文章编号:0254-0096(2018)08-2260-07

太阳能燃气互补供热系统实验研究

杨 林[1], 张 欢[1], 由世俊[1], 陈志炜[1], 王 启[2], 高文学[2]
(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘 要: 介绍一种太阳能燃气互补的供热系统,提出系统的测试方法和能效指标。针对该测试方法,搭建系统测试平台,对系统进行不同工况下的测试,并分析太阳能集热效率的测量误差。实验结果表明,阴天工况下此系统能满足用户用热需求且系统*COP*为0.756,晴天工况下,在太阳能日总辐射量为46.18 MJ/m^{2}时,集热器集热效率为59%,系统*COP*为1.13。由测量误差分析可知,此系统测试数据的最大相对误差为2.1%,误差较小,说明该系统测试数据准确可靠。

关键词: 太阳能燃气互补供热系统; 测试方法; 能效指标; 误差分析
中图分类号: TK511$^+$.2 **文献标识码**: A

0 引 言

太阳能属于可再生能源,数量巨大,取之不尽,用之不竭;但其时间性、季节性较强[1]。燃气壁挂炉可方便快捷地为住宅或别墅提供采暖热水和生活热水,但其作为耗气设备,只有消耗足够的燃气才能满足用热需求,从而引发舒适性与经济性的矛盾。由此可知,单独采用太阳能或者燃气壁挂炉都会因自身的局限性而无法达到良好的效果,因此将两者合理搭配,可充分发挥各自的优势,实现资源利用最大化。目前国内外对此类系统的研究正逐渐增多,但对太阳集热器和燃气壁挂炉两设备的结合存在很多问题,并且大多结构简单、集成程度低、自动化控制程度低、使用局限性大。

本文在前人研究的基础上,克服系统原有弊端,提出一种新型的集成程度高的太阳能燃气互补供热系统。目前,虽然太阳集热器、燃气壁挂炉的检测技术及规范[2-4]早已普及,但对于太阳能与燃气壁挂炉互补供热系统的检测技术并不完善,为研究系统热性能,本文结合太阳集热器和燃气壁挂炉检测标准及国内外相关文献,提出针对太阳能燃气互补供热系统的测试方法和能效指标,为同类型的系统测试提供参考与依据,并为日后相关规范标准的制定做出基础性研究。

1 太阳能燃气互补供热系统实验装置

太阳能燃气互补供热系统最大的特征就是该系统同时提供采暖热负荷和生活热水热负荷,并且在考虑到用水卫生和防冻等因素,系统采用间接式换热。本系统属于小型供热系统适用于短期蓄热,因而选用蓄热水箱作为蓄热装置。由于太阳能光热利用系统水温较低,因此系统末端形式选用低温水系统的地板辐射。空气热容和密度均较小,相同面积的集热器,空气集热器的供热能力要比液体工质集热器低,本系统采用液体工质的平板集热器。

由以上分析可知,太阳能燃气互补供热系统由平板集热器、双盘管储热水箱、燃气壁挂炉、水泵、地板辐射采暖末端组成。太阳集热器与水箱下部盘管相连构成太阳能循环系统,壁挂炉及地板辐射采暖末端并联接入水箱上部盘管,生活热水由水箱内热水提供,负荷不足时开启壁挂炉进行二次加热。系统原理图如图1所示。

系统控制策略:1)太阳能集热循环控制:设定太阳集热器出口水温T_1与蓄热水箱底部探测器温度T_8的差值。系统达到启动温差值,太阳能循环水泵被打开,此时太阳能工质通过蓄热水箱底部盘管

收稿日期: 2016-05-11
基金项目: 天津市海洋经济创新发展区域示范项目(cxsf-43)
通信作者: 张 欢(1960—), 女, 博士、教授, 主要从事数值传热方面的研究。zhhuan@tju.edu.cn

开始给蓄热水箱加热；系统达到停止温差值，停止循环。2）采暖系统控制策略：燃气壁挂炉提供采暖热水时，用户可自行设置供水温度。当蓄热水箱采暖换热盘管温度 T_7 大于采暖末端设计供水温度时，电动三通阀控制采暖回水进入采暖换热盘管；当蓄热水箱采暖换热盘管温度 T_7 小于采暖末端设计供水温度时，电动三通阀将回水水路切换到壁挂炉加热至设计供水温度。3）生活热水系统控制策略：燃气壁挂炉提供生活热水时，用户可自行设置出水温度。当生活用水出口水温 T_3 小于用户需求时，电动阀动作，将供暖环路切换到换热盘管，优先加热生活热水；当从蓄热水箱流出的生活用水水温 T_3 大于用户需求时，通过恒温混水阀调节冷热水比例，使得生活热水可满足用户需求保持温度恒定。

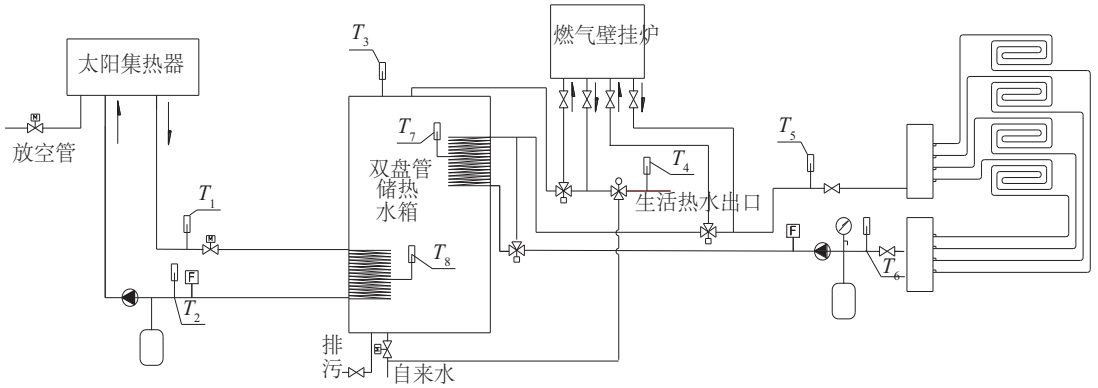


图1　太阳能燃气互补供热系统原理图

Fig. 1　Diagram of solar energy-gas complementary heating system

1.1　实验装置

太阳能燃气互补供热系统主要实验装置有：1）平板集热器：集热器外形尺寸为 2400 mm×800 mm×80 mm，6 片集热器并联，每片有效采光面积为 1.75 m^2，正南向东西放置，采光面与水平面成 59°夹角。2）水箱：水箱选用江苏迈能双盘管多能源搪瓷水箱，容积 500 L，水箱外径为 710 mm，高度为 1575 mm。3）燃气壁挂炉：燃气壁挂炉热水系统额定热负荷 20 kW，热效率为 88.4%，供暖系统额定热负荷 20 kW，热效率为 90.8%，产热水能力为 10 kg/min。4）水泵：水泵包括太阳能工质循环泵、燃气壁挂炉采暖水泵、水箱采暖环路水泵，额定扬程分别为 16、5、5 m，额定流量分别为 2.00、2.50、0.78 m^3/h。

1.2　测量用仪表

太阳能燃气互补供热系统测试参数主要有太阳辐照度、风速、集热器进出口工质温度、采暖供回水温度、生活热水温度、室外温度、室内温度、太阳能循环工质流量、壁挂炉采暖水流量、蓄热水箱采暖水流量、生活热水水流量等，测试用主要仪表有：1）太阳辐照度：采用灵敏度为 10.119 μV/(W·m^{-2}) 的总辐射表，非线性，测量范围可达 0~2000 W/m^2。2）温度：液体温度采用 Pt100 铂电阻测量，精度±0.1%；燃气温度采用水银温度计，精度为 0.5 ℃，量程 0~50 ℃。3）流量：液体流量通过 BL-LWGY 液体涡轮流量计测量，精度为 1.0 级，量程为 0~20 L/min；燃气流量使用 QK5000-Ⅲ智能燃气表测量，测量范围为 0.01~10000 m^3/h。4）压力：大气压力通过气压计测量，精度为 0.1 级，量程为 0~0.15 MPa；燃气压力通过压力表测量，精度为 0.2 级，量程为 0~5 kPa。

2　实验测试方法

2.1　太阳集热器能效测定

2.1.1　测试要求

关于太阳集热器热性能测试，欧洲标准[5]提出稳态测试和动态测试 2 种方法。本文采用对气候因素限制条件不太严格的动态测试方法，测试要求如下：1）太阳总辐照度在 300~1100 W/m^2 范围内；2）集热器进口温度满足测试温度的要求，偏差在±1K 以内；3）工质流量为 0.02 kg/(s·m^2)，偏差

在±1%以内。动态测试不同于稳态测试,对散射辐射的比例、环境温度及环境风速无特殊要求。

2.1.2 太阳集热器能效指标

太阳集热器能效指标即为太阳集热器平均效率,集热器平均效率为测试时间内一定集热面积条件下,得到的有用太阳能占可利用太阳能的比值:

$$\eta_d=\frac{3600Q_S}{A_C(1-\eta_L)I_\theta T}\times 100\%=\frac{3600\rho_1 c_1 V_1(t_{out}-t_{in})}{A_C(1-\eta_L)I_\theta T}\times 100\% \quad (1)$$

式中,Q_S——太阳能循环集热量,kWh;A_C——集热器的采光面积,m^2;η_L——管路及水箱热损失率,一般取0.1~0.3;I_θ——集热器采光面上的平均太阳辐照度,W/m^2;c_1——太阳能循环工质比热容,kJ/(kg·K),取3400;V_1——水箱容积,L;t_{out}、t_{in}——出水、进水温度,℃;T——太阳集热器运行时间,s。

2.2 燃气壁挂炉能效测定

2.2.1 采暖热效率的测定方法及要求

采暖热效率的测定中,测试系统采暖供回水温度为45/30 ℃,在整个测试过程中,应使水流量稳定在±1%内,保证水泵连续运行。测试期间,温度变化不超过±1 K,定义稳定工况。稳定工况内每隔30 s测定进出水温度及燃气流量,当3次测试结果中的任何2个结果的偏差不超过0.5%时,最终结果为3次测量值的算术平均值。否则,应连续测试至少8次,最终结果为每次测量值的平均值。计算方法如下:

$$\eta_t=\frac{Mc(t_{w2}-t_{w1})}{Vq}\times\frac{273+t_g}{273}\times\frac{101.3}{p_{amb}+p_g-S}\times 100\% \quad (2)$$

式中,M——水流量,kg/s;c——水的比热容;kJ/(kg·K),取4200;t_{w2}、t_{w1}——出水、进水温度,℃;V——实测燃气流量,m^3/min;q——实测燃气低热值,kJ/m^3;t_g——试验时流量计内燃气温度,℃;p_{amb}——试验时的大气压力,kPa;p_g——试验时壁挂炉前燃气压力,kPa;S——温度为t_g时的饱和水蒸气压力,kPa。

2.2.2 生活热水热效率的测定方法及要求

生活热水热效率的测定中,测试系统生活热水加热温升为30 ℃,在整个测试过程中,应使水流量稳定在±1%内,保证水泵连续运行。稳定工况内每隔30 s测定进出水温度及燃气流量,当3次测试结果中的任何2个结果的偏差不超过0.5%时,最终结果为3次测量值的算术平均值。否则,应连续测试至少8次,最终结果为每次测量值的平均值。计算方法同式(2)。

2.3 太阳能燃气互补供热系统综合能效的测定

由文献[6]可知,带辅助能源的太阳能系统实验分为单天热性能实验和长期热性能实验,本实验采用可以对系统进行评定的单天热性能实验。

2.3.1 测试工况

采暖要求室温在18~20 ℃,采暖供水温度和生活热水设计出水温度均为45 ℃。放水时间及热量按表1进行,测试要求每隔10 min采集数据。

表1 生活热水用热量时间表[6]

Table 1 Timetable of hot water supplying

时刻	用热量占日总共热量的比例/%	时刻	用热量占日总共热量的比例/%
07:00	5	15:00	15
08:00	5	16:00	15
11:00	5	17:00	25
13:00	5	18:00	25

2.3.2 系统能效指标

1) 太阳能保证率

太阳能保证率为太阳能系统中由太阳能部分提供的能量占系统总负荷的百分比[7]:

$$f=Q_S/Q_T \qquad Q_T=Q_S+Q_F=Q_W+Q_C \quad (3)$$

式中,Q_T——系统总耗热量,kJ;Q_f——辅助能源提供热量,kJ;Q_W——生活热水耗热量,kJ;Q_C——建筑采暖耗热量,kJ。

2) 系统 *COP*

对整个燃气壁挂炉辅助太阳能供热系统,其系统 *COP* 为系统总集热量 Q 与不可再生能源耗量 W 之比[8]:

$$COP=\frac{Q}{W}=\frac{Q_S+Q_B}{W_b+W_p} \quad (4)$$

式中,Q_B——燃气壁挂炉单元产热量,MJ;W_b——燃气壁挂炉燃气能耗,MJ;W_p——水泵能耗,MJ。

3　实验研究结果及分析

实验室置于宁夏银川市艾尼公司厂房内，实验室结构如图 2 所示。实验房间参数如下：有窗户的墙为西外墙，其他面墙置于厂房中，西墙窗户下的围护结构为 20 cm 厚砖墙，其他部分为 1 mm 钢板+100 mm 厚苯板+1 mm 厚钢板；南面围护结构门为 2.5 mm 厚玻璃；其他两面为 15 mm 厚漆面木板。实验时间为 2015 年 10 月 10~16 日，分别进行 4 d 阴天工况实测和 2 d 晴天工况实测，时间从 00:00~23:50，每隔 10 分钟记录 1 次数据。

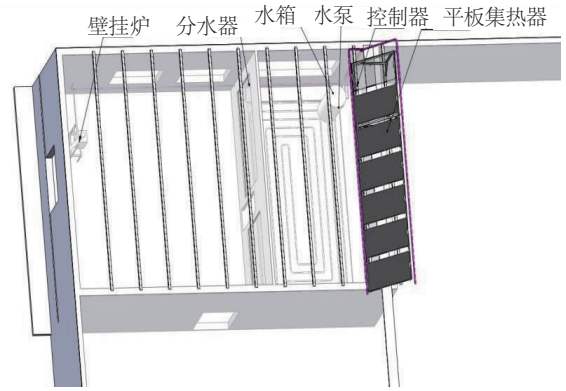


图2　实验室结构图

Fig. 2　Diagram of laboratory

3.1　不同工况的运行情况

本文选取具有代表性的几组工况的测试数据进行分析，分别为 2 组阴天工况和 1 组晴天工况。

3.1.1　阴天工况测试

阴天工况下全天辐照度低于 300 W/m^2，太阳能高端温度与水箱温度的差值无法达到启动温差，用户用热需求完全由燃气壁挂炉提供。燃气壁挂炉出水温度设为 45 ℃，自启动温差为 15 ℃。

由图 3 实验数据可知，燃气壁挂炉间断性工作，出水温度大于 45 ℃则关闭，小于 30 ℃则开启；整个测试时间内，室温在 17.1~20.8 ℃范围内波动，属于可接受范围；壁挂炉运行时间为 544 min，燃气总耗量 12790 L。

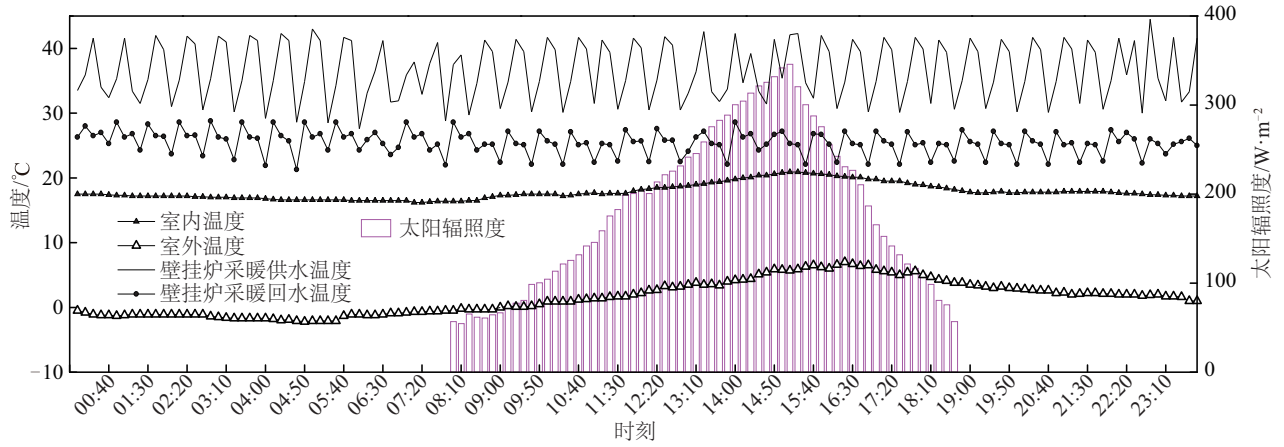


图3　阴天工况系统运行数据

Fig. 3　Operating data under the cloudy day condition

3.1.2　晴天工况测试

晴天工况下，太阳能日总辐照量为 46.18 MJ/m^2 时，太阳能系统的高端温度与水箱温度的差值可达到启动温差，用户用热需求由太阳能和燃气壁挂炉共同提供。

由图 4 实验数据可知，集热器 11:18 时开始运行，此时集热器高端温度 37 ℃，低端温度 27 ℃，水箱水温 30 ℃；16:08 停止运行，此时集热器高端温度 59 ℃，低端温度 58 ℃，水箱水温 56 ℃。集热器停止工作后，16:09~20:40 由水箱热水提供采暖负荷，水箱温度由 56 ℃降到 45 ℃，20:41~23:59 燃气壁挂炉开始工作。测试时间范围内，室温在 17.6~21.2 ℃内波动，属于可接受范围；壁挂炉运行时间为 327 min，燃气总耗量 6526 L。

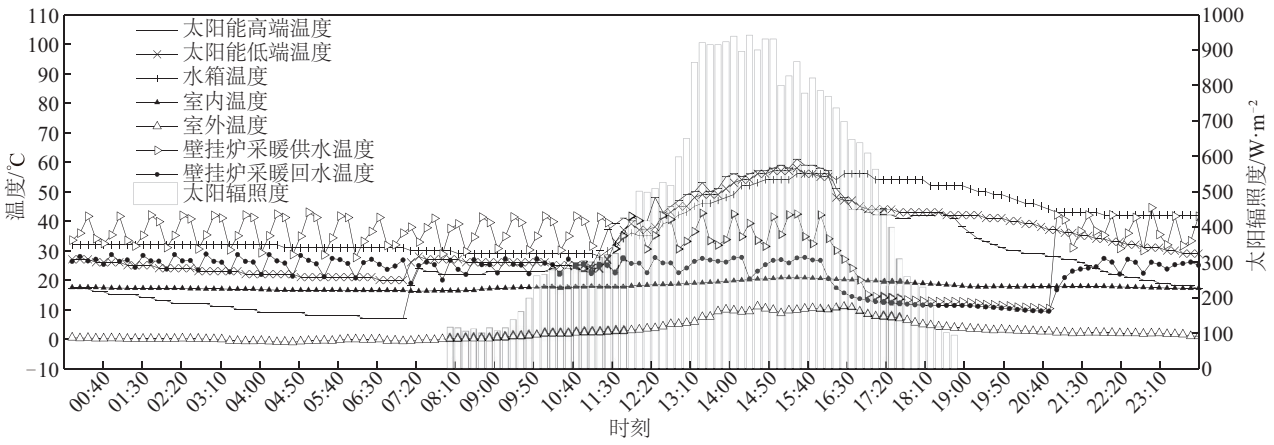


图4 晴天工况系统运行数据

Fig. 4 Operating data under the sunny day condition

3.2 运行效率的测定

3.2.1 太阳集热器能效的计算

晴天工况中,在符合太阳集热器测试要求的时间内,对集热器以每分钟为单位进行积分,得出集热器在测试期间内接收的总太阳能为 86688 kJ,在此期间水箱温度升高 25 ℃,则水箱得热量即太阳能循环集热量为 51500 kJ,由此计算得出集热器平均效率为 59%。

3.2.2 燃气采暖效率的测定

设定采暖出水温度为 45 ℃,燃气壁挂炉的耗气量与热效率实验结果如表 2 所示。由实验数据计算可得,壁挂炉采暖平均热效率为 89.5%。

表2 燃气壁挂炉采暖热效率数据

Table 2 Thermal efficiency of boiler for space heating

时间间隔/s	燃气耗量/L	供水温度/℃	回水温度/℃	效率/%
30	11.0	46.2	29.1	91.7
30	10.7	45.8	29.6	88.8
30	10.8	46.5	29.8	90.8
30	10.8	46.6	29.8	91.0
30	10.6	46.3	29.6	91.7
30	11.1	46.1	29.4	87.6
30	11.4	46.1	29.2	86.7
30	11.4	46.2	29.0	88.0

3.2.3 燃气生活热水效率的测定

生活热水流量为 10 L/min,加热温升为 30 ℃,壁挂炉燃气耗量及效率实验结果如表 3 所示。由实验数据计算可得,壁挂炉热水平均热效率为 87.7%。

表3 燃气壁挂炉热水热效率数据

Table 3 Thermal efficiency of boiler for hot water

燃气耗量/L	水箱热水温度/℃	壁挂炉热水温度/℃	温差/℃	效率/%
41.3	18.2	48.5	30.3	86.3
42.9	17.8	48.8	31.0	85.0
40.6	18.1	48.7	30.6	88.7
41.1	17.9	48.2	30.3	86.7
40.8	17.6	48.7	31.1	89.7
41.2	17.7	48.5	30.8	87.9
40.9	17.9	48.9	31.0	89.1
41.5	17.6	48.8	31.2	88.4

3.2.4 系统性能指标

阴天工况下,太阳辐照度较低,太阳能循环系统不能工作,则太阳能保证率为 0;晴天工况下,水箱升温 28 ℃,则太阳能循环集热量为 57680 kJ,燃气壁挂炉提供的热量为 185761 kJ,则太阳能保证率为 0.24。

系统阴天工况和晴天工况的系统能效比如表 4 所示。由表可知,晴天工况系统 *COP* 为 1.131,阴天工况系统 *COP* 为 0.756,小于 1。

表4　实验不同工况下系统能效比

Table 4　Results *COP* of different experimental conditions

工况	太阳能集热量 Q_S/MJ	壁挂炉产热量 Q_b/MJ	系统总集热量 Q/MJ	壁挂炉燃气能耗 W_b/MJ	泵能耗 W_p/MJ	系统能效比 *COP*
阴天工况	0.00	345.00	345.00	455.00	2.05	0.756
晴天工况	58.52	212.20	270.72	232.00	10.65	1.131

4　实验系统误差分析

4.1　间接测量误差基本原理

本实验系统利用间接测量的方法，得出集热器集热效率、燃气壁挂炉采暖热效率和生活热水热效率等，实验采用仪表对温度、流量和太阳辐照度等进行直接测量，按照已知函数关系计算得出系统能效指标。根据间接测量的误差传递原理[9]，得出函数误差计算公式。

设一般的函数方程为 $Z=F(x_1,x_2,\cdots,x_n)$，$x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为独立测量值，$\Delta x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为独立测量值的绝对误差，则函数 Z 的传递误差计算式为：

$$\Delta Z=\frac{\partial F}{\partial x_1}\Delta x_1+\frac{\partial F}{\partial x_2}\Delta x_2+\cdots+\frac{\partial F}{\partial x_n}\Delta x_n \tag{5}$$

则函数 Z 的相对误差为：

$$\frac{\Delta Z}{Z}=\frac{1}{Z}\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\Delta x_1+\frac{\partial F}{\partial x_2}\Delta x_2+\cdots+\frac{\partial F}{\partial x_n}\Delta x_n\right) \tag{6}$$

4.2　实验数据的误差分析

以集热器集热效率的误差分析为例，分析本实验系统实验数据的测量误差。

集热器平均集热效率为：

$$\begin{aligned}\eta_d&=\frac{3600Q_S}{A_C(1-\eta_L)I_\theta T}\times 100\%\\&=\frac{3600\rho_1 c_1 V_1(t_{out}-t_{in})}{A_C(1-\eta_L)I_\theta T}\times 100\%\end{aligned} \tag{7}$$

根据误差传递原理可知，集热器平均效率的绝对误差为：

$$\Delta\eta_d=\frac{3600\rho_1 c_1 V_1}{A_c(1-\eta_L)T}\left(\frac{\Delta t_{out}-\Delta t_{in}}{I_\theta}-\frac{t_{out}-t_{in}}{I_\theta^2}\Delta I_\theta\right) \tag{8}$$

则集热器平均效率的最大相对误差为：

$$\left|\frac{\Delta\eta_d}{\eta_d}\right|=\left|\frac{\Delta t_{out}}{t_{out}-t_{in}}\right|+\left|\frac{\Delta t_{in}}{t_{out}-t_{in}}\right|+\left|\frac{\Delta I_\theta}{I_\theta}\right| \tag{9}$$

1）集热器供回水温度测量误差

铂电阻精度为±0.1%，满量程为 100 ℃，其测量误差为±(0.1%×100)= ±0.1℃。晴天工况下，集热器供、回水平均温差为 9.6 ℃，则：

$$\left|\frac{\Delta t_{out}}{t_{out}-t_{in}}\right|=\left|\frac{\Delta t_{in}}{t_{out}-t_{in}}\right|=\left|\frac{0.1}{9.6}\right|=1.04\% \tag{10}$$

2）太阳辐照度测量误差

总辐射表灵敏度为±10.119 μV/(W·m^{-2})，量程为 0~2000 W/m^2，测试中平均太阳辐照度为 535 W/m^2，转换为热电势为 3.993 mV，则：

$$\left|\frac{\Delta I_\theta}{I_\theta}\right|=\left|\frac{0.0010119}{3.993}\right|\times 100\%=0.02\% \tag{11}$$

则计算得集热器平均效率的最大相对误差为 2.1%，小于 5%。

5　结　论

1）在银川地区的气候条件下，太阳能燃气互补供热系统在不同工况下均能维持室内温度在可接受范围内，且能提供稳定温度的生活热水，可满足用户用热需求，系统能效比较高，在阴天工况下系统 *COP* 可达 0.756。

2）在冬季的晴天工况下，当太阳能日辐射量为 46.18 MJ/m^{2}时，太阳集热器平均效率为 59.0%，系统的太阳能保证率可为 0.24，系统 *COP* 为 1.13。

3）此系统实际运行中燃气壁挂炉采暖热效率为 89.5%，生活热水热效率为 87.7%，均小于按照国家标准测出的效率，说明设备实际运行效率与标准测试效率存在差距，因此在系统设计选型时应注意留出余量。

4）对实验数据进行测量误差分析可知，测试数据的最大相对误差为 2.1%，误差较小，表明该实验系统测试数据准确可靠。

[参考文献]

[1]　陈志炜. 太阳能-燃气互补供热系统优化设计方法研究[D]. 天津：天津大学，2015.

[1]　Chen Zhiwei. Research on optimization design method for solar energy-gas complementary heating system[D].

Tianjin: Tianjin University, 2015.
[2] GB/T 4271—2007, 太阳能集热器热性能实验方法[S].
[2] GB/T 4271—2007, Test methods for the thermal performance of solar collectors[S].
[3] GB/T 4271—2000, 平板型太阳能集热器热性能试验方法[S].
[3] GB/T 4271—2000, Test methods for the thermal performance of flat plate solar collectors[S].
[4] GB/T 25034—2010, 燃气采暖热水炉[S].
[4] GB/T 25034—2010, Gas-fired heating and hot water combi-boilers[S].
[5] BS EN 12975—1: 2006, Thermal solar systems and components—solar collectors: part 2: Test method[S].
[6] GB/T 25967—2010, 带辅助能源的家用太阳能热水系统热性能试验方法[S].
[6] GB/T 25967—2010, Test methods for the thermal performance of domestic solar-plus-supplementary water heating systems[S].
[7] 丁 勇, 刘 垚. 重庆地区太阳能复合空气能热水系统关键因素分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(10): 2402—2410.
[7] Ding Yong, Liu Yao. Analysis of key factors at air-source heat pump assisted solar hot water system in Chongqing area [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(10): 2402—2410
[8] 韩宗伟, 李先庭, 石文星, 等. 太阳能蓄热与低温空气源热泵复合空调系统优化设计[J]. 太阳能学报, 2012, 33(9): 1529—1525.
[8] Han Zongwei, Li Xianting, Shi Wenxing, et al. Optimal design of low temperature air source heat pump system combined with thermal storage of solar energy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(9): 1529—1525.
[9] 张喜明, 于立强, 旷玉辉. 太阳能热泵供热实验台的设计及误差分析[J]. 节能技术, 2006, 24:316—320.
[9] Zhang Ximing, Yu Liqiang, Kuang Yuhui. Measurement error analysis of solar assisted heat pump system[J]. Energy Conservation Technology, 2006, 24: 316—320.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SOLAR ENERGY-GAS COMPLEMENTARY HEATING SYSTEM

Yang Lin[1], Zhang Huan[1], You Shijun[1], Chen Zhiwei[1], Wang Qi[2], Gao Wenxue[2]
(1. *School of Environmental Science and Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300350, *China*;
2. *North China Municipal Engineering Design & Research Institute*, *Tianjin* 300074, *China*)

Abstract: A new solar energy-gas complementary heating system is presented. In order to study the performance of the system, the test method and several performance indexes are put forward. Aiming at this test method, the test platform of system is set up, the tests under different operation conditions are carried out and the measurement error of the thermal efficiency of the solar collector is analyzed. The experimental results show that the system can meet the heat requirements of users, and *COP* is 0.756 under the cloudy condition. The thermal efficiency of collector is 59% and *COP* can reach 1.13 under the sunny conditions with a total radiation of 46.18 MJ/m^2. The measurement error analysis shows that the maximum relative error of the system test data is 2.1% and the error is smaller. The results indicate that the test data of system are accurate and reliable.

Keywords: solar energy gas complementary heating system; test method; performance index; error analysis