

# 湍流燃烧实验研究的进展与挑战

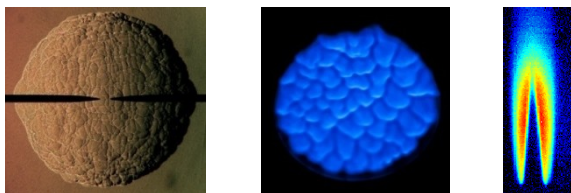
王金华

西安交通大学

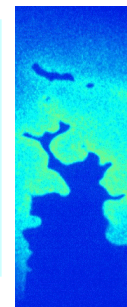
动力工程多相流国家重点实验室

# 研究内容

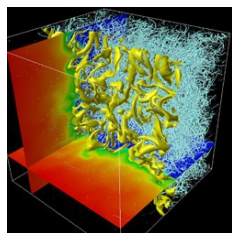
高压层流火焰自身不  
稳定性理论发展，  
火焰特征参数



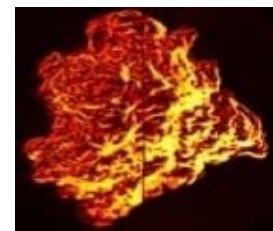
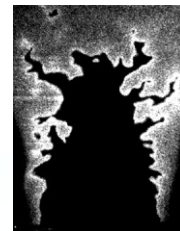
层流火焰尺度、湍流  
尺度与湍流火焰尺度  
耦合作用机制



高压强湍流下，  
湍流与燃烧相互作用



湍流燃烧机理与模型




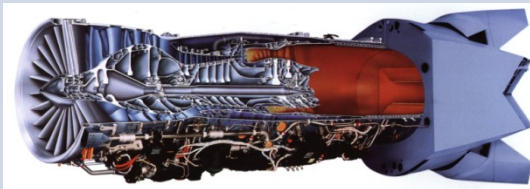
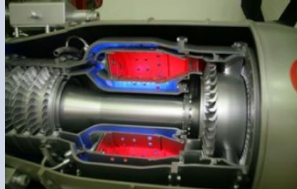
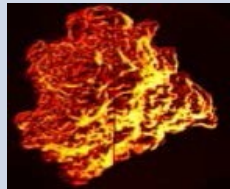
1. Jinhua Wang\*, Futoshi Matsuno, Masaki Okuyama, Yasuhiro Ogami, Hideaki Kobayashi, and Zuohua Huang. [Proceedings of the Combustion Institute](#). 2013, 34(1): 1429-1436.
2. Jinhua Wang\*, Meng Zhang, Zuohua Huang, Taku Kudo, and Hideaki Kobayashi. [Combustion and Flame](#). 2013, 160(11): 2434-2441.
3. Meng Zhang, Jinhua Wang\*, Wu Jin, Zuohua Huang\*, Hideaki Kobayashi, Lin Ma. [Combustion and Flame](#). 2015, 162(5): 2087-2097.

# 汇报内容

---

1. 背景
2. 湍流火焰模式理论
3. 湍流燃烧实验研究前沿与难点问题
4. 湍流燃烧实验研究进展
5. 挑战与交叉合作

# 背景

内燃机	燃气轮机	航空发动机	湍流燃烧
			

## 关键科学问题：湍流与燃烧相互作用机理及模型

- 湍流：涡尺度，频率，强度
- 燃烧放热：温度梯度，组分梯度
- 燃烧化学反应：成百上千基元反应，长度尺度，时间尺度

宽广尺度，耦合作用

国家航空发动机和燃气轮机“两机”科技重大专项（国家重大技术专项）  
面向发动机的湍流燃烧基础研究（基金委，重大研究计划）

瓶颈问题之一：缺乏定量实验，高压强湍流燃烧

# 前沿基础研究

1. 实验：基础火焰激光诊断
2. 计算：DNS, LES, RANS, pdf...

- 机理，模型

- 前沿问题：

- 湍流与燃烧相互作用机理
- 实验困难，高压强湍流
- 定量，湍流燃烧模型验证
- 火焰动力学模型
- 数值计算
  - DNS：精度高，花费大
  - LES：依靠参数，精度低
- 火焰动力学模型G-equation：
  - 节省计算量，保留燃烧主要部分，
  - 研究火焰规律

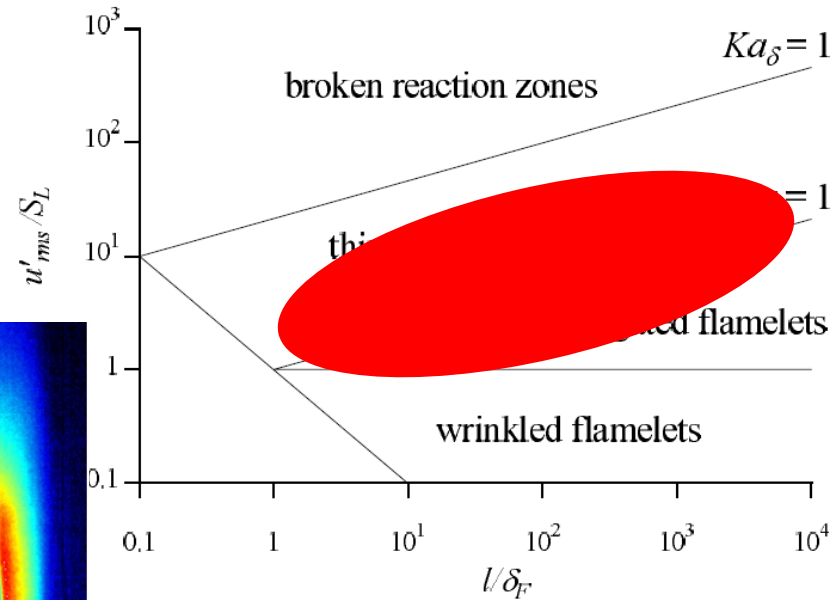
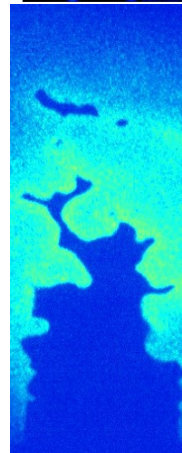
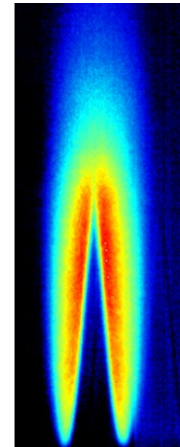


# 湍流火焰模式理论

- 预混湍流火焰
- 层流火焰结构 (火焰自身)
- 湍流 (尺度)
- 瞬时火焰前锋面 (反应区结构)

- 瞬时湍流火焰结构

- 湍流扰动
- 燃烧放热影响湍流
- 火焰响应 (拉伸, 弯曲)
- 湍流与火焰相互作用



湍流火焰模式理论

## Flamelet theory:

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{A_T}{A_L}$$

$S_L$ : laminar burning velocity

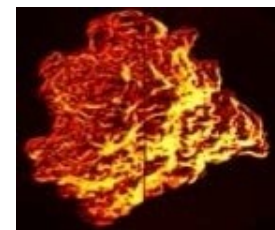
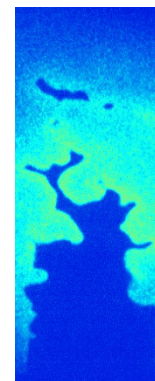
$u'_{rms}$ : turbulence intensity

$l$ : integral length scale  
(turbulence)

$\delta_F$ : laminar flame thickness

# 本报告讨论内容

- 湍流燃烧分类：
- 预混湍流燃烧
- 非预混湍流燃烧
- **本报告主要集中于：**
- 预混湍流燃烧（湍流与火焰相互作用）
- 侧重于实验和机理
- 火焰片模式区
- 均匀准各向同性湍流场（湍流场参数表征）
- 基础火焰结构
- 基础火焰诊断



[1] S. B. Pope, **Annu. Rev. Fluid Mech.** 19, 237 (1987).

[2] N. Peters, **Turbulent Combustion** (Cambridge University Press, NY, 2000).

[3] A. N. Lipatnikov and J. Chomiak, **Prog. Energy Combust. Sci.** 28, 1, 1 (2002).

[4] J. F. Driscoll, **Prog. Energy Combust. Sci.** 34, 91 (2008).

[5] A. N. Lipatnikov and J. Chomiak, **Prog. Energy Combust. Sci.** 36, 1, 1 (2010).

[6] **Next generation of guiding questions for basic turbulent combustion research. 2014, CBET 1438956, Final report.**

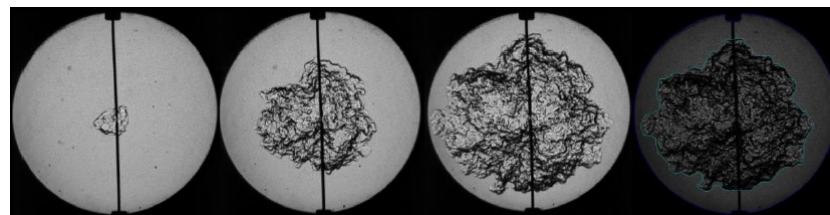
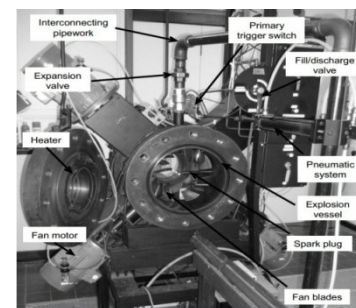


# 湍流燃烧实验研究

- 湍流燃烧实验研究方法：湍流燃烧容弹；连续稳定湍流燃烧炉

- 湍流燃烧容弹, turbulent expanding flame

1. 风扇湍流容弹（常用），在容弹边缘对称布置风扇
2. 喷射湍流容弹，利用特殊布置的进气道来产生湍流
3. 孔板湍流容弹，拉动孔板运动产生湍流
4. 改良燃烧器（最近趋势）

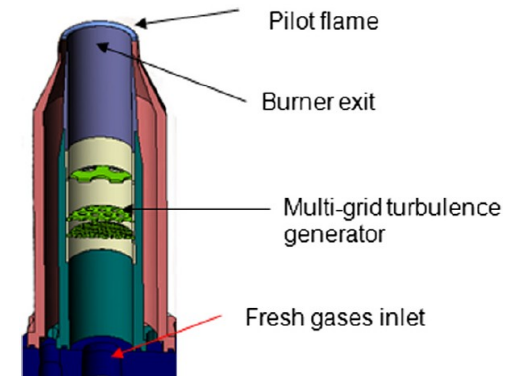
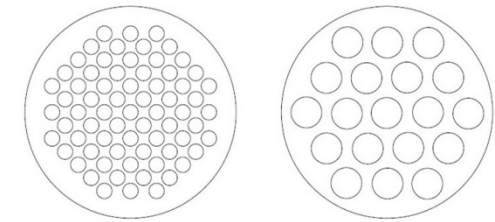


- Prof. D. Bradley, Leeds University
- Prof. E.L. Petersen, Texas A&M University, Department of Mechanical Engineering, Turbomachinary Laboratory
- S. Chaudhuri, C.K. Law, Princeton University
- Prof. S.S. Shy, National Taiwan University
- Prof. N.Zarzalıs, Engler Bunte Institute, 德国卡尔斯鲁厄大学
- Prof. Toshiaki Kitagawa, Kyushu University
- Prof. Masaya Nakahara, Hiroyuki Kido, Kyushu University
- ...



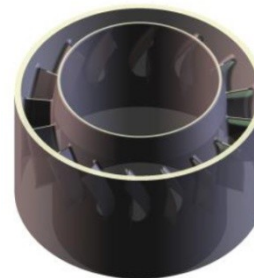
# 湍流燃烧实验研究

- 连续稳定预混湍流火焰, stationary burner
- 孔板, 多层孔板
- 旋流器
- Prof. Fabien Halter, CNRS
- Prof. Kobayashi, Tohoku University
- Prof. Ömer L. Gülder, University of Toronto
- Prof. James F Driscoll, University of Michigan
- Prof. Tanahashi, 东京工业大学
- ...

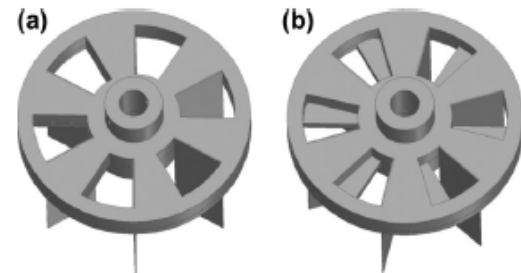


Fabien Halter @ CNRS, France

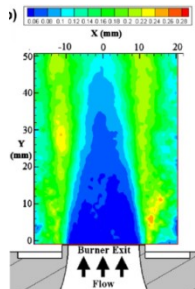
- 典型Burner:
- Sandia flame
- Sydney burner
- Low swirl burner (Berkley, Lund...)



Low swirl burner



Tim Lieuwen @ Georgia Institute of Technology



# 两种实验方式对比

	优点	缺点
湍流燃烧容弹	1. 高压，强湍流	1. 瞬态火焰传播 2. 1D测量 3. 激光诊断困难 4. 火焰膨胀，自加速
连续稳定湍流火焰	1. 长时间测量，统计分析 2. 激光诊断	1. 高压困难 2. 湍流范围窄 3. 回火，脱火

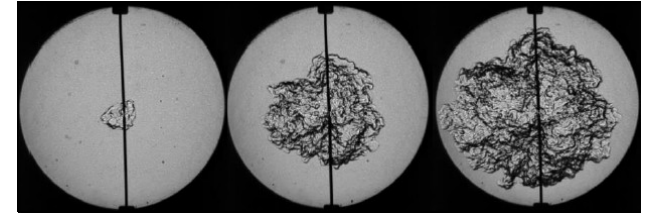
# 湍流场

---

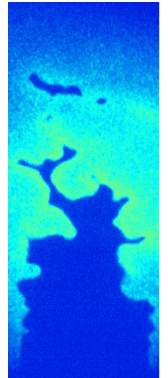
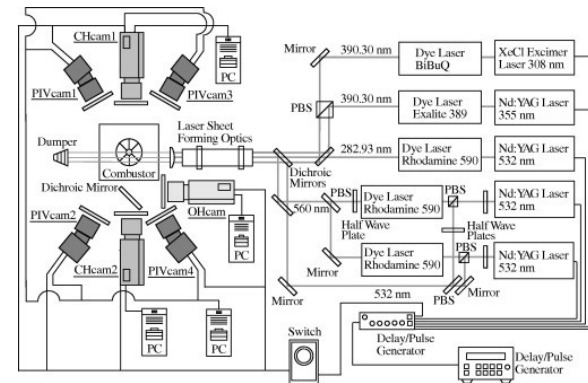
- 湍流场的产生，测量，表征
- **湍流**与火焰相互作用
- **准均匀各向同性湍流场难点：**
  1. 产生
  2. 湍流强度范围
  3. 冷态，热态
  4. 热线风速仪，PIV
  5. 湍流强度，尺度表征，频谱

# 湍流火焰测量

- 火焰传播：
- 高速纹影，PIV，探针，压力
- 连续稳定火焰：
- 组分场：PLIF, PIV/PLIF, Mie scattering, Laser tomography...
- 温度场：CARS



- 难点：
- 维度：1D, 2D
- 频率：LIF
- 分辨率
- 多场，多维，多参数同步测量
- 不确定性分析：测量系统影响



**Mamoru TANAHASHI**

Tokyo Institute of Technology

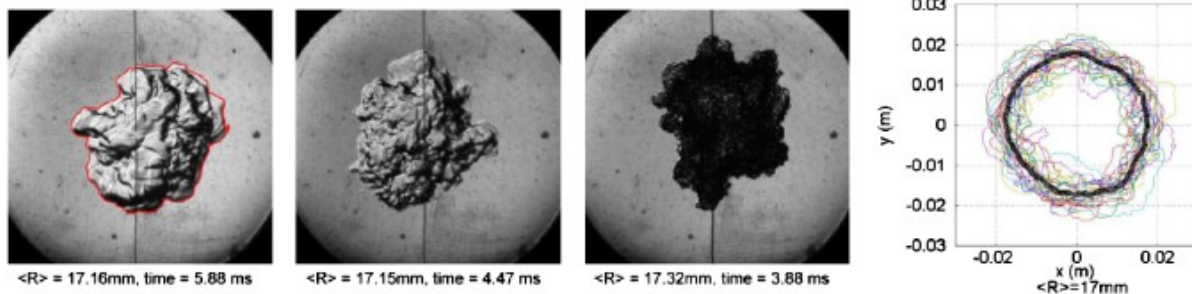
Turbulence: dual-plane PIV

Flame: single plane OH-PLIF,

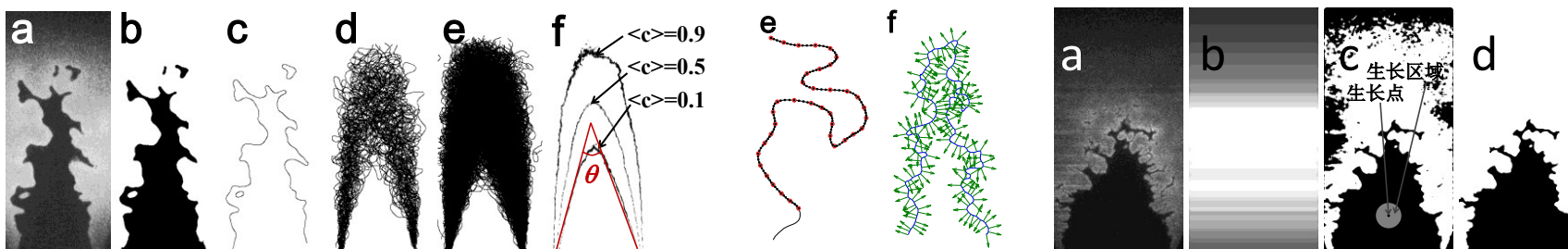
dual-plane CH-PLIF

# 图像处理

- 湍流容弹，火焰传播：



- 连续稳定湍流火焰：



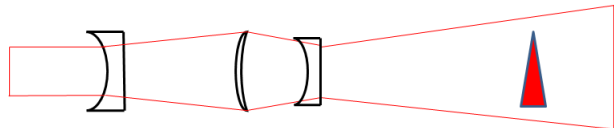
自适应阈值二值法

- 基于Matlab的Canny边缘捕捉算法

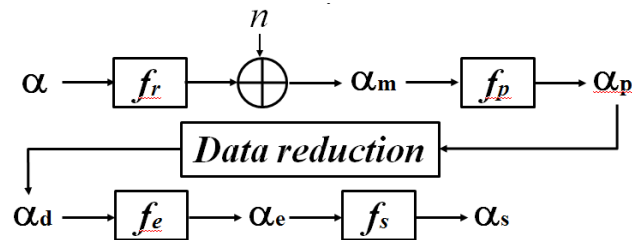
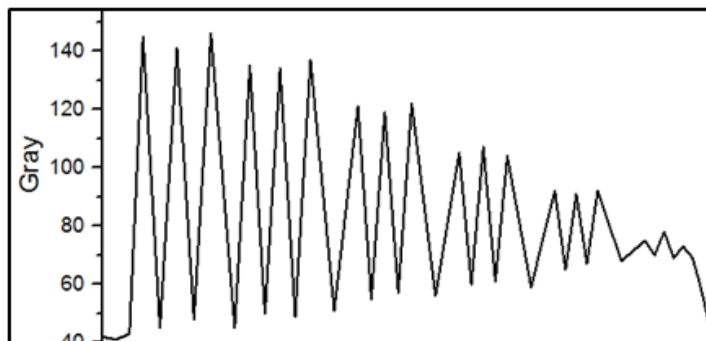
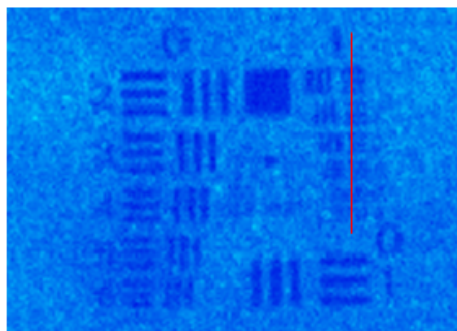
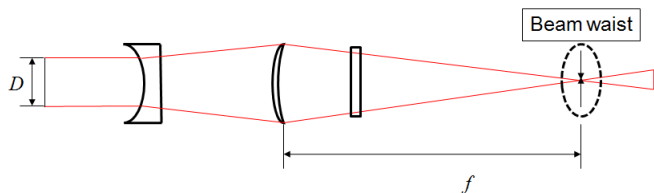
# 不确定性分析：测量系统影响

- 成像系统物理分辨率
- 光学系统
- 图像处理边缘提取算法

Side view



Top view



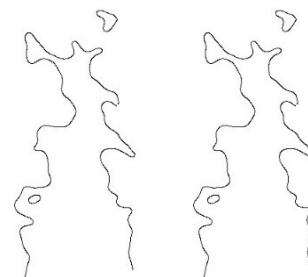
Measurement:  $\alpha_m = f_r * \alpha + n$

Post-processing:  $\alpha_p = f_p * \alpha_m$

Data-reduction:  $\alpha_p \rightarrow \alpha_d$

Flame front extraction:  $\alpha_e = \alpha_d * f_e$

Statistical parameters of turbulent flame:  $\alpha_s = \alpha_e * f_s$



# 科学问题和进展1-湍流火焰速度

- 湍流参数，实验装置
- 湍流强度，湍流尺度，混合气，热膨胀，流场拉伸、弯曲，火焰不稳定性...

## 1. 火焰传播速度（V形火焰，球形传播火焰）

$$S_{T,D} = (V_{Flame} - V_{gas}) \vec{n}$$

## 2. 整体消耗速率（本生灯）

$$S_{T,GC} = \frac{\dot{m}}{\rho_r A_{\bar{c}=0.5}}$$

## 3. 局部消耗速率（V形火焰）

$$S_{T,LC} = S_{L0} I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \Sigma d\eta$$



# 湍流火焰速度（实验）

## • 进展：

1. 大量实验数据
2. 多种拟合形式，统一公式
3. 湍流尺度与火焰尺度作用机理

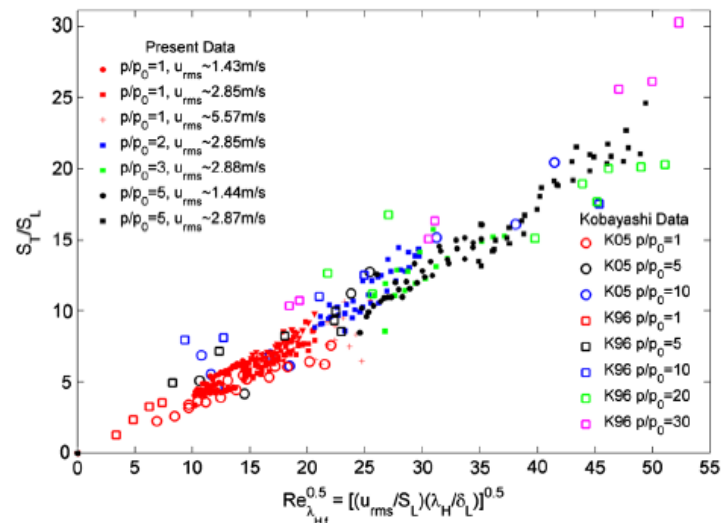
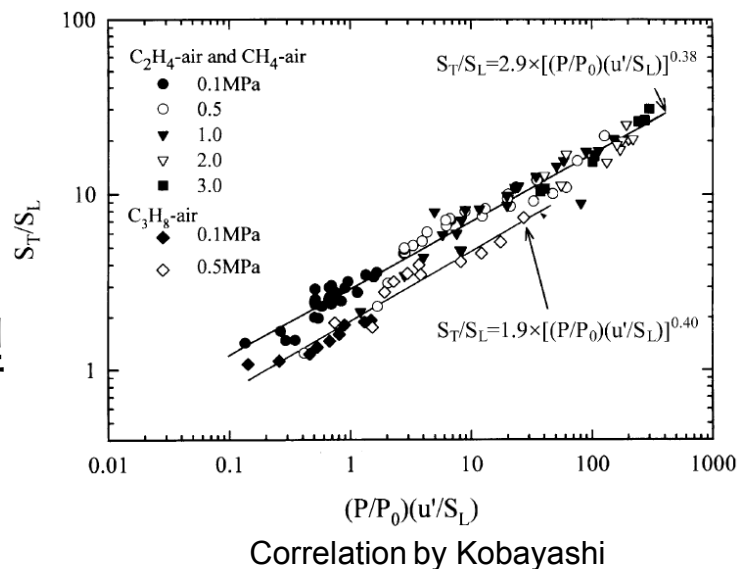
## • 问题：

1. 定义不明确
2. 数据离散
3. 拟合半经验

$$\frac{S_T}{S_{L0}} = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} \Sigma d\eta = I_0 \Sigma_{\max} \delta_T$$

$$\frac{S_T}{S_{L0}} = f\left(\frac{u'}{S_{L0}}, \frac{\ell}{\delta_{L0}}, Ma_T, \frac{W}{\ell}, \text{ or } \frac{t}{(\ell/u')}\right)$$

$$\frac{S_T}{S_{L0}} = f\left(\frac{u'}{S_{L0}}, \frac{\ell}{\delta_{L0}}, Ma_T\right)$$



# 湍流火焰速度（计算）

---

- 未发表内容，删除

# 科学问题和进展2-湍流火焰结构

- 湍流火焰结构:

- 火焰面密度 $\Sigma$

- 火焰刷厚度

- 拉伸因子 $I_0$  (火焰拉伸宏观表征)

- 曲率分布

- 几何学分析: 分形理论, 特征提取与表征, 模态分析

- 湍流火焰结构意义:

1. 基础湍流燃烧模型验证的微观参数 ( $\Sigma$ 为微观参数;  $S_T$ 为宏观参数)
2. 湍流与火焰相互作用的结果

- 基于 $\Sigma$ 的湍流燃烧子模型:

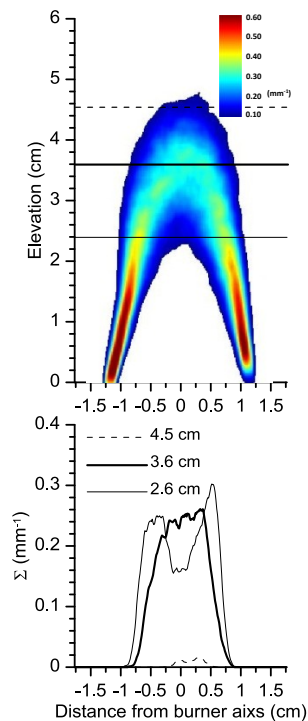
1. 代数方程: BML, Stochastic particle/Monte Carlo concept, Fractal model, Zimont correlation model
2. 微分方程: Flame surface density balance (CFM/RANS, LES), G-Equation, DNS

$$\frac{S_T}{S_{L0}} = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} \Sigma d\eta = I_0 \Sigma_{\max} \delta_T$$

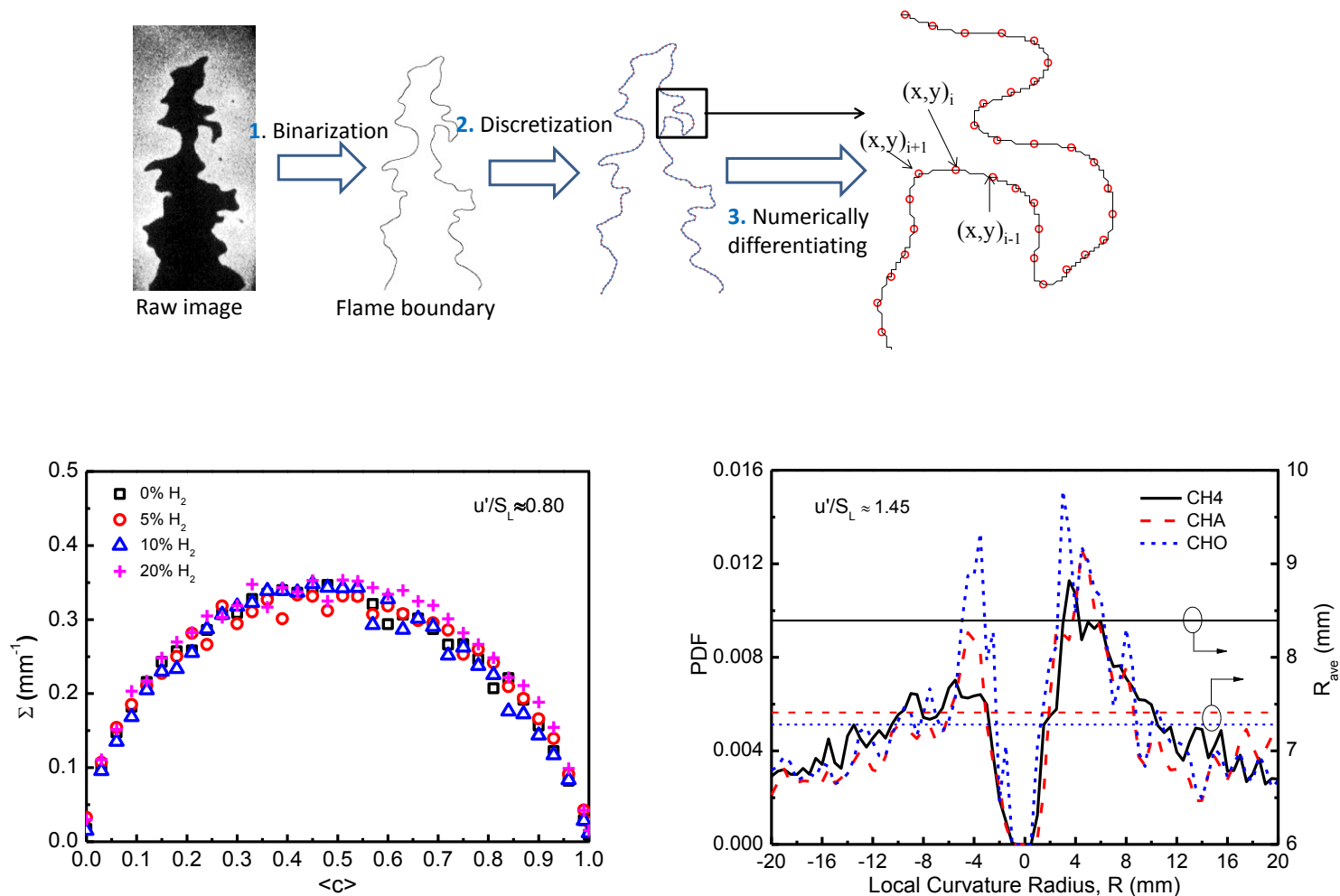
$$\int_0^{+\infty} \Sigma dV$$

# 湍流火焰结构

## 火焰刷和火焰面密度



## 火焰局部结构



# 湍流火焰结构

## • 湍流火焰分形理论

在湍流中：

$$\frac{At}{A} = \left( \frac{\eta}{L} \right)^{2-D}$$

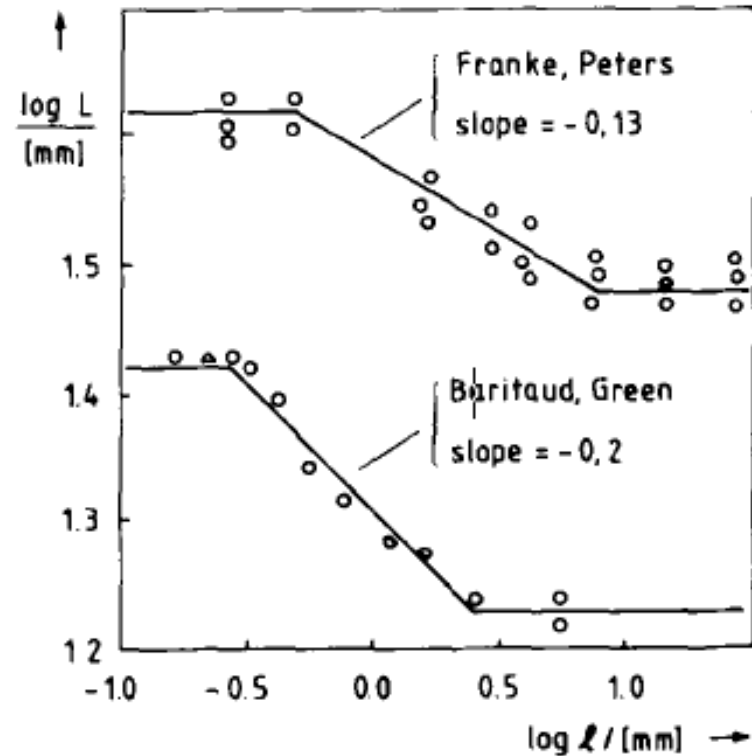
Kolomogorov 尺度  $\eta$   
积分尺度  $L$

在湍流火焰中：

N.Peters指出最小尺度为Gibson尺度：

$$\frac{At}{A} = \left( \frac{L_G}{L} \right)^{2-D} \quad L_G = \frac{S_d^3}{\varepsilon}$$

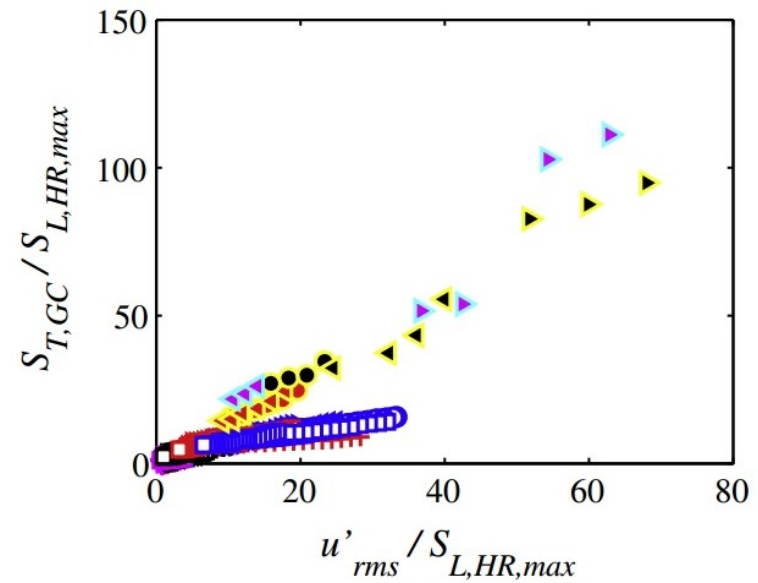
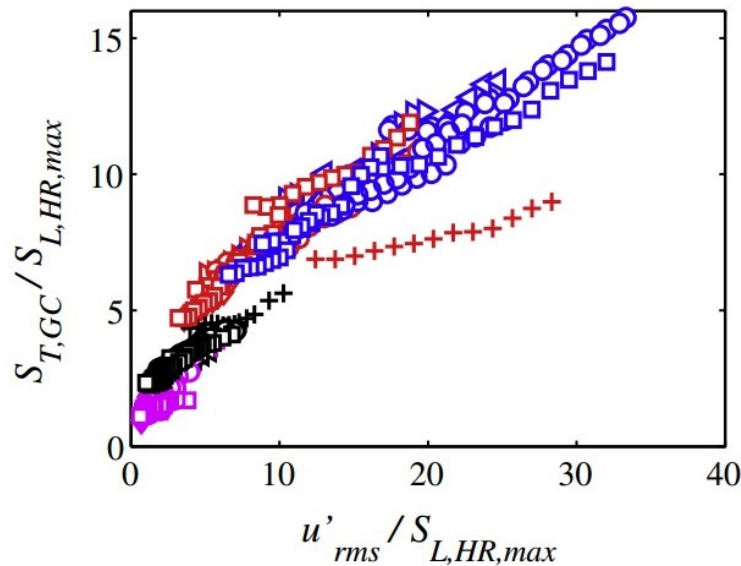
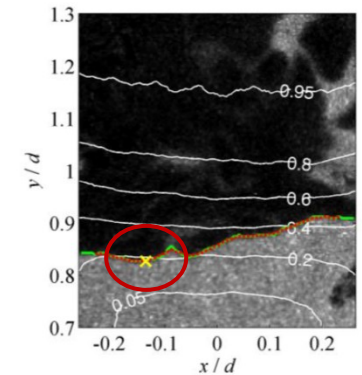
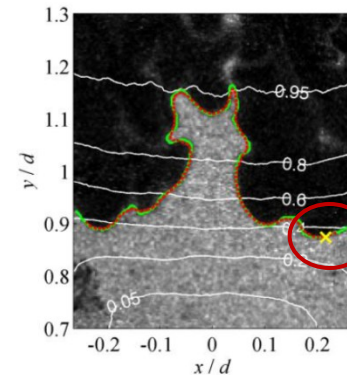
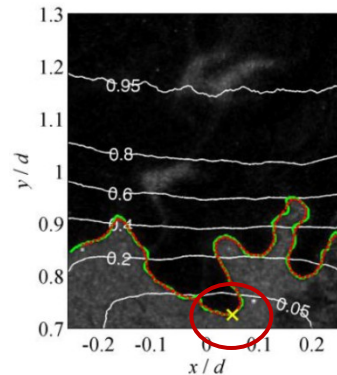
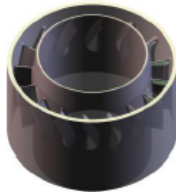
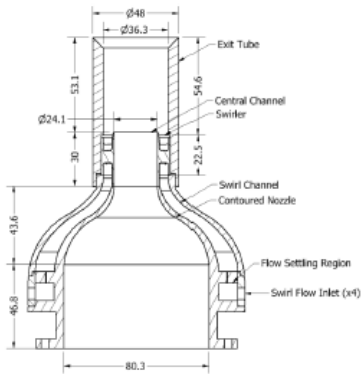
$$U_t = \overline{S_c} \left( \frac{L_G}{L} \right)^{2-D}$$



斜率为 $2-D$ ， $D$ 为分形维数 (7/3)

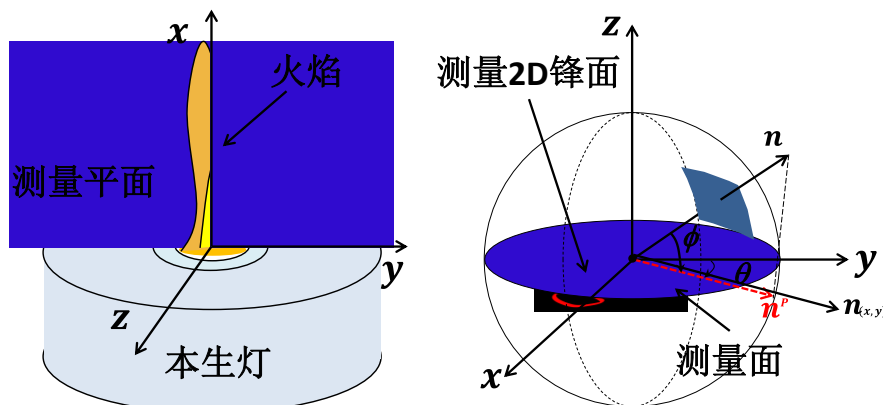
# 湍流火焰结构

- Leading point concept by Tim Lieuwen @ Georgia Institute of Technology



# 湍流火焰结构

## 3D火焰面密度及燃料消耗率的估计



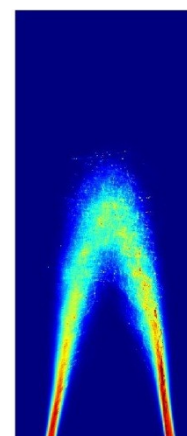
2D到3D估计模型坐标图示

燃烧系统整体燃料消耗率：

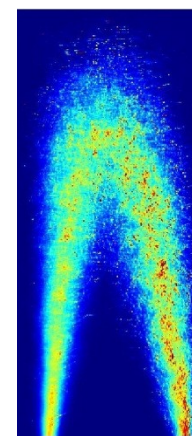
$$W = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \Sigma \rho_0 I_0 S_L \pi x dx dy$$

消耗率和供给燃料量之比：

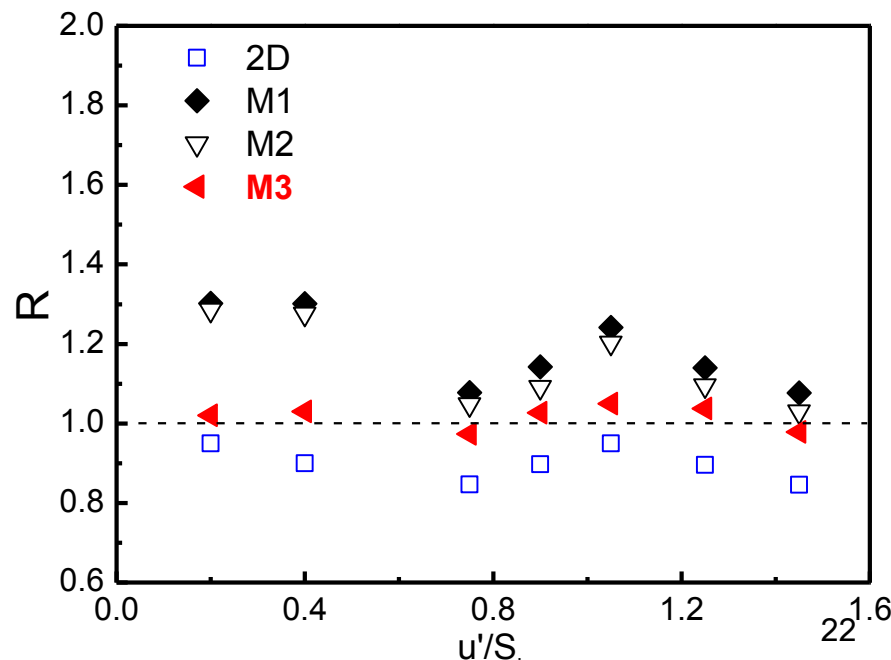
$$R = \frac{\int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \Sigma I_0 S_L \rho_0 \pi x dx dy}{\rho_0 U_0 A_0}$$



2D



3D

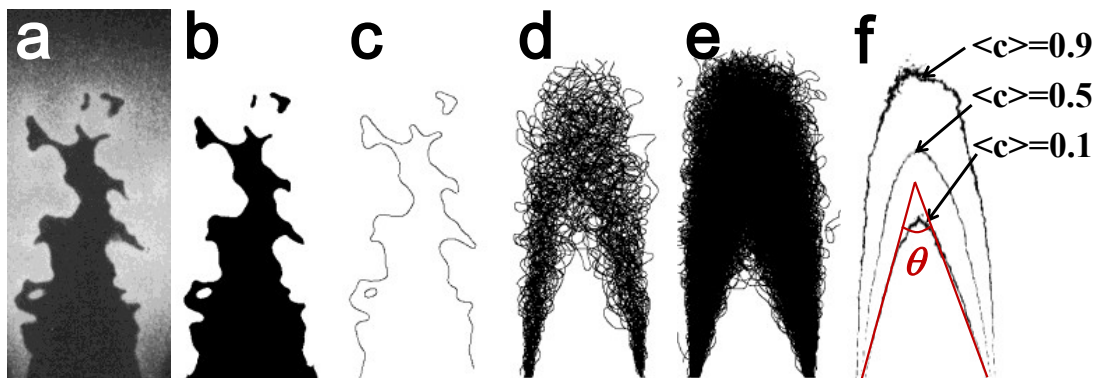




# 科学问题和进展3-湍流火焰模态

- POD本征正交分解 (PCA, 主成分分析法)

湍流火焰是个大尺度范围动力学系统，通常激光诊断获得的数据集十分庞杂，可利用**POD**方法进行低维数的近似，找出反应火焰特性的特征函数。



$$X = ((x_i, y_i), t) \rightarrow \chi = \text{cov}(X)$$

$$\chi = \Phi \times W \times \Psi \quad W^2 = \Lambda$$

POD  
modes  $k$

特征值对角矩阵  $\lambda_i$   
( $\lambda_{k+1} < \lambda_k$ )

应用:

1. 图像处理
2. 数据分析
3. 模型简化

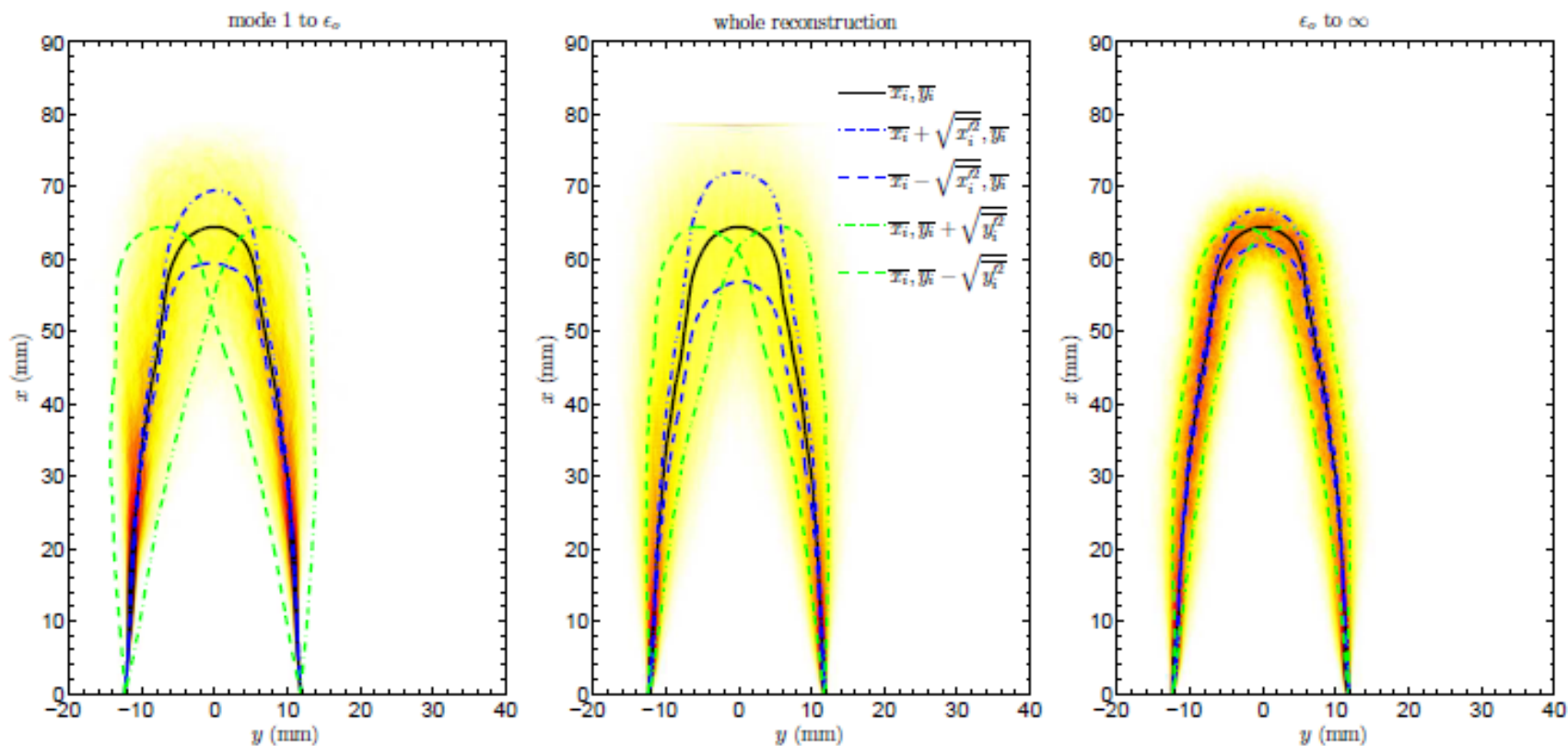
难点:

如何将数学提取出的模态与物理意义相联系

$k$ 小，对应大尺度

$k$ 大，对应小尺度

# 湍流火焰模态



大尺度构建的火焰刷

完全重构的火焰刷

小尺度构建的火焰刷

火焰刷是一个由大尺度主导的现象，而小尺度的锋面振荡实际上是在削减火焰刷。

# 交叉合作

---

- 湍流燃烧实验方面的交叉合作：
  1. 火焰+流体力学
  2. 湍流火焰+燃烧激光诊断，光学
  3. 湍流火焰+图像处理
  4. 湍流火焰+统计学
  5. 湍流火焰实验+理论+DNS，LES高精度计算
  6. 湍流火焰+多物理场（等离子体场，电场，声场，磁场，微波场...）

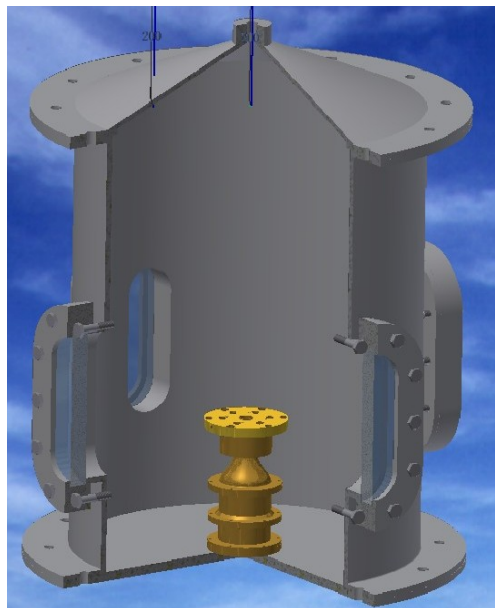
# 小 结

---

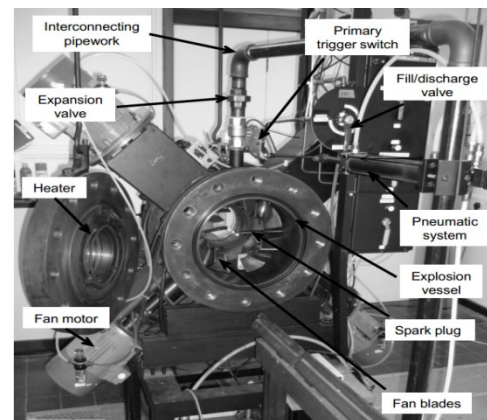
1. 湍流燃烧实验研究非常困难（实验装置，测量技术，科学问题，高压强湍流...）
2. 基于科学问题的基础火焰实验设计
3. 湍流，火焰，诊断，图像，统计，多学科交叉不可或缺
4. 面向科学问题：实验，理论，数值计算结合

# 预混湍流燃烧实验平台@XJTU

1. 高压连续燃烧平台
2. 高压预混湍流燃烧弹



高压湍流燃烧平台



高压定容湍流燃烧容弹<sub>27</sub>

# 致 谢

---

- 国家自然科学基金委员会 (51376004)
- JSPS日本学术振兴会 (P10063)
- Kobayashi Lab, Tohoku University, Japan
- 黄佐华教授实验室, 西安交通大学

---

**敬请批评指正！**

王金华

Tel: 13669299823

Email: [jinhuaawang@mail.xjtu.edu.cn](mailto:jinhuaawang@mail.xjtu.edu.cn)