



清华大学

“燃煤+” 耦合发电及低碳综合利用学术沙龙

2022.4.23

循环流化床掺烧污泥技术研发及应用

报告人：柯希玮 博士

循环流化床课题组，能源与动力工程系，清华大学



1-污泥焚烧背景及意义

2-污泥特性简析

3-CFB锅炉掺烧污泥工程实践

330 MW 亚临界

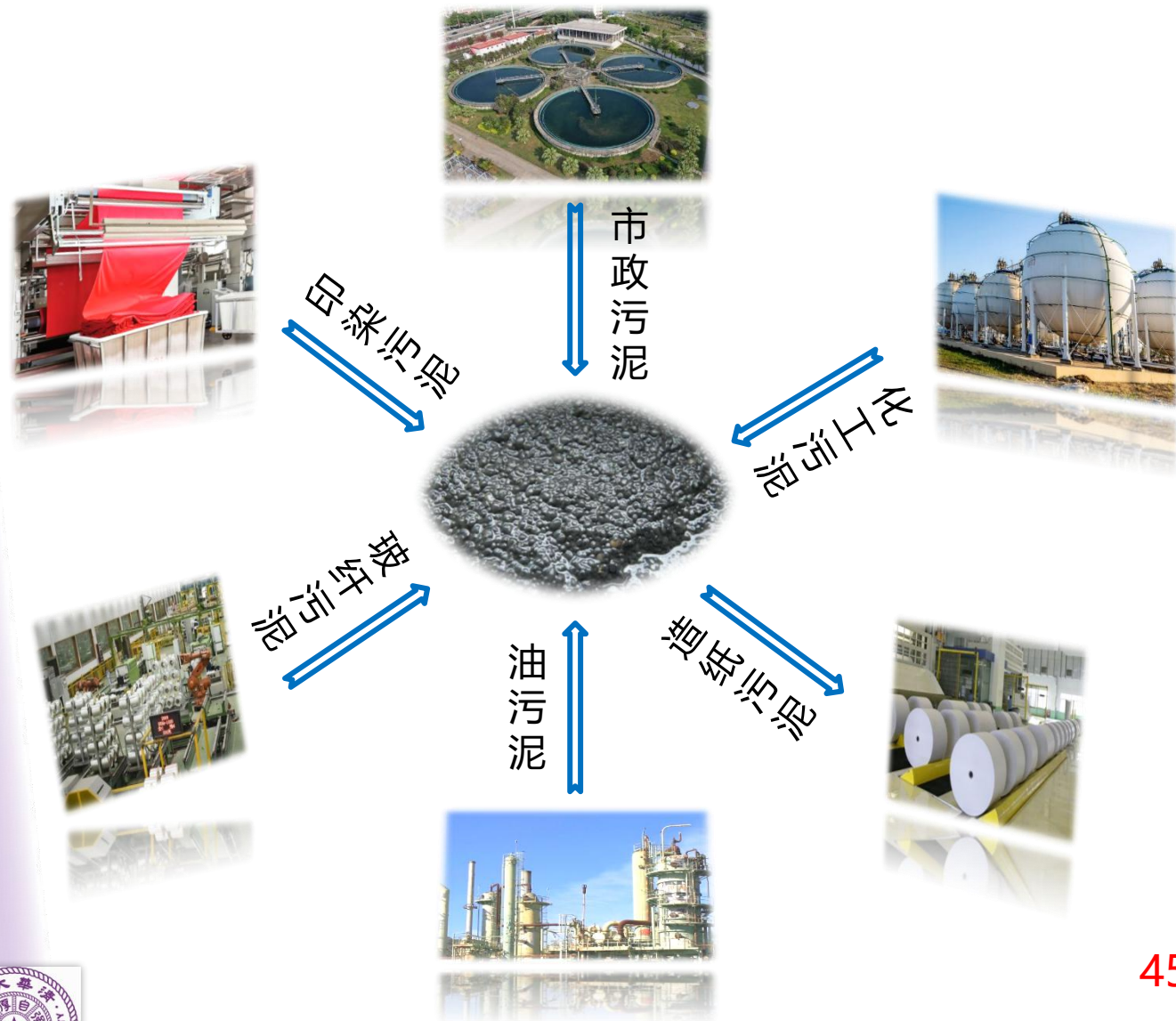
180 t/h 高压

4-燃煤CFB锅炉掺烧污泥讨论

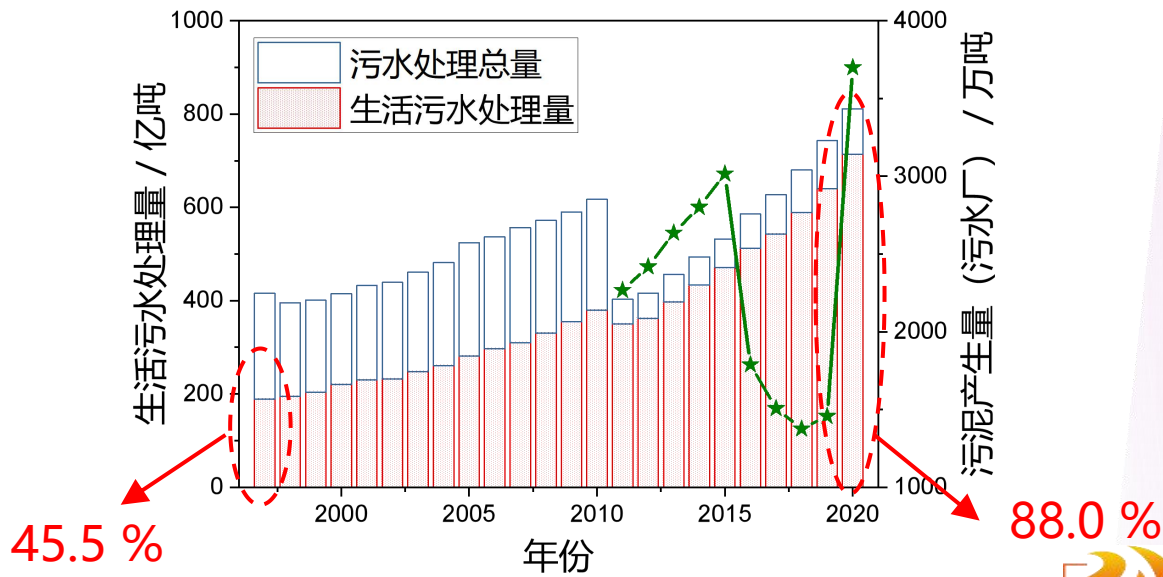
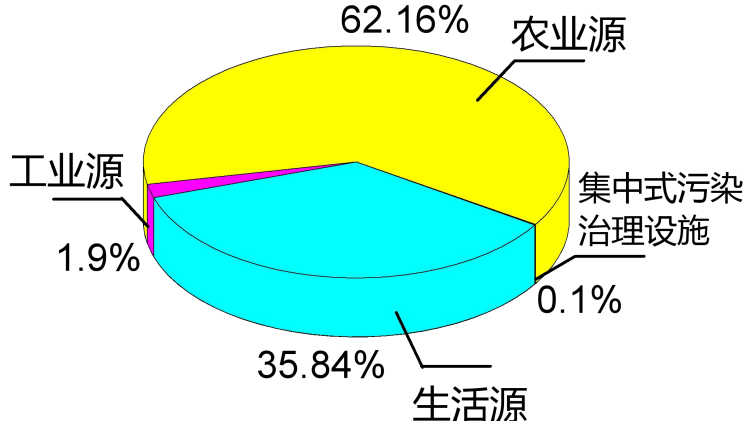
5-总结



背景：污泥治理必要性



2020年 全国废水中化学需氧量排放比例



*数据来源：各年生态环境统计年鉴



填埋

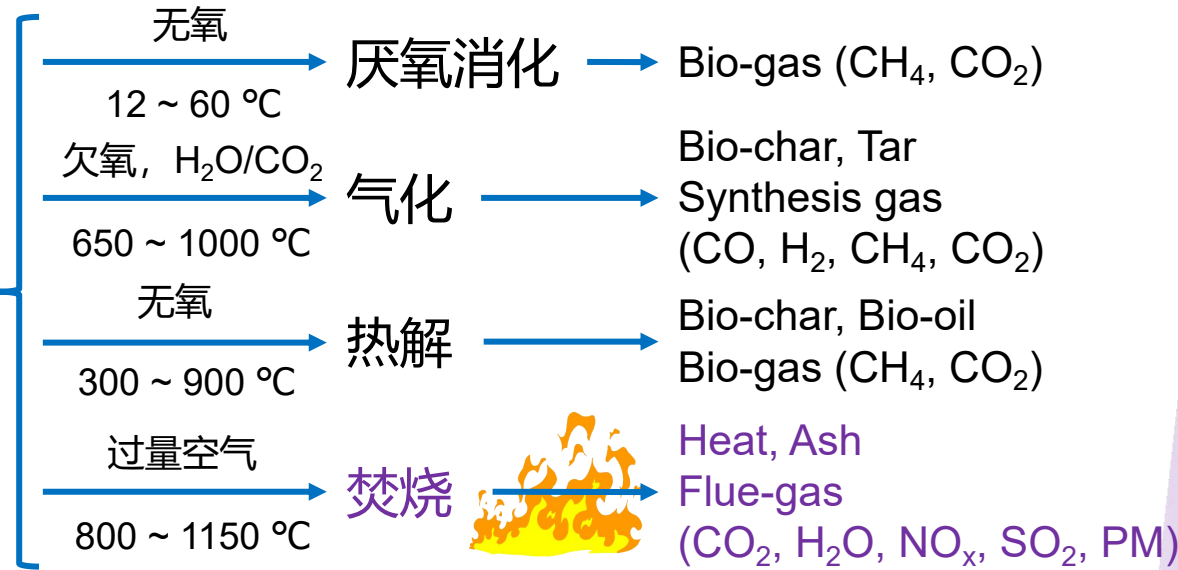
农业利用



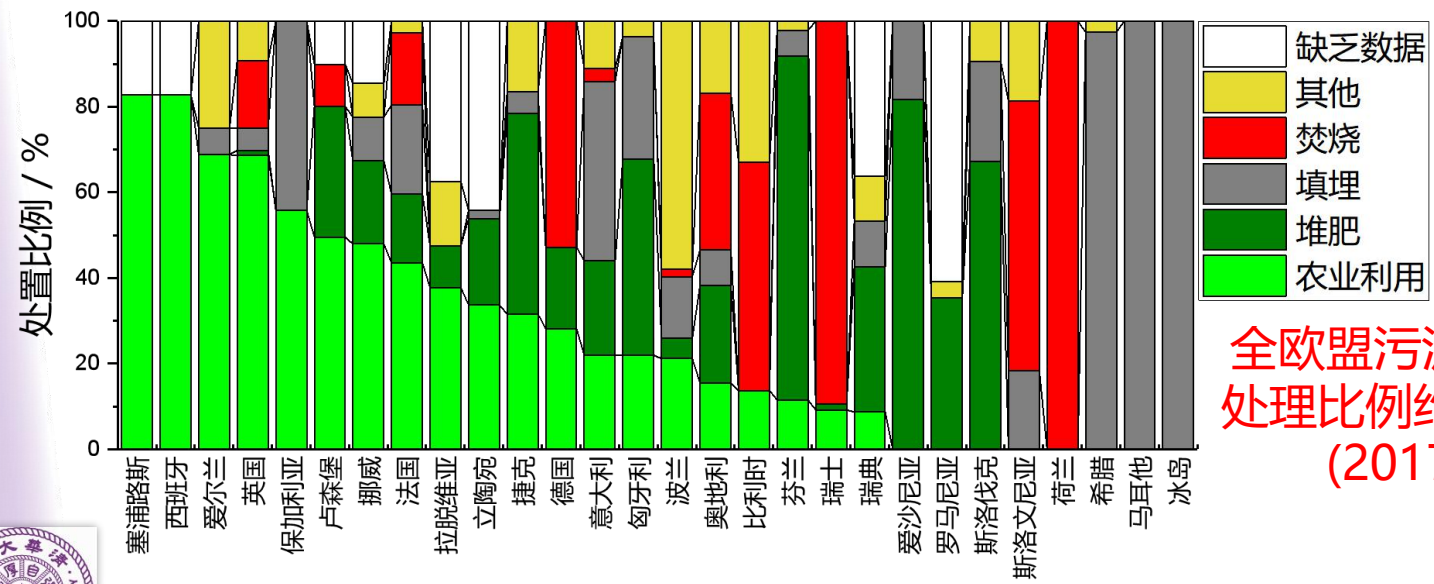
污泥处置



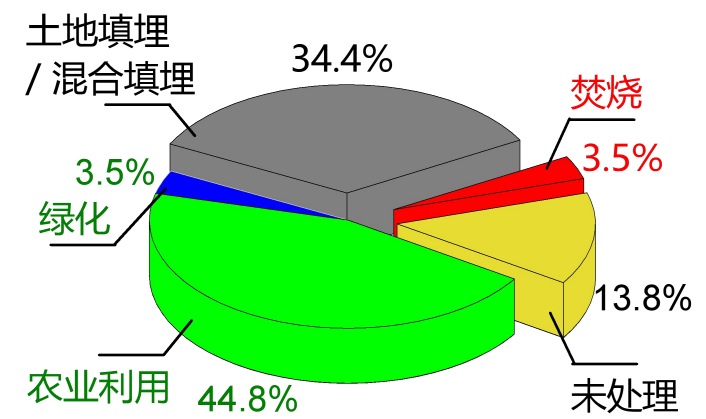
能源 (热)
回收



减量化、资源化、无害化



全欧盟污泥焚烧
处理比例约 19%
(2017)



国内污泥焚烧处理比例不足4%

*数据来源：S. Donatello, C.R. Cheeseman. Waste Management, 33 (2013): 2328-2340



背景：CFB锅炉掺烧污泥技术发展

5

1962年

世界首台流化床污泥焚烧炉在美国Lynnword Washington 建成投运，用于处理市政污泥和工业废弃物

1960s

- 流化床污泥焚烧技术逐步建立，开始时以鼓泡床为主（代表：鲁奇公司）
- 1969年前国外已建成70多套流化床污泥焚烧炉；
- 国内东方红炼油厂建成流化床焚烧炉处理油污泥（1 t/h）

1990s

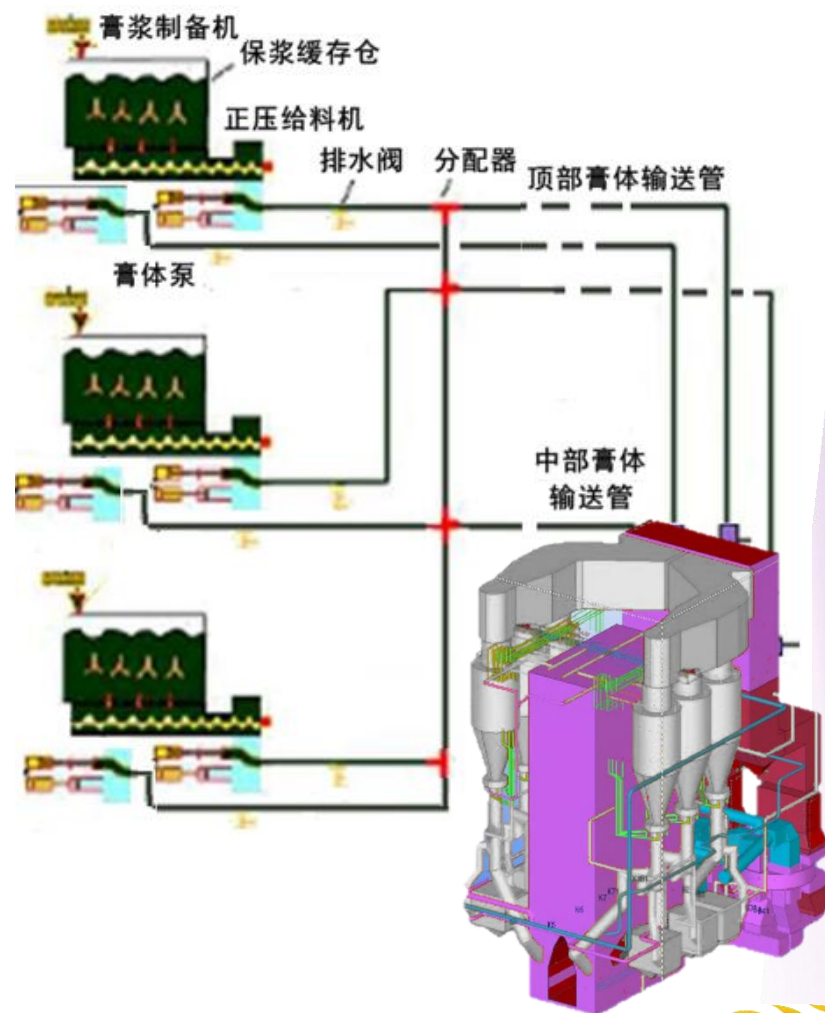
焚烧工艺在部分发达国家发展迅速，作为污泥处置主要方法
1984年日本焚烧处理量占污泥处置总量的72%，1992年占市政污泥处理量的75%

以日本为例，1992年焚烧处理量占市政污泥处置总量的75%

2004年

上海石洞口市政污水处理厂建成中国首个污水污泥干燥焚烧工程
干燥后污泥水分为5-10%，干污泥设计处理能力为64 t/d

机械浓缩—脱水(板框脱水)—干燥(流化床干燥机)—流化床焚烧



灰分高，且部分含有较多金属/
重金属，灰渣属于危废

大部分污泥中硫氮含量
与煤相当或略低

燃料	工业分析, %			元素分析, %					发热量, MJ/kg		灰熔点, °C
	M _{ar}	A _{ar}	V _{daf}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	Q _{ar,net}	Q _{d,net}	ST
市政污泥	82.34	9.86	90.67	3.05	0.32	3.67	0.54	0.22	-0.43	9.23	1220
市政污泥	79.30	11.75	93.94	4.48	0.70	2.97	0.69	0.12	-0.31	8.08	1266
市政污泥	78.96	11.86	92.82	5.63	0.91	2.32	0.61	0.67	0.359	11.09	/
造纸污泥	74.00	8.27	87.14	7.49	1.00	0.35	8.90	0.18	1.17	/	
纤板污泥	80.60	3.68	72.73	8.30	0.86	6.15	0.36	0.06	1.11	/	/
油污泥	16.95	51.99	93.17	20.85	2.70	6.00	0.11	1.40	8.53	/	/
油污泥	4.50	65.72	76.96	21.31	2.66	4.99	0.30	0.52	9.39	/	1185
石化污泥 (空干)	55.27	13.69	80.51	18.10	2.79	7.04	1.48	1.63	/	7.58	/
干化污泥	40.00	32.19	92.00	17.58	2.09	6.33	1.58	0.23	5.06	10.10	1240
干化污泥	20.00	41.95	87.05	19.63	3.32	11.19	3.21	0.70	7.28	9.73	1210
干化污泥	43.10	27.64	93.02	12.60	1.40	14.67	0.57	0.02	1.76	/	/

水分高

可燃物中挥发分有机物为主，
着火容易，综合燃烧性能好

热值低（充分干化
后热值与褐煤相当）



污泥特性：高水分

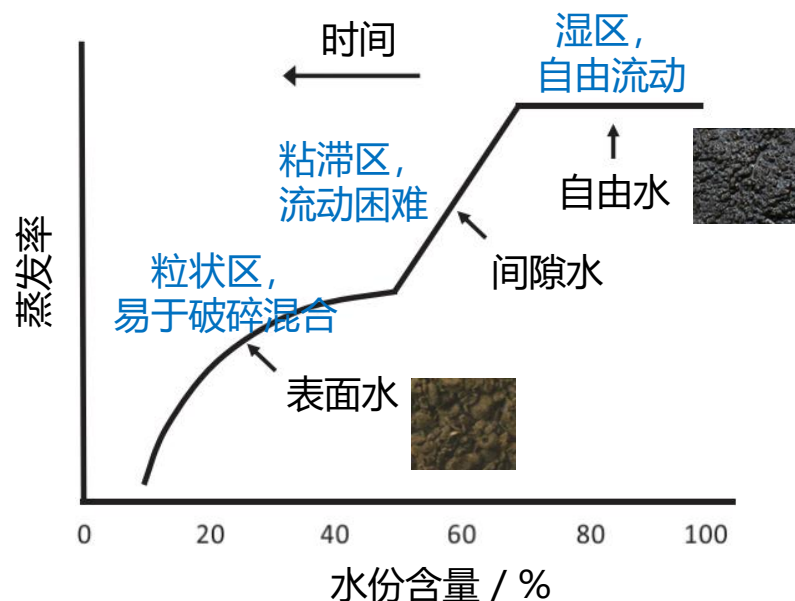
7

水份含量超80%：自由水、间隙水、表面结合水、内部结合水

主要组成，且难以通过机械方法脱除

高水分问题

- 给料困难，易堵塞
- 降低炉膛温度，影响燃烧稳定性和锅炉效率
- 增大烟气量，导致引风机电耗增加及磨损问题
- 影响酸露点，增加积灰和低温腐蚀风险



脱水

热干化

常见设备：流化床、带式、桨叶式、卧式转盘式、立式圆盘式和喷雾等

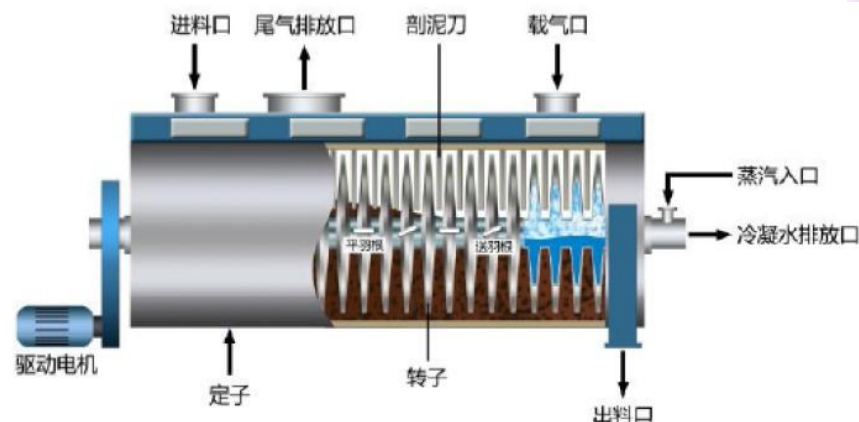
机械方法

污泥调理

离心脱水 (75-80%)
板框脱水 (60-75%)
带式脱水 (80-85%)

化学调理
物理调理
生物调理

直接加热式
间接加热式
热辐射加热式
并流式
逆流式
错流式

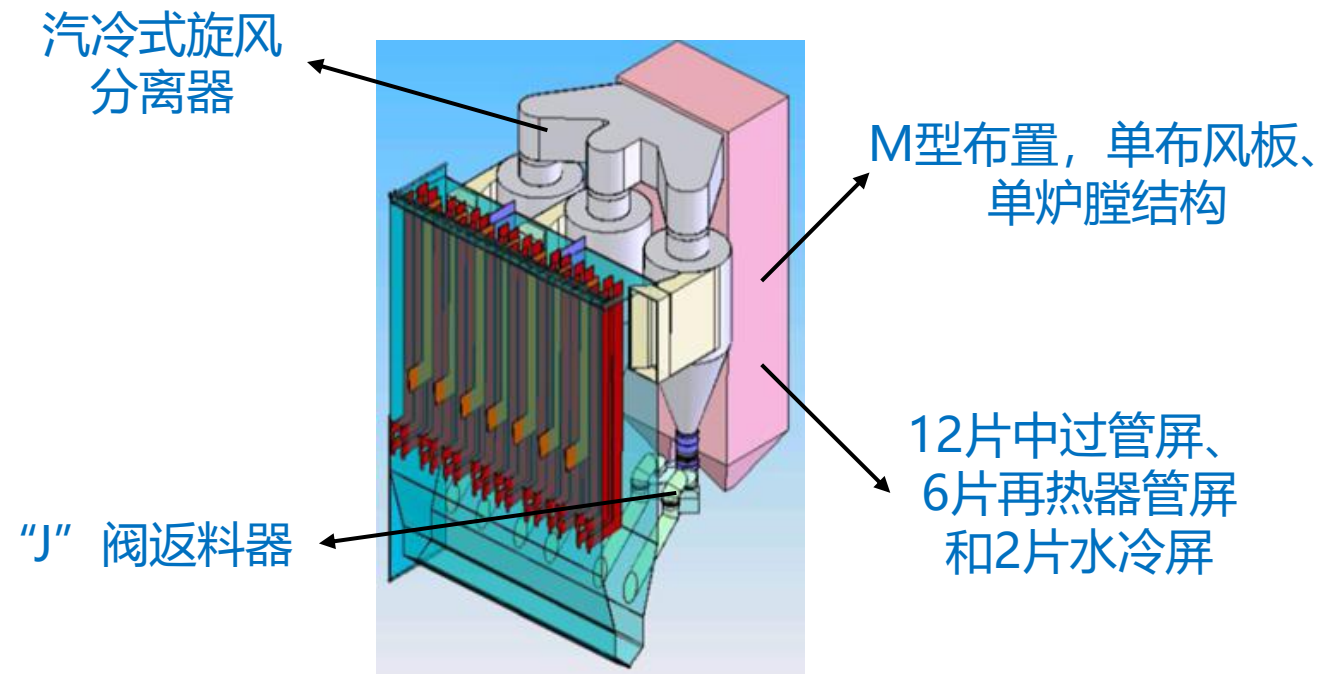


圆盘式干化机



用户名称	锅炉型号	掺烧成分	掺烧比例	其他说明
四川白马电厂	600 MW超临界	干化市政污泥 (M>60%)	5% 污泥 (216 t/d)	整体性能影响不大，锅炉效率仅降低0.1~0.2百分点
宁东电厂	330 MW亚临界	污泥 (M<60%, 1073 kcal/kg)	10% 污泥 + 15% 煤泥 + 75%煤矸石	污泥和煤泥混合后经泵送从炉顶给入
xx环保有限公司	TG-180/9.81-M	印染污泥 (M>50%, 1100 kcal/kg)	25% 煤(14 t/h) + 75% 污泥(42 t/h)	单独设置掺烧口；掺烧比例最大1100 t/d
xx热电有限公司	TG-240/13.7-M (3)	水厂污泥；气提废气；废液/废油	污泥(1 t/h) + 气提废气(5000 m³/h) + 废液/废油(1 t/d)	单独设置掺烧口
xx化工有限公司	TG-210/9.81-M (2)	污泥 (M=85%); 化工废气 (6000-8000 kcal/m³); 化工染料油 (8400 kcal/m³); 生化废气	污泥(1.5 t/h) + 化工废气(700-1500 m³/h) + 化工燃料油(1 t/h) + 生化废气(20000-30000 m³/h)	污泥从污泥仓用污泥浆液泵输至炉顶给入；废气从二次风口给入
xx热电有限公司	TG-280/13.7-M (3)	玻纤污泥	污泥(3 t/h)	玻纤污泥加水后搅拌，含水率很高，泵送至炉顶
xx热电有限公司	TG-260/9.81-M (3)	造纸污泥/纸渣 (M=40%)	纸泥/纸渣(8 t/h)	纸泥/纸渣适当烘干
xx造纸有限公司	TG-300/9.81-M (2)	造纸污泥 (M=50%)	纸泥(4.5 t/h) + 造纸白泥(10-12 t/h)	纸泥适当烘干
xx化工有限公司	75 t/h	污水污泥 (M=80%-85%, 900-1000 kcal/kg)	常规20% (2.5 t/h)，最高30%	污泥经泵送从炉顶给入；锅炉运行未受明显影响，灰渣继续作为水泥厂原料





BMCR工况下锅炉主要参数

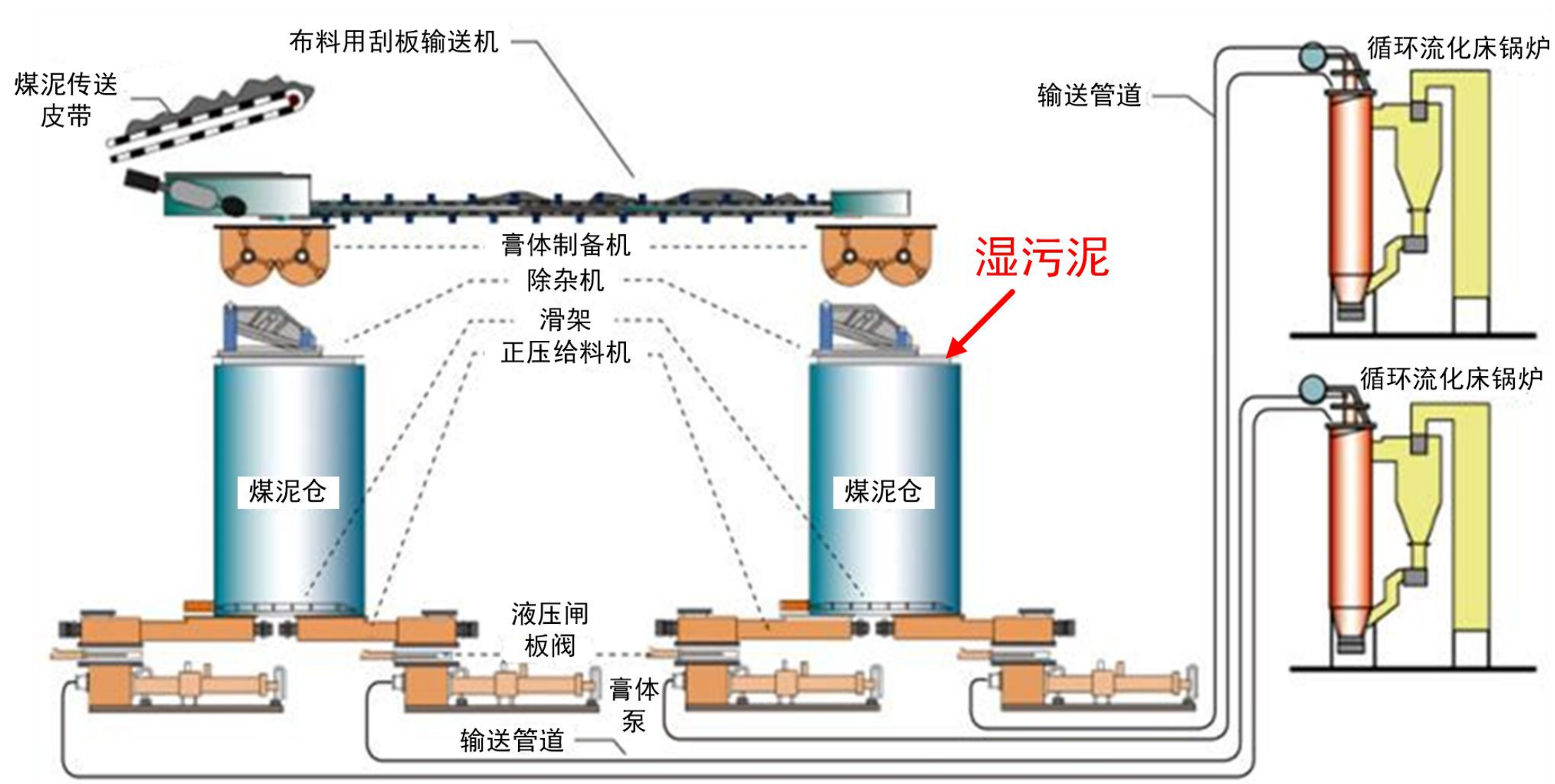
主要运行参数	数值
过热蒸汽流量 / t·h ⁻¹	1 177
过热蒸汽压力 / MPa	17.5
过热蒸汽温度 / °C	541
再热蒸汽流量 / t·h ⁻¹	979.6
再热蒸汽进/出口压力 / MPa	4.12/3.94
再热蒸汽进/出口温度 / °C	341/541
给水温度 / °C	279.6

该330 MW CFB锅炉燃料煤质分析结果

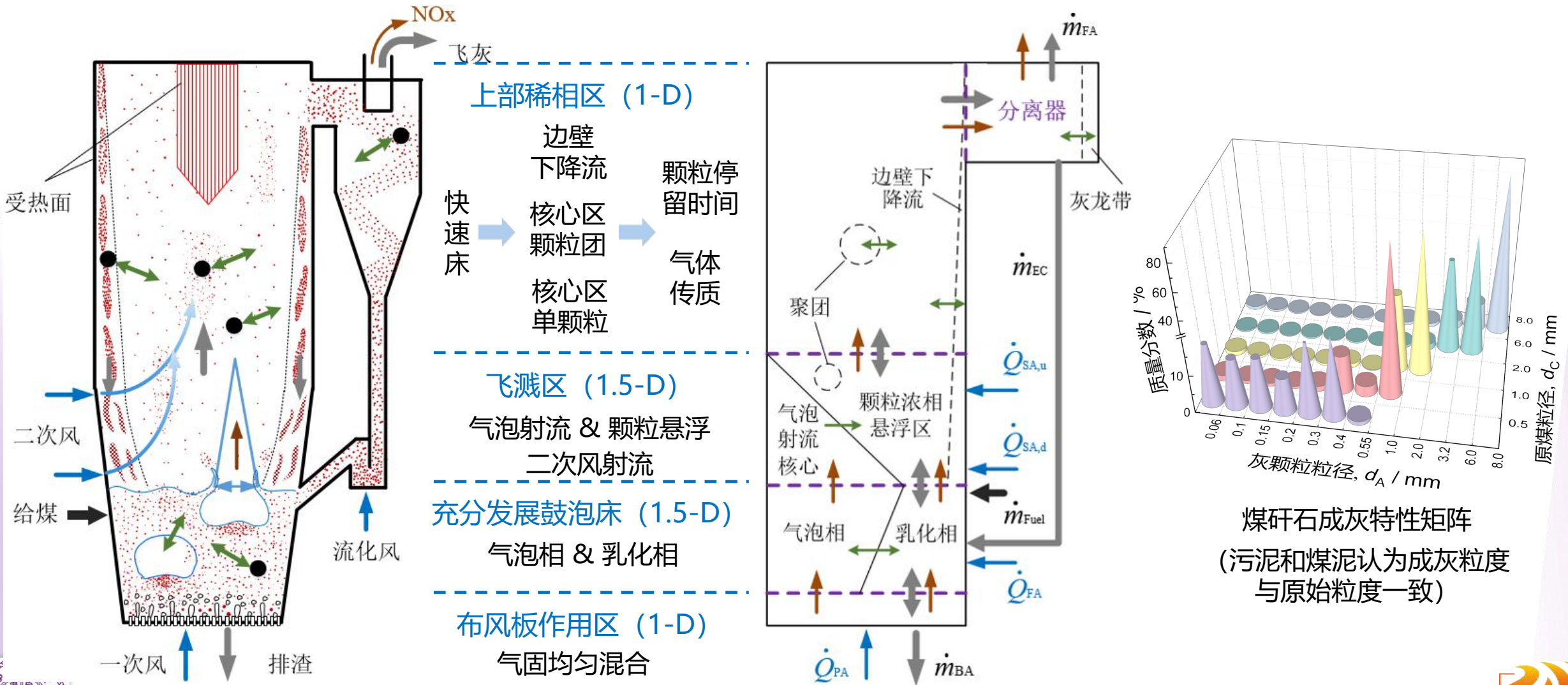
燃料	工业分析, wt %			元素分析, wt %					$Q_{ar,net} / \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	掺混比例 / %
	M_{ar}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}		
煤矸石	6.14	61.81	41.73	23.83	1.85	5.62	0.44	0.31	8.69	75
煤泥	30.28	15.66	42.60	44.80	2.87	5.62	0.44	0.33	16.86	15
污泥	56.12	19.12	89.90	12.71	1.83	7.96	0.81	1.45	4.49	10



CFB锅炉掺烧污泥工程实践：330 MW亚临界锅炉



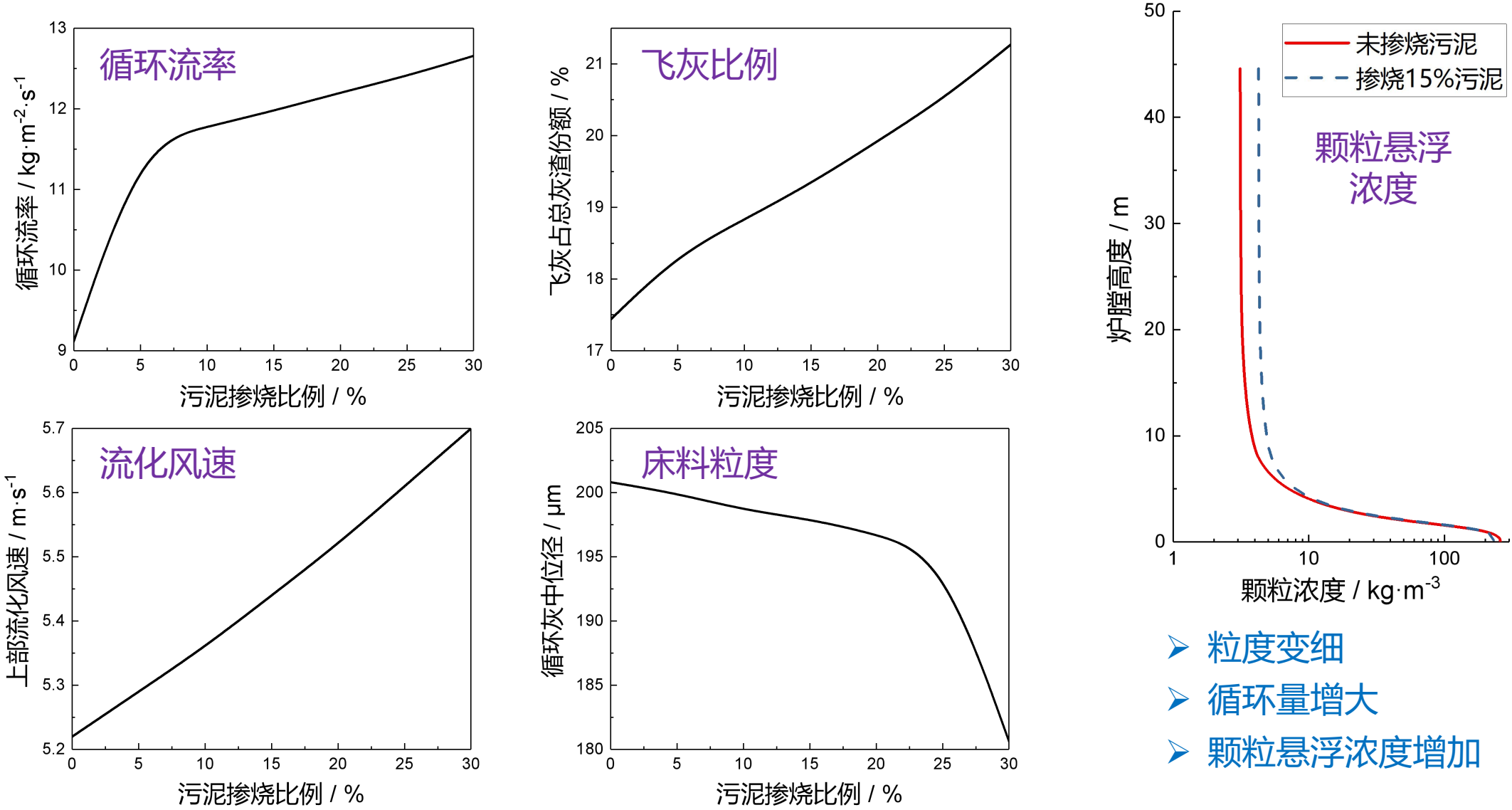
物料平衡特性模型分析（1-D/1.5-D混合循环流化床锅炉模型）：



*模型详细介绍: KE Xiwei, Markus Engblom, YANG Hairui, et al. Fuel, 309 (2022): 122133



污泥掺烧对锅炉物料平衡特性影响（模型分析）：



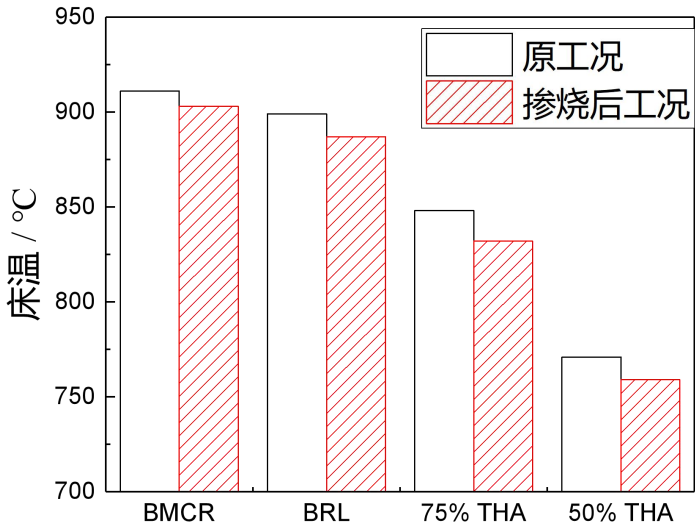
- 粒度变细
- 循环量增大
- 颗粒悬浮浓度增加



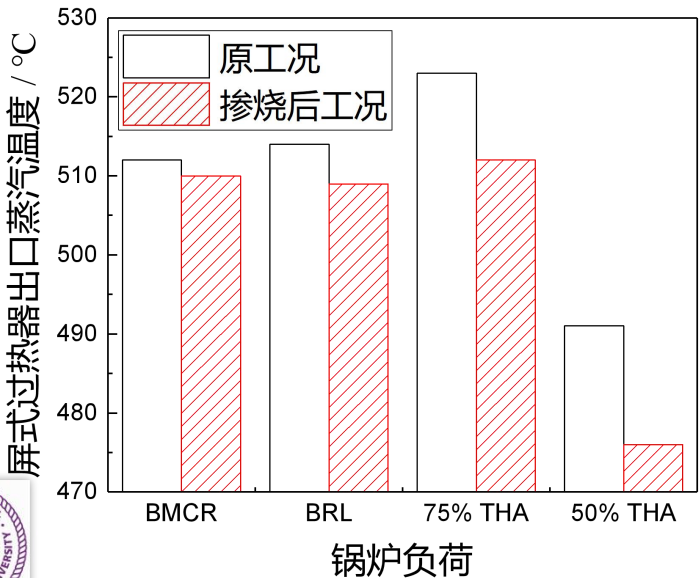
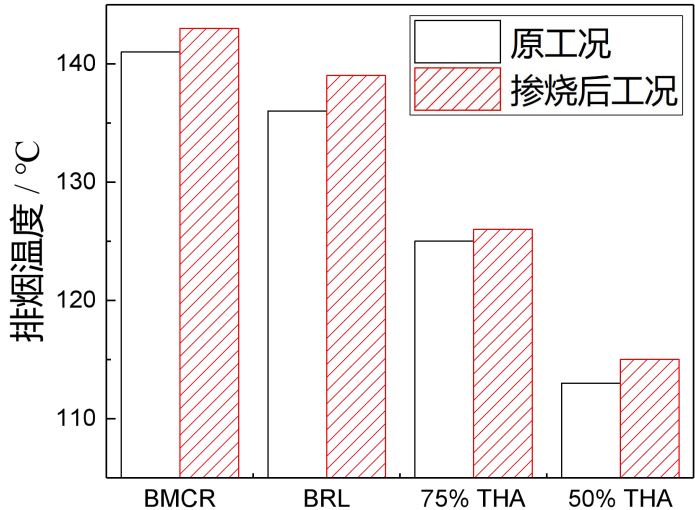
污泥掺烧对锅炉性能影响（实测，10%掺烧量）：

污泥掺烧比例较低时，锅炉蒸汽参数等变化较小，对整体运行性能影响有限

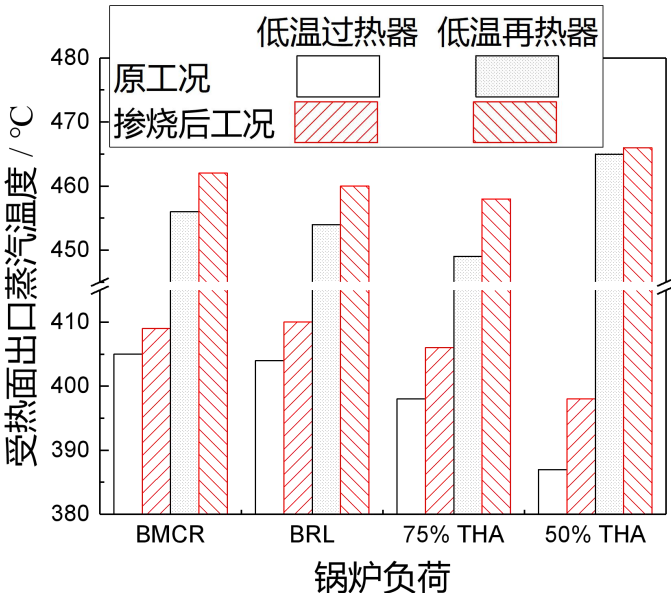
➤ 床温降低
↑
污泥带入大量水分蒸发



➤ 排烟温度升高，锅炉效率有所降低



➤ 炉内悬吊受热面出口蒸汽温度降低
↑
床温降低，炉内换热减弱



➤ 尾部受热面出口蒸汽温度升高
↑
排烟温度升高、烟气流速增加，飞灰变多，尾部对流受热面换热增强



- 为焚烧处理印染污泥单独设计，集供热、发电为一体
- 原污泥（含水量80%以上）经机械压滤、圆盘干化机（蒸汽热源）干化后，经螺旋给料机从炉前单独污泥口送入炉膛
- 最大污泥掺烧量可达1100 t/d（掺烧率约80 %）
- 前期主要靠SNCR脱硝，后期按照当地环保要求及考虑氨逃逸积灰等，增设了SCR
- 依靠尾部湿法脱硫，无炉内石灰石脱硫

已稳定运行五年，炉温均匀且基本保持在850℃以上；NO_x、SO₂、粉尘等排放均满足超低排放要求

该180 t/h CFB锅炉燃料煤质分析结果

燃料	工业分析, wt %			元素分析, wt %					$Q_{ar,net} / \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	掺混比例 / %
	M_{ar}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}		
烟煤	15.90	14.12	30.65	58.44	3.01	7.21	0.85	0.47	21.77	25
印染污泥	45.00	27.65	90.90	13.72	1.77	7.75	1.36	2.75	4.77	75



➤ 主要问题一：污泥给料难以连续、稳定

污泥水分高、粘性强，给料不均匀，导致炉内燃烧状态及 NO_x 排放波动较大；且床料及循环灰量波动易发生炉膛“塌灰”现象。

——由原刮板给料机改为螺旋给料机，并增设高压气枪间歇吹扫

➤ 主要问题二：该印染污泥含有大量铁块等杂质，堵塞布风板

大量杂质严重影响了布风均匀性，增加了一次风机电耗；且经常堵塞落渣口，影响正常连续排渣，同时铁块等易导致冷渣机损坏，降低了锅炉安全性和稳定性；当杂质积累到一定程度时，则必须停炉清理。

➤ 主要问题三：污泥灰量高、烟气量增加，炉内冲刷磨损加剧

➤ 主要问题四：尾部受热面积灰、腐蚀严重

污泥水分高、粘性强，尾部受热面易积灰，尤其在空预器低温段；

——由原立管式空预器更换为卧管空预器，堵灰情况有所缓解，可连续运行3个月，清灰工作缩减至3-5天。

同时该污泥含硫、含氯较高，加之积灰严重，易对尾部受热面造成低温腐蚀，特别是省煤器和空预器，需定期检修及更换。



原空预器积灰



省煤器管排弯
头腐蚀泄漏



CFB掺烧污泥讨论：因泥制宜、系统分析

污泥性质

含水率
热值
粒度分布
碱、氯、重金属含量...

锅炉性能

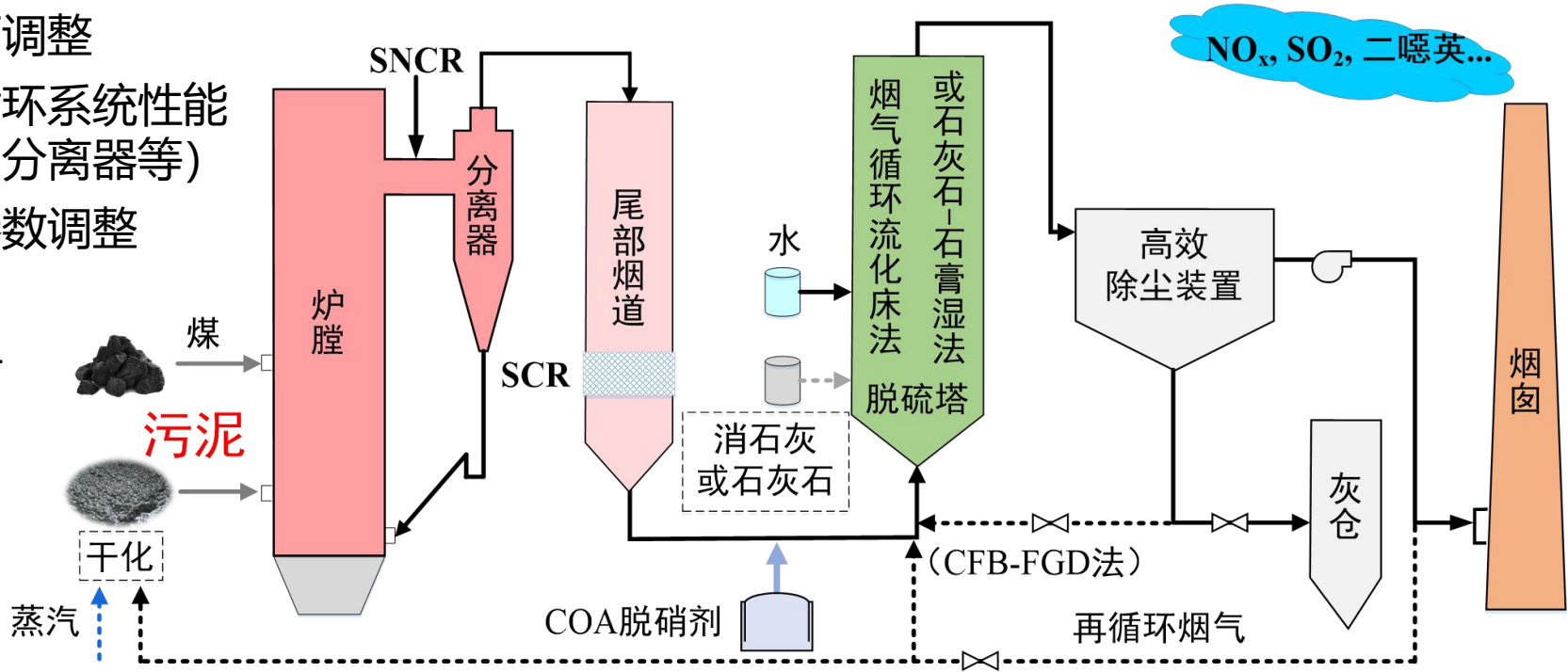
热力计算
防磨性能
低负荷性能
现场条件及改造...

环保要求

常规大气污染物（硫氮、粉尘）
二噁英排放控制
灰渣处理
环境恶臭...

系统分析
(经济性、社会价值) → 污泥掺烧技术改造

- 受热面调整
- 物料循环系统性能评估（分离器等）
- 操作参数调整
- 污泥干化方式选择
- 给料方式



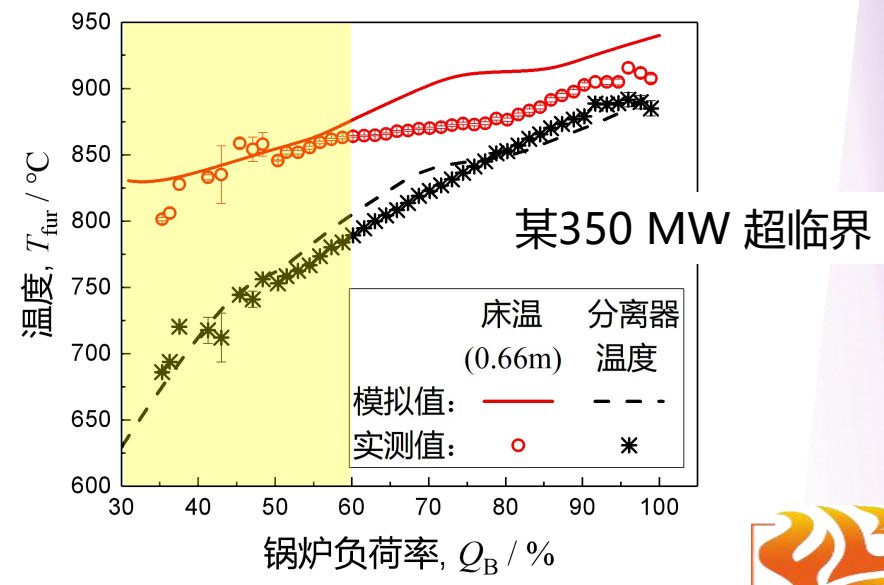
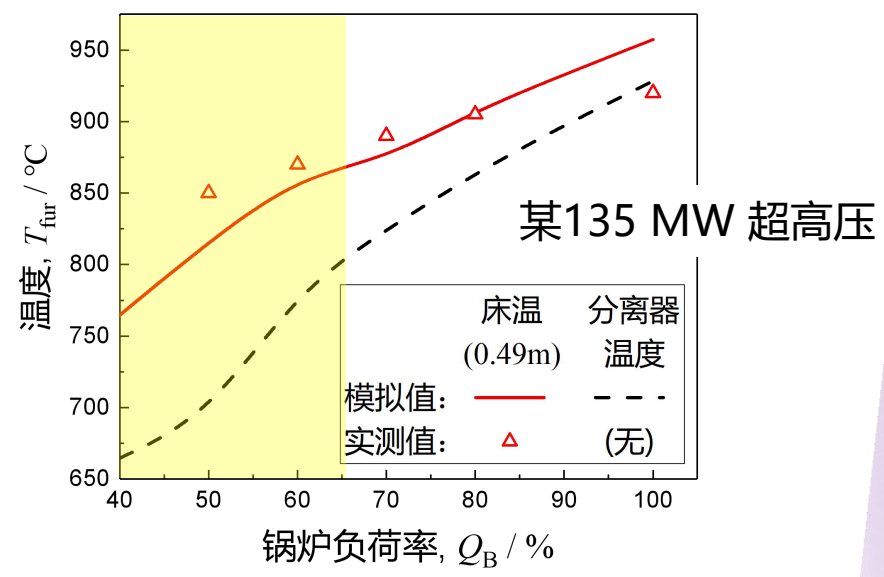
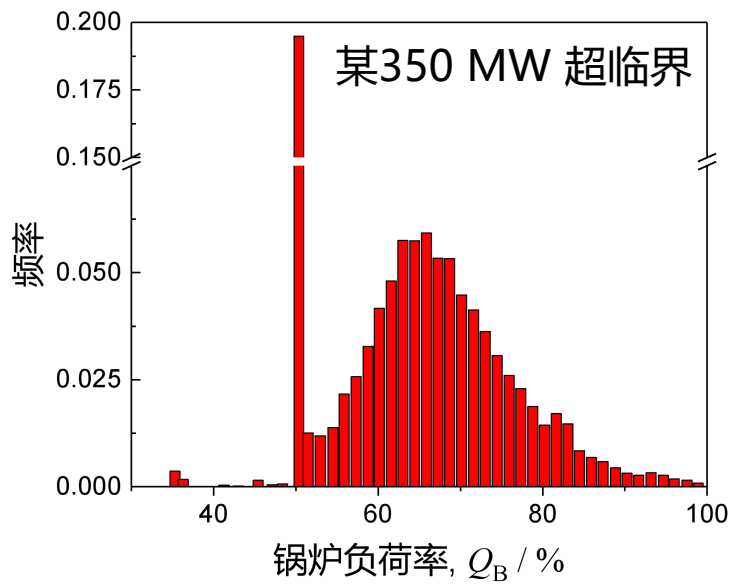
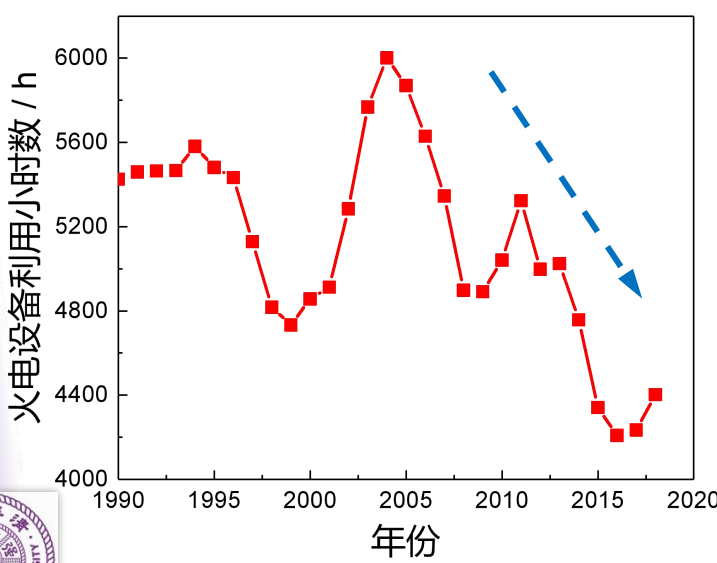
- 脱硫、脱硝、除尘等环保设备评估
- 潜在磨损、结渣、腐蚀问题处理



CFB掺烧污泥讨论：低负荷问题



CFB锅炉可能长时间低负荷运行 → 床温显著降低、循环量下降 → 污泥掺烧影响？



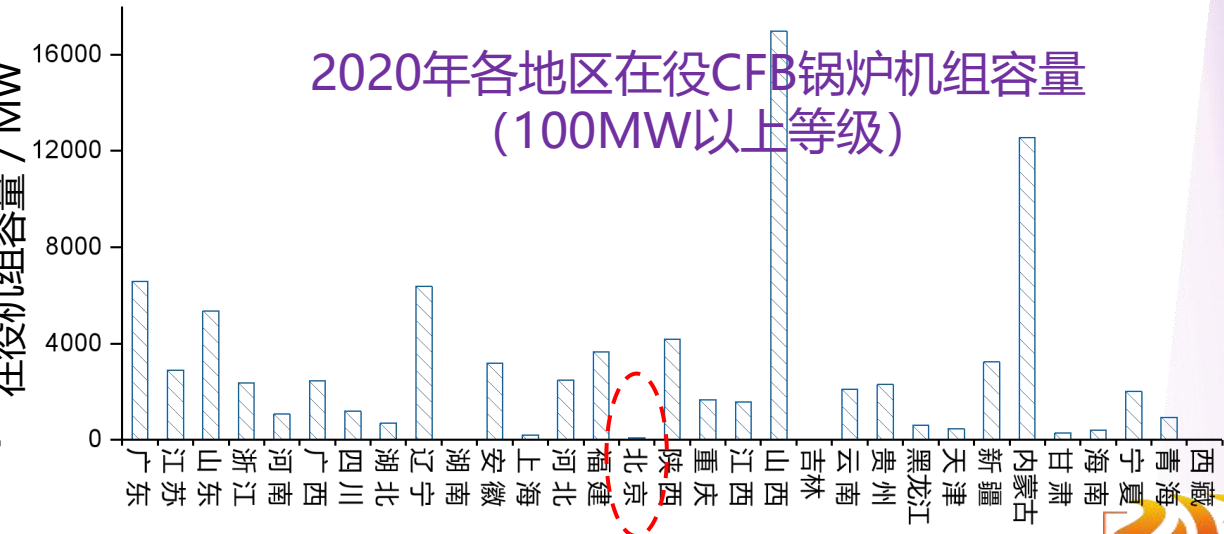
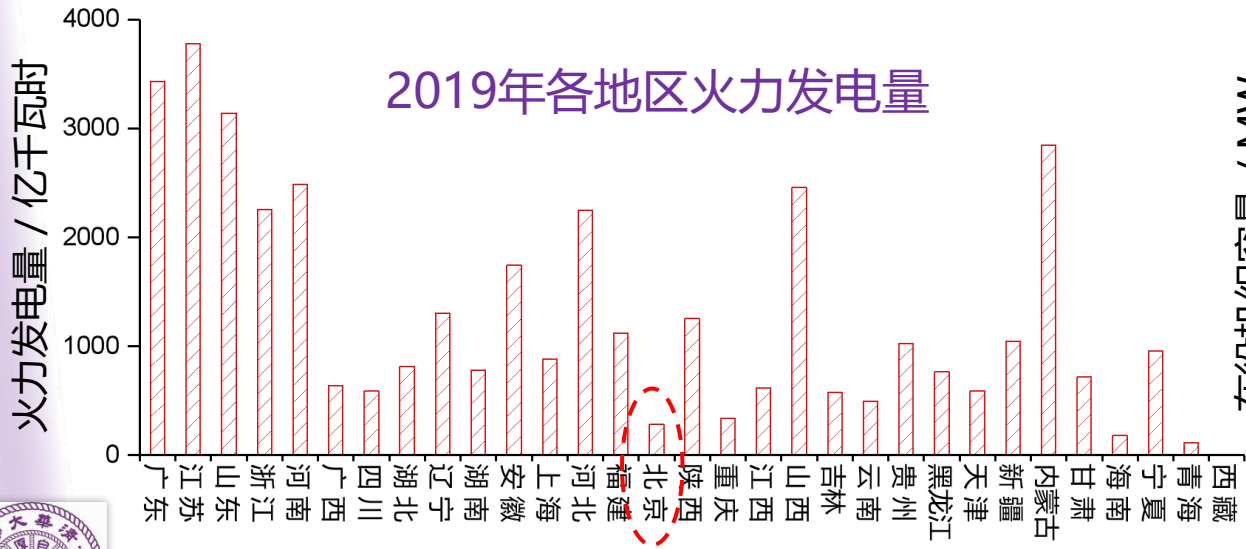
广东省能源发展“十三五”规划

——完善绿色低碳能源体系，能源结构进一步优化。能源消费总量控制在3.38亿吨标准煤以内，其中煤炭约1.75亿吨、石油约5000万吨、天然气约280亿立方米。力争实现全省煤炭消费零增长，其中珠三角地区煤炭消费负增长。化石能源消费趋于峰值，全省非化石能源消费占能源消费总量比重达26%。

北京市人民政府关于印发《北京市“十四五”时期能源发展规划》的通知

大力推动化解煤炭过剩产能，大台等5座国有煤矿全部关停，600万吨煤炭产能全部退出，结束北京千年采煤史。举全市之力全面实施各类用煤设施电力、天然气等清洁能源替代，全市电厂、锅炉房、工业和居民采暖用煤总量大幅压减，平原地区基本实现无煤化。全市煤炭消费量——能源绿色低碳转型实现新突破。大力推进“减煤、稳气、少油、强电、增绿”。非应急情况下基本不使用煤炭，天然气消费量控制在

污泥生产量 $\propto$ 燃煤CFB机组容量？



*数据来源：2020年生态环境统计年鉴，2020年中国能源统计年鉴



目前还缺乏全国统一的关于燃煤耦合污泥电厂大气污染物排放标准
上网电价、政策补贴或扶持？

内容 \ 标准	《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》 (GB/T 24602-2009)	《生活垃圾焚烧污染控制标准》 (GB 18485-2014)	《火电厂大气污染物排放标准》 (GB 13223-2011)	《燃煤耦合污泥电厂大气污染物排放标准》 (DB 31/1291-2021)
烟尘 (mg/m³)	80	20	20	5
氮氧化物 (mg/m³)	400	250	50	50
二氧化硫 (mg/m³)	260	80	100	35
一氧化碳 (mg/m³)	150	80	—	—
氯化氢 (mg/m³)	75	50	—	10
汞及其化合物 (mg/m³)	0.2	0.05	0.03	0.01
Cd+Tl (mg/m³)	0.1 (单独镉)	0.1	—	0.01
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V (mg/m³)	1.6 (单独铅)	1.0 (无钒)	—	0.08
二噁英类 (ng TEQ/m³)	1.0	0.1	—	0.02



- 利用循环流化床锅炉掺烧一定比例污泥是减量化、无害化和资源化处理污泥的有效方式，并促进CFB锅炉转型升级，前景广阔
- 小比例掺烧污泥对锅炉整体运行性能影响不大，包括蒸汽参数、燃烧性能、环保参数等
- 高比例直接掺烧高水分污泥时，可能带来给料困难、炉内冲刷磨损加剧、尾部受热面积灰/腐蚀严重等一系列问题，值得关注
- 需要结合污泥特性和锅炉运行性能，从系统角度分析并确定污泥掺烧技术方案；同时关注新形势下（机组深度调峰、空间分布差异、标准统一问题）燃煤耦合污泥焚烧技术发展





感谢各位专家聆听

柯希玮 博士

清华大学 能源与动力工程系

Email: kxw_energy@163.com / kexiwei94@gmail.com

Tel: 13120236066

