

# 生物质直燃发电大气污染物超低排放 技术路线分析

谭增强<sup>1,2</sup>, 牛国平<sup>1,2</sup>, 王一坤<sup>2</sup>, 李元昊<sup>1,2</sup>, 张安超<sup>3</sup>, 李东阳<sup>1,2</sup>, 李子宁<sup>4</sup>

(1.西安西热锅炉环保工程有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华能长江环保科技有限公司, 北京 100031;

3.河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003;

4.富利康科技股份有限公司, 台湾 高雄 000800)

[摘 要] 总结了生物质燃料与煤的元素含量的差异, 分析了生物质锅炉积灰、结渣、腐蚀的机理, 梳理了生物质锅炉的烟气特点, 并对选择性非催化还原脱硝技术、选择性催化还原脱硝技术、湿法脱硫技术在生物质电厂应用的局限性进行了讨论和总结。结果表明: 固态高分子脱硝和催化剂脱硝脱硫均需特殊催化剂或脱硝剂, 属于专利产品, 运行成本高; 氧化脱硝技术属于氧化吸收反应, 产生易溶于水的硝酸盐, 部分地区禁止采用该技术; 陶瓷催化滤管一体化脱除技术运行维护简单, 锅炉过氧燃烧可提高燃烧效率, 延长空气预热器使用寿命, 而且没有脱硫废水、烟囱防腐、白色烟羽等相关问题, 适用于生物质锅炉硫、尘、硝超低排放。

[关键词] 生物质; 脱硫; 脱硝; 除尘; 超低排放

[中图分类号] TK16 [文献标识码] A [DOI编号] 10.19666/j.rfd.202103074

[引用本文格式] 谭增强, 牛国平, 王一坤, 等. 生物质直燃发电大气污染物超低排放技术路线分析[J]. 热力发电, 2021, 50(10): 101-107. TAN Zengqiang, NIU Guoping, WANG Yikun, et al. Analysis of technical route for ultra-low emission of air pollutants in biomass direct-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(10): 101-107.

## Analysis of technical route for ultra-low emission of air pollutants in biomass direct-fired power plants

TAN Zengqiang<sup>1,2</sup>, NIU Guoping<sup>1,2</sup>, WANG Yikun<sup>2</sup>, LI Yuanhao<sup>1,2</sup>, ZHANG Anchao<sup>3</sup>,  
LI Dongyang<sup>1,2</sup>, LI Zining<sup>4</sup>

(1. Xi'an TPRI Boiler Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Huaneng Yangtze Environmental & Technology Co., Ltd., Beijing 100031, China;

3. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

4. Fulikang Technology Co., Ltd., Kaohsiung 000800, China)

**Abstract:** The difference of element content between biomass fuel and coal is summarized, the mechanisms of ash accumulation, slagging and corrosion of biomass boilers are analyzed, and the characteristics of flue gas of biomass boilers are combed. Moreover, the limitations of selective non-catalytic reduction technology, selective catalytic reduction technology and wet flue gas desulfurization technology in the application of biomass power plants are discussed and summarized. The results show that, both the solid-state polymer NCR denitrification and sulfur-nitrogen integrated removal using catalyst require special catalysts or denitrification agents, which are patented products and have high operating costs. The oxidation denitrification technology is oxidation absorption reaction, which produces nitrates that is soluble in water, this technology is prohibited in some areas. The ceramic catalytic filter tube integrated removal technology is simple to operate and maintain, of which the over-oxygen combustion of the boiler can improve the combustion efficiency and prolong the service life of air preheater. Moreover, there is

收稿日期: 2021-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51976072); 清华大学-中国华能集团有限公司基础能源联合研究院项目(U20YYJC01)

Supported by: National Science Foundation of China (51976072); Tsinghua-Huaneng Basic Energy Joint Research Institute (U20YYJC01)

第一作者简介: 谭增强(1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为燃煤烟气多污染物协同脱除, tanzq2008@126.com.

no desulfurization wastewater, chimney corrosion, white plume and other related issues. Therefore, it is a more suitable for ultra-low emission of biomass boilers.

**Key words:** biomass; desulfurization; denitrification; dust removal; ultra-low emission

20世纪70年代,世界第一次石油危机掀开了大规模发展生物质能源的序幕<sup>[1-2]</sup>,生物质能源的利用逐渐走向工业化。生物质能是可再生能源中唯一的绿色零碳燃料,碳中和目标的提出,为生物质能产业带来历史性发展机遇。作为农业大国,生物质燃烧发电技术已成为我国农林废弃物大规模处置的主要途径,有助于解决秸秆露天焚烧难题,有助于早日实现碳达峰和碳中和<sup>[3]</sup>。

截至2019年初,我国投运的生物质直燃发电厂已经有321个,总装机容量达到806万kW<sup>[3]</sup>。随着国家环保要求的日益严格,对生物质锅炉污染物减排的需求也愈加迫切<sup>[3-4]</sup>。国家发改委、环保部等十部委于2017年12月5日发布《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》,提出加快发展为县城供暖的农林生物质热电联产,同时提高生物质热电联产新建项目环保水平,加快已投产项目的环保改造步伐,实现超低排放。鉴于此,全国各省市、地方相继出台了地方标准,如北京、杭州对新建生物质成型燃料锅炉的NO<sub>x</sub>排放限值分别降低至30、50 mg/m<sup>3</sup>,与燃煤电厂超低排放标准的限值相当。由此可以看出,生物质锅炉的污染物排放限值向燃煤电厂的超低排放标准看齐是必然趋势。

环保设施稳定运行和污染物达标排放,直接影响到生物质电厂的可持续发展。但是生物质燃烧后的烟气性质与常规燃煤机组有很大区别,针对大型电站锅炉开发的超低排放技术并不完全适用于生物质电厂。生物质电厂还未形成一套成熟的、性价比高的权威环保治理技术路线<sup>[4-6]</sup>。

## 1 生物质燃料特性

典型生物质燃料特性见表1<sup>[7]</sup>。生物质燃料与煤相比存在明显的差异,生物质燃料具有高挥发分、高碱金属含量、低灰分、低硫分、低热值的特点。生物质燃料水分高,同时含水率随季节波动较大,有些燃料水分甚至达40%~50%,燃烧后烟气中水蒸气充满锅炉尾部烟道内,与烟气中的酸性物质共同作用加速了低温受热面腐蚀。

生物质燃料的燃烧过程主要有2个独立阶段:挥发分的析出、燃烧,以及残余焦炭的燃烧、燃尽。与煤炭相比,生物质燃料具有以下燃烧特点<sup>[7]</sup>:

1) 需要较长的干燥时间减少燃料中的水分,生物质锅炉的排烟热损失较大; 2) 生物质燃料的密度小,迎风面积大,易形成悬浮燃烧; 3) 生物质燃料的发热量低,导致炉膛内的温度场偏低; 4) 生物质燃料的挥发分高,着火温度较低,温度在250~350℃下挥发分就大量析出并开始剧烈燃烧; 5) 生物质焦炭燃尽困难,机械不完全燃烧损失偏高。

表1 煤与生物质燃料的特性比较 单位: w/%  
Tab.1 Quality analysis of the biomass fuel and coal

燃料种类	工业分析				元素分析				
	M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	FC	H	C	S	N	K <sub>2</sub> O
豆秸	5.10	3.13	74.65	17.12	5.81	44.79	0.11	5.85	16.33
稻草	4.97	13.86	65.11	16.06	5.06	38.32	0.11	0.63	11.28
玉米秸	4.87	5.93	71.45	17.75	5.45	42.17	0.12	0.74	13.80
麦秸	4.39	8.90	67.36	19.35	5.31	41.28	0.18	0.65	20.40
牛粪	6.46	32.40	48.72	12.52	5.46	32.07	0.22	1.41	3.84
大同烟煤	8.85	21.37	38.48	31.30	3.81	57.42	0.46	0.93	
无烟煤	8.00	19.02	7.85	65.13	2.64	65.65	0.51	0.99	

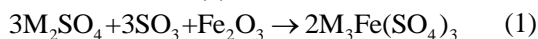
表2给出一些生物质灰组分<sup>[8]</sup>。由表2可见:麦秸、稻壳、稻草、棉秆、玉米秆、柳木灰中的K<sub>2</sub>O质量分数是江西丰城煤灰的2~20倍;麦秸、稻壳、稻草、棉秆、玉米秆、柳木灰中的碱土金属氧化物CaO的质量分数是江西丰城煤灰的5~80倍。

表2 生物质灰组分 单位: w/%  
Tab.2 Ash composition of the biomass

项目	麦秸	稻壳	稻草	甘蔗秆	棉秆	玉米秆	柳木	江西丰城煤
灰分	7.02	20.26	18.67	2.44	—	—	1.71	
SiO <sub>2</sub>	55.32	91.42	74.67	46.61	6.34	57.65	2.35	54.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.88	0.78	1.04	17.69	0.53	6.42	1.41	26.12
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.02	0.09	2.63	0.20	0.23	0.05	0.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.73	0.14	0.85	14.14	1.30	1.37	0.73	7.09
CaO	6.14	3.21	3.01	4.47	48.79	10.34	41.20	0.64
MgO	1.06	<0.01	1.75	3.33	6.84	4.03	2.47	0.46
Na <sub>2</sub> O	1.71	0.21	0.96	0.79	0.17	0.54	0.94	1.10
K <sub>2</sub> O	25.60	3.71	12.30	0.15	16.61	8.34	15.0	1.29
SO <sub>3</sub>	4.40	0.72	1.24	2.08			1.83	7.76
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.26	0.43	1.41	2.72	14.75	7.21	7.40	

生物质燃料燃烧过程中,碱金属、氯和硫以气体的形态挥发出来后发生一系列化学反应<sup>[7]</sup>,碱金属氧化物与SO<sub>3</sub>在冷的受热面上凝结成易熔的K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>表层,在该表层上粘附灰粒形成灰层,高温

下熔化成渣层。管壁温度高于 600 °C 时,渣层和受热面管壁发生反应(式(1)),导致受热面的腐蚀。



式中: M 为一价金属离子。

生物质燃料中的 K、Cl 含量比煤高,导致生物质锅炉的积灰、结渣、高温腐蚀等问题比较严重<sup>[9-11]</sup>。Cl 是植物体内含量最高的微量元素之一<sup>[12]</sup>,在生物质燃料的燃烧过程中,Cl 元素起着传输作用,促进了燃料颗粒内部的碱金属迁移到颗粒表面。其次,Cl 元素有助于碱金属元素的气化,Cl 元素优先和燃料中碱金属元素相结合,以 KCl、NaCl 等形式进入气相,随后附着于锅炉受热面,引起高温腐蚀<sup>[13-14]</sup>。部分 Cl 元素以 Cl<sub>2</sub>、HCl 等形式存在于烟气中,腐蚀受热面。为了控制结焦和积灰引起的高温腐蚀,现有生物质锅炉普遍采用低温燃烧的技术路线。根据不同的生物质燃料特性,锅炉炉膛温度场控制在 700~830 °C<sup>[15]</sup>。

## 2 环保技术路线

### 2.1 脱硫技术

湿法脱硫工艺(WFGD)以石灰石浆液作为 SO<sub>2</sub> 的脱除剂,脱硫效率高。WFGD 在运行过程中会出现脱硫浆液中毒的现象,浆液中毒后脱硫效率下降,石膏含水率增加,呈稀泥状,脱水系统无法正常运行<sup>[16-17]</sup>。

针对煤粉电站锅炉开发的 SO<sub>2</sub> 超低排放技术并不完全适用于生物质电厂。生物质直燃的 SO<sub>2</sub> 质量浓度在 100~600 mg/m<sup>3</sup> 间波动,烟气成分较多,例如含有 HCl、HF、重金属等,极易造成湿法脱硫浆液中毒。此外,WFGD 初投资较高,而且脱硫废水处理费用也是中小型生物质电厂无法承受的。

目前,生物质电厂多采用半干法脱硫技术,采用 Ca(OH)<sub>2</sub> 或 CaO 粉末作为吸收剂,脱除烟气中的酸性污染物,包括 SO<sub>2</sub>、HCl 和 HF 等。

### 2.2 脱硝技术

生物质电厂“卡脖子”的技术难题是实现 NO<sub>x</sub> 的超低排放。生物质锅炉的烟温低,烟气中的 H<sub>2</sub>O 较多,飞灰黏附性强、碱金属含量高,这导致选择性非催化还原(SNCR)或选择性催化还原(SCR)脱硝工艺难以实现生物质锅炉烟气中 NO<sub>x</sub> 的稳定、高效脱除。

氨水作为还原剂的 SNCR 脱硝工艺,其最佳温度窗口是 850~1 100 °C;尿素作为还原剂的 SNCR 脱硝工艺,其最佳温度窗口是 900~1 150 °C<sup>[18-19]</sup>。

对于生物质锅炉,满负荷下的炉膛温度大都低于 850 °C,中负荷下的炉膛温度低于 750 °C,低负荷下的炉膛温度更低。因此,生物质锅炉没有满足 SNCR 温度窗口的氨水/尿素溶液喷枪布置点。

据文献[20]报道,浙江某生物质焚烧厂应用 SNCR 脱硝技术后,NO<sub>x</sub> 脱除效率仅为 10%,而且为达到一定脱硝效率大量喷射还原剂导致高温受热面严重腐蚀。山东兰陵琦泉生物质电厂投运初期采用 SNCR 脱硝技术,导致喷枪周围的水冷壁腐蚀、省煤器腐蚀、空预器腐蚀,布袋阻力升高到 5 000 Pa。该厂最终停用 SNCR 脱硝技术,借助缺氧燃烧方式控制 NO<sub>x</sub> 生成,但 CO 质量浓度在 1 000 mg/m<sup>3</sup> 左右,即通过牺牲炉效来降低 NO<sub>x</sub> 生成质量浓度。

常规 SCR 催化剂通过催化剂表面的酸性活性位发生脱硝反应,最佳温度窗口为 300~420 °C。由于生物质燃料中的碱金属(K、Na)的含量很高<sup>[21]</sup>,燃烧后烟气的灰分和气态碱金属产物与催化剂表面酸性位结合会造成脱硝催化剂的中毒失活<sup>[5-6]</sup>,催化剂失活速度可达燃煤电厂的 3~4 倍。据文献[22]报道,某生物质电厂的 SCR 催化剂使用 3~6 个月后就失活了,且空气预热器积灰、腐蚀严重,形成严重堵塞。

### 2.3 常见生物质锅炉超低排放技术路线

#### 2.3.1 固态高分子脱硝+旋风除尘+半干法脱硫+布袋除尘

固态高分子脱硝(PNCR)<sup>[23]</sup>是一种炉内脱硝技术。PNCR 脱硝剂是一种以功能高分子材料为主要组分的固态混合物,含有乳化剂、分散剂、缓释剂、功能高分子还原材料(C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>N<sub>s</sub>)、活化剂和渗透剂,以及由钙、氧、镁、钡、锰、铝、硅和稀土元素等组成的催化剂。通过粉体自动输送系统,脱硝剂输送到锅炉炉膛中,在 650 °C 以上被气化、激活,与 NO<sub>x</sub> 发生化学反应,将 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>。主要反应化学方程式为:



目前,PNCR 技术的效率为 60%~80%。PNCR 脱硝方案初投资与 SNCR 方案相当,甚至更低,但运行成本较高。PNCR 工艺流程如图 1 所示。

#### 2.3.2 催化剂脱硝脱硫+旋风除尘+布袋除尘

催化剂脱硝脱硫 ZYY 硫、硝一体化脱除是将尿素颗粒及“催化剂”(金、铂、铈)通过喷枪均匀喷入炉膛,在炉膛内将 SO<sub>2</sub> 质量浓度降到 35 mg/m<sup>3</sup> 以下,NO<sub>x</sub> 质量浓度降到 50 mg/m<sup>3</sup> 以下,产物为 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,直接由除尘器脱除<sup>[23]</sup>。

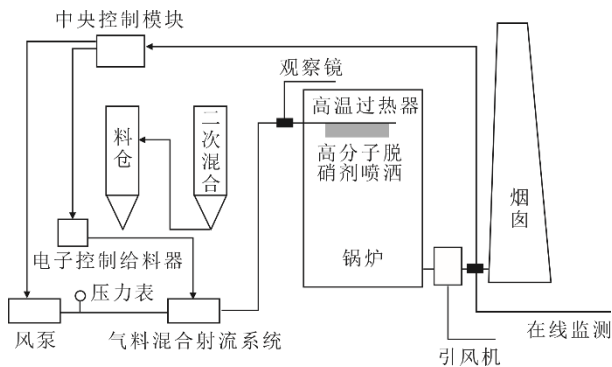


图1 PNCR 工艺流程

Fig.1 Process flow of the PNCR denitration technology

脱硫:  $\text{SO}_2 + \text{O}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow \text{催化剂1} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (3)

脱硝:  $\text{NO}_x + \text{NH}_3 \rightarrow \text{催化剂2} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (4)

ZYY 硫、硝一体化脱除+旋风除尘+布袋除尘可实现粉尘、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  的超低排放, 无需脱硫塔, 且无脱硫废水产生。该技术的缺点是为实现  $\text{NO}_x$  的超低排放, 氨逃逸量较高。 $\text{SO}_2$  的初始质量浓度较低 ( $500 \text{ mg/m}^3$  以下) 时可采用该技术。

### 2.3.3 旋风除尘+氧化脱硝+半干法脱硫+布袋除尘

氧化脱硝 (COA) 按采用的氧化剂不同, 分为液相 (一般为亚氯酸钠溶液、液态氯酸钠溶液等) 和气相 (臭氧) 2 种。先采用氧化剂将难溶于水的水 NO 氧化为易溶于水的高价态氮化合物, 再进入脱硫塔中与脱硫剂发生高效中和反应并固定。

第一种液相氧化剂为氯基氧化剂, 成本较低, 但副产物中氯化物含量将大幅提高, 控制不当易造成硝酸根超标、氯超标和重金属超标, 污染土壤和地下水。对于第二种臭氧脱硝技术而言, 可能带来 2 项隐患: 一是臭氧的污染; 二是氧化反应产物对水体的污染

### 2.3.4 高温除尘+低温 SCR 脱硝技术路线

采用“先高温脱硫、除尘, 后低尘低温 SCR 脱硝”技术路线, 可大幅降低脱硝催化剂的磨损、堵塞、中毒等风险, 催化剂体积可减小 1/3 以上, 并提高催化剂使用寿命 1 倍以上。由于将 SCR 脱硝催化剂布置在除尘器之后, 进入脱硝反应器的烟气是没有粉尘的洁净烟气, 脱硝催化剂工作在低尘甚至无尘工况下, 因此可以采用低尘 SCR 脱硝技术。文献[24]报道了采用先脱硫、除尘, 后脱硝的工艺路线, 包括湿法脱硫+高效除雾器+冷凝器+中低温 SCR 脱硝。

低温 SCR 脱硝技术因需要外部热源对原烟气进行加热, 对净烟气进行热量回收, 因此设备系统

较复杂, 初投资也相对较高<sup>[25-27]</sup>。低温催化剂对  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{SO}_x$  的抗性较差, 生物质锅炉烟气的含水量较高, 烟气中还含有  $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{SO}_x$ , 从而导致低尘 SCR 脱硝技术在生物质电厂受限。

### 2.3.5 陶瓷催化滤管一体化脱除技术路线

该技术路线的原理是: 将添加  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$  催化剂的陶瓷纤维制成陶瓷催化滤管, 并将其布置在一体化脱除塔内, 往塔前的烟道中喷射氨还原剂和可高效脱除  $\text{SO}_x$ 、 $\text{HCl}$  的脱酸剂; 在塔中被隔离在陶瓷催化滤管外表面的粉尘、未反应脱硫剂以及生成的脱硫产物通过反吹系统和清灰系统清除至灰斗。陶瓷催化滤管一体化脱除工艺流程如图 2 所示。

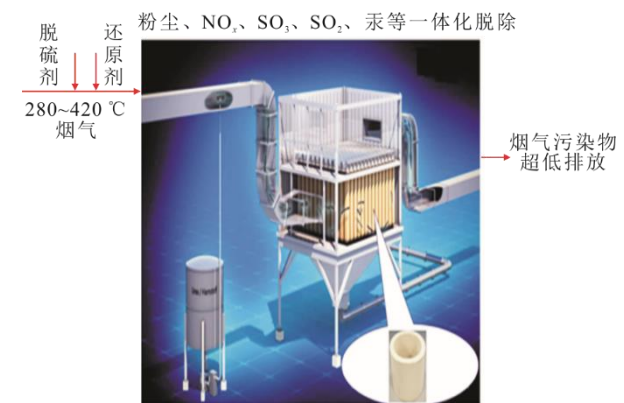


图2 陶瓷催化滤管一体化脱除工艺流程

Fig.2 The integrated removal process by ceramic catalytic filter tube

采用该烟气一体化净化工艺, 其污染物净化效率高, 脱硫效率在 90% 以上, 脱硝效率在 90% 以上,  $\text{HCl}$  脱除率为 80%~90%; 最高出口粉尘质量浓度可控制在  $5 \text{ mg/m}^3$  以内; 此外, 整个系统占地面积小, 运行能耗低, 净化流程缩短, 且无废水排放<sup>[28-29]</sup>。

在欧美发达国家、日本等, 陶瓷催化滤管一体化脱除技术已经在生物质电厂、焦化厂、危废焚烧厂和玻璃窑炉等行业大量应用。2017 年, 国家两部委将该技术列为国家鼓励发展的重大环保技术装备目录。目前, 该技术已经在国内的焦化行业、玻璃窑炉、生物质电厂等领域的近 60 台机组或窑炉上使用, 均能实现硫、尘、硝的超低排放。济南玉泉生物发电有限公司配备  $1 \times 130 \text{ t/h}$  高温高压联合炉排生物直燃炉。2018 年该厂采用陶瓷催化滤管尘、硫、硝一体化脱除工艺, 替代原“SNCR 脱硝+旋风除尘+袋式除尘+石灰石-石膏脱硫”工艺, 以满足济南市“2+26”地区的超净排放要求。2018 年



10 月, 尘、硫、硝一体化脱除系统建成并投入使用(图 3)。投运 2 年来, 该技术稳定实现硫、尘、硝的超低排放。对现有工艺(陶瓷催化滤管硫、尘、硝一体化脱除技术)与原工艺的运行成本进行了分析和比较, 结果见表 3。

生物质锅炉燃料复杂且灰量较高, 为了控制环保指标, 锅炉大部分时间处于缺氧燃烧。采用陶瓷催化滤管一体化脱除技术后, 可采用设计过量空气系数运行, 从而提高燃烧效率。130 t/h 生物质锅炉 1 天燃烧量约为 800 t, 则可节约燃料 8 t 左右, 燃料价格均价约 300 元/t, 以 1 年运行天数按 300 天计算, 1 年可节约燃料 72 万元。



图 3 济南玉泉生物质电厂一体化工程  
Fig.3 The integrated removal project of Jinan Yuquan Bio-power Plant

表 3 陶瓷催化滤管一体化脱除技术与常规技术对比

Tab.3 Comparison between the integrated removal using ceramic catalytic filter tube and the conventional technology

优势	项目内容	节省/(万元·a <sup>-1</sup> )	备注
替代布袋	使用 2 080 条布袋, 2 年更换 1 次	41	400 元/条
减少氨水用量	原用 6 t/d, 现 2 t/d	72	600 元/t
过氧燃烧更充分, 提高燃烧效率	燃料燃烧充分, 年减少燃料 0.1%	72	燃料约 800 t/d
延长空气预热器使用寿命	原 1.5 年, 延长为 5 年	45	
减少环保税	原 130 万元/a, 现 17 万元/a	100	
减少运行维护成本		20	
合计		350	

陶瓷催化滤管硫、尘、硝一体化脱除技术的占地面积小, 可以实现设备运营维护的自动化、模块化, 降低了运行维护成本。不考虑环保不达标导致的机组停炉、检修及起炉的费用, 陶瓷催化滤管硫、尘、硝一体化脱除技术比 SNCR+布袋除尘+湿法脱硫技术节约成本 350 万元/年。

### 2.3.6 各环保技术路线对比

生物质电厂的大气污染物超低排放技术的优缺点总结如下。

1) 为避免高温腐蚀, 生物质锅炉炉膛温度场控制在 700~830 °C 之间, 导致 SNCR 技术效率低, 无法实现 NO<sub>x</sub> 超低排放, 而且大量还原剂逃逸到下游, 腐蚀受热面、堵塞空预器、堵塞布袋等。另外, 生物质锅炉烟气中的 K、Na 等碱金属、水分、HCl 含量较高, 生物质灰熔点较低, 催化剂容易堵塞、中毒。

2) 生物质锅炉的烟气成分复杂, WFGD 容易中毒导致无法稳定实现 SO<sub>x</sub> 的超低排放。同时 WFGD 存在废水和烟羽治理问题, 生物质电厂宜采用干法或半干法脱硫技术实现 SO<sub>x</sub> 的超低排放。

3) PNCR 和 ZYY 脱硝均需特殊催化剂或脱硝剂、配方保密, 增加后期运行成本的不确定性, 还有待市场的进一步检验。COA 脱硝技术属于氧化吸收反应, 产生易溶于水的硝酸盐, 部分地区禁止使用该技术。

4) 低温 SCR 脱硝技术因需要外部热源对原烟气进行加热, 对净烟气进行热量回收, 因此设备系统较复杂, 初投资也相对较高。同时, 低温催化剂对 H<sub>2</sub>O 和 HCl、HF、SO<sub>x</sub> 的抗性较差, 生物质锅炉烟气的含水量较高(可达到 15%~30%), 烟气中含有 HCl、HF、SO<sub>x</sub>, 这导致低尘 SCR 脱硝技术在生物质电厂受限。

5) 陶瓷催化滤管一体化超低技术的显著优势是缩短烟气净化流程、运行维护简单、锅炉过氧燃烧提高生物质燃烧效率、延长空气预热器使用寿命, 而且没有脱硫废水、烟囱防腐、白色烟羽等相关问题。

适用于生物质电厂超低排放技术的特点汇总表 4。

表 4 生物质电厂超低排放技术对比  
Tab.4 Comparison of the ultra-low emission technologies for biomass power plants

脱硝技术	PNCr	ZYY 硫、硝一体化脱除	COA	低温 SCR 脱硝技术	陶瓷催化滤管一体化脱除技术
配套设施	旋风除尘+半干法脱硫+布袋除尘	旋风除尘+布袋除尘	旋风+布袋除尘器+WFGD	湿法脱硫+高效除雾器+冷凝器	无
技术特点	可实现硫、尘、硝的超低排放；PNCr 初投资与 SNCR 相当；PNCr 脱硝剂配方保密，且仅有特定厂家能够提供，增加了后期运行成本的不确定性	可实现硫、尘、硝的超低排放；为实现 NO <sub>x</sub> 的超低排放，氨逃逸高；适用于 SO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 初始浓度较低的情况 (SO <sub>2</sub> 质量浓度 < 500 mg/m <sup>3</sup> , NO <sub>x</sub> 质量浓度 < 250 mg/m <sup>3</sup> )；ZYY 脱硝剂配方保密，且仅有特定厂家能够提供，增加后期运行成本的不确定性	能够实现硫、硝、尘的超低排放；脱硝系统占地面积小；脱硝能耗大；存在臭氧逃逸的可能；臭氧制备费用比较高；针对臭氧的二次污染问题，各地环保政策不一	能够实现硫、尘、硝的超低排放；脱硫废液的处理有难度；碱金属毒化 SCR 催化剂，催化剂更换成本较高；产生白色烟羽；需要外部热源对原烟气进行加热，设备较多，系统较复杂，初投资也相对较高	稳定实现硫、尘、硝的超低排放；占地面积小；初投资高；运行成本小

### 3 结 论

1) 随着国家环保政策的完善，生物质电厂单纯依靠上网电价很难实现无补贴运营，生物质电厂的重要发展方向是县域经济的热电联产。新建的生物质热电厂需要借鉴燃煤电厂的环保要求，从设计初期就考虑到大气污染物的超低排放、废水零排放、固废处理等方面，避免反复投资建设、及相互矛盾的技术路线。

2) 低温 SCR 脱硝技术、SNCR 脱硝技术、WFGD、PNCr 技术、ZYY 脱硝技术、COA 脱硝技术方案用于生物质电厂大气污染物超低排放均存在着各种弊端。陶瓷催化滤管一体化超低技术的显著优势是缩短烟气净化流程、运行维护简单、锅炉过氧燃烧提高生物质燃烧效率、延长空气预热器使用寿命；而且没有脱硫废水、烟囱防腐、白色烟羽等相关问题。130 t/h 的生物质炉采用陶瓷催化滤管硫、尘、硝一体化脱除技术比 SNCR+布袋除尘+湿法脱硫技术节约成本 350 万元/年。

#### [参 考 文 献]

- [1] 武文璇, 李寒松, 李青, 等. 生物质锅炉的发展现状及农业中的应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(3): 81-84.  
WU Wenxuan, LI Hansong, LI Qing, et al. Development status of biomass boiler and its application in agriculture[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(3): 81-84.
- [2] 舒振杨. 小型秸秆生物质成型燃料锅炉结构设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 1-4.  
SHU Zhenyang. Structure design of small straw biomass briquette boiler[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 1-4.
- [3] 樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 7-17.  
FAN Jingli, LI Jia, YAN Shuiping, et al. Application potential analysis for bioenergy carbon capture and storage technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 7-17.
- [4] 方平, 唐子君, 黄建航, 等. 生物质锅炉烟气污染物排放特性及其控制对策[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 155-160.  
FANG Ping, TANG Zijun, HUANG Jianhang, et al. Emission characteristics of flue gas pollutants emitted from biomass boilers and its control strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(10): 155-160.
- [5] 孙克勤, 钟秦, 于爱华, 等. SCR 催化剂的碱金属中毒研究[J]. 中国环保产业, 2007(7): 30-32.  
SUN Keqin, ZHONG Qin, YU Aihua, et al. Toxic study of alkali metals on SCR catalyzer[J]. China Environmental Protection Industry, 2007(7): 30-32.
- [6] 云端, 宋蕾, 姚强. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> SCR 催化剂的失活机理及分析[J]. 煤炭转化, 2009, 32(1): 91-96.  
YUN Duan, SONG Qiang, YAO Qiang. Mechanism and analysis of SCR catalyst deactivation[J]. Coal Conversion, 2009, 32(1): 91-96.
- [7] 付鹏. 典型生物质气化特性的实验研究与模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 45-46.  
FU Peng. Experimental study and simulation of typical biomass gasification characteristics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006: 45-46.
- [8] 米铁. 生物质气化过程的综合实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002: 35-40.  
MI Tie. Comprehensive experimental study on biomass gasification process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2002: 35-40.
- [9] VASSILEV S V, BAXTER D, ANDERSEN L K, et al. An overview of the chemical composition of biomass[J]. Fuel, 2010, 89(5): 913-933.
- [10] YU C, QIN J, NIE H, et al. Experimental research on agglomeration in straw-fired fluidized beds[J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4534-4543.
- [11] NIELSEN H P, FRANDSEN F J, DAM-JOHANSEN K, et al. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(3): 283-298.
- [12] 徐婧. 生物质燃烧过程中碱金属析出的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 15-19.  
XU Jing. Experimental study on alkali metal precipitation during biomass combustion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 15-19.
- [13] 蒋育澄, 高世扬, 夏树屏. 痕量碱金属快速连续分析方法评述[J]. 理化检验(化学分册), 2003, 39(12): 743-747.

- JIANG Yucheng, GAO Shiyang, XIA Shuping. Recent progress of rapid and continuous analysis of trace amounts of alkali metals[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis*, 2003, 39(12): 743-747.
- [14] 吕泽康, 龙慎伟, 李冠兵, 等. 生物质锅炉氯腐蚀的密度泛函理论研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(11): 4370-4376. LYU Zekang, LONG Shenwei, LI Guanbing, et al. Density functional theory study on chlorine corrosion of biomass furnace[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(11): 4370-4376.
- [15] 叶江明. 电厂锅炉原理及设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 25-30. YE Jiangming. Principle and equipment of power plant boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 25-30.
- [16] 卢泓樾. 燃煤机组烟气污染物超低排放研究[J]. *电力科技与环保*, 2014, 30(5): 8-11. LU Hongyue. Research of the domestic 600 MW supercritical coal-fired units ultra in low emissions of flue gas[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2014, 30(5): 8-11.
- [17] 杨用龙, 苏秋风, 王丰吉, 等. 一体化技术处理脱硫中毒浆液[J]. *华电技术*, 2015, 37(5): 70-80. YANG Yonglong, SU Qiufeng, WANG Fengji, et al. Integrated technology for treatment of desulfurization poisoning slurry[J]. *Huadian Technology*, 2015, 37(5): 70-80.
- [18] 段传和, 夏怀详. 选择性非催化还原法(SNCR)烟气脱硝[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 45-50. DUAN Chuanhe, XIA Huaixiang. Selective non-catalytic reduction (SNCR) for flue gas denitration[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 45-50.
- [19] 陈镇超. 基于尿素还原剂的选择非催化还原高效脱硝技术的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 53-69. CHEN Zhenchao. Experimental study on selective non catalytic reduction of NO<sub>x</sub> based on urea reductant[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 53-69.
- [20] 李廉明, 李秋萍, 俞燕, 等. 生物质循环流化床锅炉烟气脱硝技术研究与应用[J]. *节能*, 2017(3): 47-49. LI Lianming, LI Qiuping, YU Yan, et al. Research and application of flue gas denitration technology of flue gas from biomass CFB boiler[J]. *Energy Conservation*, 2017(3): 47-49.
- [21] 李廉明, 金建荣, 孙坚, 等. 生物质循环流化床锅炉空气预热器积灰分析[J]. *设备管理与维修*, 2017(4): 99-100. LI Lianming, JIN Jianrong, SUN Jian, et al. Analysis of ash deposition in air preheater of biomass circulating fluidized bed boiler[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2017(4): 99-100.
- [22] 薛军, 翁卫国, 俞燕, 等. 130 t/h 全烧生物质锅炉脱硝技术研究及应用[J]. *锅炉制造*, 2017(2): 24-26. XUE Jun, WENG Weigu, YU Yan, et al. Study and analysis of denitration technologies on 130 t/h full-biomass-fired boiler[J]. *Boiler Manufacturing*, 2017(2): 24-26.
- [23] 薛玉宝, 郜光伟, 武新虎, 等. 生物质直燃锅炉超低排放脱硝技术研究[J]. *河北电力技术*, 2020, 39(2): 29-32. XUE Yubao, GAO Guangwei, WU Xinhui, et al. Research on ultra-low emissions denitration technology for biomass direct-fired boiler[J]. *Hebei Electric Power*, 2020, 39(2): 29-32.
- [24] 王小飞, 冯丽军. 生物质锅炉烟气超低排放——脱硝(协同消白)技术研究[J]. *广西节能*, 2019(1): 34-35. WANG Xiaofei, FENG Lijun. Ultra-low emission of flue gas from biomass boiler research on denitration (collaborative whitening) technology[J]. *Guangxi Energy Conservation*, 2019(1): 34-35.
- [25] 郑中原, 赵鹏, 姜玲, 等. 基于云平台的发电机组节能减排实时监控[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 148-154. ZHENG Zhongyuan, ZHAO Peng, JIANG Ling, et al. A real-time monitoring and control system for energy saving and emission reduction of generator set based on cloud platform[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 148-154.
- [26] 林玥廷, 张维奇, 林英明, 等. 考虑燃煤机组健康度与负荷转移的连锁故障防控策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17): 101-108. LIN Yueying, ZHANG Weiqi, LIN Yingming, et al. Control strategy of cascading failures considering the health degree of coal-fired units and load transfer[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17): 101-108.
- [27] 贡保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 123-130. GUN Baoji, BAI Senke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on a chaos adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 123-130.
- [28] 牛国平, 谭增强, 邱长彪, 等. 一体化高效脱除 NO<sub>x</sub> 和粉尘实验研究[J]. *热力发电*, 2019, 48(10): 71-76. NIU Guoping, TAN Zengqiang, QIU Changbiao, et al. Experimental study on integrated removal of NO<sub>x</sub> and dust by ceramic catalytic filter[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(10): 71-76.
- [29] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 139-146. ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 139-146.

(责任编辑 杨嘉蕾)