

基于热超构材料的能量收集与热电转换特性*

李一鸣¹⁾ 王鑫^{1)†} 李昊¹⁾ 杜宪²⁾ 孙鹏²⁾

1) (内蒙古大学电子信息工程学院, 呼和浩特 010021)

2) (内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070)

(2022 年 5 月 29 日收到; 2022 年 6 月 27 日收到修改稿)

针对温差发电器的局限性, 利用热超构材料的热场调控特性, 提出了将温差发电机与二维扇形热超构材料能量收集结构进行集成, 从而改善温差发电器的热电转换效率. 基于有限元多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 研究了不同材料对能量收集结构热场调控性能的影响, 确定材料后对其进行热电性能仿真, 仿真结果表明, 能量收集结构可实现热流的有效调控, 在同一仿真条件下能量收集中心的温度梯度相比自然材料提高了 8 倍. 对不同尺寸温差发电机发电量进行研究, 在此基础上综合考虑加工精度和测试难度, 完成了能量收集结构 3 维建模及加工制造. 搭建实验测试系统, 使用热成像仪观测能量收集结构的温度分布, 测试实验结果显示该能量收集结构可以有效调控热场, 在相同冷热源条件下相比自然材料结构可以将温差发电机的工作效率提高 3.2 倍, 对推动温差发电技术更加迅速地发展具有一定的现实意义.

关键词: 温差发电机, 热超构材料, 热场调控, 热能收集**PACS:** 73.50.Lw, 81.05.Xj, 44.90.+c, 07.05.Tp**DOI:** 10.7498/aps.71.20221061

1 引言

温差发电机诞生于 20 世纪 40 年代, 是基于塞贝克效应将热能直接转换为电能的一种能量转换装置, 它具有结构简单、无运动部件、转换过程稳定、输出能量连续、幅度变化缓慢、绿色环保等优点^[1]. 依托热电材料和器件的飞速发展, 温差发电技术越来越受到学术界和工业界的关注^[2]. 在热电材料领域通过量子限制、调制掺杂、能带收敛及共振态工程或引入各种晶格缺陷作为声子散射中心等使得无量纲热电优值 (ZT) 大大提高^[3–12]. 2021 年, 南京工业大学 Yin 等^[13] 通过将 CuBiSe_2 引入到热电材料 (GeTe) 中协同优化热电输运性能, 在 723 K 时获得了 2.2 的高热电优值. 同时, 热电器件转换效率连续刷新纪录, 单级组件高达 9%, 分段级联

组件更高达 12%^[14–17]. 2020 年, 中国科学院上海硅酸盐研究所的 Chu 等^[18] 在电极和热电材料之间引入铌 (Nb) 作为阻挡层, 实现了电极界面的优化, 制作了 8 对 skutterudite (SKD) 组件, 在 872 K 的热端温度下, 将单级组件的转换效率提高至 10.2%.

尽管当前温差发电器的热电转换效率相比其诞生时的 2% 有了很大提升^[19], 但是仍然存在热能收集效率低、散失快、转换效率低等问题, 而在热能的收集利用过程中无法避免的是热能的损失, 且这一部分占据的比重很大, 因此, 若能提高热能的收集效率, 则其利用效率也可以得到显著的提高. 提高能量收集与转换效率的关键在于将能量收集装置与能量来源进行良好匹配, 通常的做法是选择合适的转化媒质. 然而, 自然界中传统材料的导热系数通常是相对均一的, 且具有各向同性的特性, 导致其在热能的收集方面受到了制约.

* 国家级大学生创新创业训练计划 (批准号: 202110126036) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangxin219@imu.edu.cn

超材料作为一种新型的人工材料,可以根据应用需求进行空间上的结构设计,实现自然材料所不具备的超常物理性质,体现在热学方面即可以调控热流进而调控热场,通过热流的集中与温度梯度的提高,实现热场的精准调控与热能的高效收集.因此,采用具备超常物理性质的超材料取代自然材料用于设计新的能量转换媒介,可实现优异的能量收集性能.与声、光的波动行为不同,热传导满足的是扩散方程,扩散方程和波动方程的物理机制迥异,因此,以扩散方程为主导的热学超材料的研究发展较晚.

然而,自从变换光学、坐标变换与有效媒质等应用于扩散场的热学超材料之后,热学超材料有了迅猛的发展^[20].2008年,热隐身斗篷理论(thermal cloak)首次问世^[21].因热超构材料给热电操控提供了前所未有的自由度,2010年,Li等^[22]把热与电复合起来,热电双功能隐身斗篷相继提出.其后,有大量的相关工作陆续被报道,从二维热隐身、三维薄层热隐身斗篷到二维热流反转、二维热流集中、多功能隐身斗篷、热场和电场调控等都在理论、仿真和实验上得到了验证^[21,23–31],同时热超构材料的诞生使得许多新奇的热学现象成为可能,热幻像、无能量恒温器甚至负能量恒温器也逐渐成为现实^[32–34],在很多领域表现出巨大的应用前景,具备战略性重大突破的可能.

对于热聚集器而言,目前主流的结构有二维结构和三维结构.2015年,新加坡国立大学的仇成伟教授研究组^[35]提出了热场调控与热能收集的三维超材料模型;2017年,Liu等^[36]提出了基于三维花状超材料的热场调控与热能收集器,但是由于三维能量收集结构具有复杂性,需要采用较高精度的微纳加工技术进行精准制备,且实验测试相对困难,因此三维热学超材料基本上还处于理论验证与仿真探索的阶段,短时间内难以将其进行推广和应用.2015年,新加坡国立大学的Han等^[37]使用Cu和PDMS构成的扇形单元热学超材料获得了对热流位置的精确控制,可以实现热流聚焦、均匀加热、热收集等功能.相比三维结构,二维热学超材料结构因结构多样、相对简单且无尺寸效应,可以使用3D打印或机械加工的方法进行制造,降低了加工与设计的难度;平面结构可以直接利用红外热成像仪评估其热学性能等优点,被广泛应用于热能收集、热二极管、热场与电场的多物理场调控等^[38].

综上所述,针对目前温差发电器的局限性,结合热超构材料的热能收集特性,本文提出将基于热超构材料的能量收集结构与温差发电机进行集成,实现热能的高效收集与转换.首先,为取代自然材料,实现热场的精准调控与热能的高效收集,基于COMSOL Multiphysics 仿真软件对二维扇形能量收集结构进行了设计、优化.其次,通过仿真验证了能量收集结构的热、电性能.在此基础上完成了该结构的加工制备,最终搭建实验系统以温差发电机发电量为指标对能量收集结构和自然材料结构进行对照实验,测试结果表明能量收集结构可以有效提高温差发电机发电量,突破自然材料的局限性,改善温差发电机工作效率.

2 基于热超构材料的热场调控与热能收集特性

2.1 能量收集结构设计

热超构材料能量收集结构如图1所示,整个能量收集结构由3部分组成,分别是基底(灰色)、能量收集中心(黄色)以及由若干高导热系数(红色)和低导热系数材料(蓝色)的小扇形交替排布组成的扇形区域.为了实现能量收集结构与温差发电片的有效集成,将能量收集中心设计为矩形结构.

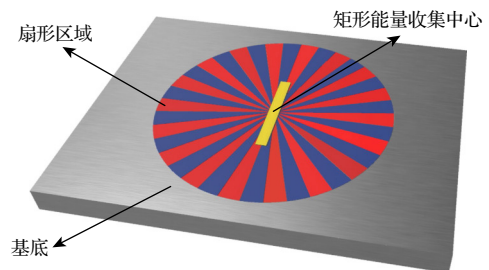


图1 二维扇形能量收集结构示意图

Fig. 1. Schematic of the fan-shaped energy harvesting structure.

本文将依托 COMSOL Multiphysics 仿真软件中的固体传热模块、电流模块以及热电效应多物理场接口,进行热学超构材料的结构优化及热电性能仿真.传热过程采用热传导方程(1)进行模拟计算:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q, \quad (1)$$

达到稳态后的热传导方程为

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = Q, \quad (2)$$

传导热通量 q 以及热电效应产生的电流密度 J 分

别表示为

$$q = -k\nabla T + PJ, \quad (3)$$

$$J = -k(\nabla V + S\nabla T), \quad (4)$$

其中 ρ 表示质量密度, C 表示热容, T 表示温度, k 表示热导率, Q 表示热源. P 表示帕尔贴系数, S 表示塞贝克系数, V 表示电位.

为进行仿真模拟, 首先对热学仿真条件进行设置, 选择平板热源, 温度为 370 K, 热沉温度为 270 K, 温度梯度为垂直方向, 并将左右边界设置为热绝缘, 热流线设置为均匀密度. 同时设定电流模块及热电效应接口相关参数, 选择矩形能量收集中心为作用域并将初始电势设置为零, 对矩形能量收集中心最下端做接地处理.

2.2 能量收集结构的材料选择

能量收集结构能够对热流进行有效调控, 其关键在于将具有不同导热系数材料进行组合实现了空间导热系数的各向异性. 不同材料的契合程度和加工精度对聚热效果有较大的影响, 因此拟选择加工精度高、具有一体化成型优点的 3D 打印技术对能量收集结构进行加工.

树脂、铝合金和不锈钢是 3D 打印技术中比较常见的材料. 耐高温树脂 9500 是坚固、耐高温零件的首选材料, 并且可以方便快捷地进行高精度的 3D 打印加工. 耐高温树脂 9500 能够提供类似于工程塑料 (ABS 和 PBT) 的热学性能, 并且克服了 ABS 材料在 3D 打印过程中出现易翘曲、易变形、精度不足等问题^[39,40]. 在 1.81 MPa 压强条件下, 其热变形温度为 119 °C, 以其优良的高耐热性, 优秀的细节分辨率和刚度, 成为各种应用包括模具、风洞试验、高温试验、电外壳和汽车壳体的理想材料.

铝合金 (AlSi10Mg) 是一种典型的铸造合金, 具有良好的铸造性能, 可用于薄壁和复杂几何设计的 3D 打印或精密机械加工. 该种合金包含了硅和镁, 使得强度和硬度相对于纯铝显著增强, 兼具良好的热学性能和动态特性、较低的成本及加工难度, 广泛的应用于散热器部件的制造^[41]. 树脂和铝合金的导热系数分别为 0.2 W/(m·K) 和 155 W/(m·K), 相差 3 个数量级. 将树脂与铝合金交替排布, 并对其热流调控特性进行仿真, 结果如图 2 所示. 当热流流经铝合金 (A 标记) 与树脂 (B 标记) 间隔分布

的矩形区域时热流只从铝合金部分流过, 因此铝合金与树脂的组合可以实现热流的调控.

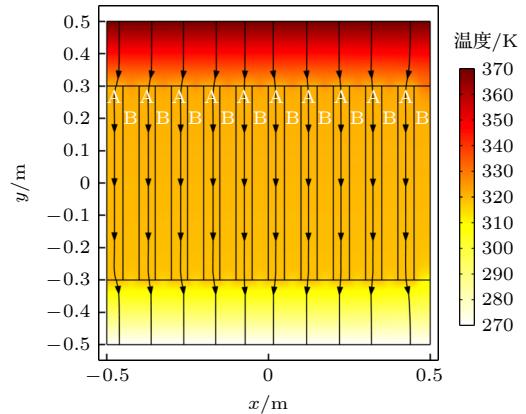


图 2 铝合金与树脂交替排布实现热流调控

Fig. 2. Control of the heat flow by alternately arranging the AlSi10Mg and resin.

能量收集结构的基底需与冷热源直接接触, 承担热流传递的任务, 对能量收集结构热场调控性能具有较大的影响, 因此对基底材料的热传导能力有一定的要求. 如果使用树脂材料作为基底, 即使实现了热流的调控, 但是因树脂导热性能不佳, 在矩形能量收集区域难以形成较大的温差, 无法改善热电器件的工作效率. 与铝合金相比, 不锈钢材料的导热能力较弱. 在不锈钢基底中热流从热源出发后更多地经过扇形区域, 而不是直接沿着能量收集结构的两侧边界流入热沉, 进而流入矩形能量收集中心的热流相比铝合金基底更多. 同时, 流入矩形能量收集中心的热流流出该区域的速度也更慢. 综上所述, 在不锈钢基底中可以更好地实现热流汇集, 因此在能量收集中心可以获得更高的温度梯度.

本文以矩形能量收集中心的温度梯度为指标通过热学仿真研究了分别以铝合金和不锈钢作为基底的两种能量收集结构的热场调控性能. 首先对二维能量收集结构进行初步建模, 如图 1 所示. 其中, 扇形区域内红色及蓝色的小扇形分别选用铝合金及耐高温树脂材料, 灰色部分即为基底. 采用不同基底材料时, 能量收集结构的温度梯度仿真结果如图 3 所示, 由此可见, 采用不锈钢基底时矩形能量收集中心的温度梯度为铝合金基底的 2.89 倍.

综上所述, 在扇形区域, 低导热系数材料选择导热系数为 0.2 W/(m·K) 的耐高温树脂 9500, 选择导热系数为 155 W/(m·K) 的铝合金 (AlSi10Mg) 作为高导热系数材料, 通过耐高温树脂和铝合金的

交替排布实现空间导热系数的各向异性, 同时选择 304 不锈钢作为基底材料.

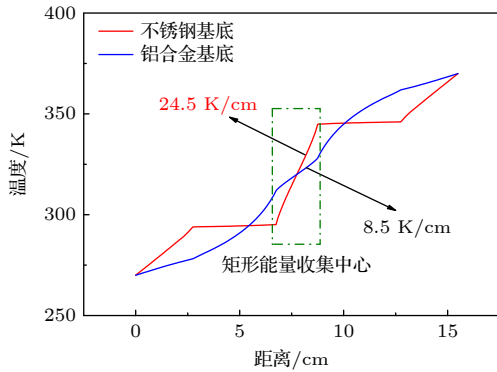


图 3 采用不锈钢基底与铝合金基底的能量收集结构温度梯度图

Fig. 3. Temperature gradients of energy harvesting structures respectively using stainless steel or AlSi10Mg substrate.

2.3 能量收集结构的热、电性能仿真

2.3.1 能量收集结构的热学性能仿真

单一不锈钢结构的温度与热流分布的仿真结果如图 4(a) 所示, 黑色箭头流线代表热流线. 仿真结果表明, 单一不锈钢结构具有导热系数的各向同性, 热流保持均匀分布沿同一方向从热源流入热沉, 因此单一不锈钢结构的温度分布均匀, 矩形能量收集中心上端温度为 322 K, 下端温度为 317 K, 温差仅有 5 K.

热超构材料能量收集结构的温度与热流分布的仿真结果如图 4(b) 所示. 热流从热源流出, 在流经扇形区域前保持均匀分布, 靠近扇形区域后热流方向变为径向, 沿着高导热系数的铝合金小扇形流

入矩形能量收集中心并在此形成汇集后又沿着扇形区域的径向从高导热系数的铝合金流出, 最终在基底处恢复均匀分布后流入热沉. 观察温度分布图可以看出, 由于等温线向矩形能量收集中心发生了弯曲, 因此同一水平高度上矩形能量收集中心附近颜色明显加深, 代表了温度的升高. 仿真结果显示, 矩形能量收集中心上端温度为 340 K, 下端温度为 300 K, 温差达到 40 K, 较单一不锈钢结构温差提高了 8 倍.

2.3.2 能量收集结构的热电效应仿真

为更加直观研究能量收集结构对温差发电器工作效率的影响, 在相同仿真条件设置下本文进行了多物理场耦合热电效应仿真. 在单一不锈钢结构和热超构材料能量收集结构的矩形中心均放置一块常见热电材料碲化铋 (Bi_2Te_3) 以模拟温差发电器件, 模拟所用到的基本参数有恒压热容、密度、相对介电常数、塞贝克系数、导热系数及电导率, 其中, 后 3 个均为温度的函数. 在模拟温度范围内 (270—370 K), 碲化铋材料的基本参数取值范围如表 1 所示.

表 1 Bi_2Te_3 材料的基本参数
Table 1. Basic parameters of Bi_2Te_3 material.

参数名称	取值范围	单位
恒压热容	154	J/(kg·K)
密度	7700	kg/m ³
塞贝克系数	2.1×10^{-4} — 2.3×10^{-4}	V/K
导热系数	1.3—1.6	W/(m·K)
电导率	0.5×10^5 — 0.7×10^5	S/m
相对介电常数	1	量纲一

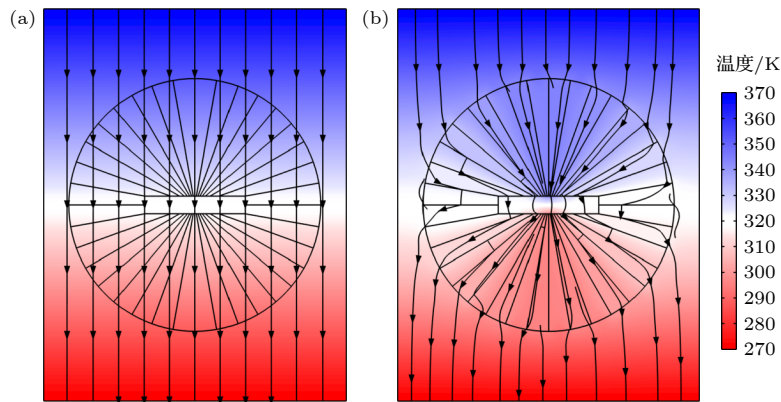


图 4 单一不锈钢结构与能量收集结构的温度分布与热流分布图 (a) 单一不锈钢结构; (b) 能量收集结构

Fig. 4. Temperature and heat flow distribution of single stainless steel structure and energy harvesting structure: (a) Stainless steel structure; (b) energy harvesting structure.

图 5 显示了能量收集结构对温差发电器工作效率的影响. 图 5(a) 表明, 在单一不锈钢结构中, 该温差发电器产生的电势为 0.92 mV. 同时从图 5(b) 可以看出, 温差发电器放置在能量收集结构中后, 其产生电势约为 7.2 mV. 因此在相同的冷热源仿真条件下, 能量收集结构可以将温差发电器的工作效率提高约为 8 倍, 这与前文中矩形能量收集区域温度梯度提高 8 倍的仿真结果相符.

以能量收集结构为例, 研究了放置温差发电器后对热流分布的影响. 放置温差发电器后能量收集结构温度与热流分布如图 6(b) 所示, 从定性分析的角度来看, 热流在能量收集结构中的分布并无明显改变. 从定量分析的角度来看, 矩形能量收集中心上下两端温度分别为 338 和 299 K, 温差为 39 K, 与未放置温差发电器时的情况基本相同. 因此放置温差发电器对能量收集结构的热场调控性能没有明显的影响.

综上所述, 利用铝合金与耐高温树脂交替分布结合不锈钢基底构建二维扇形能量收集结构, 可以实

现对平面热场的精确调控以及能量的高效收集. 矩形能量收集中心处的温度梯度提高 8 倍, 将温差发电器放置在矩形中心可以改善温差发电器的工作效率.

3 热超构材料能量收集结构的制备与性能测试

3.1 能量收集结构的三维建模与制备

为了进行能量收集结构的三维建模、加工制作以及实验验证, 仿真研究了温差发电器件的几何参数对其发电量的影响, 以便选择合适的温差发电器件进行集成.

图 7 所示为目前主要的消费类温差发电器件的内部结构, 它是由大量热电偶通过热并联和电串联连接起来, 并夹在两块高导热、低导电的陶瓷板之间, 从而形成一种三明治型模块^[42]. 热电偶主要由 P-N 型热电材料以及氧化铝组成. 当两块陶瓷板之间存在温差时, 热流将会沿着垂直于陶瓷板的方向传输, 从而产生电能.

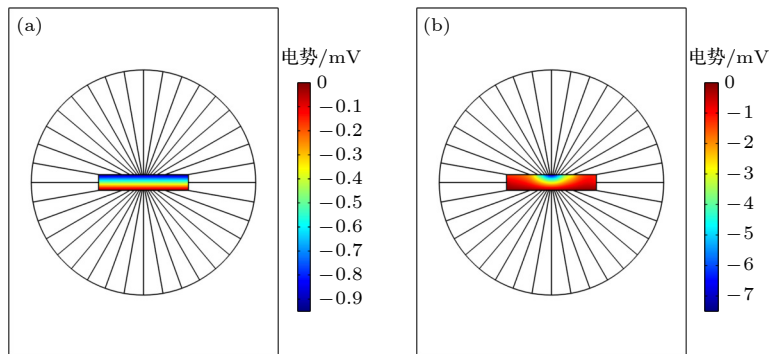


图 5 温差发电器件放置于单一不锈钢或能量收集结构的电势量 (a) 单一不锈钢结构; (b) 能量收集结构

Fig. 5. The power generation of thermoelectric generators placed in a single stainless steel or energy harvesting structure: (a) Stainless steel structure; (b) energy harvesting structure.

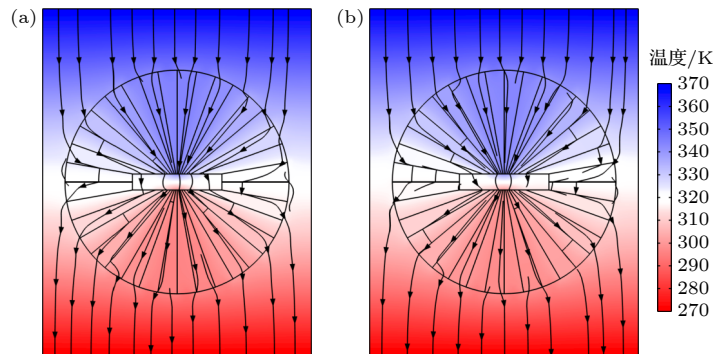


图 6 放置温差发电器前后能量收集结构温度与热流分布图 (a) 放置温差发电器; (b) 未放置温差发电器

Fig. 6. Temperature and heat flow distribution of the energy harvesting structure before and after placing the thermoelectric generator: (a) With thermoelectric generator; (b) without thermoelectric generator.

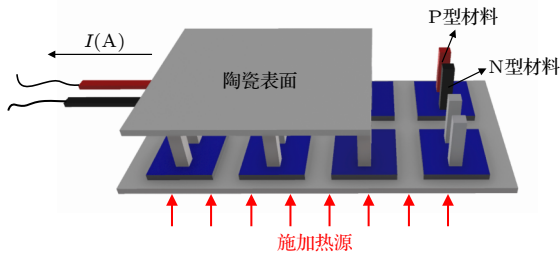


图 7 消费类温差发电器结构示意图
Fig. 7. Schematic of common thermoelectric genetators.

同系列商用温差发电器的厚度相同, 长度和宽度尺寸组合各异, 在相同的温差条件下, 因温差发电器的结构原理, 其发电量与长度和宽度成正比. 但是不同系列温差发电器的厚度不同, 从 3.5—8.0 mm 不等, 因此本文对相同长度和宽度但厚度不同的温差发电机进行仿真, 以研究温差发电机厚度对其发电量的影响, 仿真结果如表 2 所示.

表 2 不同厚度温差发电机热电仿真结果
Table 2. Thermoelectric simulation results of thermoelectric generators with different thicknesses.

热电器件 厚度/mm	上下两端 温差/K	温度梯度/ (K·mm ⁻¹)	产生电势 /mV
8	41.5	5.2	-7.57
6	40.4	6.7	-7.34
4	39.7	9.9	-7.12

由此可见, 相同长度和宽度条件下, 不同厚度的温差发电机发电量接近, 厚度对温差发电器件工作影响不大. 因此从更加经济的角度考虑, 选择了厚度为 3.5 mm 的 TES1 系列中的 TES1-12006 (4 cm×2 cm×0.35 cm) 温差发电器件进行能量收集结构的建模和制备.

整个能量收集结构由图 8 所示的 3 部分装配而成, 分别采用精密机械加工和 3D 打印技术实现不锈钢基底及扇形结构的加工制备, 考虑装配公差后中心留有 4.1 cm×2.1 cm×0.4 cm 的开槽用以集成温差发电机.

图 8(a) 为不锈钢基底的结构, 不锈钢基底整体尺寸为 15.5 cm×12 cm×2.3 cm, 为降低后续测试难度以及提高实验精度, 基底的两端有 12 cm×1 cm×7.5 cm 的长方体凸起以确保基底与冷、热源充分接触. 基底中心留有开孔用来装配扇形结构, 其结构类似于法兰盘, 上端开孔半径 5 cm, 下端开孔半径 4.2 cm, 下端开孔可以实现热阻断从而有助于降低从热端直接沿着不锈钢基底底部

传导到冷端的热流, 以实现更接近于仿真中的实验条件.

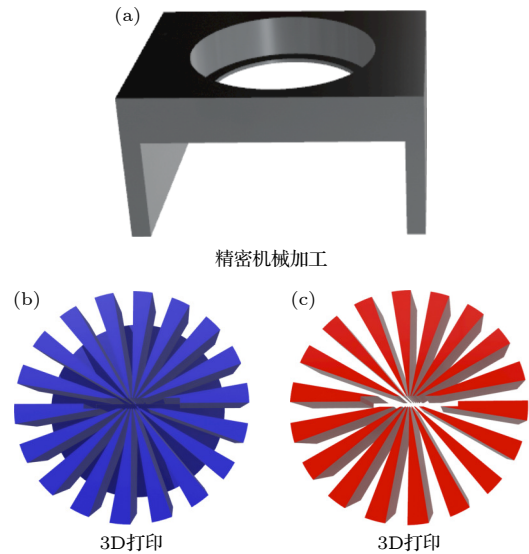


图 8 能量收集结构三维模型图 (a) 不锈钢基底; (b) 树脂扇形区域; (c) 铝合金扇形区域

Fig. 8. 3D model diagram of the energy harvesting structure: (a) Stainless steel substrate; (b) resin sectors; (c) AlSi10Mg sectors.

如果树脂部分与铝合金部分均为分立结构, 那么后期装配将会出现加工误差累积的情况, 从而产生较大的间隙, 严重影响实验结果, 因此耐高温树脂部分由 18 个底部相连的小扇形组成, 如图 8(b) 所示, 公共底部可以起到均匀误差并降低加工、装配难度的作用, 实现能量收集结构的精准装配. 图 8(c) 为扇形结构中的铝合金部分, 由 18 块半径为 5 cm, 厚度 2 cm 的分立小扇形组成, 可以与树脂部分相契合组成扇形结构并与基底进行装配得到能量收集结构, 集成温差发电机后的能量收集结构如图 9 所示.

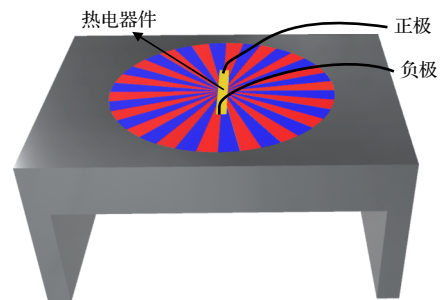


图 9 集成温差发电器的能量收集结构装配模型图
Fig. 9. Model diagram of the energy harvesting structure with the thermoelectric generator.



图 10 能量收集结构实验测试系统

Fig. 10. Experimental test system for energy harvesting structure.

3.2 能量收集结构的性能测试与结果分析

实现能量收集结构与温差发电片集成后, 为提高实验精度, 在能量收集结构的契合处涂抹少量导热硅脂. 整个测试系统如图 10 所示, 在室温 25 °C 条件下进行实验, 能量收集结构左右两端凸起分别与冰水混合物和通过电磁加热装置持续加热的沸水充分接触以模拟热源与热沉条件. 采用万用表对温差发电片产生的电压和电流进行测量, 并使用海康威视 H13 专业版红外热成像仪对能量收集结构进行拍摄, 研究能量收集结构表面的温度分布以刻画能量收集结构的热场调控性能.

为直观对比能量收集结构与自然材料结构的热学性能差异及对温差发电片发电量不同影响, 在相同的实验条件借助单一不锈钢结构设置了对照组实验, 如图 11 所示.

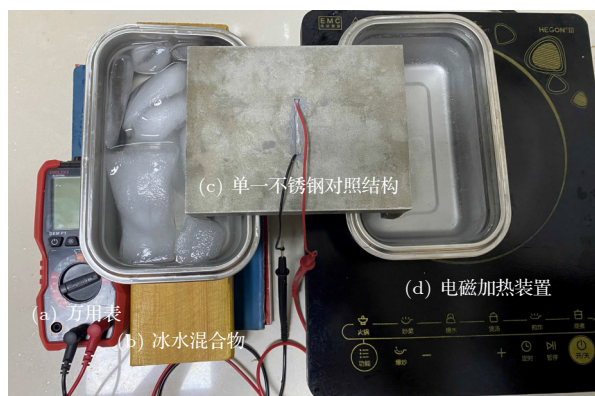


图 11 单一不锈钢结构实验测试系统

Fig. 11. Experimental test system for single stainless steel structure.

在相同测试条件下分别对能量收集结构和单一不锈钢结构进行三组测试, 采用固定功率的加热装置对实验装置充分加热 1 h 以模拟热流传导的过程, 实验过程中定期使用沸水补充水位, 使用万用表记录实验过程中的最大发电量及加热结束后的发电量, 并使用红外热成像仪对结构表面进行拍摄, 分析此时能量收集结构的温度分布.

能量收集结构和单一不锈钢结构表面温度分布情况如图 12 所示. 图中红色十字箭头代表最高温度出现的位置. 由图 12(b) 可知, 单一不锈钢结构表面最高温出现在结构最上端, 温度从结构上端到下端保持均匀分布. 然而在能量收集结构表面, 扇形区域内铝合金的温度明显高于结构外部温度, 最高温出现在扇形铝合金上, 温差发电片上端温度高于单一不锈钢结构, 说明能量收集结构有效地实现了热流调控, 达到热聚集的效果. 实验过程中对两结构温差发电片发电量进行持续测试, 数据如表 3 和表 4 所示.

在能量收集结构中, 温差发电片的平均最大发电量为 9.5 mW, 是单一不锈钢结构中温差发电片 1.8 倍. 随着热传导的不断持续, 两结构中温差发电片上下两端温差均随之降低, 导致发电片发电量相应下降. 单一不锈钢结构具有导热系数的各向同性特点, 因此导致从热源到热沉温度呈现均匀分布, 热流传导慢且难以聚集, 最终矩形能量收集中心上端温度稳定在 55.2 °C, 下端温度为 48 °C, 温差为 7.2 °C. 热超构能量收集结构实现了空间导热系数的各向异性, 进而实现了热流调控与热能聚集.

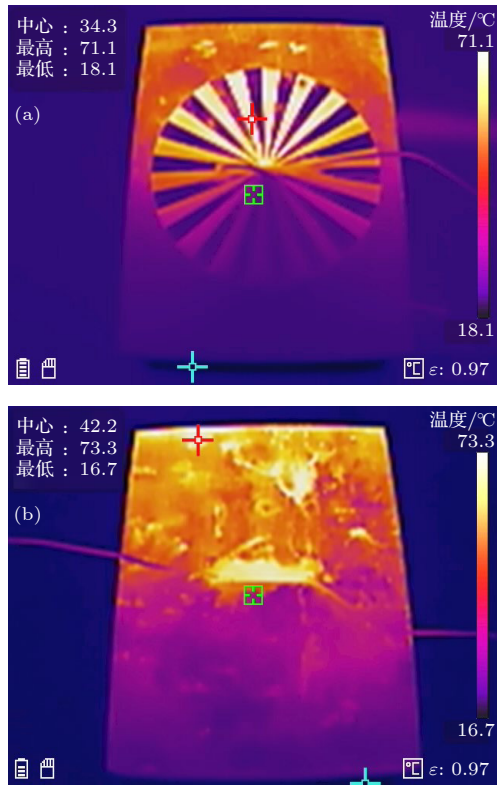


图 12 红外热成像仪测试结果图 (a) 能量收集结构; (b) 单一不锈钢结构

Fig. 12. Test results by the infrared thermal imager: (a) Energy harvesting structure; (b) stainless steel structure.

表 3 能量收集结构中温差发电片发电量
Table 3. Power generation of the thermoelectric generator placed in the energy harvesting structure.

测试序号	最大发电量/mW	结束时发电量/mW
1	9.91	8.57
2	8.97	7.99
3	9.63	8.31
平均值	9.50	8.29

表 4 单一不锈钢结构中温差发电片发电量
Table 4. Power generation of the thermoelectric generator placed in the single stainless steel structure.

测试序号	最大发电量/mW	结束时发电量/mW
1	5.07	2.45
2	5.33	2.88
3	5.26	2.23
平均值	5.22	2.52

加热结束时矩形能量收集中心上端温度为 62.5 °C, 下端温度为 38.3 °C, 上下温差为 24.2 °C, 相较不锈钢结构提高 3.4 倍. 在相同实验条件下, 采用万用表分别对单一不锈钢结构和热超构材料能量收

集结构中温差发电片的电压和电流进行测量, 相比单一不锈钢结构, 超构材料能量收集结构可有效提高温差发电片的发电量, 发电量的平均值提高 3.2 倍.

4 结 论

目前温差发电器件受工作效率的限制难以得到广泛的应用. 本文提出了一种将温差发电器件与二维热超构材料能量收集结构集成以改善温差发电器工作效率的方法. 在能量收集结构扇形区域采用铝合金与树脂的交替排布实现了导热系数的更向异性, 进而实现了热场的调控与热流的聚集. 通过高精度 3D 打印技术和精密机械加工对能量收集结构进行加工制备.

采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对能量收集结构的热学性能进行仿真, 并利用红外热成像仪进行实验测试验证得出该热超构能量收集结构可以有效调控热场, 实现热流集中, 在相同实验环境下相比自然材料结构可以将热电转换效率提高 3.2 倍.

倘若进一步优化加工工艺、提高系统集成程度, 并将能量收集结构与相关能量管理电路结合, 可望实现对某些超低功耗应用如无线传感器网络、可穿戴设备等的自主供电功能, 对推动自供电技术的发展及绿色能源利用具有一定的现实意义, 具备较为广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Shi Y G 2018 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [史尧光 2018 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [2] Snyder G J, Toberer E S 2008 *Nat. Mater.* **7** 105
- [3] Xing T, Song Q, Qiu P, Zhang Q, Gu M, Xia X, Liao J, Shi X, Chen L 2021 *Energy Environ.* **14** 995
- [4] Zhang Y, Feng B, Hayashi H, Chang C P, Sheu Y M, Tanaka I, Ikuhara Y, Ohta H 2018 *Nat. Commun.* **9** 2224
- [5] Zhao Y, Yu P, Zhang G, Sun M, Chi D, Hippalgaonkar K, Thong J T L, Wu J 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2004896
- [6] Xing T, Zhu C X, Song Q F, Huang H, Xiao J, Ren D D, Shi M J, Qiu P F, Shi X, Xu F F, Chen L D 2021 *Adv. Mater.* **33** 2008773
- [7] Li J, Zhang X, Chen Z, Lin S, Li W, Shen J, Witting I T, Faghaninia A, Chen Y, Jain A, Chen L, Snyder G J, Pei Y 2018 *Joule* **2** 976
- [8] Zhang Q, Liao B, Lan Y, Lukas K, Liu W, Esfarjani K, Opeil C, Broido D, Chen G, Ren Z 2013 *Proc. Natl. Acad.* **110** 13261
- [9] Hong M, Chen Z G, Yang Y, Zou Y C, Dargusch M S, Wang

- H, Zou J 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705942
- [10] Zhai R, Hu L, Wu H, Xu Z, Zhu T J, Zhao X B 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 28577
- [11] Liu W D, Yu Y, Dargusch M, Liu Q, Chen Z G 2021 *Renew. Sustain. Energy Rev.* **141** 110800
- [12] Wang D Z, Liu W D, Li M, Yin L C, Gao H, Sun Q, Wu H, Wang Y F, Shi X L, Yang X N, Liu Q F, Chen Z G 2022 *Chem. Engineer. J.* **441** 136131
- [13] Yin L C, Liu W D, Li M, Sun Q, Gao H, Wang D Z, Wu H, Wang Y F, Shi X L, Liu Q F, Chen Z G 2021 *Adv. Energy Mater.* **11** 2102913
- [14] Zhang Q H, Zhou Z X, Maxwell D, Agne M T, Pei Y Z, Wang L J, Tang Y S, Liao J C, Li J, Bai S Q, Jiang W, Chen L D, Gerald J S 2017 *Nano Energy* **41** 501
- [15] Zhu H T, He R, Mao J, Zhu Q, Li C H, Sun J F, Ren W Y, Wang Y M, Liu Z H, Tang Z J, Sotnikov A, Wang Z M, Broido D, Singh D J, Chen G, Nielsch K, Ren Z F 2018 *Nat. Commun.* **9** 2497
- [16] Zhang Q H, Liao J C, Yunshan T, Ming G, Ming C, Qiu P, Bai S, Shi X, Uher C, Chen L D 2017 *Energy Environ. Sci.* **10** 956
- [17] Jood P, Ohta M, Yamamoto A, Kanatzidis M G 2018 *Joule* **2** 1339
- [18] Chu J, Huang J, Liu R H, Liao J C, Xia X G, Zhang Q H, Wang C, Gu M, Bai S Q, Shi X, Chen L D 2020 *Nat. Commun.* **11** 2723
- [19] Kumar M, Rani S, Singh Y, Gour K S, Singh V N 2020 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **20** 3636
- [20] Shi W C, Stedman T, Woods L M 2019 *J. Phys. Energy* **1** 025002
- [21] Fan C Z, Gao Y, Huang J P 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 251907
- [22] Li J Y, Gao Y, Huang J P 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 074504
- [23] Sheng S, Asegun H, Jonathan T, Zheng R, Chenet G 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 251
- [24] Sebastien G, Claude A, Denis V 2012 *Opt. Express* **20** 8207
- [25] Schittny R, Kadic M, Guenneau S, Wegener M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 195901
- [26] Ma Y G, Lan L, Jiang W, Sun F, He S 2013 *NPG Asia Mater.* **5** 1
- [27] Lan C W, Li B, Zhou J 2015 *Opt. Express* **23** 24475
- [28] García-Meca C, Barceló C 2016 *J. Optics.* **18** 044026
- [29] Shen X Y, Li Y, Jiang C R, Ni Y S, Huang J P 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 031907
- [30] Stedman T, Woods L M 2017 *Sci. Rep.* **7** 6988
- [31] Xu L J, Zhao X T, Zhang Y P, Huang J P 2020 *Eur. Phys. J. B.* **93** 101
- [32] Hou Q W, Zhao X P, Meng T, Liu C L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 103506
- [33] Shen X Y, Li Y, Jiang C R, Huang J P 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 055501
- [34] Wang J, Shang J, Huang J P 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 024053
- [35] Yang T Z, Bai X, Gao D L, Wu L Z, Li B W, Thong J T L, Qiu C W 2015 *Adv. Mater.* **27** 7752
- [36] Liu W M, Lan C W, Ji M W, Yao J T 2017 *Global Challenges* **1** 1700017
- [37] Han T C, Bai X, Liu D, Gao D L, Li B W, Thong J T L, Qiu C W 2015 *Sci. Rep.* **5** 10242
- [38] Liu W M 2017 *M. S. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [刘文美 2017 硕士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [39] Zhang S, Xu Y S, Sun S S, Zang W H, Sun J, Gu X Y 2016 *China Plastics* **30** 7 (in Chinese) [张胜, 徐艳松, 孙姗姗, 臧文慧, 孙军, 谷晓昱 2016 *中国塑料* **30** 7]
- [40] Chen C Z, Pan H J 2016 *Engineer. Plastic Appl.* **44** 146 (in Chinese) [陈彩珠, 潘汉军 2016 *工程塑料应用* **44** 146]
- [41] Liu J C 2021 *Foundry* **70** 1372 (in Chinese) [刘金城 2021 *铸造* **70** 1372]
- [42] Sanad M F, Shalan A E, Abdellatif S O, Shalan A E, Serea E S A, Adly M S, Ahsan M A 2020 *Topics Curr. Chem.* **378** 1

Energy harvesting and thermoelectric conversion characteristics based on thermal metamaterials^{*}

Li Yi-Ming¹⁾ Wang Xin^{1)†} Li Hao¹⁾ Du Xian²⁾ Sun Peng²⁾

1) (*College of Electronic Information and Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China*)

2) (*Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China*)

(Received 29 May 2022; revised manuscript received 27 June 2022)

Abstract

Considering the limitations of thermoelectric generators, the integration of thermoelectric generator with two-dimensional fan-shaped thermal metamaterial energy harvesting device is proposed to improve the thermal-to-electrical energy conversion efficiency of thermoelectric generator (TEG) by regulating the thermal field. Based on the COMSOL Multiphysics software simulation, the influences of different materials on the performances of energy harvesting devices in thermal field regulation are investigated. The performances of the selected materials are simulated, indicating that the energy harvesting device can effectively regulate heat flow, the temperature gradient in the center of it is increased by eight times compared with the natural material under the same simulation conditions. The generated electrical energy of thermoelectric generators of different sizes is studied, then three-dimensional modeling and processing of the energy harvesting device are completed by carefully considering the processing accuracy and testing difficulty. The experimental test system is set up to observe the temperature distribution of the energy harvesting device equipped with an infrared thermal imager. The test results demonstrate that the energy harvesting device can effectively regulate the thermal field. In comparison with the natural material, the working efficiency of the thermoelectric generators can be increased by 3.2 times under the same experimental condition, which has specific practical significance for promoting the rapid development of thermoelectric power generation technology.

Keywords: thermoelectric generator, thermal metamaterials, thermal field regulation, heat energy harvesting

PACS: 73.50.Lw, 81.05.Xj, 44.90.+c, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.71.20221061

^{*} Project supported by the Regional Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates, China (Grant No. 202110126036).

[†] Corresponding author. E-mail: wangxin219@imu.edu.cn

基于热超构材料的能量收集与热电转换特性

李一鸣 王鑫 李昊 杜宪 孙鹏

Energy harvesting and thermoelectric conversion characteristics based on thermal metamaterials

Li Yi-Ming Wang Xin Li Hao Du Xian Sun Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 207304 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221061

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221061>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于辐射制冷-温室效应的热电系统性能分析

Performance analysis of thermoelectric system based on radiative cooling and greenhouse effects

物理学报. 2021, 70(21): 214401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210356>

基于超构材料的Cherenkov辐射

Cherenkov radiation based on metamaterials

物理学报. 2020, 69(15): 154103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200260>

基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

收集振动能的摩擦纳米发电机设计与输出性能

Design and output performance of vibration energy harvesting triboelectric nanogenerator

物理学报. 2019, 68(19): 190201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190806>

含双曲超构材料的复合周期结构的带隙调控及应用

Band gap engineering and applications in compound periodic structure containing hyperbolic metamaterials

物理学报. 2020, 69(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200084>

纳米组装相变储热材料的热设计前沿

Thermal design frontiers of nano-assembled phase change materials for heat storage

物理学报. 2022, 71(1): 016501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211776>