doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.01.003

新型机柜半导体空调制冷性能试验研究

刘丽君[1,2],盛　健[1,2],张　华[1,2],许贯禄[1]

（1. 上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093;2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室,上海 200093）

摘　要:为了实现对机柜温度的精确控制,设计了一种电器柜集成半导体空调,采用标定型房间量热计法,通过试验研究了输入电流(6~11 A)、环境温度(26~35 ℃)、箱内外温差(0~40 ℃)、热端风量等参数对机柜半导体空调制冷性能的影响。结果表明:在环境温度 26 ℃,箱内外温差 20 ℃时,半导体空调最佳工作电流为 8 A(36 V),此时制冷量最大(213 W);当电流为 8 A(36 V)时,随着环境温度(20~35 ℃)升高,制冷量提高了 13.9%,*COP* 提高了 11.9%;随着箱内外温差(0~40 ℃)增大,制冷量和 *COP* 均显著增大(108~340 W,0.38~1.21),热交换量的提高是制冷量上升的主要原因;热端风扇的风量从 108.6 m^3/h 升高至 156 m^3/h 时,制冷量提高了 4.02%,*COP* 提高了 1.50%。研究结果可为机柜半导体空调设计优化提供参考。

关键词:半导体制冷;机柜空调;量热计法;制冷性能

中图分类号:TB663;TB657.2　　**文献标志码:**A

Experimental study on refrigeration performance of new cabinet semiconductor air conditioning

LIU Lijun[1,2],SHENG Jian[1,2],ZHANG Hua[1,2],XU Guanlu[1]

(1.School of Energy and Power Engineering,University of Shanghai for Science and Technology,Shanghai 200093,China;
2.Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering,Shanghai 200093,China)

Abstract: An integrated semiconductor air conditioner for electrical cabinet is designed, and the effects of input current (6~11 A), ambient temperature (20~35 ℃), temperature difference between inside and outside the cabinet (0~40 ℃) and air volume at the hot end on the refrigeration performance of the cabinet semiconductor air conditioner are studied by using the calibrated room calorimeter method. The experimental results indicate that when the ambient temperature is 26 ℃ and the temperature difference between the inside and outside of the box is 20 ℃, the optimal working current of the semiconductor air conditioner is 8 A (36 V), and the refrigeration capacity is the largest (213 W). When the current is 8 A (36 V), with the increase of ambient temperature (20~35 ℃), the cooling capacity and *COP* increase by 13.9% and 11.9%, respectively. With the increase of temperature difference (0~40 ℃) inside and outside the box, the refrigeration capacity and *COP* both increase significantly (108~340 W, 0.38~1.21), and the increase of heat exchange capacity is the main reason for the increase of refrigeration capacity. When the air volume of the hot-end fan is increased from 108.63 m^3/h to 156 m^3/h, the cooling capacity increased by 4.02% and the *COP* increased by 1.50%. It can provide reference for the design optimization of new cabinet semiconductor air conditioning.

Key words: semiconductor refrigeration; cabinet air conditioning; calorimeter method; refrigeration performance

0　引言

随着对通信技术和高性能电子设备的需求增加,电子器件向高功率、高集成度发展。电子器件工作时消耗电能并散发热量,使机柜内部温度上升。研究表明,电子元件工作温度超过 70 ℃时,每升高 2 ℃性能下降 10%[1],直接影响使用寿命和稳定性[2],因此,为机柜设置空调进行降温是其高效运行的重要保障。传统机柜空调采用蒸气压缩制冷循环,存在体积重量较大、结构复杂等问题;机柜半导体空调利用半导体材料的帕尔贴效应制冷,具有结构紧凑、控温准确、无噪声、无运动部件、无制冷剂、价格低廉等优点[3],应用于机柜热管理具有独特优势。

收稿日期: 2024－04－02　**修回日期:** 2024－08－18

基金项目: 上海市 2020 年度“科技创新行动计划”技术标准项目(20DZ2204400)

目前,关于半导体制冷的研究主要围绕结构、工作参数和散热 3 个方面。结构研究主要针对半导体元件臂长、面积、对数等参数[4-5]和多级半导体制冷器[6]。张晓波等[7]提出以半导体元件制冷量 15 W、冷端温度 280 K,制冷效率(*COP*)最大为目标时的几何参数选择图,确定 PN 结对数和热电偶高度与横截面比值的选择范围。牛炳轩等[8]建立了 1 ~ 6 级半导体制冷器多物理场耦合仿真模型,并研究不同驱动电路对制冷性能的影响,发现独立电源和电串联供电时最大制冷温差随级数的增加而增大。工作参数研究主要针对半导体制冷时工作电流、电压和冷热端热阻等。ÇAĞLAR[9]设计的半导体制冷冰箱使用正交试验优化运行条件,确定半导体元件和冷热端风扇的最佳运行电压和环境温度。CHEN 等[10]开发了电梯轿厢半导体制冷空调,以环境温度和冷侧流量为变量,调整输入电流进行性能优化,获得最优制冷系数为 1.24。梁婷[11]将电流和冷热端换热面积配比作为双目标变量,采用共轭梯度法研究半导体的制冷量和 *COP* 综合效益最大的权重系数。CHEN 等[12]采用数值模拟的方法研究了散热器的电流、冷却温差、填充系数和几何尺寸对小空间风冷半导体冷却装置制冷性能的影响。HE 等[13]通过试验研究了半导体制冷片的电压与热 / 冷端散热风扇电压的耦合关系,发现相较冷端风扇电压,热端风扇电压对半导体制冷片最佳工作电压影响更大,随着热端风扇电压的增加,最佳工作电压下 *COP* 不断降低。杨晚生等[14]将通信机柜与半导体制冷装置结合应用,并进行试验分析,结果表明,半导体元件输入功率越大,制冷装置的 *COP* 先增大后减小且散热性能降低。目前,半导体制冷包括风冷散热、水冷散热[15-16]、热管冷却[17-19]等形式。ZHOU 等[20]提出半导体制冷系统冷热端散热器热导率存在最优分配比,以获得系统最大制冷量和 *COP*。当前试验大多针对小型制冷元件,输入功率小,性能表现不明显;而仿真模拟大多忽略接触热阻等影响,换热误差偏大,结论具有局限性。

本文设计了一种可用于机柜温度控制的集成半导体空调,搭建了标定型房间量热计法半导体空调制冷性能测试台,对多种运行工况进行试验,研究输入电流、环境温度、箱内外温差和热端风量对制冷量、*COP* 和冷热端温度的影响,为机柜半导体空调的设计研究提供参考。

1 试验系统

1.1 机柜半导体空调

由于机柜空调服务的对象是电子元件,一般要求电气机柜运行温度不超过 70 ℃[21],随着内部负载电流增大或者增加安装基带处理单元(BBU)、传输类设备后,需要对关键元件快速定向解热,维持运行温度,因此,设计降温迅速的大制冷量机柜半导体空调十分重要。同时,物联网机柜、不间断电源(UPS)、气象设备集成机柜、新能源储能柜等长期处于柜内温度高于环境温度的状态,需研究环境温度、内外温差对空调制冷性能的影响。

新型机柜半导体空调有如下改进:(1)市面商用半导体热电臂对数≤ 127 对(半导体制冷元件 TEC127 制冷量 49.2 W[22]),热电偶对数增加,制冷能力越强[5],本文提高热电臂对数到 680 对,采用 NSHM 封测技术降低焊接空洞率,实现大制冷量和大功率输出[23];(2)热电臂对数增大,散热需求增大,改进半导体结构以减小热阻。传统半导体元件采用氧化铝陶瓷作为基板热界面材料(TIM),陶瓷热阻导致冷热端温差增大。在半导体元件两侧与热端 / 冷端散热器之间都直接采用 1060 铝板作为传热基板,并均匀涂抹导热硅脂,减少两层 TIM,导热热阻变小,有效增强换热[24]。采用高热电臂对数、高导热基板、低接触热阻材料的半导体元件,有效降低接触热阻与冷热端空气层的能量损失,适用于高热量密度的器件散热[25],半导体元件模块化设计可以拼装重组,满足更大制冷量的需求。综上,新型机柜半导体空调主要由半导体制冷元件、热端 / 冷端散热器及风扇、控制模块等组成,其结构如图 1 所示,参数见表 1。半导体制冷元件热电偶臂的截面尺寸为 1.1 mm×1.1 mm,高度为 1.58 mm。300 K 时的主要热电参数:塞贝克系数α_{pn}为 2×10^{-4} V/K,电导率σ为 10^5 S/m,导热系数λ为 1.4 W/(m·K)。

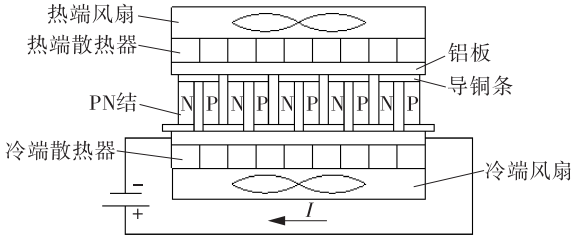


图 1 机柜半导体空调结构示意

Fig.1 Schematic diagram of semiconductor air conditioner structure of cabinet

表 1 机柜半导体空调参数

Tab.1 Cabinet semiconductor air conditioning parameters

项目	参数
半导体元件	TEC680-18A
冷端散热器	240 mm×260 mm×55 mm
热端散热器	240 mm×260 mm×30 mm
冷端风扇	13.68 W，154.7 m^3/h
热端风扇（2 个）	4.08 W，108.63 m^3/h

半导体元件制冷量的计算公式如下：

$$Q_e = n\left[\alpha_{pn} I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K\left(T_h - T_c\right)\right] \quad (1)$$

式中，Q_e 为制冷量，W；n 为 PN 结对数；α_{pn} 为塞贝克系数，V/K；I 为输入电流，A；T_c 为冷端温度，K；R 为电阻，Ω；K 为总导热系数，W/K；T_h 为热端温度，K。

半导体元件输入功率的计算公式如下：

$$P_e = n\left[\alpha_{pn} I\left(T_h - T_c\right) + I^2 R\right] \quad (2)$$

式中，P_e 为输入功率，W。

1.2 试验台

机柜半导体空调制冷性能测试台主要由标准测试箱、机柜半导体空调、电源、测量系统和环境测试房组成，试验原理如图 2 所示。标准测试箱采用铝箔面聚氨酯保温板拼接密封，尺寸为 720 mm×900 mm×740 mm，壁厚为 40 mm，侧壁下方位置设 424 mm×240 mm 的矩形开口以放置待测半导体空调，内部设有额定电压 220 V、额定功率 1.5 kW 的不锈钢翅片电热管和额定电压 220 V、额定功率 30 W 的风扇，测试箱由支架架空放置在环境测试房内。

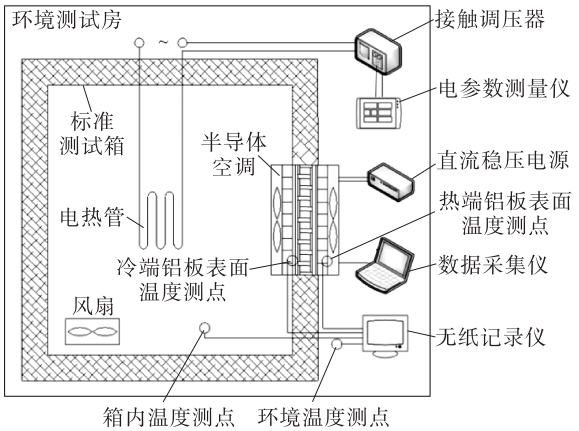


图 2 机柜半导体空调试验原理

Fig.2 Experimental schematic diagram of cabinet semiconductor air conditioning

1.3 试验方法

制冷量测量方法：依据 YD/T 2768—2014《通信户外机房用温控设备》和 GB/T 7725—2022《房间空气调节器》中的标定型房间量热计法测量制冷量，即测试箱温度稳定时，空调制冷量等于箱内电热管加热量与测试箱向环境的漏热量之和。漏热量测量方法：关闭半导体空调，调节电热管加热功率，使测试箱温度稳定，此时电热管的功率等于漏热量。箱内外温差 ΔT 为 10，20，30，40 ℃时，对应的漏热量分别为 20，40，56，85 W。

半导体空调制冷量计算式如下：

$$Q_c = P_h + P_l \quad (3)$$

式中，Q_c 为制冷量，W；P_h 为电热管的输入功率，W；P_l 为箱体漏热量，W。

半导体空调制冷效率（COP）为输出制冷量与输入功率之比，COP 计算式如下：

$$COP = \frac{Q_c}{P_c} = \frac{P_h + P_l}{UI} \quad (4)$$

式中，COP 为制冷系数；P_c 为输入功率，W；U 为输入电压，V。

采用 PT100 温度传感器测量测试箱箱内温度、环境温度及半导体冷 / 热端铝板表面温度，并采集各测点温度；采用接触调压器调节电热管的功率，并通过电参数综合测量仪实时测量。在试验工况达到稳定状态 1 h 后，每间隔 5 min 记录一次试验数据。

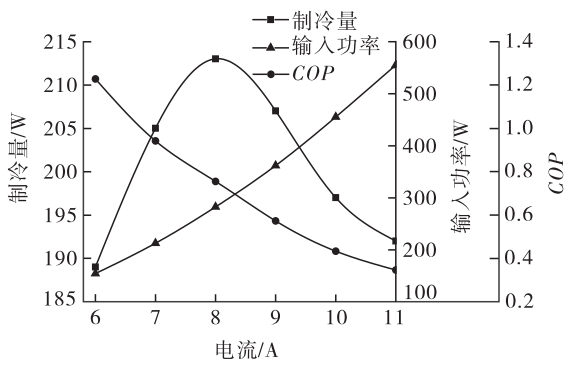
根据半导体空调的实际运行环境，研究机柜半导体空调在不同输入电流（6~11 A）、环境温度（20~35 ℃）、箱内外温差（0~40 ℃）和热端风量（117.8，156 m^3/h）条件下的制冷性能。

2 试验结果与分析

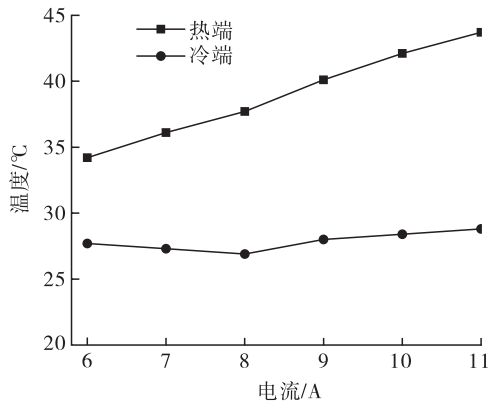
2.1 输入电流对制冷性能的影响

由式（1）可知，制冷量 Q_e 是电流 I 开口向下的抛物线函数，存在最大制冷量时对应的最佳输入电流。由式（2）可知，输入功率随电流的平方而增加，输入功率过大，会严重影响半导体空调的 COP。因此，测试了环境温度为 26 ℃，箱内外温差为 20 ℃时不同输入电流对半导体空调制冷性能的影响。由图 3（a）可知，随着电流的升高，输入功率逐渐增大，制冷量先升高后降低，COP 逐渐减小，与式（1）和式（2）的规律一致。电流 6 A（26 V）时，COP 最高，但制冷量过小；电流 8 A（36 V）时，

制冷量达到最大值 213 W，制冷量提高了 11.2%，半导体输入功率为 288 W。因此，根据实际机柜散热需求，当夏季需要较大的制冷量时，应根据半导体空调最大制冷量调节输入电流[26-28]；当散热负荷较小时，应根据半导体空调最大 *COP* 调节输入电流。



（a）制冷量、输入功率、*COP* 特性



（b）冷、热端温度特性

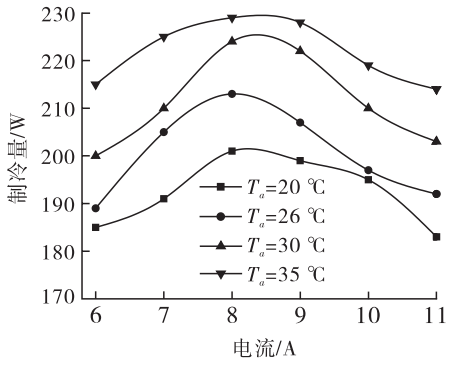
图 3 输入电流对半导体空调制冷性能的影响

Fig.3 Influence of input current on refrigeration performance of semiconductor air condition

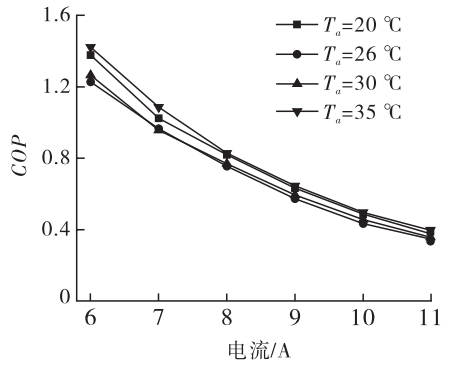
由图 3（b）可见，热端温度随电流不断升高，而冷端温度先降后升。热端散热量随输入电流升高而增大，而环境温度及热端风扇风量不变，因此，热端温度不断升高。冷端温度随电流增大而降低，是因为半导体帕尔贴效应产生的制冷量大于焦耳效应产生的热量；电流继续增大，焦耳效应产生的热量及热端温度攀升而向冷端的导热量增大，使冷端温度上升。最大制冷量时电流 8 A（36 V）为半导体空调最佳工作电流，因此，适当增大电流可以提高半导体空调制冷量，过度增大电流会导致半导体元件温度过高，降低空调制冷性能。

2.2 环境温度对制冷性能的影响

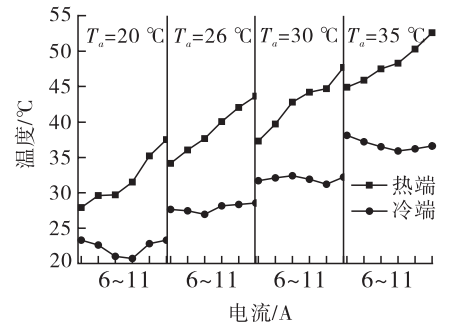
机柜半导体空调需要在恶劣环境下高效稳定运行，测试了不同环境温度下的制冷性能。图 4 示出箱内外温差 20 ℃，输入电流 6 ~ 11 A 时，不同环境温度 T_a 对制冷性能的影响。随着环境温度的升高，制冷量和 *COP* 均增大，冷、热端温度也随之升高，冷、热端温差基本不变。例如，电流为 8 A 时，环境温度从 20 ℃升至 26，30，35 ℃，由图 4（a）（b）可知，制冷量分别提高了 6.0%，5.2%，3.2%，*COP* 分别提高了 0.01，0.02，0.06；由图 4（c）可知，热端温度分别提高了 7.8，5.1，5.3 ℃，冷端温度分别提高了 6.0，4.9，5.4 ℃，冷、热端温差分别提高了 1.7，0.3，0.5 ℃。



（a）制冷量特性



（b）*COP* 特性



（c）冷、热端温度特性

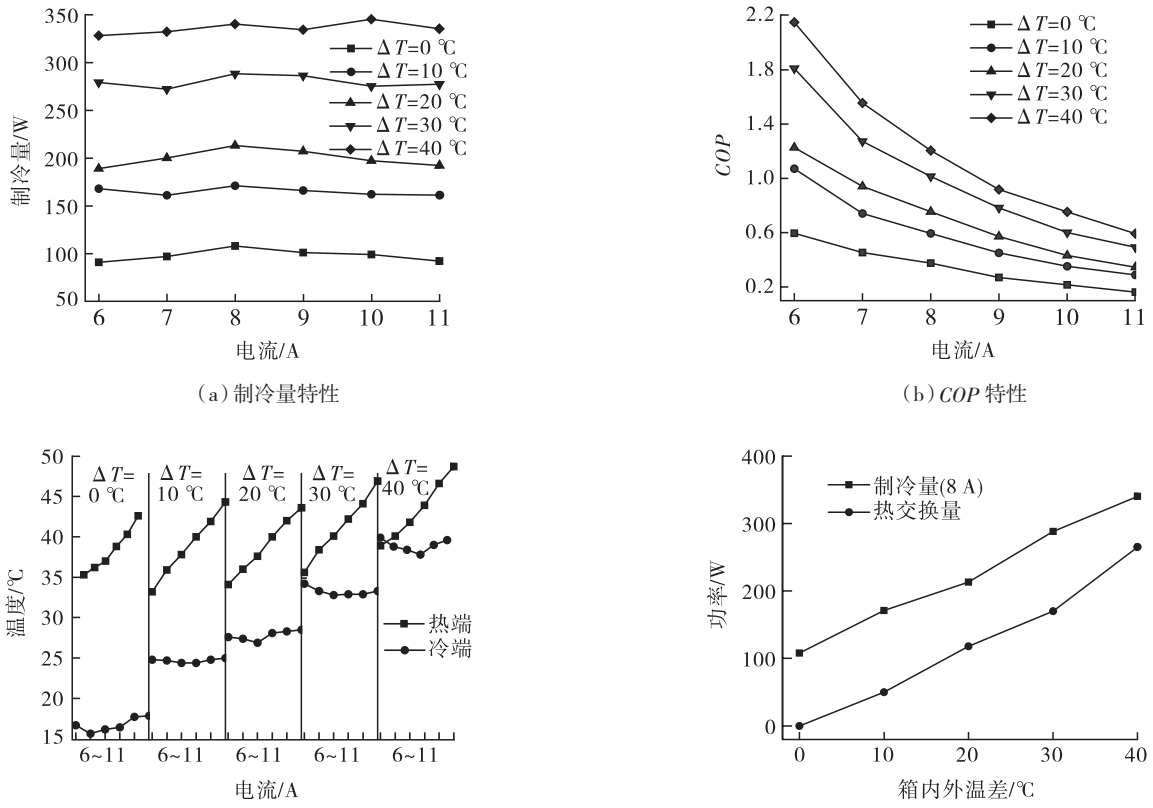
图 4 环境温度对半导体空调制冷性能的影响

Fig.4 Influence of ambient temperature on refrigeration performance of semiconductor air condition

当环境温度升高，箱内外温差不变时，箱内温度也升高，导致冷、热端温度同时上升。由式（1）可知，冷热端温差越小，则半导体傅里叶导热和塞贝克效应的电势越小；冷端温度越高，则半导体帕尔贴效应产生的制冷量越大，使空调制冷量和 *COP* 均增大。

2.3 箱内外温差对制冷性能的影响

由于机柜散热时，机柜内温度高于环境温度，存在内外温差，因此，对不同温差下空调的制冷性能进行研究。图 5 示出环境温度 26 ℃，输入电流 6~11 A 时，不同箱内外温差 ΔT 对半导体空调制冷性能的影响。如图 5（a）（b）所示，箱内外温差越大，制冷量越大，*COP* 也不断上升。例如：电流为 8 A 时，箱内外温差由 0 ℃升至 40 ℃时，制冷量的增幅分别为 58.3%，31.0%，28.6%，18.1%，*COP* 的增幅分别为 57.9%，26.9%，34.4%，18.8%，表明箱内外温差增大时，制冷量和 *COP* 增幅趋缓，ΔT 影响效果逐渐减小。由图 5（c）可以看出，环境温度不变，箱内温度增加时，随着温差的增大，热端温度缓慢增加，冷端温度显著升高，冷、热端温差变小，由式（1）可知，半导体空调制冷量增大。



（a）制冷量特性　（b）*COP* 特性

（c）冷、热端温度特性　（d）空调制冷量与热交换量对比

图 5　箱内外温差对半导体空调制冷性能的影响

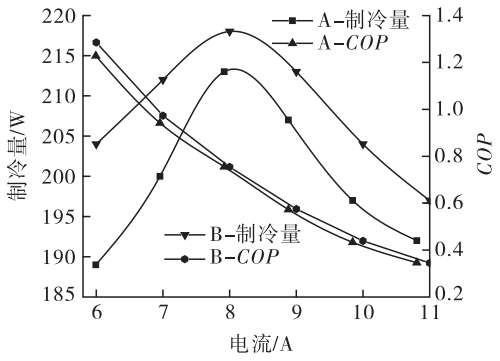
Fig.5　Influence of temperature difference inside and outside that box on refrigeration performance of semiconductor air condition

对半导体空调制冷量进行进一步研究，即半导体制冷断电而仅对冷热端风扇供电，进行不同箱内外温差下热交换模式的换热量测量。如图 5（d）所示，随着箱内外温差增大，热交换的热量占半导体空调制冷量比例也不断增大，当箱内外温差由 0 ℃升至 40 ℃时，风扇热交换的热量占比分别为 0%，29.2%，55.4%，59.0%，77.9%。表明半导体空调制冷量增加的主要原因是热端散热能力的提升。箱内温度升高，使半导体热端温度与环境温度温差变大，对流换热量提高，增强了热端散热能力，半导体空调制冷量和 *COP* 都因此增大。

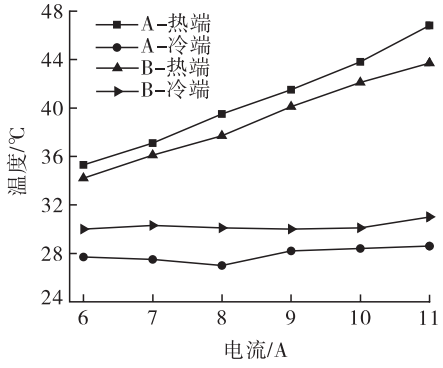
2.4 热端风扇风量对制冷性能的影响

图 6 示出环境温度为 26 ℃，箱内外温差为 20 ℃时不同热端风扇风量对半导体空调制冷性能的影响。热端风扇分别选用风扇 A（风量为 108.63 m^3/h）和风扇 B（风量为 156 m^3/h）。在不同输入电流下，风扇 B 的制冷量和 *COP* 均大于风扇 A，制冷量平均提高了 4.02%，*COP* 平均提高了 1.50%；热端温度平均降低了 1.68 ℃，冷端温度平均升高了 2.35 ℃，冷、热端温差平均降低了 3.7 ℃。

热端风扇功耗增大了 19.2 W。



(a) 制冷量、*COP* 特性



(b) 冷、热端温度特性

图 6 热端风扇风量对半导体空调制冷性能的影响

Fig.6 Influence of air volume of hot-end fan on refrigeration performance of semiconductor air condition

热端风扇风量越大，即风速越大，雷诺数增大，流体的扰动增强，强化了对流换热，使热端温度和冷、热端温差降低，进而导致冷、热端之间的导热量减小，制冷量提高。

3 结论

(1) 随着输入电流增大，半导体空调输入功率不断增大，制冷量先增大后减小，*COP* 逐渐减小，制冷量在电流 8 A (36 V) 时达到最大值。

(2) 箱内外温差不变的情况下，随着环境温度从 20 ℃升高至 35 ℃时，由于半导体冷端温度升高，制冷量也提高。例如，电流为 8 A 时，制冷量提高了 13.9%，*COP* 提高了 11.9%。

(3) 环境温度不变的情况下，随着箱内外温差从 0 ℃升高至 40 ℃时，热交换量提高，半导体冷、热端温差变小，增强了热端散热能力，半导体空调制冷量增大，*COP* 随之增大。

(4) 增大热端风扇风量，降低了半导体冷、热端温差，从而提高了空调制冷性能。风扇的风量从 108.6 m^3/h 升高至 156 m^3/h 时，半导体空调制冷量平均提高了 4.02%，*COP* 平均提高了 1.50%。

新型机柜半导体空调在输入电流 8 A、环境温度 26 ℃、箱内外温差 20 ℃的条件下，制冷量达到 213 W，*COP* 达到 0.75，冷、热端温差达到 10.7 ℃，*COP* 提高约 1.6 倍[29-30]。相对而言，箱内外温差的变化对空调制冷量和 *COP* 的影响更显著。因为机柜在不同季节散热需求差异较大，通过试验研究机柜空调制冷特性，可以更准确地编制自控程序，调节输入电流大小及冷却温度设定值等，避免 “过度冷却” 问题，为机柜提供稳定的工作环境。

参考文献：

[1] CUI H, ZHANG Q, BO Y, et al. Flexible microfluidic electrocaloric cooling capillary tube with giant specific device cooling power density [J]. Joule, 2022, 6(1): 258 – 268.

[2] 李广义，张俊洪，高键鑫. 大功率电力电子器件散热研究综述 [J]. 兵器装备工程学报，2020，41(11)：8 – 14.
LI G Y, ZHANG J H, GAO J X. Review on heat dissipation of high power electronic devices [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(11): 8 – 14.

[3] ZHAO D, TAN G. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1/2): 15 – 24.

[4] CAI Y, LIU D, ZHAO F Y, et al. Performance analysis and assessment of thermoelectric micro cooler for electronic devices [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 203 – 211.

[5] 李爱博，陈焕新，申利梅，等. 结构与性能参数对单级半导体制冷器性能影响的数值分析 [J]. 流体机械，2011，39(2)：72 – 76.
LI A B, CHEN H X, SHEN L M, et al. Numerical analysis of single-stage thermoelectric cooler performance by changing structure and performance parameters [J]. Fluid Machinery, 2011, 39(2): 72 – 76.

[6] 孙悦桐，孟凡凯，周林，等. 空冷式多级热电制冷器性能综合分析 [J]. 上海交通大学学报，2024，58(3)：371 – 381.
SUN Y T, MENG F K, ZHOU L, et al. Comprehensive performance analysis of air-cooled multi-stage thermoelectric refrigerator [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(3): 371 – 381.

[7] 张晓波，徐象国. 多目标约束下半导体制冷片几何

结构参数的优化设计[J]. 制冷学报,2018,39(3):22 – 30.
ZHANG X B,XU X G.Optimal design of geometric structure parameters of semiconductor refrigeration sheet under multi-objective constraints[J].Journal of Refrigeration,2018,39(3):22 – 30.

[8] 牛炳轩,刘志杰,刘泽宇,等. 多级热电制冷器的制冷性能及主要影响因素分析[J]. 制冷学报,2023,44(2):78 – 85.
NIU B X,LIU Z J,LIU Z Y,et al.Analysis of refrigeration performance and main influencing factors of multi-stage thermoelectric coolers[J].Journal of Refrigeration,2023,44(2):78 – 85.

[9] ÇAĞLAR A.Optimization of operational conditions for a thermoelectric refrigerator and its performance analysis at optimum conditions[J].International Journal of Refrigeration,2018,96:70 – 77.

[10] CHEN C,MAO L,LIN T,et al.Performance testing and optimization of a thermoelectric elevator car air conditioner[J].Case Studies in Thermal Engineering,2020,19:100616.

[11] 梁婷. 热电制冷器的双目标优化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
LIANG T.Research on bi-objective optimization of thermoelectric cooler[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2017.

[12] CHEN L G,MENG F K,XIE Z H,et al.Thermodynamic modeling and analysis of an air-cooled small space thermoelectric cooler[J].The European Physical Journal Plus,2020,135(1):80.

[13] HE Y,CAO C,WU J,et al.Investigations on coupling between performance and external operational conditions for a semiconductor refrigeration system[J].International Journal of Refrigeration,2020,109:172 – 179.

[14] 杨晚生,陈世林,毕崟. 通信机柜半导体制冷装置的性能测试[J]. 制冷学报,2017,38(5):82 – 92.
YANG W S,CHEN S L,BI Y.Performance test of semiconductor refrigeration device in communication cabinet[J].Journal of Refrigeration,2017,38(5):82 – 92.

[15] JIANG F,MENG F,CHEN L,et al.Thermodynamic analysis and experimental research of water-cooled small space thermoelectric air-conditioner[J].Journal of Thermal Science,2022,31(2):390 – 406.

[16] 姜坪,魏晓雯,穆宜轩. 基于蒸发冷却的半导体制冷装置制冷性能研究[J]. 低温工程,2021(2):47 – 51.
JIANG P,WEI X W,MU Y X.Study on refrigeration performance of semiconductor refrigeration device based on evaporative cooling[J].Cryogenic Engineering,2021(2):47 – 51.

[17] 王振雨. 微小空间半导体制冷器的强化传热研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
WANG Z Y.Study on heat transfer enhancement of semiconductor refrigerator in small space[D].Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2018.

[18] ABDEREZZAK B,DREEPAUL R K,BUSAWON K,et al.Experimental characterization of a novel configuration of thermoelectric refrigerator with integrated finned heat pipes[J].International Journal of Refrigeration,2021,131:157 – 167.

[19] 黄双福,林春深,黄金耀,等. 半导体制冷系统热端散热试验研究[J]. 流体机械,2021,49(2):77 – 83.
HUANG S F,LIN C S,HUANG J Y,et al.Experimental study on heat dissipation at the hot end of semiconductor refrigeration system[J].Fluid Machinery,2021,49(2):77 – 83.

[20] ZHOU Y,YU J.Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices[J].International Journal of Refrigeration,2012,35(4):1139 – 1144.

[21] 中华人民共和国工业和信息化部. 通信系统用户外机柜:YD/T 1537—2015[S]. 北京:人民邮电出版社,2015.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China.User external cabinet of communication system:YD/T 1537—2015[S].Beijing:People's Posts and Telecommunications Press,2015.

[22] 王子成,蔡兰兰,高鹏,等. 热电制冷强化风冷散热模块的工作特性分析[J]. 制冷学报,2020,41(2):48 – 55.
WANG Z C,CAI L L,GAO P,et al.Analysis of working characteristics of air-cooled cooling module for thermoelectric refrigeration[J].Journal of Refrigeration,2020,41(2):48 – 55.

[23] SHITTU S,LI G Q,ZHAO X D,et al.Review of thermoelectric geometry and structure optimization for performance enhancement[J].Applied Energy,2020,268:115075.

[24] 王天伦,秦文波,黄飞,等. 热界面材料可靠性能研究进展[J]. 高分子材料科学与工程,2022,38(7):183 – 190.
WANG T L,QIN W B,HUANG F,et al.Research progress of reliability performance in thermal interface materials[J].Polymer Materials Science and

Engineering,2022,38(7):183 – 190.
[25] 胡浩茫.基于帕尔贴效应的热电器件能量输运过程及其热设计研究[D].上海:上海交通大学,2020.
HU H M.Study on energy transport process and thermal design of thermoelectric devices based on Peltier effect [D].Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2020.
[26] 李晓,孙宝红,彭庆龙.半导体空调的理论研究与性能分析[J].制冷与空调(四川),2013,27(2):110 – 113.
LI X,SUN B H,PENG Q L.Theoretical research and performance analysis of semiconductor air conditioning [J].Refrigeration and Air Conditioning(Sichuan),2013,27(2):110 – 113.
[27] 吴小华,魏闻天,宋衍昌,等.人工冰场用跨临界CO_2并联压缩制冷试验研究[J].流体机械,2023,51(12):16 – 22.
WU X H,WEI W T,SONG Y C,et al.Experimental research on performance of transcritical CO_2 parallel compression refrigeration system applied to artificial ice rink[J].Fluid Machinery,2023,51(12):16 – 22.
[28] 陈雪辉,张志远,李昊,等.一种非对称异步排气涡旋压缩机的数值模拟研究[J].机电工程,2023,40(9):1433 – 1440.
CHEN X H,ZHANG Z Y,LI H,et al.Numerical simulation of an asymmetric asynchronous exhaust scroll compressor[J].Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2023,40(9):1433 – 1440.
[29] SASIDHARAN M,SABRI M F M,HATTA S F W M,et al.A review on the progress and development of thermoelectric air conditioning system[J].International Journal of Green Energy,2024,21(2):283 – 299.
[30] 徐淑鹏.基于热电制冷的医用试剂仓研制与热端强化传热研究[D].重庆:重庆大学,2017.
XU S P. Study of thermoelectric cooling-based medical reagent storehouse and heat transfer enhancement of the hot side[D].Chongqing:Chongqing University,2017.

作者简介:刘丽君(1997),女,硕士研究生,主要从事制冷技术、制冷空调节能研究,E – mail:llj6190203@163.com。
通信作者:盛健(1985),男,高级实验师,主要从事特种制冷与空调系统研究,通信地址:200093 上海市军工路 516 号上海理工大学能源与动力工程学院,E – mail:sjhvac@usst.edu.cn。

本文引用格式:
刘丽君,盛健,张华,等.新型机柜半导体空调制冷性能试验研究[J].流体机械,2025,53(1):17 – 24.
LIU L J,SHENG J,ZHANG H,et al.Experimental study on refrigeration performance of new cabinet semiconductor air conditioning[J].Fluid Machinery,2025,53(1):17 – 24.

(上接第 16 页)

[22] 宋嘉梁,陈健,赵锐,等.超临界压力下CO_2在旋流通道内对流换热试验研究[J].压力容器,2021,38(11):9 – 17.
SONG J L,CHEN J,ZHAO R,et al. Experimental investigation on convection heat transfer of CO_2 at supercritical pressures in helically coiled tube [J].Pressure Vessel Technology,2021,38(11):9 – 17.
[23] 王珂,刘云书,陈卫杰,等.导流型高温板式换热器的流动与传热特性分析[J].压力容器,2024,41(2):7 – 16.
WANG K,LIU Y S,CHEN W J,et al. Analysis on flow and heat transfer characteristics of high-temperature plate heat exchanger with a deflector[J].Pressure Vessel Technology,2024,41(2):7 – 16.
[24] 陈林,马爽,张晓慧,等.低温混合工质大质流密度流动传热试验系统[J].流体机械,2023,51(11):15 – 21.
CHEN L,MA S,ZHANG X H,et al.Experimental system for flow and heat transfer of low temperature mixed refrigerant with high mass flow density[J].Fluid Machinery,2023,51(11):15 – 21.
[25] 陶文铨.传热学[M].第五版.北京:高等教育出版社,2019.
TAO W Q.Heat transfer[M].Edition 5.Beijing:Higher Education Press,2019.
[26] 刘纪福,兰凤江,宋坤,等.液化天然气汽化器设计与冷能利用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2020.
LIU J F,LAN F J,SONG K,et al.Design and cold energy utilization of LNG vaporizer[M].Harbin:Harbin Institute of Technology Press,2020.

作者简介:周兵(1986),男,高级工程师,主要从事传热技术与装备、工程发展战略等方面研究工作,通信地址:230031 安徽省合肥市长江西路 888 号合肥通用机械研究院有限公司,E – mail:ftmqq@163.com。

本文引用格式:
周兵,陈永东,王严冬,等.中间介质汽化器超临界传热试验技术研究[J].流体机械,2025,53(1):10 – 16.
ZHOU B,CHEN Y D,WANG Y D,et al.Study on the intermediate fluid vaporizer supercritical heat transfer test system[J].Fluid Machinery,2025,53(1):10 – 16.