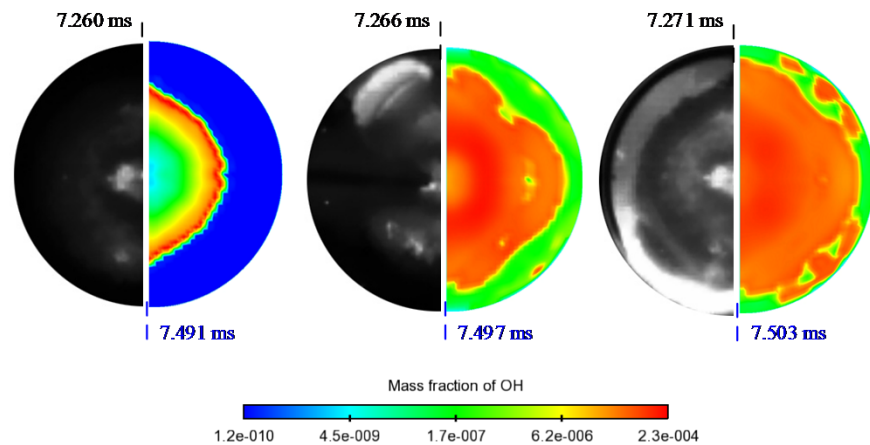


(c) 3-D LES-LEM computational grid

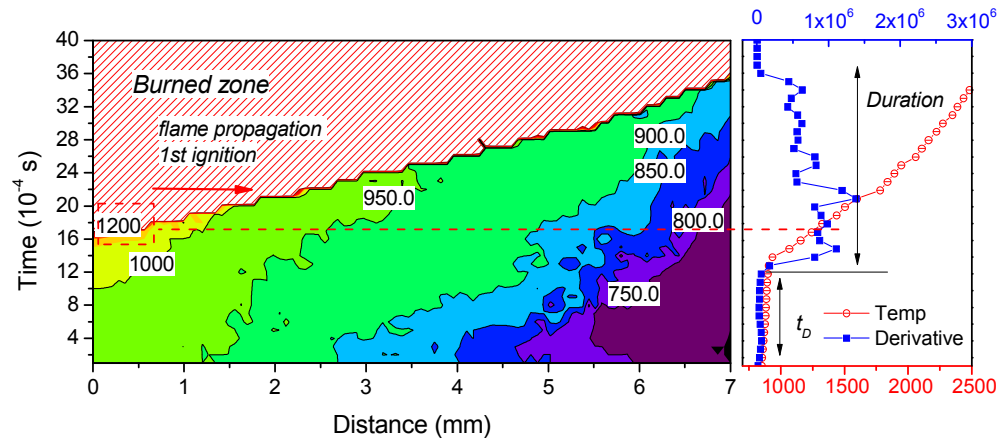
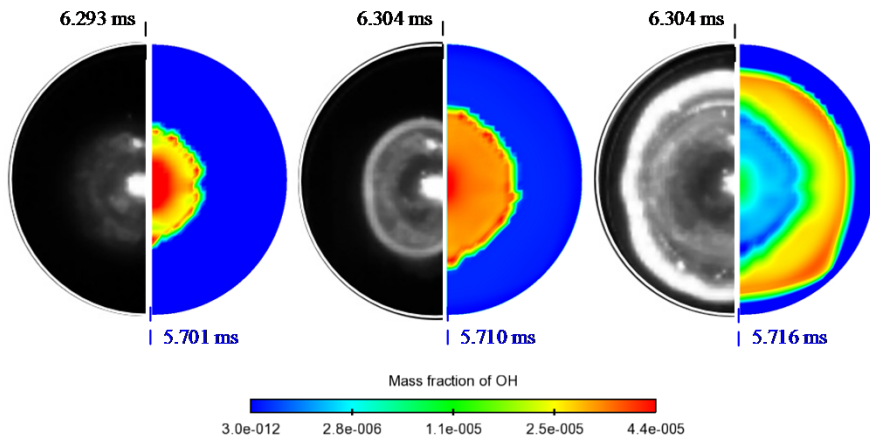
LES-LEM 中亚网格尺度下湍流对标量  
输运过程的影响示意

## 3-2 湍流强度对燃烧过程的影响

从KIVA计算结果中，抽取典型非正常燃烧工况下，缸内的湍流脉动强度，在LEM code中进行1-D计算分析。



小湍流作用下的自燃过程（存在明显NTC现象）



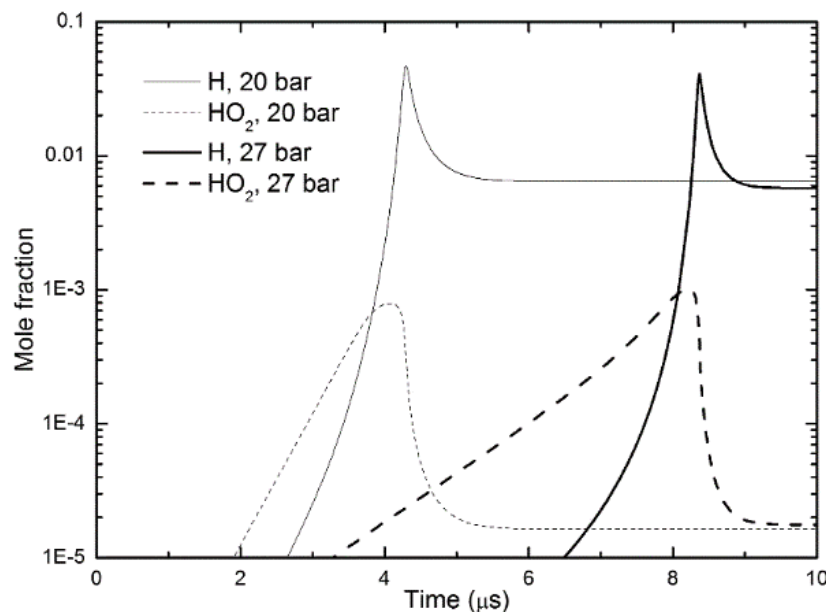
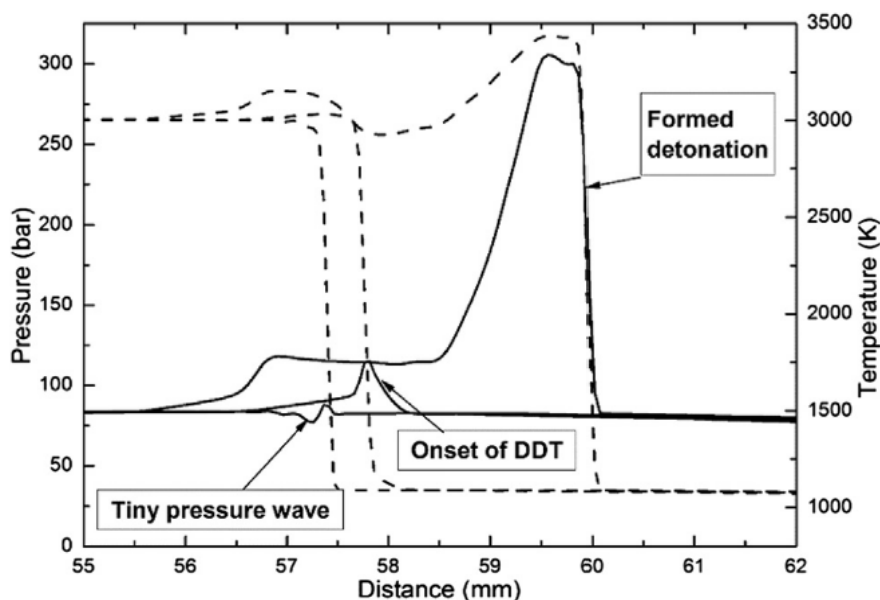
较强湍流作用下的自燃过程（NTC现象不明显）



## (4) 压力突变-燃烧相互作用研究

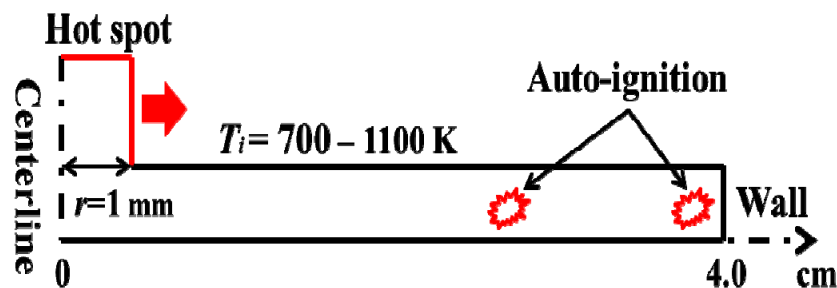
### 4-1 火焰加速与压力波的相互作用

- 压力波在缸内的来回反射会提升未燃气体的活性，同时对火焰面产生滞止和推动作用；
- 燃烧产生的压力波经壁面反射会使末端气体升温并产生温度不均匀性，由此会引发多点自燃和压力振荡；
- 压力波在燃烧室内的不断传播会加强火焰传播甚至引发DDT过程。

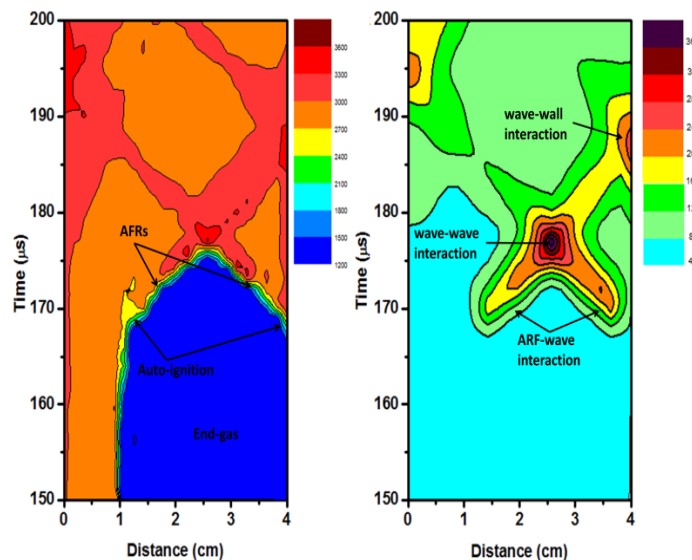
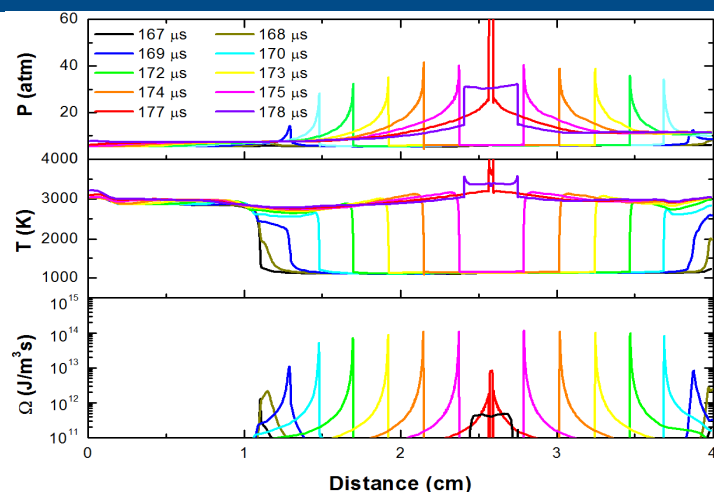
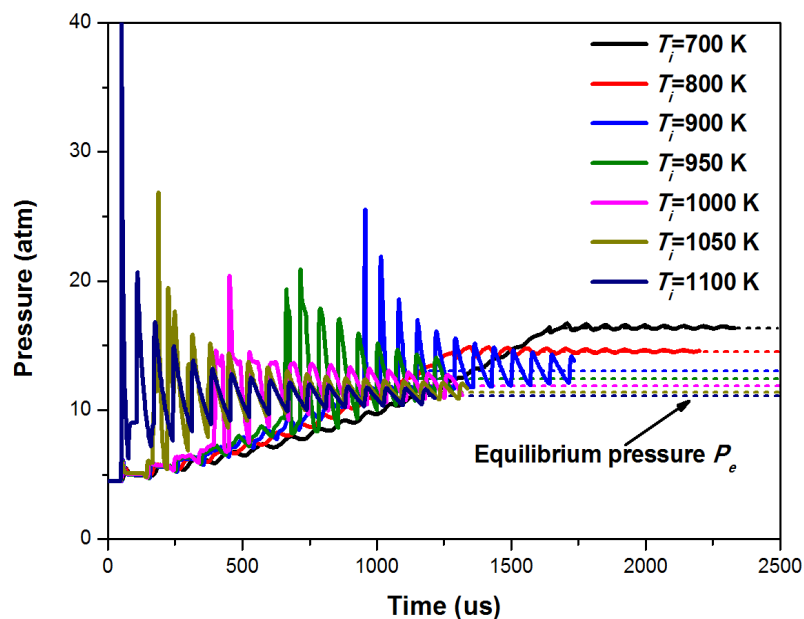


幅值较低的压力波追赶上火焰面后两者相互加强导致了DDT的发生，压力波峰值由约80bar升高至300bar，由于燃烧非常剧烈，同时产生了一个向相反方向传播的压力波，峰值为125bar

## 4-2 热点形成及自燃后压力突变的形成



一维数值模型示意图



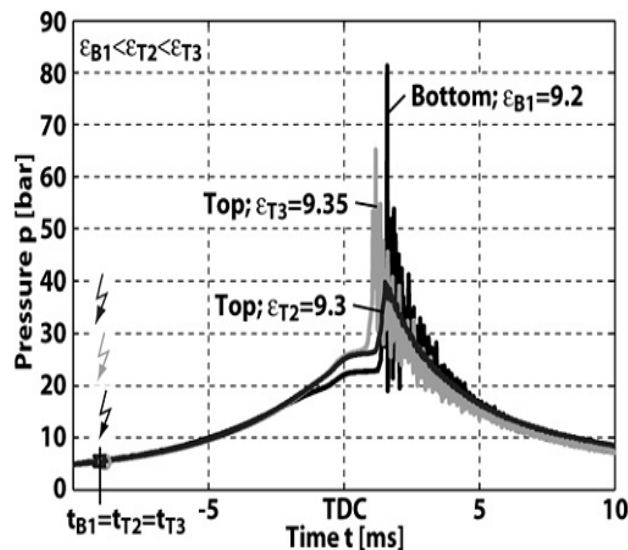
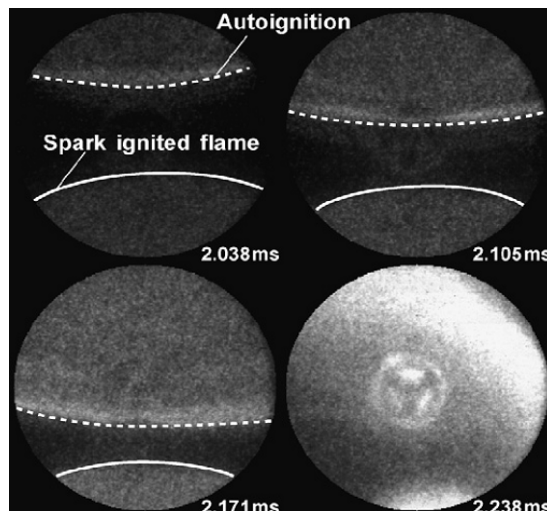
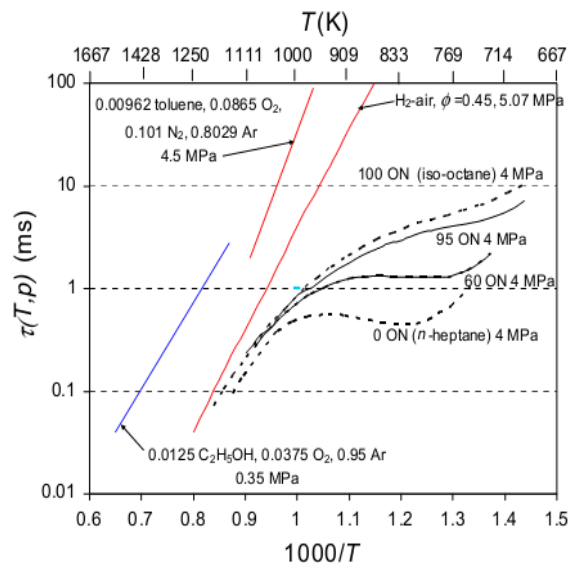
- 热点自燃的瞬时释热导致压力突变；
- 压力突变诱导产生更多的局部热点；
- 局部热点和火焰前锋的相互作用有可能使燃烧模态从亚声速缓燃向超声速爆燃转变。

## 二、本方向前沿、难点及国际进展

---

# 爆震和早燃的共性问题

**无论是爆震、还是早燃问题，都起源于未燃气体的自燃！**



## ■ 自燃条件

- 热力学状态、空燃比等的非均匀性
- 已燃气体的热对流与热辐射
- 已燃气体的组分扩散

## ■ 自燃的化学动力学特性

- 自燃化学反应和输运特性
- 燃料及机油对滞燃期影响
- 不同自由基及火焰结构对自燃的影响

## ■ 自燃、压力振荡、强度

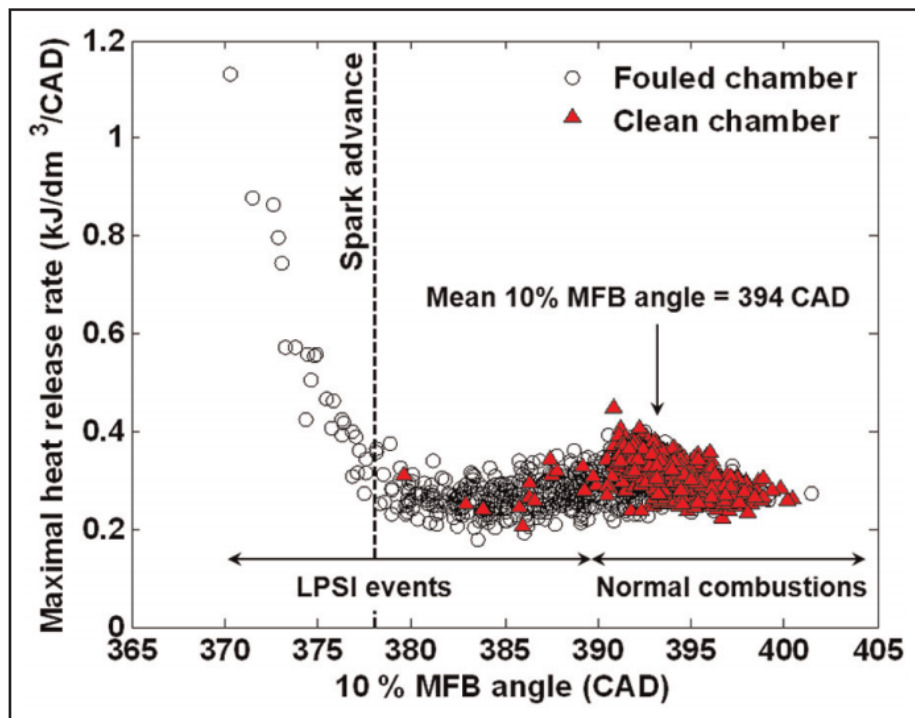
- 自燃不一定发生爆震
- 自燃模式决定了火焰传播和压缩波特性

自燃后产生的压力扰动会在燃烧室内形成**不同强度的压力突变**（压力波、激波或爆轰波），**压力突变与湍流火焰的相互作用**最终决定了爆震及早燃的燃烧过程。

# 前沿与难点--早燃产生“源”尚不明确

- 由颗粒物（碳烟）导致的早燃现象：

通过早喷和加浓混合气制造高颗粒物排放“环境”，发现低速早燃频次明显升高，并指出：**沉积物（碳质的或灰分）可能在壁面积累并形成局部高温，剥落后诱发混合气发生早燃，缸内压力振荡可能会导致沉积物剥落。**



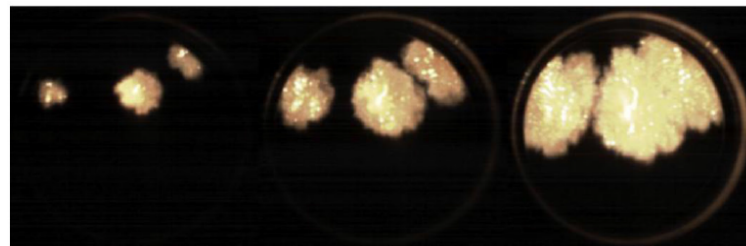
Kawahara N, Tomita E. Visualization Of Auto-Ignition And Pressure Wave During Knocking In A Hydrogen Spark-Ignition Engine. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(7):3156–3163

- 由润滑油自燃导致的早燃现象：

通过将润滑油喷入燃烧室，采用光学测量观测到了**润滑油液滴引发的早燃现象。**



CA=-7.2°aTDC CA=-2.4°aTDC CA=2.4°aTDC



CA=7.2°aTDC CA=12.0°aTDC CA=16.8°aTDC



CA=21.6°aTDC CA=26.4°aTDC CA=31.2°aTDC

Dingle, Simon F., et al. Lubricant induced pre-ignition in an optical SI engine. No. 2014-01-1222. SAE Technical Paper, 2014. 17/26

# 前沿与难点——调控手段处于探索阶段

- 早燃的调控手段目前仍处于探索阶段，目前常用手段包括**EGR**，多次喷射等。

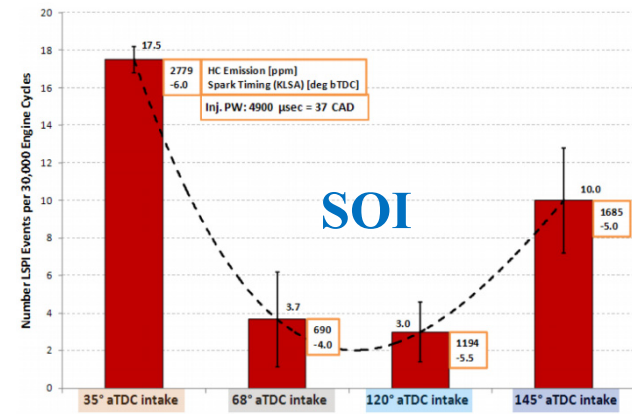
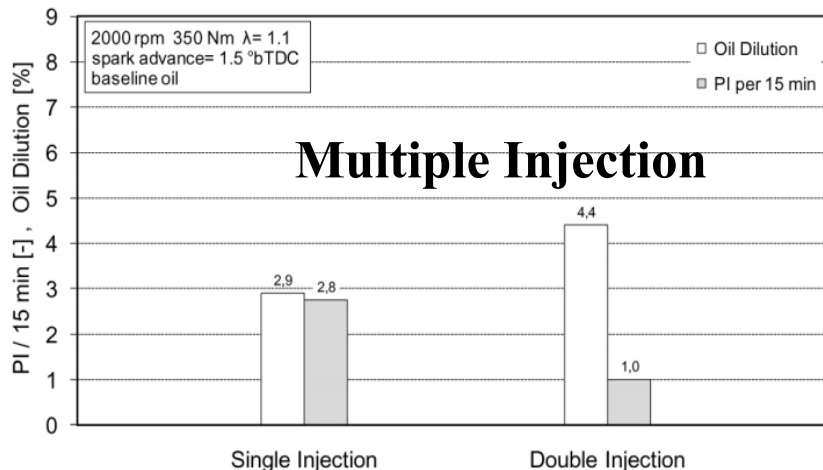
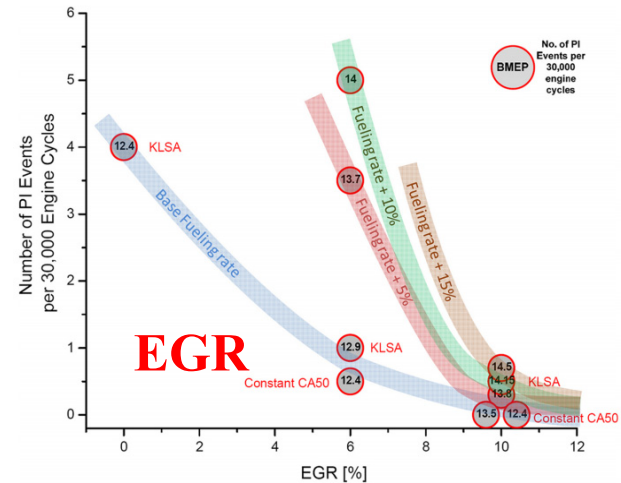
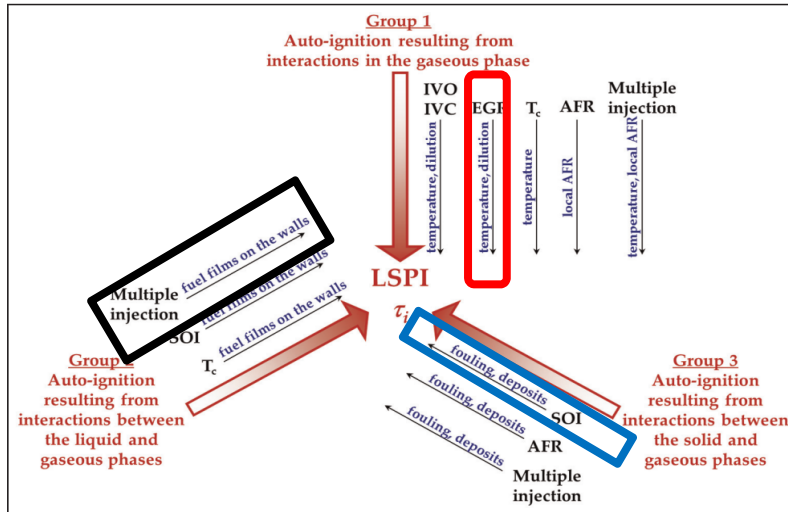


Figure 10. GDI Injection Timing Effects on LSPI



# 前沿与难点--共性问题研究手段

## 一、爆震/早燃燃烧过程的可视化研究：

- **热力学条件较难实现：**混合气自燃的控制（初始温度、压力，末端加热），燃烧爆发压力的限制（多采用 $H_2$ 和正庚烷等）；
- **具有随机性和瞬变性：**不适合稳态测量；
- **压力波和火焰面的同时捕捉：**传播速度不同，表征信号不同（光强/自由基，密度场）；

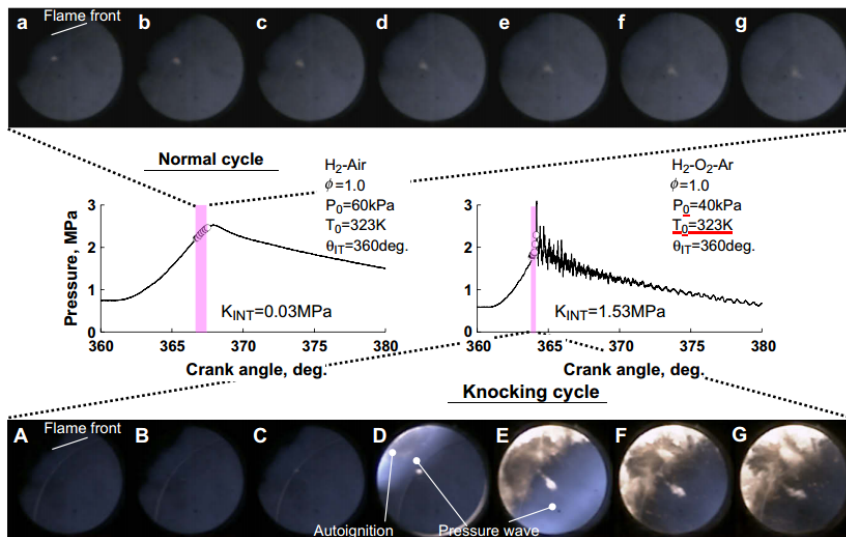
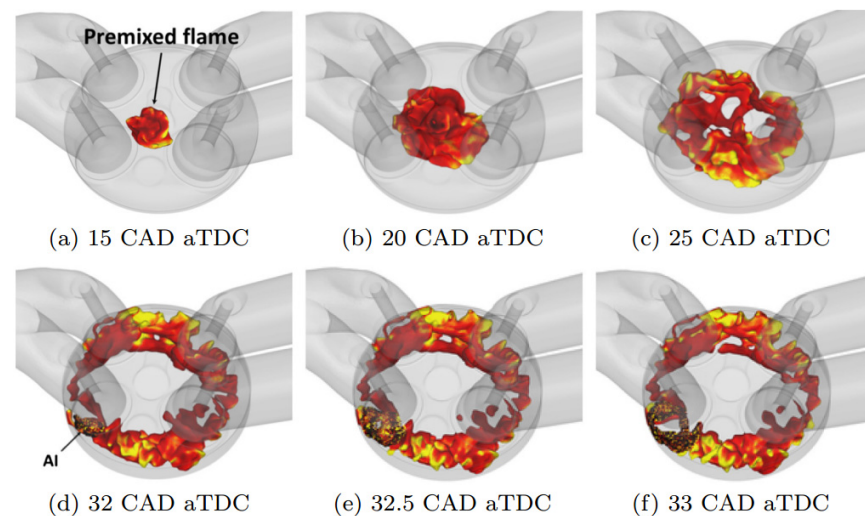


Fig. 3 - Time series of high-speed direct images and related in-cylinder pressure histories for both normal and knocking engine cycles.

Kawahara N, Tomita E.. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(7):3156-3163

## 二、爆震/早燃燃烧过程的数值模拟：

- **精确的爆震模型开发：**需综合考虑化学动力学与气体动力学因素（诸如湍流脉动）；
- **压力震荡的捕捉：**精确捕捉爆震将振荡及其发展过程，需避免数值震荡。



Robert A, Richard S, Colin O, et al. Combustion and Flame, 2015.

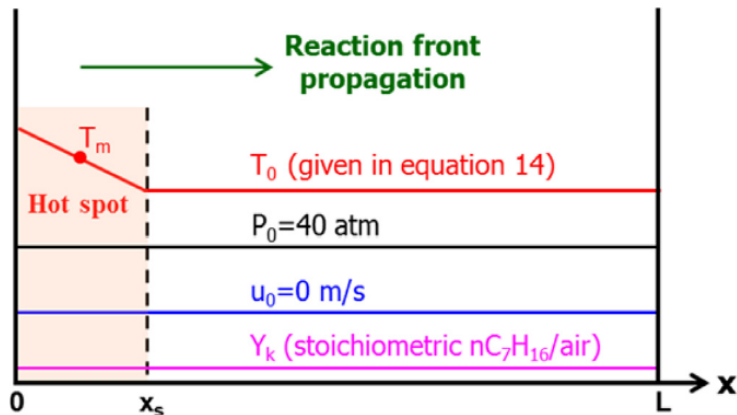
- ◆ 早燃可能产生原因的系统分析；
- ◆ 爆震及早燃的预测模型；
- ◆ 爆震与早燃的调控抑制手段开发

# (1) 热点形成、自燃模式对非正常燃烧的影响

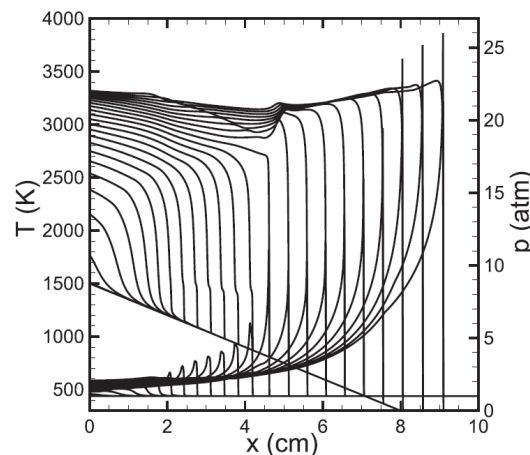
- **早燃/爆震的产生与热点自燃的关系：** 自燃火焰往往传播速度更快,产生极高的放热率和压力振荡。然而，关于**热点形成的原因**以及其对**自燃模式的影响**，尚缺乏强有力的论断。
- **自燃模式：** 70年代，Zeldovich提出梯度理论：**温度梯度产生点火延迟的梯度**，影响反应面形成过程，进而导致不同自燃模式（**reaction wave**）：

$$u_{rf} = \left( \frac{\partial \tau_{ig}}{\partial x} \right)^{-1} = \left( \frac{\partial \tau_{ig}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \right)^{-1}$$

- Bradly, Liberman, Chen等又在此理论基础上采用详细化学机理对热点自燃模式进行了各种研究。



P.Dai, Z.Chen.. Combustion and Flame (2015), in press



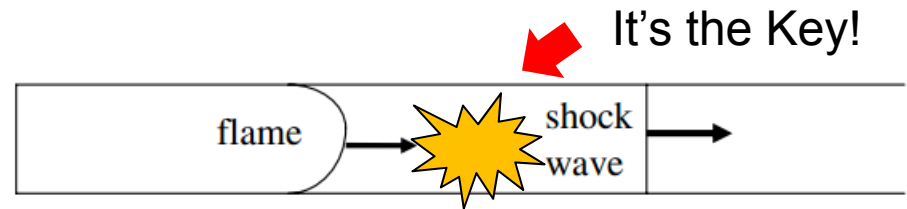
Liberman M A, Kiverin A D, Mf. I. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2012, 85(5):1-21

- ◆ 热点成因探究
- ◆ 热点自燃到自燃火焰传播过程的影响因素，定量化研究



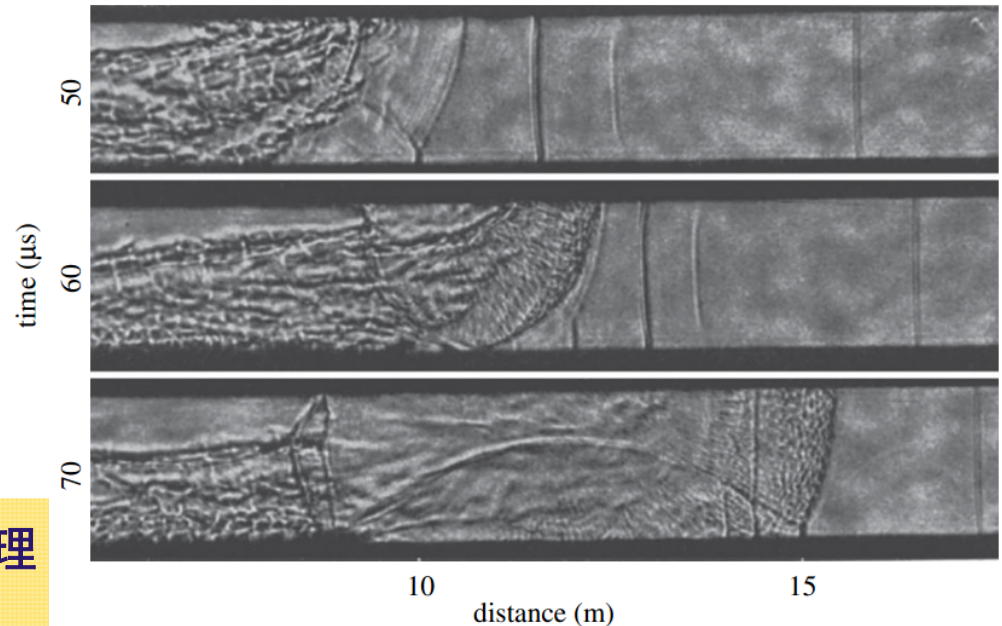
## (2) 内燃机是否存在DDT过程？

- 早燃/爆震伴随着强烈的压力振荡，压力波由燃烧产生，在缸内传播的过程中会与未燃气体、火焰面产生相互作用，可能出现**火焰面与压力波的相互耦合\增强**。进而可能导致不正常燃烧及压力振荡。但多基于模拟结果，实验的探索还缺乏足够的说服力，**需要更深入的研究**。
- Bradley的“explosion in explosion”理论是否能够在SI缸内的**有限火焰传播空间内产生**？
- 半岛理论仅适用于热点自燃初期，**后期的火焰传播与发展过程需要进一步深入研究**。



explosion in explosion

*Autoignitions and detonations*



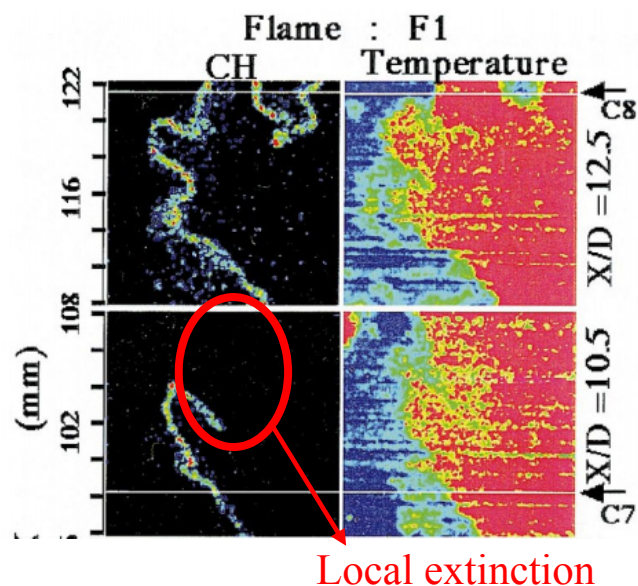
◆ 有限狭窄空间内的DDT产生可能机理

◆ 火焰在传播中加速机理

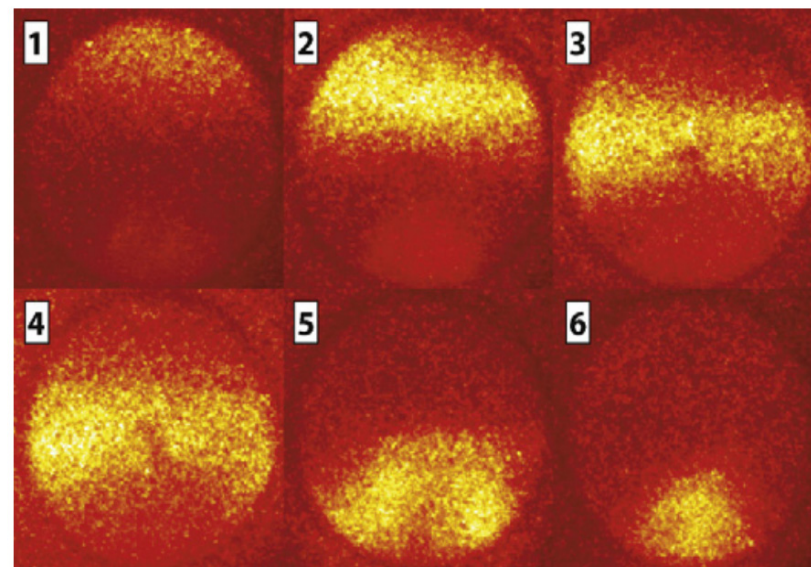
Bradley, D., M. Combustion and Flame, 2008. 154(1-2): p. 96-108

### (3) 湍流对于缸内非正常燃烧过程的影响

- 缸内的非正常燃烧现象与缸内热力学状态的**不均匀性**的关系被大量实验证实。**湍流的加入对缸内标量场输运作用**的影响需要关注。
- 其次，受到空间限制，SI发动机缸内的湍流属于未充分发展状态，**低雷诺数的湍流燃烧过程研究存在一定的空白**。
- 湍流作用下**主火焰的传播过程及pre-flame的自发反应过程的相互作用**。



Gülder, L., et al.. Combustion & Flame, 2000. 120(4): p. 407-416



Pöschl M, Sattelmayer T. Combustion & Flame, 2008, 153(4):562-573

- ◆ 低雷诺数下经典湍流模型的适用性；
- ◆ 综合湍流脉动，考量不均匀性对燃烧过程的影响；
- ◆ 局部较大湍流脉动对火焰面的淬熄、主火焰面传播的抑制与末端自燃过程时间尺度的延长。

### 三、未来可能的研究方向与合作

---

# (1) 数值模拟手段协同开发与优化

## ➤ 湍流模型的开发：

贴近于缸内湍流特性的湍流燃烧模型开发（或基于LES的亚网格模型开发），主要工作在于优化与验证低雷诺数下湍流能谱，近壁面模型，为精确模拟缸内湍流脉动过程提供新的数值模拟手段；

## ➤ 先进的数值方法以及差分格式的应用：

将高精度差分格式引入多维CFD code中，细致研究湍流脉动、化学反应过程与压力脉动在封闭空间中的耦合；

## ➤ 早燃模型的开发：

润滑油的自燃是目前公认的导致早燃的原因之一，然而，现有模拟手段鲜有捕捉这一物理现象的功能，缺乏考虑润滑油等非燃料物质自燃的化学动力学模型以及贴近物理过程的早燃预测模型。

## (2) 先进可视化设备的协同使用

### ➤ PIV技术

试验中采用两套PIV时间分辨粒子成像测速系统，两台摄像机按照一定的角度同时拍摄同一示踪流场，对所得到的图片进行相关性处理，得到三维流场的空间分布。

### ➤ PLIF技术

采用PLIF 和高速纹影技术相结合的方法，同时测量自燃产生火焰的锋面结构、火焰传播速度并对火焰和压力波进行分离，从而得出密度间断面—压力波。

### ➤ 高速纹影技术

实验室采用纹影仪结合高速摄像机拍摄自燃产生的压力波。

### ➤ 多种手段结合

多种光学测试技术的结合，是研究压力突变-燃烧-湍流之间相互作用的有效手段。如PIV、PLIF及纹影技术相结合。

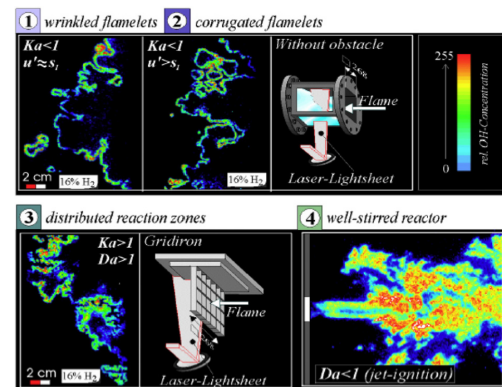
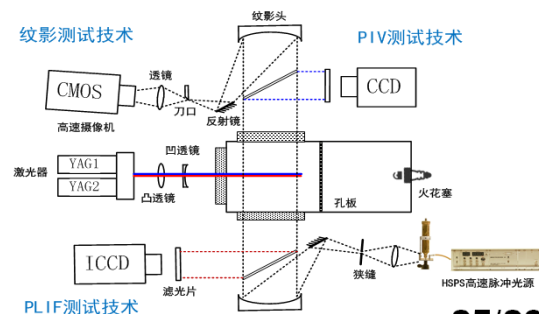
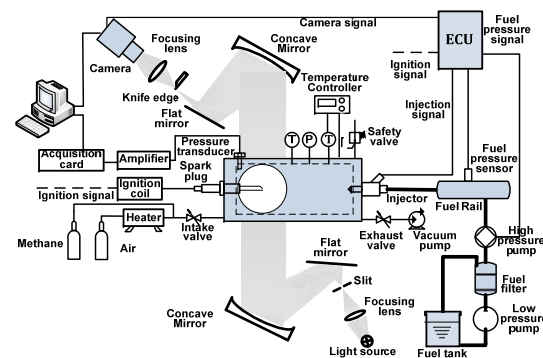


Fig. 12. PLIF images of flame structure for the various regimes [76,77].





### (3) 爆震和早燃新的控制策略

#### ➤ 基于燃料物性的爆震和早燃调控：

辛烷值（或MON、AKI）是目前衡量燃料抗爆性的主要参数，然而随着早燃的出现，辛烷值并不能全面的表征燃料早燃倾向，燃料的蒸发特性（馏程）、汽化潜热、含氧量等都有待进一步研究以**确定有利于抑制爆震、早燃的燃料关键物性，从而建立完整的燃料抗爆、抗早燃评价体系；**

#### ➤ 基于润滑油物性的爆震和早燃调控：

润滑油进入燃烧室被认为是导致早燃出现的重要原因，同时润滑油燃烧会导致积碳增多而促使局部温度升高，从而影响爆震倾向。因此有必要**对润滑油的蒸发特性、粘度、氧化反应活性、添加剂（钙、磷、钼）等开展研究，在满足润滑油基本要求的基础上设计具有抑制爆震和早燃倾向的润滑油。**

#### ➤ 基于发动机运行参数的爆震和早燃调控：

目前爆震抑制主要从降低缸内工质温度入手，包括降低压缩比或增压比、推迟点火时刻、加浓混合气、采用外部冷却EGR等，但通常会导致发动机燃油消耗增加，而早燃的抑制手段目前仍处在探索阶段。因此有必要**开发基于扫气、喷油策略、空燃比控制及发动机热管理等单一或联合的爆震及早燃有效控制策略。**



感谢大家！

