

# 生物质固体成型燃料炉在北方农宅供暖系统改造中的应用与研究

闫瑞妙，张兴惠，周瑞辰，秦成君

太原理工大学

**摘要：**北方农村供暖存在建筑热工性能差、散煤燃烧污染严重两大问题。为解决热工性能差的问题，以某典型农户为例进行节能改造，将模拟数据与实测数据相结合，分析实际节能改造效果，结果表明：节能改造后该农户可降低60%的能耗，且增设50mm的保温层改造性价比最高。为解决散煤燃烧污染严重的问题，分别以生物质固体成型燃料炉与传统小型燃煤锅炉为热源进行供暖运行对比。在热舒适性方面，二者对应的室内平均温度分别为17.39，14.52，均可满足设计参数14的要求，但室内PMV值分别维持在-0.08~0.24，-1.18~0.18范围内，前者热感觉适中，后者热感觉较凉；在经济性方面，前者较传统燃煤锅炉每年单位面积可节省7元/（m<sup>2</sup>·a），费用年值降低465元/a；在环保性方面，前者排放值低于小型燃煤锅炉。

## 0引言

现阶段我国北方农村供暖存在两大问题：一是农村建筑围护结构的热工性能差，缺乏保温措施，传热系数远高于国家标准要求<sup>[1-3]</sup>；

二是农户供

暖普遍采用小型燃煤锅炉，

其燃料煤是不可再生能源，且燃烧造成的污染严重，热效率低<sup>[4-5]</sup>。

为进一步加快新农村建设，解决农村供暖存在的问题，中央财经领导小组第十四次会议研究提出了推进北方地区清洁取暖的要求，并制定了煤改电、煤改气<sup>[6-7]</sup>，推广生物质燃料<sup>[8]</sup>等多项政策。

### 建筑围护

结构的热工性能直接影

响室内热舒适性和建筑能耗，而建筑能耗高是能源浪费的主要原因之一<sup>[9-10]</sup>。

目前北方典型农村建筑的围护结构热工性能较差，其墙体多采用实心砖且没有保温措施，屋面多采用较薄的炉渣保温，但效果不佳，窗户以密闭性差的单层木窗为主，致使围护结构传热系数大且冷风渗透量大，冬季最冷月室内平均温度低于10，难以满足室内热舒适要求且能耗大<sup>[11]</sup>。

农村建筑节能是关系国家经济持续发展的重要问题<sup>[12]</sup>，对农村既有建筑进行节能改造势在必行<sup>[13]</sup>。

生物质能是四大清洁能源之一<sup>[8]</sup>

，广泛分布在我国农村地区，具有原料种类来源多样、价格低廉等优点。生物质能的清洁利用包括沼气、生物质气化、生物质固化，以及热电联产等供暖技术<sup>[14-16]</sup>。

沼气初投资大，安

全性、技术性要求高，农户散养量较低，

沼气量不足，导致其推广遇到困难<sup>[14]</sup>。

户用生物质秸秆气化炉因焦油量高等原因也没有得到广泛推广<sup>[15]</sup>。

。村镇

微型生物

质热电联产供暖技

术因技术要求高、初投资高、建设周

期长，无法短时间推广以替代小型散煤锅炉<sup>[16]</sup>。

。本文研究生物质固化在农户应用推广的可行性。生物质固体成型燃料是以农林剩余物在一定温度和压力作用下压缩成棒状、块状或颗粒状等成型燃料<sup>[17-18]</sup>。

，便于储存和运输，其热值相当于标准煤

的70%~80%，热值/价格相对较高<sup>[19]</sup>，燃烧时NO<sub>x</sub>，SO<sub>2</sub>排放量均远小于煤<sup>[20-21]</sup>。

，燃烧特性较好，效率较高。因此以生物质固体成型燃料锅炉为热源的供暖方式符合清洁供暖的政策要求及实际需求，值得在北方农村地区推广<sup>[22]</sup>。

[23-25]

，判断节能改造潜力并确定改造方案；实测农户改造前后室内外温度<sup>[26]</sup>

、传热系数等热工参数，研究分析节能改造效果。在此基础上，对比生物质固体成型燃料炉与小型燃煤锅炉2种供暖技术方案在热舒适性、经济性与环保性等方面的优劣，为北方农村节能改造、清洁供暖提供参考数据。

## 1 典型农户能耗的数值分析

### 1.1 建筑地理位置

典型农户位于山西省孝义市顺光村，东经111°48′，北纬37°12′，海拔738.75m。

### 1.2 室外气象参数

选择清华大学和中国气象局提供的介休市典型气象年逐时数据（因介休市与孝义市地理位置相近，气候条件相似）

。

### 1.3 研究对象

该住宅建于2006年，实景图见图1，数值分析模型图见图2。该建筑坐北朝南，单层，平屋顶，左右分为格局完全一样的两小户。因东、西朝向修正系数相同，二者围护结构耗热量相同。两小户各居住2人，照明设备相同，第2小户比第1小户多电视、电冰箱等电器，但使用时间很少，二者的人员、照明、设备的散热量可视为相同，其安全量不予考虑。数值模拟时以第1小户为研究对象。



图 1 典型农户实景图

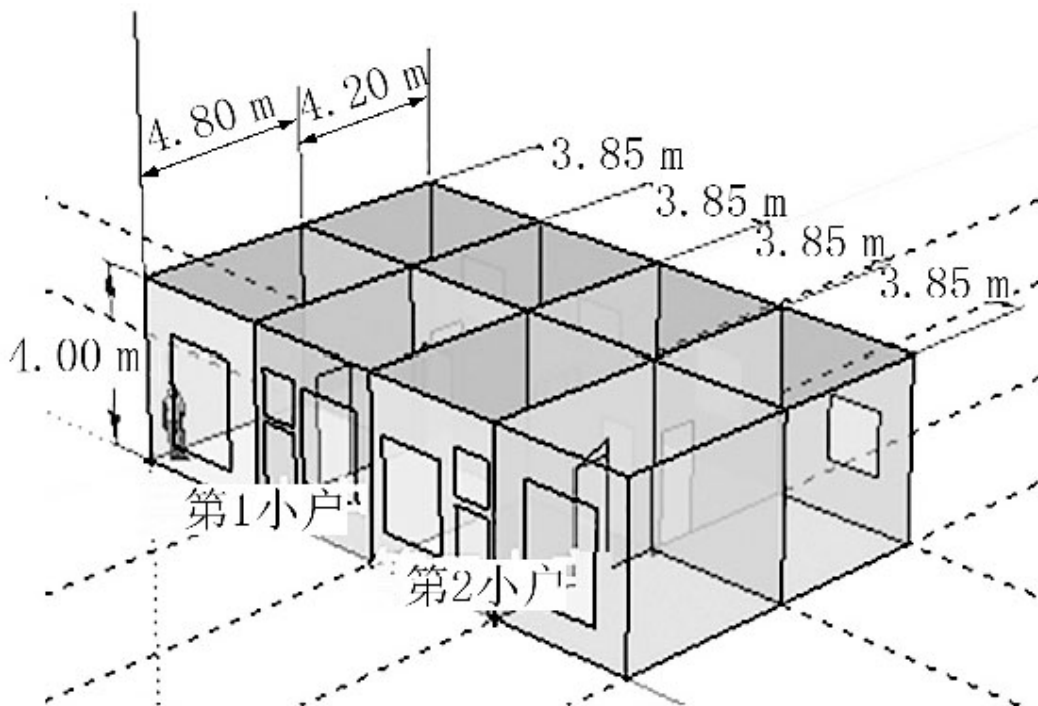


图 2 数值分析模型图

## 1.4室内计算参数及围护结构

设定室内供暖计算温度为14℃，室外计算温度设定为-11.3℃。

能耗模拟分析包括改造前和改造后两部分，改造前围护结构的材料完全按照典型农户的材料，改造后的能耗分析建立在采取节能改造措施的基础上。外墙与屋面增设保温层，常用保温层有挤塑板与聚苯板，因聚苯板粘接性好且价格便宜，所以选用聚苯板；窗户在原来木窗的基础上增设1层铝合金窗户。对比能耗分析时，围护结构材料如表1所示，其余条件均不变，包括：建筑结构、气象条件、模拟设定值等。为确定适宜的保温层厚度，改造后的能耗模拟分析过程分别选用30，50，75，100mm 4种厚度的聚苯板。

表1 围护结构材料厚度

	mm									
	外墙				外窗(玻璃厚度)			屋顶		
	水泥砂浆	聚苯板	黏土实心砖	石灰砂浆	单层木窗	单层铝合金窗	钢筋混凝土	炉渣	黏土实心砖	聚苯板
改造前	20		370	20	3		120	200	53	
改造后	20	30/50/75/100	370	20	3	5	120	200	53	30/50/75/100

## 1.5模拟结果

EnergyPlus能耗模拟分析结果见表2。从该农户整个供暖季(从11月1日至次年3月1日)维持14℃室温的总能耗、热负荷、节能率等方面进行分析，在原木窗基础上增加1层铝合金窗户，增加不同厚度聚苯板保温层，节能率均可达60%。随着聚苯板保温层厚度的增加，供暖季总能耗降低，但变化趋势渐缓，即节能率增加趋势变缓。盲目增加保温层厚度并不经济，有可能造成投资增加，节能收益相对减少。结合模拟结果及市场价格，选用50mm厚的聚苯板保温层的改造方案性价比最高。

表2 EnergyPlus 能耗模拟结果

建筑围护结构改造方案	供暖季总能耗/ GJ	全年累计热负荷指标/ (kW·h/m <sup>2</sup> )	热负荷/ W	热负荷指标/ (W/m <sup>2</sup> )	节能率/%
改造前	31.38	125.80	6 604.17	95.30	0
增加 30 mm 厚聚苯板+双层窗户	11.25	45.09	3 689.60	53.24	64.15
增加 50 mm 厚聚苯板+双层窗户	8.34	33.42	3 185.91	45.97	73.42
增加 75 mm 厚聚苯板+双层窗户	6.38	25.59	2 848.16	41.10	79.67
增加 100 mm 厚聚苯板+双层窗户	5.27	21.11	2 625.29	37.88	83.21
增加 50 mm 厚聚苯板+双层窗户+吊顶(实际改造)	8.16	32.71	3 104.76	44.80	75.69

## 2节能改造

对两小户均进行节能改造，本章以第1小户为研究对象进行论述。

### 2.1改造前围护结构热工参数的测量

为了解北方农村典型农户热工性能现状，于2016年11月25日至12月2日，采用热流计法测量该农户外墙、屋顶、外窗、外门的传热系数。测试仪器选用BES-GP智能多路温度、热流检测仪(温度分辨率为0.01℃，传热系数电流分辨率为0.001mA)。改造前后测量结果平均值见表3。

表3 节能改造前后传热系数 W/(m<sup>2</sup>·K)

	改造前	节能标准 <sup>[3]</sup>	改造后
墙	1.492	0.65	0.406
窗户	3.997	2.80	1.535
屋顶	1.057	0.50	0.370
外门	3.124	2.50	3.124

对比分析改造前实测值与农村居住建筑节能设计标准[3]要求限值可知，除外门的传热系数稍高于标准外，外墙、屋顶、外窗的传热系数远远高于标准限值。

## 2.2 节能改造方案

影响建筑供暖能耗的热工变量有建筑朝向，体形系数，外墙窗墙面积比，外墙、外窗、屋顶、外门、地面等的传热系数。基于农宅现状和建筑结构各部分实际热工参数，考虑实施难度以及农民可以承担的经济水平，并参照数值模拟结果，最终采取以下优化措施。

1) 墙体内保温：农户南外墙有装饰性瓷砖，拆除回用率低、费用高、工序复杂；改造施工在2016年12月进行，此时室外温度在夜间可能低于5℃，会影响外保温施工质量，所以选择墙体内保温。依据模拟结果，改造时选用性能稳定可靠、阻燃、50mm厚的聚苯板。

2) 增加1层窗户：外窗原为普通木窗，拆除会影响原有外墙的结构与美观，为此选择在原有木窗基础上增加1层密封性能较好的铝合金窗户，形成双层窗户。

3) 屋顶外保温与吊顶：屋顶外部铺设50mm厚的聚苯板；内部进行吊顶，其空气层厚度为150mm，降低屋顶传热系数。

因外门的传热系数与标准限值接近，改造性价比不高，没有对其进行改造。为保证实际改造效果，改造前用Energy Plus进行能耗数值分析，数值模拟结果显示，改造后可节能75.69%（见表2）。

## 2.3 改造前后系统分析

改造后，于2017年1月2—9日，采用相同方式对传热系数进行连续7d的测量，改造后测量结果见表3。墙体、窗户和屋顶改造后的传热系数分别下降72.70%，61.59%，64.99%，均能满足相关标准要求，表明对该农户节能改造取得显著效果。

图3显示了改造前后室内外温度对比，虽改造后室外温度明显降低，但室内温度却有所上升，表明改造后围护结构热惰性增加，传热性能衰减，室外温度变化对室内温度的影响降低，有利于维持室内温度的稳定性。

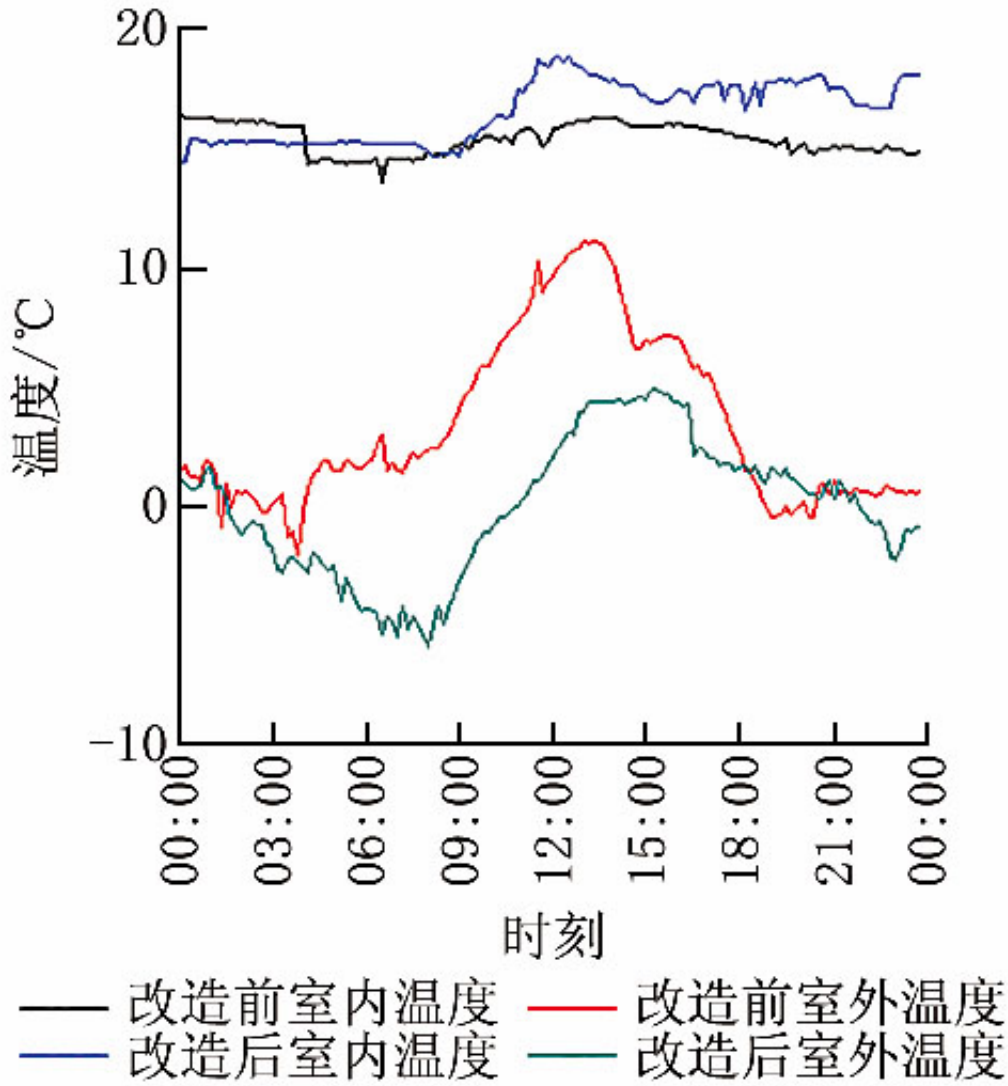


图 3 改造前后室内外温度

表4为改造前后1天生物质固体成型燃料消耗量实测值，据实测数据分析计算，改造后实际节能率达66.74%，与75.69%的模拟结果接近。

表 4 节能改造前后能耗分析

	改造前	改造后
测试时间	2016-12-01	2017-01-08
室内平均温度/℃	14.37	17.58
室外平均温度/℃	3.16	0.21
实际消耗生物质燃料/kg	60	30
单位温差消耗生物质燃料/kg	5.20	1.73
单位温差节约燃料率/%	0	66.74

### 3 生物质固体成型燃料炉与传统小型燃煤锅炉运行对比

节能改造后，第1小户与第2小户分别以生物质固体成型燃料炉、小型燃煤锅炉为热源进行供暖，以对比二者运行效果。下面从热舒适性、经济性以及环保性3个方面进行分析。

#### 3.1 热舒适性

2017年1月16—22日，使用ETH-P型环境试验设备智能多路巡检仪对室内外温湿度进行测量，其温度测量误差为 $\pm 0.2$ ，相对湿度测量误差为 $\pm 1.5\%$ 。因每个房间面积不足 $20\text{m}^2$ ，每个房间只需2个温度测点、1个相对湿度测点，取各房间平均值作为计算数据。

第1小户、第2小户的相对湿度测试平均值分别为41.3%，39.7%，说明2种热源对相对湿度无明显影响。

图4显示了1月18日以生物质固体成型燃料炉与小型燃煤锅炉分别作为热源的两小户室内外温度的变化。由图4可知：在室外最高温度为 $4.58$ ，最低温度为 $-5.79$ 的条件下，第1小户室内平均温度为 $17.39$ ，波幅为 $2.06$ ；而第2小户室内平均温度为 $14.52$ ，波幅高达 $7.55$ ，最低平均室温为 $10.36$ 。与室内设计温度 $14$ 相比，两小户平均温度均可满足要求，但二者温度范围及波动情况不同，热舒适性就会不同。

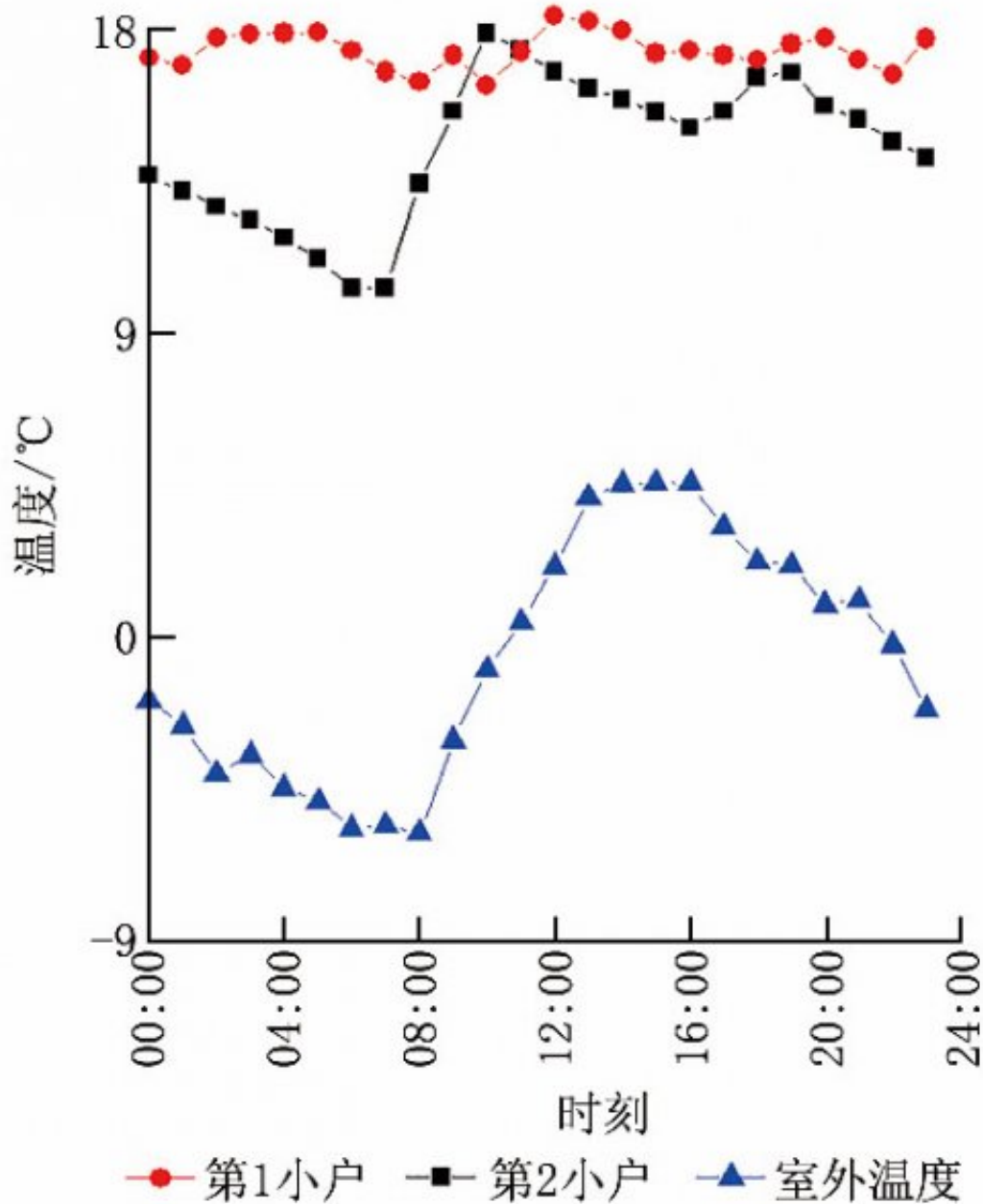


图 4 同一室外温度下不同锅炉供热效果对比

目前典型的人体热舒适性评价体系是Fanger教授基于实验研究提出的PMV指标<sup>[27-29]</sup>。根据室内平均

温度、相对湿度测试值，以静坐、身着棉质衣服成年男子为研究对象计算室内PMV<sup>[30]</sup>

，结果见表5。从表5可知：第1小户热感觉始终为适中，而第2小户热感觉有时会较冷。在热舒适性方面，生物质固体成型燃料炉较传统小型燃煤锅炉更具优势。根据计算及改造时的实地调查，室内计算温度为14℃，不满足人体的热舒适要求。随着社会进步，农民生活水平不断提高，对热舒适的要求也不断提高，建议修改农村居住建筑76暖通空调HV&AC2019年第49卷第3期技术交流节能设计标准中的有关规定：严寒和寒冷地区农村居住建筑的卧室、起居室等主要功能房间，冬季室内计算温度从14℃提升为16℃。



表 5 两小户 PMV 值对比

		室内平均 温度/℃	室内平均相 对湿度/%	PMV	热感觉
第 1 小户	平均值	17.39	41.3	0.12	适中
	最高值	18.04	41.3	0.24	适中
	最低值	16.34	41.3	-0.08	适中
第 2 小户	平均值	14.52	39.7	-0.44	微凉
	最高值	17.91	39.7	0.18	适中
	最低值	10.36	39.7	-1.18	较冷

### 3.2 经济性分析

费用年值是评价技术方案全寿命周期投资费用较为全面的综合性计算指标，费用年值应包含初投资与运行费用<sup>[31]</sup>。

这里初投资只考虑锅炉及其辅助设备的安装调试费，生物质锅炉初投资为4500元，小型燃煤锅炉为2500元。对于运行费用，该单体农户只考虑燃料费与电费，不考虑水费、人工费等，按市场费用统计，生物质固体成型燃料600元/t，电费0.47元/(kW·h)，散煤600元/t。

2017年1—2月，第1小户实际共消耗生物质燃料1.4t，耗电145kW·h，第2小户实际消耗散煤2.2t。虽生物质燃料热值低于散煤燃烧的热值，但生物质锅炉使用效率远高于小型燃煤锅炉。根据历年1—2月供暖燃料占整个供暖季燃料的比例计算得，整个供暖季共需生物质燃料2.39t，耗电247kW·h，耗煤3.75t，则其运行费用分别为1550元和2250元。采用费用年值计算公式（见式（1））计算分析比较各供暖方案的经济性。

$$f = z \frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} + F \quad (1)$$

式中  $f$  为供暖方案费用年值，元/a； $z$  为供暖系统初投资，元； $i$  为收益率，取 0.1； $m$  为使用寿命，取 20 a； $F$  为供暖系统运行费用，元/a。

2种供暖方案费用年值分别为207

9，2544元，单位面积供暖费用分别为30，37元/m<sup>2</sup>

；使用生物质固体成型燃料炉较小型燃煤锅炉每年节省7元/(m<sup>2</sup>

· a)，费用年值降低465元/a。但偏远地区农户一般使用劣质煤，价格为200~300元/t，供暖季约使用5t，其费用年值为1294~2294元/a，远低于生物质锅炉的费用年值。生物质锅炉的推广仍然需要政策扶持。

### 3.3 环保性分析

生物质固体成型燃料属清洁能源,其燃烧产生的污染物排放量远低于传统散煤燃烧排放量,生物质锅炉的 $\text{NO}_x$ 质量浓度是燃煤锅炉的 $1/10\sim 1/2$ ;生物质固体燃料燃烧几乎不排放 $\text{SO}_2$ <sup>[32-33]</sup>。用生物质固体成型燃料炉代替小型燃煤锅炉,污染物排放量可减少约50%<sup>[7]</sup>。生物质固体成型燃料炉点火运行稳定后几乎看不到烟气,而小型燃煤锅炉的烟气呈黑色且很浓。生物质固体成型燃料炉灰渣呈粉末状,可用于施肥,产量是小型燃煤锅炉的 $1/7\sim 1/5$ ,燃烧较为充分;而小型燃煤锅炉燃烧产生的灰渣,多为粒状,甚至夹杂着黑色煤粒,燃烧不充分。生物质固体成型燃料一般袋装,可较为整洁地存放在储物间,避免煤堆引起的扬尘污染与不美观。由于燃烧特性的不同,生物质锅炉房更易保持干净整洁。使用生物质固体成型燃料炉,农户只需保证储料斗内燃料充分,通过按钮控制锅炉运行启停及燃烧速度,从又脏又繁重的烧煤体力劳动中解放出来。生物质固体成型燃料炉可作为清洁供暖热源在北方农村推广。

#### 4 结语

通过EnergyPlus对北方典型农户能耗进行模拟分析,得出现有典型北方农村建筑节能改造有60%以上节能空间。据模拟分析结果可知,增加保温层的节能效果随着保温层厚度增大而增大,但节能率的增速会随着保温层厚度的增加而逐渐减小。在节能改造前需进行能耗分析以选定经济、合理的改造措施和适宜的保温层厚度,山西孝义增设50mm厚聚苯板较经济、合理。

节能改造后实测墙体、窗户、屋顶的传热系数分别下降72.70%, 61.59%, 64.99%;室内温度波幅减小;单位温差需要的生物质燃料节约66.74%,数值模拟节约率为75.69%,与实测值相近,节能改造效果明显。此次节能改造选用了推拉窗,建议农户改造选用节能效果显著的平开窗。

生物质固体成型燃料炉与传统小型燃煤锅炉运行对比表明:热舒适性方面,二者的平均温度分别为17.39, 14.52, 均可满足设计参数14 要求;但前者PMV值为-0.08~0.24,热感觉适中,后者PMV值为-1.18~0.18,热感觉较冷,室内设计参数为14,人体热舒适性并不适中。建议修改农村居住建筑节能设计标准中的有关规定,将14 提升为16。经济性方面,生物质锅炉较传统小型燃煤锅炉每年单位面积可节省7元/( $\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ),费用年值降低465元/a。在环保性方面,生物质锅炉 $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  排放值均低于小型燃煤锅炉。生物质锅炉的运行更简单、方便,降低农民劳动强度。综上所述,生物质固体成型燃料炉是值得推广的一种清洁供暖方式。

在煤改生物质固体成型燃料问题上,需要政府加大监管力度、宣传力度与农户的积极参与。政府需加大对生物质固体燃料生产方的管控,严禁掺假,保证生物质燃料的环保性;加大对劣质散煤的控制。据该村农民反映,2017年供暖季农民只能买到600元/t的煤,两者价格相等时可增加农户选择生物质固体成型燃料炉的概率。随着生活水平的提高,农民倾向选择更方便、更快捷的炊事方式,调研时了解到,该农村90%农户采用电或煤气做饭,生物质锅炉的推广可节省此笔开支。随着生物质固体成型燃料炉的推广,其燃料价格会随着生产费用的下降而降低。再者,农户可以出售农作物枝秆或专门种植相应的农作物,以降低生活成本。

但生物质锅炉作为新型供暖设备,生产运输成本大,且其生物质燃料价格相对高于劣质散煤,目前市场占有率较低,在农村地区普及程度不高。政府在推进生物质固体成型燃料炉替代小型燃煤锅炉的前期,应对生物质炉具和燃料制定适当补贴政策,提高生物质锅炉改造和运行的经济可行性,提高农民对生物质锅炉的接受度和认可度。农村供暖问题的解决仍需要更多关注与研究,以及政府的支持与农民的配合。

## 参考文献：

- [1] 杜涛,黄珂,周志华,等. 中国北方城镇居住建筑供暖能耗现状与节能潜力分析[J]. 暖通空调,2016,46(10):75-81
- [2] 卢玫珺,王桂秀,范伊. 寒冷地区既有农村住宅节能改造方案优化设计[J]. 新型建筑材料,2009,36(10):45-47
- [3] 中国建筑科学研究院,中国建筑设计研究院. 农村居住建筑节能设计标准:GB/T 50824—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:13-15
- [4] 支国瑞,杨俊超,张涛,等. 我国北方农村生活燃煤情况调查、排放估算及政策启示[J]. 环境科学研究,2015,28(8):1179-1185
- [5] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2016[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016:144-152
- [6] 高磊,赵振宇,LOREN B,等. 北京市农村地区公共设施冬季供暖清洁替代方案研究[J]. 农村电气化,2016(7):19-20
- [7] 蒋建云,章永洁,叶建东,等. 北京农村地区燃煤供暖替代技术方案实效对比[J]. 暖通空调,2016,46(9):51-55
- [8] WANG W Y, WEI O, HAO F H. A supply-chain analysis framework for assessing densified biomass

- solid fuel utilization policies in China[J]. *Energies*, 2015, 8(7):7122-7139
- [9] BOLATTÜRK A. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(11/12):1301-1309
- [10] HABIB M A, HASANUZZAMAN M, HOSENUZZAMAN M, et al. Energy consumption, energy saving and emission reduction of a garment industrial building in Bangladesh[J]. *Energy*, 2016, 112:91-100
- [11] 李刚,冯国会,王丽,等. 严寒地区农村住宅节能改造能耗模拟[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2012,28(5):884-890
- [12] 郑竺凌,李永红,杨旭东. 北京市农村住宅节能研究[J]. *建筑科学*,2008,24(4):9-14
- [13] MA H L, NIU J H. Energy consumption and economic analysis to residential building meeting the criterion of 65% energy saving in Zhangjiakou [J]. *Advanced Materials Research*,2011,225/226:239-242
- [14] 胡万里,李长友. 小型民用秸秆气化炉的改进设计[J]. *节能*, 2005(8):37-38
- [15] 王飞,蔡亚庆,仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析[J]. *农业工程学报*,2012,28(1):184-189
- [16] 樊瑛,龙惟定. 生物质热电联产发展现状[J]. *建筑科学*,2009,25(12):1-6
- [17] ADAMS P W, HAMMOND G P, MCMANUS M C, et al. Barriers to and drivers for UK bioenergy development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2):1217-1227
- [18] CHEN L, XING L, HAN L. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9):2689-2695
- [19] 王泽龙,田宜水,赵立欣,等. 生物质能-太阳能互补供热系统优化设计[J]. *农业工程技术(新能源产业)*, 2012, 28(10):178-184
- [20] SHAN M, LI D K, JIANG Y, et al. Re-thinking China's densified biomass fuel policies: large or small scale[J]. *Energy Policy*, 2016, 93:119-126
- [21] ZHANG P, YANG Y, TIAN Y, et al. Bioenergy industries development in China: dilemma and solution [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9):2571-2579
- [22] KAZMERSKI L. Renewable and sustainable energy reviews [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 38(10):834-847

- [23] 潘毅群, 吴刚, VOLKER H. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用[J]. 暖通空调, 2004, 34(9): 2-7
- [24] CRAWLEY D B, LAWRIE L K, WINKELMANN F C, et al. EnergyPlus: a new-generation building energy simulation program[C]// Forum 2001: Solar Energy: The Power to Choose, 2001:319-331
- [25] CRAWLEY D B, LAWRIE L K, WINKELMANN F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program[J]. Energy and Buildings, 2001, 33(4):319-331
- [26] 刘晓男, 孙建. EnergyPlus 能耗分析软件在空调系统节能改造中的应用[J]. 施工技术, 2012(增刊 1): 398-401
- [27] 金国辉, 张东杰, 沈强, 等. 内蒙古西部农牧区住宅过渡季室内热舒适现场研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(6):41-47
- [28] FANGER P O, TOFTUM J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6):533-536
- [29] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016:109-118
- [30] 徐欣, 朱能, 田喆, 等. 室内计算参数的确定与舒适和节能的关系[J]. 暖通空调, 2012, 42(7):22-26
- [31] 张治江, 陶进, 石久胜, 等. 几种能源供暖方式的技术经济比较[J]. 暖通空调, 2004, 34(1):8-10
- [32] 梁俊宁, 张振文, 高晓庆, 等. 煤质对锅炉大气污染物排放量的影响[J]. 煤炭转化, 2015, 38(1):91-96
- [33] 罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5):220-226

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/152742.html>