

循环流化床 O_2/CO_2 煤燃烧 及其污染物排放特性研究

赵长遂 段伦博 陈晓平

东南大学热能工程研究所，南京 210096

主要内容

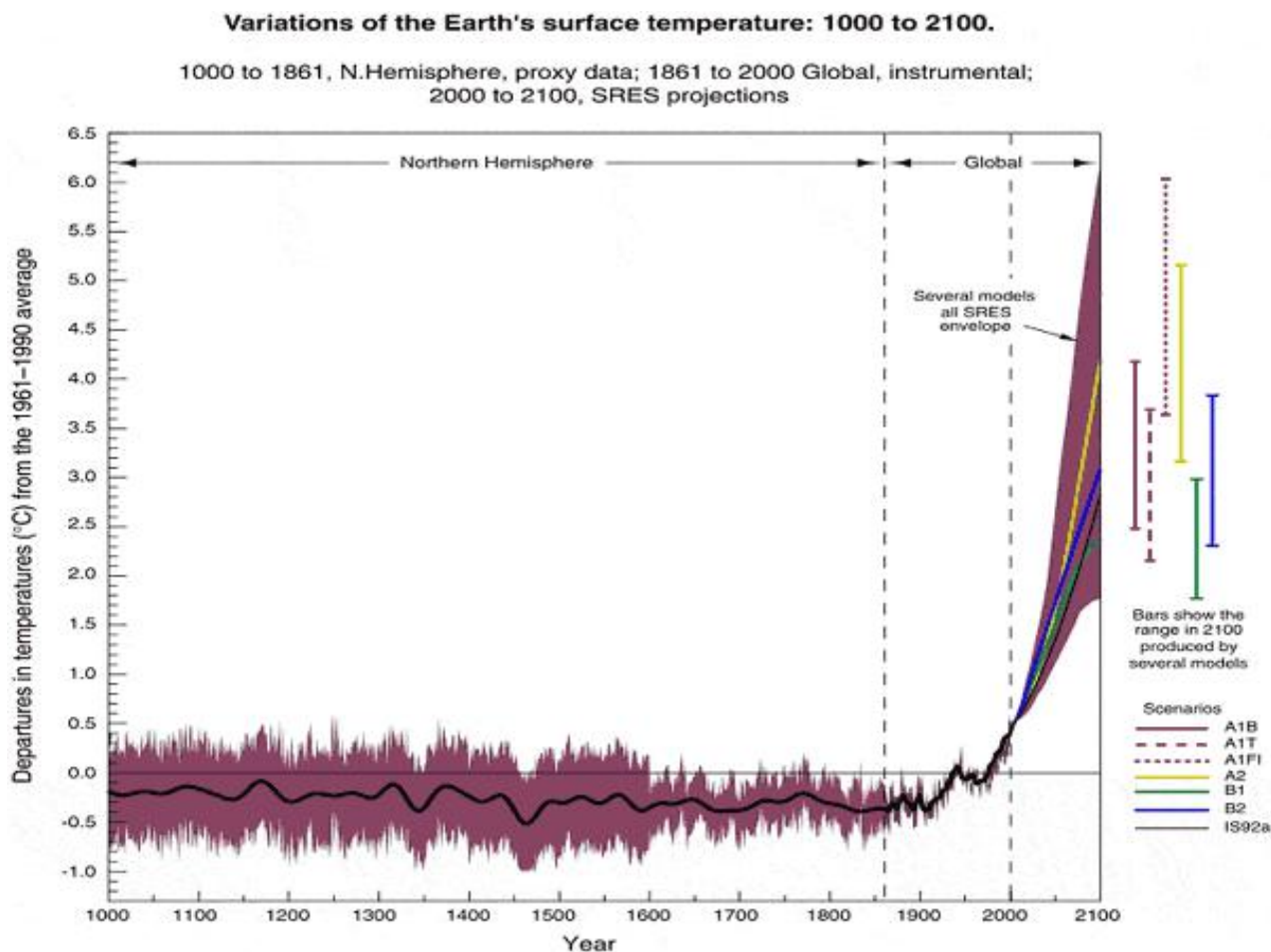
1. 背景
2. 试验设备及试样
3. 试验结果及分析
4. 结论



1、背景



全球变暖



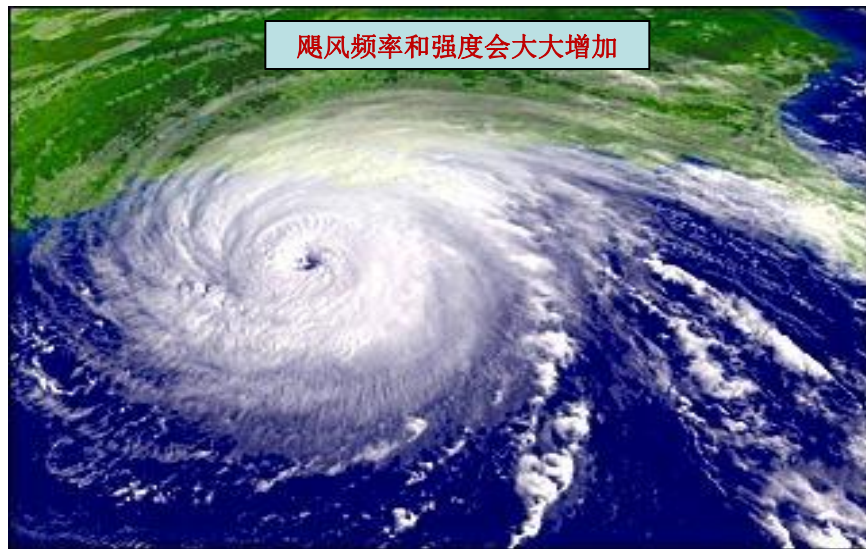
可能带来的后果 第七 冰川融化、海平面上升和飓风增加



东南大学
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。



能源与环境学院

School of energy & Environment

2022-1-4

气候变化会使12-32亿人口面临干旱和
水源短缺， 从而造成粮食短缺， 贫困人口增加



東南大學
中国 • 南京



能源与环境学院

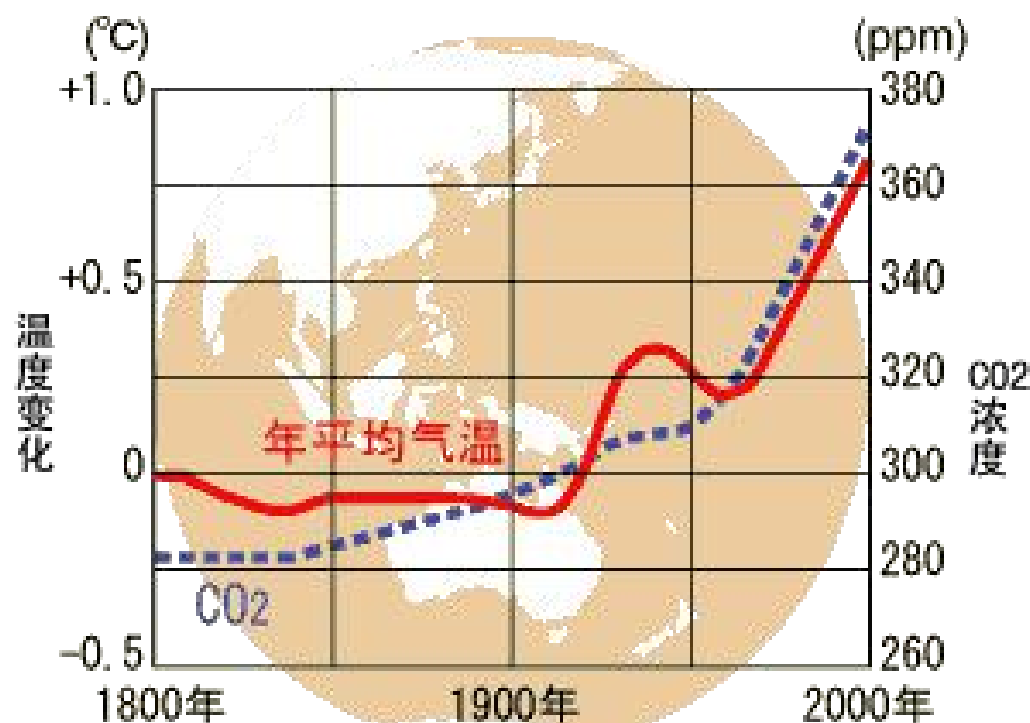
School of energy & Environment

2022-1-4

大量生物灭亡

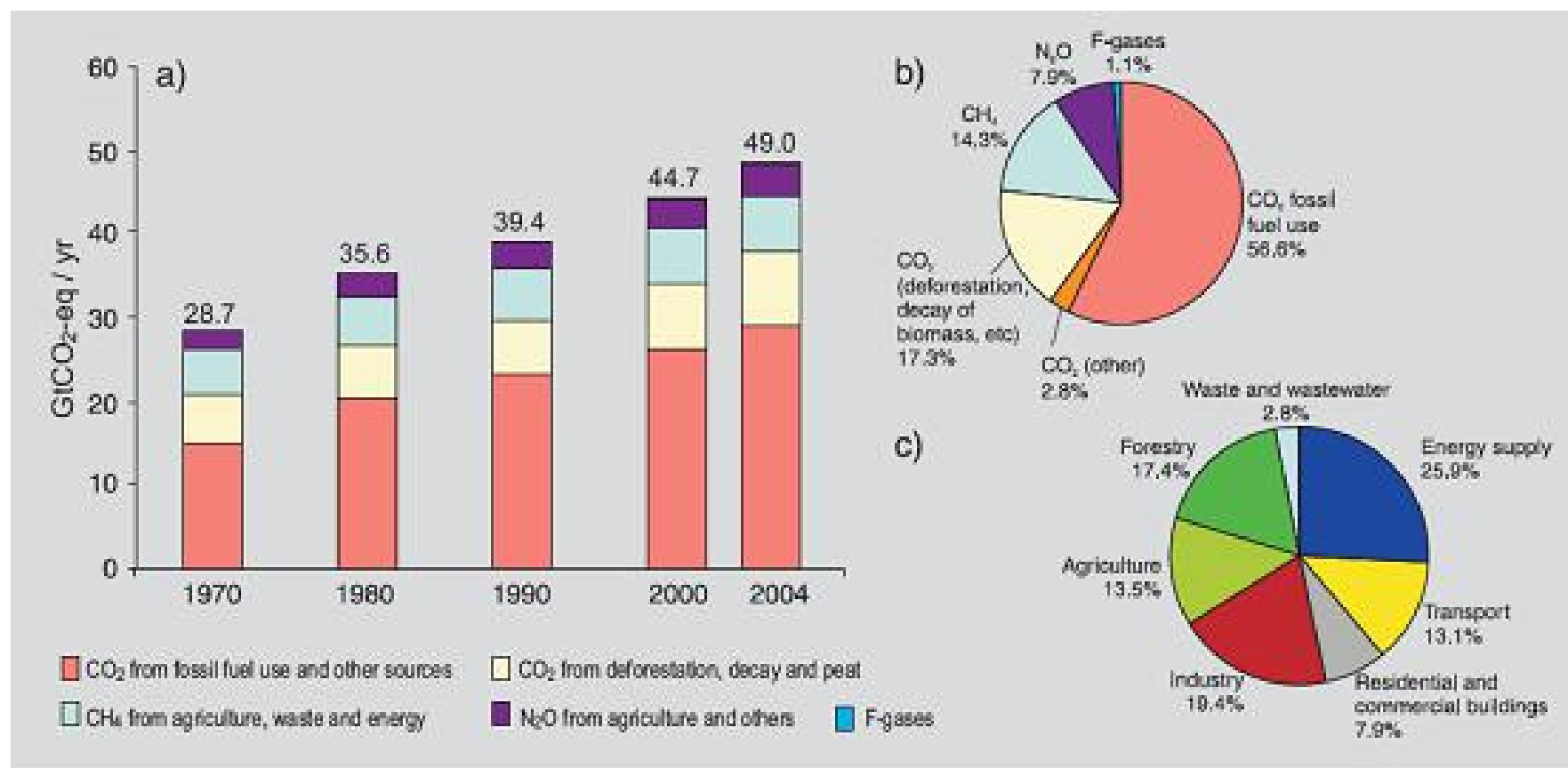


地球温度上升和CO₂浓度的关系

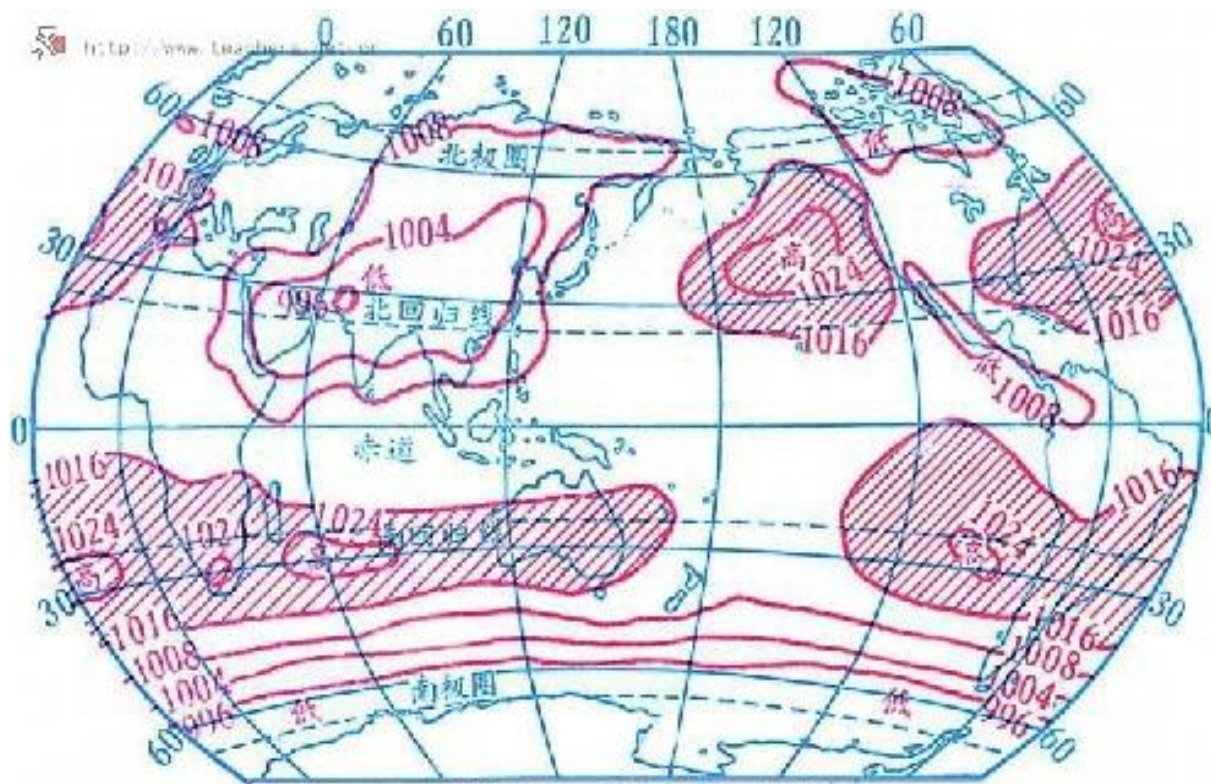


地球年平均气温变化图

温室气体的来源

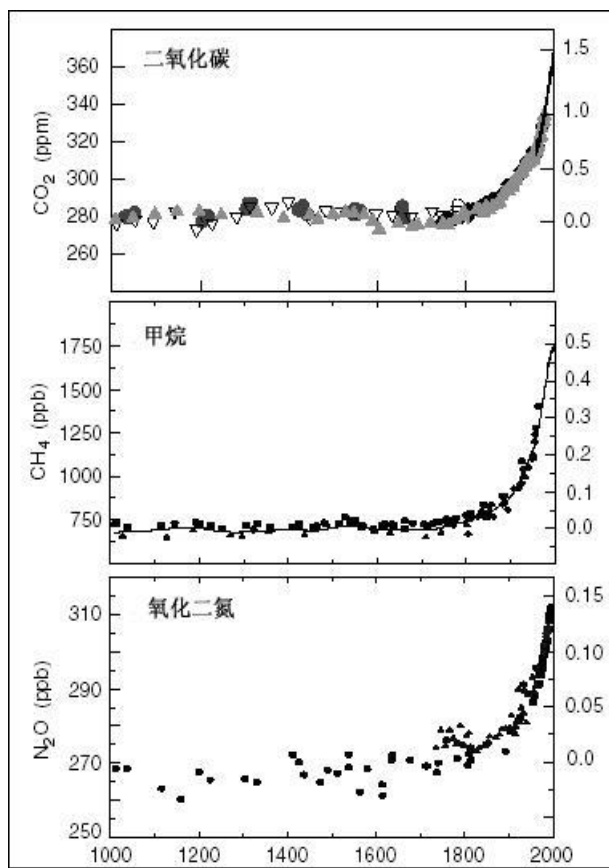


国务院新闻办公室10月29日发表《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书指出：近三十年来，中国沿海海平面上升了90毫米。地表气温升高 1.1°C 。疾病发生和传播的机会增加。



7月气压 气压单位(毫巴)
7月份海平面等压线的分布

我国温室气体的来源及危害



CO₂:1

主要来自

CH₄:11

部分来自

N₂O:270

主要来自





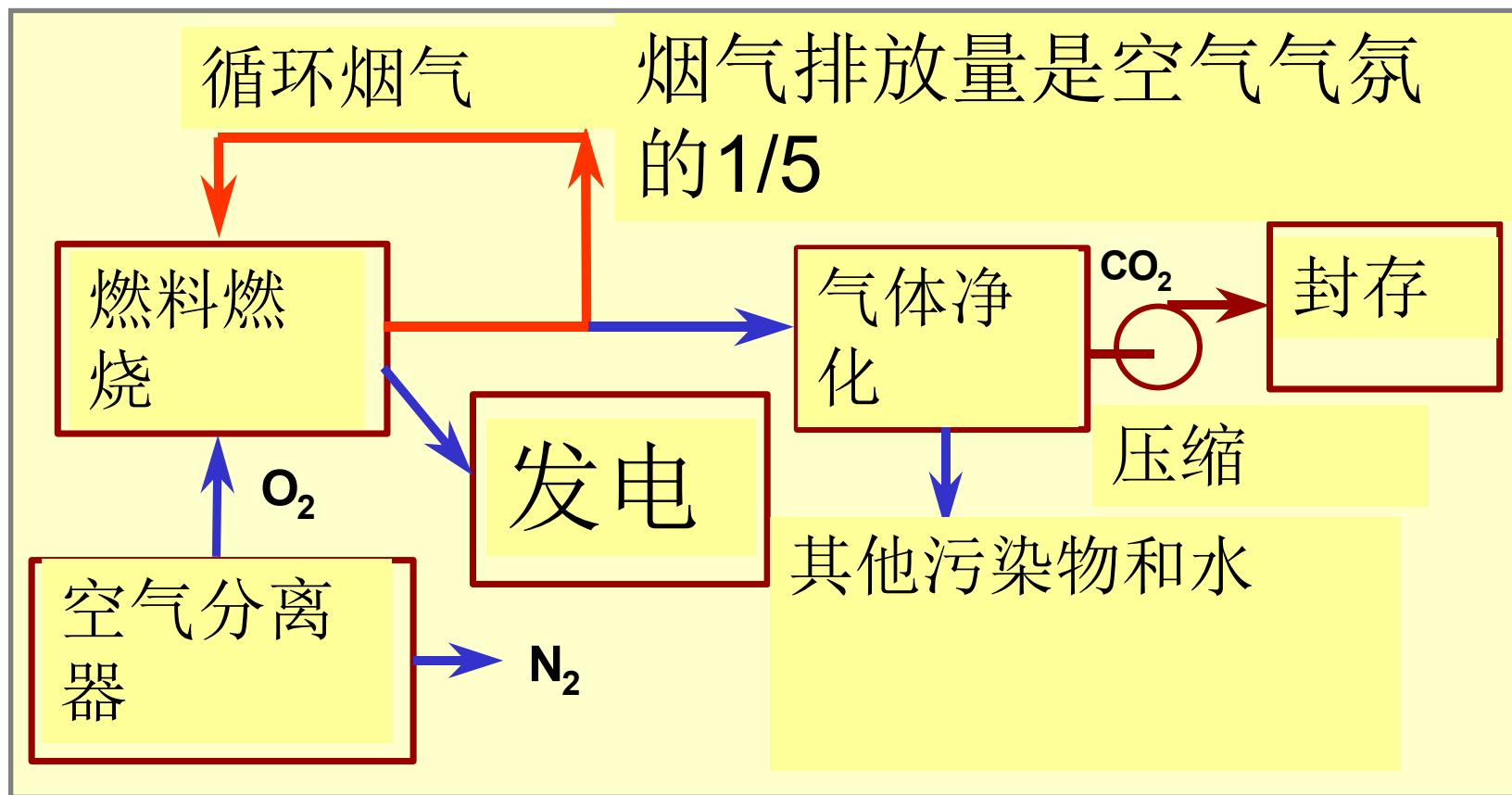
引起各方高度重视!

主要的燃煤电站CO₂减排技术

- ◆ 湿法吸收分离技术（MEA）；
- ◆ 整体煤气化联合循环技术（IGCC）；
- ◆ 煅烧—碳酸化循环分离技术（CCR）；
- ◆ 化学链燃烧技术（CLC）；
- ◆ 膜分离技术；
- ◆ O₂/CO₂燃烧技术。

在众多的CO₂减排技术中，O₂/CO₂燃烧技术是最现实的燃煤电站CO₂减排技术，离我们并不遥远！

O_2/CO_2 技术流程示意图



采用 O_2/CO_2 燃烧技术捕获 CO_2 的中试装置



地点: 德国Esbjerg电厂

能力: 1吨 CO_2 /时

燃煤烟气: 5000Nm³/h

2006年初投入运行

捕获二氧化碳的中试装置



◆世界首个CO₂捕获的火力发电示范装置于2008年9月9日在德国北部SchwarzePumpe电厂附近正式投入试运行，采用O₂/CO₂燃烧技术。

- 项目耗资：7000万欧元
- 年捕获CO₂：10万吨
- 输出：发电12MW和供热30MW
- CO₂埋存方法：压缩后埋藏在200KM以外枯竭的Altmark天然气田表面以下3000米处

◆法国南部Lacq地区将建类似规模的示范装置

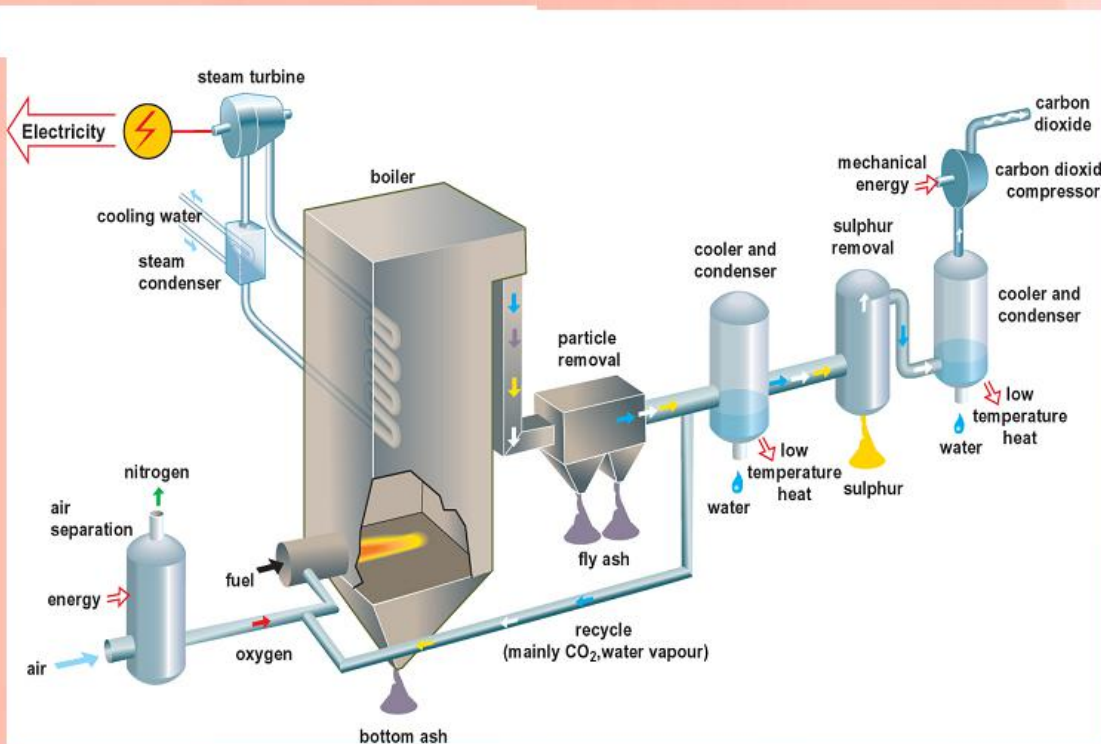
VATTENFALL OXYFUEL TECHNOLOGY

The size of the plant will be about 30 MWth and the energy will be utilized

➤ The technology used is the “Oxyfuel technology”

➤ Adjacent to the Schwarze Pumpe Power plant and will utilise infrastructure.

➤ Fuel will be lignite, and hard coal



澳大利亚旧燃煤电厂改造工程



澳大利亚Callide电厂O₂/CO₂燃烧示范工程

改造前（1965年投产）

装机容量: 4 × 30MWe

燃用煤种: 澳洲黑煤

改造后

制氧厂能力: 660吨/天

氧纯度: 98%

处理的烟气量: 147吨/天

排烟中CO₂浓度: 68%

设计CO₂生产能力: 75吨/天

CO₂地下埋存目标值: 60吨/天

项目投资商

CS Energy

Xstrata Coal

IHI（技术提供方）

Mitsui Co., LTD.

Schumberger

J Power EPDC

Australian COAL Association

Australian Government

Queensland Government

循环流化床 O_2/CO_2 燃烧技术优点

- 适应多种燃料燃烧，尤其是低品位燃料，如石油焦，固体废弃物等；
- 可实现炉内脱硫，具有相当的经济优势；
- 通过烟气再循环，可提高石灰石和 SO_2 的接触几率，提高脱硫效率和钙利用率；
- 无热力 NO_x 生成，可实现低 NO_x 排放；
- 炉内三原子气体浓度增加，增强了炉内辐射传热；

循环流化床 O_2/CO_2 燃烧技术优点（续）

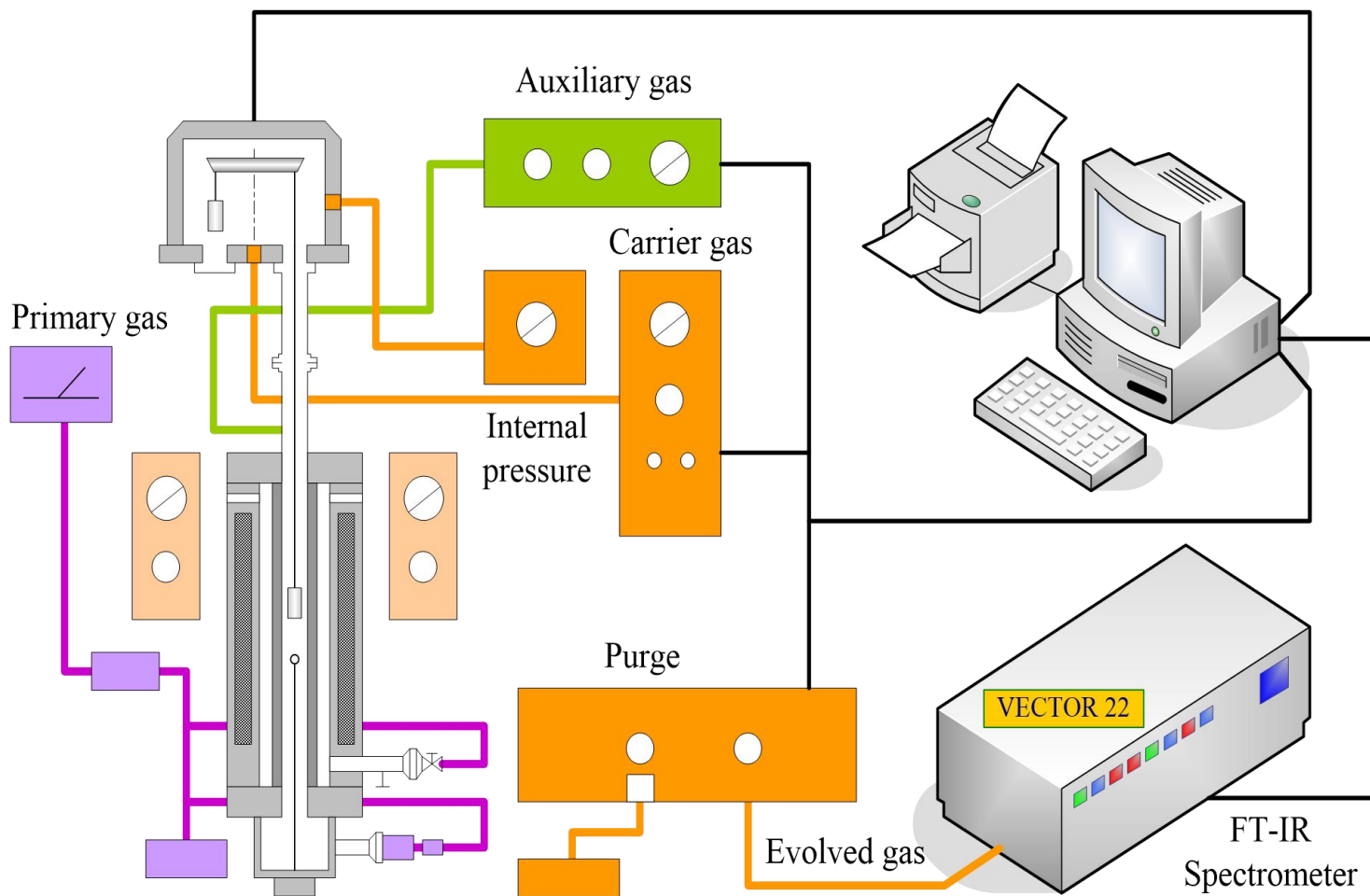
- 通过固体颗粒回燃，可提高固体颗粒炉内停留时间，削弱了富氧燃烧带来的燃料燃尽时间延长问题；
- 排烟体积大大减小，锅炉排烟热损失降低，锅炉岛体积减小，节省初投资；
- 排烟 CO_2 浓度可达95%以上，符合资源化或者埋存要求；
- 负荷调节比宽，在25%额定负荷下仍能稳定燃烧；
- 负荷调节方便快捷，负荷连续变化速率可达7%~12%MCR/min。

2、试验设备及试样

试验设备及试样



東南大學
中国 • 南京



热重—红外分析联用系统



能源与环境学院

School of energy & Environment

2022-1-4

试验设备及试样（续1）



東南大學
中国 • 南京

沉降炉系统



能源与环境学院

School of energy & Environment

2022-1-4

试验设备及试样（续2）



东南大学
中国 • 南京

50kWth循
环流化床
 O_2/CO_2 燃
烧综合试
验装置



能源与环境学院

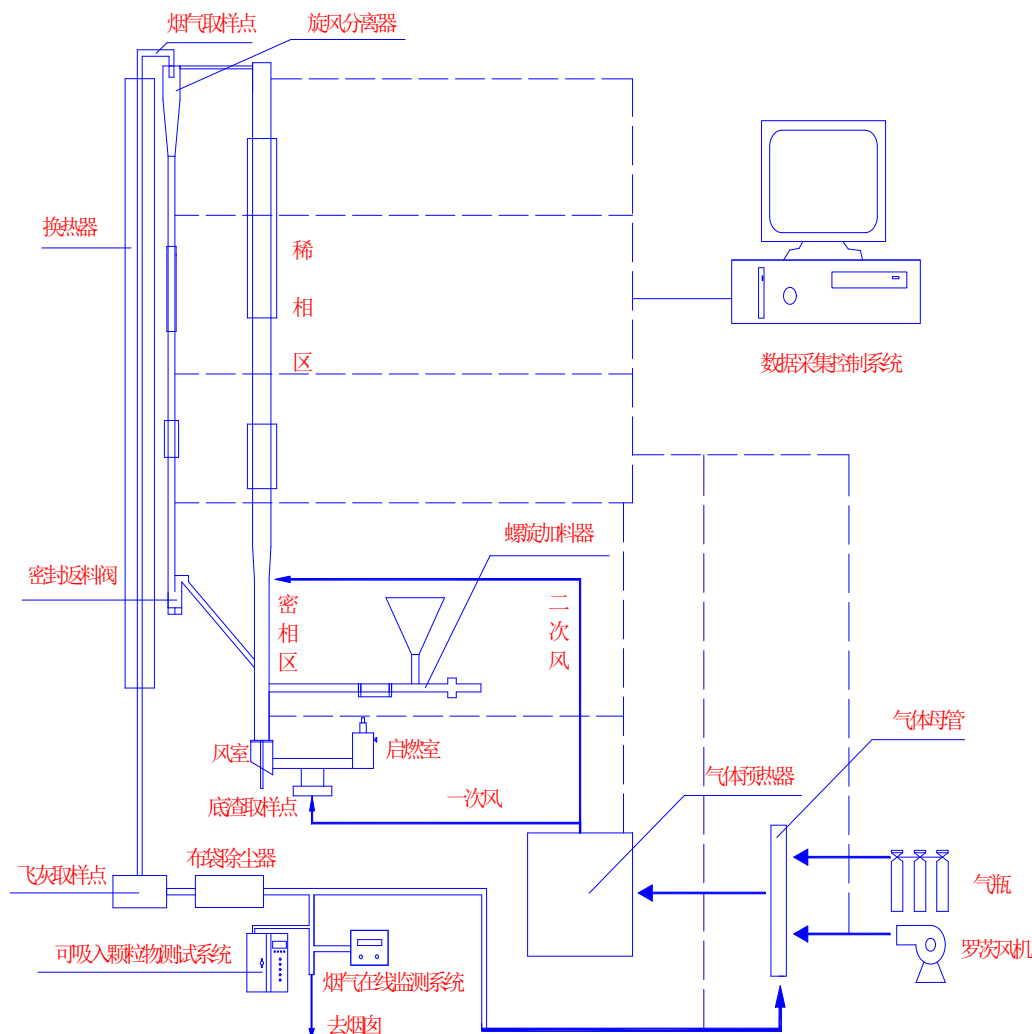
School of energy & Environment

2022-1-4

50kWth CFBO₂/CO₂燃烧综合 试验装置系统图



東南大學
中国 • 南京



设计输入热量: 50kW

设计加煤量: 8Kg/h

理论氧气量: 10Nm³/h

表观流化速度: 4m/s

密相区床高: 800mm

密相区直径: 120mm

稀相区床高: 3000mm

稀相区直径: 150mm



能源与环境学院

School of energy & Environment

2022-1-4

试验设备及试样（续3）



东南大学
中国·南京

徐州烟煤及其煤焦的元素分析和工业分析

样品	元素分析 /%(空气干燥基)					工业分析/%(空气干燥基)			
	C	H	O	N	S	M	A	V	FC
烟煤	58.97	3.65	7.30	0.67	1.76	2.10	25.55	25.02	47.33
煤焦	57.34	0.50	5.1	0.61	3.17	1.10	32.18	4.07	69.65

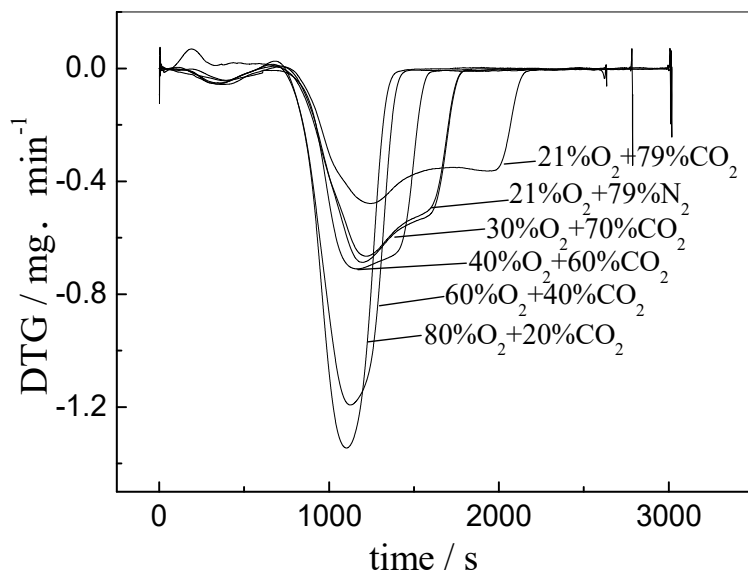
龙岩无烟煤和贵州烟煤的元素分析和工业分析

煤 种	元素分析 / %					工业分析 / %				$Q_{\text{net,ar}}$ (MJ/kg)
	$w(\text{C}_{\text{ad}})$	$w(\text{H}_{\text{ad}})$	$w(\text{O}_{\text{ad}})$	$w(\text{N}_{\text{ad}})$	$w(\text{S}_{\text{ad}})$	FC_{ad}	V_{daf}	A_{ad}	M_{ad}	
龙岩无烟煤 (LY)	55.65	1.31	0.23	0.52	2.74	54.43	9.96	38.23	1.32	24.64
贵州烟煤 (GZ)	61.46	3.57	3.04	0.70	4.26	49.68	31.95	25.52	1.45	23.95

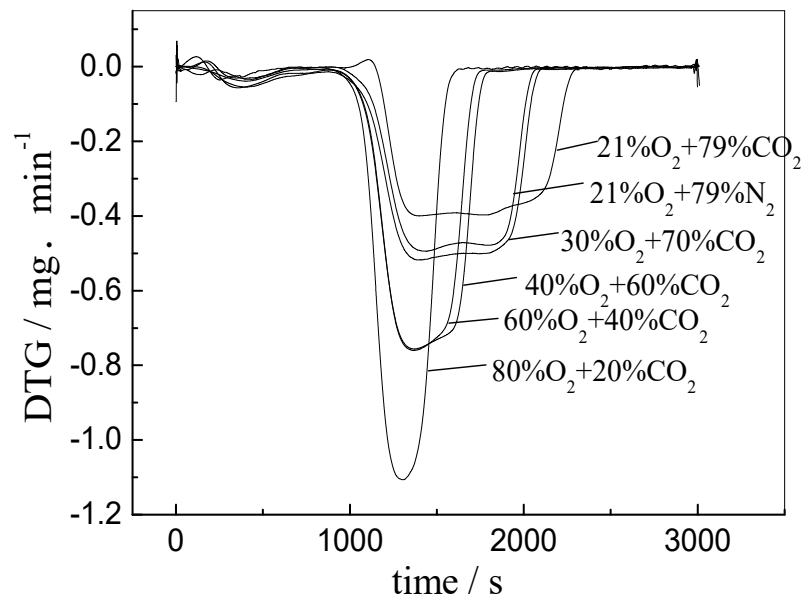


3、试验结果及分析

煤和煤焦的DTG曲线

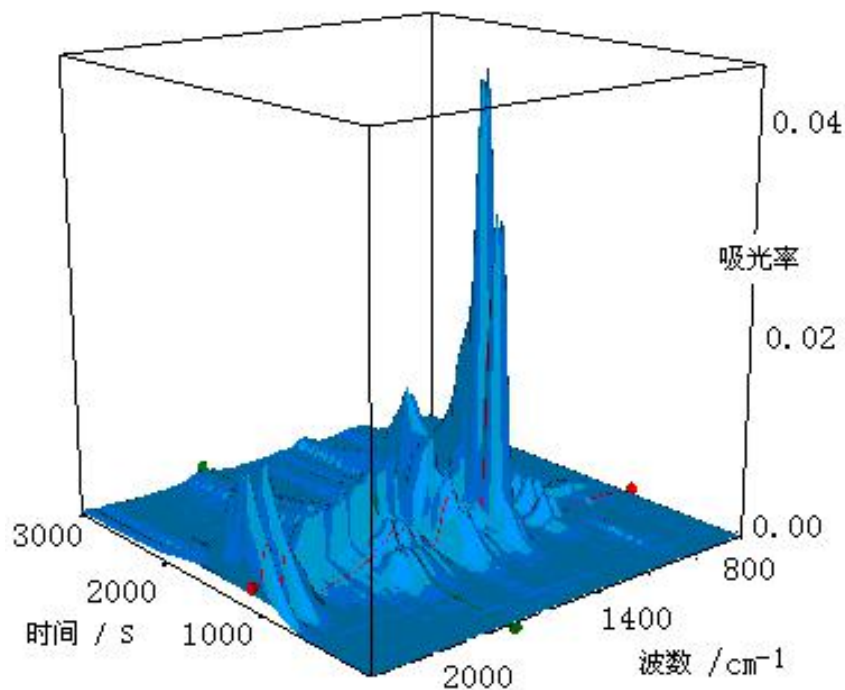


烟煤的DTG曲线

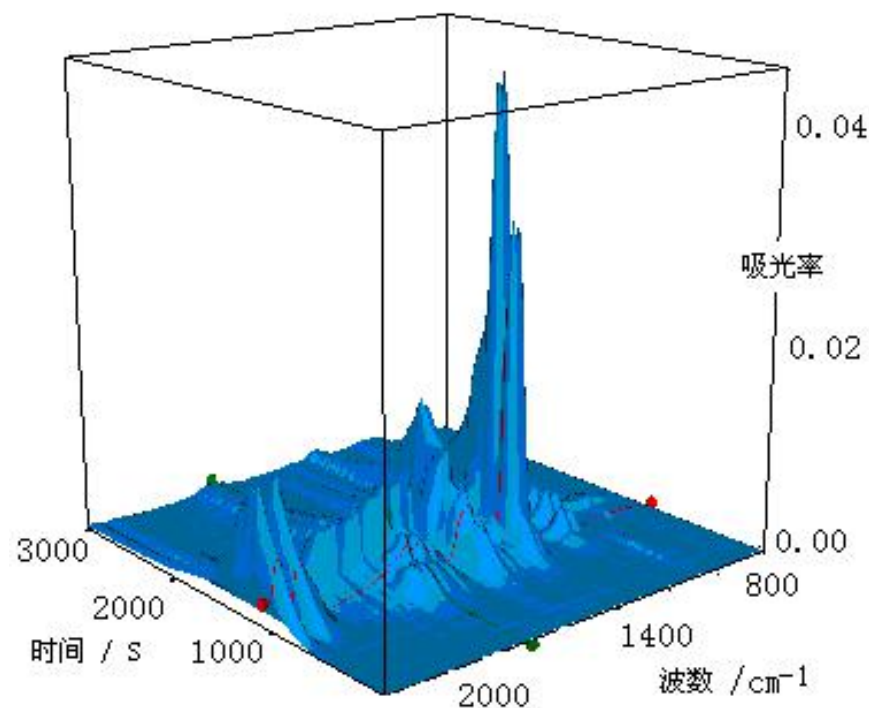


煤焦的DTG曲线

徐州烟煤燃烧的红外特征谱图

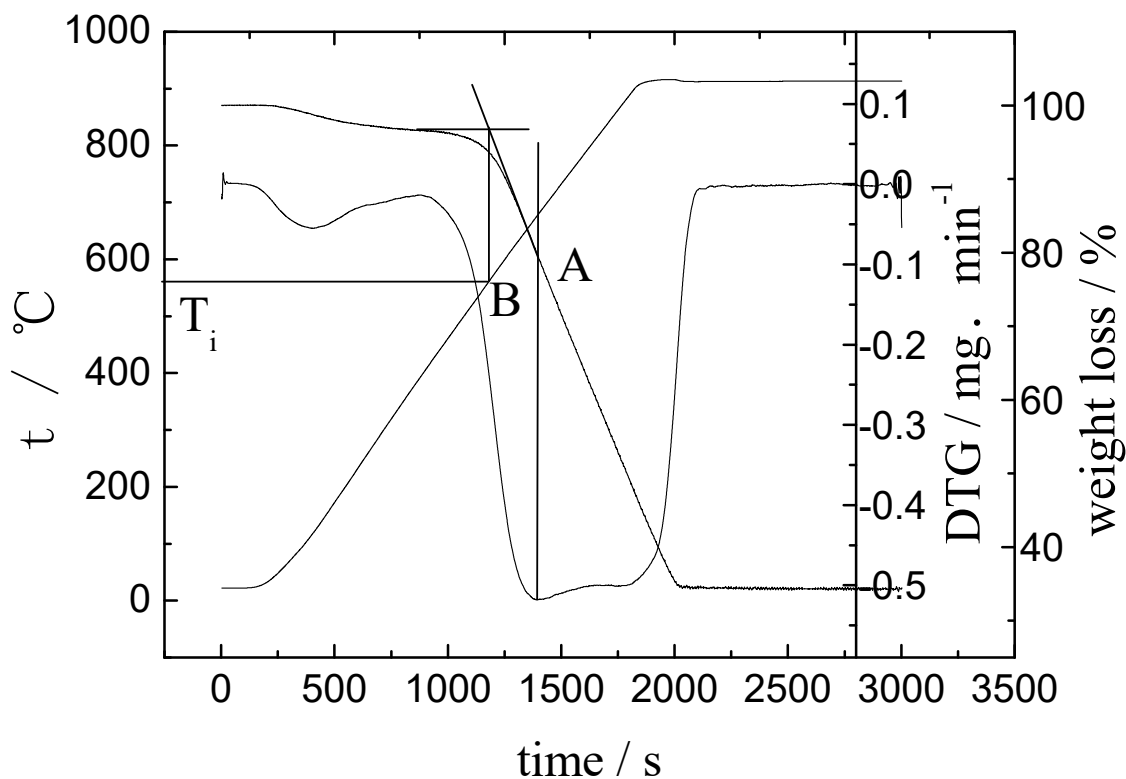


空气气氛



21% O₂/79% CO₂ 气氛

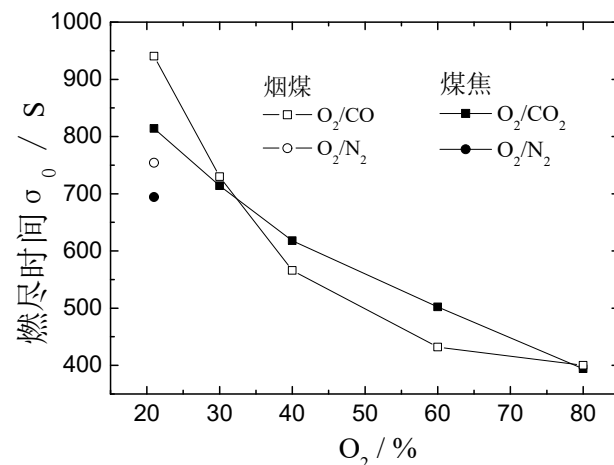
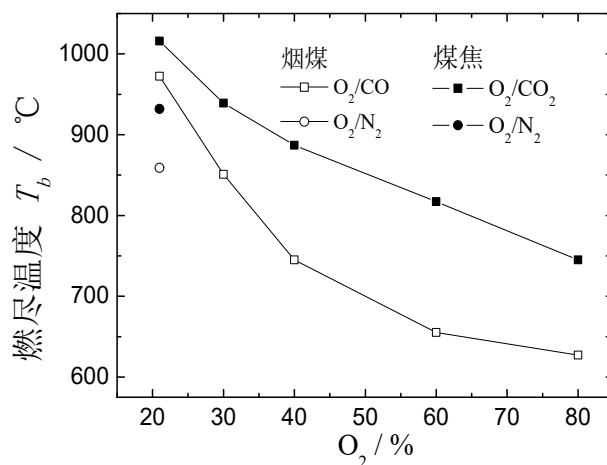
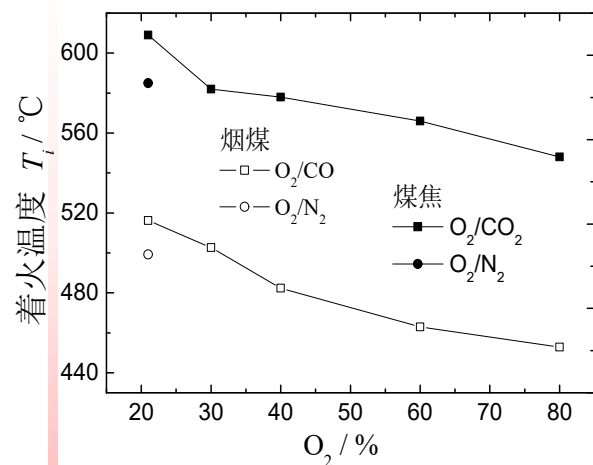
着火温度的定义：TG—DTG法



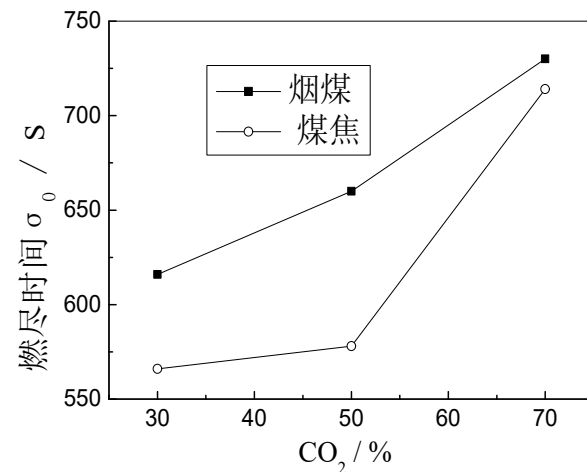
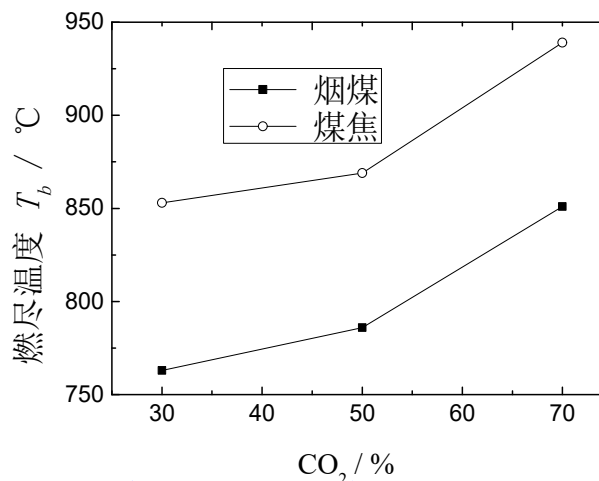
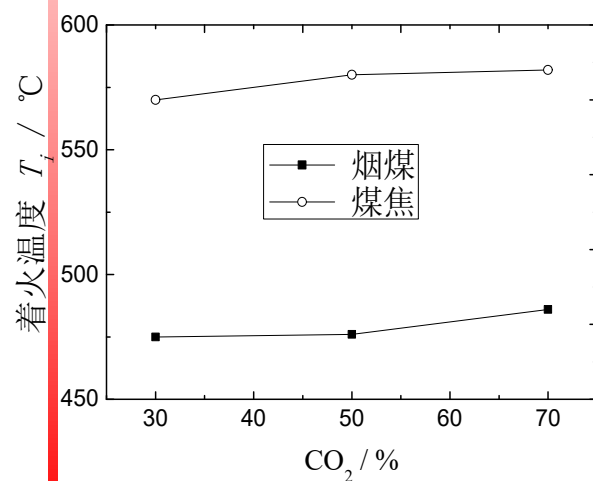
O₂/CO₂气氛下燃烧特性



东南大学
中国·南京



O₂浓度对燃烧特征参数的影响



CO₂浓度对燃烧特征参数的影响

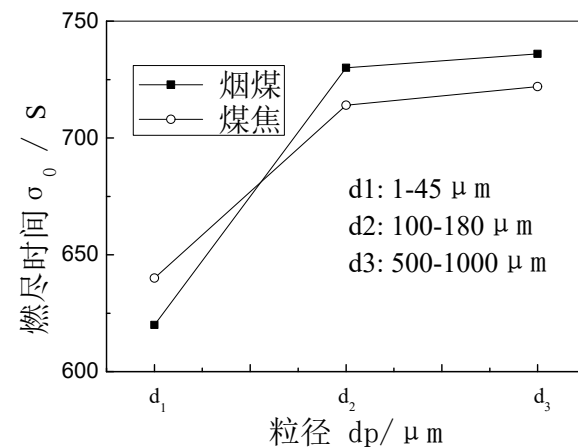
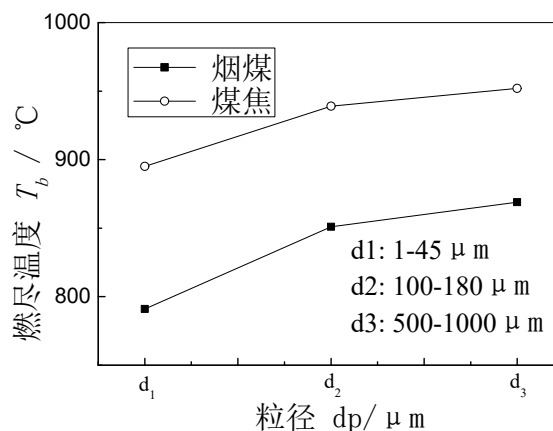
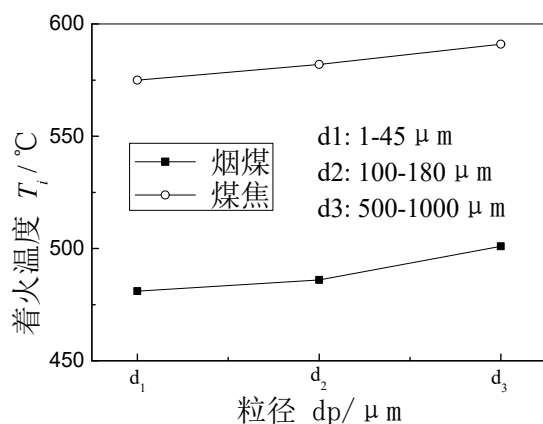


能源与环境学院

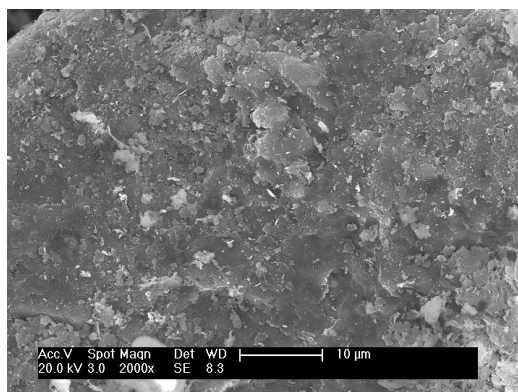
School of energy & Environment

2022-1-4

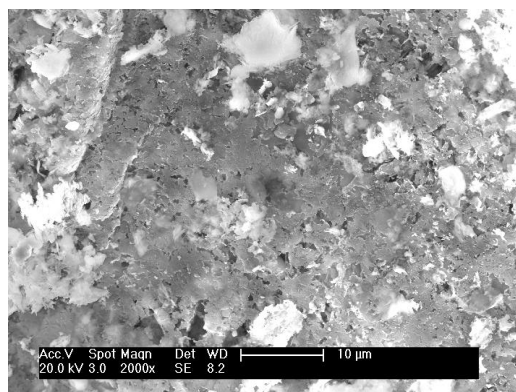
颗粒粒径对燃烧特征参数的影响



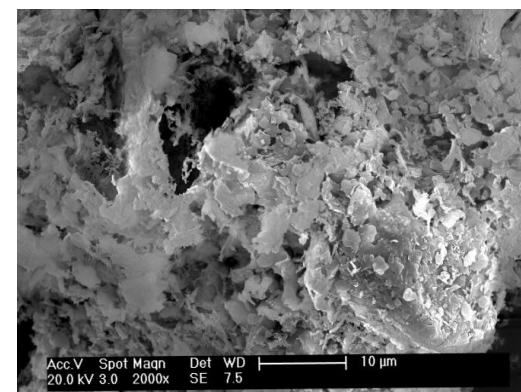
气氛对煤灰表面特性的影响



21% O_2 /79% N_2

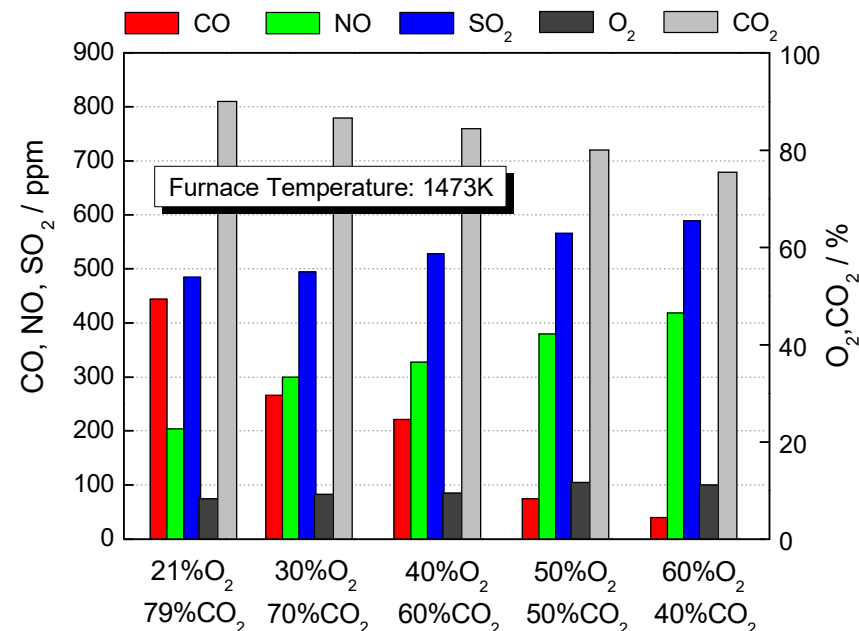
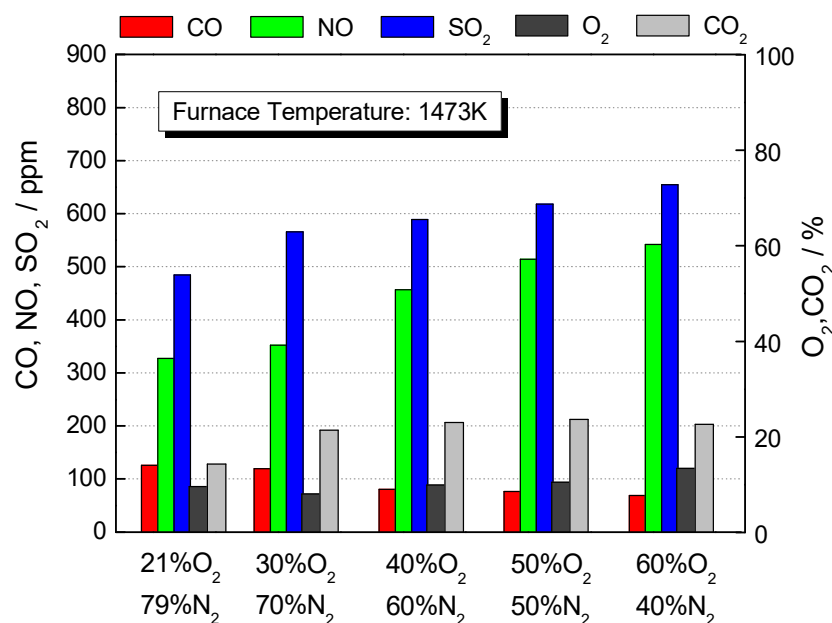


21% O_2 /79% CO_2



80% O_2 /20% CO_2

龙岩无烟煤在不同气氛下燃烧气态产物的组成

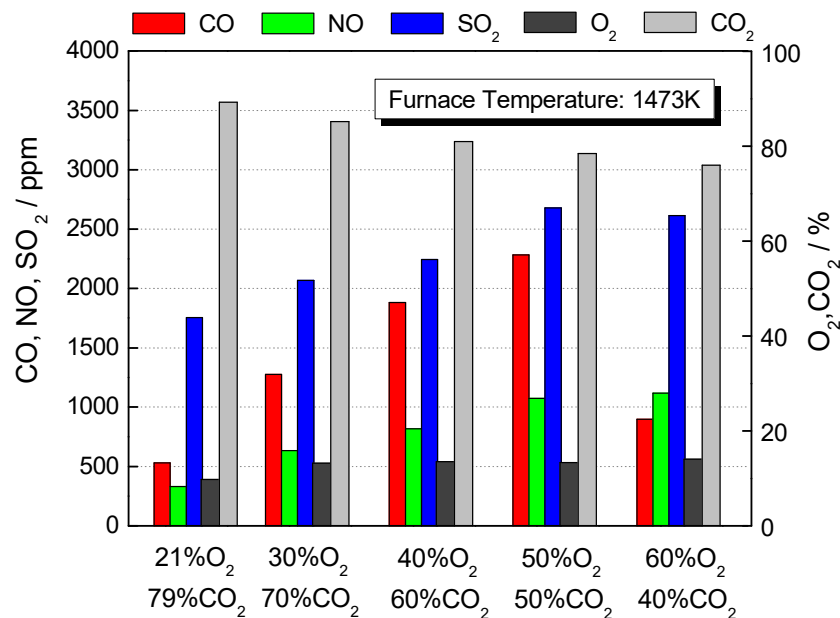
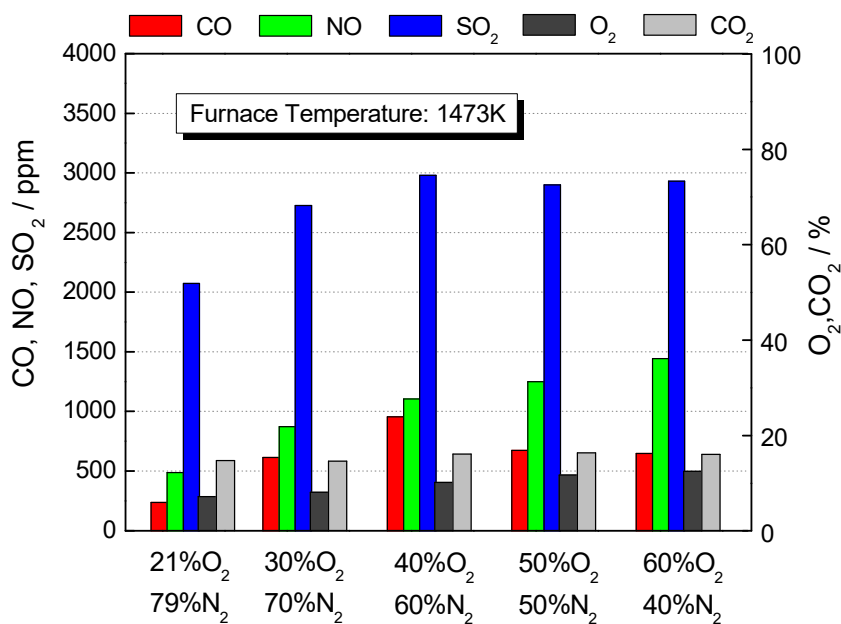


O₂/CO₂气氛下污染物排放特性



東南大學
中国 • 南京

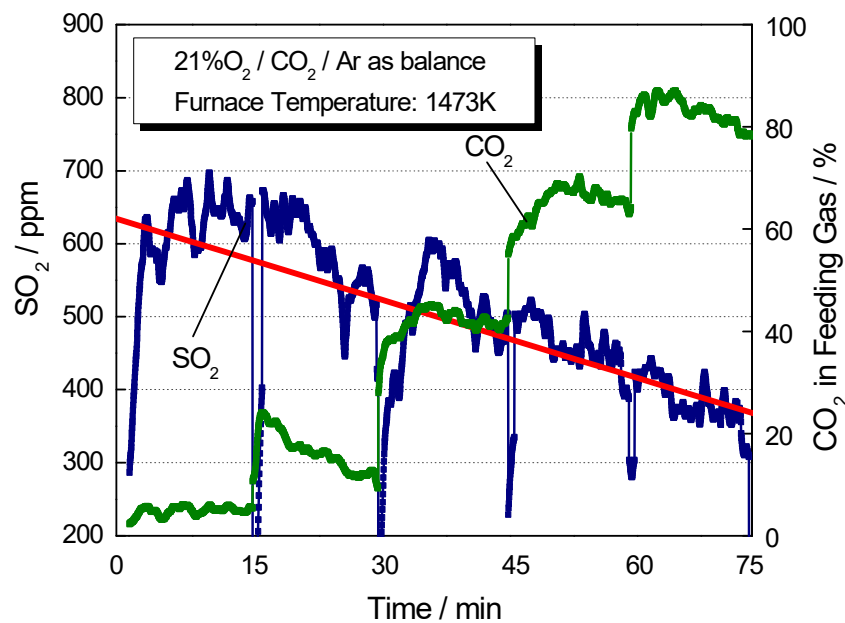
贵州烟煤在不同气氛下燃烧气态产物的组成



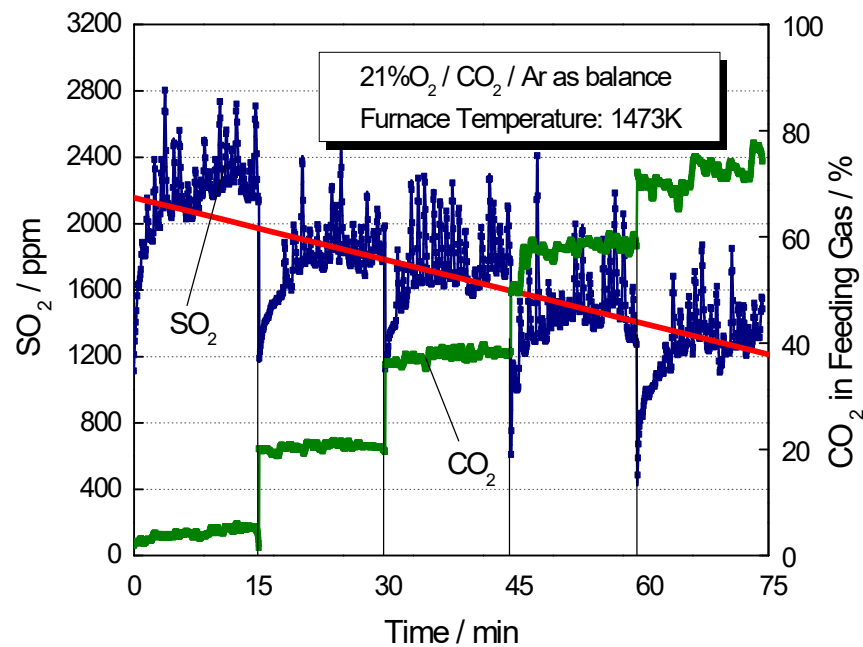
O_2/CO_2 气氛下 SO_2 排放特性



東南大學
中国 • 南京



龙岩无烟煤



贵州烟煤

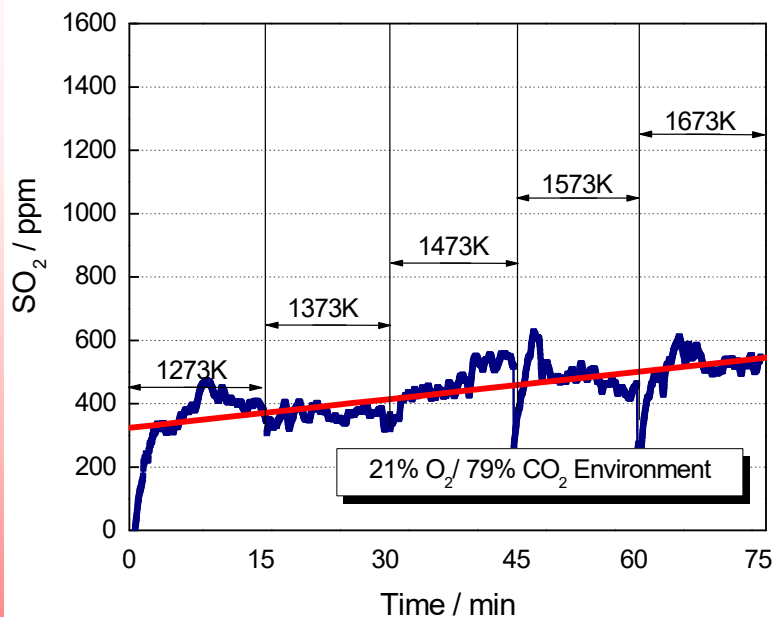
CO_2 浓度对燃煤 SO_2 排放的影响



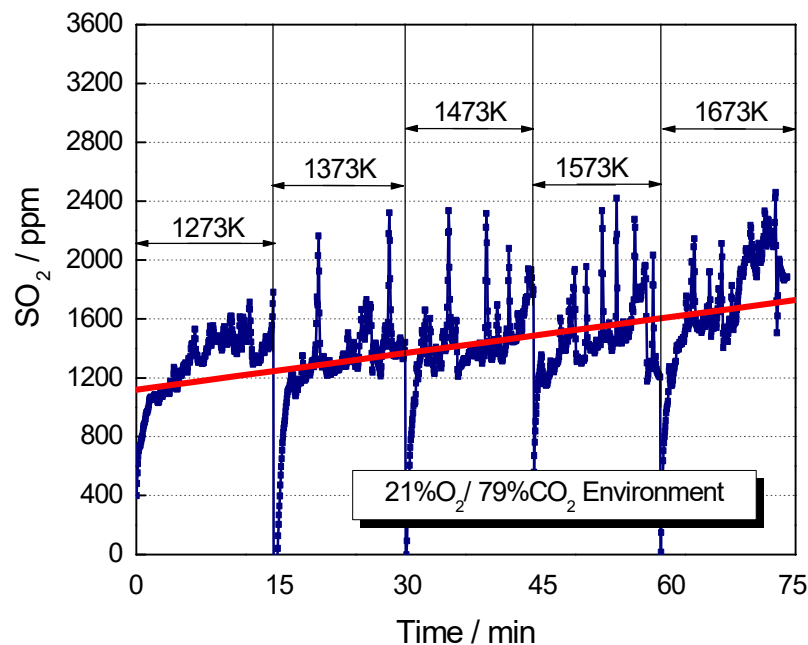
O_2/CO_2 气氛下 SO_2 排放特性



東南大學
中国 • 南京



龙岩无烟煤



贵州烟煤

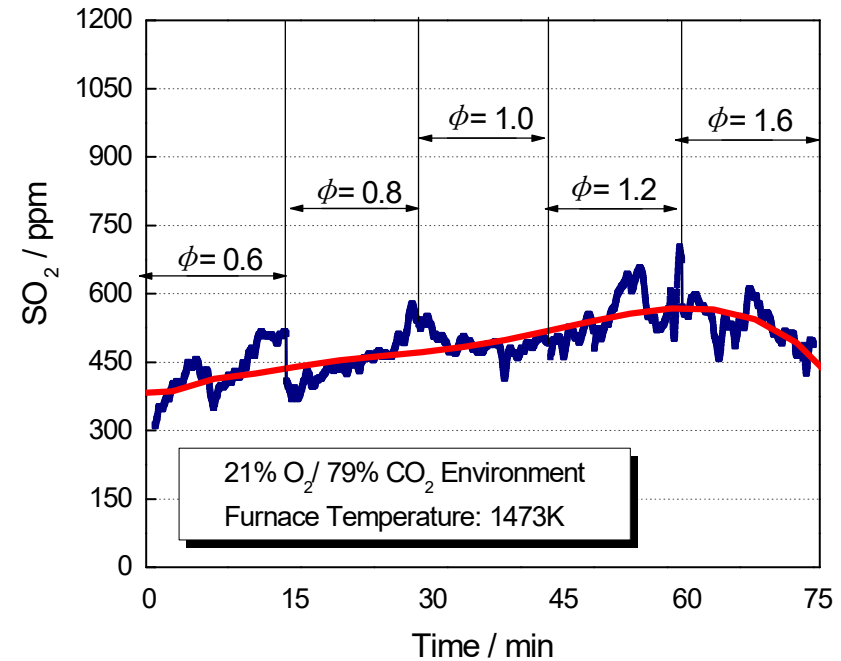
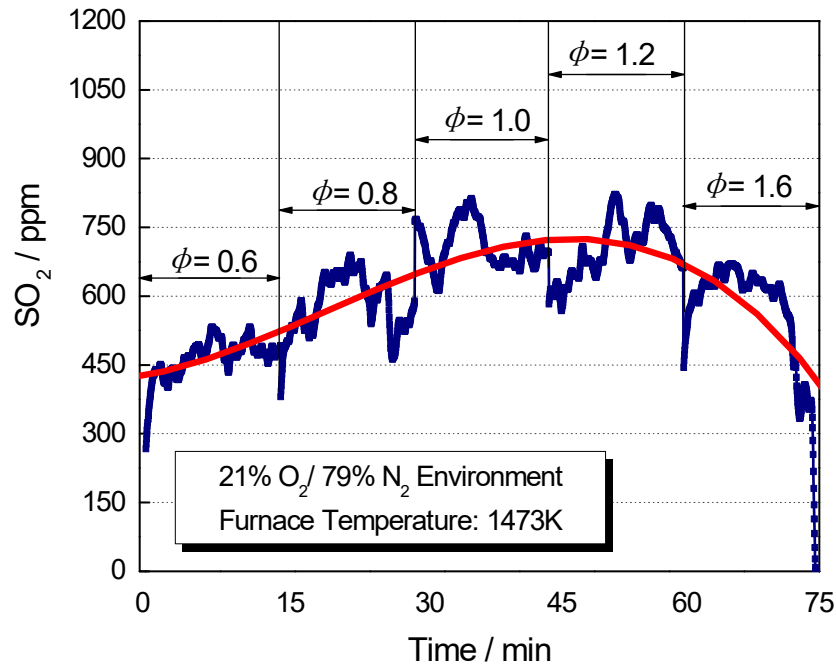
燃烧温度对 SO_2 的排放的影响



O₂/CO₂气氛下SO₂排放特性



東南大學
中国 • 南京



化学当量比对龙岩无烟煤燃烧SO₂排放的影响



能源与环境学院

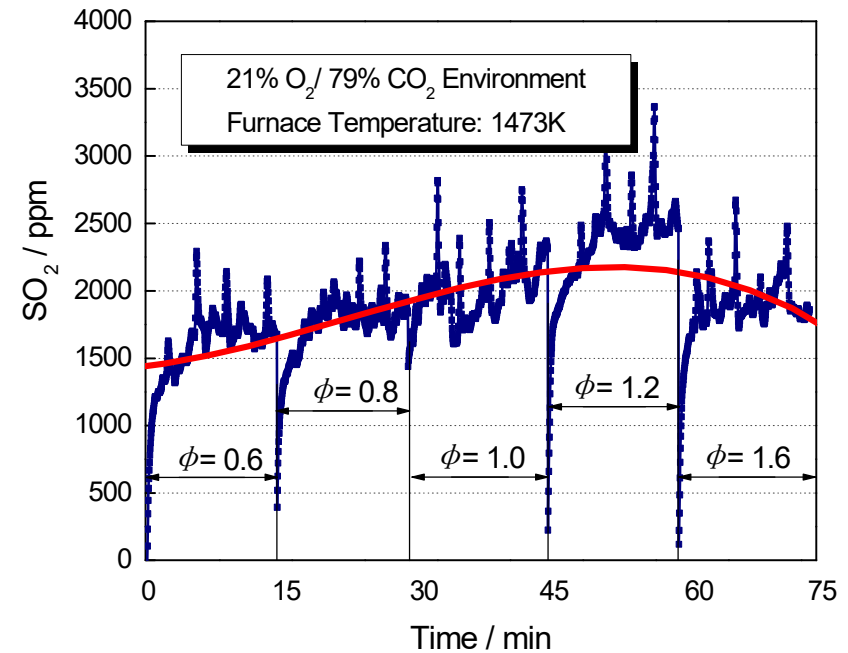
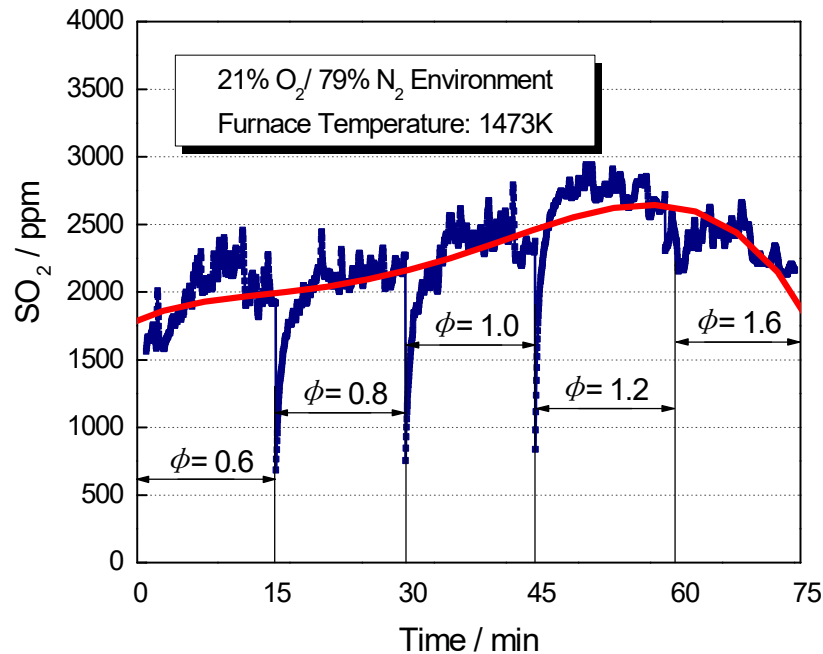
School of energy & Environment

2022-1-4

O_2/CO_2 气氛下 SO_2 排放特性



東南大學
中国 • 南京



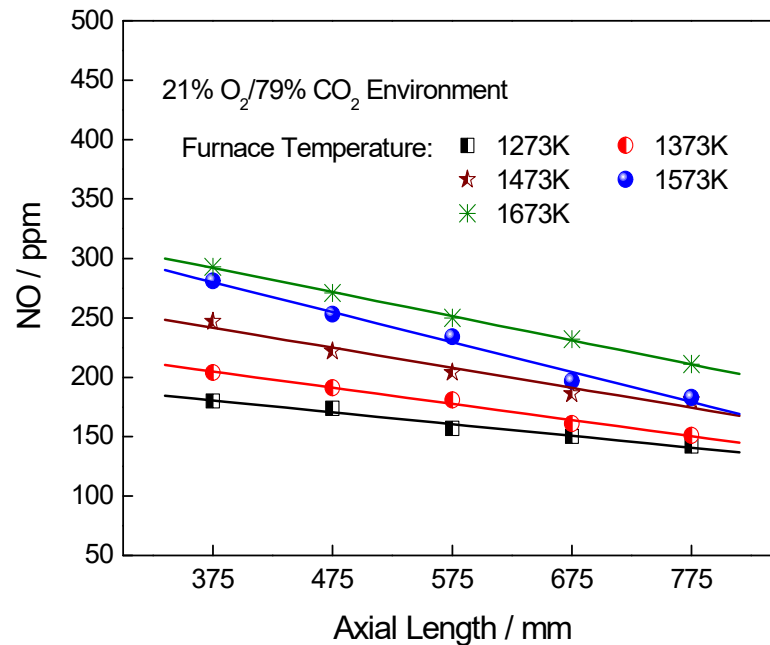
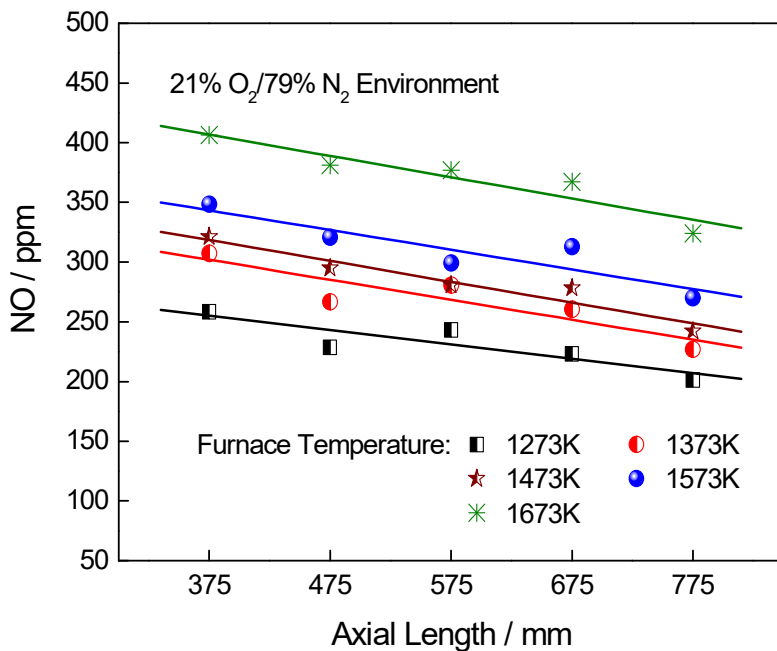
化学当量比对贵州烟煤燃烧 SO_2 排放的影响



O_2/CO_2 气氛下NO排放特性



東南大學
中国 • 南京



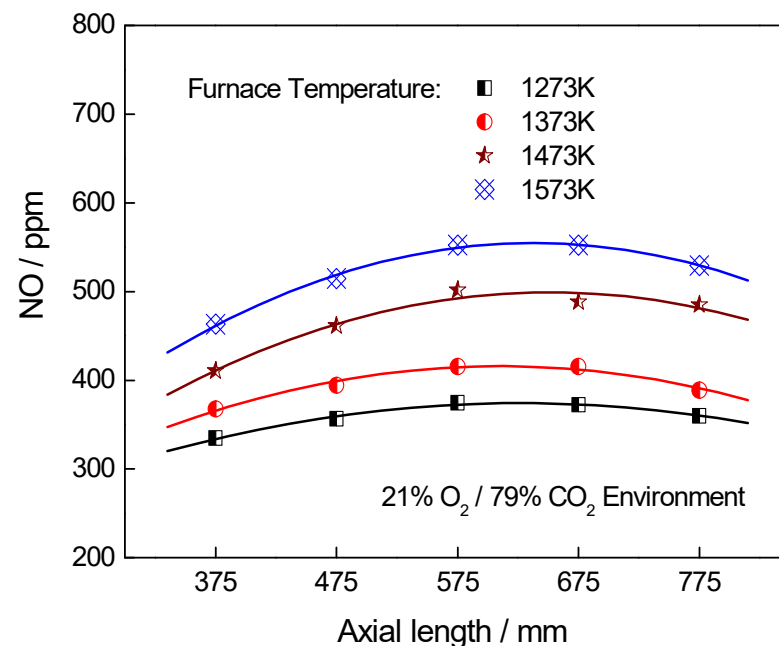
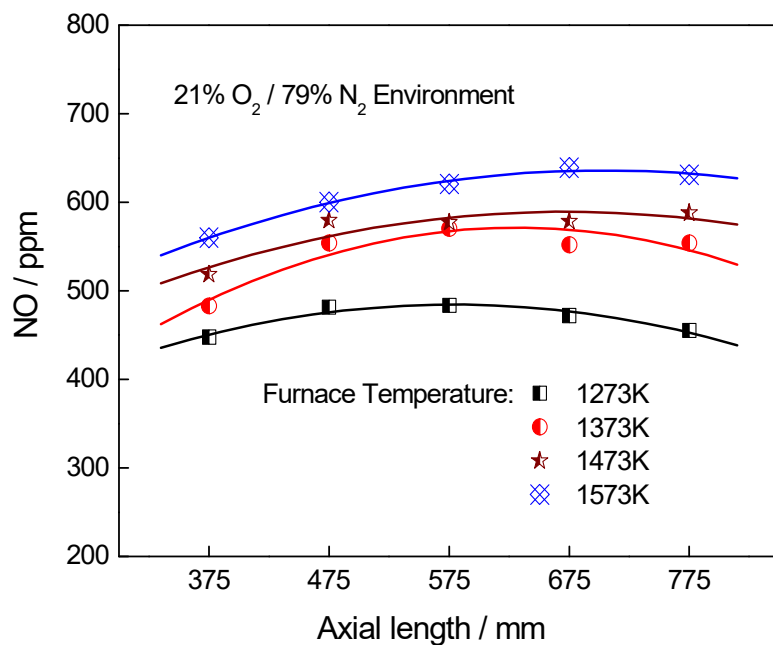
龙岩无烟煤燃烧NO的沿程排放



O₂/CO₂气氛下NO排放特性



東南大學
中国 • 南京



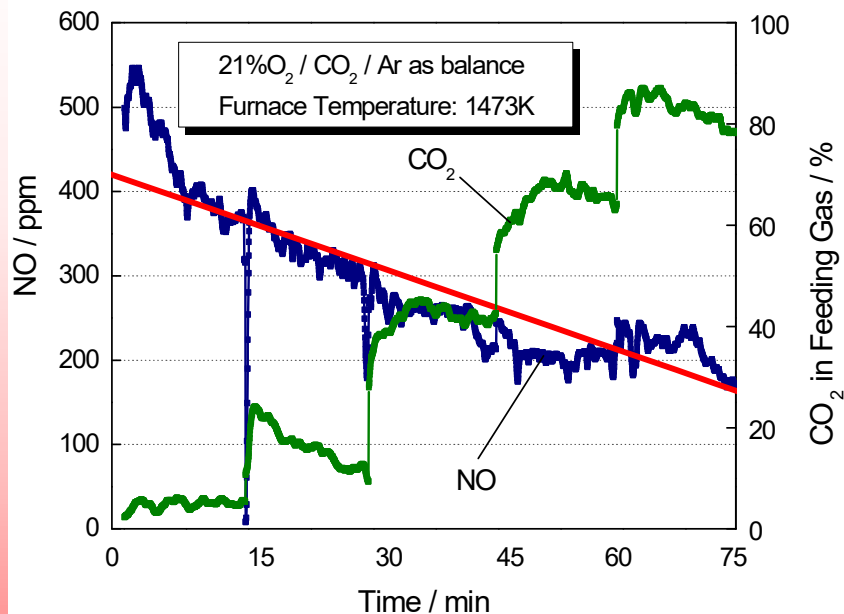
贵州烟煤燃烧NO的沿程排放



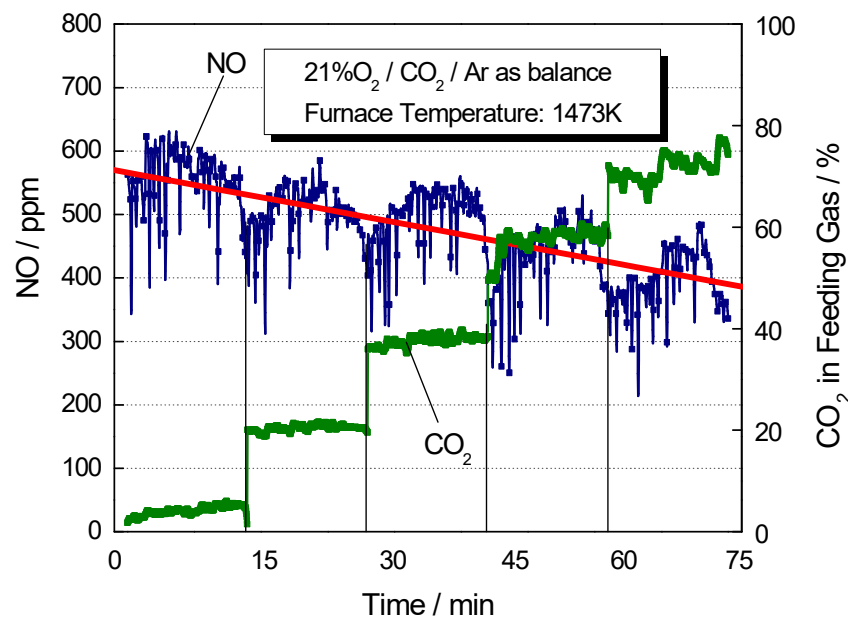
O₂/CO₂气氛下NO排放特性



東南大學
中国 • 南京



龙岩无烟煤



贵州烟煤

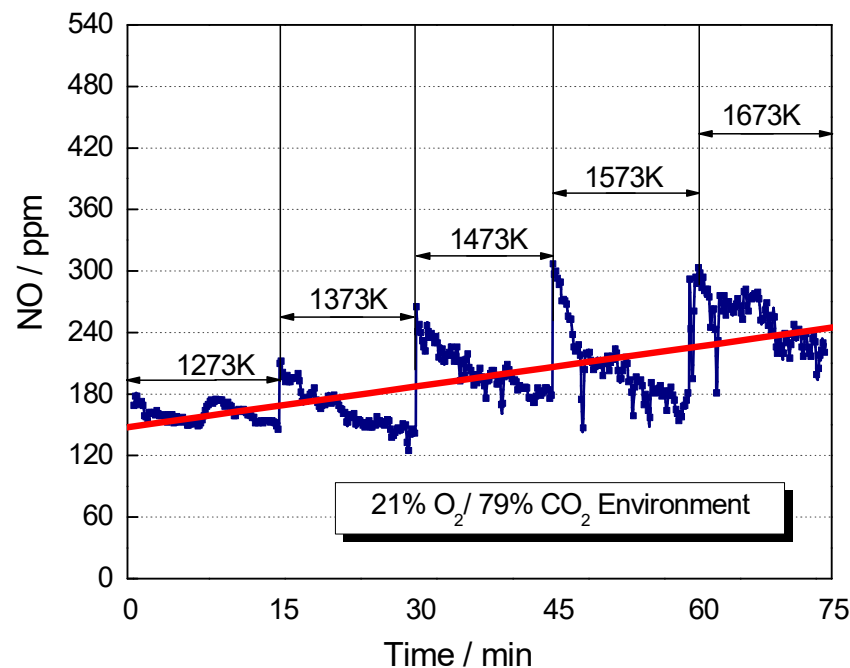
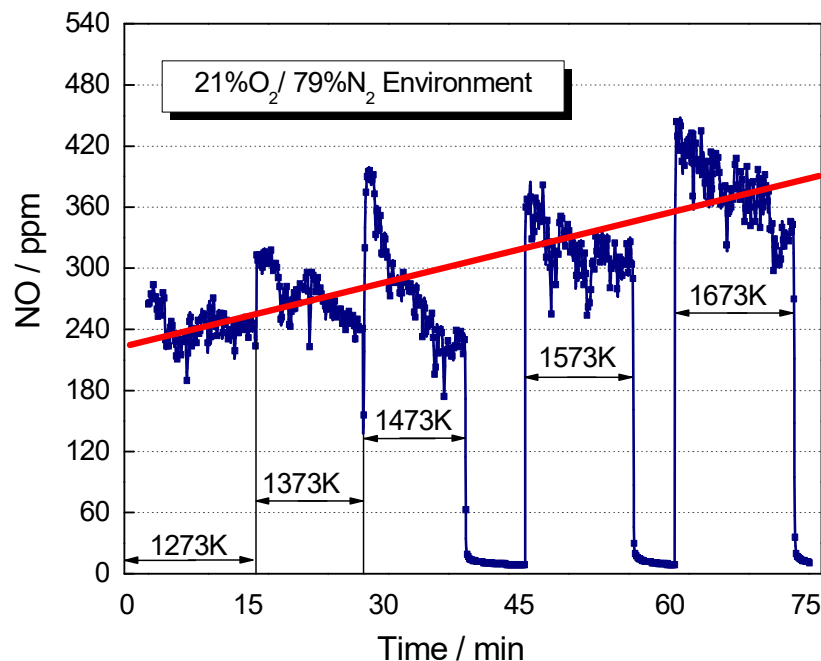
CO₂浓度对燃煤NO排放的影响



O_2/CO_2 气氛下NO排放特性



東南大學
中国 • 南京



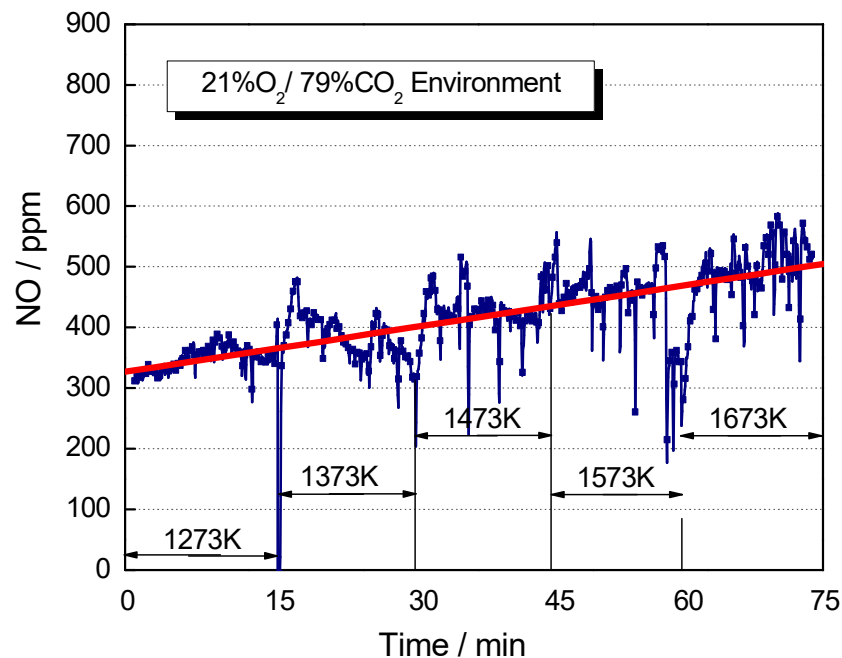
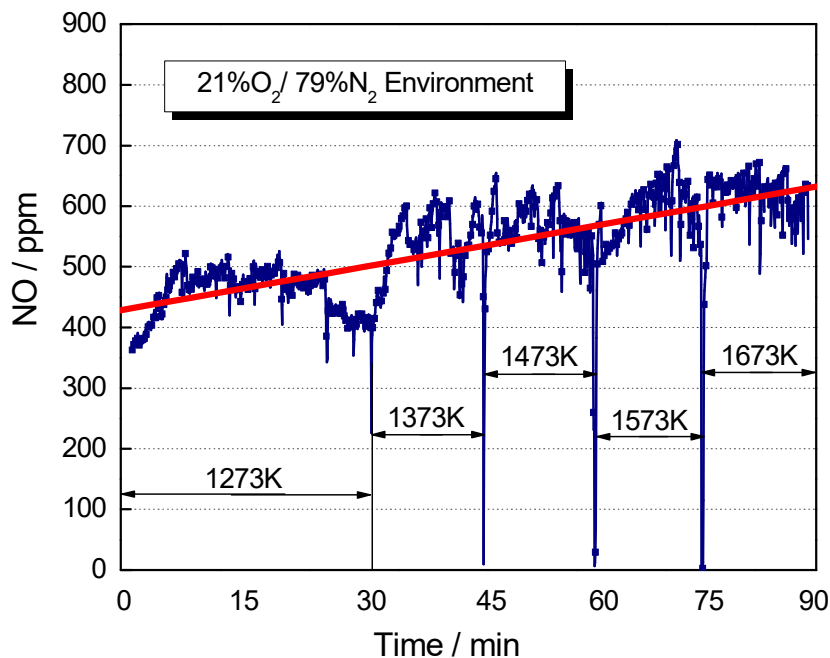
温度对龙岩无烟煤燃烧NO的排放的影响



O_2/CO_2 气氛下NO排放特性



东南大学
中国 · 南京



温度对贵州烟煤燃烧NO的排放的影响



能源与环境学院

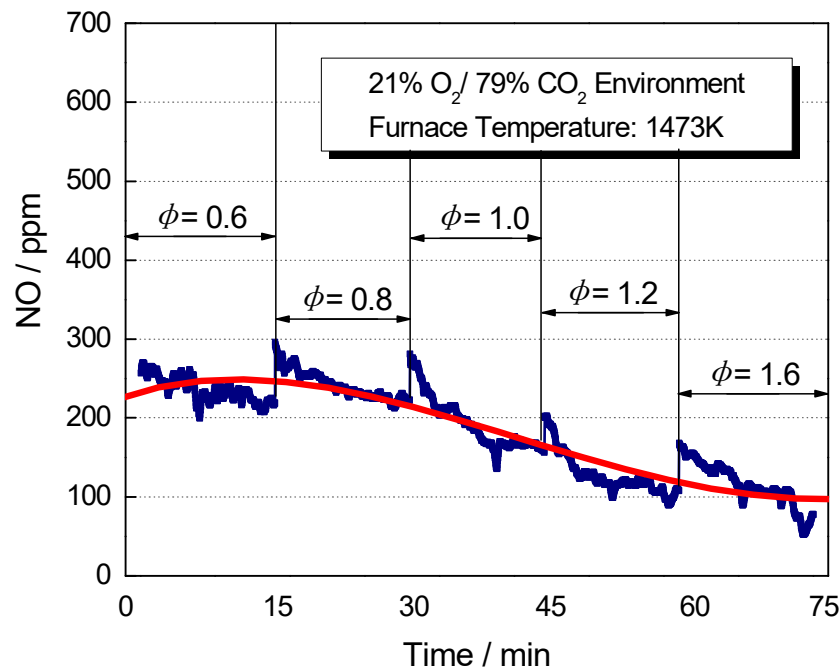
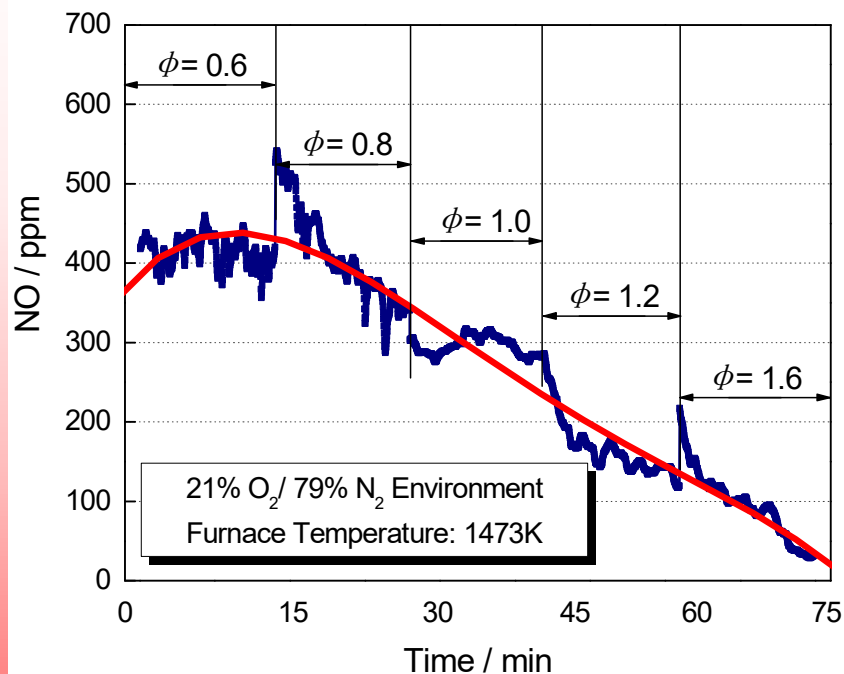
School of energy & Environment

2022-1-4

O₂/CO₂气氛下NO排放特性



東南大學
中国 • 南京



化学当量比对龙岩无烟煤燃烧NO排放的影响



能源与环境学院

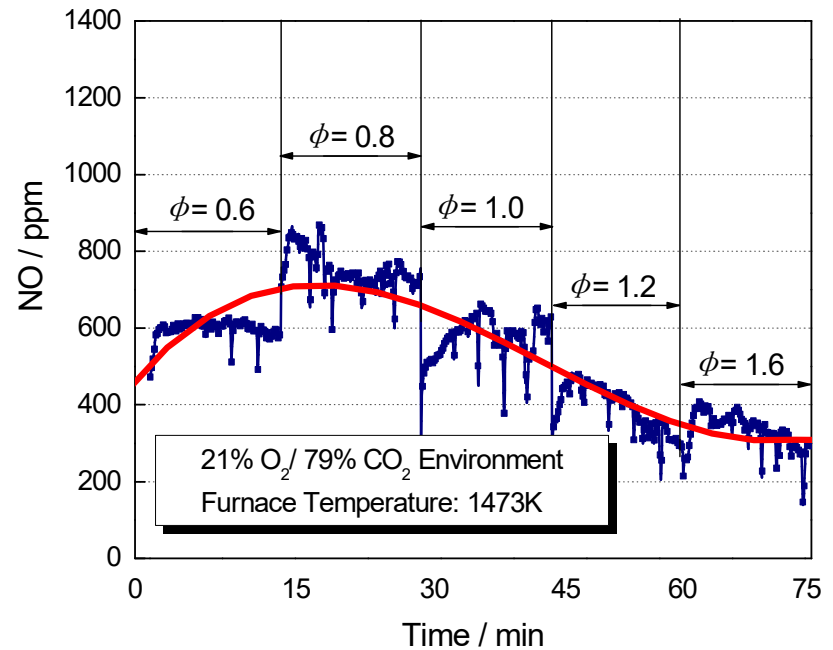
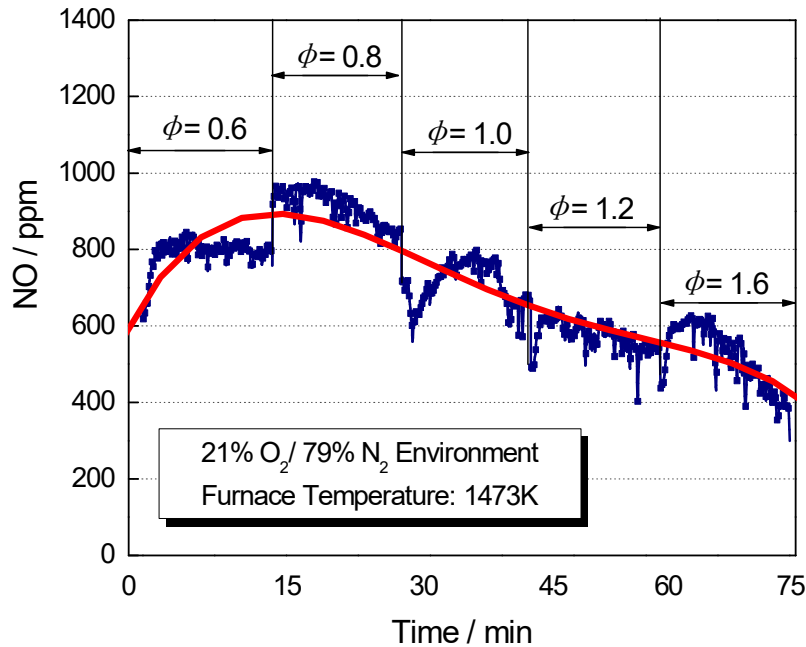
School of energy & Environment

2022-1-4

O_2/CO_2 气氛下NO排放特性



東南大學
中国 • 南京



化学当量比对贵州烟煤燃烧NO排放的影响



能源与环境学院

School of energy & Environment

2022-1-4

结论

- O_2/CO_2 气氛下，随着 O_2 浓度的升高，煤及煤焦的着火温度及燃尽温度降低，燃尽时间提前。
- 同等 O_2 浓度下，随着 CO_2 浓度的升高，煤及煤焦的着火温度略有升高，燃尽温度显著升高，燃尽时间延长。
- O_2/CO_2 气氛下，随着煤焦粒径的增大，煤焦的着火温度和燃尽温度提高，燃尽时间延长。
- 用 CO_2 代替 N_2 进行燃烧可以改善煤的烧结特性； O_2/CO_2 气氛下，增大 O_2 浓度会使煤更易烧结。

结论（续）

- 随燃烧配气中 CO_2 浓度的增加，烟气中 SO_2 的浓度呈现逐步降低的趋势。
- 燃烧温度对 O_2/CO_2 气氛下 SO_2 释放的影响在于高温下煤粉燃烧的改善以及其它硫形态向 SO_2 的进一步转化。
- 两种气氛下， SO_2 的释放浓度在贫燃料区随燃料/氧气化学当量比的增加而增加，在富燃料区随燃料/氧气化学当量比的增加而降低，其最高浓度大约出现在化学当量比为1.2的工况下。

结论（续）

- 随着 CO_2 浓度的增加，两种煤燃烧NO的排放浓度均呈现降低的趋势，与21% O_2 /79%Ar气氛下相比，21% O_2 /79% CO_2 气氛下NO排放浓度的降幅在30%~50%。
- 两种气氛下NO的整体变化趋势表现出随温度变化一致的跟随性，但增加的幅度因煤种和燃烧气氛的差异而有所不同，其主要在于煤质及气氛引起的燃烧特性的差异使得不同燃烧阶段燃料N的析出也有所不同。
- NO排放浓度随燃料/氧气化学当量比（ φ ）的变化均呈现先增加后降低的趋势，其最大排放浓度均出现在 $\varphi=0.8$ 左右；在 φ 远大于1的富燃料区，两种气氛下NO的排放浓度基本可以降到一致的水平。

进一步工作——在循环流化床中试装置上研究：

- 不同 O_2/CO_2 气氛下煤的着火特性、燃尽特性；
- 循环流化床 O_2/CO_2 循环燃烧方式下钙基脱硫剂的脱硫新机理及规律；
- 循环流化床 O_2/CO_2 循环燃烧方式下氮氧化物生成及抑制规律；
- 循环流化床 O_2/CO_2 循环燃烧方式下硫/氮氧化物协同脱除机制；
- 不同 O_2/CO_2 气氛下煤中矿物质物理性质和化学组成的变化规律以及煤中痕量元素赋存、迁移行为；
- 循环流化床 O_2/CO_2 循环燃烧烟气中 CO_2 浓度的变化规律

致谢

资金支持:

- ◆ 国家重点基础发展规划基金项目 (2006CB705806);
- ◆ 江苏省普通高校研究生科研创新计划;
- ◆ 东南大学优秀博士学位论文基金。



谢谢！

