

第二章 生物质能直接燃烧技术

本章主要介绍

- 生物质能直接燃烧概述;
- 生物质燃料的成分与发热量;
- 生物质燃料特性及其对燃烧过程的影响;
- 典型燃烧设备;
- 生物质直燃和混燃技术。

要求重点掌握

- 生物质燃料燃烧特征;
- 生物质-煤混合燃烧技术特点及优势。

1

第一节 生物质能直接燃烧概述

第一节 生物质能直接燃烧概述

一 直燃技术优势

- (1) 生物质燃烧所释放出的 CO_2 大体相当于其生长时通过光合作用所吸收的 CO_2 ，有助于缓解温室效应;
- (2) 生物质的燃烧产物用途广泛，灰渣可加以综合利用;
- (3) 生物质燃料可与矿物质燃料混合燃烧，既可以减少运行成本，提高燃烧效率，又可以降低 SO_x 等有害气体的排放浓度;
- (4) 生物质燃烧设备可以最快速度地实现各种生物质资源的大规模减量化、无害化、资源化利用，而且成本较低，因而生物质直接燃烧技术具有良好的经济性和开发潜力。

2

第一节 生物质能直接燃烧概述

二 直燃技术方式

- 炉灶燃烧;
- 锅炉燃烧;
- 垃圾焚烧;
- 固型燃料燃烧。

截至2021年底，国家和地方政府累计核准农林生物质发电项目约250个，生物质发电新增装机808万千瓦，累计装机达3798万千瓦，生物质发电量1637亿千瓦时。

3

第一节 生物质能直接燃烧概述

炉灶燃烧是最原始的利用方法，但一般适用于农村或山区分散独立的家庭用炉，它的投资最省，但效率最低，燃烧效率在15~20%左右。

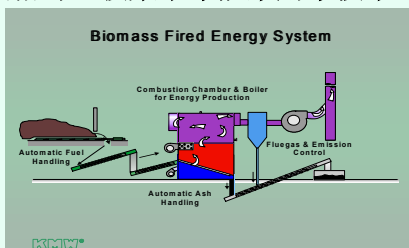


4

第一节 生物质能直接燃烧概述

锅炉燃烧采用了现代化的锅炉技术，适用于大规模利用生物质:

- **优点**是效率高，并且可实现工业化;
- **缺点**是投资高，而且不适于分散的小规模利用，生物质必须相对比较集中才能采用本技术。



5

第一节 生物质能直接燃烧概述



江苏国信如东生物质发电有限公司 25MW秸秆发电项目于2008年7月1日起正式投入商业运行，选用一台110t/h高温高压锅炉，秸秆年消耗量20多万吨，每年预计减排量约为15万吨二氧化碳当量。



南京协鑫生活污水发电有限公司 位于南京江宁区，于2005年1月并网发电。公司规模为2×55MW抽凝发电机，2×240t/h高温高压循环流化床锅炉，具备年发电9亿千瓦时；年供热128万吨的能力。

6

第二节 生物质燃料特征

第二节 生物质燃料特征

因为

- 燃料的种类很多、燃烧特性也有很大差异；
- 不同燃料通常要采用不同的燃烧方式和燃烧设备。

所以，必须

- 熟悉生物质的基本燃烧特性；
- 了解生物质的燃烧过程。

7

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

一、生物质化学成分

生物质主要含C、H、S、O、N、水分(M)、灰分(A)，秸秆焚烧灰中钾、钙及氯含量高，木屑焚烧灰中碱金属含量低，硅、钙含量高。各成分特性如下：

(1) 碳(C)

- 主要可燃成分——约占可燃成分的38~50%
- 含碳较少，因此不耐烧，要频繁添加燃料

8

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

(2) 氢(H)

- 主要可燃成分之一——生物质中氢占可燃成分的5~6%，煤2~8%
- 发热量很高——比碳(C)高
- 碳氢化合物多——易分解，冒黑烟，污染环境
- 着火点较低——木质燃料易着火

(3) 硫(S)

主要有害元素，含量较低

- 烟气结露——腐蚀设备
- 排入大气——危害人及动、植物，污染环境，相较于煤含量少(<2%)

9

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

(4) 氧(O)

- 是杂质，习惯上仍算可燃成分——无用，生物质中氧含量高30~40%

(5) 氮(N)

- NO_x 污染环境——有毒的光化学烟雾，生物质中含量变化较大

(6) 水分(M)

- 主要杂质之一——M越高，燃料的发热量就越低
- 水汽化——降低炉温，不利燃烧；带走大量热量
- 烟气结露——低温受热面的积灰和腐蚀

10

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

(7) 灰分(A)

- 最主要的杂质——使发热量降低
- 受热面积灰、积渣现象比较严重
- 加大金属磨损
- 大气污染
- 有效的除尘设备——设备投资也要增加

11

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

燃料种类 sort of fuel	元素组成 % element composition					
	H ^t	C ^t	S ^t	N ^t	P ^t	K ₂ O ^t
豆 秸 beanstalk	5.81	44.79	0.11	5.85	2.86	16.33
稻 草 rice straw	5.06	38.32	0.11	0.63	0.146	11.28
玉米秸 maize straw	5.45	42.17	0.12	0.74	2.60	13.80
麦 秸 wheat straw	5.31	41.28	0.18	0.65	0.33	20.40
牛 粪 cow dung	5.46	32.07	0.22	1.41	1.71	3.84
烟 煤 bitumite	3.81	57.42	0.46	0.93	/	/
无烟煤 anthracite	2.64	65.65	0.51	0.99	/	/

12

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

几种常见木材的元素分析成分（%）

树种	碳 (C)	氢 (H)	氧 (O)	氮 (N)	灰分 (A)
杉木	56.2	5.9	36.7	0.0	1.2
松木	52.3	5.8	38.8	0.2	2.9
山毛榉	49.01	6.11	44.25	0.09	0.57
桦木	48.88	6.06	44.67	0.10	0.29
柞木	50.16	6.02	43.45	—	0.37

13

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

生物质的污染物含量低

生物质平均含硫量只有3.8%，而煤的平均含硫量约为1%（中硫煤）。

生物质与煤成分比较

	玉米杆	玉米棒芯	稻壳	黄豆杆	棉花杆	树皮	杂树叶
S _{daf} , %	0.05	0.03	0.08	0.09	0.05	0.1	0.3
N _{daf} , %	0.7	0.47	0.63	0.69	0.52	1.17	0.98
A _{ad} , %	4.45	2.44	13.50	3.20	2.77	7.44	20.35
	神木煤	准格尔煤	淮南煤	峰峰煤	鹤壁煤	龙山煤	晓云煤
S _{daf} , %	1.56	0.49	1.42	0.36	0.31	0.34	0.41
N _{daf} , %	1.04	1.43	1.61	1.94	1.71	1.61	0.86
A _{ad} , %	4.35	14.94	10.06	10.42	5.66	13.22	18.50

高硫煤 (>3%)¹⁴

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

二、燃烧特性

了解燃烧特性的目的：

- 选择适合的燃料
- 选择适宜的燃烧操作

1. 工业分析

可以根据生物质在炉中燃烧时的物质变化情况来看表示——工业分析成分（更具实用价值）。

15

南京林业大学

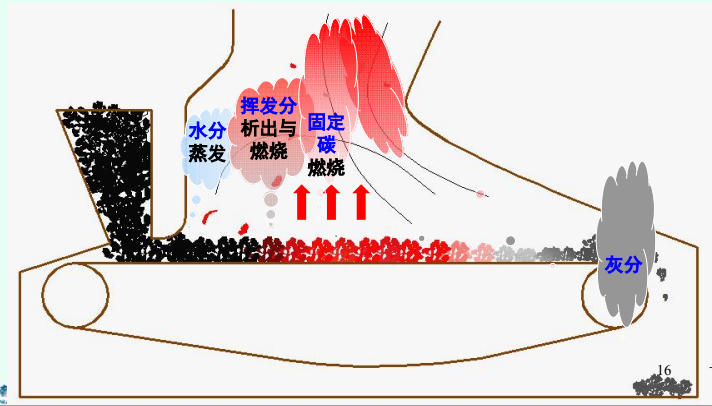
热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

成分还可以根据生物质在炉中燃烧时的物质变化情况来看表示

——工业分析成分（更具实用价值）

燃烧过程：

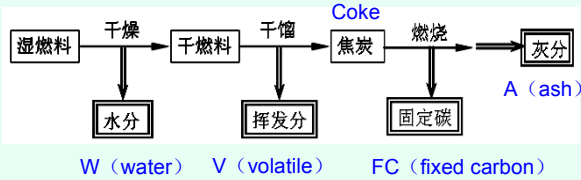


16

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征



W (water) V (volatile) FC (fixed carbon)

$W + V + FC + A = 100\%$

$C + H + S + O + N + W + A = 100\%$

A	C	H	S	O	N	W
灰分	固定碳	挥发分			水分	
焦炭						

17

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

几种常见木材的工业分析成分（ad%）

树种	水分 (W)	挥发分 (V)	固定碳含量 (FC)	灰分 (A)
桦木	9.06	74.90	13.68	2.36
柳木	6.72	77.17	12.44	3.67
杨木	6.26	73.68	16.56	3.50
杉木	7.38	74.30	16.12	2.20
松木	6.25	78.95	14.04	0.76

18

南京林业大学

热能动力工程

第二节 生物质燃料特征

元素、工业分析成分基准

$W + V + FC + A = 100\%$ $C + H + S + O + N + W + A = 100\%$

收到基ar(应用基y): 以实际收到的燃料为基准进行计算。

$W_{ar} + A_{ar} + V_{ar} + FC_{ar} = 100\%$ $C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + W_{ar} + A_{ar} = 100\%$

空干基ad(分析基f): 对经过自然干燥后的燃料(去除了外部水)为基准进行计算。

$W_{ad} + A_{ad} + V_{ad} + FC_{ad} = 100\%$ $C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + W_{ad} + A_{ad} = 100\%$

干燥基d(干燥基g): 以去除水分的燃料为基准进行计算。

$A_d + V_d + FC_d = 100\%$ $C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\%$

干燥无灰基daf(可燃基r): 以去除水分和灰分的燃料为基准进行计算。

$V_{daf} + FC_{daf} = 100\%$ $C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100\%$

第二节 生物质燃料特征

2. 燃烧特性指标

燃烧特性指标 —— 发热量、挥发分、灰熔点以及焦渣的特征等。

(1) 发热量

定义与分类:

每kg燃料——完全燃烧时——所放出的热量kJ/kg

- 高位发热量——包括燃烧生成物中水蒸汽的汽化潜热
- 低位发热量——燃烧计算依据

第二节 生物质燃料特征

如何获得燃料发热量数据?

- 经验公式进行近似计算

$Q_{dw} = 339C_y + 1030H_y - 109(O_y - S_y) - 25W_y$

- 测量—— 氧弹量热计 高位

标准煤: 统一的能源计量单位

kg标准煤 (或 t 标准煤)

— 29307kJ/kg (7000kCal/kg)

$B_z = (B \cdot Q_y) / 29307$

第二节 生物质燃料特征

生物质干燥基高位发热量 (平均)

$Q_{gw}^g = 19800 \text{ kJ / kg } (= 4729 \text{ kCal / kg })$

大致相当于二类烟煤

表 1 一些生物质燃料、煤的工业分析成分、元素组成和低位热值
Table 1 The components for industrial analysis, element composition and calorific value of some biomass and coal

燃料种类 sort of fuel	工业分析成分 % components for industrial analysis				元素组成 % element composition						热值 calorific value Q_{dw} kJ/kg
	W^f	A^f	V^f	Cl_d	H^f	C^f	S^f	N^f	P^f	K_2O^f	
豆 秸 beanstalk	5.10	3.13	74.65	17.12	5.81	44.79	0.11	5.85	2.86	16.33	16157
稻 草 rice straw	4.97	13.86	65.11	16.06	5.06	38.32	0.11	0.63	0.146	11.28	13980
玉米秸 maize straw	4.87	5.93	71.45	17.75	5.45	42.17	0.12	0.74	2.60	13.80	15550
麦 秸 wheat straw	4.39	8.90	67.36	19.35	5.31	41.28	0.18	0.65	0.33	20.40	15374
牛 粪 cow dung	6.46	32.40	48.72	12.52	5.46	32.07	0.22	1.41	1.71	3.84	11627
烟 煤 bitumite	8.85	21.37	38.48	31.30	3.81	57.42	0.46	0.93	/	/	24300
无烟煤 anthracite	8.00	19.02	7.85	65.13	2.64	65.65	0.51	0.99	/	/	24430

注: W^f 水分 water content, A^f 灰分 ash content, V^f 挥发分 volatile gas content, Cl_d 固定碳 solid carbon content

刘建禹 生物质燃料直接燃烧过程特性的分析 东北农业大学学报

第二节 生物质燃料特征



热重-差热分析仪, 对生物质能进行燃烧特性实验。

热重分析仪主要由天平、炉子、程序控温系统、记录系统等几个部分构成。

最常用的测量的原理有两种, 即变位法和零位法。

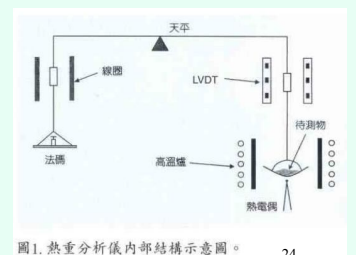
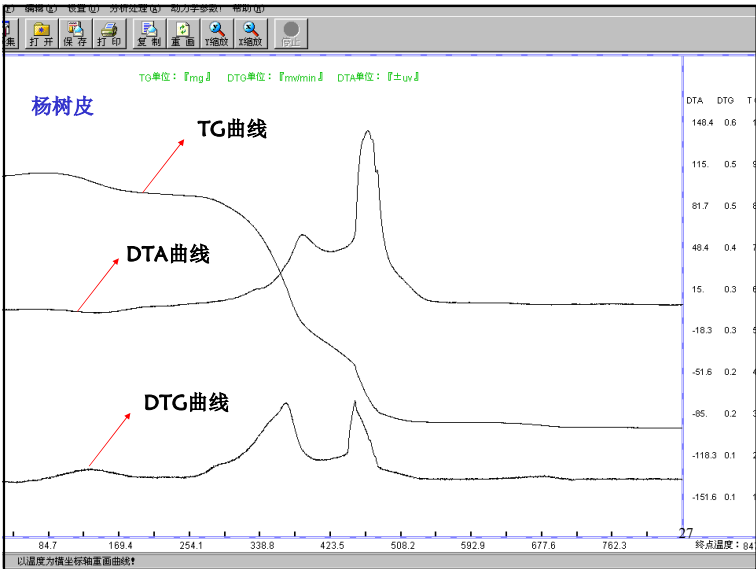
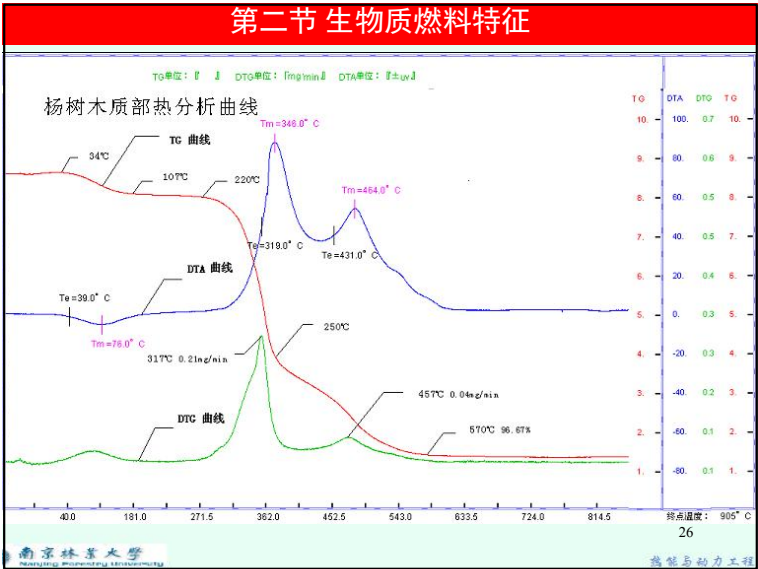
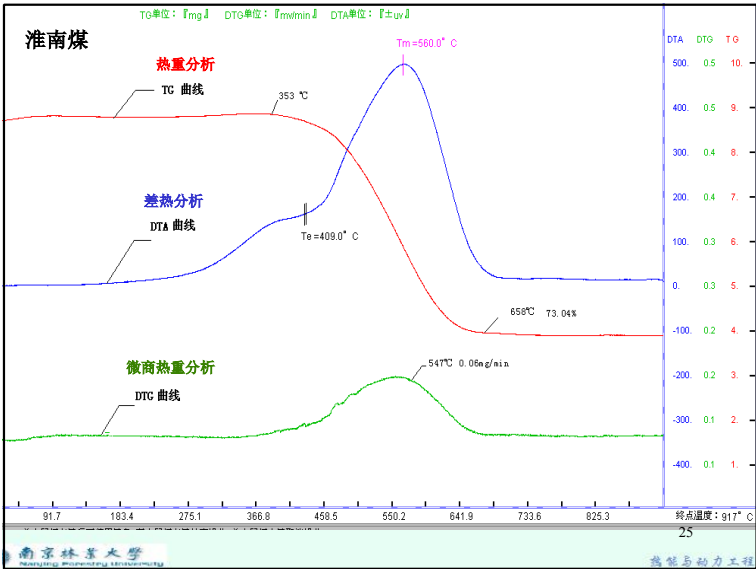


图1. 热重分析仪内部结构示意图。



第二节 生物质燃料特征

(2) 灰熔点

- 灰熔点是固体燃料中的灰分，达到一定温度以后，发生变形，软化和熔融时的温度
- 低熔点（低于1200℃）的灰易在炉内结渣——堵塞炉排——裹住焦炭

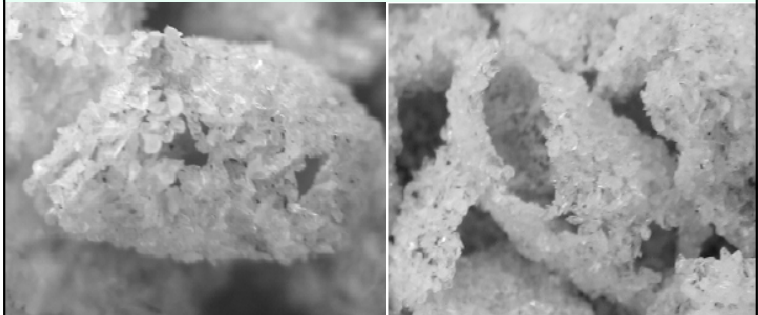
生物质灰熔融性问题严重

第二节 生物质燃料特征

原因：

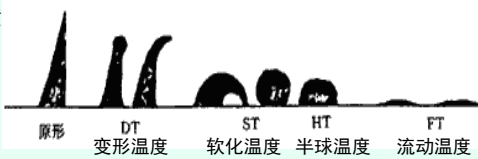
造成生物质灰熔点较低的原因主要是因为生物质灰分中的碱金属含量比较高，碱金属盐本身的熔点较低，并且当多种碱金属盐（K、Na等）与碱土金属（Ca、Mg等）共存时，将形成熔点更低的共熔体，特别是草本植物较木本植物其碱金属含量更高。

第二节 生物质燃料特征

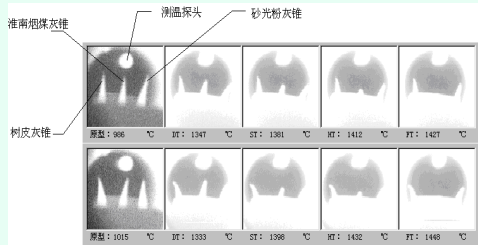

$$X_2O + nSiO_2 \rightarrow X_2O \cdot nSiO_2$$

第二节 生物质燃料特征

灰的熔化性质
预测方法：



一般把ST为1350℃作为锅炉是否易于结渣的分界线



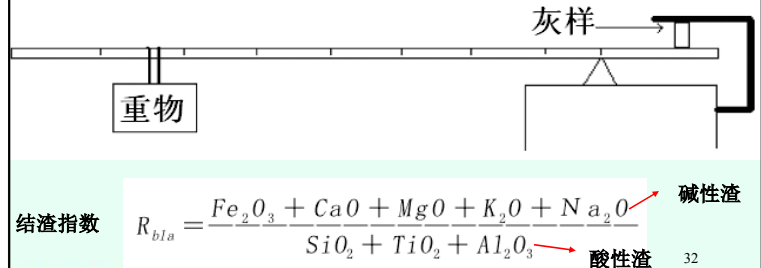
31

第二节 生物质燃料特征

(3) 焦渣特征

预测方法：

- (1) 破碎度
- (2) 压碎法
- (3) 指数预测



32

第二节 生物质燃料特征

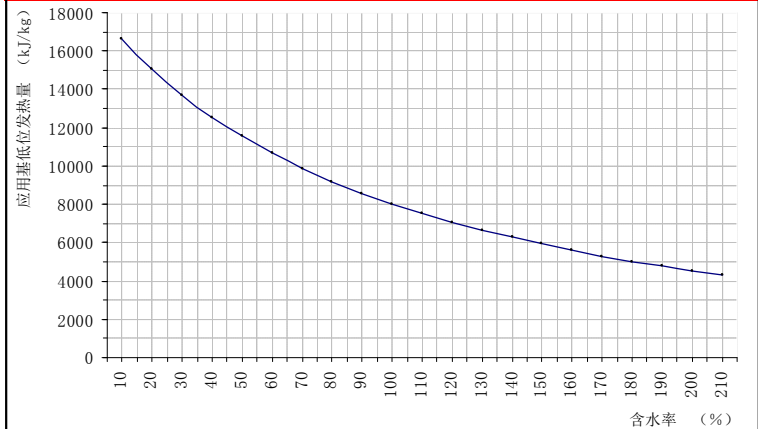
(4) 水分

➤ 木质燃料中水分对燃烧过程的影响

- 水分的蒸发将使炉温下降
- 水分的蒸发使着火推迟
- 水分直接导致木质燃料发热量的降低

33

第二节 生物质燃料特征



应用基低位发热量随含水率的变化

34

第二节 生物质燃料特征

用于干燥的热源可以是

- 锅炉产生的蒸汽、热水或导热油等
- 但比较经济的热能来源则是锅炉的余热——即利用锅炉的排烟作为干燥介质

好处：

- 一方面可以利用锅炉排烟余热
- 另一方面，由于烟气中氧含量很低干燥时可以减少木废料自燃的可能性

35

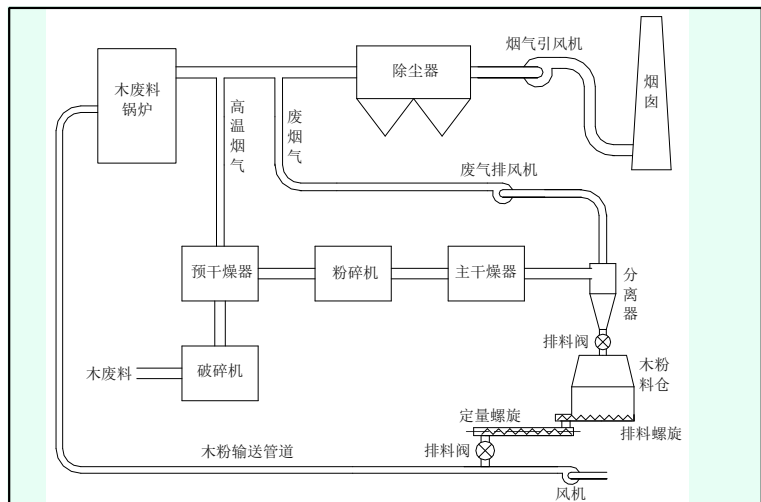


图2. 木质燃料燃烧前的预处理

36

第二节 生物质燃料特征

(5) 挥发分

- 木质燃料的挥发分含量很高，
一般能达到65~80%左右，是烟煤的2~3倍
在设计或改造锅炉时，适当增加炉膛容积
- 喷燃、存放和运输一挥发分高可能发生爆炸

37

第二节 生物质燃料特征

(6) 几何特征

- 粉状 悬浮燃烧——容易着火、燃尽
- 大块 层式燃烧——
 - 如尺寸太大，或尺寸悬殊太大
则很难燃尽
 - 如含水率较高，
则着火也很困难

38

第二节 生物质燃料特征

三 生物质燃烧特点综述

- 1 生物质水分含量较多，燃烧需要较高的干燥温度和较长的干燥时间，产生的烟气体积较大，排烟热损失较高；
- 2 生物质燃料的密度小，结构比较松散，迎风面积大，容易被吹起，悬浮燃烧的比例较大；
- 3 由于生物质发热量低，炉内温度场偏低，组织稳定的燃烧比较困难；

39

第二节 生物质燃料特征

- 4 生物质挥发分含量高，燃料着火温度较低，一般在250~350℃温度下挥发分就大量析出并开始剧烈燃烧，此时若空气供应量不足，将会增加燃料的化学不完全燃烧损失；
- 5 挥发分析出燃尽后受到灰烬包裹和空气渗透困难的影响，焦炭颗粒燃烧速度缓慢，燃尽困难，若不采取适当的必要措施，将会导致灰烬中残留较多的余碳，增大机械不完全燃烧损失；
- 6 灰熔点低，容易粘结。

40

第三节 生物质直接燃烧设备

第三节 生物质直接燃烧设备

一、预处理设备

- 1、将木块类的生物质削成碎片；
- 2、将木屑、锯末、稻壳类的细碎生物质压缩成棒或颗粒；
- 3、收获农作物时将秸秆打捆、风干，再送往锅炉附近；
- 4、干燥机。

41

第三节 生物质直接燃烧设备

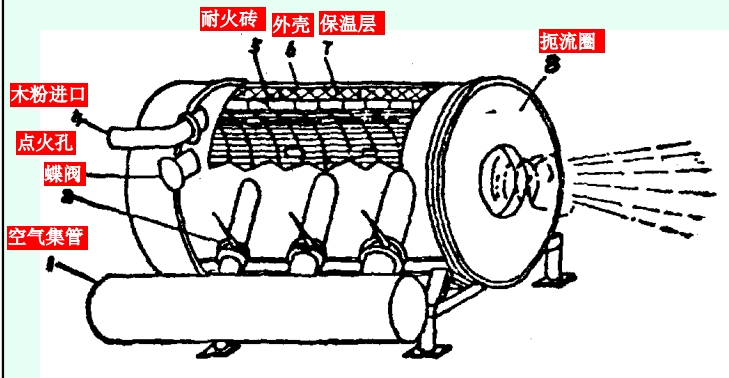
二 燃烧设备

1 室燃烧

用粉状燃烧时，首先应将其制成粉末。由于生物废料是非脆性材料，磨制时易生成纤维团而不是粉状，而且需要预先干燥，而干燥高水分的生物质燃料要消耗大量的热。一般可切成碎片在用于煤粉、油或气体燃烧的燃烧室内燃烧。

42

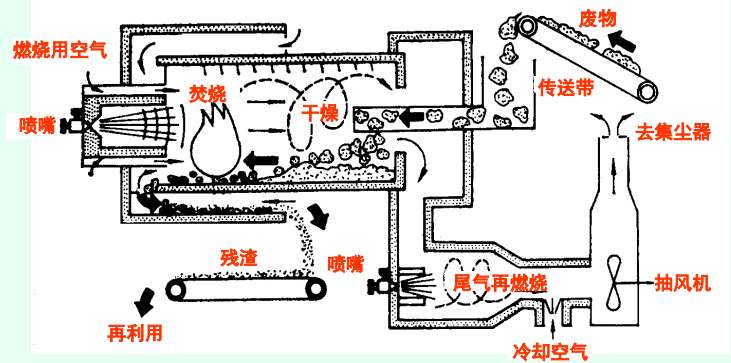
第三节 生物质直接燃烧设备



旋风燃烧炉

43

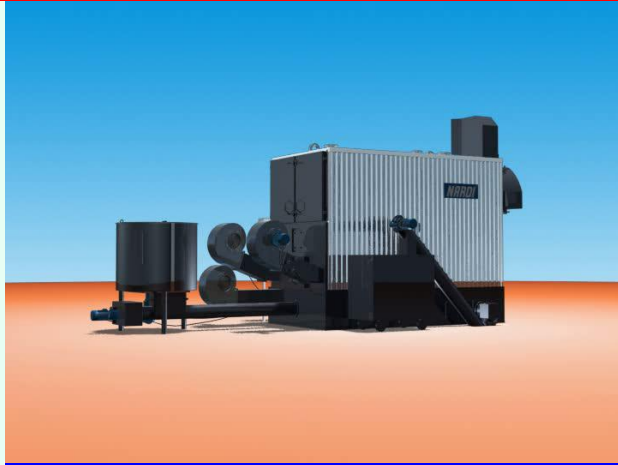
第三节 生物质直接燃烧设备



逆流式旋转窑焚烧炉

44

第三节 生物质直接燃烧设备

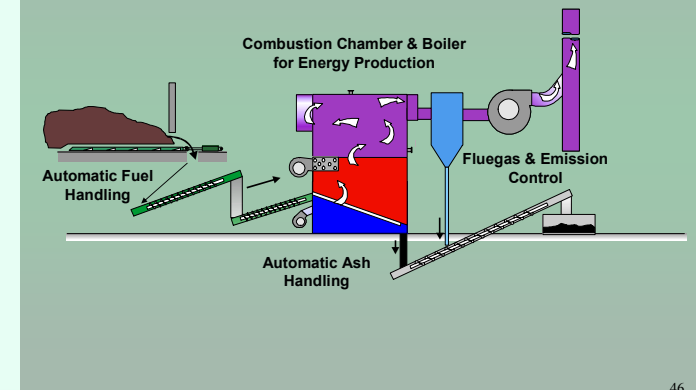


燃烧粉状干燥木废料的喷燃炉

45

第三节 生物质直接燃烧设备

Biomass Fired Energy System



46

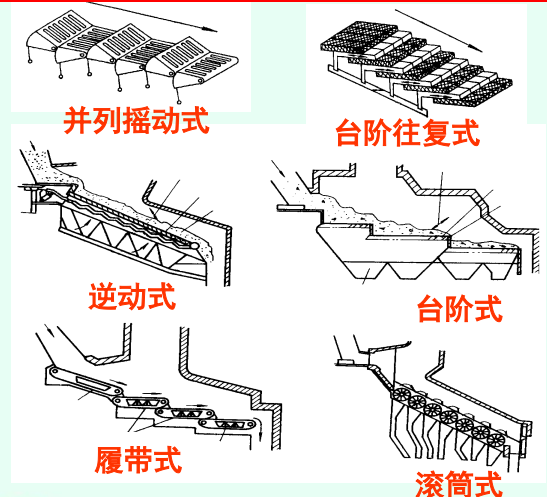
第三节 生物质直接燃烧设备

2 层燃式

层燃锅炉生物质燃料通过给料斗送到炉排上时，容易在炉排上形成料层疏密不均，从而形成布风不匀。由于生物质的挥发份很高，在燃烧的开始阶段，需要大量空气用于燃烧。由于生物质比较轻，容易被空气吹离床层而带出炉膛。灰分很少，不能在炉排上形成一层灰，以保护后部的炉排不被过热，从而导致炉排被烧坏。

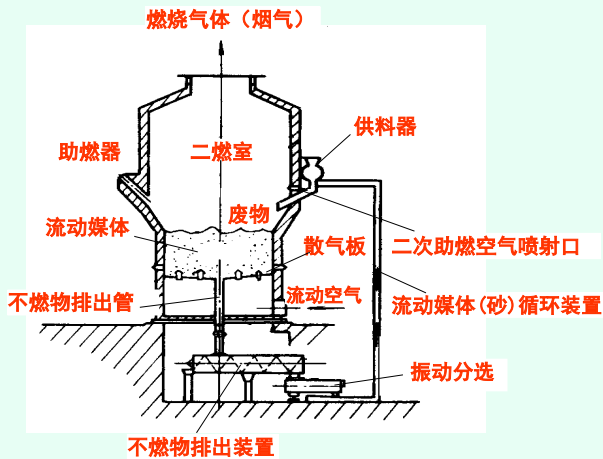
47

第三节 生物质直接燃烧设备



48

第四节 典型燃烧设备



55

第四节 生物质直燃技术

第四节 生物质直燃技术

1) 优点

- ✓技术较成熟
- ✓投资少
- ✓处理量大
- ✓燃料适应性广

层燃燃烧
流化床燃烧

我国当前发展的主要形式

56

第四节 生物质直燃技术

2) 主要问题

锅炉容量、参数受到限制,致使生物质能利用效率不高。

燃料储
存成本

燃料供
应成本

受热面腐
蚀、积灰

57

第四节 生物质直燃技术

◆燃料储存成本

➢ 生物质体积密度低;

范围从各种草类的约100 kg/m³ 到木材的500 kg/m³, 平均仅约为煤的1/5。因此生物质的能量密度(即单位体积的发热量)比煤低得多, 约为煤的1/10。

- 生物质生产存在季节性;
- 生物质储存要求高(安全性、品质)。

58

第四节 生物质直燃技术

◆燃料供应成本

生物质原料价格测算表

发电规模 /MW	1~2	5~10	10~20	≥20	计算依据
原料供应规模 / (万 t/年)	1	5	10	≥20	干物质
平均收集范围 /km	1~4	5~10	10~20	≥30	以 30%生物质产量计算
原料基本费用 / (元 / t)	100	100	100	100	直接向农户收购价
收集及搬运费 / (元 / t)	40	40	40	40	收集与搬运的人工费
运输费 / (元 / t)	10	15	20	25	每增加 1 km 增加 1 元 / t
储存管理费 / (元 / t)	10	15	20	25	管理费主要考虑规模与储存时间等的关系
综合成本 / (元 / t)	160	170	180	190	

59

第四节 生物质直燃技术

效益分析对比

比较因素	小型生物质 直燃发电	大型生物质 直燃发电
单位投资 / (元 / kW)	4 500	12 208
发电成本 / (元 · (kW · h) ⁻¹	0. 479	0. 457
燃料费 / %	60	38
折旧费 / %	13	30
人工成本 / %	11	13
运行成本 / %	16	19

大型 (2台75 t/h高温高压锅炉配2 台12MW汽轮发电机组);
小型 (10 t/h锅炉配1 500 kW 汽轮机)。

60

第四节 生物质直燃技术

◆受热面腐蚀与积灰

生物质组成（稻秆）

Chemical composition in wt.% on dry basis	Typical	Variation
Ash	4.5	2-7
Volatiles	78	75-81
Hydrogen, H	5.9	5.4-6.4
Carbon, C	47.5	47-48
Nitrogen, N	0.7	0.3-1.5
Sulfur, S	0.15	0.1-0.2
Chlorine, Cl	0.4	0.1-1.1
Silicon, Si	0.8	0.1-1.5
Aluminum, Al	0.005	< 0.03
Iron, Fe	0.01	< 0.03
Calcium, Ca	0.4	0.2-0.5
Magnesium, Mg	0.07	0.004-0.13
Sodium, Na	0.05	< 0.3
Potassium, K	1.0	0.2-1.9
Phosphorus, P	0.08	0.03-0.2

61

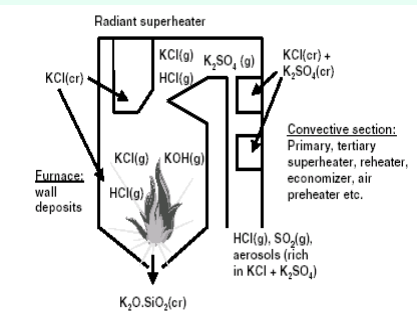
第四节 生物质直燃技术

江苏几种秸秆中氯含量（wt%）

稻秆	玉米秆	麦秆	油菜秆	棉花秆	黄豆秆
0.75	0.8	0.85	1.45	0.22	0.32

62

第四节 生物质直燃技术



一般，燃烧设备金属受热面的外壁温度大大低于KCl的气化温度。因此当烟气经过受热面时，气态KCl (NaCl) 就会凝结在受热面上形成积灰。这种积灰由于经历了相变过程，粘结强度较高。

63

第四节 生物质直燃技术

生物质锅炉受热面腐蚀事例

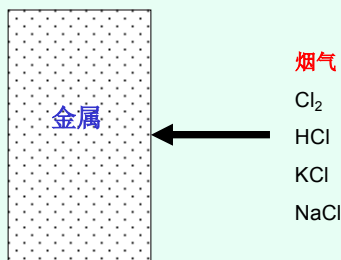
炉型	容量	燃料	过热蒸汽温度	腐蚀位置	管材	腐蚀速度
鼓泡流化床		高Cl树皮-生物垃圾混合物	530℃	第三过热器区	CrMoV 121	10mm/y (最大值)
抛煤炉	10MW	秸秆	450℃ 490-520℃ >520℃			极低 中等 明显
抛煤炉		树皮 废轮胎 废纸		炉膛 过热器		不可接受
循环流化床	80MW	煤和秸秆及其它生物质混烧		过热器		不可接受
流化床	10台	燃生物质	500℃左右 或大500℃	过热器		不可接受

64

第四节 生物质直燃技术

■腐蚀机理（了解）

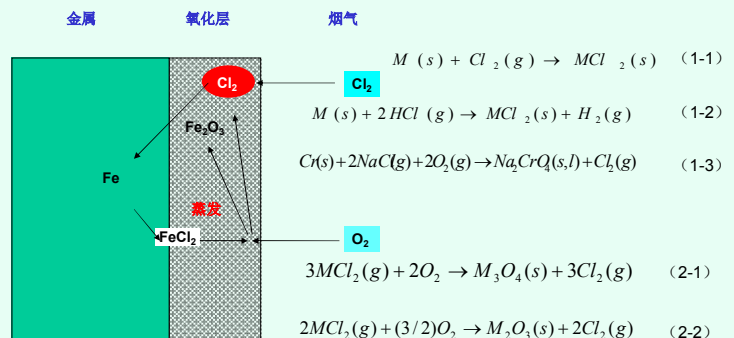
➢直接气相腐蚀



65

第四节 生物质直燃技术

方式一：烟气中的氯气或含氯化物扩散通过氧化层直接与金属反应，并导致氧化层疏松。

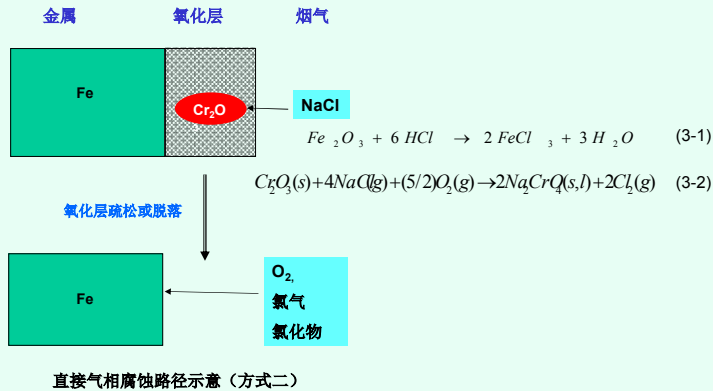


直接气相腐蚀过程示意（方式一）

66

第四节 生物质直燃技术

方式二：烟气中的氯气或含氯化物与氧化层反应，破坏氧化层，再进一步与金属反应，导致金属氧化。



67

南京林业大学

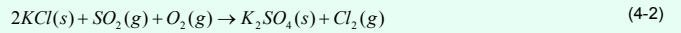
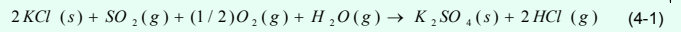
热能动力工程

第四节 生物质直燃技术

积灰腐蚀

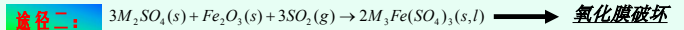
(1) 碱金属硫酸盐化腐蚀

硫酸盐化



腐蚀

途径一：释放出的Cl₂和HCl与金属反应引起腐蚀



68

南京林业大学

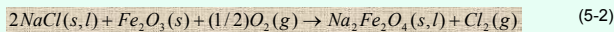
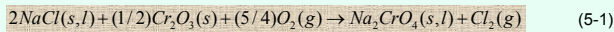
热能动力工程

第四节 生物质直燃技术

积灰腐蚀

(2) 碱金属对金属氧化层的氧化腐蚀

沉积的KCl(NaCl)与金属表层的氧化膜可发生如下氧化还原反应



氧化膜破坏

69

南京林业大学

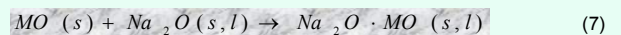
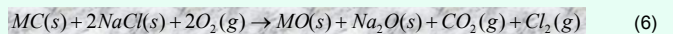
热能动力工程

第四节 生物质直燃技术

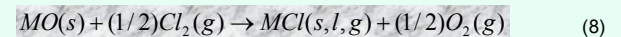
积灰腐蚀

(3) 金属氧化层的熔解腐蚀

一些金属碳化物在氧气中可与NaCl相互作用



反应形成的Cl₂进一步腐蚀



70

南京林业大学

热能动力工程

第四节 生物质直燃技术

■腐蚀的防止

选择合适的过热器结构钢材料

常用过热器结构钢的组成

Steel	Wt%									Maximum steam temperature when applied as superheater material in straw-fired boilers
	C	Cr	Ni	Mo	W	Mn	V	Nb	Ti	
15Mo3	0.15			0.30			0.60			< 450°C
13CrMo44	0.13	1.00		0.50						
10CrMo910	0.10	2.25		1.00		0.50				
HCM2S (1,2)	0.06	2.25		0.30	1.60		0.25	0.05		
P91 (1)	0.10	9.00		1.00			0.23	0.07		< 470°C
NF616 (1,2)	0.10	9.00		0.50	1.80		0.20	0.06		
X20CrMoV121	0.20	12.00	0.50	1.00			0.30			
HCM12	0.10	12.00		1.00	1.00		0.25	0.05		
Essete 1250	0.10	15.00	10.00	1.00		6.00	0.30	1.00		< 540°C
X3CrNiMoN1713 (1)	0.03	17.00	13.00	2.25						
TP347H FG	0.07	18.00	10.00					1.00		
TP347H FG	0.07	18.00	10.00					1.00		
Super304H (1,3)	0.10	18.00	9.00					0.40		< 585°C
NF709	0.07	20.00	25.00	1.50				0.25	0.05	
HR3C (1)	0.06	25.00	20.00					0.40		
HR6W		23.00	43.00	1.00	6.00			0.20	0.10	

71

南京林业大学

热能动力工程

第四节 生物质直燃技术

哈氏合金材料

哈氏C-276合金是一种含钨的镍-铬-钼合金，极低的硅碳含量，被认为是万能的抗腐蚀合金。

主要耐湿氯、各种氧化性氯化物、氯化盐溶液、硫酸与氧化性盐，在低温与中温盐酸中均有很好的耐蚀性能。因此，在苛刻的腐蚀环境中，如化工、石油化工、烟气脱硫、纸浆和造纸、环保等工业领域有着相当广泛的应用。

72

南京林业大学

热能动力工程

第四节 生物质直燃技术

►喷涂方法

目标材料特征

Characteristics of the target materials 高速氧燃料热喷涂

Material designation	Coating process	Nominal composition	Thickness (μm)	Coating hardness HVN 300 (kg mm ⁻²)	Porosity (%)
DS-200	HVOF	75Cr ₃ C ₂ -35NiCr	539	614-810	1-2
DS-105	HVOF	Cr ₃ C ₂	495	804-990	<2
DS-69	HVOF	Ni42Cr2Si	658	200-250	<1
DS-472	HVOF	Ni20Cr15Mo	700	200-250	0.5
DS-481	HVOF	Ni0.5B	615	180-240	0.5
DS-128	HVOF	WC-17Co	406	850-930	<1
71T	Wire arc spray	Ni20Cr10Mo2Fe	488	200-250	3-4
Al	Wire arc spray	99.5Al	630	<102	5-6
Roxide C	Flame spray	90Cr ₂ O ₃ 6SiO ₂ 4Al ₂ O ₃	548	1902	4
Armcor M	Wire arc spray	Fe25Cr3B2Si	298	600-1200	4-5
45CT	Wire arc spray	Ni43Cr1Ti	513	250-350	2
AISI 1618	-	Fe 0.2C (mild steel)	-	145-151	0
304SS	-	Fe19Cr9Ni0.1C	-	230-280	0

火焰喷射热喷涂 电弧喷涂 Ni、Cr、Si等

73

南京林业大学

热能动力工程

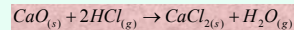
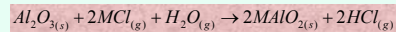
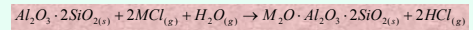
第四节 生物质直燃技术

►添加剂

研究的添加剂（高岭土、矾土、粉煤灰、石灰石）

additive	Al ₂ O ₃	SiO ₂	sum 1 ^a	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PO ₃	SO ₂	d ₅₀ (μm)	sum 2 ^b
kaolin II ^c	23.2	66.0	89.2	<0.1	1.1	1.5	0.1	5.2	0.0	0.0	18	7.9
kaolin I ^d	34.3	48.7	83.0	0.1	0.2	0.7	0.1	2.4	0.1	0.0	20	3.6
bauxite II ^c	84.9	3.4	98.3	<0.1	0.2	1.3	<0.1	0.3	0.2	0.0	10	2.0
flyash I ^d	23.6	51.6	75.2	7.2	2.0	8.5	0.9	2.6	1.0	1.0	50	23.2
limest II ^c	0.4	2.0	2.4	57.0	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	-	25	57.9
limest I ^d	0.5	1.1	1.6	55.0	0.9	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	400	56.5

^a sum 1 = Al₂O₃ + SiO₂. ^b sum 2 = other compounds. ^c II = studied at IVD. ^d I = studied at VTT.



74

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

一 生物质-煤混合燃烧技术进展

生物质-煤混合燃烧技术处于起步阶段，在一些国家已建成一定数量**生物质-煤混合燃烧发电**示范工程。电站装机容量通常在**50~700MW**之间，少数系统在**5~50MW**之间。燃料包括农作物秸秆、废木材、城市固体废物以及污泥等。混合燃烧的主要设备是煤粉炉，亦有发电厂使用层燃炉和流化床技术。

75

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

某电厂，以废木材为燃料，锅炉机组选用**635MW煤粉炉**。

木材燃烧系统独立于燃煤系统，对锅炉运行状态没有影响。现已商业化运行，每年平均消耗约6万t木材(干重)，替代燃煤约4~5万t输出电力20MW。

76

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

二 生物质-煤混合燃烧方式

混燃技术可分为**直接混合燃烧**、**间接混合燃烧**和**并联燃烧**3种方式，其各具优缺点，目都已在小范围或商业化项目中得到实施。

1 直接混合燃烧

直接混合燃烧是指经前期处理的生物质直接输入燃煤锅炉中使用，可分为4种基本形式。

(1) 生物质燃料与煤在给煤机的上游混合，然后被送入磨煤机，按混合燃烧要求的速度分配至所有的粉煤燃烧器。原则上这是最简单的方案，投资成本最低。然而有降低燃煤锅炉出力的风险，**仅用于有限类型的生物质和非常低的混合燃烧比例**。

77

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

王学斌 300MW燃煤机组混燃秸秆成型燃料的试验研究 中国电机工程学报 2010年 第30卷 14期

- 磨煤机的生物质给料量有要求，磨料出口温度不能太高。
- 降低炉膛温度，火焰中心下移。
- 降低NO_x排放。

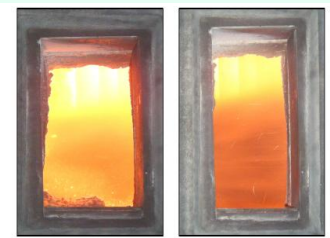


图 4 不同生物质给料量时 F 层生物质喷嘴口火焰
Fig. 4 Combustion flame out of biomass injector for different biomass quantity

78

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

- (2) 生物质搬运、计量和粉碎设备独立配置，生物质粉碎后输送至管路或燃烧器。这需要在锅炉正面安装生物质燃料**输送管道**，使锅炉正面显得更加拥挤。
- (3) 将生物质的搬运和粉碎设备独立配置，并**使用专用燃烧器**燃烧，其投资成本最高，但对锅炉正常运行影响最小。
- (4) 将生物质作为**再燃燃料**，控制NO_x的生成。生物质在位于燃烧室上部为特定目的而设计的燃烧器中燃烧。

79

第五节 生物质混燃技术

山东十里泉发电厂5号锅炉煤与秸秆混烧改造项目

- 机组配置：锅炉容量为400t/h，配套机组容量14万千瓦。
- 改造费用：总投资约为8357万元。
- 改造内容：增加一套**秸秆收购、储存、粉碎、输送设备**，同时在5号锅炉左右墙增加两台**秸秆燃烧器**，并对**供风系统及相关控制系统**进行改造，原有的锅炉燃烧系统不作变动，改造后的锅炉可以**混烧煤粉和秸秆**，也可以**单独燃烧煤粉**，并**保持原锅炉的性能及参数不变**。增加的燃烧器为燃用秸秆的旋流燃烧器。
- 生物质利用量：改造后两台新增加的燃烧器消耗秸秆量4千克/秒，按机组满负荷年运行7446小时(85%)进行计算，每年将燃烧10.7万吨秸秆，相当于8.13万吨原煤(5000大卡/千克)。
- 对SO₂排放影响：按满负荷运行计算，一年可减少SO₂排放量约1500吨。

80

第五节 生物质混燃技术

2 间接混合燃烧

间接混合燃烧是指生物质气化之后，将产生的生物质燃气输送至锅炉燃烧。这相当于用气化器替代粉碎设备，即将**气化作为生物质燃料的一种前期处理形式**。大多数混合燃烧锅炉机组选用以空气为气化剂。**间接燃烧无需气体净化 and 冷却**，其投资成本较低，气化产物在800~900℃时通过热烟气管道进入燃烧室，锅炉运行时存在一些**风险**。替代方案是在生物质燃气进入锅炉燃烧室前先冷却和净化。

81

第五节 生物质混燃技术

3 并联燃烧

并联燃烧是指**生物质在独立的锅炉中燃烧**，将生产的蒸汽供给发电机组。并联燃烧使用了完全分离的生物质燃烧系统，产生的蒸汽用于主燃煤锅炉系统，提高工质参数，转化效率高。**间接混合燃烧和并联燃烧装置的投资高于直接混合燃烧装置**，但可利用难以使用的燃料（高碱金属和氯元素含量的生物质），且分离了生物质灰和煤灰，利于后期处理。

82

第五节 生物质混燃技术

生物质与煤混燃技术

1) 总体优势

- 煤粉炉中生物质混燃，可以利用现役电厂提供一种快速而低成本的生物质发电技术，也是一种最好（**廉价而低风险**）的利用可再生能源发电的技术；
- **煤粉燃烧发电效率高**，可达35%以上，生物质混燃正是借用其高效率的优点，这是现阶段其它生物质发电技术难以比拟的；
- **生物质燃料低硫低氮**，在与煤粉混燃时可以降低电厂的SO₂和NO_x排放；
- 对于煤粉燃烧电厂，**混燃生物质意味着CO₂排放的降低**，被公认为是现役燃煤电厂降低CO₂排放的最有效措施；
- 生物质混燃技术简单，投资和运行费用低。生物质相对较便宜，对燃煤电厂而言还可增加燃料的选择范围和燃料适应性，**降低燃料成本**；
- 可以降低腐蚀和积灰。

83

第五节 生物质混燃技术

2) 掺混比例

- (1) **生物质热量配比小于2%**或质量配比小于4%或稍高些。此时生物质的量小，掺混可简单进行，无需对电厂系统进行改造，对电厂的安全和经济运行也不会造成任何影响。
- (2) **热量配比小于10%**。共燃技术可充分发挥其技术优势，可能出现的技术问题均在运行可控制的范围内。因掺烧比例较高所引起的设备投资和运行费用的增加也可由共燃的收益得到补偿，对电厂的经济性和安全性不会产生负面影响。目前国外的工程应用大多在此范围内。
- (3) **热量配比小于15%**。从理论和技术上看，生物质的掺烧比例可高至100%。但高的掺烧比例即意味着经济性的降低。因此该比例一般认为是**现役电厂掺烧比例的上限**，但目前仍有大量的研究开发工作着眼于更高的掺比。

84

第五节 生物质混燃技术

3) 主要问题

(1) 生物质燃料的制备、储存和输送

生物质的能量密度约为煤的1/10；生物质水分含量很高，燃料制备过程中必要的干燥会增加运行费用；生物质是韧性纤维质材料，不易制粉（在共燃时，生物质颗粒的平均尺寸在3 mm左右）；粉碎后生物质颗粒呈较长的柱型而非煤粉的近似球形，加之密度很低，因而可能会影响燃料的气力输送。

(2) 结渣积灰

与煤相比，生物质灰中碱性成分含量很高，在火焰中易挥发出来、凝结在受热面上形成结渣和积灰。草本生物质灰分中K和Cl含量较高，当掺烧比例较大时，有引起锅炉积灰及腐蚀的趋势；燃烧木本生物质时一般不会引起积灰，这是因为这类生物质一般Ca含量较高而K和Cl含量相对较低。

85

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

(3) 燃尽率

生物质颗粒大而非球形会对燃尽率产生影响。一方面，这类颗粒不易随气流夹带进入火焰中心，因而影响其加热和燃烧速度。另一方面，生物质颗粒水分高，而且有相当多的颗粒尺寸非常大，这类高水分、大颗粒升温 and 燃烧速度慢，因而在燃烧组织不好的情况下，不易燃尽。

(4) 污染物排放

由于生物质的含硫量和含氮量较低，因此其SO₂和NO_x的排放量亦较低，但生物质中碱金属成分在火焰中易挥发，并与燃煤烟气中SO₂等反应生成硫酸盐，凝结后形成很细的飞灰，因而可能导致细灰排放一定程度上的增加。

86

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

(5) 腐蚀

生物质和煤混烧时，由于烟气中的SO₂会和碱金属氯化物反应生成碱金属硫酸盐，其腐蚀性较氯化物弱得多，在共燃生物质特别是草本生物质时，碱金属氯化物的腐蚀仍需关注。

(6) 粉煤灰利用

由于生物质灰和普通粉煤灰的成分有显著差异，因而在进行粉煤灰综合利用时需考虑共燃生物质后粉煤灰的特性变化。

(7) 对SCR系统的影响

煤粉燃烧电厂共燃生物质会导致选择性催化还原(SCR)烟气脱硝系统催化剂活性的显著降低，其原因可能是生物质燃料中丰富的碱金属和碱土金属会引起SCR催化剂的中毒。因此对采用SCR的系统，这一问题需引起重视。

87

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

三 生物质—生活垃圾混合燃烧方式

城市生活垃圾热值低、含水率高、灰土含量大、成分复杂，造成在炉膛内燃烧时燃烧效率低、炉膛温度低、烟气成分复杂等问题。在垃圾燃烧工况不好的情况下，经常要适当喷入燃油助燃，这样在处理垃圾的同时浪费其他资源，运行成本较高，经济效益较差。

88

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

某垃圾焚烧发电厂主要设计参数

表 1 主要设计参数	
Table 1 Main design parameters	
项目	参数
焚烧炉炉排型式	倾斜往复式
焚烧炉-余热锅炉效率(%)	80
垃圾低位热值(设计值)(kJ/kg)	6 500
过热蒸汽流量(1台)(t/h)	34
过热蒸汽压力(MPa)	4.0
过热蒸汽温度(℃)	400
给水温度(℃)	140
排烟温度(℃)	200
烟气处理方式	半干法+布袋除尘器
处理烟气量(1套)(kg/h)	77 500
发电机额定功率(MW)	9.5
汽轮机型式	单缸、凝汽式

89

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

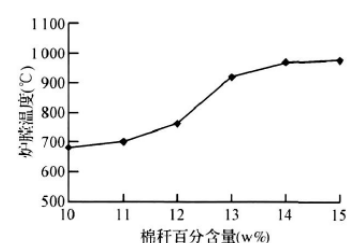


图 1 棉秆百分含量与炉膛温度的关系曲线

生活垃圾热值较低(5400kJ/kg)，所以其燃烧时炉膛温度较低，一般维持在600℃左右。随着棉秆掺入量的增多，混合物热值增大(棉秆质量百分含量为14%时，热值6780kJ/kg)，炉膛温度变大。

90

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

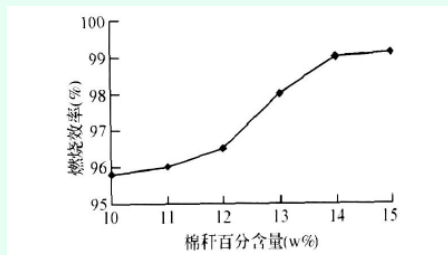


图 2 棉秆百分含量与燃烧效率的关系曲线

棉秆挥发份含量高，使得燃料不完全燃烧热损失减少。随着棉秆掺烧量的增多，燃烧效率增加。

91

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

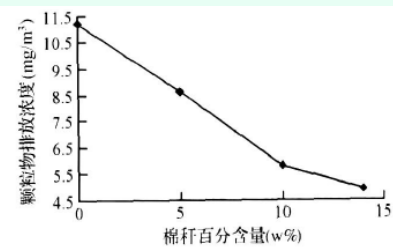


图 3 棉秆百分含量与颗粒物排放浓度的关系曲线

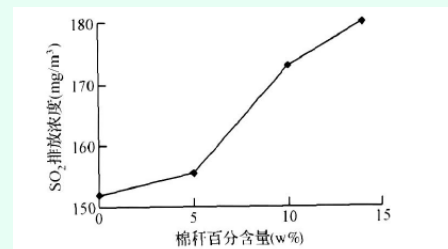
由于棉秆灰分含量远小于垃圾中灰分含量，因此，棉秆掺烧比例增加，燃烧产生灰的总量减少，颗粒物排放浓度也相应减小。

92

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

图 4 棉秆百分含量与 SO₂ 排放浓度的关系曲线

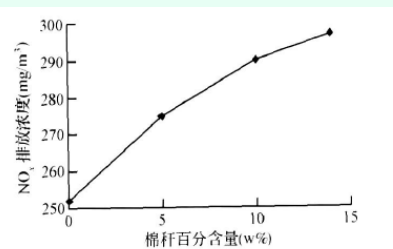
由于棉秆中硫元素含量大于垃圾中硫元素含量，因此，随着棉秆掺烧比例的增加，SO₂排放量大于混烧前SO₂排放量。

93

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

图 5 棉秆百分含量与 NO_x 排放浓度的关系曲线

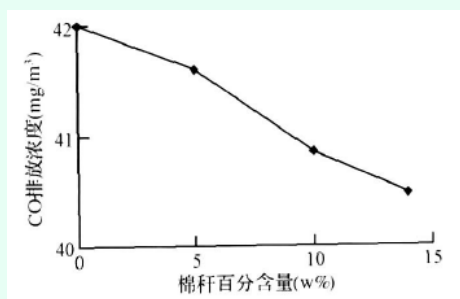
虽然棉秆含氮量低于垃圾含氮量，使得燃料型NO_x生成量减少，但随着棉秆掺烧比例增加，炉膛温度快速上升，导致热力型NO_x产量增大，从而NO_x总排放量增加。

94

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术



由于棉秆挥发份含量高，燃料的燃烧较充分，因此，随着棉秆质量百分含量的增加，CO排放量减小。

95

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

表 3 烟气中二恶英监测结果
Table 3 Monitoring results of PCDD/Fs in flue gas

多氯代二苯并二恶英 和多氯代二苯并呋喃	毒性当量 (ng/m³)	
	混烧前	混烧后
2378-TCDD	0	0
12378-PeCDD	0.012	0
123478-HxCDD	0.003	0
123678-HxCDD	0.004	0.001
123789-HxCDD	0.003	0
1234678-HpCDD	0.003	0
OCDD	0.001	0
2378-TCDF	0.003	0.001
12378-PeCDF	0.003	0.001
23478-PeCDF	0.018	0.005
123478-HxCDF	0.006	0.001
123678-HxCDF	0.005	0.001
123789-HxCDF	0	0
234678-HpCDF	0.004	0.001
1234678-HpCDF	0.002	0
1234789-HpCDF	0	0
OCDF	0	0
总毒性当量 (I-TEQ)	0.066	0.011

混烧后烟气中的二恶英浓度有很大的降低，这一方面是由于炉膛内较高的燃烧温度(大于850℃)能有效抑制二恶英的生成；另一方面是由于棉秆比垃圾中二恶英的前驱物要少。

96

南京林业大学

热能动力工程

第五节 生物质混燃技术

表 4 混烧前后经济参数的比较
Table 4 Comparison of economic parameters

参数名称	混烧前 (均值)	混烧后 (均值)
油量 (L/h)	82	0
垃圾焚烧量 (t/h)	20.6	31.6
发电量 (kW)	4 200	5 810

燃油助燃