

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.10.010

水合盐相变储能材料在太阳能融冰雪实验系统中的应用研究

郑涛杰, 陈志莉

(中国人民解放军陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401331)

摘要: 自制了结合相变储能材料应用的太阳能融冰雪实验系统, 研究了相变储能材料在“快速启动”、“能量补充”、“能量波动”及“能量吸收”等情境下对实验系统效率及产水量的影响; 在对实验系统置入相变储能材料与流程优化基础上, 对比研究了系统改进前后的产水量差异与能耗变化。研究表明: 水合盐相变储能材料能有效控温 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 具有较好的储能、释能性能与抗波动能力, 满足各情境下的控温需求。通过置入相变储能材料并采用优化流程设计, 使实验系统在全仿真模拟实验中产水量提升 11.4% , 电能消耗减少 9.4% , 可实现不同条件下能量的高效利用, 降低了人力成本。

关键词: 相变储能材料; 太阳能融冰雪; 模拟实验; 流程设计; 系统优化

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)10-090-13

Study on application of salt hydrates phase change materials in solar melting ice and snow experimental system

ZHENG Taojie, CHEN Zhili

(Department of Military Facilities, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, P.R.China)

Abstract: A solar melting ice and snow experimental system combined with phase change materials was fabricated and the effect of phase change materials on the system efficiency and the water production was studied under the conditions of “quick start”, “energy supplement”, “fluctuation” and “energy absorption”. Based on the addition of the phase change material and process optimization in the experimental system, the differences in water production and energy consumption before and after the system improvement were compared and studied. The results show that the salt hydrates phase change materials can effectively control the temperature in the range of $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and have good energy storage, release performance and anti-fluctuation ability, which can meet the temperature control requirements under various situations. By adding phase change materials and adopting optimized flow design, the experimental system can increase the water production by 11.4% and decrease the power consumption by 9.4% in the full simulation experiment, which can realize the efficient use of energy under different conditions and reduce the labor cost.

Keywords: phase change material; solar melting ice and snow; simulation experiment; flow design; system optimization

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51106177); 军队重点科研项目(BY114C006); 重庆市基础与前沿研究计划项目(CSTC 2015cyjBX0059)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51106177), and Key Project of Military Research (BY114C006) and Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology(CSTC 2015cyjBX0059).

作者简介: 郑涛杰(1993—), 中国人民解放军陆军勤务学院硕士研究生, 主要研究方向为海水淡化和太阳能, (E-mail) 530688746@qq.com。

中国存在着不少常年积雪的艰苦偏远地区,由于气候恶劣及交通闭塞,导致这些地区常年面临着饮用水获取困难、水源质量差、冬季低温水源冻结无法取水等问题^[1]。尤其是军队驻扎的高海拔边防哨所,饮用水源常年无法得到有效保障,在冬季只能借助烧煤融化冰雪取水,这也成为了制约高原寒冷地区部队战斗力、影响一线官兵身体健康的难题。本课题组前期设计开发的新型太阳能融冰雪净水系统^[2],已在西藏亚东县某哨所成功安装并投入使用,在运行时间内太阳平均辐照度高于 800 W/m^2 的条件下,日产水超过 200 L ,解决了融冰雪取水的燃眉之急。

随着相变储能技术的发展,相变储能材料被广泛应用于能源^[3]、建筑^[4]、航天^[5]、化工^[6]等领域,是目前能量利用^[7]与材料开发研究的重点^[8]。相变储能材料所具有的能量调配、温度控制,能量吸收等特性^[9]能与太阳能融冰雪系统的融冰雪产水效率提升需求能较好的契合^[10],到目前为止,国内外尚无将相变储能材料应用于太阳能融冰雪取水设备的研究报道。

将本课题组自主研发的具有高相变潜热、高导热系数及低过冷度的新型水合盐类相变储能材料应用于太阳能融冰雪取水设备中,能进一步提升产水率^[11]。为研究相变储能材料在太阳能融冰雪取水设备上的应用方式与效率提升情况,搭建了包含相变储能水箱的太阳能相变储能融冰雪实验系统^[12]。基于相变储能材料在太阳能融冰雪取水设备上应用的基本特征,针对其储能特性对比研究了有无相变材料条件下系统“快速启动”、“能量补充”、“波动调节”及“能量吸收”等情景下产水率的变化^[13],以此为基础优化设计了太阳能相变储能融冰雪取水系统的运行流程,进行了完全工作周期全仿真模拟,为太阳能利用与相变储能材料应用提供科学参考^[14]。

1 实验系统搭建与实验情景设定

1.1 水合盐相变储能材料的开发

本课题组以水合盐混合体系为基础(主成分为 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)通过增稠改性^[15]消除了其相分离^[16],并加入了本课题组自主研发的氧化石墨烯/石墨导热-成核增强剂,使其过冷下降至 $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$,使用温度范围($0 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$)内的平均导热系数高于 3.75 。该水合盐相变储能材料的相变温度为 $34.1 \text{ }^\circ\text{C}$,与太阳能融冰雪取水系统的导热循环工质平均温度接近;相变潜热大于 220 J/g ,且在 100 个热循环内相变潜热损失为 18.7% ,据 $\log_3\text{P1}$ 模型估算其相变潜热下降至初始值的 75% 需要 600 个热循环,其 DSC 分析及相变潜热衰减如图 1 所示。该型水合盐相变储能材料专为太阳能融冰雪取水系统设计,其性能参数指标达到实验系统应用要求。

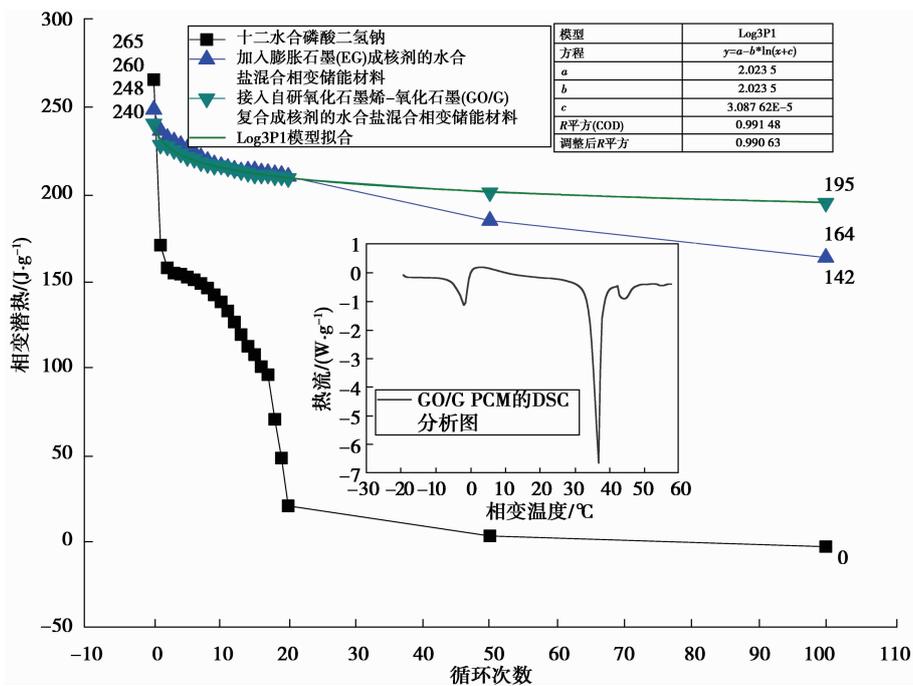


图 1 水合盐相变储能材料热循性能及 DSC 分析图

Fig.1 Thermal cycling performance and DSC analysis of salt hydrate PCM

1.2 相变水箱的设计

为了实现对相变储能水箱油路温度的有效调节,设计了如图 2 所示的相变储能水箱。

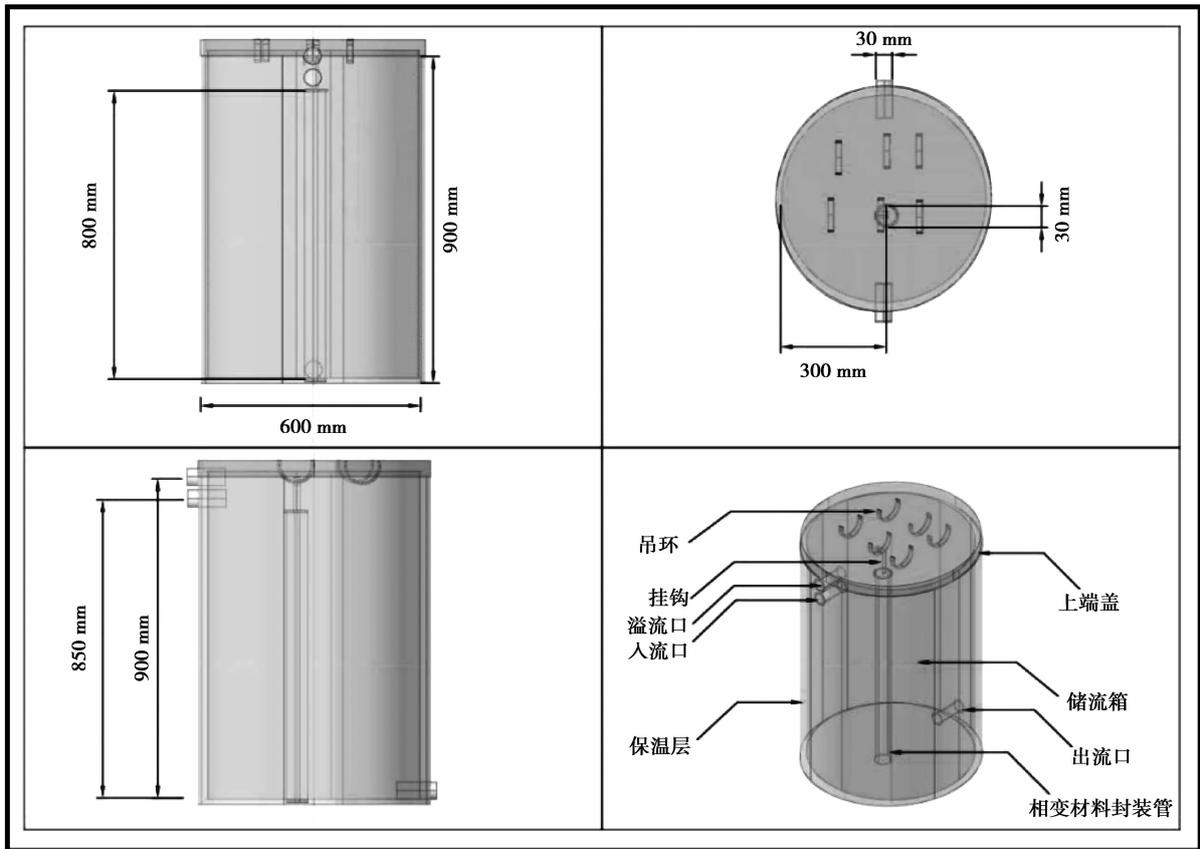


图 2 相变储能水箱设计图

Fig.2 Design of phase change energy storage tank

该相变水箱的核心部件为多组在水箱内垂直排布的相变储能管,该管由内镀高热防腐涂层的 304 不锈钢管制成。水箱内置保温层,且上端盖有 20 个相变储能反应柱挂点,可根据不同需求改变相变材料种类及质量。本实验通过将相变材料加热液化,将其注入反应柱内并密封,从而实现材料封装,如图 3 所示。可根据材料使用寿命进行定期替换。在单只反应柱内相变材料液相体积为 480 mL,填充了反应柱的 85%,能有效避免材料因体积变化从封口处渗出,较小的剩余空间能有效缓解相变材料水分汽化导致的反应柱压强上升^[17]。

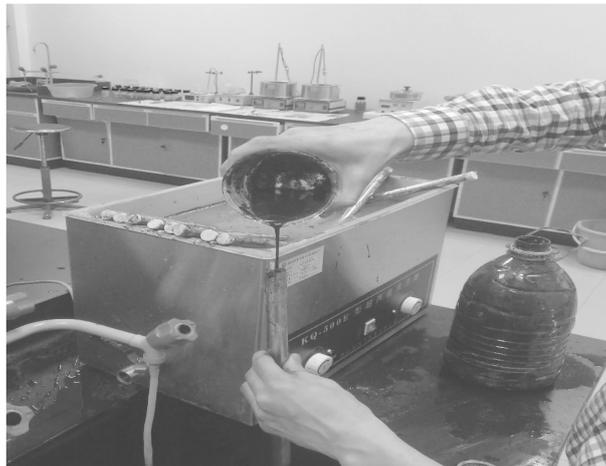


图 3 相变储能反应柱的浇装

Fig.3 Filling reaction column using PCM

1.3 太阳能相变储能融冰雪模拟实验平台

为了研究并探索相变储能材料在太阳能融冰雪取水设备上的效率提升与太阳能相变储能融冰雪系统的运行流程,搭建了图 4 的实验系统,该平台能较好的模拟原系统的工作状态。图 4 中右上为太阳能融冰雪取水系统实物图,右下为实验系统实物图。太阳能相变储能融冰雪取水系统由太阳能聚光列阵(能量输入),循环油路(能量传递),相变储能水箱(相变储能),融冰雪水箱(能量输出),及雪水处理系统几部分组成。系统运行时太阳光直射在非涅尔透镜聚光列阵上聚焦于透镜焦点真空玻璃管上,管中导热流体吸收热能,实现光热转化^[18]。吸收了能量的导热流体进入相变水箱,与其中的相变反应管充分换热,实现热能与化学能的相互转化,热流体继续流入融冰雪水箱实现热交换^[19]。与之对应的实验系统组件为 KMN501 超级恒温加热循环水浴(能量输入),外套真空玻璃管的循环水路(能量传递),自制小型相变储能水箱(相变储能),自制小型融冰雪水箱(能量输出),由于本研究以相变储能应用为研究主体,因此融冰雪水后处理系统对应的模拟部件并未加装。考虑到太阳能聚光列阵的能量输入会随着太阳辐照度变化而变化,在采用定功率的恒温水浴进行模拟时,采用计算机预设输入时间,从而达到模拟不同输入功率的要求^[20]。

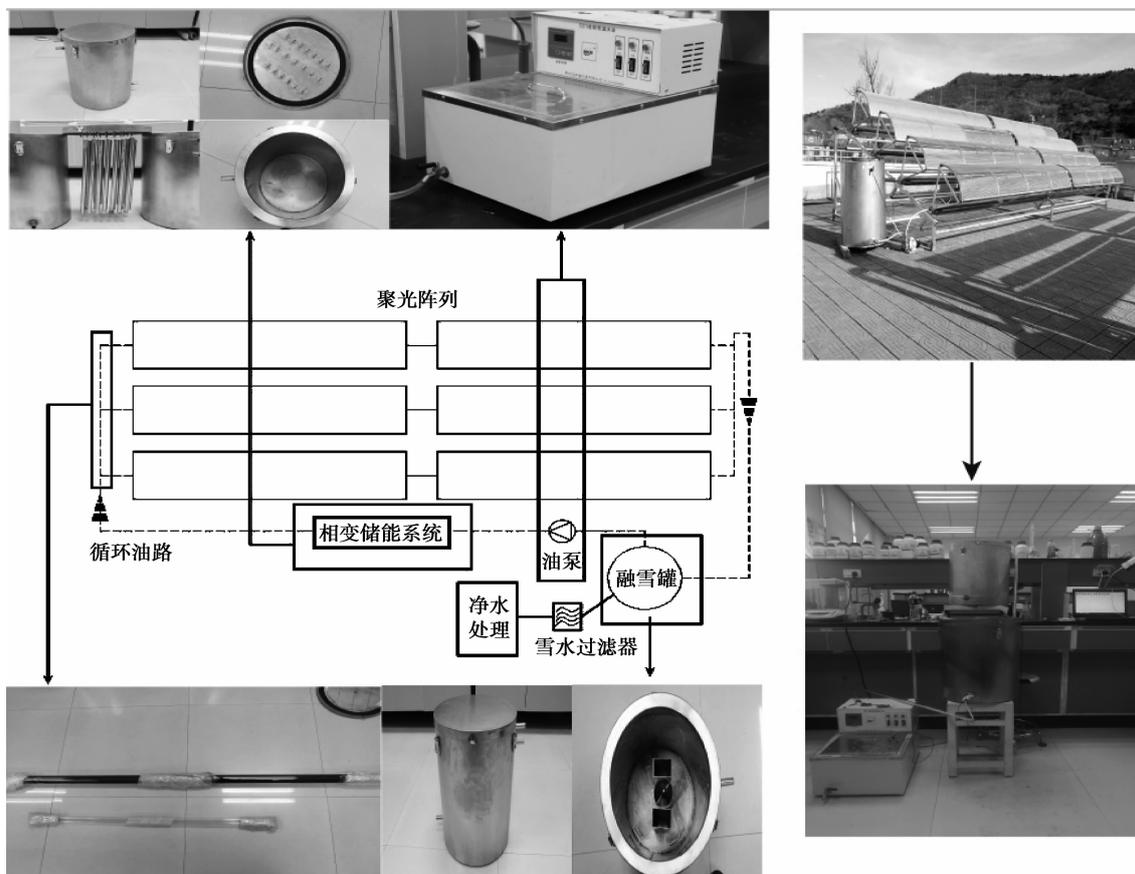


图 4 太阳能相变储能融冰雪实验系统模拟大型太阳能融冰雪取水系统对照图

Fig.4 Comparison chart of solar melting ice and snow experimental system for water production and simulation system

实验系统的固定数据采集点位如图 5 所示。其中共有 5 个固定温度采集点⁰^[21](测温点 1~4 及环境温度测温点),采用精创 RC-4 型温度记录仪测温,每 30 s 记录一次数据,分别测量恒温水浴加热水箱,相变储能水箱,相变储能管内侧,融冰雪水箱及实验平台环境温度。置于融冰雪水箱中的融冰雪槽自带刻度,可准确测量槽内产水量。实验中使用了泰克曼手持式红外测温枪对各个箱体表面的温度进行了快捷测量。

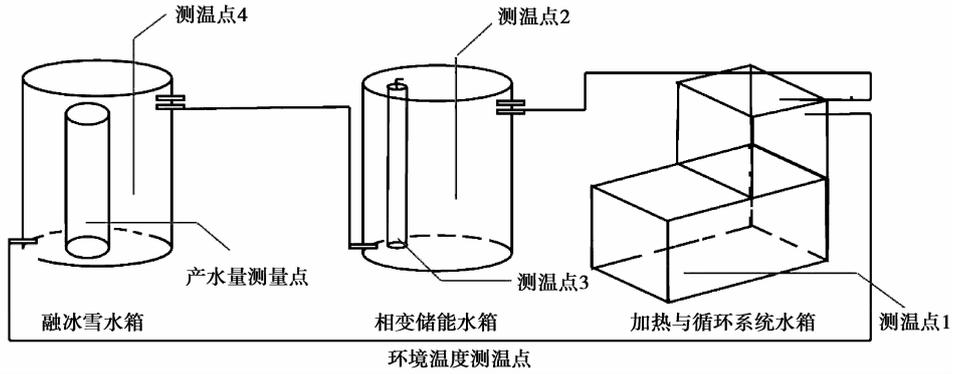


图 5 实验系统数据采集点位设置图

Fig.5 Experimental system data acquisition point setting diagram

1.4 实验情境设定

快速启动:当太阳能融冰雪设备正常运行时,突然遭遇短期恶劣气候,失去能量输入,循环油路开始冻结。随着恶劣天气消退,太阳辐照回到较高水平,此时需要尽快提升循环油路温度,以保证正常的工质流动进行能量传递。

能量补充:当正常运行的太阳能融冰雪系统突然遭遇恶劣气候,失去能量输入,同时设备所在地人员有饮水需求时,需要在短时间内保障驻地人员基本用水需求。

能量波动:在多云且风速较快的气候条件下,太阳光由于受到云层间断性遮挡,阳光不连续射在太阳能聚光板上使能量间断输入,系统能量利用与产水效率均大幅下降。

能量吸收:当太阳辐照较高时,过高的循环管路温度会降低系统整体的产水效率和减少相变储能材料使用寿命,因此需要借助相变储能材料的吸能作用使系统高效运行的同时对设备进行保护。

2 实验结果与分析

2.1 相变储能材料在太阳能融冰雪设备应用的基本特征分析

通过将加热循环水浴,自制小型相变储能水箱与自制小型融冰雪水箱相连,通过 70 min 的循环加热,分析各测温点升温情况。图 6 是不同相变储能材料挂载量及有无负载情况下的各测温点温度变化图。由图 6 可

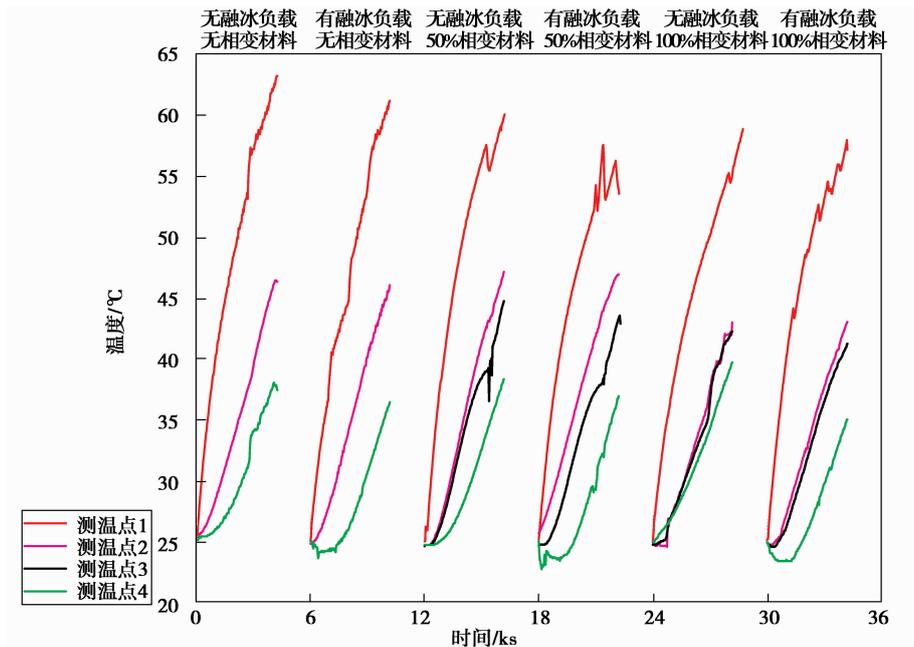


图 6 太阳能相变储能融冰雪实验系统升温特征曲线

Fig.6 Temperature rise characteristic curves of solar melting-PCM ice and snow experiment system

知无能量输出(融冰负载及相变材料吸能)情况下各水箱温度上升速度较有能量输出快,随着相变储能材料挂载量增加(0—50%—100%)及融冰负载的加入各水箱最终加热温度下降。箱体 50% 挂载时,相变水箱与相变反应管存在一定的温差,这是由于较少的相变储能材料控温能力较弱,导致温度上升过快,100% 挂载时相变水箱温度下降明显,且与相变反应管温度接近,说明相变储能管完全挂载情况下能满足太阳能相变融冰雪实验系统的控温需求。融冰雪水箱在加入融冰负载后由于水热循环的滞后性,随着热流体从加热循环水箱流经相变水箱大量流入融冰雪水箱后,温度呈现出先下降后增加的趋势。在有融冰负载的条件下,无相变材料的实验组各水箱温度均比加入相变储能材料的实验组高 3~5 ℃。利用泰克曼手持式红外测温枪对各个箱体表面的温度进行了快捷测量,在水箱内测温点温度达到峰值时,相变水箱及融冰雪外壁温度最高均为 28.1 ℃ 加热水箱壁面最高温度为 35.2 ℃,是热损耗的主要来源。

2.2 相变储能材料对太阳能融冰雪设备快速启动的影响分析

太阳能聚光列阵与相变储能材料共同为循环管路充能,能迅速使被冻结或部分冻结的导热工质恢复流动防止积温损坏设备,可采取将能量输入系统与相变储能水箱直连的方式,通过相变材料所储存的能量与能量输入系统接受的太阳能迅速提升循环管路温度,保障设备的高效运行。在实验系统中,将相变水箱与加热循环水箱直连,在有无相比储能材料挂载的情况下,进行了 40 min 的循环加热。如图 7 所示。可以得知加热循环水箱与相变储能水箱工作温度加入相变材料后均比加入前提升了 2.1 ℃ 与 3.5 ℃,水箱加热的前 20 min 内,相变水箱温度低于相变储能材料相变温度,材料迅速放热;相变水箱温度达到相变温度后相变材料放热明显减缓,各水箱升温速度也相对应减弱。放热过程中相变储能反应柱从 47 ℃ 开始降温,期间出现了 2 次温度抬升,这是由于相变反应放热同时相变水箱温度由于热流体循环温度迅速抬升,导致相变储能管温度散失较慢,产生积温。加入相变材料能有效提升快速启动状态的升温速率,使设备尽快进入正常运行状态。

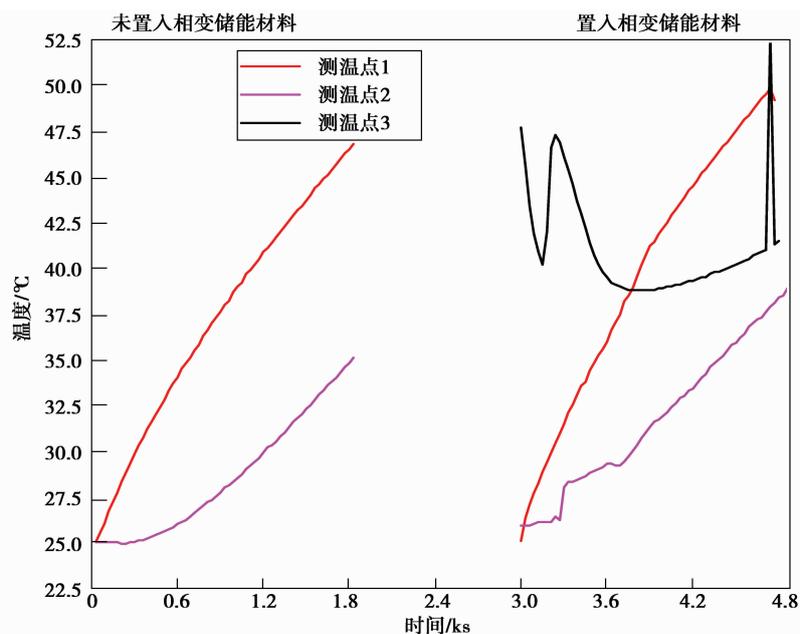


图 7 太阳能相变储能融冰雪实验系统“快速启动”升温曲线图

Fig.7 “Quick start” heating curves of solar melting-PCM ice and snow experiment system

2.3 以相变储能材料作为唯一能源融冰雪效能分析

在能量输入突然被迫切断的情形下,将相变储能水箱与融冰雪水箱直连,同时降低循环泵流速,能有效避免无能量输入情况下由于系统流程过长,导热工质流动过快与外界环境充分换热造成的能量损耗。在相变储能材料充能完毕的情况下,利用相变材料化学能放热融冰雪,能满足紧急情况下驻地人员的饮水需求。在实验系统上,通过维持循环泵低速运行保证相变储能材料缓慢且充分放热,对比有无相变储能材料时 1 h 内的产水量差距。

如图 8 可知,1 h 内有无相变材料实验组产水总量分别为 1 164 mL 与 910 mL,产水提升为 27.9%。从测温曲线来看,未挂载相变储能材料的实验组,各水箱温度均明显下降,低于 25 ℃ 的初始工作温度,在实体装置上,由于水箱温度持续下降,融冰雪速率会大幅下降,同时也可能导致导热工质冻结。挂载相变储能管

内温度在前 5 min 内大幅降低至相变温度,开始持续放热,1.25 h 后放热效率下降,后续持续缓慢放热。将相变储能材料置于太阳能融冰雪系统能在紧急情况下提供融冰雪能源,保证一定时间内的紧急用水需求,同时还可持续放热保持系统内导热工质温度恒定。

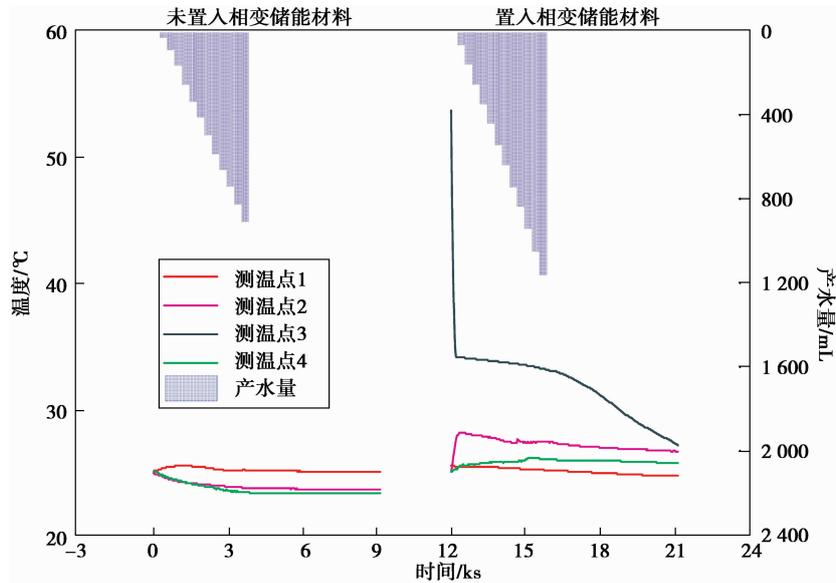


图 8 太阳能相变储能融冰雪实验系统“能量补充”升温曲线与产水量图

Fig.8 “Energy supplement” heating curves and water production map of solar melting-PCM ice and snow experiment system

2.4 太阳能相变储能融冰雪系统在能量波动输入条件下的性能分析

由于能量的输入的波动性,使得系统能量吸收与产水效率低下。相变储能材料移峰填谷的特性能很好的解决这一问题,将能量输入,相变水箱与能量输出系统相互连接,使相变储能管充分换热,在能量输入高峰吸能,在输入低谷放能,达到移峰填谷的作用。在实验平台上开启加热循环水箱加热 40 min,其波动性模拟输入如图 9 所示,每 5 min 测量各水箱温度及产水情况。

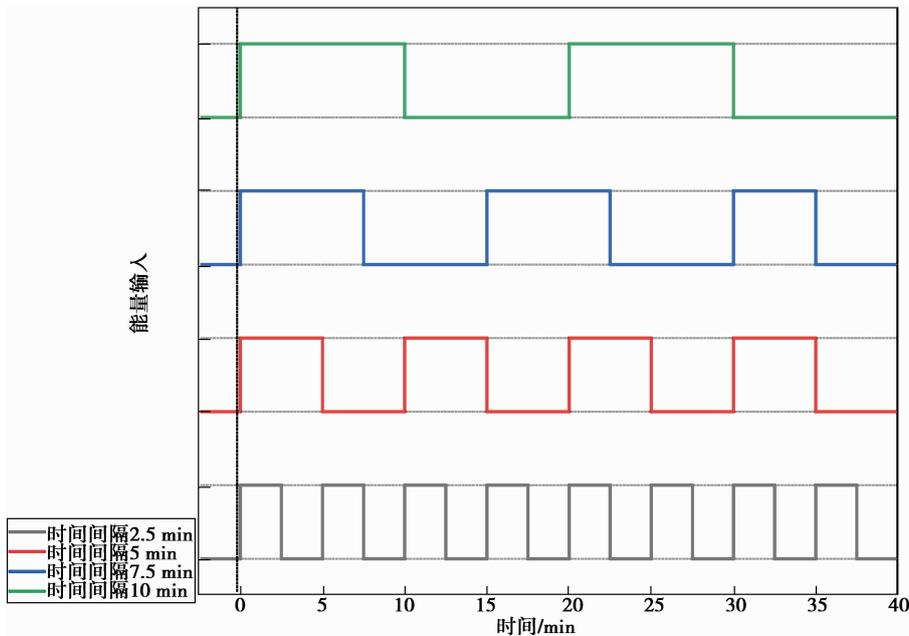


图 9 太阳能相变储能融冰雪实验系统能量波动输入图

Fig.9 Energy fluctuation input map of solar melting-PCM ice and snow experiment system

如图 10 所示,在各种波动间隔的条件下置入相变材料的实验组产水量比未置入的实验组平均提升了 1.09 倍,但考虑到相变储能材料本身存在能量释放,根据 2.3 节中相变储能管充能后 40 min 时产水 786 mL,

因此在排除相变储能材料能量输出后,由于对能量输入波动性改善带来的产水量提升为 0.33 倍。在波动输入条件下,各波动组中未置入相变材料的组产水量接近,平均产水量为 1 038 mL。置入了相变储能材料的实验组随波动时间间隔的缩短产水量呈现出先增加后降低的趋势,这是由于波动间隔时间过长会导致相变储能材料充能放能频率低,使得材料移峰填谷次数下降;但波动间隔时间为 2.5 min 时的实验组产水量低于 5 min 实验组,这是因为当波动间隔时间低于材料的响应周期(即一个充能放能周期的最短时间)时,导致相变储能材料的不完全充能,因而移峰填谷能力大幅下降。进一步提高材料导热系数会降低响应周期,使相变储能系统对能量波动输入的能力增强。由此可知,本水合盐相变储能材料响应周期接近 5 min,此时产水峰值为 2 375 mL。波动间隔时间为 7.5 min 与 10 min 时的实验组相变储能材料测温点温度线均产生了温度的猛然抬升与下降。这是由于短时间内加热使相变水箱水温迅速上升,同时相变材料放热,当两者温度接近时,相变储能材料产生积温。波动间隔为 2.5 min 和 5 min 时能量输入的“谷”期有助于相变材料能量释放,测温点 3 温度下降平缓,同时测温点 2 温度均匀上升。由于波动间隔为 5 min 时与相变材料相应周期接近,能量条件效率高,测温点 2 与 3 温度保持相同趋势上升。可以得出,相变储能材料的加入能较好的改善能量波动输入条件下的产水量,当波动间隔在 5 min 左右时其对太阳能融冰雪系统的效能改善达到最佳。

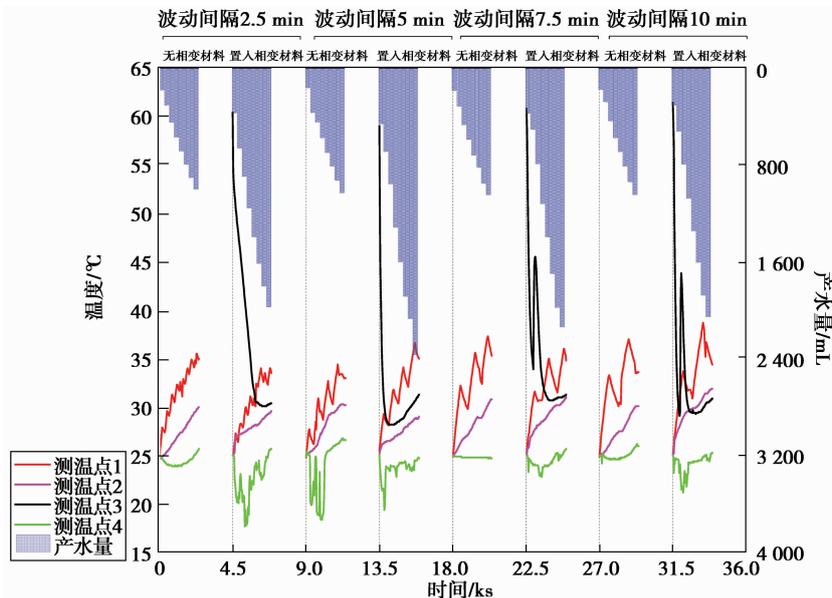


图 10 太阳能相变储能融冰雪系统在“能量波动”条件下的温度曲线与产水量图

Fig.10 Temperature curves and water production map of solar melting-PCM ice and snow experiment system under the energy fluctuation condition

2.5 相变储能材料在太阳能融冰雪系统中的能量吸收能力分析

太阳能融冰雪循环管路中温度过高时,此时将能量输入,相变水箱与能量输出系统相互连接,使相变储能管充分换热吸收能量。在实验系统上使用装满不同温度(30,40,50,60 ℃)水的相变水箱模拟管路温度,通过循环泵使热水进入融冰雪水箱进行融冰,在置入和未置入相变储能材料的情况下对比其 40 min 内产水量。

由图 11 可知,当相变水箱初温为 40,50,60 ℃时,置入相变储能材料的实验组比未置入的产水量分别下降 11.6%,7.9%,10.2%,导热工质平均温度(测温点 1 温度 \times 0.09+测温点 2 温度 \times 0.46+测温点 4 \times 0.45)分别下降 0.06,1.80,4.12 ℃,即当相变储能水箱温度高于相变材料相变温度时,材料开始吸能,且吸能总量随着水箱温度的增高而加大。而相变水箱温度低于材料相变温度时,储能材料吸收的能量极少,导热工质平均温度没有下降。随着时间推移,由相变水箱降温趋势可以看出,置入相变储能材料的实验组水箱降温趋势明显减缓,即储能材料吸能后能持续缓慢释放能量维持系统温度。补充实验证实,在相变水箱初温为 60 ℃的条件下,经过 10 h 无融冰负载降温,置入相变储能材料的相变储能水箱水温为 30.1 ℃,而未置入的水温仅有 24.5 ℃(环境温度)。

因此在太阳辐照较高的情况下,相变储能材料能吸收大量能量,防止导热工质温度过高影响设备运行。

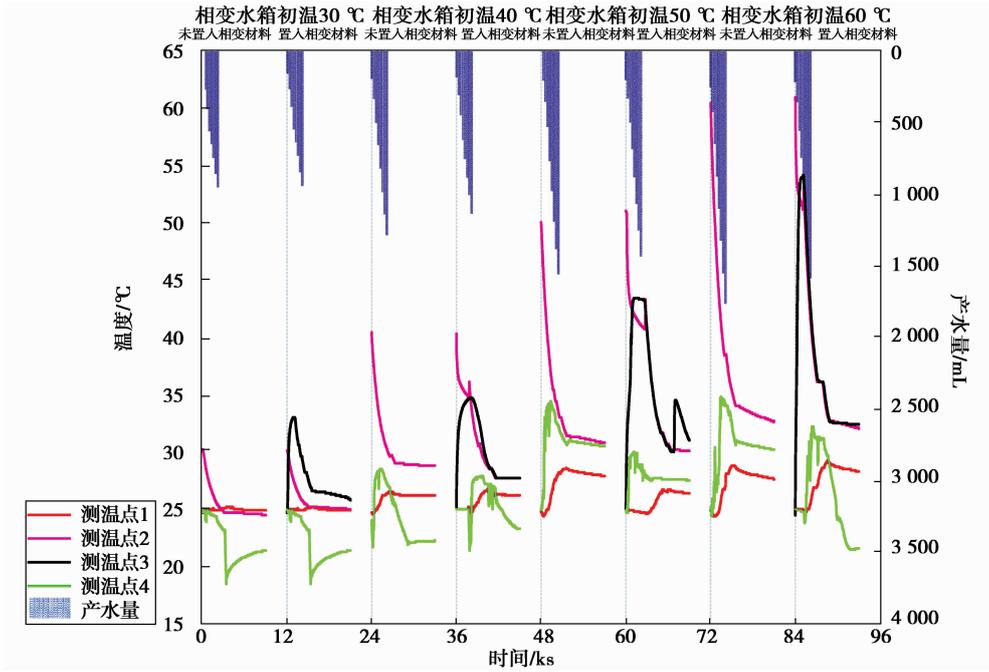


图 11 太阳能相变储能融冰雪系统在“能量吸收”条件下的温度曲线与产水量图
 Fig.11 Temperature curves and water production map of solar melting-PCM ice and snow experiment system under the energy absorption condition

3 太阳能相变储能系统流程设计与实验平台仿真模拟

3.1 太阳能相变储能系统流程设计

图 12 是原有太阳能相变储能融冰雪系统的改进设计图,该设计以中央控制系统为主体,通过各部件传感器(包括太阳能输入传感器,各水箱温度传感器,融冰雪槽负载传感器等)完成信息采集后,根据设计流程由中央控制系统发出指令,通过控制线路传达到各个区块,完成能量的合理调配。

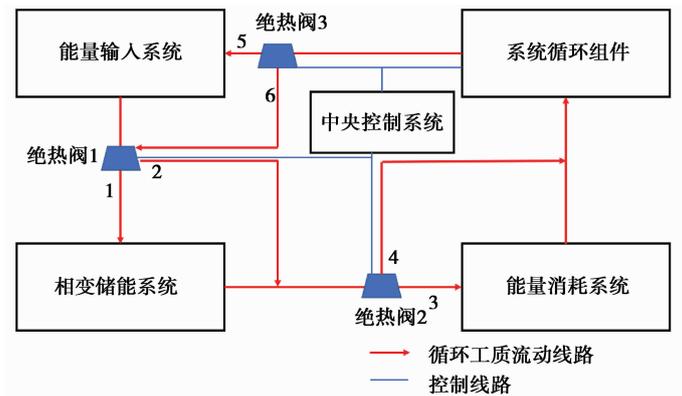


图 12 太阳能相变储能融冰雪系统改进设计图
 Fig.12 Improved design of solar melting-PCM ice and snow experiment system

其主要功能有:1)“快速启动”模式。中央控制系统调节绝热阀,使循环工质流动线路为 1-4-5,并使系统循环组件加速运行,利用相变储能系统与能量输入系统的能量对导热工质(主要是能量输入系统中的导热工质)进行迅速加热,达到目标运行温度,防止由于导热工质冻结导致太阳能集热系统产生积温降低使用寿命。2)“能量补充”模式。当能量消耗需求高但输入低(没有能量输入)的条件下,此时若储能系统充能完成,设定循环工质流动线路为 1-3-5(完全没有能量输入条件下线路设置为 1-3-6),使输入系统与储能系统共同满足高能量消耗量需求(通过相变材料所储存的能量紧急满足用户使用需求)。3)“能量波动”模式。能量输入不稳定且存在消耗需求时,控制系统设定流动线路为 1-3-5 并使循环泵高速运转,通过相变材料能

有效应对能量波动输入的特性,提升系统运行效率。4)“能量吸收”模式。在能量消耗需求低且高输入的条件下,中央控制系统调节绝热阀,使循环工质流动线路为 1—3—5。使相变储能系统完成充能,同时能较好的防止由于循环工质温度过高而产生能量输入系统积温。5)“完全消耗”模式。在能量输入处于稳定较高水平且消耗需求高时,中央控制系统调节绝热阀,使循环工质流动线路为 2—3—5,使能量全部用于能量消耗需求,并使系统循环组件加速运行,完成能量的全部转化。6)“节能运行”模式。当无能量消耗与输入时,为减少相变储能系统能量流失,中央控制系统关闭所有绝热阀,并关闭系统循环组件,使相变储能系统封闭,降低负载从而减少能量流失。为防止夜间管路冻结,可设定每隔一段时间联通所有管路,使循环泵低速运行,利用相变储能材料的少量能量释放维持温度。

根据上述主要设计功能可以得到如下流程图 13。通过多通道选择绝热阀将整个系统区块化,能在不同使用条件下进行不同的流路选择,减少流程从而降低系统非融冰雪负载,利用系统循环组件的流速控制实现不同条件下能量的高效利用,系统自动化程度高,降低了人工操作量。

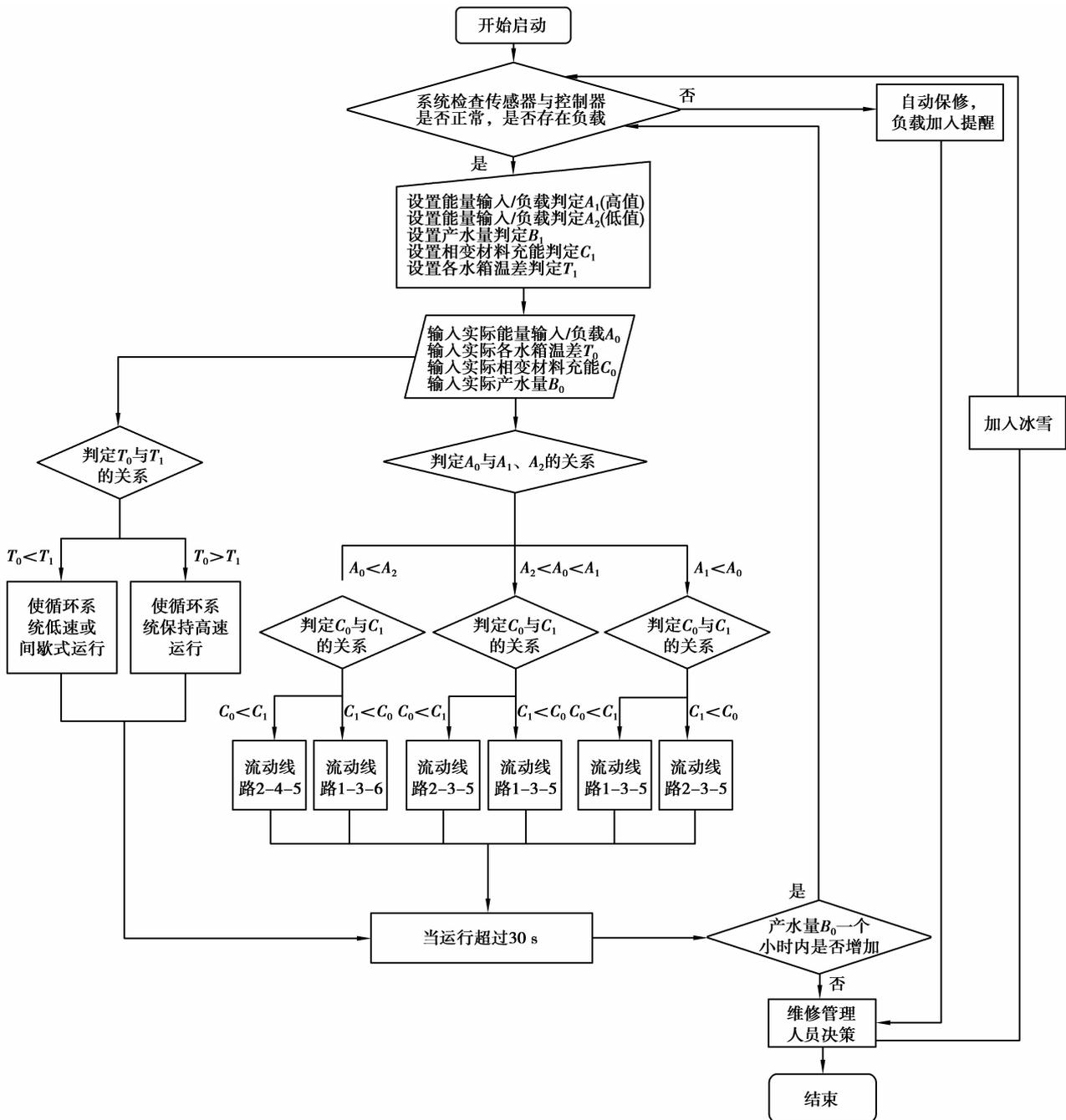


图 13 太阳能相变储能融冰雪取水系统运行流程图

Fig.13 Running flow chart of solar melting-PCM ice and snow experiment system

3.2 实验系统仿真实验

图 14 中曲线为北京 2017 年 9 月某天的太阳辐照度变化图,由于加热系统为定功率加热,为了达到与辐照对应的单位时间能量输入采用控制加热时间的方式控制输入能量(柱状为能量输入)。前期模拟测试表明实验平台完全功率条件下水箱水温 25 min 上升速率与实际设备在辐照峰值 1 h 水温上升速率一致,因此采用 25 min 为一个周期模拟太阳能输入。由于实验时间较长,冰柱需要多次更换,其平均冰柱更换时间为 40 min,每 10 min 进行一次产水测量。实验分 2 组进行,未置入相变储能材料的实验组泵体前 400 min 内高速运行,后 140 min 内间歇式运行,且连接方式固定。置入相变储能材料的实验组,泵及管路连接均按图流程运行。

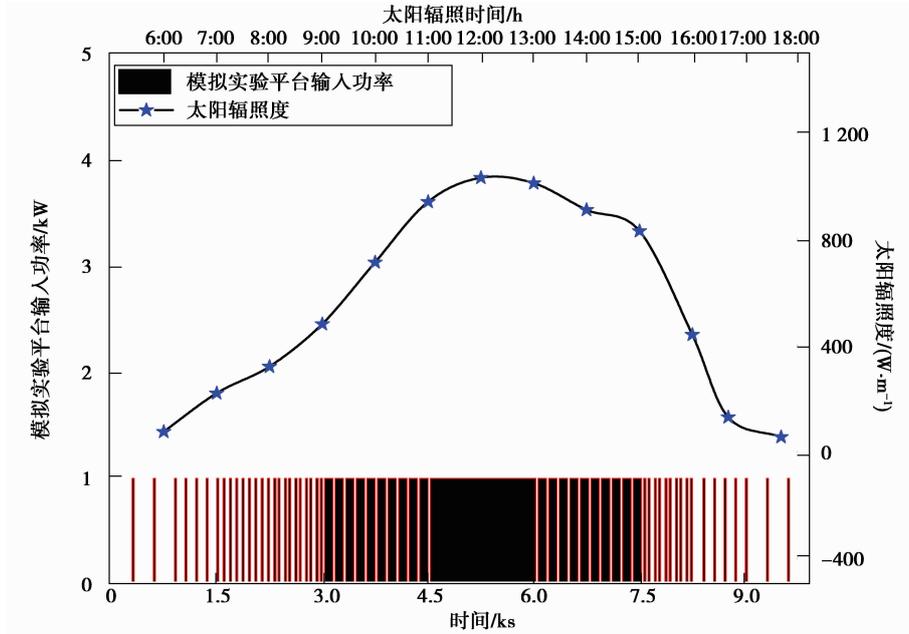


图 14 模拟太阳能能量输入图

Fig.14 Map of simulated solar energy input

图 15 为全仿真模拟实验结果。从产水量来看,在前 3 个冰柱更换周期内,置入相变材料的实验组平均产水量仅为 1 283.4 mL,未置入实验组为 1 380.0 mL,产水量处于较低水平是由于相变储能材料主要在该阶

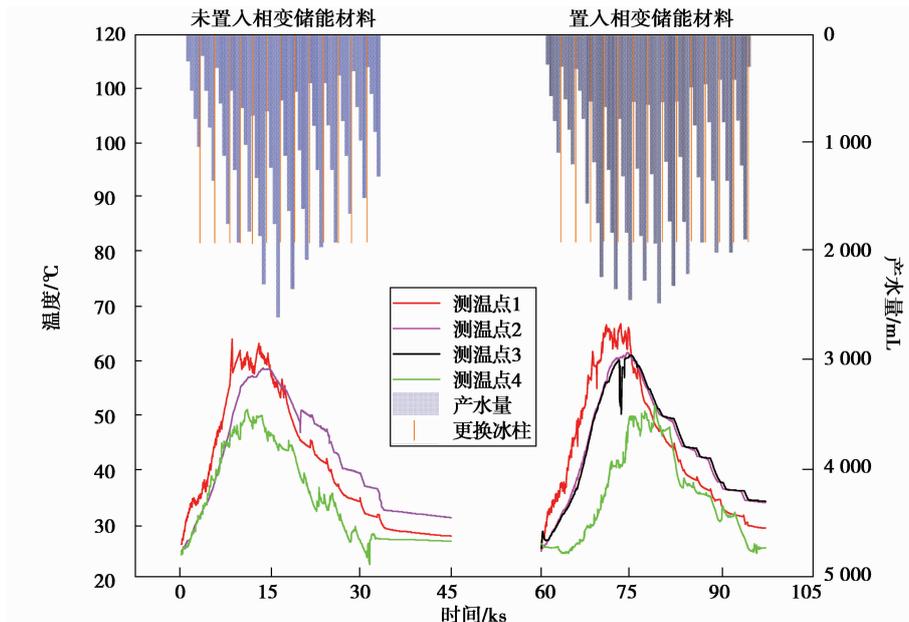


图 15 太阳能相变储能融冰雪取水系统工作周期温度曲线与产水量图

Fig.15 Temperature curves and water production map of solar melting-PCM ice and snow experiment system

段进行充能。在稳定产水阶段(每个冰柱更换周期产水量大于 1 500 mL)置入相变储能材料的实验组相比于未置入的实验组每一个冰柱更换周期内产水更加均匀,其标准差分别为 250.47 与 310.57。在后 3 个产水周期内,置入相变储能材料的实验组在相变材料放能作用下平均产水仅仅比其产水峰值下降了 21.7%;其对照组下降 25.6%,图中降幅明显。实验结束条件为循环工质平均温度(测温点 1 温度 $\times 0.09$ +测温点 2 温度 $\times 0.46$ + \times 测温点 4 $\times 0.45$)等于 30 ℃,此时置入相变材料的实验组总产水量为 28 507 mL,相比于未置入相变材料实验组的产水量 25 585 mL 提升了 11.4%。2 个实验组产水时间接近,置入相变材料的实验组有效工作时间为 530 min,未置入为 540 min。考虑到相变储能材料中仍包含部分残余能量可在后续的 10 h 内持续维持导热工质温度,抗冻性较好。

根据各水箱温度变化情况可知,升温阶段未置入相变水箱的实验组测温点 1 温度上升更加迅速,但在高温区温度难以维持,可能是由于前期融冰量较大使温度下降较快;置入相变储能材料测温点 1 温度均匀上升,测温点 4 温度先小幅下降 1 后缓慢爬升,用于产水的部分能量被相变储能材料吸收。在水箱升温阶段,置入相变材料的实验组测温点 2、3 曲线交替上升,有效提升了能量波动输入条件下的能量吸收效率,在水箱降温阶段测温点 3 曲线始终高于测温点 2 曲线,持续释放能量,保持了能量输入降低后的产水量。由于流程优化设计,置入相变储能材料的实验组比未置入相变材料的实验组运行时间减少,耗能降低 9.4%。虽然控制系统的加设增加了能耗,但泵体运转耗能仍占电能消耗主要部分,因此总体电能消耗有所下降。

通过上述结论可知,相变材料的加入及流程设计的优化提升了产水量同时降低了电能消耗,将相变材料应用于太阳能融冰雪取水设备具有一定的可行性。

4 结论

本研究开发了太阳能相变融冰雪实验系统,通过结合相变材料特性研究了不同情境下各测温点温度及产水量变化,设计了实验系统运行流程图,并完成了设备工作的全仿真模拟实验,得到以下结论:

1)本课题组制备的水合盐相变储能材料性能优异,能有效控温 3~5 ℃,具有较好的储能与释能性能,在能量波动间隔为 5 min 时具有最优的应对能力,满足“快速启动”、“能量补充”、“能量波动”及“能量吸收”等情境的控温需求。

2)优化后的流程设计能在不同使用条件下进行不同的流路选择,降低系统非融冰雪负载,利用系统循环组件的流速控制实现不同条件下能量的高效利用,降低人力成本。

3)置入了相变储能材料并采用优化流程设计,提升实验系统一天(模拟时间)产水量 11.4%,电能消耗减少 9.4%,同时具备一定的抗冻结能力,将相变材料应用于太阳能融冰雪取水设备具有一定的可行性。

参考文献:

- [1] 庄春龙. 青藏高原北部地区相变轻质哨所太阳能采暖研究[D]. 重庆大学, 2011.
ZHUANG Chunlong. Solar energy heating study on the light weight building made by phase change material wall in the Qingzang altiplate north area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [2] 彭靖棠, 陈志莉, 郑宏飞, 等. 新型太阳能融雪净水系统研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(1):67-71.
PENG Jingtang, CHEN Zhili, ZHENG Hongfei, et al. Study on a new type of solar snow melting water sytem[J]. Technology of Water Treatment, 2017,43(1):67-71. (in Chinese)
- [3] Parsazadeh M, Duan X. Numerical and statistical study on melting of nanoparticle enhanced phase change material in a shell-and-tube thermal energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 950-960.
- [4] Souayfane F, Fardoun F, Biwolle P H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review[J]. Energy & Buildings, 2016, 129: 396-431.
- [5] Kim T Y, Hyun B S, Lee J J, et al. Numerical study of the spacecraft thermal control hardware combining solid-liquid phase change material and a heat pipe[J]. Aerospace Science & Technology, 2013, 27(1): 10-16.

- [6] Yu H, Gao J, Chen Y, et al. Preparation and properties of stearic acid/expanded graphite composite phase change material for low-temperature solar thermal application[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2016, 124(1):87-92.
- [7] Panayiotou G P, Kalogirou S A, Tassou S A. Evaluation of the application of Phase Change Materials (PCM) on the envelope of a typical dwelling in the Mediterranean region[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97:24-32.
- [8] 孟令然, 郭立江, 李晓禹, 等. 水合盐相变储能材料的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(4):623-632.
MENG Lingran, GUO Lijiang, LI Xiaoyu, et al. Salt hydrate based phase change materials for thermal energy storage: A review[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(4):623-632. (in Chinese)
- [9] 郑涛杰, 陈志莉, 刘洪涛, 等. 低温相变储能材料及其应用[J]. *当代化工*, 2017, 46(12):2572-2577.
ZHENG Taojie, CHEN Zhili, LIU Hongtao, et al. Low temperature phase-change materials for thermal energy storage and their application[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2017, 46(12): 2572-2577. (in Chinese)
- [10] Koca A, Oztop H F, Koyun T, et al. Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(4):567-574.
- [11] 郑涛杰, 陈志莉, 刘强, 等. 水合盐相变储能材料增稠剂优选研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(7):1781-1787.
ZHENG Taojie, CHEN Zhili, LIU Qiang, et al. Study on optimum agent of thickness for salt hydrate phase change energy storage material[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(7):1781-1787. (in Chinese)
- [12] 刘程. 太阳能-相变水箱蓄热系统的运行特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
LIU Cheng. Investigation on operation characteristic of solar-latent heat storage water tank system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [13] Hasan A, McCormack S J, Huang M J, et al. Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials; Materials comparison in different climates[J]. *Solar Energy*, 2015, 115:264-276.
- [14] 王艳秋. 光伏直驱式太阳能热水系统的理论和实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
WANG Yanqiu. Numerical and experimental study on the PV direct-coupled solar water heating system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [15] Rammelberg H U, Osterland T, Priehs B, et al. Thermochemical heat storage materials; Performance of mixed salt hydrates[J]. *Solar Energy*, 2016, 136:571-589.
- [16] Tang Y R, Gao D L, Guo Y F, et al. Supercooling and phase separation of inorganic salt hydrates as PCMs[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2011, 71-78: 2602-2605.
- [17] Ermis K, Ereke A, Dincer I. Heat transfer analysis of phase change process in a finned-tube thermal energy storage system using artificial neural network[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2007, 50(15):3163-3175.
- [18] Cheng T C, Yang C K, Lin I. Biaxial-type concentrated solar tracking system with a fresnel lens for solar-thermal applications[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(4):115.
- [19] 夏亚浩, 陈志莉, 冯裕钊, 等. 表面疏水改性下管式海水淡化器性能研究[J]. *水处理技术*, 2017, 43(12):43-46.
XIA Yahao, CHEN Zhili, FENG Yuzhao, et al. Study on the performance of tubular desalination device by hydrophobic modification[J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(12):43-46. (in Chinese)
- [20] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
ZHANG Hefei. Solar thermal utilization principle and its computer simulation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese)
- [21] Sun J, Zhao K, Jiang T. A multipoint correction method for environmental temperature changes in airborne double-antenna microwave radiometers[J]. *Sensors*, 2014, 14(5): 7820.