

不同热端温度对低温热电制冷试验箱 制冷性能的影响

周颖¹, 王子龙¹, 张华¹, 杨斌¹, 田子傲², 胡常青³

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;
3. 上海铂世光半导体科技有限公司, 上海 201700)

摘要: 为优化低温热电制冷试验箱的制冷效率及降低其冷热端温差, 理论计算了热电制冷片热端温度为 56.18 °C 和 27.31 °C 时电流、电压、冷热端温差对试验箱制冷性能的影响。建立了三维数学传热模型, 模拟了 3 种热电制冷片布置方式对制冷箱温度分布的影响。结果表明: 当热端温度由 56.18 °C 降至 27.31 °C 时, 低温热电制冷试验箱的制冷量由 150.2 W 降至 139.5 W, 制冷系数由 4.41 降至 3.09, 冷凝温度由 -22.30 °C 降至 -41.90 °C。可见, 热电制冷片热端温度的降低能够获得更低的冷凝温度, 较高的热端温度拥有较好的制冷性能。

关键词: 热电制冷系统; 热端温度; 制冷性能; 优化; 数值模拟

中图分类号: TB 61 **文献标志码:** A

Effect of different hot end temperatures on the refrigeration performance of low temperature thermoelectric refrigeration test box

ZHOU Ying¹, WANG Zilong¹, ZHANG Hua¹, YANG Bin¹, TIAN Ziao², HU Changqing³

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
3. Shanghai Worldiray Semiconductor Technology Co., Ltd., Shanghai 201700, China)

Abstract: In order to optimize the refrigeration efficiency and reduce the temperature difference between the cold and hot ends of the low temperature thermoelectric refrigeration test box, the effects of current, voltage and temperature difference on the refrigeration performance were calculated theoretically under the hot end temperature at 56.18 °C and 27.31 °C. Three-dimensional mathematical heat transfer model was set up, and the effect of three kinds of thermoelectric cooler layout on the temperature distribution in refrigeration box was simulated. The results show that when the hot end temperature declines from 56.18 °C to 27.31 °C, the refrigerating capacity decreases from 150.2 W to 139.5 W, the refrigerating coefficient decreases from 4.41 to 3.09, and the condensing temperature

收稿日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876130); 上海市自然科学基金资助项目(20ZR1438600); 上海市教委青年东方学者项目(1018301008)

第一作者: 周颖(1998-), 女, 硕士研究生。研究方向: 热电制冷系统的优化。E-mail: zy0353@163.com

通信作者: 王子龙(1984-), 男, 副教授。研究方向: 制冷空调及相变蓄热技术。E-mail: wzl@usst.edu.cn

decreases from -22.30°C to -41.90°C . In addition, the theoretical results prove that the reduction of the hot end temperature of thermoelectric cooler can produce lower condensing temperature, and the higher hot end temperature has better refrigeration performance.

Keywords: thermoelectric refrigeration systems; hot end temperature; refrigeration performance; optimization; numerical simulation

热电制冷技术因无需制冷工质、制冷设备体积小、噪音低、冷热端调控灵活、易于实现恒温控制等优点而广泛应用于低温热电制冷箱中^[1-3],但其较低的制冷效率和制冷时存在较大的冷热端温差严重影响了该技术进一步的发展应用。因此,如何提高热电制冷系统的制冷效率和降低冷热端温差成为了研究重点^[4-5]。

黄双福等^[6]对比了有无热管散热对热电制冷片制冷性能的影响,实验结果表明:制冷片在无热管散热条件下冷端温度为 -3.1°C ;在有热管散热条件下冷端温度为 -7.5°C ,降低了 4.4°C 。Alghanima等^[7]研究了热电制冷片的冷端散热条件对制冷性能的影响,结果表明,风扇转速为 200 r/min 时的制冷系数较 500 r/min 时提高了 20% 。王成刚等^[8]数值计算了不同散热结构下冷藏箱的性能,结果表明,通过增加散热器底板厚度,冷藏箱整体降温 2°C 左右。Astrain等^[9]利用热虹吸效应强化了热电制冷片的热端散热来提高热电制冷系统的制冷系数,结果表明,热虹吸效应的热阻比常规翅片换热器的减少了 36% ,制冷系数提高了 32% 。Mirmanto等^[10]研究了热电片的不同位置布局(顶部、底部和壁面)对热电制冷系统制冷性能的影响,证实了热电制冷片的最佳放置位置为箱体侧壁面。邱兰兰等^[11]对比了热端风冷散热和水冷散热对半导体制冷箱的温度影响,当环境温度为 30°C ,风冷散热的箱内平均温度为 6°C ,水冷散热的箱内平均温度为 -2°C 。

综上所述,目前对于热电制冷技术的研究主要集中在不同热端散热方式上,而对电路中电流、电压等热电参数对制冷效率和冷热端温差的影响研究并不充分。基于此,本文理论计算了当热电制冷片热端温度为 27.31°C 和 56.18°C 时,不同电流和电压下低温热电制冷试验箱的制冷量、冷热端温差和制冷系数。该计算结果可为提高热电制冷系统的制冷效率提供理论参考。

1 系统介绍及计算方法

1.1 热电制冷原理

热电制冷片的工作原理主要应用了半导体热电偶的珀尔帖效应(Peltier effect)^[12]。当直流电通过两根不同金属丝组成的闭合回路后,其中一个接头变热,另一个接头变冷,两个结点处分别发生吸、放热现象。如图 1 所示,当直流电通过由 P 型和 N 型半导体材料组成的热电偶时,在珀尔帖效应的作用下,电流方向为 $\text{N}\rightarrow\text{P}$ 的热电偶结点吸收热量导致其顶部端面温度降低从而形成冷端,而电流方向为 $\text{P}\rightarrow\text{N}$ 的热电偶结点吸收来自冷端的热量并向周围散热,即为热端。半导体的冷端和热端主要由直流电的电流方向决定,冷端与热端吸收和释放能量的大小主要取决于电路中的温差电效应的强弱。

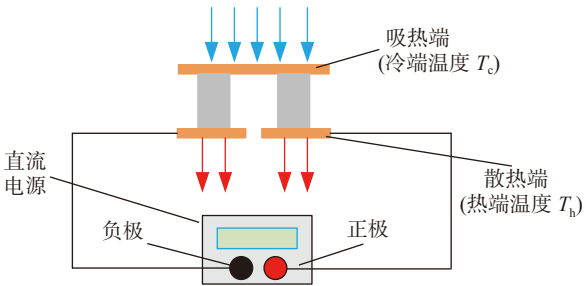


图 1 热电制冷原理图
Fig.1 Schematic diagram of thermoelectric refrigeration

此外,热电制冷片在工作时不仅受珀尔帖效应的影响,同时汤姆逊效应、焦耳热效应和傅立叶导热效应也会对热电制冷片产生作用,其中焦耳热效应和傅里叶导热效应对热电制冷系统的影响不可忽略,而汤姆逊效应作为二级效应,其产生的汤姆逊热较小,通常可以忽略不计。

1.2 理论计算方法

为研究热电制冷片在不同热端温度下对低温热电制冷试验箱性能的影响,本文理论计算了电流、电压和冷热端的温差对制冷系统的制冷量、制冷系数等的影响。具体数值计算方法如下。

热电制冷片在电流为 I 时，单位时间的制冷量 Q_c 为

$$Q_c = S I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T = S \frac{U_R}{R} T_c - \frac{1}{2} \frac{U_R^2}{R} - K \Delta T \tag{1}$$

式中： I 为电流； S 为温差电动势； T_c 为制冷片的冷端温度； R 为热电偶对的总热阻； K 为制冷片的传热系数； ΔT 为热电制冷片热端与冷端的温度差， $\Delta T = T_h - T_c$ ； U_R 为热电制冷片两侧的电压。

基于文献^[13]的研究，本文定义热电制冷片的热电参数 S 、 R 和 K 的计算公式如下：

$$S = \frac{U_{\max}}{T_h} \tag{2}$$

$$K = \frac{(T_h - \Delta T_{\max}) U_{\max} I_{\max}}{2 T_h \Delta T_{\max}} \tag{3}$$

$$R = \frac{(T_h - \Delta T_{\max}) U_{\max}}{T_h I_{\max}} \tag{4}$$

式中： $U_{\max}$ 、 $I_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 为此热端温度下的最大电压、最大电流和最大温差，其数值由厂家直接给出。

直流电源加载的电路电压 U 一部分用来克服热电偶电阻产生的压降 U_R ，另一部分用来克服塞贝克效应 U_{PN} 。因此，定义电压与温差的计算公式为

$$U = U_R + U_{PN} = IR + S \Delta T \tag{5}$$

热电制冷片在工作时所需的功率由直流电源提供。因此，热电制冷片消耗的功率为

$$P = UI \tag{6}$$

低温热电制冷试验箱的制冷系数(coefficient of performance, COP)定义为

$$COP = \frac{Q_c}{P} \tag{7}$$

1.3 理论计算误差分析

采用 Thermonamic Electronics(江西) Co., Ltd. 提供的热电制冷片，其热电参数的误差为 $\pm 1\%$ 。测量设备的型号及精度如表 1 所示。

基于 Boomsma 等^[14]的误差分析方法，理论误差计算如下^[15-16]。

1.3.1 温差电动势的计算误差

热电制冷片温差电动势 S 的计算误差主要来自 $U_{\max}$ 和 T_h ，误差分析中的相关参数可总结成方程式 $S = f(U_{\max}, T_h)$ 。

制冷片热端温度的计算误差为

$$\frac{\delta T_h}{T_h} = \frac{0.15}{56.18} = 0.27\% \tag{8}$$

表 1 测量设备基本参数

Tab.1 Parameters of measurement supplies

设备名称	型号	测量精度/误差
测温装置	Pt100	± 0.15 K
数据采集仪	Agilent34970A	$\pm 0.0004\%$
直流电源	HY3005MT	$\pm 0.2\%$
热电制冷片	TEC1-12714-T100-NS-TF00-ALO	$\pm 1\%$

式中，0.15 为测温装置 Pt100 的测量误差值，数值 56.18 为热电制冷片的最大热端温度。

热电制冷片温差电动势 S 的计算误差为

$$\frac{\delta S}{S} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_h}{T_h}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_{\max}}{U_{\max}}\right)^2} = \sqrt{(0.27\%)^2 + (1\%)^2} = 0.28\% \tag{9}$$

1.3.2 导热系数和总热阻的计算误差

热电制冷片的导热系数 K 和总电阻 R 的计算误差主要来自 $U_{\max}$ 、 $I_{\max}$ 、 $\Delta T_{\max}$ 和 T_h ，误差分析中的相关参数可总结成方程式 $K \& R = f(U_{\max}, I_{\max}, \Delta T_{\max}, T_h)$ 。 K 和 R 的计算误差为

$$\frac{\delta K \& R}{K \& R} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_h}{T_h}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_{\max}}{U_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\delta I_{\max}}{I_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T_{\max}}{\Delta T_{\max}}\right)^2} = \sqrt{(0.27\%)^2 + (1\%)^2 + (1\%)^2 + (1\%)^2} = 1.75\% \tag{10}$$

1.3.3 制冷量的计算误差

制冷量 Q_c 的计算误差主要来自 S 、 K 、 R 和 ΔT ，误差分析中的相关参数可总结成方程式 $Q_c = f(S, K, R, \Delta T)$ 。 Q_c 的计算误差为

$$\frac{\delta Q_c}{Q_c} = \sqrt{\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2} = \sqrt{(0.28\%)^2 + (1.75\%)^2 + (1.75\%)^2 + (0.31\%)^2} = 2.51\% \tag{11}$$

1.3.4 制冷系数 COP 的计算误差

低温热电制冷试验箱的制冷系数 COP 的误差由 Q_c 和 P 组成，误差分析中的相关参数可总结成方程式 $COP = f(Q_c, P)$ 。 COP 的计算误差结果如下。

直流电源加载功率的误差为

$$\frac{\delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I}\right)^2} = \sqrt{(0.2\%)^2 + (0.2\%)^2} = 0.28\% \tag{12}$$

COP 的计算误差为

$$\frac{\delta COP}{COP} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q_c}{Q_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta P}{P}\right)^2} = \sqrt{(2.51\%)^2 + (0.28\%)^2} = 2.53\% \quad (13)$$

2 数值模拟计算

2.1 实验基础

通过理论公式计算了热电制冷片在制冷时的热端散热量, 计算结果可为定制了的管翅式热管(广州同裕电子有限公司生产)提供数据参考。同时, 根据厂家提供的管翅式热管的有效导热系数 $13\,015.64\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 和总对流换热系数 $1840\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, 模拟计算了制冷试验箱中热电制冷片采用热管散

热时其热端温度的分布情况。

2.2 物理模型建立及网格划分

便携式低温热电制冷箱主要由强化传热系统、制冷系统及实验数据采集系统等组成。强化传热系统主要为翅片式热管, 热管的主要参数为 4 mm (半径) $\times 210\text{ mm}$ (长) $\times 4$ 根, 最大散热功率 240 W 。制冷系统主要由直流电源(误差 $\pm 0.2\%$)、热电制冷片 $\times 4$ (TEC1-12714)、导冷铜块、保温材料聚氨酯泡沫塑料及箱体内壁外壳组成。热电制冷片的主体尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 导冷铜块厚 30 mm , 导热硅脂(7762)固定在制冷片与箱体内壁之间, 箱体内壁与外壳中间填充聚氨酯泡沫塑料(厚度 30 mm , 导热系数 $0.002\text{ W/m}\cdot\text{K}$)。基于以上数值参数, 建立低温热电制冷试验箱物理模型并进行网格划分, 如图2所示。

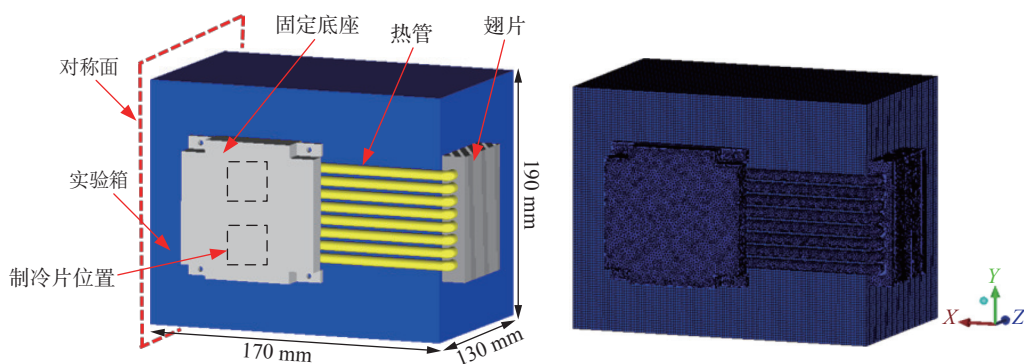


图2 物理模型及网格划分

Fig.2 Physical model and grid division

2.3 控制方程

建立三维数学传热模型, 其控制方程如下:
连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (14)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为流动速度。

动量方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \Gamma \mathbf{u} \quad (15)$$

式中: p 为压强; μ 为空气黏度; Γ 为无量纲数。

能量方程

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho T \cdot \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (16)$$

式中: T 为温度; λ 为导热系数; c_p 为比热容; S_T 为源项。

2.4 计算参数

制冷试验箱中热电制冷片的冷热端边界条件采用第三类边界条件, 管翅式热管的边界条件为第二类边界条件。物理模型的求解方法为隐式非耦合法, 计算模型为 Energy 和层流模型。使用 Simple 算法处理压力和速度场的耦合, 方程的差分格式保持默认。设置连续性和动量方程的收敛标准为 10^{-5} ; 能量方程收敛标准为 10^{-6} , 时间步长为 0.1 s 。

2.5 计算模型可靠性分析

低温热电制冷试验箱内热端温度的实验值与模拟值的对比结果如图3所示。由图可知, 热电制冷片在实验工况与模拟工况下热端温度的均方根误差为 2.92。结果表明, 热端温度的模拟值与实验值吻合较好, 说明本文建立的三维数学传热

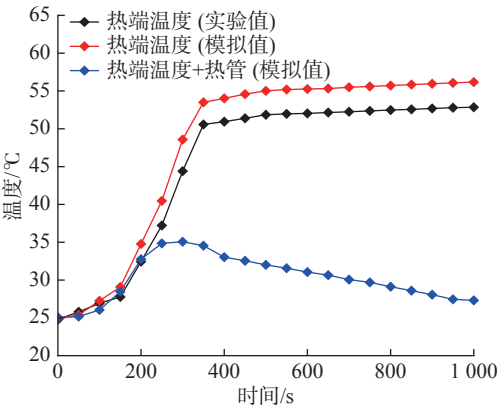


图3 模型可靠验证及热端温度变化

Fig. 3 Model reliability verification and hot end temperature variation

模型能够较好地预测低温热电制冷试验箱内的温度变化。

3 结果与讨论

3.1 热电制冷片的布置方式对制冷试验箱温度的影响

当直流电源运行时间为 960 s 时，热电制冷片的不同布置方式对制冷试验箱体内部温度分布的影响如图 4 所示。由图可知：热电制冷片“口”字型布置下，试验箱中心的平均温度为 8.32 ℃；“日”字型布置下，平均温度为-3.54 ℃；“田”字型布置下，平均温度为-10.18 ℃。与热电制冷片冷端温度-15 ℃相比，分别削减了 23.32，1.48，4.82 ℃，这说明分散式布置方式能够更加高效地将热电制冷片冷端温度传递至箱体内部。此外，图 4(a) 内部的温度梯度为 19.87 ℃，图 4(b)、(c) 内部的温度梯度分别为 6.84 ℃ 和 2.37 ℃。可见，“日”字型和“田”字型的温度梯度较“口”字型的分别降低了 65.58% 和 88.07%，这表明与集中式相比，分散式布置不仅提高了热电制冷片冷端温度向箱体的传递效率，同时也使制冷试验箱内

部的温度分布更加均匀。

3.2 电流对制冷试验箱制冷量的影响

图 5 为不同电流下制冷试验箱的冷热端温差对制冷量的影响。当管翅式散热器未参与热电制冷片热端换热时，此时的热端温度为 56.18 ℃，由图 5(a) 所知，相同温差条件下，制冷试验箱的制冷量随着电流的增大而增大，当电流由 3 A 增至 12 A 时，最大制冷量由 48.54 W 增至 140 W，增加了 91.46 W，这说明电流的增加，提高了热电制冷片的制冷量。然而，随着电流的增加，制冷试验箱的制冷量增加幅度先变大后减小，这是因为在帕尔贴效应下，热电制冷片中电流通过，产生冷量，且电流越大，热电制冷片的制冷量越大，同时焦耳热也越大。当制冷量相同时，制冷试验箱冷热端的最大温差随着电流的增加而增大，当电流分别为 3，6，9，12 A 时，制冷试验箱中冷热端的最大温差分别为 37.36，60.50，73.05，78.52 ℃，最大温差较 3 A 分别提高了 0.62 倍、1.15 倍和 2.10 倍，表明电流越大，制冷试验箱的冷端温度越低。图 5(b) 中热端温度为 27.31 ℃ 中呈现的趋势与图 5(a) 相同。此外，通过观察图 5 还可知，当热端温度由 56.18 ℃ 降至 27.31 ℃ 时，制冷试验箱的最大制冷量由 140 W 降至 130.03 W，减少了 9.97 W，冷热端的最大温差由 78.52 ℃ 降至 69.21 ℃，这说明热端温度越高，热电制冷片的制冷性能越好。然而，较高的热端温度同时也阻碍了热电制冷片冷端温度的变化，当热端温度为 56.18 ℃ 和 27.31 ℃ 时，冷端温度分别为-22.30 ℃ 和-41.90 ℃，这说明了热电制冷片热端温度越低，制冷试验箱中冷端温度也越低。

3.3 电压对热电制冷片冷热端温差的影响

图 6 为制冷试验箱中热电制冷片冷热端温差与电压的变化关系。由图可知，直流电源加载的电压随着温差的增加而增大。当热端温度为 56.18 ℃ 和 27.31 ℃ 时，加载在热电制冷片两端的电压峰

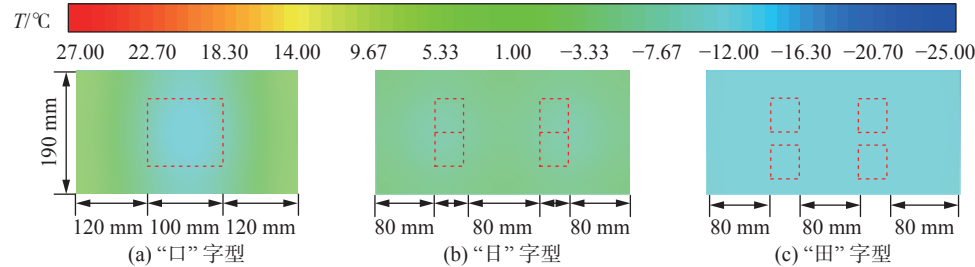


图4 横截面 z=65 mm 时制冷箱体内部温度分布

Fig.4 Temperature distribution in the refrigeration box at z=65 mm on the cross section

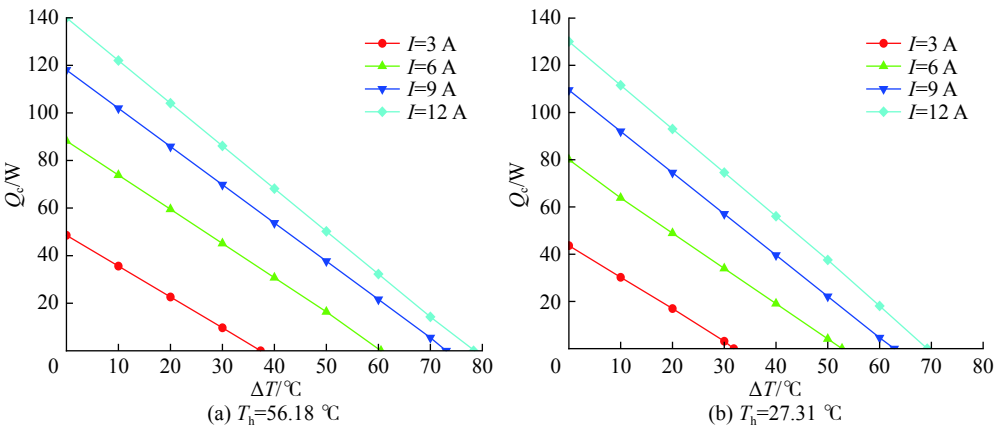


图 5 电流对热电制冷试验箱制冷量的影响

Fig.5 Effect of current on refrigerating capacity of thermoelectric refrigeration test box

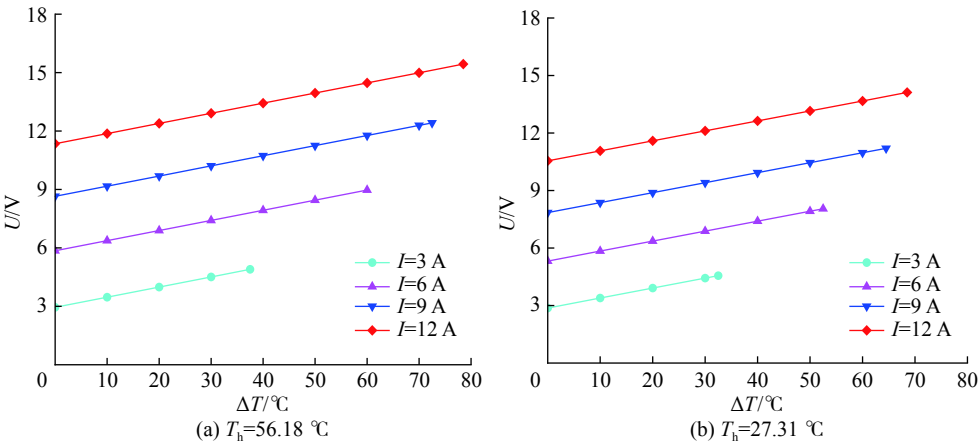


图 6 热电制冷片冷热端的温差与电压的变化关系

Fig.6 Temperature difference between the hot and cold ends of the thermoelectric cooler versus the voltage

值分别为 15.44，14.12 V，冷热端的最大温差分别为 78.50，68.50 $^\circ\text{C}$ 。这是因为热电制冷片的电压值与冷热端温差呈正相关，见式(5)，温差越大，热电制冷片的电压值越大，而冷热端温度大小决定了制冷试验箱制冷量的性能。由章节 3.2 可知，热端温度越高，制冷性能越好，因此当热端温度降低时，导致热电制冷片冷热端温度也随之下降。并且在 $T_h=27.31\text{ }^\circ\text{C}$ 时，热电制冷片的电压峰值与冷热端的最大温差较 $T_h=56.18\text{ }^\circ\text{C}$ 时分别减少了 1.32 V 和 10.0 $^\circ\text{C}$ ，这说明拥有较高热端温度的热电制冷片不仅具有较高的极限电压值，也拥有较大的冷热端温差。同时观察图 6 还可知：当电流分别为 3，6，9，12 A 时，制冷试验箱内部在 $T_h=56.18\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $T_h=27.31\text{ }^\circ\text{C}$ 时达到的最低温度随着电流的增大而降低，最低温度分别为 18.68，-3.82，-16.32，-22.30 $^\circ\text{C}$ 和 -5.19，-25.19，-37.19，-41.19 $^\circ\text{C}$ ，前者较后者的最低温度分别

相差 23.87，21.37，20.87，18.89 $^\circ\text{C}$ ；且电流越大，最低温度的增长率越小。这说明相较于较高的热端温度，较低的热端温度能够使制冷试验箱具有较低的冷端温度，且电流越大，制冷温度越低。

3.4 电压对制冷试验箱制冷量的影响

不同冷热端温差工况下，电压对制冷试验箱制冷量的影响如图 7 所示。由图可知，当热电制冷片冷热端温差一定时，低温热电制冷试验箱的制冷量随着电压的增加而增大，电压越大，制冷量的增长幅度越小，增长率最后逐渐趋近于零。这是因为较高的电压同样能够产生较大的焦耳热，抑制了制冷量的继续增大；这也同时说明了当热电制冷片开始工作时，应尽量避免使用最大电压，电压的持续增加不仅不能够有效提高制冷箱的制冷量，还会因为较强的电路电压造成直流电源电功率的损耗。当热电制冷片热端温度为 56.18 $^\circ\text{C}$

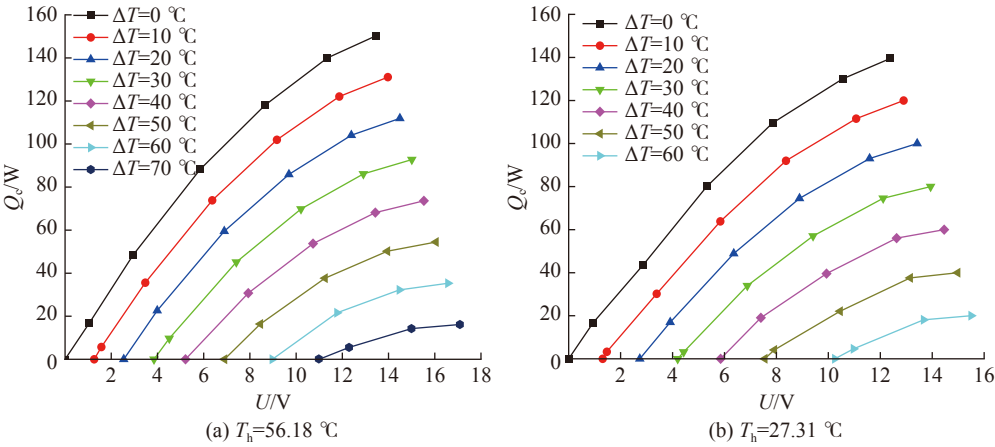


图 7 电压对热电制冷试验箱制冷量的影响

Fig.7 Effect of voltage on refrigerating capacity of thermoelectric refrigeration test box

和 27.31 °C 时, 温差值由 0 °C 增至 70 °C 和 0 °C 增至 60 °C 时, 最大电压分别由 13.45, 12.38 V 增至 17.09, 15.5 V。此外, 观察图 7 还可知, 热电制冷片在有效电压范围内的最大制冷量随着热端温度的降低而减小。当热端温度由 56.18 °C 降至 27.31 °C 时, 制冷箱的最大制冷量由 13.45 V 下的 150.2 W 减小到 12.38 V 下的 139.5 W, 电压减少了 1.07 V, 制冷量降低了 7.12%。当制冷试验箱的制冷量相同时, 热电制冷片需要的电压随着热端温度的降低而增加, 这表明热电制冷片的热端温度越高, 其制冷效果越好。

3.5 电压强度对制冷试验箱制冷系数的影响

在不同的冷热端温差工况下, 电压对制冷试验箱制冷性能的影响如图 8 所示。由图可知, 制冷试验箱的制冷系数随着电压的增加呈现先增大后减小的趋势。这是因为当电压增加时, 制冷试验箱的制冷量提升, 而直流电源提供的电功率较小, 导致制冷试验箱制冷系数增大; 随着电压的

继续增加, 直流电源加载在热电制冷片两端的电功率逐渐增大, 较大的电功率及较小增长幅度的制冷量导致制冷系数先增大后减小。当热电制冷片两端温差由 10 °C 增至 70 °C 和由 10 °C 增至 60 °C 时, 制冷试验箱的最大制冷系数由 $T_h = 56.18$ °C 时的 4.41 降至 0.085 和 $T_h = 27.31$ °C 时的 3.09 降至 0.11, 分别减小了 4.015 和 2.98; 制冷试验箱在 $T_h = 56.18$ °C 的最大制冷系数(4.41)降至 $T_h = 27.31$ °C 的最大制冷系数(3.09), 降低了 29.93%, 表明热电制冷片的热端温度越高, 热电制冷系统的制冷性能越好。此外, 观察图 8 还可得, 热电制冷系统的制冷系数出现了峰值偏移现象, 随着冷热端温差的增加, 最大制冷系数逐渐向右移动。这是因为当热电制冷片冷热端温差越小时, 制冷片冷端达到需求温度所需直流电源提供的电压值越小, 温差越大, 所需电压越大, 电压随着冷热端温差的增加而增大, 使得加载在热电制冷片上的电功率增加, 在制冷量相同的前提下, 电功率的

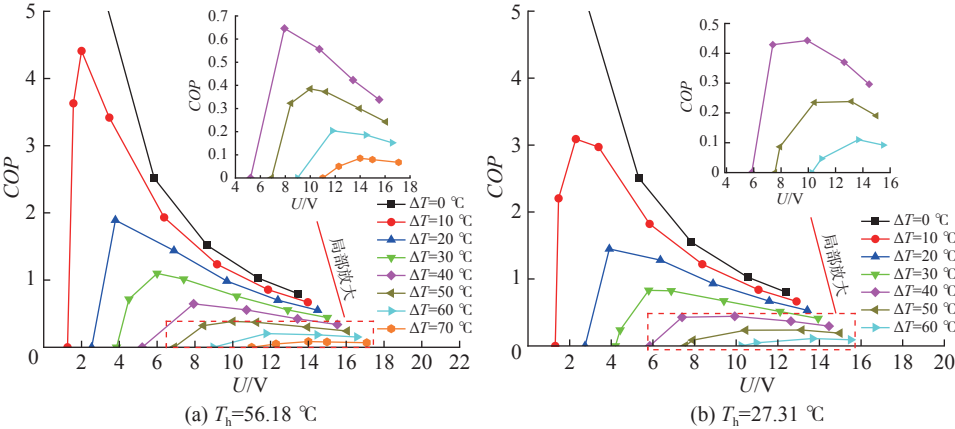


图 8 电压对制冷试验箱制冷系数的影响

Fig.8 Effect of voltage on refrigerating coefficient of thermoelectric refrigeration test box

增加, 导致了热电制冷系统制冷系数向右偏移。

4 结 论

理论计算了热电制冷试验箱热端温度为 27.31 °C 和 56.18 °C 时, 不同电流和电压对其制冷性能的影响。同时, 建立了三维数学传热模型, 模拟了热电制冷片的布置方式对制冷箱温度分布的影响。主要结论如下:

a. 分散式热电制冷片的布置方式能够提高冷量的传递速率, 提高箱体内部温度的均匀性。当热电制冷片的布置类型为“口”字型、“日”字型和“田”字型时, 制冷试验箱中心的温度梯度分别为 19.87 °C、6.84 °C 和 2.37 °C, 后者较前者分别降低了 65.58% 和 88.07%。

b. 低温热电制冷试验箱的热端温度由 56.18 °C 降至 27.31 °C 时, 其最大制冷量由 13.45 V 下的 150.2 W 减小到 12.38 V 下的 139.5 W, 电压减少了 1.07 V, 制冷量降低了 7.12%, 最低冷端温度由 -22.30 °C 降至 -41.90 °C。

c. 热电制冷试验箱的制冷系数随着电压的增加先增大后减小, 最大制冷系数由 $T_h = 56.18$ °C 的 4.41 降至 $T_h = 27.31$ °C 的 3.09。

d. 热电制冷片较低的热端温度能够使制冷试验箱达到更低的冷凝温度, 而较高的热端温度使其具备更好的制冷性能。

参考文献:

- [1] CHEN L G, MENG F K, GE Y L, et al. Performance optimization for a multielement thermoelectric refrigerator with linear phenomenological heat transfer law[J]. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 2020, 46(2): 149–162.
- [2] 武卫东, 申瑞, 姜同玲, 等. 基于 ANSYS Workbench 软件的半导体制冷器性能模拟研究 [J]. 上海理工大学学报, 2016, 38(3): 255–262.
- [3] XIA G J, ZHAO H D, ZHANG J S, et al. Study on performance of the thermoelectric cooling device with novel subchannel finned heat sink[J]. *Energies*, 2022, 15(1): 145.
- [4] 张美鑫, 柳建华, 张良, 等. 不同热端温度条件下的两级

制冷片性能分析 [J]. *上海理工大学学报*, 2013, 35(6): 586–590.

- [5] GUPTA S P, SONI S K, SIDDIQUE A, et al. Design and development of thermoelectric refrigerator[J]. *Invertis Journal of Renewable Energy*, 2018, 8(4): 194–196.
- [6] 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.
- [7] ALGHANIMA Y A, MESALHY O, ABDELGAWAD A F. Effect of cold-side heat sink configurations on thermal performance of thermo-electric compartment of a hybrid household refrigerator[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 37: 102302.
- [8] 王成刚, 郭佳欢, 韩崇. 基于冷藏箱热端散热器的优化设计 [J]. *工业加热*, 2021, 50(4): 12–15.
- [9] ASTRAIN D, VIÁN J G, DOMÍNGUEZ M. Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(17): 2183–2200.
- [10] MIRMANTO M, SYAHRUL S, WIRDAN Y. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(1): 177–184.
- [11] 邱兰兰, 王瑜, 朱洁茹, 等. 应用半导体制冷的冷藏链用储藏箱性能实验研究 [J]. *制冷学报*, 2020, 41(1): 131–140.
- [12] HE R R, ZHONG H Y, CAI Y, et al. Theoretical and experimental investigations of thermoelectric refrigeration box used for medical service[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 1215–1222.
- [13] 马广青. 基于热管散热器的半导体制冷箱冷热端传热特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [14] BOOMSMA K, POULIKAKOS D. On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(4): 827–836.
- [15] 朱孟帅, 闫勤学, 王子龙, 等. 铜金属泡沫填充率对相变材料融化过程强化传热的机理研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4915–4923.
- [16] ZHU M S, WANG Z L, ZHANG H, et al. Experimental investigation of the comprehensive heat transfer performance of PCMs filled with CMF in a heat storage device[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188: 122582.

(编辑: 董 伟)