文章编号: 1001-4543(2022)02-0135-07

# 热电元侧棱设计对热电器件性能影响

周亚杰1, 吴子华1,2, 谢华清1, 王元元1,2

(1. 上海第二工业大学 能源与材料学院,上海 201209;2. 上海先进热功能材料工程技术研究中心,上海 201209)

摘 要: 热电发电器件 (thermoelectric generators, TEGs) 具有体积小、质量轻、无传动部件、无污染、可靠性高等优点。然而,目前 TEGs 的输出功率仍然较低。利用有限元方法研究了不同侧棱设计热电元对 TEGs 的输出功率和转换效率的影响。并进一步研究不同侧棱设计的台状和倒台状热电元对 TEGs 输出功率和转换效率的影响。结果表明,柱状热电元的热电器件的输出功率高于梯台状热电元热电器件的输出功率,但其转换效率却低于后者,这是因为热量在梯台状热电元内部进行横向传导,导致热量损失。热电元棱数增加后,热电器件的输出功率有所提高,这是因为热电元的棱数增加会降低热量横向传导所引起的损失。而这棱数增加提升热电器件输出功率的现象在热电元下上底面积差异较大时更明显。

关键词: 热电发电器件; 热电元侧棱设计; 输出功率; 转换效率中图分类号: TM913文献标志码: A

# Influence of Side Design of Thermoelement on Performance of Thermoelectric Generator

ZHOU Yajie<sup>1</sup>, WU Zihua<sup>1,2</sup>, XIE Huaqing<sup>1</sup>, WANG Yuanyuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Materials, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Advanced Thermal Functional Materials, Shanghai 201209, China)

Abstract: Thermoelectric generators (TEGs) have the advantages of small size, light weight, no transmission parts, no pollution, and high reliability. However, the output power of TEGs is still low. The finite element method was used to study the effects of thermoelectric elements with different side designs on the output power and conversion efficiency of TEGs. Furthermore, the effects of terrace-shaped and inverted-table thermoelectric elements with different side designs on the output power of the thermoelectric device of the columnar thermoelectric element is higher than that of the terraced thermoelectric element, but its conversion efficiency is lower than that of the latter, because the heat is conducted laterally inside the terraced thermoelectric element, resulting in heat loss. When the number of edges of the thermoelectric element reduces the loss caused by the lateral conduction of heat. The phenomenon of increasing the number of edges to improve the output power of the TEGs is more obvious when the difference between the upper and lower areas of the thermoelectric element is large.

Keywords: thermoelectric generators; side design of thermoelement; output power; conversion efficiency

收稿日期: 2022-02-23

通信作者: 王元元 (1983-), 女, 安徽毫州人, 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: 国家自然科学基金面上项目 (51876111, 52176081), 上海市自然科学基金 (21ZR1424500), 科委地方能力建设 (22010500700), 上海市曙光项目 (18SG54) 资助

### 0 引言

当前,化石能源短缺和环境污染问题日益严重。 热电发电器 (thermoelectric generators, TEGs) 可以将 热能转化为电能 [1],并且具有无噪声、无传动部件、 稳定性好、无污染、体积小等优点<sup>[2-5]</sup>,因此被广泛 应用于废热利用<sup>[6]</sup>、光伏发电<sup>[7]</sup>、穿戴式设备<sup>[8]</sup>等 领域中。但是热电发电器件较低的能量转化效率限 制了其更广泛的应用<sup>[9]</sup>。自热电效应被发现以来, 大量工作通过优化热电材料的性能以提升 TEGs 的 效率 [10]。在器件层面, 增大热电元冷热端温差 [11]、 优化界面热阻、降低辐射和对流等办法均被研究以 提高 TEGs 的性能。除此之外, 热电元的几何位形是 影响 TEGs 性能的重要参数,其中包括热电元尺寸、 热电器件结构<sup>[12-14]</sup>等因素。Tian等<sup>[15]</sup>基于低温热 电材料碲化铋、中温热电材料方钴矿以及这两种材 料共同组成的分段热电器件建立了数学模型,研究 了热电元长度对这3种热电器件输出功率的影响。 结果表明,热电器件的输出功率随外部电阻的增大 呈现先增大后减小的趋势,当热电元的长度增大,热 电器件的输出功率峰值减小。Cheng 等<sup>[16]</sup>研究了 碲化铋热电元横截面积以及模块占用率 (rocc) 对热 电器件输出功率的影响。研究发现在热电器件冷热 端温差为 60~150 K 时, 热电元的最优横截面尺寸 为 1.6 mm×1.6 mm, 此时热电器件的 rocc 为 40.6%。 而过大的热电元横截面积以及过小的 rocc 都会使热 电器件的输出功率降低。Fan 等<sup>[17]</sup> 建立了一种计 算最佳腿长及腿部横截面积的数学模型,发现输出 功率的峰值随着热电元的长度增加而减小,与热电 元横截面积几乎成线性关系。而输出功率密度(输 出功率与热电元体积之比)的峰值随着热电元长度 成反比,并且与热电元横截面积几乎无关。Li等<sup>[18]</sup> 以 Bi<sub>2</sub>Te-2.7Se<sub>0.3</sub> 为 n 型腿, Bi<sub>0.1</sub>Sb-1.9Te<sub>3</sub> 为 p 型腿 构建了倾斜多层 TEG 的模型,固定热电器件冷热端 温差,研究热电元的长宽比(l/w)以及长高比(l/h) 对 TEGs 转换效率的影响。结果显示,在 w/l = 0.5之后热电转换效率趋于饱和值 1.45%, 而 l/h 与热 电器件的转换效率成反比,在 l/h = 10 时,热电器 件的转换效率达到 1.45%。Ji 等<sup>[19]</sup> 通过实验和仿 真的方式研究热电偶数量对分段热电器件输出功 率的影响,结果表明热电偶数量从126对降至96 对时,热电器件的输出功率比相同材质的热电器件

提高约 69%。热电偶数量降至 66 对时其经济效益 (输出功率与热电元材料成本的比值)可提高130%。 除了热电元的几何位形,热电元形状设计同样会影 响热电器件的性能。Thimont 等<sup>[20]</sup>分别研究了中 空、填充以及分层的三棱柱、四棱柱、圆柱以及梯 台状的热电元对热电发电器件性能的影响,并且用 单位面积功率密度(输出功率与腿部最大横截面积 或投影面积的比值) 衡量热电器件的性能。结果表 明,复杂几何位形如分层结构有更高的输出功率,但 复杂几何位形的热电元很难用传统的材料加工工 艺制造。Liu 等<sup>[21]</sup> 在太阳能热电发电器件的设计 中采用梯台热电元分段结构,固定热电元总体积之 后,在靠近热端一侧采用中温热电材料,冷端一侧采 用低温热电材料。研究表明,采用梯台状热电元以 及优化两层热电材料的厚度后,其输出功率提高了 4.21%。Lamba 等<sup>[22]</sup>研究了梯台状热电元对热电器 件的性能影响,引入热电元上下底面积比值 (R<sub>4</sub>), 结果表明在 R<sub>A</sub> < 1 时热电器件的输出功率随 R<sub>A</sub> 的增加而增加, 当  $R_A = 1$  时热电器件有最大的输 出功率,随后输出功率随着 R<sub>A</sub> 的增大而减小。而 转换效率在  $R_A < 1$  时随着  $R_A$  的增大而减小, 在  $R_A = 1$ 时有最小的转换效率,随后随着  $R_A$ 的增大 而增大。Meng 等<sup>[23]</sup>固定热电元下上底面积,研究 了凹型侧面热电元、凸型侧面热电元热电器件的发 电性能,研究结果表明,凸型侧面热电元的内阻较 小,与常规长方体热电元热电器件相比,短路电流增 加了 8.8%。以上工作研究了热电元冷热端面积不 同对热电器件性能的影响。然而,对于热电元的侧 棱设计,目前尚未有工作进行深入研究。因此,本文 基于 ANSYS 有限元模拟软件中的热电模块研究热 电元侧棱设计对热电器件输出功率和转换效率的影 响,同时通过热电元的温度分布和内部热通量分布 性质分析热电元侧棱设计对热电器件性能影响的原 因。本文将从新的角度优化热电元的几何位形设计, 从而提出通过热电元侧棱设计优化提升热电器件性 能有效且可行的方法。

### 1 模型和计算方法

热电发电器件的基本结构如图 1 所示,单个 TEG 由 p/n 型热电臂、冷热端、导线、外接负载组成。在计算中为了研究冷热端温差对热电元形状优 化的影响,为热电器件的热端提供不同温度的热源, 在热端温度 (*T*<sub>h</sub>)大于冷端温度 (*T*<sub>c</sub>)的情况下,由于 Seebeck 效应,会产生热电势。由图 1 可知,热端吸 热量为 *Q*<sub>h</sub>,当外界电阻构成闭合回路时,回路中会 产生热电流 *I*。



图 1 TEG 示意图 Fig. 1 Schematics of TEG

在本文中,固定热电元的体积和高度,通过棱台 体积计算公式建立包括三棱柱、四棱柱、六棱柱和 圆柱形热电元:

$$V_{\rm leg} = \frac{H}{3} \times \left(S_{\rm h} + S_{\rm c} + \sqrt{S_{\rm h} \times S_{\rm c}}\right) \tag{1}$$

式中:  $V_{\text{leg}}$  为热电元的体积, mm<sup>3</sup>; H 为热电元的高度, mm;  $S_{\text{h}}$  和  $S_{\text{c}}$  分别为热电元热端和冷端的横截面积, mm<sup>2</sup>; 其中 H 为 10 mm,  $V_{\text{leg}}$  为 250 mm<sup>3</sup>。

固定热电元总体积和高度建立以图 2(a) 所示的 4 种柱状基础热电元,并定义热电元下上底面积比 值 ( $r = S_c/S_h$ ),改变r (r = 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4), 将热电元几何形状进一步设计成不同倾斜程度的三 棱台、四棱台、六棱台、圆台 (图 2b 为r = 4 的四棱 台热电元)。



图 2 不同横截面形状 (a)、r 发生变化后 (b) 的热电元结构 示意图

Fig. 2 The structure of the thermoelectric element (a) with different cross-sectional shapes, (b) after changing of r

为了描述 TEG 的性质, 稳态下的热流控制方程 和电流密度方程可以表示为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = \dot{q} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \left( J + \xi \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \tag{3}$$

式中:  $\rho$  为密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_p$  为比定压热容, J/(kg·K); t 为时间, s; q 为热通量矢量, W/m<sup>2</sup>;  $\dot{q}$  为单位体积的 产热率, W/m<sup>3</sup>; J 为电流密度矢量, A/m<sup>2</sup>;  $\xi$  为介电 常数, F/m; E 为电场强度矢量, V/m。

热电耦合方程可以表示为

$$q = \Pi \cdot J - \kappa \cdot \nabla T \tag{4}$$

$$J = \sigma \cdot (E - S \cdot \nabla T) \tag{5}$$

式中,  $\Pi$  为帕尔贴系数, V;  $\kappa$  为热导率;  $\sigma$  为电导率, W/(m·K); S 为塞贝克系数, V/K。

将式 (4)、(5) 代入式 (2) 和 (3), 获得以下方程:  $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\Pi \cdot J) - \nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla T) = \dot{q} \qquad (6)$   $\nabla \left( \varepsilon \cdot \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \nabla (\sigma \cdot S \nabla T) + \nabla (\sigma \cdot \nabla \varphi) = 0 \quad (7)$ 

考虑到稳态传热,因此,在式(6)、(7)中,含时间 t 的项随时间 t 的变化等于零。最后通过求解式(6)、(7)可以得到电流密度 J,并由系统直接得出吸热量 Q<sub>H</sub>。导线横截面积 S<sub>line</sub> 和电流密度 J 的乘积可以计算出电流:

$$I = S_{\text{line}} \cdot J \tag{8}$$

继而计算出输出功率和转换效率分别为:

$$P = I^2 R \tag{9}$$

$$\eta = P/Q_H \tag{10}$$

#### 2 结果与分析

本文采用 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 作为热电臂材料, 热电元的 热导率、Seebeck 系数和电阻率均随温度改变而 变化 <sup>[24]</sup>。热电器件中的冷热端和导线均使用铜 质材料, 其热导率为 401 W/(m·K)。为了输出功率 达到最大, 计算中保证外接负载与内阻相同, 在本 文器件构建条件下, 外接负载的尺寸为棱长为 5 mm 的正方体, 电阻率  $\rho$  为 5.25 n $\Omega$ ·mm<sup>2</sup>。 $T_c$  固定 为 300 K, 为研究热电器件不同冷热端温差下, 热电 元侧棱优化设计对热电器件性能的影响,  $T_h$  设为 750、700、650、600、550、500 K。为简便计算, 除冷 端底面外均设置为绝热条件。

采用不同几何位形热电元时,研究不同冷热端 温差下 r 对热电器件输出功率 (P) 的影响,如图 3 所示。由图可见,不同侧棱设计热电元热电器件的 P 随着 r 的增加均呈现先增大后减小的趋势,并在 r = 1 时热电器件的 P 达到最大值。由于当 r ≠ 1 时,梯台状热电元两端的体积不同,会造成热电元热 端吸热及冷端散热过快或过慢的现象。且热电材料 的热电优值 (ZT) 受温度影响,当沿冷端方向形成温 度梯度时,不同温度段热电材料的 ZT 值、体积发 生变化,进一步对热电器件输出功率造成影响。针 对同一种热电元几何位形,随着  $T_h$ 的升高,即热电 器件冷热端温差增加 ( $T_c$ 固定为 300 K), r值的变 化对 P的影响越明显。以图 3(b)为例,  $T_h = 750$  K 时, r = 1时的 P比 r = 4时提高约 10.8%。而在  $T_h = 500$  K, r = 1时的 P仅仅比 r = 4时的提高约 8.9%。



图 3 采用 (a) 三棱台、(b) 四棱台、(c) 六棱台和 (d) 圆台热电元的 TEG 的输出功率随 *r* 的变化曲线 Fig. 3 Variation curve of output power of TEG with (a) triangular pyramid, (b) quadrangular pyramid, (c) hexagonal pyramid and (d) circular truncated pyramid thermoelement as a function of *r* 

图 4 所示为 4 种不同侧棱设计热电元热电器件 的转换效率 ( $\eta$ ) 在不同温度下随形状参数 r 变化的 性质。可以看出, 热电器件的  $\eta$  随着 r 的增加均呈 现先降低后上升的趋势, 并在 r = 1 时热电器件的  $\eta$ 有最小值。当热电器件冷热段温差为 200 K, r = 1/4时, 四棱柱形状热电元 (见图 4(b)) 的  $\eta$  为 6.2%, 比 r = 1 时的  $\eta$  大 0.9%。针对同一种热电元几何位形, 随着  $T_h$  升高即热电器件冷热端温差提高时, 形状参 数的变化对  $\eta$  的影响显著。仍以图 4(b) 为例, 当热 电器件温差提升至 450 K, r = 1/4 时的  $\eta$  比 r = 1时的增大了约 1.44%, 提升了约 60%。结合图 3、4 不难发现, 当热电器件冷热端温差提升时, 热电器件 的 $\eta$ 随形状参数r变化的趋势并无明显变化,这是 因为 $\eta$ 是输出功率与热端吸热量 $(Q_H)$ 的比值。图5 所示为热电元为四棱柱形状时热电器件的 $Q_H$ 随形 状参数r的变化曲线,从图中可以看出,热电器件输 出功率和 $Q_H$ 的变化规律和幅度一致,即热电器件 的输出功率随形状参数r的增加呈现先增加后减小 的趋势。

如图 6 所示,  $T_{\rm h} = 750$  K 时, 不同热电元几何位 形热电器件的  $P \approx \eta$  随 r 变化的性质。对比 4 种不 同几何位形热电元热电器件的 P 以及  $\eta$  可以发现, 在固定的热电器件冷热段温差下, 仅当热电元冷热 端底面积差异较大时, 热电元的侧棱设计对热电器



图 4 采用 (a) 三棱台、(b) 四棱台、(c) 六棱台和 (d) 圆台热电元的 TEG 的 η 随下上底面积比值 *r* 的变化曲线 Fig. 4 Variation curves of η of TEG with (a) triangular pyramid, (b) quadrangular pyramid, (c) hexagonal pyramid and (d) circular truncated thermoelement as a function of *r* 



图 5 采用四棱台热电元的 TEG 的 Q<sub>H</sub> 随 r 的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of  $Q_H$  of TEG with quadrangular pyramid thermoelectric element as a function of r

件 P 以及 η 的影响较为明显。如图 6(a) 所示, 包含 三棱台形状热电元热电器件和包含圆台形状热电元 热电器件的输出功率分别为 3.32 mW 和 3.34 mW, 提升约 0.6%。如图 6(b) 所示, 包含三棱台形状热电 元热电器件和包含圆台形状热电元热电器件的 η 分 别为 11.19% 和 11.29%, 提升约 0.89%。



- 图 6 采用三棱台、四棱台、六棱台、圆台热电元的 (a) P 及
  (b) η 随 r 的变化
- Fig. 6 The variation of (a) P and (b)  $\eta$  of the triangular, quadrangular, hexagonal and circular thermoelements with r of the thermoelement

为进一步探究热电元侧棱和 r 对热电器件 性能的影响,探究了相同条件下 ( $T_h = 750$  K,  $T_c = 300$  K)不同侧棱设计热电元的等温界面图 (见图 7)。由图 7 可见,当r = 1时不同侧棱设计热 电元的各横截面温度分布均匀,并沿着热电元冷端 方向等温下降。表明热电器件热端的热量向热电器 件冷端均匀传递,不会在横向传导的过程中有较大 的损失,有更多的热能转化为电能。当r以及侧棱 数量发生变化后,即 $r \neq 1$ 时,且热电元更"圆润" 时,沿热电元冷端方向的等温界面发生不同程度的 弯曲。可以从图 7 中进一步发现,热电元内部等温 界面的弯曲程度与热电元侧棱设计密切相关。其中 三棱柱热电元等温界面的弯曲程度最为明显,而随 着热电元侧棱数量的增加,热电元内部等温界面的 弯曲程度相应减小。



- 图 7 不同侧棱设计热电元纵向温度分布 (a) 三棱柱型, (b) 四棱柱型, (c) 六棱柱型, (d) 圆柱型
- Fig. 7 Longitudinal temperature distribution of thermoelements with different side designs (a) triangular prism, (b) quadrangular prism, (c) hexagonal prism, (d) cylinder

为了探究热电元温度分布对热电器件性能的影 响,图 8 所示为四棱台热电元内部热流密度矢量分 布图,从图中可以发现,热电元同一横截面上的棱边 以及棱角处的热流的绝对值较大。这表明热电元从 热源接触面所获取的热量不仅进行纵向传递,还沿 着四棱台侧棱以及侧棱进行横向传递造成热量损 失,使热电元侧棱上的各点温度与各点所在的横截 面上的温度存在差异,使热电元内等温界面产生弯 曲 (见图 7)。随着热电元棱数的增加,同一高度热电 元侧棱的热量总和与该点所在横截面热量总和的差 值减小,热电元内部等温界面趋于平缓,由热电元变 截面引起的热量损失随之降低,热电器件的输出功 率有所提升。这种现象在 r 差异较大时更为明显。



图 8 r = 4时四棱台热电元热通量图 Fig. 8 Heat flux diagram of quadrangular pyramid thermoelement when r = 4

### 3 结 论

利用 ANSYS 软件基于有限元法求解热电耦合 方程,研究了包含不同侧棱设计对热电元热电器件 的输出功率和转换效率的影响。计算结果表明,在 热电器件冷热端温度固定时,柱状热电元热电器件 的输出功率明显高于梯台状热电元热电器件的输出 功率,但其转换效率却低于后者。随着热电元侧棱 数的增加,热电器件的输出功率会有所提高。但这 种现象仅在 r 差异较大时较为明显。此外随着热电 器件冷热端温差的增大,梯台状热电元会造成更多 的热量损失,从而导致热电器件输出功率降低。本 文对于包含不同几何位形的热电元热电器件内部的 传热和能量转换机制进行了有益的探索,有利于从 器件的几何位形设计角度优化性能。

#### 参考文献:

- ARAIZ M, MARTÍNEZ A, ASTRAIN D, et al. Experimental and computational study on thermoelectric generators using thermosyphons with phase change as heat exchangers [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 137: 155-164.
- [2] SHEN Z G, WU S Y, XIAO L. Assessment of the performance of annular thermoelectric couples under constant heat flux condition [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 704-713.
- [3] NARJIS A, LIANG C T, AAKIB H E, et al. Design optimization for maximized thermoelectric generator performance [J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(1): 306-310.
- [4] YIN E, LI Q, XUAN Y M. Effect of non-uniform

illumination on performance of solar thermoelectric generators [J]. Frontiers in Energy, 2018, 12(2): 239-248.

- [5] LV S, LIU M H, HE W, et al. Study of thermal insulation materials influence on the performance of thermoelectric generators by creating a significant effective temperature difference [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 207: 112516.
- [6] QUAN R, LIU G Y, WANG C J, et al. Performance investigation of an exhaust thermoelectric generator for military SUV application [J]. Coatings, 2018, 8(2): 45.
- [7] KILKIŞ B. Development of a composite PVT panel with PCM embodiment, TEG modules, flat-plate solar collector, and thermally pulsing heat pipes [J]. Solar Energy, 2020, 200: 89-107.
- [8] ZHAO X, ZHAO C S, JIANG Y F, et al. Flexible cellulose nanofiber/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> composite film for wearable thermoelectric devices [J]. Journal of Power Sources, 2020, 479: 229044.
- [9] HE H L, WU Y, LIU W W, et al. Comprehensive modeling for geometric optimization of a thermoelectric generator module [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183: 645-659.
- [10] TOAN N V, TUOI T T K, ONO T. Thermoelectric generators for heat harvesting: From material synthesis to device fabrication [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113442.
- [11] LU X, YU X F, MA T, et al. Numerical investigation on thermoelectric power generator with gradient plate-fin heat exchanger [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(1): 169-174.
- [12] 张华俊,陈浩,王俊,等.半导体热电堆电臂尺寸之研究[J].太阳能学报,2002,23(2):154-159.
- [13] ALI H, YILBAS B S, AL-SULAIMAN F A. Segmented thermoelectric generator: Influence of pin shape configuration on the device performance [J]. Energy, 2016, 111: 439-452.
- [14] 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.

- [15] TIAN H, SUN X X, JIA Q, et al. Comparison and parameter optimization of a segmented thermoelectric generator by using the high temperature exhaust of a diesel engine [J]. Energy, 2015, 84: 121-130.
- [16] CHENG F Q, HONG Y J, LI W P, et al. A thermoelectric generator for scavenging gas-heat: From module optimization to prototype test [J]. Energy, 2017, 121: 545-560.
- [17] FAN L H, ZHANG G B, WANG R F, et al. A comprehensive and time-efficient model for determination of thermoelectric generator length and cross-section area [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 122: 85-94.
- [18] LI Y Z, WEI P, ZHOU H Y, et al. Geometrical structure optimization design of high-performance Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based artificially tilted multilayer thermoelectric devices [J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(10): 5980-5988.
- [19] JI D X, WEI Z B, JOSEP P, et al. Geometry optimization of thermoelectric modules: Simulation and experimental study [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 236-243.
- [20] THIMONT Y, LEBLANC S. The impact of thermoelectric leg geometries on thermal resistance and power output [J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(9): 095101.
- [21] LIU H B, MENG J H, WANG X D, et al. A new design of solar thermoelectric generator with combination of segmented materials and asymmetrical legs [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 175: 11-20.
- [22] LAMBA R, KAUSHIK S C. Thermodynamic analysis of thermoelectric generator including influence of Thomson effect and leg geometry configuration [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 144: 388-398.
- [23] MENG Q T, NI Q Q, SONG X X. The evaluation of power generation performance of variable cross section thermoelectric generator based on new thermoelectric material parameter measurement method [J]. Energy Sources, https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1985188.
- [24] GAO J L, DU Q G, ZHANG X D, et al. Thermal stress analysis and structure parameter selection for a Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>based thermoelectric module [J]. Journal of Electronic Materials, 2011, 40: 884-888.