第 26卷第 2期
2010年 4月

上海电力学院学报
Journal of Shanghai University of Electric Power

Vol. 26 No. 2
Apr. 2010

文章编号：1006－4729(2010)02－0131－04

秸秆生物质燃料燃烧特性分析

潘雯瑞，任建兴

(上海电力学院 能源与环境工程学院，上海 200090)

摘 要：通过分析秸秆生物质燃料与煤炭燃料燃烧特性，找出影响其安全稳定燃烧的因素，并比较了具有代表性的秸秆生物质的结渣特性，总结了主要碱金属以及氯对于生物质燃烧设备所产生的不利影响，并提出了相应的对策.

关键词：秸秆生物质；燃料特性；燃烧分析
中图分类号：S216.2 文献标识码：A

Analysis of Straw Biomass Combustion Characteristics

PAN Wen-rui, REN Jian-xing
(School of Thermal Power and Environmental Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The factors affecting the security and stability of combustion are found out by the analysis of the straw biomass and the characteristics of coal fuel combustion, and the slagging characteristics of representative straw biomass are compared, the adverse effects of main alkali metals and chlorine on biomass combustion equipment are analysed, and appropriate countermeasures are put forward.

Key words: straw biomass; combustion characteristics; combustion analysis

生物质是一种贮存太阳能的可再生能源，用现代技术可以转化成固态、液态和气态燃料，在我国是仅次于煤炭、石油和天然气的能源，并占有重要地位[1]. 生物质资源包括薪柴、农林作物，尤其是为了生产能源而种植的能源作物，以及农业和林业残剩物，食品加工和林产品加工的下脚料，城市固体废弃物、生活污水和水生植物等[2].

欧洲主要国家生物质能的开发利用均以丰富的森林资源为基础. 而我国有丰富的农作物秸秆资源，国内现有的生物质锅炉主要以燃烧农作物秸秆为主，但由于我国秸秆生物质资源的开发利用尚处于起步阶段，其中约有 1.45×10^{8} t用作畜牧饲料，9.1×10^{7} t用作还田肥料，1.4×10^{7} t用作工业原料，2.8×10^{8} t作为农民传统的生活燃料，余下的 1.0×10^{8} t左右在田间地头被直接焚烧了，这不仅污染环境，还造成能源浪费[3]. 因此，积极开发利用生物质能对解决能源短缺和协调环境发展有重要意义.

1 生物质燃料特性分析

根据发电燃烧的特点，农作物秸秆一般分为两类：一类为黄色秸秆又称软质秸秆，主要包括麦

收稿日期：2009－07－08
作者简介：潘雯瑞(1985－)，女，在读硕士，河南正阳人. 主要研究方向为燃烧与污染物控制. E-mail: 2008panwenrui@163.com.

秸、玉米秸和稻草等,在生物质秸秆燃烧应用中占很大比重;另一类为灰色秸秆又称硬质秸秆,主要包括棉秆、麻秆等[4]. 本文以我国常见的、有代表性的3种黄色秸秆(稻草、麦秸和玉米秸)为研究对象,分析其燃料特性,并判别其燃烧过程中的结渣特性. 通过表1[5,6]和表2[6,7]可以明显看出,不同生物质的元素分析结果不同,灰分组成也有明显的差异.

表1 常见生物质燃料和烟煤的工业成分分析及元素构成分析

种类	工业分析成分/%				元素组成/%				低位发热值
	M_{daf}	A_{daf}	V_{daf}	C_{gd}	C_{daf}	H_{daf}	S_{daf}	N_{daf}	Q^{y}_{dw}/kJ·kg^{-1}
稻草	4.97	13.86	65.11	16.06	48.30	5.30	0.09	0.81	13 980
麦秸	4.93	8.90	67.36	19.35	49.60	6.20	0.07	0.61	15 370
玉米秸	4.87	5.93	71.95	17.75	49.30	6.00	0.11	0.70	15 680
烟煤	1.09	24.64	31.58	42.69	57.12	2.91	0.82	0.98	24 300

表2 常见生物质燃料和烟煤的灰分组成 %

生物质灰分	灰分含量	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Cl
麦秸	7.0	55.3	1.9	0.1	0.7	6.1	1.1	1.7	25.6	4.4	1.3
稻草	18.7	74.7	1.0	0.1	0.8	3.0	1.7	1.0	12.3	1.2	1.2
玉米秸	3.2	72.2	4.3	0.2	4.7	5.1	3.9	1.3	4.4	0.1	22.8
烟煤	11.7	46.9	19.6	1.3	23.8	2.2	1.4	0.4	0.5		

生物质的挥发分含量较多,特别是玉米秸的挥发分高达70%,远远超过烟煤;生物质固定碳含量较低,不到20%,而烟煤的固定碳含量超过生物质的两倍;另外,生物质的含硫量和热值明显低于烟煤. 3种生物质中灰分含量相差很大,玉米秸的灰分含量最低,稻草的灰分含量最高,麦秸和玉米秸的灰分含量远低于烟煤;生物质灰分中SiO_2和CaO含量较高,均超过烟煤,其中SiO_2含量超过总灰分的50%;另外,生物质灰中的碱金属氧化物(K_2O+Na_2O)的含量远远高于烟煤.

生物质灰熔点的高低和灰的成分有关,不同的生物质种类和不同的产地都对其有影响. 表3列出了灰分中常见化合物的熔化温度.

表3 灰分中常见化合物的熔化温度 ℃

化合物	熔化温度	化合物	熔化温度
SiO_2	1 716	CaO	2 521
Al_2O_3	2 043	MgO	2 799
TiO_2	1 837	Na_2O	800~1 000
Fe_2O_3	1 566	K_2O	800~1 000

由表3可以看出,生物质中低熔点的成分(如Fe_2O_3)含量越多,灰熔点就越低,而生物质中的K和Na可以降低灰熔点,Ca和Mg会提高灰熔点;S元素在燃烧过程中容易与K元素形成低熔点化合物. 生物质灰中的K,Na含量远远高于烟煤,所以灰熔点较低. 无机元素的含量直接影响灰熔点. 通过对生物质灰分的分析可以看出,生物质比烟煤的灰熔点低且易结渣. 据实验数据统计,木质生物质灰的熔融温度为1 200~1 250 ℃,麦秸、农作物的熔融温度为750~1 100 ℃[8]. 各生物质的灰熔点如表4所示[9].

表4 生物质的灰熔点 ℃

生物质	变形温度	软化温度	流动温度
玉米秸	1 040	1 220	1 260
麦秸	950	980	1 080
稻秸	1 010	1 130	1 250
烟煤	1 350	1 370	1 400

由表4可以看出,生物质灰熔点从低到高的顺序是麦秸、稻草、玉米秸.

生物质特性对燃烧的主要影响有以下4点:一是含水量高、热值低,产生的烟气体积较大,排烟热损失较高,因而炉膛温度低,燃烧效率也较低;二是挥发分含量高,析出速度快,燃料在炉内能快速着火燃烧,燃烧时需补充大量空气,否则会造成空气供给量不足,难以保证生物质燃料充分

燃烧, 从而影响锅炉的燃烧效率; 三是固定碳的含量远小于烟煤, 由于固定碳的燃点高, 其含量越高越难燃烧, 因此生物质很容易燃烧; 四是生物质燃料中的硫、氮、碳含量较低, 可以降低电厂 SO_2 和 NO_x 的排放, CO_2 近似零排放.

2 生物质结渣特性的判别

判定煤的结渣性能的主要依据有灰熔点 (t_2) 和煤灰化学组成 (包括碱酸比 B/A, 硅比 G, 硅铝比 S/A) 等判别指数. 由于生物质灰与煤灰渣的差异较大, 并非已有的判别煤结渣指数均能可靠地预测生物质结渣特性, 如灰熔点判定法就不适合作为生物质燃料积灰结渣的指标[10].

目前, 主要是根据灰成分, 采用碱性指数、碱酸比的方法评价生物质积灰结渣的特性.

2.1 碱性指数

碱性指数是根据生物质燃料的单位发热量中的碱金属氧化物 (K_2O+Na_2O) 质量含量 (kg/GJ) 的高低来判别生物质的结渣特性, 碱性指数的计算式为:

$$\frac{1}{Q}Y_f^a(Y_{K_2O}^a+Y_{Na_2O}^a) \qquad (1)$$

式中: Q——燃料在干燥基和定容条件下的高位发热量, GJ/kg;

Y_f^a——燃料中的灰分百分含量, %;

$Y_{K_2O}^a$, $Y_{Na_2O}^a$——灰分中碱性氧化物 (K_2O, Na_2O) 的百分含量, %.

根据式 (1) 的计算结果, 其判别标准是当碱性指数小于 0.17 时, 发生结渣的可能性极小; 当碱性指数为 0.17~0.34 时, 发生结渣的可能性增加; 当碱性指数大于 0.34 时, 发生结渣现象.

2.2 碱酸比

判别生物质结渣特性的另一种方法为酸碱比, 通过碱性氧化物 (Fe_2O_3, CaO, MgO, K_2O, Na_2O) 与酸性氧化物 (SiO_2, TiO_2, Al_2O_3) 的比值来判别, 表达式为:

$$\frac{B}{A}=\frac{Fe_2O_3+CaO+MgO+Na_2O+K_2O}{SiO_2+Al_2O_3+TiO_2} \qquad (2)$$

式中, 各种氧化物的分子式代表其在灰分中的百分含量.

根据式 (2) 的计算结果可以判别, 当 B/A< 0.5 时为低结渣倾向; B/A=0.5~1.0 时为中等结渣倾向; B/A>1.0~1.75 时为严重结渣倾向.

根据上述结渣特性的判别方法对典型的秸秆生物质燃料和烟煤进行判别, 相关计算结果如表 5 所示.

表 5 常用生物质和烟煤的碱性指数和酸碱比

生物质	碱性指数 /kg·GJ^{-1}	酸碱比 /%	结渣性
麦 秸	1.07	0.615	较 强
稻 草	1.64	0.249	强
玉米秸	0.10	0.254	弱
烟 煤	0.03	0.416	弱

由表 5 可知, 稻草的结渣性最强, 其次是麦秸, 玉米秆的结渣可能性较小. 由碱酸比判别法得到的结果与碱性指数法相比存在一些差异, 对于生物质而言, 说明用酸碱比判别法判别结渣特性有待进一步研究.

3 生物质锅炉燃烧存在的主要问题

生物质是清洁的可再生能源, 这是生物质锅炉发展的主要优势之一. 然而由于秸秆生物质自身的燃料特性, 以及碱金属和氯的存在, 使得生物质直燃锅炉比燃煤锅炉更容易产生积灰、结渣和腐蚀等问题. 目前生物质利用中普遍存在的碱金属问题, 直接制约了生物质锅炉的发展, 这已引起国内外学者的广泛关注.

3.1 主要碱金属对结渣的影响

结渣是个复杂的物理化学过程, 其主要形态是以黏稠或熔融的沉淀物形式出现, 而造成结渣的一个重要原因是燃料层的温度高于灰的软化温度. 在燃煤锅炉的燃烧过程中, 过量空气系数、炉膛温度等参数对结渣率有重要影响, 而生物质具有区别于煤炭的燃料特性, 除了以上参数的影响外, 碱金属特别是 K, Cl, S 元素对积灰结渣和腐蚀有重要影响.

K 元素在秸秆生物质中含量较高, 主要形成氧化物、氯化物和硫酸盐, 这些化合物都表现为低熔点. 当 K 及其化合物凝结在飞灰颗粒上时具有黏性和低熔点, K 的凝结速度和扩散速率对灰粒熔点和黏性有着决定性作用[6].

Cl 元素在生物质燃烧中起着传输作用, 有助于碱金属元素从燃料颗粒内部迁移到颗粒表面与

其他物质发生化学反应,而且 Cl元素有助于碱金属元素的气化,与碱金属物质反应生成相对稳定且易挥发的碱金属氯化物[6]. 另外, Cl元素,特别是 K元素的化合物,还有助于增加无机化合物的流动性. 碱金属, S, Cl元素挥发出来,相互之间发生化学反应,然后以硫酸盐或氯化物的形式凝结在飞灰颗粒和受热面壁面上,多数硫酸盐呈熔融状态,增加了沉积层表面的黏性,加剧结渣程度. 随着碱金属元素气化程度增加,沉积物数量及黏性也不断增加. 同时,还会发生气体和沉积物灰渣本身的反应,使结渣层更厚.

我国常见的 3种秸秆生物质 (稻草、麦秸和玉米秸)的灰分 (表 2)中,稻草的碱金属氧化物 ($K_2O+SiO_2+SO_3$)含量约为 88.2%,麦秸约为 85.3%,玉米秆约为 76.7%. 通过以上碱金属对结渣影响的分析可以看出,稻草的结渣性大于其他两种秸秆.

3.2 氯对腐蚀的影响

生物质燃料的 Cl含量比煤炭高, Cl元素可以将 K从稳定的硅酸盐中吸收出来,形成低熔点腐蚀性强的硫酸盐. 一方面,这些硫酸盐在管壁上结成釉瓷状的渣膜,该渣层在表面温度升高融化时放出 SO_3并向内外扩散,使管壁氧化层破坏;另一方面,这些硫酸盐再吸收 SO_3并与 Fe_2O_3, Al_2O_3生成焦硫酸盐[6],该盐通常在管壁温度下呈熔融状态,对管壁的氧化膜造成腐蚀.

另外, HCl也是 Cl析出的一种重要形式,它对于金属的高温腐蚀有重要影响. 发生氯腐蚀的原因是由于燃料中存在一定量的 NaCl和 KCl, NaCl在高温下以气态形式存在,在炉膛内发生如下反应:

$$\begin{cases} NaCl+H_2O \rightarrow NaOH+HCl \\ 2NaCl+SO_2+\frac{1}{2}O_2+H_2O \rightarrow Na_2SO_4+2HCl \\ 2NaCl+SO_2+H_2O \rightarrow Na_2SO_3+2HCl \end{cases}$$

生成的 HCl使管壁氧化膜遭到破坏,生成气化点很低的 $FeCl_2$并随即挥发,从而使管壁金属直接受到 HCl的腐蚀,同时,由于氧化膜遭到破坏,使得 H_2S也能到达金属表面,加快了管壁金属的腐蚀速度.

由表 2可知,稻草和麦秸灰分中的 Cl含量分别为 1.2%和 1.3%,而玉米则高达 22.8%. 可见,在玉米秆的燃烧过程中 Cl对腐蚀的影响会更加严重.

4 结束语

我国的生物质直燃技术主要以燃烧农作物秸秆为主,而秸秆生物质的燃料特性和煤炭有很大差距,这些燃料特性导致不同生物质结渣特性的差异. 在我国具有代表性的 3类生物质秸秆 (稻草、麦秸和玉米秸)中,稻草的结渣性远高于玉米秸,生物质中碱金属和 Cl的含量会加剧结渣和腐蚀的可能. 因此,研究生物质燃料特性有利于减轻燃烧中存在的结渣腐蚀等问题,并可促进生物质燃烧技术的发展.

参考文献:

[1] 邓可蕴. 21世纪我国生物质能发展战略 [J]. 中国电力, 2000, (9): 82-84.
[2] 张明, 袁益超, 刘聿拯. 生物质直接燃烧技术的发展研究 [J]. 能源研究与信息, 2005, 21(1): 15-20.
[3] 马洪儒, 张运真. 生物质秸秆发电技术研究进展与分析 [J]. 水利电力机械, 2006, 28(12): 9-13.
[4] 朱万斌, 邱化蛟, 程序. 秸秆直燃发电的问题与建议 [J]. 科技导报, 2007, 22(6): 7-8.
[5] 唐红英, 胡延杰. 国外生物质能源产业发展的经验及启示 [J]. 世界林业研究, 2008, 21(3): 72-74.
[6] 杨勇平, 董长青, 张俊姣. 生物质发电技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 321.
[7] 中国华电集团公司. 生物质发电产业行业大聚焦 [EB/OL]. (2009-02-12), http://www.chd.com.cn.
[8] 阎维平, 陈吟颖. TK6生物质燃料结渣特性分析与判别 [J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(1): 49-54.
[9] 乐园, 李龙生. 秸秆类生物质燃烧特性的研究 [J]. 能源工程, 2006, (4): 30-33.
[10] 宋鸿伟, 郭民臣, 王欣. 生物质燃烧过程中的积灰结渣特性 [J]. 节能与环保, 2003, (9): 29-31.