

嵌入式相变材料对热电发电器件性能的影响

田园园^{1a}, 刘安邦², 张梦君^{1a}, 王俊丽^{1a}, 谢华清^{1a}, 吴子华^{1a}, 王元元^{1a,b}

(1. 上海第二工业大学 a. 环境与材料工程学院; b. 资源循环科学与工程研究中心, 上海 201209;

2. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210014)

摘 要: 热电器件 (thermoelectric generator, TEG) 能够直接将热能转化为电能, 且具有体积小, 无运动部件, 寿命高, 运行成本低等优点。相变材料 (phase change material, PCM) 在相变时能够恒温吸收、释放大热量, 因此被广泛应用于热电发电领域以稳定热端温度。设计了一种嵌入式的相变 - 热电 (PCM-TEG) 系统, 探究了热源停止供热后的一段时间内, 相同体积不同长度的 PCM 对 TEG 发电性能的影响。结果表明, 被 PCM 包裹的长度与总长度的比值为 40% 时, PCM-TEG 系统产生的电能最多, 与不使用 PCM 相比, 热电发电器件的输出电能增加了 76.06%。PCM 的使用能够提高热电发电系统对热能的利用率, 且在使用的 PCM 的体积一定时, 需要优化 PCM 包裹热电臂的长度以提升热电发电器件的输出热能。

关键词: 热电发电; 相变材料; 器件优化; 热电性能

中图分类号: TM743

文献标志码: A

Influence of Embedded Phase Change Materials on the Performance of Thermoelectric Power Generation Devices

TIAN Yuanyuan^{1a}, LIU Anbang², ZHANG Mengjun^{1a}, WANG Junli^{1a}, XIE Huaqing^{1a},

WU Zihua^{1a}, WANG Yuanyuan^{1a,b}

(1a. School of Environmental and Materials Engineering; 1b. Research Center of Resource Recycling Science and Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014, China)

Abstract: Thermoelectric generator (TEG) can directly convert thermal energy into electrical energy, and have the advantages of small size, no moving parts, high life, and low operating cost. Phase change material (PCM) which is capable of absorbing and releasing a large amount of heat at a constant temperature during phase change, are widely used in the field of thermoelectric power generation to stabilize the hot-end temperature. An embedded PCM-TEG system is designed. The effect of PCM which has the same volume and different lengths on the power generation performance of TEG has been investigated in a period of time after the heat source stops heating. The results show that the PCM-TEG system has the optimal output power when the ratio of the length of PCM package to the total length is 40%. Compared with the case that without PCM, the output power of the TEG is increased by 76.06%. The PCM can improve the utilization of thermal energy in the thermoelectric power generation system. When the volume of the PCM used is constant, it is necessary to optimize the length of the leg of the PCM wrapped thermoelectric material to improve the output power of

收稿日期: 2019-10-08

通信作者: 王元元 (1983-), 女, 安徽亳州人, 副教授, 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: 国家自然科学基金重大项目 (51590902), 国家自然科学基金 (51876111, 51676117), 上海第二工业大学校级基金 (EGD18XQD22), 上海第二工业大学研究生基金 (EGD18YJ0014) 和上海市高原学科 - 环境科学与工程 (资源循环科学与工程) 资助

the thermoelectric generation device.

Keywords: thermoelectric power generation; phase change material; device optimizing; thermoelectric performance

0 引言

热电器件 (thermoelectric generator, TEG) 能够直接将热能转化为电能, 以其体积小、操作简单、无运动部件、寿命高、运行成本低等优点^[1-2]被广泛应用于航空航天^[3]、太阳能光热发电^[4]、余热和废热利用^[5-6]以及海上航行^[7]等领域。传统的 TEG 由热端、冷端、 p 型半导体材料和 n 型半导体材料串联而成, 为冷、热端施加不同的温度在热电臂内形成温度梯度, 以此产生电能。决定 TEG 性能的主要因素是热电材料性能和热电模块结构^[8]。虽然学者们已经做了大量研究, 但 TEG 的转换效率始终只有 10% 左右^[9-11]。转换效率低是目前 TEG 应用过程中亟待解决的问题。为了提高 TEG 的热电转换效率, 首先要提高热电优值 (ZT)^[8,12-13], 优化 TEG 的几何尺寸^[14-15], 稳定热源温度^[16-17]。热电发电器件的应用环境决定热源会有强烈波动, 因此稳定热源温度尤为重要。相变材料 (phase change material, PCM) 以其高相变潜热、高密度、吸收和释放热量时温度稳定等优点^[18], 被应用于热电领域以稳定热端温度, 有效提高热电发电系统的热电转换效率。Carneiro 等^[7]利用海洋温度梯度, 应用 TEG 为水下自主航行器提供动能, 引入 PCM 储存热能并稳定热源温度。结果表明, 使用 PCM 的热电发电系统可以提供更多的动能。Kiziroglou 等^[19]探究了 PCM 对无线飞机传感器热电发电系统连续发电性能的影响, 实验结果表明, 使用 PCM 可以为无线飞机提供足够的电能。Kiziroglou 等^[20]通过数值模拟和实验相结合的方法, 探究了 PCM 的储热功能在热电采暖中对热电发电器件发电性能的影响。结果表明, 使用 PCM 能够很好地稳定热源温度, 极大地提高 TEG 的总发电量。Cui 等^[21]建立了一种新型的光伏-相变-热电 (PV-PCM-TE) 混合系统, 将 PCM 镶嵌在 PV 模块和 TE 模块之间, 吸收 PV 模块中多余热量的同时为 TE 模块提供稳定的热能。结果表明, 采用 PCM 可以显著提高 PV-PCM-TE 系统的性能。Altstedde 等^[22]将 PCM 应用于汽车热电发电器件的热端, 稳定热端温度。结果表明, PCM 能较好地

稳定热源温度, 提高 TEG 的发电性能。Atouei 等^[23]设计了 PCM 与 TE 模块组成的热电联产两级发电系统。PCM 镶嵌在一、二级之间, 作为第一级的冷端, 第二级的热端。结果表明, 相比于第一级或第二级单独发电, 两级同时发电产生的电能最多。上述研究表明, PCM 能够很好地稳定热端温度, 在热源停止供热后为热电发电续能, 延长 TEG 的发电时长。然而, PCM 处于热源与热电发电器之间, 在稳定热端温度的同时, 阻碍了热源和热电发电器件热端之间的传热。基于此, Jo 等^[24]提出了一种嵌入式的 PCM-TEG 装置。该装置以聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 为主体, 内部设有空间用于存放 TEG 和 PCM。PCM 包裹在热电臂靠近热端的周围用于吸收热源散失的热量。实验对比了有无 PCM 的两种发电情况, 结果表明, 包裹了 PCM 的装置具有较好的发电性能。Liu 等^[25]在前者的基础上研究了 PCM 的尺寸 (横截面和高度) 对单腿 TEG 发电性能的影响。结果表明, TEG 的总发电量随着 PCM 横截面和高度的增加而增大。然而, 以上工作忽略了 PCM 体积相同时, PCM 的尺寸对热电发电器件性能的影响。基于热源与热电发电器件热端直接接触以保证热端传热的思路, 本文设计了嵌入式的 PCM-TEG 系统, 将 PCM 包裹在热电臂靠近热端的周围, 探究了热源停止供热后的一定时间内, 相同体积不同长度的 PCM 对 TEG 发电性能的影响, 以探究 PCM 包裹热电臂的长度的优化值。

1 研究模型与方法

图 1 为 PCM-TEG 系统的示意图, 其由单腿 TEG 和镶嵌在热电臂周围的 PCM 组成。热端和冷端的温度分别为 T_H 和 T_C , 外接电阻为 R 。本文采用的 PCM 为硬脂酸, 其热性能参数如表 1 所示^[26]。硬脂酸作为有机储能材料具有化学稳定性好、相变潜热大、成本低等优点。PCM 的初始温度为 373 K。本研究中, 基于热电发电器件的尺寸, 设定 PCM 的体积为 800 mm^3 , 宽度与厚度相同, PCM 包裹热电臂的高度为 $h(1 \leq h \leq 5 \text{ mm})$ 。为了更好地

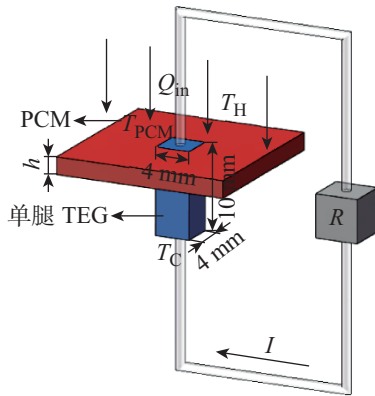


图 1 PCM-TEG 模型图

Fig. 1 The schematic of PCM-TEG

表 1 硬脂酸的性能参数^[26]Tab. 1 The properties of stearic acid^[26]

相变温度/K	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)	比热容/[kJ·(kg·K) ⁻¹]	热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)
327	157	1.76 (固) 2.27 (液)	0.29 (固) 0.17 (液)	940 (固)

在 PCM-TEG 系统中, 应用热力学第一定律建立瞬态导热问题的控制方程^[7,28-29]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} \quad (1)$$

式中: t 为时间, s; T 为空间 (x, y, z) 和 t 相关的温度, K; $\partial T / \partial t$ 为某一点温度相对于 t 的变化率; α 为热扩散系数; $\dot{q}$ 为单位体积内热量的生成率; ρ 为密度, kg/m³; C_p 为恒压比热容, J/(kg·K)。 ∇ 为揭示物体温度梯度的拉普拉斯算子。

利用 Galerkin 加权残差法对体积进行积分^[30], 同时考虑边界条件 (温度、热流和对流的时空依赖性) 和形状函数的替换^[31], 通过 ANSYS 进行有限元分析。式 (1) 可以写成下列矩阵形式:

$$[C_t]\{\dot{T}\} + ([K_{tb}] + [K_{tc}])\{T\} = \{Q_c\} \quad (2)$$

式中: t 、 b 和 c 分别为时间、扩散系数和对流表面; $[C_t]$ 为比热矩阵, J/(kg·K); $\{\dot{T}\}$ 为每个节点的温度变化率, K/s; $[K_{tb}]$ 和 $[K_{tc}]$ 分别为扩散导热矩阵和对流表面导热矩阵; $\{T\}$ 为节点温度, K; $\{Q_c\}$ 为对流表面热流矢量。基于初始参数和材料特性, 在 ANSYS 中采用 Newton-Raphson 算法求解离散的非线性方程, 在给定的时间间隔内求解 $\{Q_c\}$ ^[32]。

在降温过程中 PCM 经历液相到固相的转变, 即

解释研究结果, 引入了热电臂的冷热端温差 $\Delta T (\Delta T = T_H - T_C)$ 。PCM-TEG 系统中的热电材料为常见的低温热电材料 p 型 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ ^[27]。当 TEG 冷、热两端存在温度差 ($T_H > T_C$) 并在电路中串联一个负载时, 由于 Seebeck 效应闭合回路中产生电流 I 。计算中, 采用了两个假设: (1) 环境和 PCM-TEG 系统之间不存在热交换, 即真空条件下; (2) PCM 与热电臂之间的接触热阻忽略不计。这两个假设不会影响本文的主要结论。

凝固过程。在 ANSYS 中, 利用焓模型考虑了冷却过程中相变释放的潜热能, 并将焓 (H) 定义为温度的函数, 由所用材料的比热 (C)、 ρ 和 T 来表示^[33]:

$$H = \int \rho C(T) dT \quad (3)$$

式 (3) 包含了 3 种状态的 PCM 相对于 T 的 H 值^[34]。

$$H_s(T) = \int_{T_0}^{T_s} \rho C_{(s)}(T) dT, \quad T < T_s \quad (4)$$

$$H_m(T) = \int_{T_0}^{T_s} \rho C_{(s)}(T) dT + \int_{T_s}^{T_1} \left[\rho \frac{H_1}{T_1 - T_s} + \rho C_{(m)}(T) \right] dT \quad (5)$$

$$T_s \leq T \leq T_1$$

$$H_l(T) = \int_{T_0}^{T_s} \rho C_{(s)}(T) dT + \int_{T_s}^{T_1} \rho C_{(m)} dT + \int_{T_1}^{T_+} \rho C_{(l)}(T) dT, \quad T > T_1 \quad (6)$$

式中: H_s 、 H_m 、 H_l 分别为固体、固液混合态和液体 PCM 相对于 T 的焓值, J/m³; H_1 为相变潜热, kJ/kg; T_s 为固相线温度, K; T_0 、 T_1 和 T_+ 分别为下限温度、液相线温度和上限温度, K; $C_{(s)}$ 、 $C_{(l)}$ 和 $C_{(m)}$ 分别为固体比热、液体比热及固体和液体的平均比热,

J/(kg·K)。

整合并对式 (4)~(6) 进行积分可得^[33]:

$$H_s = \rho C_{(s)}(T_s - T_0) \quad (7)$$

$$H_m = H_s + \rho C_{(*)}(T_1 - T_s) \quad (8)$$

$$H_l = H_m + \rho C_{(l)}(T_+ - T_1) \quad (9)$$

式中, $C_{(*)}$ 为固液混合区比热容, J/(kg·K)。可定义为

$$C_{(*)} = C_{(m)} + \frac{H_l}{T_1 - T_s} \quad (10)$$

式 (7)~(9) 定义了温度界限后, 可用来定义 PCM 的 H 与 T 的关系曲线。通过 ANSYS 软件的 Transient-Thermal 模块, 利用以上焓法公式模拟 PCM-TEG 系统在热源停止供热后, PCM 做为热源继续为 TEG 供热的一段时间内, 系统随时间变化的温度分布。将获得的 TEG 的瞬态温度分布数据导入 ANSYS 软件的 Thermal-Electric 模块, 利用有限元方法计算出 TEG 随时间变化的输出电流 (I , mA) 和输出电压 (U , mV), 继而得到随 t 变化的输出功率 (P , mW) 和总产能 (E , mJ)

$$P = UI \quad (11)$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (12)$$

2 结果与讨论

在 PCM-TEG 系统中, 热电臂与热源直接接触, 由于 $k_{\text{PCM}} < k_{\text{热电臂}}$, 热量优先在 TEG 模块中传递, 相变模块吸收没有被热电发电器件吸收的热量并储存。当热源停止供热后, PCM 作为热源继续为 TEG 供热。本文研究了热源停止供热后, PCM 作为热源继续为 TEG 供能的一定时间段内, 体积不变的 PCM 包裹热电臂的高度变化时对 TEG 发电性能的影响。在计算中, 假设 PCM 温度为 373 K 时热源停止供热, 冷端温度固定为 283 K, 外接电阻与内阻相等, 固定为 15 mΩ。为了研究 PCM 包裹热电臂的高度 h 对 TEG 发电性能的影响, 将 h 固定在 1~5 mm 间变化。

图 2 为 PCM 的温度随着时间变化的性质。由图 2 可知, PCM 包裹热电臂的高度越长, 相变阶段维持的时间就越短, 这是因为假设 PCM-TEG 系统

与外界无热量交换、同时忽略了 PCM 与热电臂之间的接触热阻, PCM 储存的热量全部用来发电所造成的。因此, PCM 与热电臂的接触面积越大, 热量传递就越快。图 3 为热电发电器件的性能随时间变化的性质。从图 3(a)~(c) 可以看出, 在 PCM 的相变阶段, PCM 包裹热电臂长度越长, PCM-TEG 系统的瞬时 U 、 I 和 P 越大且下降得越快。由图 3(d) 可以清晰地看出, 热源停止供热后的 14 700 s 内, 当 PCM 包裹热电臂的长度 $h = 4$ mm 时, 即被 PCM 包裹的长度与总长度的比值为 40% 时, PCM-TEG 系统产生的电能最多。且此时产生的电能比 $h = 1$ mm 时增加了 42.39%。即在保持 PCM 体积一定的情况下, PCM 包裹热电臂的长度存在最优值, 可以大幅提高热电发电器件的输出电能。同时注意到, 与不使用 PCM 相比, 取 PCM 包裹长度最优的条件 ($h = 4$ mm) 时, 输出电能增加了 76.06%。为了探究 PCM-TEG 系统的瞬时 U 、 I 和 P 随着时间变化的原因, 探究了热电臂的 ΔT 与时间的变化关系, 如图 4 所示。由图可知, h 越大, ΔT 在相变平台处的值越大, 且下降越快; h 越小, ΔT 在相变平台处的值越小, 且下降越慢。热电臂的 ΔT 随时间的变化是导致 PCM-TEG 系统产生的总能量随着 h 变化有最大值的重要原因。由此可见, PCM 的使用能够提高热电发电系统对热能的利用率, 且在使用的 PCM 的体积一定时, 需要优化 PCM 包裹热电臂的长度以提升热电发电器件的输出热能。

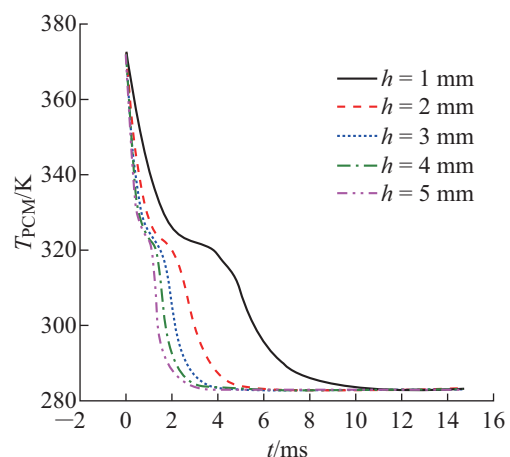


图 2 PCM 随时间变化的温度

Fig. 2 The temperature of PCM varies with time

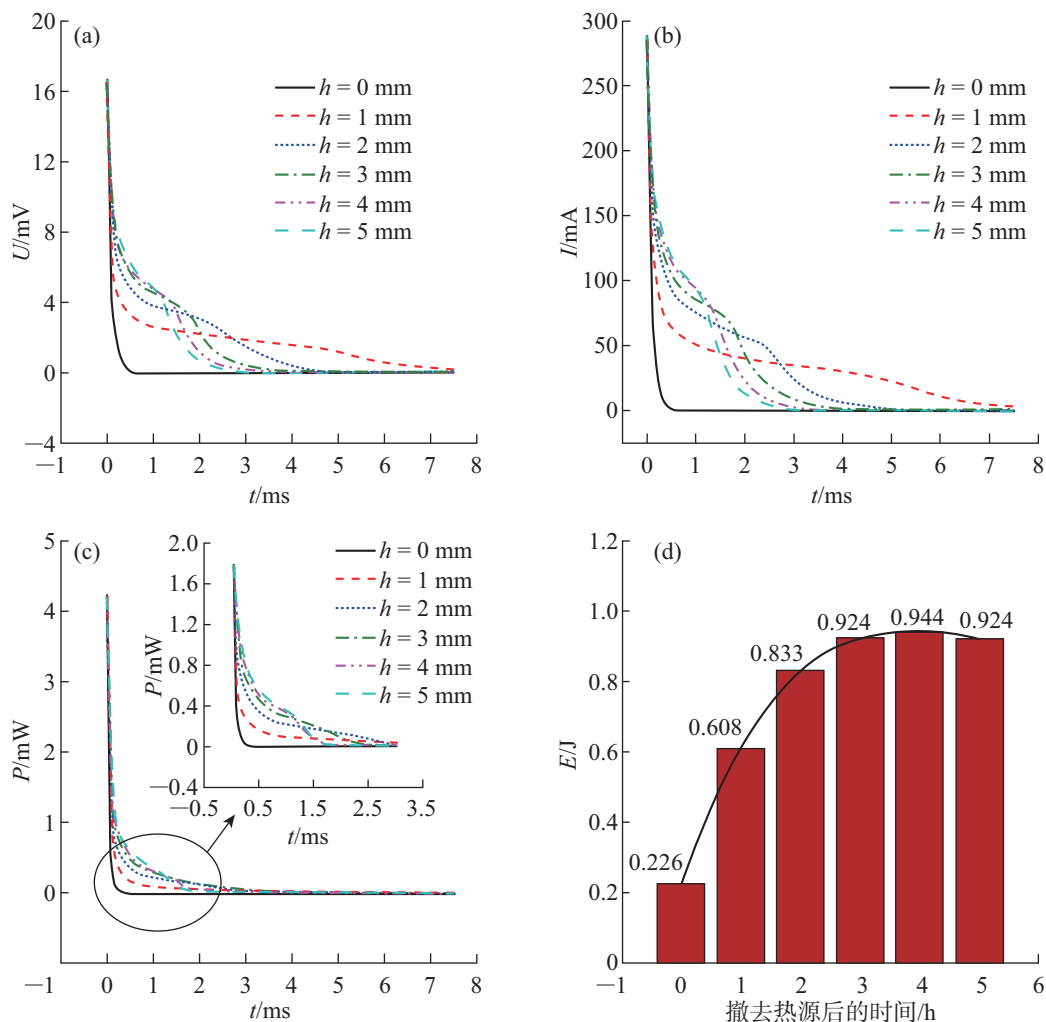


图3 PCM-TEG 系统的 (a) U 、(b) I 、(c) P 及 (d) 撤去热源后的 14 700 s 内产生的总能量随时间变化的性质

Fig. 3 (a) U , (b) I , (c) P and (d) the total energy within 14 700 s after the heat source removed of PCM-TEG system varies with time

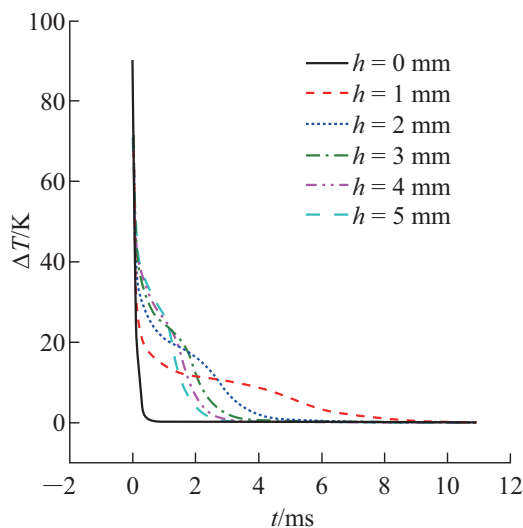


图4 PCM-TEG 系统中电臂冷热端的 ΔT 随时间变化的性质

Fig. 4 The ΔT between the hot- and cold-ends of the thermoelectric leg varies with time in the PCM-TEG system

3 结 论

PCM 与热电发电器件耦合, 能够极大地提高 TEG 对热能的利用率。本文设计了一个嵌入式的 PCM-TEG 系统, 将 PCM 镶嵌在 TEG 的热电臂靠近热端的外围。利用有限元方法研究了在 PCM 的体积保持不变时, 改变 PCM 包裹热电臂的长度对热电发电器件的性能的影响, 并且与不采用 PCM 的热电发电系统进行了对比。结果表明, 使用 PCM 有效提高了 TEG 的发电性能。撤去热源后, PCM-TEG 系统产生的总电能随着 PCM 包裹热电臂的长度变化且存在最大值。当 $h = 4$ mm 时, PCM-TEG 系统产生的电能最多, 与 $h = 1$ mm 时相比, 电能增加了 42.39%。同时, 与不使用 PCM 相比, 当采用了最优的 PCM 包裹条件时, 热电发电器件的输出电能增加了 76.06%。因此, PCM 的应用极大地提高 TEG

对热能的利用率, 并且 PCM 包裹热电臂的长度在 PCM 体积保持不变的情况下存在最优值。

参考文献:

- [1] CHAMPIER D. Thermoelectric generators: A review of applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 140: 167-181.
- [2] WANG H, MCCARTY R, SALVADOR J R, et al. Determination of thermoelectric module efficiency: A survey [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(6): 2274-2286.
- [3] JANAK L, ANCIK Z, VETISKA J, et al. Thermoelectric generator based on MEMS module as an electric power backup in aerospace applications [J]. *Mater. Today: Proc.*, 2015, 2(2): 865-870.
- [4] ABDUL-WAHAB S A, ELKAMEL A, AL-DAMKHI A M, et al. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(1): 30-34.
- [5] KUMAR S, HEISTER S D, XU X F, et al. Thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems part I: Numerical modeling and baseline model analysis [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(4): 665-674.
- [6] LEBLANC S. Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2014, 1/2: 26-35.
- [7] CARNEIRO F J, ALMEIDA F G. Model and simulation of the energy retrieved by thermoelectric generators in an underwater glider [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 163: 38-49.
- [8] DRESSELLHAUS M S, DRESSELLHAUS G, SUN X, et al. Low-dimensional thermoelectric materials [J]. *Phys Solid State*, 1999, 41(5): 679-682.
- [9] LIU W S, JIE Q, KIM H S, et al. Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices [J]. *Acta Materialia*, 2015, 87: 357-376.
- [10] ROWE D M. Thermoelectrics an environmentally-friendly source of electrical power [J]. *Renewable Energy*, 1999, 16(1/2/3/4): 1251-1256.
- [11] SAJID M, HASSAN I, RAHMAN A. An overview of cooling of thermoelectric devices [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 15-22.
- [12] DATE A, DATE A, DIXON C, et al. Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 371-381.
- [13] TWAHA S, ZHU J, YAN Y Y, et al. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 698-726.
- [14] IBRAHIM A, RAHNAMAYAN S, MARTIN V M, et al. Multi-objective thermal analysis of a thermoelectric device: Influence of geometric features on device characteristics [J]. *Energy*, 2014, 77: 305-317.
- [15] REZANIA A, ROSENDAHL L. A, YIN H. Parametric optimization of thermoelectric elements footprint for maximum power generation [J]. *J Power Sources*, 2014, 255: 151-156.
- [16] MENG J H, ZHANG X X, WANG X D. Dynamic response characteristics of thermoelectric generator predicted by a three-dimensional heat-electricity coupled model [J]. *J Power Sources*, 2014, 245: 262-269.
- [17] MONTECUCCO A, KNOX A R. Accurate simulation of thermoelectric power generating systems [J]. *Appl Energy*, 2014, 118: 166-172.
- [18] DEMIRBAS M F. Thermal Energy storage and phase change materials: An overview [J]. *Energy Sources Part B: Economics, Planning and Policy*, 2006, 1(1): 85-95.
- [19] KIZIROGLOU M E, ELEFSINIOTIS A, WRIGHT S W, et al. Performance of phase change materials for heat storage thermoelectric harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(19): 193902.
- [20] KIZIROGLOU M E, BECKER T, WRIGHT S W, et al. Thermoelectric generator design in dynamic thermoelectric energy harvesting [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 773(1): 012025.
- [21] 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.
- [22] ALTSTEDDE K M, RINDERKNECHT F, FRIEDRICH H. Integrating phase-change materials into automotive thermoelectric generators [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(6): 2134-2140.
- [23] ATOU EI S A, REZANIA A, RANJBAR A A, et al. Protection and thermal management of thermoelectric generator system using phase change materials: An experimental investigation [J]. *Energy*, 2018, 156: 311-318.
- [24] JO S E, KIM M S, KIM M K, et al. Power generation of a thermoelectric generator with phase change materials [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(11): 115008.
- [25] LIU A B, WU Z H, XIE H Q, et al. Effect of geometrical structure of embedded phase change material on the power generation of thermoelectric module [J]. *Thermal Science*,

- 2018, 22(6): 2691-2698.
- [26] JANKOWSKI N R, MCCLUSKEY F P. A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1525-1561.
- [27] POUDEL B, HAO Q, MA Y, et al. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys [J]. *Science*, 2008, 320(5876): 634-638.
- [28] HAQUE E U, HAMPSON P R. Modelling phase change in a 3D thermal transient analysis [J]. *The International Journal of Multiphysics*, 2014, 8(1): 49-68.
- [29] LEI Z Z, KANG H T, LIU Y G. Finite element analysis for transient thermal characteristics of resistance spot welding process with three sheets assemblies [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 16: 622-631.
- [30] ELMARYAMI A S A, OMAR B. Determination LHP of axisymmetric transient molybdenum steel-4037H quenched in sea water by developing 1-D mathematical model [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2012, 18(3): 203-221.
- [31] JAFARI A, HAGHPANAHI M, SEYEDEIN S. Modeling of heat transfer and solidification of droplet/substrate in microcasting SDM process [J]. *IUST International Journal of Engineering Science*, 2009, 19: 187-198.
- [32] KARUNAKARAN N, BALASUBRAMANIAN V. Multipurpose three dimensional finite element procedure for thermal analysis in pulsed current gas tungsten arc welding of AZ 31B magnesium alloy sheets [J]. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2011, 5(3): 267-274.
- [33] ALUTEI 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: The Official Journal of RESNA*, 2013, 25(1): 51-57.
- [34] 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.

简 讯

上海第二工业大学与浦东新区生态环境局举行合作揭牌仪式

10月11日上午,我校与上海市浦东新区生态环境局合作揭牌仪式在学术交流中心201会议室举行。今后,双方将在环境管理、环保干部培训、人才交流与培养等方面进一步加强合作,发挥各自资源优势,携手共建绿色浦东。

徐玉芳副校长在致辞中指出,我校环境工程团队依托学科优势,近年来积极参与浦东环境整治、污染源普查、许可证核发等项目,希望以此次合作签约为契机,推进政校合作进程,更好地服务浦东新区的环保建设。浦东新区生态环境局副局长黄伟在讲话中表示,基地的建立将对新区环保干部队伍建设起到积极作用,希望双方能发挥各自优势,共同提升新区总体环境管理能力、服务水平以及人才队伍水平,达到合作共赢的目的。

今后,我校将充分发挥教学资源与人才优势,做好环保专业人才的培训与干部培养,浦东生态环境局也将为我校环境工程硕士研究生提供学习和实践的机会和平台,促进研究生专业实践能力的进一步提升。此前,以环境工程系系主任关杰教授为首的教师和研究生团队,承担了浦东新区全国第二次污染源普查项目,师生们用了一年半的时间奔赴新区各家企业开展污染源普查,在服务地方的同时提升学生责任感与使命感,共同推动新区的绿色发展。研究生团队项目“打响蓝天保卫战——上海市曹路工业企业污染排放及治理状况调研项目”成功入围“知行杯”上海市大学生社会实践项目决赛,彰显了学校在实践中培养学生专业能力和家国情怀的成效。此次学校与浦东新区生态环境局的合作,正是不忘环保初心、牢记育人使命的体现。