doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.034

温室储热器隔热层与蓄热工质结构设计与性能分析

李建明[1,2]　王　浩[1,2]　胡艺馨[1,2]　宋　磊[1,2]　汪青霞[1,2]　肖金鑫[1,2]

(1.西北农林科技大学园艺学院,陕西杨凌 712100;2.农业农村部西北设施园艺工程重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:为解决因连续雾霾天气或阴雨雪天气而导致温室内温度过低,以及现有日光温室储热器散热量大、跨时蓄热量不足的问题,通过对储热水箱外隔热材料及水箱结构进行优化设计和蓄热工质组合研究,实现了温室储热装置跨时储热、分段缓释放热。实验表明,采用隔热涂料+气凝胶+橡塑保温棉的组合隔热效果较好,其 24 h 散热量比单一隔热材料减少散热 0.367 MJ;设置水箱隔热材料厚度为 80~120 mm,采用体积为 6~10 m^3、高径比为 1∶1的圆柱体蓄热水箱,既可保证较低的有效散热率,也能控制工程施工成本;采用复合相变材料组合增大了水箱蓄热量,优化了放热过程,并实现了热量分阶段缓释。建立了水箱有效蓄热量与水箱体积、相变填充体积的计算模型,利用该模型可根据不同地区热负荷和水箱储热时间配置适当的储热水箱。

关键词:温室;蓄热水箱;保温材料;相变材料

中图分类号:S626　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0329-09　　**OSID**:

Structural Design and Performance Analysis of Thermal Insulation Layer and Heat Storage Medium for Greenhouse Heat Storage

LI Jianming[1,2]　WANG Hao[1,2]　HU Yixin[1,2]　SONG Lei[1,2]　WANG Qingxia[1,2]　XIAO Jinxin[1,2]

(1. *College of Horticulture*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*

2. *Key Laboratory of Northwest Facility Horticulture Engineering*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming to realize the span-time heat storage of the greenhouse heat storage device and release the heat slowly, the design of thermal insulation materials outside the hot water storage tank and the structure of the water tank were optimized, the relationship between the combination of phase change materials inside the water tank and heat storage and release were studied. Experiments showed that the combination of thermal insulation coating + aerogel + rubber-plastic thermal insulation cotton had a better thermal insulation effect. It reduced heat dissipation by 0.367 MJ per unit time compared with a single thermal insulation material. And it was better to set the thickness of the water tank insulation material in the range of 80 ~ 120 mm. The volume of the greenhouse heat storage device was 6 ~ 10 m^3 and the cylindrical water tank with a height-to-diameter ratio of 1∶1 had low cost and good heat storage effect. The composite phase change material combination increased the heat storage of water tank, the heat release process was optimized and the effect of slow heat release in stages was realized. A calculation model for the actual heat storage of the water tank was established with the size of the water tank and the phase change filling volume. Applying this model, the hot water storage tank was configured according to the heat load of different regions and the heat storage time of the water tank.

Key words: greenhouse; hot water storage tank; thermal insulation material; phase change material

0　引言

我国北方地区冬季气温低、光照时长短、光强小,在连续阴雨雪天气温室室温较低,无法满足茄果类作物的正常生长要求,而近年来连续的雾霾天气更加剧了这一现象[1-4]。额外的温室增温及热量输入是保证喜温作物在温室内正常越冬生产的必要条件。温室增温措施有限,炉火加温、锅炉加温等方式不仅消耗大量化石燃料,还会造成环境污染,而以太阳能集热器为代表的新能源利用方式得到了越来越

收稿日期:2020-10-09　修回日期:2020-11-08

基金项目:国家大宗蔬菜产业技术体系项目(CARS-23-C05)和陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2020-YL-08)

作者简介:李建明(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事设施作物生理生态研究,E-mail:lijianming66@163.com

多的应用[5-7]。太阳能集热器应用较为广泛,但与温室集热器配套水体蓄热装置却鲜见报道。马承伟等[8]设计的钢管屋架管网水循环集放热系统中保温蓄热水池用黏土砖砌成,水池内壁涂刷防渗涂料,水池外部粘贴厚度为 10 cm 的发泡聚苯板进行保温。张义等[9]设计的水幕帘蓄放热系统的蓄热水池由聚酯硬质板焊接而成,水池四周外表面设置厚度 10 cm 的聚苯乙烯泡沫板保温层。徐微微等[10]在日光温室中空板水循环集/放热系统中,蓄热水池用黏土砖砌于温室内部地下,水池长 4.26 m、宽 2.25 m、深 1.60 m,内壁涂刷防渗涂料,外侧粘贴 100 mm 厚的发泡聚苯板进行保温。目前,温室蓄热水箱结构相对简单,无法满足温室跨时蓄热的要求。太阳能季节蓄热研究发现,当保温层厚度在 200 ~ 300 mm、水箱体积为 500 ~ 2 000 m^3 时,既能保证较低的散热率,也能控制施工成本[11]。为了高效地利用并储存太阳能,以便于在夜间或连续低温天气时使用,需要一种蓄热量大、蓄热时间长且价格低廉的温室蓄热装置。目前,市场上可用于温室的保温隔热材料种类繁多,各种材料性能品质参差不齐,作为储热设备外保温材料有很多局限性[12]。

温室蓄热装置一般用水作为储热介质,为了简化系统,整个太阳能热泵系统不采用储热设备。虽然水具有传热及流动特性好、热膨胀系数及粘滞性较小、价格低廉、来源丰富的特点,但水储热为显热储热,其单位质量、单位体积的储热量远不如潜热储热。陈彦康等[13]研究表明,相变材料的加入能够提高蓄热水箱的有效释热率,同时提高水箱的热分层特性,且位置越靠近进口,改善效果越好。汪玺等[14]以肉豆蔻酸/膨胀石墨为相变蓄热材料,从理论上计算该水箱的临界取热温差为 103.1℃。MUHSIN 等[15]采用不同相变蓄热材料分别进行了家用太阳能蓄/放热实验,结果表明,应用不同的相变材料可以不同程度地增加水箱蓄热量,从而使水箱提供更多高温热水。组合相变材料具有蓄放热速度快、放热速率均匀等特点,已逐渐成为一种强化传热方式[16-20]。

针对太阳能集热系统中温室储热装置隔热材料单一、结构设计简单、热散失量大的问题,本文对不同保温隔热材料的性能进行对比和组合研究,分析并测试其相关物理性能和热工性能,以得到保温效果最好、性能最优的隔热材料组合。使用目前技术成熟的相变材料增加储热装置蓄热量,应用不同相变组合测试蓄热装置分阶段放热效果,优化储热装置结构,以实现蓄热装置跨时间蓄热、分段放热的目的。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验在西北农林科技大学文洛式连栋科研温室内进行(北纬 34°16′,东经 107°59′),温室隔间长 6 m,宽 4 m,脊高 5 m。采用哈尔滨物格电子公司的 PDE-KI 型多路环境测试仪采集温室内环境数据,温度测控范围:-30 ~ 70℃,精度 ±5℃,分辨率 0.1℃;相对湿度测量范围:0 ~ 99%,精度 ±3%,分辨率 1%。实验装置内温度数据采用 AT4524 型安柏 24 路巡检仪采集,温度测控范围 -200 ~ 1 300℃,精度 ±0.2℃,分辨率 0.1℃。

1.2 隔热层材料筛选与复合材料实验

实验采用 5 个规格一致的圆柱形聚乙烯水箱,其直径(580 ±5)mm、高(900 ±5)mm、厚度 10 mm,容积为 230 L。在实际温室工况条件下,在水箱外壁加装不同处理的隔热材料,将蓄热水箱水温加热至 60℃,然后进行实际放热测试。

收集包括聚苯板、挤塑板、真空板、EPS 保温板、气凝胶、橡胶棉和复合相变材料在内的 22 种绝热材料。由于保温隔热材料加工工艺不同,规格质量难以保证,为保证材料传热数据的准确,在西北农林科技大学理学院实验室使用 FD-TC-B 型导热系数测定仪(上海复旦天欣科教仪器有限公司)对收集的保温隔热材料进行导热系数测定。为测试蓄热水箱隔热材料厚度与水箱散热量之间关系,在储热水箱外分别加装 10、30、50、80、100、180 mm 厚橡塑保温棉进行实际放热测试。

为增强单位厚度内隔热材料隔热效果,采用不同的隔热材料,按热阻大的材料在内,热阻小的材料在外,同时参考材料的结构强度和复合贴合度[21],设计了厚度在 50 ~ 100 mm 的 7 种隔热组合(表 1),进行了不同材料的复合实验。在隔热材料组合实验

表 1 隔热材料组合类型

Tab.1 Combination types of insulation materials

名称	隔热材料组合类型	组合厚度/mm
组合 1	10 mm 气凝胶 +50 mm 隔热玻璃棉	60
组合 2	30 mm 珍珠岩 +50 mm EPS 保温板	80
组合 3	10 mm 气凝胶 +50 mm 陶瓷纤维毯	60
组合 4	10 mm 隔热涂料 +20 mm 气凝胶 +50 mm 橡塑保温棉	80
组合 5	30 mm FTC 保温砂浆 +20 mm 真空板	50
组合 6	10 mm 气凝胶 +20 mm 空气层 +50 mm 橡塑保温棉	80
组合 7	30 mm FTC 保温砂浆 +20 mm 真空板 +50 mm EPS 保温板	100
对照	80 mm 橡塑保温棉	80

中，使用固定架和锁扣等进行外加固，在材料缝隙使用中性硅酮胶等进行密封，使材料之间贴合紧密减小缝隙散热。在实际测量时，在每层材料贴合部位设置温度测点，在蓄热水箱内部设置竖直平均分布的温度测点，使用安柏温度记录仪进行温度实时测定（图 1），同时用 PDE－KI 型多路环境测试仪采集温室环境温度。

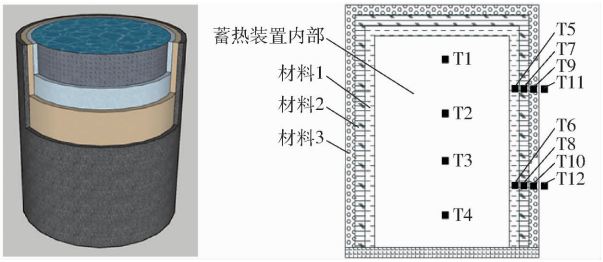


图 1　蓄热水箱材料组合示意图和温度测定布置图

Fig. 1　Schematic of material combination of hot water storage tank and layout diagram of temperature measurement

1.3　相变复合单元的制备

相变单元采用月桂酸（LA，分析纯），上海源叶生物科技有限公司；肉豆蔻酸（MA，分析纯），上海源叶生物科技有限公司；棕榈酸（PA，化学纯），上海源叶生物科技有限公司；膨胀石墨（EG，含碳率 99%，80 目，膨胀率 250 mL/g），青岛金涛石墨有限公司。相变材料采用 PC 管进行封装，PC 管为 m、n 型两种尺寸类型：m 型中空 PC 管尺寸为 20 mm × 17 mm × 150 mm，n 型中空 PC 管尺寸为 12 mm × 10 mm × 330 mm。

棕榈酸、肉豆蔻酸和月桂酸的导热系数只有 0.16 W/（m·K）左右，导热性能差，采用相变材料与石墨复合，可以显著增大相变材料的导热能力[22]。将膨胀石墨置于 60℃真空干燥箱中干燥 16 h，然后取 1 g 放于大烧杯中，再放入普通家用微波炉中（输出功率 800 W），微波膨胀 30 s 即得到蠕虫状膨胀石墨[23]。分别称取棕榈酸、肉豆蔻酸和月桂酸各 16 g 置于一端密封的 PC 管中，再加入 1 g 膨化后的膨胀石墨，之后用熔融 PC 将封装管另一端密封，制成复合相变单元。将复合相变单元置于水浴锅中加热至 70℃摇匀，每隔 10 min 摇匀一次共摇匀 5 次，使各 PCM 与膨胀石墨混合均匀充分完成吸附。制备 m 型、n 型 PA/EG、MA/EG 和 LA/EG 复合相变材料的相变单元各 100 只，各相变单元参数如表 2 所示。

表 2　各相变单元物理参数

Tab. 2　Physical parameters of each phase change unit

相变单元	质量/g	熔点/℃	相变潜热/（J·g^{-1}）	导热系数/（W·m^{-1}·K^{-1}）
PA/EG－n	17 ± 0.1	62.59	196.8	1.07
PA/EG－m	17 ± 0.1	62.59	196.8	1.07
MA/EG－n	17 ± 0.1	52.81	177.2	1.04
MA/EG－m	17 ± 0.1	52.81	177.2	1.04
LA/EG－n	17 ± 0.1	44.07	164.9	1.05
LA/EG－m	17 ± 0.1	44.07	164.9	1.05

1.4　蓄热水箱结构及组合排布

相变蓄热水箱结构如图 2 所示，用金属桁架和 50 mm EPS 保温板搭建了 3 个 500 mm × 500 mm × 600 mm 的测试区，每个测试区中间放置相变蓄热水箱，周围填充含水率 65% 的均质土壤，测试区上部加盖 20 mm 气凝胶和 80 mm EPS 保温板，测试区底面与地面间设置 50 mm 气凝胶。实验采用 3 个直径 300 mm、高 330 mm、厚度 1 mm、容积 23 L 的铁制圆柱形桶作为相变蓄热水箱刚体，水箱上下及壁面均设置 20 mm 橡塑保温棉。系统布置 24 个温度测点，主要温度测点布置如图 2 所示。

开启阀门和循环水泵，相变蓄热水箱由外置温度为 65℃的恒温水箱注水，如图 2 设置循环管道，水流上进下出，经循环管道回流恒温水箱。实际温室太阳能集热器工作效率受光照强度和光照时间的显著影响，因此配套储热装置设置 2 种工况工作模式：工况 1，集热量满足超过蓄热水箱体积的水升温至 65℃，注入蓄热水箱后进行热水循环，待水箱各测定温度一致为 65℃时停止循环；工况 2，集热量满足不大于蓄热水箱体积蓄热介质水升温至 65℃，注

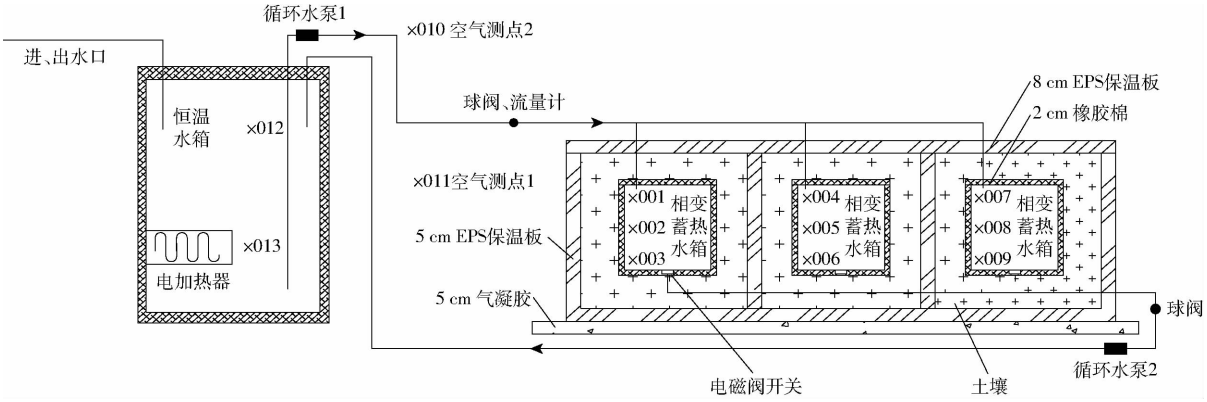


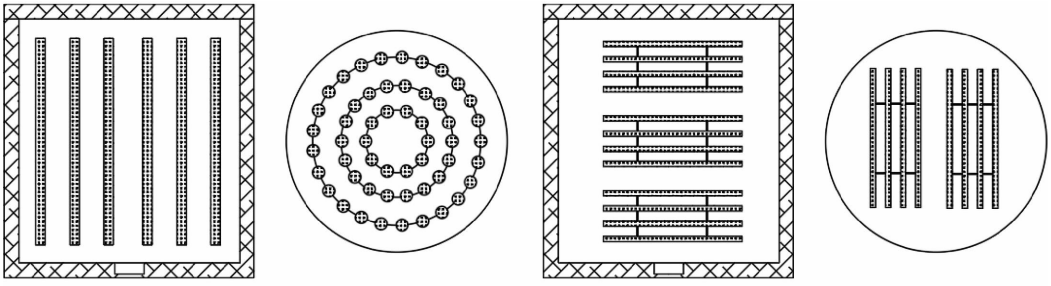
图 2　相变蓄热水箱结构及主要测点布置

Fig. 2　Phase change hot water storage tank structure and main measuring point layout

入蓄热水箱后不进行热水循环。

实际工况条件下,在蓄热水箱中分别添加不同数目和种类的相变单元,加热循环后进行放热测试。实验设置了不同的相变组合,测试不同相变单元数量、不同种类相变单元组合与水箱蓄热的关系。其中组合ⅰ为 30 个 PA/EG－n 和 30 个 LA/EG－n 单元,组合ⅱ为30 个MA/EG－n 和 30 个 LA/EG－n 单元,组合ⅲ为 30 个 MA/EG－n 和 30 个 PA/EG－n 单元。组合Ⅰ为 1∶1∶1配置的 PA/EG－n、MA/EG－n、LA/EG－n 单元组合,组合Ⅱ为 3∶2∶1配置的 PA/EG－n、MA/EG－n、LA/EG－n 单元组合,组合Ⅲ为1∶2∶3配置的PA/EG－n、MA/EG－n、LA/EG－n 单元组合。

不同封装管的 m、n 相变单元在水箱中采用如图 3 的两种排布方式。其中 n 型相变单元较长,采用环形 n 排布方式,在混合相变实验中由水箱中心到桶壁依次是 PA、MA、LA 相变单元;m 型相变单元较短,采用矩形 m 排布方式,在混合相变实验中水箱由上到下依次是 PA、MA、LA 相变单元。



(a) n型排布正剖图 (b) n型排布俯视图 (c) m型排布正剖图 (d) m型排布俯视图

图 3 m、n 型相变单元水箱排布示意图

Fig. 3 Schematics of water tank arrangement of m-type and n-type phase change unit

1.5 水箱蓄放热模型

储热水箱在放热过程中,散热量为

$$Q_s = \int_{\tau_1}^{\tau_2} KA(t_{(in,\tau)} - t_{(out,\tau)})\,\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

式中 Q_s——蓄热水箱散热量,J

K——蓄热水箱传热系数,W/(m²·K)

A——蓄热水箱传热表面积,m²

$t_{(in,\tau)}$——不同时刻水箱内的水温,℃

$t_{(out,\tau)}$——不同时刻环境的温度,℃

τ——蓄热时间,s

τ_1——水箱蓄热初始时间,s

τ_2——水箱蓄热结束时间,s

$$\frac{1}{K} = \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \frac{\delta'}{\lambda'} \tag{2}$$

式中 δ_t——水箱外壁厚度,m

δ'——水箱隔热材料厚度,m

λ_t——水箱外壁导热系数,W/(m·K)

λ'——水箱隔热材料导热系数,W/(m·K)

储热水箱内蓄热介质储存的热量随着储存时间增加不断减少,当水箱内水温低于 40℃时,与温室环境温差较小,放热量和放热效率有限。因此将温室蓄热装置中水温超过 40℃称为温室储热器有效储热温度,水箱温度超过 40℃的散热率称为有效散热率,计算式为

$$\eta = \frac{KA\tau(t_\tau - t_e)}{\Delta t_0 C_w \rho_w V_w} \tag{3}$$

式中 η——水箱有效散热率

C_w——水比热容,取 4 187 J/(kg·K)

V_w——纯水箱体积,m³

ρ_w——水的密度,取 1 000 kg/m³

Δt_0——水箱有效蓄热温差,℃

t_τ——不同时刻放热装置取水水温,℃

t_e——温室放热装置有效利用温度,℃

普通水箱储存的能量为

$$Q_w = C_w \rho_w V_w (T_1 - T_2) \tag{4}$$

相变蓄热水箱储存的能量为

$$Q_p = C_w \rho_w (V_w - V_p)(T_1 - T_2) + \sum_{i=1}^{n} \rho_{pi} V_{pi} [C_{li}(T_1 - T_{li}) + \gamma_i + C_{si}(T_{si} - T_2)] \tag{5}$$

式中 Q_w——纯水水箱总蓄热量,J

Q_p——相变水箱总蓄热量,J

C_{li}——相变材料液态比热容,J/(kg·K)

T_1——水箱蓄热起始水温,℃

T_2——水箱蓄热结束水温,℃

T_{li}——相变材料初始熔化温度,℃

T_{si}——相变材料完全相变温度,℃

C_{si}——相变材料固体比热容,J/(kg·K)

V_{pi}——复合相变材料中单一相变材料填充体积,m³

V_p——蓄热装置复合相变填充体积,m³

ρ_{pi}——相变材料密度,kg/m³

2 结果与分析

2.1 隔热材料筛选分析

在实验室使用 FD－TC－B 型导热系数测定仪

对筛选后的材料进行测定，隔热材料实际导热系数如表 3 所示。在实际工况条件下，采用单一隔热材料橡塑保温棉的储热水箱进行储热测试，得到储热水箱温度变化和散热量如表 4 所示。由表 4 可知，随着隔热材料厚度的增加，水箱储热 24 h 后的水温温度位点不断升高，散热量不断减少；理论散热量与实际散热量差别逐渐减小。当隔热材料厚度超过 30 mm 时，实际散热量与散热模型计算值误差小于 5%，因此可以用上述模型公式计算储热装置散热量。

表 3　隔热材料导热系数

Tab. 3　Thermal conductivity of thermal insulation materials

材料	聚苯板	EPS 保温板	陶瓷纤维毯	岩棉板	橡塑保温棉	聚苯颗粒砂浆	气凝胶	真空板	复合保温涂料
导热系数/（$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$）	0.035	0.033	0.036	0.042	0.041	0.154	0.022	0.008	0.035

表 4　储热水箱储热 24 h 温度变化和散热量

Tab. 4　Temperature change and heat dissipation of hot water storage tank for 24 h

隔热材料厚度/mm	初始温度/℃	24 h 水箱温度/℃	实际散热量/MJ	理论散热量/MJ	误差/%
10	60	41.80	17.58	16.52	6.40
30	60	51.90	7.82	7.51	4.18
50	60	54.40	5.41	5.20	4.10
80	60	55.77	4.09	3.95	3.47
100	60	56.24	3.63	3.52	3.07
180	60	57.09	2.81	2.75	2.15

不同隔热材料厚度的储热水箱在 24、72 h 的有效散热率如图 4 所示。随着储热时间延长，相同厚度隔热材料的有效散热率也不断增加。在相同时间下，储热水箱隔热材料厚度在 0 ~ 80 mm 时，蓄热水箱有效散热率较大，受隔热材料影响显著；当隔热材料厚度在 80 mm 以上时，蓄热水箱有效散热率较小，受隔热材料影响不显著。

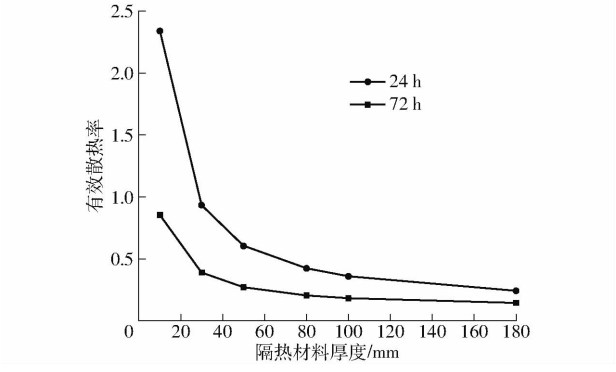


图 4　不同时间不同隔热材料厚度的水箱有效散热率

Fig. 4　Effective heat dissipation rate of water tanks with different thicknesses of insulation materials at different times

2.2　隔热复合材料性能分析

在实际工况条件下，进行不同隔热材料组合的水箱实际储热测试，各装置 24 h 实际散热量如表 5 所示。由表 5 可知，采用组合 4 的蓄热水箱 24 h 散热量最小，比对照组 80 mm 橡塑保温棉水箱减少热量散失 0.367 MJ。

表 5　不同隔热材料组合下水箱 24 h 散热量

Tab. 5　24 h heat dissipation of water tank under different heat insulation material combinations

组合	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6	组合 7	对照
水箱实际散热量/MJ	4.743	3.835	4.627	3.719	8.162	4.607	4.801	4.086

根据散热模型计算得到各组合在相同配置条件下，不同厚度的传热系数如图 5 所示。由图 5 可知，在相同隔热组合厚度条件下，组合 1 ~ 4 传热系数较小，隔热效果最好。组合 5 与组合 7，由于保温砂浆自身热阻较小，同时砂浆硬化后增大了几何散热面积，同比其他组合隔热效果不佳。组合 6 中的空气层采用直径 20 mm 薄膜气柱，两层叠加气柱间空隙较大，缝隙散热量大，同比其他组合隔热效果不佳。随着隔热材料组合厚度的增加，其传热系数有显著降低，隔热性能提升。综合来看，在隔热厚度条件为 100 mm 下组合 4（隔热涂料 + 气凝胶 + 橡塑保温棉）隔热效果最好，传热系数最小为 0.283 W/（$m^2 \cdot K$）。

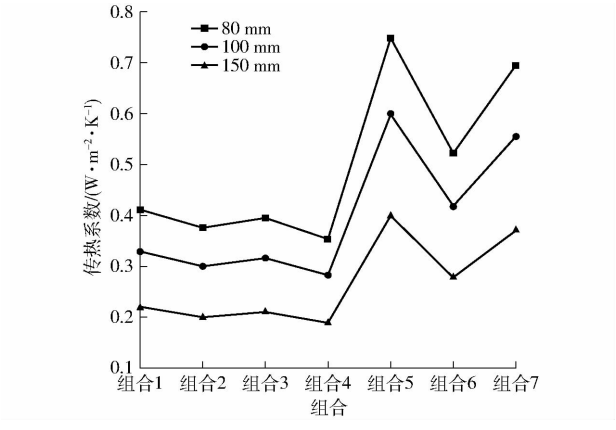


图 5　不同厚度材料组合的传热系数

Fig. 5　Heat transfer coefficient of different thickness material combinations

2.3 储热水箱优化设计

由式(1)可以看出,水箱散热量受水箱散热表面积和水箱体积的影响显著。储热水箱体积在 1 m^3 时,不同形状的水箱储热 24 h 散热量如图 6 所示。储热水箱体积在 1 m^3 时,球体储热水箱散热表面积最小,单位时间散热量最小;高径比 1∶1的圆柱储热水箱次之。在实际施工建设时,球体蓄热水箱施工复杂一般不采用,因此推荐高和底面直径比为 1∶1 的圆柱蓄热水箱。

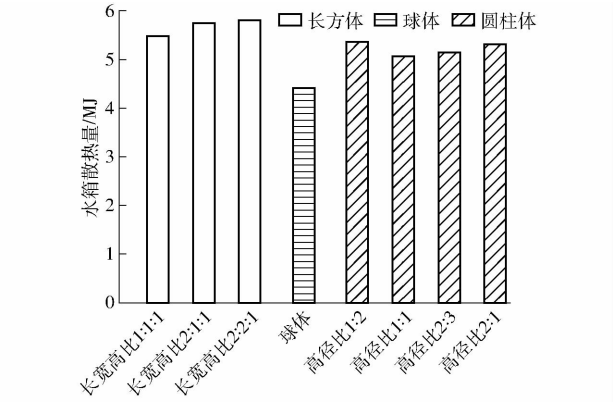


图 6 不同形状储热水箱 24 h 散热量

Fig. 6 24 h heat dissipation of different shapes of hot water storage tanks

应用隔热材料组合 4 及高径比 1∶1的圆柱水箱储热 72 h,其散热量和有效散热率如图 7 所示。可以看出,储热水箱的散热量随着水箱体积增大而显著增大。当蓄热水箱体积在 0 ~ 6 m^3 时,有效散热率较大,受水箱体积影响显著;当蓄热水箱体积大于 10 m^3 时,有效散热率较小,受水箱体积影响不显著。综合来看,蓄热水箱在 72 h 储热过程中,水箱体积在 6 ~ 10 m^3 时,既能保证较低的有效散热率也能控制工程施工成本。

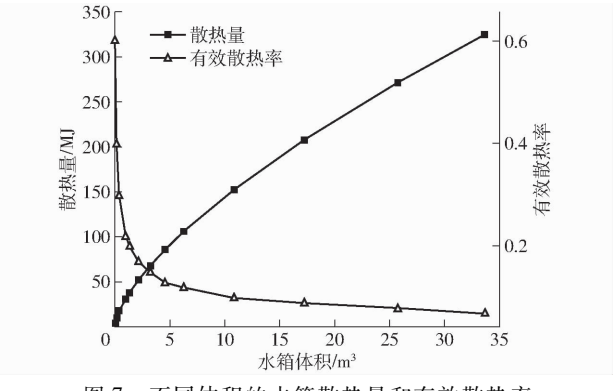


图 7 不同体积的水箱散热量和有效散热率

Fig. 7 Heat dissipation and effective heat dissipation rate of water tanks of different volumes

2.4 蓄热工质对蓄热水箱温度的影响

对无相变单元的纯水箱和两种工况条件下 80 个 MA/EG - n 单元的相变蓄热水箱进行放热实验,水箱内温度随时间变化曲线如图 8 所示。实验过程中水箱温度变化受室内温度变化影响不显著。在 0 ~ 500 min储热期间,不进行蓄热循环的工况 2 相变蓄热水箱温度降低更快;在 500 ~ 2 000 min 储热期间,2 种工况条件下相变水箱中温降平缓,水温高于纯水箱,且工况 1 运行的蓄热水箱温度高于工况 2。工况 2 条件下运行的相变蓄热水箱在蓄热开始阶段吸收热量,降低水箱水温减小了水箱高温散热量;工况 1 条件下运行的蓄热水箱充分利用了集热器多余的集热量,提高了水箱整体蓄热量。相变蓄热水箱当水温降低至相变温度时放出热量,使水箱水温维持在较高水平。相变蓄热水箱可以调节水箱放热过程,增加水箱蓄热量,减少高温散热量。

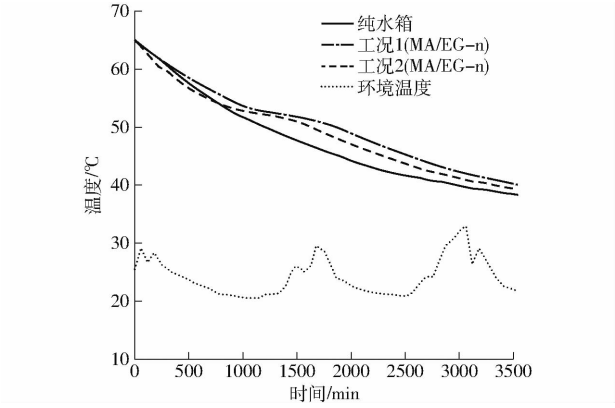


图 8 不同工况条件下相变水箱和纯水箱放热曲线

Fig. 8 Heat release curves of phase change water tank and pure water tank under different working conditions

采用 80 个 MA/EG - m 型、MA/EG - n 型相变单元和采用 m 型、n 型相变单元组合Ⅰ(150 个)配置的水箱实际放热曲线如图 9 所示。n 型排布方式的水箱水温均高于 m 型排布方式。n 型排布方式相较于 m 型排布方式,在放热过程中,底部先进行相变放热,放热时间更长;同时 n 型排布方式减弱了水箱水温的分层现象。在相变水箱长时间放热过程中,n 型排布方式比 m 型排布方式更有利于热量的蓄积。

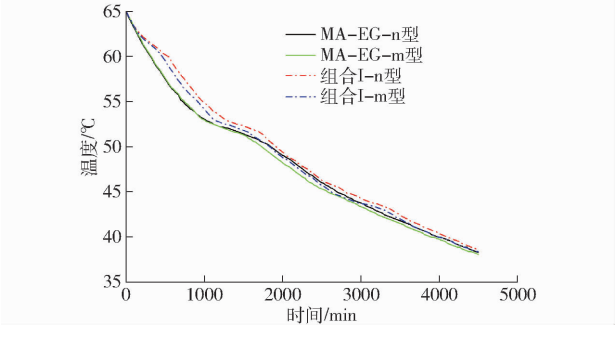


图 9 m、n 型排布方式下水箱水温随时间的变化曲线

Fig. 9 Water temperature of water tank changes with time under m-type and n-type arrangement

在相变蓄热水箱中分别添加 PA/EG－n、MA/EG－n、LA/EG－n 单元各 50 个，工况 1 条件下运行测试，得到如图 10a 所示放热曲线。随着水箱内水温降低，PA/EG－n、MA/EG－n、LA/EG－n 水箱相继进行相变放热，PA/EG－n 水箱高温阶段时间最长，LA/EG－n 水箱有效蓄热时间最久。相变蓄热水箱中分别设置组合ⅰ、组合ⅱ、组合ⅲ与组合Ⅰ对比，得到图 10b 的相变蓄热水箱放热曲线。组合ⅲ使水箱到达 50℃延长 420 min；组合ⅱ使水箱到达 40℃延长 600 min。组合Ⅰ水箱到达 50℃延长 315 min，到达 40℃延长 450 min，整体蓄热表现更好。相同数量相变单元，组合ⅲ延长水箱在高温蓄热阶段，组合ⅱ延长水箱有效需热时间，组合Ⅰ均保持较高水温整体蓄热表现更好，说明 3 种相变材料组合可以优化水箱放热过程，达到热量分阶段缓释效果。

在相变蓄热水箱中设置总数为 60、90、150 个相变单元的组合Ⅰ，得到如图 10c 所示相变蓄热水箱放热曲线。表明蓄热水箱相变材料填充量体积越大，水箱整体蓄热量也越大。与纯水箱相比，组合Ⅰ（60 个）增加蓄热 193.2 kJ，组合Ⅰ（90 个）增加蓄热 251.2 kJ，组合Ⅰ（150 个）增加蓄热 318.8 kJ，有效蓄热时间最大延长 905 min。在相变蓄热水箱中设置 150 个相变单元的组合Ⅱ，组合Ⅲ与组合Ⅰ进行实际储热测试，得到相变蓄热水箱放热曲线如图 10d 所示。与纯水箱相比，组合Ⅱ水箱到达 50℃延长 570 min；组合Ⅲ水箱到达 40℃延长 690 min。结果表明：组合Ⅱ延长水箱在高温蓄热阶段，组合Ⅲ延长水箱有效需热时间。在短时蓄热水箱设置时采用组合Ⅱ配置，在较长时间蓄热水箱设置时采用混合组合Ⅲ配置，而组合Ⅰ是介于两者之间的水箱配置。

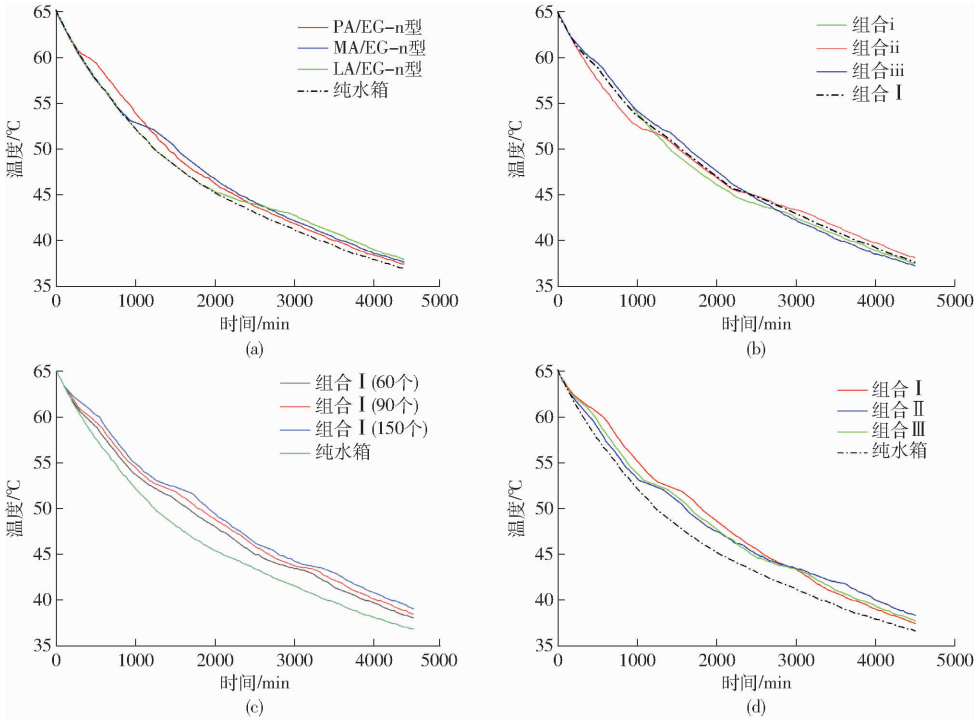


图 10　水箱水温随时间的变化曲线

Fig. 10　Water temperature variation curves in water tank with time

2.5　蓄热水箱综合分析

在水箱隔热材料和蓄热介质温度一定时，蓄热水箱体积和相变填充体积直接决定水箱蓄热量。蓄热水箱体积和相变填充体积可由纯水体积和相变材料体积表示。将蓄热水箱蓄热模型进行优化，得到水箱有效蓄热量计算公式为

$$Q = C_w\rho_w V_w\Delta T + C_p\rho_p V_p\Delta T + \rho_p V_p\gamma - 6\pi K(t_{(in,\tau)} - t_{(out,\tau)})\tau\left(\frac{V_p + V_w}{2\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

在使用 100 mm 组合 4 隔热材料，在 Python 程序中得到运行 120 h 水箱实际有效蓄热量与水箱中纯水体积、相变材料体积之间的关系如图 11 所示，可知随着水箱体积和相变填充量体积的增大，水箱实际蓄热量不断增加。根据不同地区冬季实际热负荷来计算蓄热水箱的配置，得到不同地区的蓄热水箱体积和相变填充体积的规格。在保证蓄热装置蓄热量前提下，节省施工成本。

3　结论

（1）我国北方地区温室地下储热水箱隔热材料

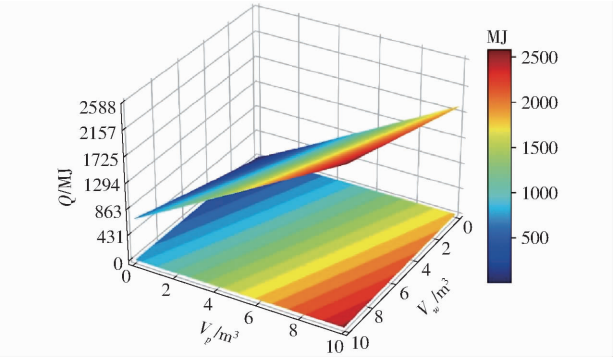


图 11 水箱有效蓄热量与纯水体积、相变填充体积的关系

Fig. 11 Relationship between heat storage capacity of water tank and volume of water tank and phase change filling volume

厚度为 80 ~ 120 mm 应用效果较好,且成本较低;储热水箱采用高度和底面直径比为 1∶1 的圆柱体、体积为 6 ~ 10 m³ 时,既可保证较低的有效散热率,也能控制工程施工成本。

(2)采用 10 mm 隔热涂料 + 20 mm 气凝胶 + 50 mm 橡塑保温棉的隔热组合,传热系数为 0.354 W/(m²·K),装置储热 24 h 后比 80 mm 单一橡塑保温棉减少热量散失 0.367 MJ,在实测组合中隔热效果最好。但不同材料贴合处存在一定的缝隙散热,需提升加工工艺。

(3)相变储热水箱蓄热量和箱内水温均高于纯水箱,可以提高水箱的蓄热能力;环形相变排布的相变蓄热水箱弱化了水箱自然热分层现象,其蓄热效果优于矩形相变排布。采用 3 种相变材料组合的蓄热水箱优化了放热过程,减少了高温散热量,实现了热量分阶段缓释效果。

(4)随着水箱体积和相变填充量体积的增大,水箱有效蓄热量不断增加,可以根据不同地区实际温室热负荷计算水箱的配置。在短时蓄热水箱设置时采用相变组合Ⅱ配置,在较长时间蓄热水箱设置时采用相变组合Ⅲ配置,而相变组合Ⅰ是介于两者之间的水箱配置。

参 考 文 献

[1] 许红军,曹晏飞,李彦荣, 等. 日光温室太阳辐射模型构建及应用[J]. 农业工程学报,2019,35(7):160 - 169.
XU Hongjun, CAO Yanfei, LI Yanrong, et al. Establishment and application of solar radiation model in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(7):160 - 169. (in Chinese)

[2] ZHANG Guanshan, DING Xiaoming, LI Tianhua, et al. Dynamic energy balance model of a glass greenhouse: an experimental validation and solar energy analysis[J]. Energy,2020,198:117281

[3] 李建设,白青,张亚红. 日光温室墙体与地面吸放热量测定分析[J]. 农业工程学报,2010,26(4):231 - 236.
LI Jianshe, BAI Qing, ZHANG Yahong. Analysis on measurement of heat absorption and release of wall and ground in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(4):231 - 236. (in Chinese)

[4] 肖金鑫,李建明,武莹. 大跨度非对称酿热温室热环境及节地增产效果分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(1):65 - 76.
XIAO Jinxin, LI Jianming, WU Ying. Effect of large span asymmetric fermentation heat storage greenhouse on thermal environment, land saving and production increase[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2020,48(1):65 - 76. (in Chinese)

[5] 伍纲,杨其长,张义, 等. 太阳能热利用技术在我国温室中的应用现状[J]. 太阳能,2018(12):5 - 8.
WU Gang, YANG Qichang, ZHANG Yi, et al. Application of solar energy thermal utilization technology on greenhouses in China[J]. Solar Energy,2018(12):5 - 8. (in Chinese)

[6] 郑健,殷李高,朱传远, 等. 施用沼液对设施番茄生长与土壤生态环境的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):278 - 288.
ZHENG Jian, YIN Ligao, ZHU Chuanyuan, et al. Effects of digestate on tomato growth and soil ecological environment in greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):278 - 288. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20191032&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.032. (in Chinese)

[7] 李明,李涵,宋卫堂, 等. 基于毛细管网的日光温室主动式集放热系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):341 - 349.
LI Ming, LI Han, SONG Weitang, et al. Application of active heat system developed with capillary tube mates in Chinese solar greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(11):341 - 349. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20191138&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.038. (in Chinese)

[8] 马承伟,姜宜琛,程杰宇, 等. 日光温室钢管屋架管网水循环集放热系统的性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(21):209 - 216.
MA Chengwei, JIANG Yichen, CHENG Jieyu, et al. Analysis and experiment of performance on water circulation system of steel pipe network formed by roof truss for heat collection and release in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(21):209 - 216. (in Chinese)

[9] 张义,杨其长,方慧. 日光温室水幕帘蓄放热系统增温效应试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(4):188 - 193.
ZHANG Yi, YANG Qichang, FANG Hui. Research on warming effect of water curtain system in Chinese solar greenhouse[J].

Transactions of the CSAE, 2012,28(4):188 – 193. (in Chinese)

[10] 徐微微,马承伟,宋卫堂, 等. 日光温室中空板水循环集放热系统设计与集热性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):326 – 334.
XU Weiwei, MA Chengwei, SONG Weitang, et al. Test on heat-collecting performance of solar heat collection and release system with water cycling inside hollow plates in chinese solar greenhouse [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(7):326 – 334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180739&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.039. (in Chinese)

[11] 张广宇,曹颖,王岩, 等. 太阳能季节蓄热供暖系统蓄热水箱的研究与模拟计算[J]. 暖通空调,2019,49(3):91 – 96.
ZHANG Guangyu, CAO Ying, WANG Yan, et al. Study and simulation of heat storage tank of solar heating system with seasonal heat storage[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2019,49(3):91 – 96. (in Chinese)

[12] 张丽. 日光温室保温材料热特性的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
ZHANG Li. Study on thermal properties of thermal insulation material in sunlight greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2016. (in Chinese)

[13] 陈彦康,张华,王子龙, 等. 相变材料太阳能蓄热水箱热特性实验研究[J]. 制冷学报,2019,40(2):105 – 112.
CHEN Yankang, ZHANG Hua, WANG Zilong, et al. Experimental study on thermal characteristics of solar heat storage water tank with phase change material[J]. Journal of Refrigeration,2019,40(2):105 – 112. (in Chinese)

[14] 汪玺,袁艳平,邓志辉, 等. 相变蓄热水箱的设计与运行特性研究[J]. 太阳能学报,2014,35(4):670 – 676.
WANG Xi, YUAN Yanping, DENG Zhihui, et al. Operating characteristic of latent heat storage water tank[J]. Solar Energy, 2014,35(4):670 – 676. (in Chinese)

[15] MUHSIN M, LUISA F C, HARALD M, et al. Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems[J]. Renewable Energy,2008,34(6):1639 – 1643.

[16] 胡芃,卢大杰,赵盼盼, 等. 组合式相变材料最佳相变温度的热力学分析[J]. 化工学报,2013,64(7):2322 – 2327.
HU Peng, LU Dajie, ZHAO Panpan, et al. Thermodynamic analysis on optimum phase change temperature for multiple phase change materials[J]. CIESC Journal,2013,64(7):2322 – 2327. (in Chinese)

[17] HAMID A A, HAMID E Q. Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials[J]. Applied Mathematical Modelling,2008,33(4):2132 – 2144.

[18] 于丹,曹勇,曾范梅. 组合式相变材料换热器储热速率的实验研究[J]. 暖通空调,2008,38(5):65 – 67.
YU Dan, CAO Yong, ZENG Fanmei. Experiment of thermal charging rates of a heat storage exchanger using multiple phase change materials[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2008,38(5):65 – 67. (in Chinese)

[19] 于丹,曹勇,宋业辉, 等. 组合式相变材料储热换热器的特性实验研究[J]. 建筑科学,2007,23(10):87 – 90.
YU Dan, CAO Yong, SONG Yehui, et al. Experimental study on characteristics of a heat storage exchanger using multiple phase changematerials[J]. Building Science,2007,23(10):87 – 90. (in Chinese)

[20] GONG Zhenxiang, MUJUMDAR A S. A new solar receiver thermal store for space-based activities using multiple composite phase-change materials[J]. Journal of Solar Energy Engineering,1995,117(3):215 – 220.

[21] 朱玉尧. 温室隔热材料筛选与综合性能分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
ZHU Yuyao. Screening and comprehensive performance analysis of greenhouse thermal insulation materials[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)

[22] 张正国,王学泽,方晓明. 石蜡/膨胀石墨复合相变材料的结构与热性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2006,34(3):1 – 5.
ZHANG Zhengguo, WANG Xueze, FANG Xiaoming. Structure and thermal properties of composite paraffin/expanded graphite phase-change material[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2006,34(3):1 – 5. (in Chinese)

[23] 张庆,王宏丽,米欣. 月桂酸-肉豆蔻酸-癸酸/膨胀石墨定形相变材料的制备与性能研究[J]. 化工新型材料,2015,43(4):46 – 48.
ZHANG Qing, WANG Hongli, MI Xin. Preparation and characterization of lauric-myristic-capric acid/expanded graphite form-shaped composite phase change material[J]. New Chemical Materials,2015,43(4):46 – 48. (in Chinese)