

严寒地区太阳能热利用系统 防冻实验研究^{*}

哈尔滨工业大学 刘慧芳[☆] 张时聪 姜益强[△] 姚 杨

摘要 以哈尔滨地区为例,建立了太阳能系统实验台,针对太阳能热利用系统中存在的防冻问题提出了新的防冻运行模式和控制策略。该防冻模式采用集热器内高温液体作为防冻热源向管路提供热量,测试了不同室外条件以及不同运行模式下,室外管道内液体温度的变化。实验结果表明,防冻模式下室外环路内防冻液温度可高于外界环境温度 15 ℃ 以上,所采用的防冻液体积分数可由 50% 降低到 30%。该防冻策略比传统的防冻措施更可靠、安全,经济性更优。

关键词 太阳能 防冻 集热系统 严寒地区 经济性

Experimental study on anti-freezing of solar heating system in severe cold zone

By Liu Hui Fang[★], Zhang Shicong, Jiang Yiqiang and Yao Yang

Abstract Establishes an experiment platform to research the anti-freezing operating modes and control strategies of the solar energy utilization system in Harbin. The thermal energy in solar collectors is used as the energy resource to prevent freezing in this system. Under different outdoor conditions and operating modes, tests the temperature variation of the fluid in outdoor pipe. The results suggest that it can keep the temperature 15℃ higher than that of the environment, and further the volume fraction of antifreeze can be reduced from 50% to 30%. In addition, this anti-freezing strategy is more reliable, safer and more economical than the traditional anti-freezing measures.

Keywords solar energy, anti-freezing, solar collecting system, severe cold zone, economical efficiency

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

太阳能作为一种清洁的可再生能源,近年来在供热、制冷、发电、干燥等领域得到了广泛的应用^[1-3]。严寒地区由于供暖时间较长、供暖能耗偏大,利用太阳能供暖符合我国节能减排、发展低碳经济的目标和要求。但是目前连续使用太阳能资源还存在很多需要解决的问题与难点,太阳能系统防冻是严寒地区太阳能利用中存在的问题之一。目前常用的防冻做法有添加防冻液、电伴热带辅助加热、排空、循环流动等^[4],相关文献中给出了应对管道防冻的一些措施,但是在实际应用中有一定的局限性,主要适用于小型家用太阳能热水系统^[5]。

对于大型太阳能供暖工程,通常是采用一定浓度的防冻液防止管道冻结。

在严寒及寒冷地区,采用防冻液防冻时,其浓度的选取目前尚没有明确的依据。实际工程中通常是保证所选取的防冻液的冰点高于该地区最低室外空气温度,并有一定的安全余量。这种做法往往导致防冻液浓度选取过高,使得系统运行成本增加,降低系统的集热效率。以哈尔滨地区为例,冬

①☆ 刘慧芳,女,1983年9月生,在读博士研究生

△ 姜益强(通信作者)

150090 哈尔滨工业大学二校区市政环境工程学院 1306 信箱

(0451) 86282123

E-mail: jyq7245@163.com

收稿日期:2013-11-05

修回日期:2014-01-10

季供暖室外计算干球温度为 $-24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，太阳能供暖系统中采用防冻液作为循环介质时，防冻液(乙二醇溶液)体积分数一般要取50%左右(冰点 $-33.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)。夜间随着室外空气温度的降低，室外管道与集热器内介质温度也逐渐降低。一段时间后，管道内介质温度达到其冰点温度开始结冰，并最终可能冻坏室外管道。即便在保温良好的情况下，由于管道内液体水容量很小，其温度也会在几个小时内从将近 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或更低，而此时由于真空管集热器本身保温性能和防冻性能较好，设备本身冻坏的可能性较小，而且真空管系统本身热容量较大，在白天集热结束时，集热器进出口处液体温度基本保持在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，可作为防冻的有效热源。

因此，本文提出了采用集热器内高温液体作为防冻热源，通过循环流动向管道提供热量的防冻运行模式。通过搭建太阳能系统实验台，测试了不同室外工况以及不同运行模式下，室外管道内液体温度的变化。该防冻运行模式能够实现降低防冻液浓度，提高系统经济性的目的。

1 实验系统原理及防冻运行策略

1.1 系统原理介绍

根据GB 50495—2009《太阳能供热采暖工程技术规范》^[6]，严寒地区太阳能供热系统形式宜选择：集热器为液体工质或空气集热器；末端为低温热水地板辐射供暖或热风供暖；集热系统采用间接系统形式。实验系统主要是针对太阳能系统防冻及集热性能研究，所以设备的选型、实验台的搭建按照冬季工况考虑，保证冬季有最大集热效率。实验系统原理如图1所示。

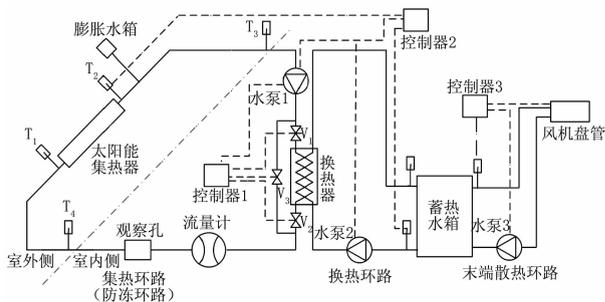


图1 实验系统原理

该实验系统包括太阳能集热环路(夜间运行时也称为防冻环路)，连接板式换热器和水箱的换热环路，末端散热环路，控制系统以及温度、流量测试

装置。太阳能集热器采用真空管集热器，总集热面积 3.5 m^2 ，其尺寸为 $\text{O}58\times 2\text{ }000\text{ mm}$ ，管内径为 $\text{O}47$ ，布管方式为竖排式。本实验中所采用集热器的集热性能及热损失系数满足相关规范要求^[7-8]，实际工况下测试得到的基于集热器进口温度的效率方程为

$$\eta = 0.556 - 1.94 \frac{t_{\text{in}} - t_{\text{a}}}{I} \quad (1)$$

式中 η 为集热器瞬时集热效率； t_{in} 为集热器进口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{a} 为室外环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ； I 为太阳辐射照度， W/m^2 。

板式换热器换热面积为 0.3 m^2 。蓄热水箱容积为 150 L ，管道管径为 $\text{DN}20$ 。控制器1用来控制防冻环路运行，控制器2和3在集热模式时使用，分别为温差控制器和定温控制器。温度测量采用T型热电偶；流量测量采用玻璃转子流量计。

1.2 防冻运行模式

该实验可以实现集热和防冻两种运行模式。本文主要针对夜间无太阳辐射时太阳能系统的防冻性能进行研究，对集热模式下的系统热性能不作详细探讨。

防冻模式是在集热模式的基础上，在换热器两侧增加旁通环路，旁通环路的启闭通过控制阀门 V_3 来实现。防冻运行时环路内液体通过旁通环路(不通过板式换热器)进行循环，可防止板式换热器冻裂。由于真空管集热器的保温性能较好，水容量大、水温较高，而室外管路内液体在静止状态下会很快降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更低(保温良好)，进而冻坏室外管道。因此，防冻模式通过将集热器内高温液体的热量反补室外管路，使管路内液体温度保持较高值或者通过循环流动来延缓室外管路内液体温度的下降，避免管内液体结冰。

本实验设有两组相同的实验台，便于比较不同流速、不同防冻液浓度以及不同防冻运行策略时对应的防冻效果，以便得到最优的防冻策略。防冻运行模式分为夜间连续运行和间歇运行两种。系统1防冻运行流程及测点布置如图2所示(系统2流程同系统1，测点分别为 $T_5\sim T_8$)。夜间防冻运行流程如图中箭头所示。

控制系统采用继电器自编程控制，根据不同防冻运行模式设置相应的控制系统。夜间连续运行时设定防冻运行时间为18:00至次日08:00(参考集热

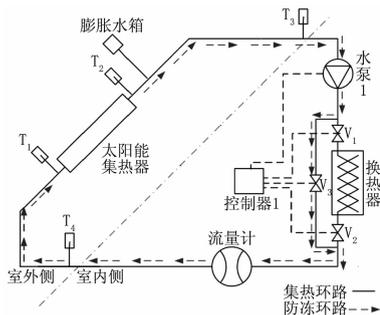


图2 系统1防冻流程及测点布置

模式运行时间进行设定)。间歇运行时根据集热环路内各测点温度以及环路内的防冻液浓度设置防冻运行温度。当集热环路内各测点温度的最低值达到设定值时,启动防冻运行模式并运行一定时间(本文中设定每次运行时间为10 min),然后停止。

2 实验数据分析

2.1 晴朗天气条件下

在晴朗天气条件下,夜间防冻环路连续运行(系统2)与静止(系统1)时系统各测点对比如图3所示。此时系统1,2内防冻液体积分数分别为50%和30%,系统2管内液体流速约为0.2 m/s,与集热模式时管内流速基本相同。

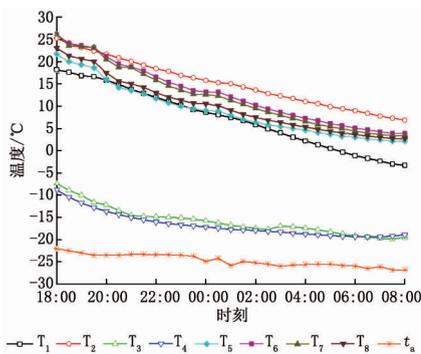


图3 系统1,2各测点温度变化对比

由图3可以看出,系统1夜间静止时,集热器进出口测点(T_1, T_2)温度较高,室外管道测点(T_3, T_4)温度较低,并且测点 T_3, T_4 温度明显低于测点 T_1, T_2 温度。18:00时,系统1中测点 T_1, T_2, T_3, T_4 温度值分别为18.2, 25.2, -7.4, -8.8℃。夜间系统1各测点处液体温度逐渐降低,在次日07:00—08:00时基本达到最低值,之后由于太阳辐射的影响,温度快速升高。08:00时,系统1中测点 $T_1 \sim T_4$ 温度分别为-3.3, 6.9, -19.5, -19.0℃。如果系统1中选择水或冰点较高的溶液作为循环介质,则室外管段很容易出现结冰,进而冻坏系统。因此,在

严寒地区,太阳能系统如果通过添加防冻液防冻的话,则需要的防冻液浓度很高。

系统2夜间防冻运行时各测点温度基本相等,各测点最大温差不超过5℃。夜间随着室外环境温度的降低和系统热损失的增加,系统各测点温度均逐渐降低,且变化趋势基本相同。08:00时,系统2各测点温度分别为2.1, 3.8, 3.4, 2.6℃,均高于0℃,该情况下系统即使采用水作为循环介质也不存在冻坏的危险。

根据以上分析,夜间集热环路连续运行时管路内液体温度明显升高,能在很大程度上降低管路结冰的可能性,但同时水泵运行也需要消耗一定的能量。根据夜间连续运行时温度基本能够保持0℃以上的结论,在连续防冻运行的基础上,改为间歇防冻运行。设定间歇防冻运行的启动温度为0℃,此时系统内防冻液体积分数为20%。其夜间防冻运行情况如图4所示。

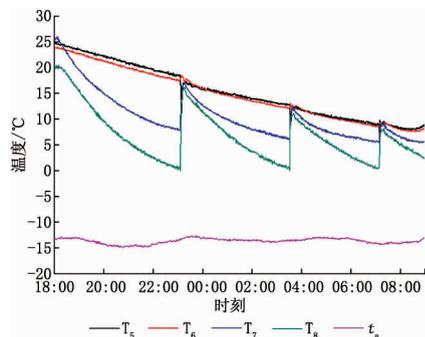


图4 系统2夜间间歇防冻运行时各测点温度变化(1)

此时,系统1集热器进出口测点温度变化规律以及最终温度与图3中相应测点温度变化类似。间歇运行模式能够大大缩短水泵运行时间,因此是一种更经济的防冻运行方式。但是当集热器进出口温度较低时,防冻模式应该改为连续运行以避免水泵的频繁启停,如图5所示。在05:25—08:10内为连续运行,之前为间歇运行,夜间总运行时间为3.7 h。

设定间歇防冻运行时每次运行时间为10 min,则间歇防冻运行时间一般在30~240 min之间,具体运行时间与设定防冻运行启动温度有关,受夜空辐射的影响也较大。

2.2 连续阴雨天气条件下

太阳能系统防冻液浓度的选取应考虑系统最不利工况,即连续阴雨(雪)天气条件下系统内溶液

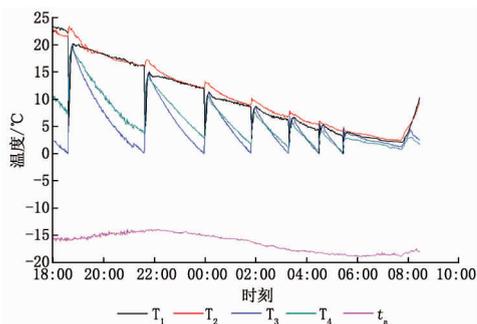


图5 系统2夜间间歇防冻运行时各测点温度变化(2)

可能出现的最低温度值。本实验采用防冻模式对连续阴雨天气条件下系统环路内液体温度的变化进行了研究。

实验以系统2为例,系统内防冻液体积分数仍取30%,流速仍为0.2 m/s左右。实验时间为2013年2月5日18:00到8日08:00,该期间为降雪天气,并且随着系统内液体温度的降低,防冻运行模式以连续运行为主。实验期间,系统2各测点的温度变化如图6所示。

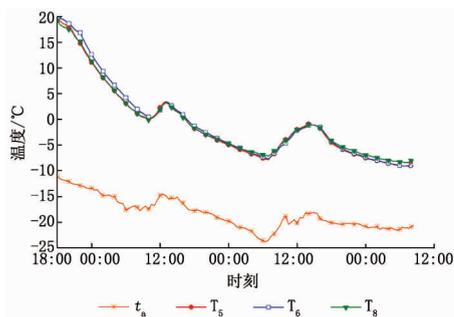


图6 连续阴雨天气条件下防冻运行

实验期间夜间管内液体温度逐渐降低,在2月7日07:00出现局部极低温度 -7.9°C ,2月8日06:30出现最低温度 -9.1°C 。同时室外最低空气温度为 -23.8°C ,实验期间管内液体温度平均高于室外环境温度 15°C 以上。白天虽然是降雪天气,但是少量的太阳辐射仍然能够使得管内液体温度有一定程度的回升。因此,实验系统采用30%的乙二醇溶液(冰点 -14.1°C)作为循环介质完全能够满足防冻要求。

2.3 防冻模式连续运行效果

在上述实验的基础上,2013年1,2月对系统2防冻模式下管内溶液温度的变化进行了连续测试,结果如图7所示,其中2月12日以前夜间防冻为连续运行,从2月13日起改为间歇运行,设定间歇

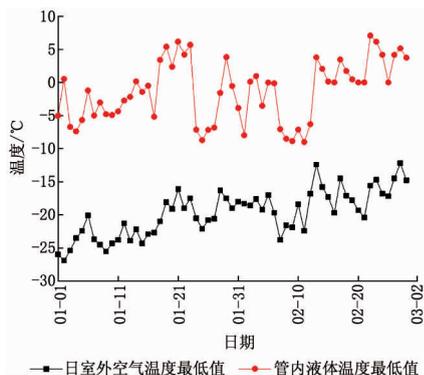


图7 防冻模式下管内液体温度变化

运行启动温度为 0°C 。实验期间管内液体最低温度为 -9°C ,明显高于室外空气最低温度,防冻运行效果良好。

同时将系统1内溶液的体积分数由50%分别降低至25%和20%进行实验,发现管内液体温度变化与体积分数50%,30%时温度变化基本相同。需要强调的是,采用20%防冻液时(冰点 -7.8°C),管内溶液最低温度达到 -9°C 而不结冰。这可能是因为流动状态能够降低管内液体的结冰温度。关于流动对溶液结冰的影响有待进一步的深入研究。

3 经济性分析

为了验证防冻运行效果的经济性,2013年10—12月对间歇防冻运行模式下的运行时间进行了测试,并对电伴热带防冻和高浓度防冻液防冻时的经济性进行了简单比较。2013年12月间歇防冻运行设定防冻模式启动温度为 0°C ,每次运行时间为10 min。每日运行时间如图8所示,月总运行时间为2300 min,即38.3 h。

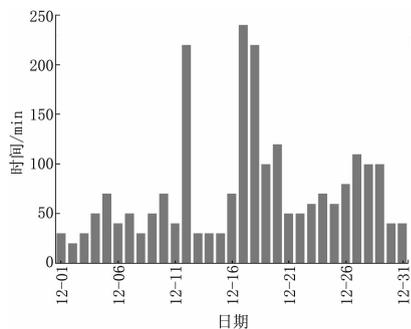


图8 12月间歇防冻运行时间

不同防冻方式下的经济性比较见表1。

表1只是对该实验系统的防冻运行费用进行了简单的经济性分析。需要指出的是,这里仅给出

表1 不同防冻方式下的经济性比较

	间歇运行防冻	电伴热带	防冻液
基本参数	供暖期 10 月至次年 4 月,总运行时间为 202 h,考虑 1.3 的富余系数,总运行时间为 262 h; 水泵功率 0.1 kW; 电价参考当地市价 1 元/(kW·h)	12 月份实测夜间耗电量 2.7 kW·h/d; 设定运行时间为每天 18:00 至次日 08:00; 整个供暖季运行时间为 110 d; 电价参考当地市价 1 元/(kW·h)	每组集热器(20 根集热管)水容量约为 52 L,整个系统容量为 79 L; 防冻液体积分数取 50%时需要添加乙二醇 42 kg; 按照乙二醇价格 10 元/kg 计算; 防冻液有效期为 3 a
运行费用/元	26.2	297	0
成本	需要开关型电动两通阀以及控制装置,合计约为 500 元	长度 21 m,约 50 元	每年每组集热器需添加防冻液费用约 140 元
10 年总费用/元	762	3 020	1 400

注:表中整个供暖期的总间歇运行时间和电伴热带耗电量根据已有的 10—12 月数据进行估算得到。

了只有一组集热器时需要添加的乙二醇的费用。对于大型太阳能供暖或者集中式热水系统,随着集热器面积的增加,所需要的乙二醇溶液的量以及费用也成倍增加,因此对于大型太阳能热利用系统,通过添加高浓度防冻液或者使用电伴热带防冻将会更加不经济,此时通过间歇循环防冻的经济性也会更加明显。但是考虑到极端天气条件的影响,间歇循环防冻最好还是结合低浓度防冻液或者水箱反补加热等防冻方式共同使用,以满足任何室外工况条件下的防冻要求。

4 结论

根据当地室外最低空气温度来确定太阳能热利用系统中防冻液浓度的做法会使得所选取的防冻液浓度过高,增加系统投资、降低系统经济性。以哈尔滨地区为例,建立了太阳能系统实验台,测试了不同室外条件以及不同防冻运行模式下,室外管道内液体温度的变化。结果表明,防冻模式下系统环路内液体温度一般可高于室外环境温度 15℃以上,所采用的防冻液体积分数可由 50%降低到 30%甚至 20%。通过对不同防冻方式的经济性比较得出,本文中给出的间歇运行防冻策略在实现系

统环路防冻的前提下大幅降低了防冻液的浓度,提高了系统的经济性。

参考文献:

- [1] Zhai Xiaoqiang, Wang Ruzhu. Experiences on solar heating and cooling in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(4): 1110-1128
- [2] Yin Zhiqiang. Development of solar thermal systems in China[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 86(3): 427-442
- [3] Vijay D, Mansoor A, Soma D, et al. Solar energy: trends and enabling technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19(3): 555-564
- [4] 刘桂永, 庄长宇, 姜立军, 等. 太阳能热水器的防冻解决方案[J]. *家电科技*, 2010(8): 64-65
- [5] Zhao Yulei, Wang Jie. Five methods of prevent frostbite of pipeline about solar water heater[C]// *Proceedings of Ises Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement*, 2007: 2100-2103
- [6] 中国建筑科学研究院. GB 50495—2009 太阳能供热采暖工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
- [7] 清华大学, 中国标准化研究院. GB/T17049—2005 全玻璃真空太阳集热管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [8] 国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京), 中国标准化研究院. GB/T 4271—2007 太阳能集热器热性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007