

优化界面热阻提升相变-热电耦合系统输出电量

黄瑾^a, 赵晓君^a, 王元元^{a,b,c}, 吴子华^{a,b,c}, 董岚^{a,b,c}

(上海第二工业大学 a. 能源与材料学院; b. 上海先进热功能材料工程技术研究中心;
c. 上海热物性大数据工程技术研究中心, 上海 201209)

摘要: 热电发电器件具有体积小、可靠性高, 无机械运动部件等优点, 经常应用于热源波动环境。由于相变材料相变时能够恒温吸收、释放大量的热量, 被广泛应用到热电发电系统中以提高其热能利用率。在相变-热电耦合系统中, 相变材料和热电模块之间的界面热阻影响了系统的能量传输, 从而强烈影响了系统的发电性能。利用经典焓模型和热电耦合方程分别描述相变材料和热电发电器件中的传热和能量转换过程, 采用有限元方法求解耦合方程, 探讨界面热阻对耦合系统发电性能的影响。结果表明, 存在最优界面热阻使得相变-热电系统的总输出电能达到峰值。通过给出了通过优化界面热阻提升系统性能的方便可行的方法, 有利于热电发电器件在波动热源条件下更广泛的应用。

关键词: 热电发电器; 相变材料; 相变-热电耦合系统; 界面热阻; 总输出电能

中图分类号: TM913

文献标志码: A

Enhanced Output Electricity of Coupled Phase Change Material-Thermoelectric Generator System with Optimized Interfacial Thermal Conductivity

HUANG Jin^a, ZHAO Xiaojun^a, WANG Yuanyuan^{a,b,c}, WU Zihua^{a,b,c}, DONG Lan^{a,b,c}

(a. School of Energy and Materials; b. Shanghai Advanced Thermal Functional Materials Engineering Technology Research Center; c. Shanghai Thermophysical Properties Big Data Engineering Technology Research Center, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: The thermoelectric electricity components have the advantages of small size, high reliability, and no mechanical motion components. They are often used in the heat source fluctuation environment. Because phase-changing materials can absorb and release a large amount of heat in constant temperature, they are widely used in the thermal power generation system to improve their thermal energy utilization rate. In the phase change-thermoelectric coupling system, the interface thermal resistance between the phase-changing material and the thermoelectric module affects the heat transmission of the system, which strongly affects the power generation performance of the system. Use the classic enthalpy model and thermoelectric coupling equation to describe the heat transfer and energy conversion process in the phase-changing materials and the thermoelectric power generation components, and the decoupled coupling equation is used to explore the effects of the thermal resistance of the interface on the coupling system. The results show that the thermal resistance of the optimal interface makes the total output power of the phase change-thermoelectric system reach its peak. By giving the convenience and feasibility of improving the performance of the system by optimizing the thermal resistance of the interface, it is

收稿日期: 2024-06-20

通信作者: 王元元 (1983-), 女, 安徽亳州人, 教授, 博士, 主要研究方向为新能源材料与器件。E-mail: wangyuanyuan@sspu.edu.cn

基金项目: 上海市自然科学基金 (23ZR1424300), 上海市“曙光”计划项目 (22SG56), 上海市科委地方能力建设项目 (22010500700) 资助

conducive to the more extensive application of thermoelectric electrical components under the condition of fluctuating thermal source.

Keywords: thermoelectric generator; phase change materials; phase change-thermoelectric coupled system; interfacial thermal resistance; total output electrical energy

0 引言

热电发电机 (thermoelectric generator, TEG) 是一种能够将热能直接转化为电能的装置, 由于其无机械振动, 具备稳定性高、可靠性好和长期运行时间长^[1]等优点, 因此被认为是一种具有广阔前景的能源转换技术。TEG 被广泛应用于汽车余热发电^[2-3]、工业余热回收^[4-5]、太阳能发电^[6-7]等领域, 其性能通常通过输出功率和转换效率来评估。热电材料的热电优值 (ZT) 是影响 TEG 性能最基础、最直接的因素, 大量 ZT 大于 1 的热电材料体系被报道, 热电材料的 ZT 是影响 TEG 性能最基础、最直接的因素。Akram 等^[8]通过将 Na 掺杂到 CoO₂ 材料中, 掺杂后的 CoO₂ 材料在 1 010 K 时 ZT 为 1.24。在器件层面, 为提高 TEG 的性能, 大量工作研究通过优化热电偶的几何位形^[9]、散热器^[10]、界面^[11]、工作条件^[12]等因素以提升其性能。然而在实际应用中, 热电发电器件的热源温度往往随时间波动, 比如汽车尾气余热利用、太阳能发电模块余热利用等, 这导致热电发电器件输出电能不稳定及热电转换效率降低^[13-14]。相变材料 (phase change material, PCM) 是一种潜热储能材料, 在相变过程中实现吸热和放热^[15]。因此可以采用 PCM 与 TEG 热端耦合的方法, 稳定热源波动带来的 TEG 热端温度变化, 以提升相变-热电 (PCM-TEG) 系统的输出电能和转换效率。大量工作探索了 PCM-TEG 系统中不同因素对其性能的影响。在 PCM-TEG 系统中, 相变部分与热电模块之间的耦合方式是关键因素之一。将 PCM 放置在热电系统的热侧时, 会对耗散的热量进行储存或回收利用。Cui 等^[16]将 PCM 应用于光伏-热电耦合系统, 将相变模块夹在光伏电池和热电模块热端之间, 用以吸收光伏模块多余的热量, 并为热电模块提供热能。该装置有效地提高了太阳能的光能利用效率。Altstedde 等^[17]对汽车尾气产生的余热回收利用时, 将 PCM 安装在排气通道中, 以稳定 TEG 的输出。数值模拟结果表明, 与无 PCM 相比, 采用 PCM 后系统的输出功率可提

高 29%。Huang 等^[18]通过将 PCM 放置在热电模块的热侧用于余废热的回收, 结果表明, 其开路电压和输出功率分别提高了 0.7% 和 1.16%。将 PCM 放置在热电系统的冷端, 可以有效的控制热电发电器件冷端温度变化。Jaworski 等^[19]通过实验测试了具有 PCM 作为散热器的 TEG 的性能, 结果表明, PCM 可以有效地稳定冷侧温度。Tu 等^[20]设计了一种 PCM-TEG 系统, 将 PCM 用于热电模块的冷侧, 结果表明, 使用由石蜡/5%膨胀石墨组成的 PCM 可显著提升 TEG 的总能量输出, 比使用纯石蜡提高了 32.73% 的总能量输出。Almeshaal 等^[21]将由石蜡、氧化铝粉混合而成的 PCM, 放置在热电模块的冷端, 结果表明, 通过使用 PCM/氧化铝复合材料成功地使热电发电器件的热电效率提高 12.28%。将 PCM 放置在热电系统的热侧和冷侧, 形成一种可重复使用的能量收集系统。Liao 等^[22]提出了一种新型双 PCM 热电能量采集装置, 结果表明, 与使用单个 PCM 相比, 使用 PCM 复合材料的 PCM-TEG-PCM 的输出功率提高了 35.8%。通过实验表明, 将 PCM 用于单级热电模块中, 对提升热电模块的输出性能有很大的改善, 同样也适用于多级热电模块。Yang 等^[23]提出了一种具有不同 PCM 嵌入模式的两级 TEG, 与单级 TEG-PCM 系统相比, 总电能增加了 44.8%, 转换效率为 6.0%。然而, 以上工作忽略了 PCM-TEG 耦合发电系统中, 各个模块间热界面导热系数的影响。石峰等^[24]通过研究 PCM 与热电器件之间的接触热阻的影响, 结果表明减少接触热阻可提高系统的输出功率。为了探究热电模块与热源和冷源之间的界面导热系数对 PCM-TEG 耦合系统发电性能的影响, 建立了嵌入式 PCM-TEG 耦合系统, 利用经典焓模型描述 PCM 中的热输运过程, 利用热电耦合方程描述热电发电器件中的传热和能量转换过程。运用有限元方法求解热电耦合方程, 探讨在不同界面导热系数的情况下, PCM-TEG 耦合系统的总输出电能, 并且提出了界面热阻存在最优值。

1 模型与方法

图 1(a) 所示为 PCM-TEG 耦合系统的模型图, 其中包含 199 对热电元, 热电元间相互串联, 热电片通过导热胶与相变模块和冷端相连, 利用导线连接一个外接电阻组成闭合回路, 当给定一个热源温度, 热量从相变模块传到冷端, 在整个系统中形成温度梯度, 由于热电效应回路中产生电流 I 。PCM-TEG 耦合系统的尺寸如图 1(b) 所示, 图中热电片的尺寸采用的是标准的 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的商业尺寸, 包括陶瓷片、铜片、p 型和 n 型热电臂。在本次模拟计算中, 热端的初始温度 (PCM 的温度) 为 550 K , 冷端温度固定为 300 K , 外接电阻为 $2\ \Omega$ 的定值电阻。在系统中, 假设热电模块与热源和冷源之间的界面导热系数由界面材料导热胶来决定, 并在模型中将导热胶简化为一层厚度为 0.2 mm 的导热胶层。首先, 本工作应用 ANSYS 软件的 Transient-Thermal 模块, 给定系统热端一个 550 K 的稳定热源, 待整个系统达到热稳定后撤去热源, 模拟 PCM-TEG 耦合系统在撤去热源后降温到室温的一段时间内, 界面导热系数不同时, 整个系统在这段时间的温度分布; 然后, 将热电模块在各个时间点的温度分布加载到 ANSYS 软件的 Thermo-Electric 模块, 利用有限元法

进行计算, 得到 TEG 在每个时间点的输出电流 I 、输出电压 U , 进而得到 TEG 随时间变化的输出功率 P 以及 TEG 在相变阶段产生的总电量。为了保证计算的顺利进行, 做出了以下假设: (1) PCM-TEG 耦合系统与外界无热量交换, 即在真空环境下; (2) 假设冷端热沉的换热能力无限大, 即冷端温度一直保持在 300 K ; (3) 假设 PCM-TEG 耦合系统中各个元件间的界面导热系数无限大; (4) 假设热电模块与热源之间的界面导热系数和热电模块与冷源之间的界面导热系数相同。该假设不会对研究的主要问题产生影响。

固-液 PCM 在降温过程中经历液相到固相的转变, 因此包含 PCM 的传热模型通常为非线性数值模型。求解相变传热的方法通常有两种: 温度法模型和焓法模型。本文采用焓法模型来描述相变模块的瞬态传热。相变焓的微分方程可以表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \frac{\partial H}{\partial t} \tag{1}$$

式中: $H(x, y, z, t)$ 为位置和时间相关的焓场; \dot{q} 为单位体积产热率; κ 和 ρ 分别为 PCM 的导热系数和密度。在已知边界条件和初始条件下, 通过求解式 (1) 可求得热焓函数。焓函数^[25] 还与相变的热容 (C) 和相变潜热 (h) 有关, 可以表示为

$$H = C_p T + h f_l \tag{2}$$

式中: $C_p = (C_1 + C_s)/2$ 是相变区域的等效热容; f_l 为液相比率。从式 (2) 可以得到关于焓的温度函数:

$$T - T_m = \begin{cases} \frac{H - H_s}{C_s}, & H \leq H_s \\ \frac{H - C_p T_m - \frac{h}{2}}{C_p + \frac{h}{2} T_a}, & H_s \leq H \leq H_1 \\ T_a + \frac{H - H_1}{C_1}, & H > H_1 \end{cases} \tag{3}$$

式中: C_1 和 C_s 分别为 PCM 的固体和液体比热; T_m 为 PCM 的相变温度; $H_s = C_s(T_m - T_a)$ 和 $H_1 = C_1(T_m + T_a) + h$ 分别是固相和液相的饱和焓; $T_a = (T_1 - T_s)/2$ 表示相变半径, 其中 T_s 和 T_1 分别是相变开始和结束的温度。通过求解式 (1) 可以得到焓函数, 根据式 (3) 可以得到 PCM 的温度分布。

在降温过程中 PCM 经历液相到固相的转变, 即凝固过程。焓 (H) 是基于温度的函数, 由所用材料

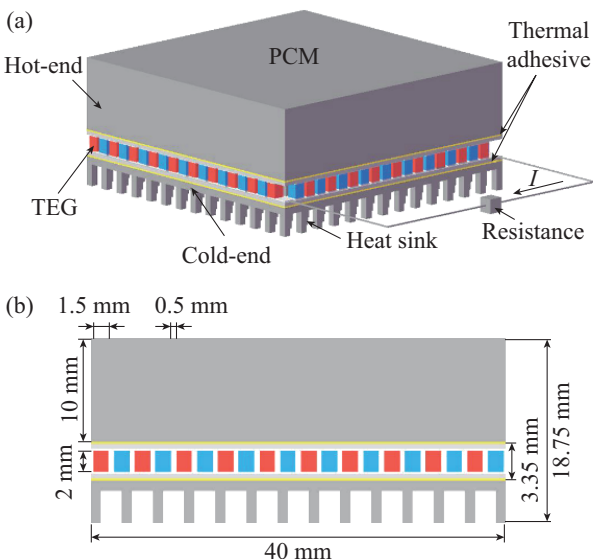


图 1 PCM-TEG 耦合系统的 (a) 模型图和 (b) 尺寸图 (其中 PCM、热电模块和热电臂的宽分别为 40 mm 、 40 mm 和 1.5 mm)

Fig. 1 (a) Modeled and (b) dimensioned diagrams of the PCM-TEG coupled system (where the widths of the PCM, thermoelectric module, and thermoelectric arm are 40 mm , 40 mm and 1.5 mm , respectively)

的比热 (C)、密度 (ρ) 和温度 (T) 来表示 [25]:

$$H = \int \rho C(T) dT \quad (4)$$

式 (4) 包含了 3 种状态的 PCM 相对于温度 T 的焓值 [25]:

$$H_s(T) = \int_{T_0}^{T_s} \rho C_s(T) dT, \quad T < T_s \quad (5)$$

$$H_m(T) = \int_{T_0}^{T_s} \rho C_s(T) dT + \int_{T_s}^{T_1} \left\{ \rho \frac{h}{T_1 - T_s} + \rho C_m(T) \right\} dT, \quad T_s \leq T \leq T_1 \quad (6)$$

$$H_l(T) = \int_{T_0}^{T_s} \rho C_s(T) dT + \int_{T_s}^{T_1} \rho C_m dT + \int_{T_1}^{T_+} \rho C_l dT, \quad T > T_1 \quad (7)$$

式中: T_0 、 T_1 和 T_+ 分别为 PCM 的下限温度、液相线温度和上限温度; C_m 为固体和液体的平均比热。

整合并对式 (5)~(7) 进行积分可得 [26]:

$$H_s = \rho C_s (T_s - T_0) \quad (8)$$

$$H_m = H_s + \rho C_* (T_1 - T_s) \quad (9)$$

$$H_l = H_m + \rho C_l (T_+ - T_1) \quad (10)$$

式中, C_* 为固、液混合区的比热容, 可定义为

$$C_* = C_m + \frac{L}{T_1 - T_s} \quad (11)$$

式 (8)~(10) 定义了温度界限后, 可用来求解 PCM 的焓随温度变化的性质。

本文使用的 PCM 及其参数如表 1、2 [27-29] 所示, 相变温度为 467 K, 潜热为 262 kJ/kg, 使用的 p 型和 n 型热电材料分别为 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 和 Bi_2Te_3 。本文选取热电材料的导热系数在 0.8~1.3 W/mK 之间, 考虑到低于、接近和高于热电材料导热系数的不同情况, 因此选取了一组界面导热系数 ($\kappa_c = 0.1, 0.5, 1, 3$ W/mK)。将选取的界面导热系数依次代入到软件中进行计算, 得到相应的结果。

表 1 PCM 的基础参数 [27-29]
Tab. 1 Basic parameters of PCM [27-29]

PCM	$C/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\kappa/(\text{W}\cdot\text{mK}^{-1})$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	相变潜热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	相变温度/K
$(\text{LiNO}_3)_{49}-(\text{NaNO}_3)_{51}$	1.35 (s)	0.87 (s)	2317 (s)	262	467
	1.72 (l)	0.59 (l)			

表 2 PCM 的热焓 [27-29]
Tab. 2 Enthalpy of PCM [27-29]

温度/ $^{\circ}\text{C}$	$H/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
0	0
193	603.694 35
195	1 217.861 54
350	1 835.573 74

2 结果与分析

由图 2(a) 可以看出, 界面导热系数越大, PCM 降温到相变温度的时间越靠前且相变阶段持续的时间越短, 当界面导热系数大于 1 时, PCM 降温到相变温度的时间无明显差别。这是由于界面导热系数越大, 系统冷端在相变阶段的换热能力越强, 热量传递的速率越快, 相变阶段持续的时间就越短。此外, 本文采用的 PCM 的导热系数在固态时为 0.87

W/mK, 在液态时为 0.59 W/mK, p 型热电材料的导热系数在 0.9~1.3 W/mK, n 型热电材料的导热系数在 0.8~1 W/mK, 因此, 当界面导热系数大于 1 时, 界面导热系数对 PCM-TEG 耦合系统传热性能的调控变弱, 不再是影响整个系统传热的主要因素。所以, 当界面导热系数大于 1 时, PCM 随时间变化的温度逐渐趋于一致。图 2(b) 所示为 PCM-TEG 耦合系统随时间变化的输出功率, 由图可见, 在降温阶段的前半段 (大约在前 500 s), 即 PCM 还未发生相变之前, 界面导热系数越大, 热电模块的输出功率越大, 在降温的后半段 (大约在 500 s 之后), 界面导热系数越大, 热电模块的输出功率越小。这是由于界面导热系数越大, 降温阶段在相变阶段的换热能力越强, 增大了 TEG 冷热两端间的温差, 因而在该阶段 TEG 发电系统的输出功率越高。由于提升了 TEG 系统的冷端在单位时间内的热交换能力, 相对应的平稳发电时间随之缩短。图 2(c) 所示为 PCM-TEG 耦合系统界

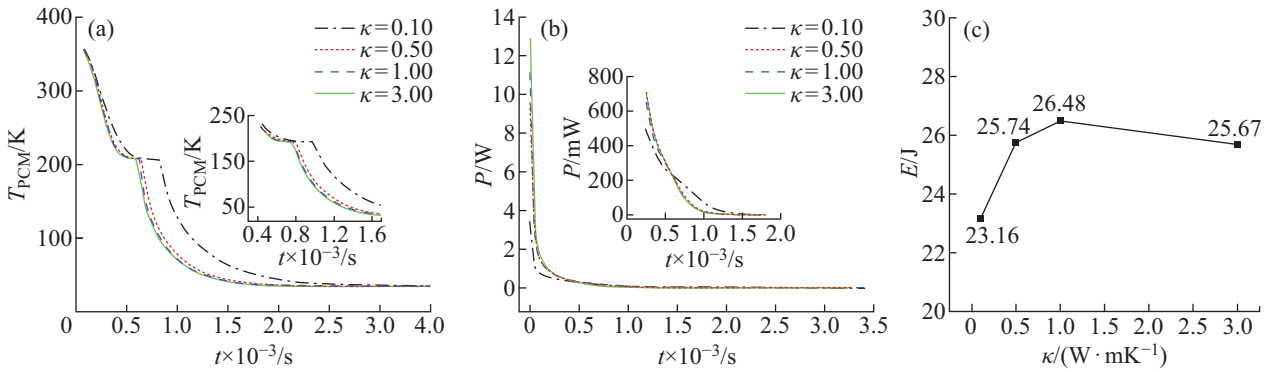


图 2 在撤去热源后的一段时间内, (a) PCM 的温度随时间变化的趋势; (b) 热电模块的输出功率随时间变化的趋势; (c) 界面导热系数不同时, 热电模块在相变阶段产生的总电能
 Fig. 2 Trends of (a) the temperature of the PCM with respect to time, (b) the output power of the thermoelectric module with respect to time, and (c) the total electrical energy generated by the thermoelectric module in the phase transition stage when the thermal conductivity of the interface is different, for a period of time after the heat source is removed

面导热系数不同时, 热电模块在相变阶段产生的总电能, 从图中可以看出, 存在最优界面热阻使得输出总电量最大, 当界面导热系数较小即界面热阻较大时, 会减少传递到 TEG 中的热量, 从而降低了系统所产生的输出总电量。当界面导热系数较大即界面热阻较小时, 会加快热量的传递, 但会降低热电模块两端的温度梯度, 温度梯度的降低会直接导致输出电能的降低。

3 结 论

本文针对热电模块与热源和冷源之间的界面导热系数对 PCM-TEG 耦合系统发电性能的影响进行了研究, 通过建立 PCM-TEG 耦合系统的三维立体模型, 运用有限元方法求解热电耦合方程, 应用 ANSYS 软件对耦合系统进行计算, 得出了在不同界面导热系数的情况下, PCM-TEG 耦合系统的最佳发电性能。结果表明, 界面导热系数越大, PCM 降温到相变温度的时间和相变阶段持续的时间越短, 当界面导热系数大于 1 时, 界面导热系数对 PCM-TEG 耦合系统传热性能的调控变弱, 不再是影响整个系统传热的主要因素。在相变前的降温阶段内, 界面导热系数越大, 热电模块的输出功率越大, 而在相变后, 界面导热系数越大, 热电模块的输出功率越小。

参考文献:

[1] CHAMPIER D. Thermoelectric generators: a review of applications [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 140: 167-181.
 [2] TANG Z B, DENG Y D, SU C Q, et al. A research on ther-

moelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2015, 5: 143-150.
 [3] LIU C X, PAN X X, ZHENG X F, et al. An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust [J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(2): 271-281.
 [4] ARANGUREN P, ASTRAIN D, PÉREZ M G. Computational and experimental study of a complete heat dissipation system using water as heat carrier placed on a thermoelectric generator [J]. Energy, 2014, 74: 346-358.
 [5] CASI Á, ARAIZ M, CATALÁN L, et al. Thermoelectric heat recovery in a real industry: from laboratory optimization to reality [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 116275.
 [6] KRAEMER D, POUDEL B, FENG H-P, et al. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration [J]. Nature materials, 2011, 10(7): 532-538.
 [7] KRAEMER D, MCENANEY K, CHIESA M, et al. Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications [J]. Solar Energy, 2012, 86(5): 1338-1350.
 [8] AKRAM R, KHAN J, RAFIQUE S, et al. Enhanced thermoelectric properties of single phase Na doped Na_xCoO_2 thermoelectric material [J]. Materials Letters, 2021, 300: 130180.
 [9] ZHANG A B, WANG B L, PANG D D, et al. Influence of leg geometry configuration and contact resistance on the performance of annular thermoelectric generators [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 166: 337-342.
 [10] ABDEREZZAK B, RANDI S. Experimental investigation

- of waste heat recovery potential from car radiator with thermoelectric generator [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, 20: 100686.
- [11] WANG S X, XIE T X, XIE H X. Experimental study of the effects of the thermal contact resistance on the performance of thermoelectric generator [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 847-853.
- [12] APERTET Y, OUERDANE H, GLAVATSKAYA O, et al. Optimal working conditions for thermoelectric generators with realistic thermal coupling [J]. *Europhysics Letters*, 2012, 97(2): 28001.
- [13] CHEN W H, HUANG S R, WANG X D, et al. Performance of a thermoelectric generator intensified by temperature oscillation [J]. *Energy*, 2017, 133: 257-269.
- [14] BOMBERGER C C, ATTIA P M, PRASAD A K, et al. Modeling passive power generation in a temporally-varying temperature environment via thermoelectrics [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 56(1/2): 152-158.
- [15] ALVA G, LIU L, HUANG X, et al. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 693-706.
- [16] CUI T F, XUAN Y M, LI Q. Design of a novel concentrating photovoltaic-thermoelectric system incorporated with phase change materials [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 112: 49-60.
- [17] ALTSTEDDE M K, RINDERKNECHT F, FRIEDRICH H. Integrating phase-change materials into automotive thermoelectric generators [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(6): 2134-2140.
- [18] HUANG K, YAN Y Y, WANG G H, et al. Improving transient performance of thermoelectric generator by integrating phase change material [J]. *Energy*, 2021, 219: 119648.
- [19] JAWORSKI M, BEDNARCZYK M, CZACHOR M. Experimental investigation of thermoelectric generator (TEG) with PCM module [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 527-533.
- [20] TU Y B, ZHU W, LU T Q, et al. A novel thermoelectric harvester based on high-performance phase change material for space application [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1194-1202.
- [21] ALMESHAAAL M A, ALTOHAMY A A. Experimental analysis of a photovoltaic thermal collector using phase change materials and copper oxide nanofluid [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 93: 112265.
- [22] LIAO X Z, LIU Y X, REN J H, et al. Investigation of a double-PCM-based thermoelectric energy-harvesting device using temperature fluctuations in an ambient environment [J]. *Energy*, 2020, 202: 117724.
- [23] YANG H Z, LI M X, WANG Z H, et al. Performance optimization for a novel two-stage thermoelectric generator with different PCMs embedding modes [J]. *Energy*, 2023, 281: 128307.
- [24] 石峰, 刘安邦, 吴子华, 等. 接触热阻对相变耦合温差发电系统的影响 [J]. *上海第二工业大学学报*, 2020, 37(4): 270-278.
- [25] CHEN L, WANG P L, SONG P N, et al. Finite element numerical simulation of temperature field in metal pattern casting system and "reverse method" of defining the thermal physical coefficient [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2007, 20(3): 217-224.
- [26] ALUȚEI A-M, SZELITZKY E, MÂNDRU D. Transient thermal state of an active braille matrix with incorporated thermal actuators by means of finite element method [J]. *Assistive Technology*, 2013, 25(1): 51-57.
- [27] JANKOWSKI N R, MCCLUSKEY F P. A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1525-1561.
- [28] DA CUNHA J P, EAMES P. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials: a review [J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 227-238.
- [29] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4): 2118-2132.