



## 第一届全国青年燃烧学术会议

# 内燃机喷雾与燃烧过程的数值模拟



汇报人：贾明

单 位：大连理工大学

上海 2015.09.19

# 提纲

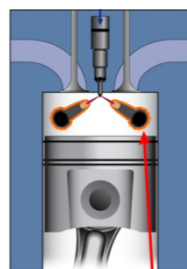
---

- 研究背景
- 前沿与难点问题
  - 喷雾模拟的可靠性
  - 湍流/化学反应的相互作用
  - 化学反应动力学机理的构建
  - 基础与应用的结合
- 未来的研究方向

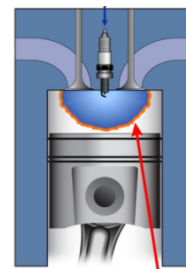
# 研究背景

- 先进压缩燃烧（Compression Ignition）方式发动机的燃烧和排放均受燃料的化学反应动力学主控：

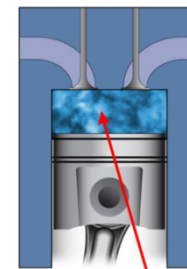
- ✓ 均质压燃 (HCCI)
- ✓ 柴油预混压燃 (PCCI或PCI)
- ✓ 汽油部分预混压燃 (PPC)
- ✓ 反应活性压燃 (RCCI)
- ✓ 其他低温燃烧 (LTC) 策略



柴油机



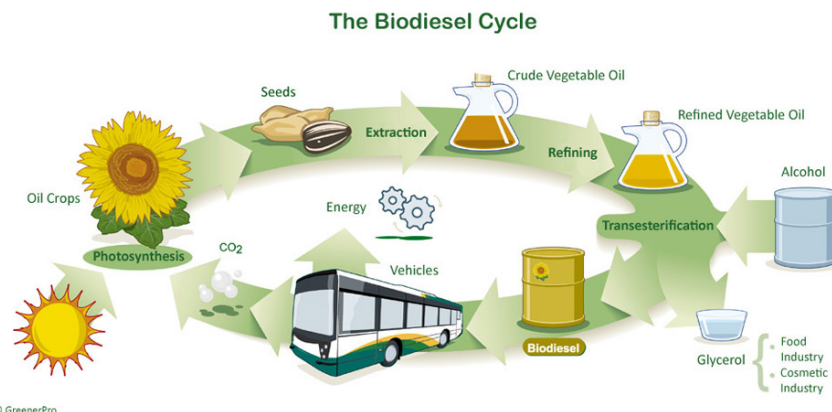
汽油机



预混压燃发动机

- 新型燃料和替代燃料的关注：

- ✓ 生物燃料
- ✓ 生物气和合成气
- ✓ 甲醇、乙醇、丁醇和戊醇
- ✓ 二甲醚（DME）



# 研究背景

---

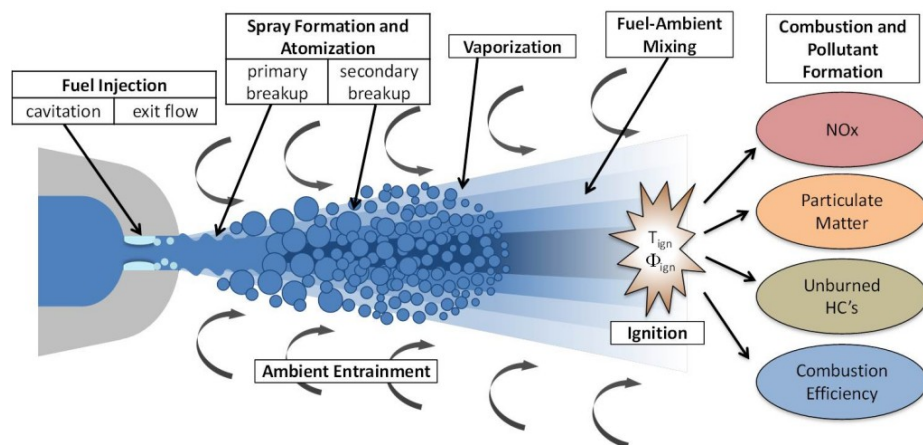
- 数值模拟在先进压燃发动机研究中的重要性

HCCI has grown from an idea to reality in a very short time, and **computational combustion** has been a major contributing factor. Comparison of this evolution to those of SI and diesel engines is a nice illustration of **the benefits of computer analysis** in engine.

C.K. Westbrook, Y. Mizobuchi, T.J. Poinso, P.J. Smith and J. Warnatz  
Proceeding of the Combustion Institute, 30(1):125-157 (2004)

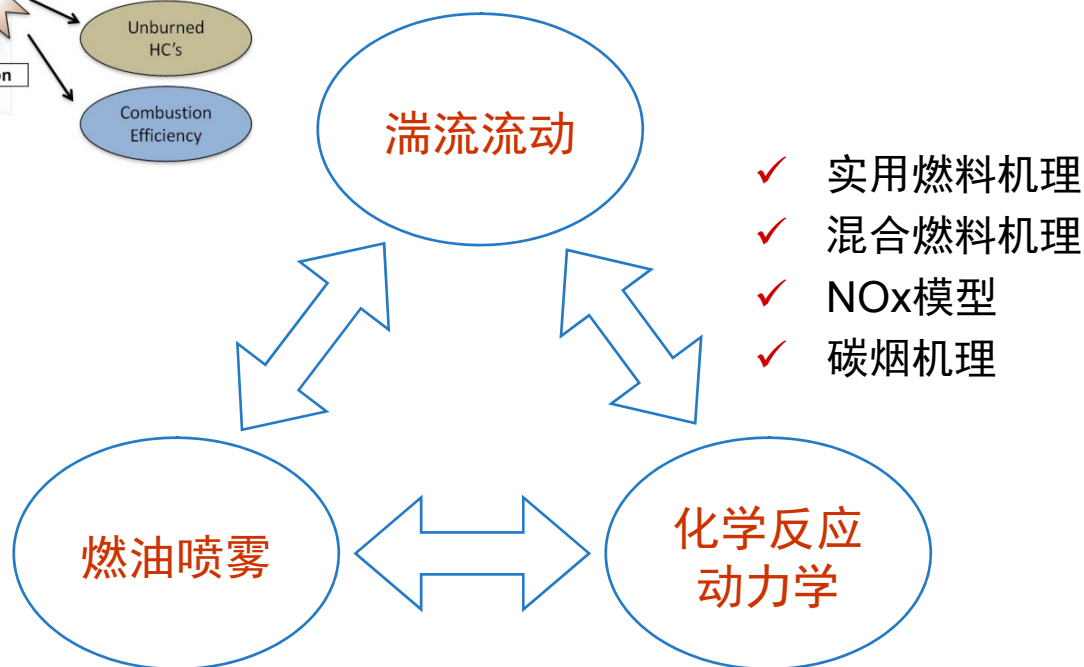
# 研究背景

## ■ 内燃烧的流动、喷雾与燃烧过程的数值模拟



- ✓ 雷诺平均 (RANS) 模型
- ✓ 大涡模拟 (LES) 模型
- ✓ 直接数值模拟 (DNS)
- ✓ 传热模型

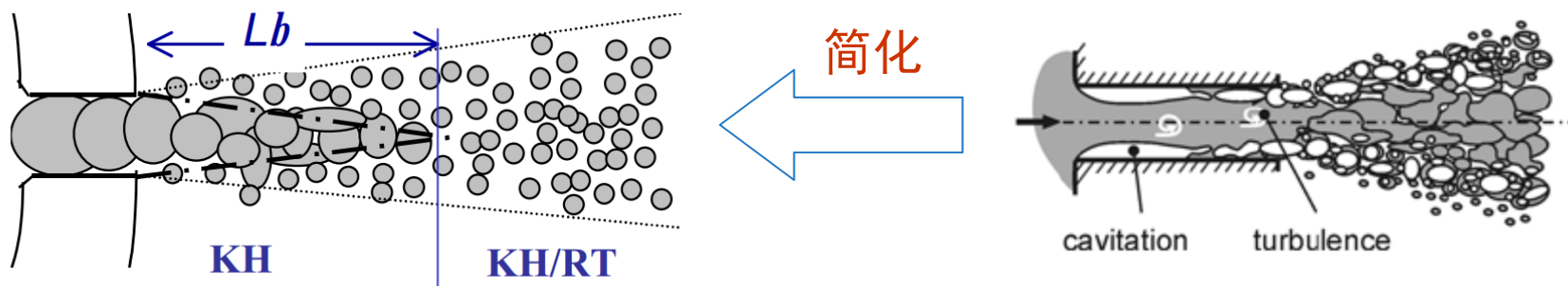
- ✓ 空化模型
- ✓ 雾化模型
- ✓ 碰撞模型
- ✓ 碰壁模型
- ✓ 蒸发模型



# 前沿与难点问题（一）

- 如何提高喷雾模拟的精度、降低其不确定性？

应用最为广泛的KH-RT破碎模型



- 雾化长度

$$L_b = C \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g} d_o}$$

- KH模型

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r' - r}{\tau}$$

$$r' = B_0 \Lambda$$

$$\tau = B_1 \frac{3.788r}{\Omega \Lambda}$$

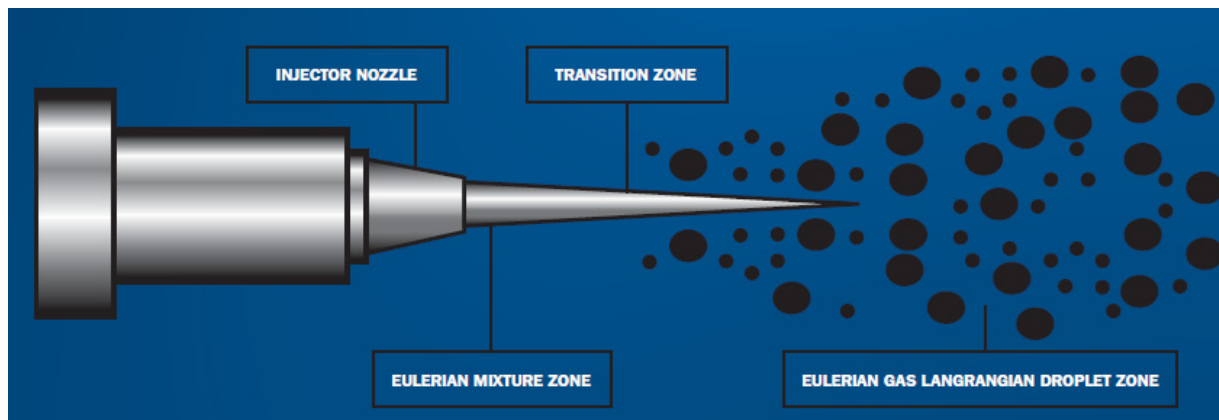
经验常数

- 模型中的经验常数需要根据喷孔的几何形状、运行工况的变化而改变

# 前沿与难点问题（一）

## ■ 如何提高喷雾模拟的精度、降低其不确定性？

欧拉-拉格朗日耦合方法



主要问题：

- 欧拉方法与拉格朗日方法的耦合需要加以模化
- 欧拉方法对多组分蒸发模拟存在挑战
- 拉格朗日方法的计算结果受网格的直接影响
- 计算量较大

# 前沿与难点问题（二）

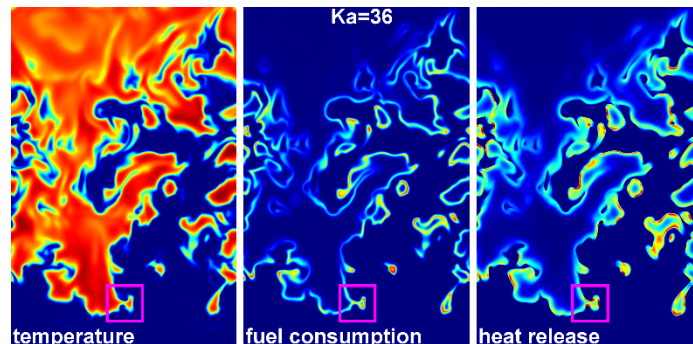
- 内燃机的燃烧模拟中，是否需要复杂的“湍流/化学反应”相互作用模型？

先进压缩燃烧方式发动机的特点：

- 涉及预混、部分预混和扩散燃烧等多种燃烧模式；
- 需要耦合相对详细的反应动力学机理，以预测着火、燃烧和排放特性。

主流“湍流/化学反应”相互作用模型的适用性：

- 涡团破碎（EBU）模型：完全忽略化学动力学的影响
- 小火焰（Flamelet）模型：仅适用于扩散燃烧
- 条件矩封闭（CMC）模型：无法直接耦合详细化学反应机理
- 涡团耗散（EDC）模型：系数基于经验、无法直接耦合详细反应机理
- 特征时间尺度（CTC）模型：系数基于经验
- 线性涡模型（LEM）：计算量较大
- 概率密度函数（PDF）方法：计算量过大

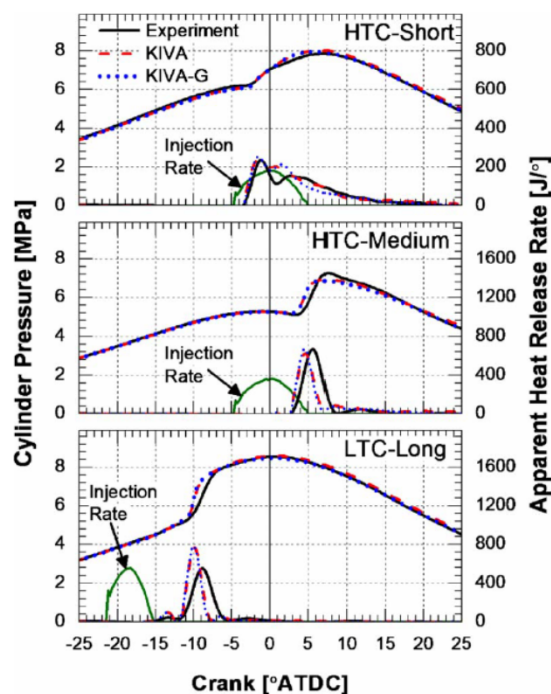




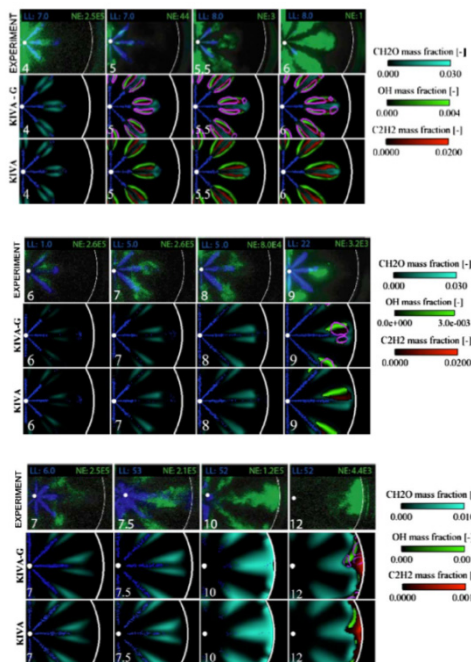
# 前沿与难点问题（二）

- 内燃机的燃烧模拟中，是否需要复杂的“湍流/化学反应”相互作用模型？

S.L. Kokjohn, R.D. Reitz. J. Eng. Gas Turbines Power 133(10):102805 (2011)



宏观缸压和放热率比较（KIVA：仅受反应动力学控制；KIVA-G：火焰传播模型）



传统混合控制燃烧  
（短滞燃期）

传统混合控制燃烧  
（中等滞燃期）

低温燃烧  
（长滞燃期）

- 主要观点：
- 在不同燃烧模式下，只有在燃油与空气预混下才发生着火，所以燃烧过程受大尺度混合和扩散的控制；
  - 有无火焰传播模型的计算结果非常接近，仅在火焰结构的细节方面略有差异。

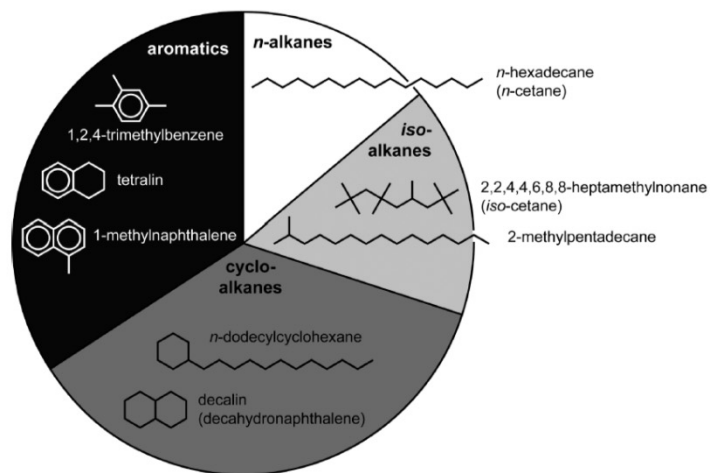
结论

预混和非预混燃烧  
均无需考虑亚网格尺度的湍流/化学反应

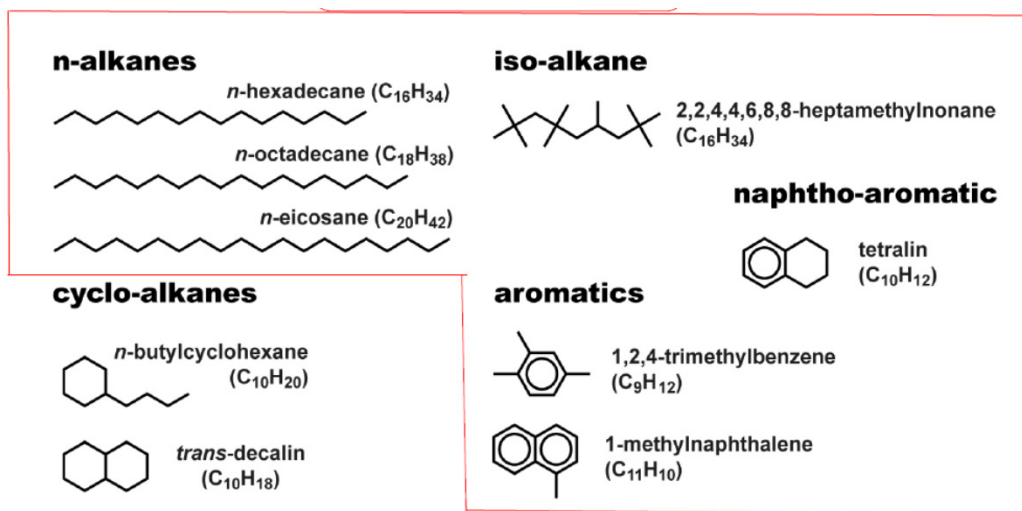
# 前沿与难点问题（三）

## ■ 如何构造适用于发动机三维模型的化学反应动力学机理？

多达4660种组分, 18255个反应



实用柴油的成分分布



CRC AVFL-18柴油表征燃料机理

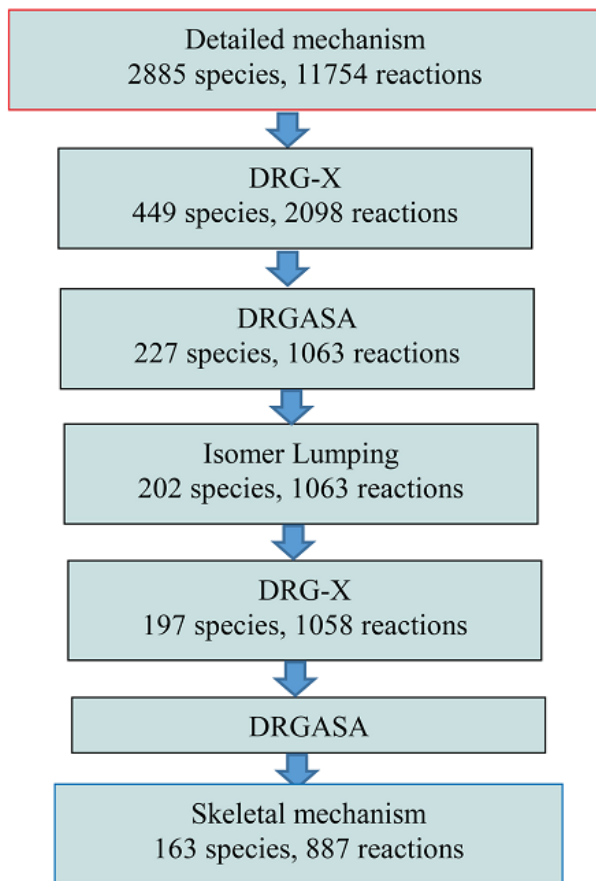
W.J. Pitz, M. Mehl, C.K. Westbrook. DOE National Laboratory Advanced Combustion Engine R&D Merit Review (2015)

- 实用柴油的成分十分复杂；
- 柴油表征燃料的详细机理过于庞大，无法直接与CFD计算耦合。

# 前沿与难点问题（三）

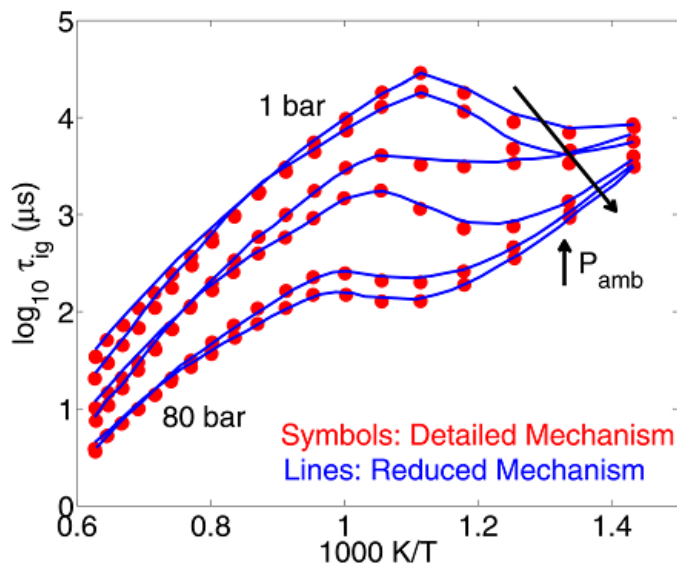
## ■ 如何构造适用于发动机三维模型的化学反应动力学机理？

Y. Pei, M. Mehl, W. Liu, T. Lu, W.J. Pitz, S. Som. J. Eng. Gas Turbines Power 137(11):111502 (2015)



机理简化流程

- 需要经过一系列复杂的简化过程才能够得到规模相对较小的骨架机理；
- 简化过程依赖于经验；
- 简化机理的性能受简化目标的直接影响。

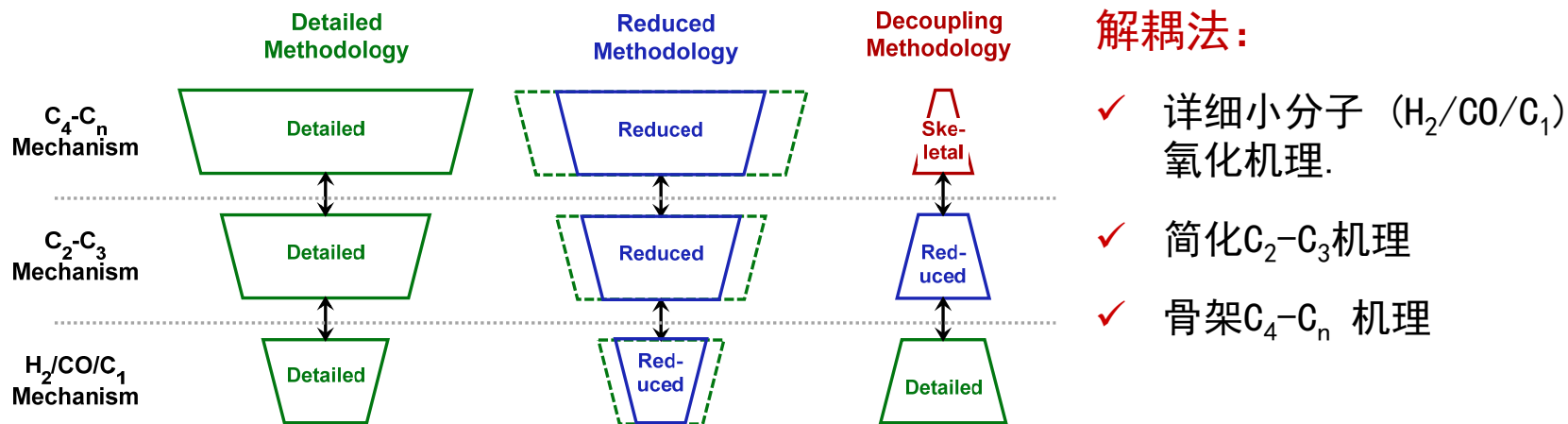


详细机理与简化机理预测着火滞燃方面的比较

# 前沿与难点问题（三）

## ■ 如何构造适用于发动机三维模型的化学反应动力学机理？

C. Chang, M. Jia, Y. Li, Y. Liu, M. Xie, H. Wang, R.D. Reitz. Combust. Flame, 162(10):3785-3802 (2015)



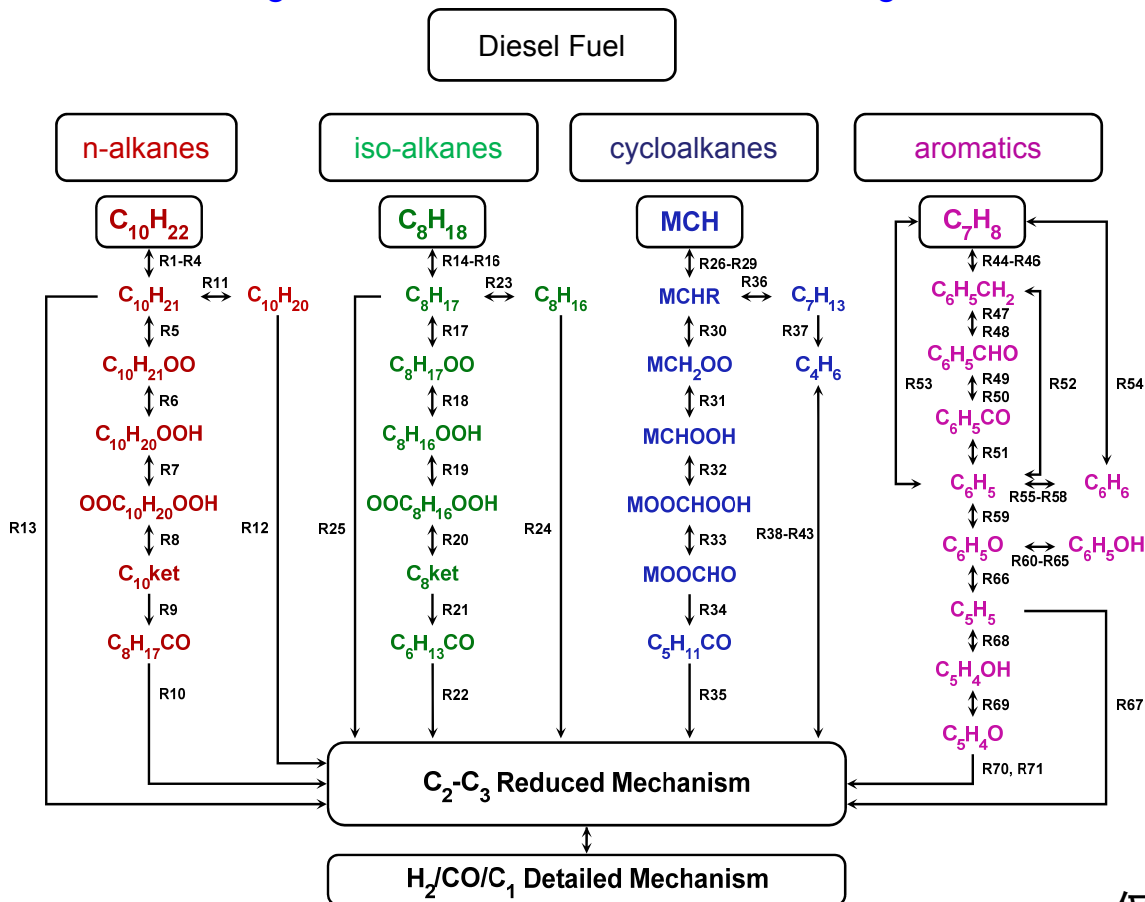
详细法、简化法和解耦法构建机理的对比图

- 详细机理的规模随着燃料分子碳原子数目的增加呈指数增长；
- 简化方法在特定的条件下针对特定目标，剔除详细机理中不重要的组分和反应；
- 解耦法在保持机理规模紧凑的情况下，可较准确预测着火和火焰传播特性。

# 前沿与难点问题（三）

## 如何构造适用于发动机三维模型的化学反应动力学机理？

C. Chang, M. Jia, Y. Li, Y. Liu, M. Xie, H. Wang, R.D. Reitz. Combust. Flame, 162(10):3785-3802 (2015)



柴油表征燃料属性

	Surrogate A	Surrogate B
n-decane (mol. %)	50.39	26.67
iso-octane (mol. %)	10.56	14.89
MCH (mol. %)	12.86	36.81
toluene (mol. %)	26.19	21.64
Cetane Number	52.17	37.31
C/H Ratio by Weight	6.83	6.73
Lower Heating Value (MJ/kg)	43.43	43.31

- Surrogate A: 接近典型的美国2号柴油
- Surrogate B: 一种合成柴油
- 主要关注重现实用柴油的化学特性

- 仅包括70个组分、220个反应

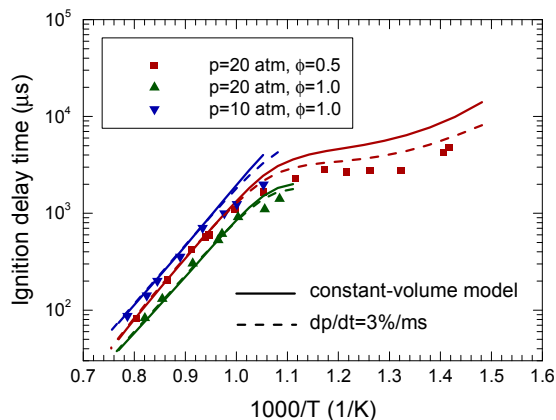
柴油表征燃料的骨架机理

# 前沿与难点问题（三）

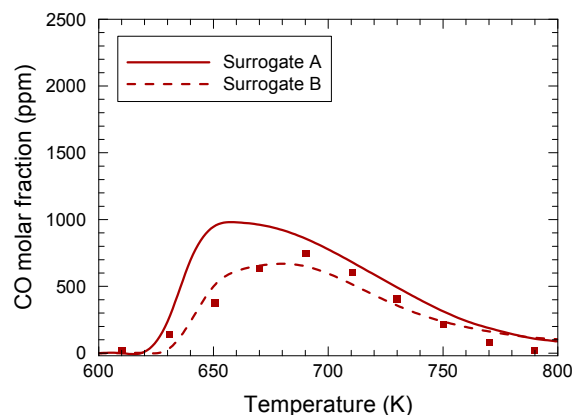
## ■ 如何构造适用于发动机三维模型的化学反应动力学机理？

C. Chang, M. Jia, Y. Li, Y. Liu, M. Xie, H. Wang, R.D. Reitz. Combust. Flame, 162(10):3785-3802 (2015)

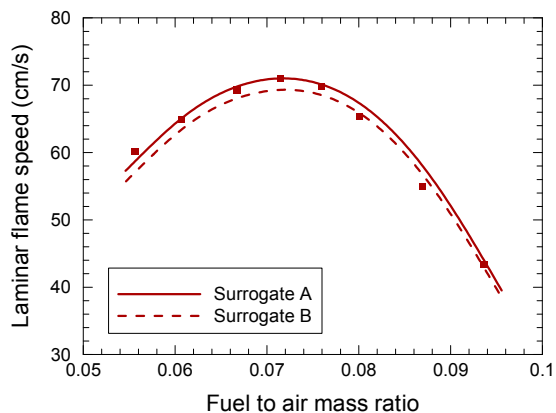
实用柴油的验证结果：



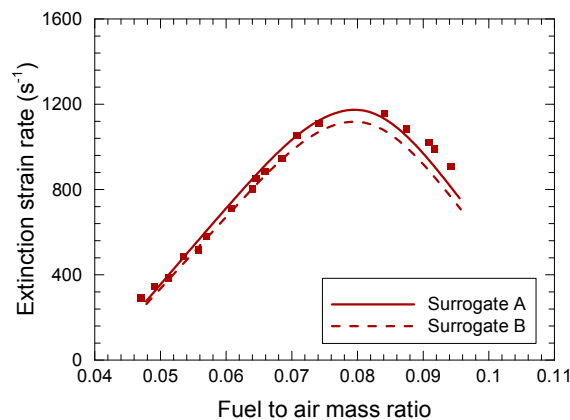
激波管内着火延迟的验证



流反应器内CO的验证



火焰速度的验证



熄火拉伸率验证

➤ 在各种反应器不同工况下，预测结果与实验结果均吻合得较好

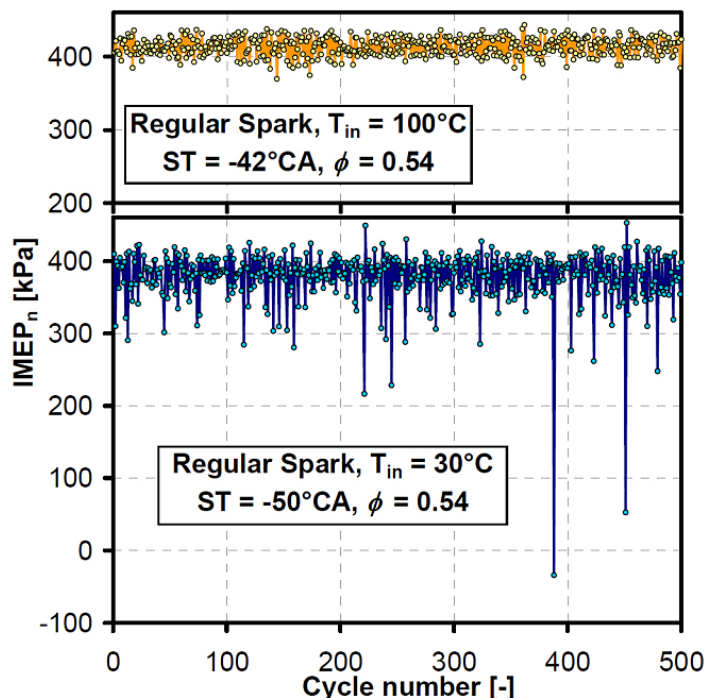
➤ 只需优化C<sub>4</sub>-C<sub>10</sub>相关的反应常数

# 前沿与难点问题（四）

## ■ 如何将基础燃烧研究成果应用于发动机的设计中？

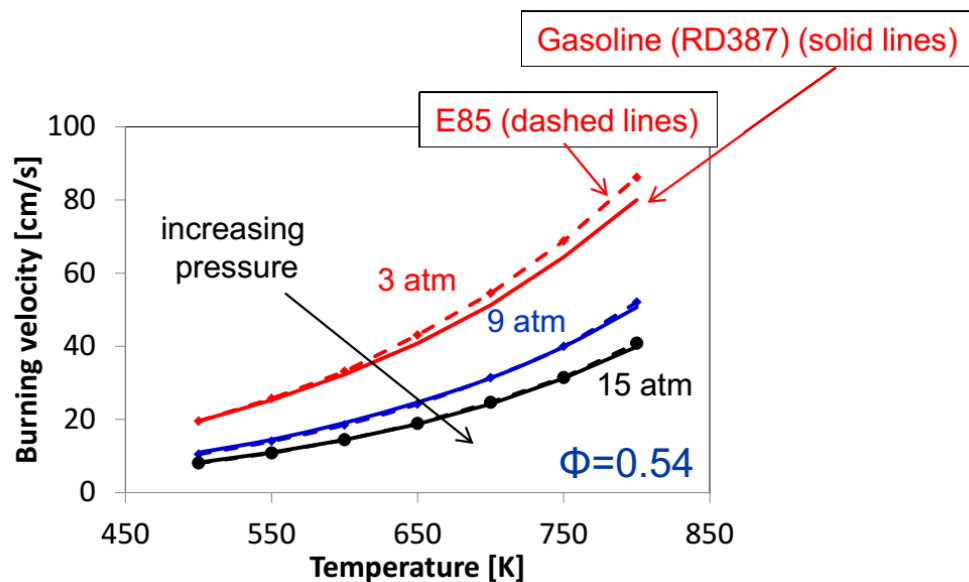
通过火焰速度数据，理解直喷火花点火（DISI）发动机的稳定性

M. Sjöberg, W. Zeng, D. Singleton, J.M. Sanders, M.A. Gundersen. SAE 2014-01-2615 (2014)



稀当量比下，进气加热对IMEP稳定性的影响

提高进气温度可大幅  
提高燃烧稳定性



发动机工下，火焰速度随温度和压力的变化

火焰速度随温度的  
升高而迅速增加

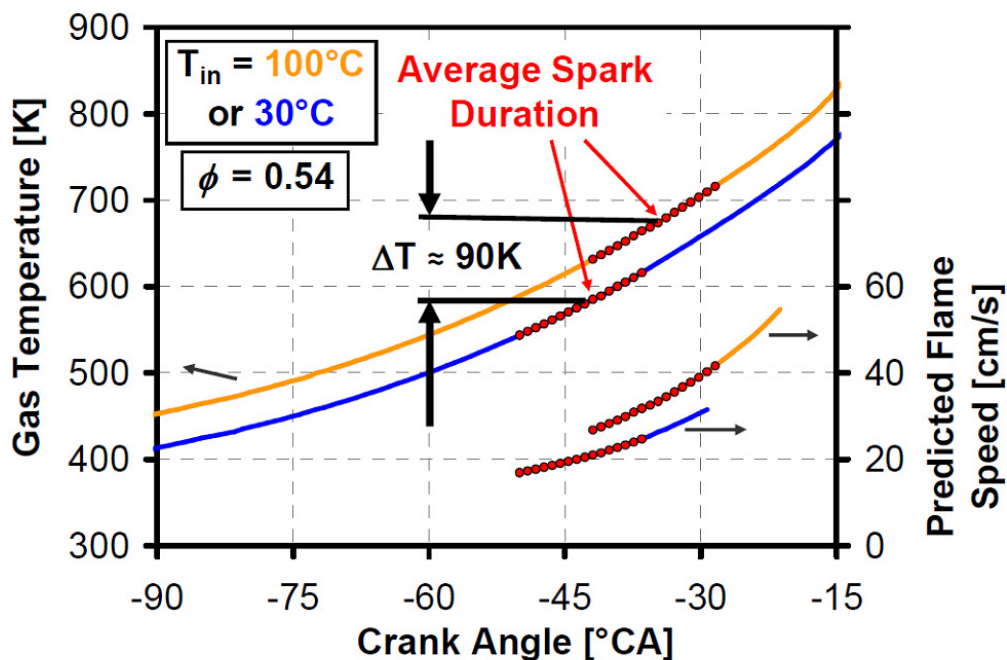


# 前沿与难点问题（四）

## ■ 如何将基础燃烧研究成果应用于发动机的设计中？

通过火焰速度数据，理解直喷火花点火（DISI）发动机的稳定性

M. Sjöberg, W. Zeng, D. Singleton, J.M. Sanders, M.A. Gundersen. SAE 2014-01-2615 (2014)



进气加热对点火时缸内气体温度的影响

### 结论：

- 在点火期间，提高进气温度  $100^{\circ}\text{C}$  使火焰速度提高约35%；
- 火焰速度的提高，允许采用较晚的点火时刻；
- 提高进气温度可以有效降低发动机的循环变动。



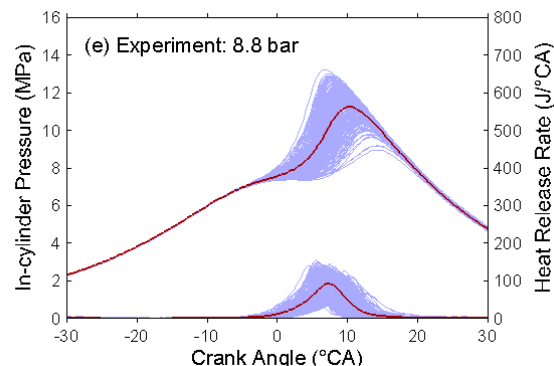
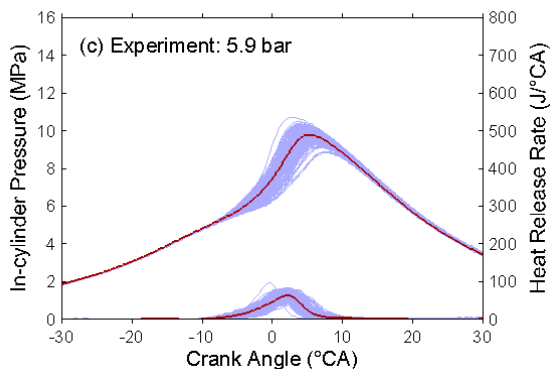
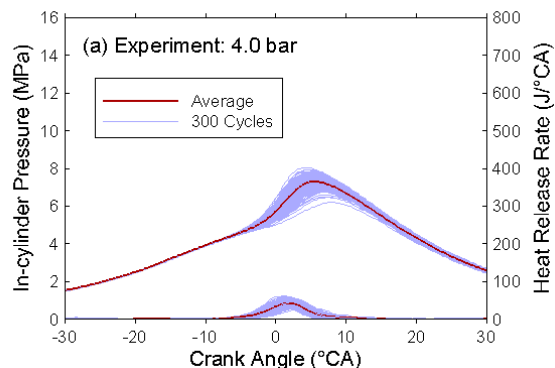
# 前沿与难点问题（四）

## ■ 如何将基础燃烧研究成果应用于发动机的设计中？

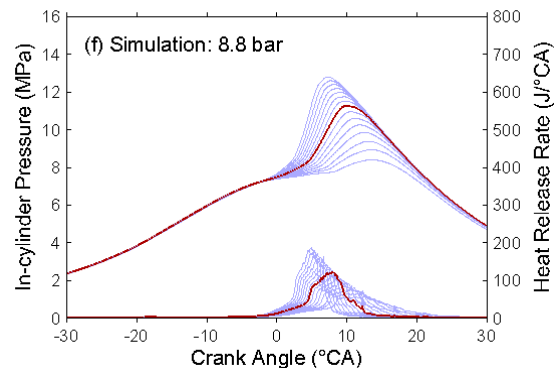
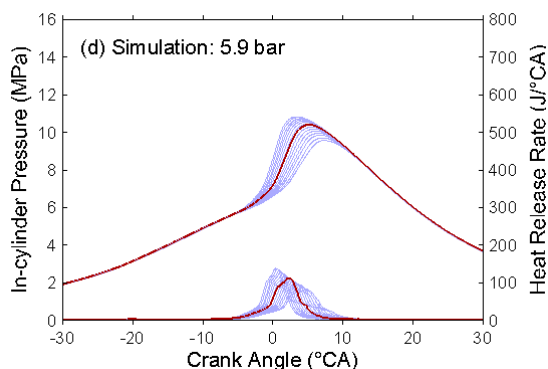
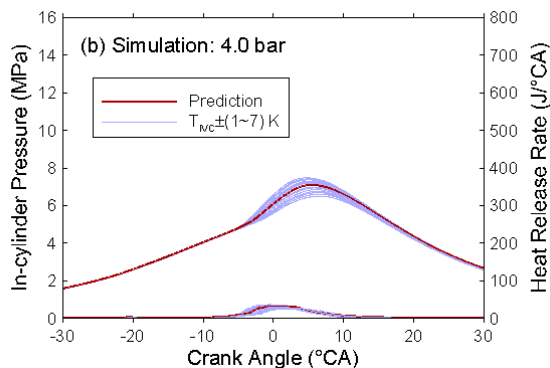
通过着火延迟数据，理解反应活性控制压燃（RCCI）发动机的稳定性

M. Jia, A.B. Dempsey, H. Wang, Y. Li, R.D. Reitz. Int. J. Engine Research, 16(3):441-460 (2014)

### ➤ 实验结果（300个瞬态循环）



### ➤ 模拟结果（通过扰动IVC时刻缸内温度 $\pm 7^\circ\text{C}$ ）



柴油/汽油RCCI燃烧（1900 rev/min）

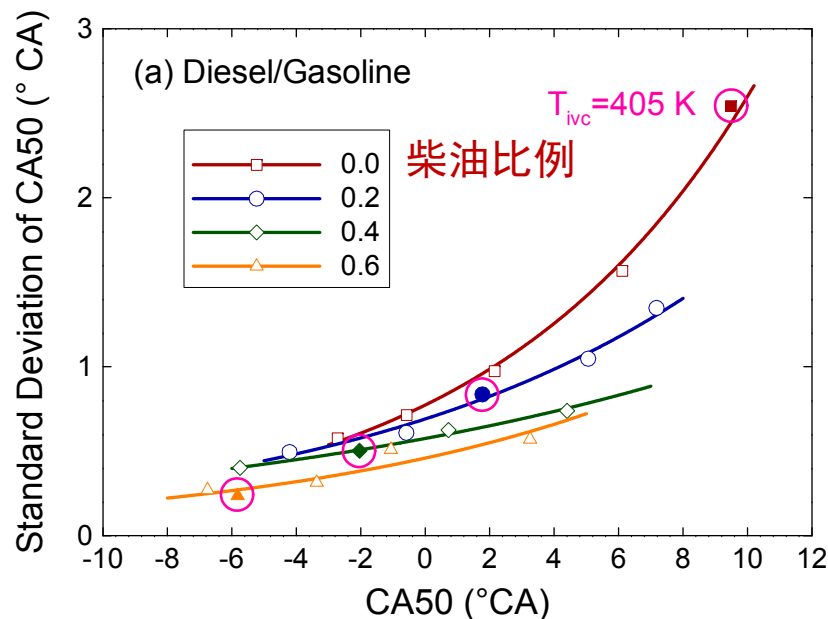
# 前沿与难点问题（四）

## ■ 如何将基础燃烧研究成果应用于发动机的设计中？

通过着火延迟数据，理解反应活性控制压燃（RCCI）发动机的稳定性

M. Jia, A.B. Dempsey, H. Wang, Y. Li, R.D. Reitz. Int. J. Engine Research, 16(3):441-460 (2014)

### ➤ 柴油质量分数的影响



➤ 在采用相同进气温度下，加大柴油比例可有效降低发动机的循环变动

柴油/汽油RCCI发动机中柴油比例对循环变动的影响

$p_{imep} = 6.0\text{ bar}$ , 900 rev/min

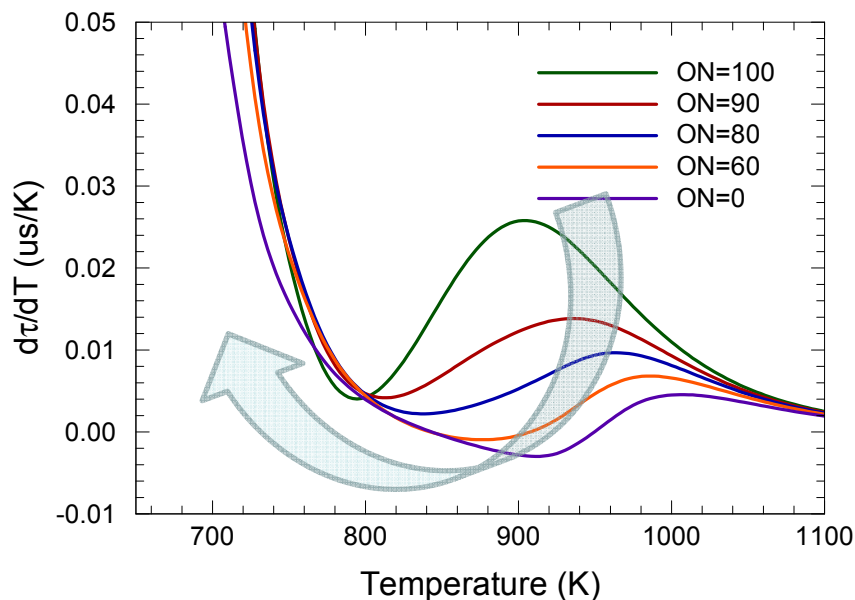
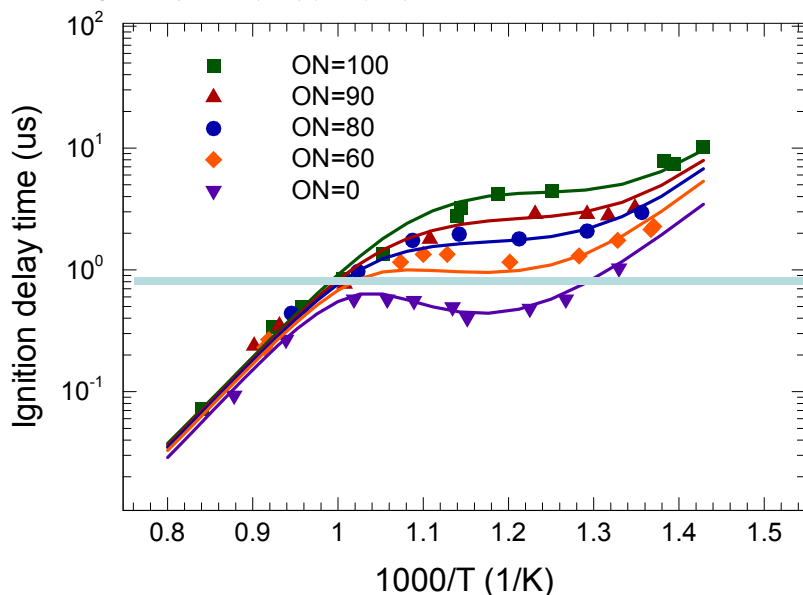
# 前沿与难点问题（四）

## ■ 如何将基础燃烧研究成果应用于发动机的设计中？

通过着火延迟数据，理解反应活性控制压燃（RCCI）发动机的稳定性

M. Jia, A.B. Dempsey, H. Wang, Y. Li, R.D. Reitz. Int. J. Engine Research, 16(3):441-460 (2014)

### ➤ 柴油质量分数的影响



激波管内参考燃料（PRF）的着火延迟（ $\tau$ ）、着火延迟对温度的敏感度（ $d\tau/dT$ ）  
 $p=40$  bar,  $\phi=1.0$

- 在保持初始温度相同的情况下，低ON值的燃料有利于降低CA50的循环变动

# 未来研究方向：基础与应用更紧密结合

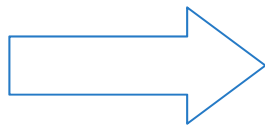
## ■ 基础燃烧研究推动内燃机的进步

- 仅通过传统的台架实现，无法完成先进压燃发动机的研发
- 通过与基础研究结合，解释发动机燃烧过程中的相关现象

### 基础研究

- ✓ 层流火焰速度
- ✓ 着火延迟
- ✓ 熄火特性
- ✓ 燃料氧化和放热率
- ✓ 多环芳烃（PAH）的生成

提供理论支撑



### 先进压燃发动机中存在的问题

- ✓ 爆震
- ✓ 循环变动
- ✓ 着火点的控制
- ✓ HC和CO排放
- ✓ 颗粒物排放

# 未来研究方向：基础与应用更紧密结合

## ■ 内燃机的应用推进基础燃烧研究

### ➤ 喷雾碰壁研究

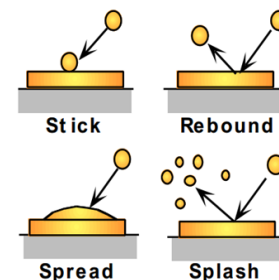
#### 实际发动机

- ✓ 喷雾束
- ✓ 小粒径
- ✓ 高速运动

#### 基础研究

- ✓ 单液滴
- ✓ 大粒径
- ✓ 低速运动

- 当前发动机缸内的喷雾碰壁模型的构建基于基础实验的结果
- Reynolds数和Weber数的变化直接影响喷雾碰壁的行为



### ➤ 液滴蒸发研究

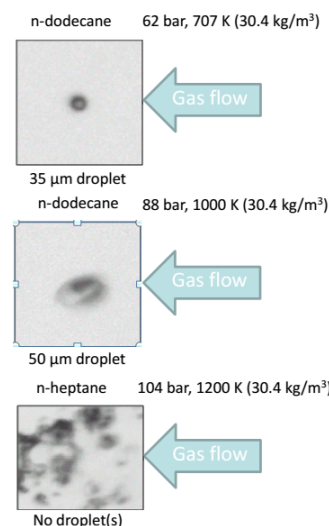
#### 实际发动机

- ✓ 多组分
- ✓ 强对流
- ✓ 低至高温

#### 基础研究

- ✓ 简单组分
- ✓ 静止或低速流
- ✓ 低于沸点

- 多组分的扩散特性直接影响了液滴的蒸发和后续燃烧过程
- 高温下液滴无明显的界面，蒸发特性发生本质的改变



### ➤ 化学反应动力学机理研究

#### 实际发动机

- ✓ 宽当量比范围
- ✓ 不同EGR率环境
- ✓ 宽温度范围

#### 基础研究

- ✓ 当量比0.5-2.0
- ✓ 空气或惰性气体
- ✓ 高温数据居多

- 火焰速度受EGR率的强烈影响，直接决定发动机的性能
- 在低当量比下的着火特性对预混压燃发动机的研究至关重要

---

谢谢各位老师！

Email: [jiaming@dlut.edu.cn](mailto:jiaming@dlut.edu.cn)