

主动式相变储热装置蓄/放热特性实验

张 冷¹, 徐 敏¹, 刘忠兵², 张晓洁¹

1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082

2. 中国五环工程有限公司, 武汉 430079

摘要 针对一种主动式电热热泵相变蓄热装置, 在不同工作电压和不同热源温度下测试其蓄热和放热性能。实验结果表明, 在不同工作电压和不同热源温度时, 该装置的蓄/放热时间以及蓄/放热效率有很大差异。在工作电压较高, 余热热源温度较高的情况下, 该装置蓄热所需时间较短; 此时继续增加工作电压会导致半导体芯片冷热端温差变大而降低该装置的制热系数。对比被动式相变蓄热装置, 该装置最大的优越性在于工作电压的可调性, 在合理的范围内调整工作电压大小, 可以保证其较高的蓄/放热性能, 同时克服了被动式相变蓄热装置在低温余热回收过程中无法改善热能供需双方在时间、地点和强度上不匹配性的缺点。

关键词 相变蓄热; 电热热泵; 主动蓄热

中图分类号 TE09

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.11.001

Heat Storage/Release Characteristics of an Active Phase-change Thermal Storage Device

ZHANG Ling¹, XU Min¹, LIU Zhongbing², ZHANG Xiaojie¹

1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

2. Wuhuan Engineering Co. Ltd., Wuhan 430079, China

Abstract In this paper, the heat storage and release properties of an active phase-change thermal storage device have been tested under different working voltage and exhaust heat temperature. The experimental results show that: different working voltage and exhaust heat temperature make great difference on the time and efficiency of thermal storage/release. Under higher voltage and exhaust heat temperature, the time that the device needs to store heat is short. The increased working voltage can enlarge the temperature difference between the hot and cold sides of semiconductor chips, and then reduce the heating coefficient. Compared to passive phase-change thermal storage devices, the biggest advantage of the device is the adjustability of working voltage. Therefore, much higher heat storage/release properties can be assured by adjusting working voltage within a reasonable range. At the same time, the device overcame the mismatch of thermal energy supply and demand sides on time, place and intensity in the process of recycling low-temperature waste heat, which cannot be improved by passive phase-change thermal storage devices.

Keywords phase-change thermal storage; thermoelectric heat pump; active thermal storage

0 引言

潜热储能技术因其具有储能密度高、充释热温度稳定等优点而受到普遍关注。Shamsundar 和 Srinivasan^[1]设计了一种壳-管式蓄热换热器, 并对其进行了蓄热、放热实验研究。Banaszek 等^[2]对采用螺旋式结构的储能装置进行了理论与实验研究。吕其岗等^[3]和 Horbaniuc 等^[4]分别于 1992 年和 1999

年设计了蓄热式热管换热器。王增义等^[5]借鉴了以往热管在蓄热方面的理论与应用, 设计了一套热管式相变蓄热换热器, 并进行了详细的实验研究。目前, 已经有多种结构形式的储能装置, 并在提高相变材料导热性能和传热性能方面做了很多工作^[6-9]。但上述所列的不同形式的换热装置无一例外地都是被动式的热能转换装置, 一方面上述热能转换装置只能通

收稿日期: 2010-12-03; 修回日期: 2011-02-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA05Z229); 湖南省科技厅国际科技合作研发计划项目(06wk3023); 湖南省科技计划项目(2010WK3036)

作者简介: 张冷, 教授, 研究方向为建筑节能与热回收, 电子邮箱: zhangl@hotmail.co.uk

过余热热源与储能材料之间的温差被动蓄热,在低温余热回收利用方面并不适用;另一方面在余热回收过程中,被动式热能转换装置不能根据余热排放的时间和强度适时调整蓄热速率,以充分回收余热,提高回收效率,同时在热能释放的过程中,不能按照能源使用端的要求实现热能的主动释放,以满足不同的热能使用要求。

本文对一种新型热电热泵相变蓄热换热装置进行了性能测试。该装置作为一种主动式相变蓄热换热装置,克服了上述被动式相变蓄热装置的缺点,实现主动蓄热/放热过程,为余热回收、电力的“移峰填谷”、将间断能源如太阳能、风能等转化为连续能源方面等领域提供了新方法。

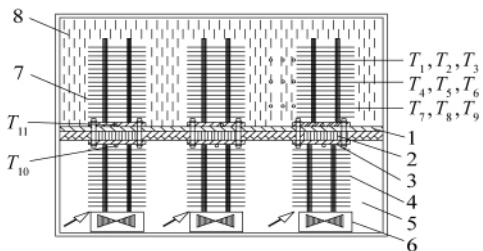
1 热电热泵相变蓄热/放热原理及装置

1.1 热电热泵相变蓄热换热实验装置

图1给出了热电热泵相变蓄热换热器的结构简图及铂电阻测点布置图。可以看出,本装置由蓄热箱体、热电芯片、热管散热器、风机、风道等组成。

本实验选用的相变储能材料为专用蜡 35[#];热电芯片型号为 TEC1-12706,外形尺寸为 40mm×40mm×3.8mm,最大电压、电流分别为 15.4V、6A,最大温差为 60℃,最大产冷量 51.4W。共选用 6 片热电芯片,每 2 片一组,每组热电芯片冷、热端各采用一个热管散热器散热。相变蓄热箱体的尺寸为 400mm×200mm×200mm,采用 1mm 的镀锌铁皮制作,底板采用 1.2mm 厚的紫铜板制作,为了减少散热损失,蓄热箱体四壁采用 6cm 厚的聚氯乙烯保温材料保温。

温度测点具体布置见图 1,由上到下,从两个热管散热器中点到翅片依次布置 1—9 个测点。其中测点 3、测点 6、测点 9 紧靠热管散热器翅片,测点 1、测点 4、测点 7 位于两热管散热器中点,测点 5 位于测点 4 和测点 6 的中点位置。热电芯片两端分别布置测点 10 和测点 11。



1—铜板;2—热电芯片;3—热管散热器底座;4—热管散热器;5—风道;6—风机;7—热管散热器;8—相变储能材料; T_1 — T_{11} —测点

图 1 热电热泵相变蓄能装置

Fig. 1 Thermoelectric heat pump phase-change thermal storage device

1.2 热电热泵相变蓄热/放热原理

热电热泵相变蓄能装置工作过程如图 1 所示。蓄热工况下,含有低温余热的废气经过风机的强制对流与热电热泵冷端热管散热器 4 发生热交换,经热电热泵作用后产生的热量

经过热管散热器 7 将储热材料熔化,以大量潜热和少部分显热的形式储存在相变材料中。放热工况下,改变输入热电热泵电流的方向,原热电热泵冷热端交换,输入少量电能将储存在相变材料中的热能释放出来,这时,取热流体在风机的强制对流作用下与热管散热器 4 发生热交换升温后排出。

2 结果与分析

2.1 工作电压对热电热泵蓄热性能的影响

根据热电热泵制热原理,输入热电芯片的电压越大,热电芯片热端产生的热量越大,而热电芯片热端散热条件一定,因此热端温度越高,冷热端温差越大。图 2 和图 3 分别为不同电压下,热电热泵蓄热时间和冷热端温差的比较。

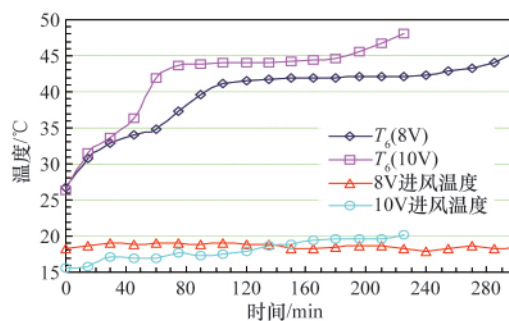


图 2 不同工作电压下的热电热泵蓄热时间比较

Fig. 2 Comparison of the storing time of the thermoelectric heat pump under different working voltages

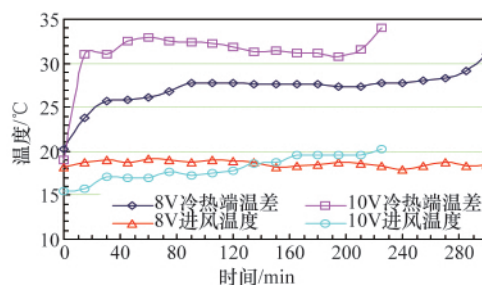


图 3 不同工作电压下的热电热泵冷热端温差比较

Fig. 3 Comparison of the temperatures difference between the two sides of the thermoelectric heat pump under different working voltages

从图 2 可以看出,在余热热源温度(即进风温度)相差不大的情况下,电压越大,完成整个蓄热过程所需时间越短。从 T_h 的温度曲线图可以看出,在电压 10V 时,从蓄热开始到石蜡相变完成大约为 180min,随后进入显热蓄热状态;而在电压 8V 时,从蓄热开始到石蜡相变完成大约为 260min。

从图 3 可以看出,在蓄热开始阶段,热电热泵冷热端温差随着蓄热时间的增加而迅速增大,这是由于开始阶段热电热泵热端产生的热量主要以显热形式储存在相变材料石蜡中,石蜡吸收热量后温度迅速上升,而随着蓄热时间的增加,石蜡开始发生相变,热电热泵热端产生的热量以潜热的形式

储存在石蜡中,石蜡温度维持在相变点左右,变化缓慢,使得热电热泵热端温度维持在一个小范围内变化,因此热电热泵冷热端温差变化较为缓慢。随着相变材料石蜡相变完成,热端温度迅速增大,使得冷热端温差出现迅速变大的趋势。由于进风温度存在一定波动,冷热端温差受到一定程度的影响,特别是在电压 10V 时,冷热端温差受到的影响较大。

2.2 余热热源温度对热电热泵蓄热性能的影响

根据热电制热原理,冷热端温差对热电制热性能有重要影响,冷热端温差越小,制热系数越大。通入风道的气体(余热热源)是热电热泵的热源,其温度的改变使得冷端的换热条件发生改变,这也必将改变热电热泵蓄热装置的冷热端温差,进而影响热电热泵蓄热装置的制热性能。

图 4 为电压 8V 时,不同进风温度下热电热泵蓄热时冷热端温差比较,可以看出,进风温度越高,冷热端温差越小,蓄热时间越短。

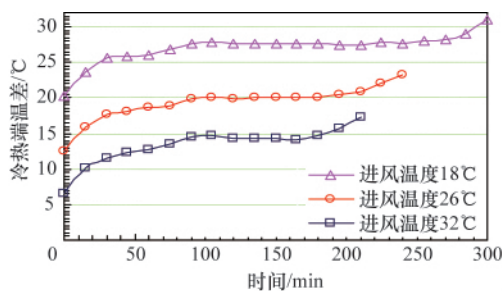


图 4 电压 8V、不同进风温度时的热电热泵冷热端温差比较
Fig. 4 Comparison of temperature difference between hot and cold sides with different inlet temperature under the condition that the working voltage is 8V

图 5 为电压 8V 时,不同进风温度、热电热泵蓄热时制热系数随热电热泵冷热端温差的变化。图中温差值为从蓄热开始到蓄热结束,每隔 15min 的测试值。可以看出,余热热源温度越高,冷热端温差越小,制热系数越大。进风温度为 18°C 左右时,整个蓄热过程热电热泵冷热端温差在 20.2—30.95°C 之间,制热系数在 1.52—1.14 之间变化;进风温度 26°C 时,整个

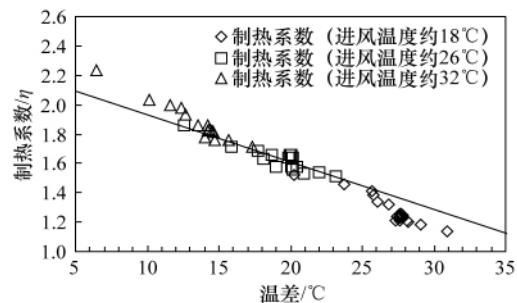


图 5 电压 8V、热电热泵蓄热时制热系数比较
Fig. 5 Comparison of heating coefficients with different inlet temperature under the condition that the working voltage is 8V

蓄热过程热电热泵大部分时间对应应在冷热端温差 12.55—23.2°C 之间,制热系数在 1.86—1.51 之间;进风温度 32°C 时,整个蓄热过程热电热泵大部分时间对应应在冷热端温差 6.5—17.3°C 之间,制热系数在 2.23—1.71 间变化。

2.3 不同工况下热电热泵的放热性能

相变储能装置放热时制热系数越大越好,即输入尽可能少的电能,将储存在相变材料中的热能释放出来。根据热电热泵制热性能,热电热泵冷热端温差越小,输入芯片的电流越小,制热系数越大,但单片芯片输入的功率越小,芯片热端产生的热量越少,要达到能源使用端强度的要求,只能增加装置芯片的数量。

图 6 为电压为 4V、进风温度 25°C 左右和电压 6V、进风温度 20°C 左右时,热电热泵放热时的制热性能随时间变化。从图中可以看出,电压越高,进出风的温差越大,即出风温度升高值越大。石蜡放热刚开始的一段时间内,由于是相变材料显热释,热电热泵冷端温度迅速下降,随后进入潜热释放阶段,冷端温度下降的趋势比较平缓。

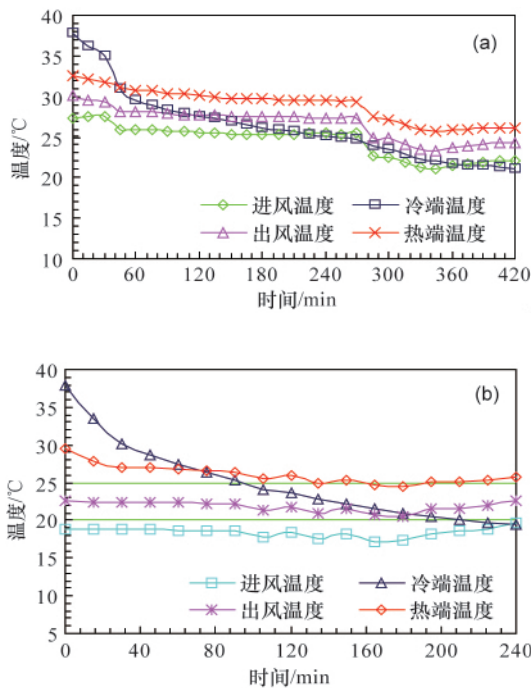


图 6 电压 4V、进风温度 25°C 左右 (a) 和电压 6V、进风温度 20°C 左右 (b) 热电热泵放热时的性能变化
Fig. 6 Changes of thermoelectric heat pump performance under the condition that the working voltage is 4V, inlet temperature is 25°C (a) and working voltage is 6V, inlet temperature is 20°C (b)

图 7 为图 6 对应的热电热泵在不同电压下放热时制热系数随冷热端温差的变化情况。可以看出,在放热时,制热系数随着温差的增大按照线性变化规律减小,这种变化趋势在电压较小时更为显著。在电压 4V、进风温度 25°C 左右,热电

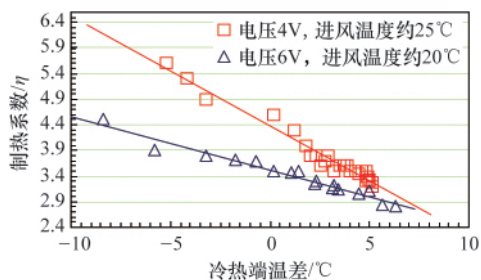


图7 不同电压下电热泵制热系数随温差的变化
 Fig. 7 Comparison of heating coefficients under different working voltages

热泵在整个放热过程中电热泵冷热端温差在 $-6\sim 6^{\circ}\text{C}$ 之间,制热系数在 $5.6\sim 3.2$ 之间变化;在电压 6V ,进风温度 20°C 左右时,放热时的制热系数在 $4.5\sim 2.8$ 之间变化。

3 结论

本文对比了一种主动式电热泵相变蓄热装置在不同试验参数下的实验结果。通过对实验结果的分析,得出以下结论。

(1) 工作电压是影响电热泵相变蓄热装置性能的重要因素,输入电压越大,相变过程越迅速,所需蓄热时间越少,但同时增大了冷热端温差,降低了制热系数。因此,控制输入电压的大小是控制该装置蓄/放热强度和蓄/放热性能的主要手段。

(2) 余热热源温度同样影响电热泵相变蓄热装置的性能,适当提高余热热源温度可以减小冷热端温差,进而可以缩短蓄热时间和提高电热泵的制热系数。

(3) 在消耗电能比较上,该装置比传统被动式相变蓄热装置耗电较多,且多耗电集中为热电芯片所消耗的电能。为了保证有较高的制热系数,单片热电芯片输入电压不宜超过 10V ,热电芯片的输入电压非常小,多消耗的电能占总电能消耗的比重非常小。

(4) 该装置并不因为增加了热电芯片组而增加蓄热量。蓄热时间和蓄热材料同样影响着蓄热性能。但是该装置改善了传统被动式相变蓄热装置在蓄热过程中只能依赖于温差的现状,在蓄/放热过程的控制上,该装置明显优于传统被动式相变蓄热装置。

(5) 依靠牺牲了一部分电能换来对蓄/放热过程控制的强化,以及热电技术本身的优势,使得该装置的应用范围比

较广泛。去掉风机部件可以采用水冷方案,甚至可以回收较低品位的热能,这是被动式蓄热装置做不到的。

参考文献 (References)

- [1] Shamsundar N, Srinivasan R. Analysis of energy storage by phase change with an array of cylindrical tubes [C]//Thermal Storage and Heat Transfer in Solar Energy Systems, Proceedings of the Winter Annual Meeting. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1978: 35-40.
- [2] Banaszek J, Domafiski R, Rebow M, et al. Experimental study of solid-liquid phase change in a spiral thermal energy storage unit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1999, 19(12): 1253-1277.
- [3] 吕其岗, 吴丰, 司秀丽. 风力致热系统中的一种新型具有“弹性”的热管贮热装置[J]. *新能源*, 1992, 14(1): 11-13.
Lu Qigang, Wu Feng, Si Xiuli. *New Energy*, 1992, 14(1): 11-13.
- [4] Horbaniuc B, Dumitrascu G, Popescu A. Mathematical models for the study of solidification with in a longitudinally finned heat pipe latent heat thermal storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 1999, 40(15-16): 1765-1774.
- [5] 王增义, 刘中良, 马重芳. 热管式相变蓄热换热器储/放能过程中传热特性的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(6): 989-991.
Wang Zengyi, Liu Zhongliang, Ma Chongfang. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(6): 989-991.
- [6] Ettouney H M, Alatiqi I, Al-Sahali M, et al. Heat transfer enhancement by metal screens and metal spheres in phase change energy storage systems[J]. *Renewable Energy*, 2004, 29(6): 841-860.
- [7] Sari A, Karalpekli A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(8-9): 1271-1277.
- [8] Shaikh S, Lafdi K. Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15-16): 2103-2117.
- [9] Li T, Tang G F, Gong G C, et al. Investigation of prototype thermoelectric domestic ventilator [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(10): 2016-2021.
- [10] Liu Z B, Zhang L, Yang Z A, et al. Experimental study of thermoelectric heat pump water heater with exhaust heat recovery from kitchens[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition*, 2009, 36(Z1): 131-135.
- [11] 钟广学. 半导体制冷器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Zhong Guangxue. *Semiconductor refrigeration and its application* [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [12] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
Xu Desheng. *Semiconductor refrigeration and application technology* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992.

(责任编辑 代丽)