

用于沼气系统的热管式热水加热器的设计*

夏吉庆 王宁宁 王晓东 刘环宇 施灿璨 王忠江

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了解决北方冬季沼气厌氧发酵温度不稳定的瓶颈问题, 研制了一种用于沼气系统中的燃气加热增温装置, 即配套一种燃气加热的热管式热水加热器。选择热管加热端距离燃气灶孔的高度、燃气流量、平均水温作为影响因素, 以热管式热水加热器热效率作为目标进行了试验分析, 结果表明: 当热管加热端距离燃气灶孔的高度为21.5cm, 液化石油气流量为 $1.01\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均水温为 $35\sim 45^\circ\text{C}$ 时, 其热效率能达到最高, 最高值为63.47%。

关键字: 沼气系统; 热管; 加热器; 热效率

中图分类号: S216.4 文献标识码: A 文章编号:

Design of Hot Water Heater with Heat Pipe for Biogas System

Xia Jiqing Wang Ningning Wang Xiaodong Liu Huanyu Shi Cancan Wang Zhongjiang
(Department of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract

Fermentation temperature is instable in the northern winter which is the bottleneck of biogas system. In order to solve this problem, a heating equipment which was a hot water heater with heat pipe with gas heating used for biogas system was developed in this study. The distance of the heating side with heat pipe from gas stove hole, flow rate of the burning gas and average water temperature were chosen as experimental parameters. The conditions of this processing technology were optimized by the index of thermal efficiency of hot heater. The result showed that the thermal efficiency of the hot water heater reached the maximum value of 63.47% when the distance of the heating side with heat pipe from gas stove hole was 21.5cm, the flow rate of the liquefied petroleum gas was $1.01\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ and the average water temperature was $35\sim 45^\circ\text{C}$.

Key words: Biogas system; Heat pipe; Hot water heater; Thermal efficiency

收稿日期: 2013-07-16 修回日期: 2013-10-13

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B04)、黑龙江省青年科学基金资助项目(QC2011C083)和东北农业大学人才基金资助项目(2009RC49)

作者简介: 夏吉庆研究员, 博士, 主要从事农业机械化工程研究。Email:xjq12345@sohu.com

引言

在沼气厌氧发酵系统中,温度是制约厌氧发酵效率的一个关键因素,其一般不低于 10°C ,最高不超过 55°C ,其中,以稳定为宜。厌氧发酵温度的波动范围一般一天不宜超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,若波动过大,沼气池厌氧发酵速率就会遭到抑制,甚至停止产气^[1-5]。因此,在建设沼气池时,为了保证沼液发酵温度的稳定性,需配备专门的加热保温装置。在我国,小型沼气池多利用太阳能或者燃池的方式对发酵料液进行加热保温,然而此种方式在北方寒冷地区难以实现沼气工业化生产^[6-8]。而在许多大、中型沼气工程中,多采用燃煤锅炉为热源,这种方式增大了沼气生产成本,能源效率低,环境污染严重,难以实现沼气系统的自身能量平衡。因此,研制综合热效率较高,并以沼气生产系统自身生产的沼气为燃料的换热装置很有必要。

热管是一种新型的高效传热元件,其一般被制成换热器应用于废热回收。现有的热管换热器的热管通常采用相互平行且与隔板成垂直角度的均布方式固装在隔板上,当热源对其集中受热时,会使热管受热不均匀,影响加热器的热效率。因此,本文研制具有新型结构的热管式热水加热器,这种方式使热管受热均匀,不仅便于集中受热,同时也提高位于外侧部热管的管壁温度,防止酸露点腐蚀。

1 沼气发生系统工作原理与热水加热器应用

图1所示的沼气发生装置是由1个酸化罐和2个产气罐组成的两阶段厌氧发酵系统^[9],其中热水加热器9通过设置在沼气罐底部的盘管或水箱对发酵罐进行加热保温。具体工作原理如下:热水加热器中的水一般加热到 65°C 左右,根据发酵罐所需温度的需要,设定加热盘管中温度的上下限(一般在 $50-58^{\circ}\text{C}$,过高则超过发酵菌的耐受温度),水的循环由设置在系统中的加热水循环泵10实现,即当加热盘管中的温度达不到下限时则启动加热水循环泵,将热水加热器中已加热的水送入加热盘管或加热水箱,将其水温提升到设定的上限,而加热盘管或水箱中的低温的热水回流到热水加热器中被重新加热,整个系统中缺水时再补充冷水。达到上限时则关闭加热水循环泵,泵的整个运行过程由继电器自动控制。由图1可知,热水加热器在加热保温系统中是一个关键设备,其热效率直接影响加热保温的

效果及系统的经济性和能量平衡,因此研制高效实用的热水加热器显得尤为重要。

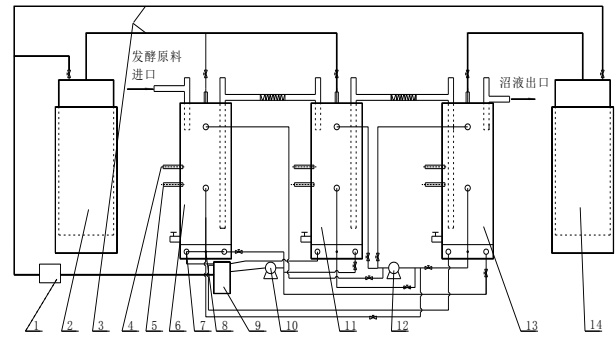


图1 含热水加热器的两阶段厌氧发酵系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-stage anaerobic fermentation with hot water heater

1-气水分离器 2-集气罐1 3-输气管 4-发酵温度检测 5-pH值检测 6-酸化罐 7-加热盘管或水箱 8-热水温度检测 9-热水加热器 10-加热水循环泵 11-产气罐1 12-污泥回流泵 13-产气罐2 14-集气罐2

2 热管式热水加热器工作原理与结构设计

2.1 热管式热水加热器的工作原理

本研究涉及的热管式热水加热器属于热水锅炉,是把热管技术和锅炉技术有机结合的换热装置,其与专用沼气灶配套应用于沼气增温系统。该加热器的核心元件是由多根重力式热管按照一定的排列方式组成的热管束,应用了重力式热管的工作原理。重力式热管一般由管壳和端盖组成,管内被抽成 $10^{-4}\sim 1.3\times 10^{-1}$ 负压,并充以适量的低沸点工作液体,如乙二醇、丙酮等,使用端盖

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery
加以密封,制成热管^[10-11]。沿轴向方向热管可分为3段,即蒸发段、绝热段、冷凝段。其工作原理为:热管的蒸发段吸收外部热源的热量,使其内部工作液体的温度上升,随着工作液体温度上升,液面蒸发直至形成饱和蒸气压,此时热量以潜热的形式传给蒸气,随着工作液体温度的上升,饱和蒸气压不断上升。蒸气在压差的作用下,通过蒸气通道上升到低压且温度也较低的冷凝段,遇冷在气液分界面上冷凝放出潜热。放出的热量通过冷凝段管壁传给冷源,而冷凝后的液体在自身重力的作用下回流到蒸发段再一次准备接受热源热量,以此循环,热量就源源不断从热管蒸发段传至冷凝段^[12-13]。

2.2 热管式热水加热器的结构设计

现有的热管式热水加热器内的热管束通常采用相互平行且与隔板成垂直角度的均布方式固装在隔板上,采用燃气灶为燃烧器,由于燃气灶的火焰区域呈圆形,并集中在燃烧室中心区域,所以位于隔板中心外侧部位的热管加热端部会

远离燃气灶火焰燃烧加热区域,造成热管受热不均匀,不仅影响加热器的热效率,同时也会影响沼气的产生。为了解决上述问题,设计了一种新型的热管式热水加热器,其结构示意图如图 2^[14]所示。

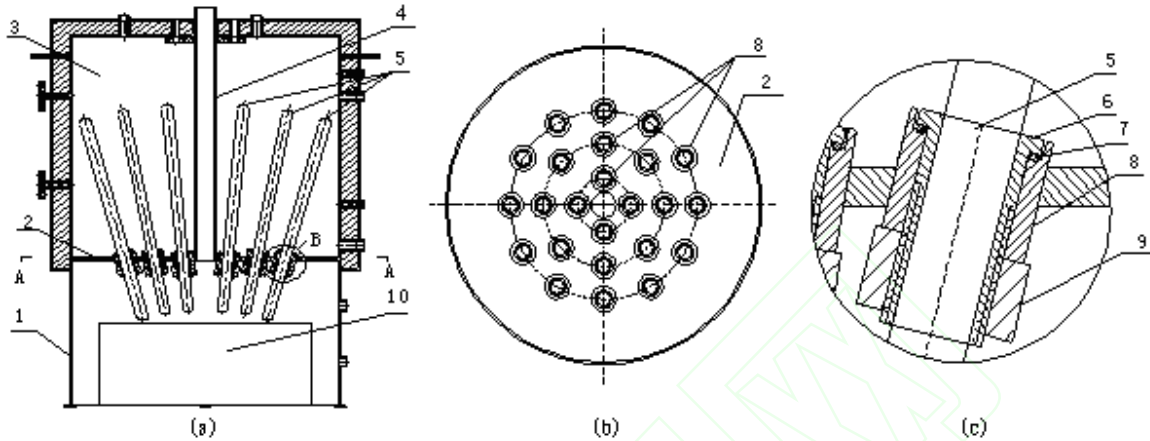


图 2 热管式热水加热器的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of hot water heater with heat pipe

1-壳体 2-隔板 3-水腔室 4-烟道 5-热管 6-台肩式外螺纹套筒 7-密封垫 8-热管座 9-锁紧定位螺母 10-燃烧室

(a)结构示意图 (b)A-A 剖视图 (c)B 局部图

该热管式热水加热器的结构特点是:在隔板 2 上位于烟道 4 外侧部以同一中心点为圆心依次从内至外的不同直径尺寸圆周部位处均布且上端向外侧倾斜的固装多个热管座 8,且热管座 8 与垂直方向之间的外倾角度依次增大;同轴心固装在热管 5 上的台肩式外螺纹套筒 6 同轴心的插装在相应的热管座孔内,其两者之间配装密封垫 7,通过锁紧定位螺母 9 将台肩式外螺纹套筒 6 固装在热管座 8 上。上述结构特点的优点是:热

管倾斜安装在隔板上,热管下侧的蒸发段向下集中到燃烧室加热源的上方,使热管受热均匀,不仅便于集中吸热,同时也提高了位于外侧部热管的管壁温度,防止酸露点腐蚀;而热管上侧的冷凝段向上呈发散的形式伸到水腔室中,使热管能更快速、有效地进行传热。热管束在隔板上安装结构是一个可拆卸结构,若单根热管损坏,可以很方便进行维修、更换。表 1 为热管式热水加热器的设计参数

表 1 热管式热水加热器的设计参数

Tab.1 Design parameters of hot water heater with heat pipe

热管 排号	热管 直径 /mm	热管 总长 /mm	每排热 管中心 处直径 /mm	热管 根数	热管与 垂直方 向的外 倾角度 /°	热管 加热 段长 /mm	热管座参数			台肩式外螺纹套筒参数			
							总 长 /mm	最大 圆直 径 /mm	外倾 角/°	套筒顶 部距加 热端的 距离 /mm	总长 /mm	外螺 纹/mm	最大 圆直 径 /mm
1			129	4	5	170	5			204		M42*5	
2	32	700	295	8	10	178	10	50	60	219	87	.5, 长	52
3			455	12	14	199	14			240		度为	
												50	

3 性能试验

3.1 试验步骤

对自行研制的热管式热水加热器,经过预试验可知热管加热端距离燃气灶孔的高度、液化石油气流量、平均水温对加热器的平均热效率有显著的影响。因此,选择这三者为影响因素,热效率为目标进行试验研究。试验步骤为:首先,固定热管加热端距离燃气灶孔的高度为20cm不变,设置液化石油气流量分别为 $0.862\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.92\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.96\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.01\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.1\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$,做5组试验;其次,固定热管加热端距离燃气灶孔的高度为21.5cm不变,变化液化石油气流量的值分别为 $0.72\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.98\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.01\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.088\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.12\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,再做5组试验;再次,固定热管加热端距离燃气灶孔的高度为22.6cm不变,取液化石油气流量分别为 $0.95\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.971\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.076\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.11\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $1.24\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$,最后做5次试验。每组试验都是把水从 25°C 加热到 67°C ,加热的水量为 215.782kg ,每组试验每隔 5°C 就记录一次燃气耗量和时间。试验时,燃料选择液化石油气(使用沼气时按热值换算使用量),其热值为 $45547.7\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[15],燃烧器为家用燃气灶,其综合热效率在30~40%之间^[16],并且每组试验都等加热器和灶具完全冷却后再进行下一次试验,以保证试验条件基本一致。在整个试验过程中火焰呈蓝色,燃烧稳定正常。

3.2 试验数据分析

计算热管式热水加热器的平均热效率的公式为^[16]

$$\eta = (t_2 - t_1)C_p G_w / (Q_d G_g)$$

式中 t_1 —初始水温, $^\circ\text{C}$

t_2 —结束水温, $^\circ\text{C}$

c_p —水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$

Q_d —液化石油气的低位热值, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

G_w —水的质量, kg

G_g —液化石油气耗量, kg 。

其中, $t_1=25^\circ\text{C}$, $t_2=67^\circ\text{C}$, $c_p=4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$, $Q_d=45547.7\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, $G_w=215.782\text{kg}$, G_g 采用佰伦斯电子科技有限公司生产的电子计价秤测量,该电子称最大量程 40kg ,精度 $\pm 2\text{g}$,准确度等级为III。按照试验步骤进行的试验结果见表2。

由表2可见,热管加热端距离燃气灶孔的高

度和液化石油气流量对加热器的热效率有显著的影响,其中当热管加热端距离燃气灶孔的高度为 21.5cm ,液化石油气流量为 $1.01\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$,热水的温度从 25°C 上升到 67°C 时,加热器的平均热效率较高,约为57%,比另外两种情况下得到的最高值高4~5个百分点。

3.3 试验结果分析

3.3.1 热管加热端距离燃气灶孔高度和液化石油气流量对加热器热效率的影响

液化石油气流量和热效率的关系如图3所示。由图3可知热管加热端距离燃气灶孔的高度和液化石油气流量对加热器的热效率有较大影响。对于该加热器,热管加热端距离燃气灶孔的高度与热效率呈现马鞍形的关系,在高度值为 21.5cm 时,其热效率较高。这是由于高度大时,火焰的高温外焰距离热管加热端较远,散热损失的作用显著增加,从而使热效率减少。高度值过小时,火焰相对加热面积减少,同样使无效热损失增加,从而减少热效率。而液化石油气流量与热效率同样呈现马鞍形的关系,在高度为 21.5cm ,液化石油气流量为 $1.01\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,其热效率最高,最高值为57%。这是由于该加热器加热面积比较大,液化石油气流量小时,散热损失的作用严重,使热效率减小。另外由图3还可知:随着热管加热端距离燃气灶孔高度的增大,加热器的热效率达到最高值所需要的液化石油气流量也逐渐增加。 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$

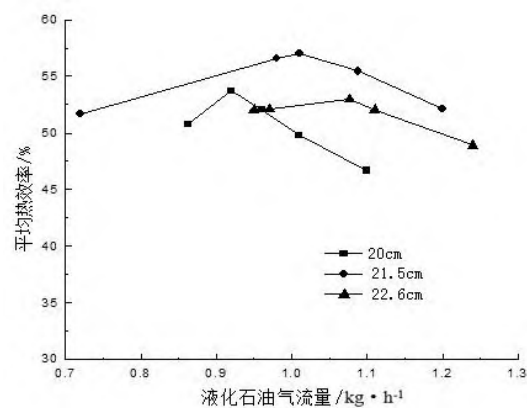


图3 液化石油气流量和热效率的关系图

Fig.3 Relationship cures between flow rate of liquefied petroleum gas and thermal efficiency

表 2 热管式热水加热器性能试验结果

Tab.2 Experimental results for hot water heater with heat pipe

试验 编号	热管加热端距离燃 气灶孔高度/cm	液化石油 气耗量/kg	加热时 间/h	液化石油气 流量/kg·h ⁻¹	初始温度 /°C	结束温 度/°C	水的质 量/kg	平均热效 率/%
1		1.638	1.9	0.862	25		215.782	50.78
2		1.552	1.683	0.92	25		215.782	53.59
3	20	1.598	1.665	0.96	25	67	215.782	52.05
4		1.67	1.65	1.01	25		215.782	49.8
5		1.76	1.6	1.1	25.5		215.754	46.69
6		1.608	2.23	0.72	25		215.782	51.72
7		1.47	1.5	0.98	25		215.782	56.58
8	21.5	1.46	1.45	1.01	25	67	215.782	57
9		1.5232	1.4	1.088	25		215.782	55.45
10		1.638	1.367	1.2	24.9		215.754	52.1
11		1.605	1.683	0.95	26		215.725	51.82
12		1.596	1.644	0.971	25		215.782	52.11
13	22.6	1.57	1.46	1.076	25	67	215.782	52.98
14		1.598	1.44	1.11	25		215.782	52.05
15		1.704	1.371	1.24	25		215.782	48.8

3.3.2 平均水温与热效率的关系

图 4 是平均水温与热效率的关系。由上述分析可知：当热管加热端距离燃气灶孔的高度为 21.5cm，燃气流量为 1.01kg·h⁻¹时，加热器热效率较高，因此，按照试验 8 的情况，安排试验。试验时，把水温从 25℃到 67℃分为 8 个温度段，每隔 5℃就记录一次加热时间和燃气耗量，从而

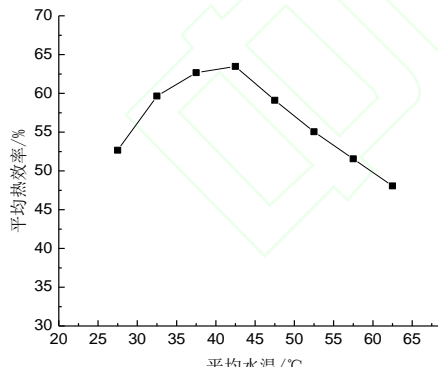


图 4 平均水温与热效率的关系

Fig.4 Relationship curves between average water temperature and thermal efficiency

计算出每个温度段的平均热效率。由图 4 可知，水温对加热器的热效率有显著的影响。开始时，热效率逐渐增大，平均水温为 35~45℃时，热效率达到最大，最大值为 63.47%，然后随着平均水温的升高，其热效率下降。从理论上来说，随着平均水温的升高，无效热损失将变得显著，

从而降低热效率，但由于刚开始加热时，必须先加热加热器的燃烧室内部以及管壁等，使热效率较低，随着这部分无效热损失减少，热效率将会逐渐增大，但随着平均水温的继续升高，其对无效热损失的影响显著增加，使热效率下降。试验表明，平均水温高于 35~45℃后，水温对无效热损失的影响显著增加。在实际使用的情况下，对于循环加热保温系统，当加热器内部水温降到 40℃左右时即启动燃烧装置对其进行加热，可以使加热器的热效率始终保持在较高值，同时，40~67℃也正是维持稳定的中温厌氧发酵温度所需要的加热水温度范围。

3.3.3 液化石油气流量与加热时间的关系

通过上述试验可知，热管加热端距离燃气灶孔高度为 21.5cm 时，加热器热效率相对较高，因此，固定高度为 21.5cm 不变，然后在不同液化石油气流量的条件下，把热水从 25℃加热到 67℃，实测其加热时间，得到如图 5 所示的关系图。由图 5 可知：液化石油气流量减小时，加热时间增长。当液化石油气流量小于 0.98kg·h⁻¹时，液化石油气流量减少会使加热时间急剧增加，液化石油气流量大于 1.01kg·h⁻¹时，液化石油气流量的增加对加热时间的影响较小。

综上所述，热管加热端距离燃气灶孔的高度，液化石油气流量和平均水温是影响热管式热

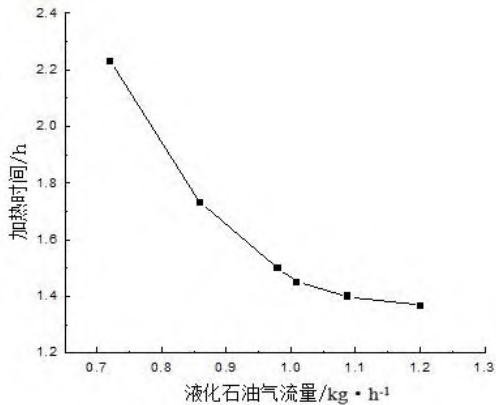


图5 液化石油气流量与加热时间的关系图

Fig.5 Relationship curves between flow rate of liquefied petroleum gas and heating time

水加热器热效率的 3 个关键因素。在实际使用中,合理设置其值,不仅能提高加热器的热效率,而且也能降低加热时间。

3.4 试验结果验证

由于实验室条件有限,上述试验所用的燃料为液化石油气,因此,需要用沼气代替液化石油气为燃料,验证热管式热水加热器的使用性能。

试验采用的沼气来自于东北农业大学生物质能源实验室,其组成成分为 55%CH₄、35%CO₂和 15%N₂,热值为 19748.3KJ/Nm³。试验验证了表 2 中的 2、8、13 组。每次试验都是把水的温度从 25℃加热到 67℃,水的质量为 178kg,试验结果如表 3 所示。

表 3 以沼气为燃料的热管式热水加热器性能试验结果 Tab.3

热管加热端距离 燃气灶孔高度/cm	沼 气 耗 量 /m ³	沼 气 流 量 /m ³ ·h ⁻¹	水 的 质 量 /kg	热效 率/%
20	2.941	2.127	178	53.8
21.5	2.766	2.32	178	57.2
22.6	2.986	2.482	178	53

从上述可以看出按照热值换算用沼气代替液化石油气与直接用沼气做试验得出的试验结果是相吻合的。

4 热管式热水加热器的技术经济分析

做一实例分析,某小型洗衣店在过去一直使用某品牌的直接换热式热水加热器加热水洗涤衣物,该加热器的外形结构如图 6,技术参数见表 4,其中,采用的燃烧器为家用燃气灶,燃料为液化石油气,每次使用把热水从 25℃加热到 67℃,并采用与热管式加热器类似的加热方

法,选择合适的流量及加热距离进行比较试验,以寻找其热效率的变化,具体的试验结果见表 5,其中热效率的计算利用了上述热管式热水加热器平均热效率的计算公式。



图 6 直接换热式热水加热器

Fig.6 Hot water heater with direct heat transfer

表 4 直接换热式热水加热器的技术参数

参数	值
产品型号	LHG0.012-0.4-W II
性能参数/kg·h ⁻¹	12
额定工作压力/MPa	0.4
饱和蒸汽温度/℃	152
额定水容量/L	25
使用燃料	II 类无烟煤或燃气
排污阀型号	DN15
外形尺寸/mm×mm	Φ356×660

表 5 直接换热式热水加热器使用性能记录表

液化石油气 流量/kg·h ⁻¹	液化石油气 耗量/kg	水的质量 /kg	热效率/%
0.5	0.216	16.812	30
0.6	0.26	24.638	36.5
0.7	0.286	25.03	32.13

从表 5 可以看出,当液化石油气流量为

0.6kg·h⁻¹时,该加热器热效率能达到一个较大值,为36.5%;显然该加热器热效率较低,能源浪费严重,因此,选择用热管式热水加热器来代替。表6是2种类型加热器的综合技术经济分析表,其中部分数据参考表2和表5,而目前液化石油气的价格按8元/kg、加热器平均每年按运行300d、每天需要加热热水按1100kg计算。

由表6可知,采用热管式热水加热器为洗衣房提供热水,具有热效率高,燃料消耗少,运行成本低,成本回收期短等特点。

表6 2种类型的加热器技术经济分析

Tab.6 Technical and economic analysis for two types of heater

参数	加热器类型	
	热管换热式	直接换热式
燃烧器	家用燃气灶具	家用燃气灶具
燃料	液化石油气	液化石油气
最大热效率/%	57	36.5
初投资/元	10000	500
日生产热量/kg	1100	1100
日燃料消耗量/kg	7.44	11.62
日运行成本/元	59.52	92.96
日节约成本/元		33.44
年节约成本/元		10032
回收期/a		1

5 结论

(1) 热管加热端距离燃气灶孔高度为21.5cm,液化石油气流量为1.01kg·h⁻¹,平均水温为35~45℃时,热效率能达到最大值63.47%。

(2) 燃气流量对加热时间的影响显著。当热管加热端距离燃气灶孔的高度为21.5cm,燃气流量小于0.98kg·h⁻¹时,加热时间随着燃气流量的减小而急剧增加,当燃气流量大于1.01kg·h⁻¹时,燃气流量的增加对加热时间影响很小。

(3) 热管式热水加热器用于洗衣房与传统加热器相比较具有热效率高,燃料消耗少,成本回收期短等特点。

参考文献

- 任南琪,王爱杰.厌氧生物技术原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- 刘建宇,樊美婷,刘科.高寒地区沼气发酵料液加热升温装置传热特性[J].农业工程学报,2011,27(2):298~301.
Liu Jianyu, Fan Meiting, Liu Ke. Heat transfer characteristics of warming methane fermentation liquid heating device in alpine region[J]. Transaction of Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2):

- 298~301.(in Chinese).
- 周孟津,张榕林,蔺金印.沼气实用技术[M].北京:化学工业出版社,2009.
- 袁小艳,王冬华.利用热管传热技术提高沼气产气率[J].中国沼气,2005,23(增刊):231~232.
- 刘树民,朝靖玉,岳海军.中国北方寒冷地区沼气的综合开发利用[J].内蒙古大学学报,2002,23(4):83~86.
Liu Shumin, Chao Jingyu, Yue Haijun. The comprehensive exploitation and utilization of methane in northern cold region of China[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2002, 23(4): 83~8.6(in Chinese)
- 常小虎.沼气池寒冷冬季正常产气可行性探讨[J].中国沼气,2002,20(4):39~40.
- 董飞青.利用太阳能提高猪粪生物质能转化的综合生态工程[D].杭州:浙江大学,2012.
Dong Feiqing. Ecological engineering of using solar energy to promote the transformation of pig manure wastes biomass energy[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012.(in Chinese)
- 王晓超.太阳能热管加热系统在生态校园沼气工程中的应用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008.
Wang Xiaochao. Application's research of solar heat pipe heating system on eco-campus's biogas system[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2008.(in Chinese)
- 夏吉庆,马添翼,毕经毅,等.牛粪厌氧发酵污泥回流试验[J].农业机械学报,2011,42(4):105~109.
Xia Jiqing, Ma Tianyi, Bi Jingyi, etc. Sludge Recycle Trial of Cattle Manure Anaerobic Fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 105~109.
- D. Khrustalev, A. Faghri. Estimation of the maximum heat flux in the inverted meniscus type evaporator of a flat miniature heat pipe[J]. Heat Mass Transfer, 1996, 39: 1899~1909.
- Lanchao Lin, Rengasamy Ponnappan, John Leland. High performance miniature heat pipe[J]. Heat Mass Transfer, 2002, 45: 3131~3142.
- 余建祖.换热器原理与设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- 曹志高,杜海存,曹娟华.热管技术及其应用分析[J].

江西能源, 2009 (3): 39~41.

Cao Zhigao, Du Haicun, Cao Juanhua. Analysis of heat-pipe technology and its application[J]. Jiangxi Energy, 2009(3):39~41.(in Chinese)

- 14 夏吉庆, 王宁宁, 王英, 等.热管式热水加热器: 中国, 201320008290.5 [P], 2013-06-12.
- 15 同济大学, 重庆大学, 哈尔滨工业大学, 等.燃气燃烧与应用[M].4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- 16 李兆坚, 江亿. 家用燃气灶热效率特性特性测试分析[J].应用基础与工程科学学报, 2006, 14 (3): 368~374.
Li Zhaoji, Jiang Yi. Thermal efficiency test of a home gas cookstove in actual condition[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(3):368~374.(in Chinese)