

# 气固燃料燃烧的激光诊断

---

报告人：王智化

能源清洁利用国家重点实验室

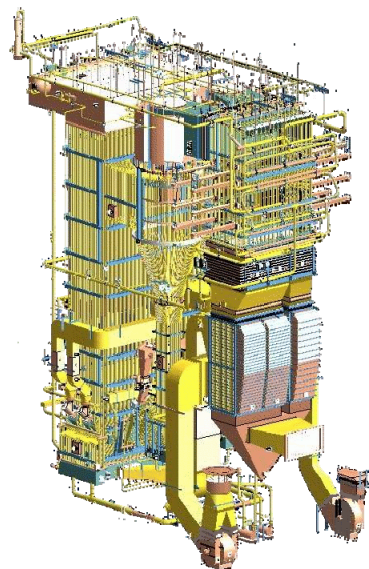
浙江大学

2015/9/22

1. 气固燃料燃烧的研究难点
2. 等离子体气体火焰助燃PAC定量测量
3. 固体燃料燃烧过程中碱金属动态释放特性测量
4. 未来可能的研究方向与合作

# 现代燃烧设备的复杂性

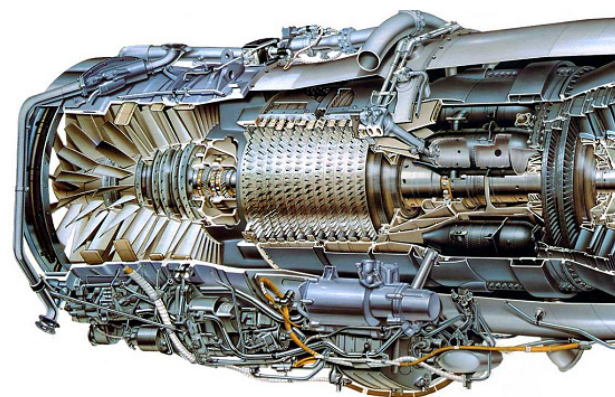
- 大型电站锅炉体积庞大、温度高
  - ✦ 600MW尺寸：17.6m×17.6m×54m；
  - ✦ 1000MW尺寸：32m×15.7m×66.4m；
  - ✦ 最高温度>1600℃；
  - ✦ 气固两相湍流流动。
- 现代气流床气化炉压力高、温度高
  - ✦ 运行压力：3.0~8.5MPa；
  - ✦ 最高温度：1300~1700℃；
  - ✦ 液态排渣。



锅炉



气化炉



燃气轮机

对象复杂

高温高压

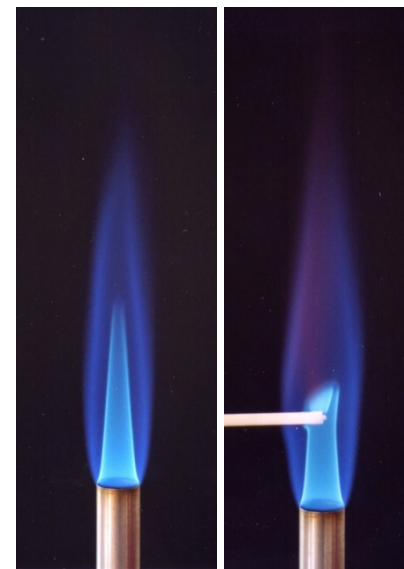
测量困难

# 常规测量手段的不足

- 在燃烧过程中，由于剧烈的燃烧化学反应往往发生在100~200um厚的火焰薄层内，火焰锋面前后存在着巨大的温度梯度、速度梯度和浓度梯度，其复杂的传热、传质现象造成对其理论描述的困难和直接测量的不易；
- 湍流火焰结构、自由基分布等信息对于认清燃烧机理，发展湍流模型意义重大；
- 缺乏有效的测量手段，会造成对其内部反应机理的探究困难。

## 传统测量手段：

干扰流场，测量误差大，费时费力，时空分辨率低

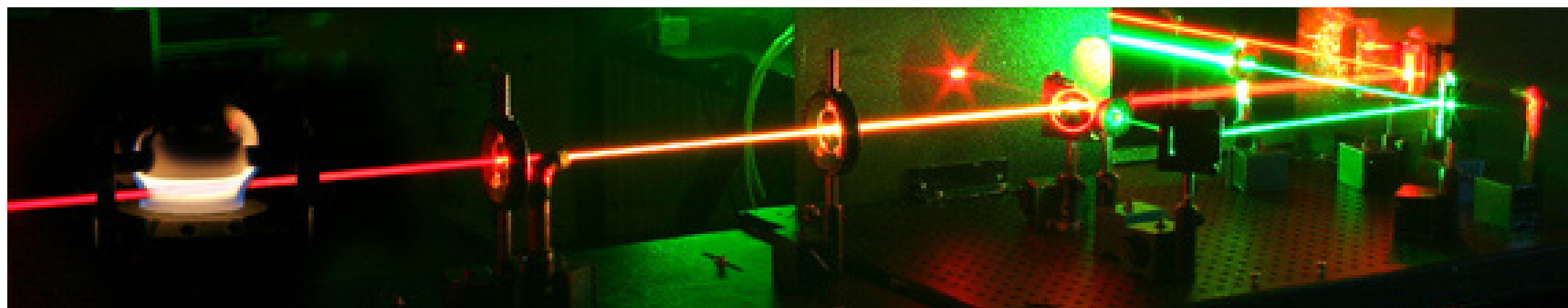
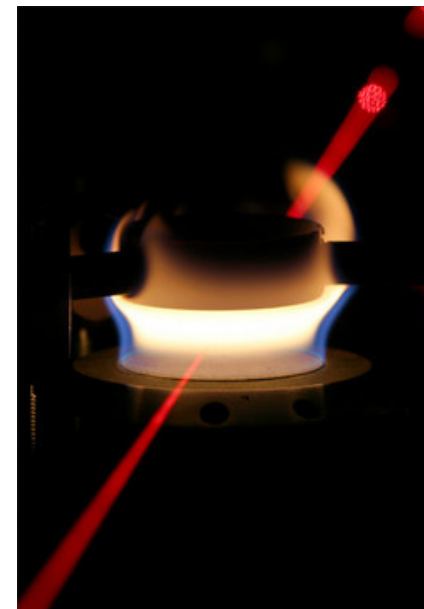


热电偶测温造成对火焰结构的干扰

# 先进的激光诊断技术

## 激光燃烧诊断技术的优点：

- 非接触，无干扰；
- 高空间分辨率 ( $<0.001 \text{ mm}^3$ ) ；
- 高时间分辨率 ( $<10 \text{ ns}$ ) ；
- 可用于测量温度，组分（分子，原子，自由基），速度，颗粒物大小密度等；
- 成为近年来燃烧学领域最重要的测量手段之一。

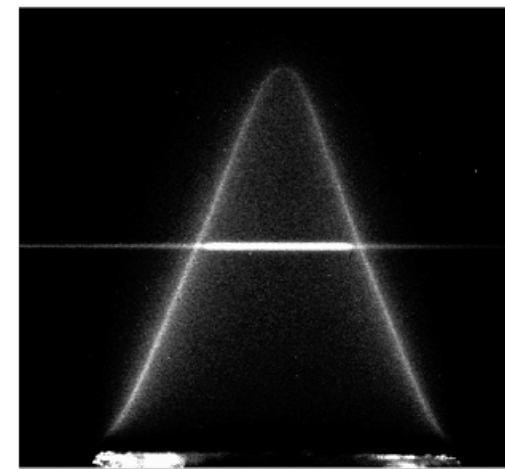
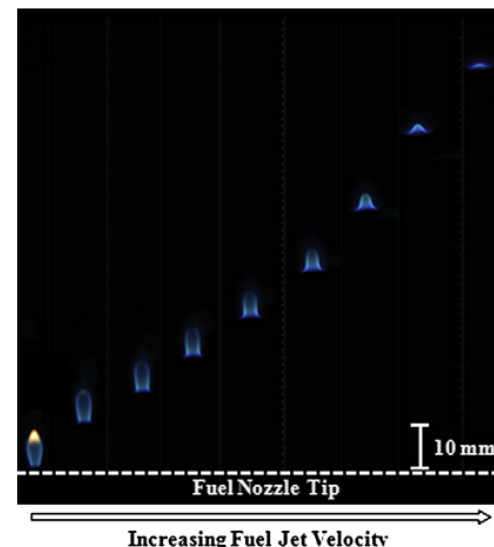
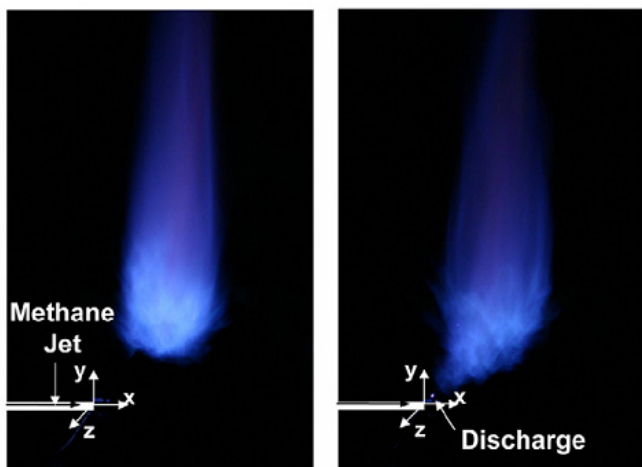


1. 气固燃料燃烧的研究难点
2. 等离子体气体火焰助燃PAC定量测量
3. 固体燃料燃烧过程中碱金属动态释放特性测量
4. 未来可能的研究方向与合作

- ◆ 极端条件下火焰存在**燃烧失稳**，比如最新的**DLN低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术**；
- ◆ **等离子体助燃PAC**可显著提高燃烧速度，增强火焰稳定性。

等离子体助燃原理：

- ◆ **产生活性自由基**(包括高能电子、离子、 $\text{O}$ 、 $\text{OH}$ 、 $\text{H}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{O}_2^*$ 等)；
- ◆ Plasma是通过热效应还是自由基改变链式反应向火焰锋面**输送能量**，**机理不明**；
- ◆ 以 $\text{O}_3$ 生存时间最长，最具实用价值。



1. W. Kim et al. / *Combust. Flame*, 153(2008):603-615
2. T. Ombrello et al. / *Combust. Flame*, 157(2010):1906-1915
3. F. Halter, et al. / *Energy Fuels*, 25(2011):2909-2916.



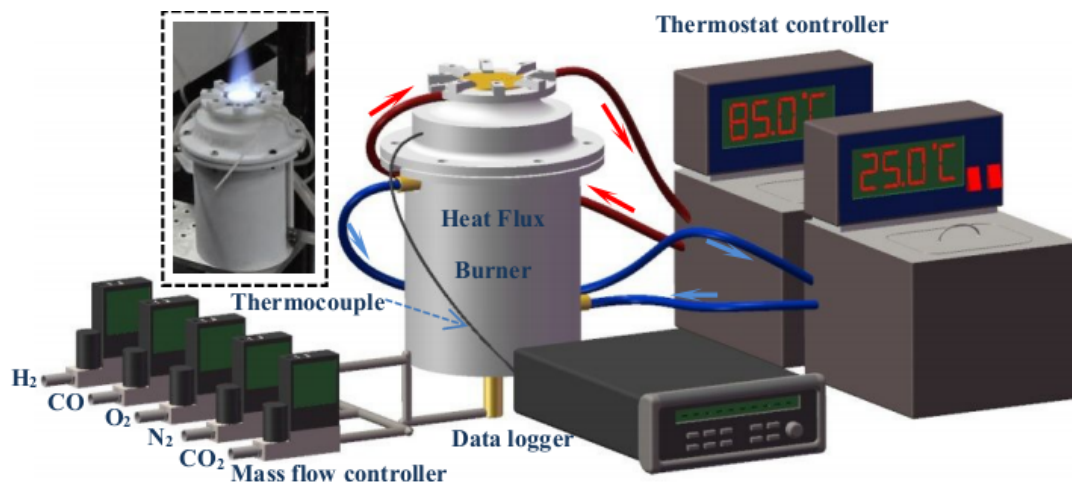
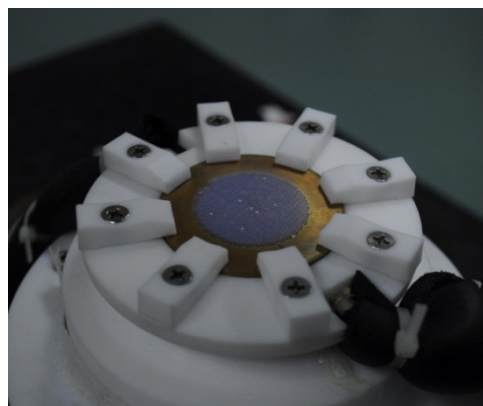
- 建立了Heat-flux热流量测量平台，直接测量了O<sub>3</sub>加入前后的绝热层流火焰速度；
- 首次建立了16步活性分子O<sub>3</sub>与O<sub>2</sub>、O、N<sub>2</sub>、H、OH、H<sub>2</sub>O、HO<sub>2</sub>、NO、CH<sub>3</sub>等分子的相互反应机理。

**Table 1**

Modified O<sub>3</sub> mechanism that can be supplemented to GRI-Mech 3.0.<sup>a</sup>

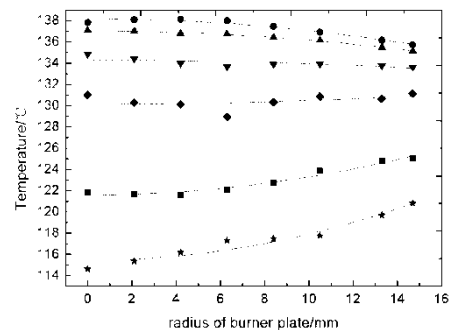
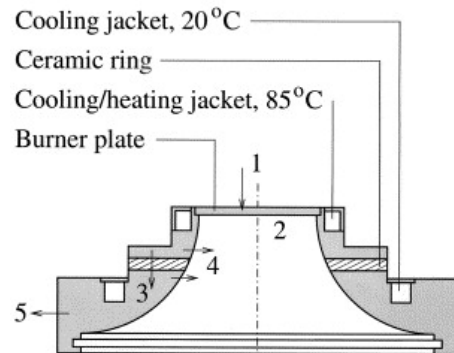
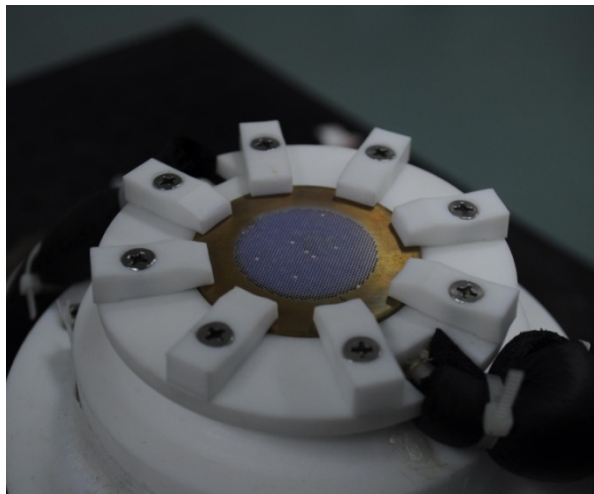
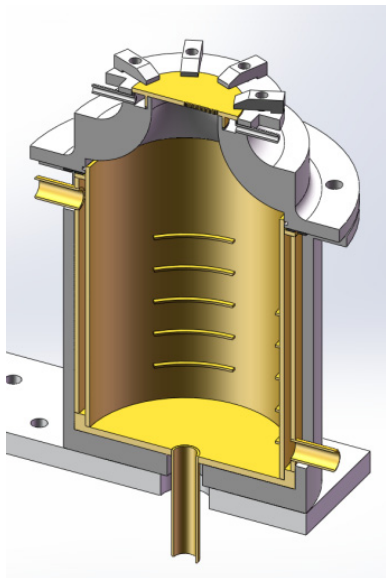
NO.	Reaction	A	n	E
1	$O_3 + O_2 \rightarrow O_2 + O + O_2$	1.54E+14	0	23,064
2	$O_2 + O + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$	3.26E+19	-2.1	0
3	$O_3 + N_2 \rightarrow O_2 + O + N_2$	4.00E+14	0	22,667
4	$O_2 + O + N_2 \rightarrow O_3 + N_2$	1.60E+14	-0.4	-1391
5	$O_3 + O \rightarrow O_2 + O + O$	2.48E+15	0	22,727
6	$O_2 + O + O \rightleftharpoons O_3 + O$	2.28E+15	-0.5	-1391
7	$O_3 + O_3 \rightarrow O_2 + O + O_3$	4.40E+14	0	23,064
8	$O_2 + O + O_3 \rightarrow O_3 + O_3$	1.67E+15	-0.5	-1391
9	$O_3 + H \rightleftharpoons O_2 + OH$	8.43E+13	0	934
10	$O_3 + H \rightleftharpoons O + HO_2$	4.52E+11	0	0
11	$O_3 + OH \rightleftharpoons O_2 + HO_2$	1.85E+11	0	831
12	$O_3 + H_2O \rightleftharpoons O_2 + H_2O_2$	6.62E+01	0	0
13	$O_3 + HO_2 \rightleftharpoons OH + O_2 + O_2$	6.62E+09	0	994
14	$O_3 + O \rightleftharpoons O_2 + O_2$	4.82E+12	0	4094
15	$O_3 + NO \rightleftharpoons O_2 + NO_2$	8.43E+11	0	2603
16	$O_3 + CH_3 \rightleftharpoons CH_3O + O_2$	5.83E+10	0	0

<sup>a</sup> Expressed as  $k = AT^n \exp(-E/RT)$  (cal, cm<sup>3</sup>, mol, s).

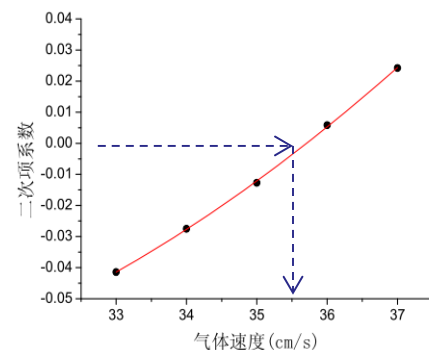




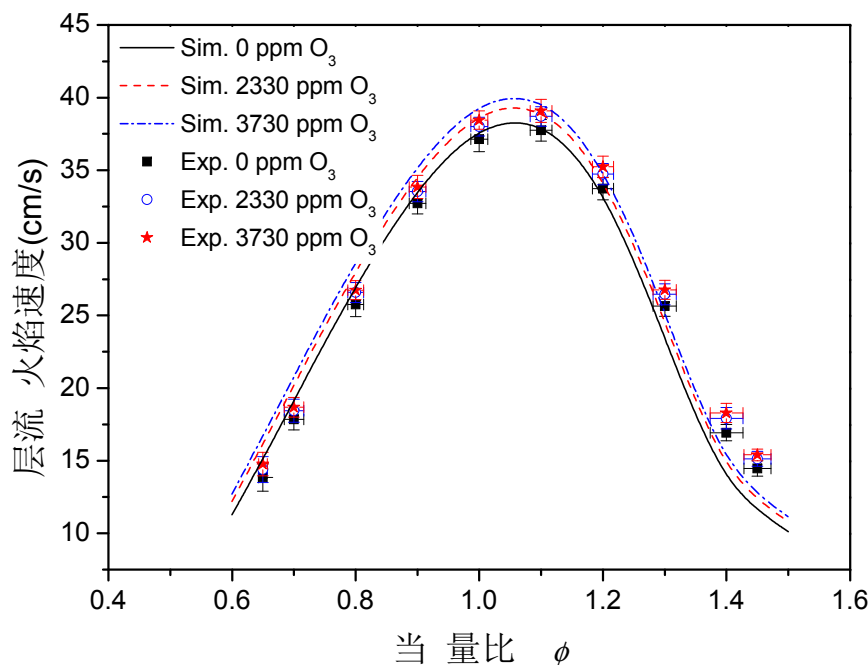
# Heat Flux热流量法火焰速度测量



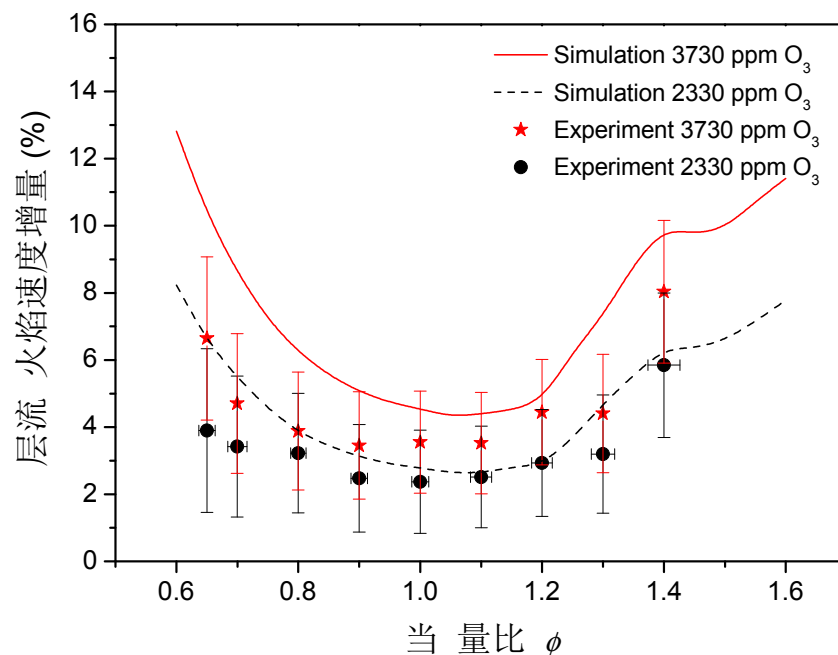
- Heat-flux热流量方法是近年来新发展起来的火焰速度精确测量方法之一；
- 在多孔炉盘表面形成稳定的**一维平面火焰**；
- 由**外部热量补偿**火焰在炉盘片稳定所散热量；
- 当给气速度与火焰速度匹配时，炉盘片**温度均匀**一致；
- 通过**拟合**测量不同送气条件下的**盘片温度分布**，得出温度均匀时的送气速度，获取精确的燃烧速度。



# 活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理



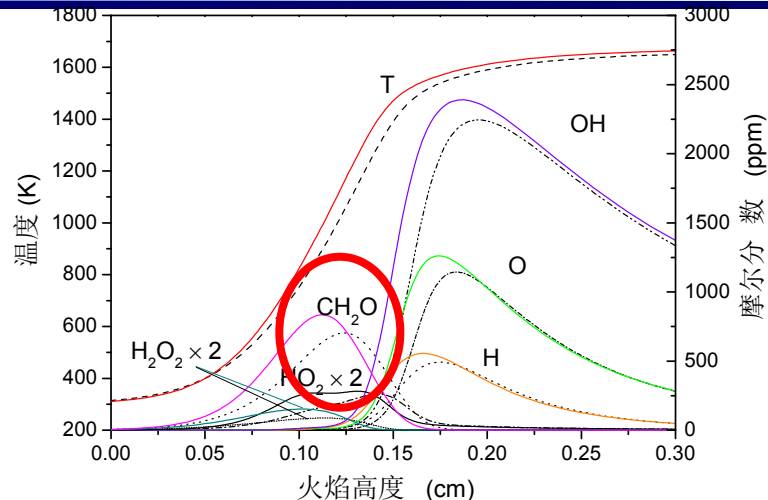
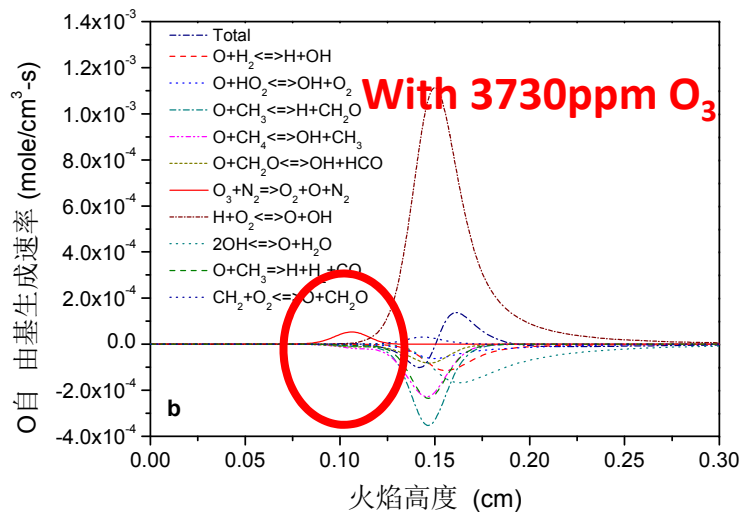
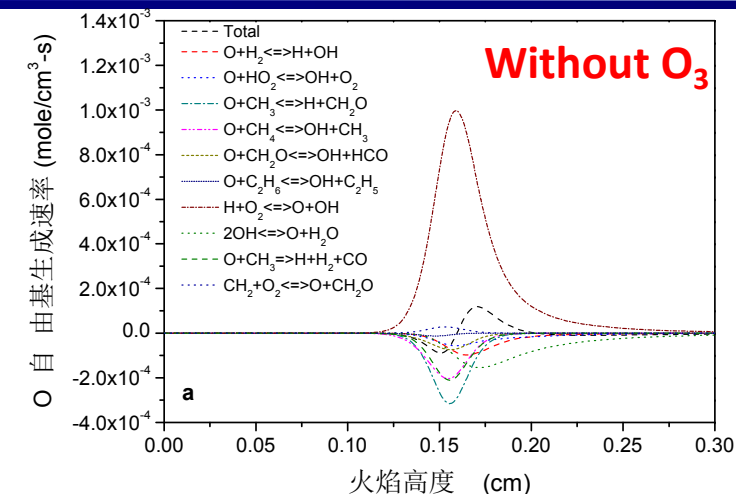
不同 $\text{O}_3$ 浓度下 $\text{CH}_4$ 火焰速度



不同 $\text{O}_3$ 浓度下的火焰速度增量

- ◆ 率先定量测量了活性分子 $\text{O}_3$ 对 $\text{CH}_4/\text{Air}$ 燃烧速度的强化效果；
- ◆ 强化主要发生在偏离当量比的区域，如lean侧和rich侧；
- ◆ 模型可对不同浓度 $\text{O}_3$ 强化燃烧进行准确预测。

# 活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理

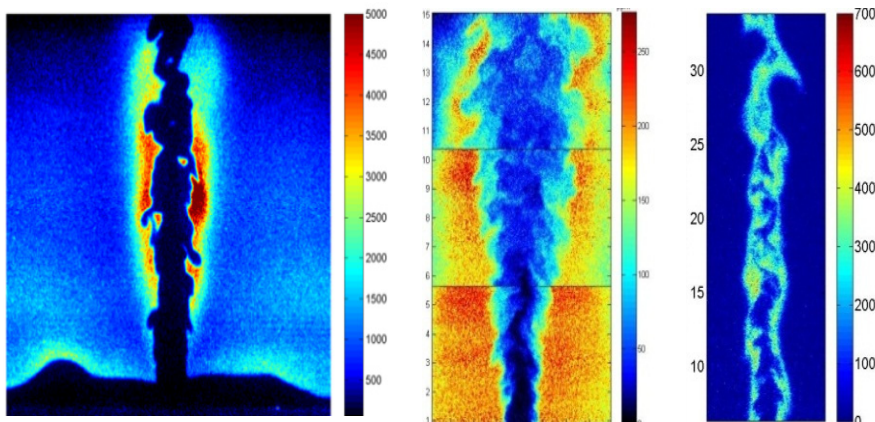


- ◆ 发现O<sub>3</sub>促进了预热区O自由基大量生成，有利于整个燃烧链式反应的启动和加速；
- ◆ 燃烧初期CH<sub>2</sub>O分子显著增多，可提高热释放速率，促进火焰的燃烧。

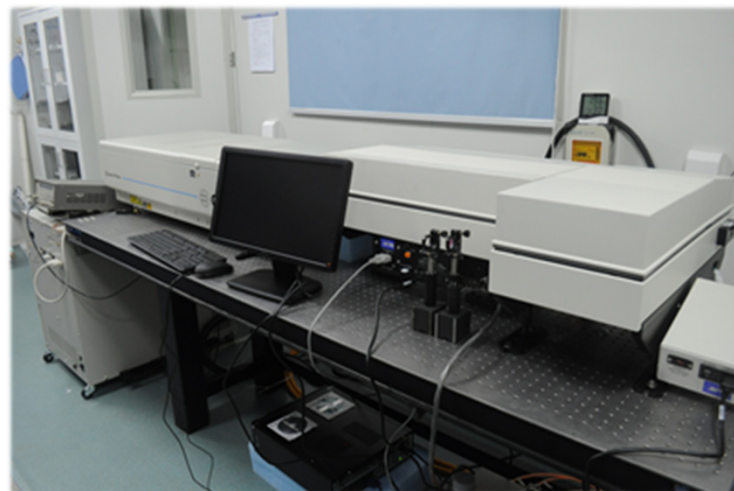
提高了O<sub>3</sub>与CH<sub>4</sub>燃烧的作用机理认识，相关成果发表在国际燃烧领域权威期刊Combustion & Flame..

各种自由基所需激发波长：

分子	OH	C <sub>2</sub>	CH	CN	NH	NO	CH <sub>2</sub> O	CO	NO <sub>2</sub>
激发波长 (nm)	283	516	431	388	336	226	320-360	460	450-470

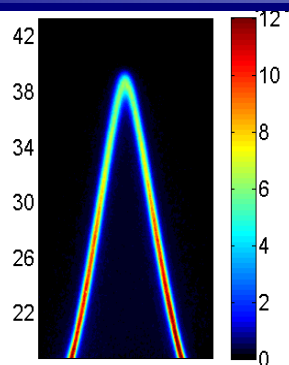


基于PLIF技术的活性分子二维分布测量  
(从左往右依次为OH, NO, CH<sub>2</sub>O)

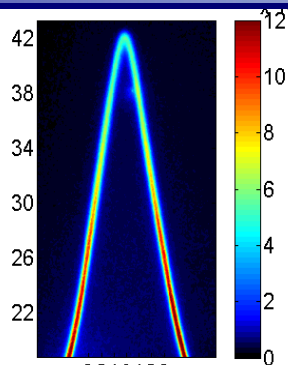


- ◆ 实验室已建成高能量平面激光诱导荧光PLIF试验平台
- ◆ 可实现CH<sub>2</sub>O、OH、NO、NO<sub>2</sub>等实时在线二维测量

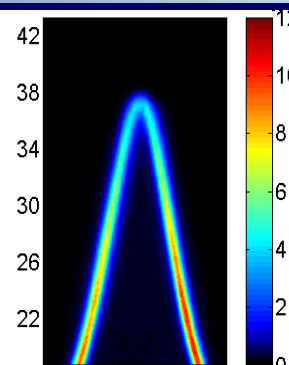
# 活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理



$\phi=0.8$

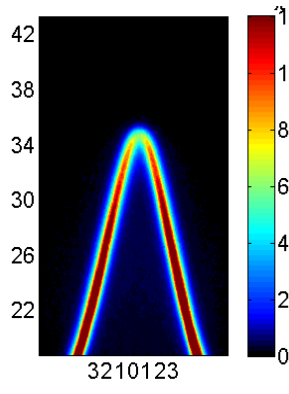
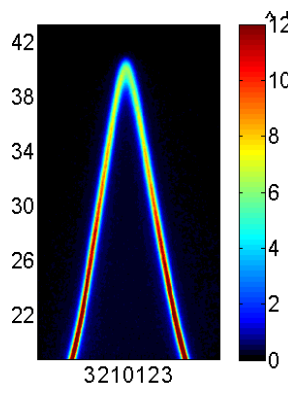
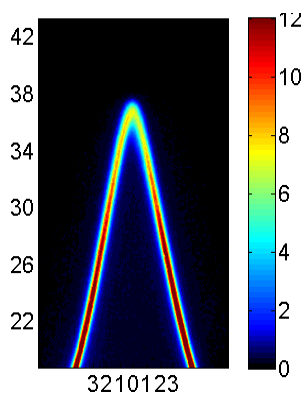


$\phi=1.0$



$\phi=1.4$

$O_3$   
(0 ppm)

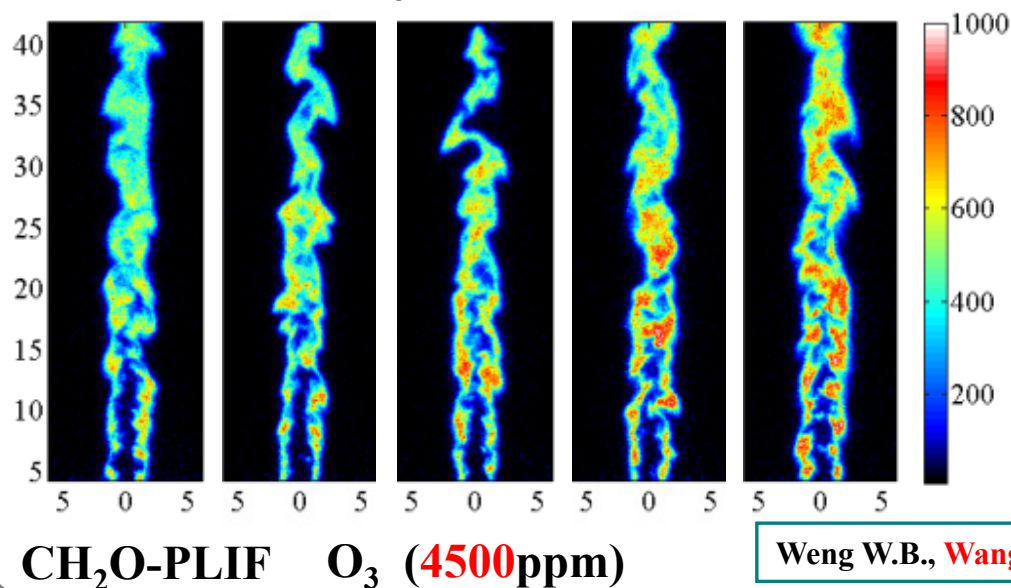
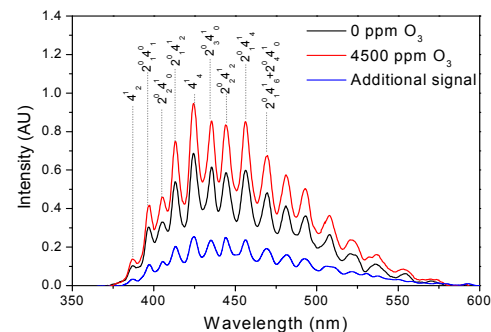
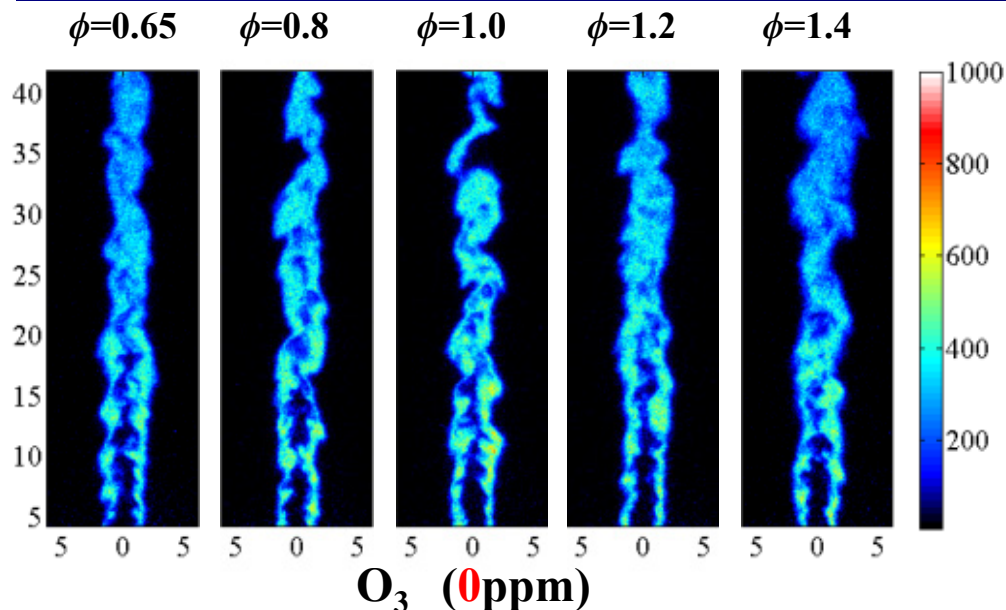


$O_3$   
(4500 ppm)

- ◆ 火焰中 $CH_2O$ 中间产物浓度增加了**15%-60%**;
- ◆ 在当量比1.4的工况下 $CH_2O$ -PLIF信号的增量最大, 与前述 $O_3$ 对火焰燃烧的强化**规律一致**。



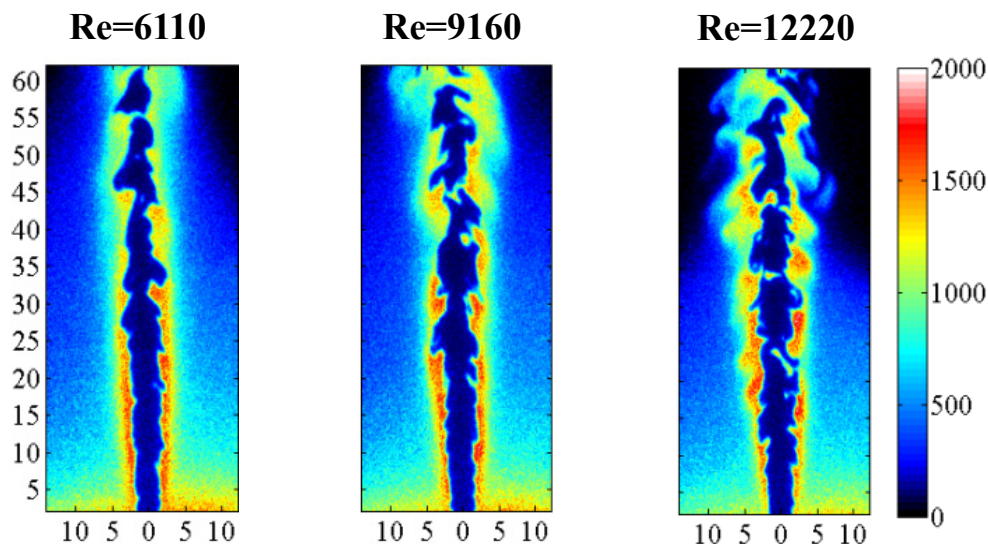
# 活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理



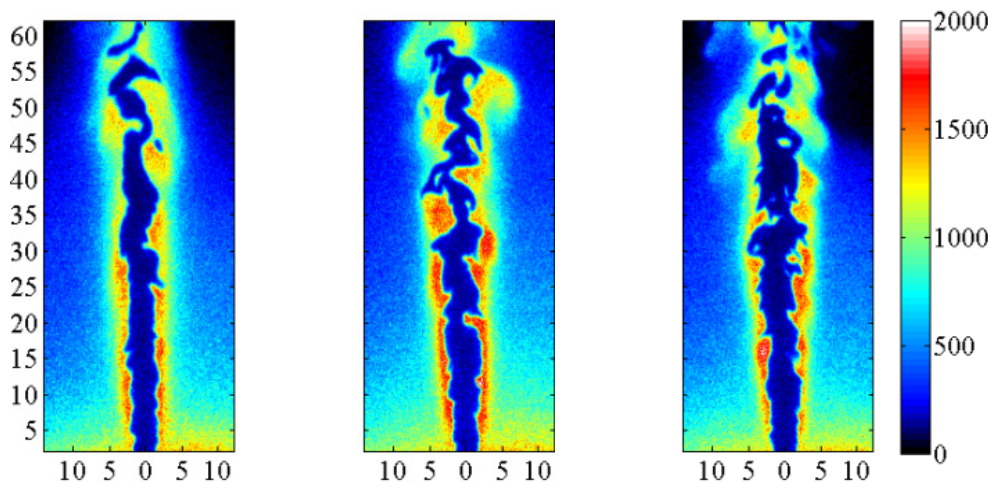
- ◆ 湍流射流火焰中CH<sub>2</sub>O产物浓度增加了**35%-85%**;
- ◆ 湍流促进传热传质, 扩大了预热区域, 使火焰下游的CH<sub>2</sub>O浓度增量更明显。



# 活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理



O<sub>3</sub> (0 ppm)  $\phi=0.65$



OH-PLIF O<sub>3</sub> (2400 ppm)  $\phi=0.65$

- ◆ OH自由基绝对浓度增加不显著，活性分子**主要影响火焰预热区**的链式反应；
- ◆ 随Re增加，湍流涡团的**脉动**及与火焰面的作用加强，火焰面的**皱褶度**进一步增加；
- ◆ 可以观察到**湍流涡结构**对于组分的**输运**和**火焰面的皱褶、挤压、变形**；
- ◆ 加入活性分子O<sub>3</sub>后，可观察到**火焰面的皱褶度**进一步增加，表明燃烧得到了强化。

1. 气固燃料燃烧的研究难点
2. 等离子体火焰助燃定量测量
3. 固体燃料燃烧过程中碱金属动态释放特性测量
4. 未来可能的研究方向与合作

# 固体燃料燃烧过程中的碱金属问题

- 准东煤田预测储量3900亿吨，我国最大的整装煤田；
- 准东煤的沾污、积灰、结渣问题制约其大规模开发应用；
- 生物质锅炉也普遍存在碱金属腐蚀积灰问题。

煤种	Mad%	Aad%	Vad%	FCad%	Mt%
伊敏煤	13.88	11.01	31.95	43.16	30.92
昭通煤	31.84	15.65	31.02	21.49	53.11
准东煤	11.55	3.84	27.3	57.31	24.94

煤种	DT °C	ST °C	HT °C	FT °C
伊敏煤	1135	1161	1213	1257
昭通煤	1216	1228	1235	1245
准东煤	1329	1368	1390	1407

燃烧过程中碱金属动态释放  
缺乏在线测量



新疆大南湖电厂燃用准东煤后的积灰情况



生物质锅炉的碱金属腐蚀积灰问题

煤种	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
伊敏煤	60.65	15.61	10	2.4	5.43	0.78	0.53	0.78	3.82
昭通煤	36.53	19.89	18.05	3.33	9.86	0.15	1.16	1.26	8.61
准东煤	10.79	9.62	36.83	9.21	3.95	3.42	0.41	0.68	24.74

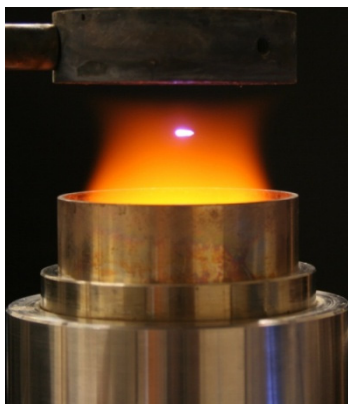
# LIBS技术原理

- **LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy)**, 即**激光诱导击穿光谱**, 它是利用高能量密度的激光将被测物质击穿, 产生**高温等离子体**, 进而观察等离子体冷却过程中激发态原子辐射的**原子光谱**。

激光聚焦在  
被测对象

光与物质相互作用:  
产生高温等离子体

等离子体冷却:  
辐射原子光谱



Incident Photons

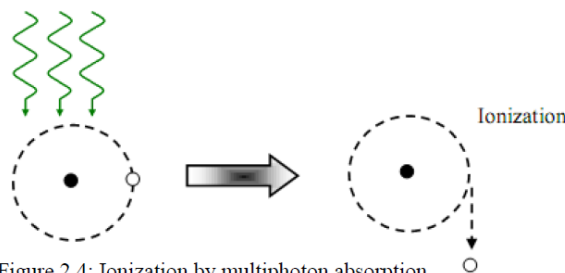
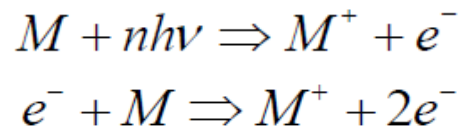
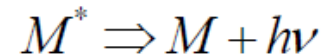
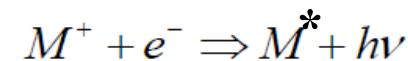


Figure 2.4: Ionization by multiphoton absorption.



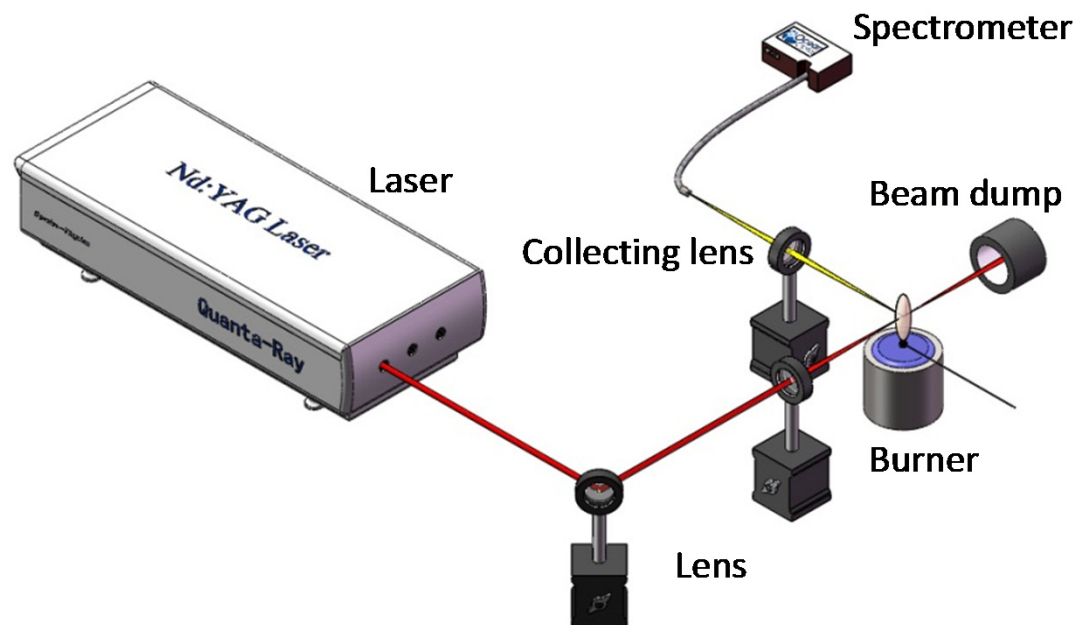
$$M^+ + e^- \left( \frac{mv_1^2}{2} \right) \Rightarrow M^+ + e^- \left( \frac{mv_2^2}{2} \right) + h\nu$$



$$I_{\text{LIBS}} = C * n_s$$

# 碱金属激光在线测量

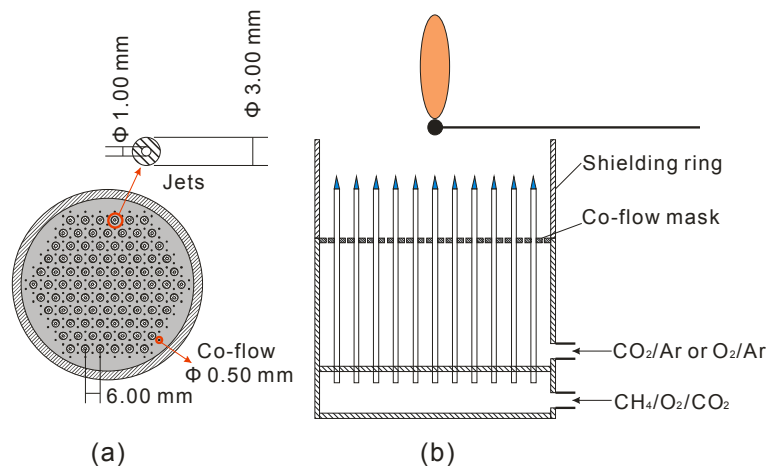
## LIBS测量系统



- 激光器：YAG激光，10Hz， $\sim 8\text{ns}$ 脉宽，最大输出能量 $1600\text{mJ}@1064\text{nm}$
- 聚焦透镜： $f=200\text{ mm}$ ， $D=50\text{ mm}$
- 收集透镜： $f=100\text{ mm}$ ， $D=125\text{mm}$
- 光仪：海洋光学 USB2000，光谱范围 $200\text{--}800\text{nm}$ ，光谱分辨率 $0.3\text{nm}$

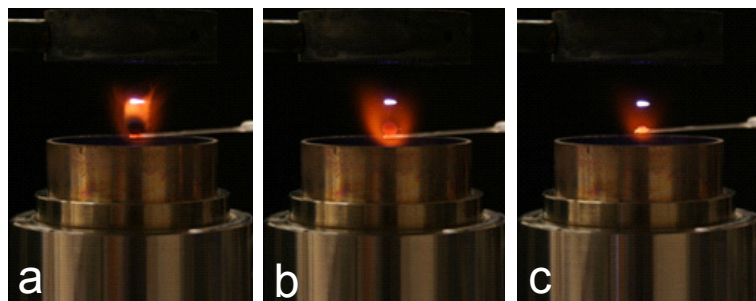
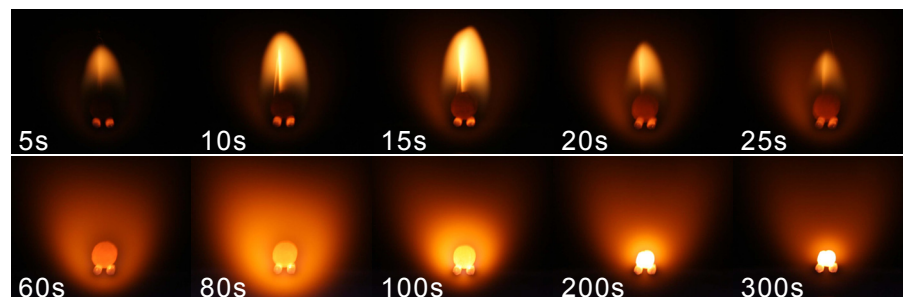


# 准东煤颗粒燃烧过程测量



Multi-jet burner

## 准东煤燃烧过程

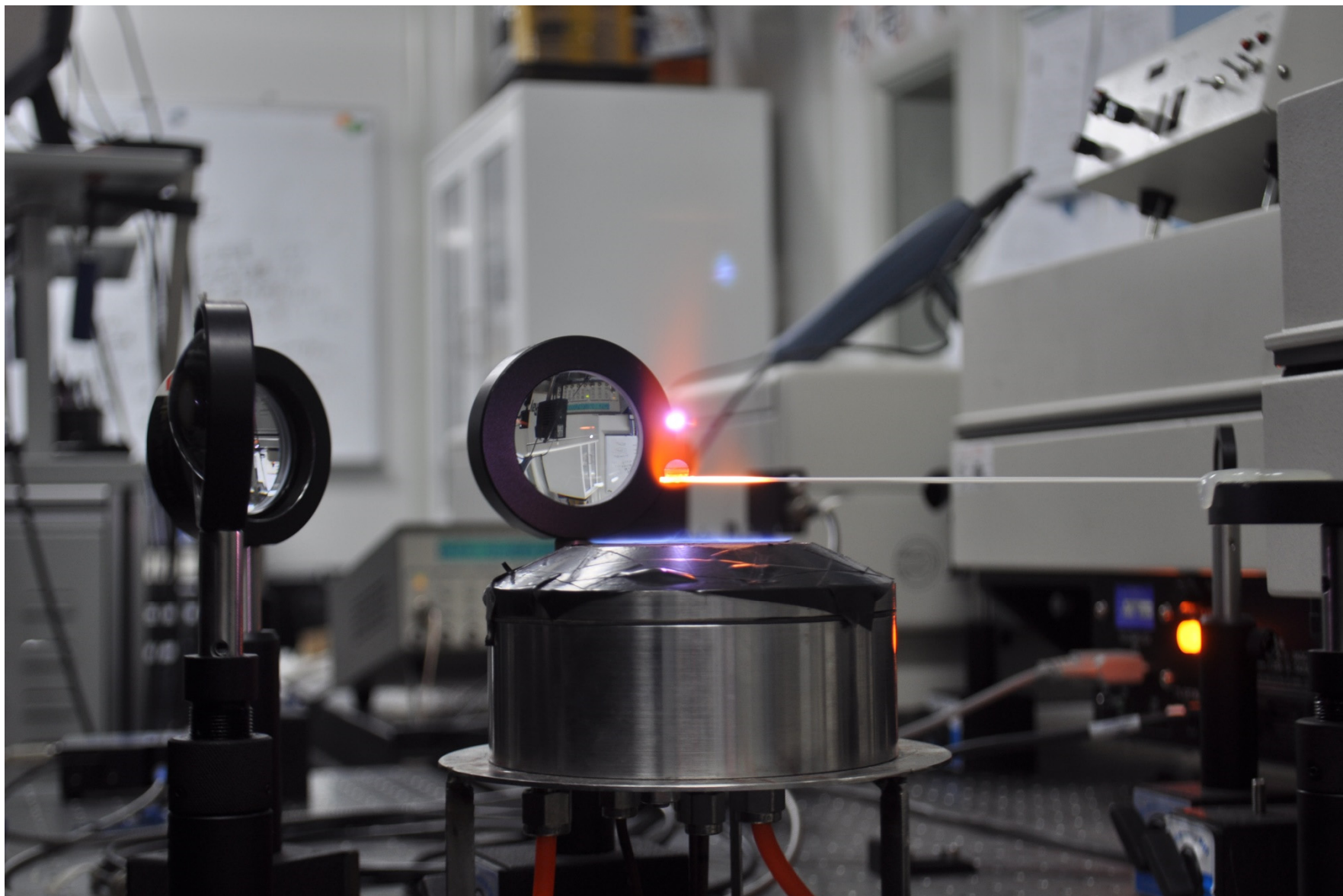


不同燃烧阶段的LIBS测量

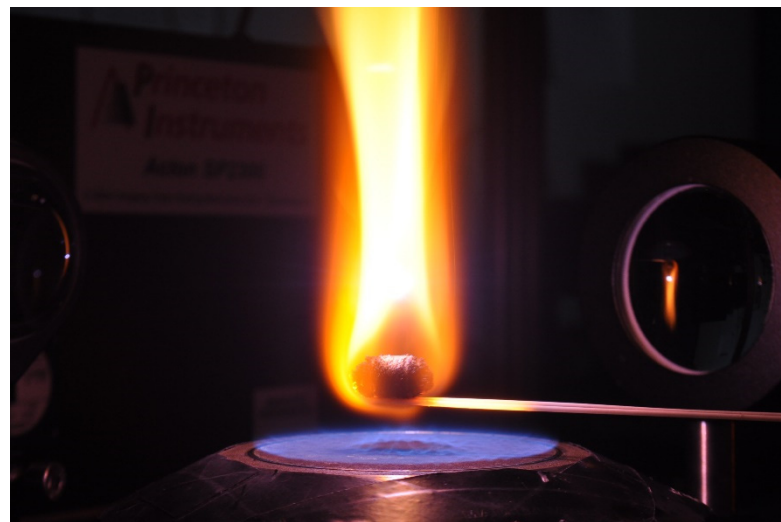
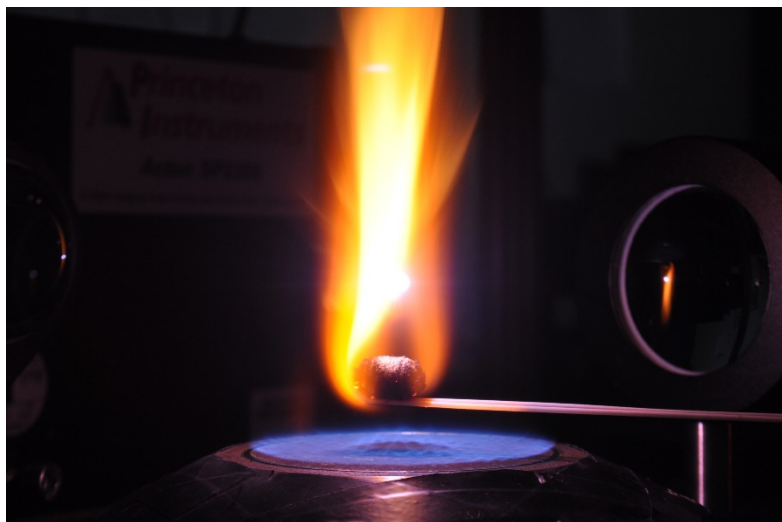
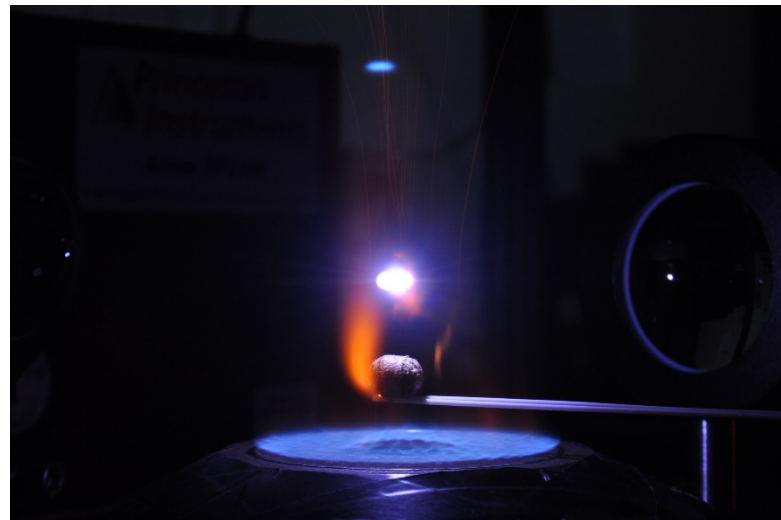
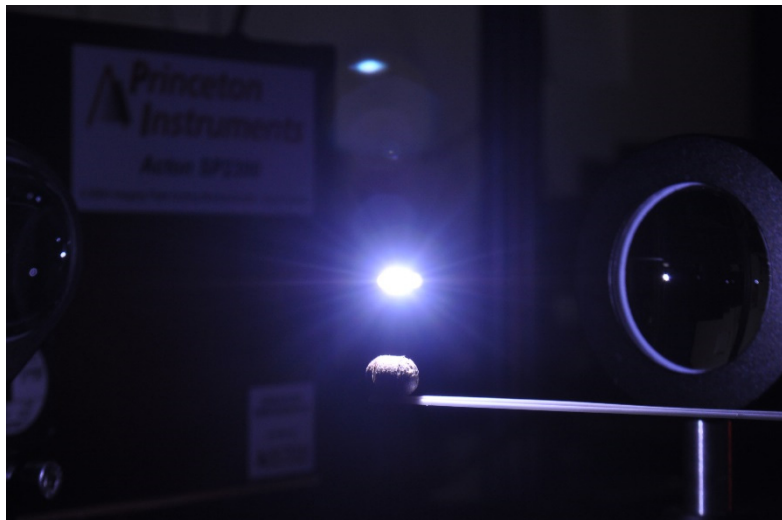
- 通过改变co-flow的当量比以及遮挡环高度，可实现高温环境的可调、可控。
- Na: 588.995 nm 和 589.592 nm
- K: 766.490 nm



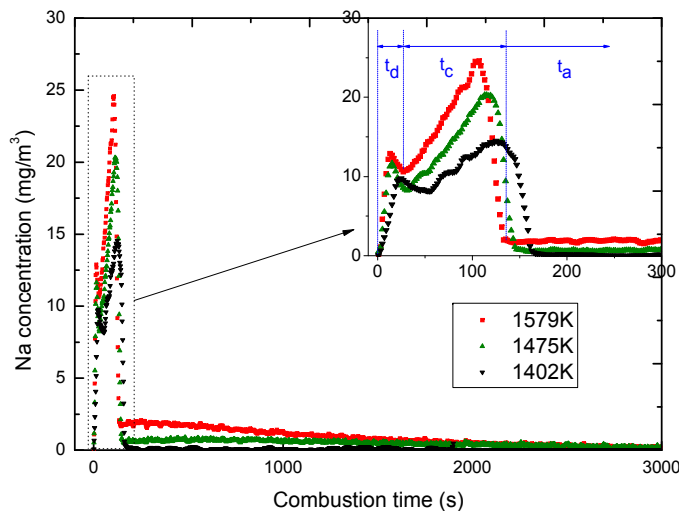
# 煤颗粒的燃烧及测量



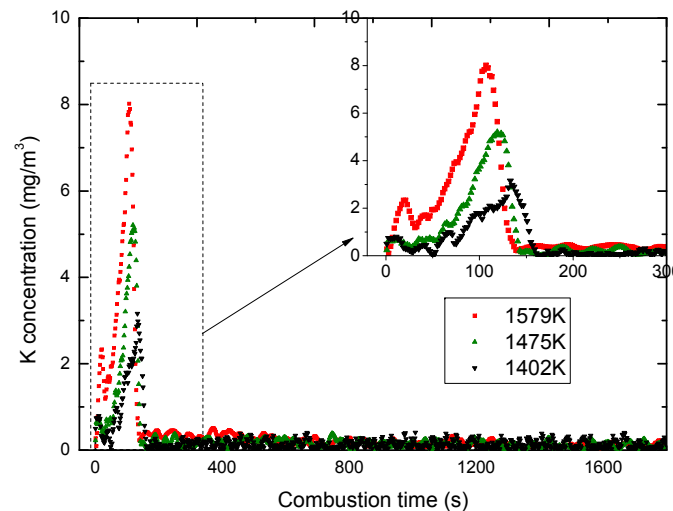
# 生物质颗粒燃烧及过程测量



# 温度对Na、K释放影响



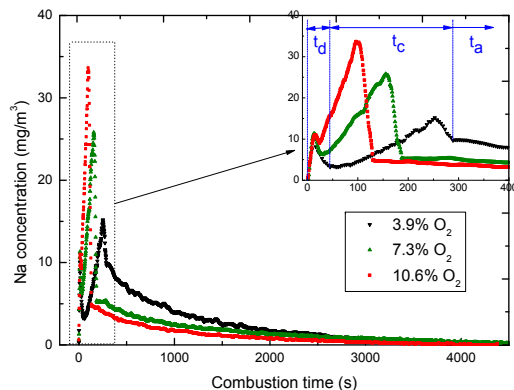
Na动态释放过程



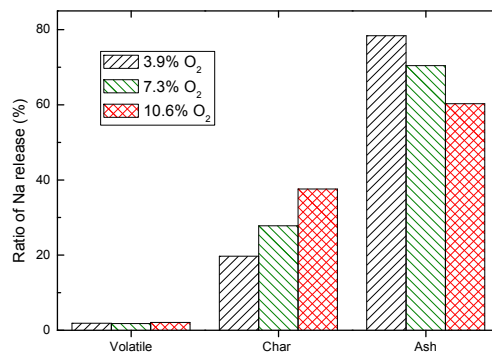
K动态释放过程

- 温度对挥发份阶段Na、K释放具有显著影响，温度越高，Na、K释放速率越快，峰值浓度明显增大。
- 温度升高促进焦炭阶段Na、K释放。原因是温度升高后焦炭燃烧速率加快，颗粒温度升高，使结合在焦炭内的Na，K释放速率相应增加。
- 灰分阶段碱金属释放速率随温度的升高同样增大。

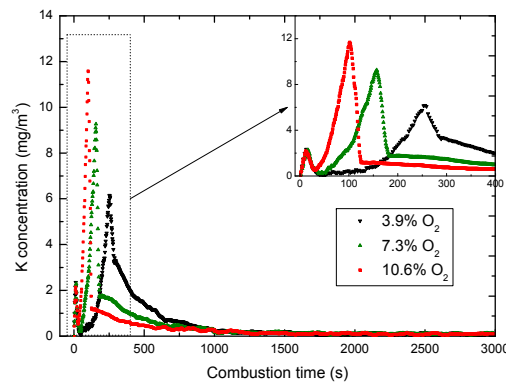
# O<sub>2</sub>浓度对Na、K释放影响



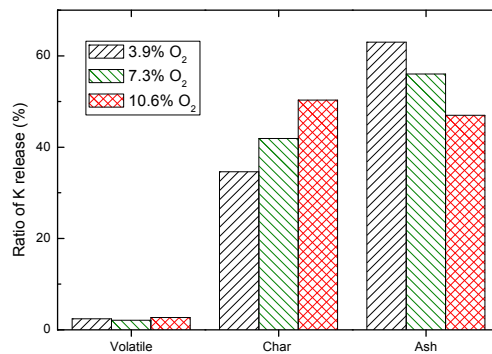
Na动态释放过程



Na各阶段相对释放比例



K动态释放过程



K各阶段相对释放比例

- O<sub>2</sub>浓度对挥发份阶段碱金属释放无显著影响。
- 焦炭燃烧阶段：O<sub>2</sub>含量高，焦炭燃烧速率加快，颗粒温度显著提高，导致Na、K释放速率明显加快。
- 灰分阶段释放比例高达50%以上。实际组织燃烧时应严格控制灰分在高温区的停留时间！

1. 气固燃料燃烧的研究难点
2. 等离子体火焰助燃定量测量
3. 固体燃料燃烧过程中碱金属动态释放特性测量
4. 未来可能的研究与合作方向

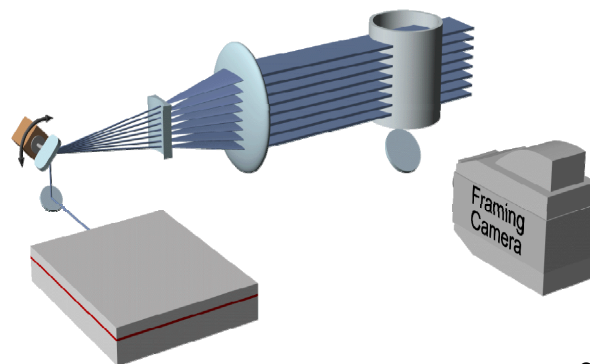
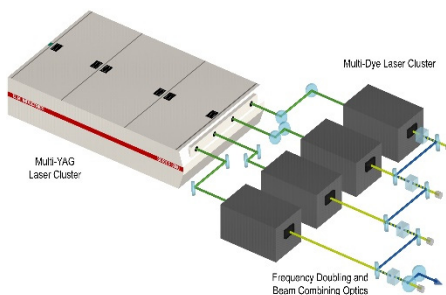
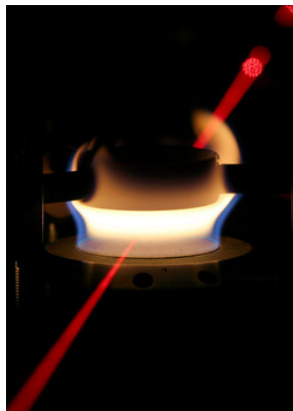
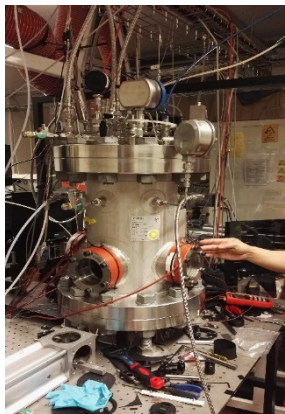


# 未来可能的研究与合作方向

## ➤ 气体燃料燃烧的激光诊断

- ✦ 高温、高压、超音速、超贫燃、低温无焰燃烧等极限条件下火焰结构、温度场、自由基分布、污染物生成等特性的激光诊断：
- ✦ **TLC**(Toward Lean Combustion), **LSWL**(Low Swirl Combustion), **Flameless/MILD**燃烧诊断...
- ✦ 等离子体与火焰相互作用机理**PAC**...
- ✦ 多组分的同时2D测量，比如**OH/CH/CH<sub>2</sub>O/CO**...
- ✦ 三维火焰**3D**结构在线测量，比如**Multi-YAG**...
- ✦ 超音速火焰结构测量...
- ✦ 高压条件下的燃烧特性及火焰结构测量...
- ✦ **Sooty** flame条件下的组分及温度测量...

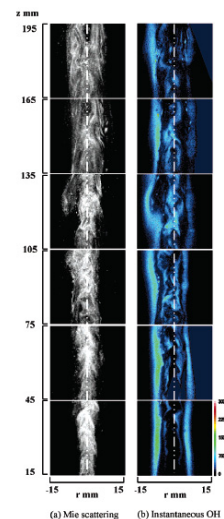
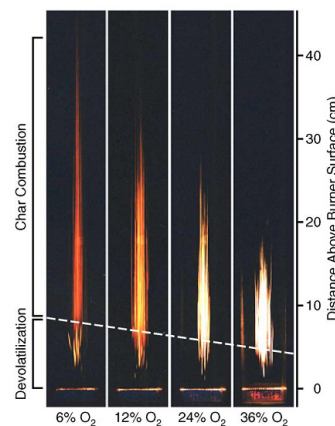
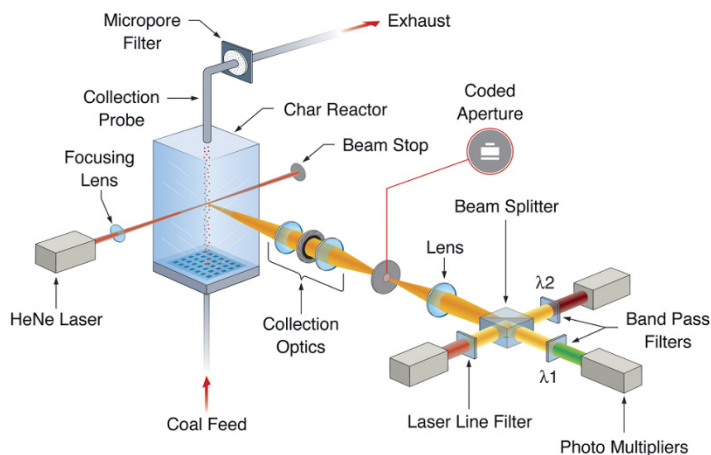
PLIF, TDLAS,  
Raman, LII, CARS,  
TLAF, Rayleigh  
PIV, LIBS,





## ➤ 固体燃料多相流动和燃烧过程测量

- ✦ 单颗煤粒的热解/燃烧/气化过程测量，包括：温度、粒径、挥发份组分、Soot、Na/K碱金属、Hg等其他重金属的在线测量，获取准确的燃烧反应动力学参数；
- ✦ 气固颗粒群燃烧过程测量，包括：火焰结构，OH自由基，气相温度场、组分场，颗粒相温度、速度、浓度、粒径，以及污染物生成测量；
- ✦ 试验测量与大规模DNS/LES模拟结果的对比验证。



# 谢谢大家

