

生物质成型燃料热水锅炉的设计与试验研究

赵迎芳，梁晓辉，徐桂转，叶芳，刘圣勇，孙建青

(河南农业大学机电工程学院，河南郑州450002)

摘要：在对生物质成型燃料元素分析及燃烧特性研究的基础上，设计生产了180kW生物质成型燃料热水锅炉，并进行了热性能试验。结果表明，在试验工况下锅炉燃烧效率达94.8%，热效率达78.2%，排烟损失为10.09%，气体不完全损失为0.522%，散热损失为7.9%。排烟中 NO_x ， SO_2 及烟尘浓度远远低于燃煤锅炉，且符合国家工业锅炉大气中污染物排放标准要求。

作物秸秆是来源于太阳能的一种可再生能源，具有资源丰富含碳量低的特点。加之在其生长过程中吸收大气中的 CO_2 而被称为清洁能源。美国在20世纪30年代研制成了螺旋式压缩机及相应的燃烧设备；日本在20世纪50年代研制出棒状燃料成型机及相关的燃烧设备。中国从20世纪80年代引进螺旋推进式秸秆成型机。但是，相应的专用生物质成型燃料燃烧设备的研制还很少，一些单位为燃用生物质成型燃料，在未弄清生物质成型燃料燃烧特性的情况下，盲目把原有的燃煤燃烧设备改为生物质成型燃料燃烧设备，改造后的燃烧设备存在着炉膛的容积、形状与生物质成型燃烧不匹配，锅炉的受热面与生物质成型燃料不匹配，过剩空气系数与生物质成型燃烧不匹配等原因，致使锅炉燃烧效率及热效率较低，污染物排放超标。因此，根据生物质成型燃料燃烧特性重新设计生物质成型燃料燃烧专用设备，对缓解农村能源紧张的局面，减轻温室效应，解决能源和环境协调发展问题都有重要的意义。

1 设计依据

1.1 生物质成型燃料与煤的元素分析比较

生物质成型燃料由水稻、小麦、玉米等秸秆压缩成型而来，在压缩过程中以物理变化为主，其元素组成与微观结构与原生物质秸秆基本相同。而煤是由远古植物遗体在地表湖沼或海湾环境中随着地壳的变动被埋入地下，长期处在温度、压力较高的环境中，原植物中纤维素、木质素经脱水腐蚀，其含氧量不断减少，而碳量不断增加，逐渐形成化学稳定性强、含碳量高的固体碳氢燃料。碳含量的规律是随煤的变质强度的加深而增加，一般含量50%~90%，在变质程度最高的无烟煤中则高达90%—98%，而在各种生物质成型燃料中碳含量集中在35%~42%；氢含量较低，为3.82%—5%；氮和硫对煤和生物质成型燃料而言都是有害物质。煤中氮含量在1%—3%，硫含量在1%—2%，而生物质成型燃料氮含量比煤低，不到1%，硫的含量更低，不到0.2%。因此，其造成的污染程度要低于煤；煤的挥发分含量随着煤的变质程度的加深而减少，烟煤中挥发分含量在10%~40%，秸秆成型燃料的挥发分均在60%—70%，远高于煤。因此，挥发分是设计锅炉时考虑的一个主要因素。由此，生物质成型燃料中硫、氮等元素含量较煤少。具有挥发分和炭活性高，同时生物质燃烧过程具有 CO_2 零排放的特点。这对于缓解日益严重的“温室效应”有着特殊的意义。

1.2 生物质成型燃料的燃烧特性

生物质成型燃料是经过高压而形成的块状燃料，其密度远远大于原生物质，燃烧相对稳定。虽然点火温度有所升高，点火性能变差，但比煤的点火性能好。由于生物质成型燃料是经过高压而形成的块状燃料，其结构与组织特征就决定了挥发分的逸出速度与传热速度都大大降低。但是与煤相比显得更为容易。因此，生物质成型燃料的挥发分特性指数大于煤的，其燃烧特性指数较煤的大。燃烧速度适中，能够使挥发分放出的热量及时传递给受热面，使排烟热损失降低。同时挥发分燃烧所需的氧与外界扩散的氧很好的匹配，燃烧波浪较小，减少了固体与排烟热损失。

2 生物质成型燃料热水锅炉的设计

2.1 生物质成型燃料热水锅炉的结构

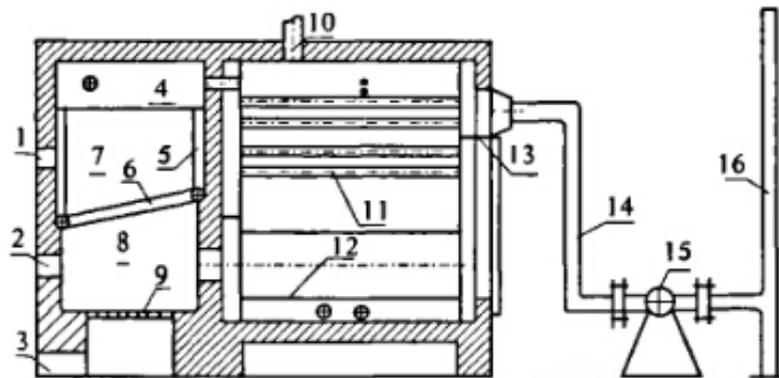
生物质成型燃料热水锅炉由上炉门、中炉门、下炉门、上炉排、辐射受热面、下炉排、风室、炉膛、降尘室、对流受热面、炉墙、排汽管、烟道、烟囱等部分组成，其结构布置如图1所示。

2.2 生物质成型燃料热水锅炉的工作原理

燃料通过中炉门在下炉排上点火成功后，成型块从上炉门进入上炉排，根据生物质容易着火的燃烧特性，片刻就会

燃烧起来。在引风机引导下下吸燃烧，上炉排漏下的生物质屑和灰渣到下炉排上继续燃烧和燃烬。成型燃料在上炉排上燃烧后形成的烟气和部分可燃气体透过燃料层、灰渣层进入上、下炉排间的炉膛进行燃烧，并与下炉排上燃料产生的烟气一起，经后墙上的烟气出口流向降尘室和后面的对流受热面。降温对流受热面采用烟管并联。

高温烟气在烟管中向上多回程流动，这样既能减少烟气的阻力，又能使气体在夹层内停留更多的时间，传热效率高，然后烟气流向烟道，此时温度都有很大的降低，再进入烟囱排向外界。这种燃烧方式，实现了生物质成型燃料的分步燃烧，缓解生物质燃烧速度，达到燃烧需氧与供氧的匹配，使生物质成型燃料稳定持续完全燃烧，起到了消烟除尘作用。



1. 上炉门;2. 中炉门;3. 下炉门;4. 上水箱;5. 水冷壁管 ;6. 上炉排;
7. 风室;8. 炉膛;9. 下炉排;10. 排汽管;11. 对流受热面;12. 降尘室;
13. 隔烟板;14. 烟道;15. 引风机;16. 烟囱
1. Up door ;2. Middle door ;3. Lower door ;4. Up bank ;5. Water wall ;6. Up grate ;7. Fan room ;8. Hearth ;9. Lower grate ;10. Steam discharge pipe ;11. Convection bank ;12. Dust fall ;13. Baffle plate ;14. Smoke aisle ;15. Blast blower ;16. Chimney

图 1 生物质成型燃料锅炉的结构

Fig.1 The structure figure of biomass briquette hot water boiler

2.3炉膛及炉排的设计

炉排尺寸和炉膛尺寸是燃烧设备的两组主要参数,它们的大小直接关系着燃料燃烧的温度场、浓度场及空气流动场分布,直接影响着燃料的燃烧状况,参照锅炉设计手册^[9-11],选取炉膛容积热负荷 $q_v = 300 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$;炉排面积热强度 $q_R = 350 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,炉膛容积(V)与炉排面积(A_R)计算公式为

$$V = BQ_{\text{net. ar}}/q_v \quad (1)$$

$$A_R = BQ_{\text{net. ar}}/q_R \quad (2)$$

式中: B 为燃料消耗量; $Q_{\text{net. ar}}$ 为燃料收到基低位发热量; q_v 为炉膛容积热强度; q_R 为炉排面积热强度.

2.4 受热面的设计

2.4.1 辐射受热面的设计为了降低生物质成型

燃料燃烧设备炉温度,并保证生物质成型燃料的充分燃烧,在炉膛中上辐射受热面的布置如图1所示,上炉排、上炉膛上部及四周都布置了辐射受热面。其辐射受热面的大小与布置形式与燃料种类、燃烧设备形式等因素有关。其计算公式为

$$\theta_{\text{II}} = N / (\alpha''_l + e) \quad (3)$$

式中: θ_{II} 为理论燃烧温度; α''_l 为炉膛出口过量空气系数, 选取 1.5; N 为燃质系数; e 为燃料系数.

$$Q_f = (\theta_{\text{II}} - \theta''_{\text{ly}}) Q_{\text{gl}} / (\theta_{\text{II}} - \theta_{\text{py}}) \quad (4)$$

式中: Q_f 为辐射受热面吸热量; θ''_{ly} 为炉膛出口烟温; θ_{py} 为排烟温度; Q_{gl} 为锅炉有效利用热量.

有效辐射受热面积 (H_f) 为

$$H_f = Q_f / q_f \quad (5)$$

式中: q_f 为辐射受热面热强度.

2.4.2 对流受热面的设计 对流受热面可分为降尘对流受热面和降温对流受热面. 降尘对流受热面采用圆弧矩型布置, 降温对流受热面采用烟管并联布置, 其计算公式为

$$Q_{\text{gs}} = (\theta' - \theta'') / Q_{\text{gl}} / (\theta_{\text{II}} - \theta_{\text{py}}) \quad (6)$$

$$H = Q_{\text{gs}} / K \Delta t \quad (7)$$

式中: Q_{gs} 为锅炉烟管束吸热量; θ' 为进口温度; θ'' 为出口温度; H 为对流受热面积; K 为传热系数; Δt 为平均温差.

3 生物质成型燃料热水锅炉热性能试验与分析

为了说明该燃烧设备能够适用于生物质成型燃料, 确实能代表生物质成型燃料专用燃烧设备的水平, 且使试验得出主要设计参数具有一定的可靠性与合理性, 根据 GB/T 15137—1994 工业锅炉节能监测方法、GB 5468—91 锅炉烟尘测定方法及 GBW-PB3—1999 锅炉大气污染物排放标准, 对该生物质成型燃料燃烧设备进行热性能及环保指标试验.

试验燃料为液压成型玉米秸秆, 粒度为 $\Phi 70$ mm 圆粒, 密度为 $0.919 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$, 收到基净发热量为 $15\,658 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 含水率为 14%, 环境温度为 $11 \text{ }^\circ\text{C}$, 大气压力为 $0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$. 对生物质成型热水锅炉进行热性能试验, 结果如表 1 所示. 在试验工况下, 热水锅炉热效率为 78.2%, 热水温度为 $82.55 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均热水量为 $2\,100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均燃料量为 $54 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 排烟温度为 $157.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 排烟热损失 10.09%, 气体不完全燃烧损失 0.522%, 散热损失 7.9%.

表 1 生物质成型燃料热水锅炉热平衡试验
Table 1 Heat balance test of hot-water boiler

项目 Item	数值 Value	
热水锅炉正平衡 Positive balance efficiency of hot-water boiler	平均热水量 / (kg · h ⁻¹) Average hot water mass	2 100
	热水温度 / °C Hot water temperature	82.55
	热水压力 / kPa Hot water pressure force	103.1
	给水温度 / °C Supplied water temperature	11
	平均燃料量 / (kg · h ⁻¹) Consumption of fuel	54
	锅炉正平衡效率 / % Positive balance efficiency of hot-water boiler	78.2
热水锅炉反平衡 Negative balance efficiency of hot-water boiler	平均每小时炉渣质量 / (kg · h ⁻¹) Slag mass per hour	3.16
	炉渣百分比 / % Percentage of slag	92.54
	飞灰百分比 / % Percentage of ash	7.458
	固体不完全燃烧损失 / % Solid imperfect combustion loss	1.275
	排烟中三原子气体容积百分比 / % Percentage of RO ₂ in exhaust smoke	8.6
	排烟中氧气容积百分比 / % Percentage of O ₂ in exhaust smoke	11.69
	排烟中 CO 容积百分比 / % Percentage of CO ₂ in exhaust smoke	0.051
	排烟中 NO _x 容积百分比 / % Percentage of NO _x in exhaust smoke	0.021
	排烟中 SO ₂ 容积百分比 / % Percentage of SO ₂ in exhaust smoke	0.003 7
	排烟处过剩空气系数 Exhaust smoke excess air coefficient	2.2
	排烟温度 / °C Exhaust smoke temperature	157.3
	冷空气温度 / °C Cold air temperature	13
	排烟热损失 / % Exhaust smoke heat loss	10.09
	气体不完全燃烧损失 / % Gas imperfect combustion loss	0.522
	散热损失 / % Heat sinking loss	7.9
	灰渣物理热损失 / % Slag heat loss	0.083
	锅炉反平衡效率 / % Negative balance efficiency of hot-water boiler	70.13

4结论

1)根据生物质成型燃料的燃烧特性设计出的180kW生物质成型燃料热水锅炉的热效率、热水流量、热负荷，水温等热性能参数达到了设计要求，证明该设计方法正确性和科学性。

2)热水锅炉燃烧效率最高达78.2%，烟尘含量为110mg · m⁻³，远远低于燃煤锅炉，符合国家关于工业锅炉大气中污染物排放标准要求。且有较好的环保效益。

3)该热水锅炉制造工艺简单，价格与同容量燃煤锅炉相当，试验时操作也比较容易，可大大提高生物质利用率，且有较高的经济效益与社会效益。

参考文献：

- [1]邓可蕴，贺亮.我国农村地区能源形势分析[J].中国工程科学，2000，2(6)：52—58.
- [2]刘圣勇，赵迎芳，张百良.生物质成型燃料燃烧理论分析[J].能源研究与利用，2002(6)：26—28.
- [3]阴秀丽，吴创之，徐冰娥，等.生物质气化对减少CO₂排放的作用[J].太阳能学报，2000，21(1)：40—44.
- [4]马孝琴.生物质(秸秆)成型燃料燃烧动力特性及液压秸秆成型机改进设计研究[D].郑州：河南农业大学.2002.
- [5]马孝琴.秸秆着火及燃烧特性的试验研究[J].河南职业技术学院学报，2002，16(2)：69—73.
- [6]孙学信.燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M].北京：中国电力出版社.2002.
- [7]沈伯雄，刘德昌，陆继东.石油焦着火和燃烧燃烬特性的试验研究[J].石油炼制与化工，2000，31(10)：60—65.

[8]刘圣勇,张百良.杨群发,等.双层炉排生物质成型燃料锅炉设计与研究[J].农业工程学报,2003,19(6):268—271.

[9]刘圣勇.生物质(秸秆)成型燃料燃烧设备研制及试验研究[D].郑州:河南农业大学,2003.

[10]宋贵良.锅炉设计手册[M].沈阳:辽宁科学技术出版社.1995.

[11]刘圣勇,袁超,张佰珍,等.秸秆成型燃料锅炉的研制[J].河南农业大学学报,2004,38(3):329—334.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/93593.html>