

半导体与热管耦合制冷系统的实验研究

孙小琴 刘宁 陈卓宇 高静 刘子铭 李梦雪 李范

(长沙理工大学 能源与动力工程学院 长沙 410114)

摘要 针对半导体制冷效率低的问题, 本论文提出采用热管系统提高半导体热端散热率的方法, 设计了一种半导体与热管耦合制冷系统。为验证该系统的制冷性能, 在恒温恒湿环境室内对比测试半导体制冷和半导体与热管耦合制冷的制冷量, 结果表明利用热管散热可提高半导体制冷量的 56%, 降低半导体冷端温度 3.5℃。通过改变发热量, 室外环境温度以及热管内工质充注量, 探讨了半导体与热管耦合制冷系统在不同工况下的制冷性能。实验发现半导体热管耦合制冷系统的制冷量随发热量的增大而增大; 实验工况下, 最优的工质充注量为 50g。

关键词 半导体制冷; 热管; 工质充注量; 发热功率

中图分类号: TQ051.5; TK172

文献标识码: A

Experimental research of a semiconductor refrigerating system coupled with a heat pipe

Sun X-Q Liu N Chen Z-Y Gao J Liu Z-M Li M-X Li F

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, 410114, China)

Abstract A heat pipe system was proposed to improve the heat dissipation from the hot side of semiconductor refrigerating system to solve its problem of low energy efficiency. A semiconductor refrigerating system coupled with a heat pipe was designed. To verify the cooling performance, the cooling capacity was measured in an ambient room, compared with a normal semiconductor refrigerating system. It was found that the cooling capacity was improved by 56% using heat pipe. The influences on cooling capacity of input heat, outdoor air temperature, refrigerant filling mass was figured out. The cooling capacity increased with input heat. The optimal refrigerant filling mass was 50 g under the experimental conditions.

Keywords semiconductor refrigerating; heat pipe; refrigerant filling mass; input power

1 引言

半导体制冷技术利用半导体材料的热电能量转换特性实现制冷目的。相对于其他机械制冷技术, 半导体制冷技术降温迅速、操作简单、可靠性强、容易实现高精度的温度控制、无污染等; 尤其适用于制冷量不大, 要求装置小型化的场合^[1]。但是半导体制冷性能受其冷、热端温度影响很大^[2]。李茂德和卢希红^[3]通过理论计算获得了半导体制冷性能与其热端散热量之间的解析式, 结果表明半导体的制冷量随热端散热强度的增加而增大, 但增大到一定程度后制冷量趋于稳定。

为了提高半导体的制冷效率, 半导体热端空气冷却、水冷却和重力热管冷却的制冷效果受到了很多研究^[4-9], 结果表明半导体热端采用热管散热可使系统获得更低的冷端温度, 半导体的制冷效果最佳, 最节能环保。

为了探查半导体与热管耦合制冷的性能, 本论文设计一种半导体与热管耦合制冷的系统, 在不同的室外环境温度和电热片发热量的条件下, 探究不同热管工质充注量对半导体制冷片冷热端温度及制冷量的影响, 找出半导体与热管耦合制冷性能达到最佳的工质充注量, 为实际半导体制冷系统的性能优化提供一定的参考。

2 工作原理及实验测试

半导体热管制冷系统由热管和半导体组合而成。当设备接通直流电源时，电子从 N 型半导体材料移动至 P 型半导体材料，在 P 型半导体材料内吸收热量，在 N 型半导体材料内放出热量。热管蒸发端贴附在半导体热端，通过循环工质蒸发带走半导体热端的热量，热量通过气导管传递到热管的冷凝端，最终将热量散出。

2.1 半导体传热计算

设半导体冷端温度为 T_c ，热端温度为 T_h ，冷热端温差为 $\Delta T = T_h - T_c$ 。冷端从外界吸取的热量(即制冷量)为 Q_c ，热端向外放出的热量(即散热量)为 Q_h 。半导体工作时的制冷量如下：

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - k \Delta T \quad (1)$$

其中： α 为温差电动势， $\mu V/^\circ C$ ； I 为输入电流，A； R 为半导体电阻， Ω ； k 为热导率， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

半导体冷端吸收热量后，热端排出的热量如下：

$$Q_h = \alpha I T_h + \frac{1}{2} I^2 R - k \Delta T \quad (2)$$

2.2 热管传热计算

热管的蒸发端与半导体的热端直接接触带走半导体热端的热量。

蒸发端的换热量 Q'_c ：

$$Q'_c = \frac{1}{R_1} A (T_h - T'_c) \quad (3)$$

其中： R_1 为热管蒸发端热阻， $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ ； A 为热管蒸发端传热面积， m^2 ； T'_c 为热管蒸发端壁面温度， $^\circ C$ ； T_h 为半导体热端壁面温度， $^\circ C$ 。

热管冷凝端的散热量为：

$$Q'_h = \frac{A_f (T'_h - T_{air})}{R_2} \quad (4)$$

其中： R_2 为热管冷凝端热阻， $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ ； A_f 为冷凝端换热面积，

m^2 ； T'_h 为冷凝端循环工质的温度， $^\circ C$ ；

T_{air} 为冷凝端空气温度， $^\circ C$ 。

2.3 实验测试装置

半导体与热管耦合制冷系统装置如图 1 所示。为增强该系统的制冷性能，半导体冷端和热管冷凝端分别布置一轴流风机，实现强制对流传热。为测量该设备的制冷性能，采用电加热片模拟热源负荷，并将半导体热管制冷装置与电加热片安装于同一个箱体内部；此外，为探明热管在提高半导体热端散热量的效果，箱体内安装了风冷半导体制冷系统，对比测试该两种制冷系统的制冷性能。实验测试平台如图 2 所示。实验在恒温实验室内进行，用恒温实验室模拟不同室外环境温度。整个实验主要分为两部分，第一部分是半导体热管耦合制冷系统和风冷半导体制冷系统的性能对比，第二部分热管半导体制冷系统的性能优化。



图 1 半导体与热管耦合制冷系统实验装置

Fig. 1 Experimental device of thermoelectric cooling module coupled with heat pipe

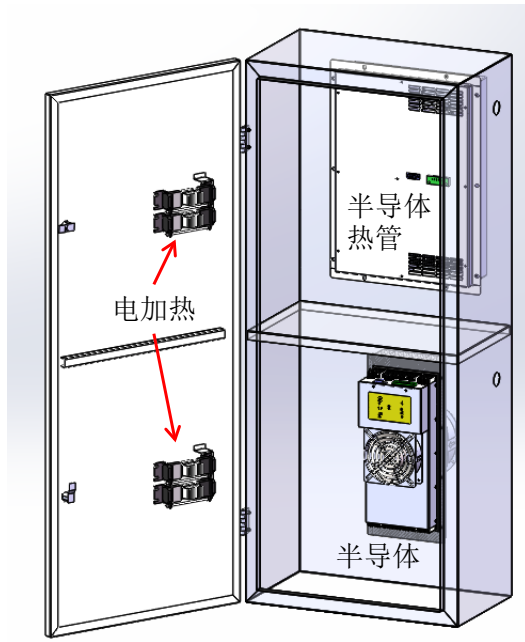


图 2 对比测试实验平台

Fig. 2 Experimental apparatus for comparison

实验中采用热电偶测量各点温度，系统布置 28 个测温点，其中在恒温实验室均匀布置 16 个热电偶测量环境温度；实验箱体内布置 6 个热电偶，

表 1 不同工况下的测试结果

Tab. 1 Experimental results under various conditions

环境温度 (°C)	空气 流速 (m/s)	进出口平均温差 (°C)		制冷量 (W)		冷端温度 (°C)	
		半导体热 管制冷	半导体制 冷	半导体热 管制冷	半导体 制冷	半导体热 管制冷	半导体 制冷
30	5.22	3.42	1.87	195.6	106.9	20.4	26.2
35	5.22	3.25	2.60	185.5	148.7	24.8	27.3
40	5.22	3.23	2.42	181.4	135.8	29.1	31.7
45	5.22	3.43	2.02	189.6	111.9	32.3	35.0
50	5.22	3.96	2.14	215.7	116.7	33.9	37.6

由表 1 结果可知，采用热管系统辅助半导体散热后，半导体冷端温度降低，其与空气之间的换热温差增大，故半导体热管制冷的换热量增大，对比与半导体的制冷效果，半导体冷端温度降低 3.5°C，换热量平均增大 56%。此外，两种不同制冷装置内，半导体冷端温度均随环境温度的升高而增大，但两种装置的制冷量随环境温度变化呈现不同的变化趋势。当加入热

其中 2 个用于测量电加热片表面温度，4 个用于测量箱体内温度；在半导体热管制冷装置内布置 6 个热电偶，分别测量半导体冷端温度（2 个）、热管蒸汽上升管壁面温度、热管冷凝端温度（2 个）以及液体回流管壁面温度。热电偶测得的温度通过数据记录仪记录，每秒读取一次数据。

3 实验测量和结果分析

3.1 性能对比

本实验设定的室外环境温度分别为 30°C、35°C、40°C、45°C、50°C，根据实验测试的送回风温度和风速，分别计算不同工况下半导体热管耦合制冷系统和半导体制冷系统的制冷量，结果如表 1 所示。

$$Q_c = \rho v A c (T_{in} - T_{out}) \quad (5)$$

其中： ρ 为空气密度， kg/m^3 ； v 为空气流速， m/s ； A 为风口面积， m^2 ； c 为空气比容， $\text{J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ ； T_{in} 和 T_{out} 为回风和送风温度， $^\circ\text{C}$ 。

管增强散热后，半导体的制冷量先降低后升高；室外环境温度升高后，热管内工质的循环加快，加快热量的散失，从而增大半导体的制冷量。而半导体装置的制冷量随环境温度的升高先增大后降低。当环境温度较低时，箱体内负荷小于半导体的制冷量，故随着环境温度的升高（即负荷上升），半导体的制冷量增大，当箱体内负荷大于半导体的制冷量时，多余的热量

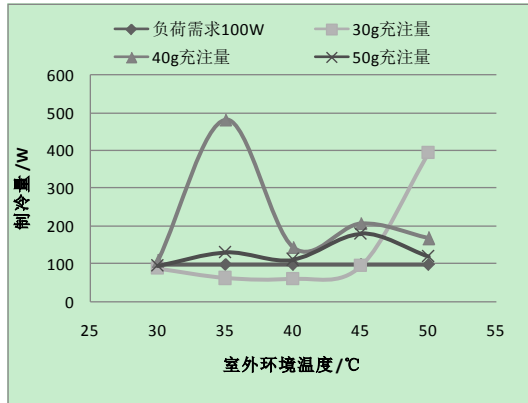
在半导体冷端堆积，导致其制冷量降低。

3.2 性能优化

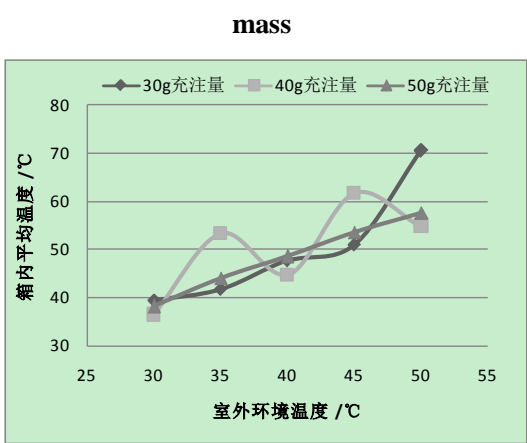
3.2.1 工质充液量

热管的超导性能是利用工质相变过程中的汽化潜热传递热量实现的，不同工质充注量对热管的性能产生较大影响，从而影响整个半导体热管耦合制冷系统的性能。本实验研究不同工质充注量下（30g、40g、50g）的制冷实验，以探讨不同充液率下的制冷性能。

不同工质充注量下制冷量以及箱内平均温度的对比，如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出，当工质充注量为 30g，室外环境温度为 50℃时，制冷量明显偏高，对比箱体内平均温度分布可知此时箱体内平均温度很大，导致回风口测得的温度升高，此工况下制冷量的偏高主要是由于箱内温度偏高造成的，并不能反映实际制冷量。当工质充注量为 40g，室外环境温度为 35℃和 45℃时，箱体内温度升高，制冷量增大，与上述工况类似。当工质充注量为 50g 时，箱内平均温度较低，且制冷量较大，制冷性能随环境温度变化不大。此外，当工质充注量为 50g 时，在不同环境温度下制冷量均大于热源发热量，可完全满足箱体内部的制冷需求。综上所述，当工质充注量为 50g 时，相对于 30g 和 40g 制冷效果更好，并且系统运行更加稳定。



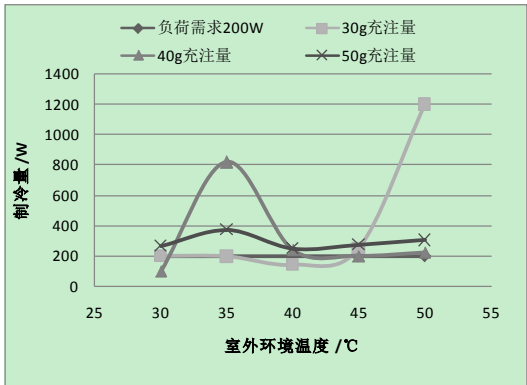
(a) 制冷量随工质充注量的变化
(a) Cooling capacity with refrigerant filling



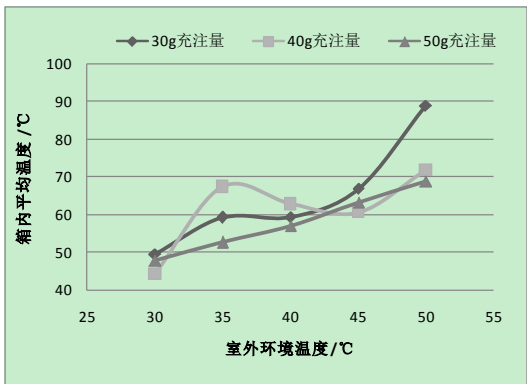
(b) 箱内温度随工质充注量的变化
(b) Cabinet inside air temperature with refrigerant filling mass

图 3 制冷效果随工质充注量的变化（100W 负荷）

Fig. 3 Cooling performance with refrigerant filling mass (100W)



(a) 制冷量随工质充注量的变化
(a) Cooling capacity with refrigerant filling mass



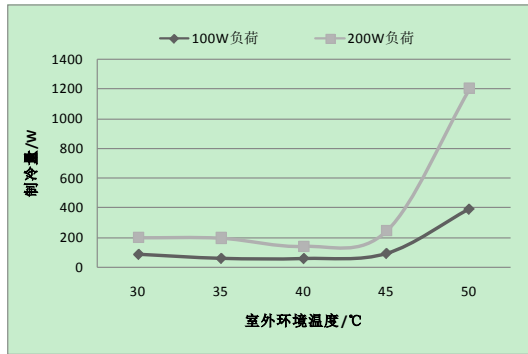
(b) 箱内温度随工质充注量的变化
(b) Cabinet inside air temperature with refrigerant filling mass

图 4 制冷效果随工质充注量的变化 (200W 负荷)

Fig. 4 Cooling performance with refrigerant filling mass (200W)

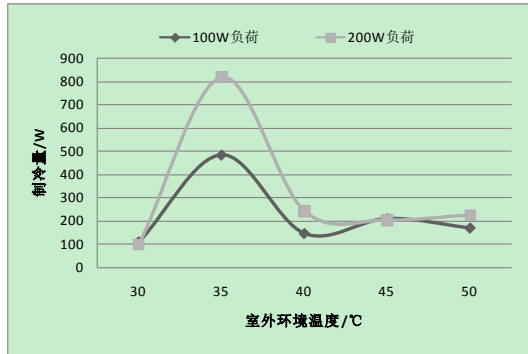
3.2.2 电加热功率

本实验中分别设定电加热片发热功率为 100W 和 200W, 研究不同电加热功率对于系统制冷性能的影响, 结果如图 5 所示。在不同工质充注量下, 半导体热管制冷设备的制冷量随负荷的增大而增大, 即热管可在不同负荷下自动调整运行状态, 负荷增大时, 热管内工质循环加快, 加大半导体热端的散热量; 但其负荷调整能力受半导体制冷能力和其工质充注量限制, 图中 50℃ 环境、30g 工质充注量和 35℃ 环境、40g 工质充注量下的制冷量明显偏离实际运行效果, 该现象主要是由于箱体内温度过高引起的。



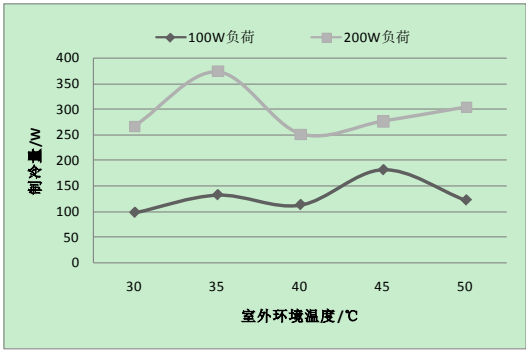
(a) 工质充注量: 30g

(a) Refrigerant filling mass: 30g



(b) 工质充注量: 40g

(b) Refrigerant filling mass: 40g



(c) 工质充注量: 50g

(c) Refrigerant filling mass: 50g

图 5 制冷量随负荷的变化

Fig. 5 Cooling capacity with input heat

4 结论

本文设计了一种半导体与热管耦合制冷系统, 研究了该系统在不同环境温度下、不同工质充注量和不同热源下的制冷性能, 研究结果表明:

1) 热管有效提高了半导体的制冷性能, 其制冷量提高了 56%, 冷端温度降低了 3.5℃。

2) 当工质充注量为 50g 时, 可满足不同负荷的制冷需求, 且在不同环境温度下的运行更加稳定。

3) 热管具有一定的工况调整能力, 半导体热管耦合制冷系统的制冷量随热源发热量的增大而增大。

致谢

本文受国家自然科学基金项目 (51608051)、湖南省教育厅优秀青年项目 (15B014)、湖南省自然科学基金项目 (2016JJ3006)、长沙市科技计划项目 (kq1602016) 资助。(This project was supported by National Natural and Science Funding (51308051), the Education Department of Hunan (15B014), the Hunan Natural and Science Funding (2016JJ3006) and the Science and Technology Department of Changsha (kq1602016)).

参考文献

- [1] 贾艳婷, 徐昌贵, 闫献国, 等. 半导体制冷研究综述[J]. 制冷, 2012, 31(1): 49-55. (Jia Y-T, Xu C-G, Yang X-G, et al. Semiconductor refrigeration review [J]. Refrigeration, 2012, 31(1): 49-55.)
- [2] 蔡德坡. 半导体制冷热端的分析与实验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010. (Cai D-P. Analysis and optimization of the hot side of experimental study [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.)
- [3] 李茂德, 卢希红. 热电制冷过程中散热强度对制冷参数的影响分析[J]. 同济大学学报, 2002, 30 (7): 811-813. (Li M-D, Lu X-H. Influence of intensity of heat emission on performance of semiconductor refrigeration [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30 (7): 811-813.)
- [4] Liu D, Zhao F-Y, Yang H-X, et al. Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system[J]. Energy, 2015, 83, 29-36.
- [5] 张建成. 半导体制冷的热管式散热器传热研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30 (5): 38-41. (Zhang J-C. Study of heat transfer about heat pipe type cooler of semiconductor refrigerating element [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2000, 30 (5): 38-41.)
- [6] 戴源德, 温鸿, 于娜, 等. 热管散热半导体制冷系统的实验研究[J]. 南昌大学学报: 工科版, (Dai Y-D, Wen H, Yu N, et al. Experimental study on semiconductor refrigeration system with a heat pipe radiator [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2013, 35(1): 54-57.)
- [7] 王莹, 朱姣颖, 庞云凤. 多种半导体制冷热端散热方式的综合实验研究[R]. 中国制冷学会学术年会, 南京, 2011 年. (Wang Y, Zhu J-Y, Pang F-Y. Comprehensive experimental study on many heat transfer methods of hot side on semiconductor refrigeration [R]. Annual meeting of China Refrigeration Institute, Nanjing, 2011)
- [8] 谢万蓉, 屈宗长, 刘公衍, 等. 半导体冰箱热管及变工况控制的研究[J]. 制冷技术, 2013, 41(5): 69-74. (Xie W-R, Qu Z-C, Liu G-Y, et al. Research on heat pipe and the variable condition control in semiconductor freezer [J]. Refrigeration, 2013, 41(5): 69-74.)
- [9] Wang J, Zhao X-J, Cai Y-X, et al. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 532-540.

通信作者简介

孙小琴, 女, 副教授, 长沙理工大学能源与动力工程学院, (0731) 85258409, E-mail: xiaoqinsun@csust.edu.cn. 研究方向: 建筑节能技术。

About the corresponding author

Sun Xiaoqin, female, associate professor, School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, (0731) 85258409, E-mail: xiaoqinsun@csust.edu.cn. Research fields: Energy conservation in buildings.