

基于 ANSYS Workbench 软件的半导体 制冷器性能模拟研究

武卫东, 申 瑞, 姜同玲, 于子森

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 利用 ANSYS Workbench 数值模拟软件研究了输入电压、热端温度、半导体单元属性、半导体电偶臂及级间绝缘材料属性等因素对二级半导体制冷器冷端温度、冷端冷量及制冷系数等性能的影响。研究表明:在一定范围内,保持半导体制冷器热端温度不变,冷端温度随着输入电压的增大而递减;保持输入电压不变,冷端温度随着热端温度的升高而递增;保持输入电压和热端温度不变,冷端冷量随着冷端温度的升高而递增;在冷端温度、热端温度一定时,制冷系数 ϵ 随着输入电压的增大而迅速减小;半导体单元高度的增加和单元间距的减小都可以使冷端达到更低温度;随着半导体电偶臂及级间绝缘材料属性即热导率、高度的增加,冷端温度均呈递增趋势。模拟结果与实验数据对比显示,两者具有较好的吻合性。

关键词: ANSYS Workbench 软件; 半导体制冷器; 性能; 数值模拟; 实验验证

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

Performance Simulation on Semiconductor Cooler Based on ANSYS Workbench Software

WU Weidong, SHEN Rui, JIANG Tongling, YU Zimiao

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The finite element analysis on a two-stage semiconductor refrigeration device was carried out using the thermoelectric module in ANSYS Workbench software. The influences of the input voltage, hot end temperature, property of semiconductor unit, and properties of joint thermocouple arm and inter-stage thermal insulation materials on the cold end temperature and cooling capacity were studied. The simulation results show that the cold end temperature decreases with the increasing of input voltage when the hot end temperature keeps constant; the cold end temperature goes up with the increasing of hot end temperature when the input voltage keeps constant, which leads to the rising of cooling capacity; enlarging the height of semiconductor units and narrowing the spaces between them, and decreasing the thermal conductivity of joint couple arm and inter-stage insulation materials can lower the cold end temperature of semiconductor refrigerating device. The simulated results are in good agreement with the experimental results.

收稿日期: 2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50606027);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(Z2015301018);上海市自然科学基金资助项目(14ZR1429000)

第一作者: 武卫东(1973-),男,副教授。研究方向:制冷新技术。E-mail:usstwwd@163.com

Keywords: ANSYS Workbench software; semiconductor cooler; performance; numerical simulation; experimental verification

半导体制冷也称为温差电制冷或者热电制冷,是建立在珀尔帖效应基础上的制冷技术^[1].同常规的压缩式制冷方式相比,它具有噪声低、寿命长、易于微型化及反应敏捷等优势^[2].

对不同型式的半导体制冷器的相关性能进行优化实验往往需要较大的人力和物力,尤其对于结构和工艺相对复杂的多级半导体制冷器,具有一定的难度和复杂性.随着计算机技术的日臻成熟,人们开始着手利用功能全面的模拟软件对半导体制冷器进行设计、建模与优化.许多学者选择从传热学与热力学角度进行了相关数值模拟研究.吴丽清等^[3]利用非平衡态热力学理论对包含3种热电效应的半导体制冷器件建立了模型,发现在半导体的实际循环中汤姆逊效应是不可忽视的.黄焕文等^[4]运用 ANSYS 软件对风冷式半导体制冷器散热片的翅片长度、底座厚度等结构进行了数值模拟和结构优化设计.王太峰等^[5]研制了一种主要用于血液保存的半导体制冷保温容器的制冷系统,通过对其不同工作电压、环境温度及外部散热条件的研究,找出了影响半导体制冷性能的主要因素.Cheng 等^[6]分别用三维建模和实验的方法研究了半导体制冷器的输入电流、热电元件高度等参数对制冷器性能的影响.同时针对半导体热电臂进行了三维建模,对其瞬态传热特性进行了理论分析.赵举等^[7]运用 ANSYS 软件在3种工况下,对4种热电制冷器的热电距离和外界环境对热电制冷器制冷温度的影响进行了模拟分析,并用实验的方法对比了不同工况和不同散热温度下的模拟结果.安景飞^[8]用 ANSYS 软件模拟介质热阻、冷热端温差对半导体制冷系统的影响,总结了介质热阻和冷热端温差半导体制冷的影响并提出了优化建议.赵举等^[9]运用 ANSYS 软件模拟研究了四级热电制冷器的制冷温度,结果表明,受环境温度的影响,热电制冷器的制冷温度随着热端温度的升高而增高且随着热电对高度增高而降低,因此,必须保证热端散热良好.Hwang 等^[10]分别用实验和模拟的方法研究了六级平板型半导体制冷器,将其利用在 MEMS(微机电系统)装置的冷却方面,在 68 mW 的负荷下得到了 51 K 的温差.Antonova 等^[11]利用 ANSYS 软件主要对单级半

导体制冷器进行了模拟,最新的热电模块集成了焦耳热、电效应、塞贝克效应和帕尔帖效应,发现单级半导体制冷器模拟结果与实验测试结果基本吻合.近年来出现的 ANSYS Workbench 软件平台可以精确地简化各种仿真应用的工作流程,整个过程都以图形的形式一目了然且操作过程更为简便.然而,目前尚鲜有文献报道基于 ANSYS Workbench 软件对多级半导体制冷器进行数值模拟研究.

半导体制冷器的冷端温度、冷端冷量是衡量半导体制冷性能的重要指标.影响半导体制冷性能的因素包括外界因素和内部因素.外界因素包括:输入电压、热端温度和换热条件.内部因素包括:N型、P型半导体单元属性,如N型、P型半导体热导率、塞贝克系数,N型、P型半导体单元高度和间距;半导体制冷器其他配件属性,如半导体电偶臂属性、级间导热绝缘材料属性.

本文考虑以上多种不同的影响因素,基于 ANSYS Workbench 软件中电磁场分析的一个子模块即热电模块,对二级半导体制冷器进行了建模与数值模拟,同时,将模拟结果与相关实验数据进行了对比分析.在此基础上总结分析了各因素对二级半导体制冷性能影响的一般规律,研究结果对二级半导体制冷器的优化设计具有一定指导作用.

1 半导体制冷器数值模拟方法

将第二级半导体热端贴于第一级半导体冷端,则第一级冷端相当于第二级的散热器,便可制作成二级半导体制冷器.ANSYS 14.5 软件中的热电模块可以耦合热场和电场.本文采用 ANSYS 14.5 Workbench 对二级半导体制冷器进行模拟分析,模拟参数包括:输入电压、热端温度、半导体单元属性、半导体电偶臂属性和级间导热绝缘材料属性.数值模拟分析过程如下:

a. 将 [Thermal-Electric] 模块导入项目流程图中.

b. 定义模型材料的工程数据,需定义热电材料的属性,如电阻率和热导率、塞贝克系数等,热电制

冷堆模型还需定义级间绝缘导热层和导线的属性,如电阻率和热导率。

c. 导入三维几何模型. 采用 AutoCAD 建立三维几何模型,然后将三维模型另存为 SAT 格式,将二级半导体制冷器模型导入 ANSYS Workbench 中. 图 1(a)为所建的二级半导体制冷器 CAD 三维几何模型,模型模拟基本公式如表 1 所示。

d. 定义零件行为。

e. 定义连接关系,接触关系应考虑热电效应。

f. 划分网格。

g. 建立分析设置. 包括:(a)步长控制[Step controls];(b)采用非线性控制[Nonlinear Controls],从而可以控制电压和电流收敛,热量和温度收敛,对应的非线性算法采用默认[Quasi]选项;(c)输出控制[Output Controls],用来定义需要输出的时间点;(d)求解器[Solver Controls],其默认是直接法(稀疏求解器)。

h. 施加载荷和约束,本模拟主要包括电压、电流、温度、热对流、热辐射及完全绝热边界等。

i. 求解。

j. 查看结果,以云图的形式显示热场及电场的模拟结果,从图 1 中可以直观地看出温度分布及电压分布及冷端冷量分布等. 图 1(b)—1(e)为模拟后的温度、电压、冷量、热量、热端热量的结果图。

表 1 半导体制冷器模拟基本公式

Tab.1 Basic formula for the semiconductor cooler simulation

半导体制冷物理量	模型基本公式
制冷量 Q_c	$Q_c = (\alpha_P - \alpha_N)IT_c - \frac{1}{2}I^2R - K(T_h - T_c)$
散热量 Q_h	$Q_h = (\alpha_P - \alpha_N)IT_h + \frac{1}{2}I^2R - K(T_h - T_c)$
输入功率 P	$P = I^2R + (\alpha_P - \alpha_N)(T_h - T_c)I$
制冷系数 ϵ	$\epsilon = \frac{Q_c}{P} = \frac{(\alpha_P - \alpha_N)IT_c - 0.5I^2R - K(T_h - T_c)}{I^2R + (\alpha_P - \alpha_N)(T_h - T_c)I}$
制冷温差 ΔT	$\Delta T = T_h - T_c = \frac{(\alpha_P - \alpha_N)IT_c - 0.5I^2R - Q_c}{K}$

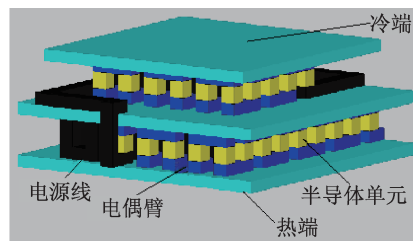
T_h, T_c 分别为半导体制冷器的热端和冷端温度, K;

α_N, α_P 分别为 N 型、P 型半导体温差电动势率, 即 P 型半导体的塞贝克系数, V/K;

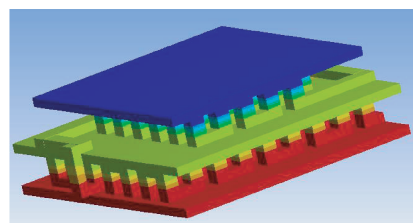
K 为半导体的总热导率, W/(m · K);

I 为通过半导体制冷器的电流, A;

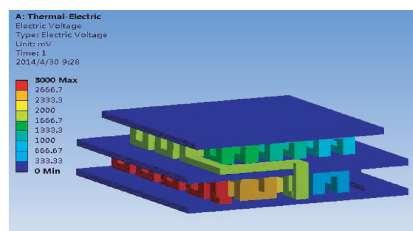
R 为半导体制冷器的电阻, Ω 。



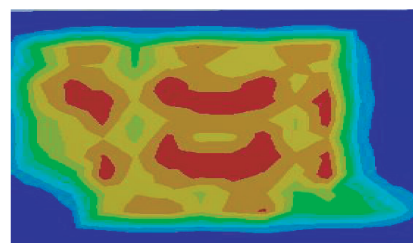
(a) 二级半导体制冷器CAD三维几何模型



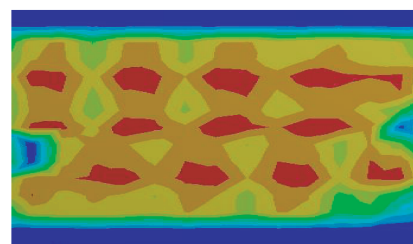
(b) 温度分布



(c) 电压分布



(d) 冷端冷量分布



(e) 热端热量分布

图 1 模拟的几何模型图和结果云图

Fig.1 Simulation of the geometric model and the results

2 半导体制冷器的数值模拟与分析

2.1 数值模拟的实验验证

为了验证数值模拟结果的准确性,搭建了二级半导体制冷器性能测试实验台,如图 2 所示(见下页)。

实验中采用昆晶冷片(深圳)有限公司生产的二级半导体,其最大输入电压为 4 V. 电压输入控制模

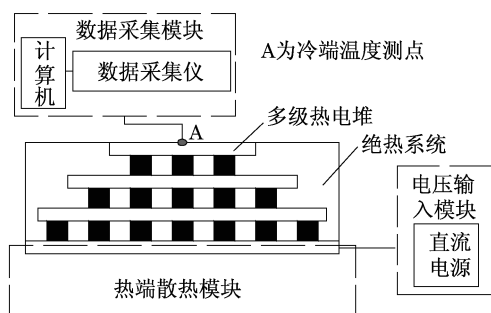


图2 二级半导体制冷器性能测试实验台

Fig.2 Two-stage semiconductor refrigerator performance testing platform

块采用 NF EC1000S 型号的可编程直流/交流电源, 直流输出范围为 $-190 \sim +190$ V, 精度为 1%。绝热系统在设计上采用导热性极低的珠光砂, 其导热系数为 $0.022 \sim 0.025$ W/(m·K)。热端散热采用水冷散热器模块, 通过控制循环冷却水的温度来间接控制热端温度, 其中, 冷却水回路由上海越平科学仪器有限公司生产的恒温槽提供, 可以提供 $-5 \sim +100$ °C 的恒温环境。在实验中, 温度作为主要测量参数。数据采集模块主要由数据采集仪、热电偶和计算机组成。数据采集仪采用美国安捷伦公司生产的 Agilent 34970A; 热电偶采用上海大华-千野仪表有限公司生产的 T 型热电偶, 精度为 ± 0.5 °C, 电偶丝直径为 0.2 mm, 其正极材料为纯铜, 负极材料为 60% 铜和 40% 镍的合金, 并经二级标准温度计在恒温槽上标定。

在保证实验工况与模拟参数完全相同的情况下, 分别进行不同输入电压与热端温度下半导体制冷器冷端温度变化的实验测量和模拟研究, 并将两者结果进行对比, 以验证模拟结果的可靠性。图3和图4分别显示了冷端温度随着输入电压和热端温度变化的模拟与实验对比结果(分绝热与室温23.5 °C两种情况)。

将图3和图4中模拟与实验结果对比后发现, 无论是在绝热条件还是室温条件下, 两者均具有相同的变化趋势, 且吻合性较好。室温条件下实验的冷端温度略高于模拟计算的结果(两者平均误差在 1.54 °C), 这是因为模拟时热端温度为恒定值, 而实验条件下热端温度是按循环冷却水温度近似取值的, 传热温差的存在使得实验时热端温度略高于模拟设定值, 从而导致相应误差; 而绝热条件下实验的冷端温度与模拟的结果相比偏差较大(两者平均误差有 3.72 °C), 这是因为实验时的绝热条件没有模拟条件好。

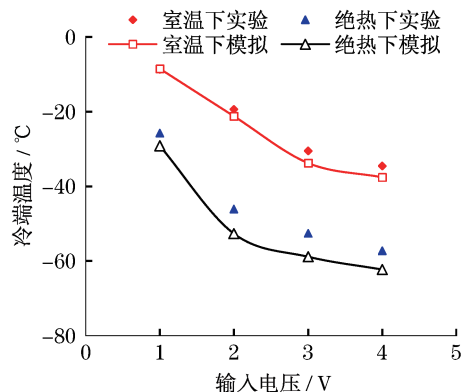


图3 冷端温度随着输入电压的变化(模拟和实验时都将半导体热端温度控制在 8 °C)

Fig.3 Changes of cold end temperature with the input voltage (the hot end temperature of the semiconductor is controlled at 8 °C)

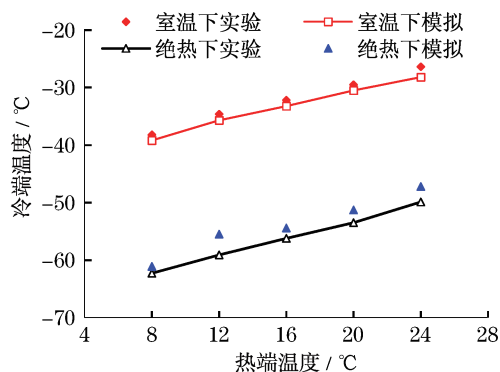


图4 冷端温度随着热端温度的变化(模拟和实验时都将半导体输入电压控制为 4 V)

Fig.4 Changes of cold end temperature with the hot end temperature (the semiconductor input voltage is controlled to 4 V)

综上所述可见, 本文数值模拟方法所得结果基本是可信的, 可以用来模拟半导体制冷器的相关性。基于此, 本文在研究了外部条件对半导体制冷器性能影响的基础上, 还模拟研究了内部因素, 如 N 型、P 型半导体单元属性及其配件属性对半导体制冷器性能的影响。

2.2 外部条件对半导体制冷性能的影响

影响半导体制冷性能的外界条件包括: 输入电压、热端温度和换热条件。

从图3可以看出, 在绝热和室温两种条件下, 冷端温度都是随着输入电压的增大而逐渐降低, 且冷端温度降逐渐趋于平缓。在相同条件下, 绝热的冷端温度低于室温时的冷端温度, 在输入电压为 4 V 时, 模拟的绝热和室温情况下的最低冷端温度分别达到 -62.3 、 -37.6 °C。绝热时的冷端温度明显低于室温时的冷

端温度,这是因为室温条件下半导体制冷器冷端与外界环境存在热量交换,此时相当于有冷量存在。

从图4可以看出,输入电压保持不变时,随着热端温度的上升,半导体冷端温度逐渐升高。这主要是由于热端温度升高时,热电堆需要克服的不可逆因素增大,其制冷温度必然随之升高。从模拟和实验结果还可以看出,随着热端温度的上升,半导体冷热端温差也在逐渐增大;在相同热端温度下,同样由于半导体制冷器冷端与外界环境存在热量交换,室温条件下(相当于有冷量存在)的冷端温度明显高于绝热条件下的冷端温度。

在实际应用中,除了要考虑冷端温度外,冷端冷量和制冷系数也是非常重要的性能指标。图5和图6分别为不同输入电压和冷端温度对应冷端冷量和制冷系数的模拟结果。

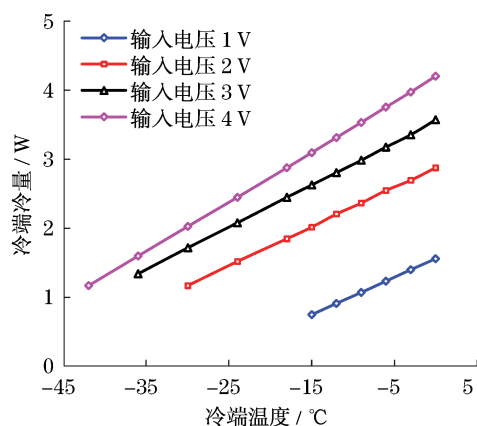


图5 冷端冷量随着输入电压与冷端温度的变化

Fig.5 Changes of cold end cooling capacity with the input voltage and cold end temperature

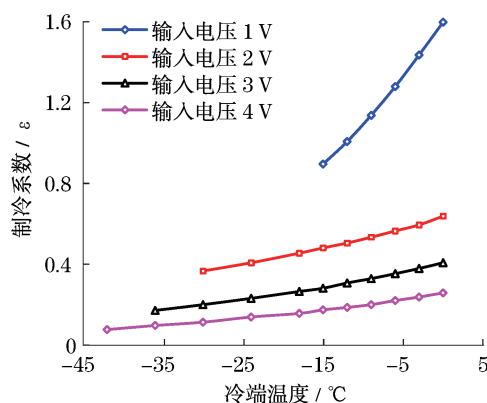


图6 制冷系数随着输入电压和冷端温度的变化

Fig.6 Changes of cooling coefficient with the input voltage and cold end temperature

从图5可以看出,热端温度恒定时,在半导体输入电压相同的情况下,冷端冷量随着冷端温度的降

低而递减,这符合热力学第一定律,因为,原本用于冷端冷量的部分能量被用来降低冷端温度,这就导致冷端冷量的降低。同时,在获得的冷端温度固定时,冷端冷量随着输入电压的增大而增大(且增大趋势在放缓),这主要是因为随着输入电压的增大,半导体工作性能得到提升,从而得到的冷端冷量更大。

从图6中可以看出,在冷端温度、热端温度一定时,制冷系数 ϵ 随着输入电压的增大而迅速减小(输入电压增大导致输入功率增大),且减小趋势在逐渐放缓;而在输入电压一定时,制冷系数 ϵ 随着冷端温度的减小而减小。由此可见,并不是输入电压越大、冷端温度越低就越好,输入电压的增大或者冷端温度的降低都会使整个二级半导体制冷器的制冷效率降低,所以,设计时应在满足实际工况要求的前提下,注意选择合适的输入电压和冷端温度。

2.3 N型、P型半导体单元属性的影响

N型、P型半导体单元属性指的是N型、P型半导体热导率和塞贝克系数等物性参数,以及其高度和相邻半导体间距等几何参数。现通过改变以上参数,对半导体制冷器的冷端温度进行模拟。其中,输入电压控制为2V,热端温度控制为8℃,冷端保持绝热。在模拟过程中,采用控制变量法,相关的物理量参数为:热导率 $K_N = 1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $K_P = 1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,塞贝克系数 $\alpha_N = 1.7 \times 10^{-4} \text{ V/K}$, $\alpha_P = 2.1 \times 10^{-4} \text{ V/K}$,半导体高度 $H = 1.1 \times 10^{-3} \text{ m}$,相邻半导体间距 $L = 1.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

2.3.1 N型、P型半导体热导率和塞贝克系数对冷端温度的影响

冷端温度随着N型、P型半导体热导率和塞贝克系数的变化分别如图7和图8所示(见下页)。

从图7和图8可以看出,随着N型、P型半导体热导率 K_N, K_P 的增大与塞贝克系数 α_P, α_N 的增大,半导体冷端温度均呈递减趋势。这可以由半导体的优值系数 Z 来解释。热电材料的优值系数 Z 是表征热电性能的主要指标,其值决定了半导体制冷器所能达到的最大温差。据半导体优值系数的推导公式 $Z = (\alpha_P - \alpha_N)^2 / (RK) = 4\alpha^2 / (RK)$ (其中, $\alpha_P = -\alpha_N = \alpha$; K 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; R 为半导体制冷器的电阻, Ω)^[1]可知,热导率的减小与塞贝克系数的增大都会使半导体优值系数增大,而优值系数的大小决定了半导体的制冷性能及所能达到的最大温差,优值系数越大,半导体制冷所能达到的最大温差越大。在热端温度保持不变时,冷热端温差越大,则冷端温度越低。

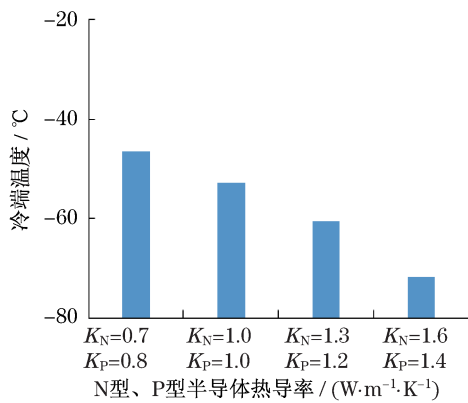


图7 冷端温度随着N型、P型半导体热导率的变化

Fig.7 Changes of cold end temperature along with the thermal conductivity of N type and P type semiconductors

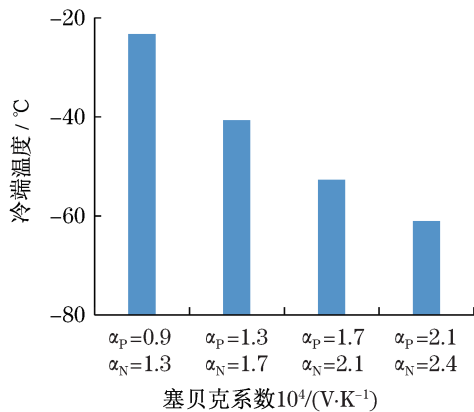


图8 冷端温度随着N型、P型半导体塞贝克系数的变化

Fig.8 Cold end temperature changes with the Seebeck coefficient of N type and P type semiconductors

2.3.2 N型、P型半导体单元高度和间距对冷端温度的影响

如图9为冷端温度随着N型、P型半导体的高度和间距的变化情况.从图9可以看出,随N型、P型半导体单元高度 H 的增大,冷端温度逐渐降低,其主要原因是,随着高度 H 的增大,半导体电阻 R 将会增大,从而引起半导体制冷装置的焦耳热增大,同时热端到冷端的有害热传导会减小.从模拟结果可以看出,冷端温度降低,说明热电堆的有害热传导的减少量大于焦耳热的增加量.但从图9中可以看出,随着高度 H 的逐渐增加,冷端温度变化曲线逐渐趋于平缓,综合考虑尺寸、经济性、性能等多方面因素,N型、P型半导体应有一个最佳高度.

从图9中还可以看出,随着N型、P型半导体单元间距从 9×10^{-4} m增加到 13×10^{-4} m时,半导体冷端温度呈递增趋势,但变化范围较小.事实上,由

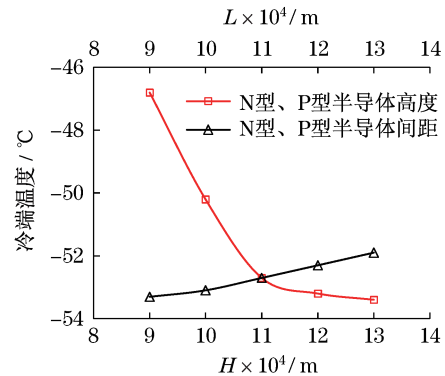


图9 冷端温度随N型、P型半导体高度和间距的变化

Fig.9 Changes of cold end temperature with height and pitch of N type and P type semiconductor

于此处换热条件为绝热,即使间距增大,也不存在任何对流和辐射换热损失.而冷端温度之所以有小幅上升,主要是因为间距的增大使得连接N型、P型半导体的铜块变长,从而使半导体制冷器电阻增加,热能损耗增加,因此,用于冷端制冷的有效能相应减少.

2.4 半导体电偶臂属性的影响

电偶臂属性包括电偶臂热导率 K_2 和高度 H_2 两方面.为探讨半导体电偶臂热导率和高度的变化对冷端温度的影响,模拟时保持半导体输入电压2 V,热端温度8 °C,冷端保持与外界环境绝热,分别改变电偶臂属性,对半导体制冷器的冷端温度进行模拟,结果如图10所示.

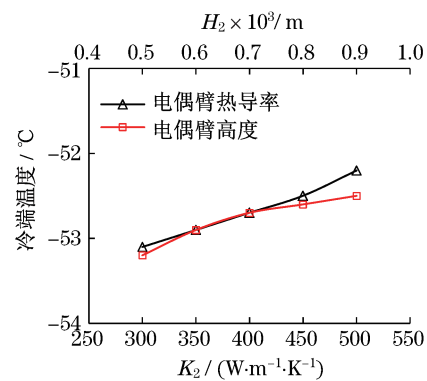


图10 冷端温度随电偶臂热导率和高度的变化

Fig.10 Changes of cold end temperature with the thermal conductivity and height of the galvanic arm

在探究电偶臂热导率对冷端温度的影响时,电偶臂高度保持在 0.7×10^{-3} m不变,改变电偶臂(如铜块)热导率分别为300,350,400,450,500 W/(m·K).从图10可以看出,随着电偶臂热导率的增加,半导体冷端温度呈递增趋势,这主要是因为电偶臂热导率的增加使半导体热端热量更容易传递给冷端,冷

端吸收热端热量后温度升高.另外,电偶臂热导率虽有近 70% 的提高,但冷端温度增加幅度相对较小,这说明热端通过电偶臂传递给冷端的热量较小.由此可见,电偶臂热导率的大小对半导体制冷性能的影响较小.

在探究电偶臂高度对冷端温度的影响时,电偶臂热导率保持在 $400 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 不变,改变电偶臂高度分别为 0.5×10^{-3} , 0.6×10^{-3} , 0.7×10^{-3} , 0.8×10^{-3} , $0.9 \times 10^{-3} \text{ m}$. 同样,从图 10 可以看出,在 $0.5 \times 10^{-3} \sim 0.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ 范围内,随着电偶臂高度的增加,半导体冷端温度呈递增趋势,但变化范围也比较小.这主要是因为电偶臂高度的增加使其电阻增加,从而使得整个半导体制冷装置的电阻增加.在输入电压保持 2 V 不变的情况下,增加的电阻将“消耗”部分电能,用于冷端制冷的有效能将有所下降,从而使冷端温度出现小幅上升.

2.5 级间导热绝缘材料属性的影响

级间导热绝缘材料属性包括级间导热绝缘材料热导率 K_3 和高度 H_3 两方面.保持半导体输入电压 2 V ,热端温度 8°C ,冷端与外界环境绝热.将级间导热绝缘材料(如氧化铝陶瓷)高度控制在 $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$,在热导率分别为 $25, 30, 35, 40, 45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的条件下,以及级间导热绝缘材料热导率控制在 $35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,高度分别为 0.3×10^{-3} , 0.4×10^{-3} , 0.5×10^{-3} , 0.6×10^{-3} , $0.7 \times 10^{-3} \text{ m}$ 的条件下,分别对半导体制冷器的冷端温度进行模拟,结果如图 11 所示.

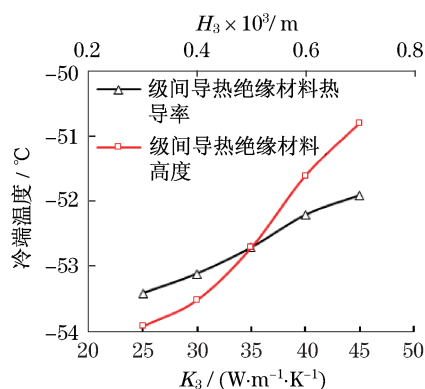


图 11 冷端温度随级间绝缘材料热导率和高度的变化

Fig. 11 Variation of cold end temperature with the thermal conductivity and height of the insulation material between stages

从图 11 中可以看出,随着级间氧化铝陶瓷热导率的增加,级间高度从 $0.3 \times 10^{-3} \text{ m}$ 增加到 $0.7 \times$

10^{-4} m ,半导体冷端温度均呈递增趋势,原因与电偶臂属性对半导体制冷性能的影响相同,所不同的是,随着级间导热绝缘材料高度的增加,冷端温升速率明显增加,考虑冷端温度及加工难度,级间导热绝缘材料最佳高度可选取中间适宜值.

3 结 论

运用 ANSYS Workbench 软件中的热电模块对二级半导体制冷装置进行有限元分析,模拟了输入电压、热端温度、半导体单元属性、半导体电偶臂属性、级间导热绝缘材料属性等因素对制冷器冷端温度、冷端冷量及制冷系数等性能的影响.模拟与实验结果的对比显示,两者吻合得很好,说明采用此种模拟方法是可靠的.主要得出以下结论:

a. 在一定范围内,保持半导体制冷器热端温度不变,其冷端温度随着输入电压的增大而递减;保持输入电压不变,冷端温度随着热端温度的升高而递增;保持输入电压和热端温度不变,冷端冷量随着冷端温度的升高而递增;在冷端温度、热端温度一定时,制冷系数 ϵ 随着输入电压的增大而迅速减小,且减小趋势在逐渐放缓.

b. 半导体制冷单元高度的增加和制冷单元间距的减小可使半导体冷端达到更低的温度,但综合考虑尺寸、经济性、性能及加工工艺等多方面因素,N型、P型半导体应有一个最佳高度和间距,在设计时应进行相应优化.

c. 随着半导体电偶臂热导率、高度以及级间导热绝缘材料属性热导率、高度的增加,半导体冷端温度均呈递增趋势,尽管本文模拟数据显示的温度变化范围相对较小,但也应根据需要在设计时予以考虑.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 魏宏玲,章秋宝.基于液体循环冷却的温差半导体的研究[J].工程设计学报,2005,12(5):298-300.
- [3] 吴丽清,陈金灿,严子浚.汤姆孙效应对半导体制冷器性能的影响[J].半导体学报,1997,18(6):448-453.
- [4] 黄焕文,冯毅.半导体制冷强化传热研究[J].低温与超导,2010,38(8):60-63.
- [5] 王太峰,欧阳新萍,薛娜.半导体制冷保温容器制冷性能的实验研究[J].上海理工大学学报,2007,29(4):341-344.
- [6] CHENG C H, HUANG S Y, CHENG T C. A three-

- dimensional theoretical model for predicting transient thermal behavior of thermoelectric coolers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(9/10): 2001–2011.
- [7] 赵举, 陈曦. 多级热电制冷器的数值模拟与实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 94–99.
- [8] 安景飞. 半导体制冷系统性能的研究[D]. 成都: 西华大学, 2013.
- [9] 赵举, 朱洪亮, 仇和兵, 等. 多级热电制冷数值模拟与实验研究[J]. 制冷技术, 2015, 35(4): 17–21.
- [10] HWANG G S, GROSS A J, KIM H, et al. Micro thermoelectric cooler Planar multistage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(7/8): 1843–1852.
- [11] ANTONOVA E E, LOOMAN D C. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS [C] // Proceedings of the 24th International Conference on Thermoelectrics. Clemson, IEEE, 2005: 215–218.
- (编辑: 石 瑛)

~~~~~

(上接第 210 页)

- [2] SHAPIRO V L. Quasilinearity below the 1st eigenvalue [J]. Proceedings of the American Mathematical Society, 2001, 129(7): 1955–1962.
- [3] RUMBOS A J, SHAPIRO V L. Jumping nonlinearities and weighted Sobolev spaces [J]. Journal of Differential Equations, 2005, 214(2): 326–357.
- [4] RUMBOS A. A semilinear elliptic boundary value problem at resonance where the nonlinearity may grow linearly[J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 1991, 16(12): 1159–1168.
- [5] LEFTON L E, SHAPIRO V L. Resonance and quasilinear parabolic partial differential equations[J]. Journal of Differential Equations, 1993, 101(1): 148–177.
- [6] SHAPIRO V L. Resonance, distributions and semilinear elliptic partial differential equations [J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 1984, 8(8): 857–871.
- [7] 赵美玲, 贾高. 加权 Sobolev 空间中奇异拟线性椭圆方程共振问题[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(6): 598–603.
- [8] JIA G, SUN D. Existence of solutions for a class of singular quasilinear elliptic resonance problems[J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 2011, 74(10): 3055–3064.
- [9] SHAPIRO V L. Special functions and singular quasilinear partial differential equations [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1991, 22(5): 1411–1429.
- [10] SHAPIRO V L. Singular quasilinearity and higher eigenvalues[M]. Rhode Island: American Mathematical Society, 2001.
- [11] KESAVAN S. Topics in functional analysis and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- (编辑: 石 瑛)