



## 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

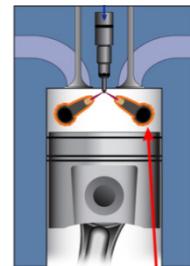
---

- 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

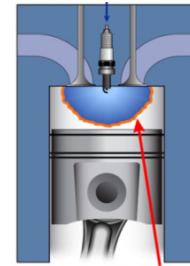
# 研究背景

- 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：

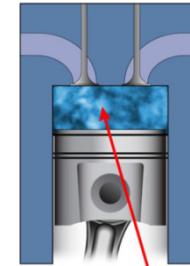
- ✓ 均质压燃 (HCCI)
- ✓ 柴油预混压燃 (PCCI或PCI)
- ✓ 汽油部分预混压燃 (PPC)
- ✓ 反应活性压燃 (RCCI)
- ✓ 其他低温燃烧 (LTC) 策略



柴油机



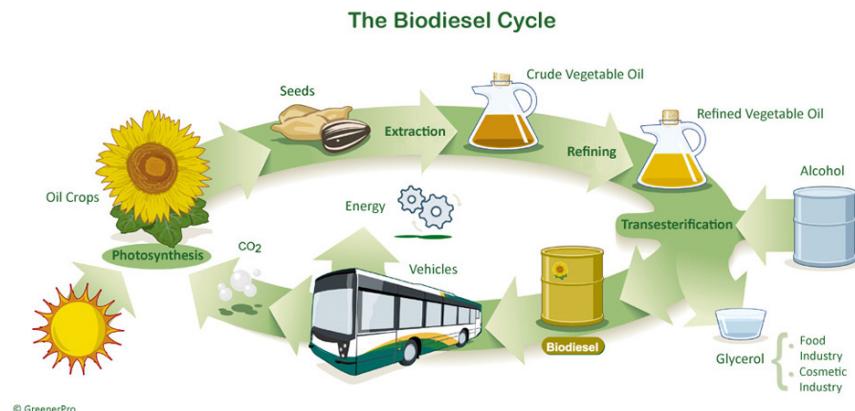
汽油机



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

---

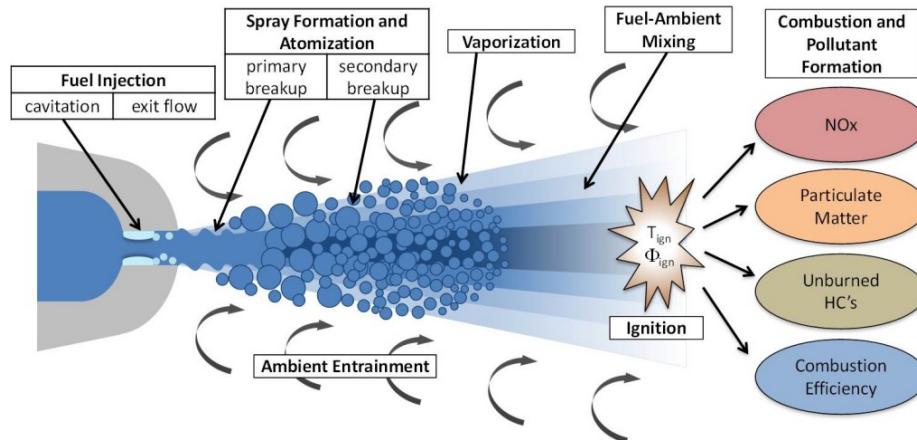
- 数值模拟在先进压燃发动机研究中的重要性

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. Poinsot, P.J. Smith and J. Warnatz  
Proceeding of the Combustion Institute, 30(1):125-157 (2004)

# 研究背景

## 内燃机的流动、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

湍流流动

- ✓ 实用燃料机理
- ✓ 混合燃料机理
- ✓ NOx模型
- ✓ 碳烟机理

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

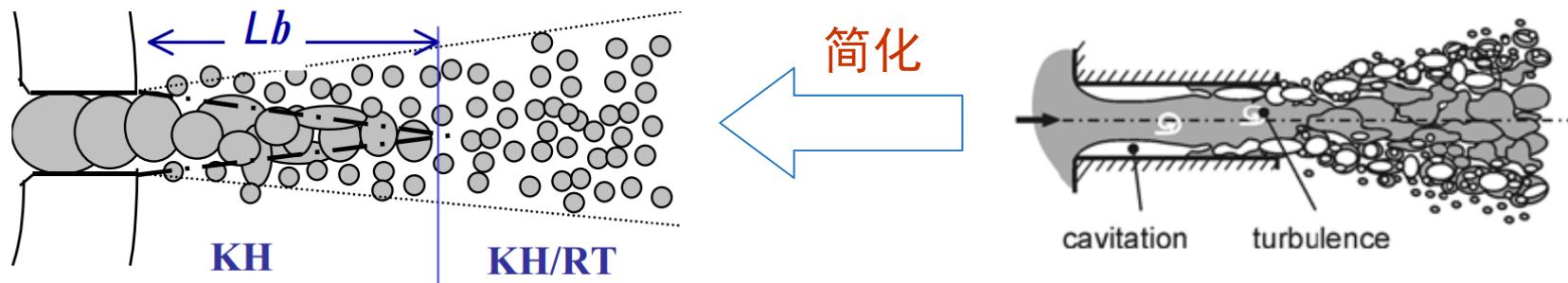
燃油喷雾

化学反应  
动力学

# 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

$$L_b = C_1 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} d_o$$

经验常数

➤ KH模型

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

$$r' = B_0 \Lambda$$

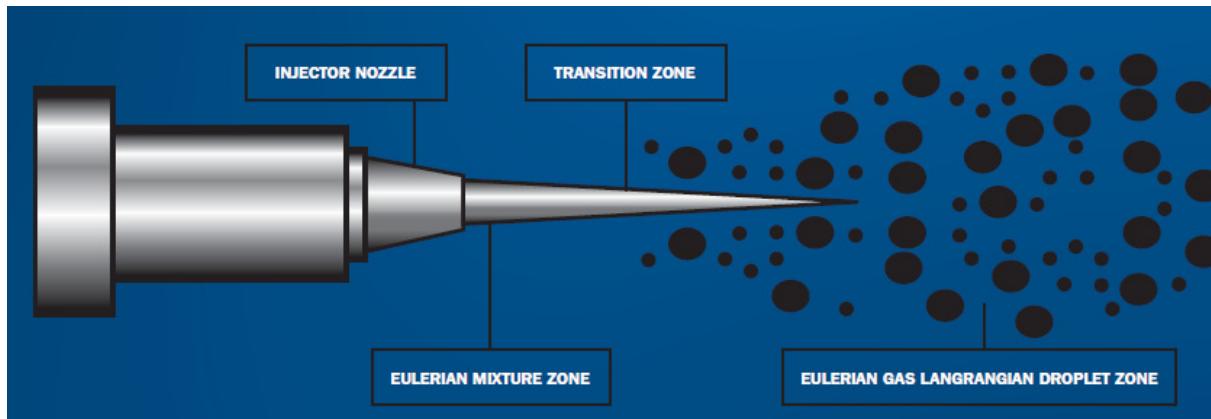
$$\tau = B_1 \frac{3.788r}{\Omega \Lambda}$$

- 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）

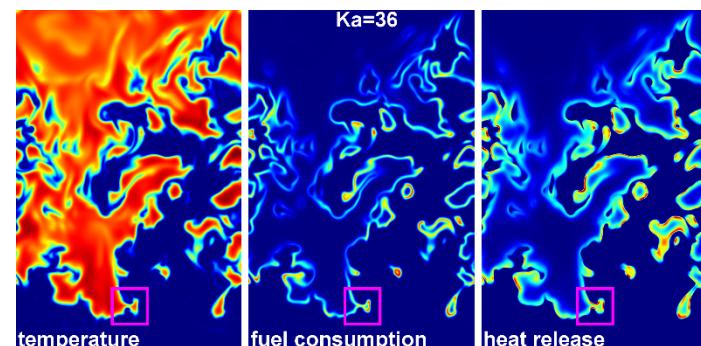
## ■ 内燃机的燃烧模拟中，是否需要复杂的“湍流/化学反应”相互作用模型？

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：

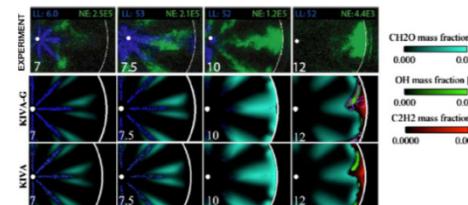
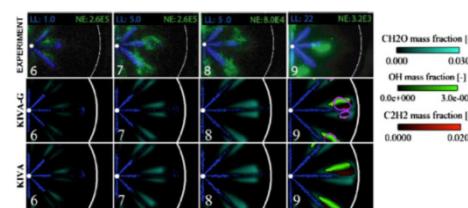
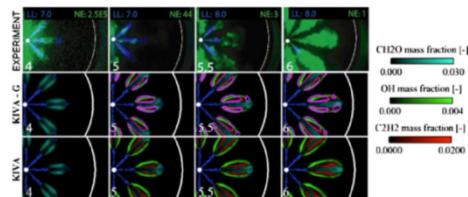
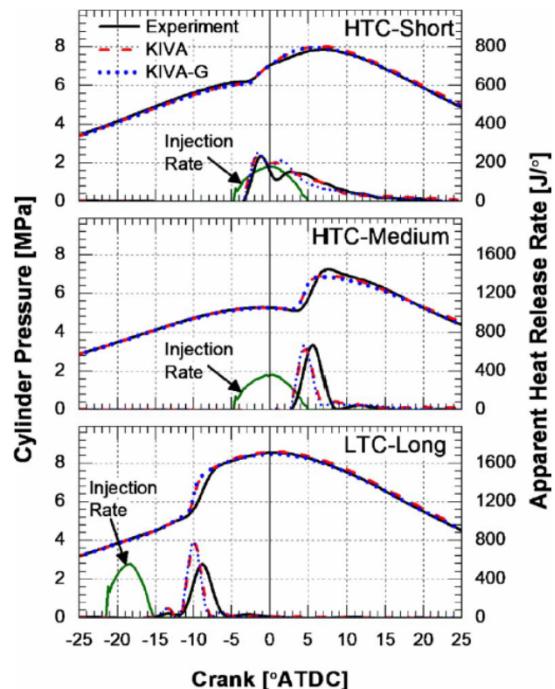
- 涡团破碎（EBU）模型：完全忽略化学动力学的影响
- 小火焰（Flamelet）模型：仅适用于扩散燃烧
- 条件矩封闭（CMC）模型：无法直接耦合详细化学反应机理
- 涡团耗散（EDC）模型：系数基于经验、无法直接耦合详细反应机理
- 特征时间尺度（CTC）模型：系数基于经验
- 线性涡模型（LEM）：计算量较大
- 概率密度函数（PDF）方法：计算量过大



# 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)



- 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。

关键组分分布比较

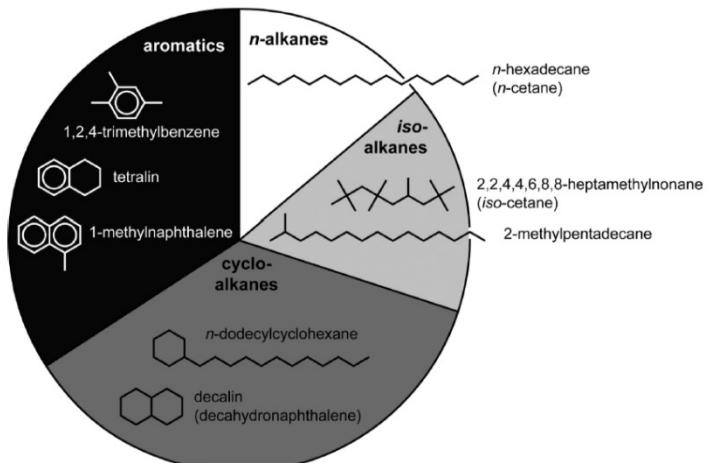
结论

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

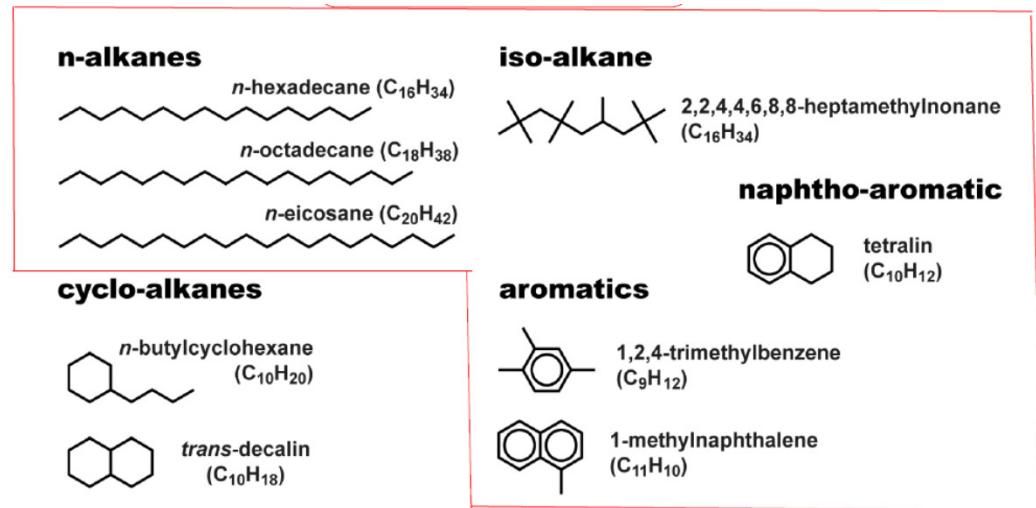
# 前沿与难点问题（三）

## ■ 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

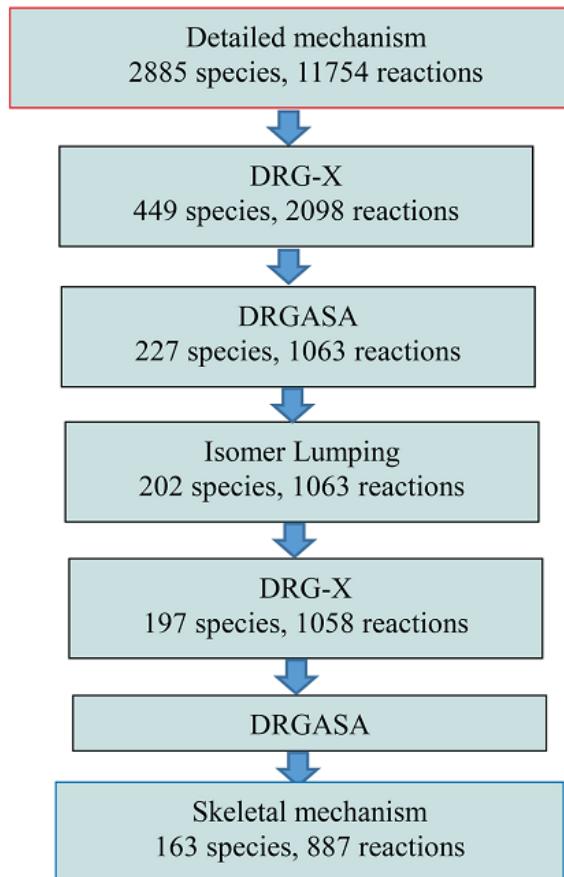
W.J. Pitz, M. Mehl, C.K. Westbrook. DOE National Laboratory Advanced Combustion Engine R&D Merit Review (2015)

- 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）

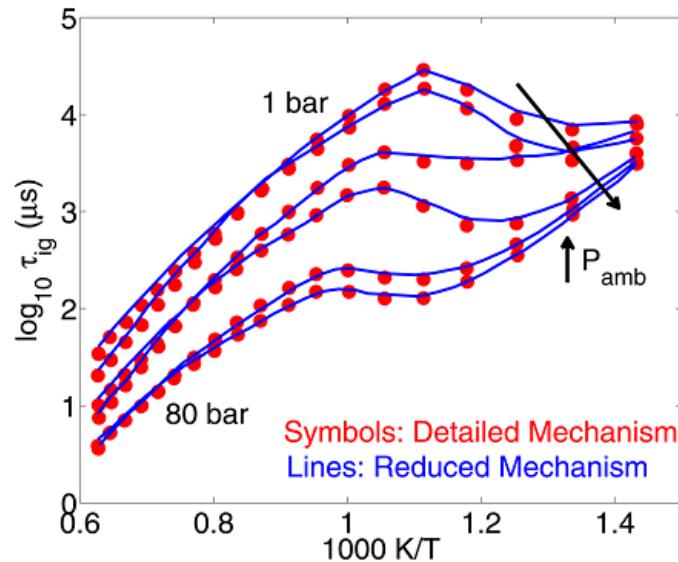
## ■ 如何构造适用于发动机三维模型的化学反应动力学机理？

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。

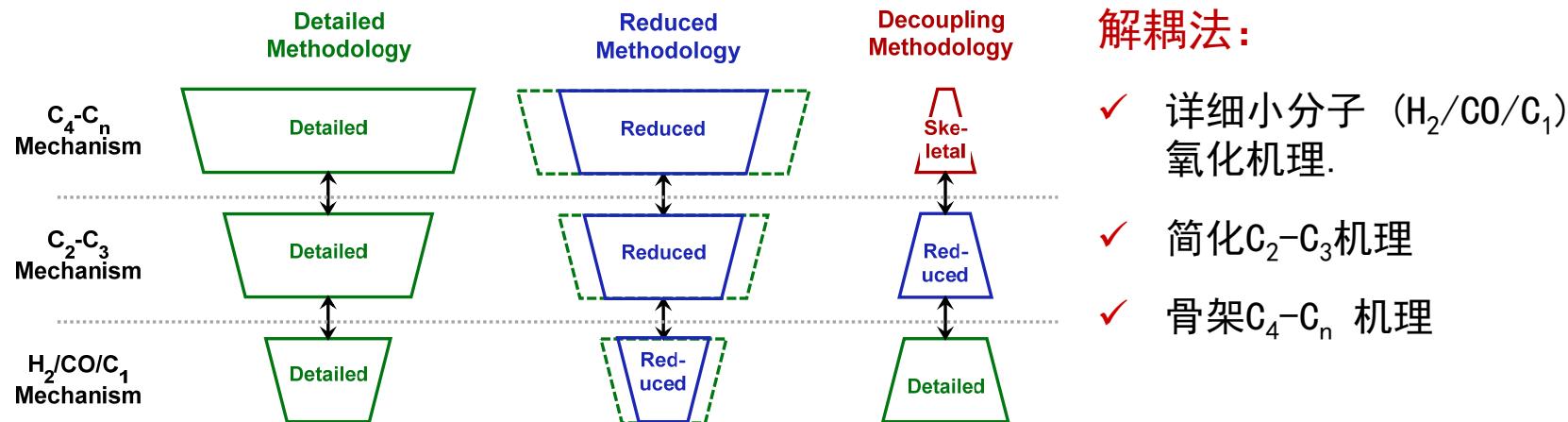


详细机理与简化机理预测着火滞燃方面的比较

# 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)



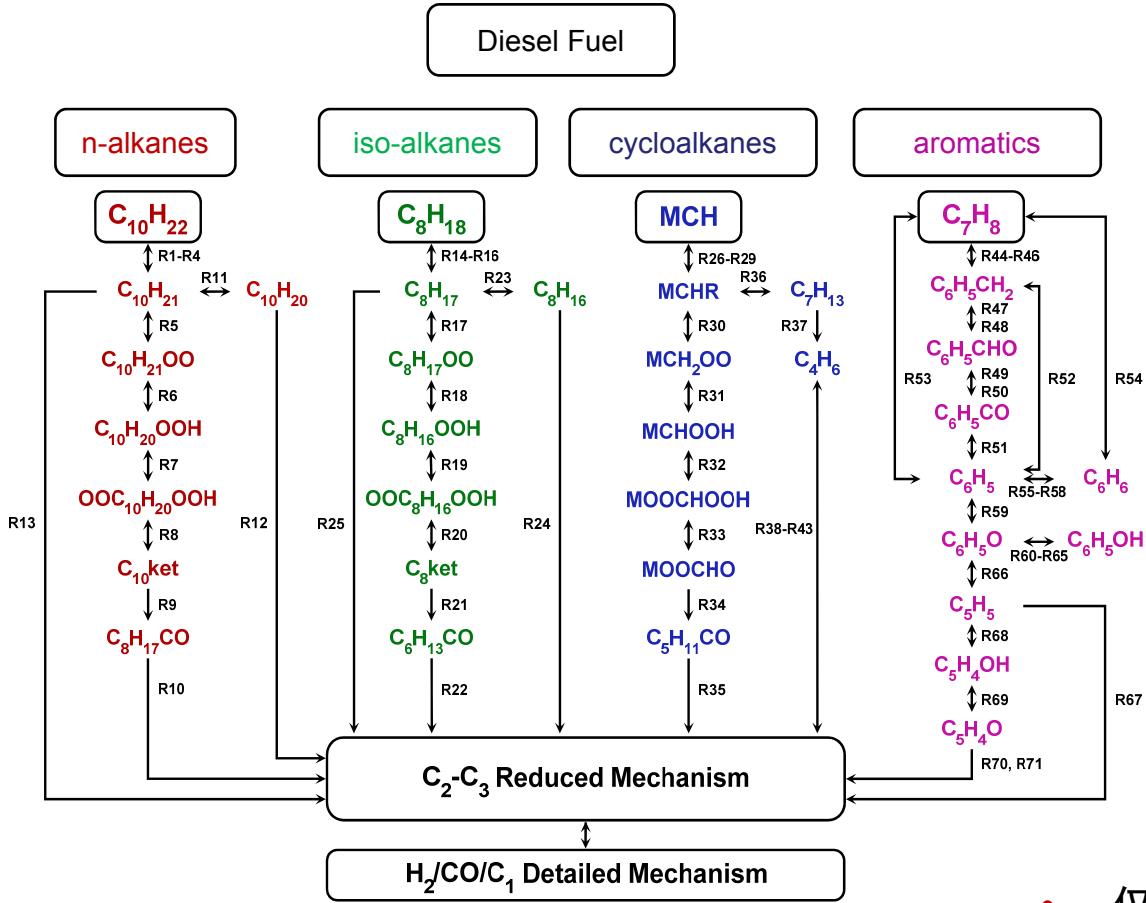
详细法、简化法和解耦法构建机理的对比图

- 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

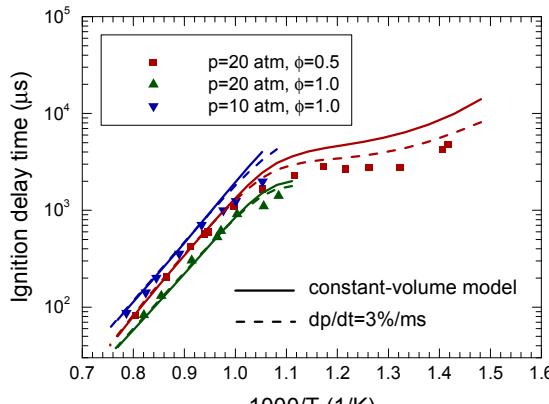
- 仅包括70个组分、220个反应

# 前沿与难点问题（三）

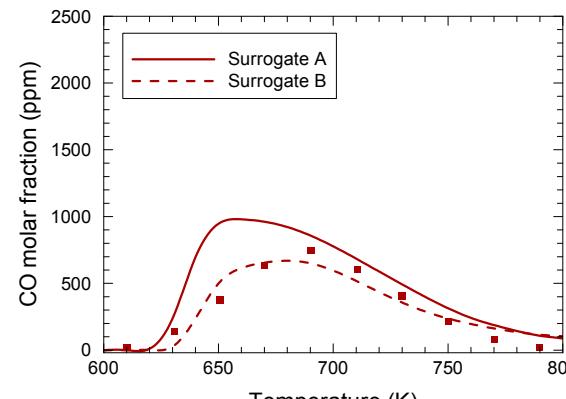
## ■ 如何构造适用于发动机三维模型的化学反应动力学机理？

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

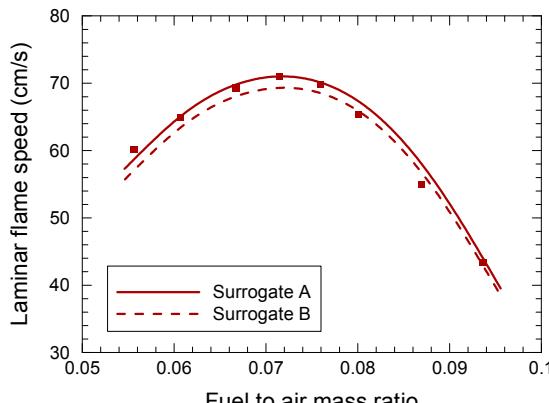
实用柴油的验证结果：



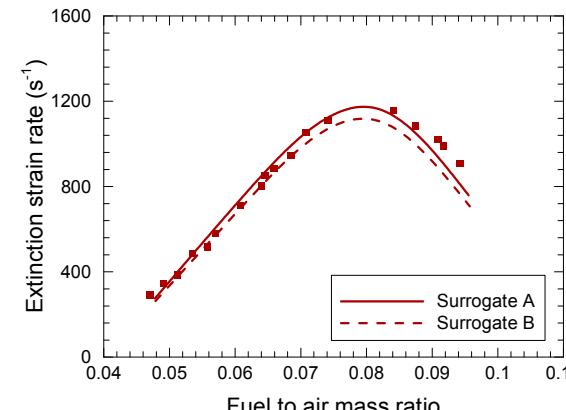
激波管内着火延迟的验证



流反应器内CO的验证



火焰速度的验证



熄火拉伸率验证

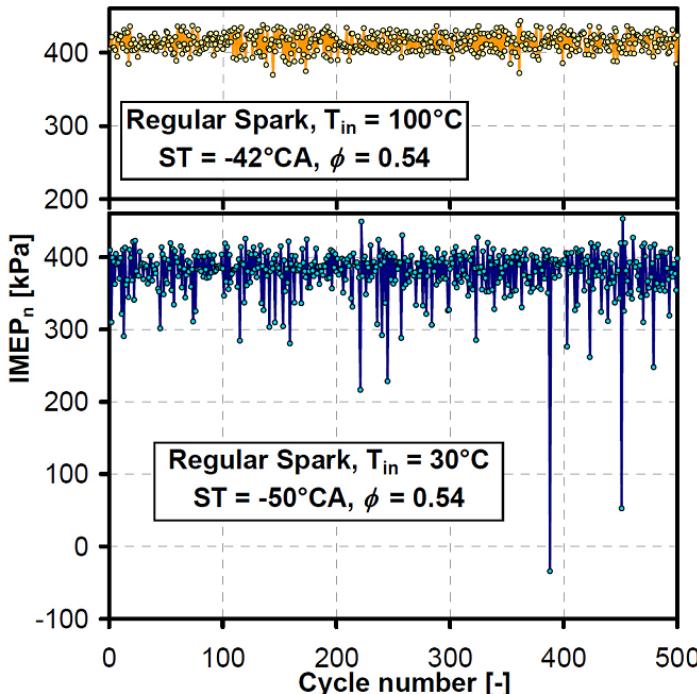
- 在各种反应器不同工况下，预测结果与实验结果均吻合得较好
- 只需优化C<sub>4</sub>-C<sub>10</sub>相关的反应常数

# 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？

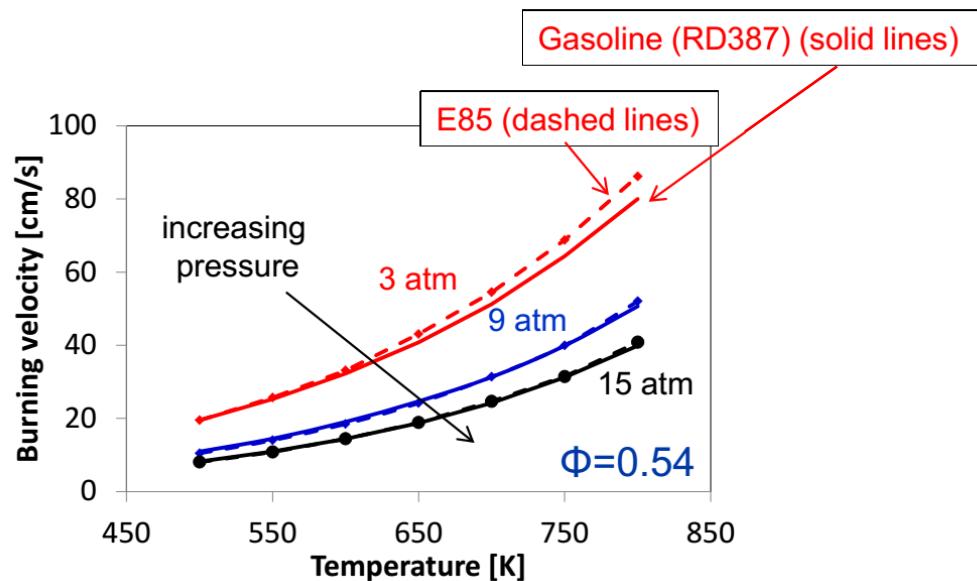
通过火焰速度数据，理解直喷火花点火（DISI）发动机的稳定性

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



发动机工况下，火焰速度随温度和压力的变化

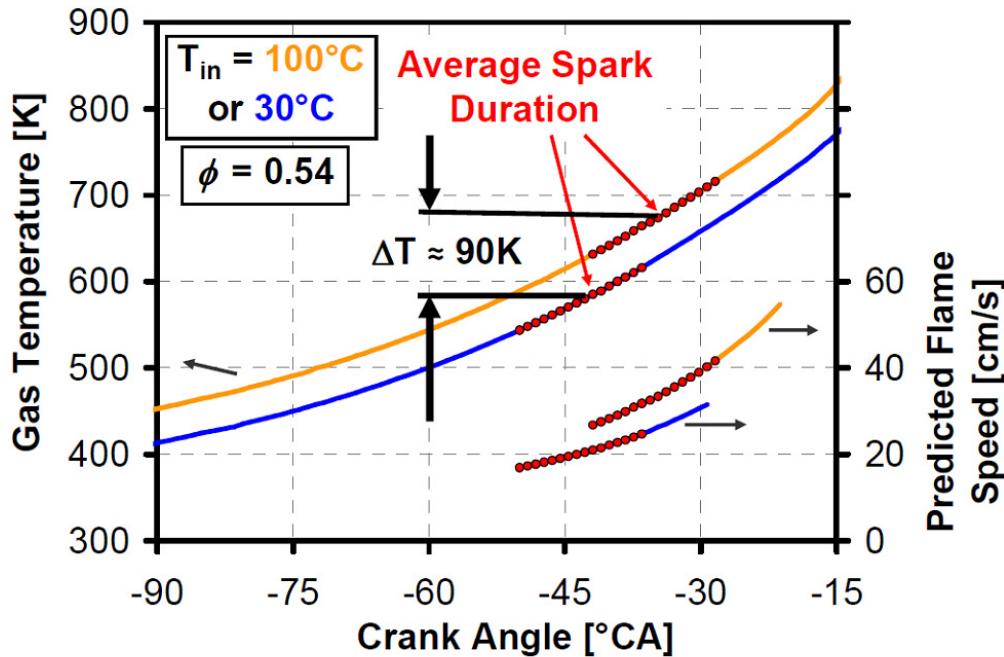
火焰速度随温度  
的升高而迅速增加

# 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。

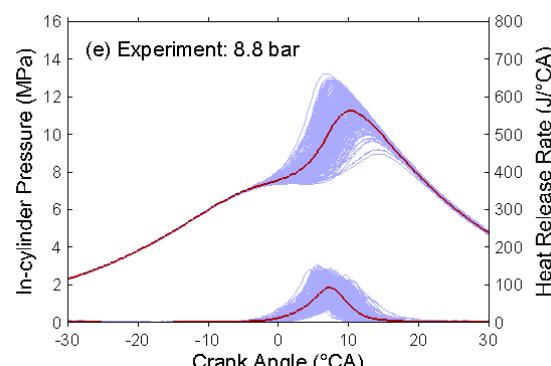
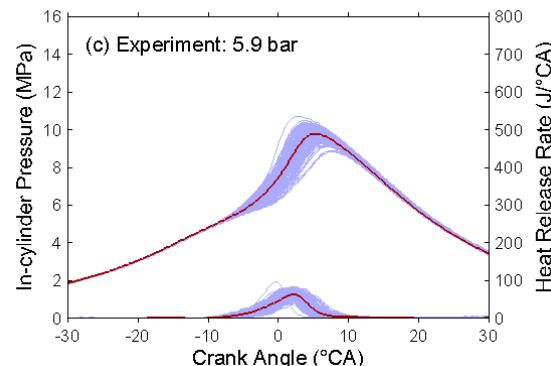
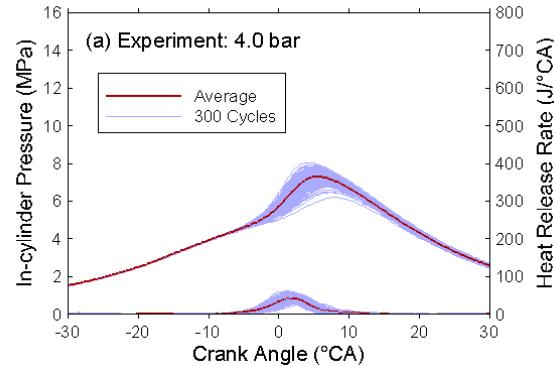
# 前沿与难点问题（四）

## ■ 如何将基础燃烧研究成果应用于发动机的设计中？

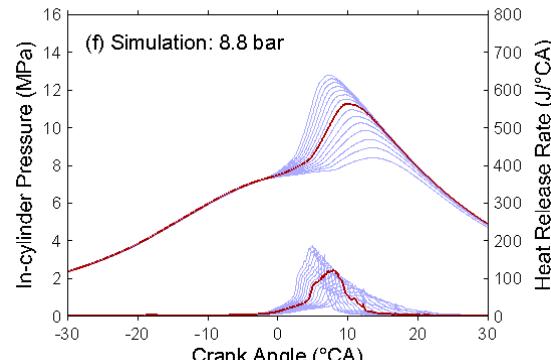
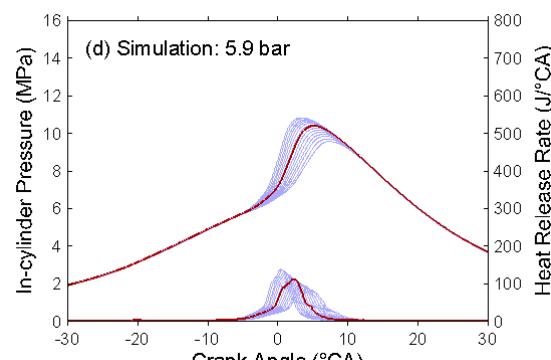
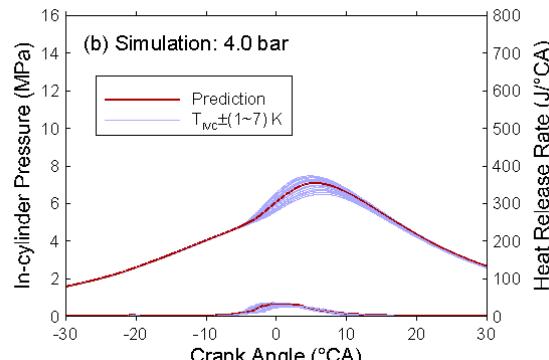
通过着火延迟数据，理解反应活性控制压燃（RCCI）发动机的稳定性

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 $\pm 7$ °C）



柴油/汽油RCCI燃烧 (1900 rev/min)

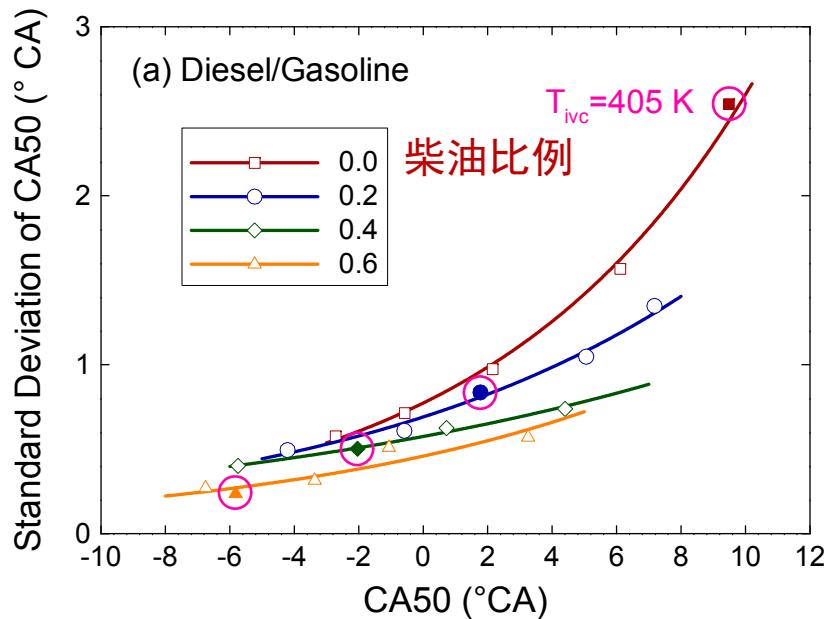
# 前沿与难点问题（四）

## ■ 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

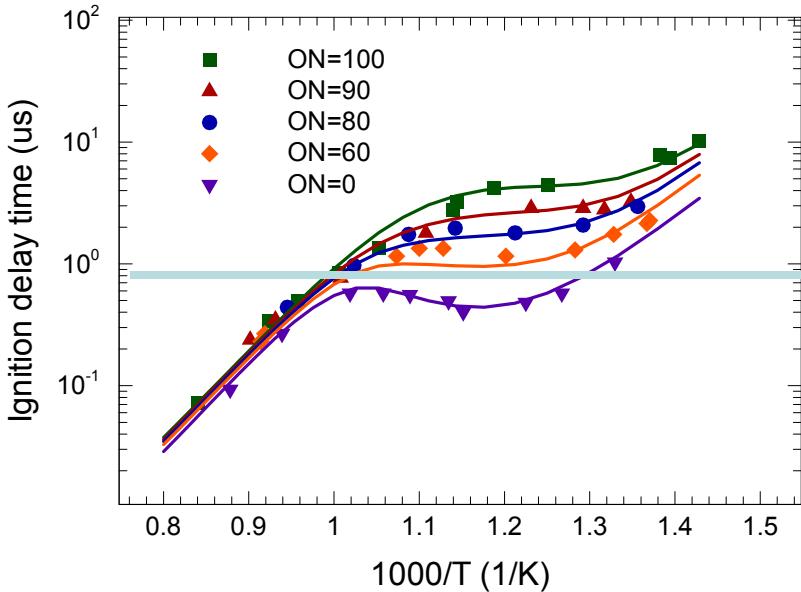
# 前沿与难点问题（四）

## ■ 如何将基础燃烧研究成果应用于发动机的设计中？

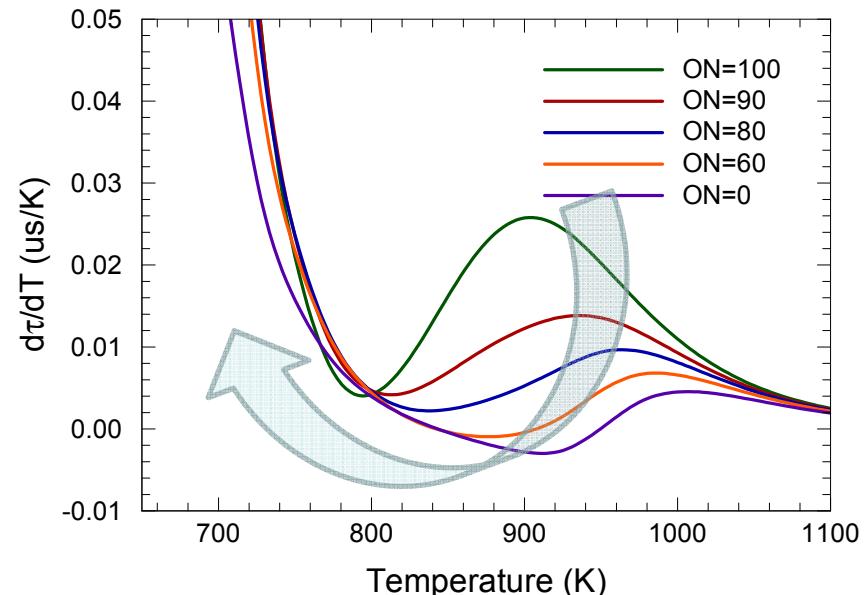
通过着火延迟数据，理解反应活性控制压燃（RCCI）发动机的稳定性

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,  $\varphi=1.0$



- 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

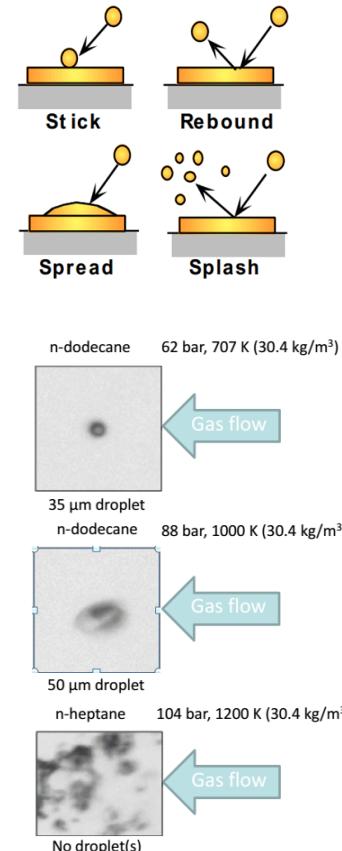
**实际发动机**

- ✓ 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)