

DOI: 10.7652/xjtub201705001

高温套管式熔融盐相变蓄热器蓄热性能实验研究

马朝¹, 何雅玲¹, 袁帆¹, 吕硕², 朱桂花²

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 北方民族大学化学与化学工程学院, 750021, 银川)

摘要: 为揭示高温熔融盐相变蓄热器的蓄放热特性,并进一步提高其蓄热性能,搭建了高温梯级熔融盐相变蓄热实验台(最高蓄热温度可达 800 °C),对高温套管式熔融盐相变蓄热器开展了蓄/放热性能实验研究。首先选择蓄热性能优良的二元碳酸盐作为高温相变蓄热材料,测试了其热物性;其次实验研究了高温套管式熔融盐相变蓄热器的总蓄/放热时间、平均蓄/放热速率以及蓄热效率等蓄/放热性能。结果显示:相变蓄热材料的熔化过程存在着非均匀性;在放热过程中,位于不同位置的相变蓄热材料存在着不同程度的过冷现象。最后,实验研究了在熔融盐侧添加环形肋片对高温熔融盐相变蓄热器的蓄/放热性能的强化效果,以及空气温度、质量流量等运行参数分别对光管和肋片管相变蓄热器总蓄/放热量、平均蓄/放热速率以及蓄热效率的影响。结果显示,在添加肋片后,相变蓄热材料温度分布更加均匀,蓄热过程结束时相变蓄热材料的最大温差由 51.1 °C 下降到 43.2 °C,下降了 15.4%,高温相变蓄热器的平均蓄热速率与平均放热速率分别增加了 6.8% 和 9.1%。实验结果可为后续高温梯级熔融盐相变蓄热器的性能研究以及实际应用提供参考。

关键词: 熔融盐相变蓄热器;非均匀性;过冷现象;传热强化

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)05-0001-08

Experimental Study on the Thermal Performance of High-Temperature Shell-and-Tube Molten Salt Phase-Change Thermal Energy Storage

MA Zhao¹, HE Yaling¹, YUAN Fan¹, LÜ Shuo², ZHU Guihua²

(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Chemical Engineering, Northern University for Ethnicity, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The high-temperature molten salt phase-change thermal energy storage (PCTES) has been preferably used in concentrated solar power (CSP) plant heat storage due to its high energy density and constant charging/discharging temperature. A test bench of high-temperature cascaded molten salt PCTES was established to study its thermal performance. A eutectic carbonate salt with good thermal performance was chosen as the high-temperature phase-change material (PCM), and its thermo-physical properties were measured. Subsequently, the thermal performance of the PCTES was experimentally studied. The results show that in charging process, the melting process of PCM along the radial direction is not uniform, and in discharging process, the degree of supercooling varies with different locations of PCM. Moreover, the

收稿日期: 2016-08-14。 作者简介: 马朝(1991—),男,博士生;何雅玲(通信作者),女,教授,中国科学院院士。 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51436007);国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB228303)。

网络出版时间: 2017-02-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170222.0948.006.html>

enhancement effect of annular fins on the thermal performance of PCTES was also experimentally studied. Results show that after adding annular fins, the distribution of PCM temperature become more uniform, the maximum temperature difference of PCM is decreased by 15.4% from 51.1 °C to 43.2 °C, and the average charging and discharging rates are increased by 6.8% and 9.1% respectively. At last, a study on the effects of such operation parameters as air temperature and mass flow rate on the thermal performance of PCTES was conducted. These experimental results may be a reference for the future study on the high-temperature cascaded PCTES.

Keywords: molten salt phase-change thermal energy storage; non-uniform distribution; super-cooling; heat transfer enhancement

由于太阳能具有丰富、清洁、可广泛获取等优点,以太阳能作为热源的光热发电技术^[1]得到了越来越广泛的研究与应用,然而太阳能具有间歇性和不稳定的缺点,为了提高发电效率、减少发电成本,往往需要在太阳能热发电系统中增加蓄热器。

蓄热技术主要有热化学蓄热、显热蓄热和相变蓄热 3 种不同的分类。热化学蓄热技术具有蓄热密度高的显著优点,但该蓄热过程不安全并且不可控,难以满足外界不同热量的蓄存需求,影响其推广使用。显热蓄热是目前应用最广的一种蓄热方式,原因在于该技术简单、运行方便,然而蓄热密度小,同时显热蓄热在能量吸收和释放过程中温度变化较大,使其难以与外界热用户匹配,可控性较差。相比之下,相变蓄热的蓄热密度是显热蓄热的 5~10 倍甚至更高^[2],同时相变蓄热器还具有蓄/放热温度稳定、容易控制运行等优点,使得相变蓄热器的应用日趋广泛。

目前应用的相变蓄热材料的导热系数普遍较低,影响了相变蓄热器的蓄/放热速率。为此,研究者们分别从相变蓄热器结构与相变蓄热材料的改善上着手,提出了一些不同的强化传热措施,如使用肋片^[3-6]、热管、新结构相变蓄热器的提出^[7]、添加高导热系数颗粒^[8-9]、梯级相变蓄热材料^[10]等。其中,在相变蓄热材料侧添加肋片的方法,由于制作简单、费用较低,同时高温下性能稳定,是一种有效的强化传热方法^[6]。

提高工质的运行温度,配备高温熔融盐相变蓄热器是有效提高光热电站发电效率的举措之一。然而,由于温度高、实验困难等原因,目前对于高温熔融盐相变蓄热器的研究较少,对其内部的蓄/放热特性开展实验研究是很必要的一项工作。为此,本文设计搭建了高温相变梯级蓄热实验台,采用实验的方法对单级高温套管式熔融盐相变蓄热器的蓄/放热性能进行实验研究(多级将随后报道),并采用在

相变蓄热材料侧添加环形肋片的方法对相变蓄热器的蓄热性能进行强化,最后分析了空气进口温度以及质量流量对相变蓄热器蓄/放热性能的影响。这些研究为后续高温梯级熔融盐相变蓄热器的性能研究以及实际应用提供了参考。

1 实验台介绍

1.1 实验系统

搭建的高温梯级套管式熔融盐相变蓄热实验台如图 1 所示。实验台具体组成部分和实验流程参见图 2 所示,实验台由高温空气输送系统、实验段、流量和温度调节系统、空气冷却系统、数据采集系统等 5 个部分组成。实验台以空气作为传热流体,以熔融盐作为相变蓄热材料。实验时空气首先通过过滤器,经鼓风机压缩进入加热器加热达到设定温度值,然后流经相变蓄热器进行蓄/放热实验,通过实验段后,再经空气换热器冷却至室温,排入大气。高温梯级相变蓄热实验台空气进口最高温度可达 800 °C,最大质量流量可达 270 kg · h⁻¹,可以安装 4 级相变蓄热器,分别填充不同熔点的相变蓄热材料以实现梯级相变蓄热器的性能测试。



图 1 实验装置图

1.2 熔融盐相变蓄热器及实验方法

熔融盐相变蓄热器采用套管式,由两个同心管组成,参见图 3 所示,直径分别为 76 mm 和 133 mm,

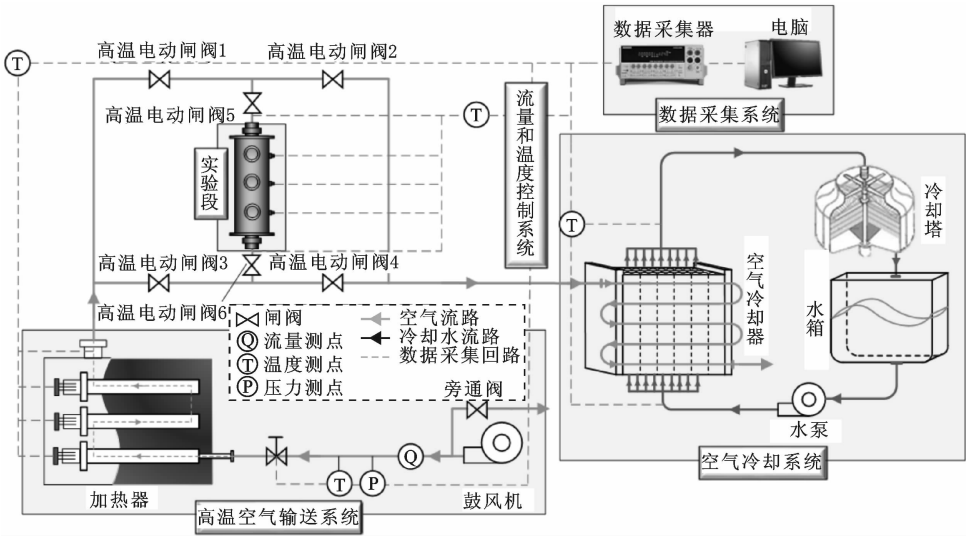


图 2 实验流程图

其中空气流经位于内部的传热管,相变蓄热材料存储于壳侧。两个同心管材料均为具有良好耐高温和耐腐蚀能力的 310S 不锈钢。实验采用了本团队前期研究推荐的潜热大、性能稳定的二元碳酸盐 62%Li₂CO₃-38%K₂CO₃(摩尔分数)作为相变蓄热材料^[10-11]。

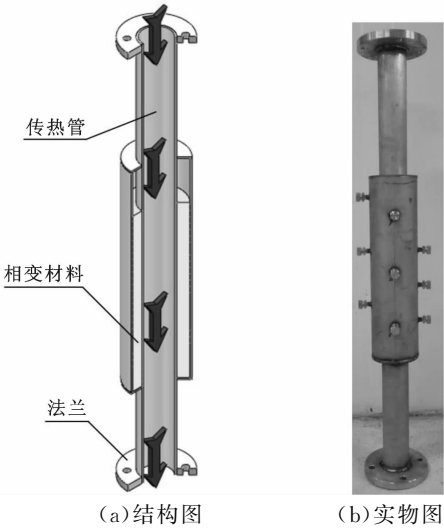


图 3 套管式相变蓄热器结构示意图

实验段进出口以及相变蓄热材料各点的温度均由 K 型热电偶测量,通过 Keithley2700 对各热电偶的温度数据进行采集,每 5 s 采集一次数据。套管式熔融盐相变蓄热器中热电偶布置情况如图 4 所示。

为强化相变蓄热效果,还在熔融盐侧添加了环形肋片,其几何参数为:肋片高度 12 mm,厚度 2 mm,肋片间距 10 mm,肋片材料为 310S 不锈钢。

一个完整的蓄/放热过程包括蓄热过程、保温过程以及放热过程。为了评价相变蓄热器蓄/放热的

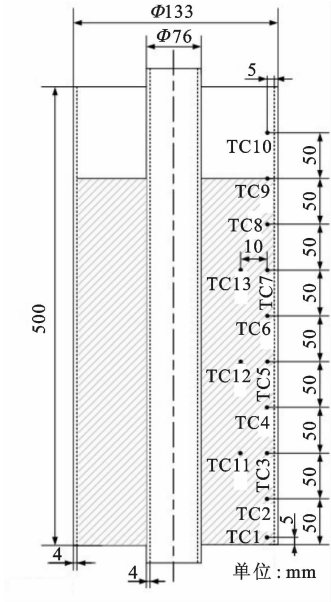


图 4 热电偶布置位置示意图

性能,用总蓄热时间、平均蓄热速率 P_{ch} 、总放热时间、平均放热速率 P_{dis} 、蓄热效率 η 等指标来定量说明。

用平均蓄热速率与平均放热速率来分别评价相变蓄热器蓄热过程和放热过程的快慢,其计算式如下

$$P_{ch} = \frac{\sum (\bar{C}_{p_{in}} \bar{T}_{in} - \bar{C}_{p_{out}} \bar{T}_{out}) \dot{m}_f \Delta t_{ch}}{t_{ch}} \quad (1)$$

$$P_{dis} = \frac{\sum (\bar{C}_{p_{out}} \bar{T}_{out} - \bar{C}_{p_{in}} \bar{T}_{in}) \dot{m}_f \Delta t_{dis}}{t_{dis}} \quad (2)$$

式中: $\bar{C}_{p_{out}}$ 、 $\bar{C}_{p_{in}}$ 分别为实验段进出口空气的平均比定压热容; $\bar{T}_{out}$ 、 $\bar{T}_{in}$ 分别为实验段进出口空气的平均温度; $\dot{m}_f$ 为空气的质量流量; t_{ch} 为总蓄热时间,指从

蓄热开始至相变材料完全熔化所需要的时间; t_{dis} 是总放热时间,指从放热开始至放热结束所需要的时间; Δt_{ch} 和 Δt_{dis} 分别为数据采集器在蓄热过程和放热过程中采集数据的时间间隔,实验中均为5 s。

用相变蓄热器的蓄热效率来评价蓄热器在进行蓄热-放热循环之后热量的利用率,即由下式计算获得

$$\eta = \frac{P_{\text{dis}} t_{\text{dis}}}{P_{\text{ch}} t_{\text{ch}}} \quad (3)$$

1.3 实验误差分析

实验台使用涡轮流量计 MAT-LUGB1206C($60 \sim 600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)对空气的流量进行测量,不确定度为1.5%。K型热电偶经过标定后不确定度为0.5%,热电偶位置的不确定度为0.02 mm,相变蓄热材料质量的不确定度为1 g。根据下式^[11]

$$\frac{\delta T_e}{T_e} = \left(\left(\frac{\delta T_{\text{cp}}}{T_{\text{cp}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta H}{H} \right)^2 + \left(\frac{\delta Q_m}{Q_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta m}{m} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

可计算得到所测量结果的不确定度为1.59%。

2 实验结果与讨论

2.1 高温熔融盐热物性测量

本次实验选用了前期研究推荐的蓄热性能优良的二元碳酸盐作为高温相变蓄热材料。首先测试其导热系数、比热容、熔点等热物性。

使用激光导热仪(LFA457, NETZSCH)测量了二元碳酸盐的导热系数,结果参见图5所示。从图中可以看到,随着温度的上升,二元碳酸盐的导热系数不断上升,但是其导热系数(均小于 $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)较低,会使得相变蓄热器的蓄热和放热速率较慢。

使用同步热分析仪(STA449F3, NETZSCH)测量了二元碳酸盐的潜热、熔点等热物性参数,测量结果参见图6。从图中可以看到,二元碳酸盐的熔点和凝固点之间、熔化潜热和凝固潜热之间的差别较大:二元碳酸盐的熔点和凝固点分别为485.3和447.8 $^{\circ}\text{C}$,熔化潜热和凝固潜热分别为314.3和230.1 $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$,这种特性会使高温熔融盐相变蓄热器的蓄热过程与放热过程产生差异,进而会对相变蓄热器的蓄热效率等蓄/放热性能产生一定的影响。

2.2 高温熔融盐相变蓄热器蓄/放热性能分析

2.2.1 蓄热过程中相变蓄热材料各点温度变化情况 T_{in} 为 600°C 、 $\dot{m}_f$ 为 $270 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,蓄热过程中相变蓄热器相变蓄热材料各测试点的温度变化情况

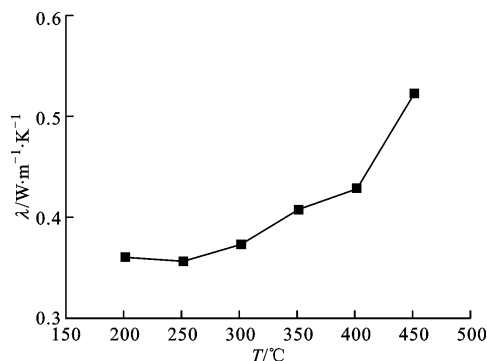


图5 不同温度下二元碳酸盐的导热系数

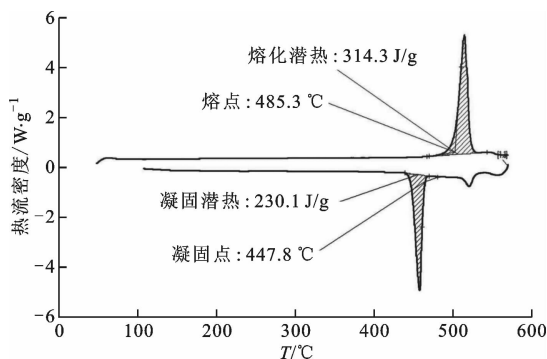


图6 相变蓄热材料 DSC 测量结果

如图7所示。从图中可以看到,在蓄热过程中,相变蓄热器中不同部位展现出不同的升温特性,以此可以判断温度测点是否位于相变材料之中:TC10以及TC9温度测点位于高温套管式熔融盐相变蓄热器的顶部(参见图4),没有与相变蓄热材料接触,因此TC10以及TC9的温升曲线中并没有出现拐点,同时在与空气对流换热和传热管壁面辐射的作用下,TC10和TC9的温度上升最快;测温点TC1~TC8以及TC11~TC13位于相变蓄热材料中,这几个测温点的温度上升过程经历了固体显热蓄热、潜热蓄热、液体显热蓄热3个阶段。

相变蓄热器中相变蓄热材料发生相变时各点温

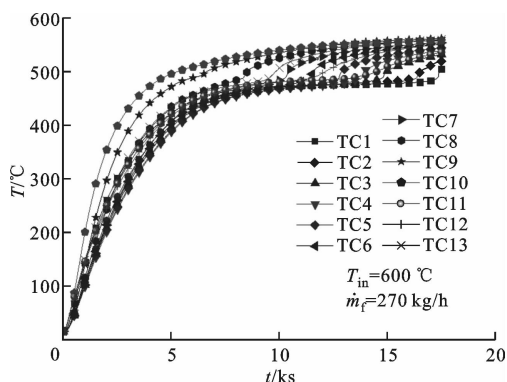


图7 各温度测点在蓄热过程中的温度变化

度变化曲线和熔化先后顺序如图8所示。从图中可以看到,高温熔融盐相变蓄热器中相变蓄热材料的熔化过程存在着非均匀性,相变材料的熔化界面与传热管呈锥形。在相变蓄热材料熔化之前,同一时刻 TC1~TC5 的温度依次下降,而 TC6~TC8 的温度依次上升,原因在于相变蓄热器的下端面与传热管焊接接触,越靠近下端面的相变蓄热材料温度越高。但是,当温度测点距离下端面较远时,受下端面的影响较小,而受传热流体温度的影响较大。因此,高温熔融盐相变蓄热器中的相变蓄热材料的熔化过程存在着非均匀性。

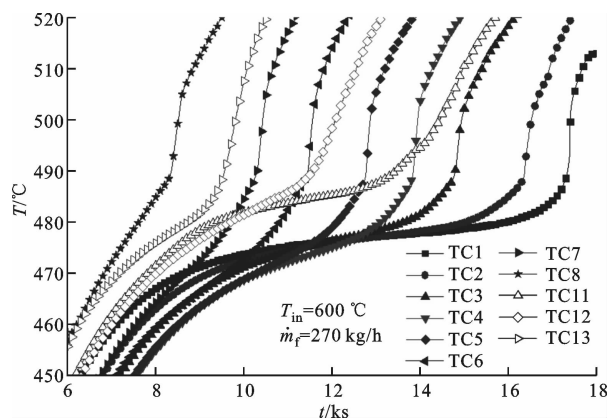


图8 测温点在相变材料熔化过程中的温度变化

与中低温相变材料的蓄热过程不同,由于高温熔融盐的蓄热温度与环境温度相差较大,因此相变材料温度分布的不均匀性会更加剧烈。同时,在高温状态下,熔融盐相变蓄热器所用310S不锈钢的强度会急剧下降,相变材料温度分布不均匀性所产生的热应力会严重影响熔融盐蓄热器安全运行。

2.2.2 保温过程中相变蓄热材料各点温度变化情况 保温过程中相变蓄热材料各点的温度变化情况如图9所示。从图中可以看到,虽然在实验段周围包裹有厚度为200 mm的硅酸铝纤维保温材料,在1 h的保温过程中,相变蓄热器依旧向外散热,相变蓄热材料各点温度不断降低。

相变材料在保温过程中所损失的热量 Q_{loss} 及其在蓄热过程中吸收的热量 $Q_{\text{pcm,ab}}$ 分别按下式计算

$$Q_{\text{loss}} = m_{\text{pcm}} c_{p,\text{pcm}} \Delta T_{\text{pcm,loss}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{pcm,ab}} = m_{\text{pcm}} (c_{p,\text{pcm}} \Delta T_{\text{pcm,ch}} + \Delta H_m) \quad (6)$$

式中: m_{pcm} 为相变材料的质量,实验段共填充了7 kg的相变材料; $\Delta T_{\text{pcm,loss}}$ 为相变材料在保温过程中所下降的平均温度; $\Delta T_{\text{pcm,ch}}$ 为相变材料在蓄热过程中的平均温升,取515 °C。

粗略估计,根据式(5),蓄热器在保温过程中的

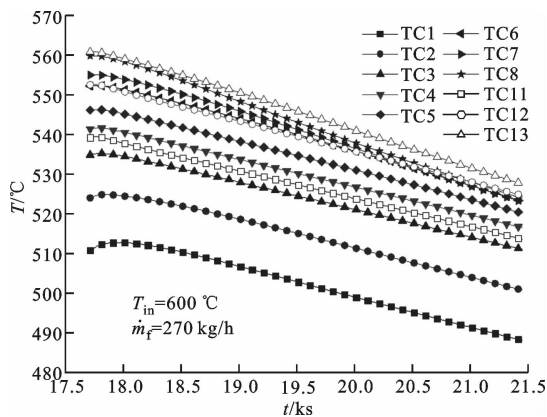


图9 相变蓄热器各测温点在保温过程中的温度变化

热损失(相变材料在保温过程中平均温降按照25 °C计算)达280.0 kJ,而根据式(6),蓄热过程结束时相变材料所存储的热量为7 968.8 kJ,所以高温相变蓄热器在保温1 h中所损失的热量约占相变材料存储热量的3.5%,散热损失较为严重。因此,在实际运行过程中,为提高蓄热器的热经济性,需要强化高温熔融盐相变蓄热器的保温。

2.2.3 放热过程中相变蓄热材料各点温度变化情况 T_{in} 为100 °C、 $\dot{m}_f$ 为270 kg·h⁻¹时,相变蓄热器中相变蓄热材料各点在放热过程温度变化情况如图10所示。从图中可以看出,与蓄热过程相似,相变蓄热材料的放热过程同样经历了液体显热放热、潜热放热、固体显热放热3个阶段。

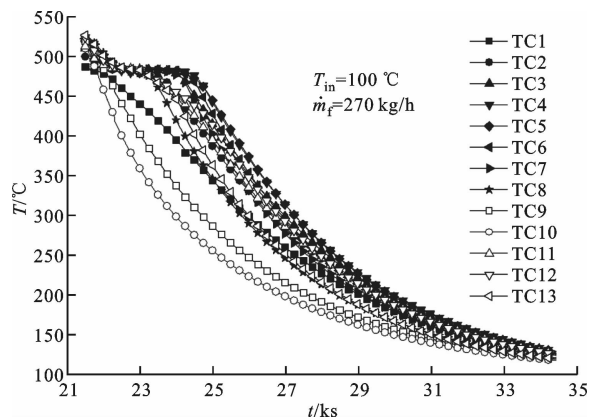


图10 相变蓄热器各测温点在放热过程中的温度变化

在凝固过程中相变蓄热材料各点温度变化情况如图11所示。从图中可以看出,位于不同位置的相变蓄热材料在进行凝固时,发生了不同程度的过冷现象。过冷现象是指在一定压力下,当液体的温度低于该压力下液体的凝固点,而液体仍不凝固的现象。过冷现象的存在会使相变蓄热材料不能在凝固点及时发生相变,影响相变蓄热材料潜热蓄热能力。

高温熔盐相变蓄热器中相变蓄热材料各点过冷度的差异,主要是由相变蓄热材料结晶时冷却速度不同引起的:冷却速度越快,实际结晶温度就越低,过冷度就越大;反之,过冷度就越小。

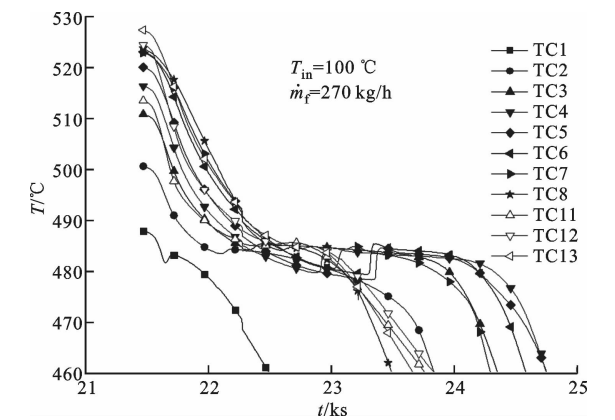


图 11 相变蓄热材料各测温点在凝固过程中的温度变化

相变蓄热材料在放热过程中存在的过冷现象,会对潜热释放的热量产生影响,因此在蓄热器实际运行中,应该尽可能减小材料中的过冷度,提高潜热释放的热量。

2.2.4 高温熔融盐相变蓄热器的蓄/放热性能 高温熔融盐相变蓄热器的蓄/放热性能如表 1 所示。从表 1 中可以看出,高温熔融盐相变蓄热器的蓄热速率大于放热速率,同时蓄热效率还是比较低的,仅为 34.4%。从经济性方面考虑,在实际运行中,要对相变蓄热器进行良好的保温工作,在后续工作中应该注意克服和改善。

表 1 相变蓄热器的蓄/放热性能	
参数	数值
P_{ch}/W	784.5
Q_{ch}/kJ	13 862.9
t_{ch}/s	17 670
P_{dis}/W	372.7
Q_{dis}/kJ	4 766.9
t_{dis}/s	12 790
$\eta/\%$	34.4

2.3 熔融盐侧添加肋片对相变蓄热器蓄/放热性能的影响

添加肋片对相变蓄热材料温度的影响如图 12 所示。从图中可以看出,添加肋片后,相变蓄热单元的蓄热时间缩短。在蓄热过程结束时,相变蓄热材料中的最大温差由 51.1℃下降到了 43.2℃,下降了 15.4%,说明环形肋片的添加使得相变蓄热材料各

点的温度更加均匀,有利于减小相变蓄热器中的热应力,而肋片的添加对相变蓄热材料中各点的降温曲线影响并不显著。

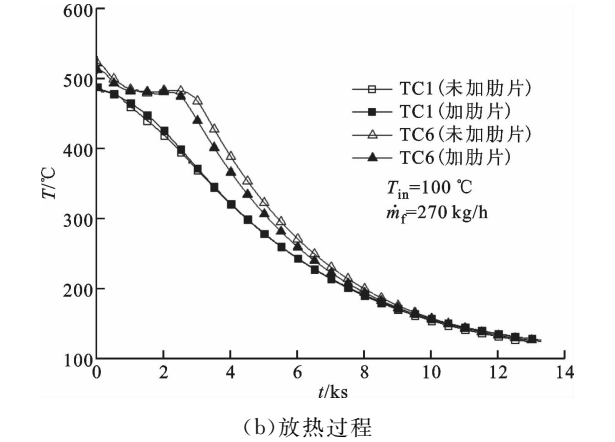
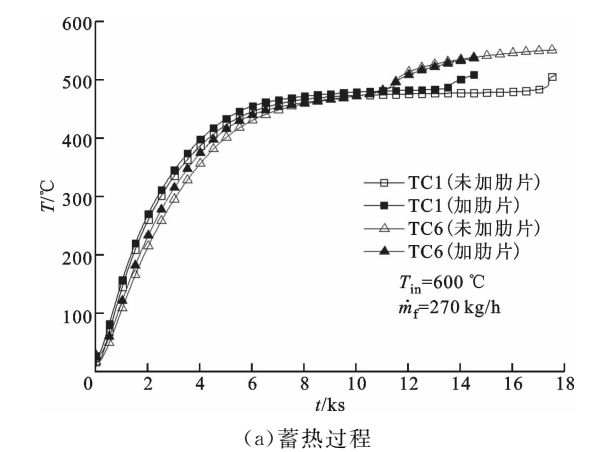


图 12 添加肋片后相变蓄热材料温度测点温度变化

添加肋片前后高温熔融盐相变蓄热器的蓄/放热性能对比情况如表 2 所示。从表 2 中可以看出,添加肋片后,高温熔融盐相变蓄热器的蓄热性能有了明显提高,其中蓄热效率由 34.4%增加到 44.1%,相对增加了 28.2%。

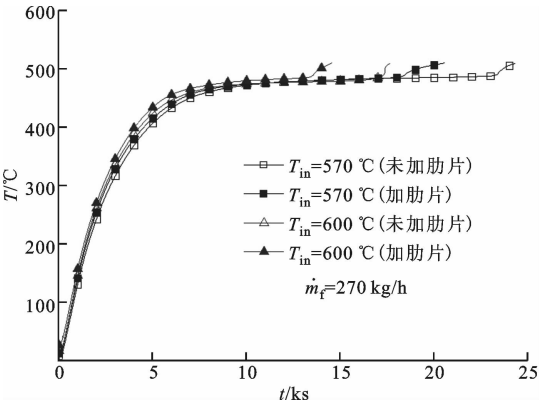
表 2 添加肋片前后相变蓄热器的蓄/放热性能对比

性能指标	光管相变蓄热器	肋片管相变蓄热器
P_{ch}/W	784.5	837.8
P_{dis}/W	372.7	406.5
Q_{ch}/kJ	13 862.9	12 231.9
Q_{dis}/kJ	4 766.9	5 394.6
t_{ch}/s	17 670	14 600
t_{dis}/s	12 790	13 270
$\eta/\%$	34.4	44.1

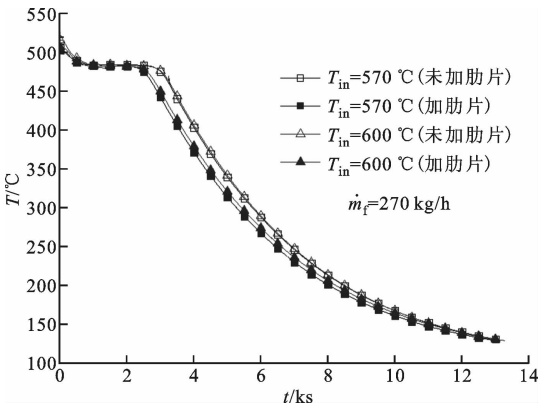
2.4 空气进口温度的影响

不同空气进口温度下光管和肋片管相变蓄热器

TC1 点的温度变化曲线如图 13 所示,可以看到,当空气的进口温度由 570 ℃ 增加到 600 ℃ 后,由于空气与相变蓄热材料间的传热温差增大,传热增强,光管和肋片管相变蓄热器的总蓄热时间都明显缩短,但对 TC1 降温曲线的影响并不明显。



(a)蓄热过程



(b)放热过程

图 13 空气进口温度变化对蓄/放热过程中 TC1 点温度的影响

$\dot{m}_f$ 为 270 kg · h⁻¹、 T_{in} 分别为 570 和 600 ℃ 时,高温熔融盐相变蓄热器蓄/放热性能指标对比情况如表 3 所示。从表 3 中可以看出,在蓄热过程中当空气进口温度由 570 ℃ 增加到 600 ℃ 时,高温熔融盐相变蓄热器的蓄热性能有了明显提升,由于总蓄热时间和总放热时间之和的减少,因此蓄热效率均有小幅的上升。

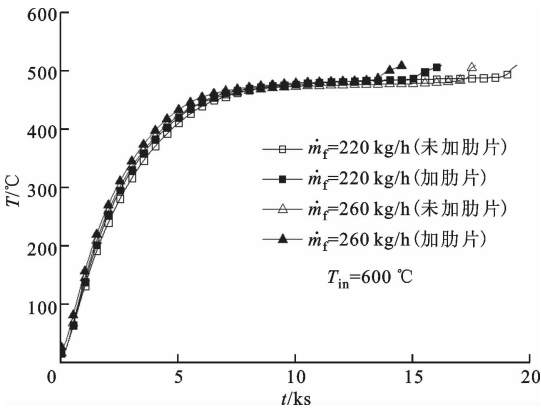
2.5 空气质量流量的影响

不同空气质量流量下,蓄热过程相变蓄热材料中 TC1 点的温度曲线如图 14 所示。从图中可以看到,当空气的质量流量由 220 kg · h⁻¹ 增加到 270 kg · h⁻¹ 后,由于传热流体与相变蓄热材料间的传热增强,蓄热与放热时间明显缩短。

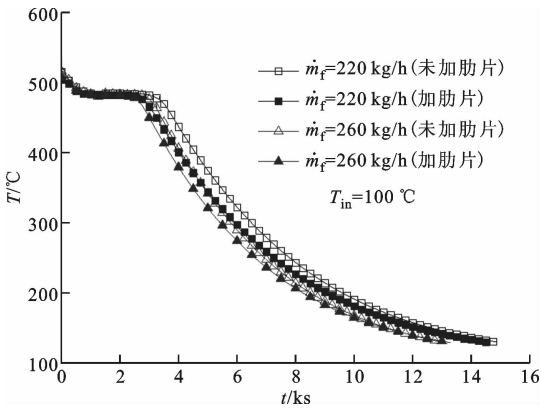
表 3 $\dot{m}_f$ 为 270 kg · h⁻¹ 时不同 T_{in} 下相变蓄热器蓄/放热性能

性能指标	$T_{in}=570\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{in}=600\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	未加肋片	加肋片	未加肋片	加肋片
t_{ch}/s	24 320	20 565	17 670	14 600
Q_{ch}/kJ	13 651.5	12 142.3	13 862.9	12 231.9
P_{ch}/W	561.3	590.4	784.5	837.8
t_{dis}/s	13 110	13 000	12 790	13 270
Q_{dis}/kJ	4 443.0	5 102.5	4 766.9	5 394.6
P_{dis}/W	338.9	392.5	372.7	406.5
$\eta/\%$	32.5	42.0	34.4	44.1

不同空气质量流量时,高温熔融盐相变蓄热器蓄/放热性能对比情况如表 4 所示。从表 4 中可以看出,当空气质量流量由 220 kg · h⁻¹ 增加到 270 kg · h⁻¹ 时,高温熔融盐相变蓄热器的蓄/放热性能明显增强,蓄热与放热过程均加快,热损失减小,所以高温熔融盐相变蓄热器的蓄热效率略有上升。



(a)蓄热过程



(b)放热过程

图 14 空气质量流量变化对蓄热材料蓄/放热过程 TC1 点温度的影响

表 4 T_{in} 为 600℃ 时不同 $\dot{m}_f$ 下相变蓄热器蓄/放热性能

性能指标	$\dot{m}_f=220\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$		$\dot{m}_f=270\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$	
	未加肋片	加肋片	未加肋片	加肋片
P_{ch}/W	675.8	746.2	784.5	837.8
P_{dis}/W	294.7	351.9	372.7	406.5
Q_{ch}/kJ	13 120.4	12 111.2	13 862.9	12 231.9
Q_{dis}/kJ	4 377.1	5 122.0	4 766.9	5 394.6
t_{ch}/s	19 415	16 230	17 670	14 600
t_{dis}/s	14 855	14 555	12 790	13 270
$\eta/\%$	33.3	42.3	34.4	44.1

3 结 论

设计并搭建了高温梯级熔融盐相变蓄热器实验台,针对应用于太阳能光热电站中的高温套管式熔融盐相变蓄热器进行了性能实验研究,主要结论如下。

(1)在蓄热过程中相变蓄热材料熔化过程存在着非均匀性,而在凝固过程中位于不同位置的相变蓄热材料存在着不同程度的过冷现象,为提高潜热释放的热量,应该尽可能减小材料中的过冷度。

(2)在相变蓄热材料侧添加肋片后,相变蓄热材料的温度分布更加均匀,蓄热过程结束时相变蓄热材料的最大温差由 51.1℃ 下降到 43.2℃,下降了 15.4%,相变蓄热器的平均蓄热速率与平均放热速率分别增加了 6.8%和 9.1%。

(3)在系统可承受范围内,可以通过提高空气进口温度和传热流体质量流量等方法来提高相变蓄热器的蓄/放热性能。

参考文献:.

[1] 何雅玲,王坤,杜保存,等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展 [J]. 科学通报, 2016, 61(30): 3208-3237.
HE Yaling, WANG Kun, DU Baocun, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: a review [J]. Chin Sci Bull, 2016, 61 (30): 3208-3237.

[2] RATHOD M K, BANEJEE J. Thermal performance enhancement of shell and tube latent heat storage unit using longitudinal fins [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75(6): 1084-1092.
[3] HE Y L, TAO W Q. Chapter three-convective heat transfer enhancement: mechanisms, techniques, and performance evaluation [J]. Advances in Heat Transfer, 2014, 46: 87-186.
[4] HE Y L, ZHANG Y W. Chapter two-advances and outlooks of heat transfer enhancement by longitudinal vortex generators [J]. Advances in Heat Transfer, 2012, 44: 119-185.
[5] 何雅玲,陶文铨. 强化单相对流换热的基本机制 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 27-38.
HE Yaling, TAO Wenquan. Fundamental mechanism of enhancing single-phase convective heat transfer [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 27-38.
[6] TAO Y B, HE Y L, QU Z G. Numerical study on performance of molten salt phase change thermal energy storage system with enhanced tubes [J]. Solar Energy, 2012, 86(5): 1155-1163.
[7] ZIPF V, NEUHAUSER A, WILLERT D, et al. High temperature latent heat storage with a screw heat exchanger: design of prototype [J]. Applied Energy, 2013, 109(2): 462-469.
[8] TAO Y B, LIN C H, HE Y L. Effect of surface active agent on thermal properties of carbonate salt/carbon nanomaterial composite phase change material [J]. Applied Energy, 2015, 156: 478-489.
[9] TAO Y B, LIN C H, HE Y L. Preparation and thermal properties characterization of carbonate salt/carbon nanomaterial composite phase change material [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 97: 103-110.
[10] TAO Y B, HE Y L, LIU Y K, et al. Performance optimization of two-stage latent heat storage unit based on entransy theory [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77(4): 695-703.
[11] XIAO X, ZHANG P. Numerical and experimental study of heat transfer characteristics of a shell-tube latent heat storage system: part I Charging process [J]. Energy, 2015, 79(1): 337-350.

(编辑 荆树蓉)