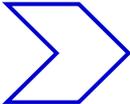




燃煤机组低碳发电技术研究

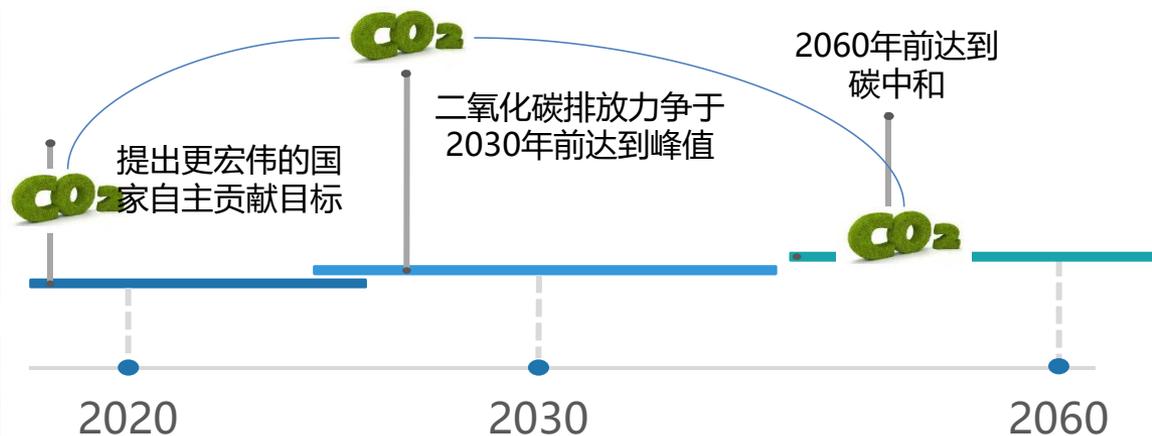
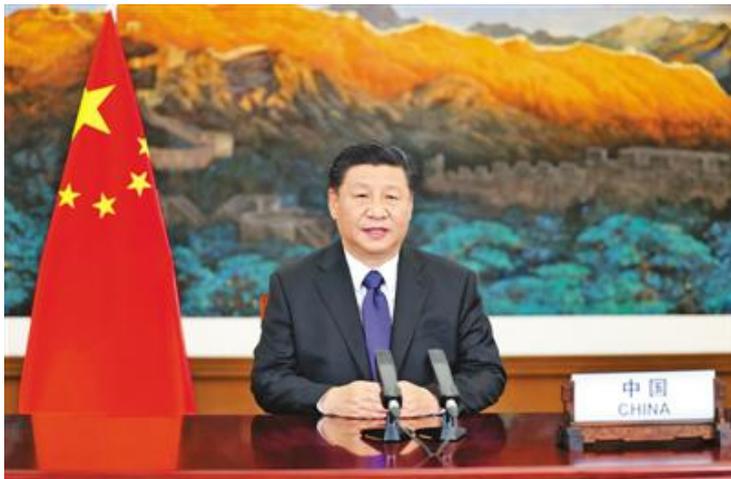
王志超 博士/高级工程师
西安热工研究院有限公司
2022年4月24日

目 录

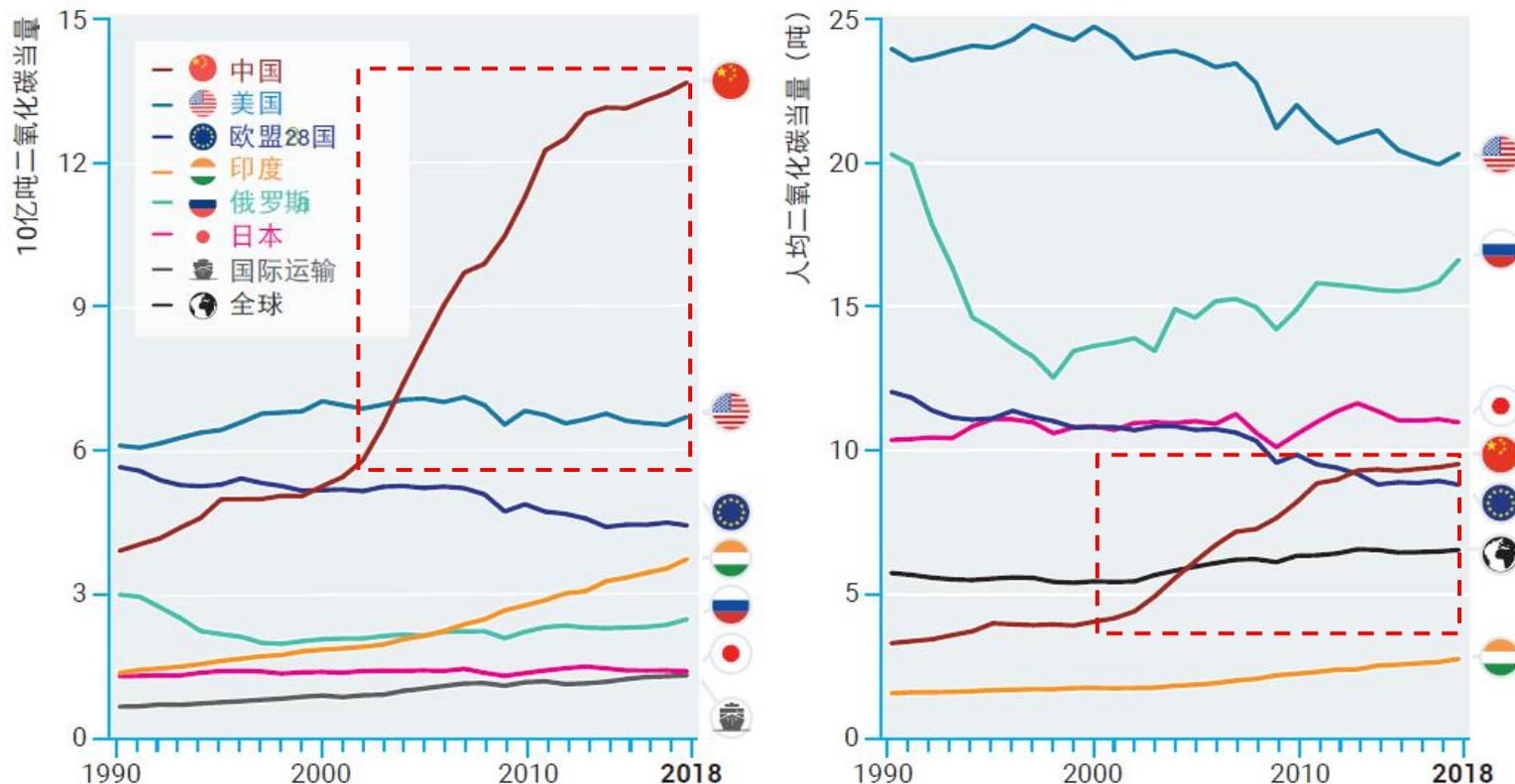
- 
- ① 碳中和背景下火电机组面临的挑战
 - ② 氨作为无碳燃料的优劣
 - ③ TPRI 氨混燃燃烧技术进展
 - ④ 小 结

碳达峰、碳中和

- 巴黎协定长期目标：确保全球平均气温较前工业化水平升高控制在 2°C 之内，并为升温控制在 1.5°C 之内付出努力
- 2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重宣布“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于**2030年前达到峰值**，努力争取**2060年前实现碳中和**”
- 2021年3月15日，习近平总书记在中央财经委员会第九次会议中强调“要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局，拿出抓铁有痕的劲头，如期实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和的目标”，指出“要构建**清洁低碳安全高效的能源体系**，**控制化石能源总量**，**着力提高利用效能**，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。”



全球CO₂排放现状



基于绝对数量（左）和人均数量（右）的主要温室气体排放源

- 2018年，全球温室气体排放量达到了**553亿吨**二氧化碳当量；化石能源使用和工业过程达到**375亿吨**二氧化碳当量，占**70%**；2019增幅趋缓，仍在不断增加
- 美国累计近4000亿吨，约占全球25%，是中国2倍；EU-28累计3530亿吨，约占全球22%

短期内化石能源的主体地位难以撼动

主要国家与组织能源结构

	原油 %	天然气 %	原煤 %	核能 %	水力发电 %	再生能源 %	合计 Mtoe	清洁能源 %
中国	19.6	7.4	58.2	2.0	8.3	4.5	3273.5	14.8
美国	40.0	30.5	13.8	8.4	2.8	3.7	2300.6	14.9
欧盟	36.2	23.0	15.0	10.3	4.8	7.1	2050.7	22.2
世界	34.1	23.9	27.2	4.4	6.8	4.0	13864.9	15.2

- 全球一次能源的85%，发电量的64%(其中煤占38%，天然气占23%)仍依赖于化石能源
- 2018年化石能源占比：中国85.2%、美国85.1%、欧盟77.8%

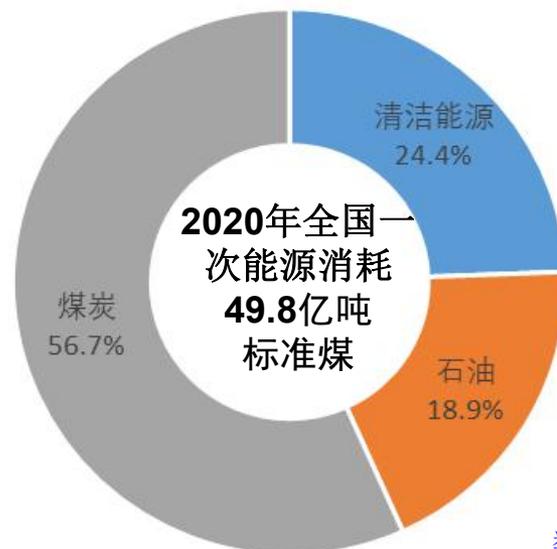
能源低碳化是国家重大需求



主要经济体自主减排目标

经济体	减排目标	基准/年	达标年
中国	-60-65%	/GDP(2005)	2030
美国	-26-28%	2005	2025
EU-28	-40%	1990	2030

全国一次能源消费结构



数据来源：国家能源局

- 排放现状：~100亿吨，>美国+EU-28
- 减排承诺：2030前达峰，2060碳中和
- 制约条件：能源结构以煤为主(2020，56.7%)
- 实现途径：“能源革命”

**能源低碳化是世界潮流，要实现本世纪后半叶零碳排放的愿景，必须要
新能源 + 化石能源低碳利用**

我国能源结构预测

- 2020年到2030年，非化石能源消费占比将从约15.8%增长到26.0%，传统能源中的煤炭消费占比将从56.7%降为44.2%

图 12: 2020-2030 年中国一次能源消费量预测 (亿吨标准煤)

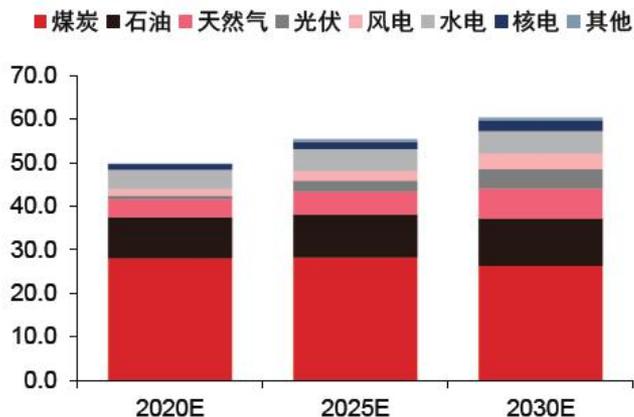
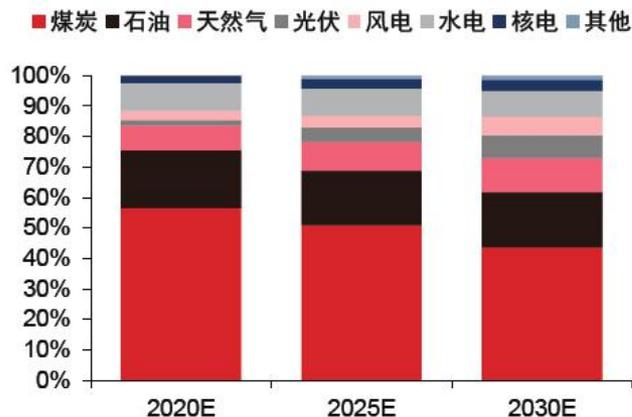
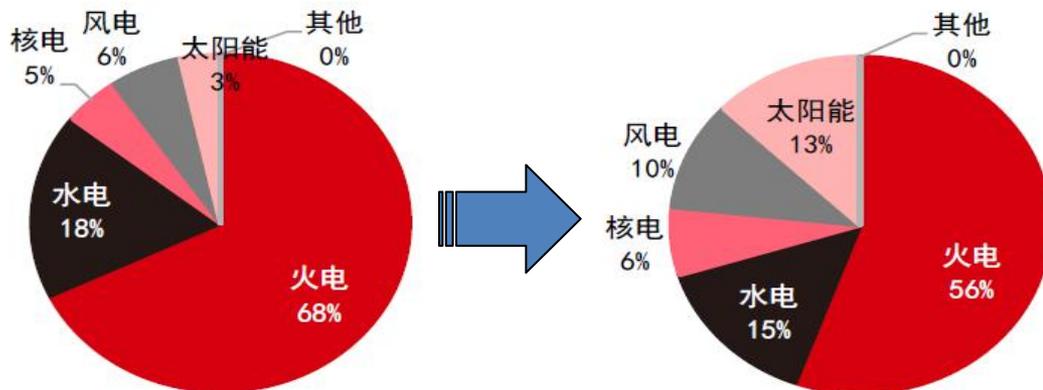


图 13: 2020-2030 年中国一次能源消费结构预测 (%)



- 2030年前火电发电量占比仍超56%，火电低碳化任重道远

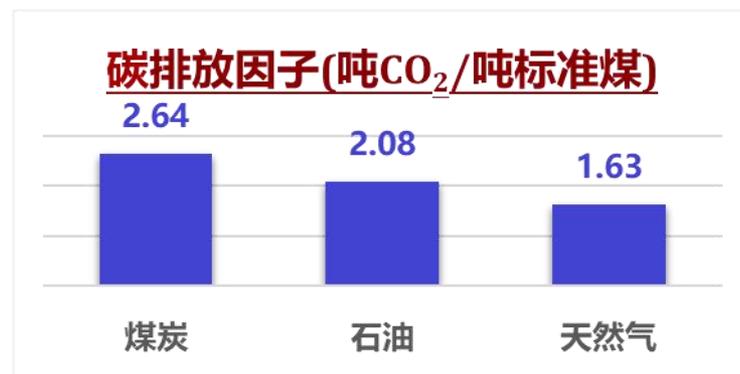
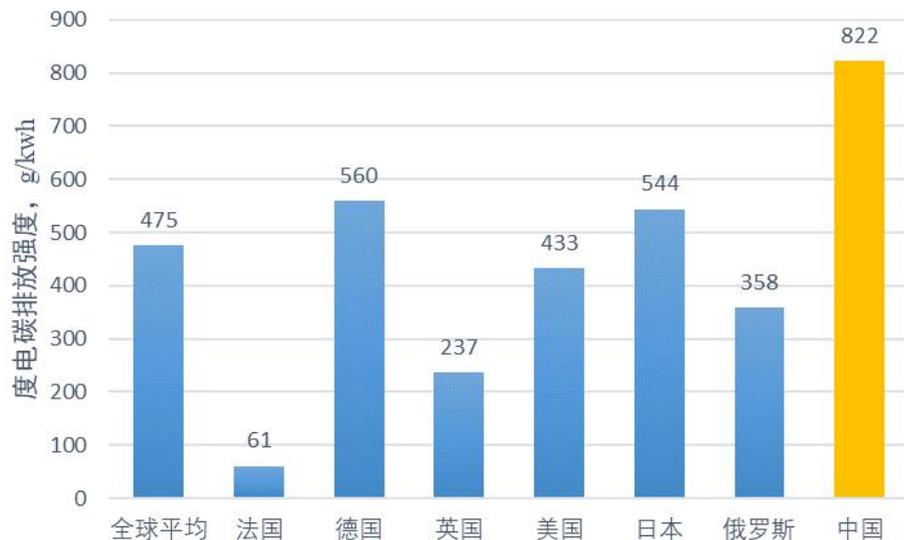


2020年发电量占比 (%)

2030年发电量占比预测 (%)

火电机组碳排放强度高

- 全球电力行业CO₂排放量达到130亿吨，占能源相关CO₂排放总量的38%左右



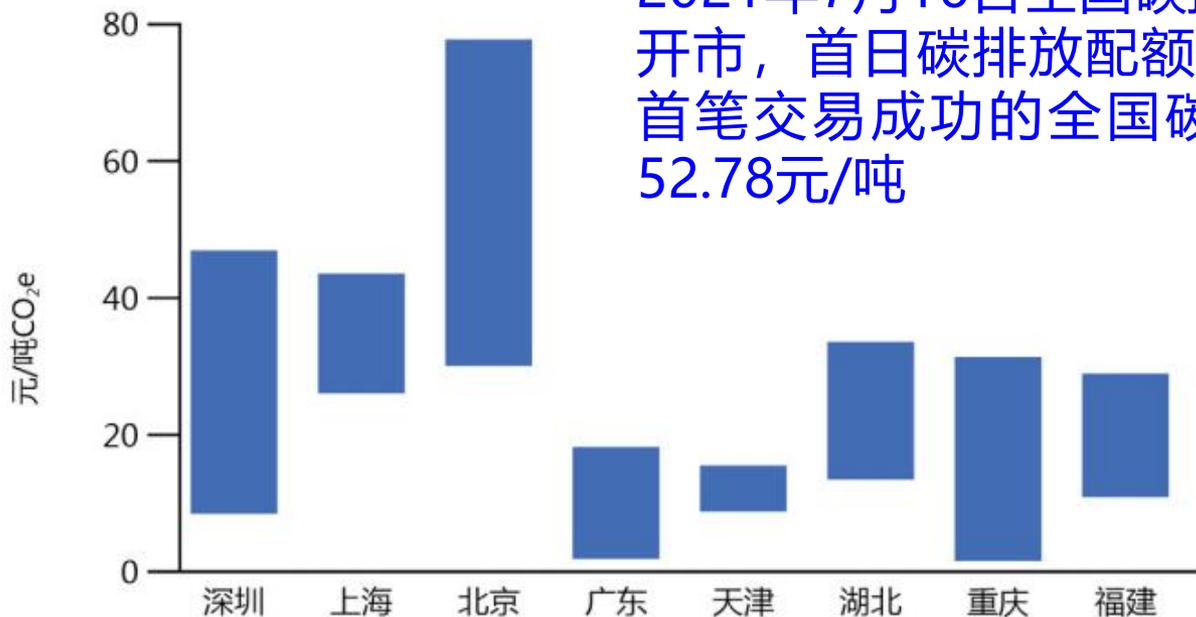
- 我国控制温室气体排放工作方案要求：大型发电集团单位供电二氧化碳排放控制在550g/kwh以内

中国电力行业碳排放量仍相对较高

单位国内生产总值二氧化碳排放2030年要比2005年下降60-65%

碳排放成本越来越高

中国地方碳交易市场碳价



2021年7月16日全国碳排放交易市场开市，首日碳排放配额价48元/吨，首笔交易成功的全国碳交易价格为52.78元/吨

2019年中国地方碳市场的价格区间

- 截至2020年10月10日，一二级现货市场累计成交4.25亿吨，成交额98.6亿
- 2020年中国平均碳价为49元/吨CO₂计算，若使用无碳燃料进行替代，每吨标煤对应的热量可以多出18.85元的碳减排收益
- 预期全国碳价在2025年达到71元/吨CO₂，2030年达到93元/吨CO₂，2050年到167元/吨CO₂

火电机组低碳化技术途径

- 对于在我国能源结构中处于“压舱石”的火电机组（煤电、气电），如何在确保电网安全性、深度参与灵活性调峰等条件下实现减煤减碳，是必须要深入研究的课题

✓ 途径一：前端处理

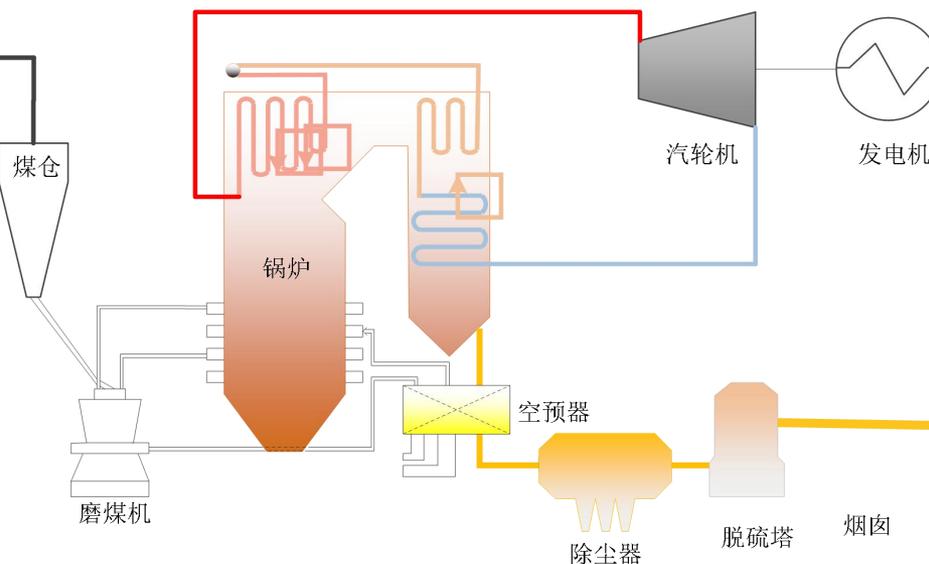
燃用无碳燃料

(1) 生物质类燃料

- 季节性
- 难计量
- 成本高

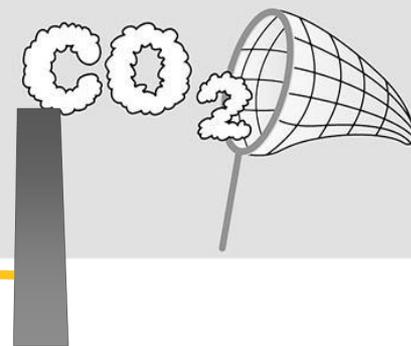
(2) H₂、NH₃等替代

燃料



✓ 途径二：尾端处理

CCUS

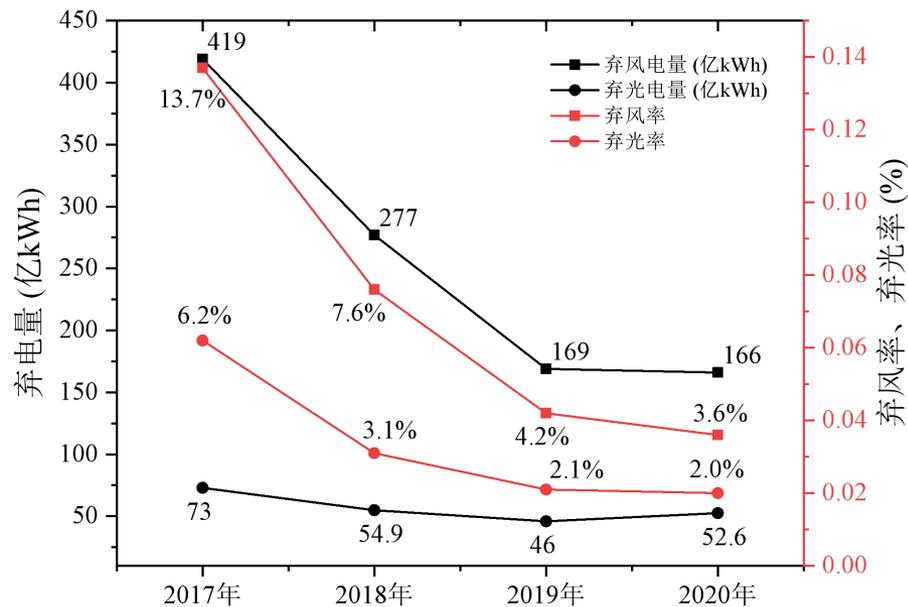


目 录

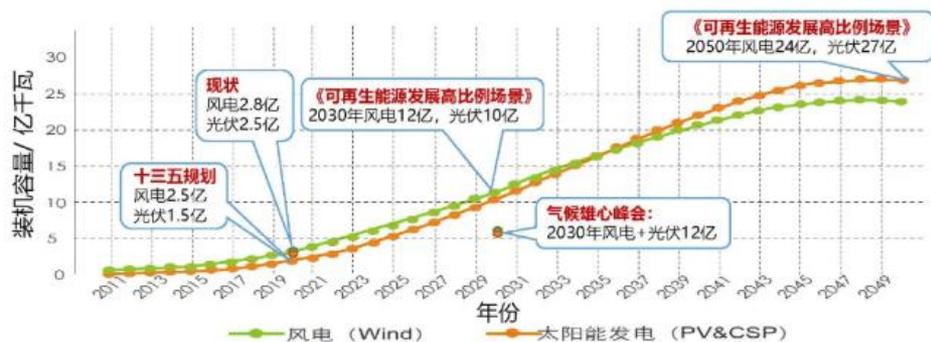
- ① 碳中和背景下火电机组面临的挑战
- ② 氨作为无碳燃料的优劣
- ③ TPRI 氨混燃燃烧技术进展
- ④ 小 结

弃电储能

- 风电、光伏等可再生能源有明显的季节性、时段性，其发电比重的逐步提升会增大电力供应的波动性



2017~2020年弃风、弃光情况



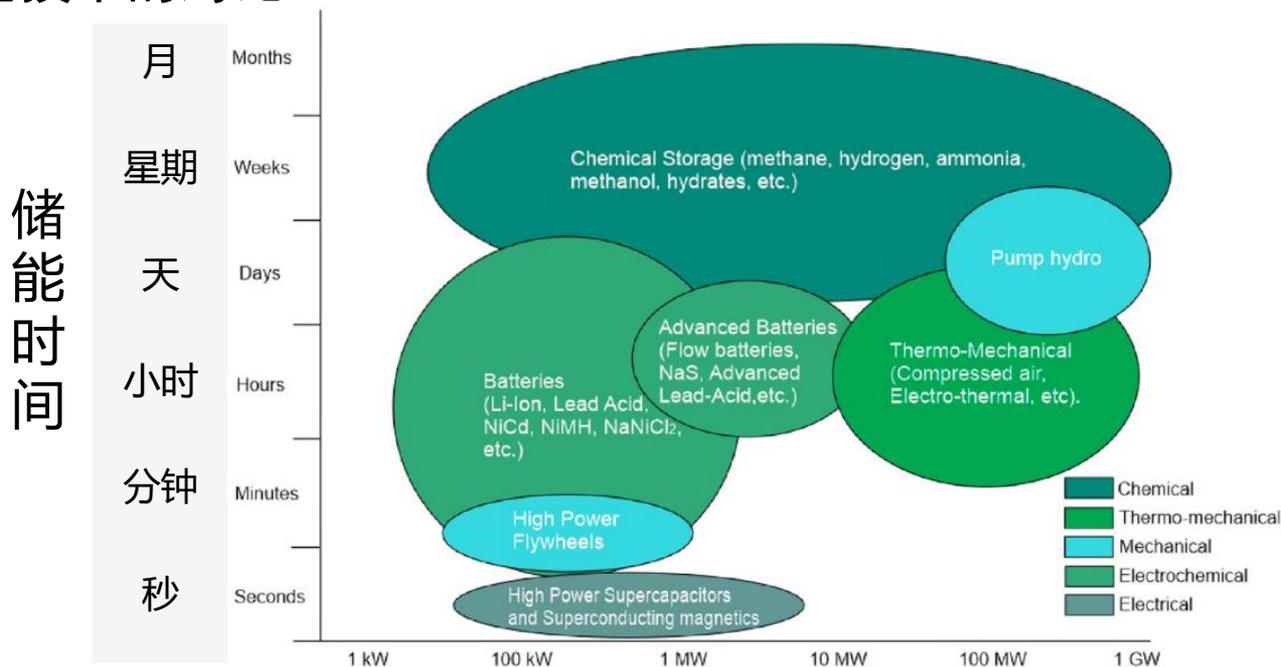
风光电装机增长预测

统计年份	容量/千瓦	非水可再生能源电量占比%		含水电可再生能源电量占比%	
		整体	局部	整体	局部
2020	风2.8亿; 光2.5亿; 水3.7亿	9.54	20	27.76	90
2030	基本方案	>16	>30	>33	>40
	高方案	>30	>50	>50	>60
2050	基本方案	>25	>50	>40	>60
	高方案	>60	>90	>80	>95

- 实现风-光-火-储系统能级匹配，是构建新型电力系统的发展趋势

氢类燃料是理想的储能物质

不同储能技术的对比



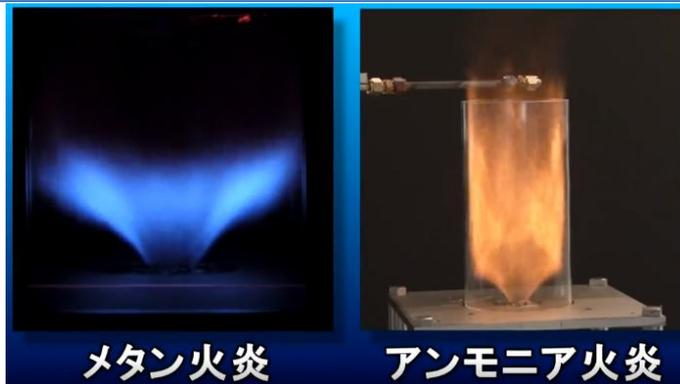
- 抽水蓄能运用于水电
- 压缩空气储能对地理条件要求高、飞轮储能时间太短，二者都有其特定应用场景
- 电化学储能只在分布式能源、微电网中有优势，在电站规模（MW级）应用优势不大
- 化学储能的方法能够应用于微电网、大电网，储能时间几乎没有限制

储氢：电解水制氢将风电、光电转化为氢能

氨是良好的氢载体

■ 氨作为燃料的优势

- 可再生清洁无碳燃料，无温室气体排放
- 能量密度高，热值18.8MJ/kg，与化石燃料相当
- 液化压力低，仅1.03MPa，很容易液化
- 每年约有1.8亿吨NH₃被生产和运输，储存和运输成熟可靠
- 良好的氢载体和替代燃料



NH₃与H₂、CH₄理化特性

理化特性	单位	液氨NH ₃	液氢H ₂	CH ₄
低位体积热值	MJ/m ³	14.3	10.8	35.9
低位质量热值	MJ/kg	18.8	121	50
单位体积储氢量	kg H ₂ /m ³	121	70.8	
常压液化温度	°C	-33.4	-253	-161
常温液化压力	MPa	1.03	70	25

- 我国 35MPa碳纤维复合瓶
- 日本 70MPa全复合轻质纤维缠绕储罐，H₂质量密度5.7%

氨是良好的氢载体

- 氨的**压缩、储运成本远低于**氢气，半年储氢成本0.54\$/kg H₂、14.95\$/kg H₂
- 氨作为燃料的**价格低**，折算天然气成本为2.67元/m³--工业天然气3元/m³
- 氨制备途径广阔

沙特NEOM “HyLIOS”项目

先锋创新项目——全球氢能市场的重大绿氢项目



利用氨燃料实现火电机组减煤降碳

■ 开发并利用氨的高效低污染燃烧技术可以成为解决化石能源替代、实现火电机组降低碳排放的有效途径之一

燃料	灰氨	绿氨 (富余电力)	绿氨 (电网电)	灰氨	绿氨 (富余电力)	绿氨 (电网电)
低位热值 (GJ/t)	121	121	121	18.8	18.8	18.8
生产成本 (元/t)	8000	10000~10800	27000~29500	1600	2180	4900
储运成本 (元/t, 100km)	8660	8660	8660	150	150	150
储运成本 (元/t, 500km)	20180	20180	20180	350	350	350
单位热值生产成本 (元/GJ, 不包含储运)	66	83~89	223~244	85	116	261
单位热值使用成本 (元/GJ, 包含储运100km)	138	154~161	295~315	93	124	269
单位热值使用成本 (元/GJ, 包含储运500km)	233	249~256	390~411	104	135	279
计入2020年碳减排收益的单位热值 总成本 (元/GJ)	>185	194~200	334~355	>98	123	267
计入2030年碳减排收益的单位热值 总成本 (元/GJ)	>185	186~193	327~348	>98	117	261
计入2050年碳减排收益的单位热值 总成本 (元/GJ)	>185	174~181	315~335	>98	107	251

氨燃烧面临的技术难题

燃料	液氨 (NH ₃)	液氢 (H ₂)	甲基环己烷 (MCH)
常压下液化温度 (1个大气压)	-33.4℃	-253℃	101℃
常温下液化压力 (25℃)	1.03MPa	70MPa	0.0075MPa
单位质量储氢率 (%)	17.8	100	6.16
单位体积的储氢量 (kg H ₂ /m ³)	121	70.8	47.3
提氢耗能 (kJ/mol H ₂)	30.6	0.907	67.5

燃料	氨 (NH ₃)	氢 (H ₂)	甲烷 (CH ₄)
最大层流火焰速度 (m/s)	0.07	2.91	0.37
火焰极限 (当量比)	0.63~1.40	0.1~7.1	0.5~1.7
最小点火能量 (MJ)	8.00	0.02	0.30
最低着火温度 (℃)	650	520	630

氨的优势

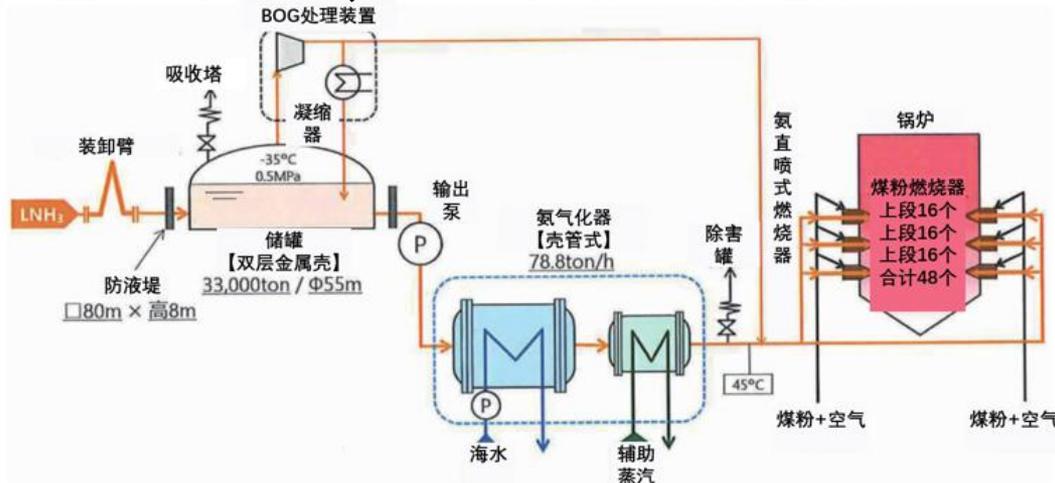
- 液化耗能很低
- 单位质量储氢率高
- 储运成本远低于氢气

氨面临的问题

- 层流火焰速度低，着火温度高
- 火焰极限窄，稳定性较差
- 氮氧化物或氨逃逸高

国外先进氨燃烧技术

■ 2021年10月，日本发布《能源基本计划》，增加氨燃烧发电部分



NEDO委托JERA联合IHI、丸红、Woodside Energy在日本最大的碧南火电厂1000MW机组上开展氨掺烧试验

- 2023年掺烧20%，年消耗量50万吨氨
- 2040年达到100%专烧

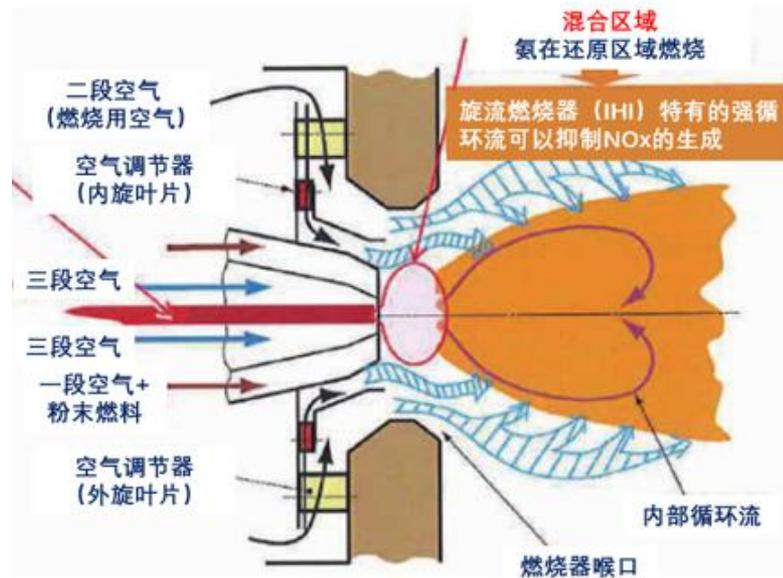
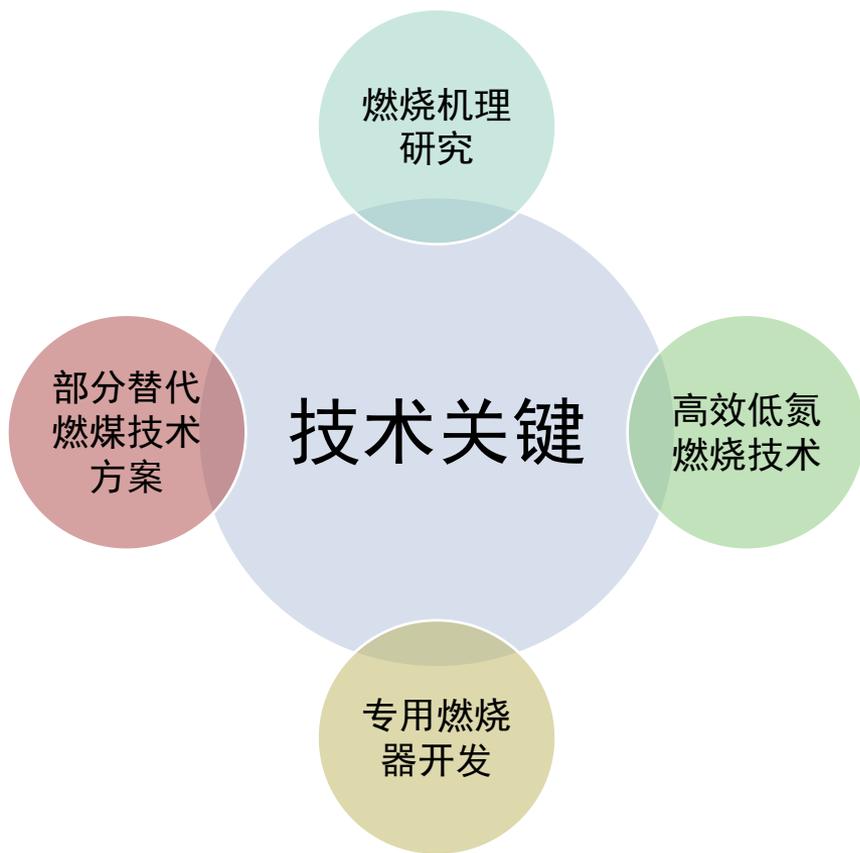


目 录

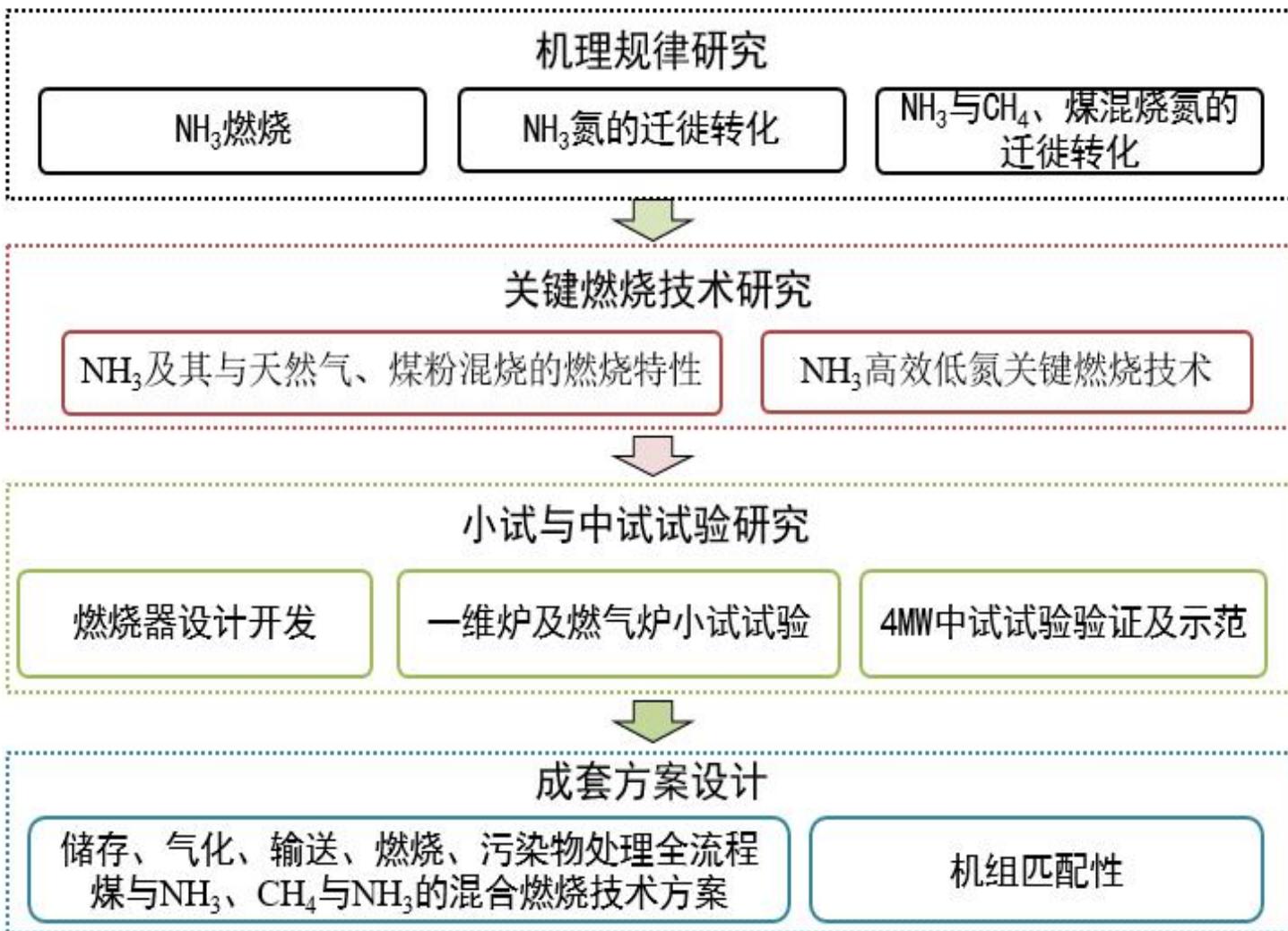
- ① 碳中和背景下火电机组面临的挑战
- ② 氨作为无碳燃料的优劣
- ③ TPRI 氨混燃燃烧技术进展
- ④ 小 结

氨燃烧技术研究关键

■ 技术关键



TPRI 氨燃烧技术研究思路



氨燃烧技术机理研究

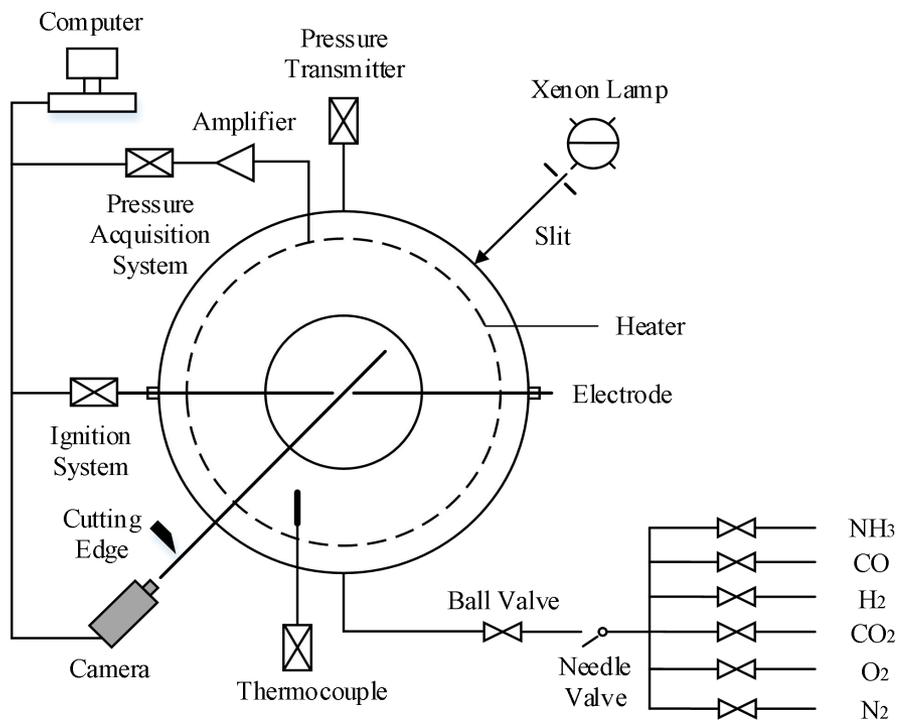
高压定容燃烧弹

氨燃烧层流火焰传播特性研究

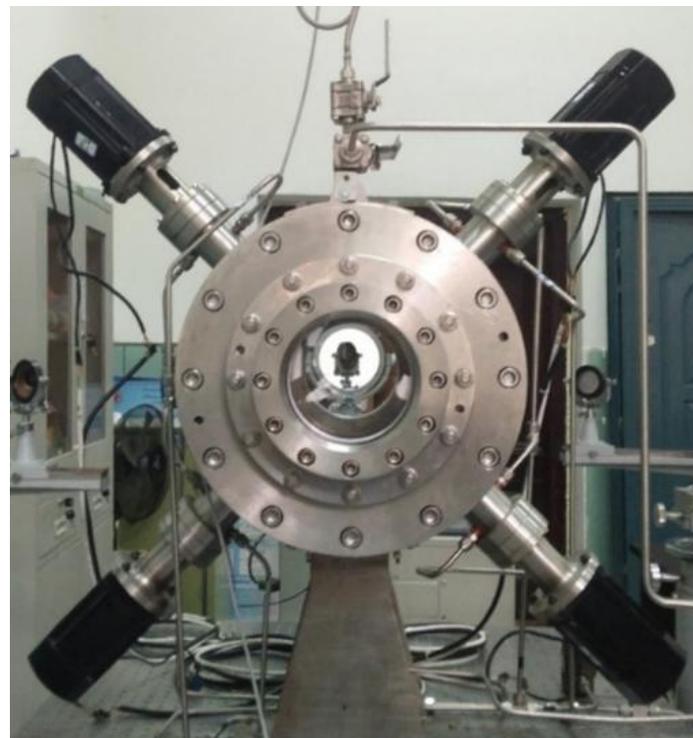
高温氨燃烧化学反应动力学

动力学分析层流火焰传播特性

Chemkin机理简化及Fluent应用



高压定容燃烧弹示意图



高压定容燃烧弹实验平台

氨燃烧技术机理研究

■ 高温氨燃烧化学反应动力学模型的建立

- C/H/O子反应机理：选自HP机理，HP机理适用于含有稀释气的C1~C2火焰
- NH₃子反应机理：选自现有的与氨气相关的众多模型
- C-N相互作用机理：选自GRI 3.0模型
- OHEX机理：选自Mathieu模型和Han模型
- 热力学数据和输运数据：选自Glarborg模型

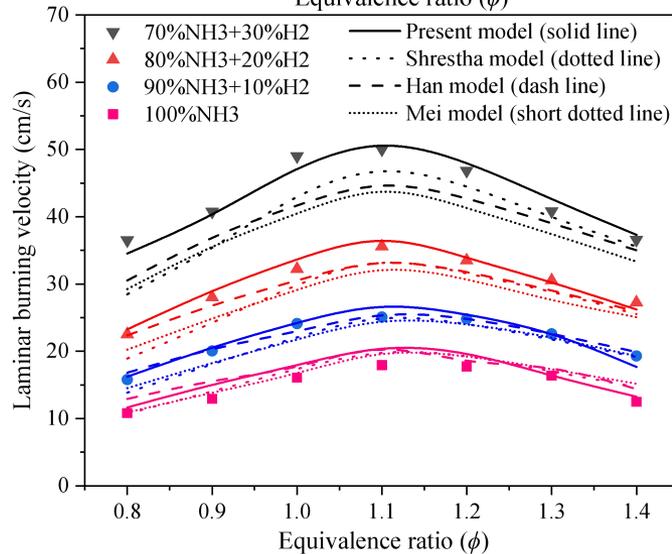
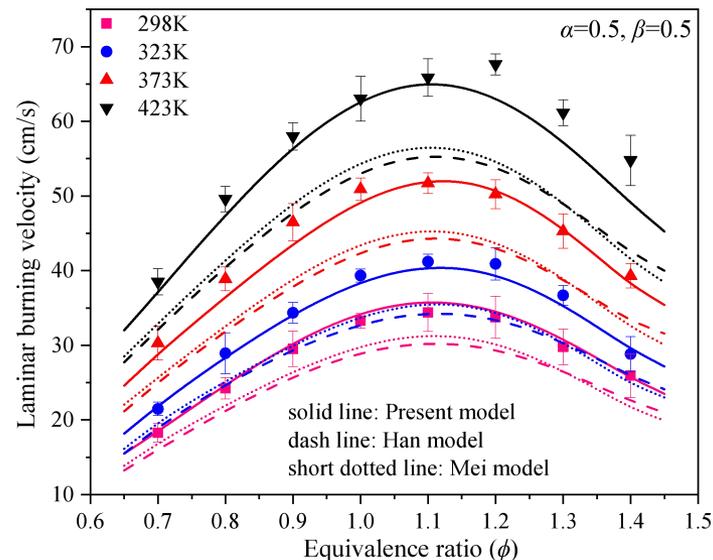
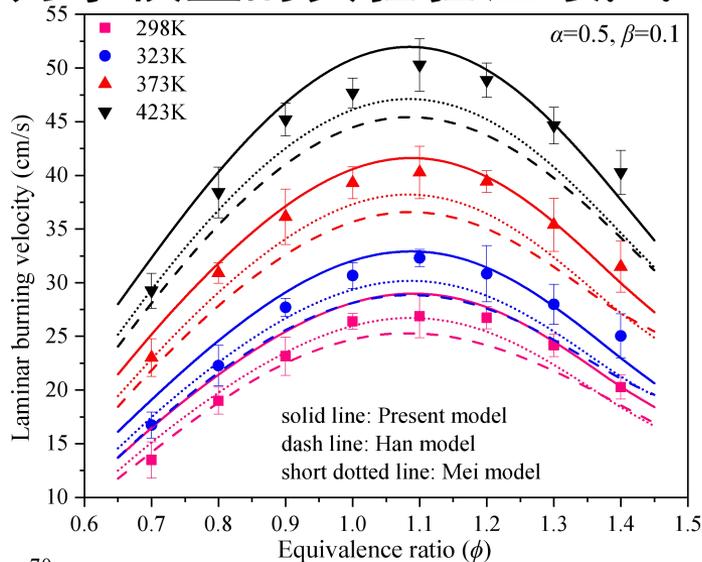
21组分，189基元反应

更新的基元反应

Reaction	Rate constants (cm, mol, s, cal)		
	A	n	Ea
NH ₃ +NH+M=N ₂ H ₄ +M	5.090E15	0.000	0.0
NH ₂ +O=HNO+H	4.000E13	0.000	0.0
NH ₂ +NH=N ₂ H ₂ +H	1.800E04	3.000	0.0
NH ₂ +NH ₂ =N ₂ H ₃ +H	4.500E14	-1.00	10084.0
N+O+M=NO+M	7.600E+13	-0.100	-1770.0
H ₂ O/16.25/CO/1.875/CO ₂ /3.75/			
NNH=N ₂ +H	4.500E007	0.500	0.0

氨燃烧技术机理研究

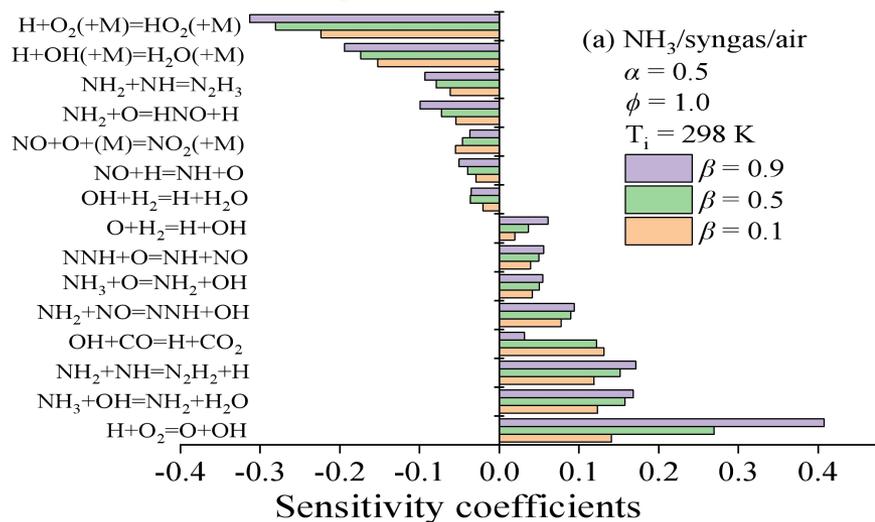
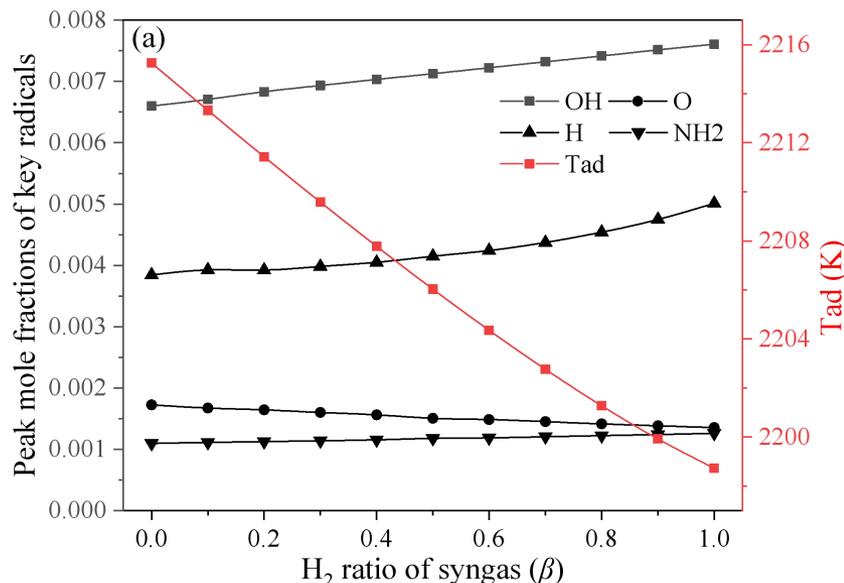
动力学模型的实验验证-氨气/合成气/空气火焰



- ◆ 通过模型修改了氢气相关的化学或氨化学中与H₂生成相关的机理使得预测精度提高
- ◆ 氨气/氢气/空气火焰的层流火焰速度

氨燃烧技术机理研究

动力学分析:氢气比例对氨气火焰传播的影响



◆ 在 H_2 比例更高的氨气-合成气火焰中，化学效应在氨气火焰传播的增强中起到的作用增强，热效应在氨气火焰传播的增强中起到的作用减弱

◆ H和OH自由基浓度的升高主要在于 H_2 浓度的升高

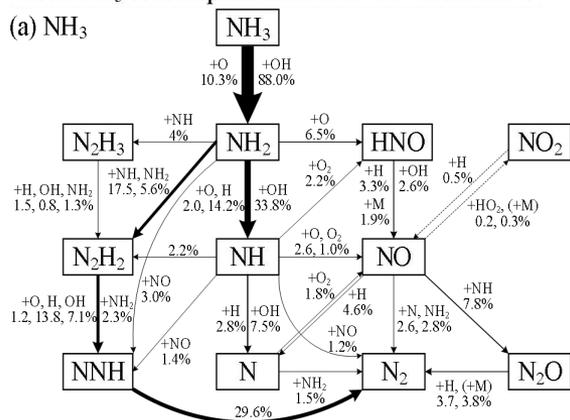
◆ S_L 的升高在于 $H+O_2=O+OH$ 和 $O+H_2=H+OH$ 生成很多H和OH活性自由基

氨燃烧技术机理研究

动力学分析:ROP分析

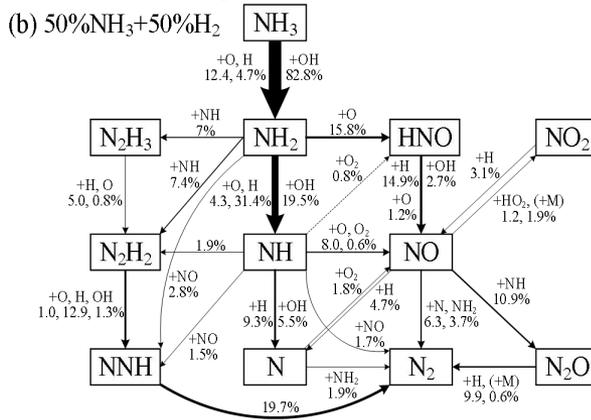
Total NH₃ consumption flux: 5.72×10^{-5} mole/cm²·s

(a) NH₃



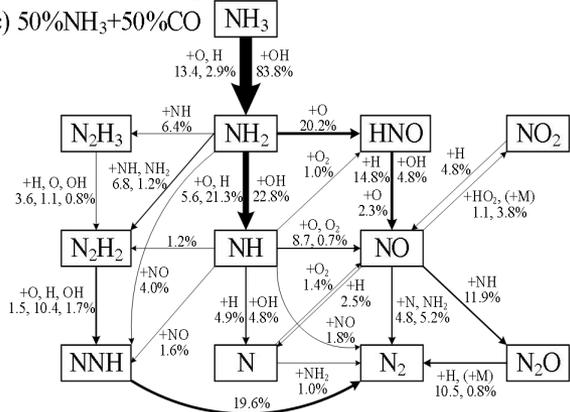
Total NH₃ consumption flux: 2.33×10^{-4} mole/cm²·s

(b) 50%NH₃+50%H₂



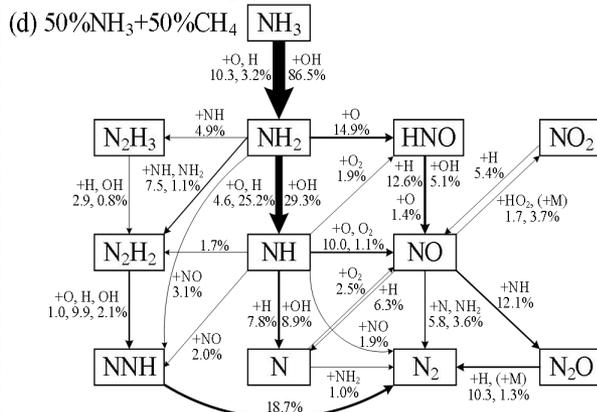
Total NH₃ consumption flux: 1.32×10^{-4} mole/cm²·s

(c) 50%NH₃+50%CO



Total NH₃ consumption flux: 5.67×10^{-5} mole/cm²·s

(d) 50%NH₃+50%CH₄



- 氨气的氧化主要通过OH自由基实现
- 氢气、一氧化碳和甲烷的加入明显提高了H自由基在氨气氧化路径中的作用，这一点在氢气添加时最为明显
- 氢气、一氧化碳和甲烷的加入明显提高了NH₂通过与O自由基反应生成HNO这一条路径的地位，而HNO是NO产生的最主要来源，因此，氢气、一氧化碳和甲烷的加入可能会提高NO的生成
- N₂O的生成主要依赖于NO和NH，外部条件主要依赖于800℃左右的低温，因此氨燃烧需要避免局部过于低温以及过量空气系数过高，控制了NO的产生也就控制了N₂O的生成

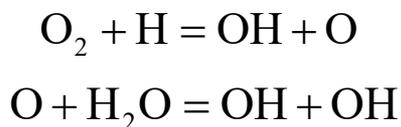
氨的一维炉燃烧试验研究

- 主燃区喷氨脱硝：在炉内主燃区形成的高温缺氧环境下喷入氨气燃烧，能够还原烟气中的NO_x

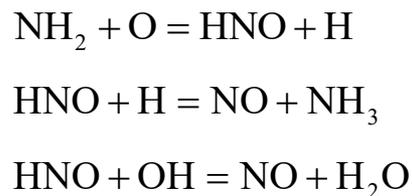


自由基
OH、H
的生成
路径

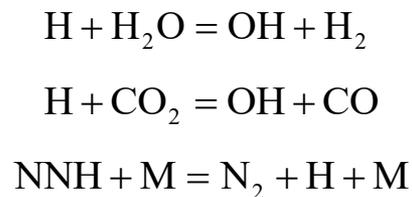
低温
有氧



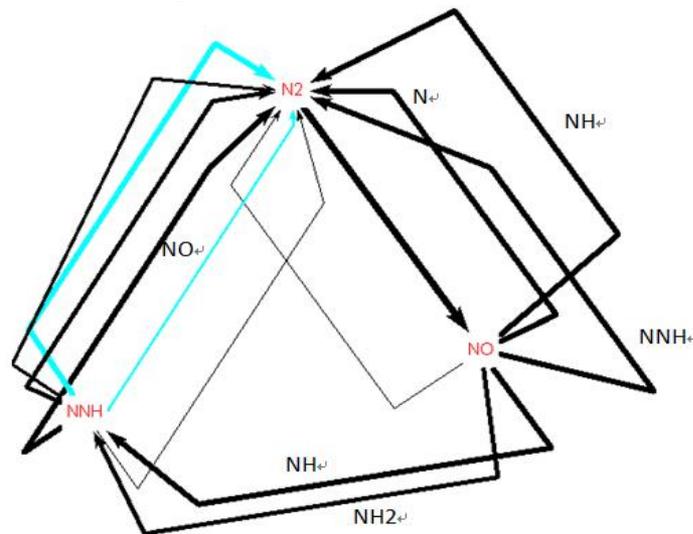
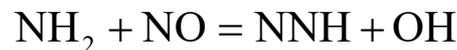
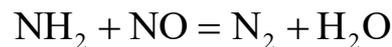
高温
有氧



高温
无氧



- 高温无氧条件下，NH₂与NO反应路径：

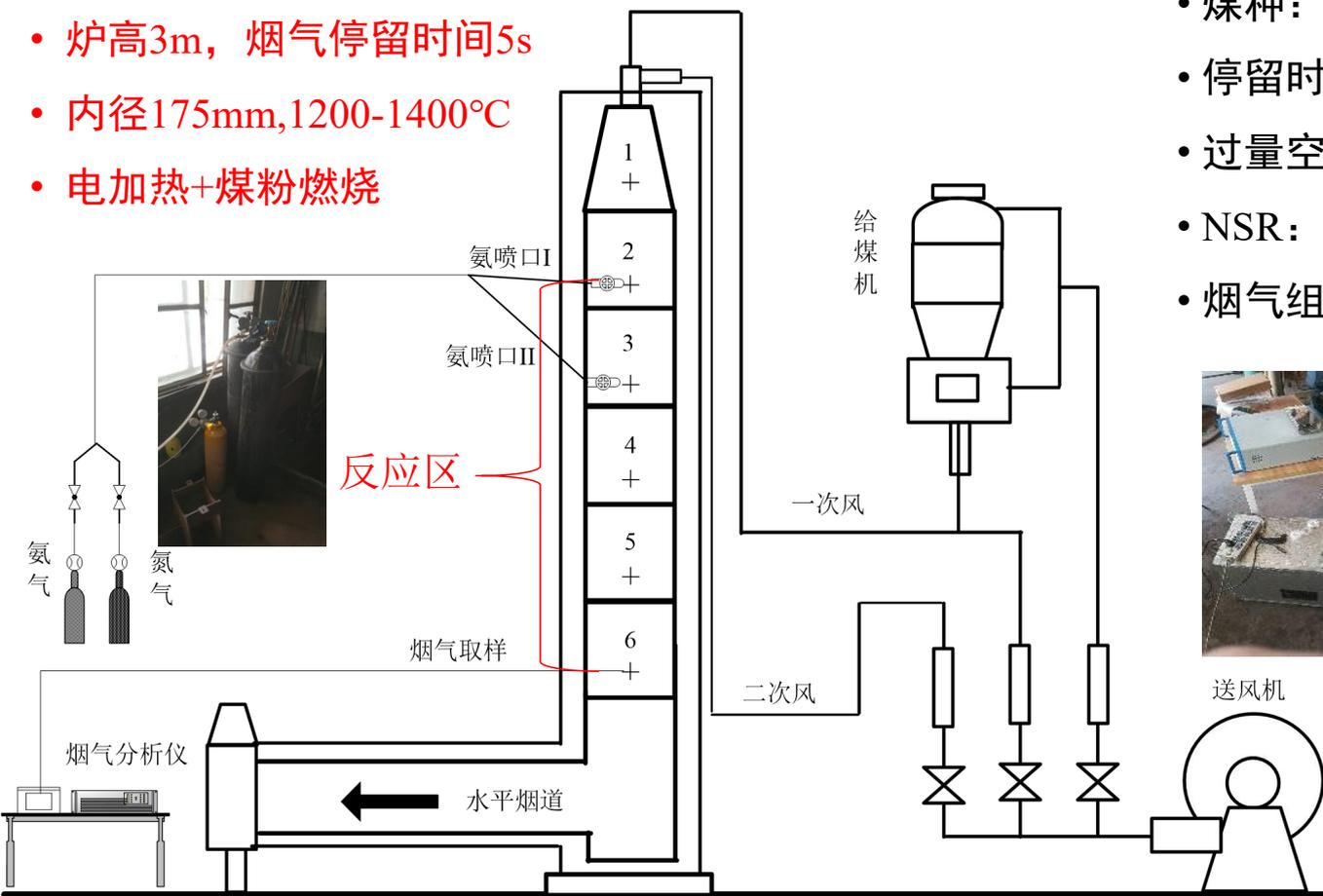


氨的一维炉燃烧试验研究

■ 一维炉主燃区喷氨（ppm级）试验

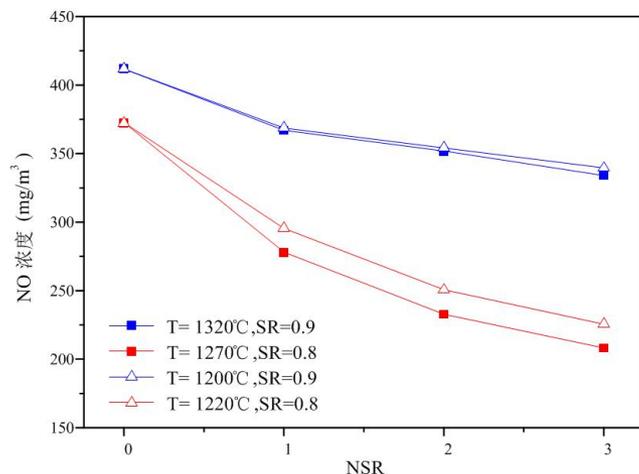
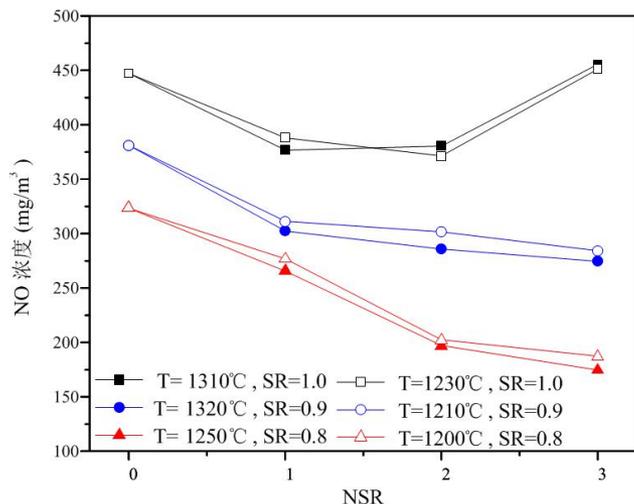
- 炉高3m, 烟气停留时间5s
- 内径175mm, 1200-1400°C
- 电加热+煤粉燃烧

- 煤种：烟煤
- 停留时间：1.3 s, 1.7 s, 1.8 s, 2.4 s
- 过量空气系数：0.8, 0.9, 1.0
- NSR：1.0, 2.0, 3.0
- 烟气组分：CO, SO₂, NO, NO₂, O₂



氨的一维炉燃烧试验研究

■ 一维炉主燃区喷氨（ppm级）试验



M_{ad} (%)	A_{ar} (%)	V_{daf} (%)	C_{ar} (%)	H_{ar} (%)	N_{ar} (%)	O_{ar} (%)	S_{ar} (%)
16.74	6.18	33.58	62.37	3.13	0.65	10.46	0.47

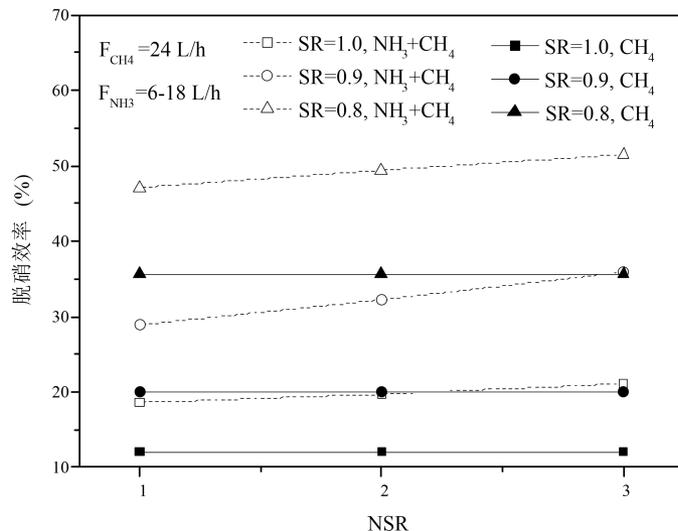
◆ 一维炉燃烧**将军庙煤（烟煤）**条件下，喷氨点温度1200-1320 °C，停留时间1.1-2.1 s，主燃区喷氨脱硝效率可达**46%**

M_{ad} (%)	A_{ar} (%)	V_{daf} (%)	C_{ar} (%)	H_{ar} (%)	N_{ar} (%)	O_{ar} (%)	S_{ar} (%)
14.63	7.52	32.82	61.52	3.59	0.84	11.486	0.42

◆ 一维炉燃烧**红沙泉煤（烟煤）**条件下，喷氨点温度1235-1300 °C，停留时间1.5-2.1 s，主燃区喷氨脱硝效率可达**39%**

氨的一维炉燃烧试验研究

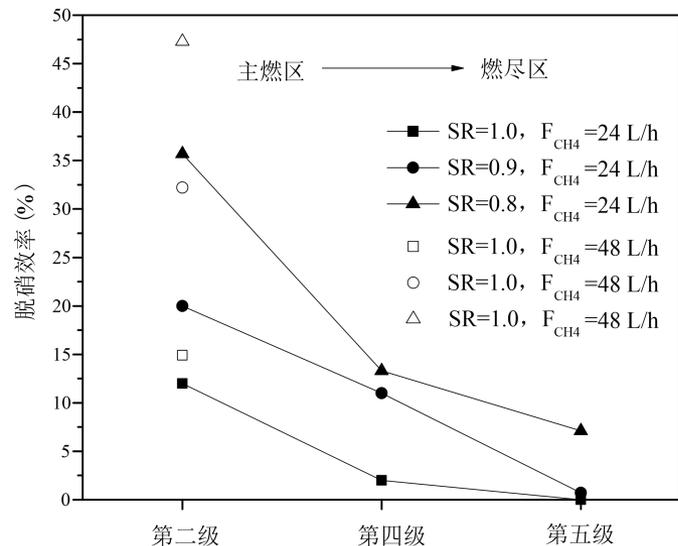
一维炉煤粉+氨气 (ppm) + 甲烷(4%)燃烧试验



◆ SR=1.0, 喷CH₄时脱硝效率12%,
喷CH₄+ NH₃时脱硝效率21%

◆ SR=0.9, 喷CH₄时脱硝效率20%,
喷CH₄+ NH₃时脱硝效率35.9%

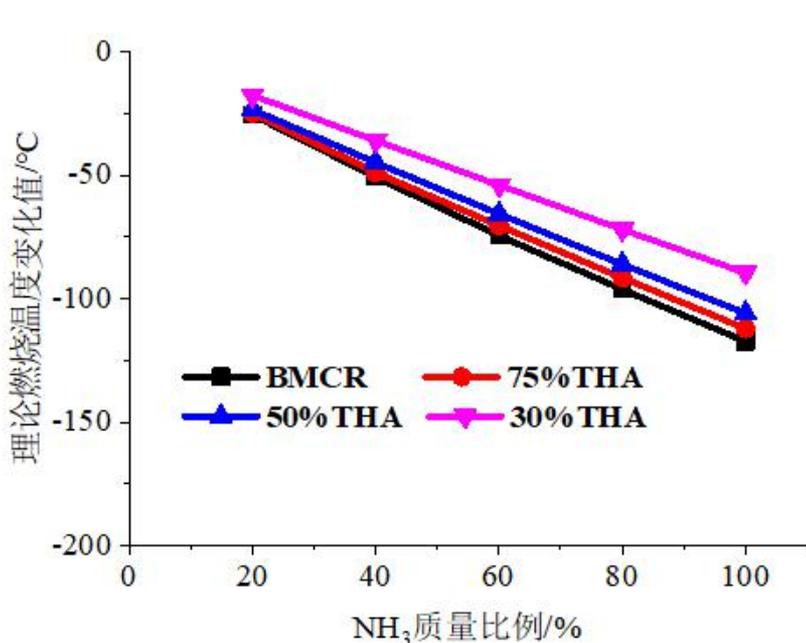
◆ SR=0.8, 喷CH₄时脱硝效率35.7%,
喷CH₄+ NH₃时脱硝效率51.5%



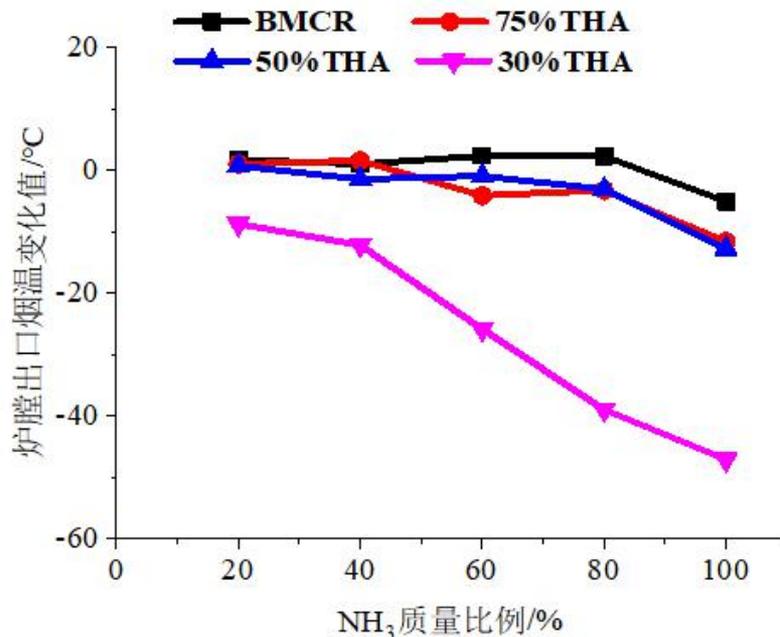
◆ 在燃煤锅炉主燃区, 喷入氨气+甲烷作为辅助燃料, (其中氨气的量为ppm级, 甲烷的量为4%燃料热值), 能够实现20-50%的脱硝效率

300MW机组不同比例掺烧氨影响分析

- 通过对一台典型300MW正压直吹式制粉系统四角切圆燃烧锅炉进行热力校核计算，分析机组掺烧不同比例氨对锅炉主要参数的影响



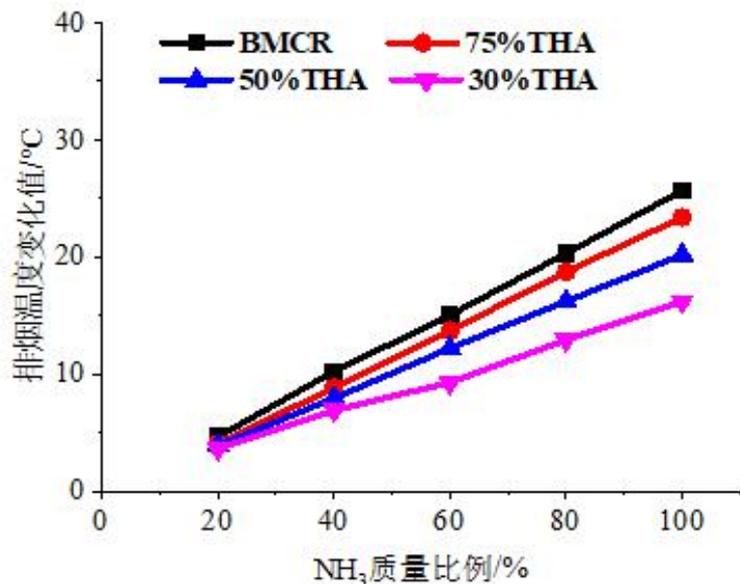
氨掺烧对理论燃烧温度的影响



氨掺烧对炉膛出口温度的影响

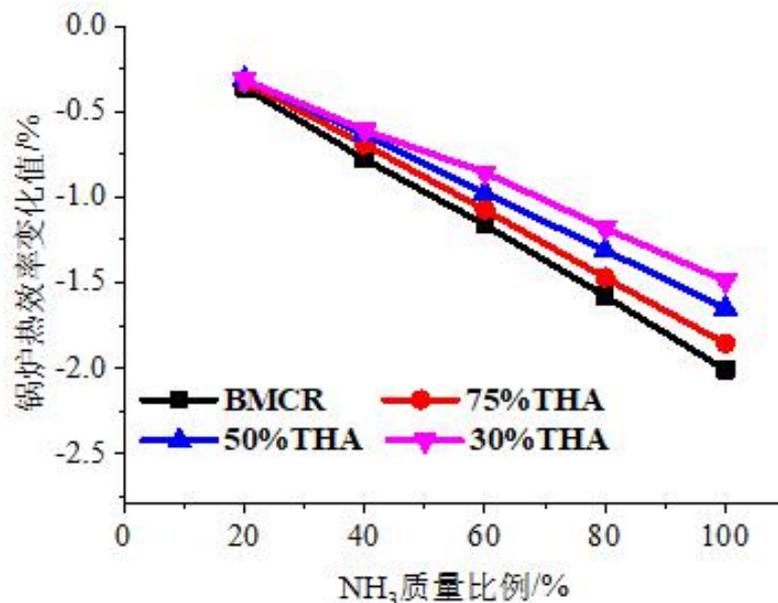
- 烟气的理论燃烧温度与燃料的热值、过量空气系数和燃烧产物特性等因素有关
- 由于NH₃的热值低于原煤，混合燃料热值随着掺混比例的增加而降低，理论燃烧温度基本呈线性下降趋势
- 全负荷下炉膛出口温度均随着掺混比例的增加而降低
- NH₃燃烧后产物均为气态产物，炉膛出口烟温的降低有利于缓解受热面的积灰和结渣

300MW机组不同比例掺烧氨影响分析



氨掺烧对排烟温度的影响

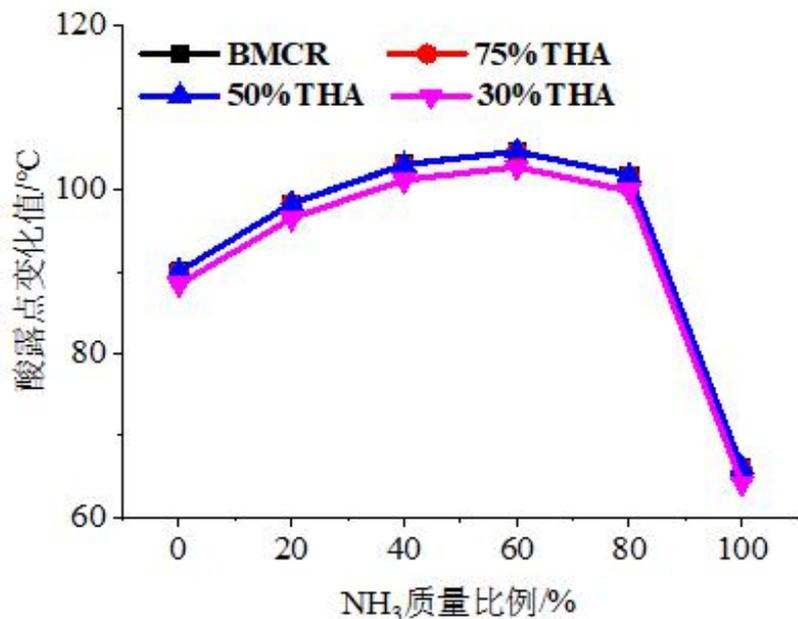
- 全负荷下排烟温度均随着掺混比例的增加而升高，即使NH₃的掺混比例增加至100%后，最高排烟温度也低于141 °C



氨掺烧对锅炉效率的影响

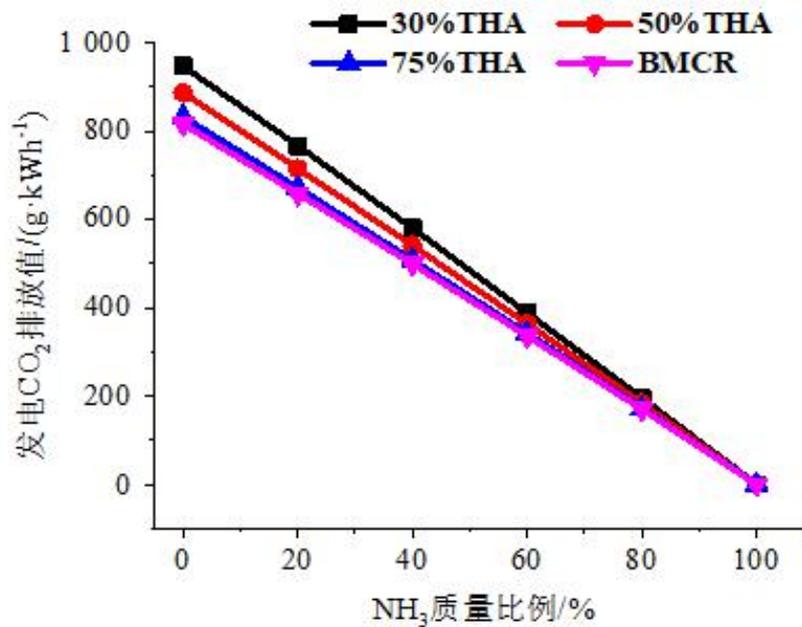
- 掺烧NH₃后的锅炉热效率均随着掺混比例的增加而降低
- 锅炉热效率的降低主要是由于烟气比焓增加导致排烟热损失增大所造成

300MW机组不同比例掺烧氨影响分析



氨掺烧对酸露点温度的影响

- 不同负荷下的酸露点基本呈相同的趋势，随着NH₃掺混比例的增加先上升然后迅速降低
- 随着NH₃的掺入，烟气中的水蒸气分压逐渐增加，此时水露点升高；但原煤比例的降低则会导致烟气中的硫分和灰分降低



氨掺烧对二氧化碳排放的影响

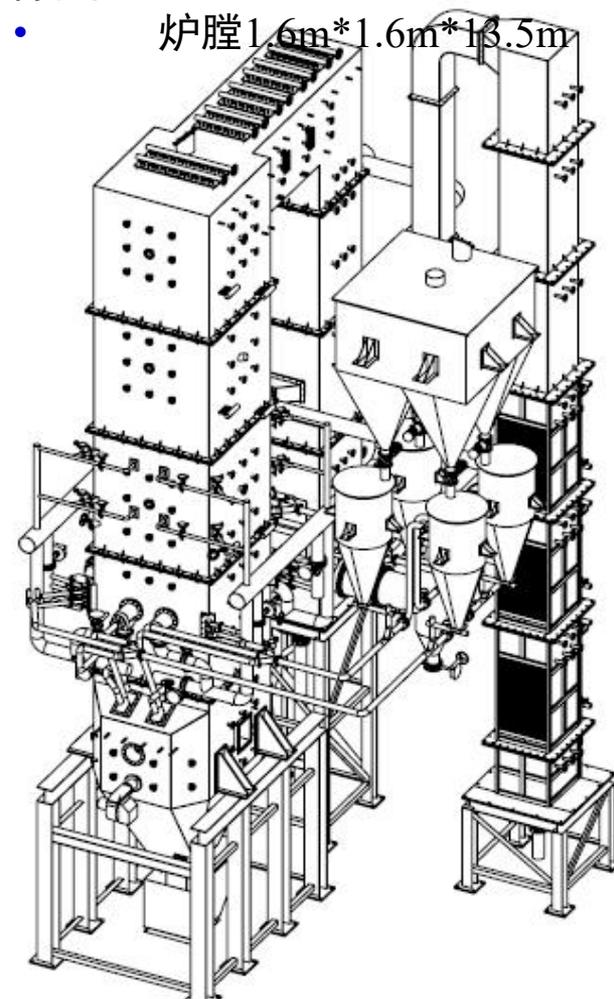
- 掺混NH₃发电后的CO₂排放值随着掺混比例的增大迅速降低
- 300 MW机组年利用小时数4500 h计算，掺混比例20%~100%时每年可减排CO₂约23.4~121.2万吨

氨燃烧中试试验平台建设

■ 中试平台--西安热工院4MW燃烧试验台



- W燃烧+四角切圆+对冲燃烧
- SCR脱硝+干法脱硫+电袋、布袋除尘



氨燃烧中试试验平台建设

■ 中试平台--西安热工院4MW燃烧试验台



目 录

- ① 碳中和背景下火电机组面临的挑战
- ② 氨作为无碳燃料的优劣
- ③ TPRI 氨混燃燃烧技术进展
- ④ 小 结

小结

- 作为优良的氢载体，氨类燃料燃烧可成为一条切实可行的火电机组碳减排技术途径
- 氨与煤粉混燃的机理尚不明晰、试验研究工作尚不全面，还需要开展进一步的研究，以支撑后续技术开发
- 热力校核测算表明，氨的高比例掺烧对机组关键参数指标如排烟温度、锅炉效率均产生一定影响，尚需开展与现役机组的匹配性和方案研究
- 氨与煤粉混燃的高效低氮燃烧技术尚需进一步开发，并进行示范验证

Thank you very much for your attention!

T P R I

技术 协同 责任 创新

王志超 18191120375

wangzhichao@tpri.com.cn

西安热工院锅炉事业部新技术与产品研发所