

中试规模循环流化床富氧燃烧 试验和模拟研究

赵长遂 段伦博 周骛 陈晓平

东南大学能源与环境学院

2011年11月02日

全球变暖可能带来的恶果

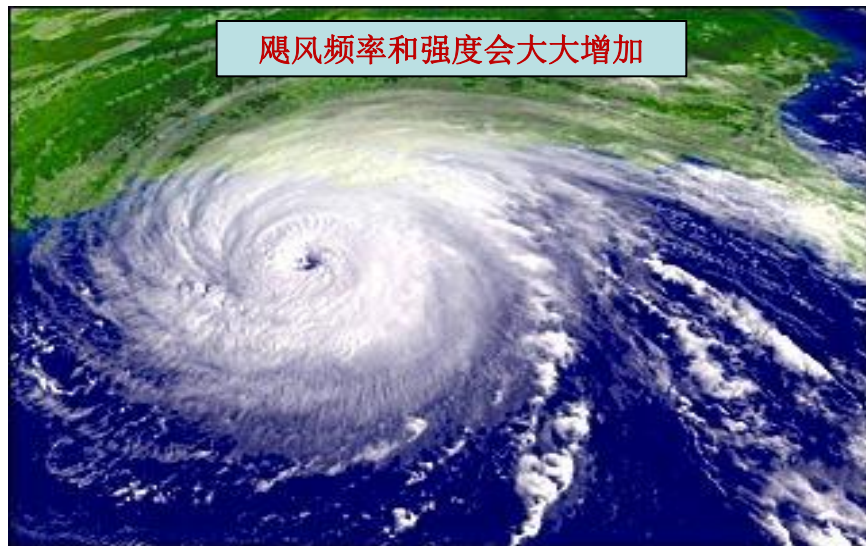


東南大學
中国 • 南京

北冰洋冰山融化，海平面上升，北极熊几无栖身之地



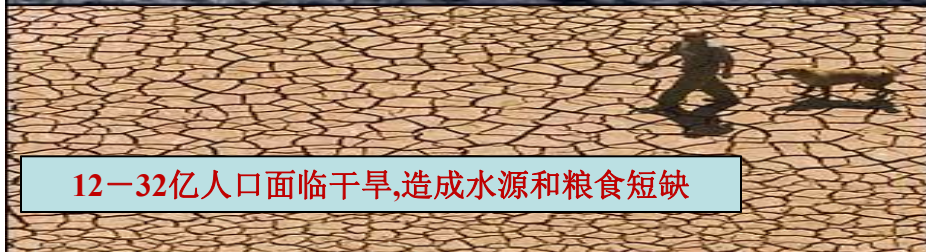
飓风频率和强度会大大增加



预计到2080年，会有超过1亿人口被淹

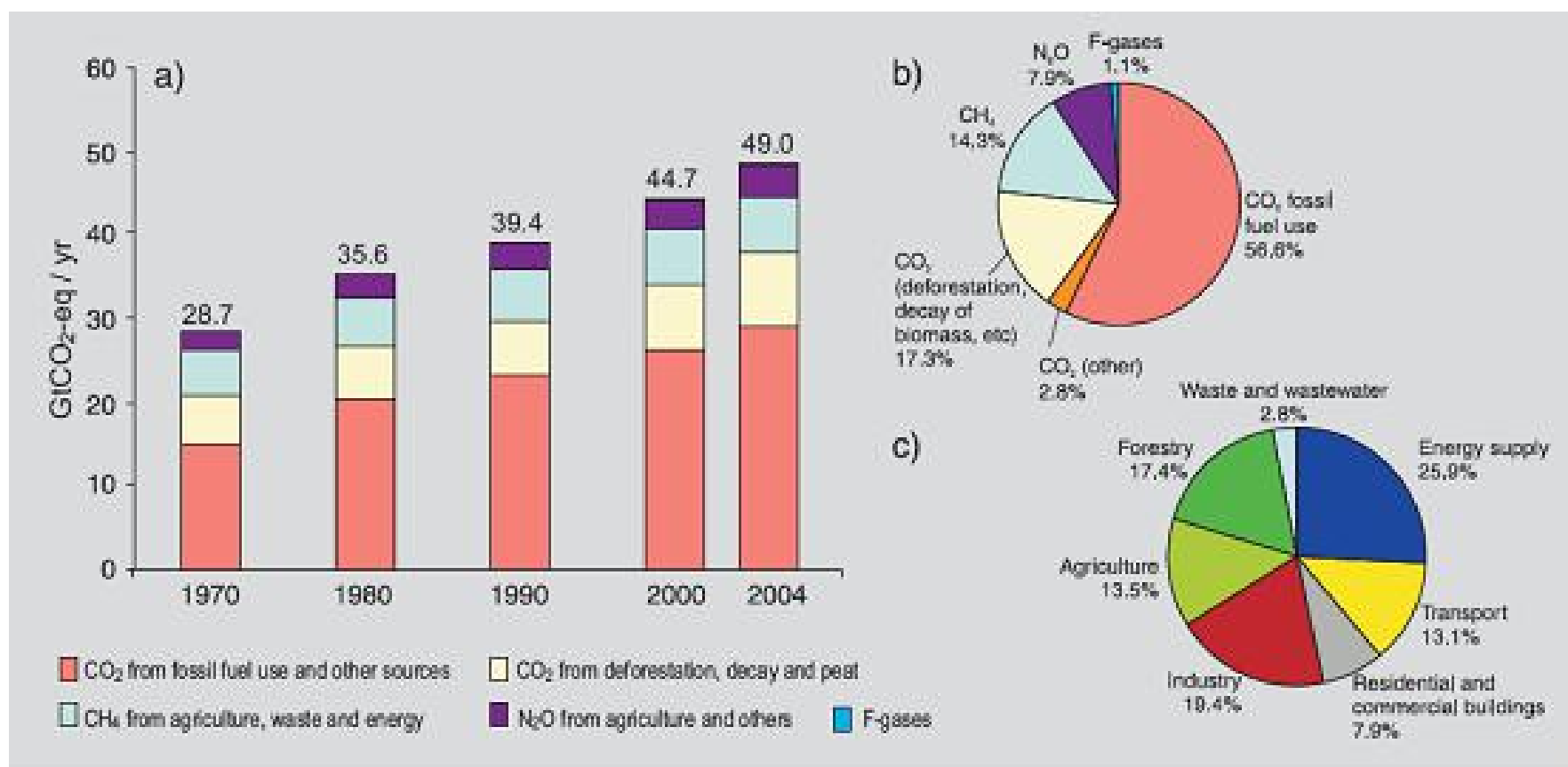


12—32亿人口面临干旱,造成水源和粮食短缺

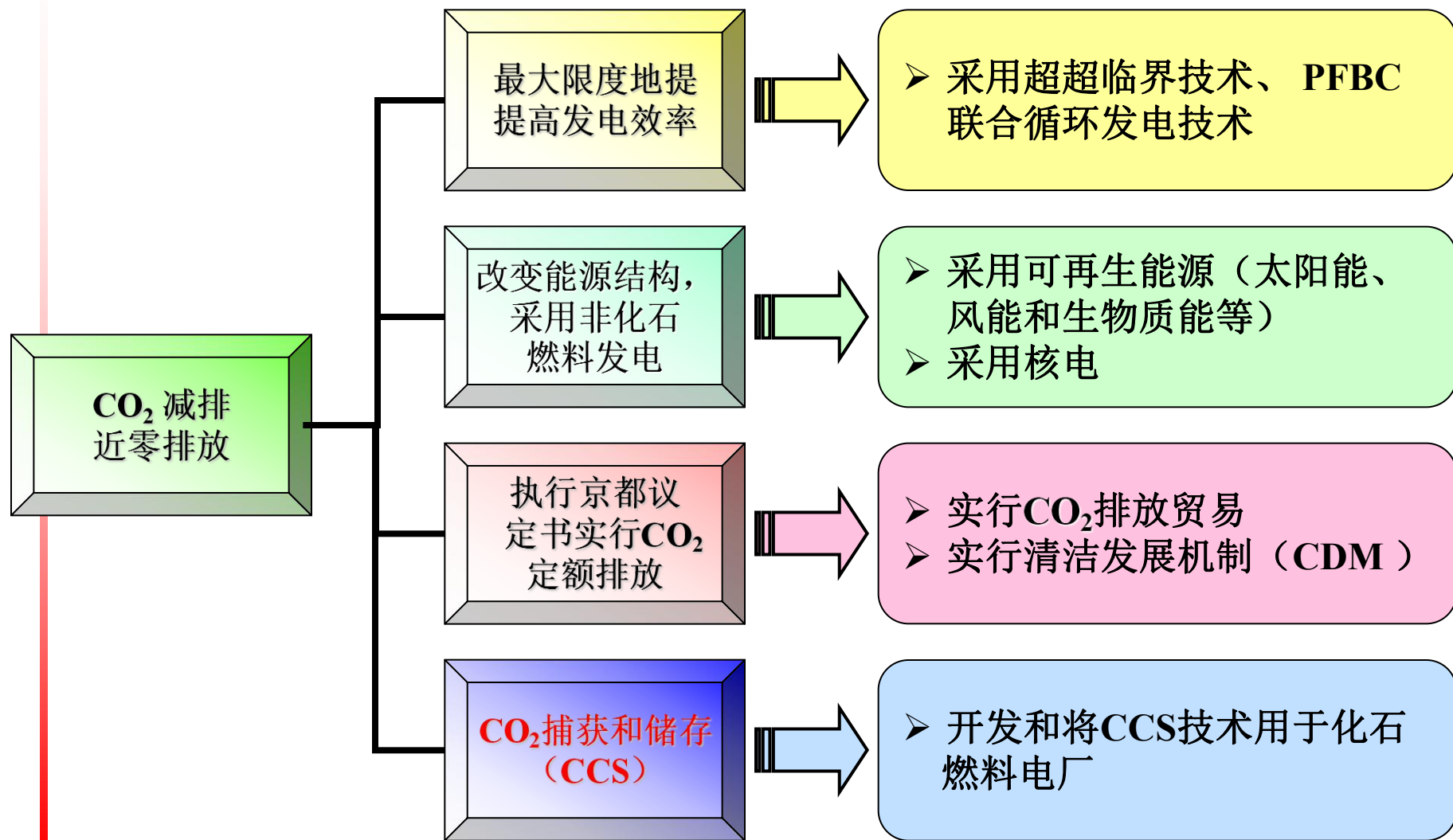




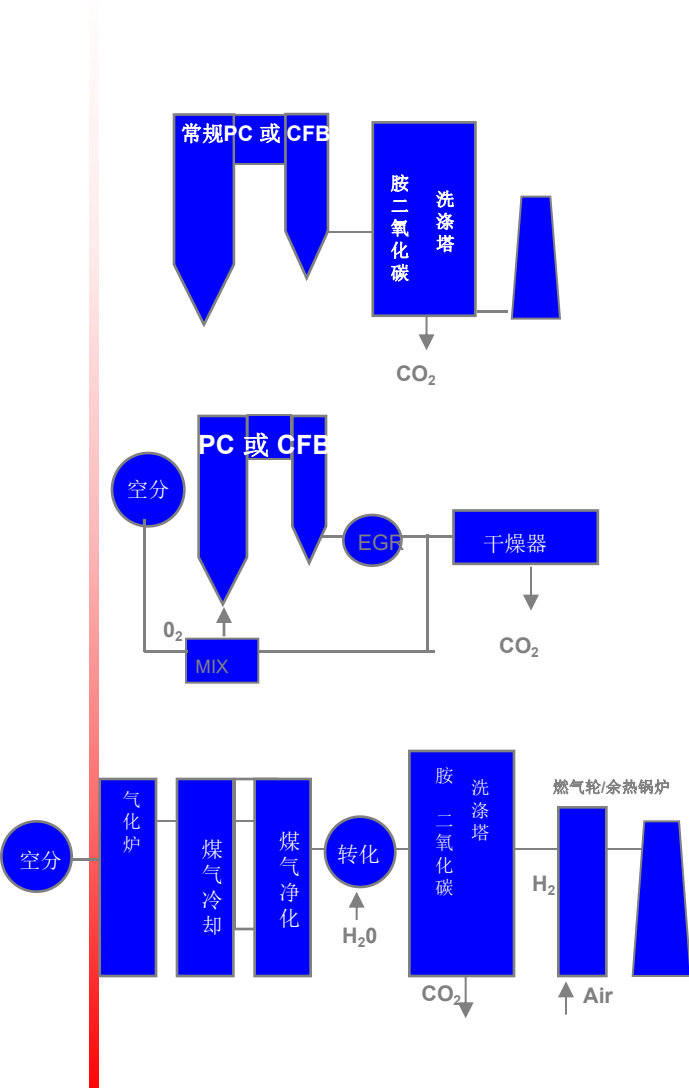
化石燃烧利用是温室气体的最主要来源—占近60%



电力行业如何实现CO₂减排



碳捕获技术比较



技术	发电成本增加比例 %	技术风险	应用	电厂效率 %	开发该技术领先的公司
燃烧后烟气处理 (胺法)	70-90%	中等-低风险	新锅炉和老锅炉改造	25%	Fluor, ABB Lumis 和三菱
燃烧后烟气处理 (冷却氨法)	50-70%	中等风险	新锅炉和老锅炉改造	28%	Alstom
氧燃料法 (Oxy-Fuel)	40-50%	中等-低风险	新锅炉和老锅炉改造	30-32%	Alstom
IGCC	40-60%	中等-高风险	只能用于新装置	30-32%	GE, Conoco Phillips, Shell

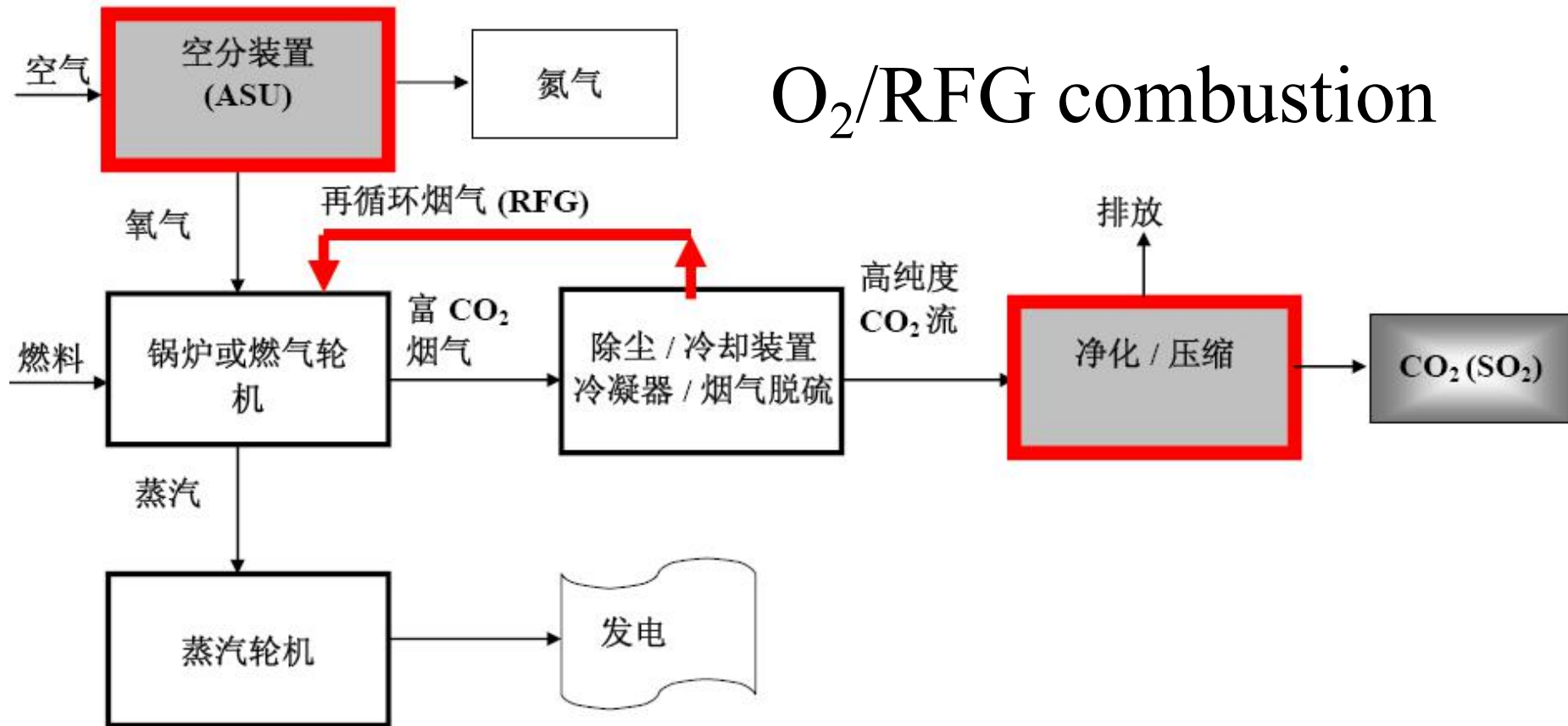
富氧燃烧



東南大學
中国 • 南京

Oxy-fuel combustion

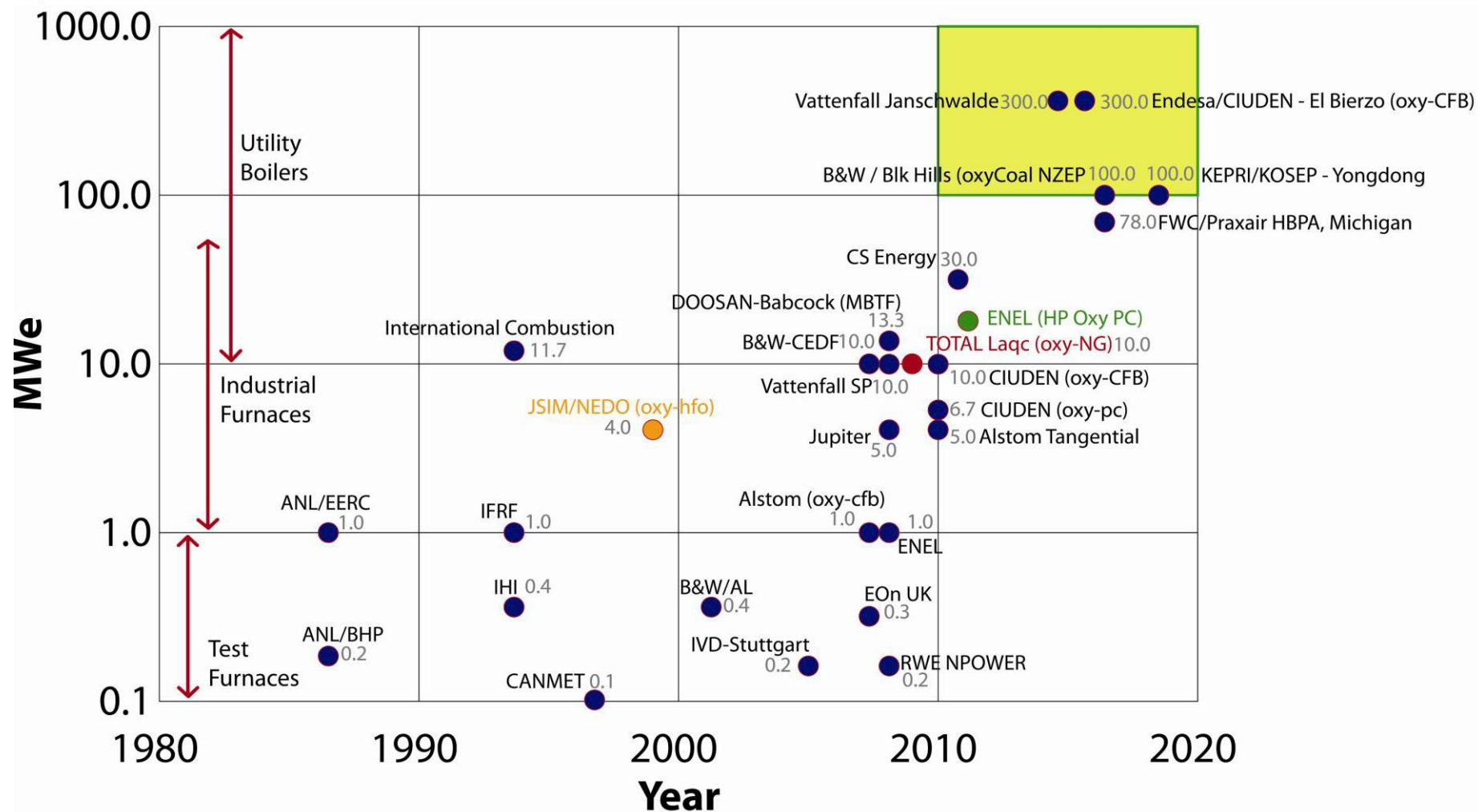
O₂/RFG combustion



富氧燃烧发展历程



東南大學
中国 • 南京



能源与环境学院

School of Energy & Environment

2022-1-4

Oxy-CCF技术优势



東南大學
中国 • 南京

◆燃料适应性广：

煤、石油焦、生物质

可以用于便宜的机会燃料

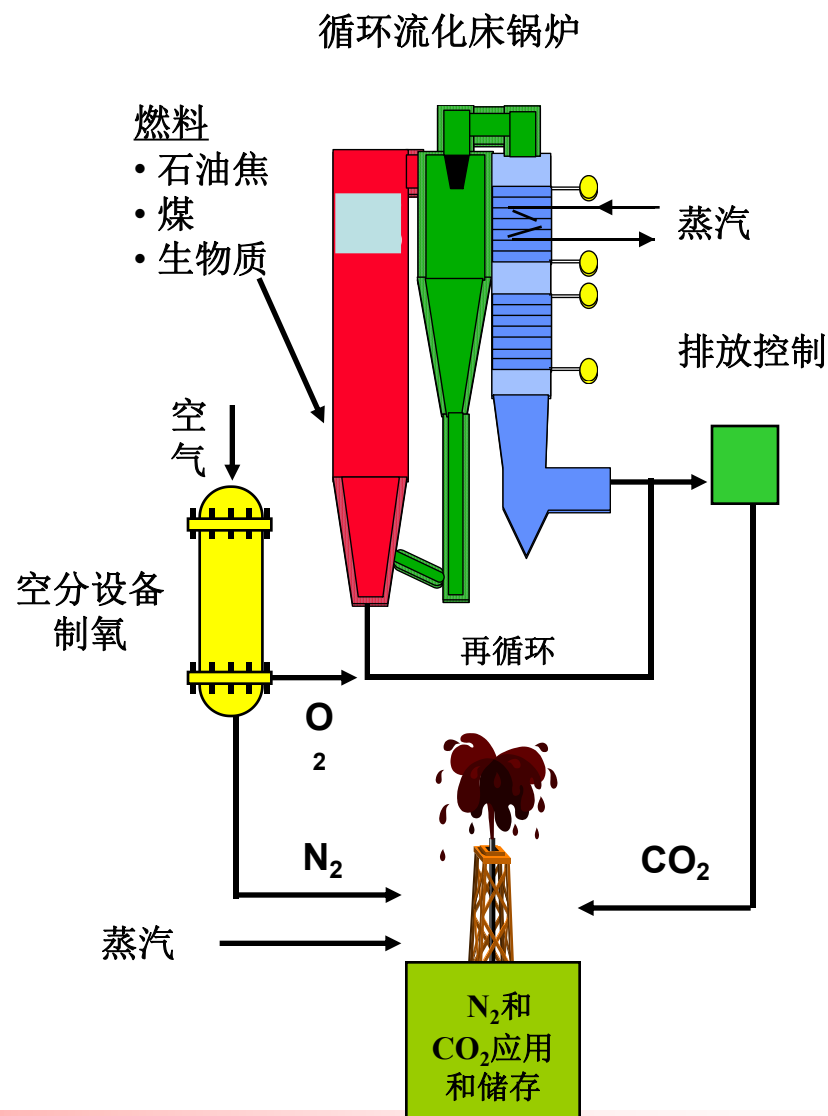
如沥青砂等

◆相比煤粉炉可采用温烟气、 并行流化床换热器，从而采用 更高的氧含量

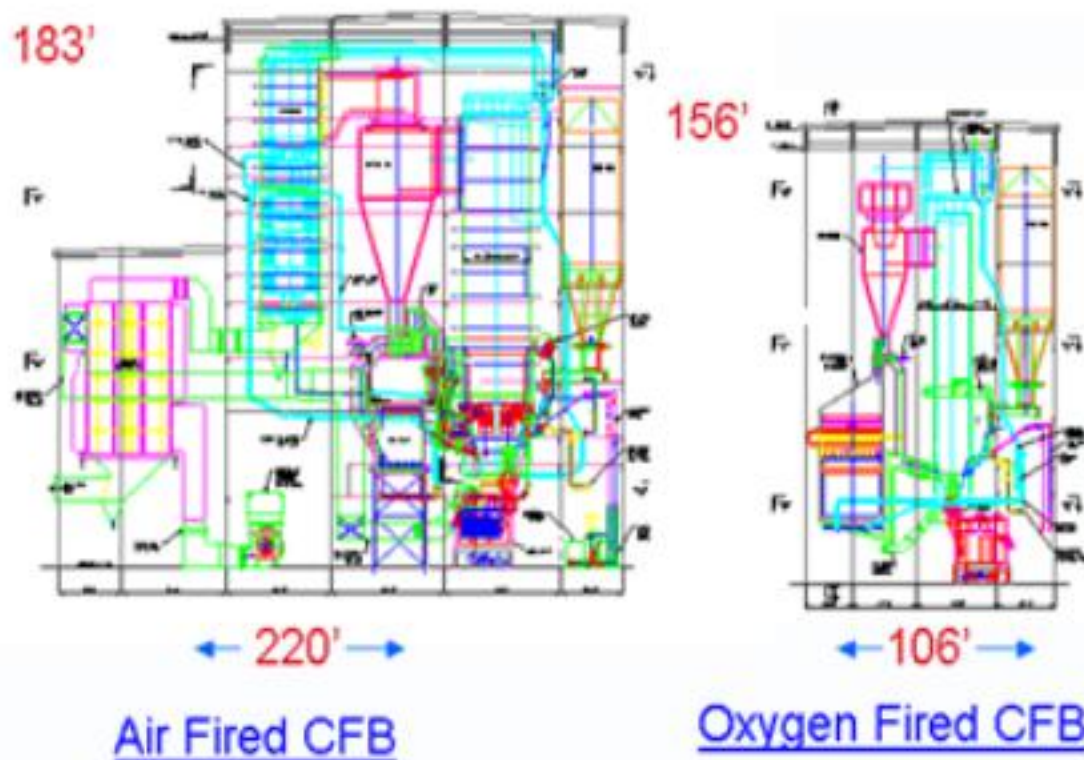
◆富氧燃烧可大大提高脱硫的 钙利用率

◆富氧燃烧可用于对现有锅炉 的改造

◆ 如用于新锅炉的设计则可大 大降低锅炉的尺寸



富氧燃烧与空气燃烧流化床锅炉尺寸



ALSTOM的结果。

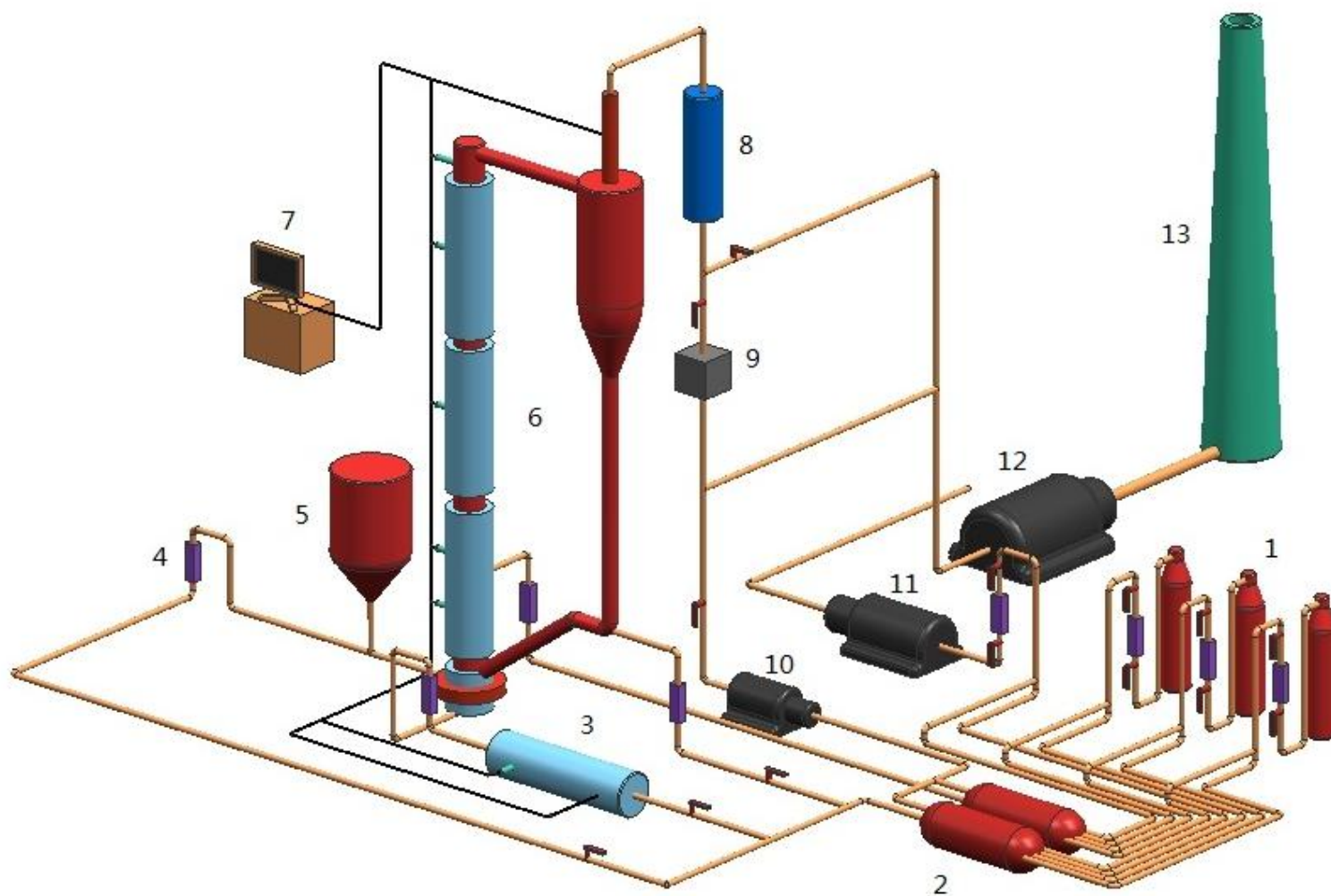


- ◆ 目前，发达国家研究机构包括锅炉制造公司研究重心正
向此倾斜，包括美国能源部（DOE）、加拿大能源技术
中心（CETC）和ALSTOM、B&W、FOSTER
WHEELER等锅炉制造企业都不同程度地启动了CFB富
氧燃烧项目。
- ◆ 在国家973项目“温室气体提高石油采收率的资源化利用
及地下埋存”（2006CB705806）和“二氧化碳减排、储
存和资源化利用的基础研究”（2011CB707301）的资助
下，东南大学开展了CFB富氧燃煤技术的研究。
- ◆ 与美国B&W公司合作，在50kWth循环流化床装置上成功
实现了带真正烟气循环的富氧燃烧试验。

50kWth循环流化床富氧 燃烧试验系统



東南大學
中国 • 南京



能源与环境学院

School of Energy & Environment

2022-1-4

燃烧室主要尺寸和参数



東南大學
中国 • 南京

项目	数值		单位	项目	数值		单位
	改造前	改造后			改造前	改造后	
热输入功率	50	50	kW	给煤量	8	8	kg/h
密相区床高	800	1000	mm	稀相区床高	3200	4000	mm
密相区内径	122	122	mm	稀相区内径	150	150	mm
总上升段高度	4200	5200	mm	二次风口高度	850 / 950	600 / 800 / 1000	mm
加煤口高度	700	400	mm	循环物料口高度	200	200	mm
分离器入口高度	4000	5000	mm	床料快速添加口	700	700	mm



改造后试验装置照片



東南大學
中国 • 南京



测量和数据采集系统



東南大學
中国 • 南京

温度T1-T18

压力P1-P15

金属转子流量计测量单一气体流量

质量流量计测量混合流量

实时气体成分分析

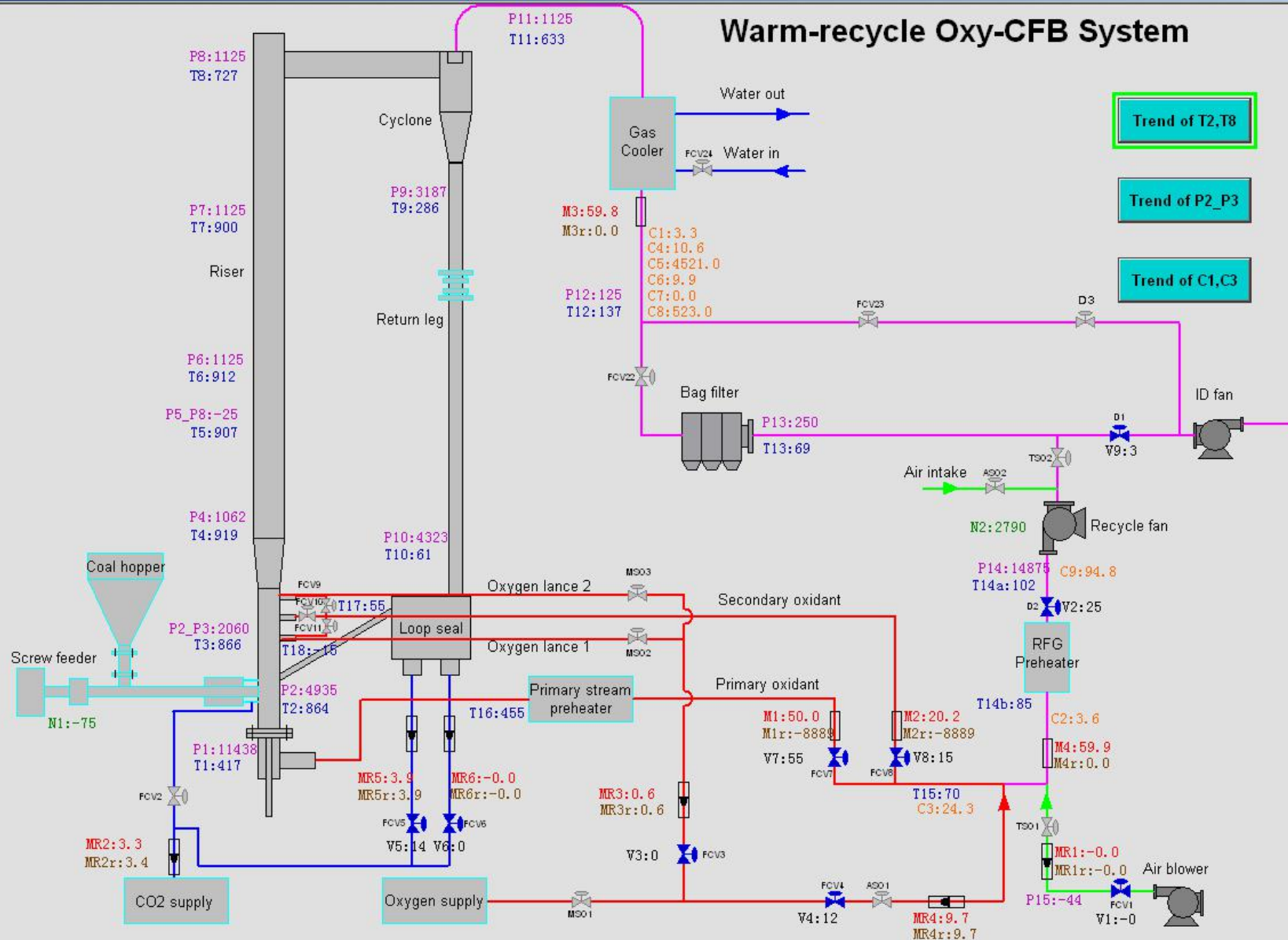
氧量计 (C1-C3)

0-100%量程CO₂ 分析仪

热质平衡在线计算



Warm-recycle Oxy-CCF System



热质平衡在线计算



東南大學
中国 • 南京

$$C_xH_yN_zO_qS_w + h \cdot H_2O + A \cdot (O_2 + m \cdot N_2 + A_a H_2O) + B \cdot [(1-n)O_2 + n \cdot N_2] + C \cdot CO_2 + D \cdot H_2O + E \cdot O_2 + F \cdot SO_2 + G \cdot N_2 + H \cdot CO_2 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{y}{2} + h + D + A \cdot A_a\right) \cdot H_2O + (w \cdot \eta + F) \cdot SO_2 + (x + C + H) \cdot CO_2$$

$$+ \left\{ \left[\frac{q}{2} + A + B(1-n) + E \right] - \left[(x) + \left(\frac{y}{4} + w \right) \right] \right\} \cdot O_2 + \left(\frac{z}{2} + m \cdot A + n \cdot B + G \right) \cdot N_2 + (1-\eta)w \cdot S_{solid}$$

Fuel Analysis - As Received		Natural Gas		Assumptions	
Carbon, %	64.75	Carbon, %	1.0396	T_pri_zone, C	850
Hydrogen, %	4.52	Hydrogen, %	4.0397	Ar in O2, %	0
Nitrogen, %	1.28	Nitrogen, %	0.012	N2 in O2, %	1
Oxygen, %	7.06	Oxygen, %	0.0138	O2 Safety Limit, %	28
Sulfur, %	2.71	MW, gm/mol	16.947	SO2 retention, %	0
Chlorine, %	0.01	HHV, BTU/lb	10000	Ambient condition	
Moisture, %	7.45	Flow Rate, kg/hr	0	T_Air, C	35
Ash, %	12.22	Facility		RH, %	38.1
HHV, BTU/lb	11710	ID_bed, m	0.122	P, Pa	35000
Fuel Analysis - As Fired		H_bed, m	1	CO2/O2 condition	
Moisture, %	7.45	ID_riser, m	0.15	P_CO2, Pa	35000
Ash, %	12.22	H_riser, m	4.2	P_O2, Pa	35000



能源与环境学院

School of Energy & Environment

2022-1-4

煤和石灰石成分分析



東南大學
中国 • 南京

煤样成分	空气干燥基 (wt.%)
水分	5.13
灰分	9.85
挥发分	35.34
固定碳	49.68
C	67.42
H	4.14
O	9.37
N	1.04
S	3.05
低位热值	26.66 MJ/kg

粒径: 0-6 mm

石灰石成分	含量 (wt.%)
CaO	55.99
MgO	0.538
SiO ₂	0.392
Al ₂ O ₃	0.1
Fe ₂ O ₃	0.0503
Na ₂ O	0.041
SO ₃	0.0381
Cl	0.0219
SrO	0.0165
K ₂ O	0.0146
P ₂ O ₅	0.0101
TiO ₂	0.0041
LOI	42.77

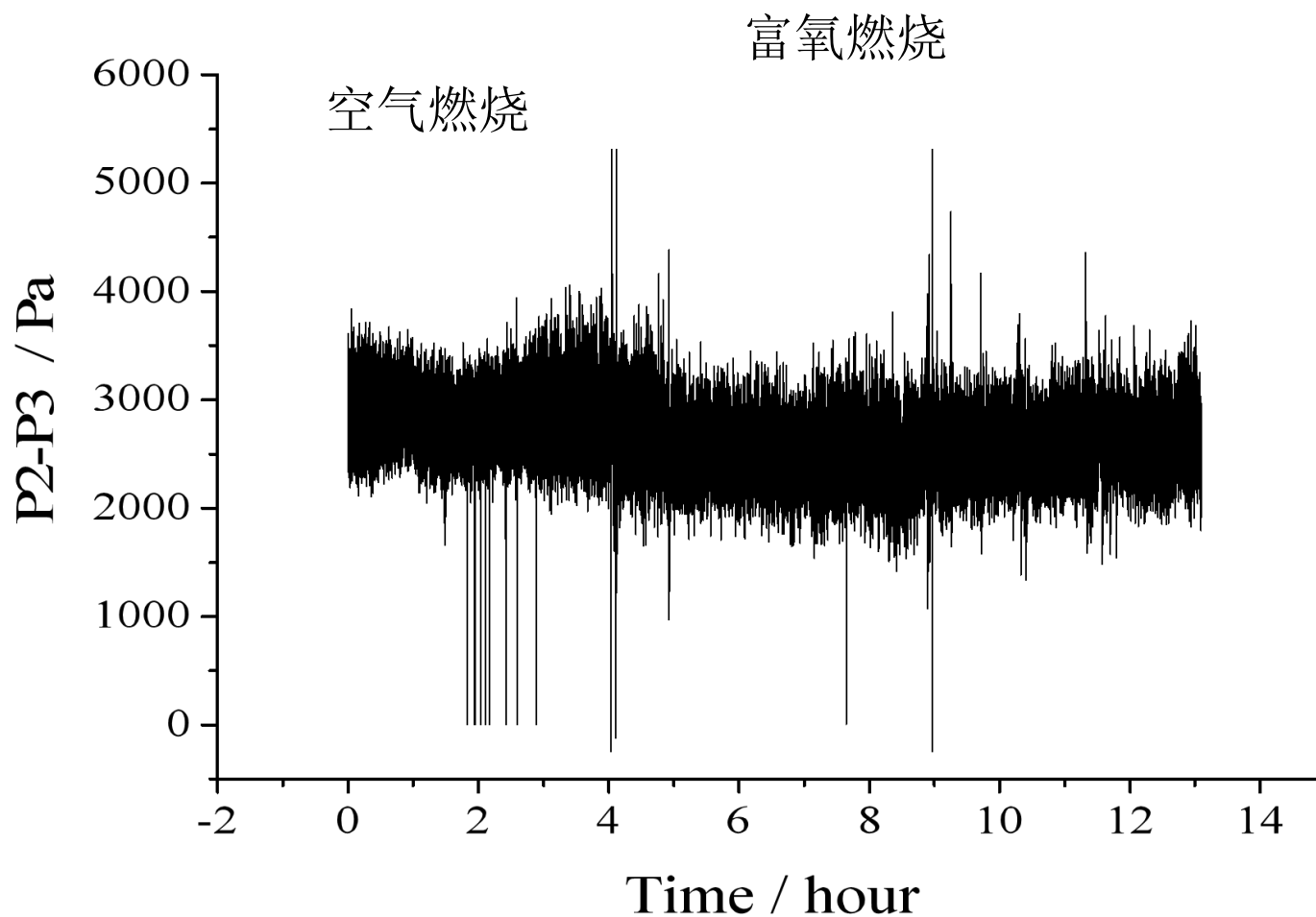
粒径: 0-1 mm



试验过程中床层压降



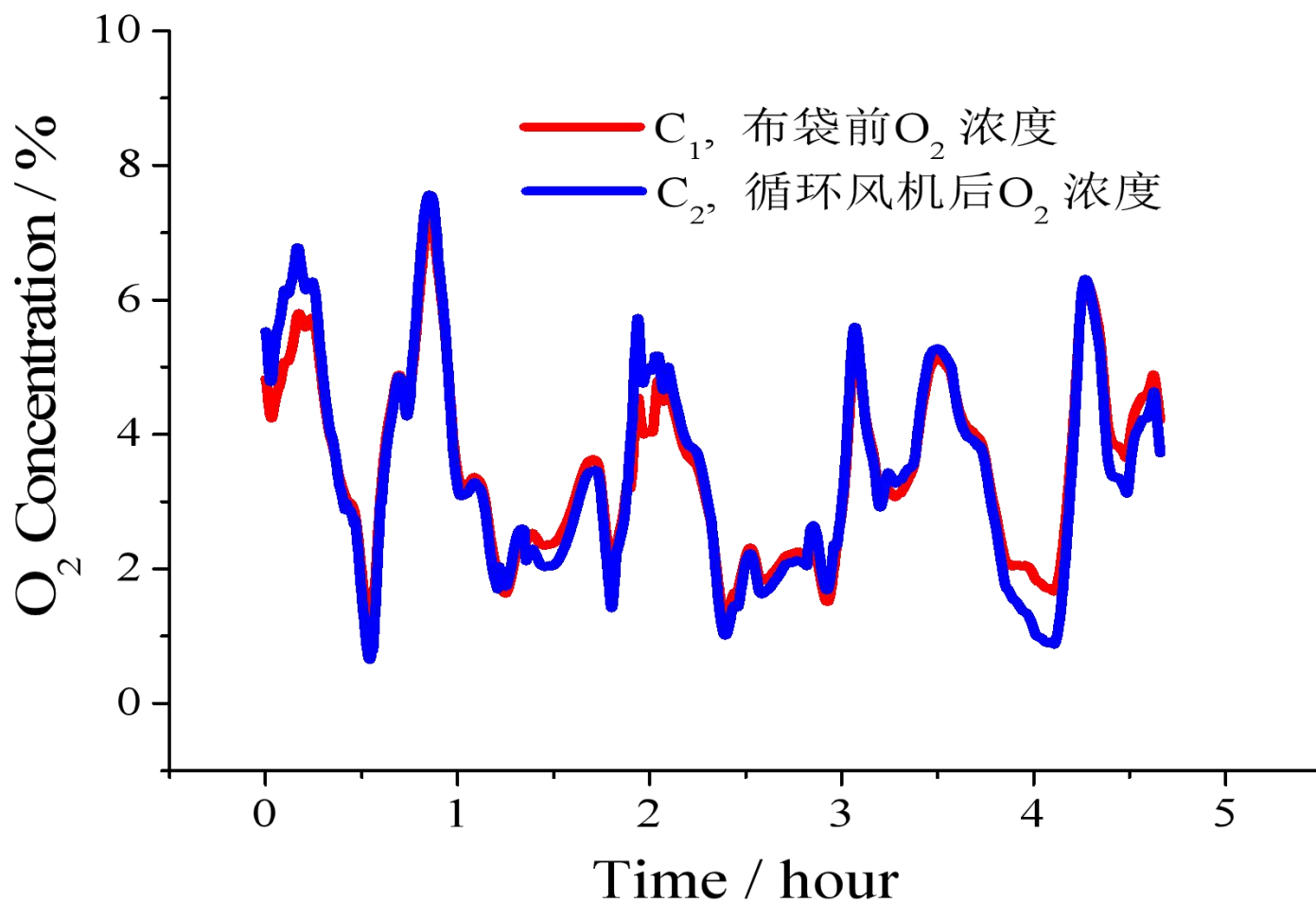
东南大学
中国 • 南京



试验过程中系统漏风



东南大学
中国 · 南京

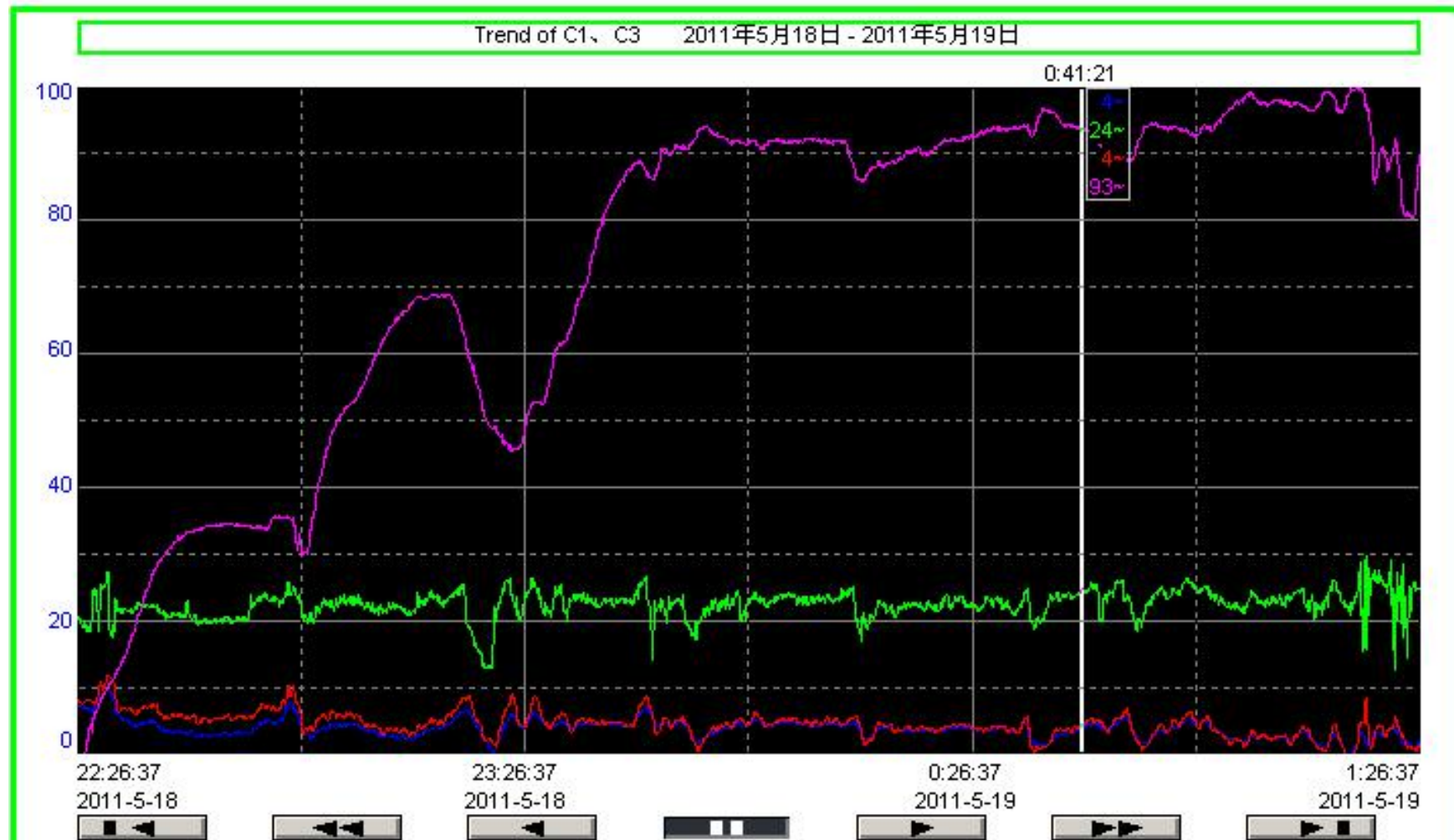


燃烧方式切换过程



东南大学
中国·南京

l of C1、C3 - /0xyCFB_20110426//



能源与环境学院

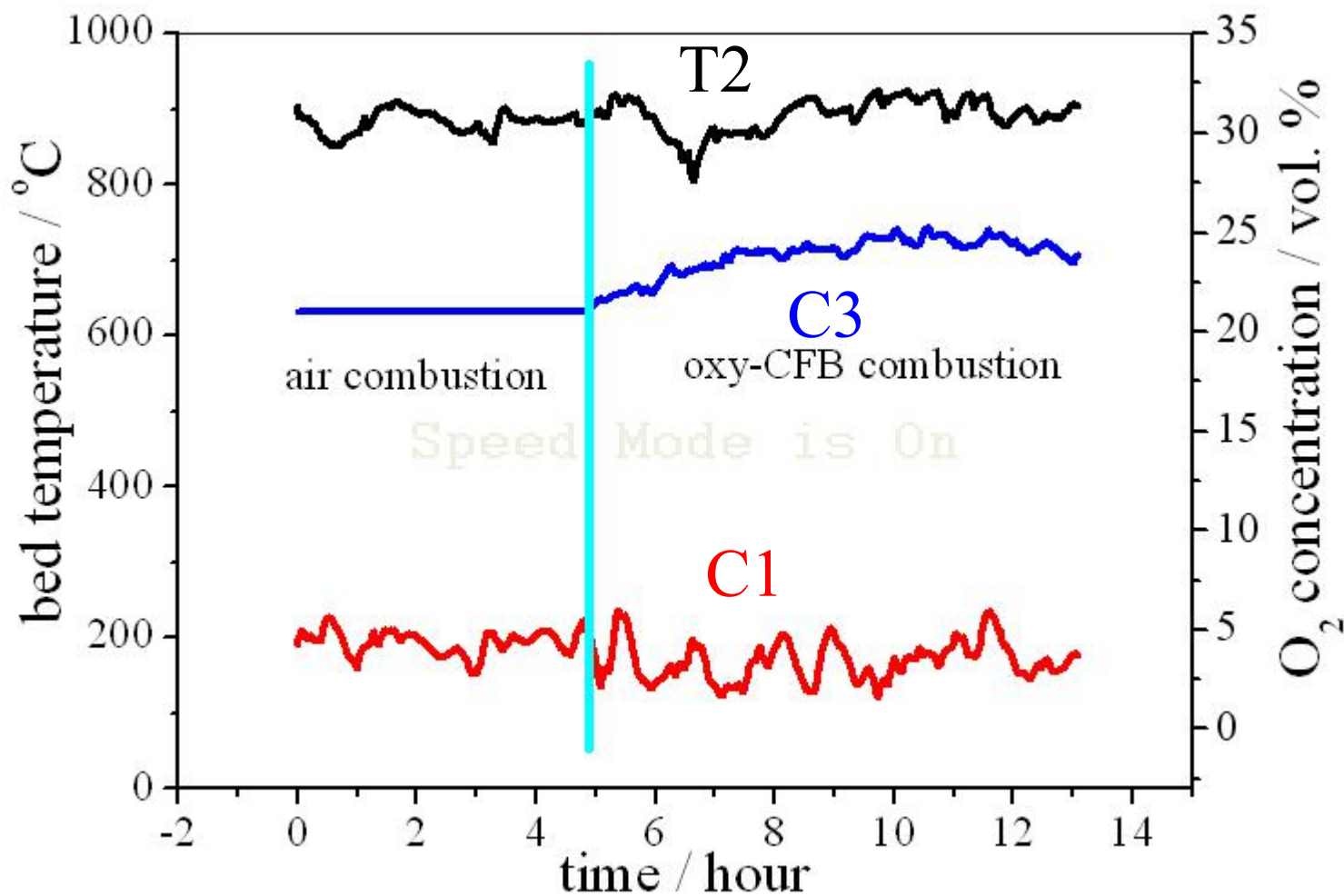
School of Energy & Environment

2022-1-4

燃烧方式切换过程



東南大學
中国 • 南京



能源

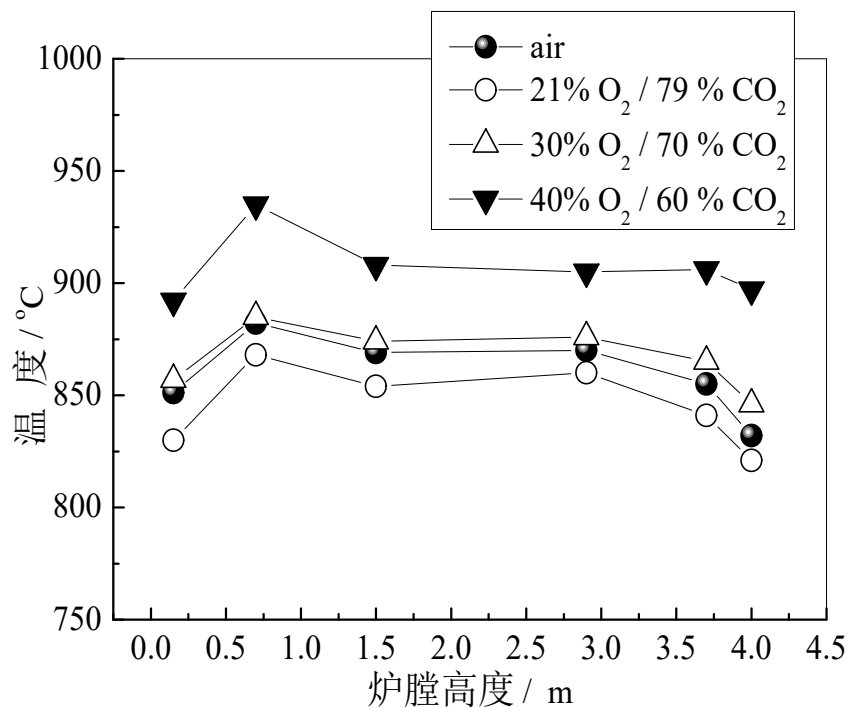
School of Energy & Environment

2022-1-4

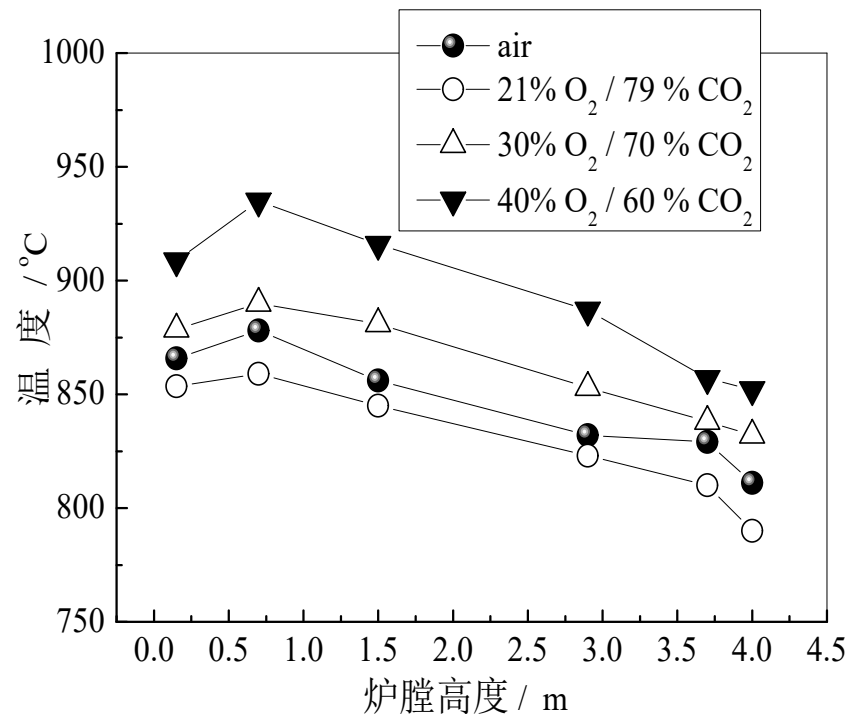
配气气氛试验结果



东南大学
中国 · 南京



褐煤



无烟煤

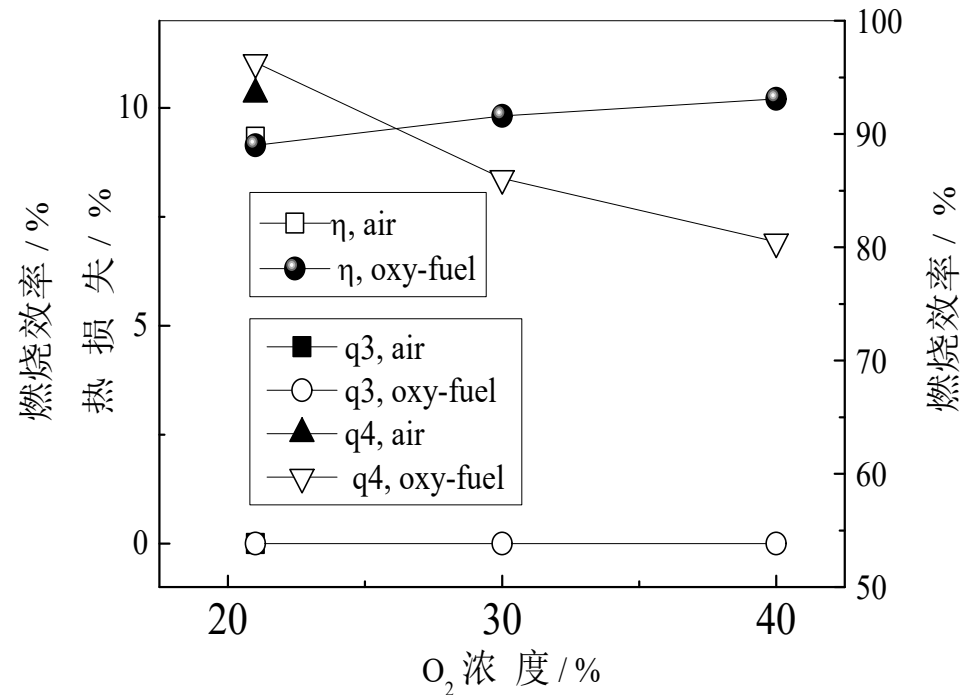
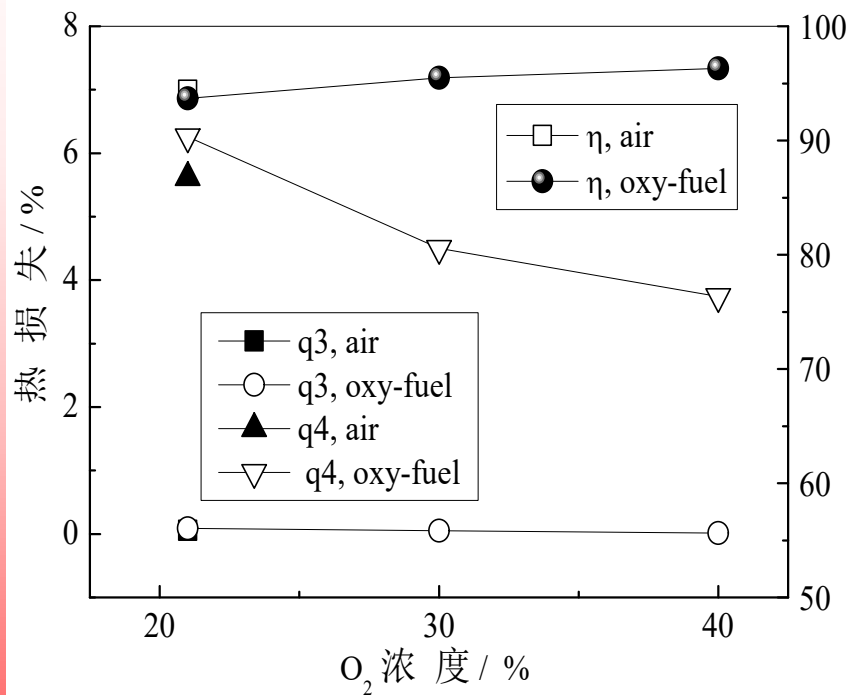
不同气氛下燃烧室温度分布
(给煤量: $8 \pm 0.5\text{kg}$; 一次风率: 0.70; $\text{Ca/S}=0$)



配气气氛试验结果



东南大学
中国 · 南京



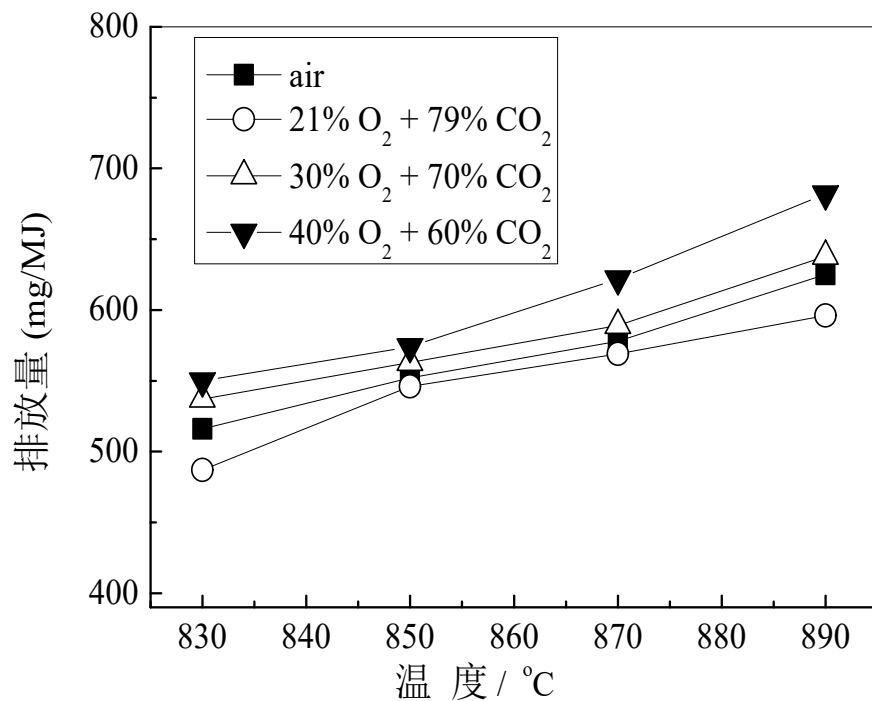
不同气氛下燃烧效率
(给煤量: $8 \pm 0.5\text{kg}$; 一次风率: 0.70; $Ca/S=0$)



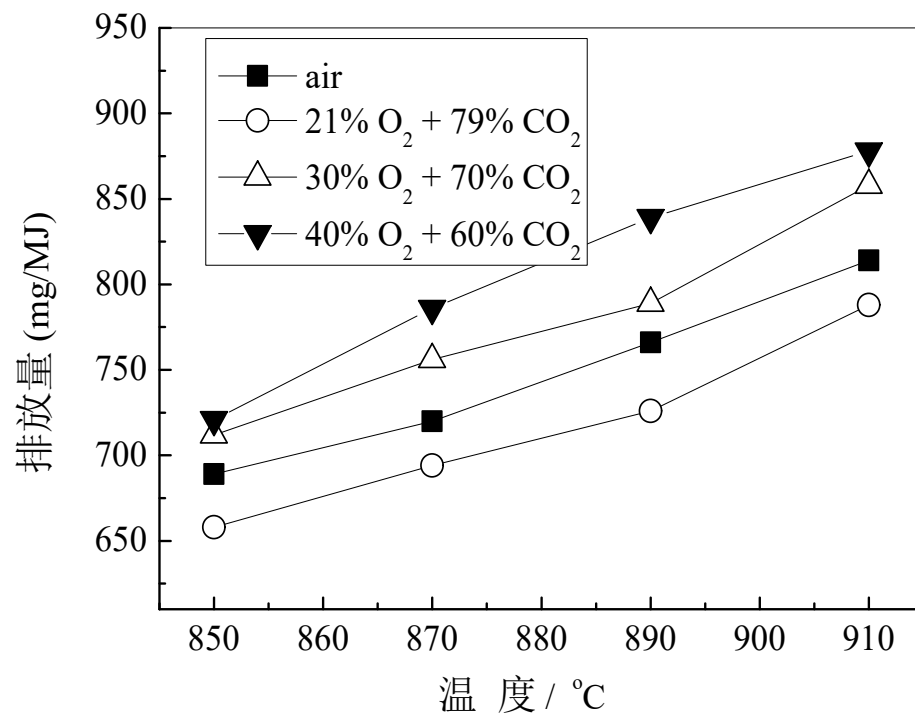
配气气氛试验结果



東南大學
中国 • 南京



褐煤



无烟煤

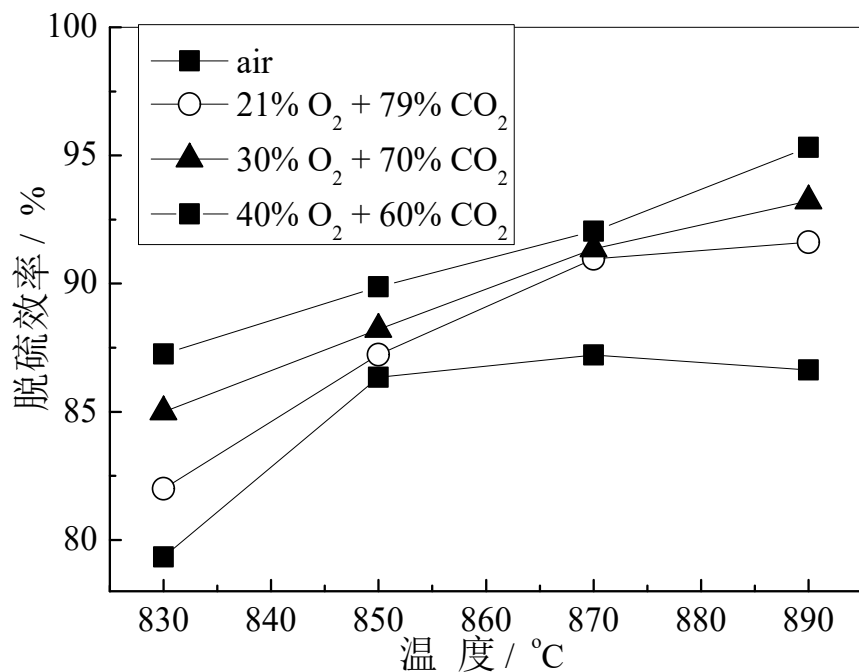
不同气氛下SO₂排放特性
(给煤量: $8 \pm 0.5\text{kg}$; 一次风率: 0.70; $\text{Ca/S}=0$)



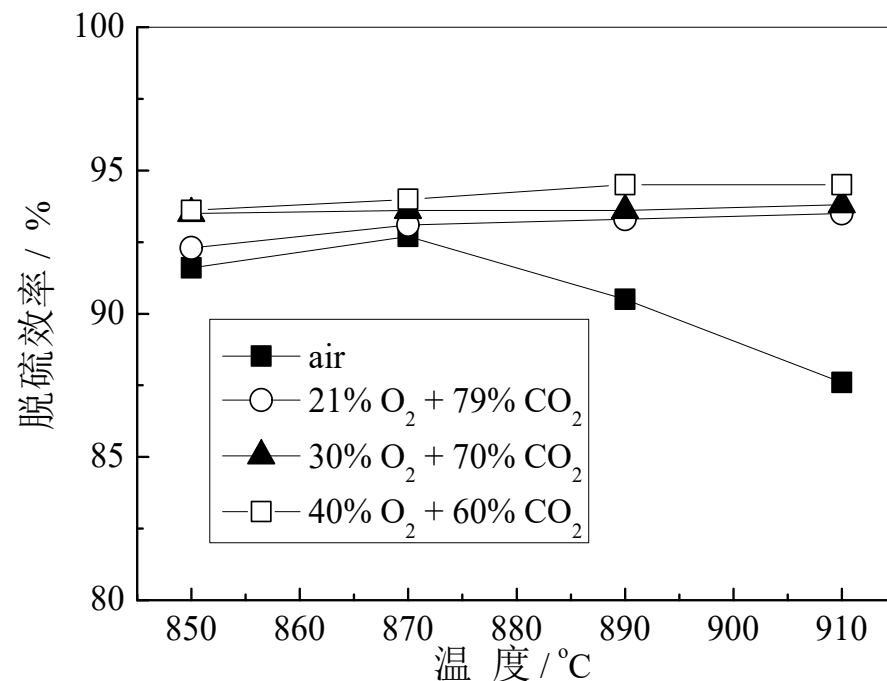
配气气氛试验结果



東南大學
中国 • 南京



褐煤



无烟煤

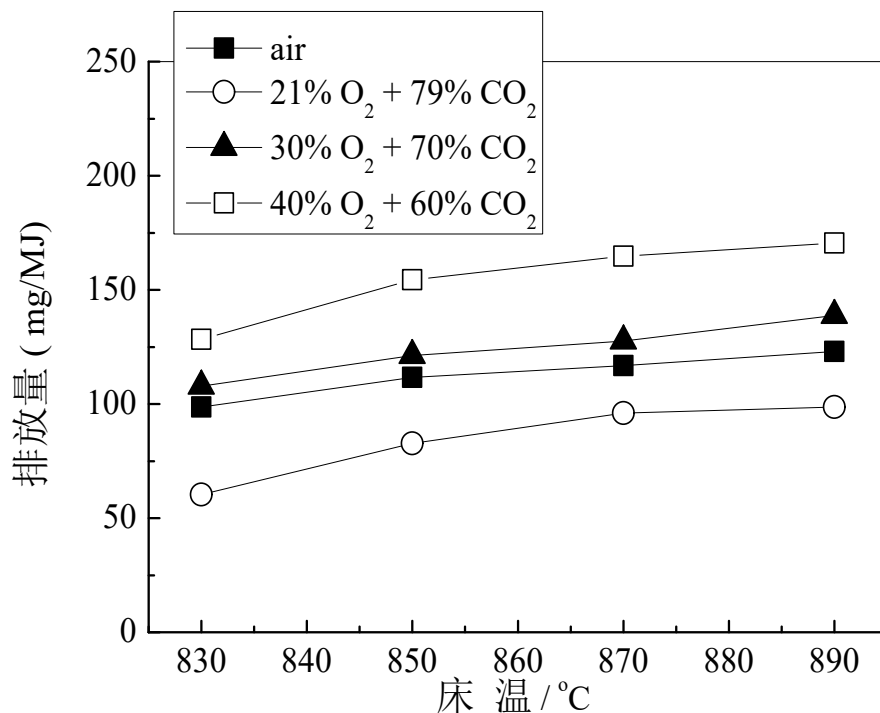
不同气氛下脱硫效率
(给煤量: $8 \pm 0.5\text{kg}$; 一次风率: 0.70; $\text{Ca/S}=2.5$)



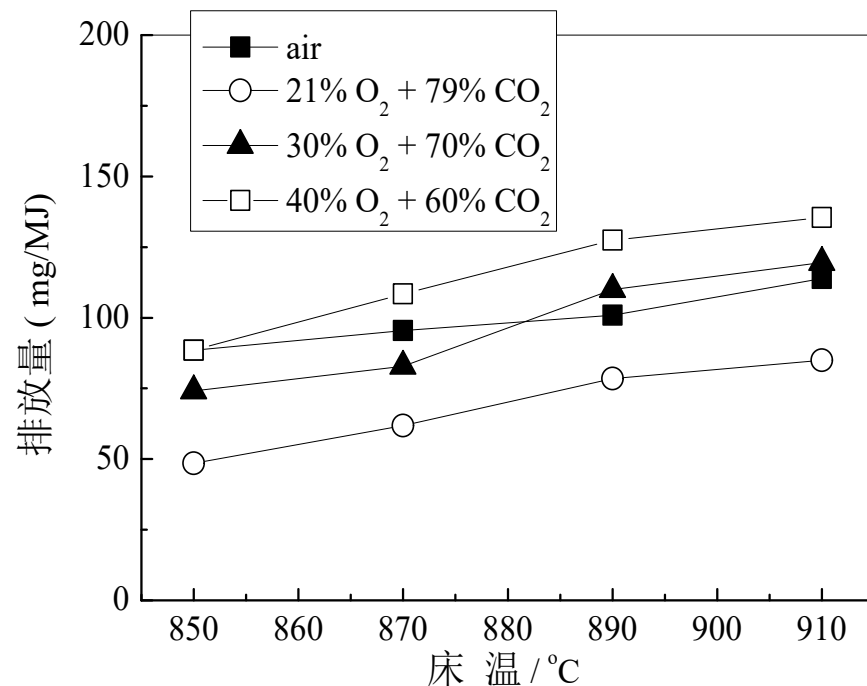
配气气氛试验结果



東南大學
中国 • 南京



褐煤



无烟煤

不同气氛下NO排放特性
(给煤量: $8 \pm 0.5\text{kg}$; 一次风率: 0.70; $Ca/S=0$)



烟气再循环初步试验结果



東南大學
中国 • 南京

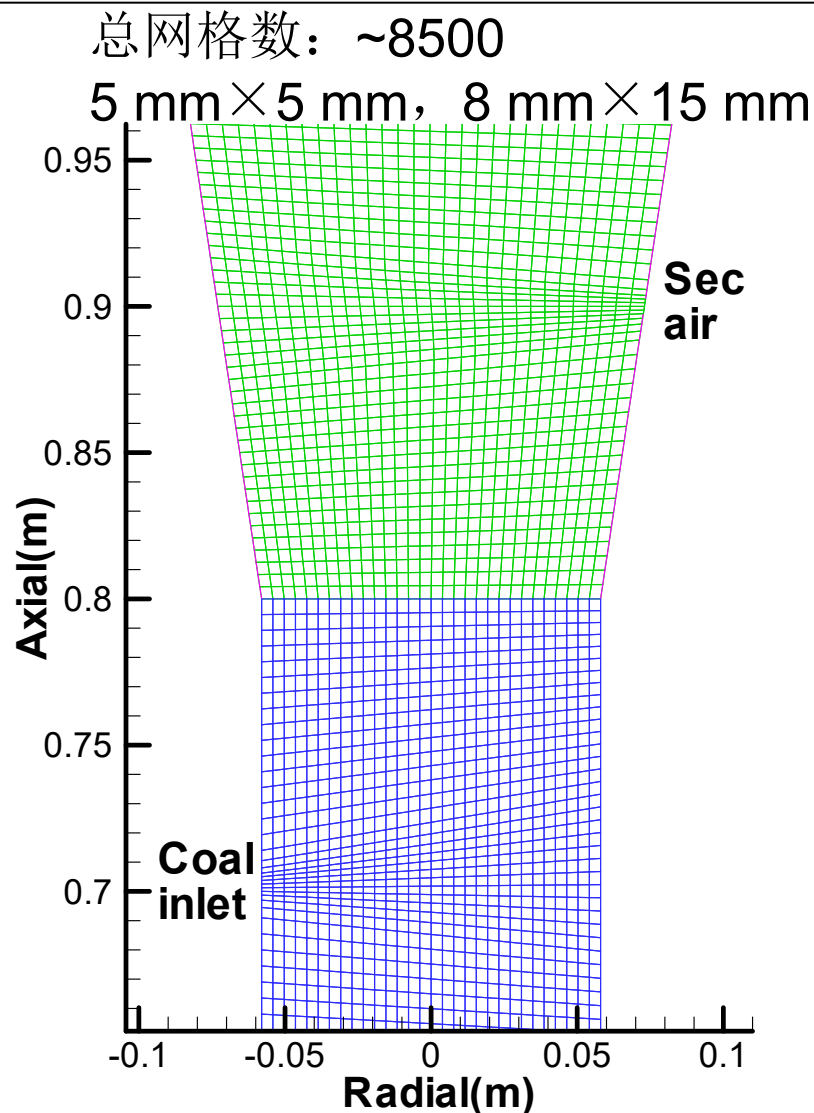
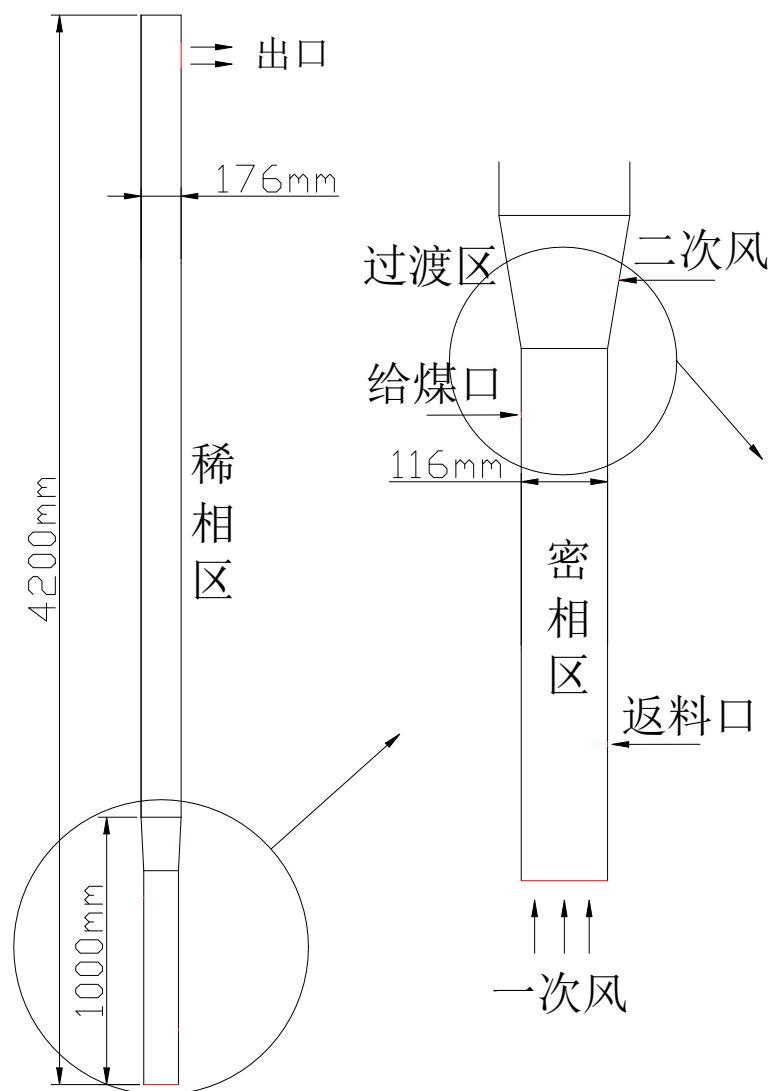
项目	单位	空气气氛	富氧气氛
床温, T2	°C	881	891
燃烧室出口温度, T7	°C	890	863
燃烧室出口O ₂ 浓度, C1	%	4.3	3.56
氧化剂O ₂ 浓度, C3	%	20.95	22.15
SO ₂	mg/MJ	1095.31	265.4685
脱硫效率	%	52.67(Ca/S=2.5)	88.5(Ca/S=4)
NO	mg/MJ	104.8	24.3
CO	mg/MJ	367.9	58.6



数值模拟对象及网格划分



东南大学
中国·南京





CFB炉内煤燃烧综合模型

耦合

流动

颗粒动理学
能量最小
多尺度原理
双流体

传热

导热
对流
辐射
反应热

燃烧

热解
挥发分燃烧
焦炭燃烧
焦炭气化

污染物

SO_2
 NO_x

模型主要参数及物性



東南大學
中国 • 南京

参数	数值	参数	数值
颗粒粒径	0.35 mm	给煤量	8 kg/h
颗粒最大堆积体积份额	0.63	过量空气系数	1.2
颗粒摩擦最小固相体积份额	0.61	给煤风风率	0.05
颗粒与颗粒碰撞系数	0.9	返料风风率	0.05
镜面系数	0.5	一次风风率	0.6
一次风温度	423 K	出口压力	-50 Pa
二次风和给煤风温度	423 K	壁面厚度	300 mm
返料口进风温度	700 K	外壁面温度	323 K

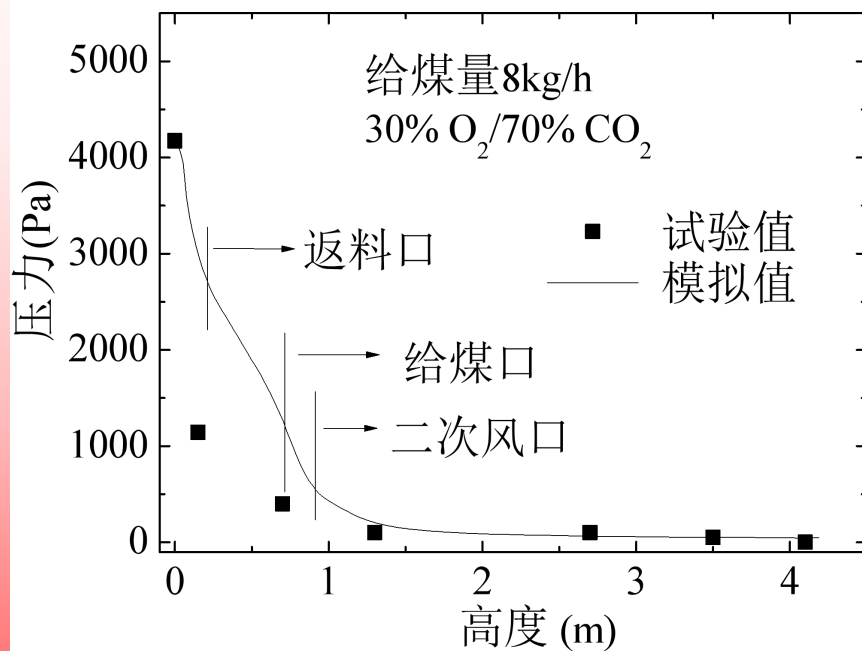
组分	密 度 (kg/m ³)	比 热 (J/kg·K)	导热系数 (w/m·K)	298K 下 焓 值 (J/kmol)
干燥原煤	1332	1220	1	-2.486375e7
水分	998.2	4182	0.6	-2.858412e8
可燃碳	1500	1220	1	-101.268
CaSO ₄	2960	732	0.5	-1.434159e9
CaO	2200	783	2.25	-6.351003e8
CaCO ₃	2714	856	2.25	-1.20693e9
灰分	2200	856	1	0



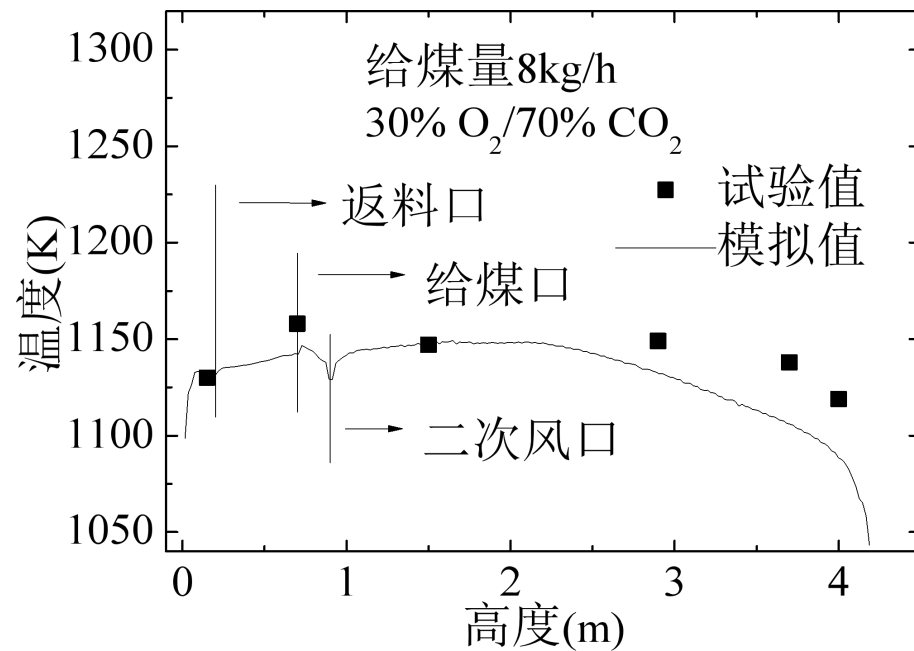
30% O₂/70% CO₂气氛下验证



东南大学
中国·南京



30% O₂/70% CO₂气氛下
燃烧室压力分布



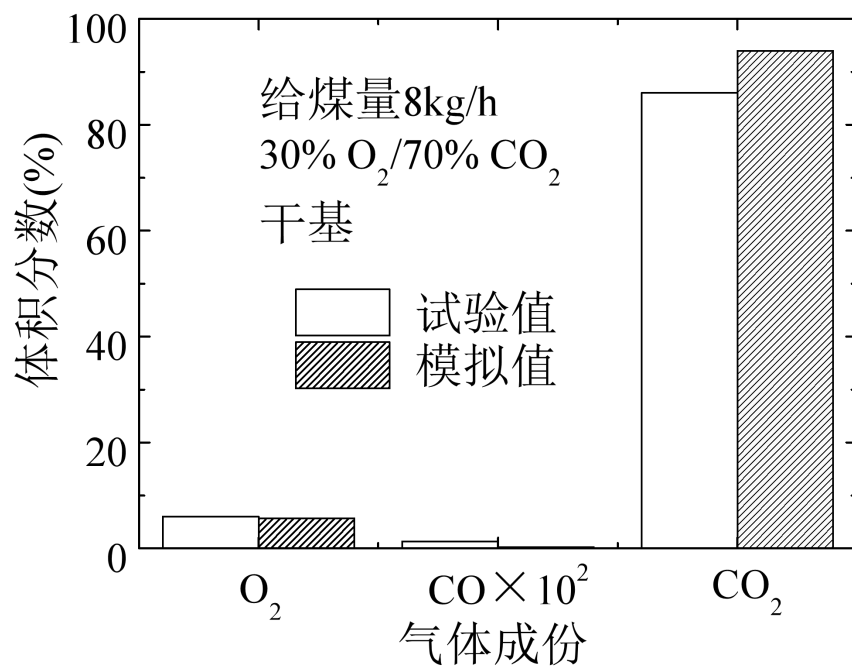
30% O₂/70% CO₂气氛下
燃烧室温度分布



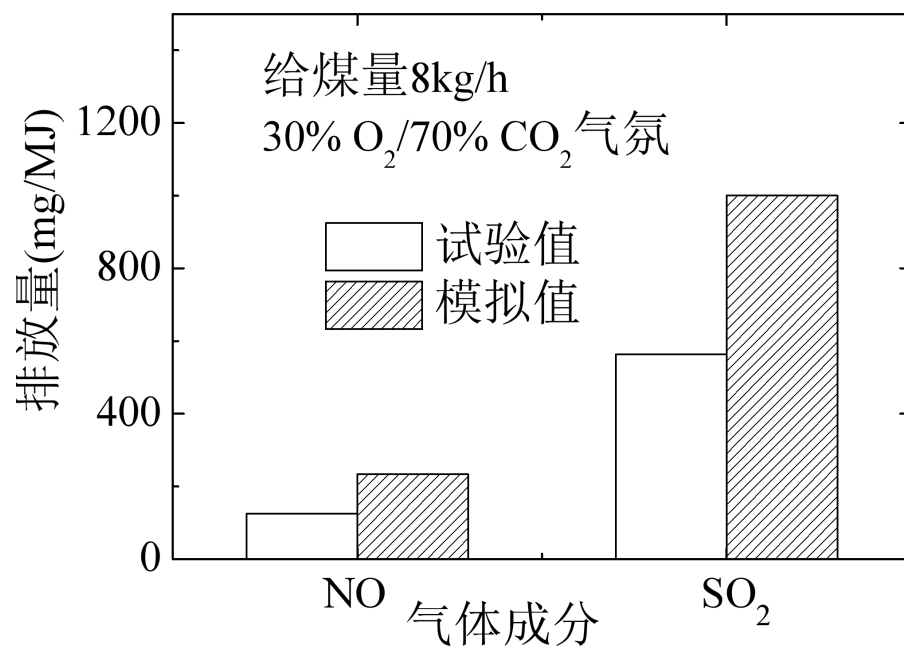
30% O₂/70% CO₂气氛下验证



东南大学
中国·南京



30% O₂/70% CO₂气氛下
燃烧室出口气体浓度



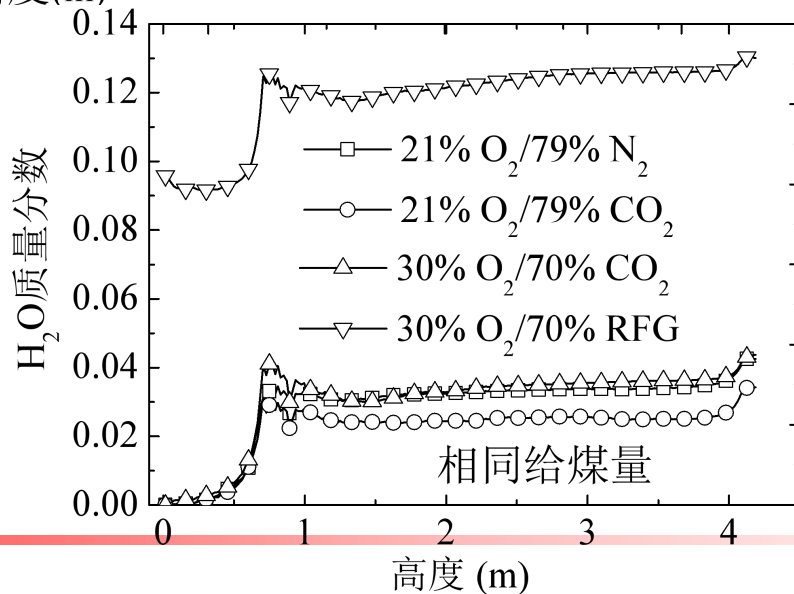
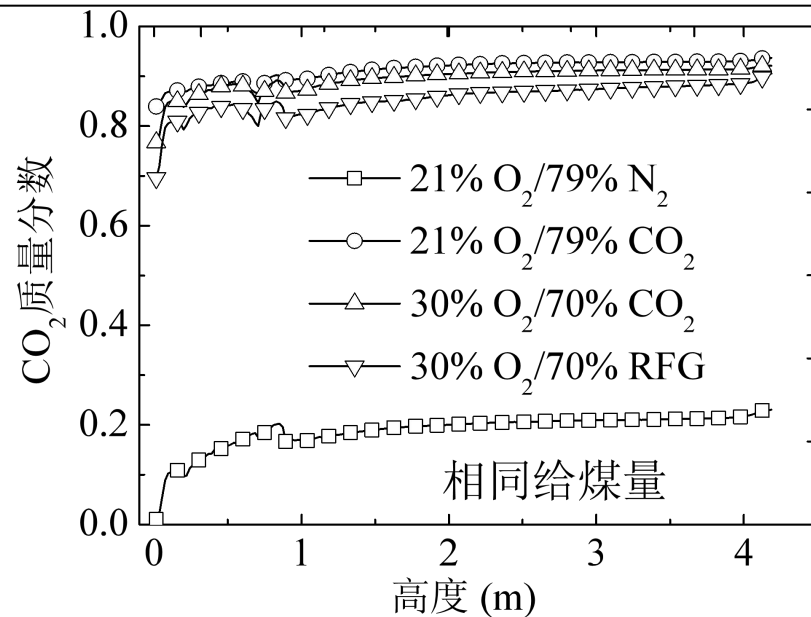
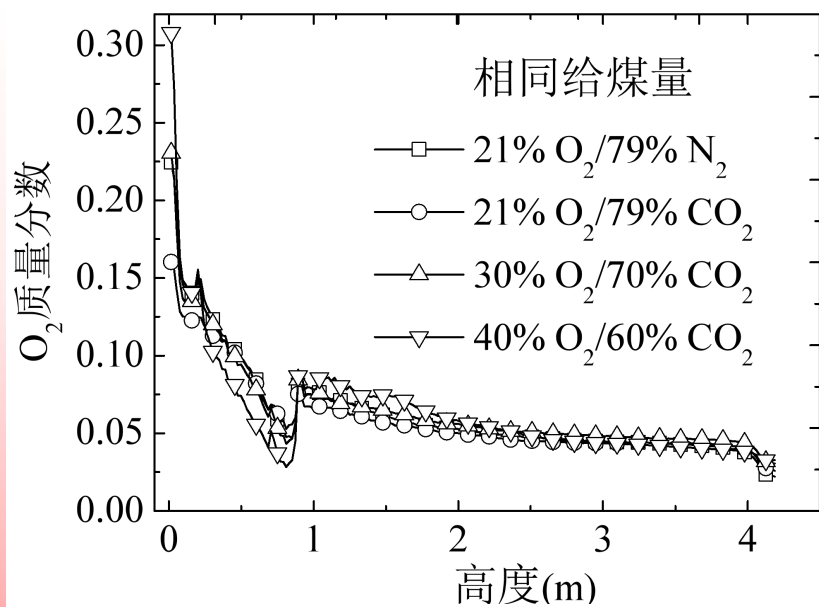
30% O₂/70% CO₂气氛下
污染物排放量



模拟预测主要气体成分分布



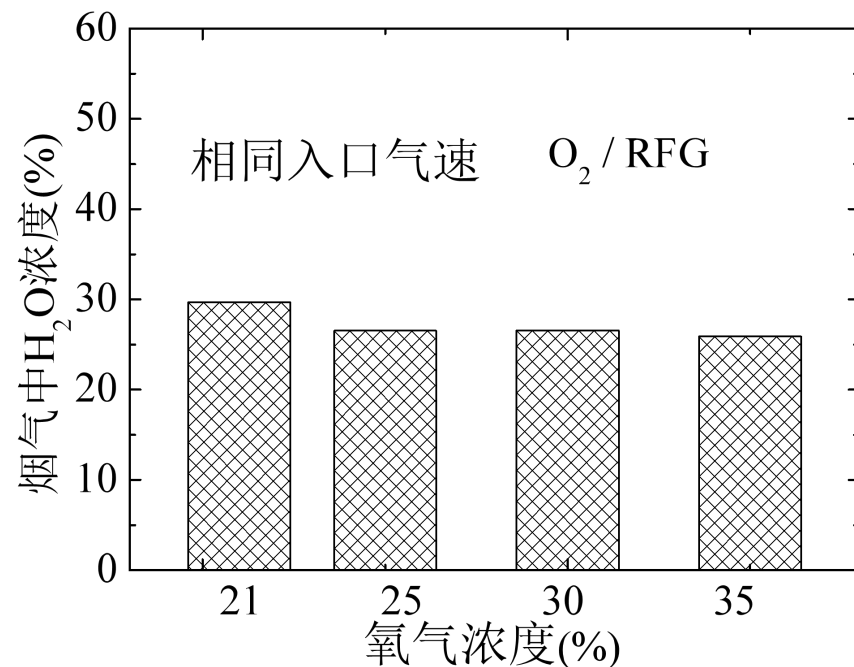
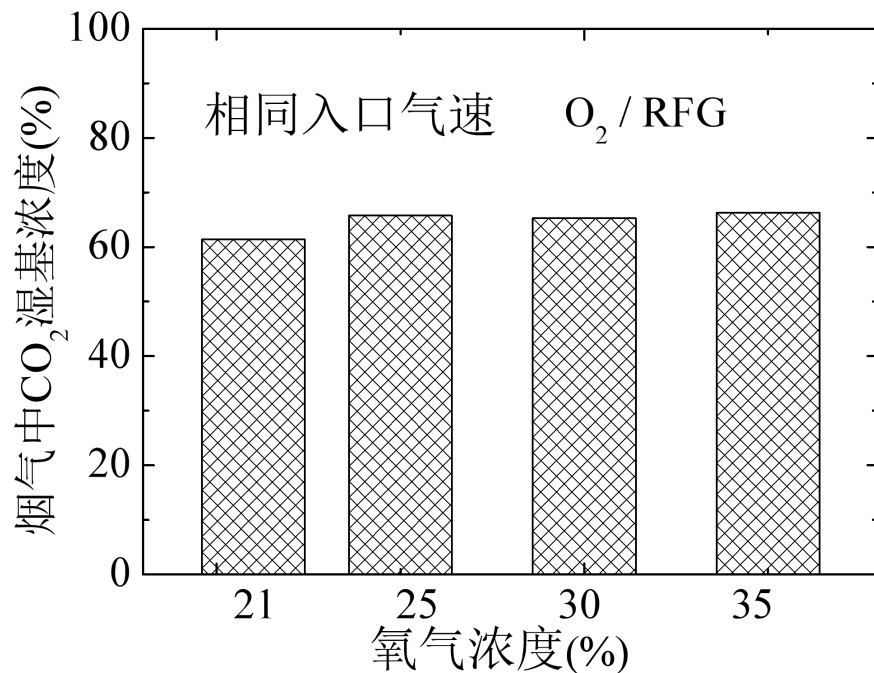
东南大学
中国 · 南京



模拟预测CO₂和H₂O浓度



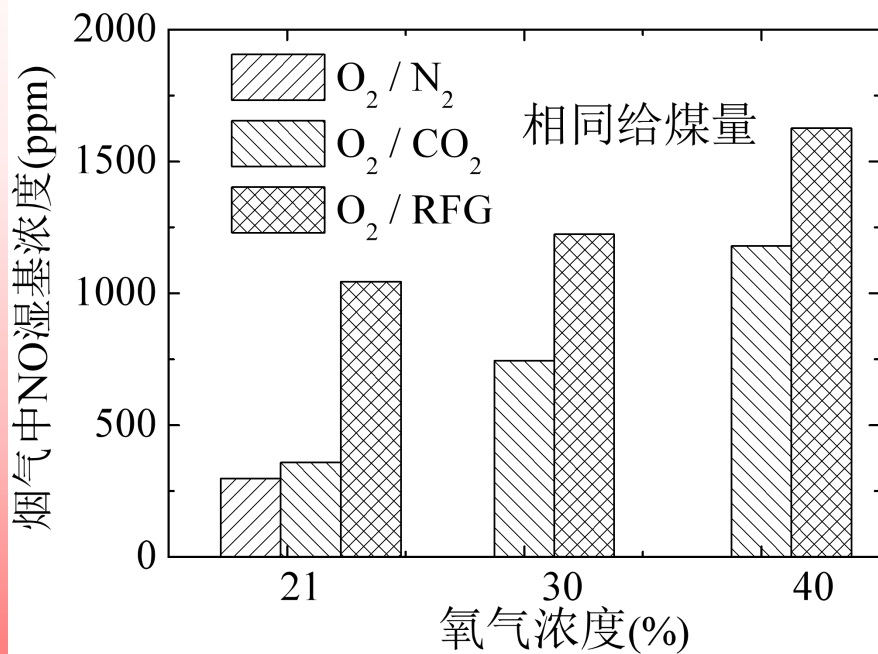
東南大學
中国 • 南京



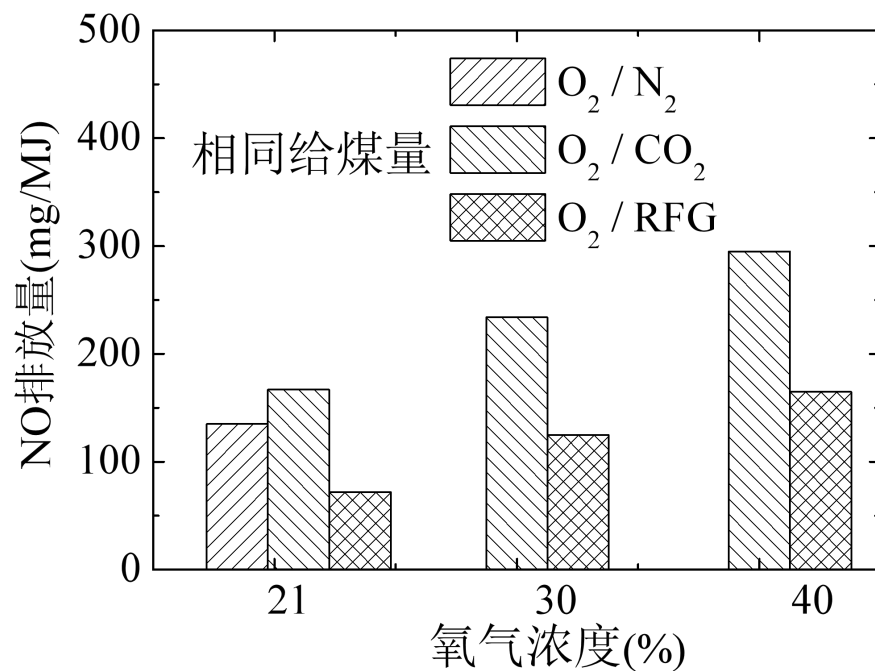
模拟预测污染物排放 (1/2)



東南大學
中国 • 南京



不同气氛下燃烧室出口
NO湿基浓度



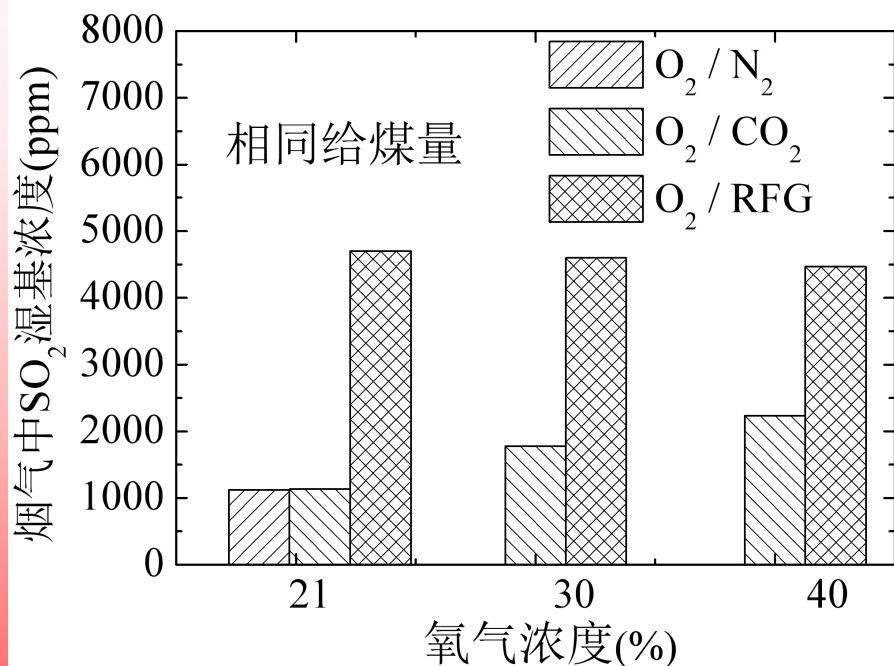
不同气氛下
NO排放量



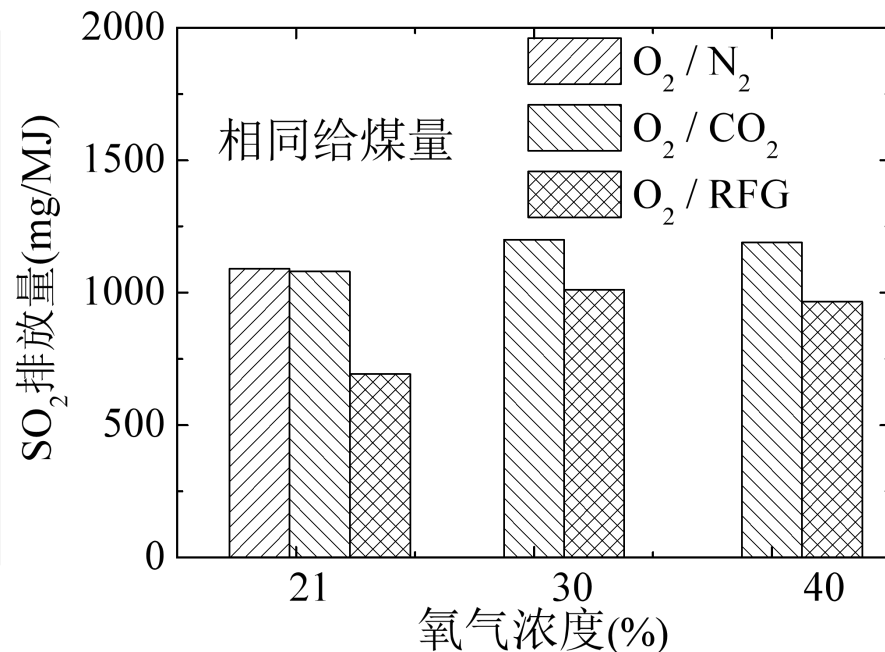
模拟预测污染物排放 (2/2)



東南大學
中国 • 南京



不同气氛下燃烧室出口
 SO_2 湿基浓度



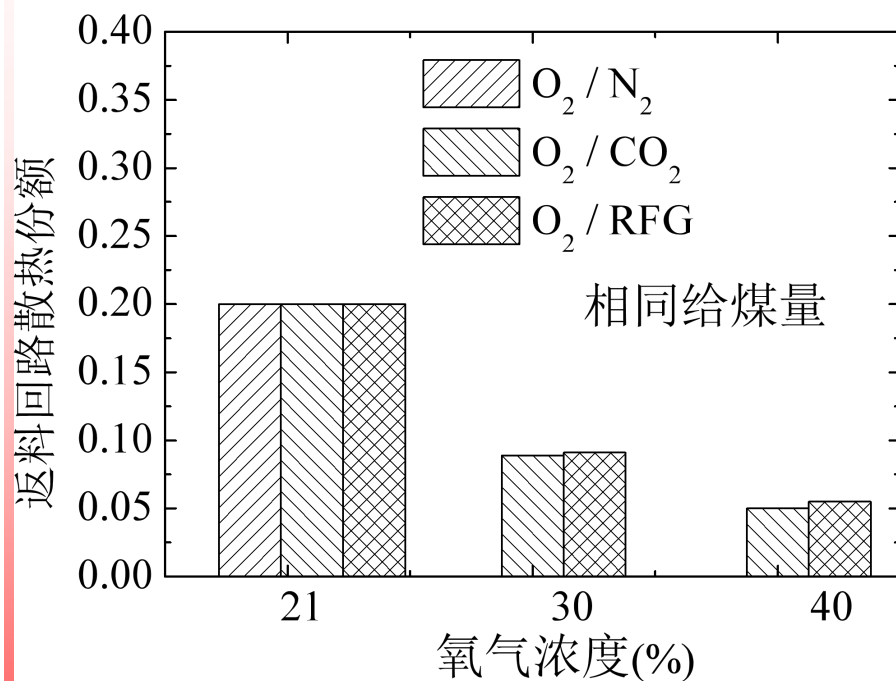
不同气氛下
 SO_2 排放量



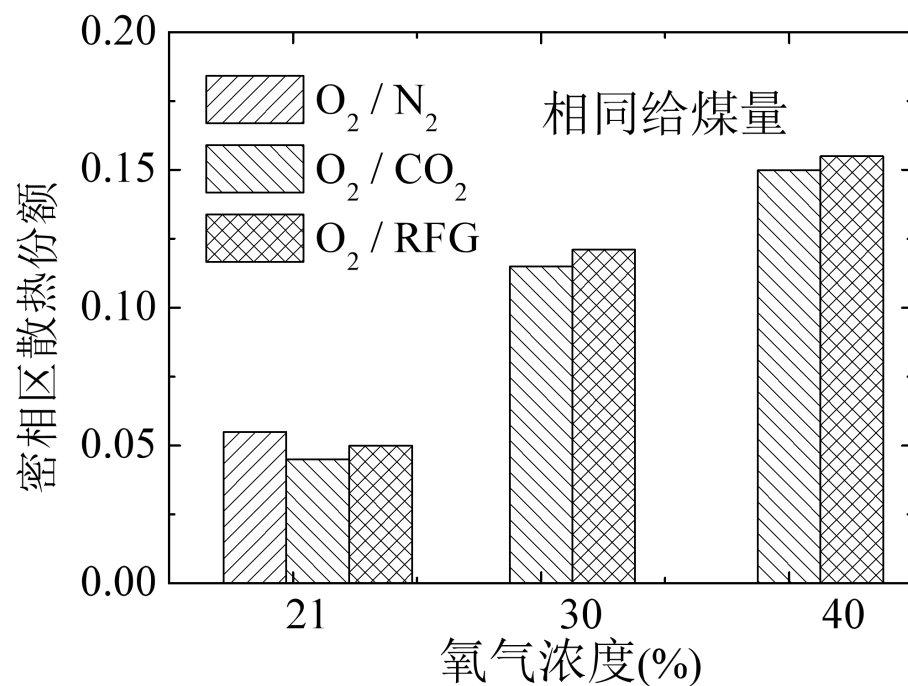
模拟预测热负荷分配



東南大學
中国 • 南京



不同气氛下返料回路
散热份额比较



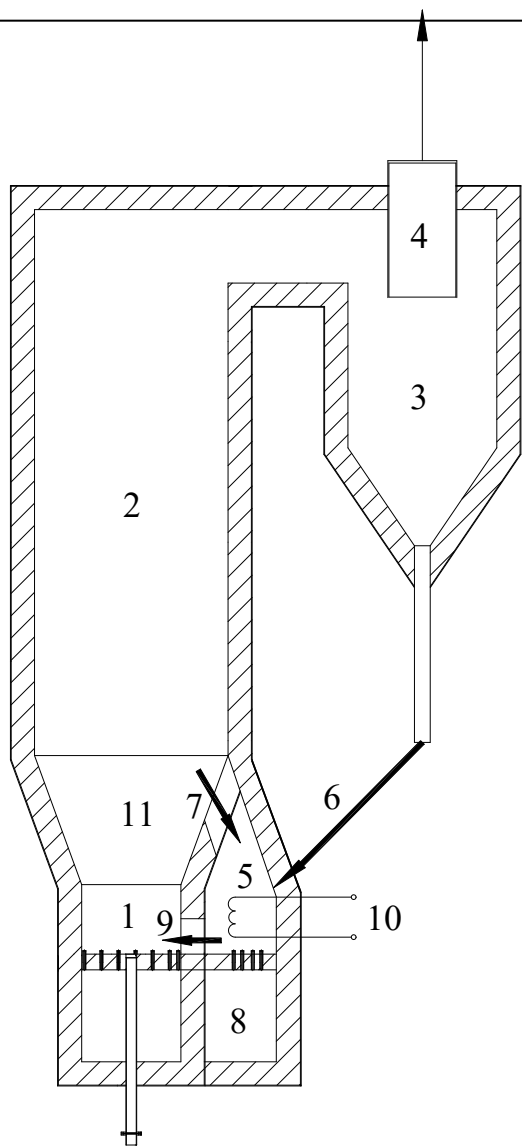
不同气氛下燃烧室密相区
散热份额比较



外置鼓泡流化床富氧燃烧换热器



东南大学
中国 · 南京



合理布置炉内受热面及开发高效的外置床换热器是循环流化床 O_2/CO_2 燃烧需要解决的关键问题之一。

外置式换热器内可布置30%左右受热面
燃烧介质中 O_2 浓度可达60%
锅炉尺寸可大为减小



总结与展望



東南大學
中国 • 南京

- 东南大学推荐一种从氧气预热器前后循环烟气的温烟气循环方法，具有提高锅炉效率和脱硫效率的优点。
- 目前，解决受热面的布置问题是开发循环流化床 O_2/CO_2 燃烧锅炉的首要问题，东南大学正在开发具有自主知识产权的外置床换热器。



致 谢



東南大學
中国 • 南京

- ◆ 国家973计划课题 “循环流化床O₂/CO₂循环燃烧及污染物的协同脱除” (2006CB705806)
- ◆ 国家973计划课题 “低成本富集CO₂的循环流化床燃烧原理和技术” (2011CB707301-3)



能源与环境学院

School of Energy & Environment

2022-1-4



谢谢!