

户用生物质炉具热效率试验方法研究

高 博, 黄韶炯, 刘佳鑫, 苏存钢, 董仁杰, 庞昌乐

(中国农业大学 工学院 能源工程与低碳技术研究所, 北京 100083)

摘 要: 针对国内外主要热效率试验方法进行对比与研究, 通过控制试验操作方法及条件, 得出 6 组影响因素, 对实测热效率结果进行了评价。尝试找出适用于国内户用生物质炉具的试验方法, 且使操作更加便捷, 测试结果更加准确。

关键词: 户用生物质炉具; 热效率; 煮水试验

中图分类号: TK6; S216.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2011)03-0096-04

Study on the test method of heat efficiency of household biomass stove

GAO Bo, HUANG Shao-jiong, LIU Jia-xin, SU Cun-gang, DONG Ren-jie, PANG Chang-le
(Energy Engineering and Low Carbon Technology Laboratory, College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this study, three typical heat efficiency test methods for biomass stove, which are GB6412-86, NY/8-2006 and Water Boiling Test Version 4.1.2, were discussed for accuracy and fitness in China, by using theoretic and experimental analysis. GB6412-86 tended to be more accuracy, and both GB6412-86 and NY/8-2006 were applicable to the evaluation of Chinese biomass stoves. 6 main factors that affected the test have been obtained. The test method that is suitable for household biomass stove has been obtained, the method is more accurate and the test operation is easy.

Key words: household biomass stove; heat efficiency; water boiling test

0 前言

户用炉具作为农村家庭生活的必备器具, 已在中国沿用了千年之久^[1]。在 20 世纪 50 年代中期和 80 年代初期, 我国曾分别两次推广户用炉具, 并且达到了明显的效果^[2]。户用生物质半气化炉具作为旧式炉具的替代产品, 具有高效率、低排放的优点, 它的推广使用对于农村节能减排, 改善农户室内空气质量, 提高农村居民生活水平都有着巨大的意义, 同时它的产业化也能够带来可观的经济效益和社会效益^{[3]、[4]}。

1 国内外热效率试验方法介绍

目前, 生物质炉具技术的研发和市场的形成还处在初级阶段, 各类产品质量参差不齐, 需要一个统一的检测标准和性能指标来衡量产品的优劣。

热效率是户用生物质炉具输出的有效热量与

投入到炉具内生物质燃料发热总量的百分比, 表明户用生物质炉具的热利用程度; 炊事型生物质炉具输出的有效热量是指试验期间锅水升温 and 蒸发时吸收的热量。热效率作为一个体现炉具热量利用能力的重要指标, 在科学研究和产品检测环节中都占据非常重要的地位^{[5]~[8]}。

2 主要热效率试验方法比较

目前, 在国内外应用较为广泛的热效率试验方法主要有 3 种: GB6412-86 家庭用煤及炉具试验方法 (以下简称 GB), NY/8-2006 民用柴炉、柴灶热性能试验方法 (以下简称 NY) 和 Water Boiling Test Version 4.1.2 (以下简称 WBT)。以上方法都是基于煮水试验, 通过测算锅水吸收热量占燃料燃烧消耗热量的百分比, 来得出炉具工作时的平均热效率, 从而衡量被测炉具有效利用燃料

收稿日期: 2010-04-19。

作者简介: 高 博(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事户用生物质气化、半气化炉具相关方面的研究。E-mail: bobgao2020@gmail.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

热量的能力^[9-11]。表 1 列出 3 种试验方法的比较。

表 1 主要热效率测试方法比较

Table 1 Comparison on testing methods of heat efficiency

测试项目	GB	NY	WBT
起始水温	25 ℃	室温	室温
起始投加燃料重量	1.0~1.5 kg	2.0~4.0 kg	无要求
起始蒸发锅内水量	6 kg	6 kg	5 kg
蒸发锅尺寸	Φ=28 cm	Φ=28 cm	V=7 L
室温	0 ℃以上, 推荐 10~30 ℃	10~30 ℃	高于 0 ℃
相对湿度	无要求	小于 85%	无要求
室内风速	<0.5 m/s	<1.0 m/s	无要求
试验操作	闭盖升温, 开盖沸腾	闭盖升温, 开盖沸腾	全程开盖 蒸发
试验结束时刻	到达沸点后, 再降至 80 ℃	到达沸点后, 再降至低于 沸点 2 ℃	到达沸点
吊火高度	无要求	无要求	无要求
灰渣处理	称重,并记录 碳损失	不处理	取余碳称重, 并计入有效热量

通过表 1 对比发现,3 种方法在测试条件、材料选取及操作细节等因素上均存在差异。结合试验条件可将以上因素分为两类:可控因素,即起始水温、起始投加燃料重量、蒸发锅尺寸、开闭盖情况、试验结束时刻、吊火高度、灰渣处理方式等;非可控因素,即室温、相对湿度、室内风速等。

在可控因素中,灰渣中余碳热量的忽略有可能导致实际热量输入低于理论热量输入,导致热效率低于真实值;反之,余碳热量全部计入热量输出部分则会造成热效率高于真实值。除此之外,起始水温、吊火高度等剩余可控因素则会直接或间接降低锅水的吸热量,使其低于炉具实际热量输出,导致热效率低于真实值。

因此,为了降低实测热效率与真实值的偏差,设计了户用生物质炉具热效率测试方法评估试

验,通过试验结合理论分析的研究方法,找出更加准确且符合我国炉具特点的测试方法,为今后的研究及产品检测提供便利。

3 户用生物质炉具热效率测试方法评估试验

首先,针对上述 3 组测试方法进行试验对比,本试验选出结果相对准确的一组方法。再选择上述标准中人为可控因素进行因素控制试验,通过测试不同操作条件下同一炉具热效率,对比所得结果,从而分析其对热效率测试的影响,并对所选方法进一步优化。

3.1 试验设备

试验设备采用生物质半气化炉具,额定功率为 4.5 kW,底部装有 30 W 轴流式风机;电子天平,量程 0~10 kg,感量为 0.1 g;风速仪,量程 0~10 m/s,精度为 0.5 m/s;TES-1315 K 型热电偶温度计,量程 0~1 100 ℃,精度为 0.1 ℃;试验室水银温度计,量程 0~100 ℃,分度值为 0.2 ℃;干湿温度计等。

3.2 试验条件

试验的环境温度为 5~15 ℃,相对湿度小于 85%,室内风速小于 1.0 m/s,试验时炉具远离其他热源。试验燃料为棒状成型玉米秸秆,直径为 35 mm,高为 34 mm 的圆柱,密度为 5.5 g/cm³,含水率为 9.8%,收到基净发热量为 14 718 kJ/kg。

3.3 试验方法

试验一:按照表 1 中列出的 3 组测试方法进行热效率试验,每组设置 3 个平行试验,取热效率均值进行对比。

试验二:如表 2 所示,将试验一中得出的相对准确的一组方法的操作条件设置为标准工况,并将初始水温、蒸发锅开闭盖状态、试验结束时刻、蒸发锅直径、吊火高度、燃料添加量作为变量进行

表 2 试验工况对照表

Table 2 Comparison table of test conditions

工况	起始水温/℃	燃料添加量/kg	开闭盖状态	结束时刻	蒸发锅直径/cm	吊火高度
工况 0	25	2.5	闭盖升温,开盖沸腾	沸腾后降温至 80 ℃	28	正常
工况 1	室温	2.5	闭盖升温,开盖沸腾	沸腾后降温至 80 ℃	28	正常
工况 2	25	2.0	闭盖升温,开盖沸腾	沸腾后降温至 80 ℃	28	正常
工况 3	25	3.0	闭盖升温,开盖沸腾	沸腾后降温至 80 ℃	28	正常
工况 4	25	2.5	全程开盖蒸发	沸腾后降温至 80 ℃	28	正常
工况 5	25	2.5	闭盖升温,开盖沸腾	沸腾后降温至 80 ℃	28	加高
工况 6	25	2.5	闭盖升温,开盖沸腾	沸腾后降温至 80 ℃	26	正常
工况 7	25	2.5	闭盖升温,开盖沸腾	沸腾后降温至 80 ℃	30	正常
工况 8	25	2.5	全程开盖蒸发	到达沸点	28	正常

对比,每组设置 3 个平行试验;同时,试验结束后分别称量剩余炉渣质量。取平均值进行对比。

3.3 结果与分析

数据处理过程中采用的炊事热效率计算公式为

$$\eta_c = \frac{4.18 \times [G_{c1}(t_{c2} - t_{c1})] + (G_{c1} - G_{c3})r}{BQ_{\text{net},v,\text{ar}} + B_1Q_{\text{net},v,\text{ar}1}} \times 100 \quad (1)$$

式中: η_c 为热效率,%; G_{c1} 为蒸发锅内初始水量,kg; G_{c3} 为试验结束时剩余锅水量,kg; t_{c1} 为蒸发锅内初始水温,°C; t_{c2} 为沸点时蒸发锅内水温,°C; r 为锅水在平均蒸发温度状态的平均气化潜热,kJ/kg;4.18 为水的比热容,kJ/(kg·°C); B 为成型燃料质量,kg; $Q_{\text{net},v,\text{ar}}$ 为成型燃料的收到基恒容低位发热量,kJ/kg; B_1 为自然风干引火柴量,kg; $Q_{\text{net},v,\text{ar}1}$ 为自然风干引火柴的收到基恒容低位发热量,kJ/kg。

(1) 试验一中 3 组热效率测试方法所得结果如图 1 所示。GB 与 NY 所测结果相对接近,由于 GB 试验条件及操作步骤设置较为合理,锅水吸热充分,减低了试验过程带来的误差,使结果更加接近真实值,但在对于热效率结果精确度要求并不高的情况下,二者均可使用;WBT 将本应计入热损失的部分余碳损失项计入有效热量中,导致测试结果偏高,该方法可应用于连续进料,且余碳产量较少的炉具,由于国内炉具属于批次进料,燃烧结束后余碳产量较大,因此该方法并不适合国内生物质炉具的测试。综上所述,选取 GB 对应的相关试验步骤进行下一步试验。

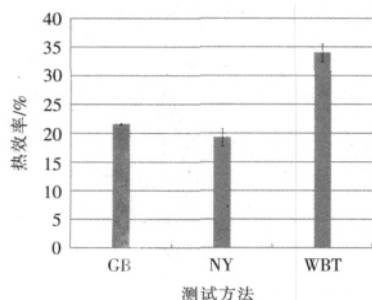


图 1 热效率测试方法结果比较

Fig.1 Comparison on results of different test methods of heat efficiency

(2) 图 2 为以 GB 对应的试验工况为标准工况,改变部分操作条件和方法进行试验,并通过公式 1 计算得到的不同试验工况下炊事热效率的测试结果。初始水温、燃料添加量、试验过程中蒸发锅开闭盖状态的变化对于实测热效率结果影响较小,基本上在标准允许的 3%~5% 内;相比而言,蒸

发锅直径、吊火高度及试验结束时刻的改变对测量值影响较大,在试验过程中需要重点考虑。

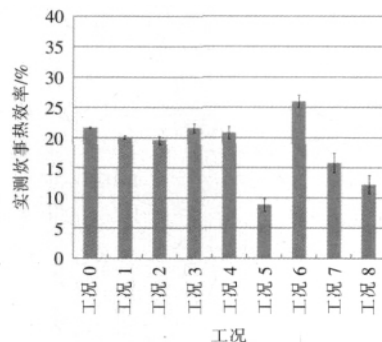


图 2 不同工况实测炊事热效率比较

Fig.2 Comparison on measured cooking heat efficiencies under different working conditions

① 初始水温、燃料添加量、试验过程蒸发锅开闭盖状态变化都未直接影响到燃料燃烧及锅水吸热过程,因此,对试验结果的影响可归结为计算中对于实际蒸发、气化情况的理想化假设所引起。如公式(1)所示:将锅水升温过程假设为无蒸发升温,忽略在升温过程中锅水的少量蒸发,使计算值高于真实值;将锅水的气化过程假定为仅在沸点温度时存在,忽略 80 °C 至沸点温度间的气化,由于气化潜热是随温度升高而逐渐降低^[12],因此使计算值低于真实值;两部分假设正负相抵,从而简化了计算过程。当试验条件改变,公式中两部分假设的变化幅度不同,导致计算结果产生误差,但在标准规定的允许误差内,可以作为正确结果接受。

开闭盖状态对于锅水升温过程的影响如图 3 所示。全程开盖与闭盖升温开盖蒸发两种操作相比,前者升温过程较慢,且试验持续时间较长,在蒸发相同水量的情况下导致计算所得平均火力强度较弱,从而影响对试验炉具热性能的评价,造成测试结果失真。因此,在实际试验过程中,应尽量采取第二种操作方式。

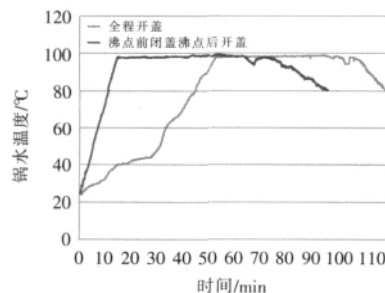


图 3 锅水温度随时间的变化

Fig.3 Temperature variation of water in pot

燃料添加量的选择应根据炉具本身设计来确定,但其对热效率结果的误差影响较小,可根据实际试验条件进行微调。初始水温对于热效率结果的影响几乎为零,因此,可在室温~25℃任意选择。

②吊火高度的上升,使蒸发锅与火焰及高温烟气的接触面积减小,从而导致锅水吸收的有效热量下降,实测热效率降低了12.8%,这一影响因素是本试验所考察的6个因素中对结果影响最大的,因此,吊火高度的确定是炊事热效率试验操作中非常重要的一部分,应当予以重点考虑。

③由于炉口尺寸固定,蒸发锅直径间接影响到吊火高度,同时锅体散热面积的变化也影响到锅水的吸热量,从而导致实测热效率的变化,本试验中26,28 mm和30 mm直径蒸发锅的实测热效率分别为26.0%,21.6%和15.8%,影响显著。

④本试验根据相关测试标准,采取沸点结束试验和过沸点降温至80℃结束试验两种操作进行对比,结果显示,沸点结束所得热效率(12.2%)远低于另一种操作方式(21.6%)。对于锅水本身来说,沸点温度对应的时间段是其蒸发量最大的阶段,通过计算转化的热效率也是单次试验过程中最高的。通过图4也可看出,在沸点结束试验,所得余碳损失(21.8%)是几个试验中最大的,因此,在试验过程中应当把沸点阶段及沸点降温至80℃期间锅水蒸发所吸收的热量计入有效热量中,同时尽可能减少不必要的余碳热损失。

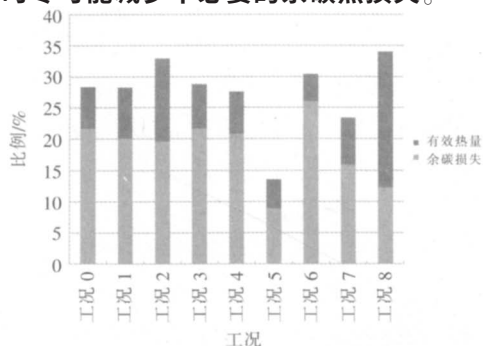


图4 不同工况下有效热量、余碳热损失占总能量输入比例

Fig4 The proportions of effective heat and the heat loss of char residue in the total energy under different working conditions

WBT中将余碳热值计入有效热量中,对结果进行修正;该测试方法主要针对连续进料的小型炊事炉具,产碳、产灰量较少,并不适用于我国半气化炉热效率的测定。

4 结论与讨论

(1)通过试验一得出GB6412-86和NY/8-2006为现行炉具测试方法中较为权威,且结果较为准确的方法,但由于针对对象不同,需要在其标准所规定步骤的基础上进行部分改进,从而使其能够更加符合生物质炉具的特点。虽然WBT测试方法广泛应用于生物质炉具的相关研究,但其操作及计算方法并不适用于测试国内市场上常见的户用生物质炉具,在使用过程中要针对测试对象谨慎使用。

(2)由试验得出,初始水温、蒸发锅开闭盖状态、试验结束时刻、蒸发锅直径、吊火高度、燃料添加量等因素都会对生物质炉具的炊事热效率测试结果产生影响,其中,试验结束时刻、吊火高度、蒸发锅直径3个因素影响较大,需在试验方法中进行严格规定,以确保结果的准确、公平,特别是吊火高度,在不同型号炉具采用蒸发锅直径等细节上需要细化规定。

(3)对于生物质炉具热效率试验研究,可采用初始水温25℃、锅水升温阶段闭盖、气化阶段开盖、锅水降温至80℃结束试验、根据炉膛大小燃料量应以装满炉膛并露出二次通风口为标准等规定进行试验,可以保证测试结果准确、有效,试验过程简便、省时。

(4)本试验在已有标准所描述的操作条件及流程基础上进行研究,存在一定局限性,需在后续试验中考虑多方面因素,并加以改进。

参考文献:

- [1] 顾树华,张希良,王革华.农业可持续发展与能源利用[M].北京:北京出版社,2001.
- [2] 徐云.新农村能源与环保战略[M].北京:人民出版社,2007.
- [3] 郝芳洲.户用生物质炉具发展现状[J].农业工程技术(新能源产业),2008(5):12-14.
- [4] 郝芳洲.壳牌基金会生物质炉灶项目的实施及其意义[J].可再生能源,2006(4):7-8.
- [5] S C BHATTACHARYA,D O ALBINA,AUNG MYINT KHAING,*et al.* Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cook stoves[J]. Biomass and Bioenergy,2002,23(5):387-395.
- [6] PIET VISSER. The testing of cookstoves: data of water-boiling tests as a basis to calculate fuel consumption[J].

Energy for Sustainable (下转第103页)

续表 2

试验号	A	B	C	D	空列	乙醇产率/g·g ⁻¹
7	3	1	1	3	1	0.108 6
8	4	3	3	2	1	0.106 3
9	1	1	4	2	3	0.092 4
10	2	3	2	3	3	0.120 3
11	3	3	4	1	2	0.108 2
12	4	1	2	4	2	0.110 0
13	1	4	2	1	1	0.094 6
14	2	2	4	4	1	0.114 8
15	3	2	2	2	4	0.102 5
16	4	4	4	3	4	0.100 4
k1	0.093 5	0.107 3	0.104 1	0.103 5	0.106 1	
k2	0.117 7	0.100 1	0.106 8	0.104 7	0.106 5	
k3	0.102 7	0.107 9	0.101 5	0.104 8	0.099 4	
k4	0.102 5	0.101 0	0.103 9	0.103 3	0.104 5	
极差 R	0.024 2	0.007 8	0.005 3	0.001 1	0.007 1	
较好水平	A ₂	B ₃	C ₂	D ₃		
因子影响主次顺序				A	B	C D

表 3 主体间效应的检验

Table 3 Effect test among main factors

源	III 型平方和	自由度 df	均方	统计量 F	显著性 Sig.
校正模型	0.001 ^a	12	0.000	2.870	0.209
截距	0.173	1	0.173	4 058.834	0.000
温度	0.001	3	0.000	9.423	0.049
发酵时间	0.000	3	6.656E-5	1.558	0.362
纤维素酶用量	7.192E-6	3	2.397E-6	0.056	0.980
接种比例	5.686E-5	3	1.895E-5	0.444	0.739
误差	0.000	3	4.273E-5		
总计	0.175	16			
校正的总计	0.002	15			
a. R ² =0.920					

由表 3 可知,因素 A 的 $F=9.432$;因素 B 的 $F=1.558$;因素 C 的 $F=0.056$;因素 D 的 $F=0.444$ 。

(上接第 95 页)

2003,18(1):366-373.

- [16] 李喜先.工程系统论[M].北京:科学出版社,2007.38-40.
- [17] 李朝辉,魏贵臣.生态环境承载力评价方法研究及实例[J].环境科学与技术,2005,28(1):75-77.
- [18] C D 威肯斯,J D 李,刘乙力,等.人因工程学导论[M].上海:华东师范大学出版社,2007.102-108.
- [19] 吕晓玲,谢邦昌.数据挖掘方法与应用[M].北京:中国人民大学出版社,2009.43-52.
- [20] 魏权龄.数据包络分析[M].北京:科学出版社,2004.75-89.

而因素 A 的 Sig. 值均小于 0.05,因素 B,C 和 D 的 Sig. 值均大于 0.05,说明因素 A 对试验结果有显著影响,而因素 B,C,D 对试验结果影响差异不显著。

由表 2 可以看出,A 因素二水平最好;B 因素三水平最好;C 因素二水平最好;D 因素 4 个水平之间差异不显著,但以三水平乙醇产率较高,即发酵温度 36 ℃,发酵时间 96 h,接种比例 1:1,纤维素酶用量 40 IU/g 为适宜的试验组合,该条件下乙醇产率为 12.03%。

3 结论

由正交试验确定的最佳发酵条件为发酵温度为 36 ℃,发酵时间为 96 h,酵母菌接种量为 10%,接种比例 1:1,纤维素酶用量为 40 IU/g;乙醇产率为 12.03%。其中发酵温度对乙醇产量的影响最大,其次为发酵时间,其他因素影响较小。

参考文献:

- [1] SAHA BADAL C. Hemicellulose bioconversion[J].Ind. Microbiol Biotechnol,2003,30(5):279-291.
- [2] BALLESTEROS M.Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SSF) with Kluyveromyces marxianus CECT 10875 [J].Process Biochemistry,2004,9 (12):1843-1848.
- [3] 张继泉.玉米秸秆发酵生产燃料酒精工艺探讨[J].广州食品工业科技,2003,19(2):24-25.
- [4] 季更生.不同培养条件对树干毕赤酵母戊糖发酵的影响[J].林产化学与工业,2004,19(2):20-21.
- [5] 王柏臣.可溶性壳聚糖对纤维素酶的抑制作用[J].黑龙江大学自然科学学报,2002,19(2):12-13.

(上接第 99 页)

Development,2005,4(1):16-24.

- [7] 刘圣勇,张飞,刘小二,等.玉米秸秆成型燃料单锅灶的设计与试验 [J]. 农业工程学报,2009,25(2):101-103.
- [8] 侯中兰.家用生物质成型燃料炉具的设计与研究[D].郑州:河南农业大学,2006.
- [9] GB6412-86,家庭用煤及炉具试验方法[S].
- [10] NY/8-2006,民用柴炉、柴灶热性能试验方法[S].
- [11] Water Boiling Test(WBT)Version4.1.2[S].
- [12] 沈维道,童钧耕.工程热力学[M].北京:高等教育出版社,2007.