

# 生物质锅炉 燃烧技术及案例

SHENGWUZHI GUOLU  
RANSHAO JISHU JI ANLI

孙风平 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 生物质锅炉

# 燃烧技术及案例

SHENGWUZHI GUOLU  
RANSHAO JISHU JI ANLI

孙风平 编著

## 内 容 提 要

本书以生物质锅炉燃烧实用技术案例为重点,对生物质锅炉燃烧技术进行了详细阐述;在对燃烧技术难题充分分析的基础上,给出了处理经验及解决措施。书中主要内容包括生物质锅炉燃烧的基本原理、生物质锅炉燃烧设备、生物质锅炉调试、生物质锅炉运行及生物质锅炉燃烧实用技术案例。

本书语言通俗,案例丰富,可供生物质电厂运行及检修人员使用,也可供相关专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

生物质锅炉燃烧技术及案例/孙风平编著. —北京:中国电力出版社,2014.1

ISBN 978-7-5123-5056-4

I. ①生… II. ①孙… III. ①生物燃料-锅炉燃烧  
IV. ①TK227.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 248363 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 7.375 印张 195 千字

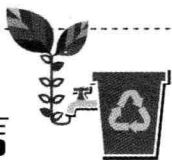
印数 0001—3000 册 定价 24.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 前 言



生物质锅炉床层燃烧是生物质电厂的核心技术，关系着生物质电厂的成败。该锅炉燃烧技术从国外引进后，由于国内外入炉燃料存在很大的差别，很多理论与国内的实际不符（例如进入炉膛的热风温度  $193^{\circ}\text{C}$  太低，锅炉受热面布置不合理），还没有形成类似煤粉锅炉燃烧那样的成熟技术。笔者在国能生物发电技术咨询有限公司从事锅炉技术工作，迫切感受到生物质燃烧是一个亟待解决的问题。

生物质锅炉燃烧技术的不成熟，燃料的品种、质量存在问题，使得生物质电厂锅炉燃烧很不理想，燃料标杆单耗居高不下，机械和化学不完全燃烧产物太高，燃烧不能完全。烟气中携带着大量可燃物，使锅炉受热面遭受磨损及腐蚀，大大缩短了运行周期。

从国内已经运行的生物质电厂来看，重要的工作就是锅炉燃烧，关键的事项就是燃料的品种、质量。上述问题得不到解决，生物质电厂作为绿色环保能源企业在我国就会举步维艰、难以为继。

生物质锅炉燃烧技术的论述书籍在我国还很少，尤其是缺少具有理论高度和实验深度的读本。出于对锅炉事业的热爱，笔者凭借一个老锅炉人的经验，探讨出一套适合国情的、通俗的、切合实际的、有实际指导意义的锅炉燃烧技术。

本书第 5 章是笔者在基层生物质电厂工作时，遇到的锅

炉燃烧技术难题在分析解决的过程中得出的经验和解决措施。希望对有志于生物质锅炉研究的学者，会有所启发。

在编写本书的过程中，得到了国能生物发电集团公司常务副总裁刘建国、生产技术部高级工程师宋宏伟、技术咨询公司高级工程师李宗瑞、华东分公司工程师仝元华的大力支持和帮助。尤其是我的老师山东黄台电厂退休工程师李志华给予了很大帮助，在此一并表示感谢。

限于经验和水平，书中疏漏和不足之处，恳请各位专家和读者不吝批评指正。

孙风平

2013年12月



# 目 录

## 前言

	<b>1 生物质锅炉燃烧的基本原理</b> .....	1
	1.1 生物质燃烧过程 .....	1
	1.2 影响燃烧过程的变量 .....	3
	1.3 生物质的组成要素 .....	6
	1.4 生物质燃烧技术 .....	9
	<b>2 生物质锅炉燃烧设备</b> .....	17
	<b>3 生物质锅炉调试</b> .....	24
	3.1 概述 .....	24
	3.2 设备的技术规范 .....	25
	3.3 调试准备及分系统试运 .....	26
	3.4 烟风系统调试 .....	27
	3.5 风量标定调试 .....	31
	3.6 锅炉动力场试验 .....	34
	3.7 锅炉漏风试验 .....	36
	3.8 给料系统调试 .....	37
	3.9 除渣系统调试 .....	41
	3.10 锅炉蒸汽吹管 .....	45
	3.11 安全阀校验 .....	55
	3.12 锅炉严密性试验 .....	58
	3.13 锅炉吹灰系统调试 .....	59

3.14	布袋除尘器及输灰系统调试 .....	62
3.15	机组整套启动试运 .....	67
3.16	总体评价 .....	77



#### 4 生物质锅炉运行 .....

4.1	锅炉点火启动 .....	78
4.2	生物质锅炉正常运行调整 .....	82
4.3	生物质锅炉停炉和保养 .....	89



#### 5 生物质锅炉燃烧实用技术案例 .....

5.1	生物质锅炉燃烧探讨 .....	93
5.2	锅炉不能满负荷运行的原因分析 .....	100
5.3	锅炉不完全燃烧的处理意见 .....	102
5.4	锅炉异常运行时的临时处置 .....	104
5.5	黄秆锅炉燃烧调整的原则 .....	107
5.6	促成炉排高端着火的措施 .....	109
5.7	灰秆锅炉燃烧调整的设想 .....	114
5.8	燃料水分大时的燃烧调整试验 .....	118
5.9	烟秆不能作为生物质锅炉燃料的建议 .....	130
5.10	除尘器投入的技术措施 .....	132
5.11	锅炉存在问题的诊断、分析及处理措施 .....	133
5.12	锅炉高温腐蚀的探讨 .....	135
5.13	锅炉高温腐蚀的燃烧调整 .....	138
5.14	锅炉一、二次风率严重失调的认识 .....	141
5.15	锅炉排烟温度高及引风机振动分析 .....	145
5.16	锅炉燃烧结构不合理的分析 .....	147
5.17	锅炉炉排低端灰渣烧不透的分析 .....	149
5.18	降低锅炉排烟温度的基本思路 .....	151
5.19	燃料水分、灰分太高时的燃烧调整 .....	153

5.20	锅炉的技术改造和效果 .....	158
5.21	对锅炉燃烧调整的看法 .....	163
5.22	锅炉燃烧的优化调整 .....	166
5.23	锅炉燃烧调整的一般措施 .....	172
5.24	燃料灰分大时的运行调整 .....	184
5.25	布袋除尘器的问题 .....	185
5.26	锅炉燃烧的诊断与调整 .....	187
5.27	锅炉运行的问题和设备改造 .....	193
5.28	对 48t/h 锅炉的探讨 .....	196
5.29	锅炉烟气热损失的影响 .....	198
5.30	锅炉的试验与调整 .....	199
5.31	后拱水冷壁高温腐蚀的防止 .....	205
5.32	关于生物质锅炉联合炉排改造的一点看法 ..	213
5.33	炉膛前拱结焦的分析 .....	215
5.34	锅炉炉排风孔改造后给燃烧带来的影响 ..	217
5.35	炉排孔眼扩大后对燃烧影响的思考 .....	219
5.36	48t/h 生物质锅炉改造方案 .....	220
5.37	新建生物质锅炉燃烧调整的指导意见 .....	222



参考文献 .....	228
------------	-----





# 1 生物质锅炉燃烧的基本原理

## 1.1 生物质燃烧过程

生物质通过化学的热解、气化和燃烧作用，转化为热量。就是将光合作用生成的生物质（树皮、树根、棉花秸秆、玉米秸秆、小麦秸秆和各种稻壳等），通过锅炉燃烧，发出热量，也就是再生能源的利用。

生物质燃烧成本低，风险低，效率高。减少污染物（ $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等）和温室气体（ $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 等）的排放，保护生态环境。

### 一、概述

干燥和热解是生物质燃烧的初级阶段，各个阶段的重要性各不相同，取决于燃烧技术、燃料特性和燃烧过程等条件。利用高温空气，可将干燥过程固定碳燃烧过程分离。在炉排上各个阶段位置不同、燃烧时间段不同，挥发分和固定碳燃烧阶段有着明显区别。生物质颗粒在燃烧过程中会出现重叠现象。

燃料进入炉排，在一定时间里，经历了干燥—挥发分析出—固定碳氧化过程。

### 二、相关名词解释

#### 1. 干燥

水分在较低温度时（ $<100^\circ\text{C}$ ）已经开始蒸发。因为蒸发利用了燃烧过程释放的能量，这就降低了燃烧室温度，并延缓燃烧进程。例如，根据国能生物质电厂的实验证明，在燃用树皮时，含水量超过 45% 时锅炉燃烧工况很难构成；超过 60%，将无法

维持正常燃烧。湿燃料需要相当的热量来蒸发其中的水分，随后加热蒸汽，这时温度低于燃烧所需的最低温度。某企业的其中一个电厂就是因为燃料水分太大，带不满负荷、湿蒸汽膨胀，致使引风机出力达到最大，燃烧严重缺氧。现在该企业各电厂都在采用燃料晾晒的办法，减少燃料水分含量。

## 2. 热解

热解指挥发分释放过程中，缺氧状态下燃料的化学变化。热解产物主要有焦油、木炭和低分子气体，CO 和 CO<sub>2</sub> 产生的数量较多。燃料的种类、温度、压力、升温速率和反应时间都会影响热解产物数量和特性。

燃料温度升高时，首先发生干燥，当温度达到 470℃，燃料开始热解，热解速率随着温度升高而加速。

根据实验，黄秆生物质锅炉的点火风不宜开启太大，以保持炉排前部的温度，利于燃料的干燥和分解。

当温度达到 670℃时，大部分挥发分析出，热解速度迅速下降。热解质量损失主要发生高温区。

## 3. 气化

气化定义为有氧化剂参与的热解过程，是指将固体燃料转化为气体燃料的热化学过程。温度一般在 1000℃以上，生物质气化就是利用空气中的氧气作气化剂，将固体燃料中的碳氧化生成可燃气体的过程。

根据经验，在气化过程中，一定要加强该区域的二次风，以利于燃烧完全。

## 4. 燃烧

燃烧是指燃料与氧结合，在炉膛高温区产生的强烈氧化还原反应，释放出热量。燃烧分为以下三个阶段：

(1) 预热阶段。该阶段主要依据燃料的挥发分和干燥程度来进行。

(2) 燃烧阶段。该阶段是锅炉燃烧的根本，需要保持较高的炉膛温度和充分的氧量，80%的可燃物在 1~2s 的燃烧时间里完

成，需要尽量地增加燃尽时间，以保障燃烧程度。

(3) 燃尽阶段。该阶段的燃烧时间长，20%的可燃物在80%的时间里燃烧完尽，因此，锅炉上层的燃尽风一定要跟上，并且要有足够的温度。

## 1.2 影响燃烧过程的变量

### 一、含水量

不同种类燃料的含水量区别很大，取决于燃料种类和储存方式。为了保持生物质燃烧稳定性，在使用之前需要晾晒（有条件时要增设干料棚）。含水量增加会降低炉膛蓄热温度，增加燃料在燃烧室的不完全燃烧。含水量过大是国能生物质电厂带不上负荷的主要原因。含水多的燃料着火困难，影响燃烧速度，使炉内温度降低，使机械和化学不完全燃烧热损失增加，当燃料水分大于45%时，燃烧就非常困难。在燃烧过程中，水分因蒸发、汽化要消耗大量的汽化热。水分含量大的燃料其燃烧后的烟气体积较大（水变为蒸汽比体积增加了1200倍），由于出口烟气有130℃左右温度，因此随烟气带走的热量损失较多（此现象可以通过烟囱的排烟，观测到呈现大量乳白气体），锅炉的热效率就较低。此外，烟气体积增加，引风机消耗的电能也随之增加，引风机功率增加了，使得烟气流速加快，燃烧上移，很难构建合理的燃烧工况，保障炉排燃烧动力平衡（养不住底火）。

烟气流速加快使得烟气携灰量也增加，加速了对炉膛尾部受热面的磨损。

### 二、发热量

#### (一) 概念

(1) 高位发热量（湿基）。指1kg燃料在单位时间里完全燃烧所放出全部的热量，单位MJ/kg。

(2) 低位发热量（干基）。是燃烧热量中，去掉燃烧时生成的汽化潜热（水蒸气）所释放的热量，单位MJ/kg。

## （二）影响发热量的因素

影响发热量的一般因素是燃料中的水分、灰分和杂质，这也是国内生物质电厂共同存在的问题（燃料水分和灰分过大的问题不解决，生物质发电企业是很难发展的）。过湿、过长的燃料在取料机、给料机里堵塞，在炉排上烧不透，增加了不完全燃烧损失（某电厂由于入炉燃料灰分通常大于 40%，所以长期带不上高负荷）。

## 三、过量空气系数

理论空气量与实际空气量的比值叫做过量空气系数。

生物质锅炉的燃烧过量空气系数要大于 1，通常大于 1.25，以保证助燃空气与可燃物的充分混合。

过量空气系数沿用了煤粉锅炉的数据，现在无权威论证。实际的锅炉燃烧因生物质挥发分高、燃烧速度快，应该是富氧燃烧。

过量空气系数主要是通过二次风来提供，实践证明，上层二次风要尽量大，以过热器不超温为原则，以利于燃烧工况的构建和燃料的燃尽。试验证明：生物质锅炉燃烧氧量任何时候都要大于 3%，当炉膛温度能够保持较高时，氧量保持在 3%~5%才能够燃烧完全。因为生物质颗粒不均、燃烧区域不同，富氧燃烧就成了生物质锅炉区别于煤粉锅炉的一个显著特点（国内某电厂的前、后上二次风开到 40%以上、氧量为 5%，燃烧工况良好，过热器区域的灰为灰白色，可以认为是国内生物质锅炉燃烧的样板；丹麦生物质锅炉一、二次风率比例：黄秆锅炉为 3:7，灰秆锅炉为 4:6）。可是现在国内生物质锅炉大多没有照此办理，主要原因是国内燃料质量太差，水分、灰分的含量太高。许多生物质锅炉风率比例变成了 5:5 或者 8:2。尤其是黄秆锅炉一次风用少了就不能浮动厚料层、减少料层厚度，炉膛蓄热就不能满足高负荷。

## 四、空气温度

生物质电厂锅炉的热风，采用的是除氧器来水加热空气的方

法，因此，需要尽量提高风温，促成炉排高端着火。

### 五、燃料种类

不同种类燃料的不同特性影响着燃烧过程，其中主要影响因素为燃料组分、挥发分和固定碳含量、热性能、密度、孔隙率、尺寸和活性表面等。燃料组分随燃尽程度不同而发生持续变化。与煤相比，生物质通常挥发分含量较高，固定碳含量较低，属于高活性燃料。但不同生物质燃料的挥发分含量不同，影响燃料的热性能。各种生物质燃料的不同化学结构和结合键也影响燃料的热性能。表现出挥发分析出规律明显不同。不同生物质燃料的密度也有较大的不同，例如，树皮和稻壳的密度相差很大。燃料密度大，影响了单位燃烧室容积，同时也影响燃料燃烧特性。孔隙率影响燃料的反应性（单位时间质量损失），影响挥发分析出速率。尤其当粉状燃料燃烧时，烟气中携带大量的颗粒物，小颗粒在燃烧室中停留时间短，如不能压制火焰，势必造成火焰上升，化学不完全燃烧热损失增加，引风机叶轮磨损。某生物质电厂调试期间，燃烧稻壳，锅炉引风机叶轮一个月之内就磨透了。

### 六、燃烧温度

燃烧温度是锅炉燃烧的基础，燃烧温度不够就不能形成燃烧的优化，就无法保障燃烧的完全。强化锅炉燃烧的三强理论如下：

- (1) 强化燃烧的初始阶段。
- (2) 强化高温烟气和燃料的对流换热。
- (3) 强化燃料燃烧时还原气氛的高浓度聚集。

不管烧什么燃料，一定要想办法保持炉膛温度，炉膛温度低于  $850^{\circ}\text{C}$  就不能形成强化燃烧。

试验证明，炉膛温度在  $400^{\circ}\text{C}$  以上锅炉点火成功，炉膛温度在  $600^{\circ}\text{C}$  以上锅炉可以形成连续燃烧，炉膛温度在  $850^{\circ}\text{C}$  以上才可能形成强化燃烧。

### 七、配风

有效的配风是锅炉燃烧的关键，一次风能够吹动燃料，增加

空隙着火面；二次风压制火焰，形成强化燃烧。以增加燃烧时间、保持炉膛温度、减少不完全燃烧热损失（推荐某生物质电厂配风参数，以30MW负荷为例，锅炉总风量为7.5kPa，一次风高端50%、中端60%、低端30%，前、后墙二次风50%，燃尽风20%）。

## 1.3 生物质的组成要素

### 一、生物质有机燃料

#### 1. 纤维素

纤维素是自然界中最为丰富的碳水化合物，是植物细胞壁的主要成分。例如，木材中纤维素的含量为40%~55%，禾本科植物如小麦、稻子、玉米等的茎秆中纤维素的含量为40%~50%，而棉花中含量则为88%~90%。因此，可以说纤维素是自然界中最丰富的一种可再生资源。

纤维素的密度为 $1.5\sim 1.55\text{kg/m}^3$ ，比热容为 $1.34\sim 1.38\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。纤维素对热传导作用轴向比横向大，其值大小与纤维素的空隙度有关，热值为 $18\,000\text{kJ/kg}$ 。

纤维素对水有强烈的吸着作用，这一性质是纤维素最重要的物理性质。纤维素的化学性质主要取决于分子中的羟基和醛基的化学性质，主要表现为纤维素的酯化和醚化反应、氧化反应、碱性降解和酸性水解。

#### 2. 木质素

木质素是仅次于纤维素的一种最丰富且重要的大分子有机聚合物，存在于植物细胞壁中。木质素在木材中的含量一般为20%~40%，在本科植物中的含量一般为14%~25%。

### 二、生物质燃料的工业分析

#### 1. 生物质的水分

(1) 外表水分。生物质的外表水分是指以机械方式附着在生物质的表面及较大毛细孔中而存留的水分，是可以通过自然干燥

而去掉的水分。

(2) 内在水分。是指生物质以物理化学结合力吸附在生物质的内部毛细管中的水分。必须在  $105\sim 110^{\circ}\text{C}$  的温度下干燥才能除去（干燥温度借用了煤粉的试验数据，真实的生物质干燥温度有待试验）。

(3) 化合结晶水。是生物质中矿物质相结合的水分，它在超过  $200^{\circ}\text{C}$  时才可以分解逸出。

### 2. 生物质的挥发分

把样品与空气隔绝在一定的温度下，加热到一定时间后，从生物质中有机物质分解出来的液体和气体产物的总和称为挥发分。挥发分高的燃料易于着火，燃烧稳定，但是火焰温度较低。

### 3. 灰分

生物质中的灰分是指生物质中所有可燃物在一定温度 [ $(815\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ] 下完全燃烧后所剩余的残渣。灰分的熔点不低于  $1200^{\circ}\text{C}$ （此值参照煤粉灰分，国家生物质燃烧科研部门未出具体数值，根据国能成安和威县电厂的经验，水冷壁后拱结焦温度大于  $1300^{\circ}\text{C}$ ）。

### 4. 固定碳

生物质试样燃烧后，其中的灰分转入焦渣中，焦渣质量减去灰分质量，就是固定碳质量。

## 三、燃料的基准

### 1. 收到基

以收到状态的燃料为基准，即包括水分和灰分内所有燃料组成的总和作为计算基准，称收到基（或应用基）。

### 2. 空气干燥基

以实验室条件下，自然风干的燃料试样为基准，即燃料试样与实验室空气湿度达到平衡时的燃料作为计算基准，称为空气干燥基（或分析基）。

### 3. 干燥基

以在烘箱中 ( $102\sim 105^{\circ}\text{C}$ ) 烘干后失去全部游离水分（外在

水分和内在水分)的燃料试样为计算基准,称干燥基。

#### 4. 干燥无灰基

以去掉水分和灰分的燃料作为计算基准,称干燥无灰基(或可燃基)。

### 四、生物质的元素分析

#### 1. 碳含量

碳是燃料中最基本的可燃元素,1kg 碳完全燃烧时生成二氧化碳,可放出大约 33 858kJ 热量。

#### 2. 氢含量

氢是燃料中仅次于碳的可燃成分,1kg 氢完全燃烧时,能放出 125 400kJ 的热量。

#### 3. 硫含量

硫是生物质中的可燃成分,也是有害的成分。1kg 硫完全燃烧时,可放出 9033kJ 的热量。

#### 4. 氮含量

氮在高温下与氧发生燃烧反应,生成  $\text{NO}_x$ , 排入空气,污染环境。

#### 5. 磷和钾含量

它们是生物质燃料特有的可燃成分。磷燃烧后产生五氧化二磷,钾燃烧后产生氧化钾,它们就是草木灰的磷肥和钾肥。

#### 6. 氧含量

氧不能燃烧释放热量,但加热时,氧极易使有机组分分解成挥发性物质,氧是燃料中的杂质。

#### 7. 秸秆中各元素的含量

碳为 48.60%, 氢为 5.96%, 氧为 43.20%, 氮为 0.91%, 硫为 0.10%~0.30%。

#### 8. 木材中各元素的含量

碳为 50.70%, 氢为 6.06%, 氧为 42.80%, 氮为 0.37%, 硫为 0.10%,



9. 收到基热值（高位发热量）

玉米秸为 19 065J/kg，玉米芯为 19 029J/kg，麦秸为 19 876 J/kg，稻壳为 17 370J/kg，花生壳为 22 869J/kg，棉花秸为 19 825J/kg，杨木片为 19 239J/kg，松木片为 20 353J/kg。

## 1.4 生物质燃烧技术

生物质燃烧就是燃料在炉膛里，与高温烟气结合，产生强烈的氧化还原反应，释放出热量。

### 一、生物质干燥、分解

#### 1. 预热干燥阶段

在该阶段，生物质被加热，温度逐渐升高。当温度达到 100℃ 以上时，生物质表面和颗粒缝隙的水被逐渐蒸发出来，生物质被干燥，生物质的水分越多，干燥所消耗的热量也越多。

燃料水分越大炉排高端一次风需要量就越大。

#### 2. 热分解阶段

生物质继续被加热，温度继续升高，达到一定温度便开始析出挥发分，就是一个热分解反应。

#### 3. 挥发分燃烧阶段

随着温度继续提高，挥发分与氧的化学反应速度加快，当温度升到一定高度时，挥发分就连续着火（根据点火时的观察：锅炉连续着火至少需要 600℃ 的炉膛温度）。

#### 4. 固定碳燃烧阶段

生物质中的固定碳在挥发分燃烧初期被包围着，氧气不能接触碳的表面，经过一段时间后，挥发分的燃烧快要終了时，氧气接触到炽热木炭，就可发生燃烧反应。

此阶段发生在炉排中端，属于典型的扩散燃烧工况。

### 二、燃尽阶段

固定碳含量高的生物质燃烧时间较长，而且后期燃烧速度更