



洁净煤“碳”索（一）
——“燃煤+”耦合低碳发电及综合利用学术沙龙

掺氢/掺氨燃烧技术开发与工程验证

张 扬

yang-zhang@tsinghua.edu.cn

清华大学

清华大学山西清洁能源研究院

2022年4月23日





报告内容



掺氢/掺氨燃烧的背景及意义



掺氢/掺氨燃烧燃烧和污染物生成特性



掺氢/掺氨燃烧组织方法及其工程验证



掺氢/掺氨技术所面临的机遇和挑战



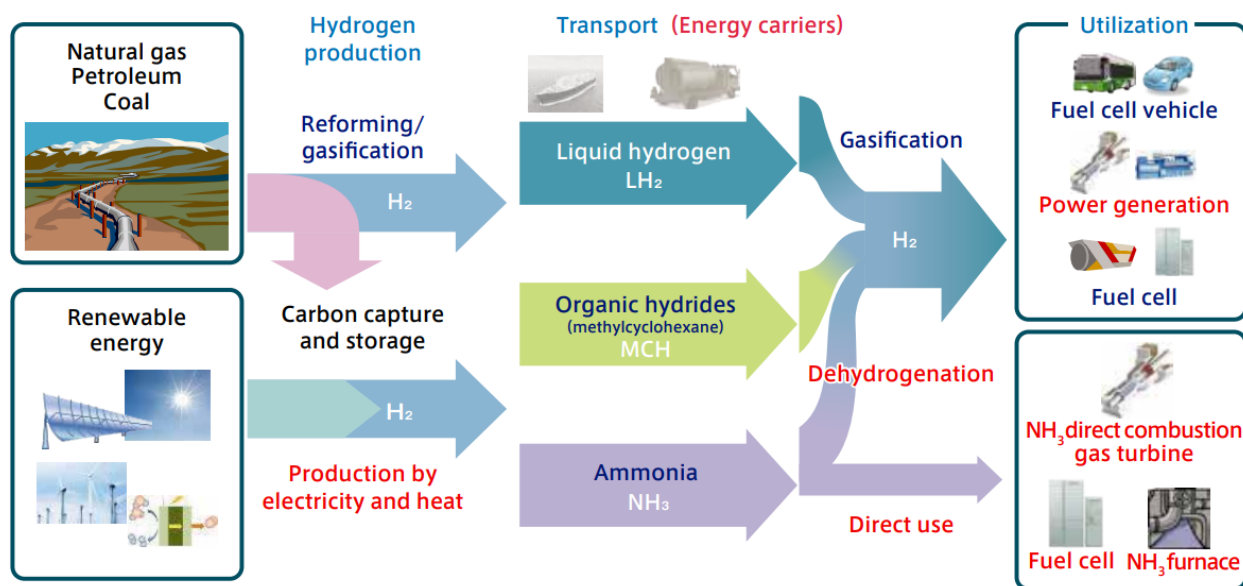


掺氢/掺氨：走向“零碳”的关键“一小步”

❖ 燃煤掺混富氢燃料：降碳的可选手段

- ✓ 过剩的可再生能源 + 特定储运条件 = 经济性
- ✓ 掺氢/掺氨燃烧都已从概念走向了工程示范

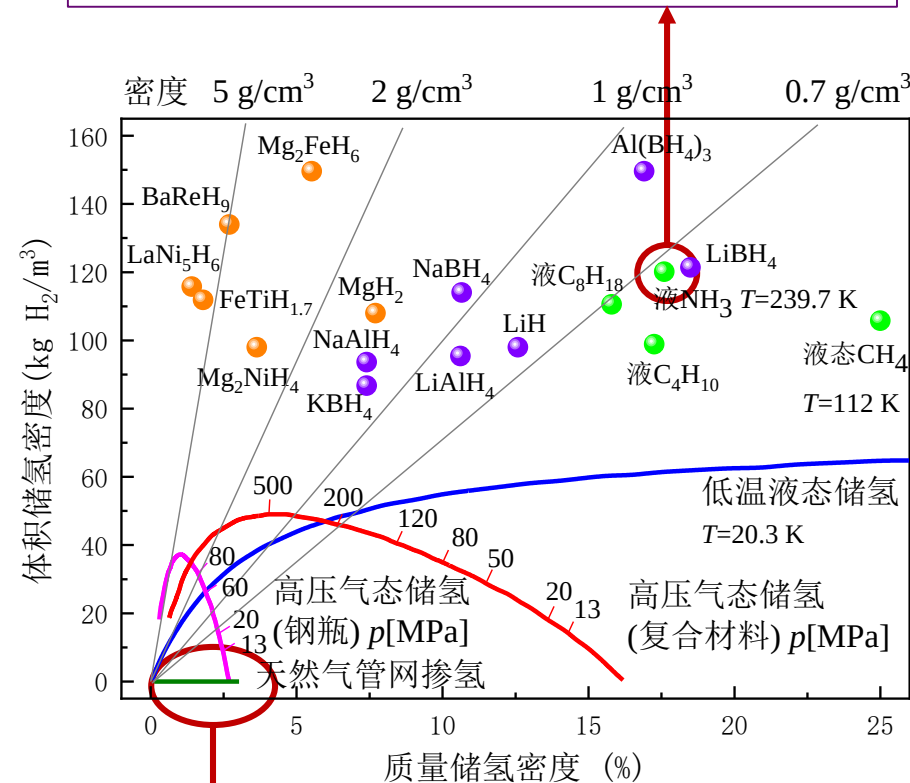
Strategy of Energy Carriers ~ Development of CO₂ free hydrogen value chain ~



能源用氢/氨生产、运输、利用方式[JST]

❖ 氢储运：管道掺氢 v.s. 钢瓶运氨

氨：较高的储氢能量密度和体积密度



天然气管道掺氢：规模大成本低



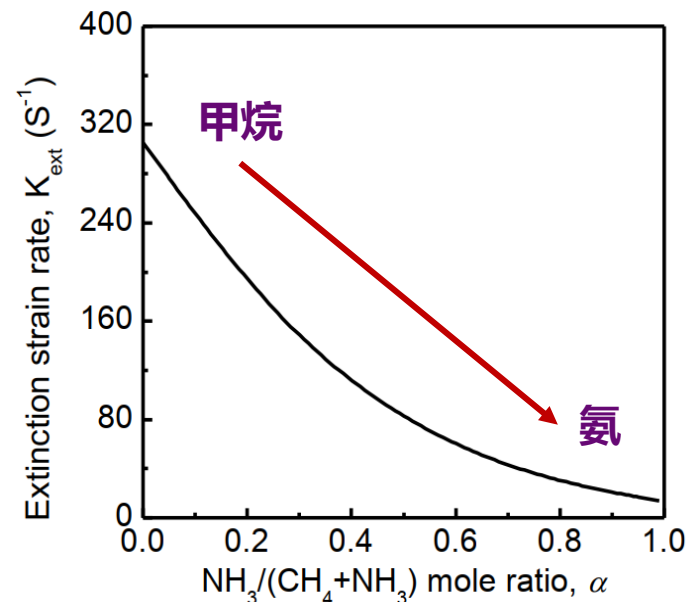
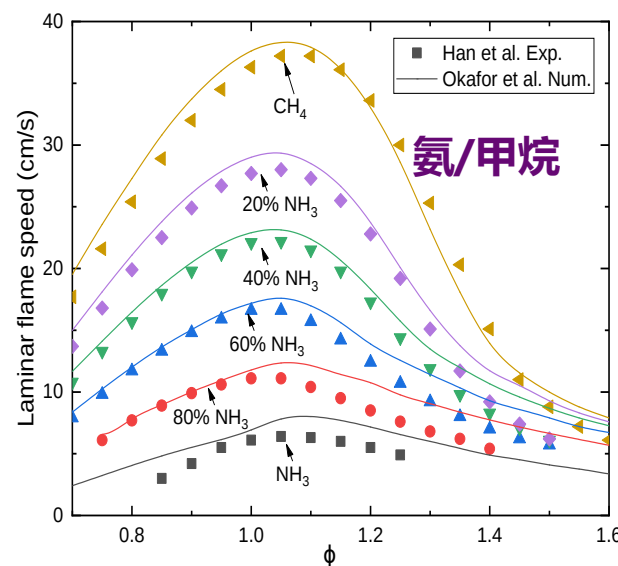
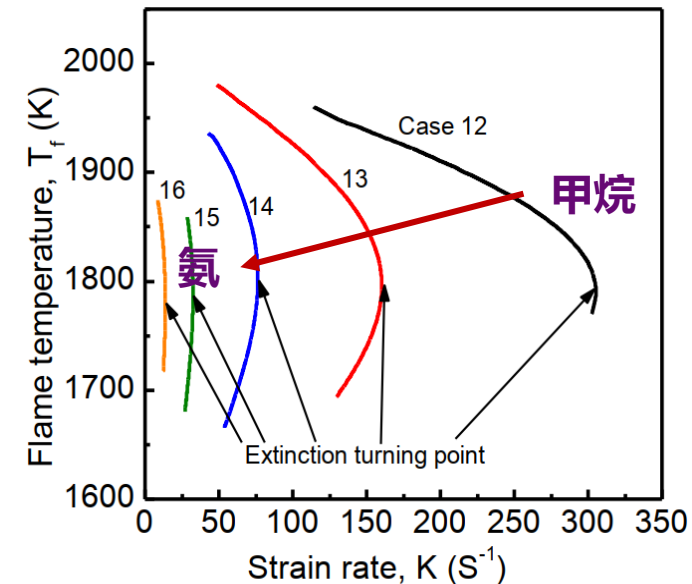
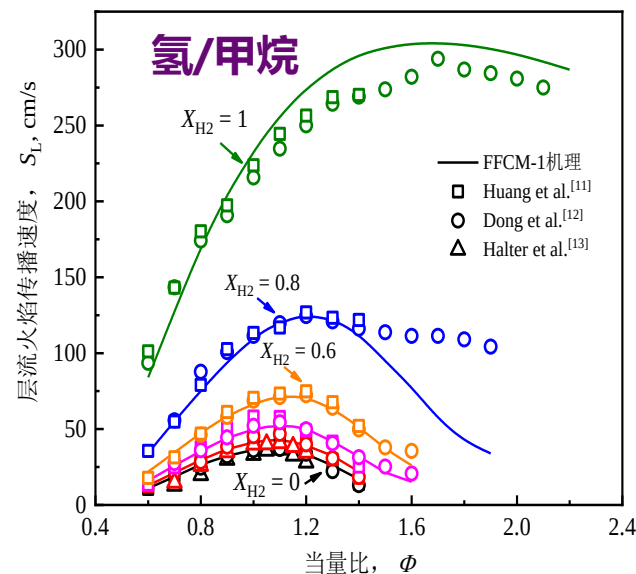


氢 v.s. 氨：气体燃料的两个“极端”

❖ 火焰特性差异大

氢/氨和甲烷的基础理化性质参数

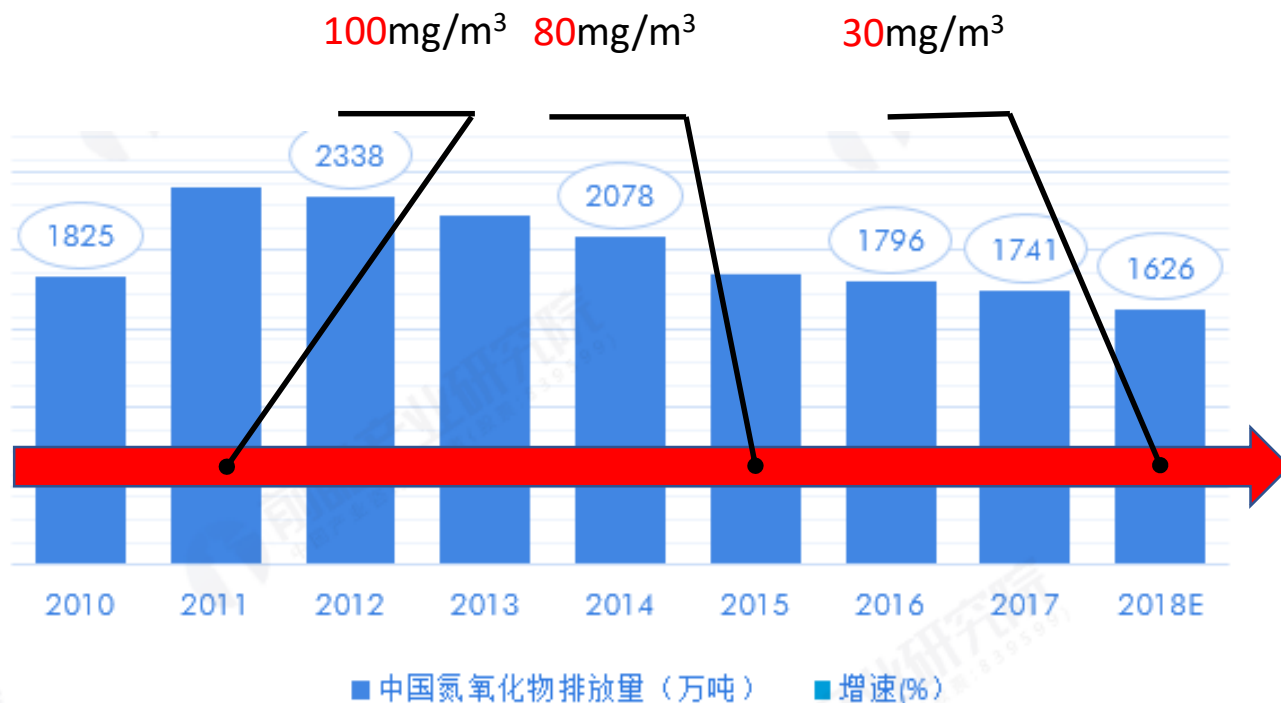
燃料	氢	氨	甲烷
分子量	2.02	17.03	16.04
密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.09	0.76	0.71
低位体积热值 / ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	10.8	14.3	35.5
低位质量热值 / ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	120	18.80	50.05
沸点@1 atm / ($^{\circ}\text{C}$)	-253	-33.4	-161
可燃极限 (当量比)	0.10-7.10	0.63-1.40	0.50-1.70
绝热燃烧温度 / ($^{\circ}\text{C}$)	2110	1800	1950
当量比层流火焰速度 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.91	0.07	0.37
最小点火能 / (mJ)	0.011	8.000	0.280
自点火温度 / ($^{\circ}\text{C}$)	500-577	657	586
辛烷值	--	130	120
质量含氢率 / (wt%)	100	17.8	25





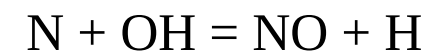
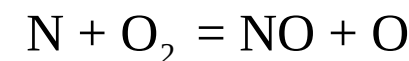
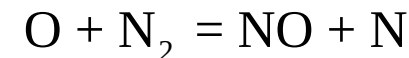
氢 v.s. 氨：气体燃料的两个“极端”

❖ 燃烧过程NO_x生成控制方法差别大

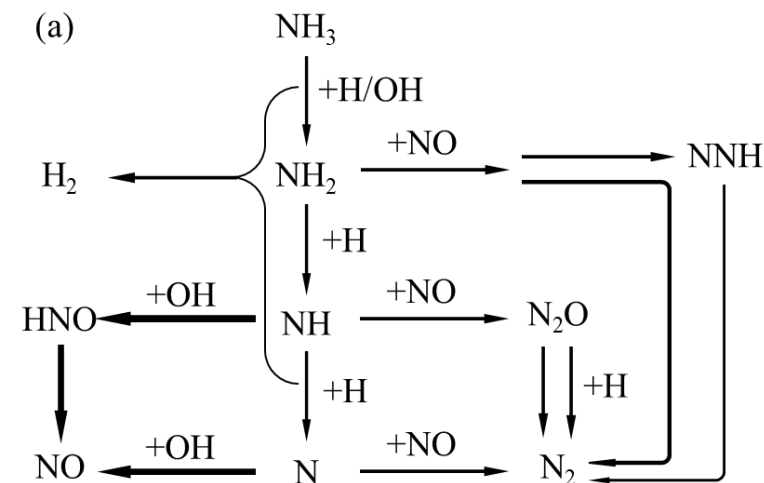


环保要求：必须攻克低氮燃烧组织关键技术

□ 氢燃烧：温度高，关注热力型NO_x



□ 氨燃烧：燃料氮，关注燃料型NO_x



[1] GB 13223-2011 火电厂大气污染物排放标准. 中华人民共和国环境保护部.

[2] DB 11/139-2015 锅炉大气污染物排放标准. 北京市环境保护局/北京市质量技术监督局.





掺氢/掺氨燃烧组织技术所关注的重点问题



	燃料	天然气	氢	氨
储运安全	储运安全	++	+	+
燃烧安全	点火安全性	++	+++	+
	抗吹熄特性	+++	++++	+
	抗回火特性	++	+	+++
污染物控制	燃料逃逸控制	+	+	+++
	热力型NOx控制	+++	++++	+
	快速型NOx控制	++	/	/
	燃料型NOx控制	/	/	+++++
阀组及控制系统	阀组响应特性	经验丰富	有变化	剧烈变化
	控制系统改造	/	不改或小改	大改



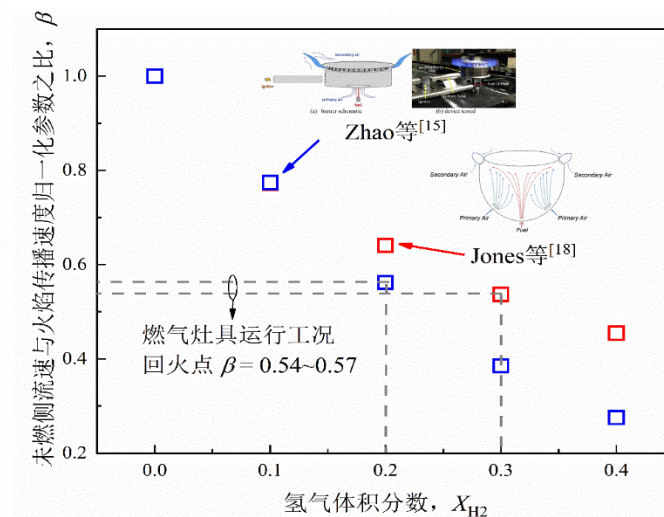
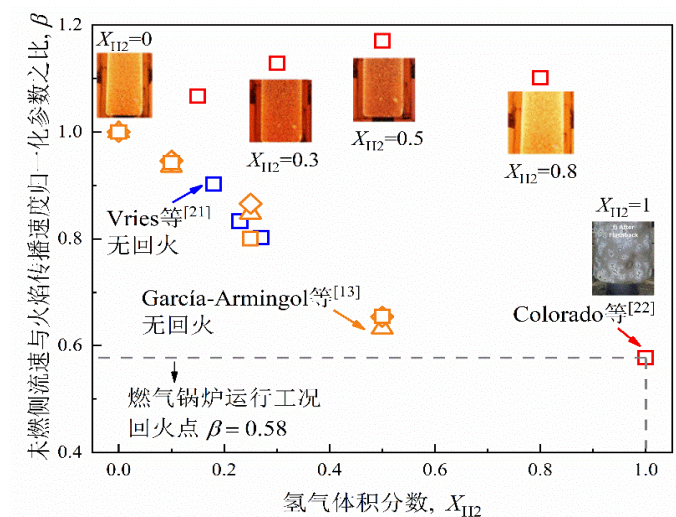
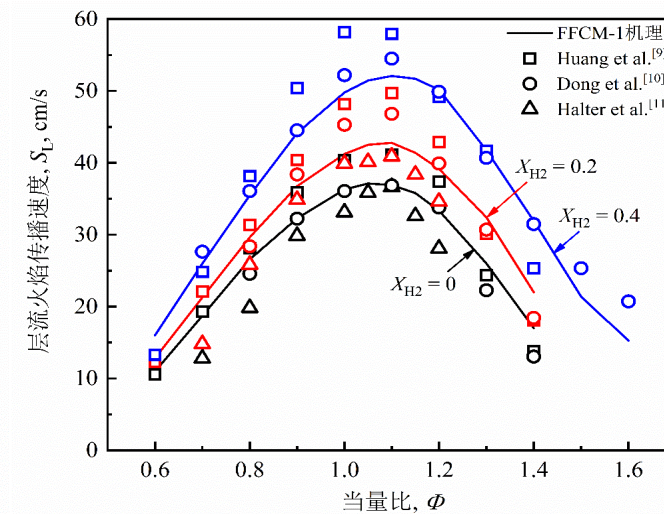
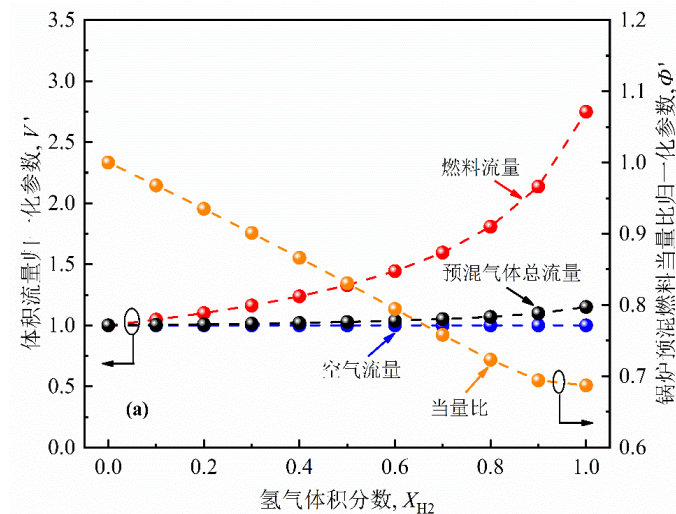


掺氢气体燃料火焰吹熄和回火特性

■ 定义参数 β 如下:

$$\beta = \frac{v'}{S_L'} = \frac{\frac{v_{total}}{v_{total}^0}}{\frac{S_L}{S_L^0}}$$

- 锅炉和灶具燃烧器总出口流速与火焰传播速度归一化参数的比值;
- 定量比较锅炉和灶具总出口流速与火焰传播速度的相对变化大小;
- β 值增加, **吹熄风险** 变大;
- β 值减小, **回火风险** 变大。

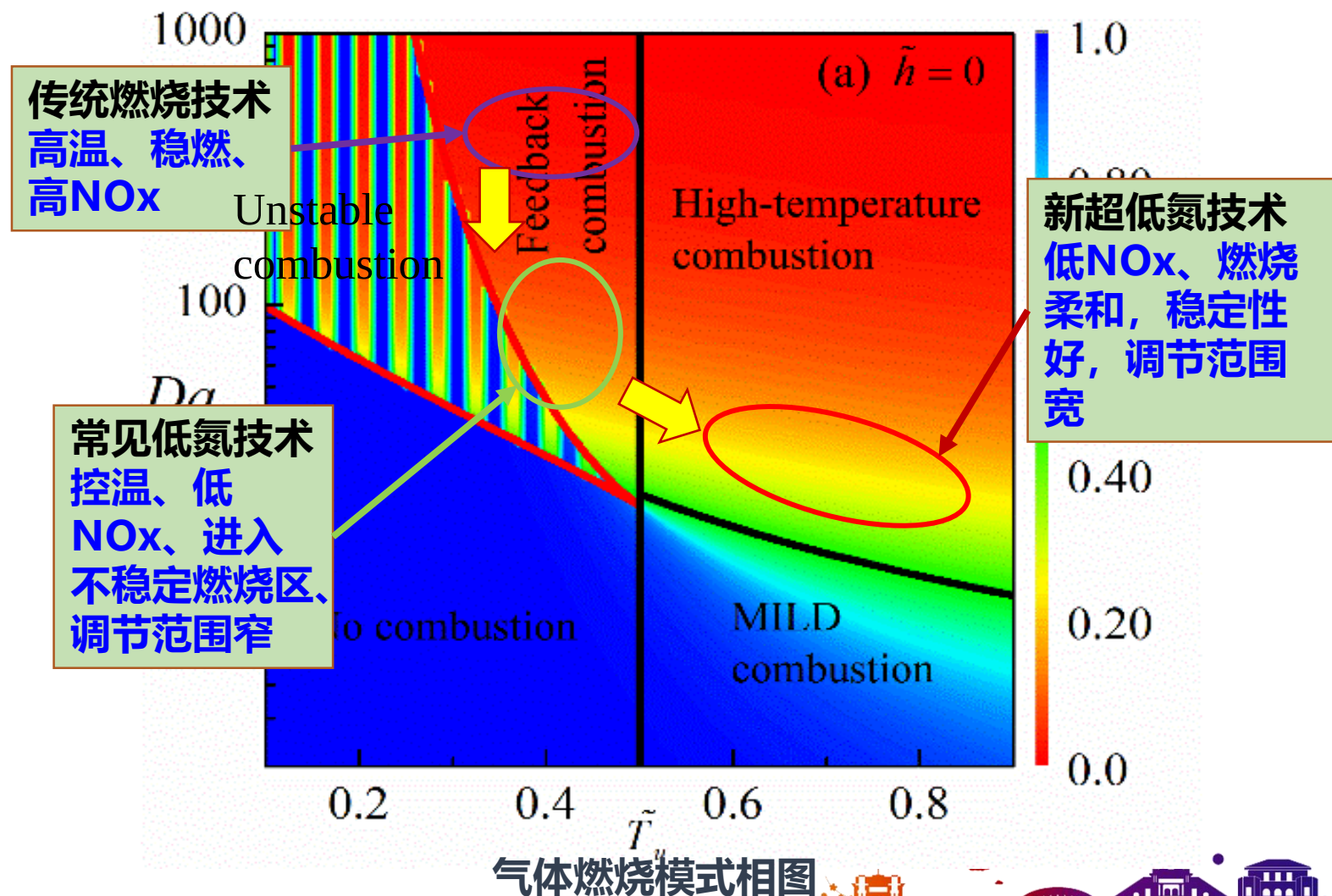
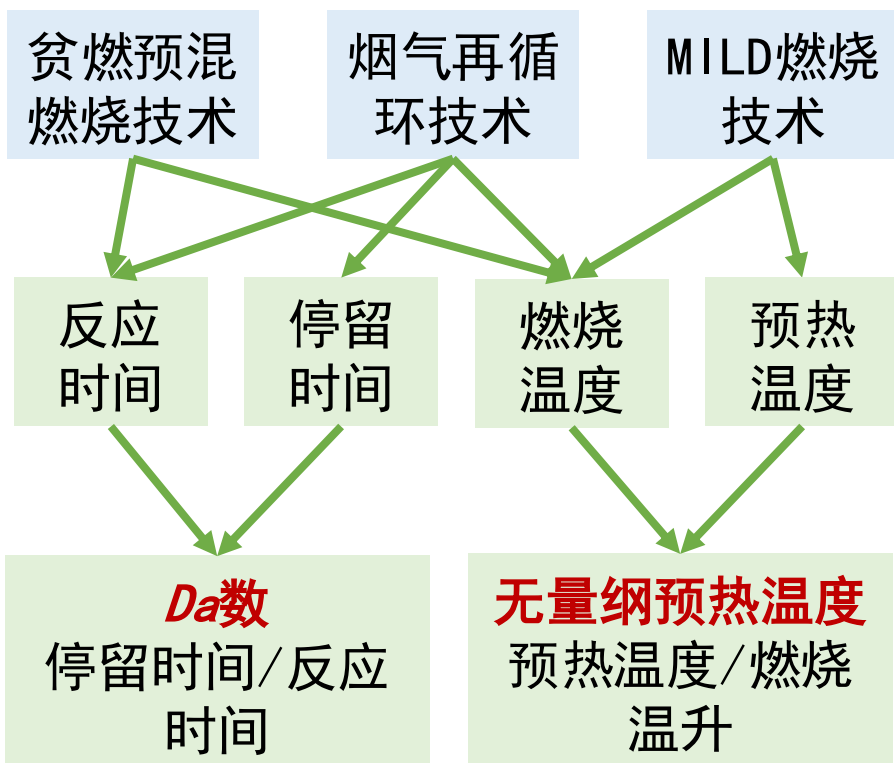




掺氢气体燃料燃烧组织方法

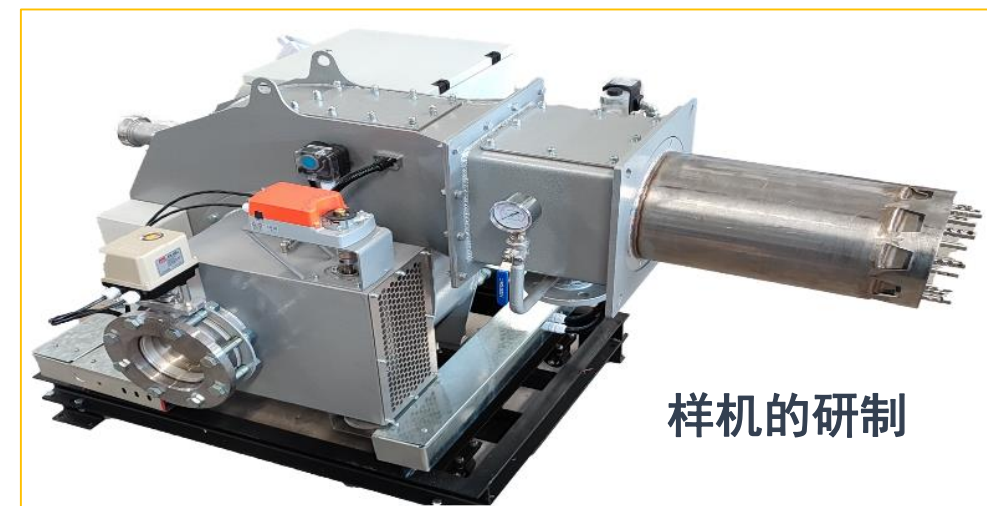
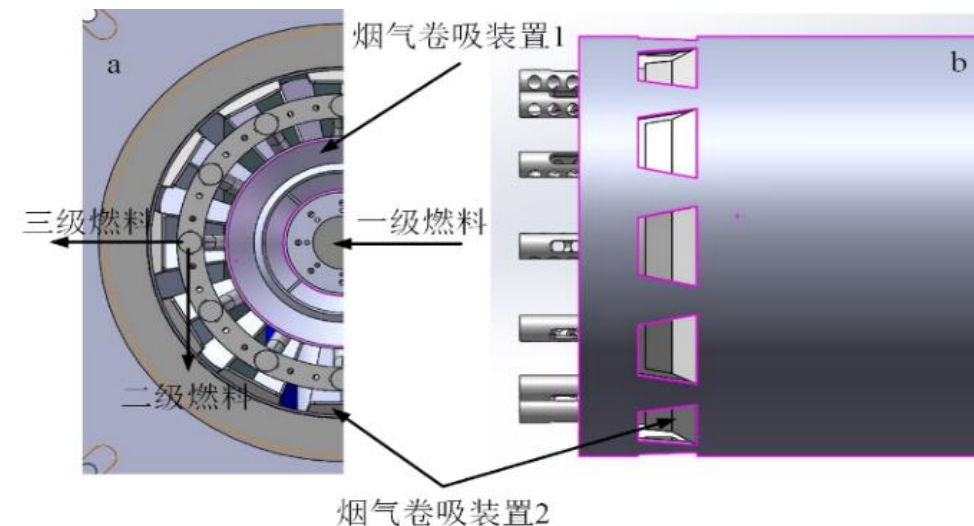
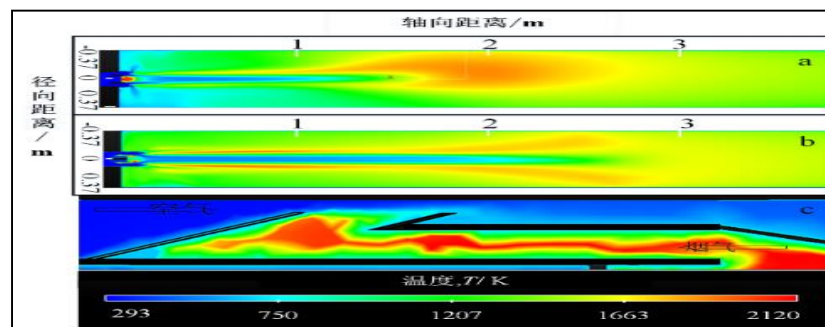
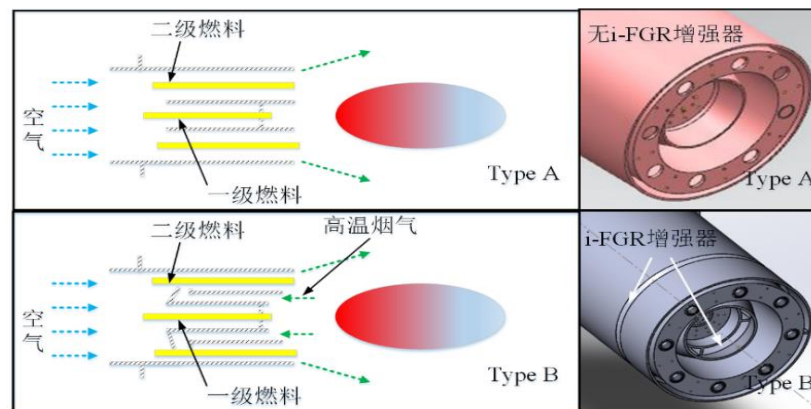
根据各种外部操作条件对燃烧过程影响机制，构建不同燃烧模式相图，控制**热力型NO_x**生成

❖ 操作参数影响规律分析





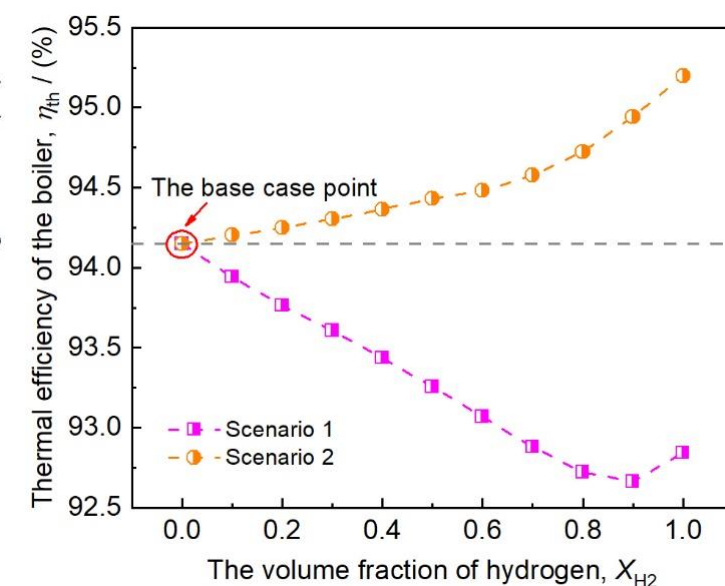
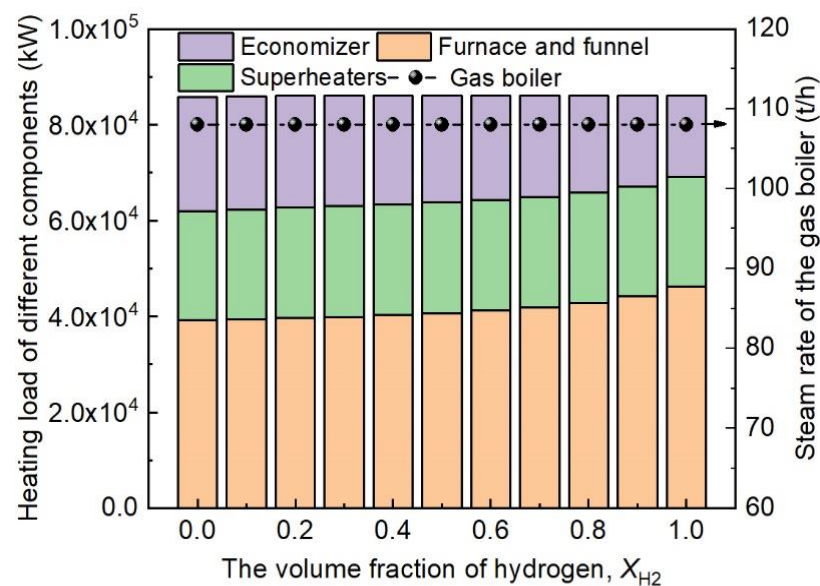
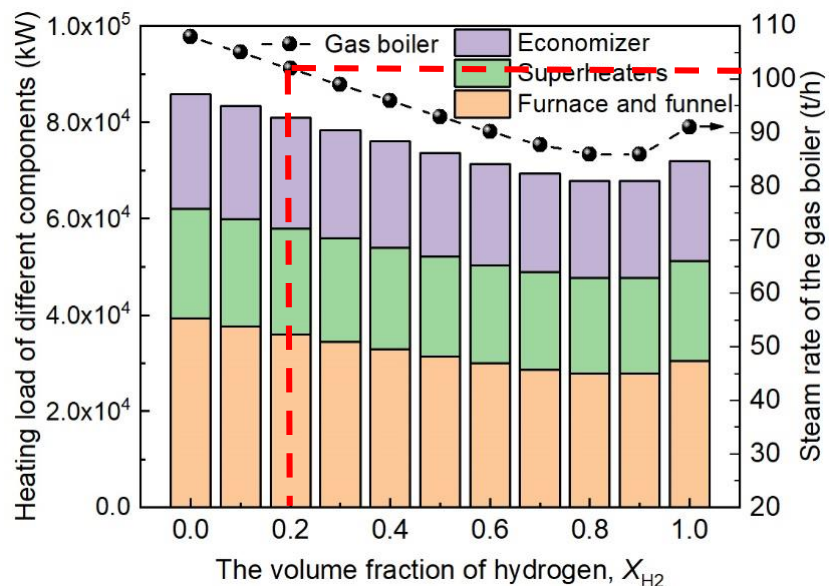
掺氢气体燃料燃烧组织方法





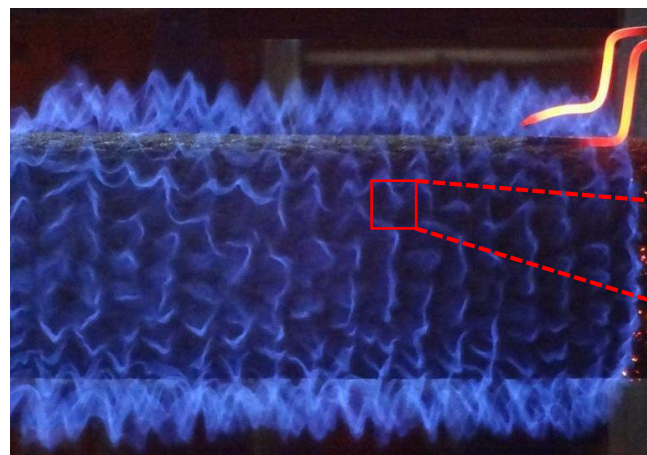
❖ 掺氢对锅炉能效影响

- 管道供气压差不变，锅炉不做任何调整，掺氢后锅炉负荷与燃料华白数变化相关；锅炉热效率先下降，在纯氢燃烧时略有升高；如果保证锅炉负荷和热效率下降偏差在基准工况的5%以内，建议 $X_{H_2} < 0.2$
- 保负荷，保过量空气系数，掺氢使锅炉燃烧温度升高，炉膛热负荷上升，省煤器热负荷下降；掺氢比增加导致锅炉热效率逐渐增加；这种运行策略下最大耐受掺氢比的要求主要在于燃烧温度升高对污染物排放的影响

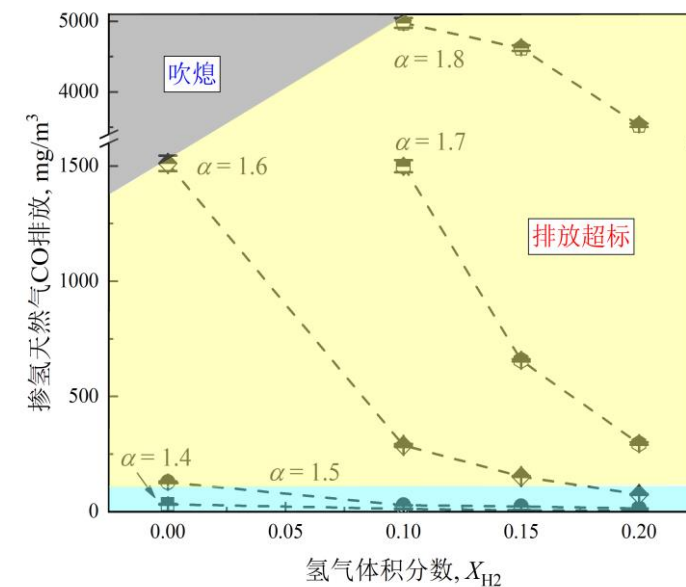
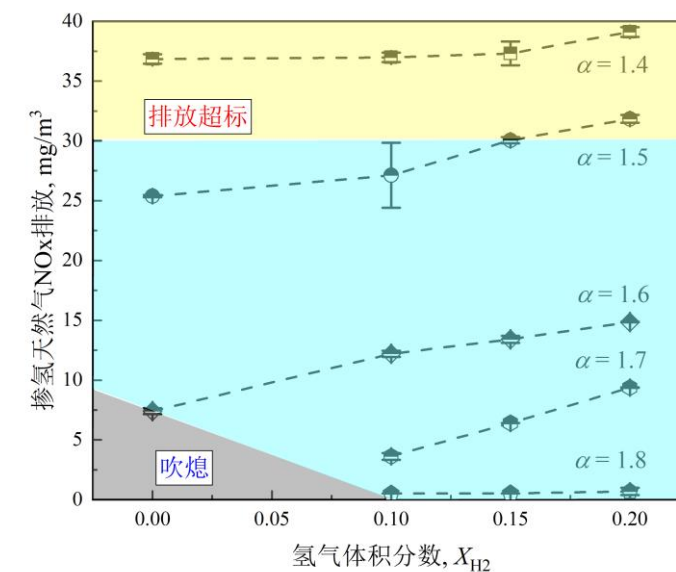
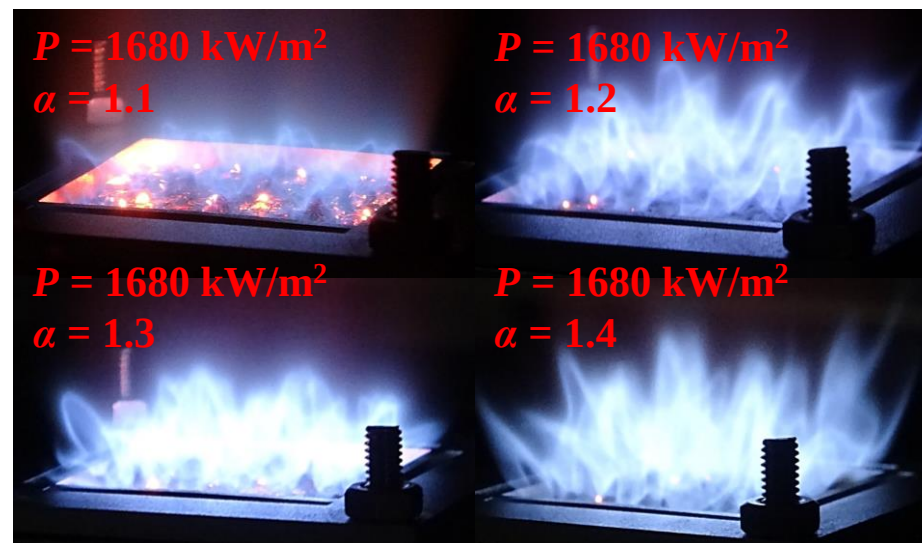
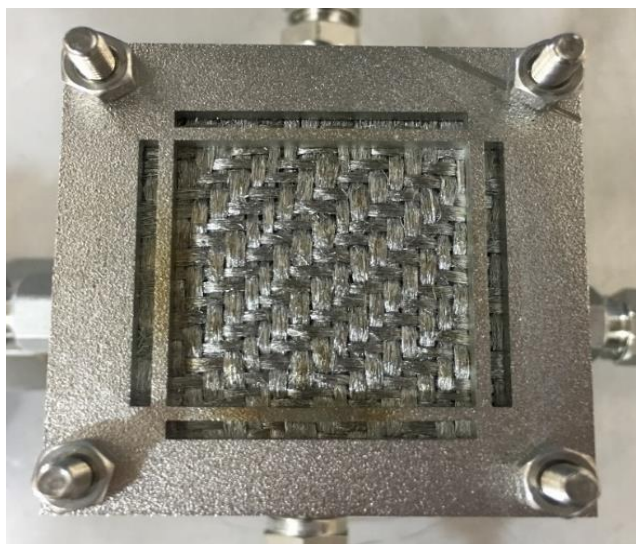
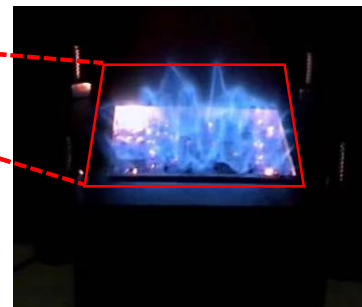




掺氢气体燃料燃烧组织方法



实验室尺寸
30mm × 30mm

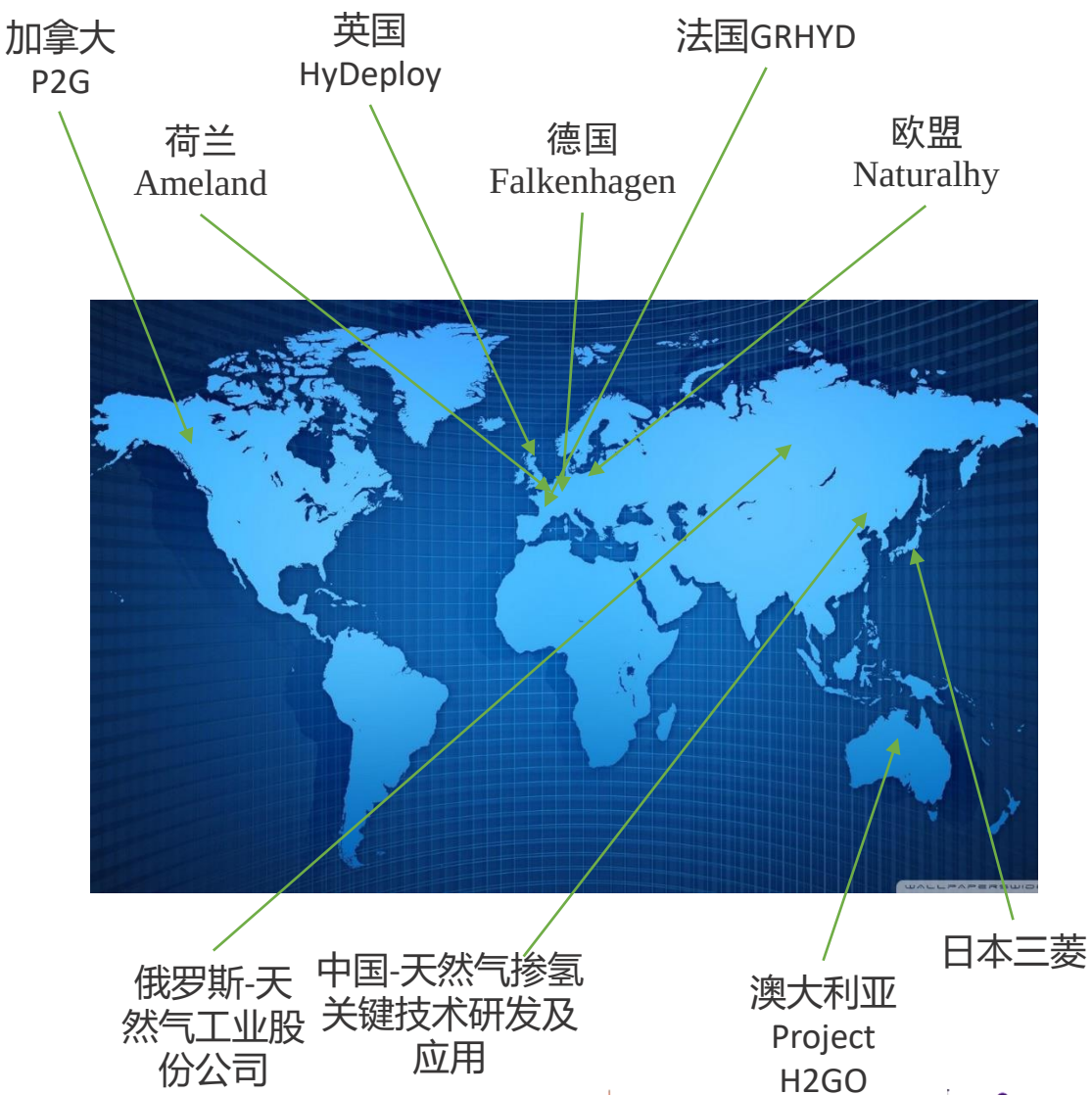




天然气管道掺氢燃烧利用的工程验证

国际天然气掺氢示范项目汇总

年份	国家/地区	典型项目名称或负责机构	应用场景	掺氢比(20%)
2004	欧盟	NATURALHY	工商业及居民用户终端设备燃料	20
2008	荷兰	Ameland	工商业及居民用户终端设备燃料	20
2013	德国	电力与天然气公司	管网掺氢示范	5
2014	法国	GRHYD	居民用户终端设备燃料	20
2016	日本	三菱	工业用户终端设备燃料	30
2017	英国	HyDeploy	工商业及居民用户终端设备燃料	20
2017	俄罗斯	天然气工业股份有限公司	工业用户终端设备燃料(发电)	25
2019	意大利	SNAM	工业用户终端设备燃料	10
2019	中国	国家电投集团有限公司	管道掺氢示范	10
2020	美国	HyBlend	终端用户供暖及发电、HCNG汽车	30
2020	加拿大	ACTO	工商业及居民用户终端设备燃料	5
2021	澳大利亚	JGN	居民用户终端设备燃料	10
2021	乌克兰	天然气公司	管网掺氢示范	20
2022	韩国	天然气公司	工商业及居民用户终端设备燃料	20





天然气管道掺氢燃烧利用的工程验证



国际天然气掺氢示范项目汇总

类型	主体单位	地点	阶段	(计划) 投产时间	掺氢比	掺氢规模	氢气来源
城燃	国家电投集团有限公司	辽宁朝阳	运行	2019.9	10%	100 Nm3/h (掺氢)	电解水制氢
城燃	山西铭石煤层气利用股份有限公司	山西晋城	运行	2019.1	10%	600 Nm3/h (掺氢)	煤制氢
长输+城燃	宁国运集团	宁夏	设计	2021.12	6-20%	--	--
长输	国家石油天然气管网集团科学研究总院分公司	榆林	规划	2023	3%	600万方/小时 (掺氢)	电解水制氢
城燃	乌海凯洁燃气有限责任公司	乌海	施工	2022.4	5-20%	30000 Nm ³ /h (掺氢)	工业副产制氢
城燃	张家口鸿华清洁能源科技有限公司	张家口	设计	2021.11	0-20%	440 万方/年 (氢气)	--
城燃	上海飞奥燃气设备有限公司	上海浦东唐镇	设计	2022.6.1	5-20%	--	--
城燃	中国石油天然气管道工程有限公司	广东湛江	可研	2024	15.50%	470000 Nm ³ /h (掺氢)	电解水制氢
城燃	内蒙古科技厅	通辽	启动	-	5-20%	--	电解水制氢、工业副产氢
城燃	四川博能燃气	青白江	规划	2022	5-20%	--	--
城燃	深圳燃气	深圳	规划	-	5~20%	80 方/天 (氢气)	光伏制氢
HCNG	长岭县长润风电有限公司	长岭县龙凤湖	施工	2021.1	5-20%	1500 Nm ³ /h (氢气)	风电制氢
-	陕煤线掺氢可行性示范项目	陕西	规划	-	5%	--	--
燃气轮机	中国联合重型燃气轮机技术有限公司	湖北荆门	施工	2021.12	15-30%	--	--





富氢燃料气燃烧技术工程验证



某厂动力车间天然气项目（3t/h）

改造前：某进口燃烧技术

无FGR时100-120 30 mg/Nm^3

有FGR小于30 mg/Nm^3 但不稳定

改造后：清华技术

无FGR时 $< 40 \text{ mg/Nm}^3$ 稳定燃烧

有FGR时 $< 20 \text{ mg/Nm}^3$ 稳定燃烧



某炼油厂富氢化工副产气（45t/h）

低氮改造后：

清华技术 $30\sim 40 \text{ mg/Nm}^3 \text{ NO}_x$

（改造目标： 80 mg/Nm^3 ）



O ₂	2.62	%
CO ₂	8.75	%
CO	1	mg/m ³
NO	8	mg/m ³
NO ₂	0	mg/m ³
NO _x	12	mg/m ³
SO ₂	73	mg/m ³
T. Gas	---	°C
T. Air	24.8	°C
平均值	13:53:12	06.01.09
计算结束	CO	

某钢铁厂富氢燃气项目 （116MW超高温亚临界锅炉）

低氮改造后：

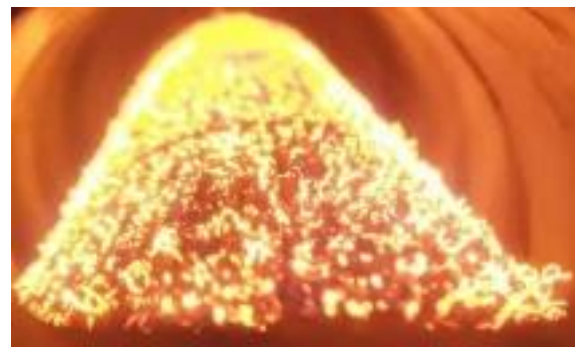
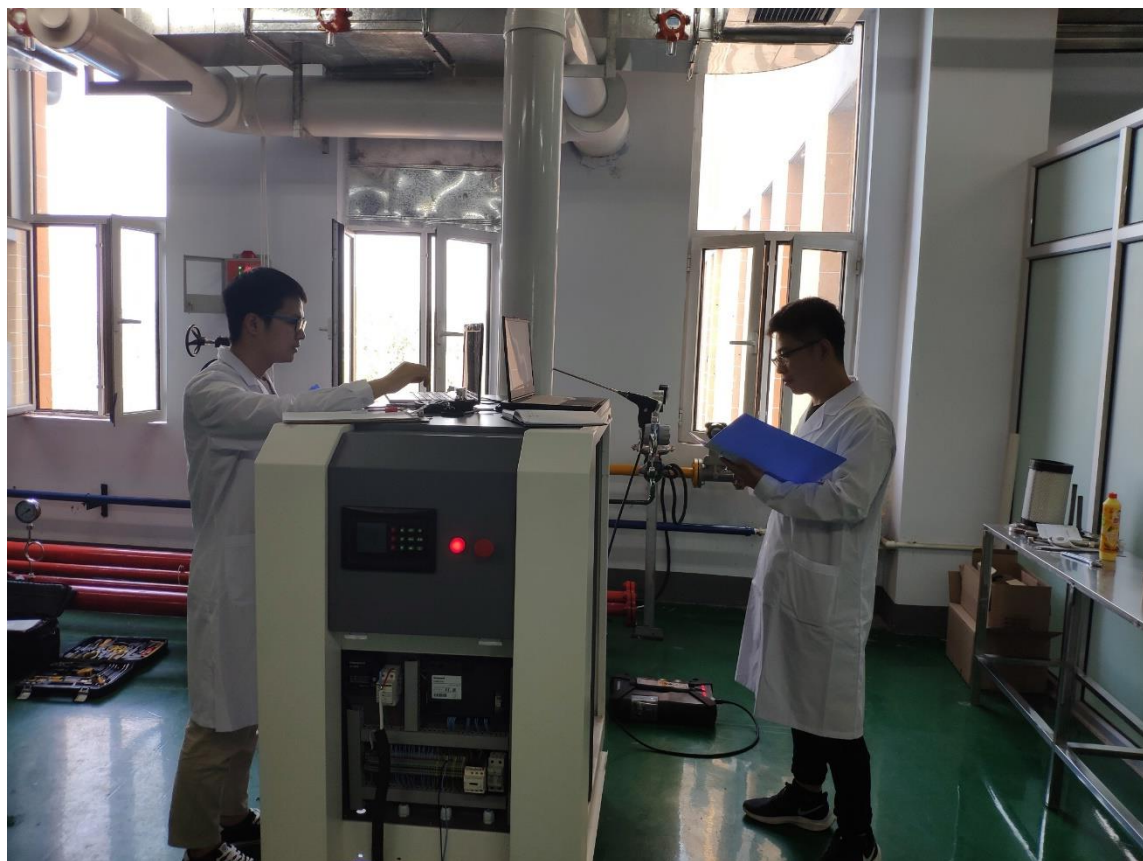
清华技术 $< 15 \text{ mg/Nm}^3$

（改造目标： 100 mg/Nm^3 ）

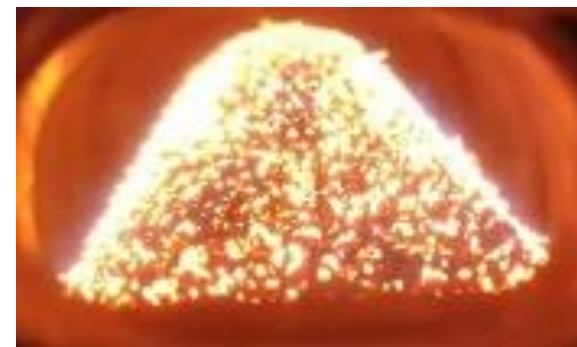




掺氢天然气燃烧技术工程验证



25%负荷, 20%掺氢比



50%负荷, 20%掺氢比



75%负荷, 20%掺氢比



100%负荷, 20%掺氢比

0.5 t/h (0.35MW) 热水锅炉掺氢实验工况: $\text{NO}_x < 30\text{mg}/\text{Nm}^3$

□ 掺氢比: 0~30%; 锅炉负荷: 25%~100%; 过量空气系数: 1.35~1.5;





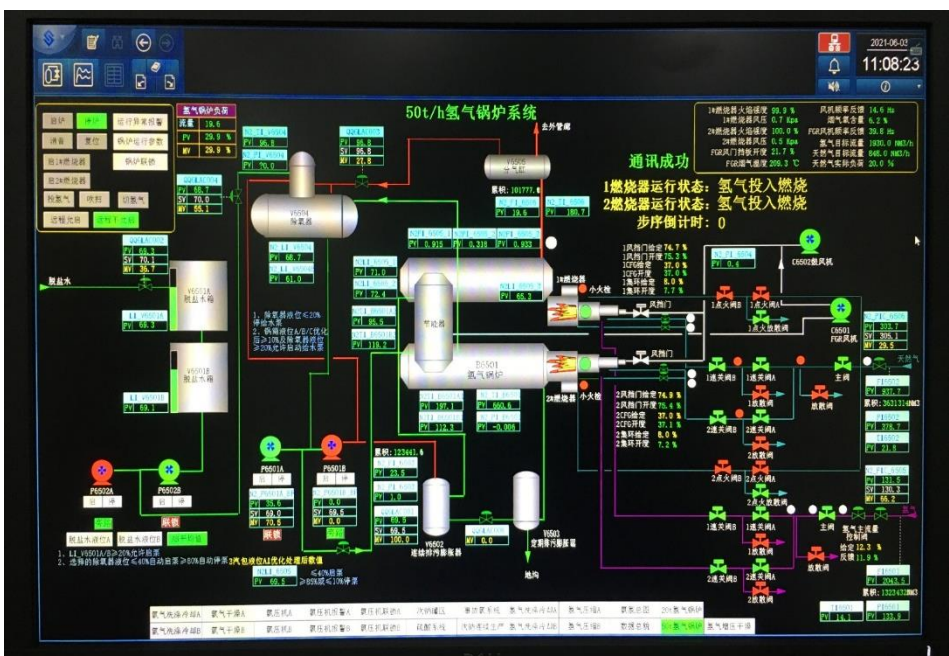
掺氢天然气锅炉燃烧技术工程验证

50 t/h掺氢燃气锅炉

- 额定蒸发量：50 t/h
- 额定工作压力：1.6 MPa
- 额定蒸汽温度：204 °C

20 t/h纯氢燃气锅炉

- 额定蒸发量：20 t/h
- 额定工作压力：1.02 MPa
- 额定蒸汽温度：192 °C



负荷	掺氢比 (%)	NOx排放@3.5%O ₂ (mg/Nm ³)
40%	71.42	25.42
60%	78.56	29.68
80%	84.03	35.48
100%	86.28	43.63

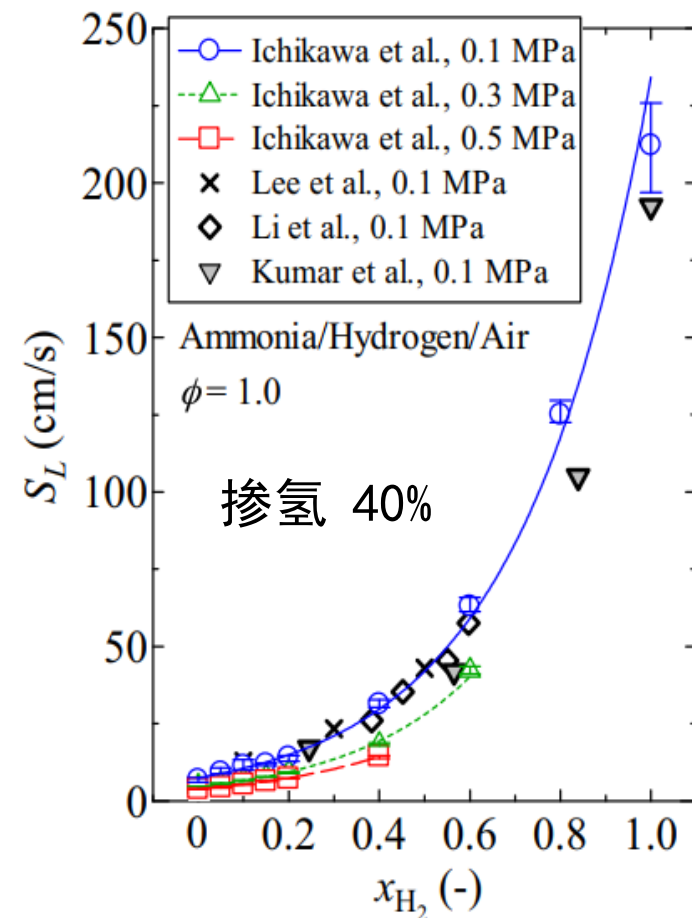
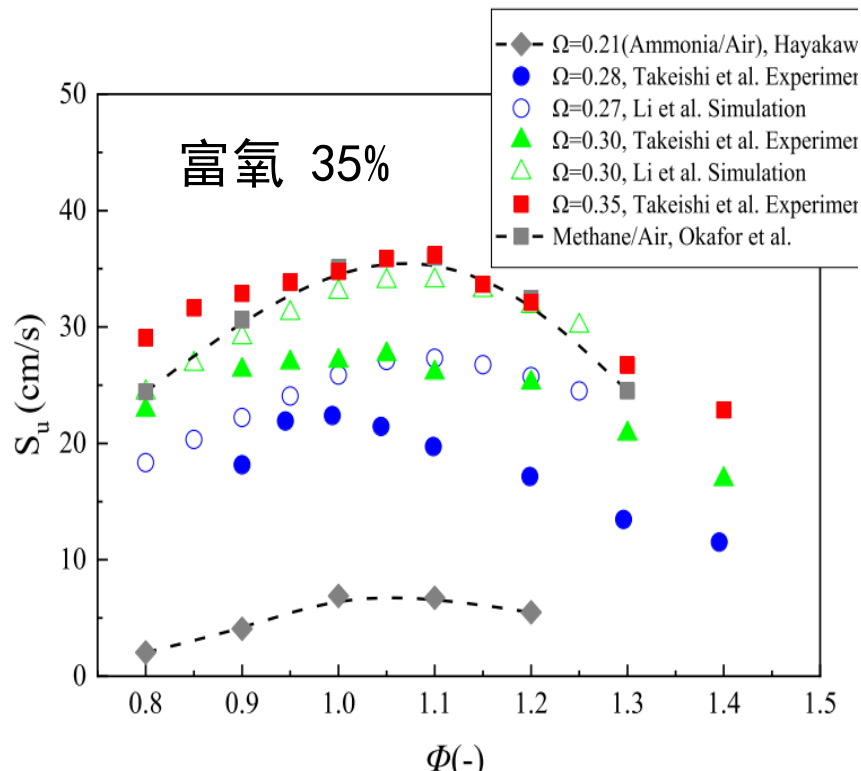
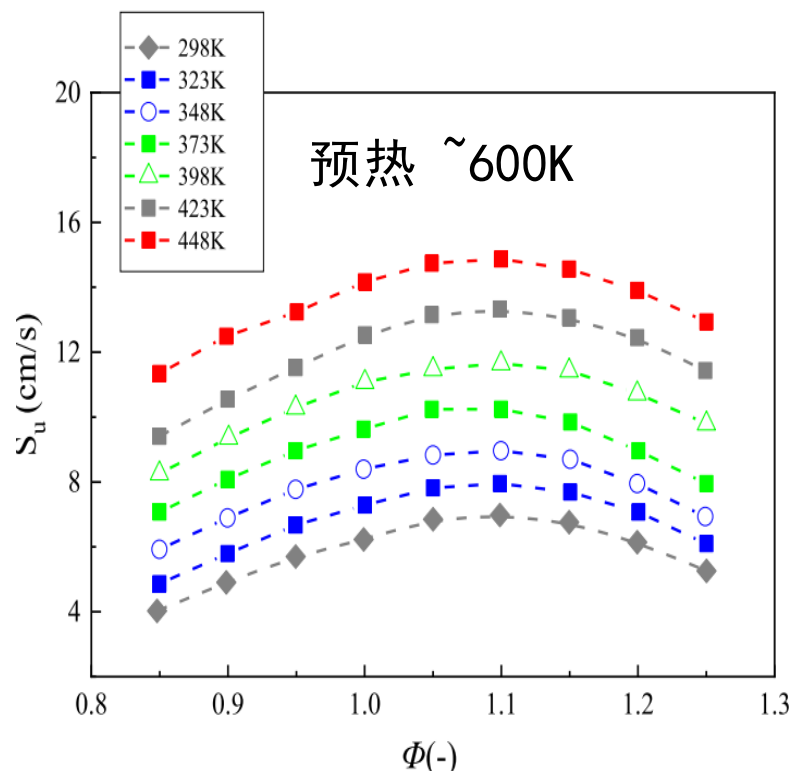




掺氨气体燃料燃烧组织方法

❖ 文献中改善氨燃烧活性的方法

- 氨的最高层流火焰速度($\sim 7\text{cm/s}$)远低于甲烷($\sim 35\text{cm/s}$)@NTP, 导致燃烧易熄火, 燃烧不完全。

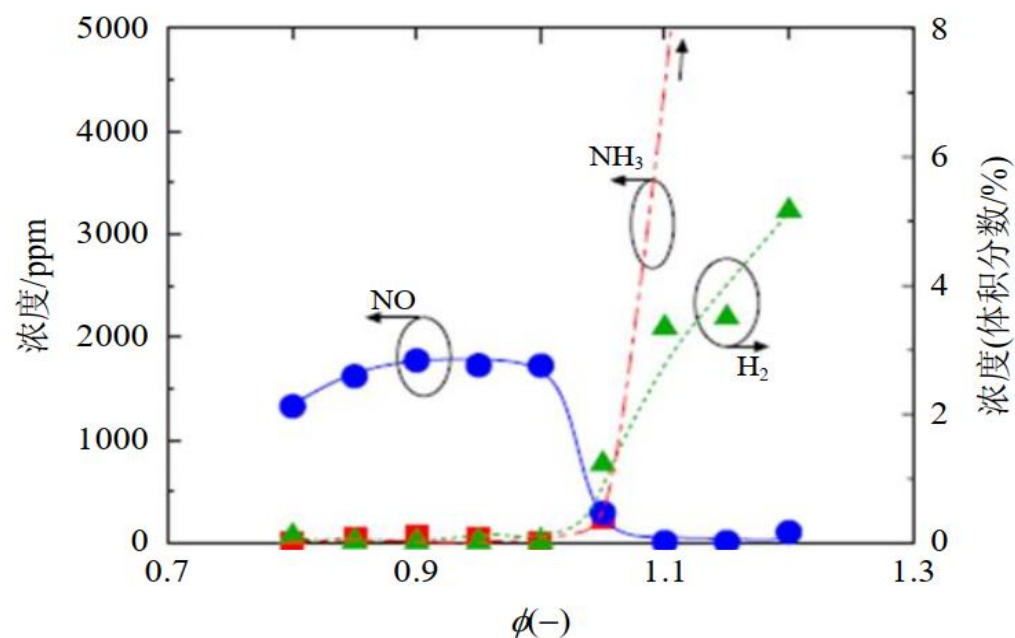




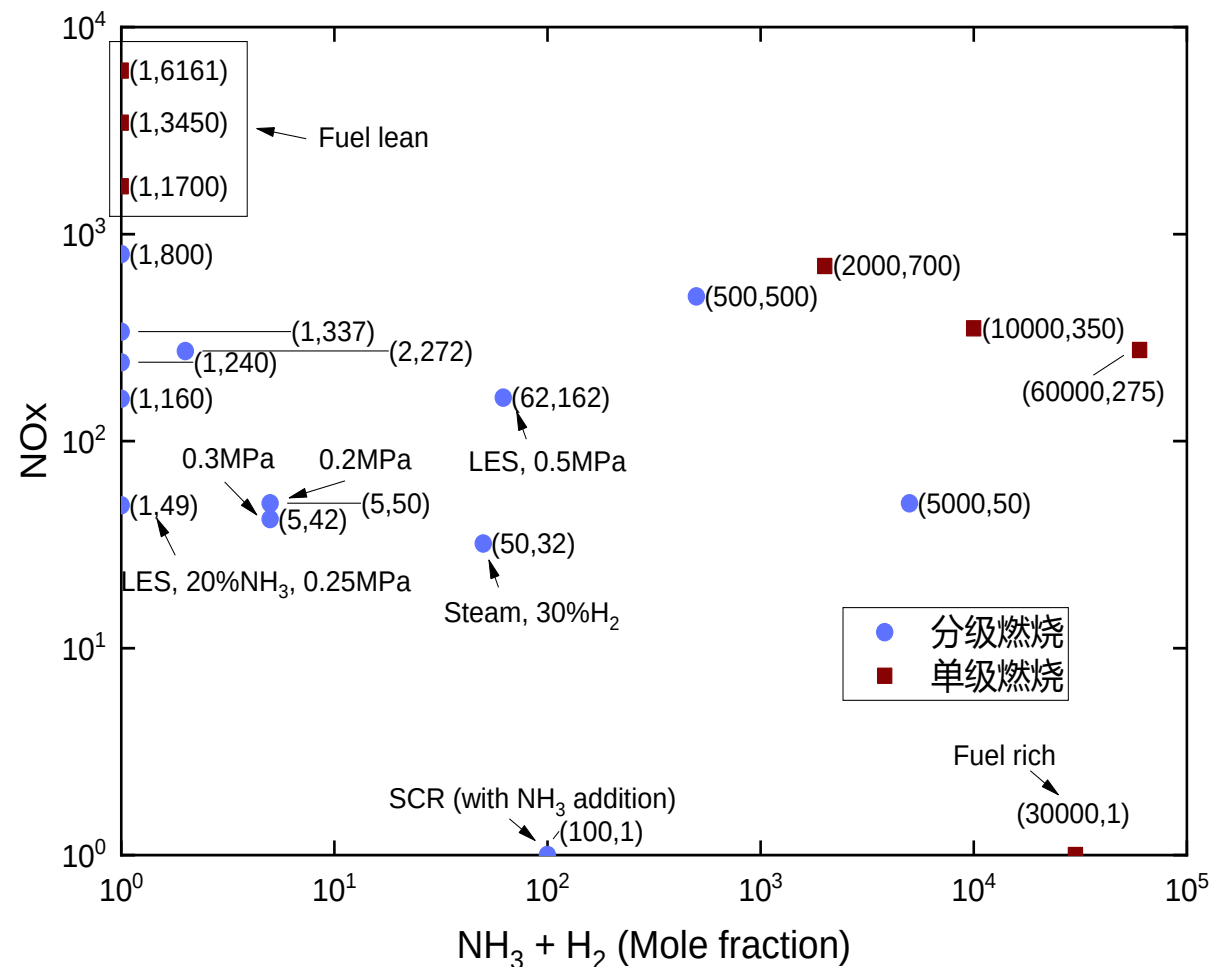
掺氨气体燃料燃烧组织方法

❖ 氨燃烧较高的NO_x排放问题

- 贫燃: NO_x排放极高
- 富燃: NO_x低, 但NH₃和H₂高



氨燃烧的NO/NH₃/H₂排放
[Hayakawa et al., 2017]



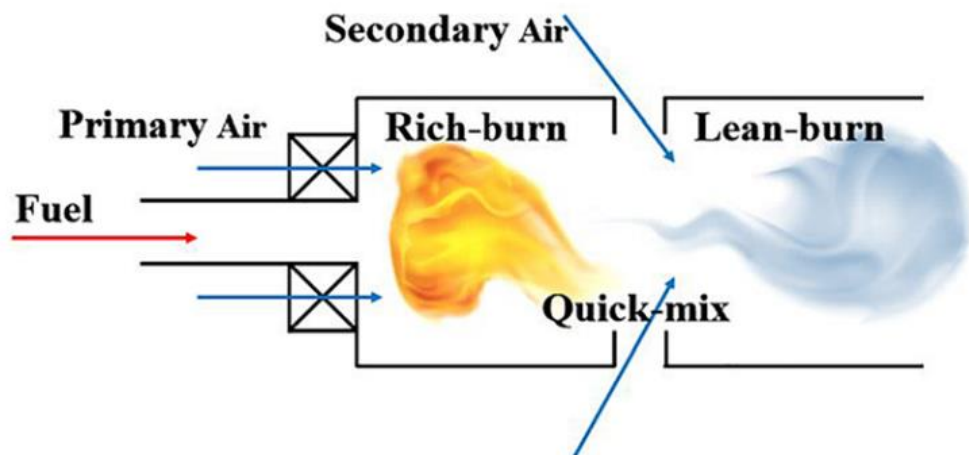
不同燃烧方式下NO_x和NH₃/H₂排放情况





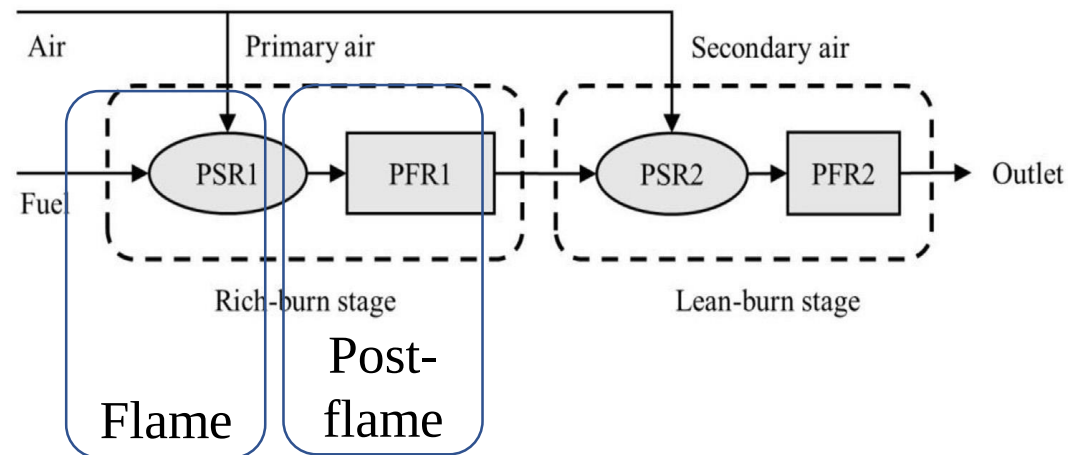
氨的低氮燃烧组织方法

❖ 氨的RQL（富燃-快速混合-贫燃）燃烧方式

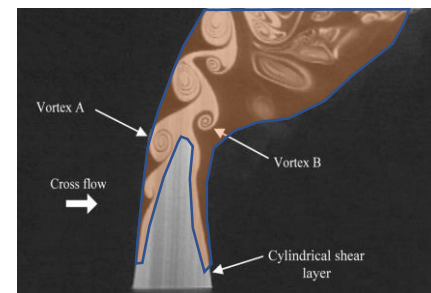
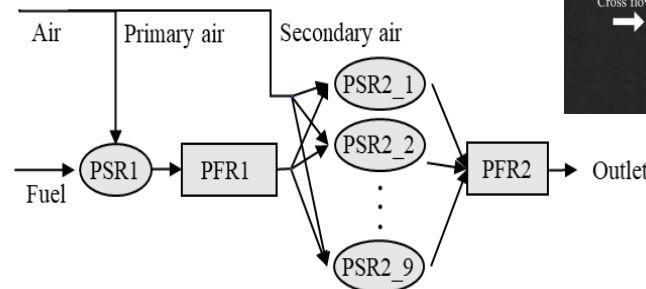


分级燃烧方式示意图[Liu et al. 2020]

反应动力学网络方法数值模拟



CRN模型示意图



- ❑ 一级：富燃抑制 NO_x 生成，部分 NH_3 、 H_2 未燃
- ❑ 二级：贫燃燃尽剩余燃料， NH_3 的燃烧会新产生 NO_x
- 最优当量比：最低总 NO_x （一级 $\text{NO} + \text{NH}_3$ 最低）

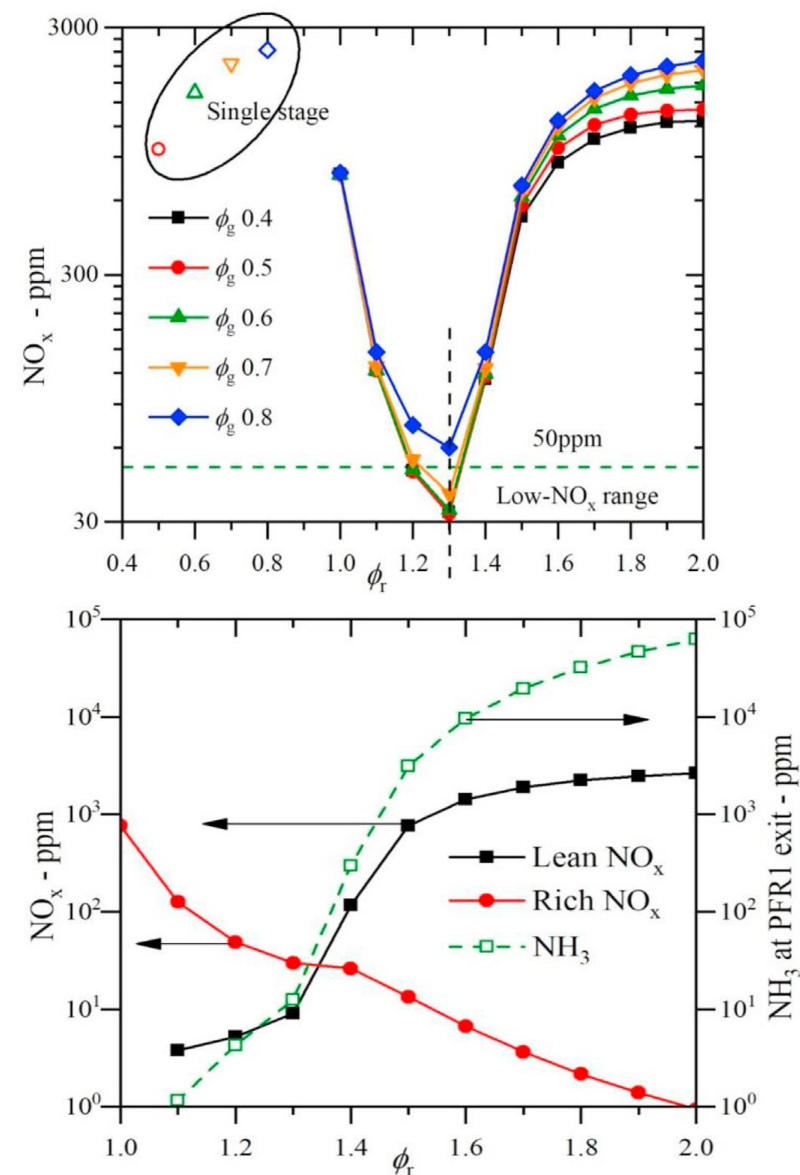




氨的低氮燃烧组织方法

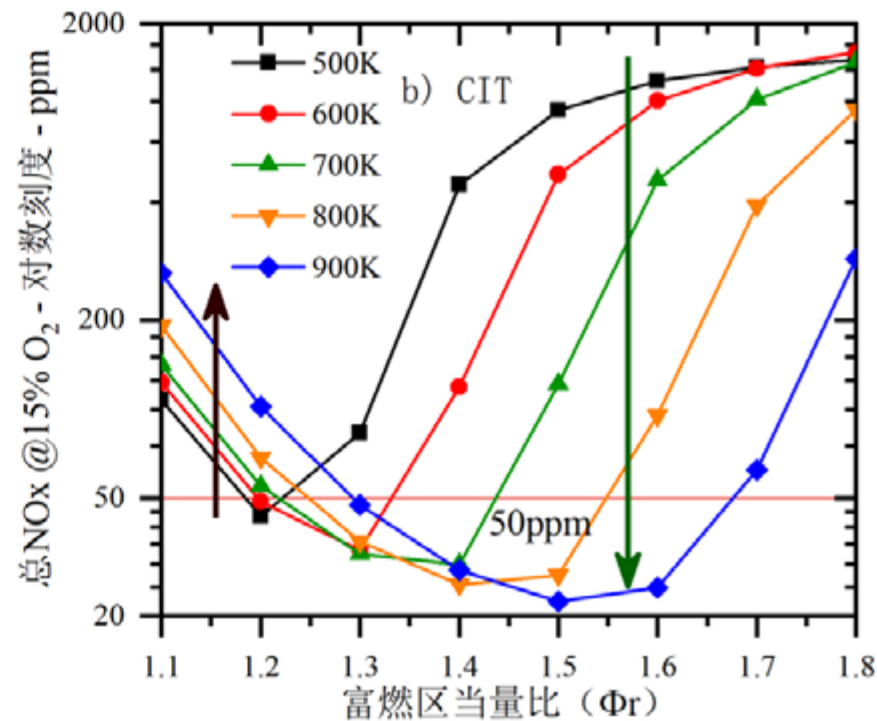
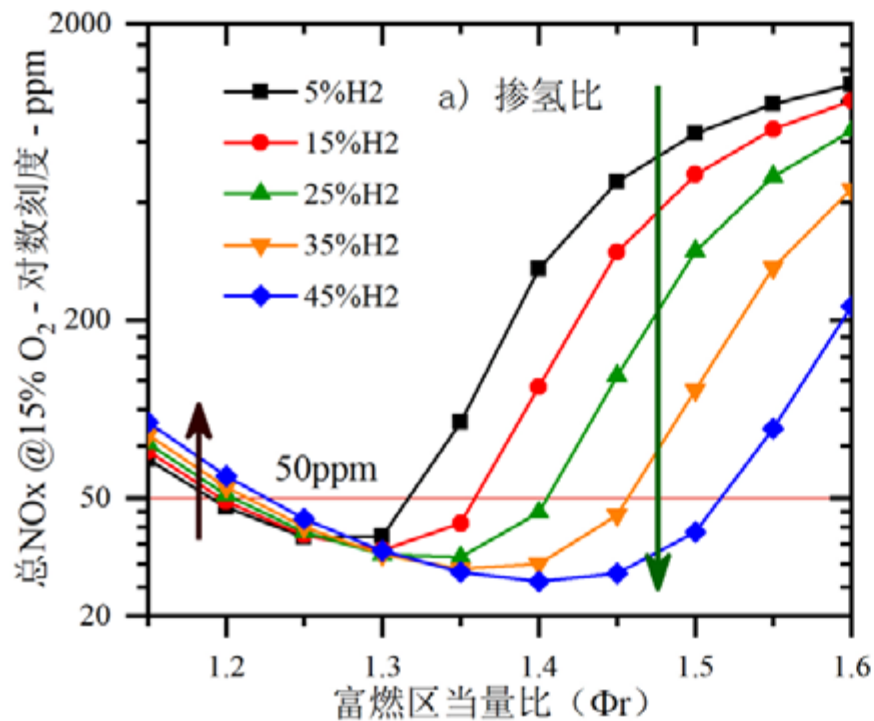
当量比

- NO_x 大体成V形变化，最优 Φ_r 下 NO_x 远低于单级燃烧；
- Φ_r 比 Φ_g 更显著的影响 NO_x 排放：最优 Φ_r 不变，低 NO_x 区附近， Φ_g 影响小。
- 变工况时一级燃料空气同时控制；二次空气可灵活调整。
- 较低 Φ_r ：Rich区 NO_x 主导；较高 Φ_r ：Lean区 NO_x 主导；
- Lean NO_x 与Rich NH_3 变化高度一致；
- Rich NH_3 Rich NO_x 显然由 Φ_r 决定，仅当Rich NH_3 很多，二次空气才影响 NO_x 。





❖ 引入掺氢或者预热的稳燃方案

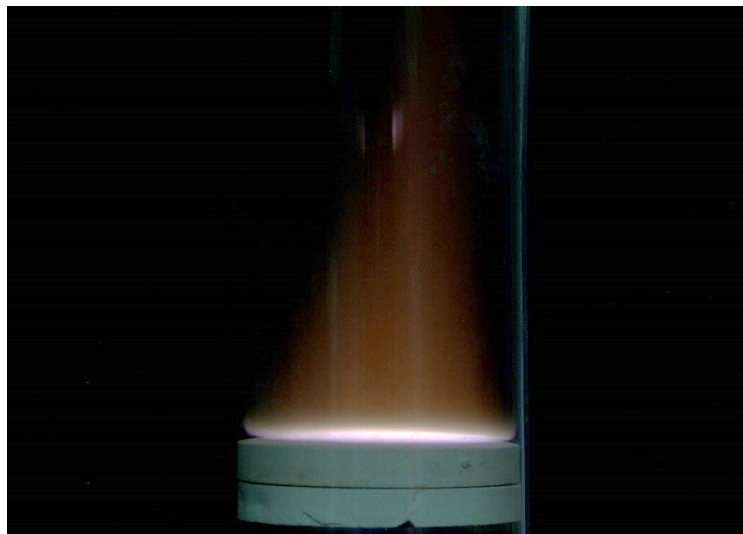


- 随 Φ_r 增大, NO_x先下降再上升;
- 掺氢增多或预热温度升高: 最优 Φ_r 增大, 低NO_x区扩大, 最低NO_x有所下降。

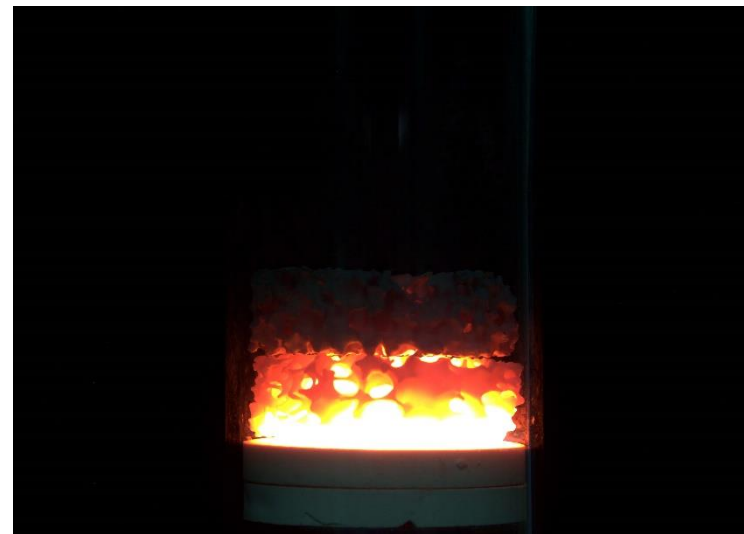




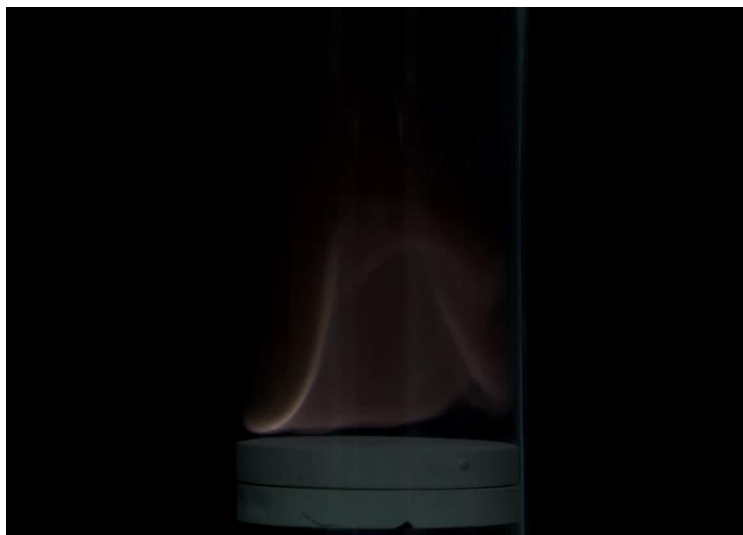
氨的多孔介质燃烧组织方法



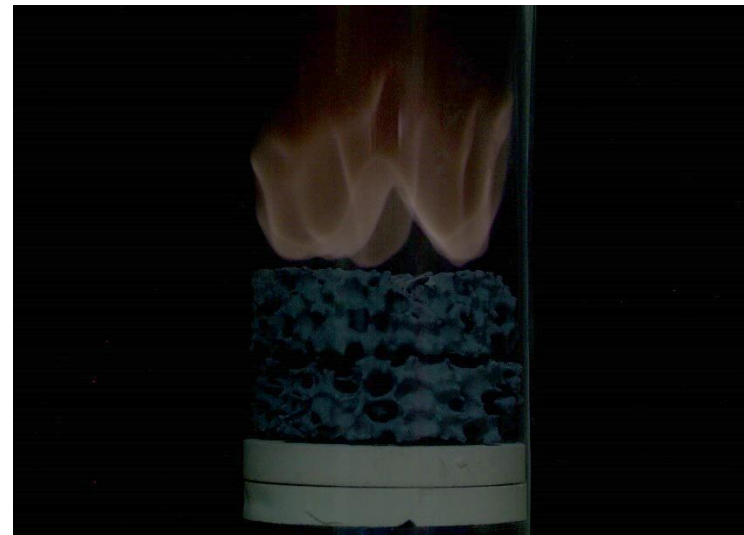
$\text{NH}_3 = 50\% \quad \phi = 1$



$\text{NH}_3 = 50\% \quad \phi = 1$



22 $\text{NH}_3 = 50\% \quad \phi = 0.85$



$\text{NH}_3 = 50\% \quad \phi = 0.83$

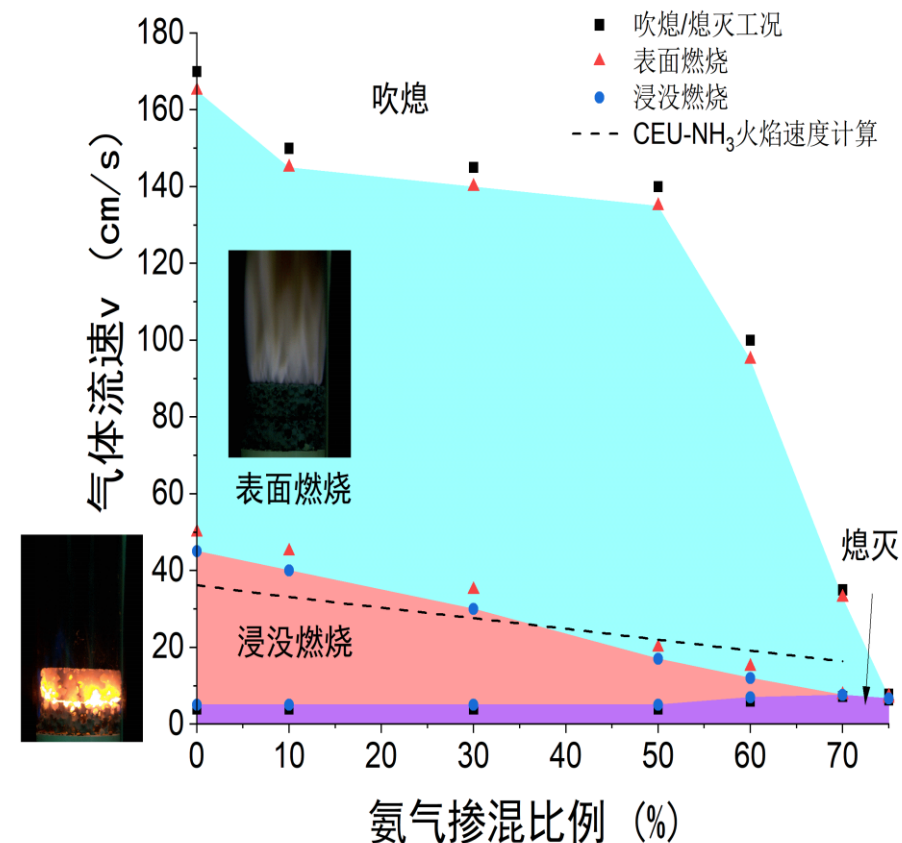


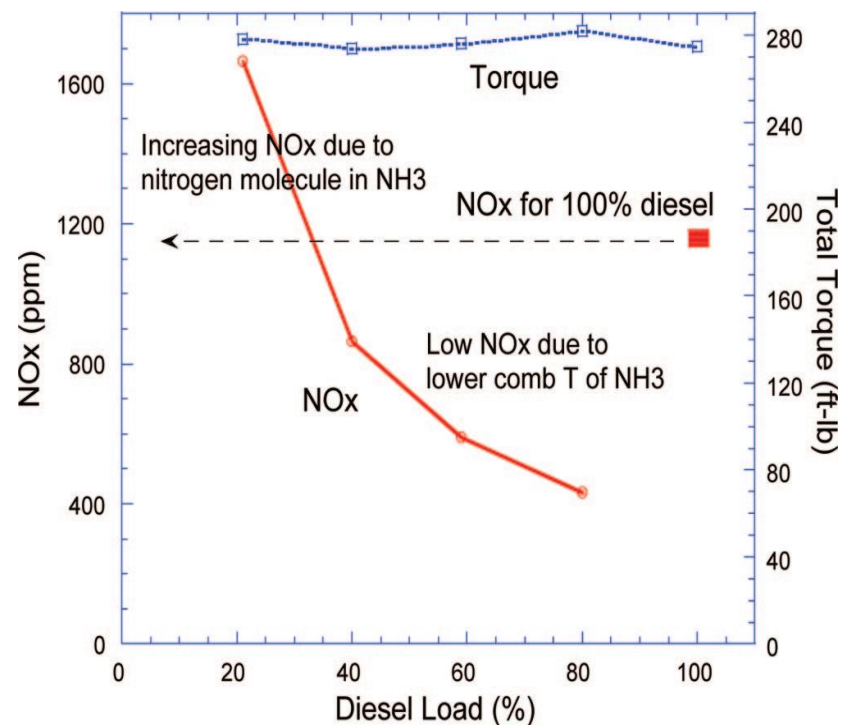
图1. 当量比 $\phi = 1$ ，不同混合比例的 NH_3/CH_4 在多孔介质燃烧器中随流速变化形成的不同燃烧状态



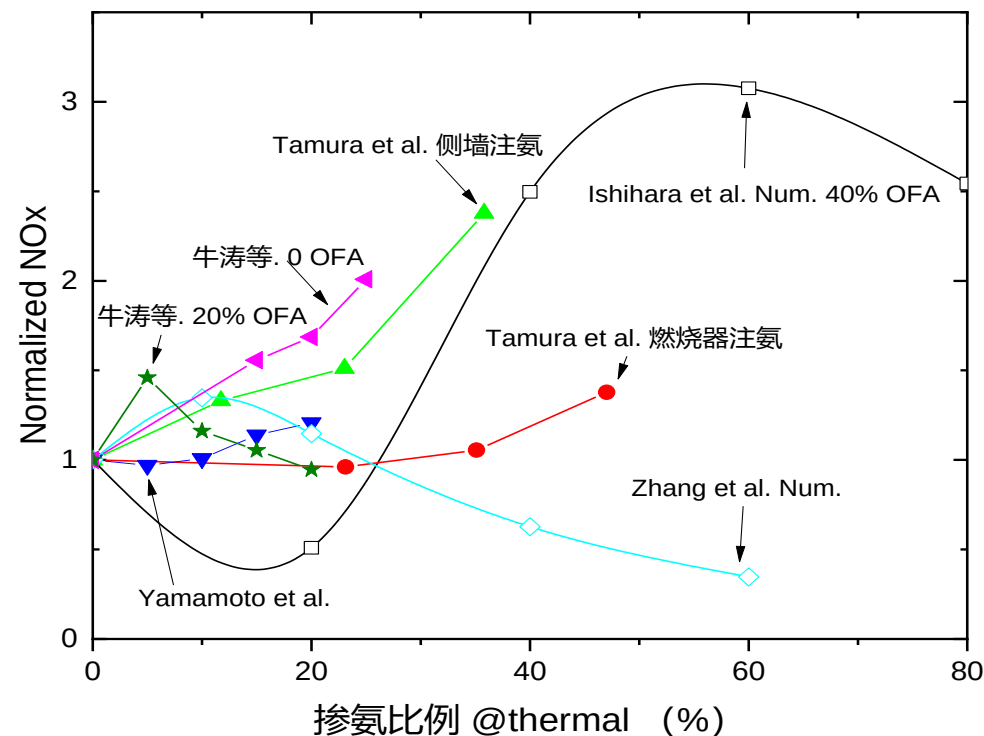


氨/掺氨燃烧技术的工程验证

- ❖ 氨/掺氨在内燃机、船用燃气轮机中的研究是近些年的学术热点
- ❖ 日本煤电机组的降碳方案的重要选择之一：煤-氨混烧
- ❖ 中国国能投烟台龙源的40MW氨煤混烧工程规模实验引发了业界广泛关注



氨/柴油内燃机燃烧
[Reiter et al., 2017]



国内外氨煤混烧研究数据汇总
[Reiter et al., 2017]





掺氢/掺氨技术所面临的机遇和挑战

❖ 掺氢燃烧

- ✓ 管道掺氢技术的发展对大规模天然气掺氢/煤掺氢技术提供了推动力
- ✓ 在气体燃烧 $30\text{mg}/\text{Nm}^3\text{NO}_x$ 标准下，热力型氮氧化物的控制是掺氢燃烧需要考量的关键因素
- ✓ 掺氢燃烧的相关标准体系的建立是技术落地的重要先决条件

❖ 掺氨燃烧

- ✓ 双碳目标的提出极大地提升了氨作为能源的潜在价值
 - ✓ 氨燃烧关键技术尚需进一步的开发和验证（稳燃技术、 NO_x 控制技术 etc）
 - ✓ 氨作为燃料的标准建立需要更多实践经验来支撑
- ❖ 无论是掺氢或掺氨，在当前的技术和市场条件下，其经济性仍需进一步的分析论证

