

# 第一届全国青年燃烧学术论坛

---

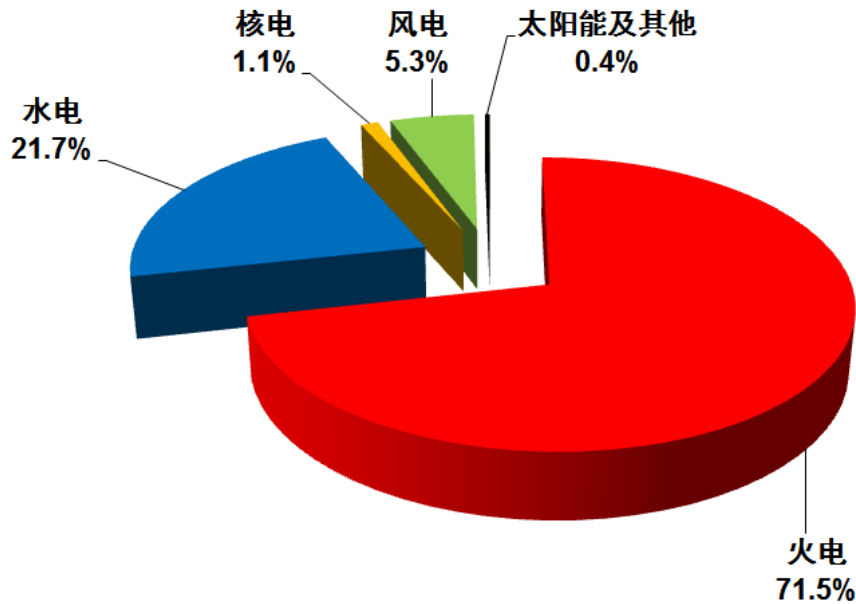
## 煤燃烧：传统和革新

赵海波

华中科技大学煤燃烧国家重点实验室

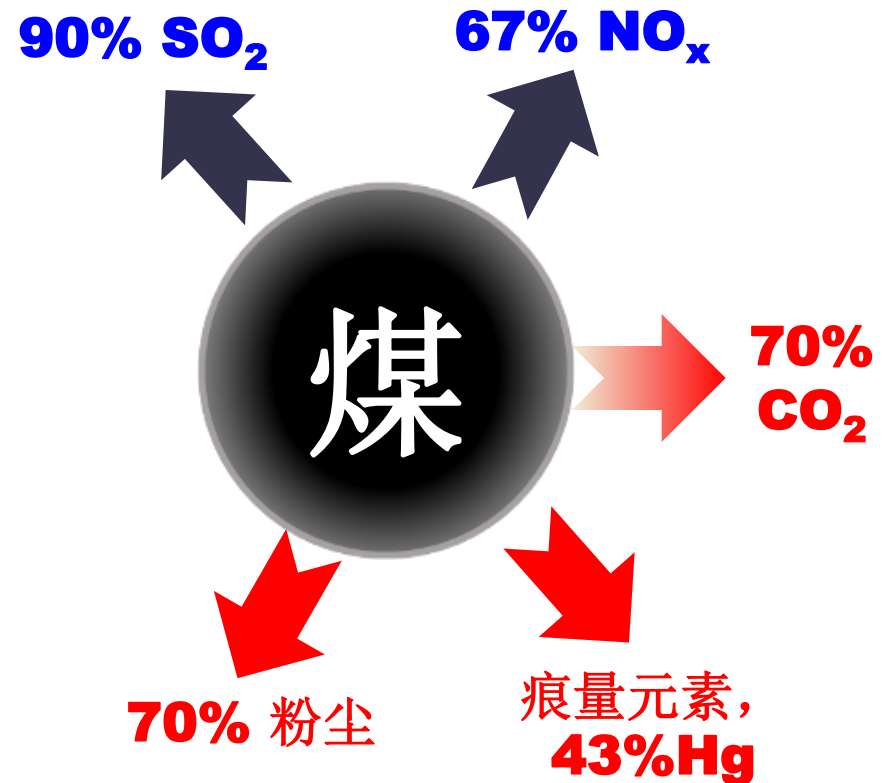
2015年9月19日

# 煤燃烧的挑战



我国发电量比例(统计年鉴2014)

**煤燃烧的挑战**  
**高效、清洁、低碳**



*Chen et al. (2010), Energy Policy*

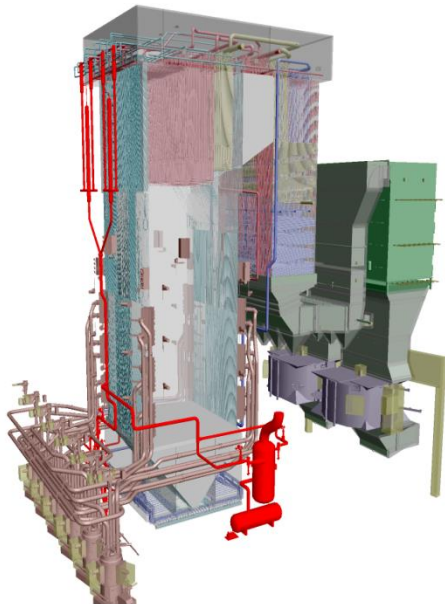
*Streets et al. (2005), Atmospheric Environment*

*Wu et al. (2006), Environ Sci Technol*

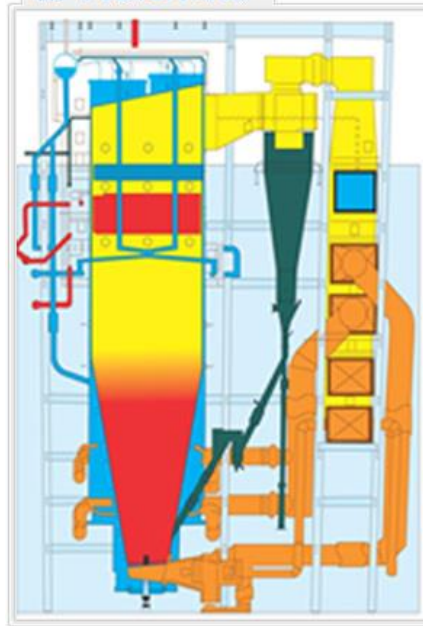
# 燃煤系统的效率

	燃烧效率	锅炉效率	系统效率
煤粉炉	>99%	~92%	~47.9%
循环流化床	~99%	~92%	~43%
工业炉	~85-90%	~65%	-

煤粉锅炉



循环流化床锅炉



工业锅炉



# 燃煤系统效率分析

	定义及相关
燃烧效率	=燃烧实际放热量/完全燃烧发热量
锅炉效率	=有效利用热量/燃料发热量=1- $\sum q_i$
系统效率	=输出电能或热能/燃料发热量

- ❖ 系统效率损耗在**剧烈燃烧过程**和**大换热温差**的**火用损**
- ❖ 锅炉效率损失包括气体和固体**不完全燃烧热损失**
- ❖ **高效燃烧的核心在于减少火用损和不完全燃烧**

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) h(P)$$

转化率 \swarrow  
时间 \nearrow

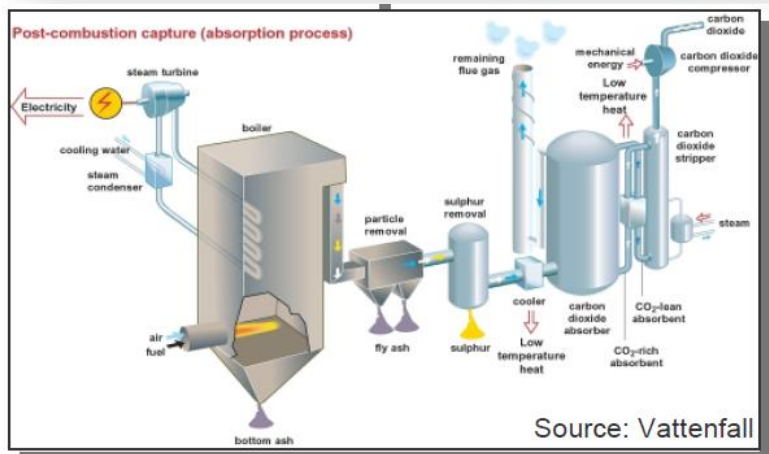
压力/分压 \swarrow  
温度 \nearrow

反应模型(内外扩散相关)

# 燃煤污染物(包括CO<sub>2</sub>)控制

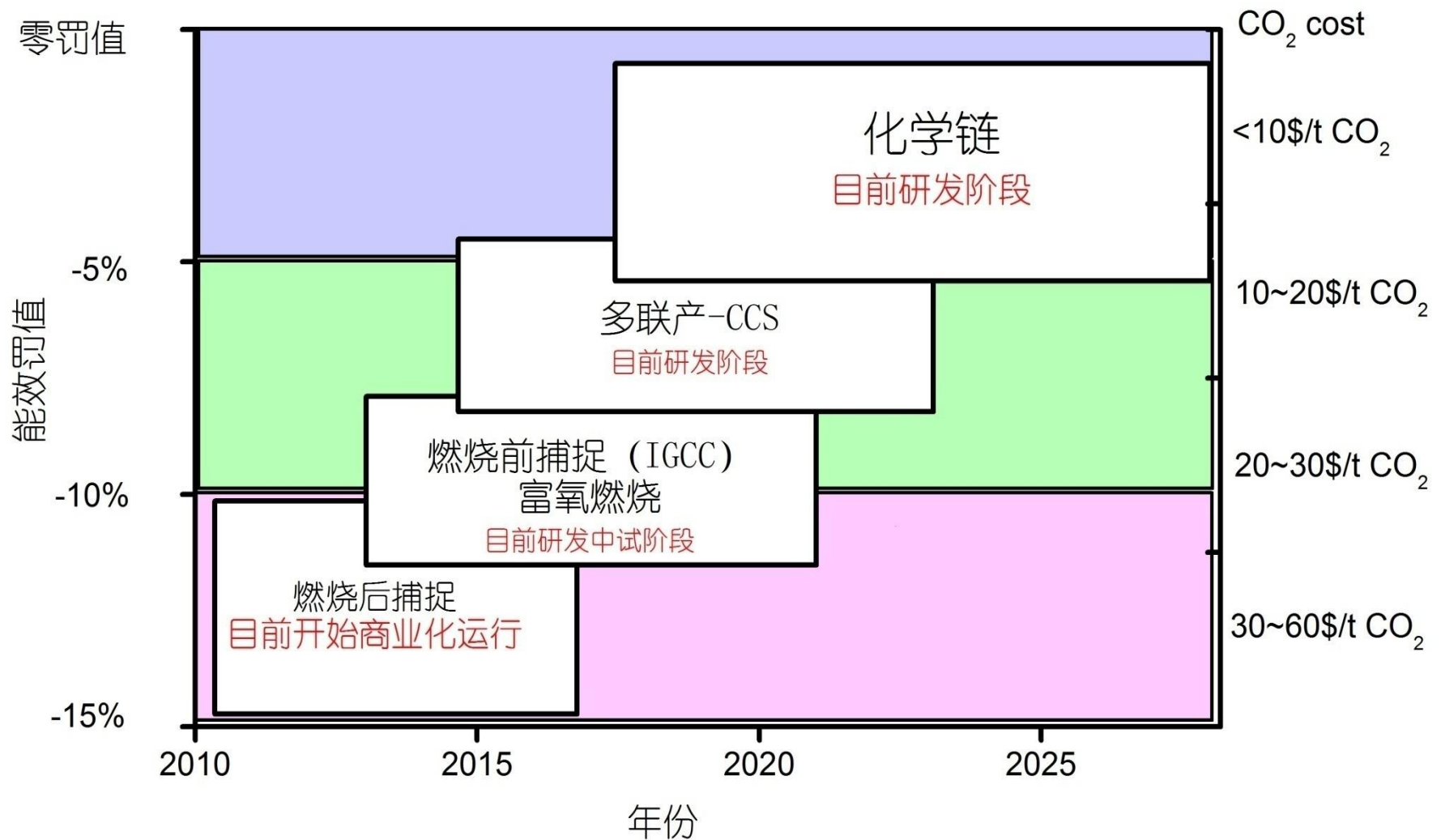


常规污染物传统方法：  
燃烧+尾气处理  
(先污染后治理)



CO<sub>2</sub>富集(燃烧后):  
巨大的能效罚值  
昂贵的经济成本  
庞大的吸收装置

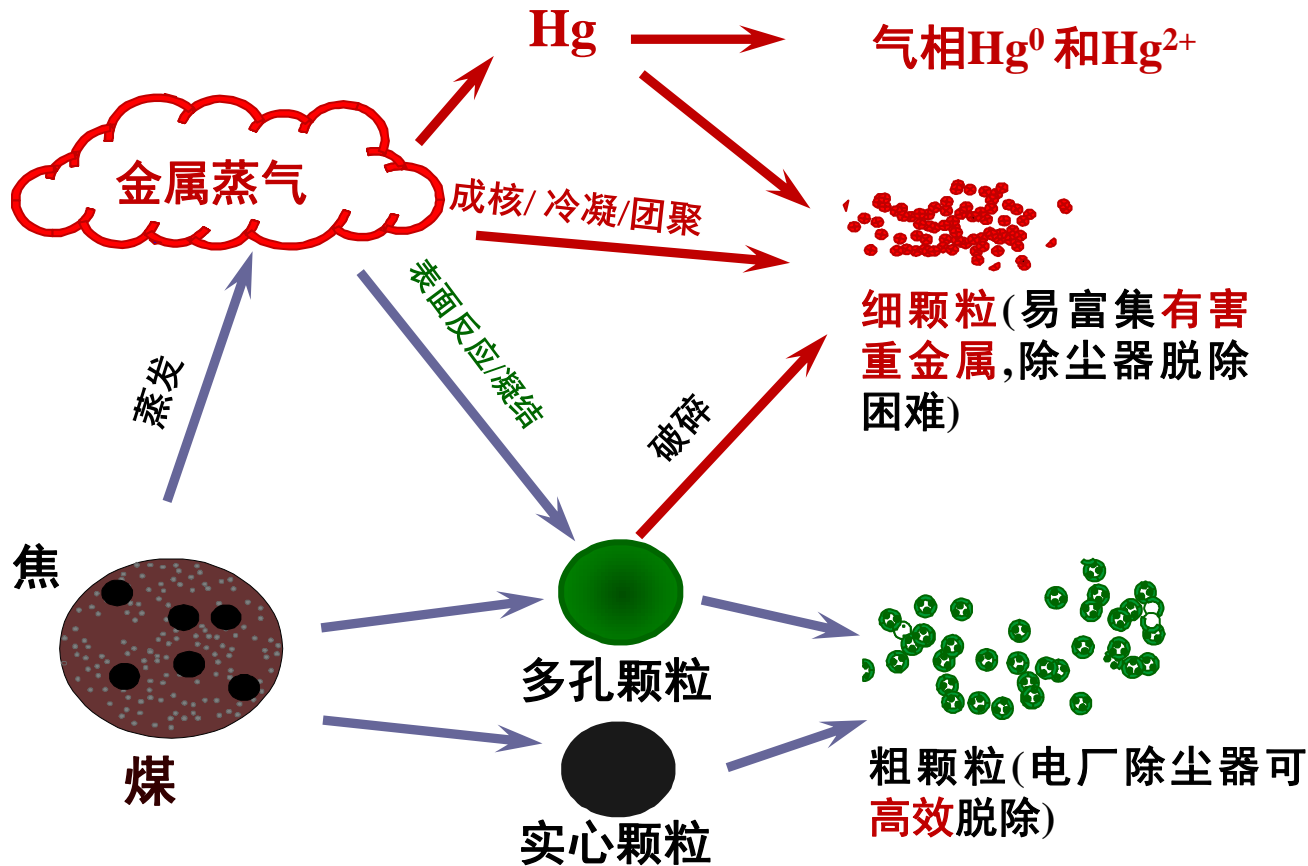
# 碳捕集技术的能耗和成本



多篇文献: Ishida M, Zheng D, Akehata T. Energy, 1987, 12, 147-154, Wall T F. P Combust Inst, 31(2007):31; IPCC, CCS special reports, 2008, Jing H. 2011, Nantong;

# 污染物控制的核心：介入燃烧本身

❖ 污染物**生成机理**→赋存形态、迁移规律、控制方法



燃煤细颗粒物生成、生长和演变



# 燃烧是解决能源与环境问题的关键

能量



CO<sub>2</sub>

常规污染物



化学能梯级利用



污染物有序控制



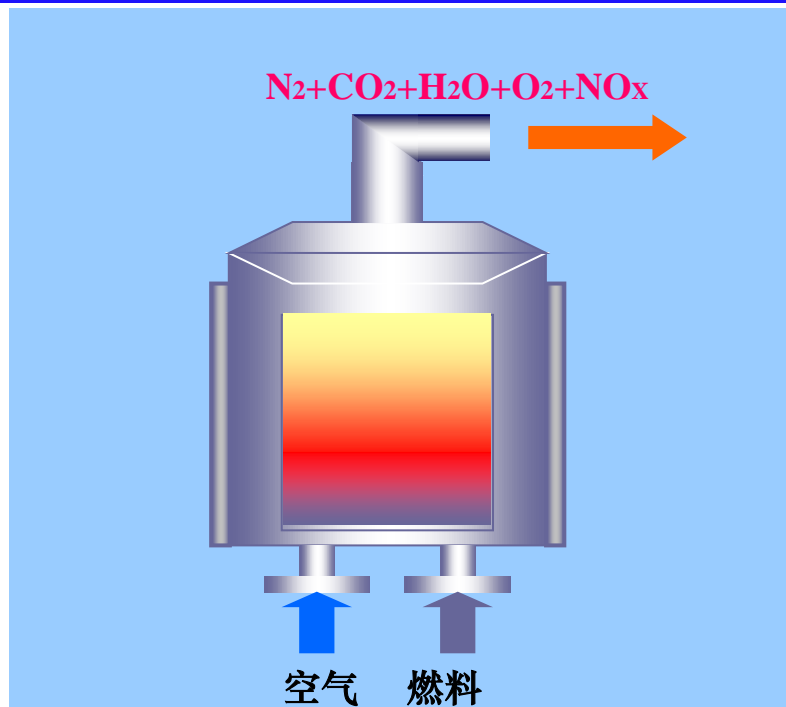
CO<sub>2</sub>富集相容理论



对化石燃料化学能利用方式进行科学理论创新和技术突破是解决能源利用效率、污染物控制和CO<sub>2</sub>减排的关键，代表了能源与环境领域的崭新发展方向

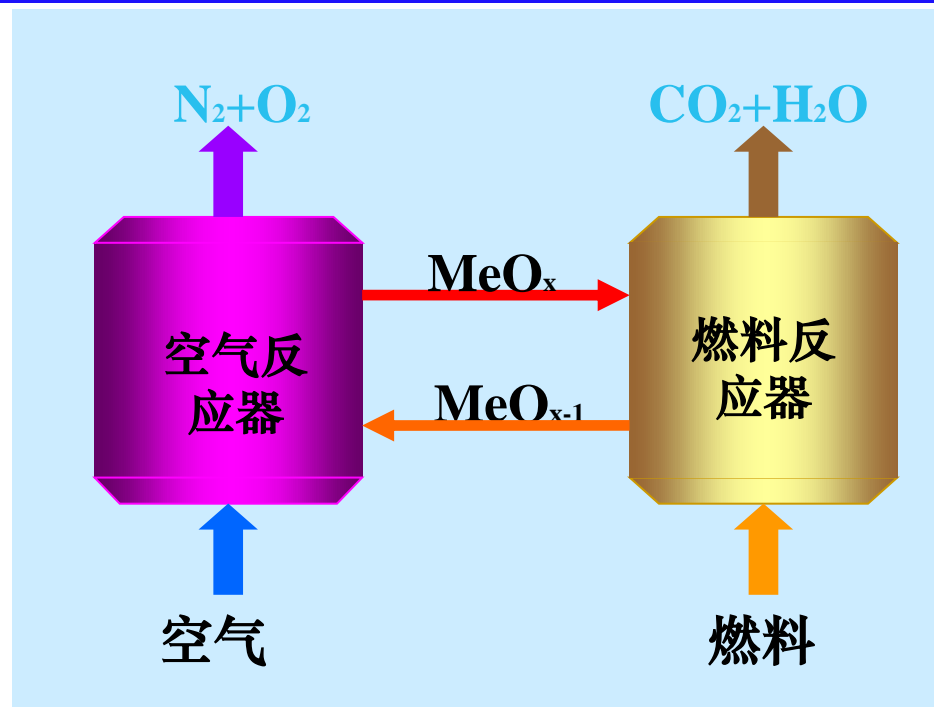


# 化学链燃烧：革新性低能耗CO<sub>2</sub>富集方式



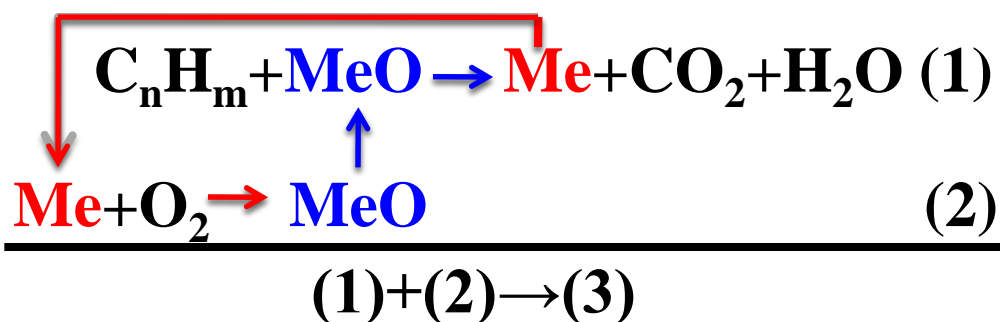
常规直接燃烧

- 烟气CO<sub>2</sub>浓度为10~15%，  
CO<sub>2</sub>富集能耗和成本高



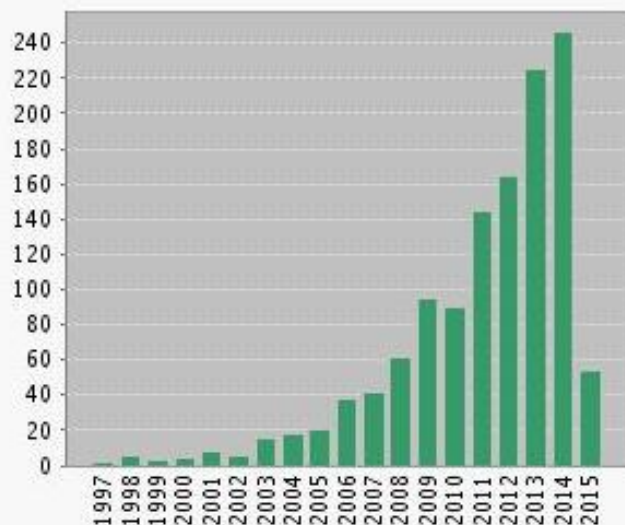
化学链燃烧

简单冷凝得到高纯度CO<sub>2</sub>

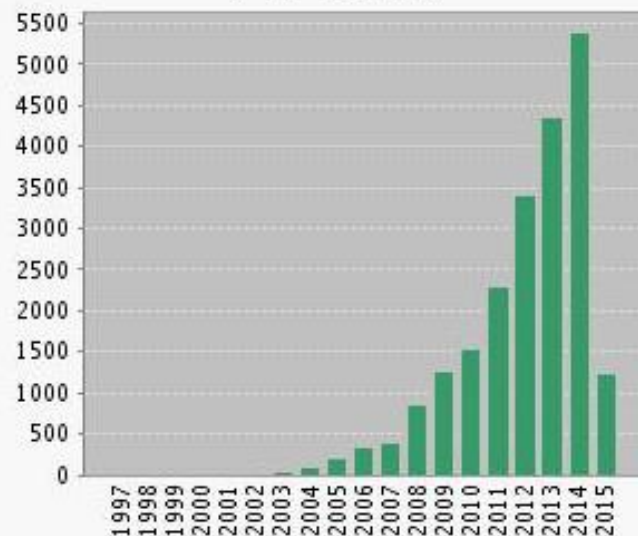


# 化学链燃烧现状

每年出版的文献数



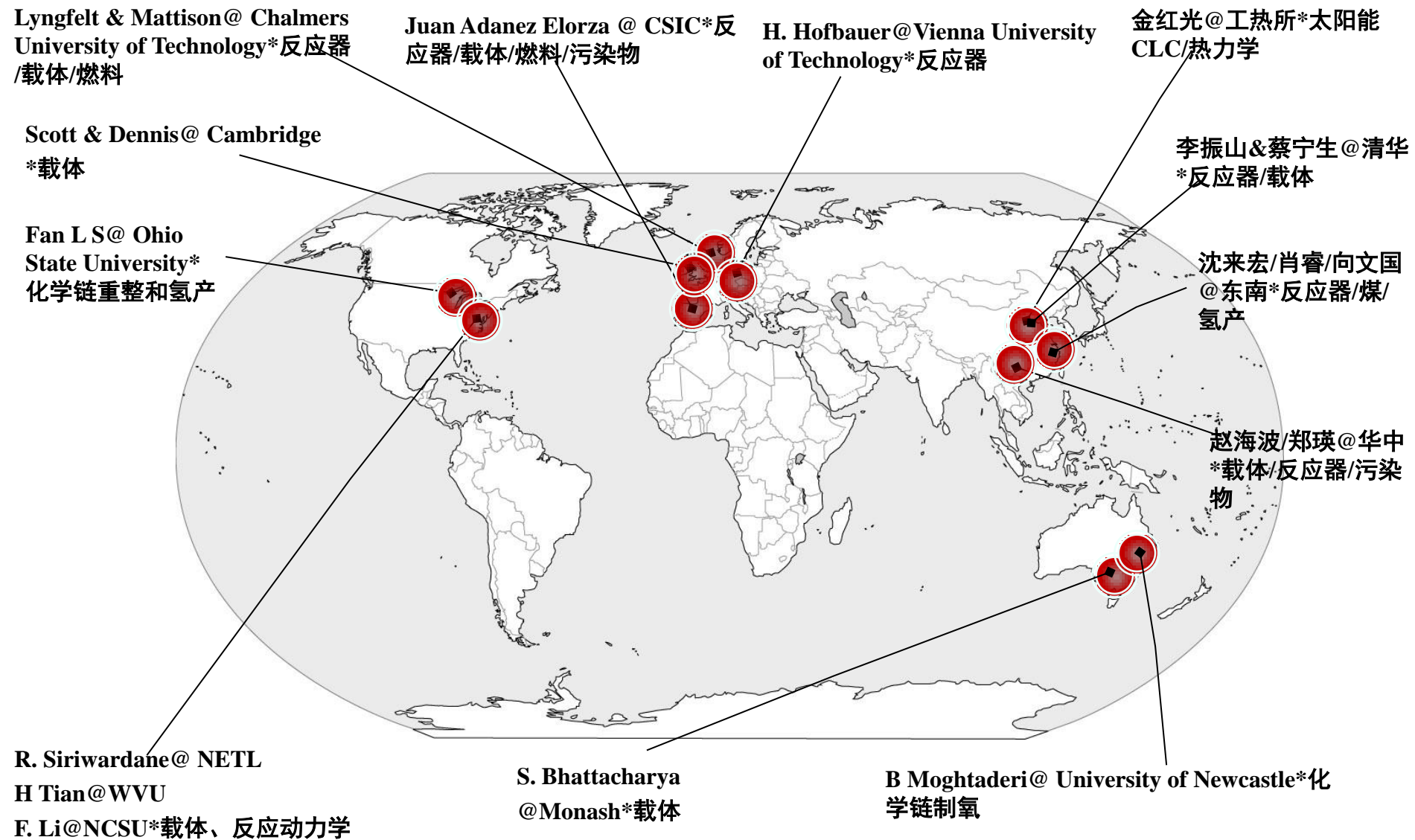
每年的引文数



<input type="checkbox"/>	PEOPLES R CHINA	287	23.089 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	USA	202	16.251 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	SWEDEN	156	12.550 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	SPAIN	131	10.539 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	ENGLAND	65	5.229 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	CANADA	57	4.586 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	AUSTRALIA	52	4.183 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	SOUTH KOREA	52	4.183 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	GERMANY	39	3.138 %	<div></div>
<input type="checkbox"/>	NORWAY	38	3.057 %	<div></div>

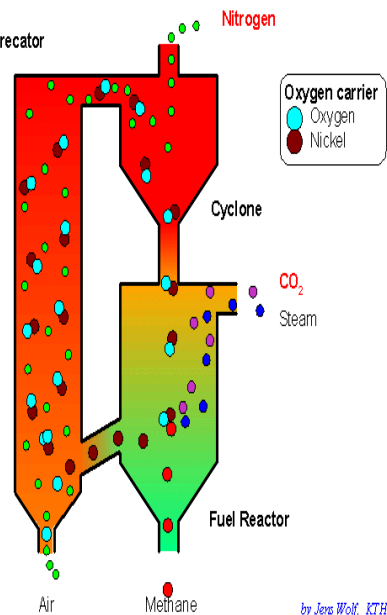
To 2015.4.8

# 化学链燃烧研发地图



其他:浙大王勤辉/西交大王树众/哈工大陆慧林/能源所何方/煤化所房倚天/华北电大董长青/青岛科技郭庆杰...

# 化学链燃烧：历史沿革



固体燃料燃烧

反应器设计和运行

氧载体颗粒

内分离CO<sub>2</sub>和低NO<sub>x</sub>

能量梯级利用

制取纯气体

中国,美国,欧洲, 2008-  
: 煤等固体燃料

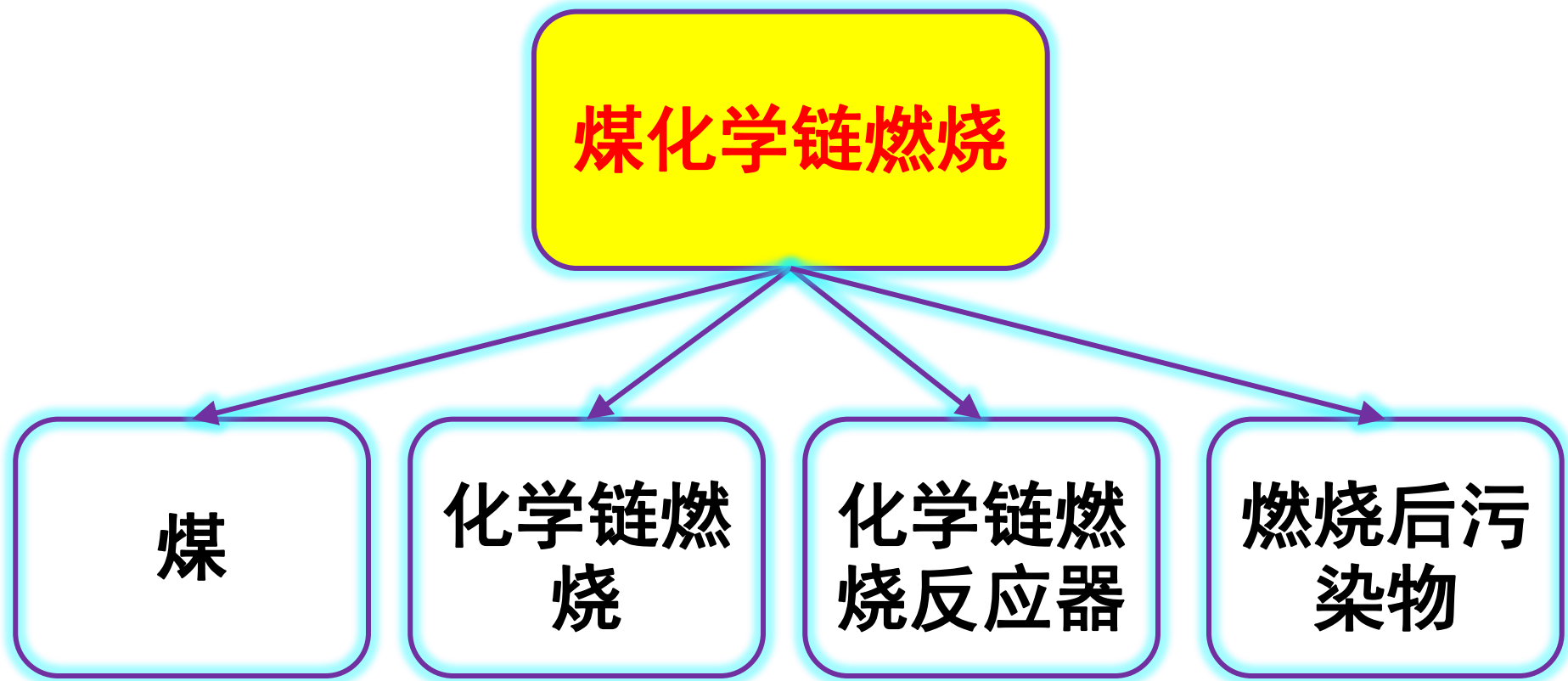
Lyngfelt et al.,  
2000s-: 串行流化床  
反应器, 气体燃料

Ishida, Zheng, Jin et  
al. 1980s-2000s: 氧载  
体颗粒和热力学分析

Lane, H., 1910s: 制氢气;  
Lewis & Gilliland, 1950s:  
制纯CO<sub>2</sub>

Richter & Knoche,  
1960s-1980s: 减少燃烧  
损失

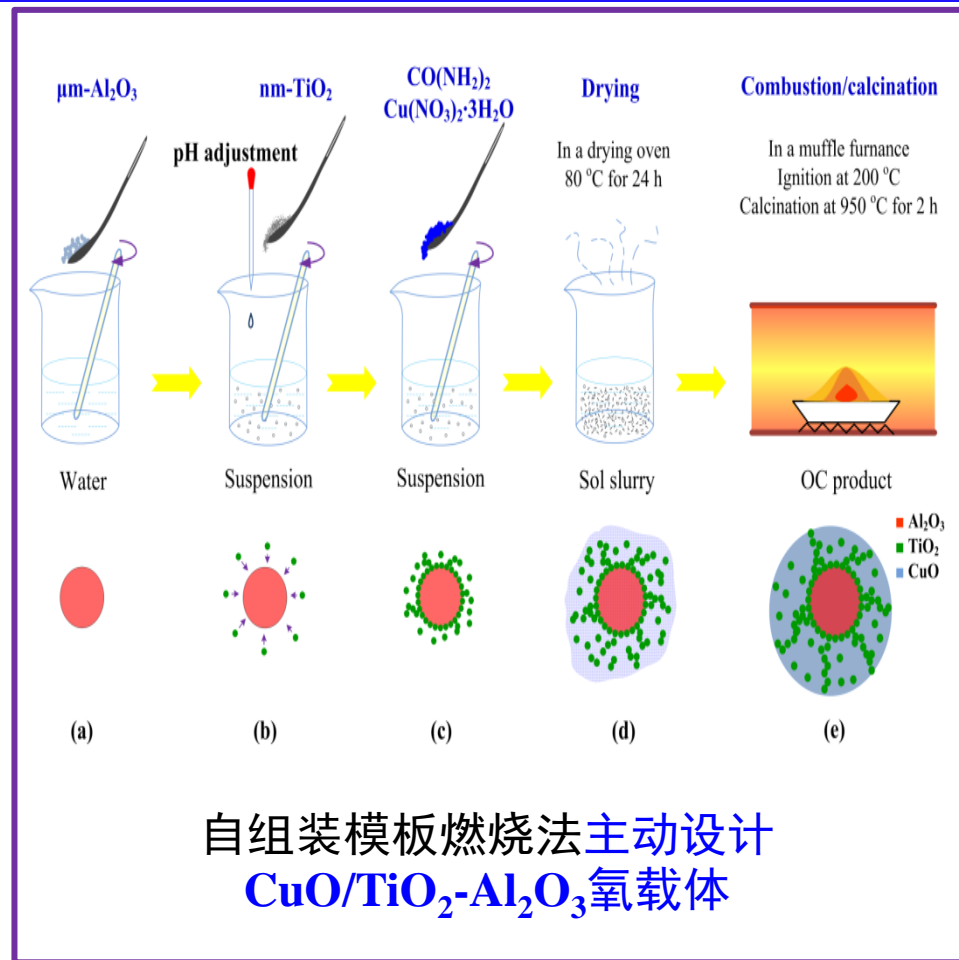
# 学术思路



# 主动设计氧载体来匹配不同煤种

## 研究成果

氧载体特征	煤种	化学链方式
完全释氧载体 ( $\text{CuO}/\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ )	无烟煤	化学链氧解耦燃烧
部分释氧载体 ( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ )	烟煤	部分氧解耦化学链燃烧
非释氧载体 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ )	褐煤	化学链燃烧

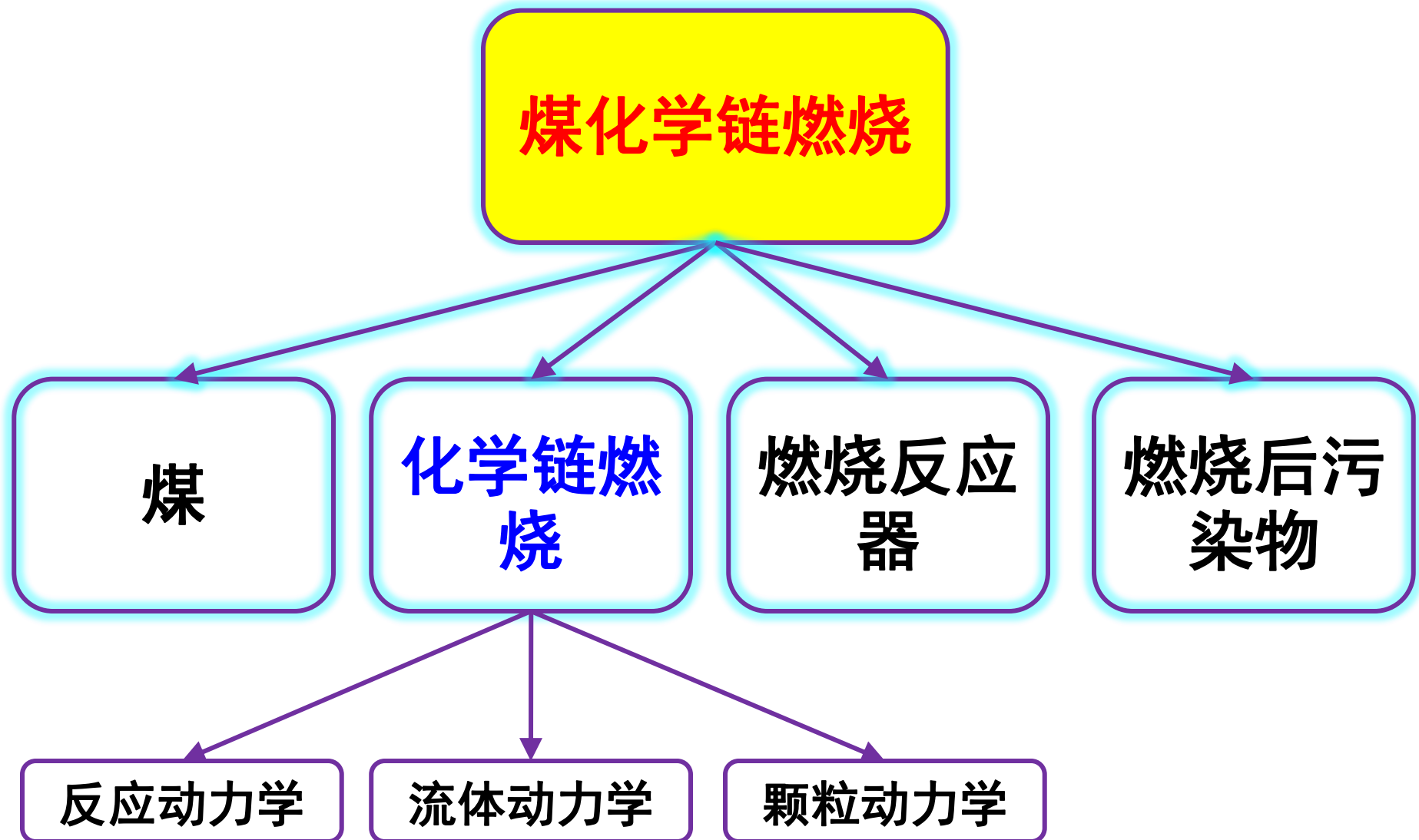


Zhao H\*, et al. *Combustion and Flame* 2015, 162: 3030-3045

Zhao H\*, et al. *Combustion and Flame* 2015, 162: 2200-2213

Zhao H\*, et al. *Environmental Science & Technology* 2015, 49: 8237–8245

# 学术思路

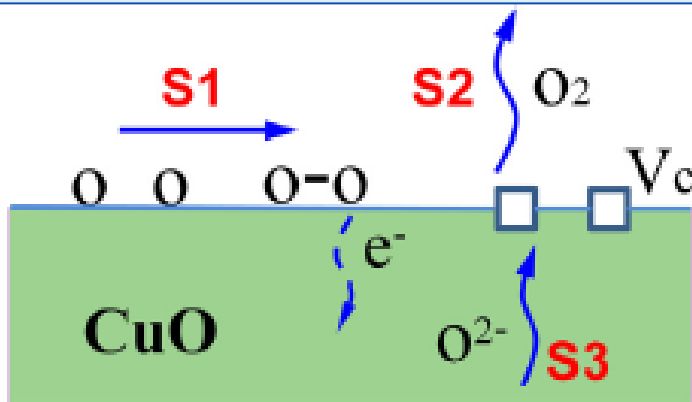




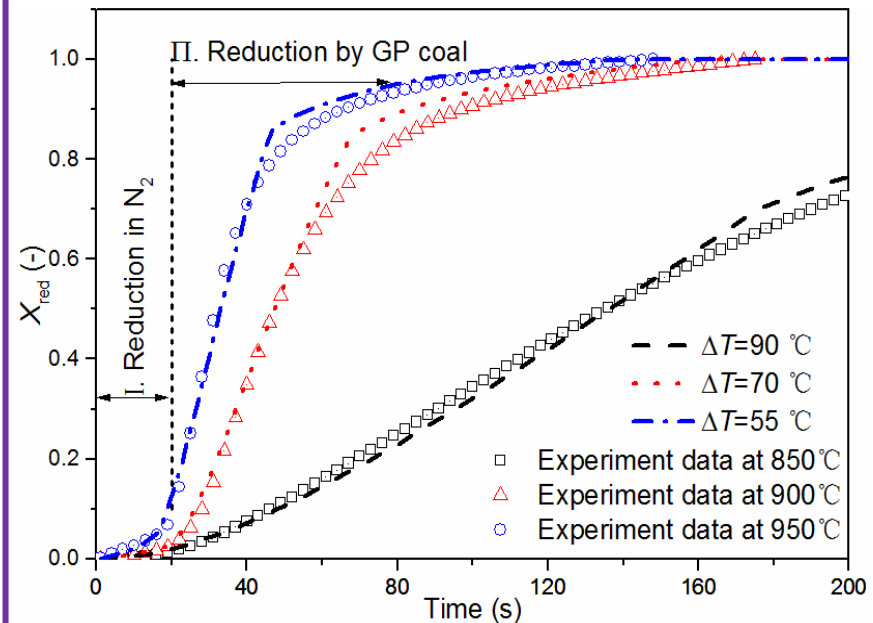
# 表界面反应动力学

## 研究成果

- 揭示出氧载体内部氧离子往表面的传输并非限制步骤(被**实验证实**，与传统催化剂观点**相反**)
- 发现颗粒表界面存在的热质内外传递、热力学驱动力和化学反应驱动力之间的**竞争模式**



$$\frac{dX}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1-X) \left[-\ln(1-X)\right]^{1/3} \times \left(\frac{p_{O_{2,e}} - p_{O_2}}{p_{O_{2,e}}}\right) S_k S_o$$



Zhao H\*, et al. *Combustion and Flame* 2015, 162: 1265-1274

Zhao H\*, et al. *Combustion and Flame* 2015, 162: 3503-3515

# 流化床颗粒聚团的多尺度曳力模型

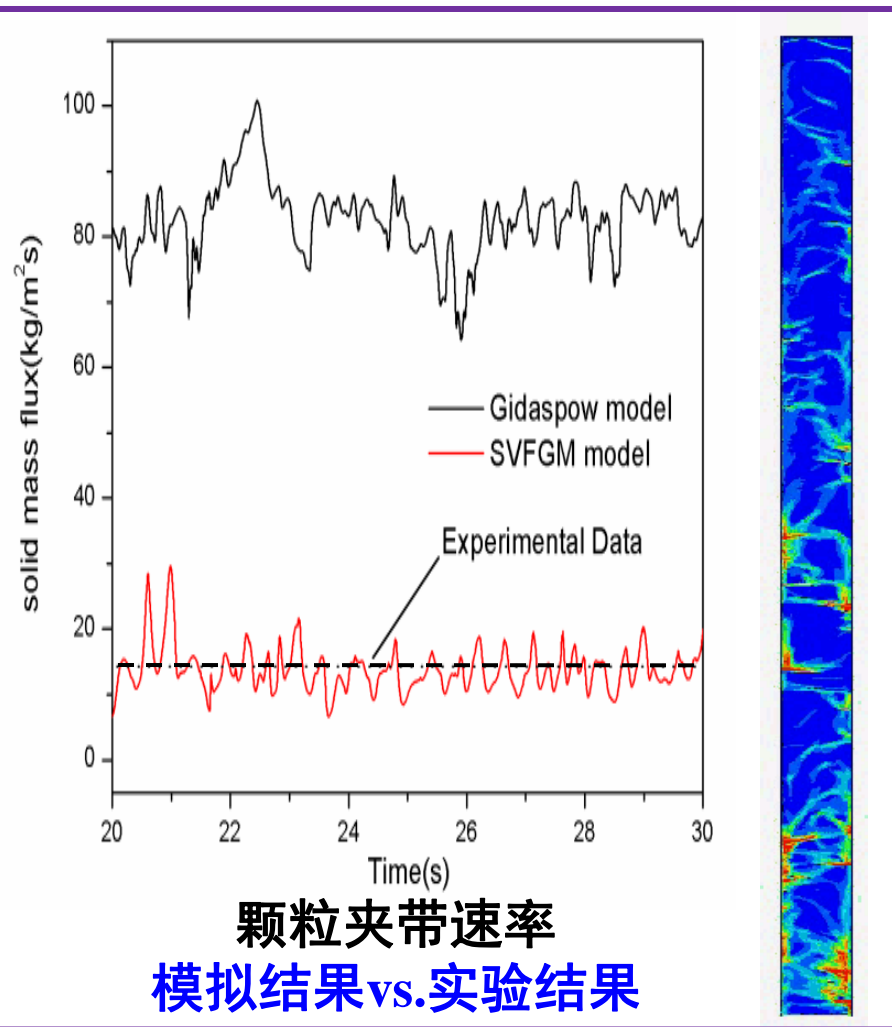
常规模型

多尺度模型

$$\beta = f(\text{Re}, \phi) \quad \beta = f(\text{Re}, \phi, d\phi/dx)$$

## 研究成果

- 发现常规气固相间曳力模型不适于颗粒浓度不均匀的网格局部
- 提出新模型考虑网格内颗粒浓度梯度，从零阶精度(均匀流态化)提升到高阶精度(非均匀团聚体)



Zhao H\* et al. *Proceedings of the Combustion Institute* 2015, 35: 2811-2818

Zhao H\* et al. *AIChE Journal*, in submission

# 颗粒动力学的群平衡Monte Carlo方法

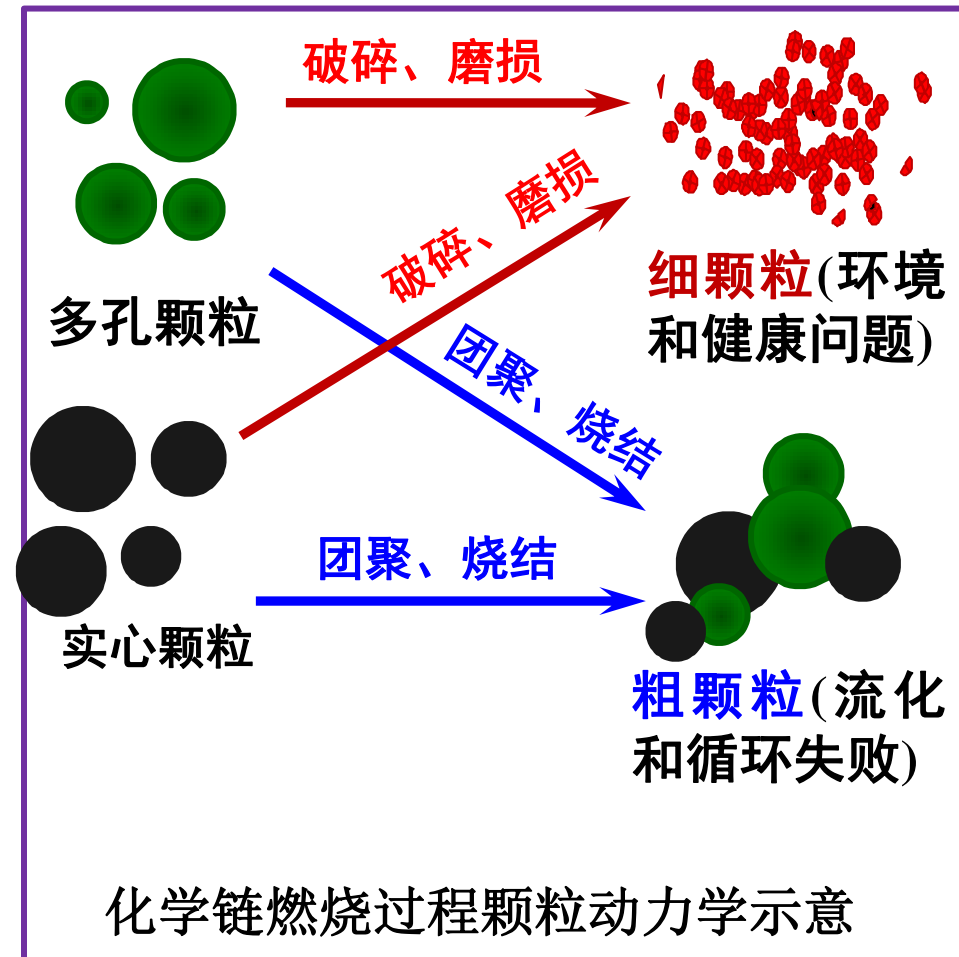
等权值方法

异权值方法

$$R_{ij} = \beta_{ij} \bar{w}$$
$$R_{ij} = \beta_{ij} w_j \frac{2 \max(w_i, w_j)}{w_i + w_j}$$

## 研究成果

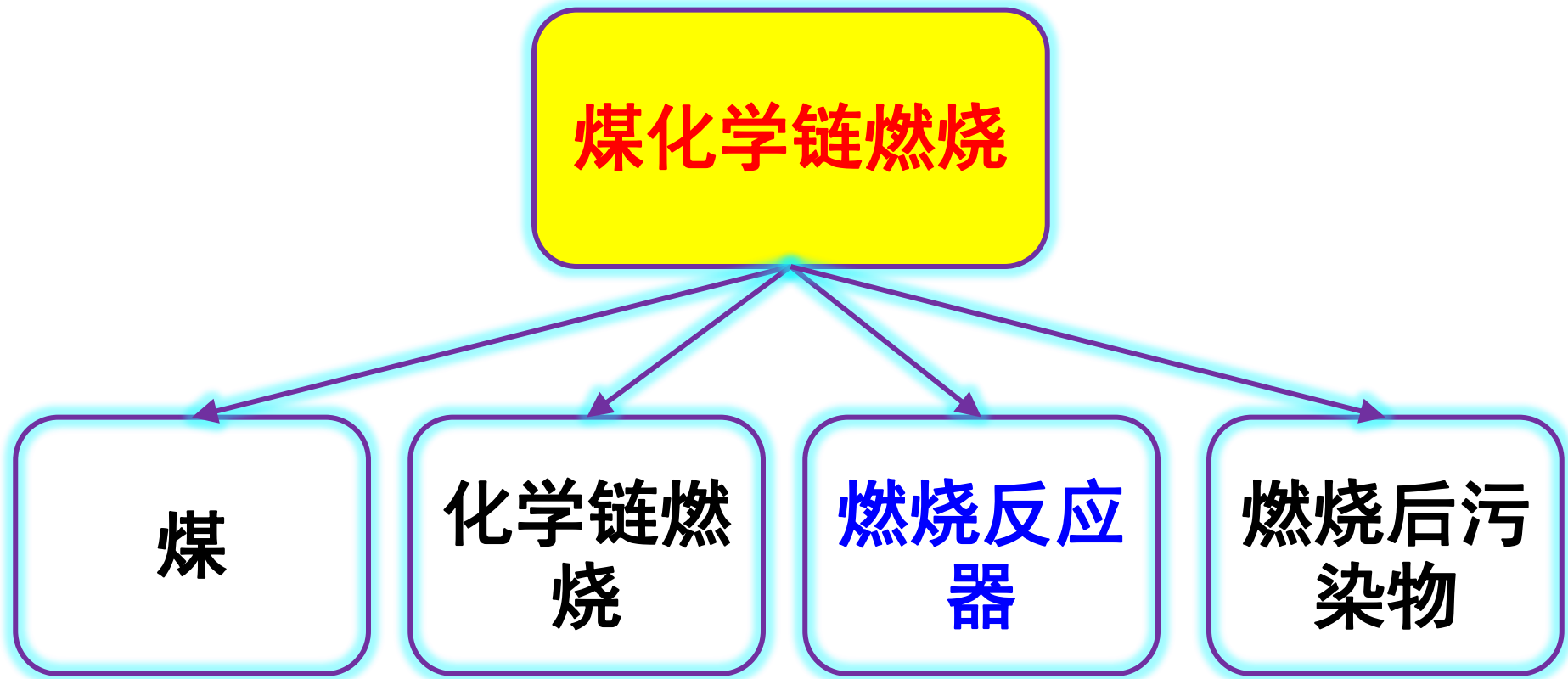
- 推导了跨尺度颗粒间团聚/破碎等动力学事件的普适性启发式模型
- 提出异权值Monte Carlo方法



Zhao H\* et al. *Journal of Computational Physics* 2010,229: 6931-6945

Zhao H\* et al. *Journal of Computational Physics* 2009,228 : 1412-1428

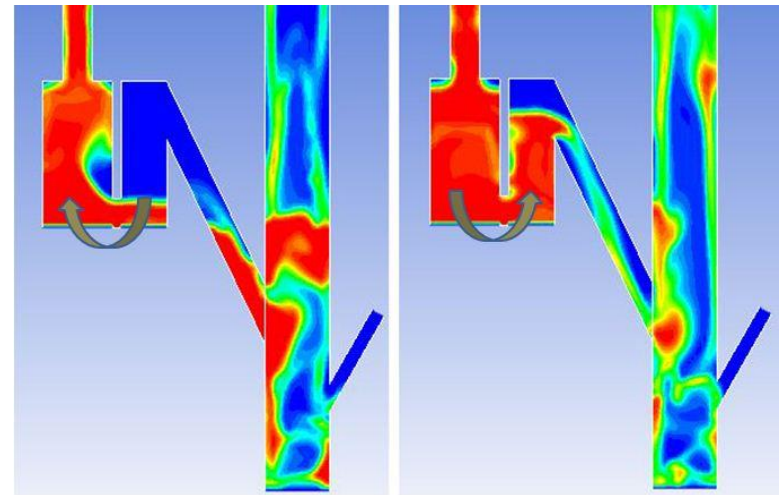
# 学术思路



# 串行流化床反应器内热质传递和反应



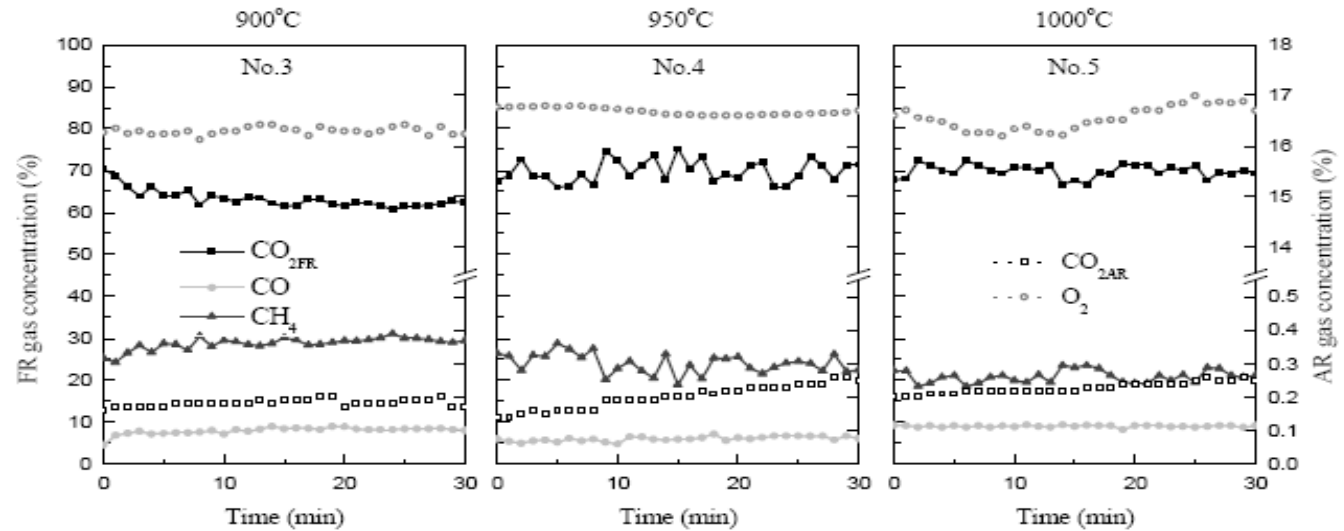
- CFD模拟服务于反应器设计放大和操作条件优化
- 热质传递及反应的调控是难点



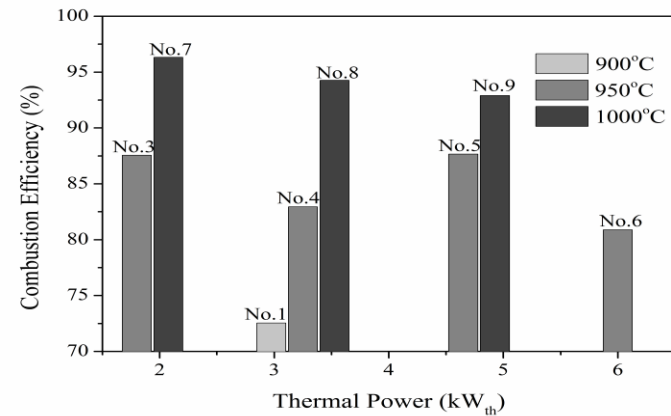
Zhao H\* et al. *Energy Conversion and Management* 2015, 105: 1–12

Zhao H\* et al. *Energy & Fuels* 2014, 28, 3970-3981

# 5kW<sub>th</sub> 串行流化床反应器连续实验



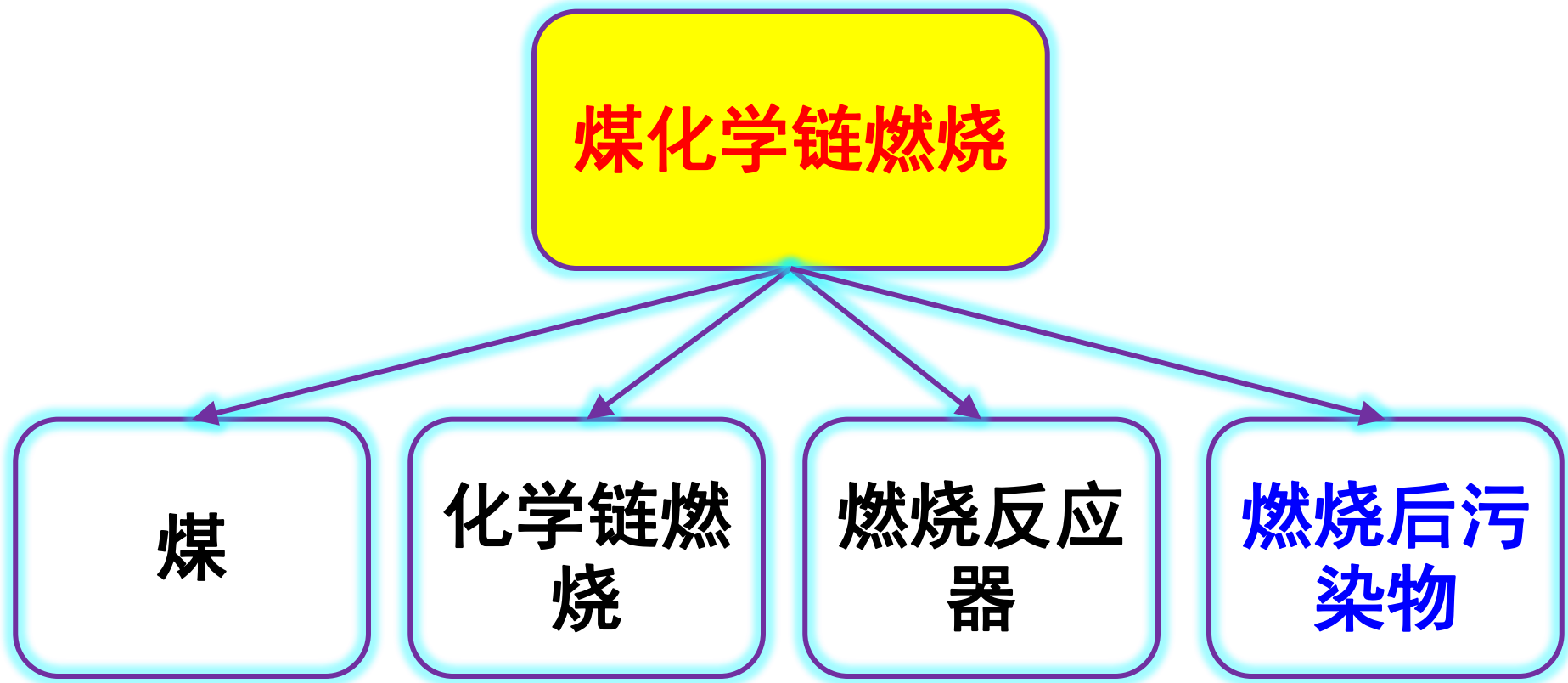
- 300小时连续实验
- 各操作参数(温度、流化风速、循环速率、床料量)影响和优化
- 氧载体反应性和循环稳定性



Zhao H\* et al. *Applied Energy* 2015, DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.124

Zhao H\* et al. *Energy & Fuels* 2015, 29(5): 3257-3267

# 学术思路





# 亚微米颗粒物纤维捕集

## 常规模型

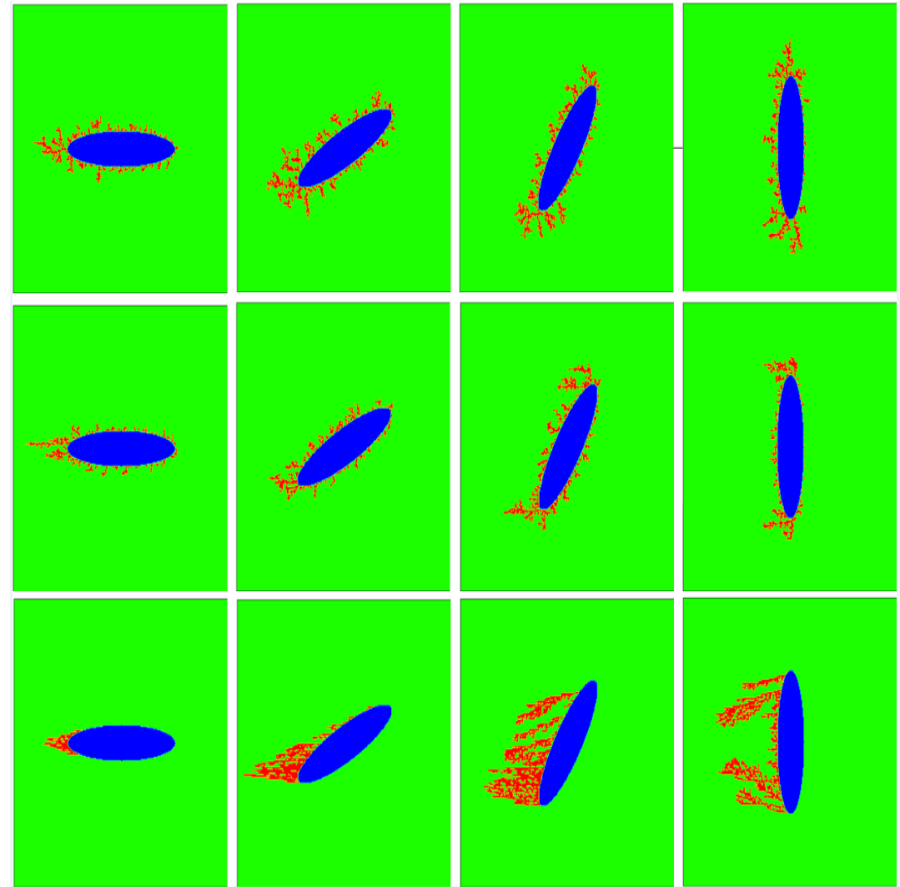
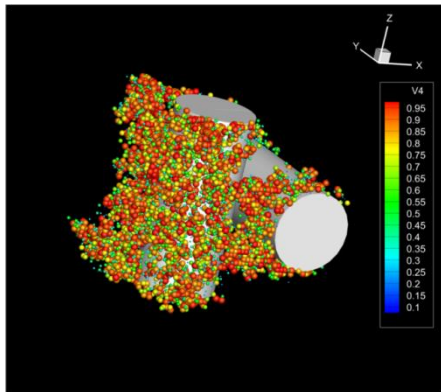
## 介观模型

Navier-Stokes+  
随机轨道模型

格子Boltzmann+元  
胞自动机概率模型

## 研究成果

- 提出元胞自动机概率模型描述细颗粒随机布朗运动
- 优化椭圆截面纤维高效捕集亚微米颗粒物



Zhao H\* et al. *Journal of Computational Physics* 2013, 239: 57-71

Zhao H\* et al. *Journal of Computational Physics* 2015, 281: 844-863

# 结语

- ❖ 高效清洁低碳燃烧的关键科学问题和难点还是燃烧本身(反应、流动、热质传递...)
- ❖ 煤燃烧的基石是高效(降低燃烧火用损)，清洁的关键是燃烧中污染物的有序管理，低碳的出路在于新型燃烧方式
- ❖ 燃烧：已知的已知、已知的未知、未知的已知、未知的未知

# 第一届全国青年燃烧学术论坛

衷心感谢  
各位同行的指导！

