

第一届全国青年燃烧学术会议，2015.9.18-20，上海

湍流燃烧实验研究的进展与挑战

王金华

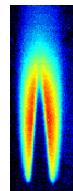
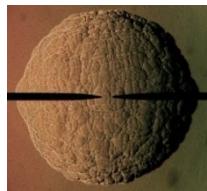
西安交通大学
动力工程多相流国家重点实验室

研究内容

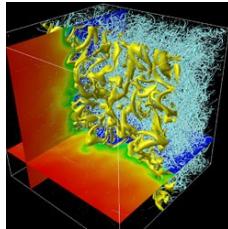
高压层流火焰自身不
稳定性理论发展，
火焰特征参数



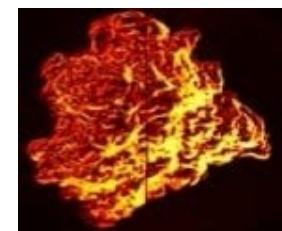
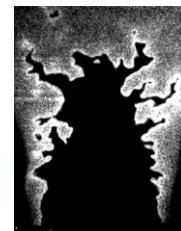
层流火焰尺度、湍流
尺度与湍流火焰尺度
耦合作用机制



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

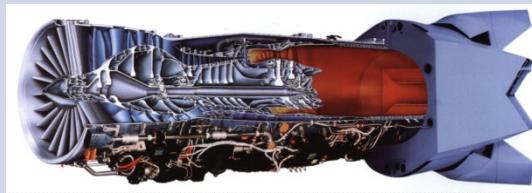
1. 背景
2. 湍流火焰模式理论
3. 湍流燃烧实验研究前沿与难点问题
4. 湍流燃烧实验研究进展
5. 挑战与交叉合作

背景

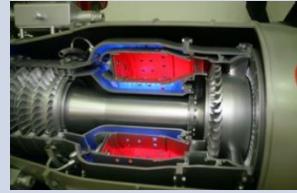
内燃机



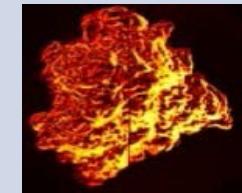
燃气轮机



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

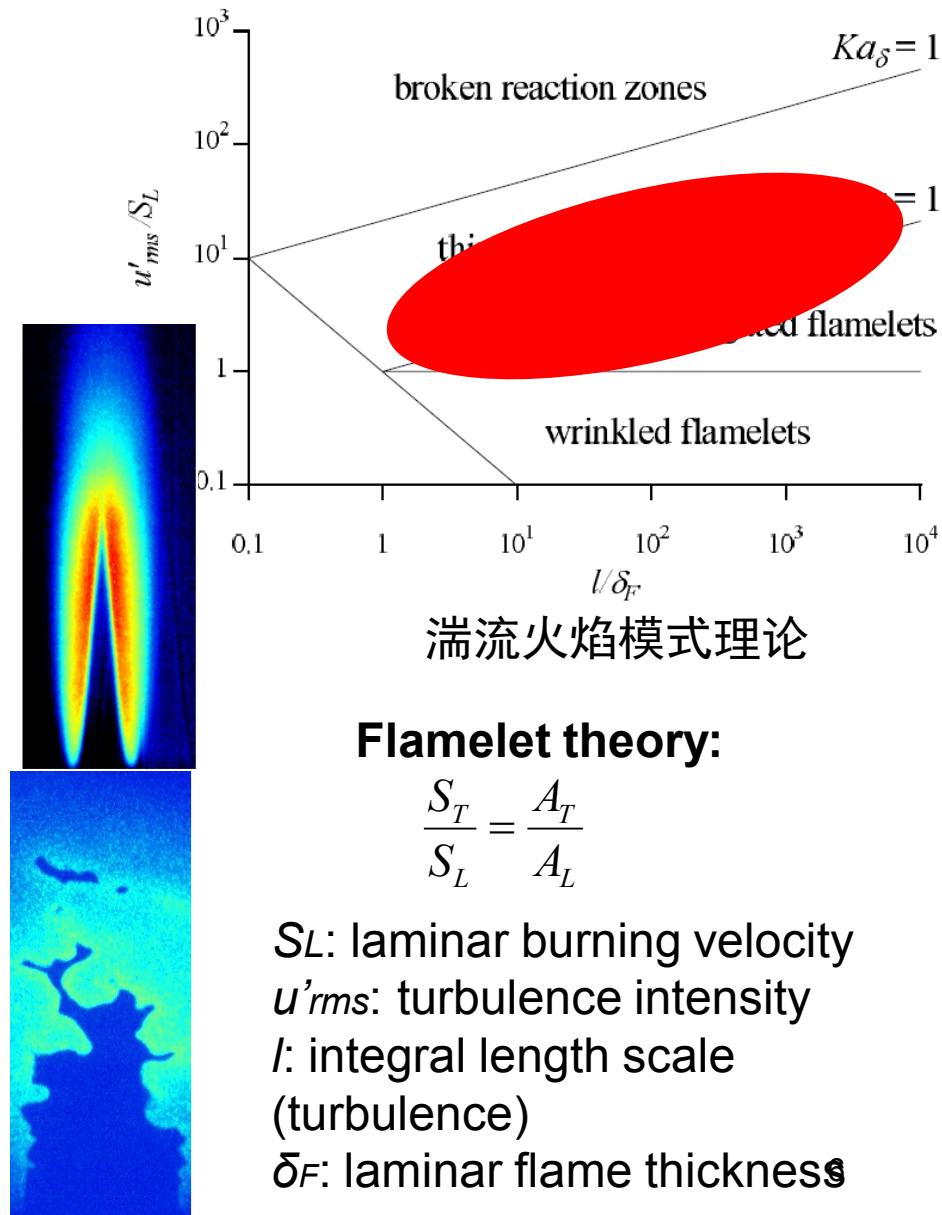
LES：依靠参数，精度低

- 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



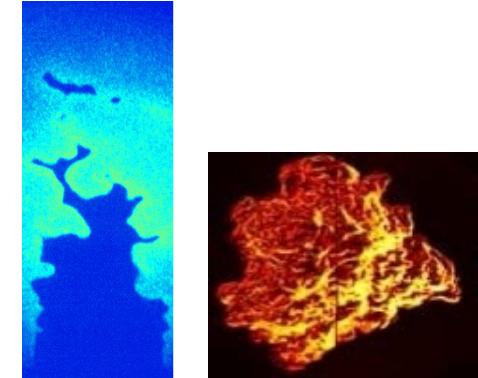
湍流火焰模式理论

- 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



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



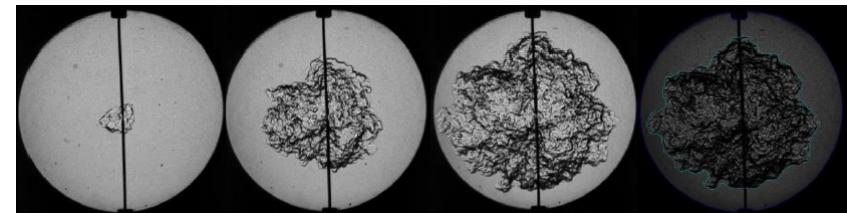
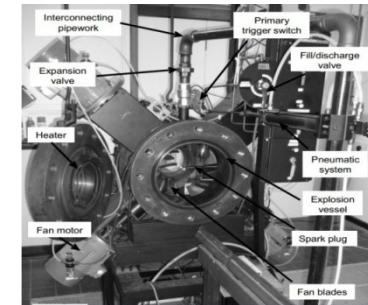
- [1] S. B. Pope, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 19, 237 (1987).
- [2] N. Peters, *Turbulent Combustion* (Cambridge University Press, NY, 2000).
- [3] A. N. Lipatnikov and J. Chomiak, *Prog. Energy Combust. Sci.* 28, 1, 1 (2002).
- [4] J. F. Driscoll, *Prog. Energy Combust. Sci.* 34, 91 (2008).
- [5] A. N. 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

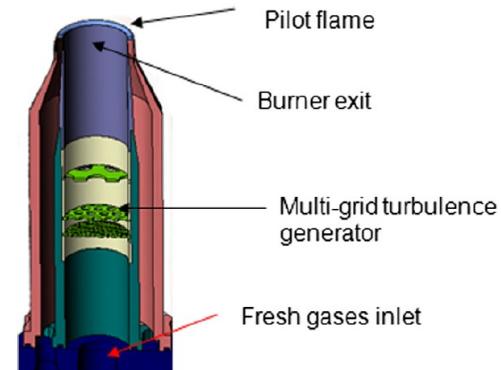
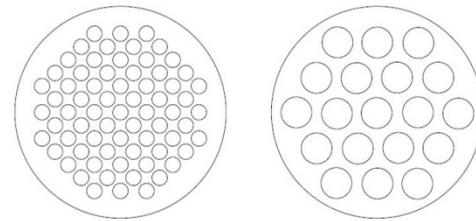
1. 风扇湍流容弹（常用），在容弹边缘对称布置风扇
2. 喷射湍流容弹，利用特殊布置的进气道来产生湍流
3. 孔板湍流容弹，拉动孔板运动产生湍流
4. 改良燃烧器（最近趋势）

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



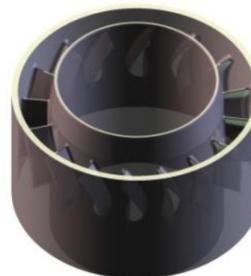
湍流燃烧实验研究

- 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
- ...

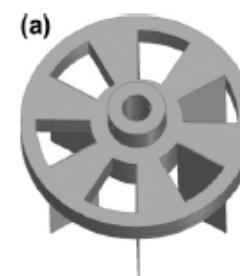


Fabien Halter @ CNRS, France

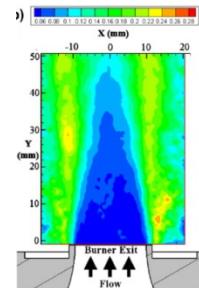
- 典型Burner:
- Sandia flame
- Sydney burner
- Low swirl burner (Berkley, Lund...)



Low swirl burner



Tim Liewen @ Georgia Institute of Technology



两种实验方式对比

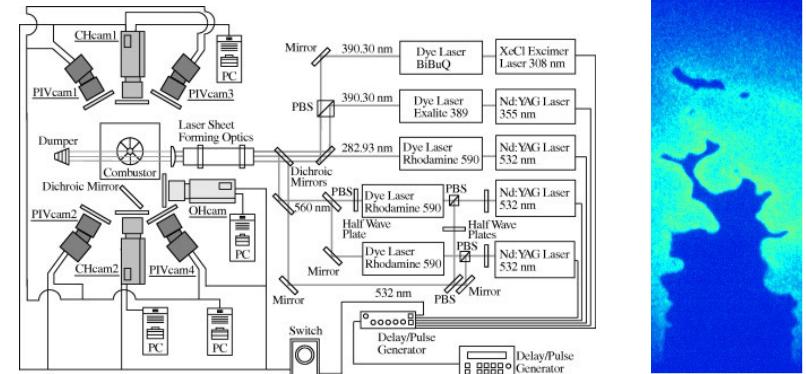
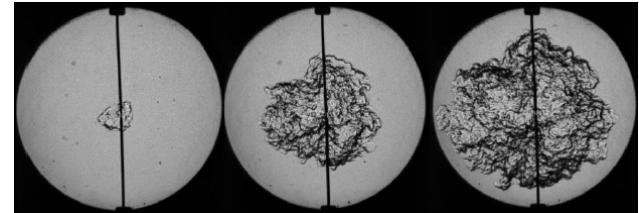
	优点	缺点
湍流燃烧容弹	1. 高压，强湍流	1. 瞬态火焰传播 2. 1D测量 3. 激光诊断困难 4. 火焰膨胀，自加速
连续稳定湍流火焰	1. 长时间测量，统计分析 2. 激光诊断	1. 高压困难 2. 湍流范围窄 3. 回火，脱火

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

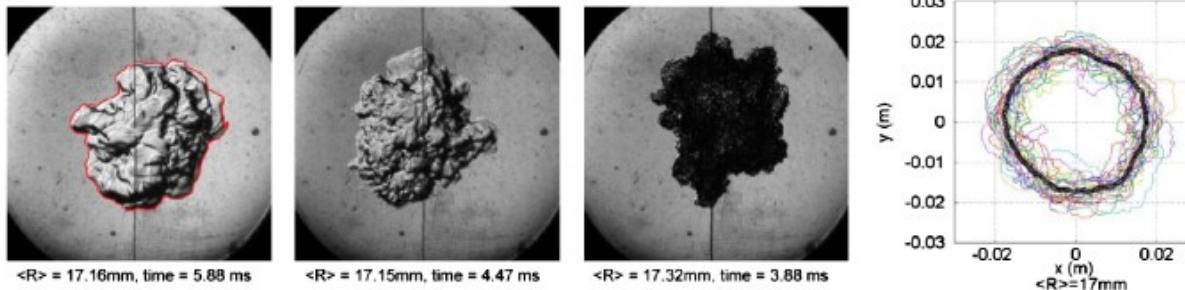
Turbulence: dual-plane PIV

Flame: single plane OH-PLIF,

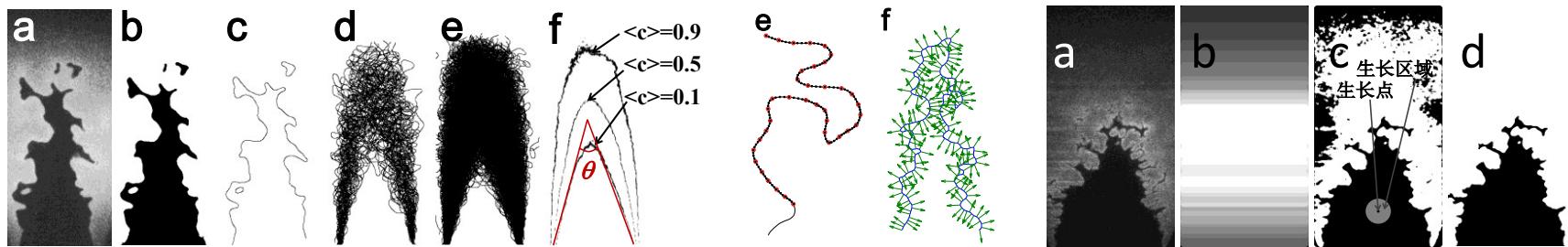
dual-plane CH-PLIF

图像处理

- 湍流容弹，火焰传播：



- 连续稳定湍流火焰：



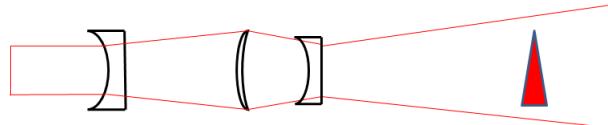
自适应阈值二值法

- 基于Matlab的Canny边缘捕捉算法

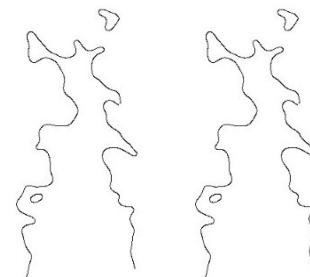
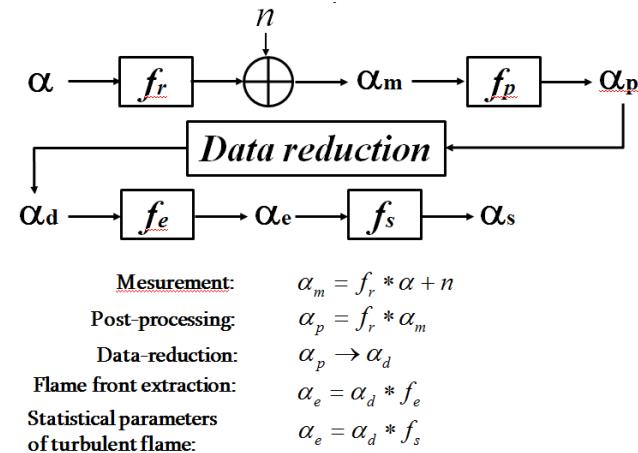
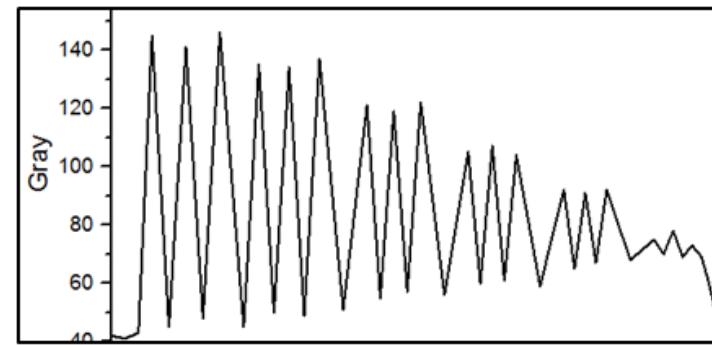
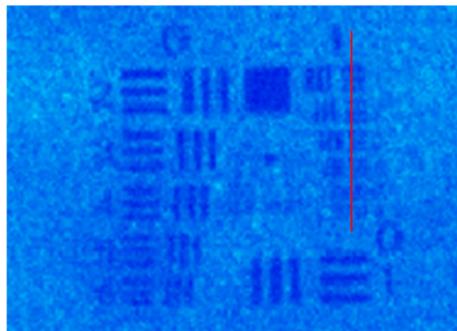
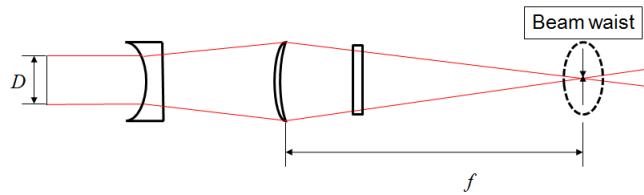
不确定性分析：测量系统影响

- 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



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）

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

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

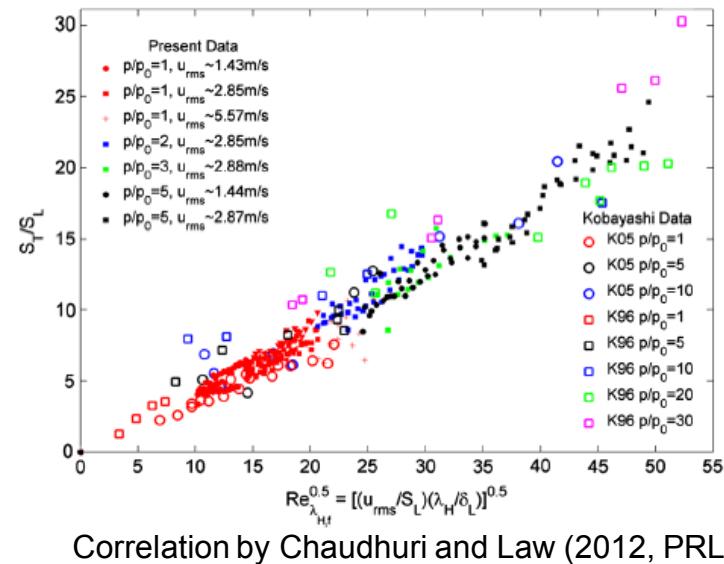
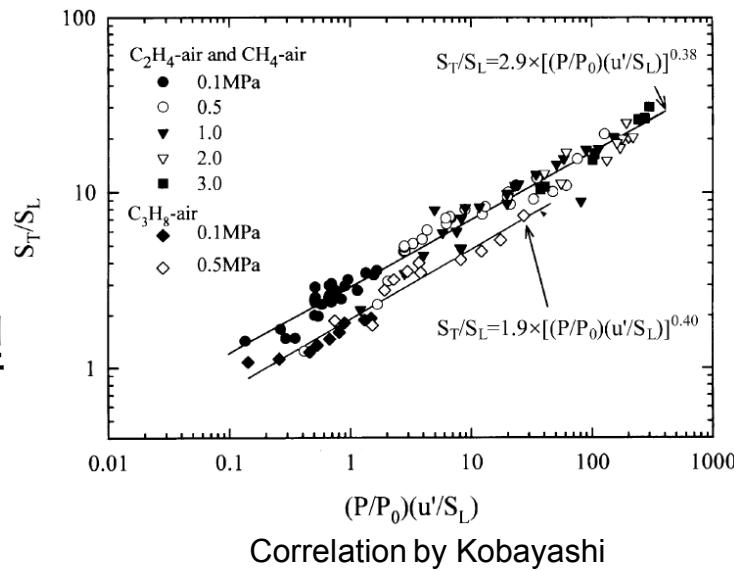
• 问题：

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:

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

- 火焰面密度 Σ

- 火焰刷厚度

- 拉伸因子 I_0 (火焰拉伸宏观表征)

$$I_0 = \frac{1}{V} \int_0^{+\infty} \Sigma dV$$

- 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:

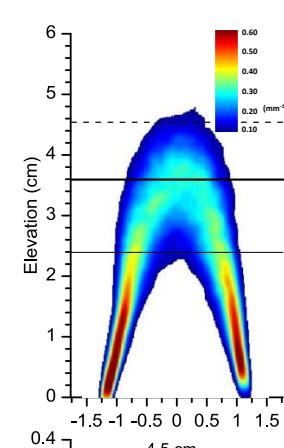
1. 基础湍流燃烧模型验证的微观参数 (Σ 为微观参数; S_T 为宏观参数)
2. 湍流与火焰相互作用的结果

- 基于 Σ 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

湍流火焰结构

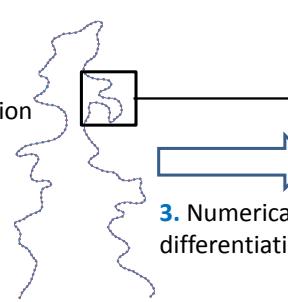
火焰刷和火焰面密度



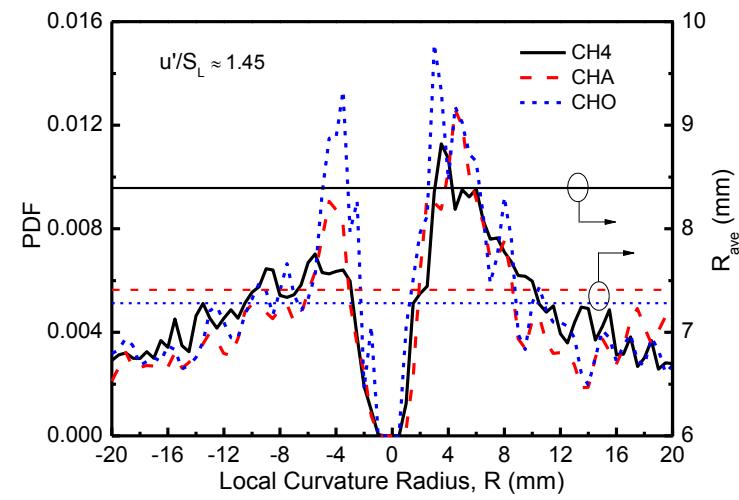
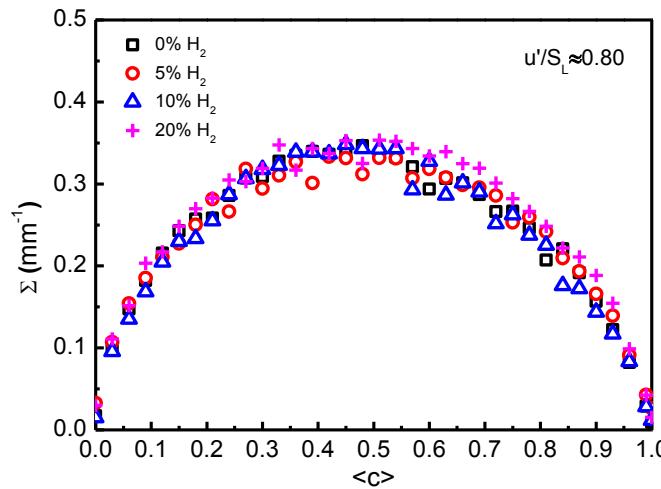
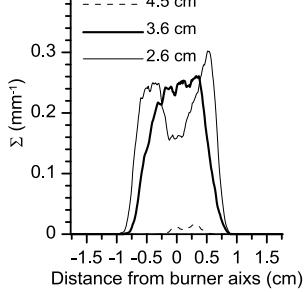
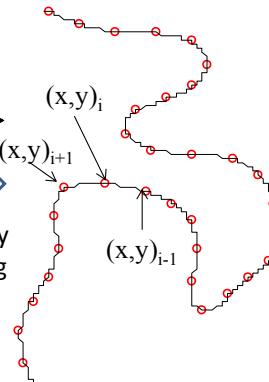
1. Binarization

Flame boundary

2. Discretization



3. Numerically differentiating



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

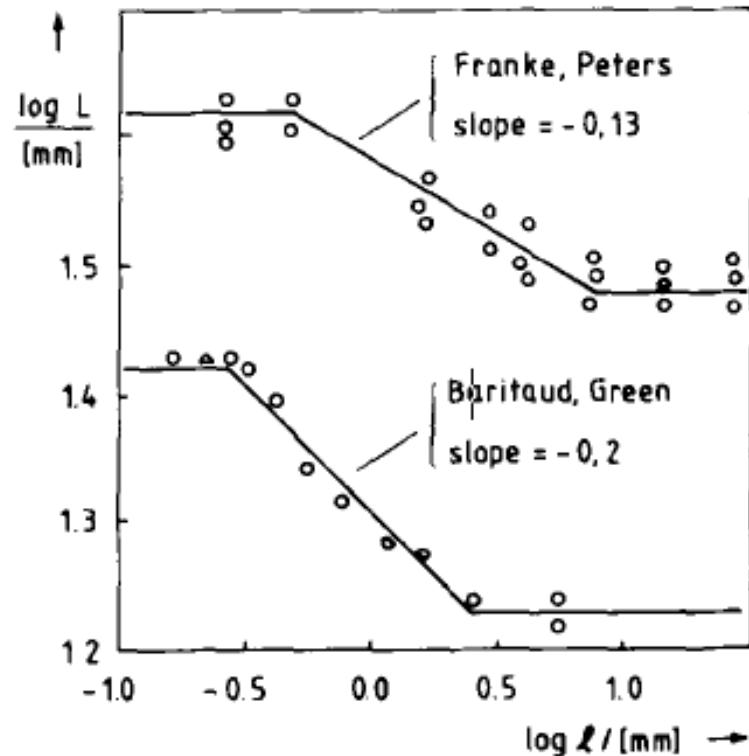
积分尺度

在湍流火焰中：

N.Peters指出最小尺度为Gibson尺度：

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

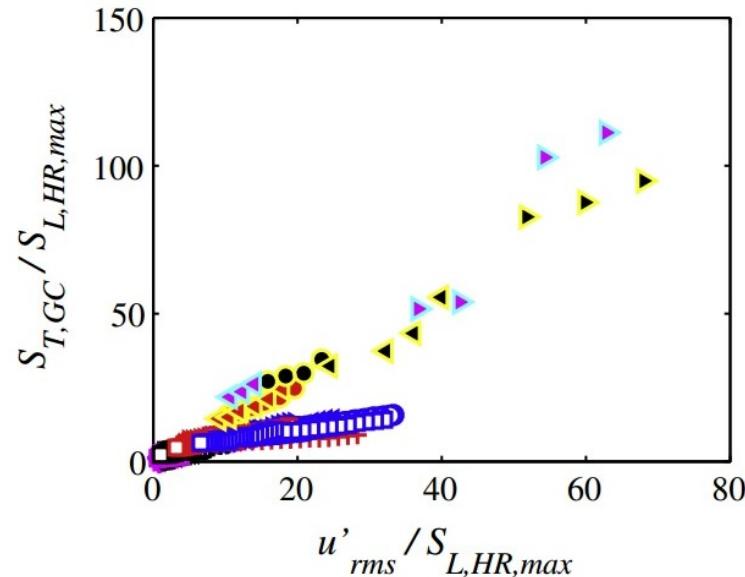
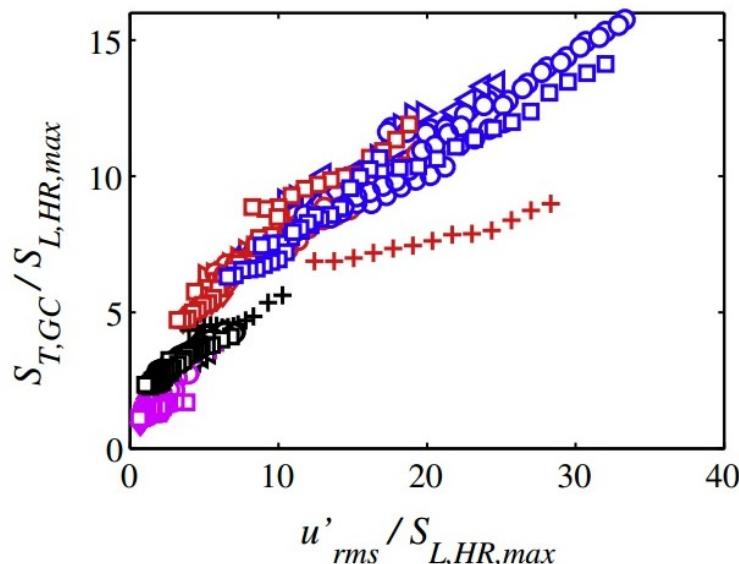
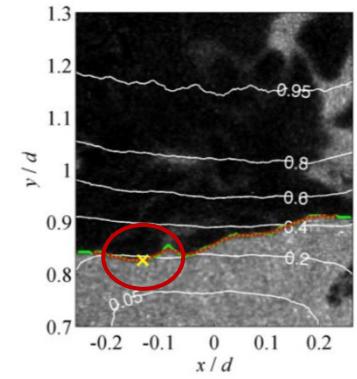
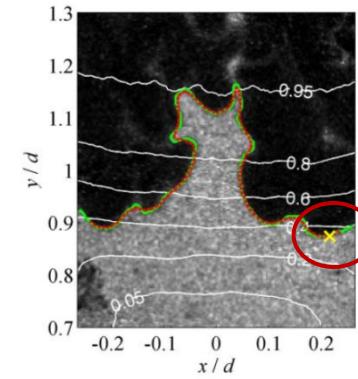
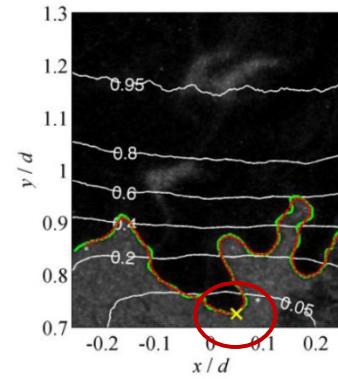
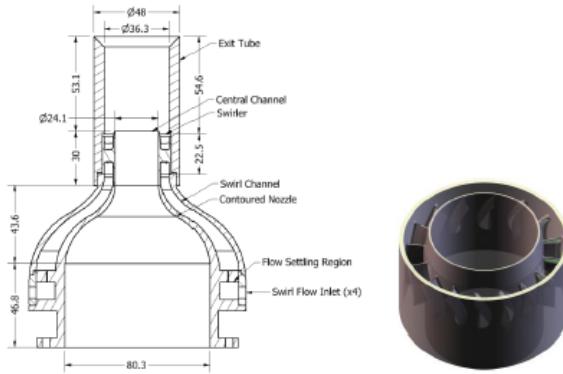
$$U_t = \overline{S}_c \left(\frac{L_G}{L}\right)^{2-D}$$



斜率为 $2-D$, D 为分形维数 (7/3)

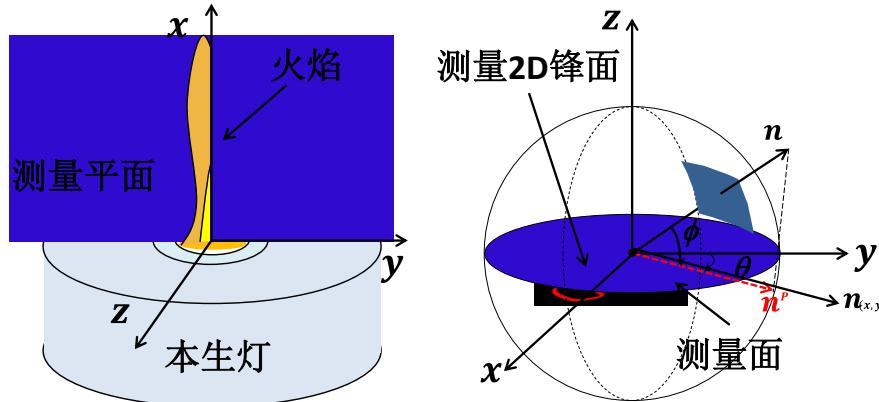
湍流火焰结构

- 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



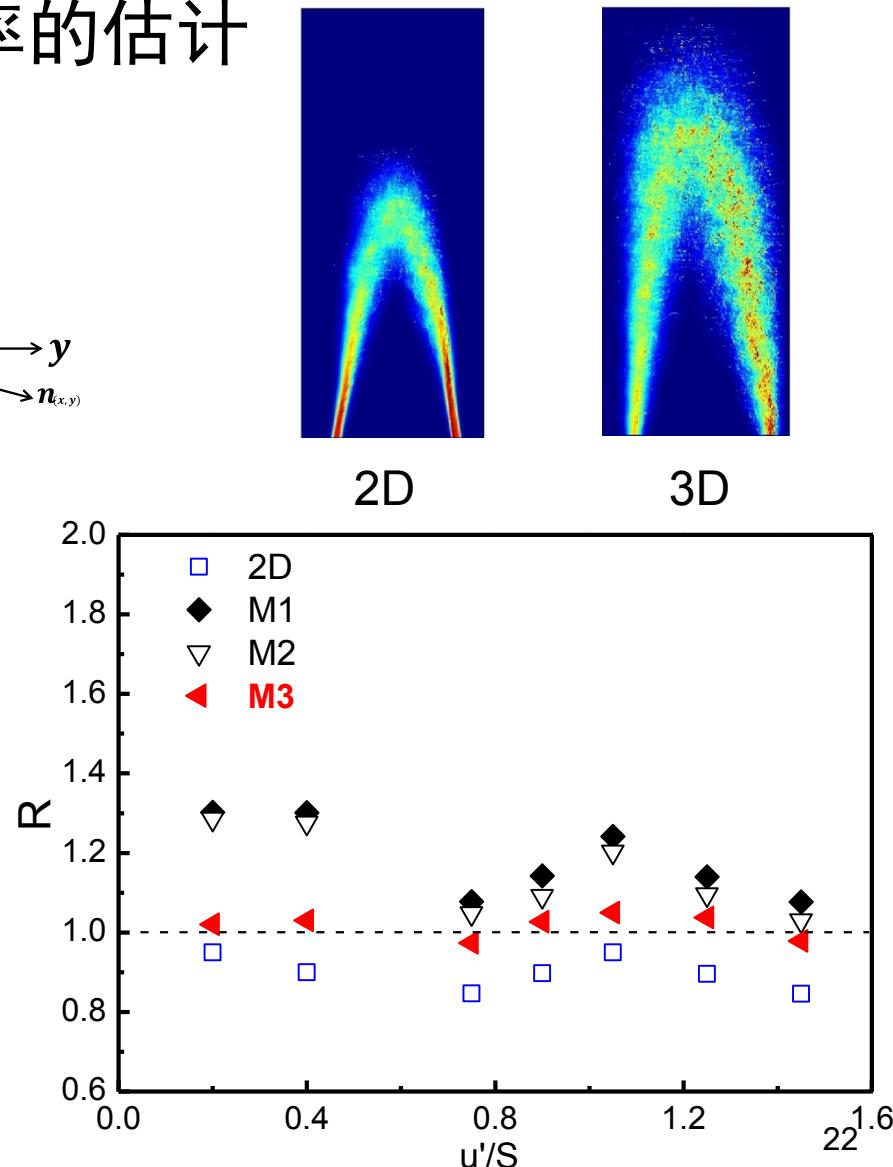
2D到3D估计模型坐标图示

燃烧系统整体燃料消耗率：

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

消耗率和供给燃料量之比：

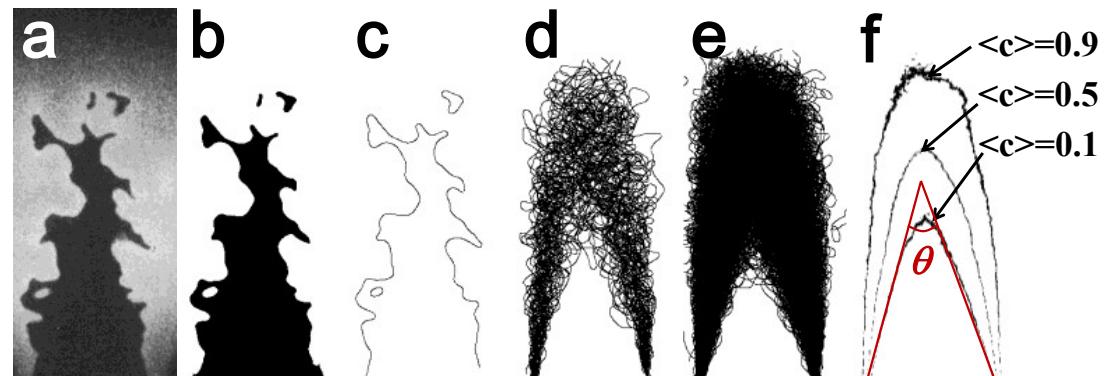
$$R = \frac{\int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \sum I_0 S_L \rho_0 \pi x dx dy}{\rho_0 U_0 A_0}$$



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 λ_i
 $(\lambda_{k+1} < \lambda_k)$

k小，对应大尺度
k大，对应小尺度

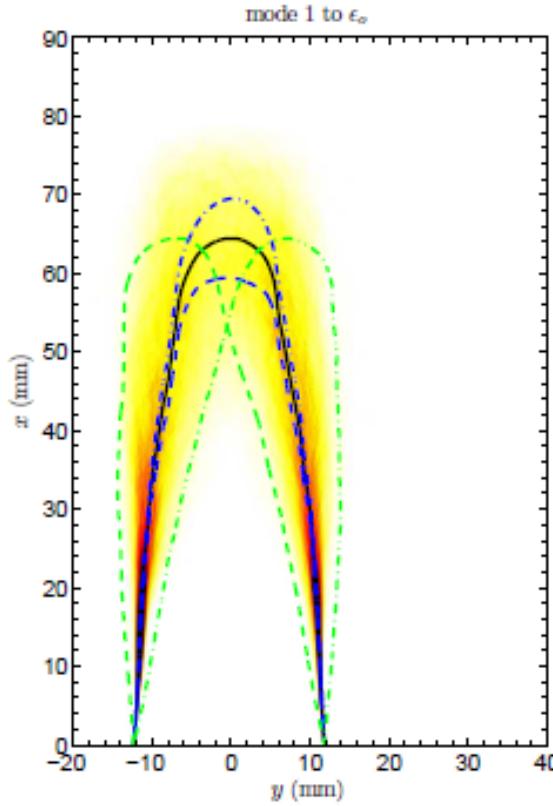
应用：

- 图像处理
- 数据分析
- 模型简化

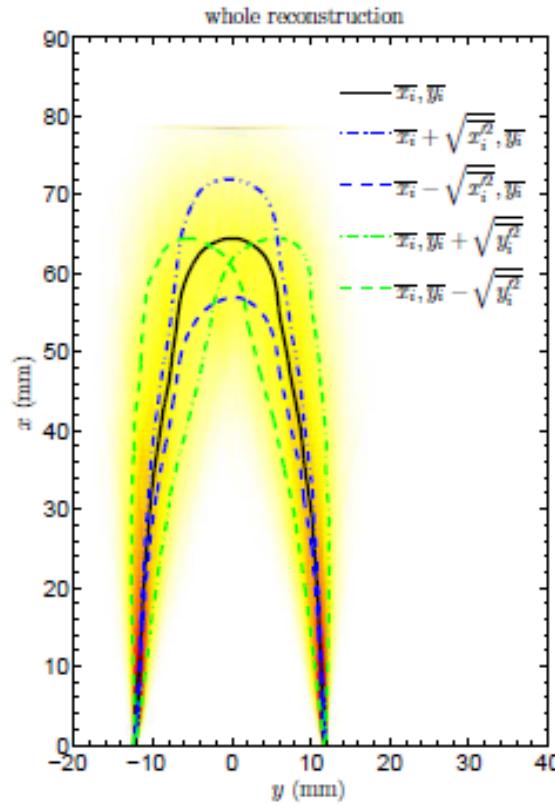
难点：

如何将数学提取出的模态与物理意义相联系

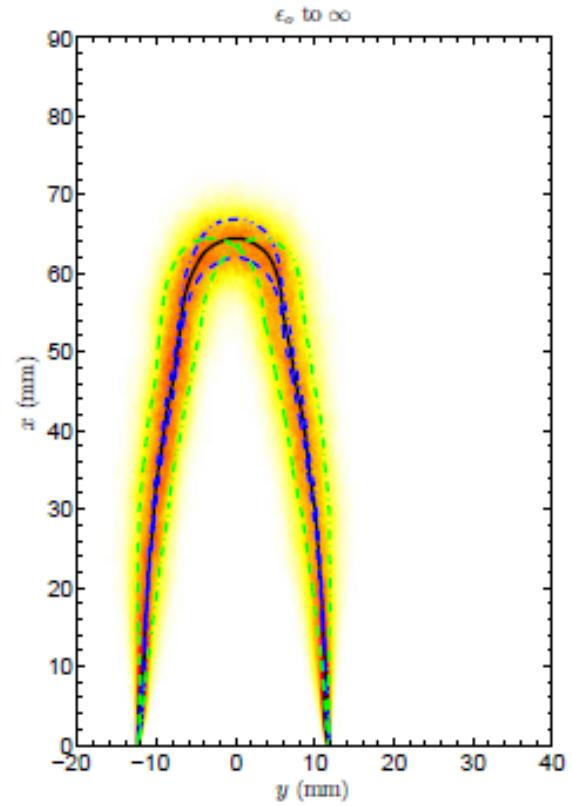
湍流火焰模态



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

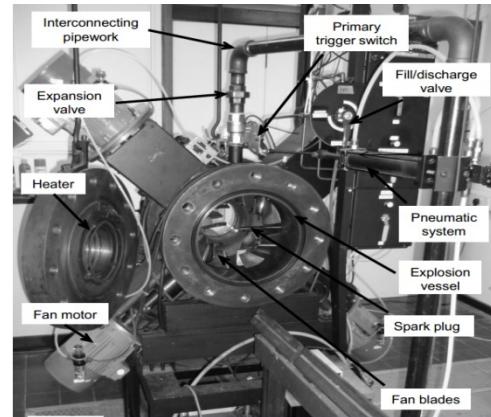
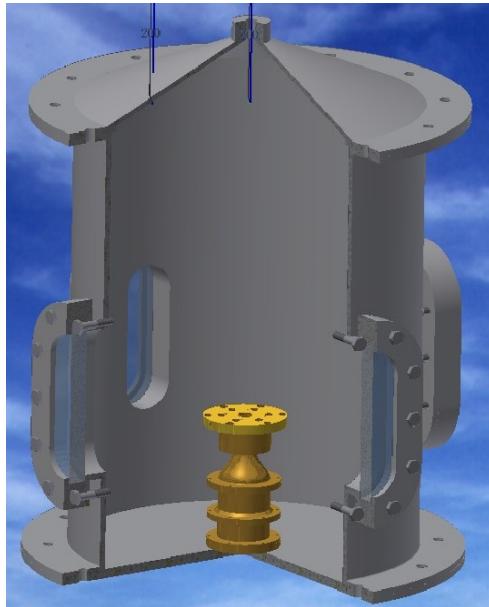
- 湍流燃烧实验方面的交叉合作：
 1. 火焰+流体力学
 2. 湍流火焰+燃烧激光诊断，光学
 3. 湍流火焰+图像处理
 4. 湍流火焰+统计学
 5. 湍流火焰实验+理论+DNS，LES高精度计算
 6. 湍流火焰+多物理场（等离子体场，电场，声场，磁场，微波场...）

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₂₇

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: jinhuawang@mail.xjtu.edu.cn