



能源清洁利用国家重点实验室

<http://www.ceu.zju.edu.cn>

State Key Laboratory of Clean Energy Utilization

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



ZHEJIANG
UNIVERSITY

2015/9/22

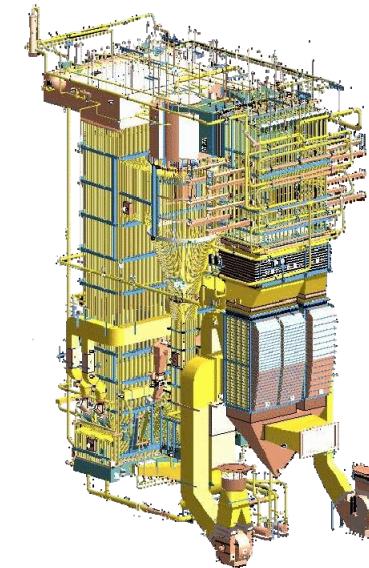
报告内容

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: $17.6m \times 17.6m \times 54m$;
- ◆ 1000MW尺寸: $32m \times 15.7m \times 66.4m$;
- ◆ 最高温度 $>1600^{\circ}\text{C}$;
- ◆ 气固两相湍流流动。

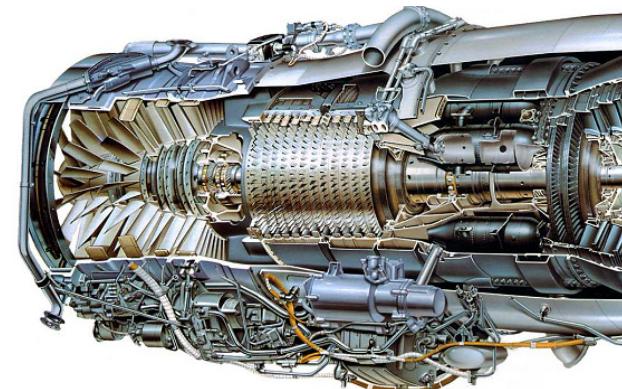


锅炉

➤ 现代气流床气化炉压力高、温度高

- ◆ 运行压力: $3.0\sim8.5\text{ MPa}$;
- ◆ 最高温度: $1300\sim1700^{\circ}\text{C}$;
- ◆ 液态排渣。

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

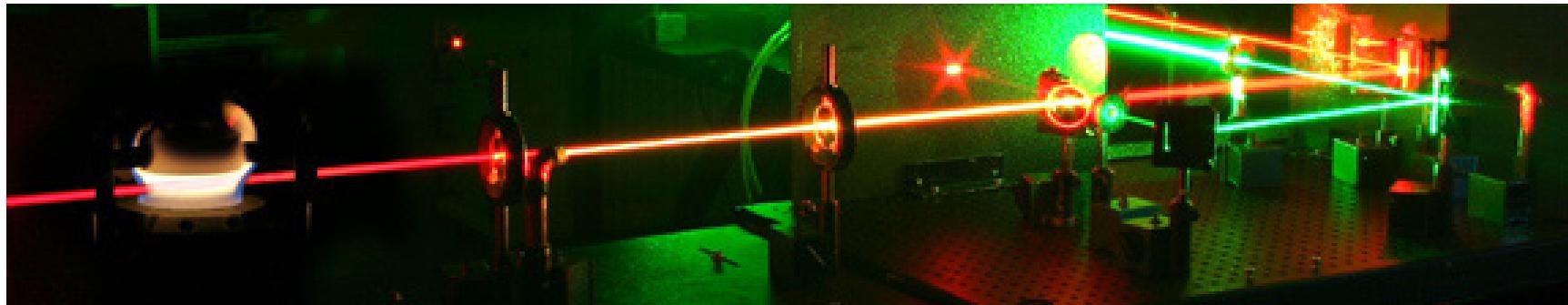
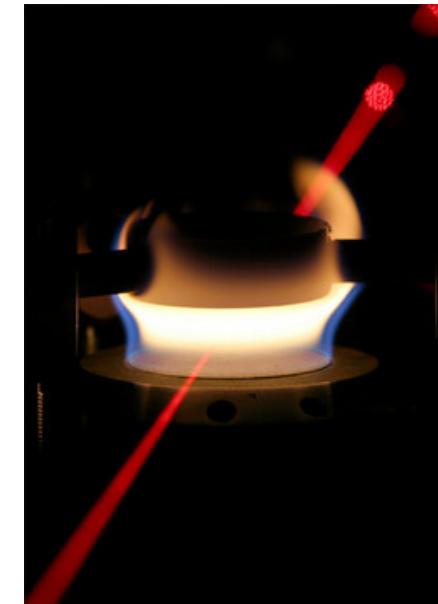


热电偶测温造成对火焰结构的干扰

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。



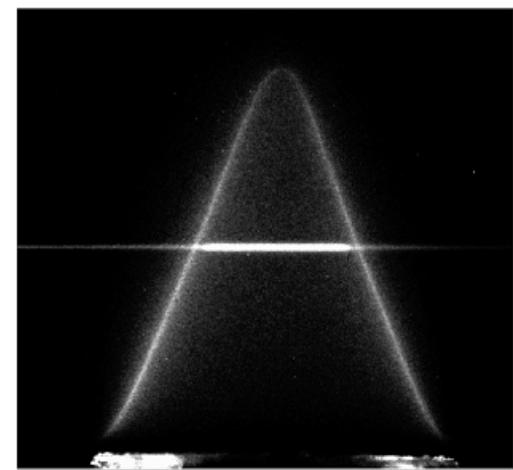
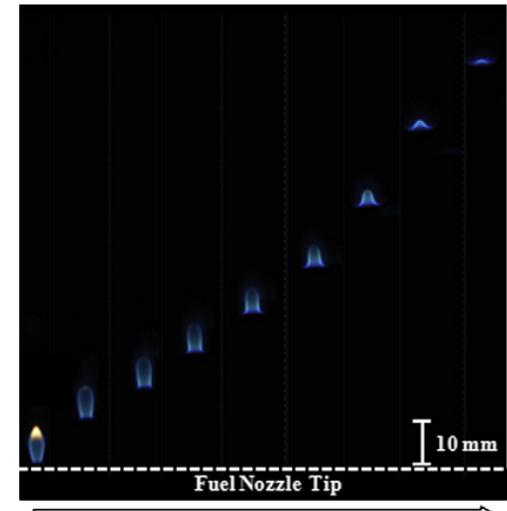
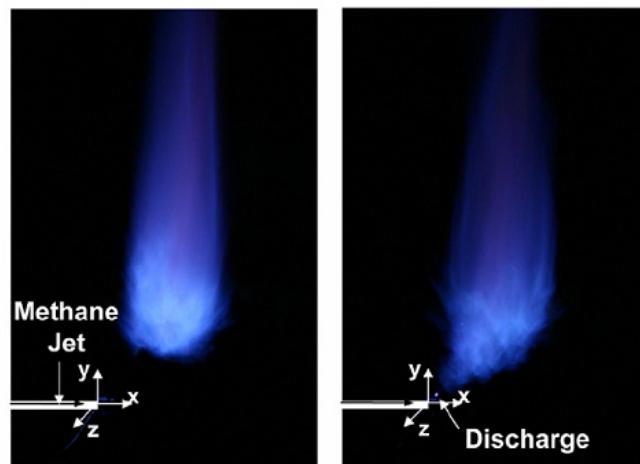
报告内容

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、O、OH、H、O₃、O₂* 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O₃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.

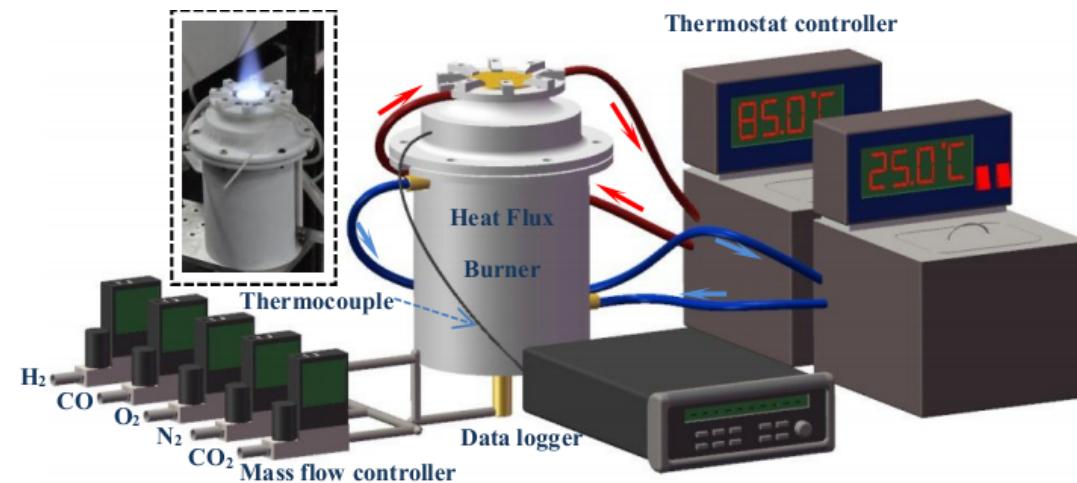
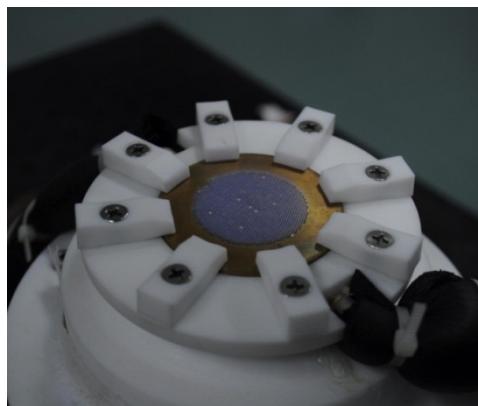
活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理

- 建立了Heat-flux热流量测量平台，直接测量了O₃加入前后的绝热层流火焰速度；
- 首次建立了16步活性分子O₃与O₂、O、N₂、H、OH、H₂O、HO₂、NO、CH₃等分子的相互反应机理。

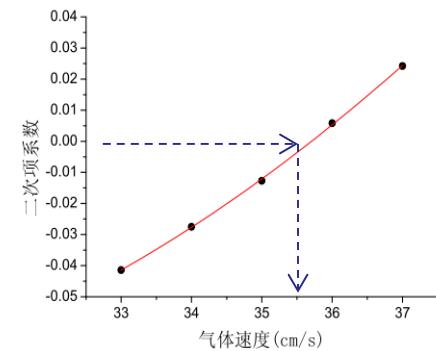
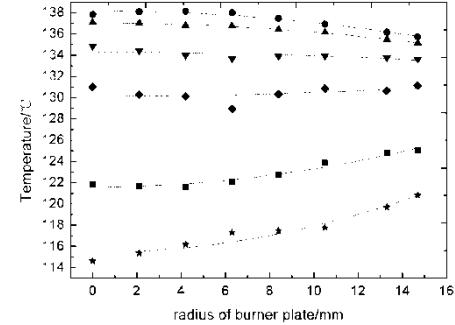
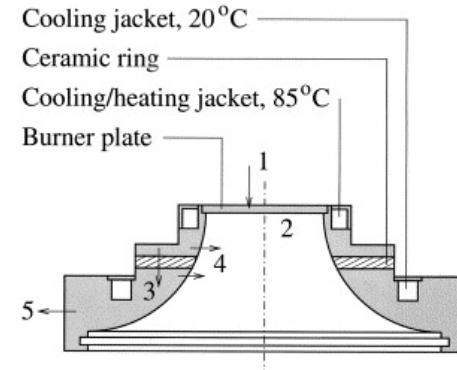
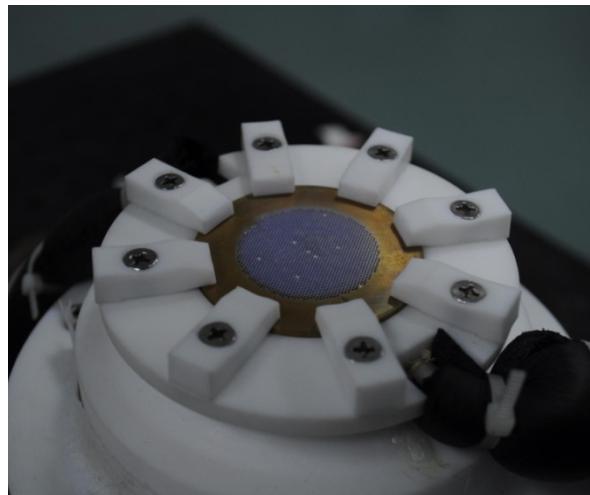
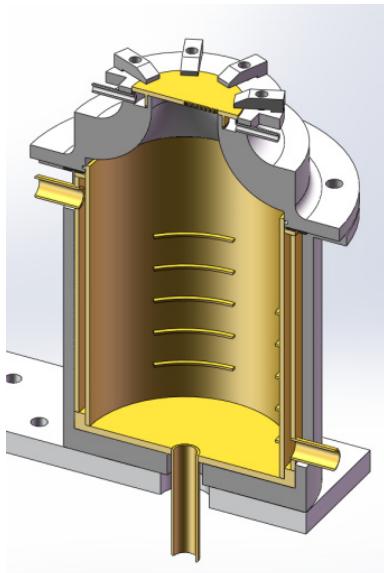
Table 1
Modified O₃ mechanism that can be supplemented to GRI-Mech 3.0.^a

NO.	Reaction	A	n	E
1	O ₃ + O ₂ → O ₂ + O + O ₂	1.54E+14	0	23,064
2	O ₂ + O + O ₂ → O ₃ + O ₂	3.26E+19	-2.1	0
3	O ₃ + N ₂ → O ₂ + O + N ₂	4.00E+14	0	22,667
4	O ₂ + O + N ₂ → O ₃ + N ₂	1.60E+14	-0.4	-1391
5	O ₃ + O → O ₂ + O + O	2.48E+15	0	22,727
6	O ₂ + O + O ⇌ O ₃ + O	2.28E+15	-0.5	-1391
7	O ₃ + O ₃ → O ₂ + O + O ₃	4.40E+14	0	23,064
8	O ₂ + O + O ₃ → O ₃ + O ₃	1.67E+15	-0.5	-1391
9	O ₃ + H ⇌ O ₂ + OH	8.43E+13	0	934
10	O ₃ + H ⇌ O + HO ₂	4.52E+11	0	0
11	O ₃ + OH ⇌ O ₂ + HO ₂	1.85E+11	0	831
12	O ₃ + H ₂ O ⇌ O ₂ + H ₂ O ₂	6.62E+01	0	0
13	O ₃ + HO ₂ ⇌ OH + O ₂ + O ₂	6.62E+09	0	994
14	O ₃ + O ⇌ O ₂ + O ₂	4.82E+12	0	4094
15	O ₃ + NO ⇌ O ₂ + NO ₂	8.43E+11	0	2603
16	O ₃ + CH ₃ ⇌ CH ₃ O + O ₂	5.83E+10	0	0

^a Expressed as $k = AT^n \exp(-E/RT)$ (cal, cm³, mol, s).

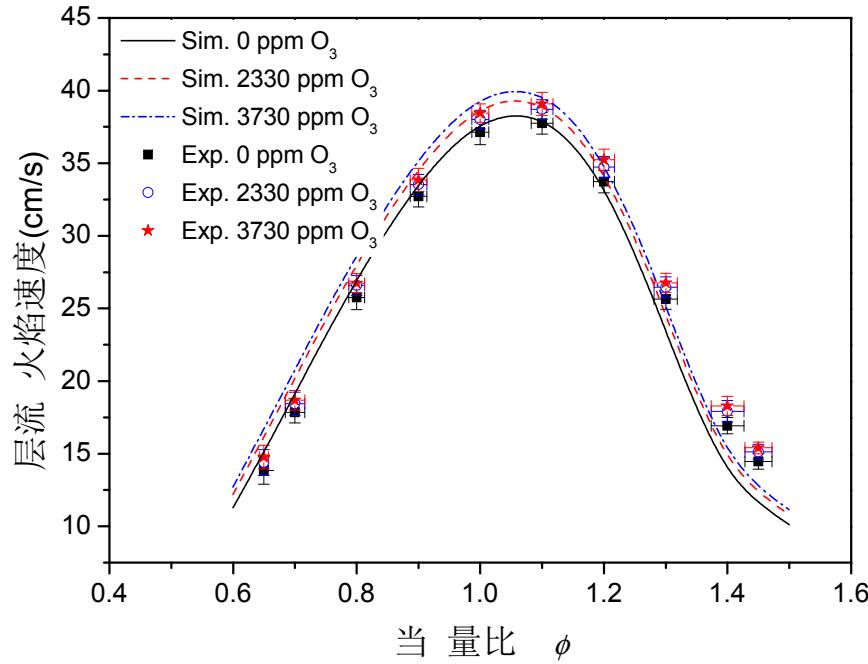


Heat Flux热流量法火焰速度测量

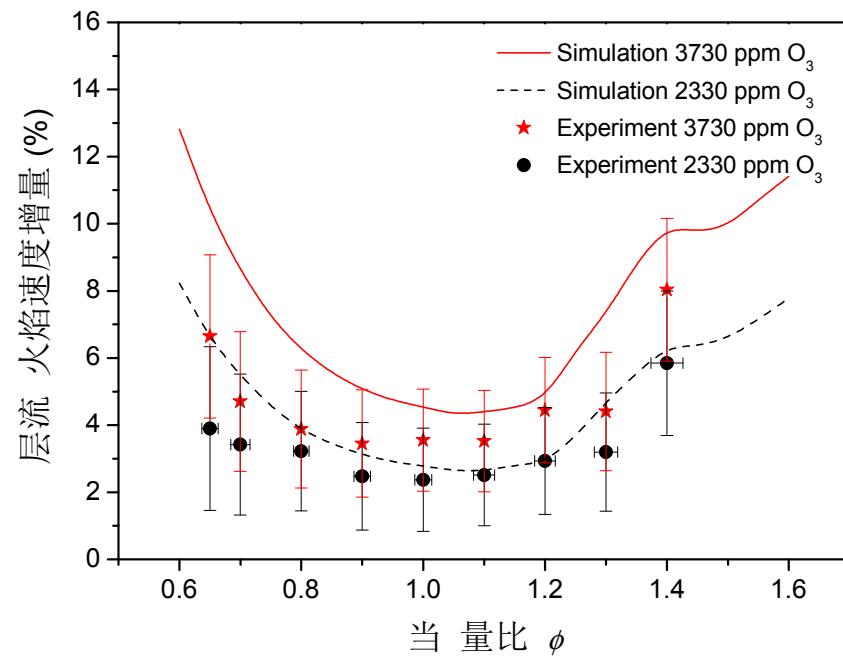


- Heat-flux热流量方法是近年来新发展起来的火焰速度精确测量方法之一；
- 在多孔炉盘表面形成稳定的一维平面火焰；
- 由外部热量补偿火焰在炉盘片稳定所散热量；
- 当给气速度与火焰速度匹配时，炉盘片温度均匀一致；
- 通过拟合测量不同送气条件下的盘片温度分布，得出温度均匀时的送气速度，获取精确的燃烧速度。

活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理



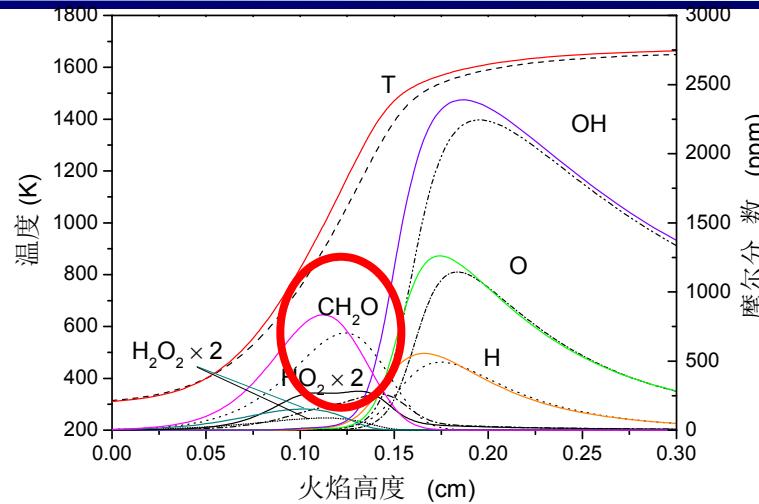
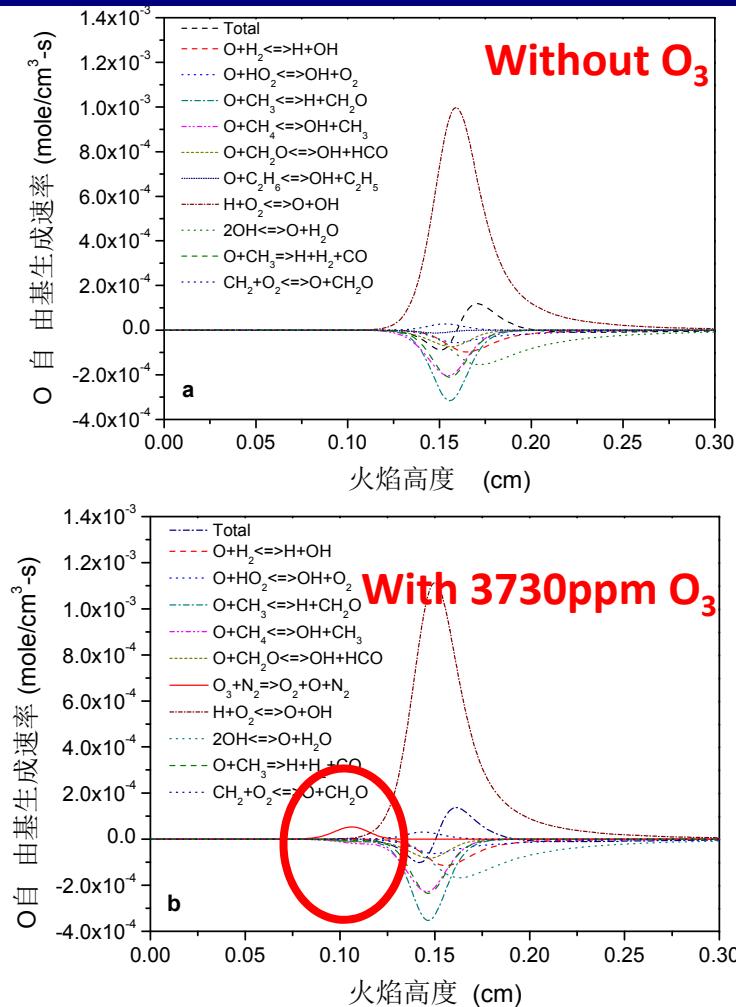
不同O₃浓度下CH₄火焰速度



不同O₃浓度下的火焰速度增量

- ◆ 率先定量测量了活性分子O₃对CH₄/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O₃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



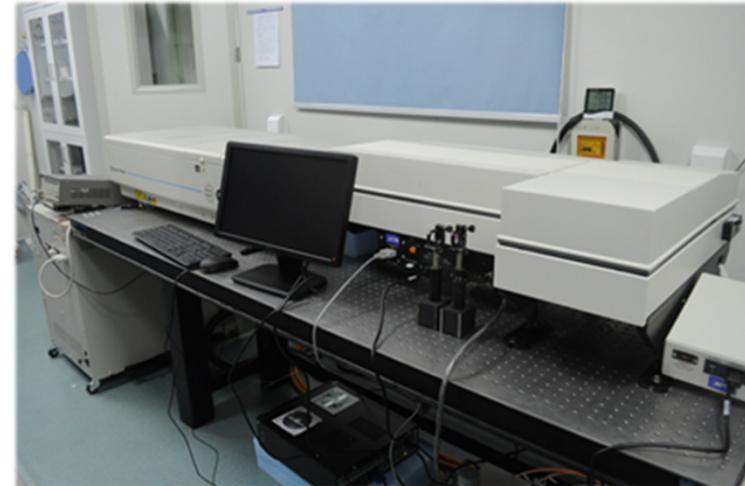
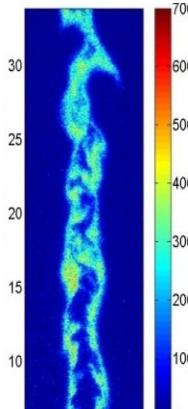
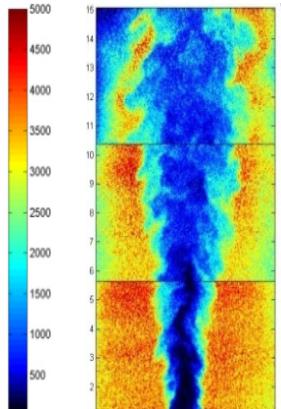
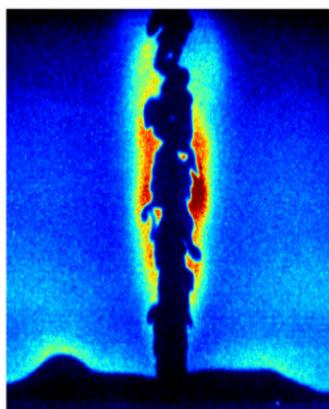
- ◆ 发现O₃促进了预热区O自由基大量生成，有利于整个燃烧链式反应的启动和加速；
- ◆ 燃烧初期CH₂O分子显著增多，可提高热释放速率，促进火焰的燃烧。

提高了O₃与CH₄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..

活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理

各种自由基所需激发波长：

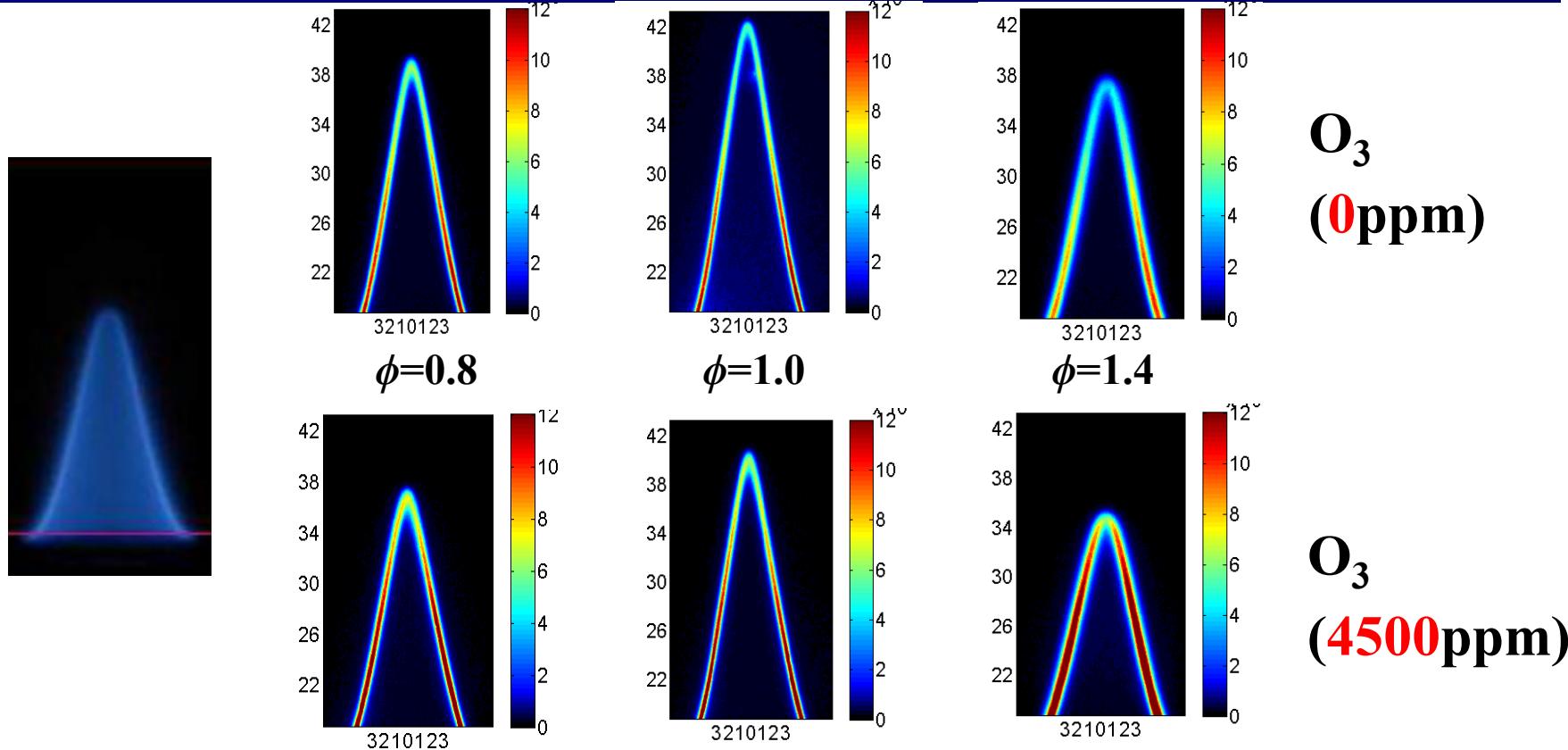
分子	OH	C ₂	CH	CN	NH	NO	CH ₂ O	CO	NO ₂
激发波长 (nm)	283	516	431	388	336	226	320-360	460	450-470



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, CH₂O)

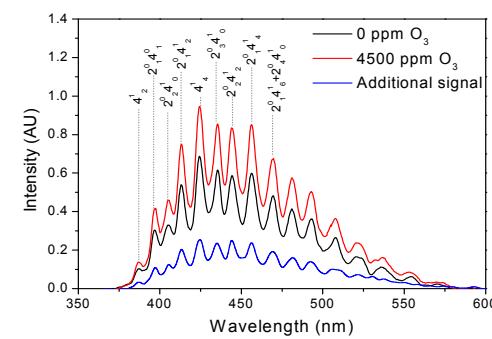
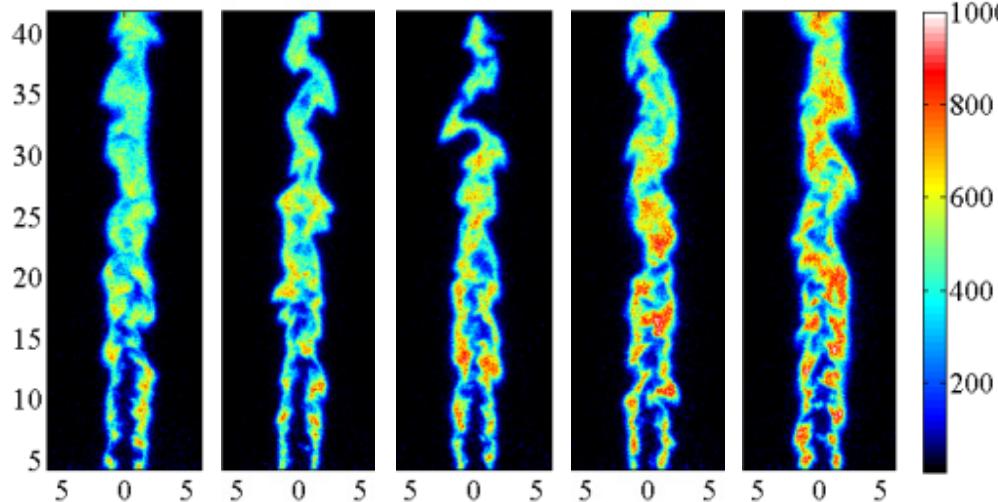
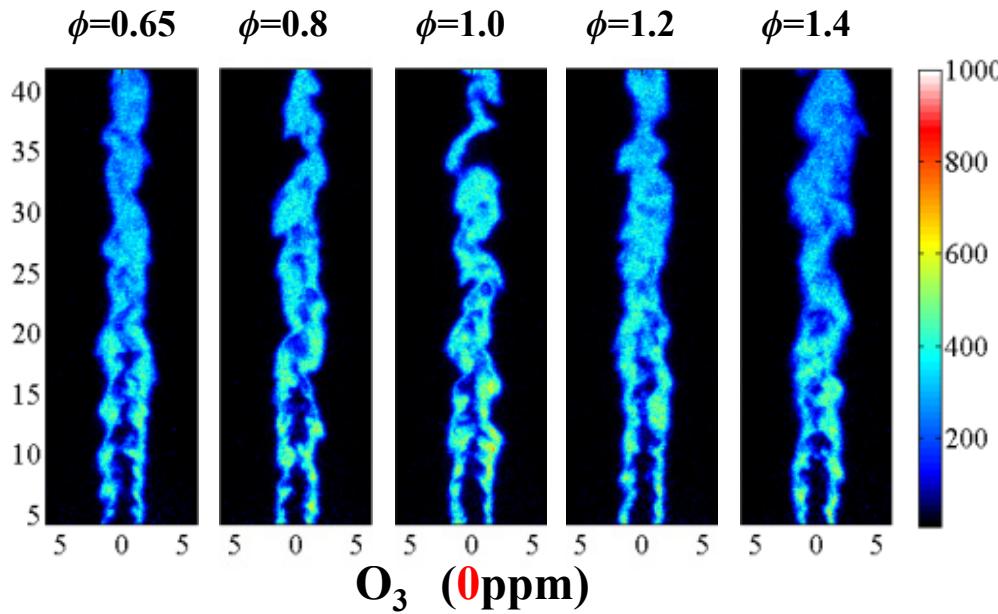
- ◆ 实验室已建成高能量平面激光诱导荧光PLIF试验平台
- ◆ 可实现CH₂O、OH、NO、NO₂等实时在线二维测量

活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理



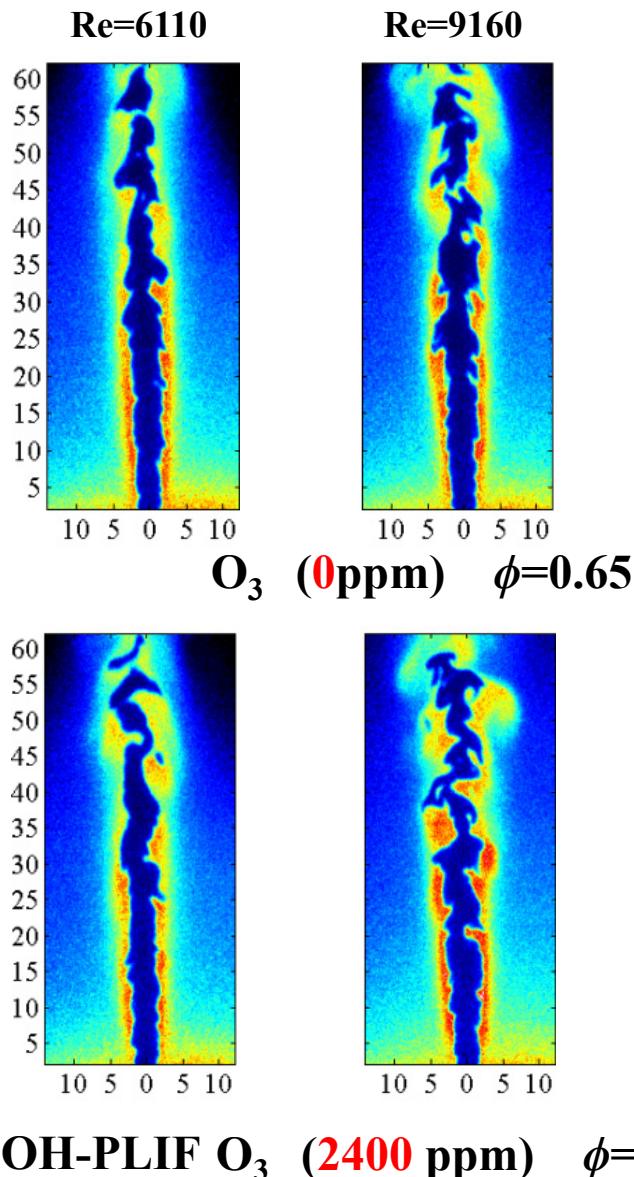
- ◆ 火焰中 CH_2O 中间产物浓度增加了15%-60%；
- ◆ 在当量比1.4的工况下 CH_2O -PLIF信号的增量最大，与前述 O_3 对火焰燃烧的强化规律一致。

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_2O 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_2O 浓度增量更明显。

活性分子与火焰燃烧的反应动力学机理



- ◆ 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_3 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。

报告内容

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利用；
- 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

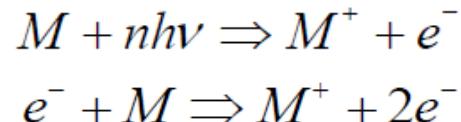
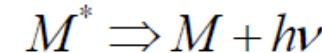
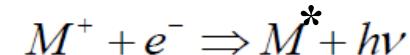
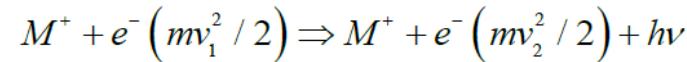
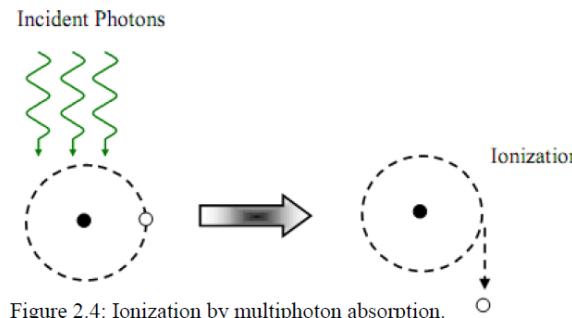
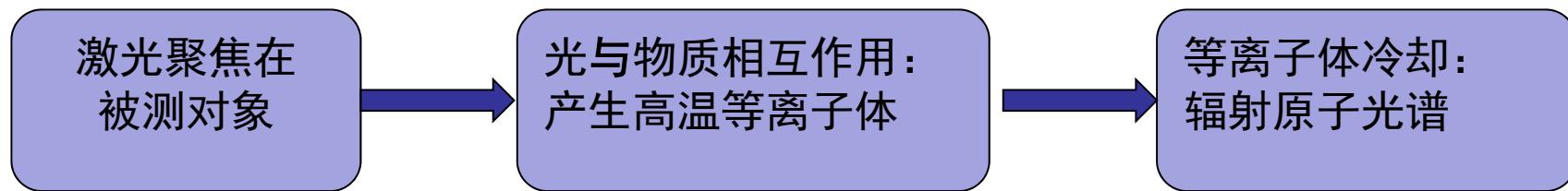


生物质锅炉的碱金属腐蚀积灰问题

煤种	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
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

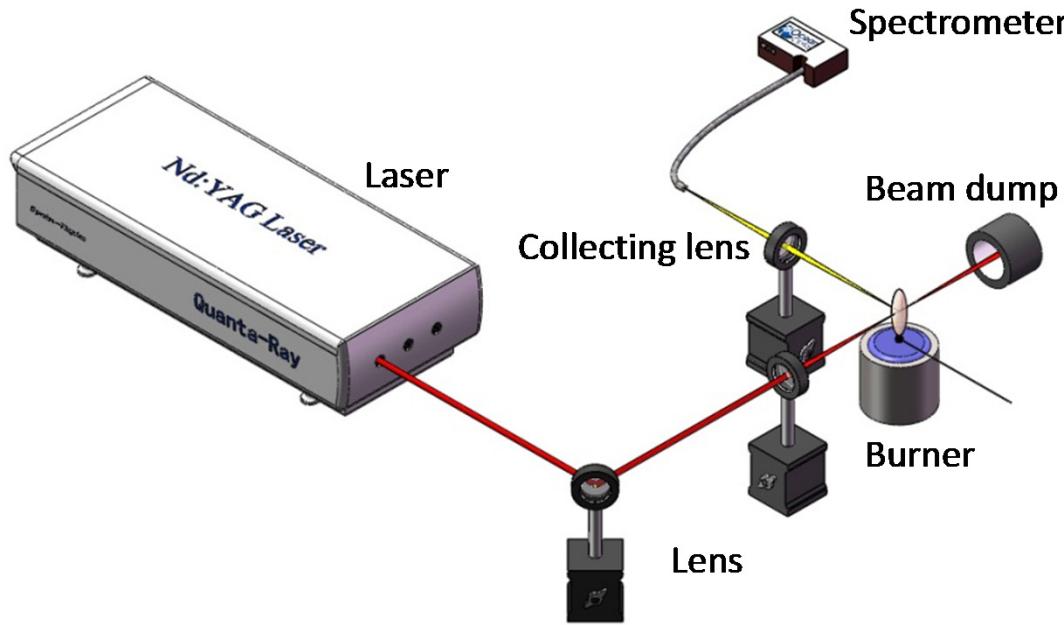
LIBS技术原理

- 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。



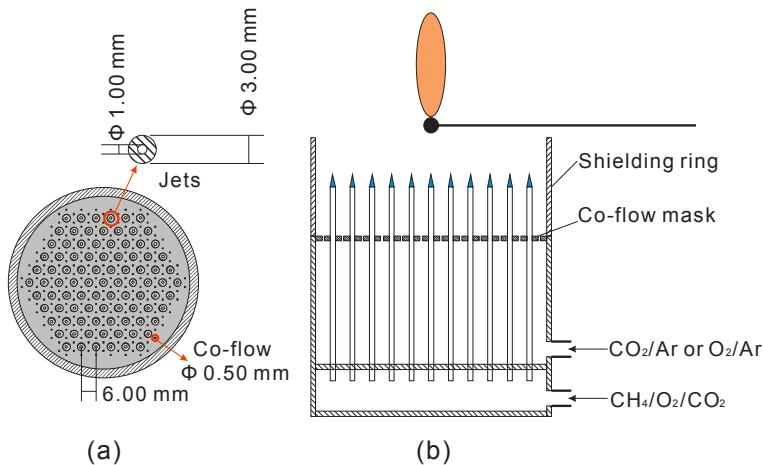
I_{LIBS}=C*n_s

LIBS测量系统

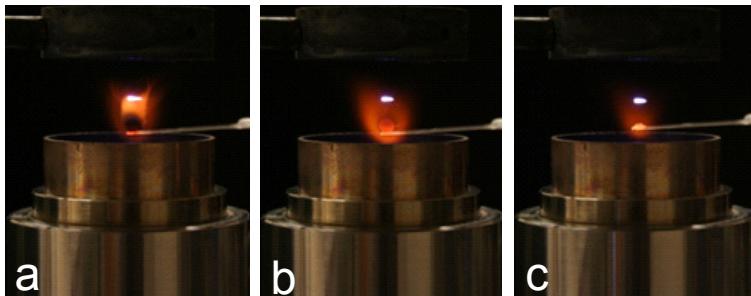


- 激光器：YAG激光，10Hz，~8ns脉宽，最大输出能量1600mJ@1064nm
- 聚焦透镜：f=200 mm, D=50 mm
- 收集透镜：f=100 mm, D=125mm
- 光仪：海洋光学 USB2000，光谱范围200–800nm，光谱分辨率0.3nm

准东煤颗粒燃烧过程测量

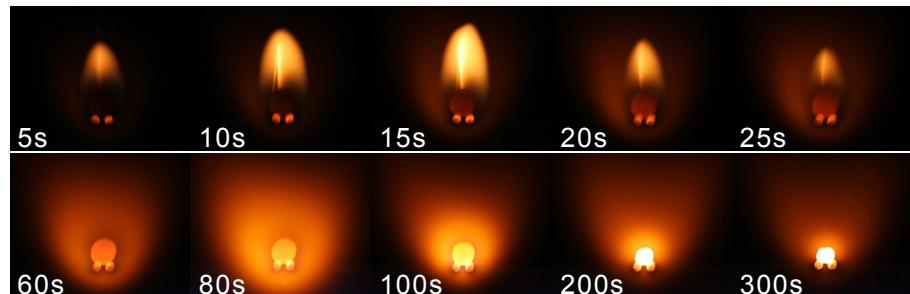


Multi-jet burner



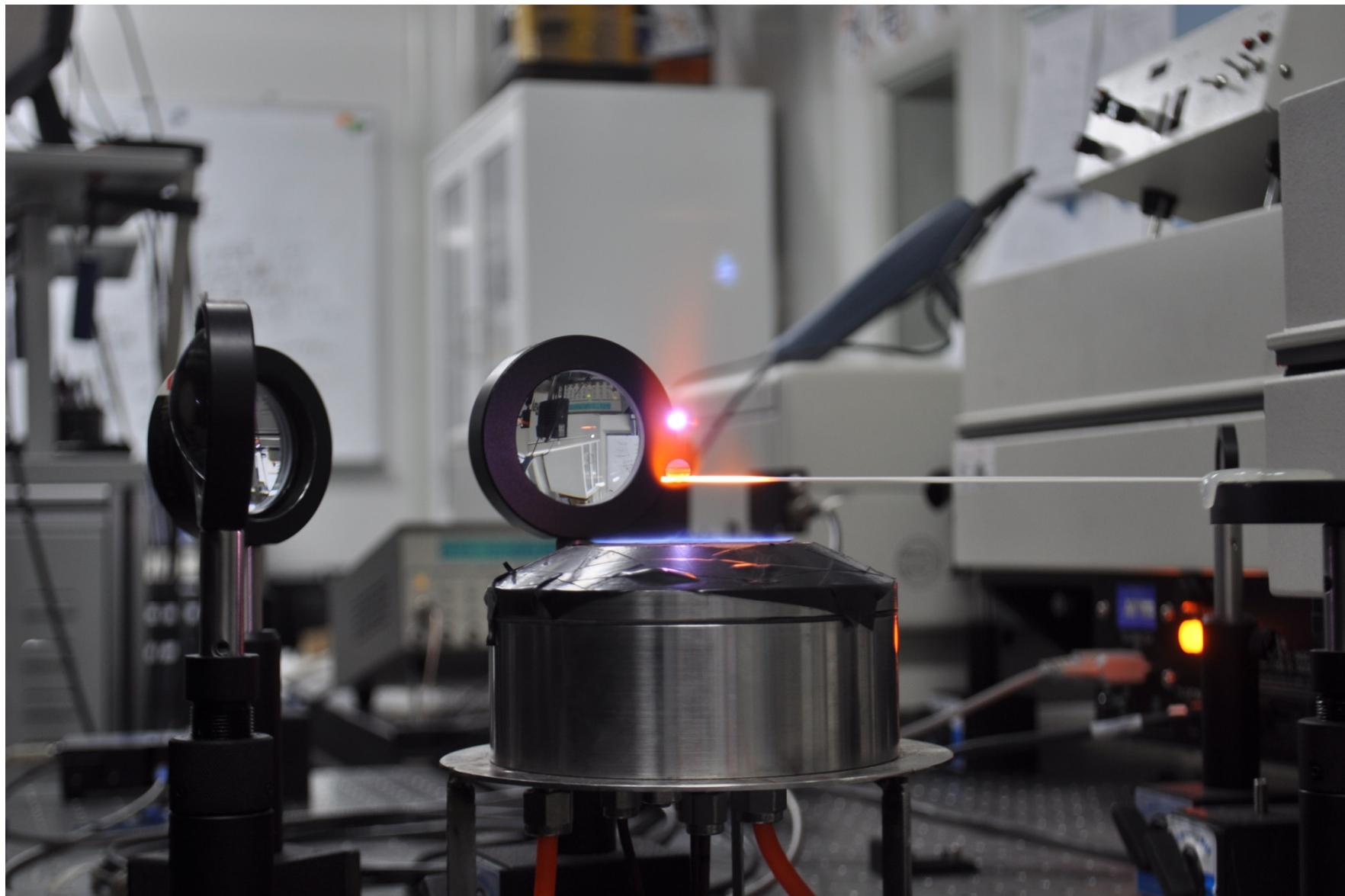
不同燃烧阶段的LIBS测量

准东煤燃烧过程

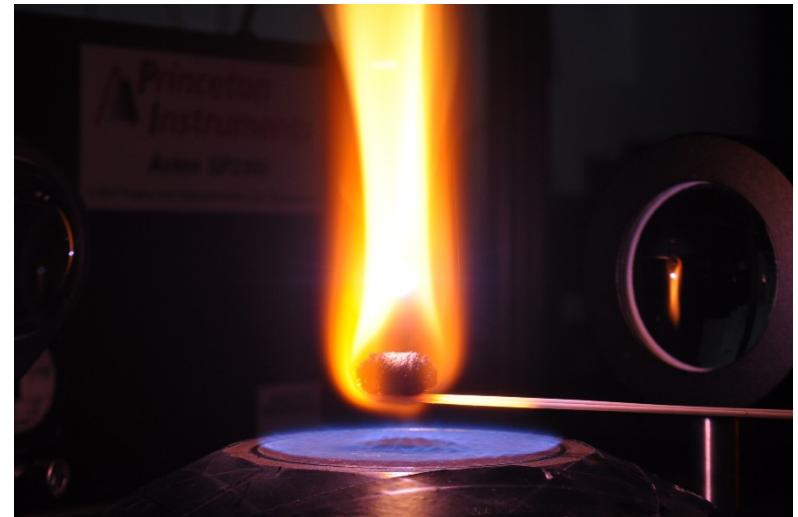
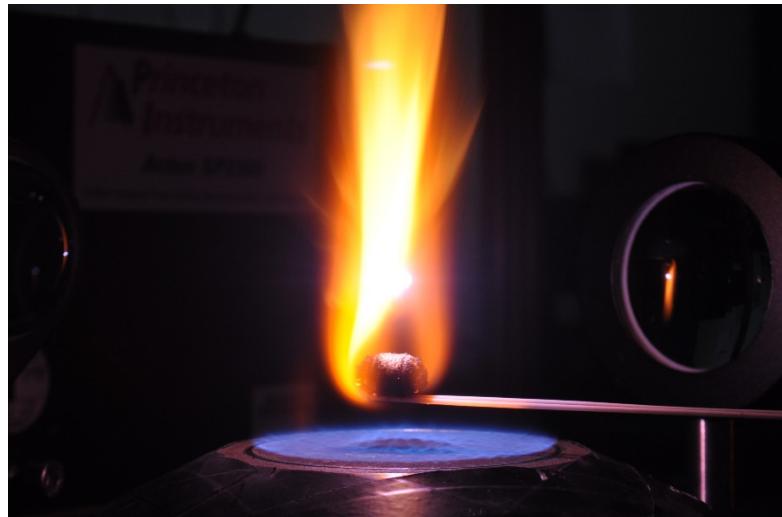
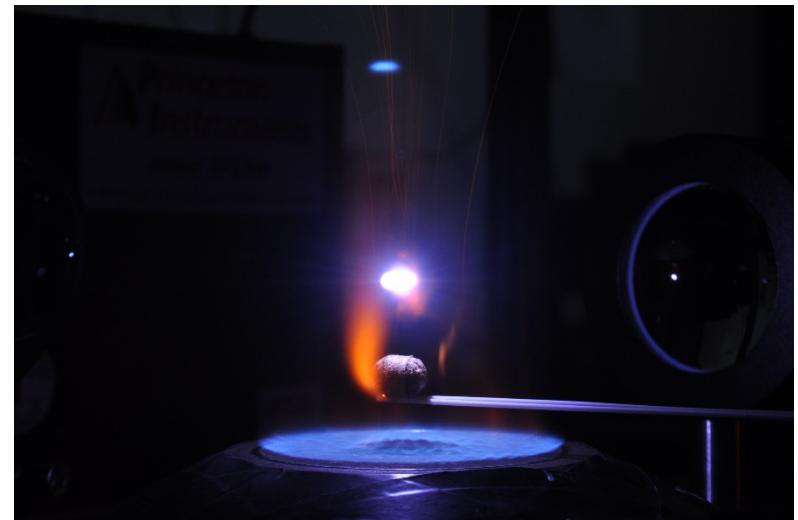
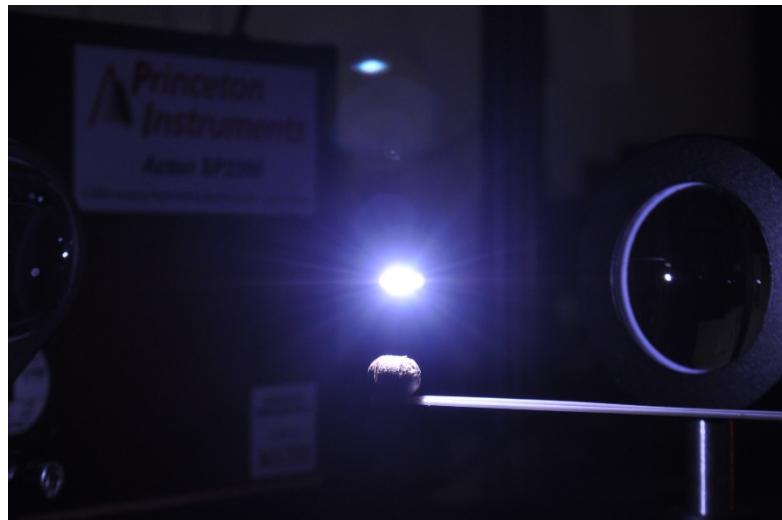


- 通过改变co-flow的当量比以及遮挡环高度，可实现高温环境的可调、可控。
- Na: 588.995 nm 和 589.592 nm
- K: 766.490 nm

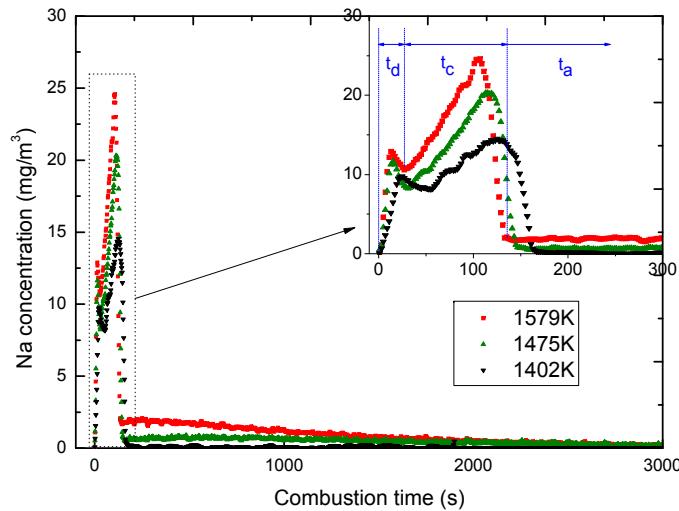
煤颗粒的燃烧及测量



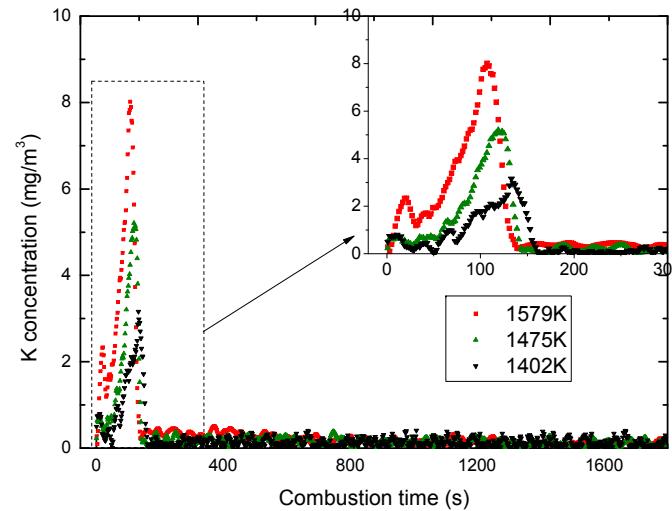
生物质颗粒燃烧及过程测量



温度对Na、K释放影响



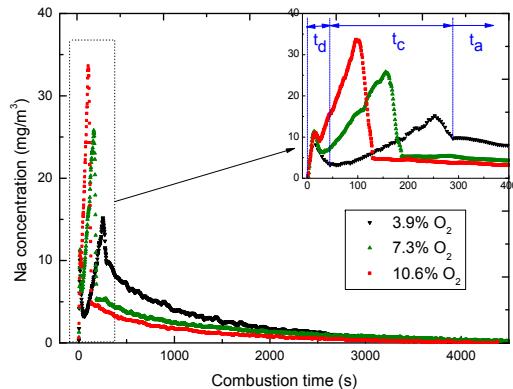
Na动态释放过程



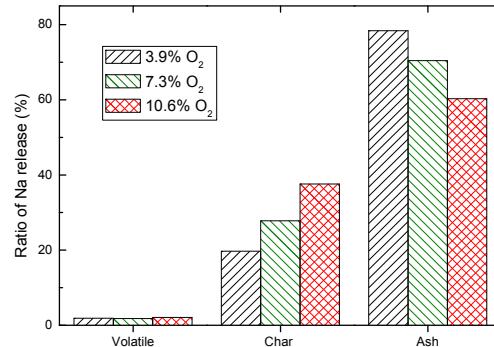
K动态释放过程

- 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。

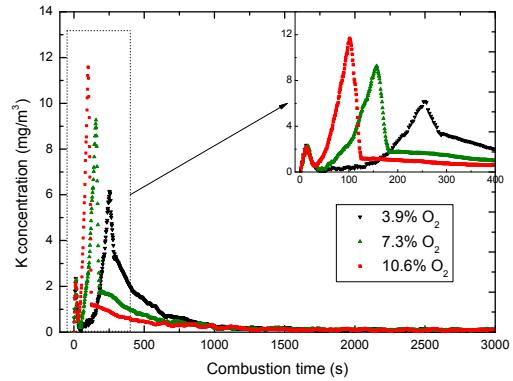
O₂浓度对Na、K释放影响



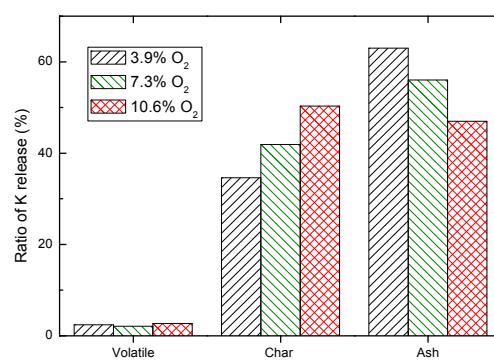
Na动态释放过程



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

- O₂浓度对挥发份阶段碱金属释放无显著影响。
- 焦炭燃烧阶段：O₂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！

报告内容

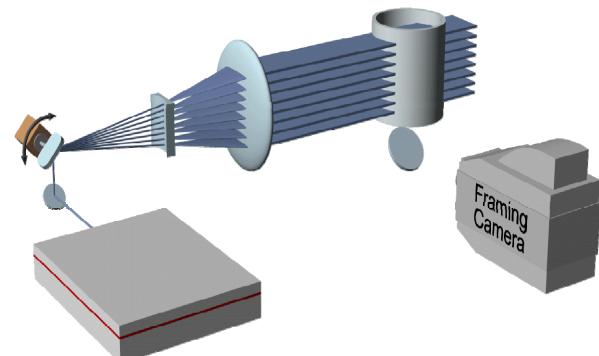
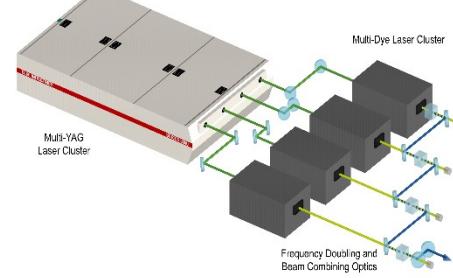
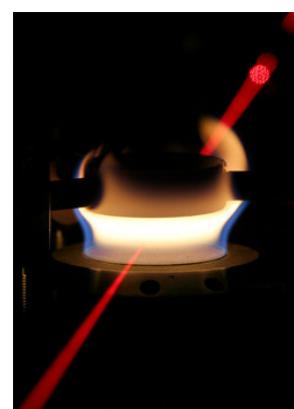
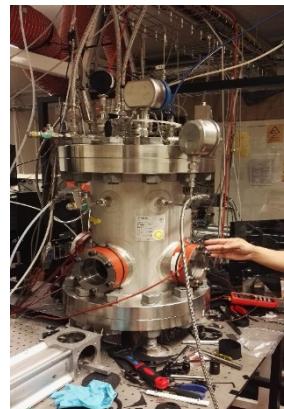
1. 气固燃料燃烧的研究难点
2. 等离子体火焰助燃定量测量
3. 固体燃料燃烧过程中碱金属动态释放特性测量
4. 未来可能的研究与合作方向

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/CH₂O/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...

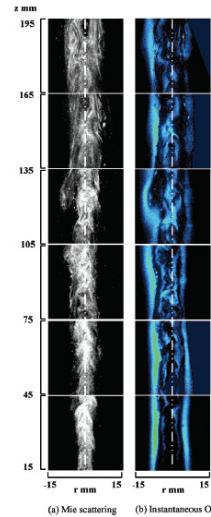
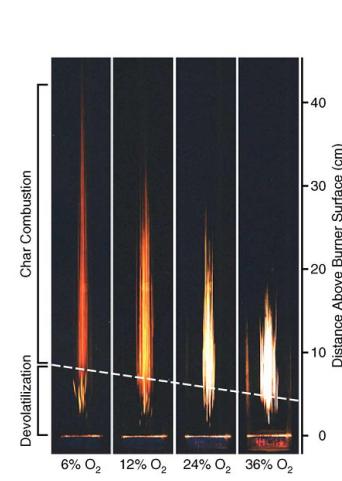
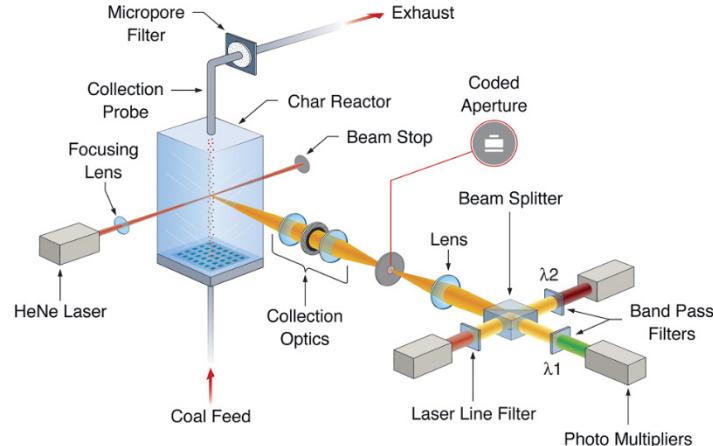
PLIF, TDLAS,
Raman, LII, CARS,
TLAF, Rayleigh
PIV, LIBS,



未来可能的研究与合作方向

➤ 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

