

DOI: 10.7652/xjtuxb201901016

泡沫金属/翅片填充管蓄热性能的实验研究

喻家帮¹, 牛朝阳¹, 韦攀¹, 罗涛², 杨肖虎^{1,3}, 刘艳华¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安; 2. 剑桥大学工程学院, CB2 1PZ, 英国剑桥;
3. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究蓄热装置内填充复合相变材料后的蓄热性能,设计了一种填充通孔泡沫金属和环形翅片的圆柱形蓄热罐,搭建了固液相变储热实验系统,并基于此系统对其熔化过程进行了实验研究,记录了相变材料内的实时温度响应数据。研究表明:与泡沫金属管相比,泡沫金属/翅片管加速了石蜡的熔化过程,缩短了整体相变时间;在实验工况下,完全熔化时间减少16.7%;然而,翅片的加入虽加速了顶部石蜡的熔化,但会抑制底部石蜡的熔化,使得石蜡内部不同高度间的温差扩大,温度均匀性降低;此外,通过提高流量可以显著增强装置的蓄热响应速度,从而提高最终稳定温度。

关键词: 蓄热;熔化相变;泡沫金属/翅片管

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0122-07

Experimental Investigation on the Thermal Energy Storage Performance of Metal Foam/Finned Tube

YU Jiabang¹, NIU Zhaoyang¹, WEI Pan¹, LUO Tao², YANG Xiaohu^{1,3}, LIU Yanhua¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, United Kingdom;

3. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This work conducted experimental investigations on the thermal energy storage performance of the shell and tube unit with composite phase change materials (PCM). A cylindrical heat storage tank filled with open-cell metal foam and annular fins was proposed. In order to study the heat transfer enhancement performance, a solid-liquid phase change thermal storage experiment system was set up. Based on the system, the melting process was experimentally studied and the real-time temperature response data in PCM were recorded. The results showed that, compared with metal foam tube, the unit with metal foam/finned tube accelerated the paraffin melting and reduced the overall phase transition time. Under the experimental conditions, the full melting time was decreased by 16.7%. However, the addition of fins accelerated the melting of the top paraffin, but inhibited the melting of the bottom paraffin, which made the temperature disparity among different heights expand and resulted in internal temperature nonuniformity. For foam tube and foam/finned tube, increasing the flow rate can significantly enhance the thermal storage response speed of the unit, and the final stable temperature can be increased.

Keywords: thermal energy storage; melting phase change; metal foam/finned tube

收稿日期: 2018-06-22。 作者简介: 喻家帮(1994—),男,硕士生;杨肖虎(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506160);陕西省自然科学基金资助项目(2017JQ5007)。

网络出版时间: 2018-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180912.1718.002.html>

随着社会经济的发展,全球能源消费迅速增长,已经出现了如能源枯竭、环境污染和全球变暖等多种问题,急需开发可再生能源^[1]。太阳能作为一种可持续的清洁能源,具有无污染、零排放的特点。在太阳能热利用方面,太阳能热水器技术日趋成熟,应用领域已从生活热水扩大到采暖、制冷空调、海水淡化、工业加热、热发电等,具有广阔的前景^[2]。然而,由于太阳能存在间歇性和随机性,往往需要集成蓄热装置协同使用^[2-3]。

工程上广泛使用的相变材料导热系数低(石蜡约为 $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[4-6])、相变储能效率低,为了提高石蜡的导热系数以加强其在蓄热领域的可行性,研究者主要从蓄热设备的改进出发,比如采用翅片、蜂窝、多孔介质等^[3,7-10],或是在石蜡中添加金属粉末、金属网、石墨等^[3-6]。

康海军等通过实验对9种平直翅片管的传热与阻力特性进行了研究,结果发现翅片间距对传热的影响依赖于临界雷诺数,对于层流,翅片间距增加,换热下降,阻力减小^[11]。Yang等对环形翅片/石蜡复合相变材料的熔化过程进行了数值模拟研究,发现通过在相变材料中插入环形翅片,完全熔化时间可以最大限度地减少65%^[12]。

往石蜡中添加高导热材料可以显著提高其导热系数,如石蜡与膨胀石墨、碳纤维等复合时,复合物的导热系数可以达到 $4 \sim 70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[3-6]。张正国等制备出粉末状的石蜡/膨胀石墨复合相变储热材料,并对其储放热性能进行了实验研究,结果表明当石蜡质量分数为80%时,复合相变储热材料的储放热时间分别比纯石蜡缩短了69.7%和80.2%^[5]。Jiang等使用石蜡和碳纤维制备了复合相变材料,根据石蜡/碳纤维复合相变材料的密度,发现其面内导热系数比纯石蜡高18~57倍,面外导热系数也提高了3.7~5.5倍^[6]。此外,导热系数的提高与复合相变材料中碳纤维的体积分数几乎呈线性关系。

使用多孔泡沫材料也可以有效提高相变材料的导热系数,使其达到原有的数十倍^[3,10,13-16]。Yang等通过实验研究了纯石蜡、底部添翅片和不添翅片的泡沫铜/石蜡等3种相变材料的温度变化和固液相界面移动,结果表明在相同条件下,复合相变材料的完全熔化时间比纯石蜡短了 $1/3$ ^[17]。马预谱等通过实验对比研究了铝翅片和泡沫金属铜对石蜡蓄热性能的影响,结果表明,加装铝翅片和填充泡沫金属铜能使散热器与石蜡的平均温差分别降低76%和18%,同时导致整体蓄热密度分别减少40.3%和

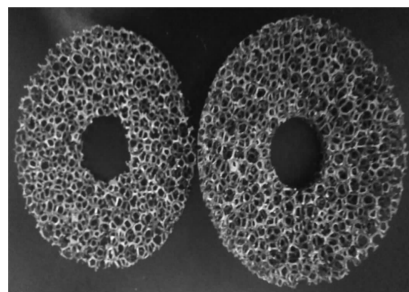
4.2%,加装铝翅片增强石蜡储热性能强于填充泡沫金属铜,但从储热密度方面考虑泡沫金属铜明显优于铝翅片^[18]。Chen等通过实验研究探讨了金属泡沫结构参数对交错管束传热和流动特性的影响,结果表明,随着金属泡沫孔隙率的增加,换热管束努塞尔数因渗透能力的增强而增加,热对流主导传热,在低雷诺数下,高孔密度金属泡沫的努塞尔数较低,保温效果较差^[19]。

泡沫金属可以强化固液相变主要是利用了其丰富的比表面积和较高的骨架热导率,但是对相变材料整体储热性能的增强有限;翅片可显著增强导热能力,将换热界面的热量传递到相变材料内部。由此,将二者有机地结合起来有望充分利用泡沫丰富的比表面积和翅片高效的热传导性能,更好地强化换热。目前的研究主要集中在翅片管和泡沫金属管的相变蓄热,关于泡沫金属管和泡沫金属/翅片管相变蓄热性能的对比研究较少。为此,本文建立了圆柱形复合相变材料蓄热装置的测试系统,研究了在不同流速工况下相变材料的温度响应和温度场均匀性,通过实验对两者的传热性能进行了系统比较。

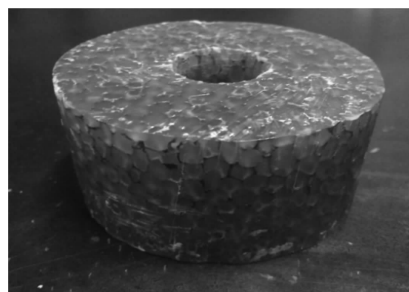
1 实验装置

1.1 实验试件

本文使用环形泡沫铜,其孔密度为 3.94 cm^{-1} ,孔隙率为0.97,外径为83 mm,内径为22.5 mm。泡沫铜试件如图1所示,采用真空注蜡法将熔融的



(a)填充前



(b)填充后

图1 泡沫金属填充石蜡前后照片

石蜡注入到泡沫铜中,待石蜡凝固后取出形成的石蜡/泡沫金属复合相变材料。本实验对比了两种复合相变材料填充换热管的固液储热性能,一种为石蜡/泡沫金属复合材料填充管,另一种是在泡沫金属间隙中每隔 50 mm 填充 2 mm 厚的圆环铜片。

1.2 实验系统

本实验为了研究泡沫金属填充管、泡沫金属/翅片填充管对蓄热过程的强化作用,搭建了一套相变换热实验系统,如图 2 所示,主要由换热流体循环系统、蓄热换热管测试系统和数据采集系统组成。换热流体循环系统主要由恒温水箱、流量计、硅胶管和阀门组成;测试系统主要由有机玻璃外管和紫铜内管组成的环形蓄热换热管以及环形间隙中填充的复合相变材料组成;数据采集系统由热电偶、流量计和数据采集仪 Agilent 34970A 组成,其中热电偶的采集精度为 0.1℃,恒温水箱的温控精度为 0.1℃,流量计的测量误差为±1%。

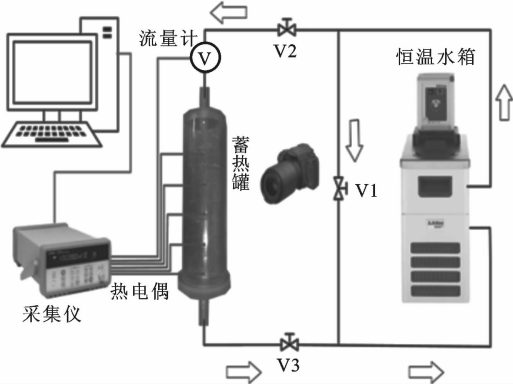


图 2 实验系统示意图

选用恒温水箱产生的 70℃ 纯水作为换热流体,从铜管顶部注入。选用石蜡为相变储热材料,其热物性参数如表 1 所示。实验设计了一个同心圆柱式蓄热管,高度为 300 mm,管外径为 100 mm,内径为 90 mm。本文设计了两种不同结构的换热管用于实验:一个是环形间隙填充泡沫金属的换热管;另一个是环形间隙填充泡沫金属和翅片的换热管,在 300 mm 的高度方向等间距分布有 5 片环形翅片,将其焊接在铜管上,间隔为 50 mm,如图 3 所示。在两种换热管制备过程中为了降低泡沫金属与铜管的接触热阻,采用导热胶(导热系数为 25 W·m⁻¹·K⁻¹)作为粘接剂,均匀涂抹于泡沫金属与铜管的接触面上。由于石蜡类材料相变吸热后体积的膨胀率在 10% 左右,因此从换热管底面至 270 mm 高度处填充满泡沫铜,上部留有 30 mm 的空腔用于石蜡膨胀。数据采集段的测点布置如图 3 所示,用 20

根 T 型热电偶监测系统的实时温度,其中 2 根分别布置在铜管的入口处和出口处,其余均布置在蓄热管内。表 2 给出了每根热电偶的径向距离 R 与垂直高度 H 。

表 1 石蜡的热物性参数

参数	数值
熔点/℃	46.5~60.4
溶解热/kJ·kg ⁻¹	102.1
比热容/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	3 250
导热系数/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0.25(固)/0.1(液)
黏性系数/kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	3.7×10 ⁻³
热膨胀系数/K ⁻¹	1.0×10 ⁻³

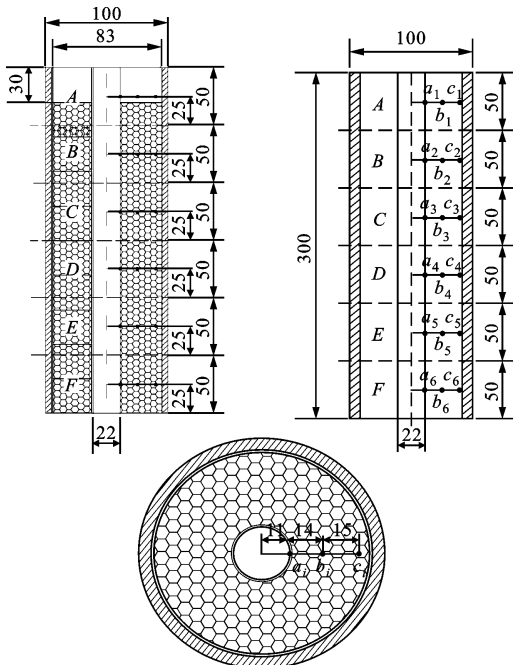


图 3 泡沫金属/翅片填充管热电偶分布图

表 2 热电偶位置分布

H/mm	位置点		
	$R=11\text{ mm}$	$R=25\text{ mm}$	$R=40\text{ mm}$
25	a_6	b_6	c_6
75	a_5	b_5	c_5
125	a_4	b_4	c_4
175	a_3	b_3	c_3
225	a_2	b_2	c_2
275	a_1	b_1	c_1

实验前应将石蜡冷却至室温附近,并且为了保证实验结果的准确性,还应检查凝固石蜡的上表面是否水平,如若有明显的凸起或凹陷,则应将其处理

至近似水平。实验过程中将整个测试段包裹在保温棉(导热系数为 $0.02\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)中,以减少热量损失。恒温水箱采用纯水作为换热流体,提供 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温换热边界。平均入口流速保持恒定且小于 0.1 m/s ,对应的换热管雷诺数低于 $2\ 000$,因此该流动为层流。

实验装置启动前,关闭阀门 2 和 3,开启阀门 1。开启恒温水箱使温度上升至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,待水箱温度稳定后打开数据采集器开始采集实时温度数据(时间间隔 10 s),此时打开阀门 2 和 3,关闭阀门 1,使换热流体从铜管顶部送入。

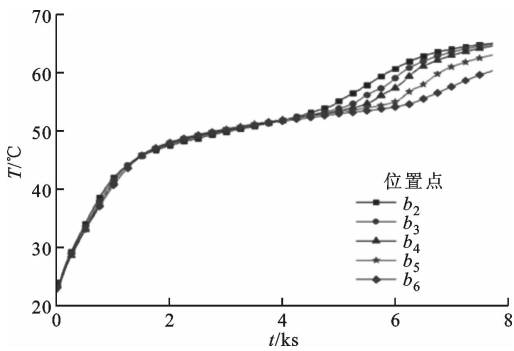
2 结果讨论

2.1 相同流速下泡沫管和泡沫/翅片管的

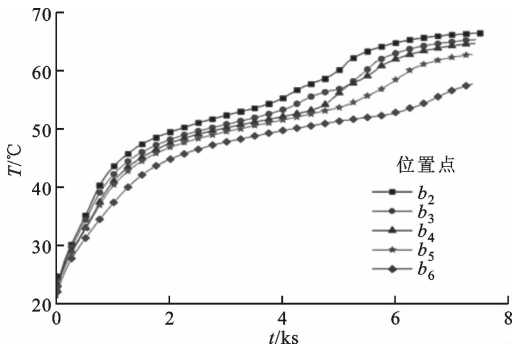
轴向温度响应

在这两种换热管中,相变材料的熔化趋势基本一致。相变蓄热主要分为 3 个阶段:第 1 阶段为固态纯导热阶段,由换热流体传递的热量通过热传导被固体石蜡吸收,由于石蜡的显热较小,所以其温升较快;第 2 阶段为相变阶段,此阶段石蜡开始由固态熔化为液态,由于其潜热较大,所以石蜡温度上升较为平缓;第 3 阶段为液态导热阶段,液态石蜡再次进入显热蓄热状态,所以该阶段石蜡温度上升也较快。完成上述 3 个阶段后,换热管内的测点温度逐渐稳定趋于定值,表明此测点附近完成蓄热。如图 4 所示,因为 a 点紧贴换热管,所以热传导占主导地位, c 点离管外壁面最近,容易受到外界环境的影响。因此,为了准确研究不同换热器结构对热传导和热对流的影响,选取 b_i 点(第 i 层的中间位置)作为代表,对其温度变化情况进行分析。

如图 5 所示,对于泡沫管,位于上层相变材料的 b_2 点熔化时间比最下层 b_6 点快 $1\ 300\text{ s}$ (0.36 h),差别很小。从图 4a 可以观察到,在第 1 阶段内的导热阶段和第 2 阶段内的对流阶段前期, b_i 点之间的温差很小,温度变化曲线几乎重叠。这主要有两个方面的原因:首先水的比热容较大,换热管进出口水温相差很小,整根管子的管壁近似于恒温壁面,所以每层热传导能力几乎一致;其次,此阶段环形间隙的石蜡熔化量很少,对流作用微弱。综合这两方面原因,该阶段的温度曲线几乎重叠,然而在后期,随着石蜡熔化量增加,对流作用越来越强, b_i 点之间的温差逐渐扩大,故温度曲线逐渐分散开,但是总体来说泡沫金属填充管内部的温度均匀性非常好。如图 5 所示,对于泡沫/翅片管,位于上层相变材料的 b_2 点熔



(a) 泡沫管



(b) 泡沫/翅片管

图 4 入口流速为 0.07 m/s 时石蜡熔化过程 b_i 点实时温度

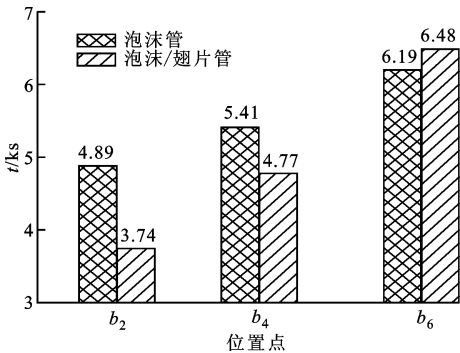


图 5 入口流速为 0.07 m/s 时泡沫管和泡沫/翅片管相同位置点的熔化时间比较

化时间比最下层 b_6 点快 $2\ 740\text{ s}$ (0.76 h),相比泡沫管熔化间隔增加了 $1\ 440\text{ s}$ 。从图 4b 可以观察到,在第 1 阶段内的导热阶段, b_i 点的温度随 i 的增大而降低,且垂直方向越靠下,温度越低。泡沫/翅片管相比泡沫管温度曲线间距拉大,是由于翅片的加入增大了管内的局部导热能力,使得进出口水的温差进一步扩大,此时不能再看作是恒温壁面,换热管的导热能力在垂直高度由上至下是逐渐减弱的。此外,因为位于铜管上方的换热流体流动的努塞尔数较大,铜管下方的换热流体流动的努塞尔数较小,所以换热流体在铜管上方能更好地换热。因此,位于

上方的测点温度要高于下方的测点温度。此外,随着时间的推移,各层之间的温差逐渐扩大。除了上述因素,局部自然对流也使得温度均匀性下降。

2.2 相同流速下泡沫管和泡沫/翅片管的

轴向各层相变时间

从拍摄结果可以看出,泡沫管完全熔化时间约为 120 min,泡沫/翅片管完全熔化时间约为 100 min,缩短了将近 16.7%。从图 6 和图 7 可以发现,在第 2 阶段内,泡沫管和泡沫/翅片管在相变时间上存在较大差异,虽然两者从上至下每层的相变时间都在逐渐扩大,但可以发现泡沫管 b_2 点的相变时间约为 3 240 s,泡沫/翅片管 b_2 点的相变时间约为 2 390 s,前者比后者慢了 850 s,然而对于 b_6 点,泡沫管的相变时间约为 4 560 s,泡沫/翅片管的相变时间约为 4 040 s,前者比后者慢了 520 s。分析如下:在垂直方向上,自然对流是由下至上进行热传递的, b_2 点位于翅片上方, b_6 点位于翅片下方,因此对于 b_2 点,翅片的加入有助于增强对流传热,缩短相变时间;对于 b_6 点,翅片的加入对增强对流传热微弱,反而在空间上一定程度地限制了自然对流,所以延长了局部石蜡的相变时间,同时也导致底部石蜡不易熔化,内部温度分布不均匀性增大。

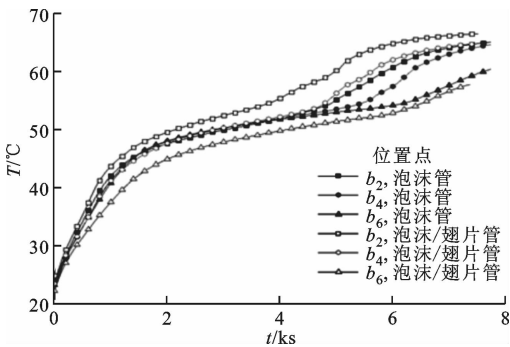


图 6 入口流速为 0.07 m/s 时泡沫管和泡沫/翅片管相同位置点的温度变化比较

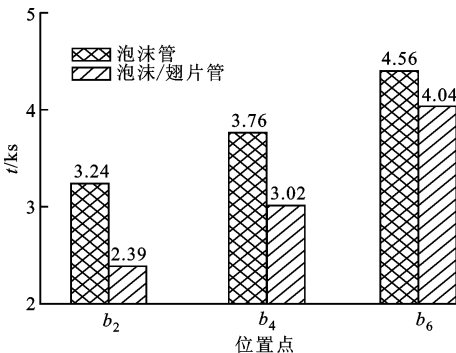
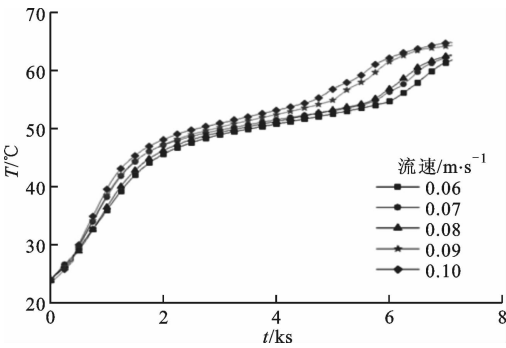


图 7 入口流速为 0.07 m/s 时泡沫管和泡沫/翅片管相同位置点的相变时间比较

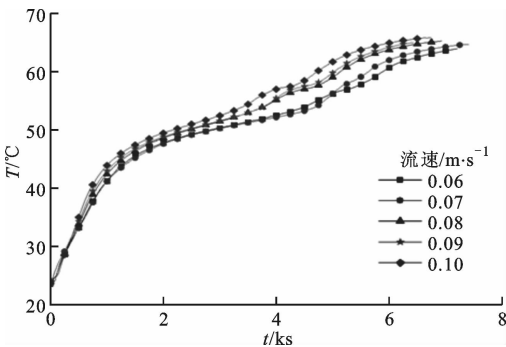
通过比较两种情况,可以观察到环形翅片的参与可以有效地增强相变传热,缩短整体完全熔化时间,但是翅片的加入会破坏泡沫管温度场的均匀性,各层之间温差扩大,而且从实验结果来看,翅片不可随意布置,在泡沫管底部布置翅片不仅不会增加底部石蜡的熔化量,反而会削弱热传递,这对工程实际有一定借鉴意义。

2.3 换热流体流速对相变材料熔化过程的影响

图 8 为不同流速下换热管 b_4 测点温度变化图,可以看出,流速对相变材料的温度改善有影响,随着流速的增加,石蜡的熔化过程会加快。对于泡沫管,当流速为 0.06 m/s 时, b_4 点的完全熔化时间约为 6 020 s,最终的稳定温度为 61.89 °C;当流速为 0.1 m/s 时, b_4 点的完全熔化时间约为 4 730 s,最终的稳定温度为 64.95 °C。可以发现,通过提高流速,泡沫管完全熔化时间缩短 21.4%,最终的稳定温度提高 4.94%。对于泡沫/翅片管,当流速为 0.06 m/s 时, b_4 点的完全熔化时间约为 4 630 s,最终的稳定温度为 63.93 °C;当流速为 0.1 m/s 时, b_4 点的完全熔化时间约为 3 550 s,最终的稳定温度为 65.83 °C。可以发现,通过提高流速,泡沫/翅片管完全熔化时间缩短 23.3%,最终的稳定温度提高 2.97%。总体来说,无论是对泡沫管还是泡沫/翅片管,换热流体



(a) 泡沫管



(b) 泡沫/翅片管

图 8 不同流速下换热管 b_4 测点温度变化图

流速从 0.06 m/s 升至 0.1 m/s 可以明显提高蓄热装置的蓄热速度和最终的稳定温度。这是由于石蜡侧填充泡沫金属和翅片之后,导热能力明显增强,从而其所占整个系统热阻的比重相应减小,换热流体侧的热阻所占比重就相对上升,这时提高流速可以明显减小换热流体侧热阻,增强装置的蓄热能力。然而,提高流速会增大系统的泵功消耗,同时也会对系统管路提出更高的要求,这对整个系统的运行能耗和初投资是不利的,所以需要权衡考虑。

3 结 论

本文针对相变材料内嵌通孔泡沫金属和翅片的熔化过程进行了实验研究,记录了在不同流速下石蜡熔化过程中各个测点的实时温度,讨论了不同换热结构(泡沫管和泡沫/翅片管)对熔化过程的影响,以及换热流体流速对相变传热的影响。通过分析,得出以下结论。

(1)泡沫铜/石蜡复合相变材料的温度分布比泡沫铜+翅片/石蜡复合相变材料的温度分布更均匀,但泡沫/翅片管具有更好的传热性能,蓄热速度更快。

(2)在泡沫金属管中不可随意布置翅片,在泡沫管底部布置翅片不会促进位于翅片之下石蜡的熔化,反而会削弱自然对流,延长底部石蜡的相变时间。

(3)对于泡沫管和泡沫/翅片管,流速对相变材料的温度改善有显著影响。随着流速的增加,石蜡的熔化过程会加快,最终的稳定温度会提高。

参考文献:

- [1] CHUA K J, CHOU S K, YANG W M, et al. Achieving better energy-efficient air conditioning: a review of technologies and strategies [J]. *Applied Energy*, 2013, 104(4): 87-104.
- [2] 魏高升,邢丽婧,杜小泽,等. 太阳能热发电系统相变储热材料选择及研发现状 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(3): 325-335.
WEI Gaosheng, XING Lijing, DU Xiaoze, et al. Research status and selection of phase change thermal energy storage materials for CSP systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(3): 325-335.
- [3] 孟锋,安青松,郭孝峰,等. 蓄热过程强化技术的应用研究进展 [J]. *化工进展*, 2016, 35(5): 1273-1282.
MENG Feng, AN Qingsong, GUO Xiaofeng, et al. A review of process intensification technology in thermal energy storage [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(5): 1273-1282.
- [4] 胡锦炎,付星,罗小兵. 石蜡/膨胀石墨储热基板的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(8): 1511-1514.
HU Jinyan, FU Xing, LUO Xiaobing. Experimental study of paraffin/expanded graphite based heat storage substrate [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(8): 1511-1514.
- [5] 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.
- [6] JIANG Zhao, OUYANG Ting, YANG Yang, et al. Thermal conductivity enhancement of phase change materials with form-stable carbon bonded carbon fiber network [J]. *Materials & Design*, 2018, 143(5): 177-184.
- [7] 宋富强,屈治国,何雅玲,等. 低速下空气横掠翅片管换热规律的数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2002, 36(9): 899-902.
SONG Fuqiang, QU Zhiguo, HE Yaling, et al. Numerical study on heat transfer of air across finned tube at low speeds [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(9): 899-902.
- [8] 王杰利,屈治国,李文强,等. 封装有相变材料的金属泡沫复合散热器实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(2): 295-298.
WANG Jieli, QU Zhiguo, LI Wenqiang, et al. Experimental study of hybrid heat sink sintered with metal foams filled with phase change materials [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(2): 295-298.
- [9] 徐百平,朱冬生,黄晓峰,等. 管外翅片强化传热途径与研究进展 [J]. *石油化工设备*, 2004, 33(5): 41-44.
XU Baiping, ZHU Dongsheng, HUANG Xiaofeng, et al. The measurements and study advances for the heat transfer enhancement of outer fins of tube [J]. *Petrochemical Equipment*, 2004, 33(5): 41-44.
- [10] 张涛,余建祖. 相变装置中填充泡沫金属的传热强化分析 [J]. *制冷学报*, 2007, 28(6): 13-17.
ZHANG Tao, YU Jianzu. Analysis on thermal conductivity enhancement for PCM embedded in metal foam [J]. *Journal of Refrigeration*, 2007, 28(6): 13-17.

- [11] 康海军, 李斌, 李惠珍, 等. 平直翅片管换热器传热与阻力特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(1): 91-98.
KANG Haijun, LI Wu, LI Huizhen, et al. Experimental study on heat transfer and pressure drop for plane fin and tube heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(1): 91-98.
- [12] YANG X, LU Z, BAI Q, et al. Thermal performance of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit: role of annular fins [J]. Applied Energy, 2017, 202: 558-570.
- [13] ZHANG P, XIAO X, MA Z W. A review of the composite phase change materials: fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement [J]. Applied Energy, 2016, 165: 472-510.
- [14] 白青松, 郭增旭, 刘亦琳, 等. 通孔金属泡沫强化蓄冰实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 20-25.
BAI Qingsong, GUO Zengxu, LIU Yilin, et al. Experimental study on enhanced ice storage in open cell metal foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1): 20-25.
- [15] 杨肖虎, 白佳希, 卢天健. 通孔金属泡沫渗透率解析模型 [J]. 力学学报, 2014, 46(6): 982-986.
YANG Xiaohu, BAI Jiaxi, LU Tianjian. A simplistic analytical model of permeability for open-cell metallic foams [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(6): 982-986.
- [16] 杨肖虎, 邝九杰, 白佳希, 等. 高孔隙率通孔金属泡沫有效导热系数的实验和理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 79-84.
YANG Xiaohu, KUANG Jiuji, BAI Jiaxi, et al. Experimental and analytic investigations for effective thermal conductivity in high porosity metallic foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 79-84.
- [17] YANG J, YANG L, XU C, et al. Experimental study on enhancement of thermal energy storage with phase-change material [J]. Applied Energy, 2016, 169: 164-176.
- [18] 马预谱, 胡锦涛, 陈奇, 等. 金属材料增强的石蜡储热性能研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(10): 2196-2201.
MA Yupu, HU Jinyan, CHEN Qi, et al. Study on heat storage performance enhancement of paraffin by metallic material [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(10): 2196-2201.
- [19] CHEN K, GUO L J, XIE X D, et al. Experimental investigation on enhanced thermal performance of staggered tube bundles wrapped with metallic foam [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2018, 122: 459-468.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 92 页)

- [18] SICARAMAKRISHNAN R, BREZINSKY K, DAY-MA G, et al. High pressure effects on the mutual sensitization of the oxidation of NO and CH₄-C₂H₆ blends [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2007, 9(31): 4230-4244.
- [19] GIMENEZ L J, ALZUETA M, RASMUSSEN C T, et al. High pressure oxidation of C₂H₄/NO mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 449-457.
- [20] KONNOV A, ZHU Jianning, BROMLY J, et al. The effect of NO and NO₂ on the partial oxidation of methane: experiments and modeling [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1093-1100.

(编辑 赵炜)