

一般可燃工业固废纯烧的工业实践

汇报人：段伦博 教授/博导

东南大学能源与环境学院

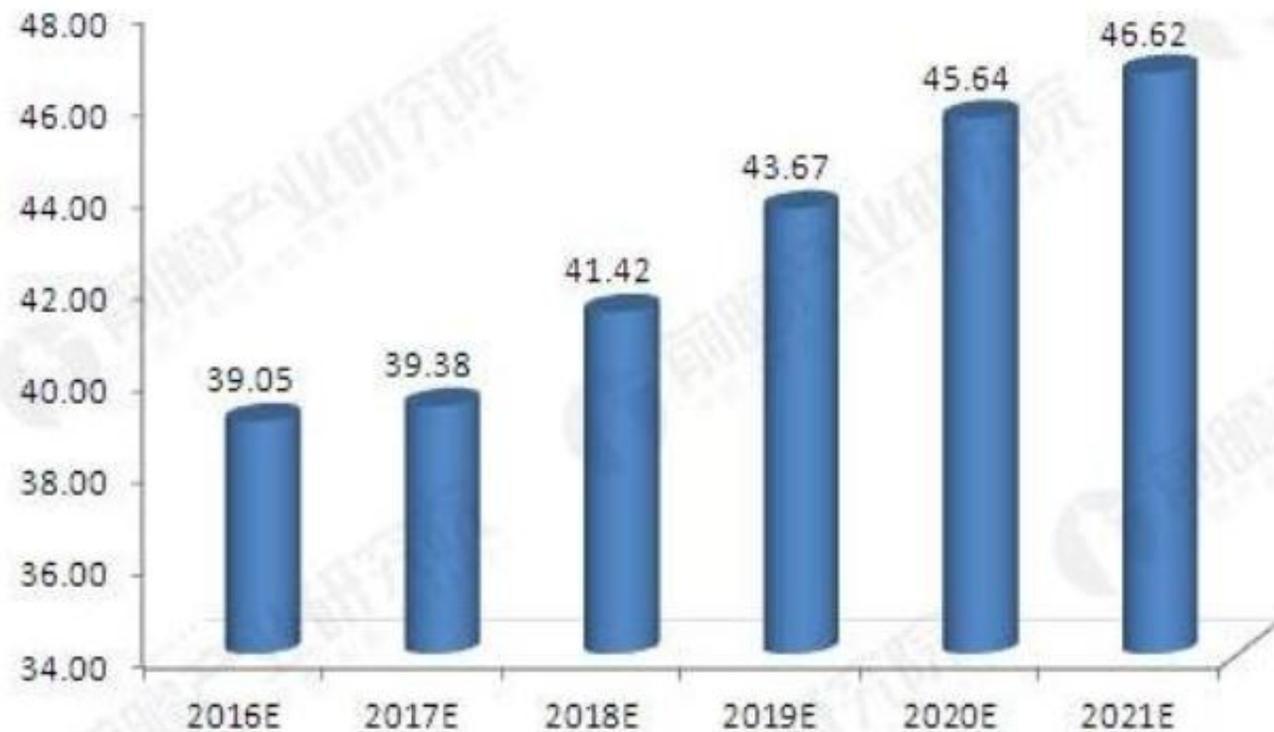
*duanlunbo@seu.edu.cn, 13951912858

汇报内容

1. 背景介绍
2. 制鞋固废分类及燃料特性
3. 2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验
4. 400TPD CFB锅炉工业实践
5. 总结

背景介绍

- 我国工业固体废弃物产生量逐年增多，且远大于生活垃圾废物（10倍以上）；
- 我国固废法要求最大限度降低固体废物填埋处理量；
- 我国工业固废的综合利用量占总固废量比例低。



2016-2021年我国工业固废年产量 (亿吨)



皮革废料



工业污泥



纺织固废



造纸废渣



石化固废



酵渣



石化泥渣



造纸浆渣

背景介绍

- ✓ 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》2020修订版明确要求：禁止向生活垃圾收集设施中投放工业固体废物；县级以上地方人民政府应当组织建设工业固体废物集中处置等设施；
- ✓ 《环境保护税法》2018年已实施，将固废纳入征收对象；
- ✓ 《中国制造2025》明确提出，工业固废综合利用率2020达到73%。



未来相当长的一个时期内，固废处理行业需求巨大，固废无害化处置技术发展潜力广阔！

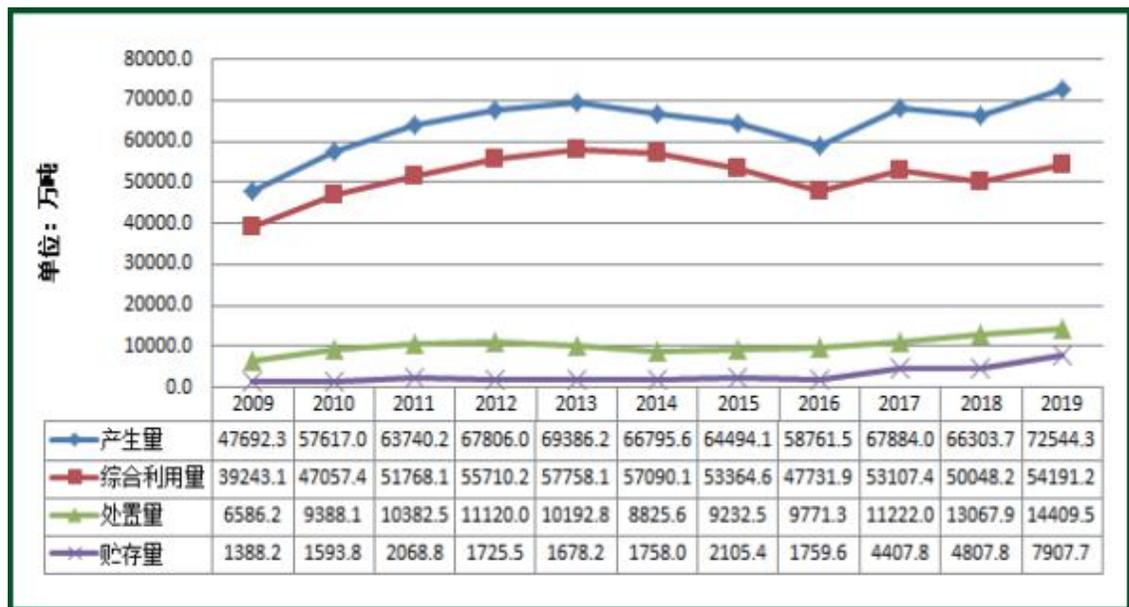
资料来源：前瞻产业研究院整理

@前瞻经济学人API

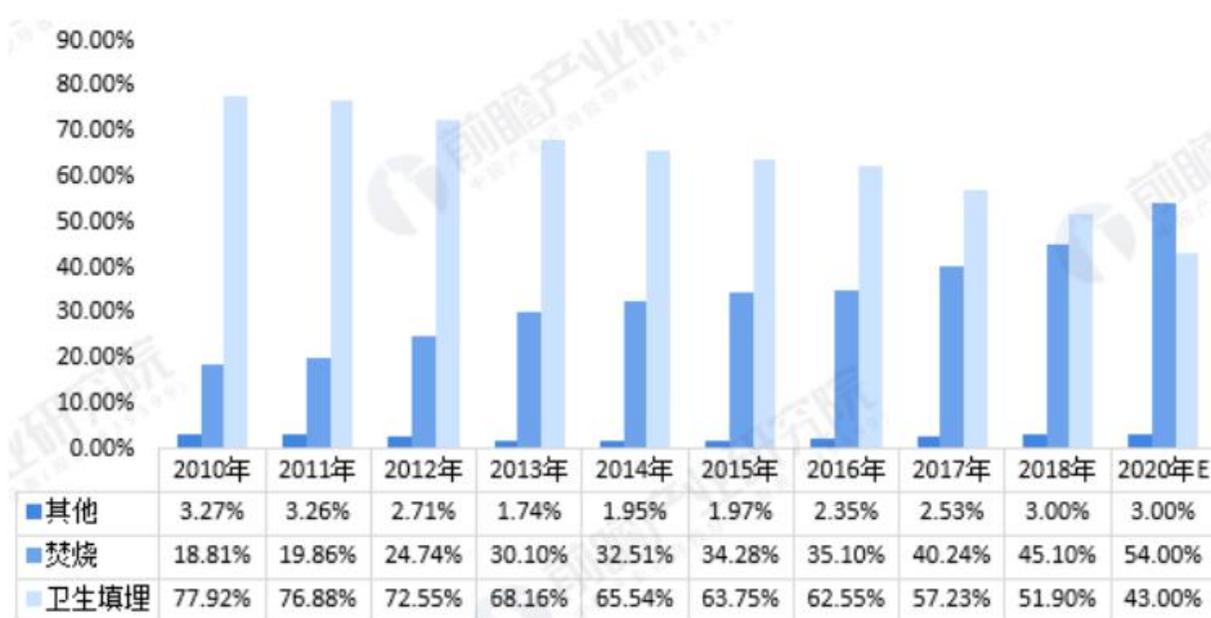
“十四五”规划期间中国各省份固废处理行业发展目标

背景介绍

- 一般可燃工业固废焚烧处置是固废减容减量最有效方案；
- 可燃工业固废可以作为替代燃料焚烧处置是其资源化利用最有效的手段之一；
- 2010年，我国固废处理中焚烧处理仅占6.7%，预计2020年增长至20.0%，**2030年将继续增长至30.0%，市场前景广阔，发展潜力巨大。**



2009-2019年重点城市及模范城市的一般工业固体废物产生、利用、处置、贮存情况 (单位: 万吨)



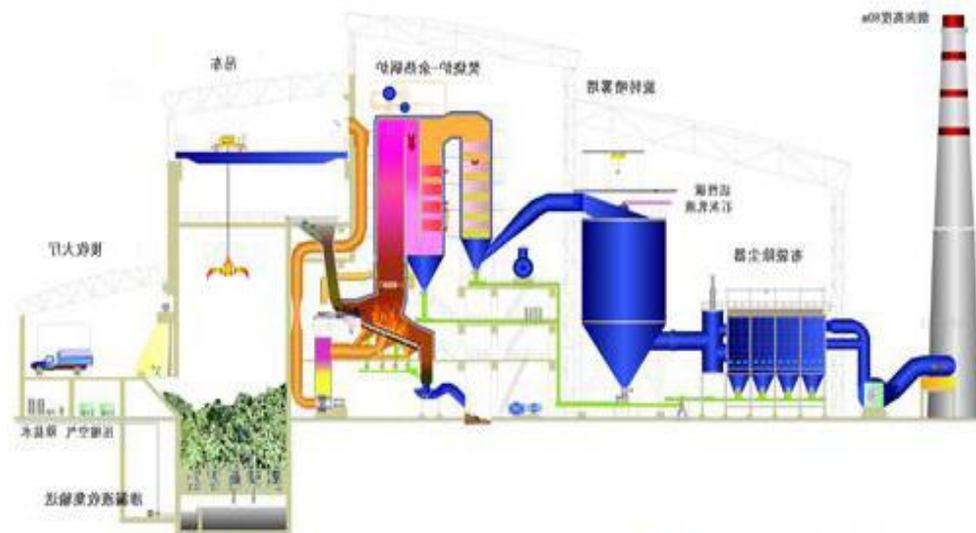
2010-2020年生活垃圾处理能力占比变化情况 (单位: %)

背景介绍

■ 一般可燃工业固废焚烧处置是固废减容减量最有效方案

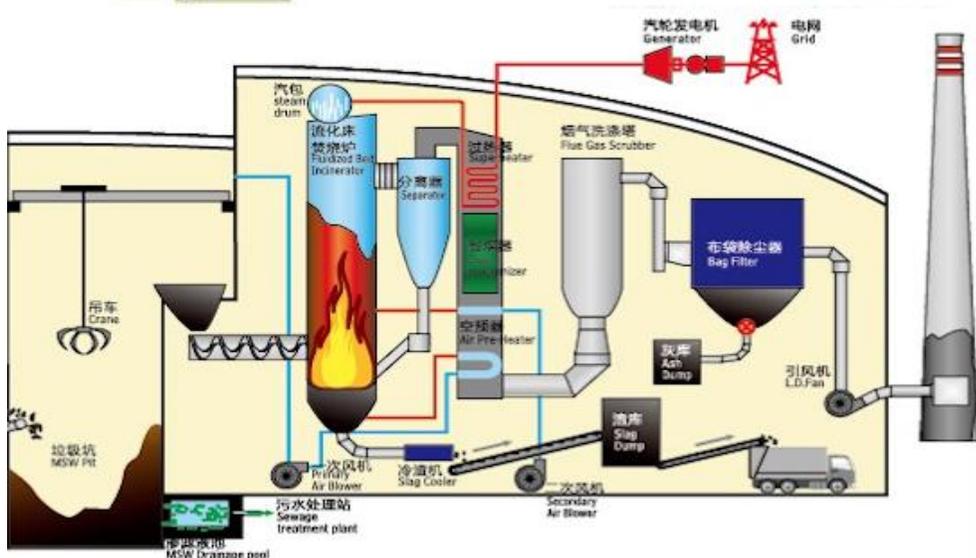
一般可燃工业固废

炉排炉焚烧



炉排炉焚烧技术：原料预处理简单、可靠性高、工程投资大，运行成本高

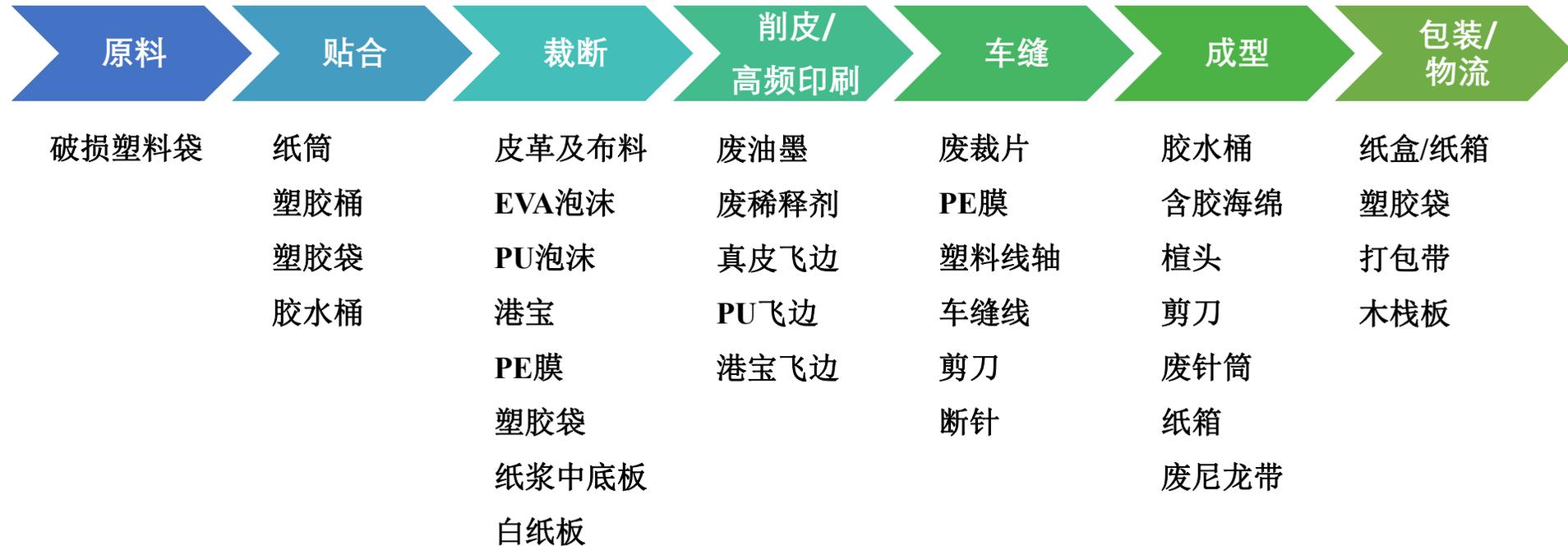
流化床焚烧



循环流化床技术：污染排放低、效率高、工程投资小、预处理复杂、飞灰比例高

背景介绍

- 中国是目前世界上最大的制鞋国，2018年总产量超过135亿双；
- 制鞋工业产生大量的废弃物，平均每生产1 kg的鞋产生0.3 kg的SMW (Shoe Manufacturing Waste)；
- SMW的组成非常复杂，主要包括**皮革、橡胶、塑料、海绵、棉花**等；
- 对不可回收利用的SMW可以通过焚烧实现减量化、资源化处理。



制鞋固废分类及燃料特性

不同SMW组分的元素分析和工业分析:

样品	元素分析						工业分析/收到基				低位热值
	N _d (%)	C _d (%)	H _d (%)	S _d (%)	O _d (%)	Cl _d (mg/g)	Ash (%)	V (%)	FC (%)	Moist (%)	MJ/kg
A	5.87	59.18	6.96	0.28	27.03	0	0.60	76.56	10.61	12.23	20.13
B	0.22	60.11	5.36	0.16	24.87	1.3	7.85	40.54	37.40	14.21	15.73
C	1.05	55.36	5.66	0.09	27.05	2	10.04	40.23	44.52	5.21	21.55
D	1.37	44.19	5.1	0.46	19.67	2.9	24.23	37.76	21.78	16.23	15.09
E	0.16	58.01	6.06	0.12	28.48	8.1	5.58	43.25	38.84	12.33	17.62
F	3.22	54.5	8.11	0.63	22.54	3.2	8.37	61.43	8.60	21.60	13.63
G	0.24	48.46	7.3	0.22	14.67	104.1	16.66	24.85	47.47	10.92	20.04
H	0.21	44.06	6.98	0.08	40.88	19.6	3.49	43.11	13.29	40.11	1.75
I	0.12	64.23	7.03	0.14	2.15	204.5	5.56	82.78	6.20	5.46	28.25
J	0.41	64.79	7.68	0.09	13.61	16.9	10.67	65.82	14.47	9.04	24.99

13:9:5:7:1:2:29。

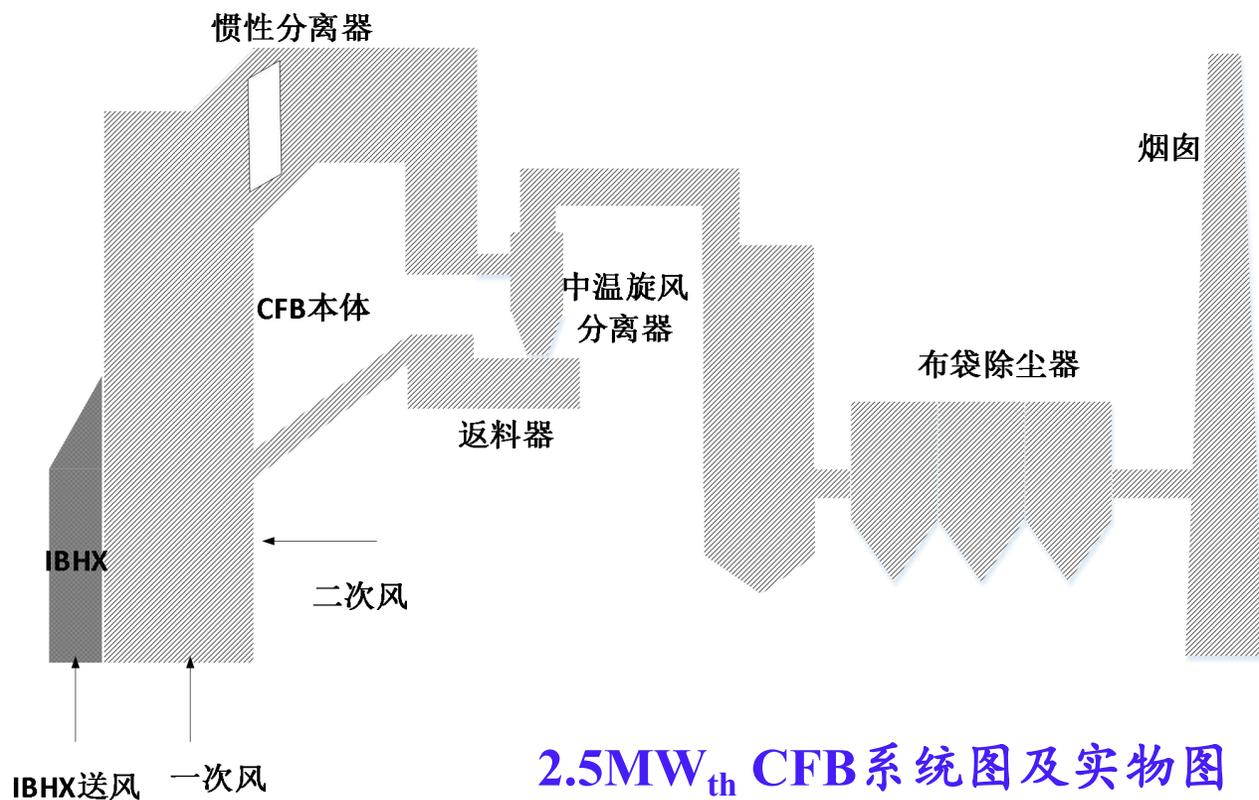


A	厚海绵
B	薄棉布
C	皮革
D	海绵布复合织物
E	硬质机织物
F	相对薄而软的海绵
G	弹性纤维
H	木材
I	塑料
J	皮革与硬壳复合织物

入炉燃料（混合组分）的工业分析和元素分析

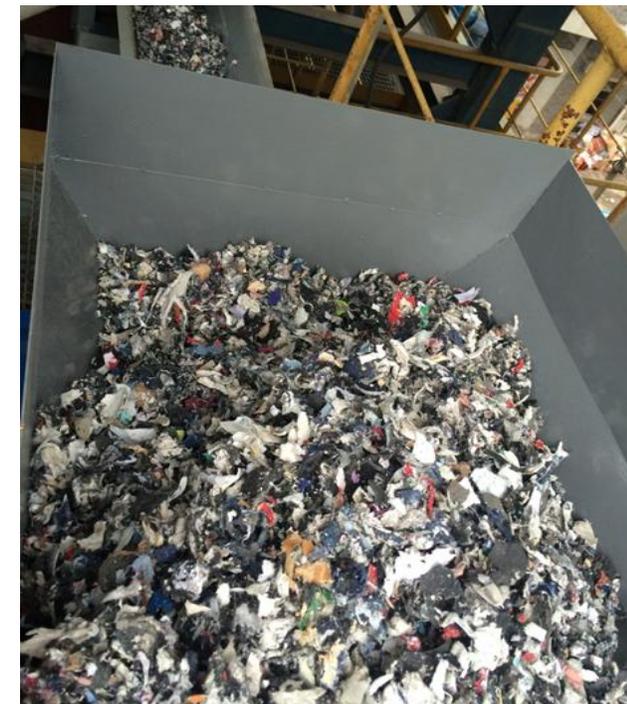
SMW	元素分析						工业分析/收到基				低位热值
	N _d (%)	C _d (%)	H _d (%)	S _d (%)	O _d (%)	Cl _d (mg/g)	Ash (%)	V (%)	FC (%)	Moist (%)	MJ/kg
SMW	0.96	56.72	6.51	0.19	20.78	18.33	11.52	49.57	28.37	10.54	20.51

2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验



2.5MW_{th} CFB系统图及实物图

- 密相区: 0.5 m*1.0 m
- 稀相区: 1.0 m*1.0 m
- 炉膛高度: 12.0 m



- 撞击式分离器+中温旋风分离器
- 螺旋给料机+皮带给料机
- 布袋除尘器
- 活性炭喷口

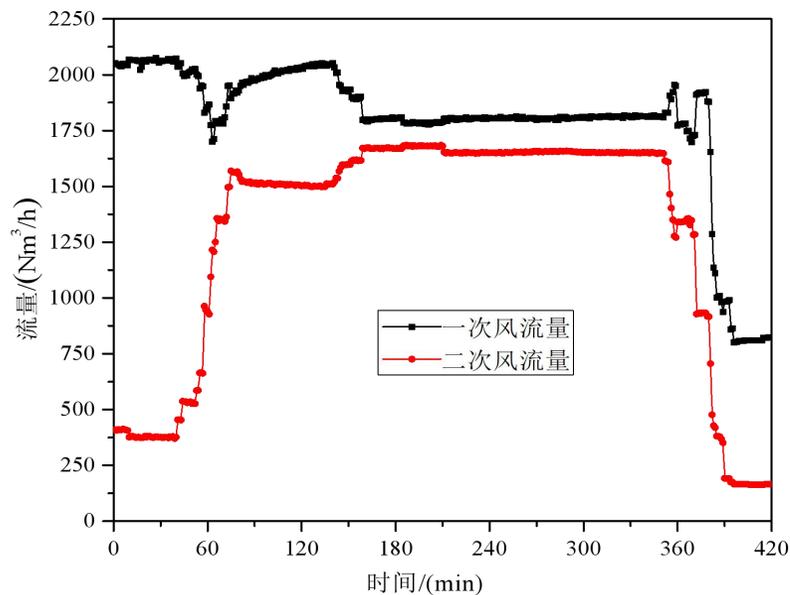
2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验

■ 取样与测试方法

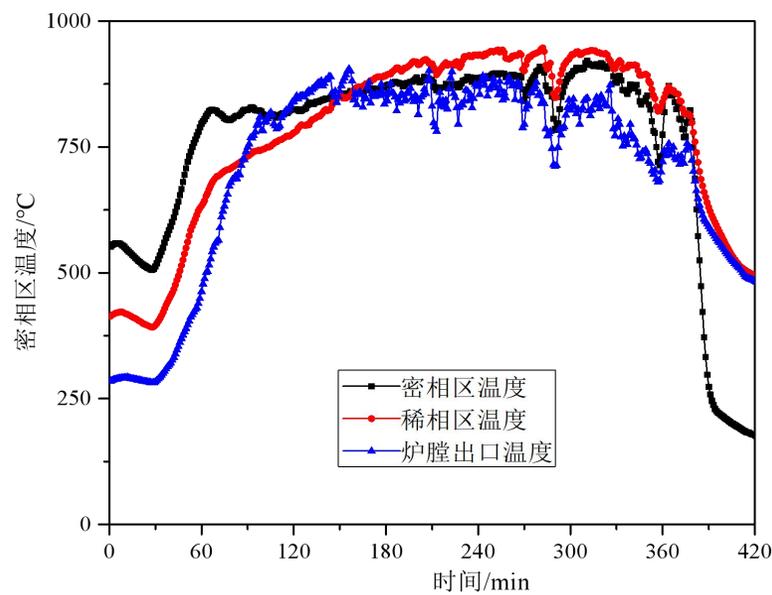
项目	取样方法	取样位置	测量方法	测量仪器
SO ₂ /NO _x /CO 浓度	在线测量	布袋除尘器前	红外测量	MGA-5 烟气分析仪
HCl/HF	GB/T16157-1996	布袋除尘器后	离子色谱法(IC)	ICS-900 离子色谱仪
微量元素	JY/T 015-1996	布袋除尘器后	电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)	Optima 5300DV电感耦合等离子体原子发射光谱仪
Hg	(安大略湿法) OHM	布袋除尘器前后	冷原子吸收光谱法(CAAS)	Hydra II AA 测汞仪
PCDDs/PCDFs	HJ77.2-2008	布袋除尘器前后	高分辨率气相色谱仪/高分辨率质谱仪 (HRGC-HRMS)	高分辨率气相色谱仪/高分辨率质谱仪
灰的化学成分	直接收集	布袋除尘器	X射线荧光光谱仪 (XRF)	S4-ExplorerX射线荧光光谱仪
灰的熔融特性	GB/T 30732-2014	布袋除尘器	目测	HR-4A 灰熔点测定仪

2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验

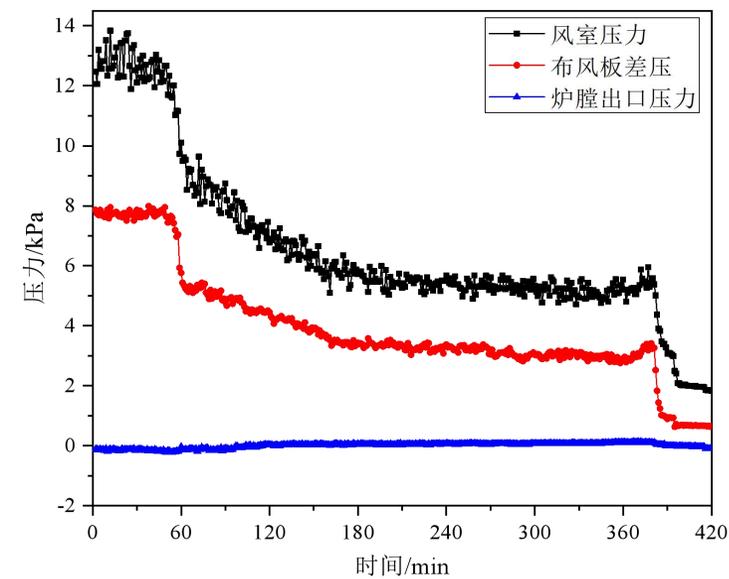
■ 锅炉运行情况



一/二次风流量



炉膛温度



风室压力

- 入炉燃料组分波动较大，烟气中的O₂浓度难以维持稳定；
- 燃料挥发分含量高，稀相区存在超温风险；
- 燃料灰分较低，需要及时补充床料。

2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验

■ SO₂/NO_x/CO排放

测试	时间	常规气态污染物					
		O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)
1	1:27	6.31	15.81	5803	65	0	10
2	2:15	6.65	13.85	544	100	0	0
3	2:16	2.6	17.11	5809	165	2	111
4	2:31	2.24	17.43	5809	253	5	156
5	3:04	1.97	17.34	5797	120	2	102
6	3:22	2.01	16.88	5797	56	2	140
7	3:22	1.87	17.73	5797	120	4	239
8	3:55	6.28	14.36	2415	114	0	14
10	4:08	2.59	16.64	5803	136	2	35
11	4:26	2.84	15.63	2762	138	2	14
12	4:34	2.72	16.11	3512	160	4	14
13	4:47	7.56	10.27	126	49	2	5
平均		3.80	15.76	4164.50	123.00	2.08	70.00

- 由于挥发分含量高，CO排放浓度较高；
- 无SNCR时，NO的原始排放量在49-253 ppm范围内；
- 入炉燃料中的S含量差异较大，使得SO₂排放量波动很大。

2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验

■ HCl/HF/Pb/Cd/Hg排放

时间	位置	飞灰中的汞浓度		烟气中的汞浓度	
		浓度	单位	浓度	单位
1:00 (without AC)	before BF	145.911	μg/kg	35.556	ng/Nm ³
	after BF	205.373	μg/kg	20.938	ng/Nm ³
2:00 (with AC)	before BF	169.255	μg/kg	36.265	ng/Nm ³
	after BF	301.672	μg/kg	13.089	ng/Nm ³
3:00 (with AC)	before BF	175.521	μg/kg	43.857	ng/Nm ³
	after BF	323.18	μg/kg	12.245	ng/Nm ³
4:00 (with AC)	before BF	170.058	μg/kg	40.639	ng/Nm ³
	after BF	338.331	μg/kg	11.417	ng/Nm ³
5:00 (with AC)	before BF	166.745	μg/kg	37.363	ng/Nm ³
	after BF	341.331	μg/kg	12.813	ng/Nm ³
6:00 (with AC)	before BF	124.653	μg/kg	33.416	ng/Nm ³
	after BF	300.331	μg/kg	11.293	ng/Nm ³
/	底渣1	8.713	μg/kg	/	/
/	底渣2	8.327	μg/kg	/	/

时间	2:24	3:10	4:07	4:52	5:29	6:10
HCl(ppm)	9.374	4.448	6.142	1.869	1.23	4.653
HF(ppm)	2.364	1.859	0	0.05	0.3	3.025
Pb(mg/m ³)	0.0035	0.0021	0.0032	0.0018	0.0016	0.0024
Cd(mg/m ³)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

- HCl/HF/Pb及烟气中汞排放量均低于《生活垃圾焚烧污染控制标准 (GB18485-2014) 》；

2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验

■ 二噁英排放

	毒性当量因子 (TEF)	布袋除尘器前			布袋除尘器后		
		ng/Nm ³	ng TEQ/m ³	比例(%)	ng/Nm ³	ng TEQ/m ³	比例(%)
多氯二苯并对二噁英 (PCDDs)							
2,3,7,8-TCDD	1	1.28E-03	1.28E-03	61.34	6.30E-04	6.30E-04	54.03
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	9.45E-04	4.73E-04	22.64	4.80E-04	2.40E-04	20.58
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	6.40E-05	6.40E-06	0.31	7.60E-05	7.60E-06	0.65
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	6.20E-05	6.20E-06	0.30	8.90E-05	8.90E-06	0.76
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	6.40E-05	6.40E-06	0.31	8.30E-05	8.30E-06	0.71
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	1.82E-05	1.82E-07	0.01	7.60E-06	7.60E-08	0.01
OCDD	0.001	7.00E-07	7.00E-10	0.00	1.45E-06	1.45E-09	0.00
多氯二苯并呋喃(PCDFs)							
2,3,7,8-TCDF	0.1	1.39E-04	1.39E-05	0.67	3.90E-05	3.90E-06	0.33
1,2,3,7,8-PeCDF	0.005	5.20E-05	2.60E-06	0.12	5.05E-05	2.53E-06	0.22
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	4.50E-04	2.25E-04	10.78	4.80E-04	2.40E-04	20.58
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	1.68E-04	1.68E-05	0.81	5.60E-05	5.60E-06	0.48
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	1.80E-04	1.80E-05	0.86	6.00E-05	6.00E-06	0.51
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	1.72E-04	1.72E-05	0.82	5.30E-05	5.30E-06	0.45
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	2.14E-04	2.14E-05	1.03	7.60E-05	7.60E-06	0.65
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	1.13E-05	1.13E-07	0.01	1.17E-05	1.17E-07	0.01
1,2,3,4,7,8,9-HpCD	0.01	1.95E-05	1.95E-07	0.01	1.04E-05	1.04E-07	0.01
OCDF	0.001	8.47E-06	8.47E-09	0.00	4.86E-06	4.86E-09	0.00
二噁英总量							
PCDDs+ PCDFs			2.09E-03	100		1.17E-03	100

- 烟气中二噁英排放量低于《生活垃圾焚烧污染控制标准(GB18485-2014)》。

2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验

■ 灰中重金属的浸出特性

Heavy metal	Unit	Fly ash	Bottom ash	Limits for hazardous waste-identification [47]	Limits for landfilling [48]
Zn	mg/L	3.53	0.065	100	100
Pb	mg/L	0.63	<0.05	5	0.25
Cd	mg/L	<0.01	<0.01	1	0.15
Cr	mg/L	0.055	0.053	15	4.5
As	mg/L	<0.05	<0.05	5	0.3
Ni	mg/L	0.65	<0.01	5	0.5
Ba	mg/L	3.14	2.92	100	25
Cu	mg/L	0.19	<0.01	100	40
Ag	mg/L	<0.05	<0.05	5	—
Be	mg/L	<0.01	<0.01	0.02	0.02
Se	mg/L	<0.05	<0.05	1	0.1
Hg	mg/L	<0.01	<0.01	0.1	0.05

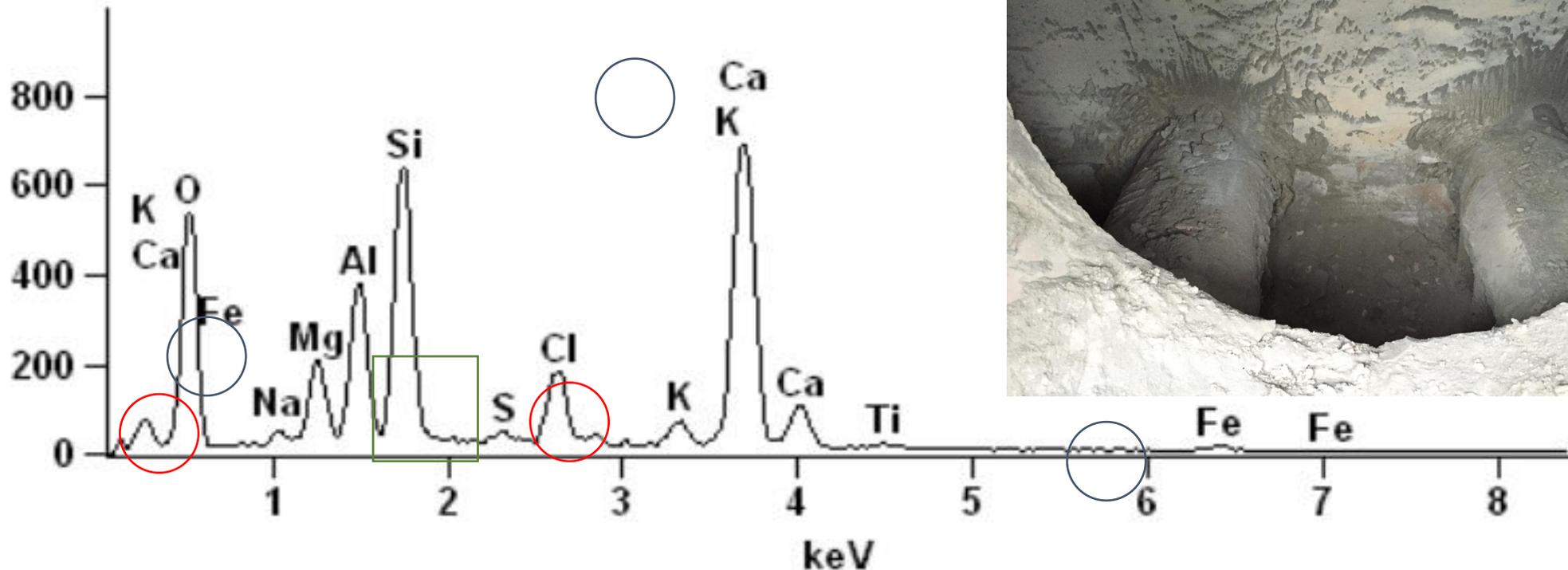
- 测试方法：《危险废物鉴别标准-毒性物质含量鉴别(GB5085.6-2007)》；
- 所有浓度均低于国家标准《危险废物鉴别标准-浸出毒性鉴别(GB 5085.3-2007)》；
- 飞灰不需要按照危废进行处理，无须进行固化或等离子高温处理，减少投资！

2.5 MW_{th} CFB 锅炉燃烧实验

■ 受热面积灰

Full scale counts: 687

data2016(658)_pt1



- 飞灰的粘附性较强，运行7小时后布袋除尘器堵塞严重；
- 停炉检查发现，尾部烟道受热面上有明显的积灰生成。

400 TPD CFB锅炉工业实践

➤ 锅炉主要参数:

- MCR: 90t/h
- 主蒸汽压力: 5.3MPa
- 主蒸汽温度: 480°C

➤ 锅炉特殊设计:

- 更低的流化速度与更高的炉膛
- 过热器更大的节距
- 加强吹灰



世界首台纯燃一般工业固废的循环流化床锅炉

400 TPD CFB锅炉工业实践

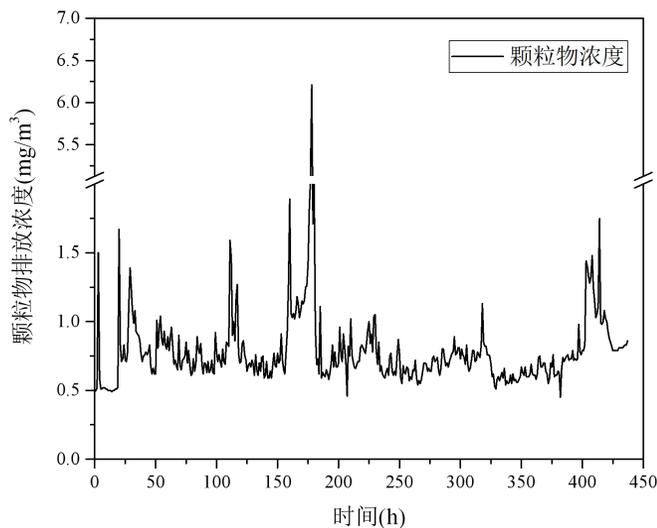
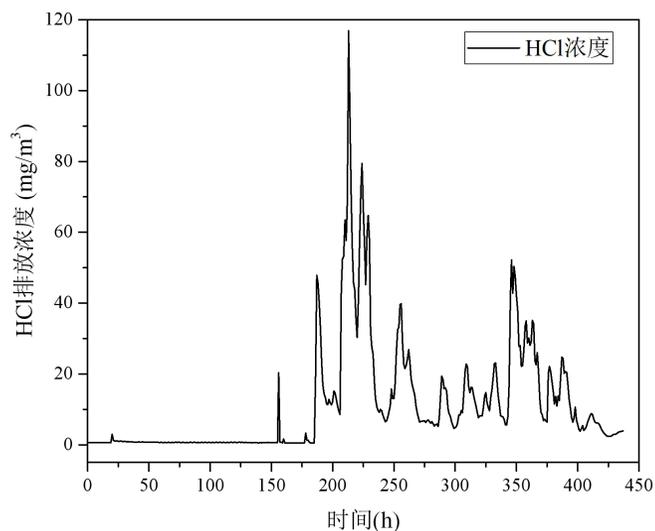
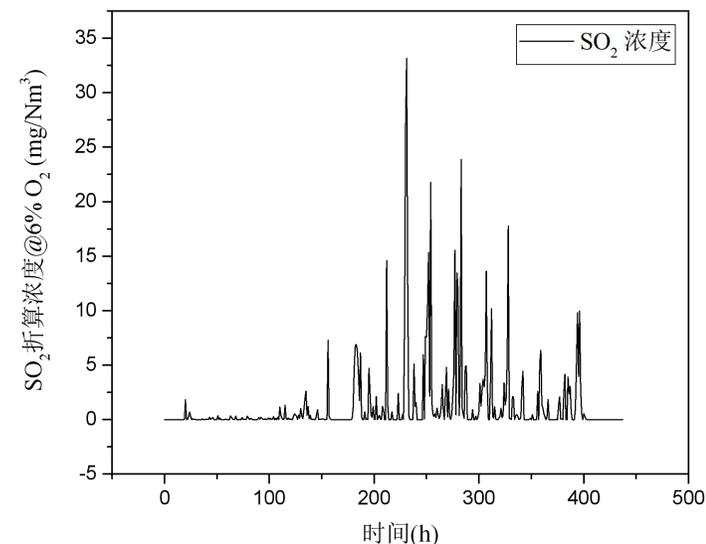
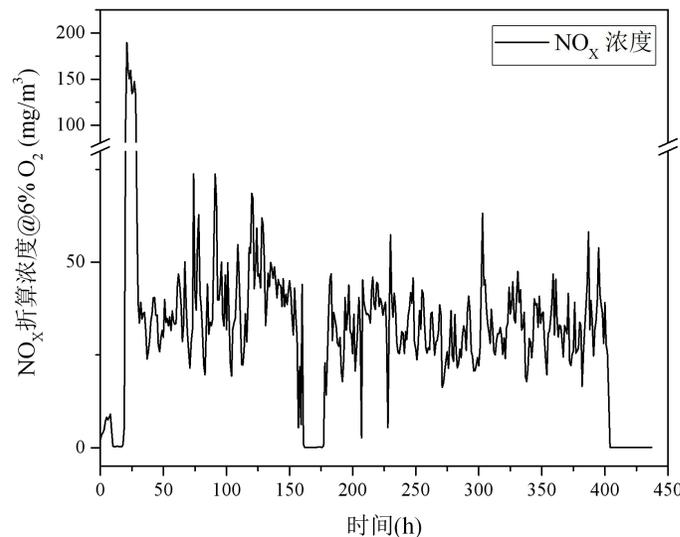
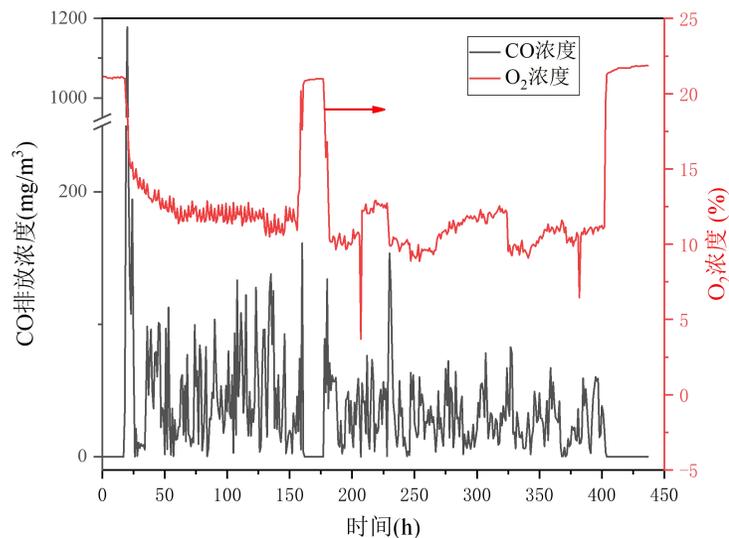
■ 运行中存在的问题

- 稳定的给料非常重要，给料经4级破碎，入炉直径4~5厘米；
- 声波吹灰器处积灰严重，导致空预器出口烟气温度很高(~170 °C)；
- 飞灰中未燃碳含量较高(~16%)；
- CO波动大，平均浓度约为 150~230 mg/Nm³；
- 不投运SNCR时NO_x的原始排放最高为 400~500mg/ Nm³；
- PCDDs/PCDFs排放量低于国家标准。



400 TPD CFB锅炉工业实践

气态污染物



- 在进行SNCR脱硝的基础上，**纯燃SMW锅炉可以实现超低排放**；
- 入炉燃料组分非常不稳定，使得锅炉**燃烧运行及污染物浓度波动较大**。

400 TPD CFB锅炉工业实践

■ 受热面积灰腐蚀

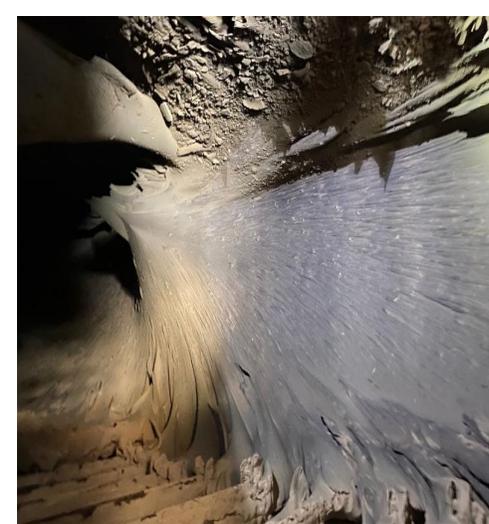
积灰严重，20余天进行一个周期，必须停炉。
现有吹灰装置完全没法满足。



高温省煤器



高温过热器



低温过热器

400 TPD CFB锅炉工业实践

■ 高过前后颗粒物/积灰/腐蚀/CI等的测量

➤ 腐蚀/积灰样品收集

测试方法：模拟换热器表面温度收集积灰

测试装置：**气冷控温积灰管**

测试位置：1) 高温过热器上方；2) 低温过热器上方

➤ 颗粒物在线测试

测试方法：参考美国**EPA method 5**

测试装置：水冷**等速取样管**+ELPI

测试位置：1) 高温过热器上方；2) 低温过热器上方

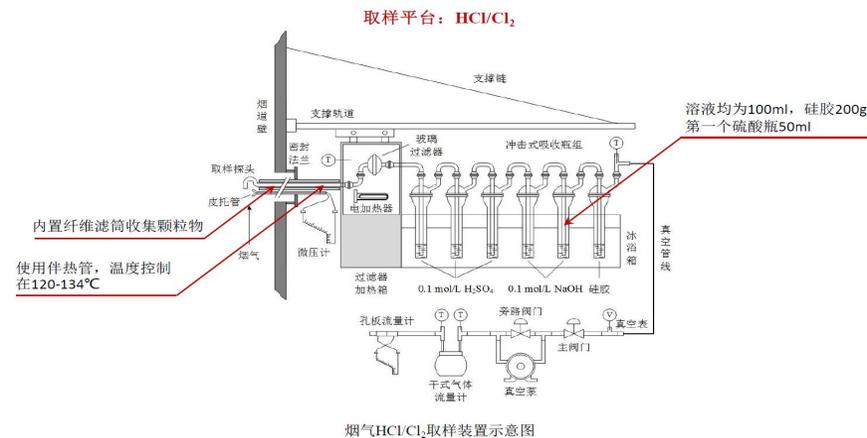
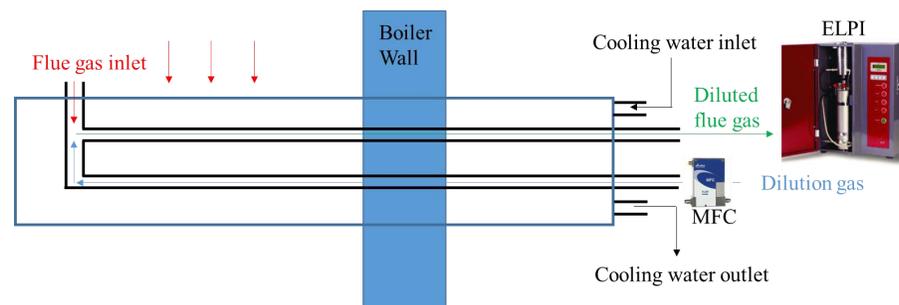
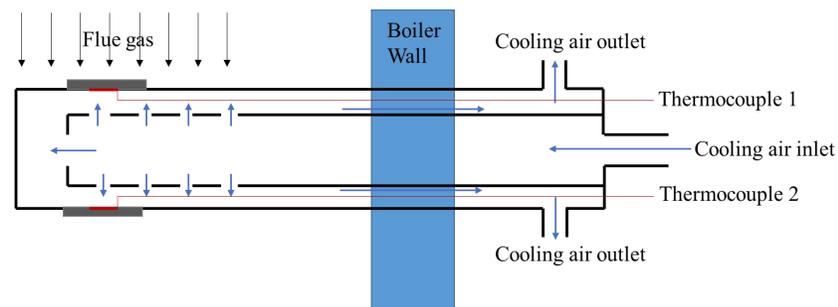
➤ 烟气中CI含量测试

测试方法：参考美国**EPA method 26**

测试装置：取样管+溶液法

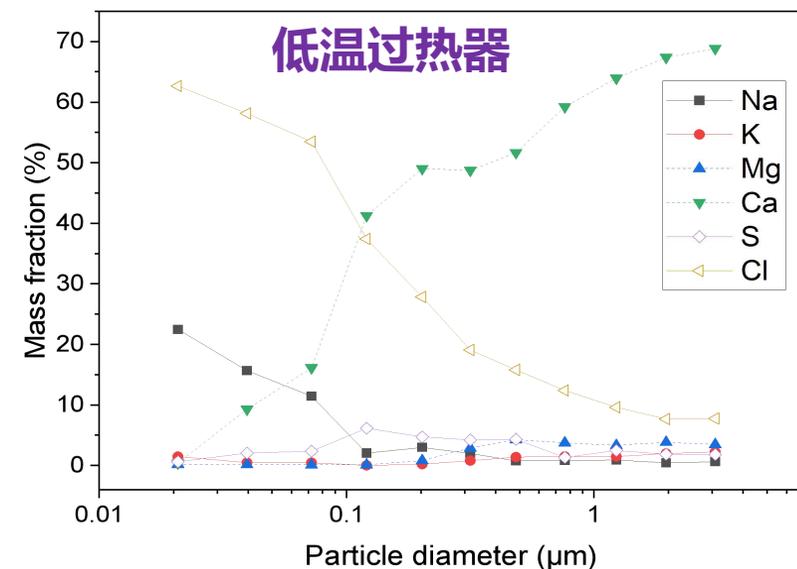
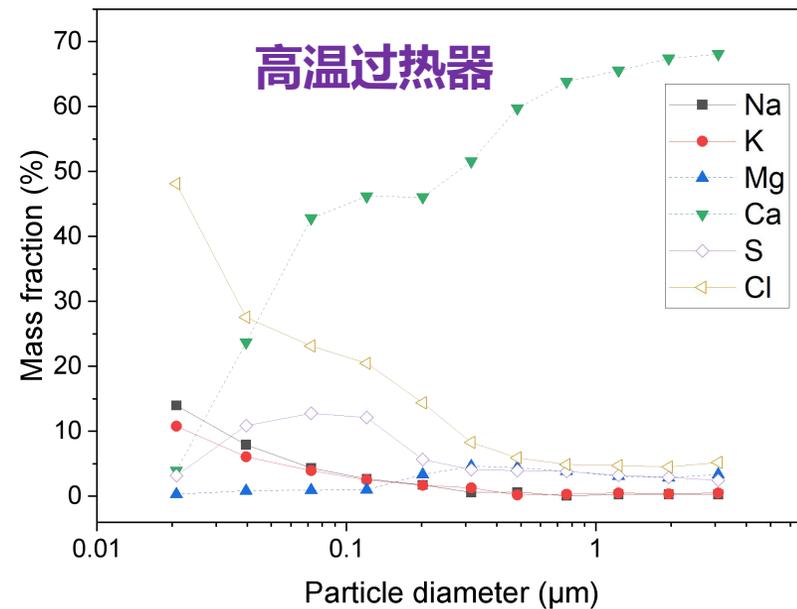
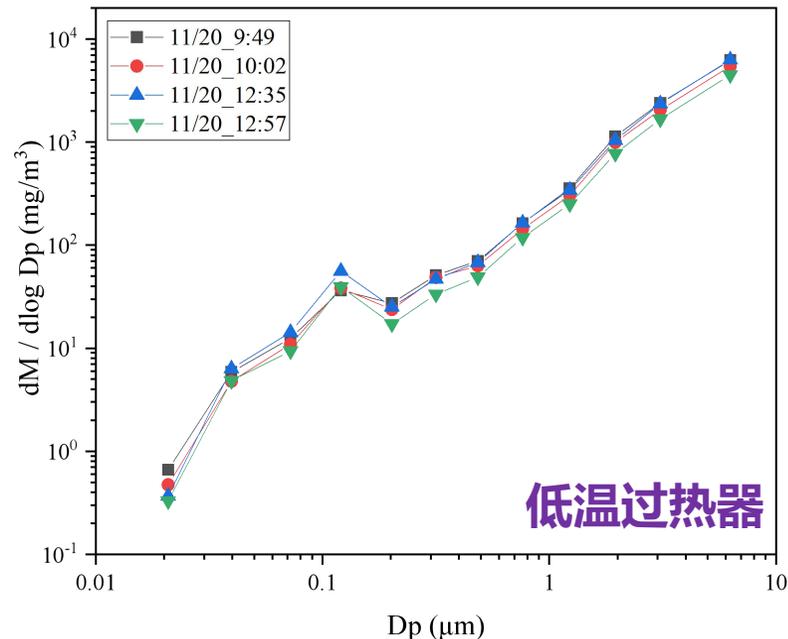
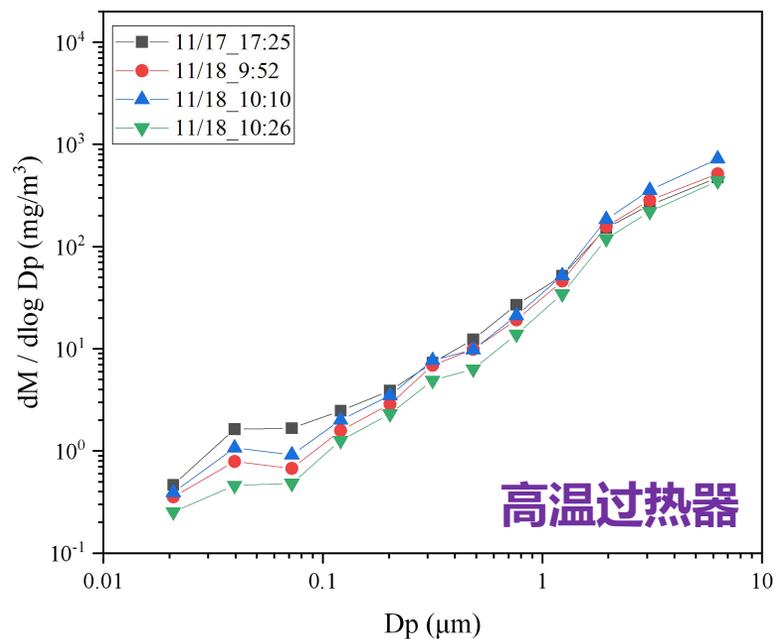
测试位置：1) 高温过热器上方；2) 低温过热器上方

➤ 飞灰/底渣/床料样品收集+DSC数据



400 TPD CFB锅炉工业实践

颗粒物排放

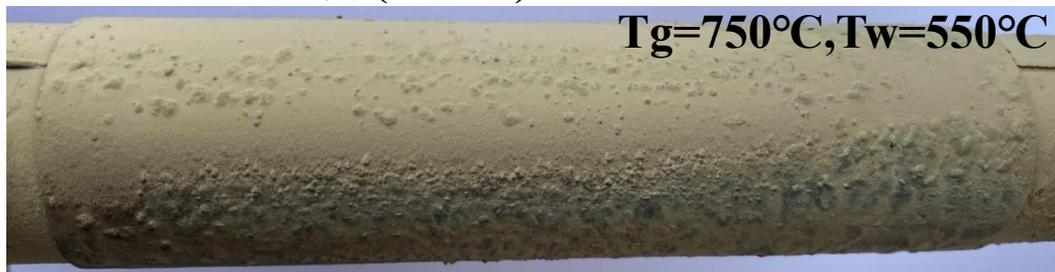


- 随着粒径变大，碱金属含量(Na, K) 降低而碱土金属含量(Ca, Mg) 升高；
- 硫在颗粒物中的含量随着粒径的变大，先升高后降低；
- 超细颗粒主要由碱金属和碱土金属的氯化物构成(如NaCl, CaCl₂)，虽然质量浓度低，但是可能对积灰和腐蚀造成显著影响；
- 超微米颗粒几乎都由钙盐构成(如CaCO₃)。

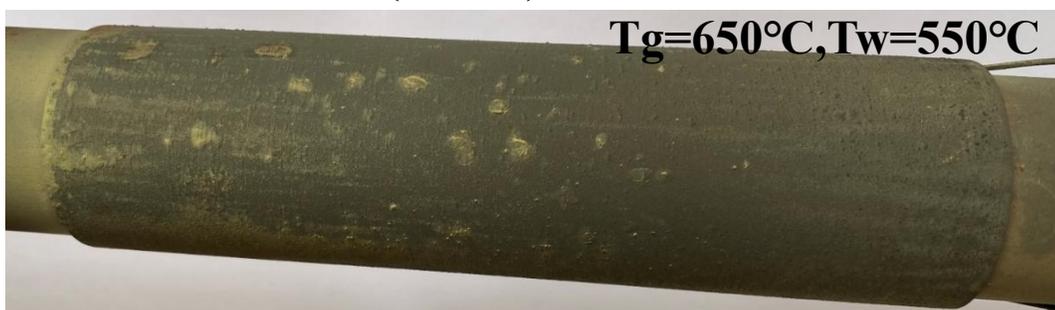
400 TPD CFB锅炉工业实践

积灰特性

高温过热器积灰 (30min)

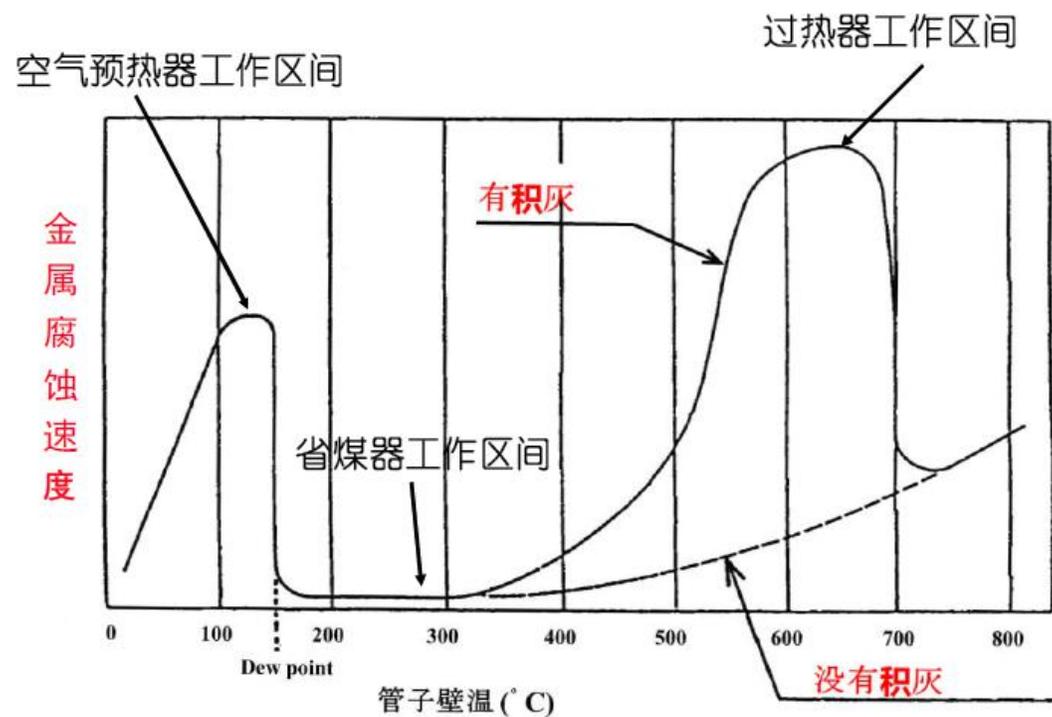


低温过热器积灰 (30min)



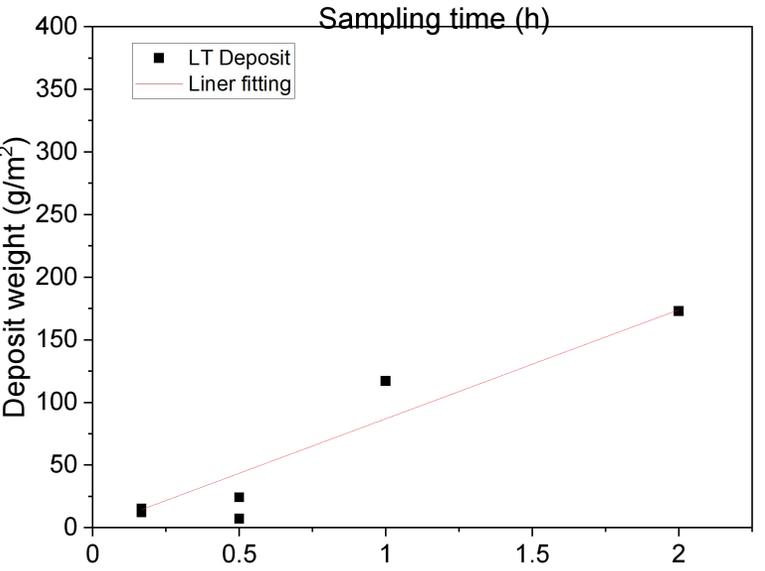
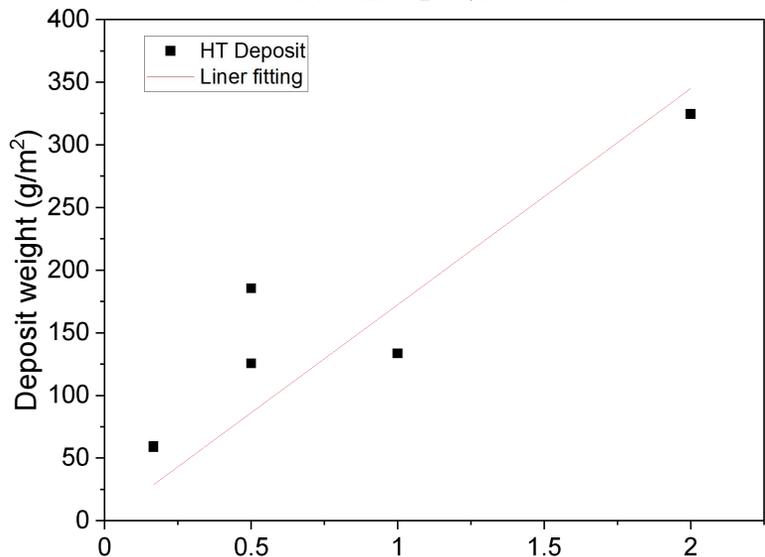
- 观测到高温过热器处积灰倾向更加明显;
- 高低温过热器处生成的积灰粘接强度较大, 较难从换热器表面移除;
- 高低温过热器处积灰会在换热器表面产生严重的腐蚀。

高温过热器积灰片清理积灰后, 腐蚀明显!



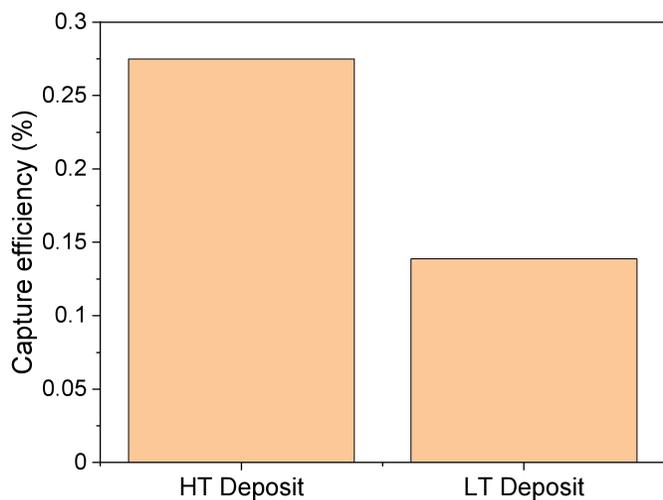
400 TPD CFB锅炉工业实践

积灰生成速率及捕集效率

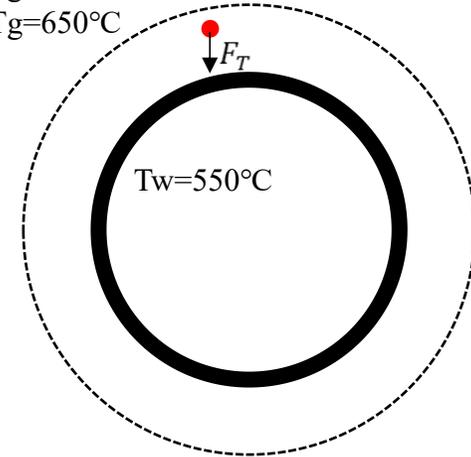


$$\text{捕集效率: } \eta = \frac{r_{\text{deposit}}}{f_{\text{fuel}} \times w_{\text{ash}}/A} \times 100\%$$

$$\text{热泳力: } F_T = -\frac{\pi \rho \lambda d_p^2}{8 T_g} \nabla T_g$$



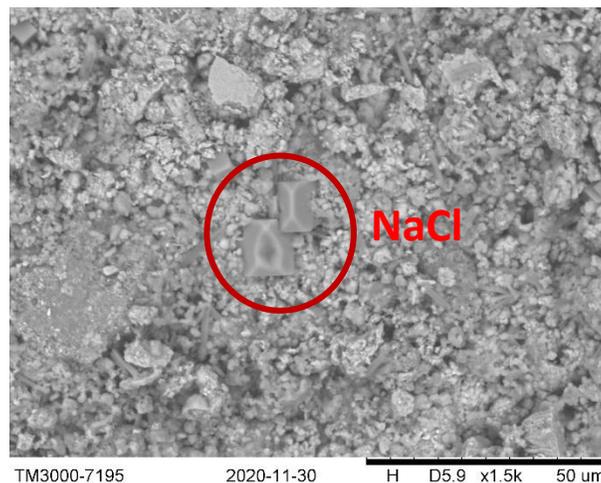
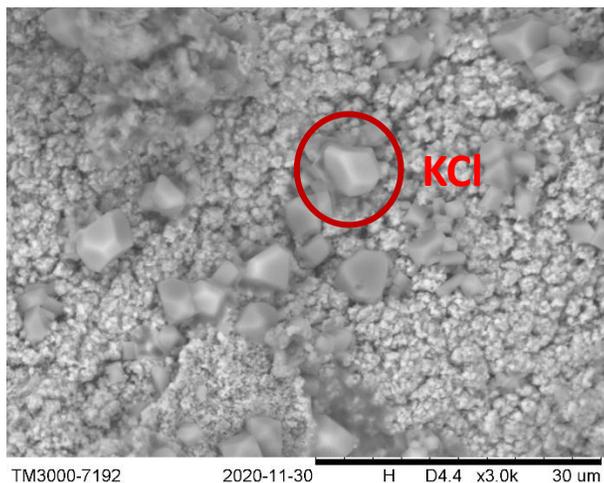
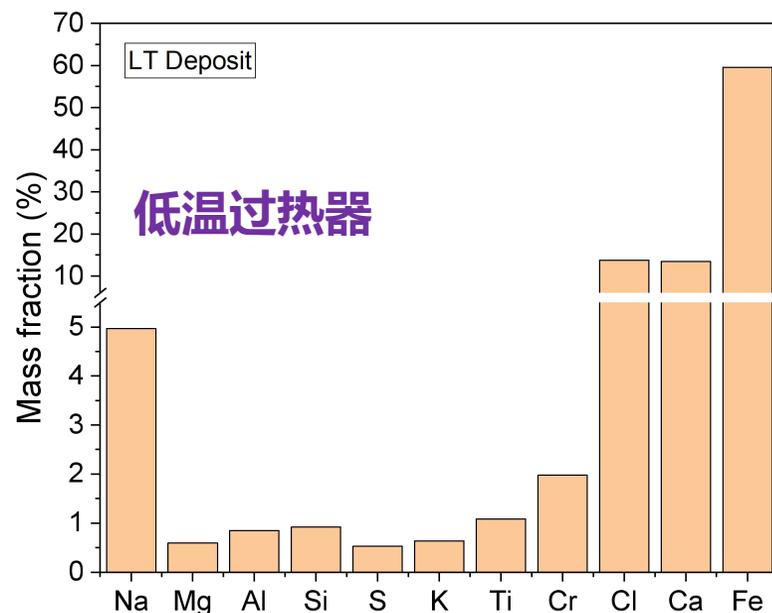
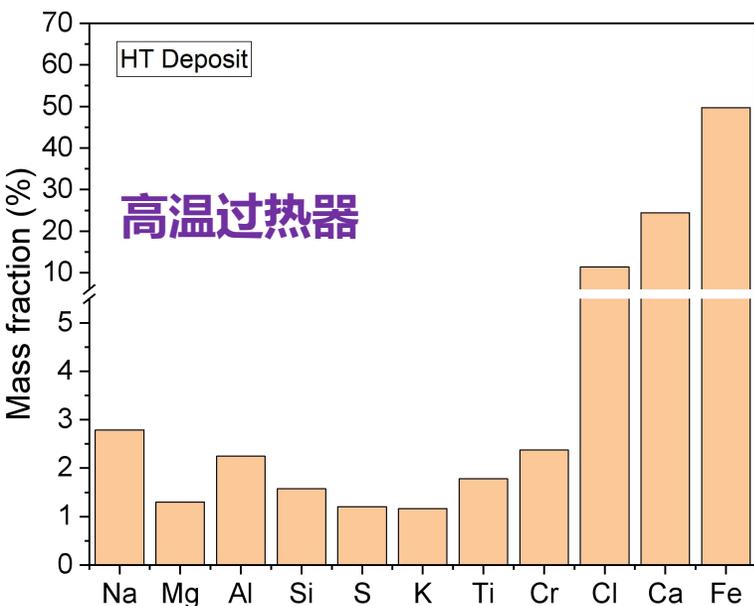
高过: $T_g=750^\circ\text{C}$
低过: $T_g=650^\circ\text{C}$



- 高温过热器处**积灰生成速率** ($172.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) **大于低温过热器** ($87.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)
- 高温过热器处积灰的总捕集效率更高, 主要是由于更**强烈的热泳力**使更多细颗粒在其表面发生**粘接作用**, 并促进积灰的生成

400 TPD CFB锅炉工业实践

■ 积灰成分与形貌



- **积灰中碱金属含量相对较高**
(原料中低于1%)，有一定程度的富集 (SEM/EDS中可看出碱金属氯化物NaCl/KCl的富集)
- **积灰形成过程中会与氯腐蚀协同作用**，导致初始积灰中铁含量极高。
- **高温过热器和低温过热器处生成的积灰成分差距不是特别显著**

400 TPD CFB锅炉工业实践

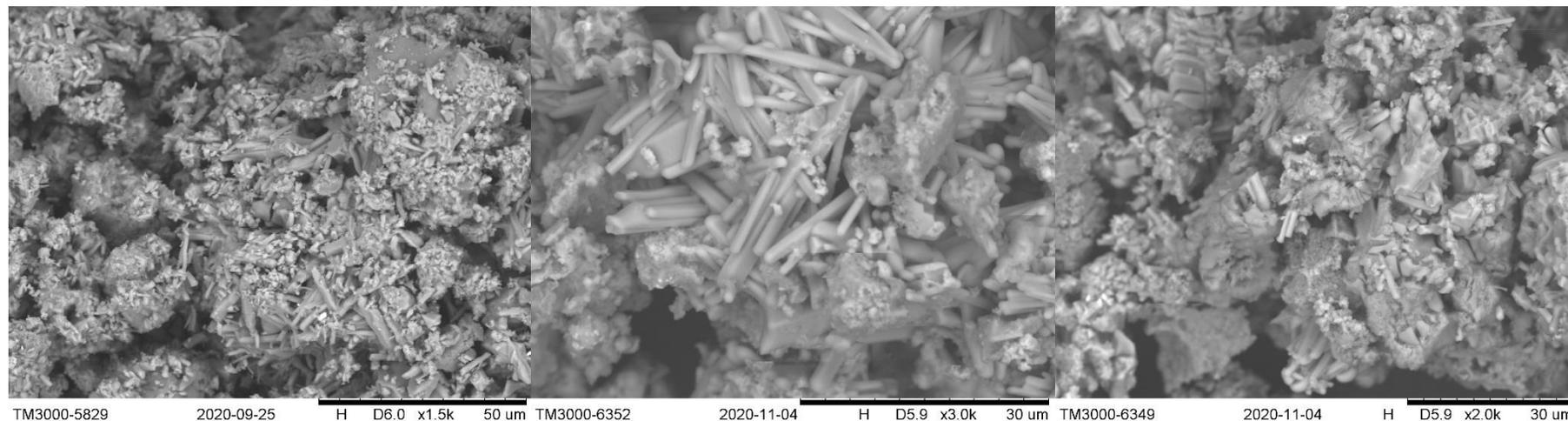
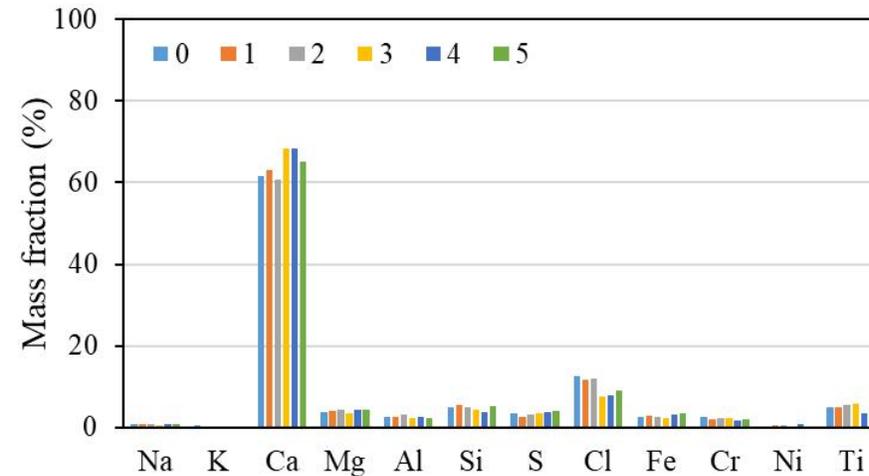
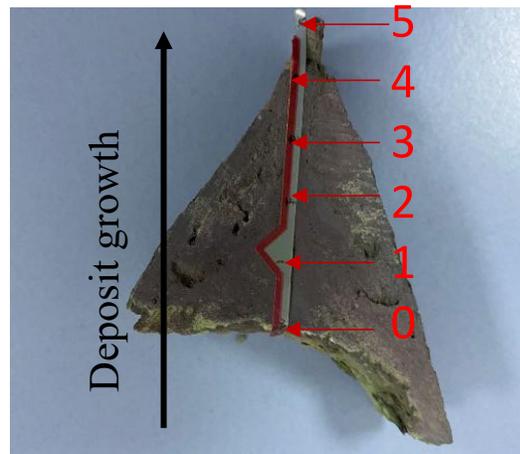
积灰分层研究



高过内层积灰



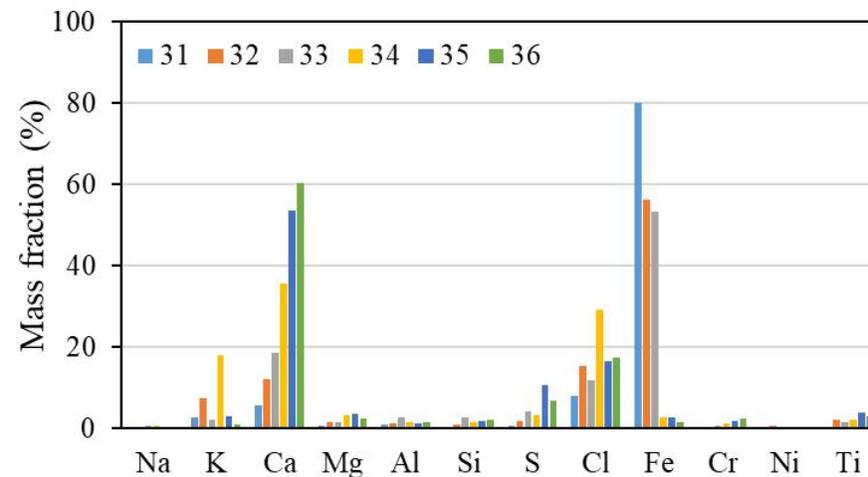
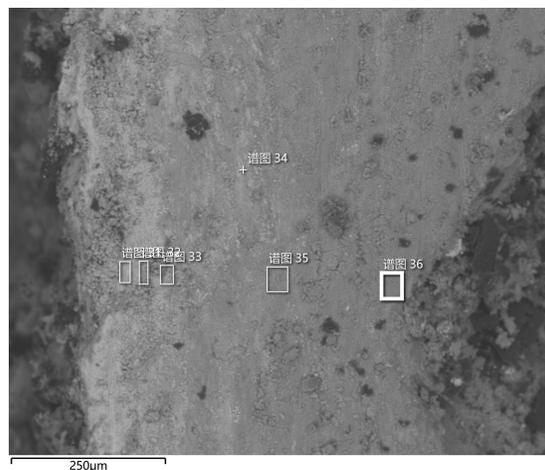
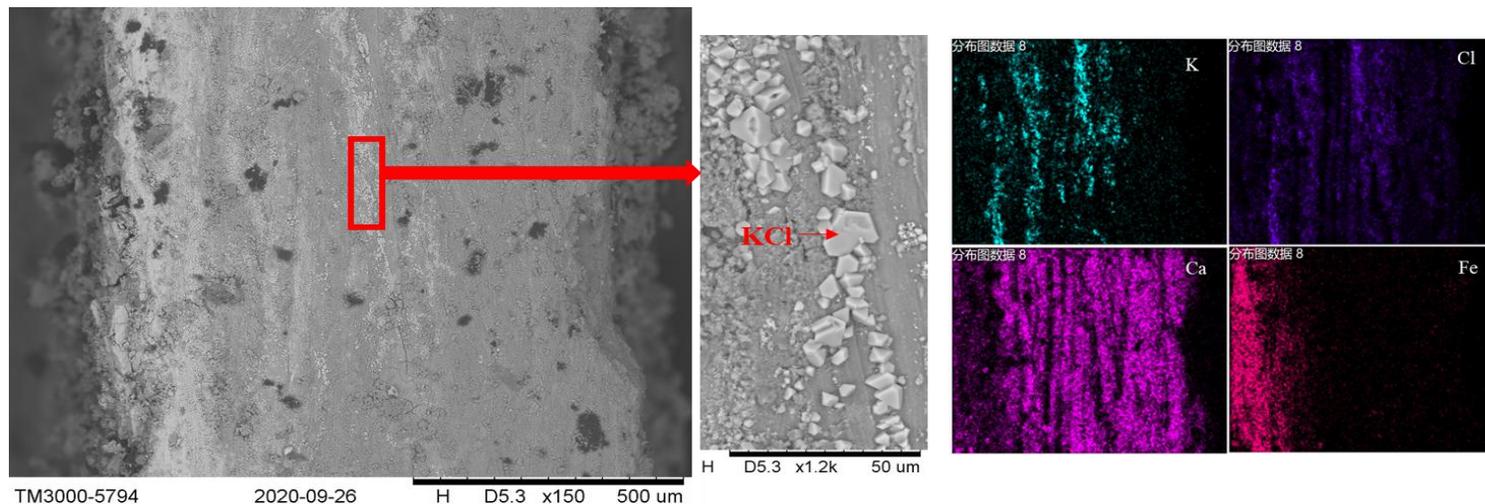
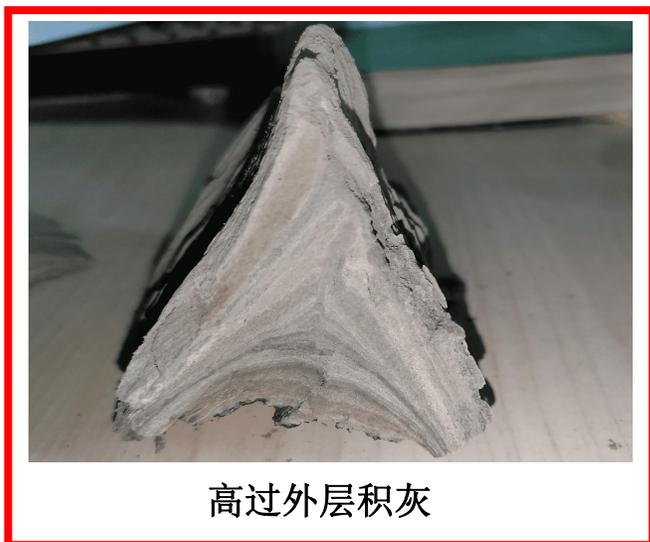
高过外层积灰



- 外层积灰的形貌和成分几乎不随灰层的厚度而改变，多由钙盐构成；
- 外层积灰存在较强烈的烧结现象，较难从换热器表面清除

400 TPD CFB锅炉工业实践

高过内/外层积灰

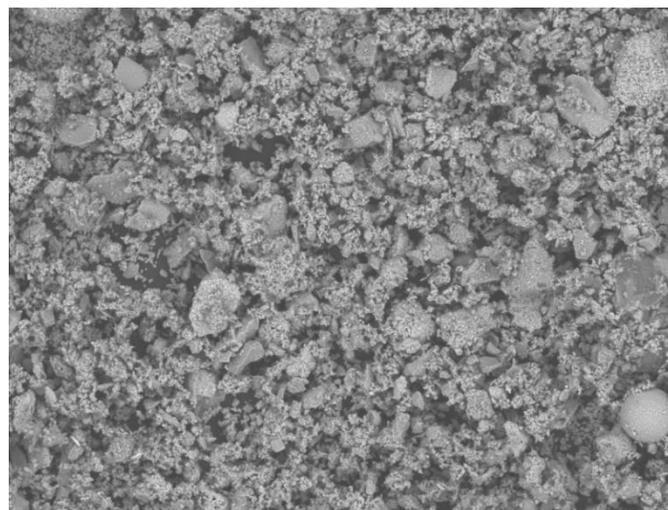
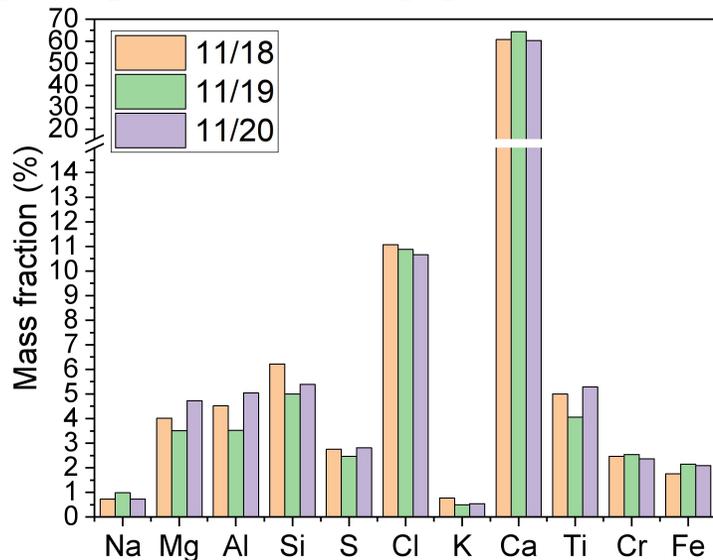


- 内层积灰中存在碱金属氯化物的多层富集
- 铁只有在内层富集，显示出严重的腐蚀现象

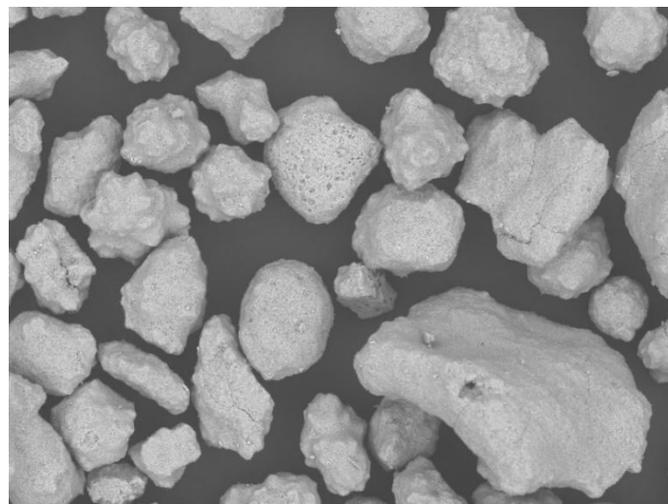
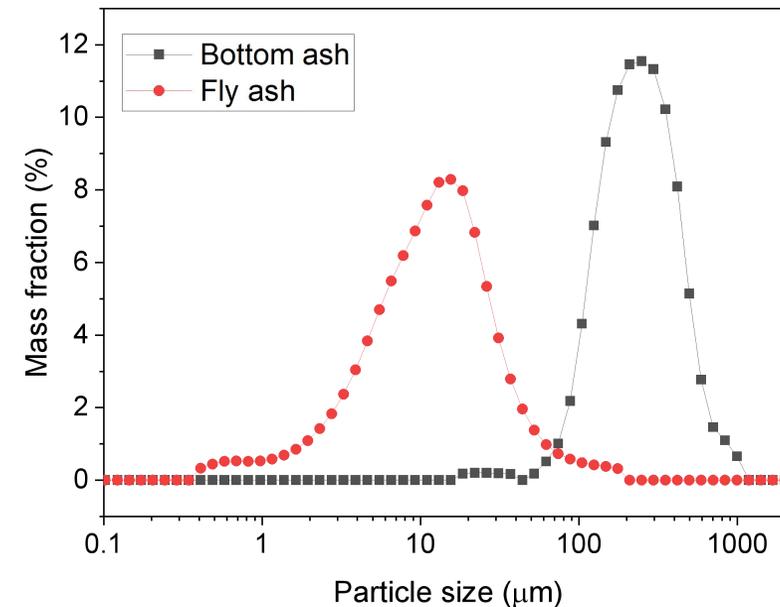
400 TPD CFB锅炉工业实践

飞灰和底渣分析

飞灰:

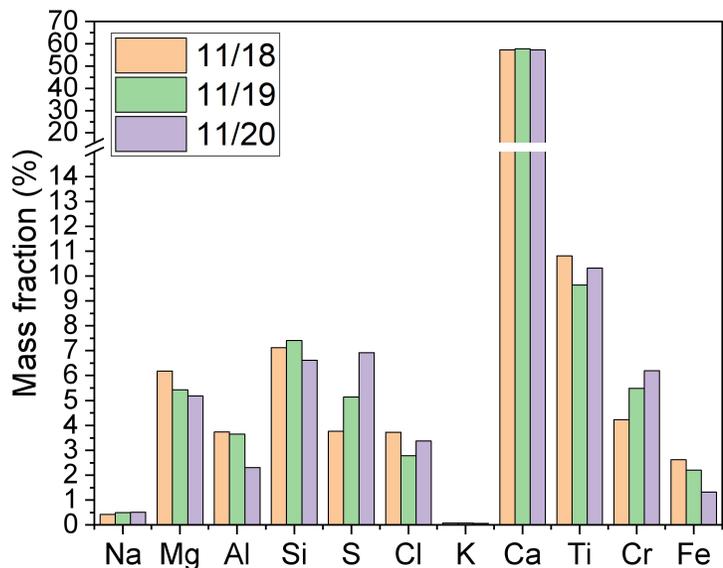


TM3000-7152 2020-11-30 H D4.9 x300 300 um



TM3000-7155 2020-11-30 H D5.0 x200 500 um

底渣:



- 飞灰和底渣在不同运行时间下，变化较小，均由钙盐构成
- 飞灰的粒径远小于底渣
- 相比于底渣，**飞灰中的Na, K, Cl含量较高**，而Mg, Si, S, Ti, Cr含量较低

总结

- ◆ 制鞋固体废料(SMW)在流化床上可实现稳定燃烧。在工业规模锅炉设计中可以通过降低流化速度、提高炉膛高度、增加二次风出口流速等方式，降低烟气中的CO含量，使其低于《生活垃圾焚烧污染控制标准（GB18485-2014）》规定的限值；
- ◆ 通过加装SNCR脱硝和尾部烟气喷射活性炭装置，可以在纯燃SMW的锅炉上实现烟气超低排放，且二噁英、重金属、Hg、HCl、Pb、Cd等排放浓度低于《生活垃圾焚烧污染控制标准（GB18485-2014）》规定的限值；
- ◆ 部分SMW中的Cl含量较高，导致尾部烟道的腐蚀、积灰非常严重，影响锅炉长期运行与安全，其机理和控制技术仍需要进一步研究。

总结

固废循环流化床锅炉燃烧的**存在的共性问题**有：

➤ **给料问题**

➤ **排渣问题**

含有部分不可燃物质——玻璃碎片、铁钉等金属物质

➤ **高温腐蚀问题**

塑料、橡胶、化纤等含量较高

壁温高于450°C时——严重的高温及化学腐蚀

关键部位的换热管材质选择及防腐处理措施

➤ **尾部积灰问题**

飞灰粘性较大，燃烧不充分时甚至会产生焦油等物质

锅炉烟气流速、换热器布置方式及吹灰系统的设计



敬请各位专家批评、指正!



2022/04/23