



第一届全国青年燃烧学术会议



# 复杂多相湍流燃烧的高精度数值模拟

樊建人、罗坤、金台、岑可法

报告人：罗 坤

浙江大学

能源清洁利用国家重点实验室

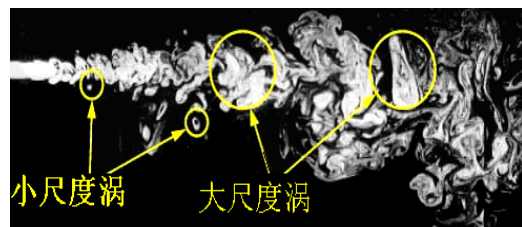
2015年9月19日

# 汇报内容

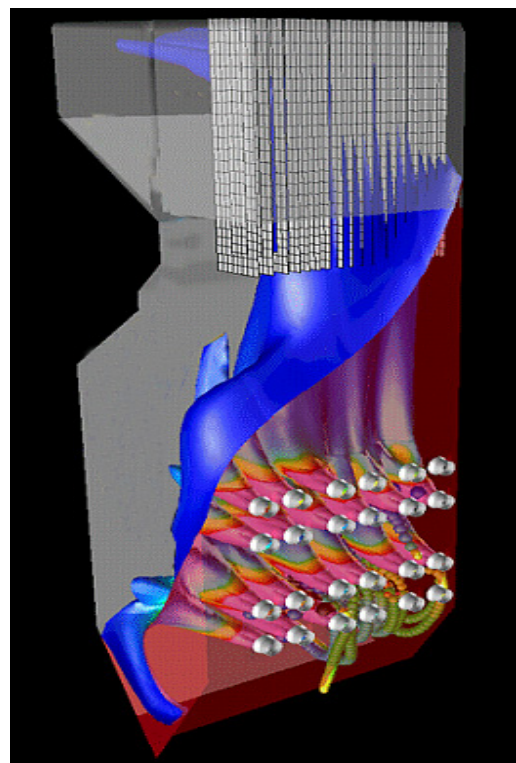
---

- 一. 研究背景与基础
- 二. 国际研究前沿与进展
- 三. 总结与展望

# 研究背景 — 复杂多相反应流动研究的科学问题



湍流的多尺度



煤粉燃烧器：多场耦合

## 多尺度相间耦合

连续相湍流涡团的多尺度、离散相颗粒的多尺度、燃烧火焰的多尺度  $\longrightarrow$  两相间多尺度耦合的作用和机理？

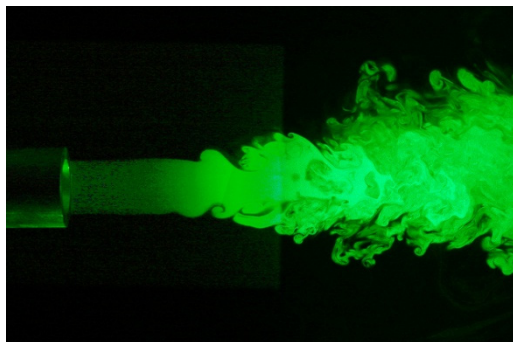
## 多物理过程耦合

湍流流动、传热传质、燃烧反应的耦合  $\longrightarrow$  两相内/相间多物理过程的耦合作用和机理？

## 单一尺度的研究手段和方法不适用

传统实验测量和基于平均方法的模拟得到的信息有限  $\longrightarrow$  高精度数值模拟方法和现代光学测量技术

# 研究背景 — 复杂多相反应流动的数值模拟研究

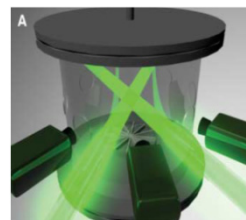


PIV实验照片

## 数值模拟方法

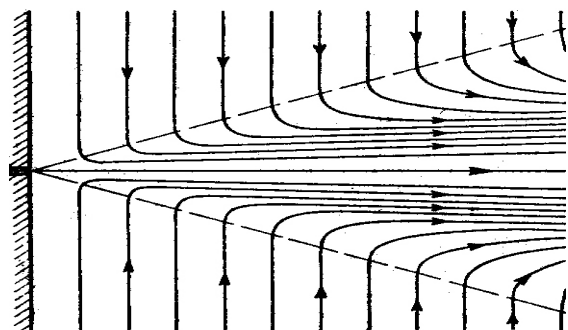
不引入湍流和燃烧模型，能够正确获得两相湍流和燃烧中多尺度结构的脉动信息。

脉动是流动系统的本质

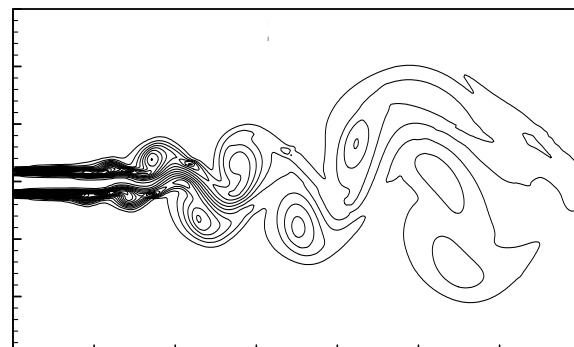


[Science, 2006, 311 : 835-838]

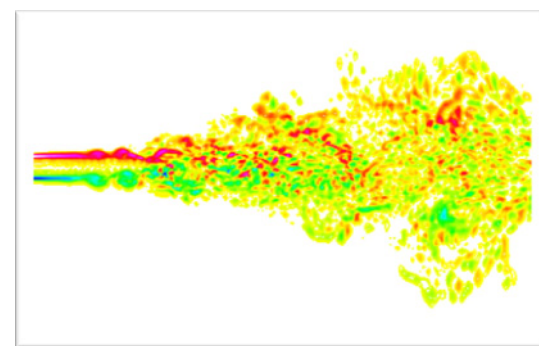
雷诺平均模拟(RANS)



大涡模拟(LES)



直接数值模拟(DNS)

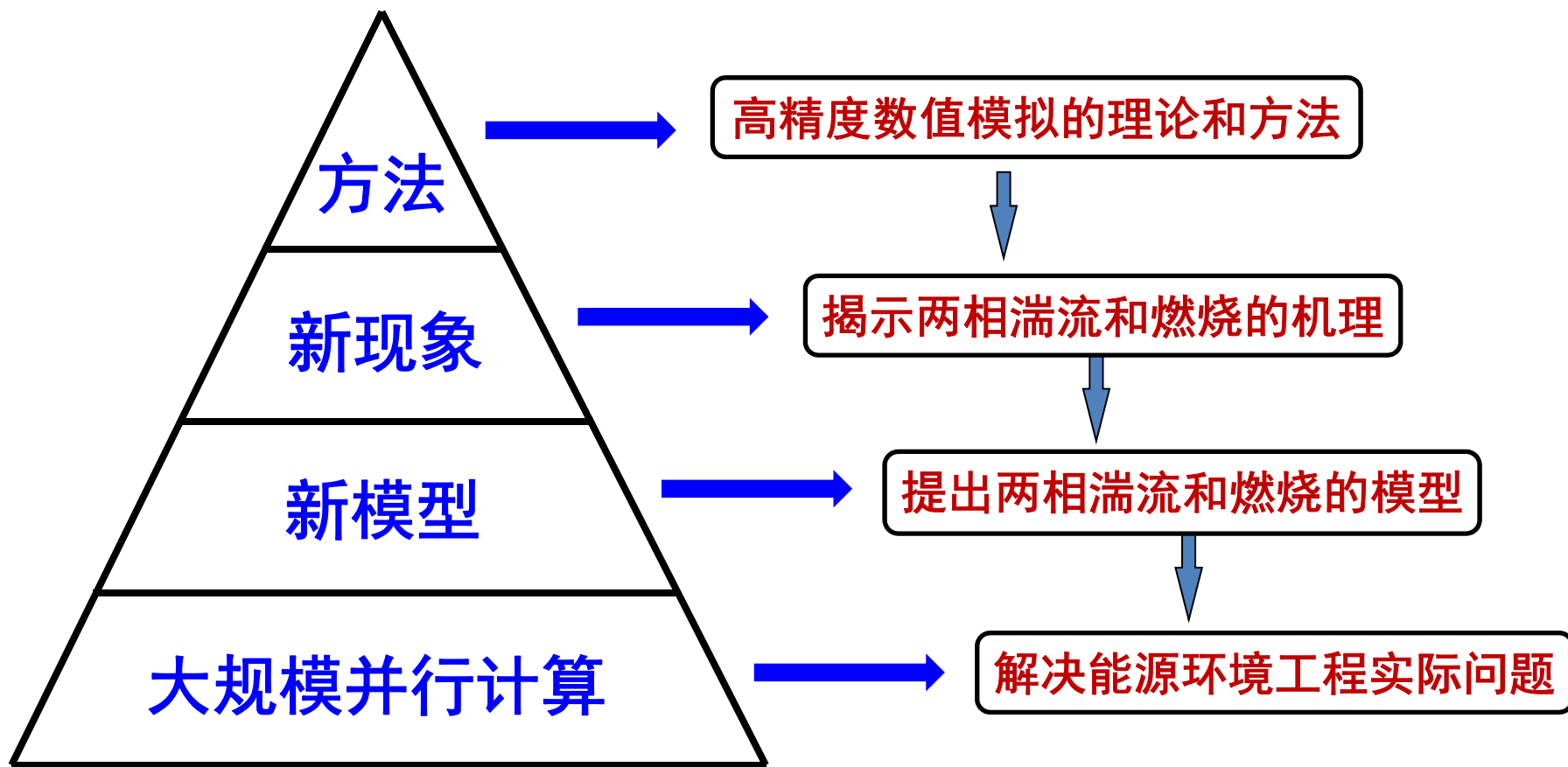


工程应用

改进提高

机理研究

# 主要学术思想



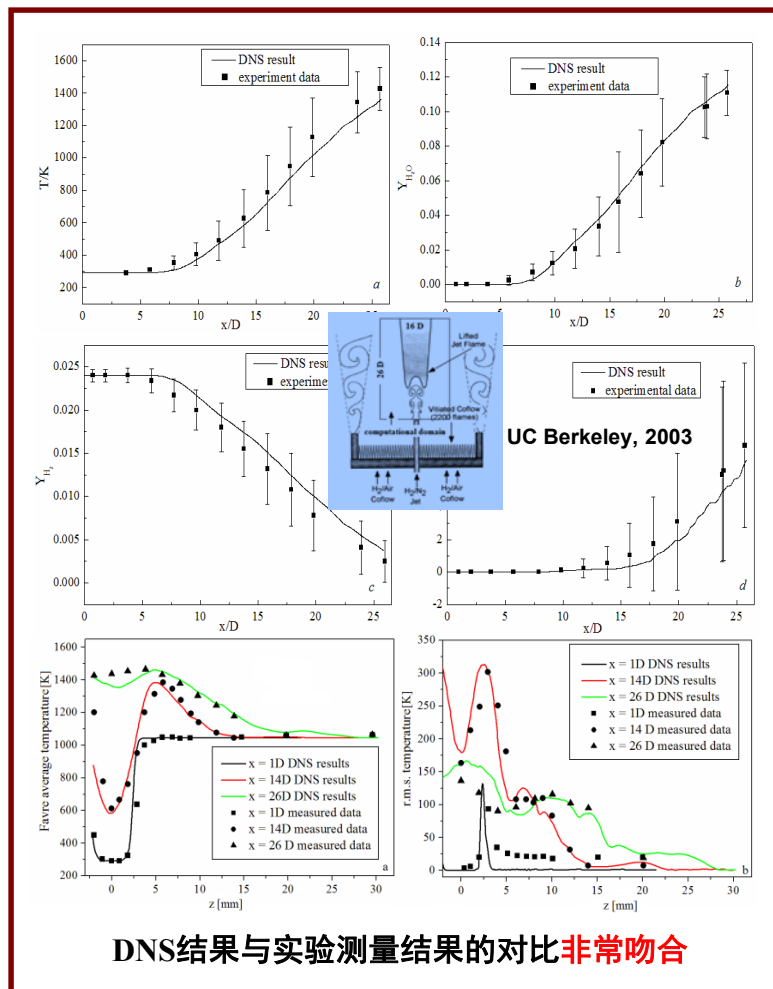
# 研究进展一: 复杂多相反应流动DNS方法的研究

## 存在的问题

Low-Mach近似, 简单化学反应, 简单几何形状

## 研究成果 (I):

- 提出了三维两相全可压缩湍流燃烧的直接数值模拟理论和方法
- 发展了高精度、格式稳定、易于大规模并行计算的离散方法
- 基于全可压缩理论, 改进了两相燃烧的特征无反射边界条件
- 耦合了拉格朗日颗粒轨道模型, 考虑了两相间质量、动量及能量的相互耦合作用



Yi FX, Fan JR et al. *Fuel*, 2011, 90(4): 1522-1528;

Wang H, Luo K et al. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2012, 37(6): 5246-5256;

Luo K, Wang H, Yi FX et al. *Energy & Fuel*, 2012, 26, 6118-6127

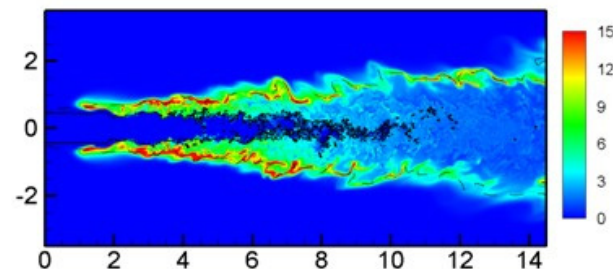
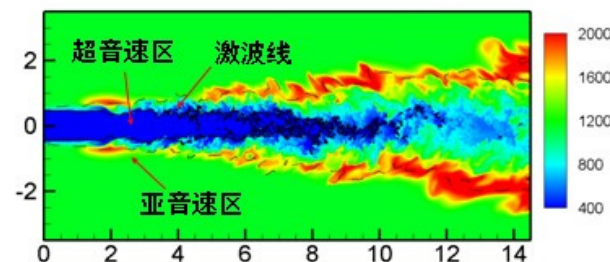
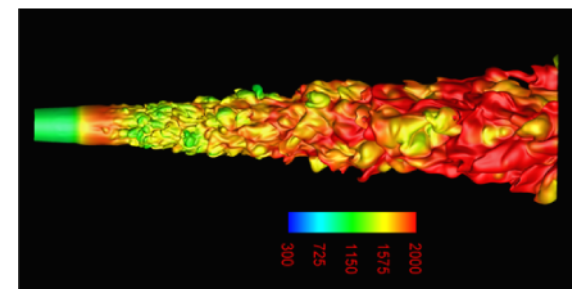
# 研究进展一: 复杂多相反应流动DNS方法的研究

## 存在的问题

亚音速流动和燃烧, 无法考虑激波和可压缩性

## 研究成果 (II):

- 发展了三维可压缩**超音速湍流燃烧**的直接数值模拟理论和方法
- 采用**可捕捉间断面的WENO**格式
- 采用三阶**TVD格式**的Runge-Kutta方法
- 特征**无反射边界条件**
- 大规模并行计算, **2000颗CPU, 500万机时**



超音速射流燃烧的火焰结构

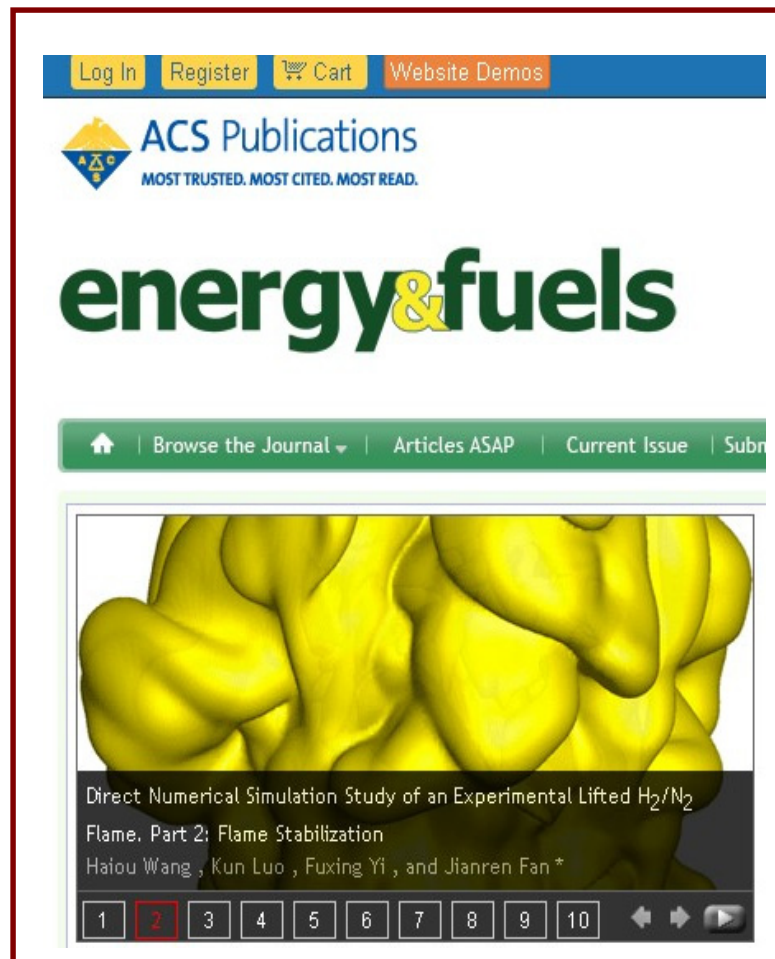
Lu SQ, Fan JR, Luo K, *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2012, 37(6): 5246–5256;  
Luo K, Jin T, Lu SQ, Fan JR, *Fuel*, 2013, under revision



# 研究进展二: 复杂多相反应流动机理的研究

## 研究成果 (I):

- 对著名的Cabra燃烧器进行了直接数值模拟研究, 预测的混合分数、温度和组份等标量与实验结果十分吻合。
- 揭示了燃烧火焰与湍流涡结构的相互作用模式;
- 发现抬升火焰的稳燃机理主要取决于自燃与大涡结构的相互作用



系列论文在Energy & Fuel上发表, 并作为研究亮点被选在网站首页进行展示

Luo K, Wang H, Yi FX et al. *Energy & Fuel*, 2012, 26, 6118–6127

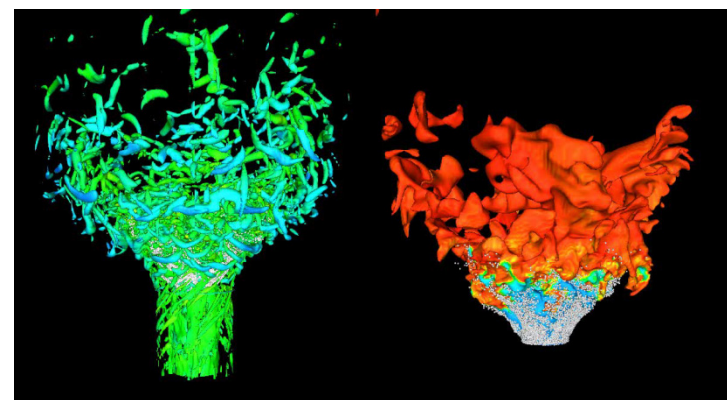
Wang H, Luo K, Yi FX et al. *Energy & Fuel*, 2012, 26, 4830–4839



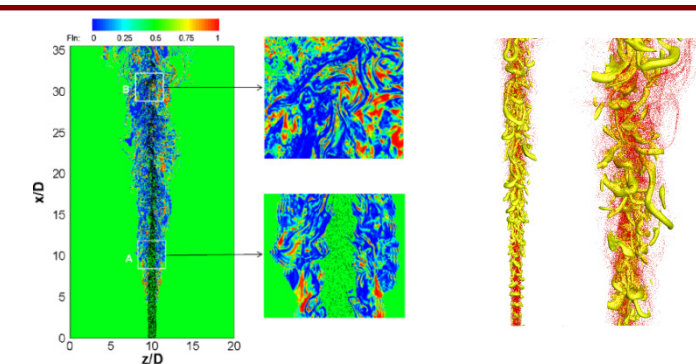
# 研究进展二: 复杂多相反应流动机理的研究

## 研究成果 (II):

- 揭示了气液气固两相湍流燃烧的火焰规律, 发现流场中同时存在着预混燃烧火焰和扩散燃烧火焰
- 发现在上游, 煤粉燃烧以群燃烧的模式进行, 而在下游以单颗粒燃烧的模式进行



旋流液雾燃烧的涡结构及火焰结构



气固两相煤粉燃烧不同的燃烧模式

DNS结果表明, 复杂的两相湍流燃烧中既存在着扩散燃烧火焰, 也存在着预混燃烧火焰, 传统上仅考虑扩散燃烧火焰的模型具有明显的局限性

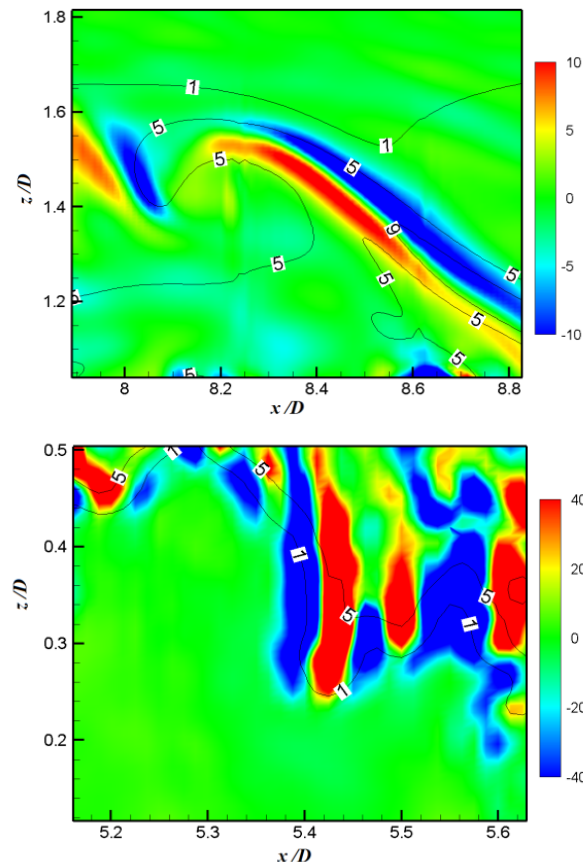
Luo K, Pitsch H, Pai M et al. *Proc. Comb. Inst.*, 2011, 33: 2143-2152

Luo K, Wang Haiou, Fan JR et al. *Energy & Fuel*, 2012, 26: 6128-6136

# 研究进展二: 复杂多相反应流动机理的研究

## 研究成果 (III):

- 揭示了超音速燃烧火焰的**结构特征及稳燃机理**
- 受可压缩性的影响, **火焰的半宽发展比亚音速要缓慢**
- 火焰底部的**稳燃以自燃为主, 扩散燃烧总体对热释放的贡献较大**



超音速燃烧中存在的爆震波和缓燃波

研究论文应邀直接在工程热物理学报上发表  
本项研究获得国家自然科学基金项目的资助

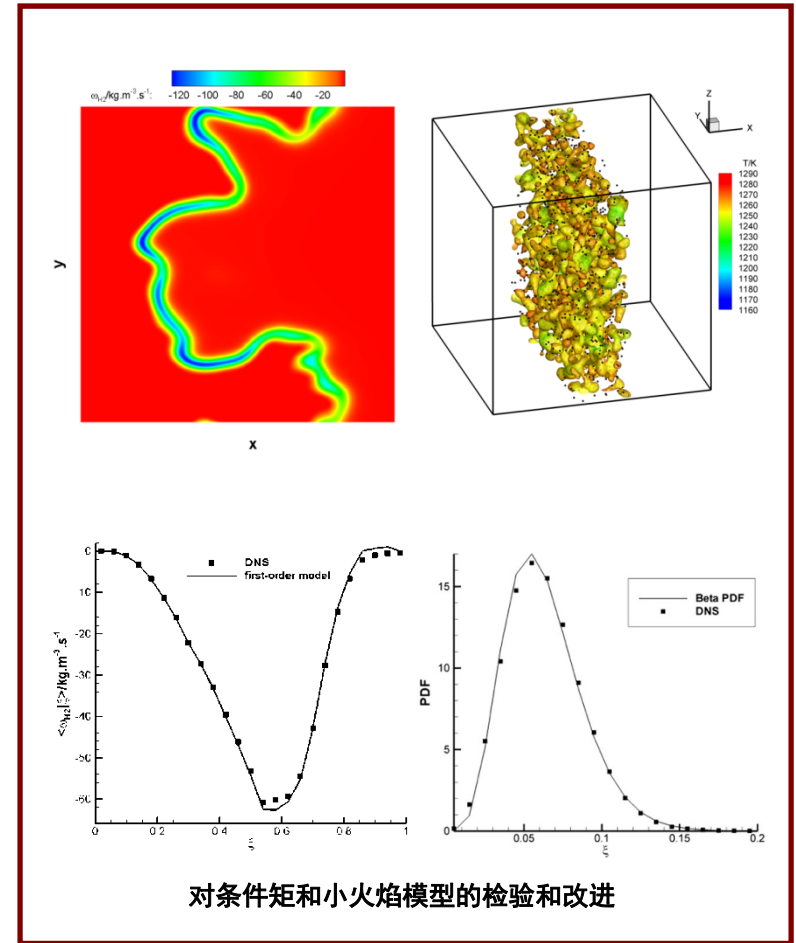
# 研究进展三: 复杂多相反应流动模型的研究

## 存在的问题

燃烧模型存在很多假定, 具有不确定性

## 研究成果 (I):

- 对各向同性湍流中的平面火焰进行了直接数值模拟研究, 分析了不同当量比的火焰结构, 检验了条件矩亚网格燃烧模型和小火焰燃烧模型
- 基于直接数值模拟, 对RANS中的燃烧模型进行评估, 改进了液雾燃烧中的条件矩燃烧模型



**Luo K** Pitsch H, Pai M et al. *Proc. Comb. Inst.*, 2011, 33: 2143-2152;  
**Kun Luo**, Jianren Fan, Kefa Cen. Flamelet Equations for Spray Combustion” in  
《*Sprays: Types, Technology and Modeling*》, Nova Science Publishers, 2011-11-30.

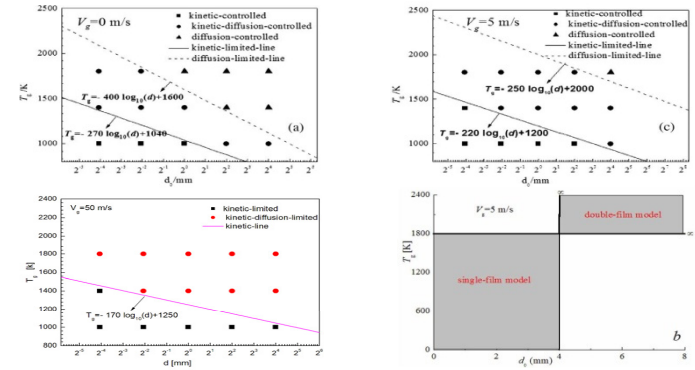
# 研究进展三: 复杂多相反应流动模型的研究

## 存在的问题

煤粉燃烧模型在不同条件下有不同的适用性

## 研究成果 (II):

- 提出了煤粉燃烧模型的选择方法并给出了图谱
- 建立了新的液雾燃烧小火焰方程, 全面考虑了液滴蒸发效应对小火焰结构的影响



$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + \dot{\omega}_i + \delta_i \dot{S}_m, \\ \frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho T u_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{C_p} (\dot{\omega}_T + \dot{S}_T), \\ \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - \rho \frac{\chi}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} &= \frac{1}{C_p} (\dot{\omega}_T + \dot{S}_T) - \left[ T + \frac{\partial T}{\partial Z} (1 - Z) \right] \dot{S}_m, \\ \rho \frac{\partial Y_i}{\partial \tau} - \rho \frac{\chi}{2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} &= \dot{\omega}_i - \left[ Y_i + \frac{\partial Y_i}{\partial Z} (1 - Z) - \delta_i \right] \dot{S}_m,\end{aligned}$$

考虑蒸发效应的液雾燃烧的小火焰方程

Luo K, Fan JR, Cen KF. *Fuel*, 2013,103:1154–1157

Kun Luo, Jianren Fan, Kefa Cen. Flamelet Equations for Spray Combustion” in  
《*Sprays: Types, Technology and Modeling*》, Nova Science Publishers, 2011-11-30.

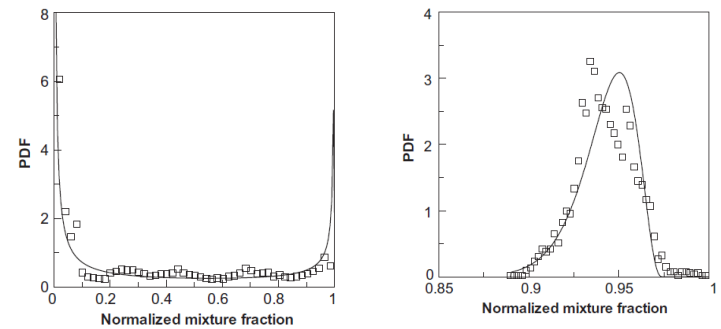
# 研究进展三: 复杂多相反应流动模型的研究

## 存在的问题

传统上人们认为两相燃烧仅仅是扩散燃烧

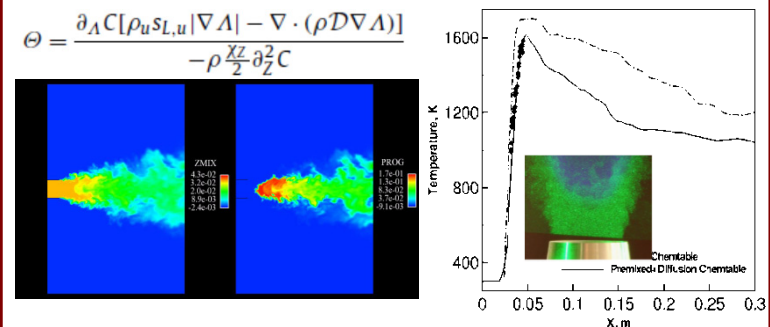
## 研究成果 (III):

- 提出液雾燃烧大涡模拟亚网格混合分数的PDF模型, 能更好地描述亚网格内混合物分数的分布状态
- 提出能同时考虑扩散和预混燃烧的大涡模拟复合小火焰模型, 得到了比传统模型更准确的模拟结果



$$Z_R = \langle Z \rangle + \alpha \sqrt{\langle Z^2 \rangle - \langle Z \rangle^2} \quad \text{with } \alpha = 2$$

新的液雾燃烧大涡模拟亚网格PDF模型



同时考虑扩散燃烧和预混燃烧的复合小火焰模型

根据DNS研究揭示燃烧机理, 提出改进燃烧模型

Luo K Pitsch H, Pai M et al. *Proc. Comb. Inst.*, 2011, 33: 2143-2152;

Kun Luo, Jianren Fan, Kefa Cen. Flamelet Equations for Spray Combustion” in  
《*Sprays: Types, Technology and Modeling*》, Nova Science Publishers, 2011-11-30.

# 主要工作总结

---

- ✓ **在理论方法上**，提出了两相流动和燃烧的直接数值模拟理论和方法，解决了两相燃烧中多物理场、多尺度耦合的高精度数值求解问题。
- ✓ **在机理研究上**，揭示了两相燃烧的火焰规律，为两相湍流和燃烧新模型的发展和应用提供了依据。
- ✓ **在数学模型上**，提出了新的液雾燃烧小火焰方程、两相燃烧的复合小火焰模型，澄清了两相湍流与燃烧领域一些长期存在有争议的问题。



## 二、国际研究前沿与进展

### 复杂多相反应流的高精度数值模拟

```
graph TD; A[复杂多相反应流的高精度数值模拟] --> B[稀疏气固两相燃烧的LES/DNS研究]; A --> C[稠密气固流化床内两相流的LES/DNS研究]; A --> D[稠密气液雾化燃烧数值模拟研究];
```

稀疏气固两相  
燃烧的LES/DNS  
研究

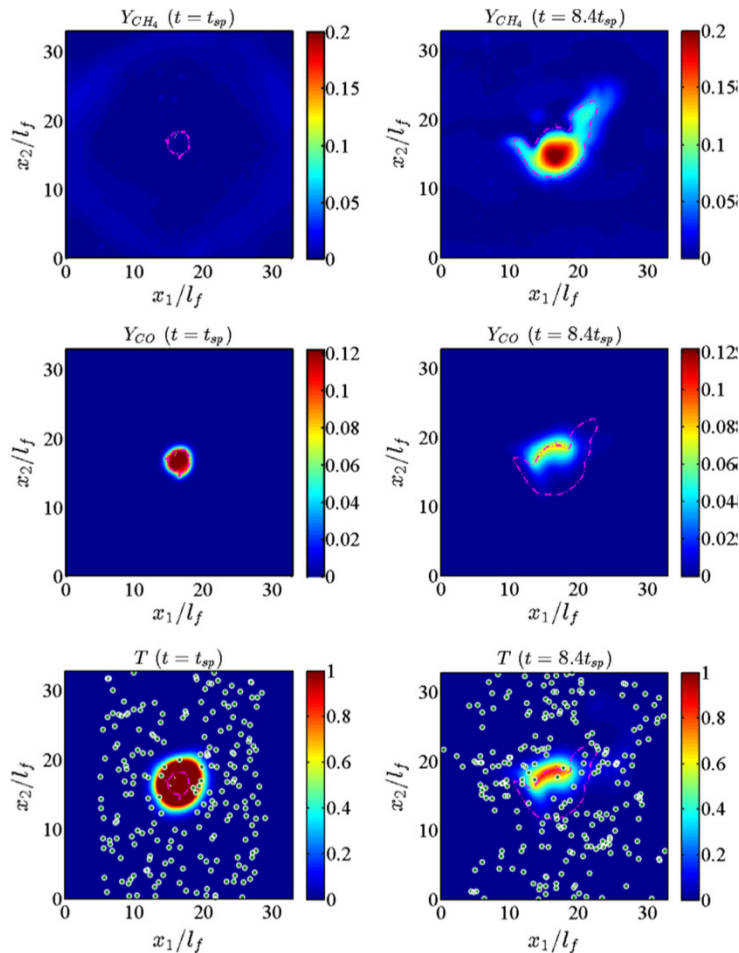
稠密气固流化  
床内两相流的  
LES/DNS研究

稠密气液雾化  
燃烧数值模  
拟研究

# 煤粉燃烧DNS研究进展

## 1. 煤粉颗粒的强迫着火的DNS研究

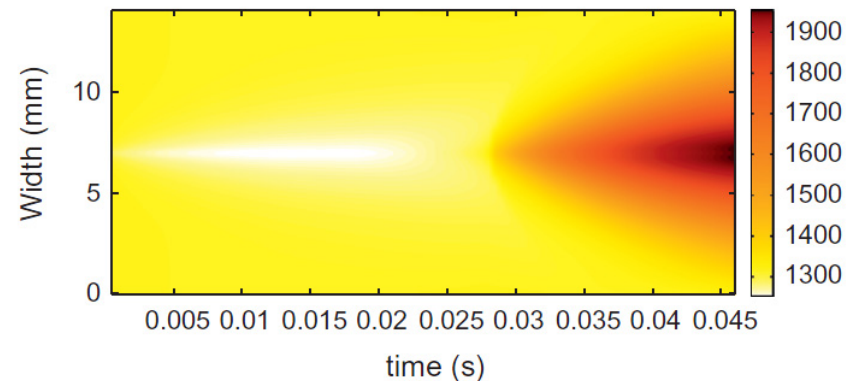
- 煤粉颗粒在box湍流中强迫着火
- 研究颗粒当量比、湍流强度、颗粒粒径对着火的影响



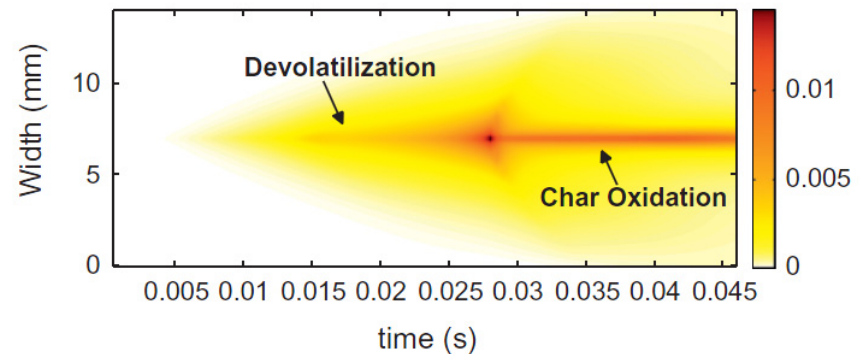
T. Brosh et al. Fuel 145 (2015) 50-62.

## 2. 一维层流煤粉燃烧研究

- 单颗粒煤粉在层流气流中燃烧
- 研究对比多种煤燃烧模型



(a) Temperature (K).



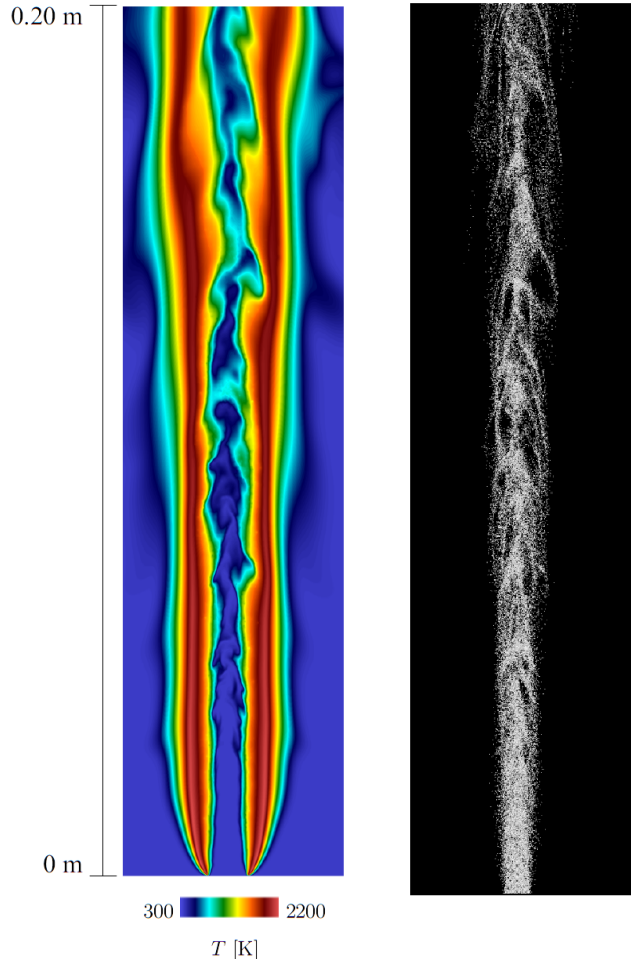
(b) CO mass fraction.

B. Goshayeshi et al. Combust Flame 162 (2014) 4016-4024.

# 煤粉燃烧DNS研究进展

## 3. 实验室煤粉射流火焰DNS研究

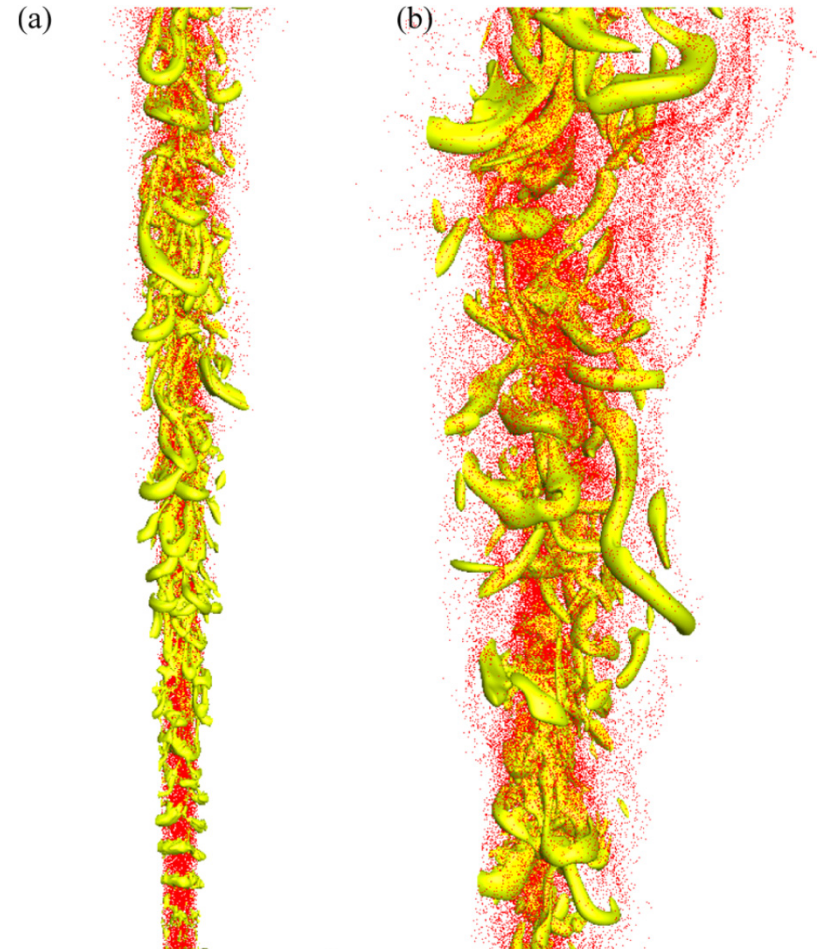
- 提出了构造的挥发分的物性计算方法
- 提出了新的挥发分两步反应机理
- 模拟了实验室尺度煤粉火焰



T. Hara, M. Muto, R. Kurose et al.

## 4. 构造的煤粉湍流射流火焰DNS研究

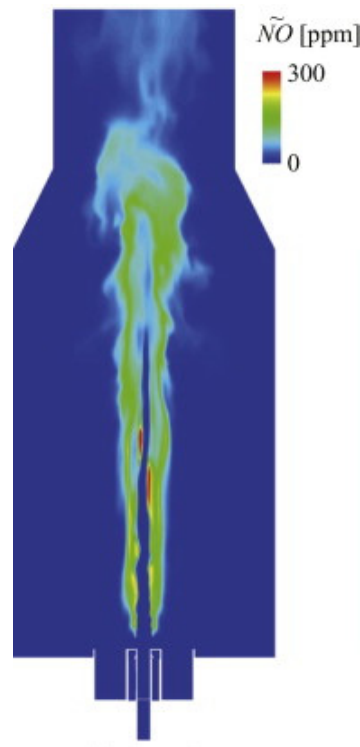
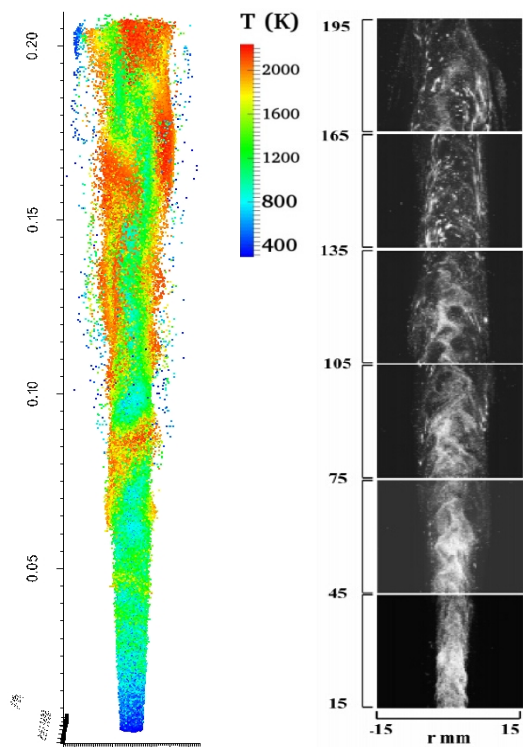
- 研究射流火焰的涡结构
- 研究火焰的燃烧特性，分析煤粉燃烧模式
- 研究煤粉射流火焰的稳燃机理



K. Luo et al. Energy Fuels 26 (2012) 6128-6136

# 煤粉燃烧LES研究进展

## ➤ 基于LES计算实验室尺度的煤粉燃烧器



## 前沿问题：

- 开发耦合LES的高精度气相燃烧模型（PDF, flamelet）
- 开发耦合LES的高精度煤粉燃烧模型——挥发分析出、焦炭燃烧模型
- 开发煤粉燃烧的污染物（soot, NO<sub>x</sub>）模型
- 基于LES计算工程中的煤粉燃烧器

# 煤粉燃烧LES/DNS研究：小结

## DNS存在问题：

1. DNS求解计算量大，难以计算实验室尺度的火焰，其结果准确性受到质疑
2. 点源DNS未考虑颗粒的实际尺寸、形状，不能研究具体煤粉颗粒表面的传热、传质现象
3. 煤粉燃烧模型的发展，需考虑颗粒的孔隙结构、热解成分等
4. 污染物生成机理是煤粉燃烧的重要问题

## LES存在问题：

1. 由于煤粉燃烧的复杂性，气相燃烧模型耦合LES 难以找到合适的模型。
2. LES应用于工程实际难点：一方面简单模型计算量小，但是预测（特别是组分，温度）不准确，另一方面高精度模型往往计算量大；
3. 煤粉燃烧过程及其复杂，挥发分组分，热物性难以判断，焦炭燃烧形成多孔结构，模型难以建立；

共同：煤粉燃烧模型的发展



# 煤粉燃烧模型研究进展

问题：挥发分析出（热解）模型、焦炭氧化/气化（燃烧）模型

难点：热解速率以及热解产物受到升温速率、最终温度、煤种等影响

## Network 热解模型——复杂

- Chemical percolation devolatilization (CPD)
- Function group-depolymerization, vaporization and cross-linking model (FG-DVC)
- Distributed energy chain model (FLASHCHAIN)

复杂模型拟合  
经验模型

## 经验热解模型——可用于CFD计算

- 单方程模型 (SFOR)
- 双方程竞争模型 (C2SM)
- 多方程热解模型
- 分散活化能模型 (DAEM)
- tabulated-devolatilization-process (TDP)  
构造热解方程参数数据库，查表插值  
动态求解热解参数
- Prrolysis kinetic preprocessing (PKP)

热解产物：实际上为多种组分混合气体 + 焦油

简化为  $\text{CH}_4$  或者 部分气体混合物 ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{H}_2$ 等) 或者 构造物质 ( $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c$ )

目前研究方法趋势：通过复杂热解模型构造、校准经验热解模型

[1] N. Hashimoto, H. Shirai. Energy 71 (2014) 399-413.

[2] M. Vascellari, R. Arora, M. Pollack, C. Hasse. Fuel 113 (2013) 654-669.



# 煤粉燃烧模型研究进展

**问题：**挥发分析出（热解）模型、**焦炭氧化/气化（燃烧）模型**

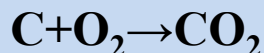
**难点：**实际上涉及到表面反应、孔隙结构、扩散、吸附等多物理过程

仅考虑焦炭表面反应：

- 详细反应模型，使用GRI3.0机理，包含了多种中间组分

根据颗粒表面C与O<sub>2</sub>生成的产物简化

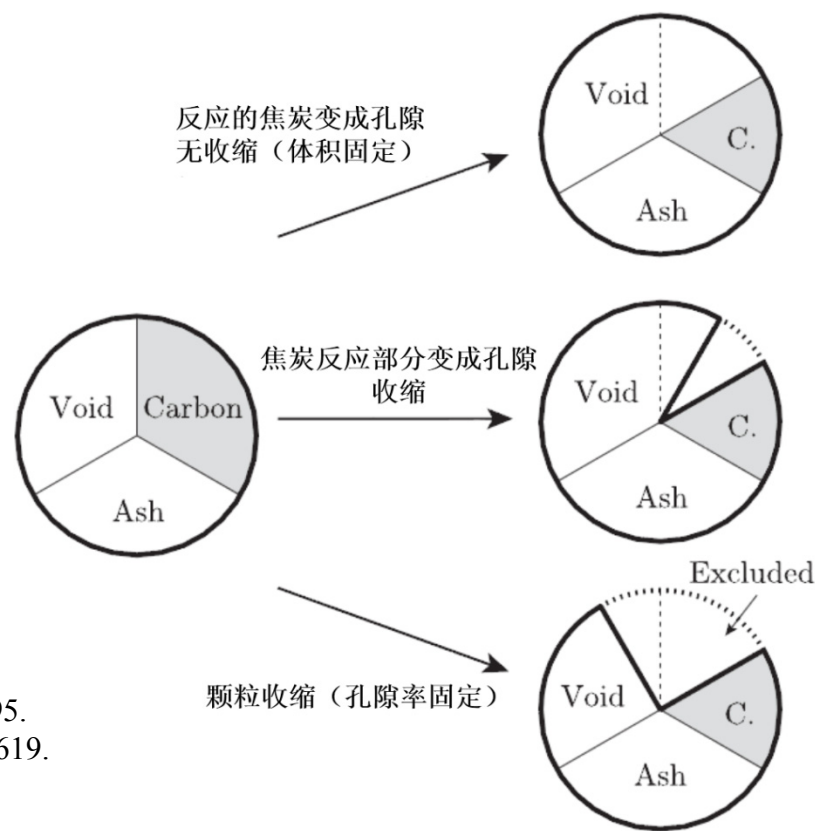
- 单膜模型：颗粒表面C与O<sub>2</sub>直接生成CO<sub>2</sub>，而不是CO，形成一个气膜



- 双膜模型：颗粒表面两个气膜，一个是C与CO<sub>2</sub>生成CO，另一个是CO的燃烧反应



**目前研究方法趋势：**考虑焦炭孔隙结构变化，计算焦炭氧化、气化反应



- [1] C. Gonzalo-Tirado, S. Jimenez et al. Combust Flame 161 (2014) 1085-1095.
- [2] N. Haugen, M.B. Tilghman, R. Mitchell. Combust Flame 161 (2014) 612-619.
- [3] H. Umetsu, H. Watanabe et al. Combust Flame 161 (2014) 2177-2191.
- [4] R. Jovanovic, E. Marek, S. Maletic et al. Fuel 151 (2015) 172-181.

# 单颗粒煤粉燃烧研究进展

1. 传统单膜模型的检验和改进：

Geier et al.(2012), Gonzalo-Tirado et al.(2013, 2015), Yu et al.(2013)

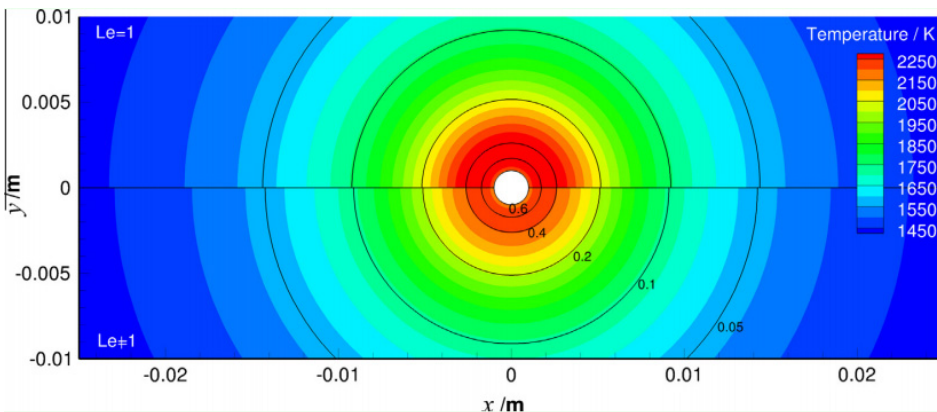
2. 新模型的提出与运用

- 移动火焰锋面模型：Zhang et al.(2005), Gu et al.(2008)
- 描绘碳颗粒燃烧时质量、密度和直径变化关系的新型模型：Haugen et al.(2014, 2015)
- 考虑孔隙结构的焦炭燃烧模型：Singer et al.(2013)

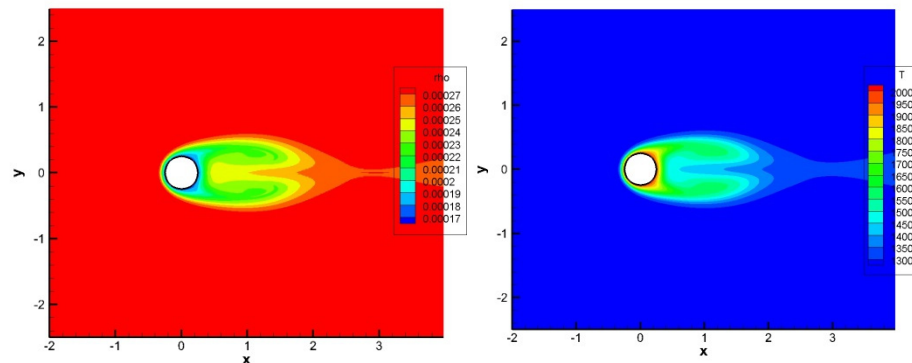
3. 对颗粒燃烧过程的全尺度数值模拟

作者	研究内容	特点
Kestel et al.(2010, 2012) Safronov et al.(2012, 2014) Nikrityuk et al.(2013) Richter et al.(2013)	气体雷诺数、温度、组分(H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )、对颗粒燃烧速率、火焰形态和燃烧状态的影响	没有考虑颗粒在燃烧过程中表观密度和尺寸的变化
Xu et al.(2013) Vascellari et al.(2013)	使用小火焰模型、全尺度模拟对碳颗粒的燃烧过程进行模拟，并使用全尺度模拟结果验证了改进的小火焰模型	考虑了曲率效应和Le数的影响
Raghavan et al.(2005)	不同温度下雷诺数对颗粒周围火焰形态和燃烧速率的影响	在燃烧速率和火焰形态上，有实验对比
Higuera et al.(2008)	颗粒尺寸、速度、流体温度和组分对颗粒的燃烧速率、颗粒温度和熄火特性的影响	考虑了颗粒直径随反应的变化

# 单颗粒煤粉燃烧研究进展



不同 $Le$ 数下的温度云图(Xu et al., 2013)

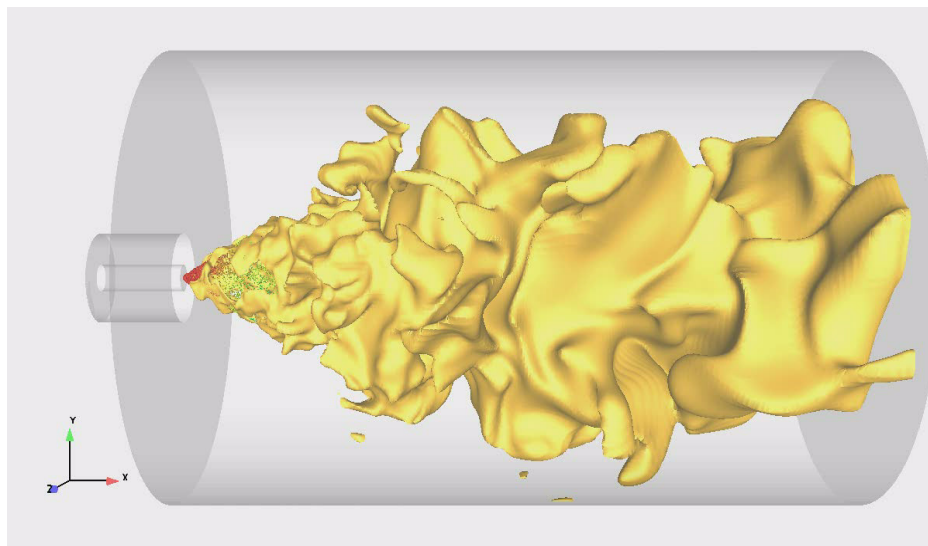


使用内嵌边界方法计算得到的密度、温度云图  
( $t=0.01s$ ,  $T_0=1280K$ ,  $T_{obj}=2000K$ )

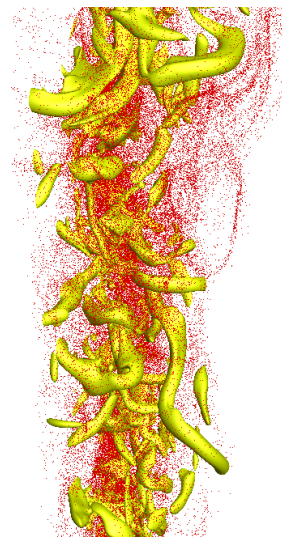
## 研究难点：

1. 如何将复杂的气-固异相反应耦合到整个流场中，包括由异相反应带来的组分变化、质量流和能量变化；
2. 如何表现颗粒的尺寸、孔隙结构、表观密度和温度，以及上述参数在燃烧过程中的变化；
3. 反应机理和计算量的控制。

# 研究前沿与进展

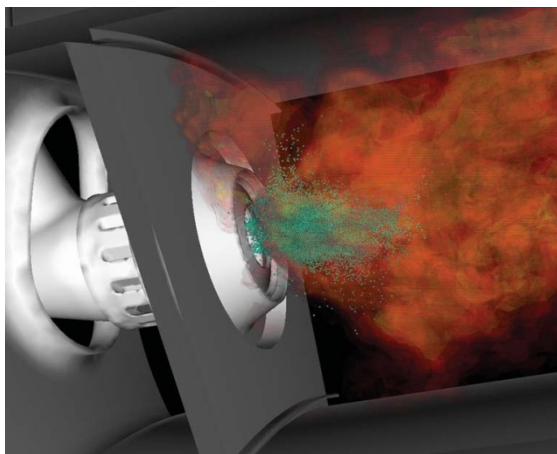


液滴颗粒燃烧



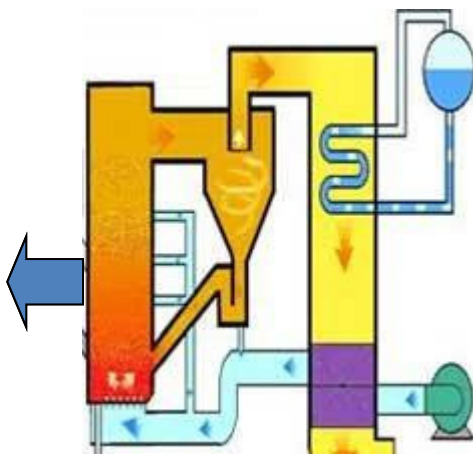
煤粉颗粒燃烧

稀疏两相燃烧已取得较多的研究成果，稠密两相流动燃烧初步发展



液体燃料雾化燃烧

高浓度两相反应流的研究比较少见，有待发展。



固体燃料流化床燃烧

## 二、国际研究前沿与进展

### 复杂多相反应流的高精度数值模拟

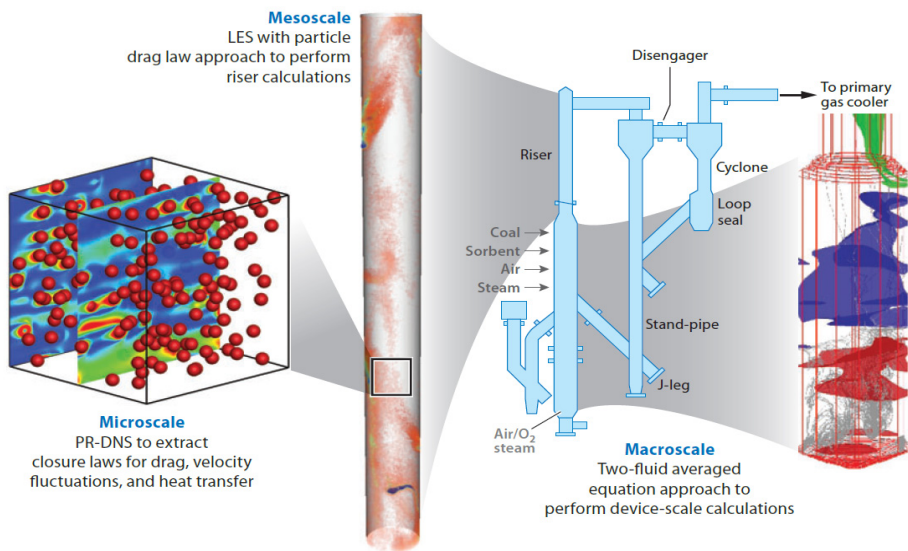
```
graph TD; A[复杂多相反应流的高精度数值模拟] --> B[稀疏气固两相燃烧的LES/DNS研究]; A --> C[稠密气固流化床内两相流的LES/DNS研究]; A --> D[稠密气液雾化燃烧数值模拟研究];
```

稀疏气固两相  
燃烧的LES/DNS  
研究

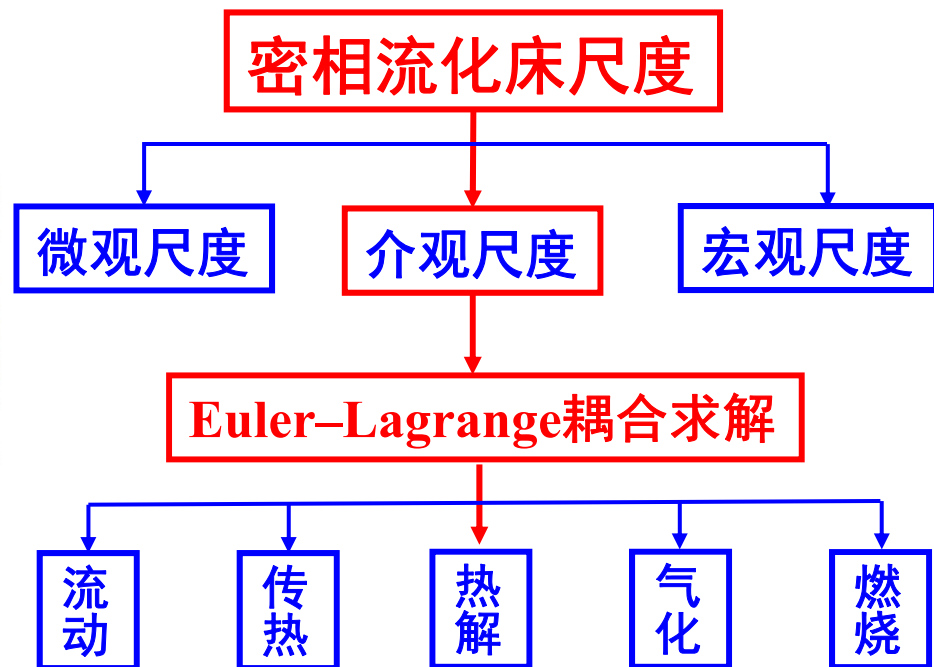
稠密气固流化  
床内两相流的  
LES/DNS研究

稠密气液雾化  
燃烧的数值模  
拟研究

# 稠密气固燃烧研究



密相循环流化床内尺度分辨示意图  
(Subramaniam, 2013)

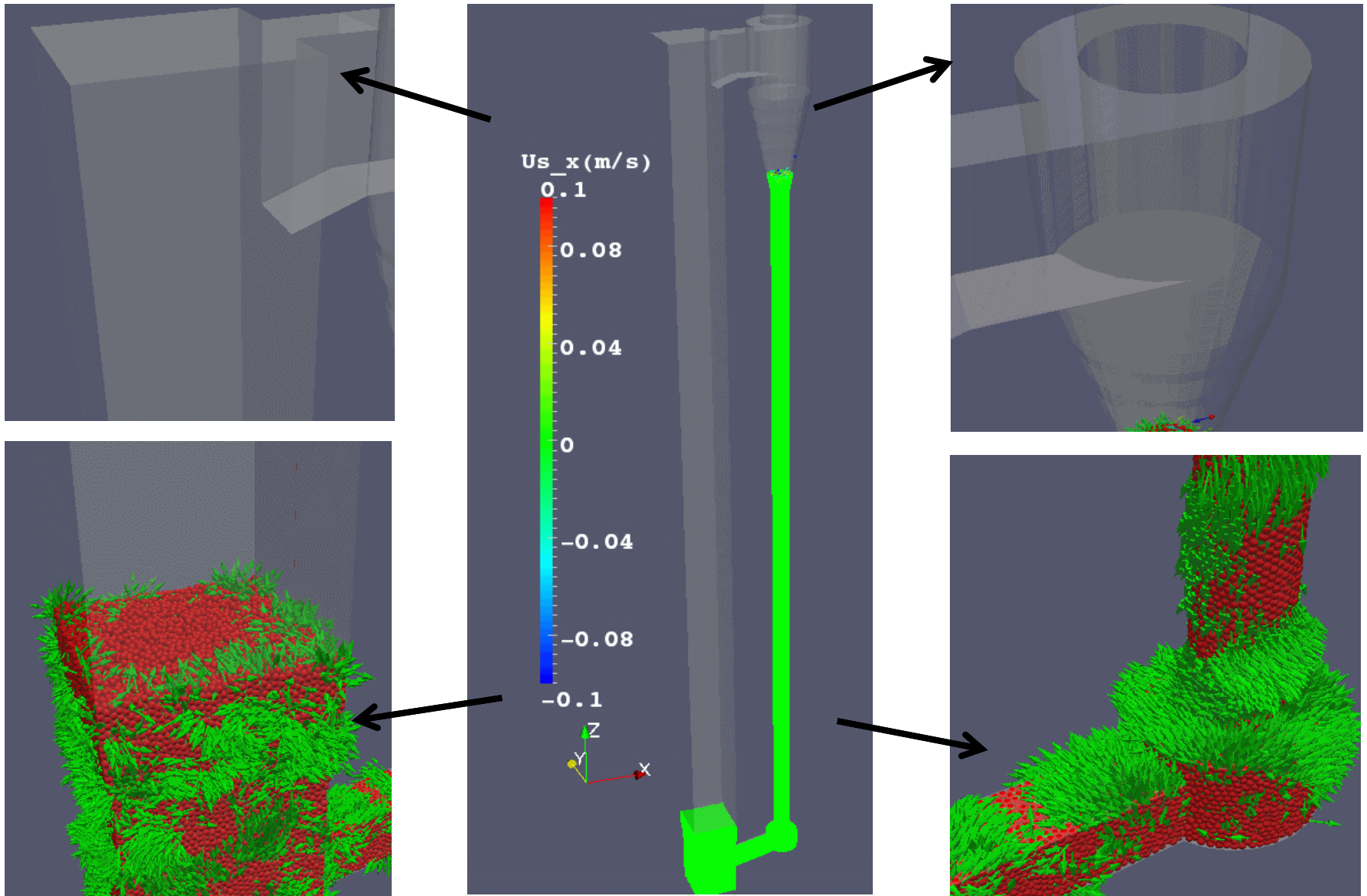


## 存在问题：

1. 对气固两相运动进行求解过程中，常忽略气体湍流对颗粒的影响；
2. 气固流动、传热、热解、均相和异相反应及污染物生成等复杂模型的耦合；
3. 颗粒数量的增加，针对颗粒的并行计算模式需要进一步优化；
4. 密相流化床燃烧实验测量的困难，使得模拟缺乏实验对比验证。



# 稠密气固燃烧研究：冷态



# 稠密气固燃烧研究：热态

作者	研究简介	成果	存在问题
Zhou et al. (2003, 2004)	二维鼓泡流化床内煤的燃烧过程	均相、异相反应；三种传热占比；热释率影响因素；温度、组分分布。	二维颗粒颗粒数较少；热解模型简化较多；所有反应假设一级；颗粒等温假设。
Liu et al. (2011)	二维鼓泡流化床丙烷和煤的燃烧过程	温度、组分分布；气体流动对异相反应的影响；煤燃烧的影响因素。	忽略辐射传热；煤颗粒直径变化忽略；煤70%碳，30%灰；床体较小，颗粒数少。
Geng et al. (2011)	拟三维鼓泡床内碳的燃烧过程	床料(沙)的抑制效应；温度、组分分布；新的碳燃烧子模型。	颗粒数较少，床体小。
Ku et al. (2015)	三维鼓泡流化床反应器内煤的气化燃烧过程	颗粒碰撞、气固耦合、湍流、传热传质、辐射以及热解、均相和异相反应。	气体流动使用RANS求解；热解模型不够完善；颗粒数较少。

存在问题：二维结构，颗粒数较少；热解模型简化较多；反应简单

# 稠密气固燃烧研究：小结

1. 针对全三维结构流化床冷态及热态模拟，Euler-Lagrange 模型是主流，但其对颗粒进行**颗粒团假设**，需进行进一步检验验证。
2. CFD-DEM模型(冷态)难点在于**复杂几何体**、**大量颗粒**，**并行算法优化**以及**气相湍流**的作用。
3. CFD-DEM模型(热态)难点除以上问题，还存在**传热传质**、**气化热解**以及**均相异相反应**的强烈耦合问题，各个子模型的选择和优化，实验的**对比验证**。



发展趋势

全**三维复杂几何体**、**多物理过程耦合**，**高精度**、**大规模并行**计算平台是流化床燃烧模拟趋势。

## 二、国际研究前沿与进展

### 复杂两相反应流的高精度数值模拟

```
graph TD; A[复杂两相反应流的高精度数值模拟] --> B[稀疏气固两相燃烧的LES/DNS研究]; A --> C[稠密气固流化床内两相流的LES/DNS研究]; A --> D[稠密气液雾化燃烧的数值模拟研究];
```

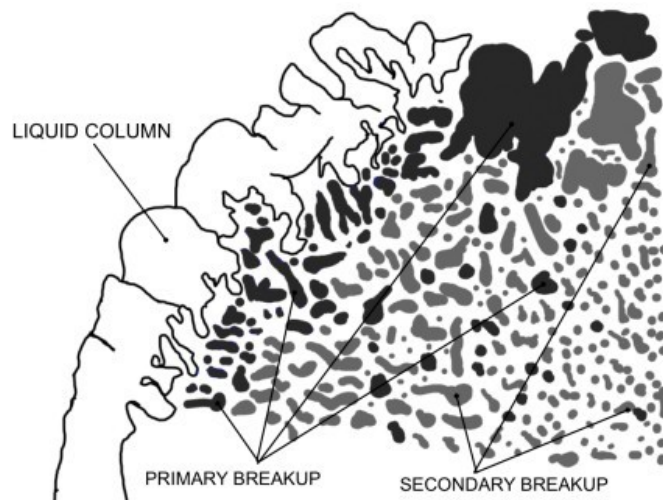
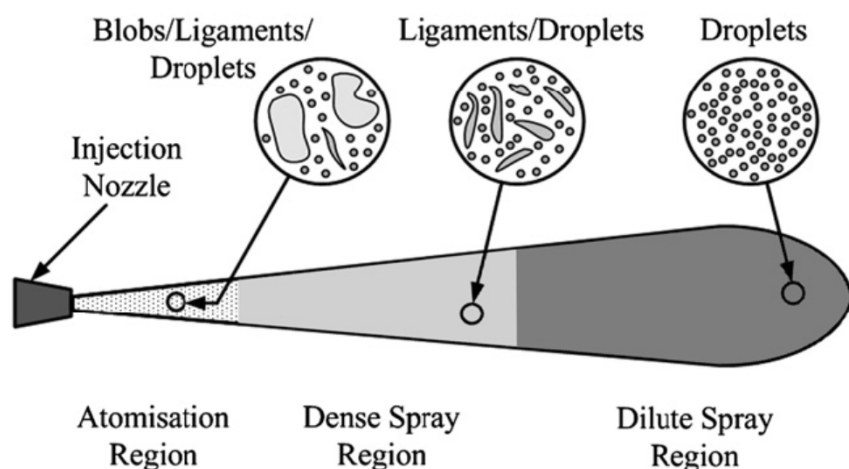
稀疏气固两相  
燃烧的LES/DNS  
研究

稠密气固流化  
床内两相流的  
LES/DNS研究

稠密气液雾化  
燃烧的数值模  
拟研究

# 气液两相雾化燃烧研究

雾化过程是指液体从喷嘴射出到破碎成液滴群的物理过程



喷嘴

一次雾化

二次雾化

液滴

燃烧

**前沿和难点：**

**雾化机理：**一次/二次雾化的直接数值模拟方法；**雾化湍流的相互作用；**

**雾化模型：**雾化机理不明确导致雾化模型发展的困难；**空化、湍流对雾化的影响**  
**未有统一的认识**

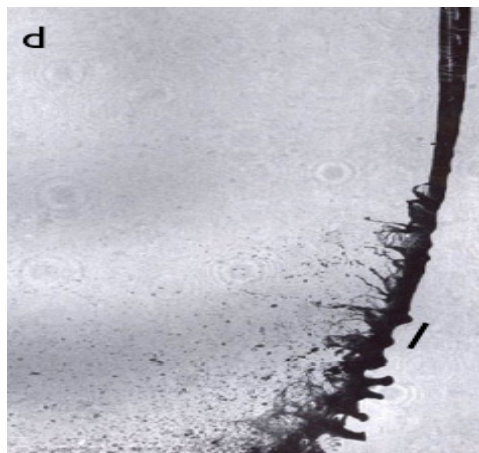
**蒸发燃烧：**雾化模型、蒸发模型的发展及对燃烧的影响



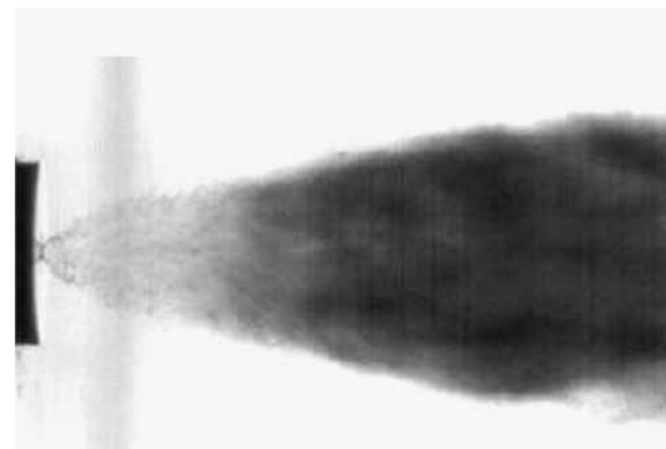
# 气液两相雾化燃烧研究



Marmottant et al. 2004

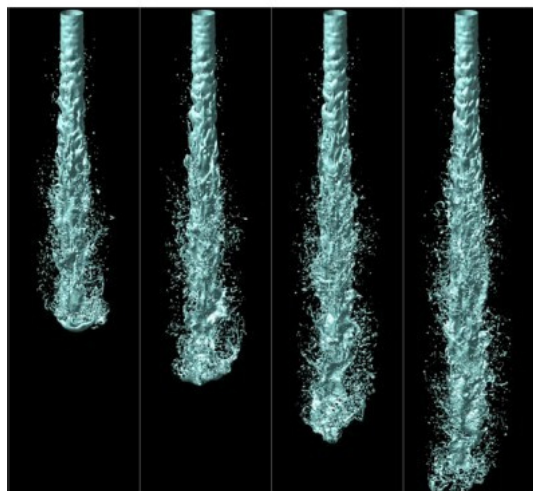


Duclaux et al. 2006

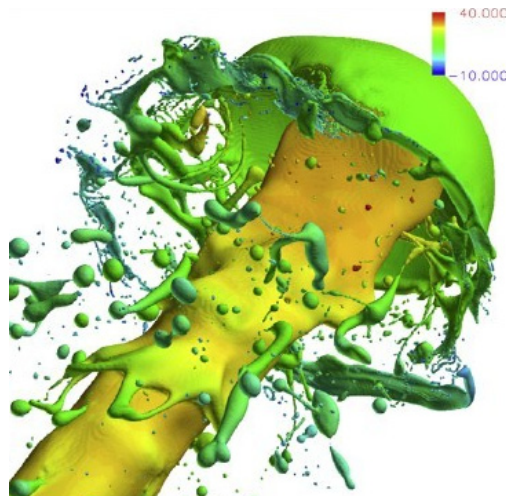


Moyne et al. 2007

受测试条件的影响，稠密区域难以测量，数值模拟可以发挥重要作用



Menard et al. 2007



Shinjo et al. 2010




Pai et al. 2008

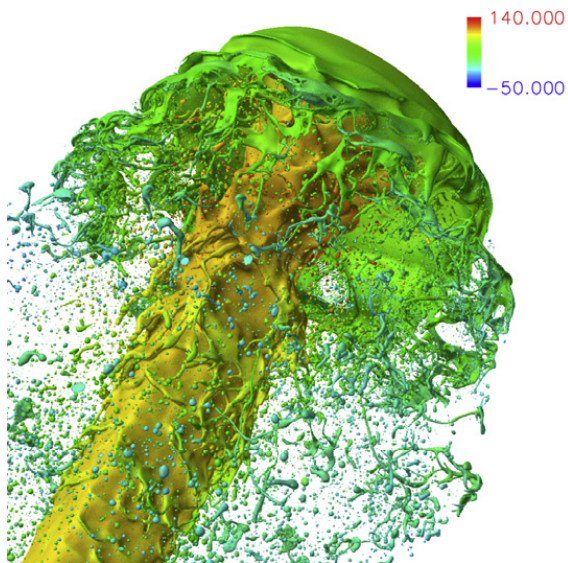


# 气液两相雾化燃烧研究：数值方法

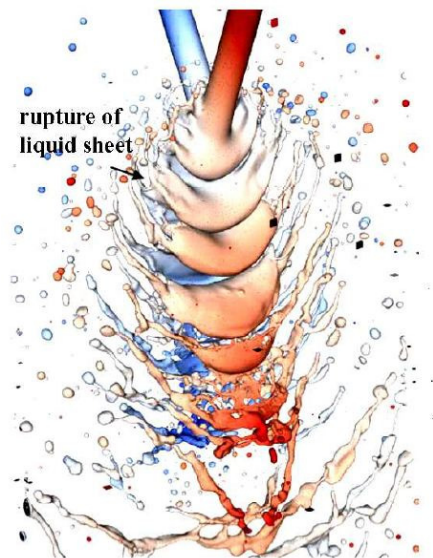
界面捕捉方法	优势	劣势
Front tracking (FT)	精确	界面拓扑不易处理，数值不稳定
Volume of fluid (VOF)	质量守恒	界面不连续，曲率不能精确计算，界面重构复杂，会产生非物理的现象
Level set (LS)	曲率等几何量易于计算，二维到三维的转化直接，容易处理拓扑变化，过程简单	质量损失
Phase field (PF)	曲率等几何量易于计算，二维到三维的转化直接，容易处理拓扑变化	相函数的选取，过程复杂

- 
1. **Refined Level Set方法+Lagrangian雾化模型，Kim(2006,2011), M.Herrmann(2008-2011);**
  2. **Coupled Level Set+VOF(CLSVOF)，Shinjo(2010,2011), Menard(2007), Sussman(2014), Arienti(2013);**
  3. **为了克服LS方法的质量不守恒的缺点，提出了基于质量修正的新方法**

# 气液两相雾化燃烧研究：数值方法



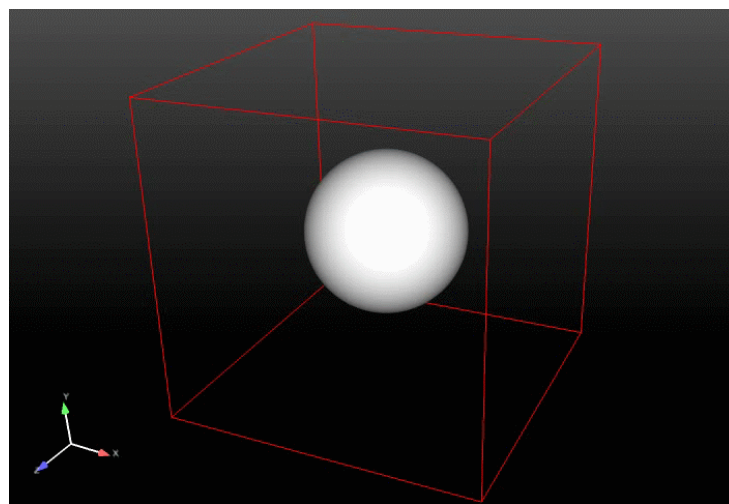
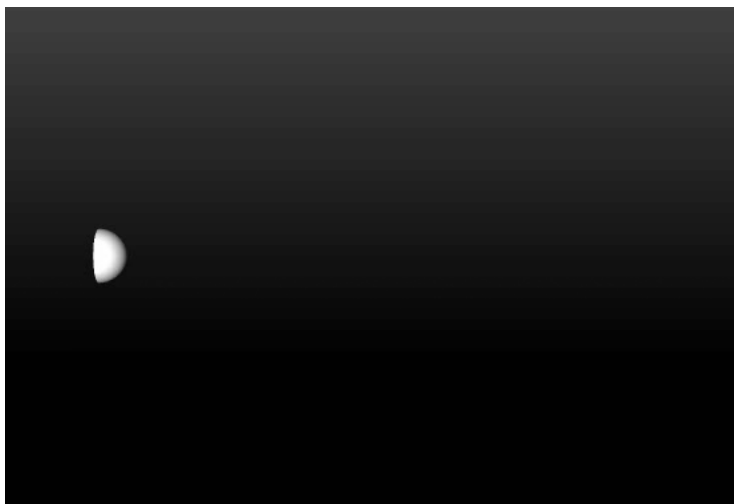
直射流液体结构 (Shinjo *et al.*, 2010)



对冲射流 (Chen *et al.* 2013)



横射流 (Desjardins *et al.* 2014)



# 气液两相雾化燃烧研究：雾化模型

雾化模型	理论	模型特点
TAB	液滴的振荡变形与弹簧振子进行类比； 表面张力、液体粘性力和气动力类比成恢复力、阻尼力和外力。	主要缺陷在于只考虑一种振动模式对应于最低价谐波；适用于低We数、二次雾化及液滴变形。
E-TAB	液滴尺寸以连续的方式减小	TAB模型的改进
WAVE	应用线性KH不稳定性分析，将液体表面无穷小振幅扰动的增长速度和其波长及其他物理参数相互联系	适用于稳定圆柱射流进入静止不可压气体中的雾化模拟；适用于稠密射流的模拟
KH-RT	增加了RT不稳定性分量，两者处于竞争机制，即更短破碎时间的机理导致破碎	稠密区及稀疏区的雾化模拟
KH-ACT	综合考虑气动力、湍流、空化的影响	当气动力占主导时，即KH模型,适用于初次雾化模拟
LISA	基于简单的流体力学原理，基本假设与KH破碎一致	适用于高压旋流液膜破碎的初次雾化模拟
Stochastic model	颗粒的破碎视为离散随机性的离散过程，并假设母颗粒破碎成子颗粒的概率与其尺寸无关	适应于高We数液滴破碎过程；可将破碎频率与尺寸相联系
ELSA	将雾化和高密度差的气液两相湍流混合现象相类比，将雾化视为“单相”流动	适用于高Re数和We数的全区域雾化模拟

基于高精度数值模拟（如DNS）对雾化模型的改进及新一代雾化模型（如随机破碎模型、ELSA模型）的提出与发展已成为雾化模型研究领域的前沿问题

# 气液两相雾化燃烧研究：小结

## 问题：

1. DNS直接模拟雾化过程**计算量巨大**，多尺度液体结构对于**网格提出了巨大要求**；
2. 点源DNS雾化燃烧的模拟中，由于雾化过程本身的复杂性，对于雾化机理尚不清晰，**雾化模型的准确性**受到质疑；
3. 点源DNS雾化燃烧的模拟中，目前的蒸发模型仅适用于简单流动中，在雾化燃烧的复杂过程中，**蒸发模型的准确性**有待进一步验证

## 发展趋势：

1. 发展自适应网格技术，仅对气液界面进行精细处理，**减少直接数值模拟的计算量**；
2. 研究**雾化的机理**，构建新的雾化理论或发展现有的雾化理论；
3. 发展适用于不同雾化过程的**雾化模型**或发展统一雾化模型；
4. 进行雾化-蒸发-燃烧的一体化直接数值模拟。

### 三、总结和展望

气固/气液湍流燃烧是一个复杂的物理化学过程，涉及到相内和相间质量、动量和能量的相互作用



实验研究

大涡模拟(LES)

直接数值模拟(DNS)

1. 直接数值模拟一方面对湍流燃烧中的机理进行研究，另一方面可以用来发展湍流燃烧模型，同时作为大涡模拟研究的验证数据库。
2. 精确的实验数据作为大涡模拟的验证；同时模拟数据的完备性可以对实验不易测量的物理量进行补充。
3. 实验和数值模拟相辅相成，共同为大尺度的燃烧室的研究服务。

# 致谢

---

- ◆ 本研究受到国家自然科学基金优秀青年基金项目、中组部“青年拔尖人才”项目以及浙江省杰出青年基金项目等的资助，衷心表示感谢！
- ◆ 感谢樊建人教授、周力行教授等的支持和帮助；
- ◆ 感谢参加项目的研究生杨世亮、王海鸥、金台、杨建山、白云、邵长孝、谭骏华等；