



生物质循环流化床燃烧技术

清华大学能源与动力工程系

张 纁



1. 生物质循环流化床燃烧技术背景

- 全球每年可产生约850亿吨标准煤的生物质，根据国际能源署研究，全球生物质资源可利用量为~300EJ（~102亿吨标准煤）；
- 我国可开发的生物质能资源总量约为7亿吨标准煤，根据工程院《中国可再生能源发展战略研究报告》，我国含太阳能的清洁能源总量为21.48亿吨标准煤，其中生物质能占54.5%，是水电的两倍和风电的3.5倍，可以说，生物质能是我国最具发展潜力的可再生能源。
- 由于没有得到合理利用，出现了无组织野外焚烧、污染严重的现象；



2. 生物质的利用



气化



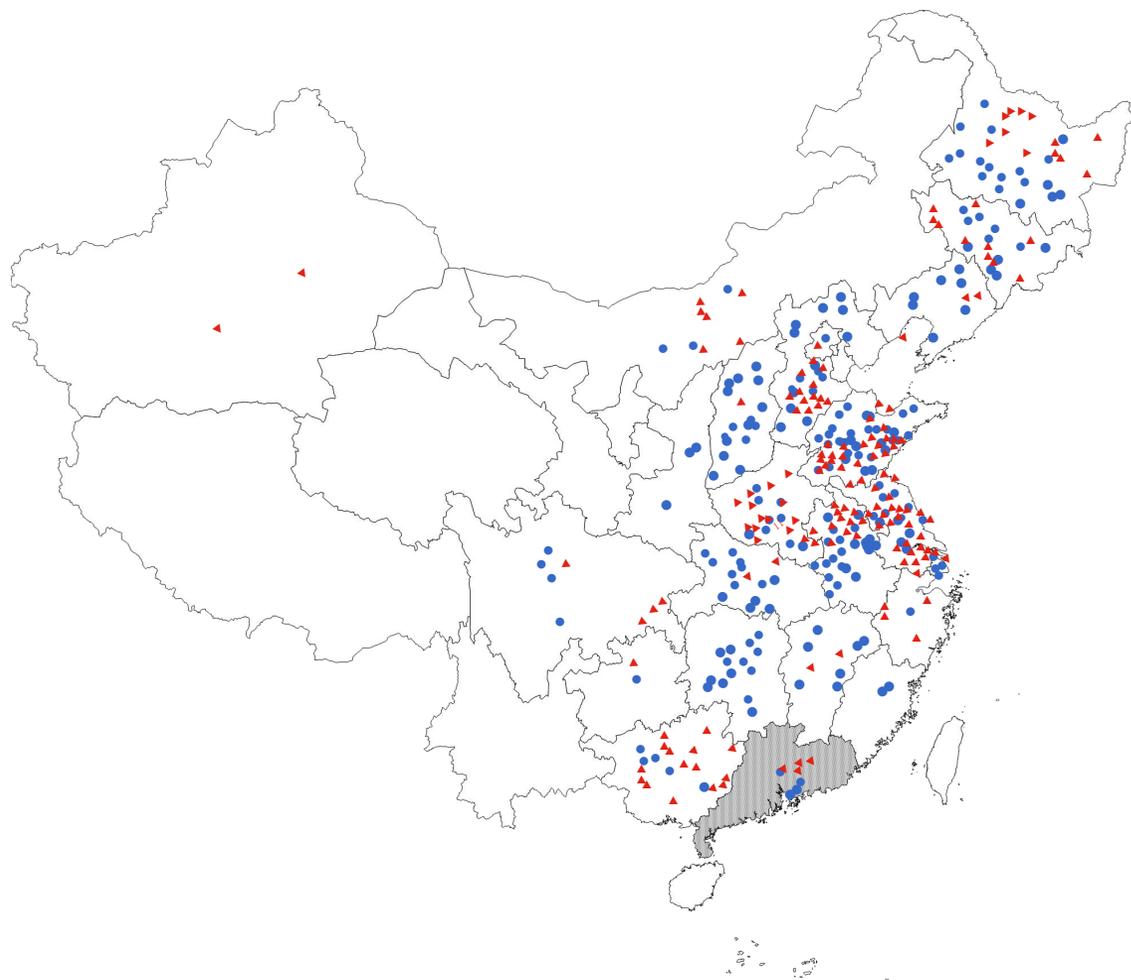
液化



直燃发电

- 其中直燃发电具有显著的可行性和经济性，实现生物质资源的大规模减量化、无害化、资源化。

3. 生物质锅炉在中国的分布



安装在国内的有482台:

- 流化床锅炉302台
- ▲ 炉排炉180台

安装在海外的有56台:

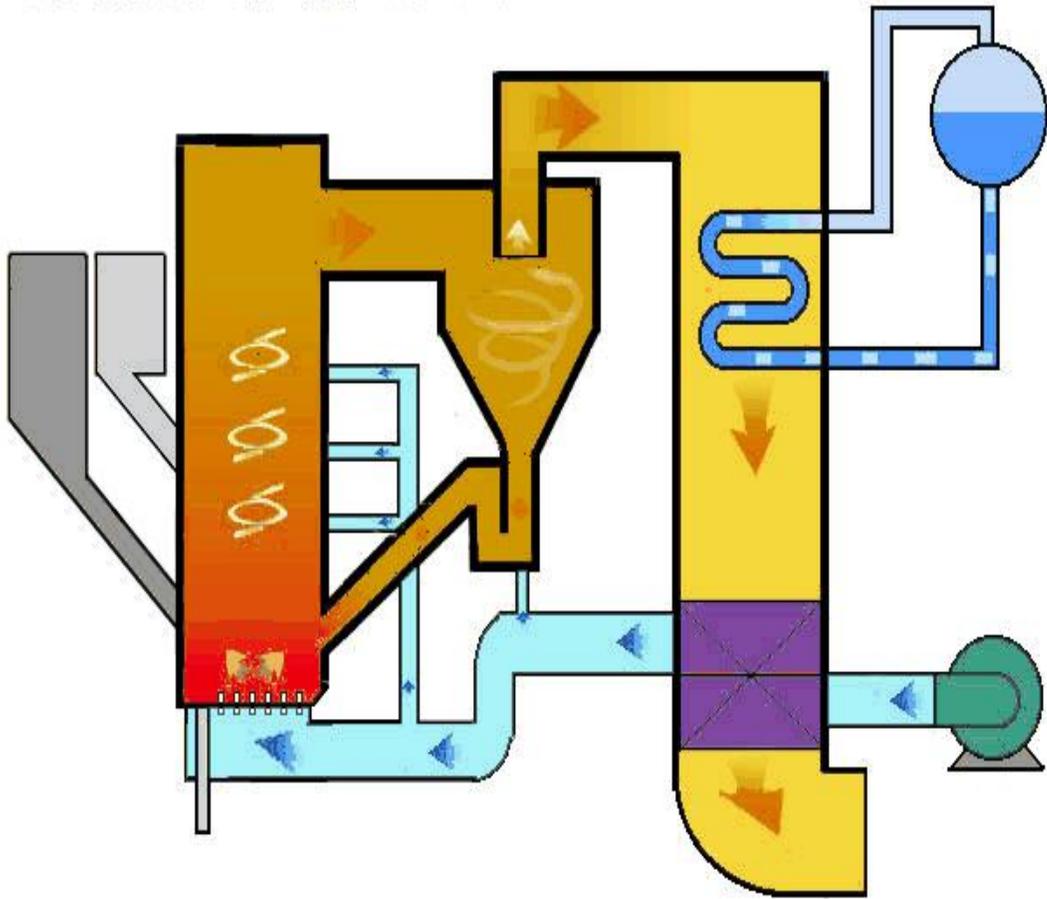
- 流化床锅炉25台
- 炉排炉31台

中国生物质锅炉分布 (截至2020年)



4. 生物质燃烧发电技术——循环流化床燃烧

循环流化床锅炉原理图



- 循环流化床由于具有燃料适应性广、污染物排放低等优点，被广泛应用于生物质直燃发电；
- 2011年，广东湛江50MW生物质CFB发电机投入运行，2016年，中国设计制造的世界首台125MW生物质CFB锅炉在泰国投入运行，2019年以来，大量的超高压一次再热生物质CFB锅炉已经得到广泛的工业应用；
- 中国生物质循环流化床燃烧发电技术已走到世界前列。

5. 生物质燃料特点

树干



树枝



树叶



生物质

玉米
秸秆



棉花
秸秆



稻草



国内典型
的生物质

5. 生物质燃料特点

1) 碱金属含量高

床层结渣

	稻壳	玉米	稻草	小麦	棉花
变形温度	>1500	1080	990	760	660
软化温度	>1500	1130	1082	780	820
融化温度	>1500	1160	1133	790	830

通常使用的石英砂床料(主要成分为 SiO_2 , 熔点在 $1450\text{ }^\circ\text{C}$ 以上) 可与农作物秸秆灰中的碱金属氧化物和盐类发生反应, 生成碱金属硅酸盐, 粘性较强;

炉膛内受热面结渣

烟气中夹带的熔化或半熔化的灰粒接触到受热面并凝结下来, 不断生长积聚, 主要发生在炉膛内受热面上。



5. 生物质燃料特点

1) 碱金属含量高



回料阀堵塞

如果燃料(如稻壳)灰本身富含碱金属和 SiO_2 , 除了容易造成床料的结渣外, 还容易出现回料阀的堵塞。

积灰

生物质中易挥发物质 (主要是碱金属盐) 在高温下挥发进入气相后, 流经对流受热面时, 通过气固相间的复杂的物理化学过程, 在对流受热面表面发生凝结、黏附、沉降。

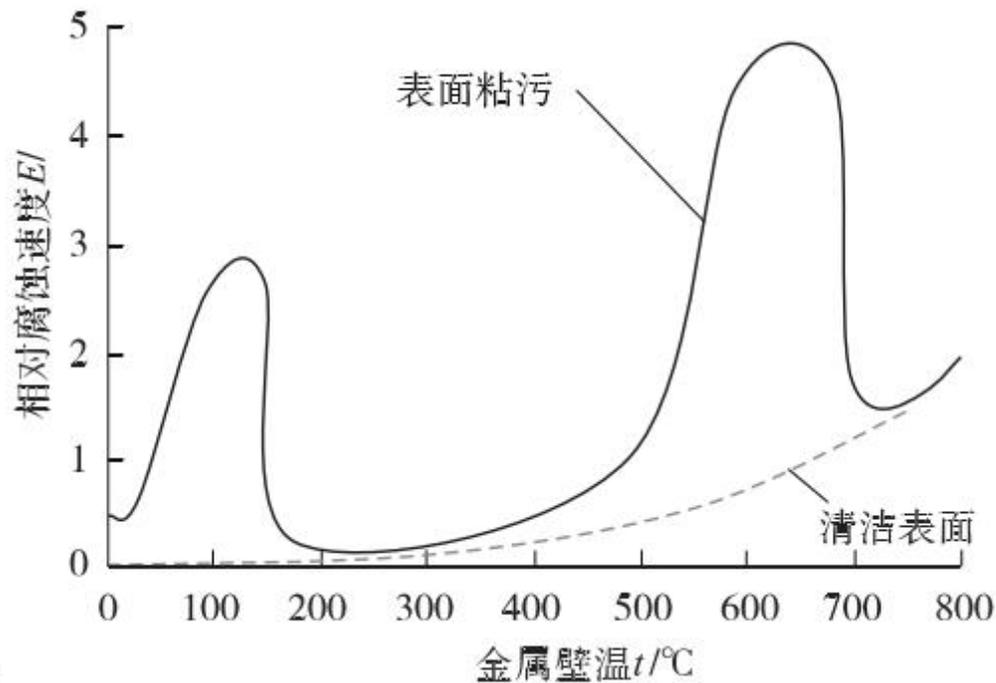
腐蚀

植物以离子形式吸收氯, 在热化学转化过程中, 释放的 NaCl , KCl , HCl 和 Cl_2 均将与受热面和烟道中的 Cr_2O_3 和 Fe_2O_3 反应, 造成设备腐蚀



5. 生物质燃料特点

腐蚀机理



➤ 秸秆燃烧挥发出来的盐蒸气在 500°C 以上的烟气中存在；

➤ 烟气通过对流受热面的冷却时，由于受热面的温度比较低，盐蒸汽会逐渐冷凝在受热面表面，成为飞灰沉积后颗粒之间的黏结剂，形成类似于结焦的沾污；

➤ 影响到受热面的传热，附着在受热面表面的灰层，诱发了垢下腐蚀。

5. 生物质燃料特点

2) 挥发分含量高

燃料的着火温度降低

炉膛上部燃烧份额大,炉膛上部燃烧温度提高, 二次风的配风比例应提高

3) 密度小, 入炉形态不稳定

需要重点考虑生物质燃料的输送及切割系统, 慎重选择入炉方式。

4) 灰份及硫份低

木材类原料的灰分含量极低, 只有1~3%, 秸秆类原料较高, 为5-10%, 大部分生物质含硫量极少或不含硫



5. 生物质燃料特点

5) 热值低

典型生物质低位发热量，生物质热值与褐煤热值基本相当

	玉米	小麦	棉花	果木枝条
低位发热量 (MJ/Kg)	15.68	15.47	18.27	16.59
低位发热量 (Kcal/Kg)	3745	3695	4364	3963

6) 水份变化大

- 水份变化范围大，导致烟气量变化幅度大，对锅炉受热面布置带来不利影响。
- 燃料来源广，种类多，热值变化范围大，给锅炉运行的稳定性及经济性带来不利影响。



5. 生物质燃料特点

7) 污染物排放

SO₂排放降低

- 生物质中硫含量低
- 碱金属与硫反应生成硫酸盐,起固硫剂作用
- 生物质灰中的CaO含量高,自脱硫能力强

	玉米	小麦	棉花	果木枝条
CaO (%)	8.1	6.55	18.92	39.82



5. 生物质燃料特点

7) 污染物排放

NO_x的排放较低

CO₂净排放为零

二噁英

生物质燃烧过程中，氯将释放至气相，主要释放形式为氯化氢和碱金属氯化物。
氯化氢是三大酸性污染排放气体之一，不仅污染环境，还会在烟道中转化为剧毒物二噁英，氯含量高的时候要考虑二噁英的排放。



6. 生物质CFB燃烧面临的主要问题

- 1) 床料及热循环回路的结渣
- 2) 尾部受热面的沾污
- 3) 提高蒸汽参数带来的受热面腐蚀

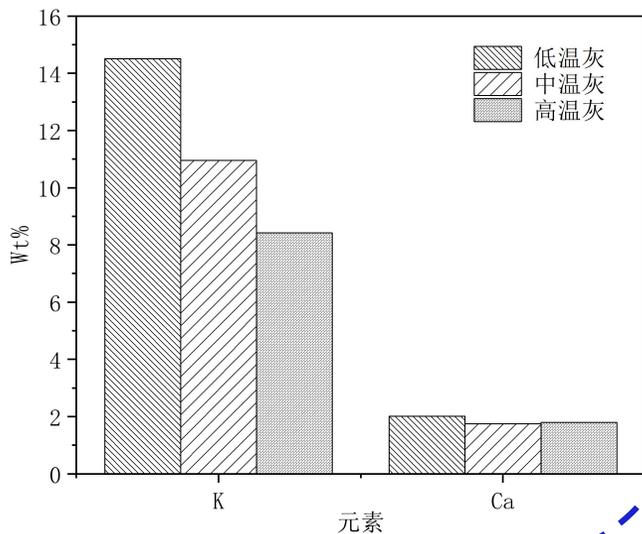
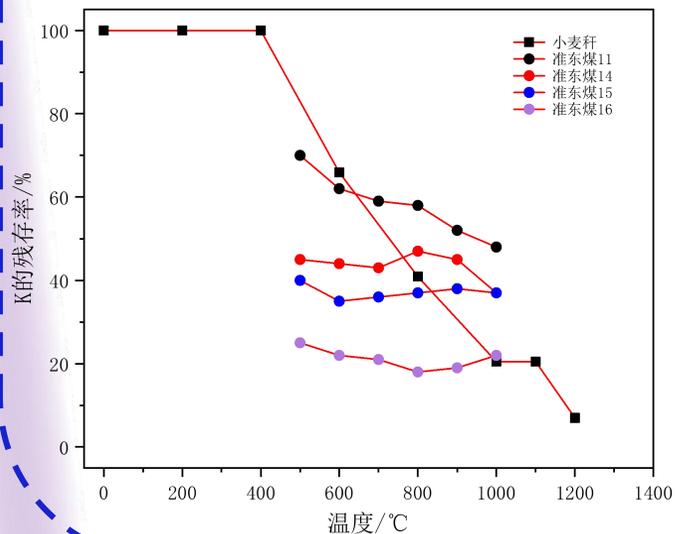
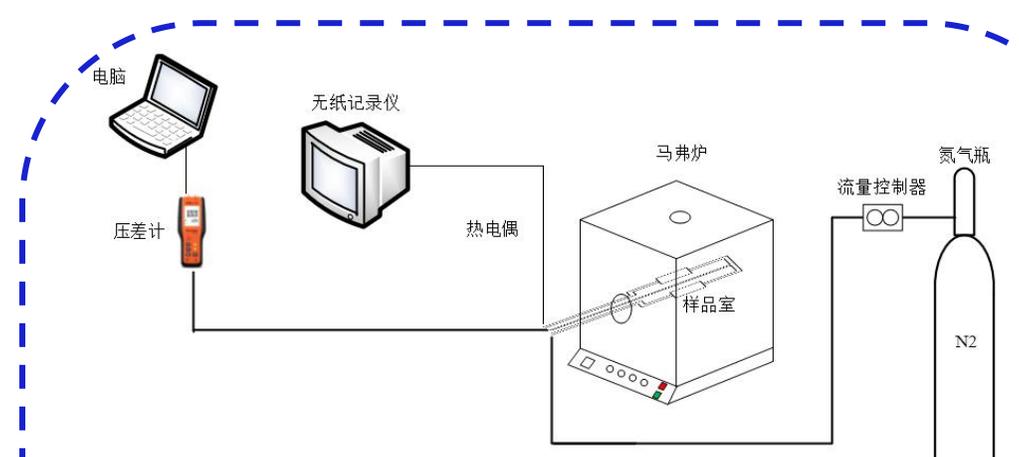


6. 针对生物质CFB锅炉开展的相关研究

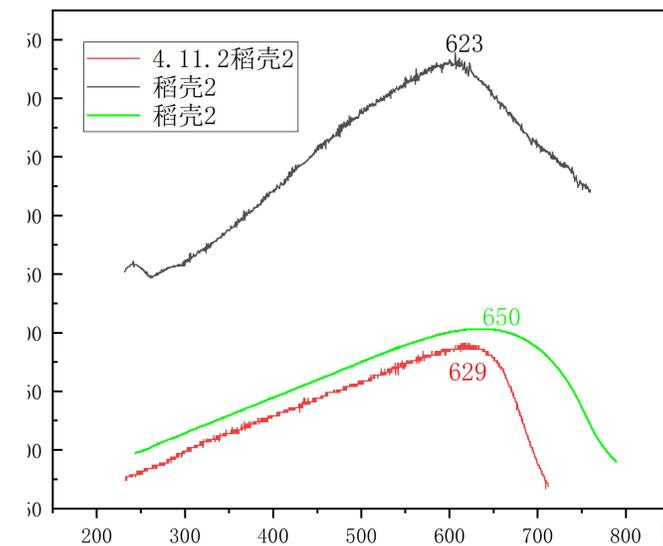
1) 灰熔点测量方法



	稻壳
变形温度	>1500
软化温度	>1500
融化温度	>1500

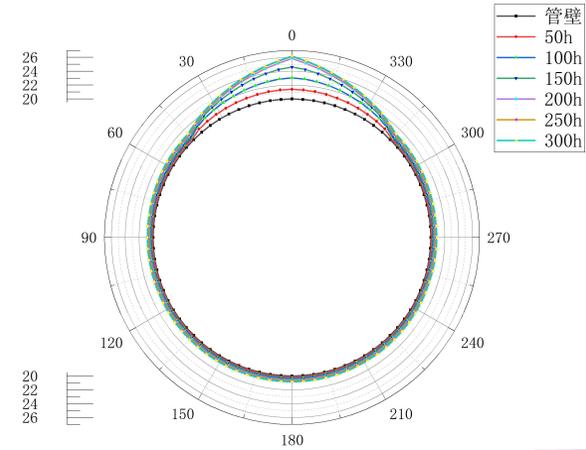
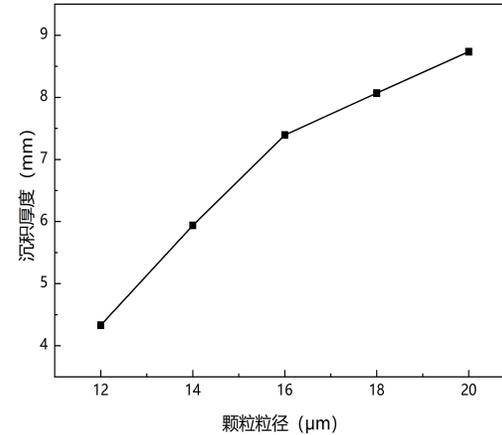
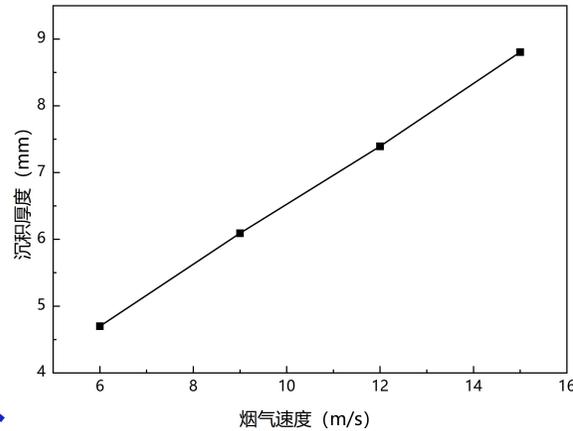
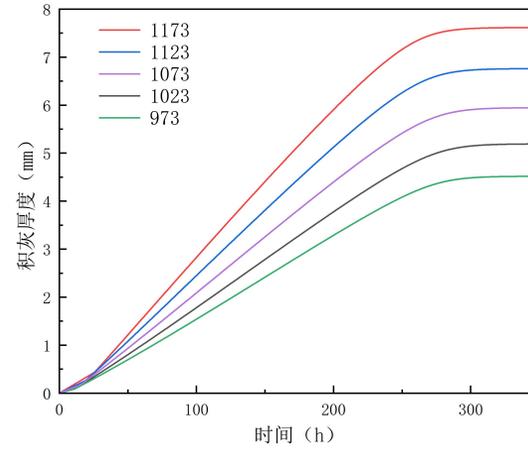
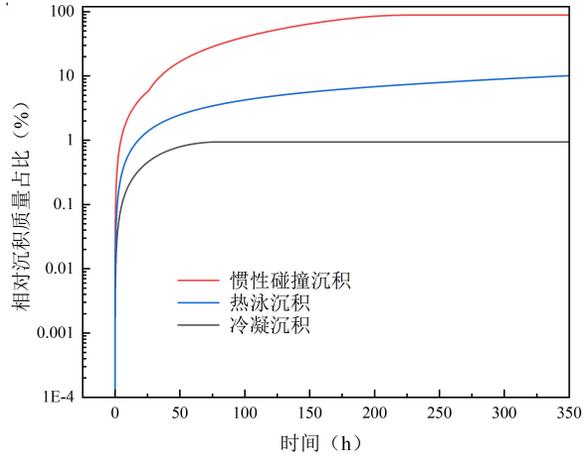
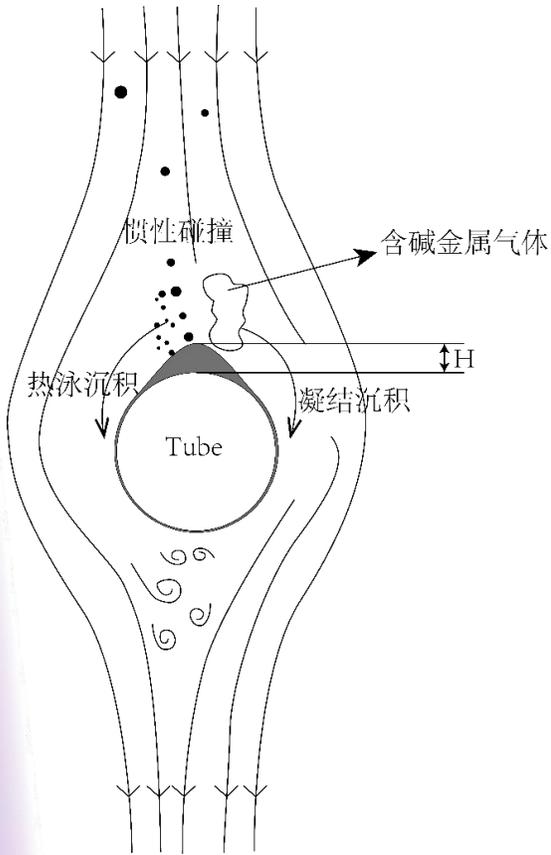


$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{u\eta}{B}$$



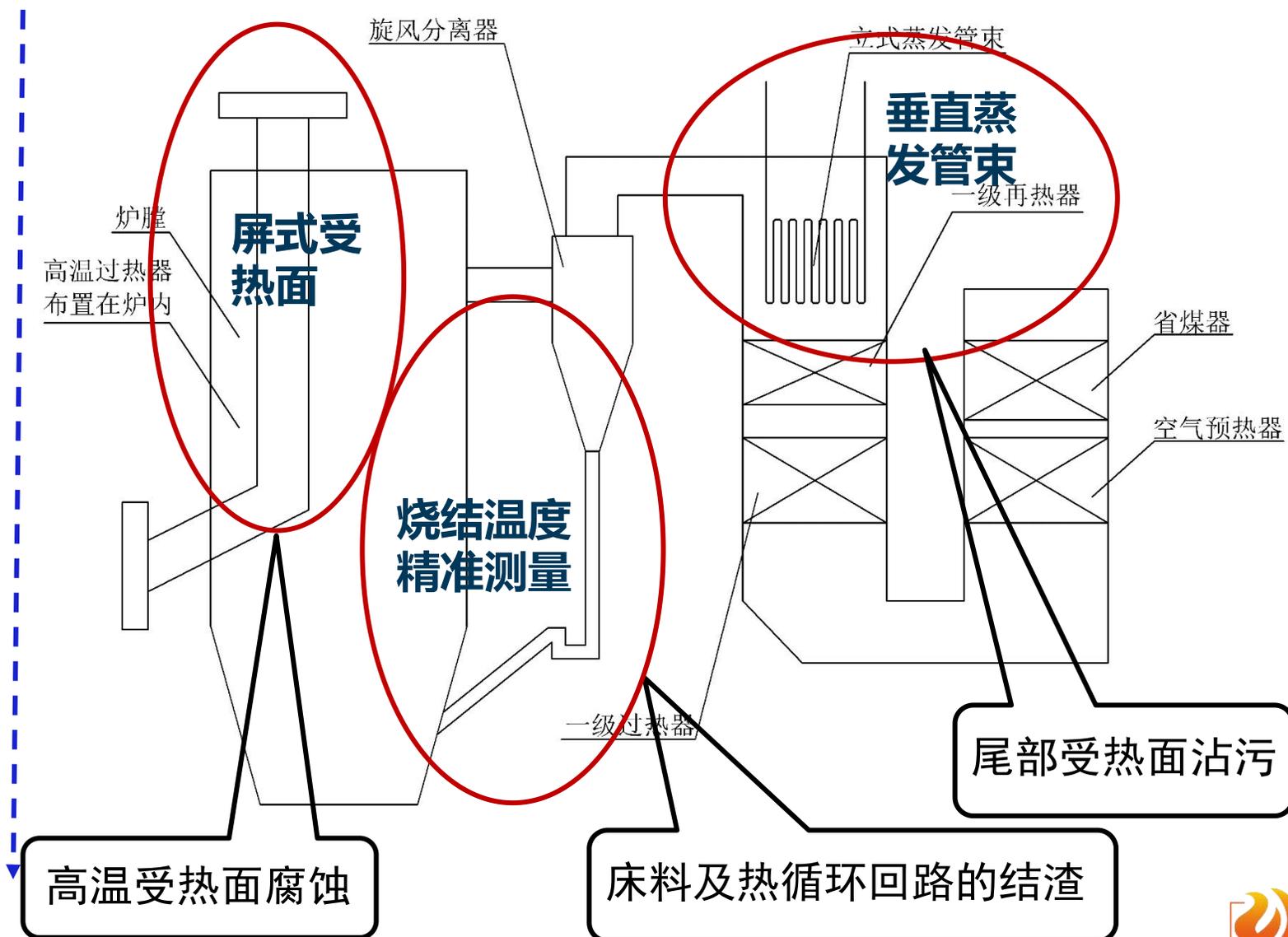
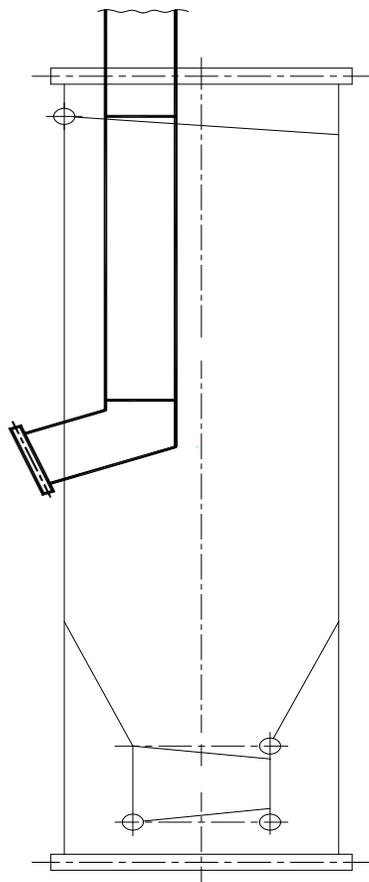
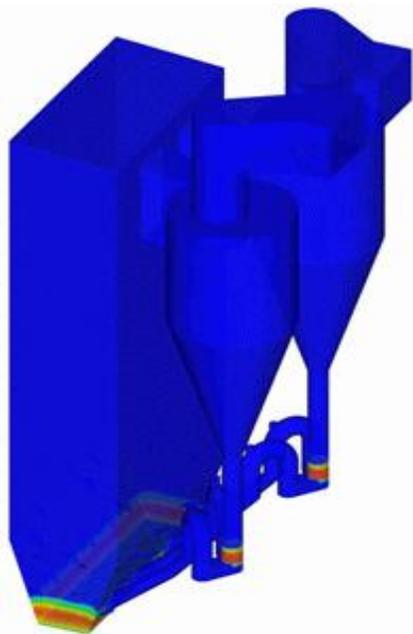
6. 针对生物质CFB锅炉开展的相关研究

2) 尾部受热面灰沉积模型

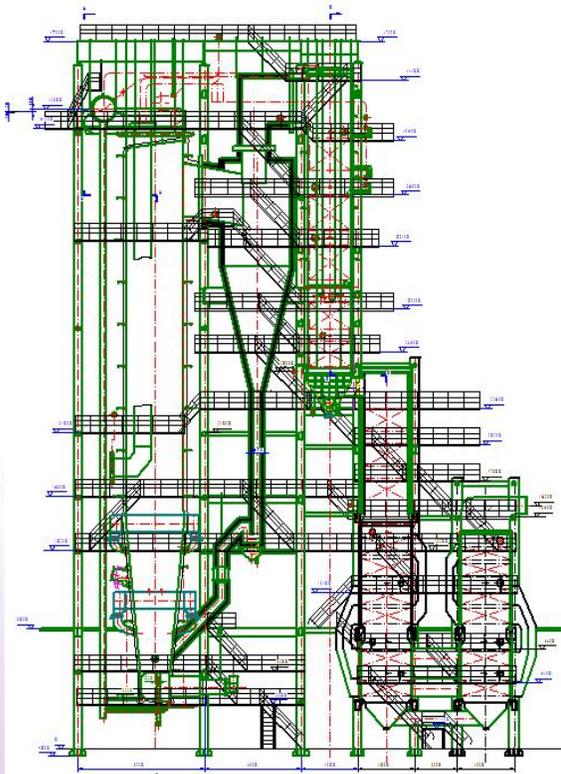


6. 针对生物质CFB锅炉开展的相关研究

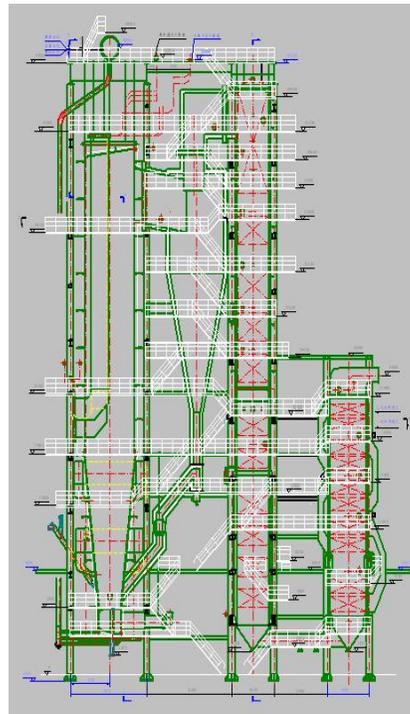
3) 高温受热面炉内布置技术



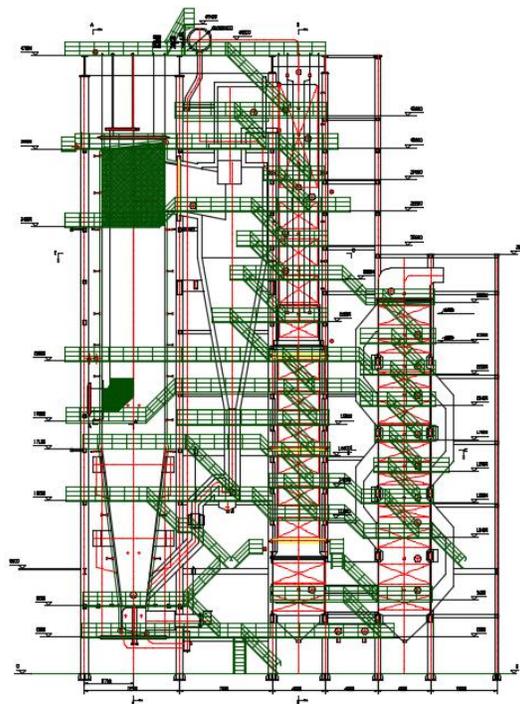
7. 纯燃生物质循环流化床工程应用



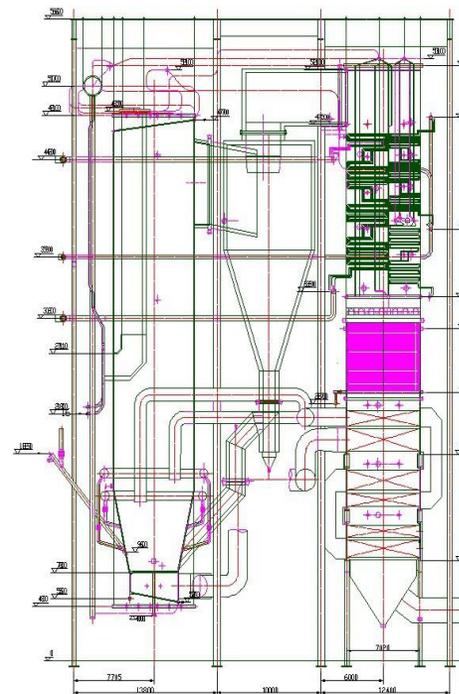
乾安聚太生物质电厂130t/h
高温高压CFB锅炉（2015）



中鑫热电生物质130t/h
超高压一次再热CFB锅炉
（2019）



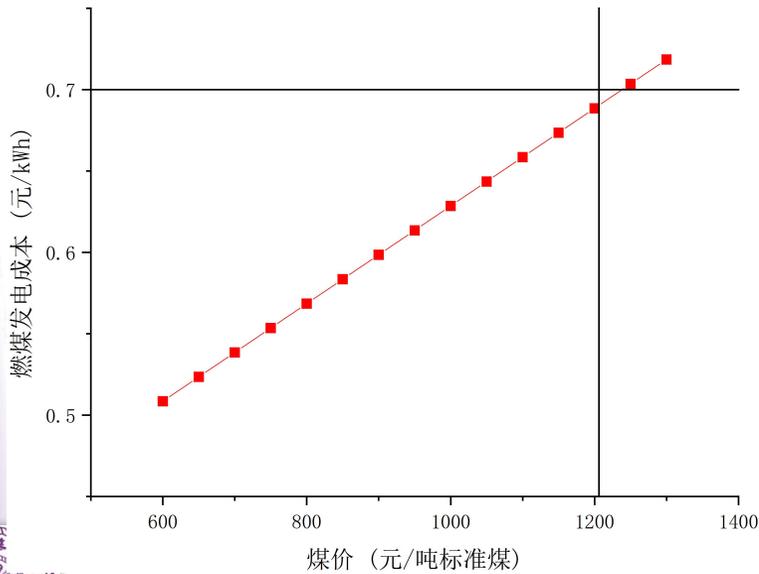
庆祥集团260t/h
超高压一次再热CFB锅炉
（2020）



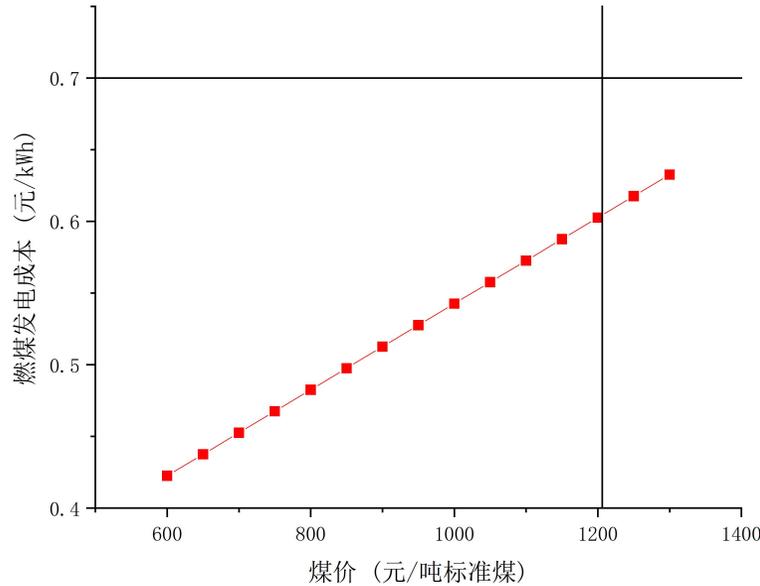
泰国#PP9项目生物质电厂
384 t/hCFB 锅炉
（2016）

8. 生物质纯然发电前景

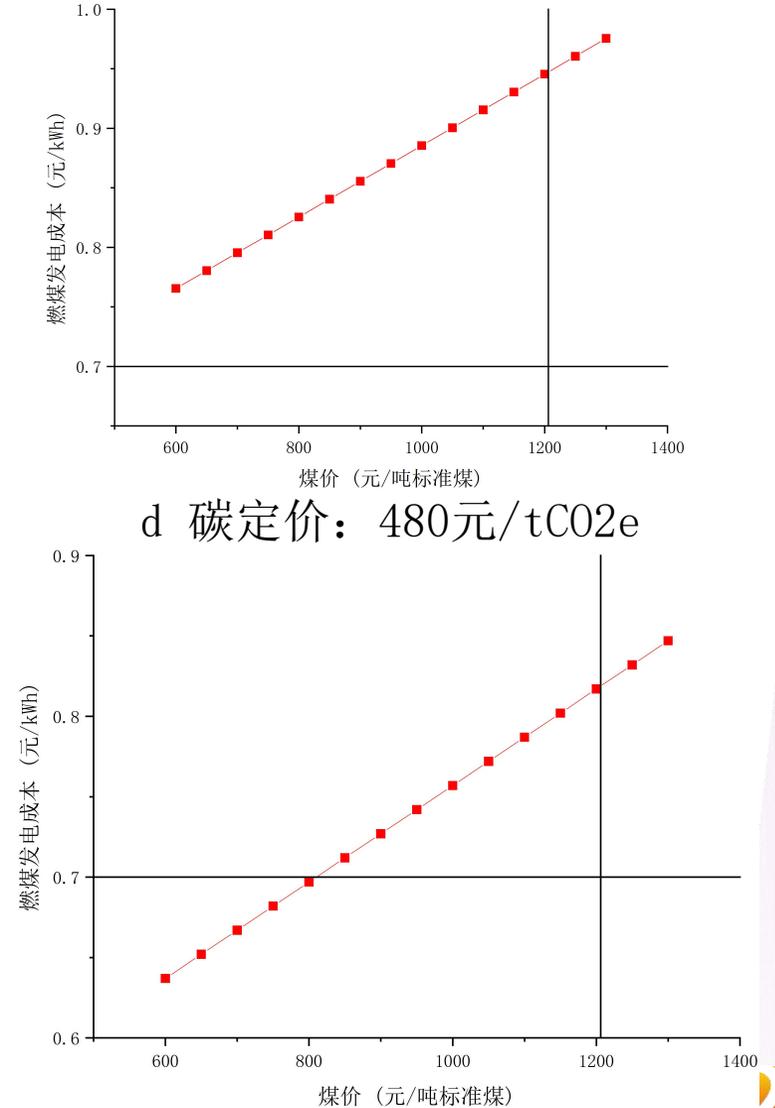
- 关键在于能否获得合理的生物质发电上网电价。由于生物质原料价格和收储运成本远高于电厂燃煤成本，因此，生物质直燃电厂，需要得到上网电价政策支持；
- 如果没有上网电价的政策支持，生物质发电项目的建设和运营将面临较大困难，其带来的良好生态环保效益也将被极大削弱。



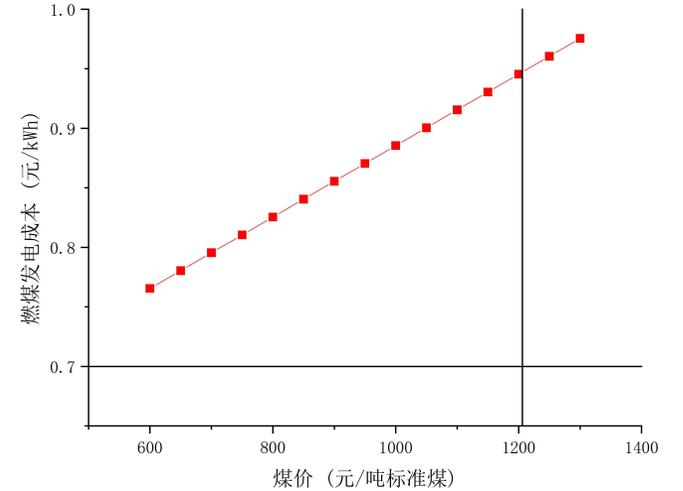
a 碳定价：8.18元/tCO₂e



b 碳定价：160元/tCO₂e



c 碳定价：320元/tCO₂e



d 碳定价：480元/tCO₂e





谢谢!

清华大学能源与动力工程系

