

# 热管堆中分段式温差发电器的仿真分析

张胤<sup>1</sup>, 郭凯伦<sup>1</sup>, 王成龙<sup>1,\*</sup>, 戴春辉<sup>2</sup>, 宋苹<sup>2</sup>, 张大林<sup>1</sup>,  
秋德正<sup>1</sup>, 田文喜<sup>1</sup>, 苏光辉<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049;

2. 武汉第二船舶设计研究所 热动力技术重点实验室, 湖北 武汉 430205)

**摘要:**温差发电机(TEG)是一种能够直接将热能转化为电能的器件设备,因此可在热管堆中将TEG作为能量转换系统。但当热管堆堆芯的平均或最高温度超过1 000 K后,TEG的缺陷就会暴露出来。分段式温差发电机(STEG)可解决这一问题。本文在COMSOL软件中搭建了STEG模型,确定了数值模拟方法,并对STEG的几何形状和热电性能进行了优化设计,将热管与STEG组合成单通道模型来进行仿真计算。对STEG进行了稳态的仿真计算,得到STEG的几何优化设计,并探究了热电和热力性能,热电转换效率最高可达15.75%,最大应力约为270 MPa。在单通道模型中,结合STEG的最优几何设计,热电转换效率最高可达15.63%。本文工作可为STEG与热管堆结合的数值模拟提供相应的基础。

**关键词:**热管堆;分段式温差发电机;数值模拟

中图分类号:TL334

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2022)10-2051-10

doi:10.7538/yzk.2021.youxian.0875

## Numerical Analysis of Segmented Thermoelectric Generator Applied in Heat Pipe Cooled Nuclear Reactor

ZHANG Yin<sup>1</sup>, GUO Kailun<sup>1</sup>, WANG Chenglong<sup>1,\*</sup>, DAI Chunhui<sup>2</sup>, SONG Ping<sup>2</sup>,  
ZHANG Dalin<sup>1</sup>, QIU Suizheng<sup>1</sup>, TIAN Wenxi<sup>1</sup>, SU Guanghui<sup>1</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Science and Technology on Thermal Energy and Power Laboratory,

Wuhan 2nd Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** The power system of heat pipe cooled nuclear reactor can be divided into dynamic conversion system and static conversion system. Thermoelectric generator (TEG) is a typical static conversion device, which can directly convert heat energy into electric energy. The combination of heat pipe cooled nuclear reactor and TEGs can bring many advantages, such as compact structure, high inherent safety, no auxiliary mechanical equipment and low noise. However, the maximum core temperature could exceed 1 000 K, and ordinary thermoelectric generators can not operate in such high temperature. To solve this problem, the use of segmented thermoelectric generator

(STEG) in the power system of heat pipe cooled nuclear reactor is a method worthy of research. STEG can play an important role in the heat pipe cooled nuclear reactor. But there is not enough literature to study the application of STEG in heat pipe cooled nuclear reactor. STEG usually splices two or three thermoelectric materials with the highest power generation efficiency in different temperature ranges. In this way, STEG can obtain a high thermoelectric conversion efficiency in a wide temperature range (usually above 600 K). Therefore, a kind of STEG for heat pipe cooled nuclear reactor was designed. In this paper, a conceptual design of a heat pipe cooled nuclear reactor with STEGs was proposed. The single STEG and single channel model were explored by COMSOL software. A three-dimensional finite element model of STEG's performance in heat pipe cooled nuclear reactor was established. STEG was designed to compose of bismuth telluride and skutterudite, and its geometric structure and performances were optimized. Numerical simulation was carried out under steady-state conditions to determine the optimal STEG's geometry. Then, the optimized STEG was connected with the heat pipe to form a single channel model for simulation to explore its performances. When the temperature difference reaches 550 K, the maximum STEGs' output power reaches 0.374 W, and the maximum conversion efficiency is 15.75%. In single channel model, when the heating power is 300 W, the maximum STEGs' output power reaches 47.29 W, and the maximum conversion efficiency is 15.63%. The simulation also show that the maximum stress of single STEG and single channel model are 270 MPa and 547.5 MPa, respectively. And the maximum stress appears on the copper conductor near the hot side. This paper could provide a preliminary basis for the numerical simulation of the combination of STEG and heat pipe cooled nuclear reactor. This paper can also be used as a reference for the thermoelectric conversion of heat pipe cooled nuclear reactors.

**Key words:** heat pipe cooled nuclear reactor; segmented thermoelectric generator; numerical simulation

温差发电机(TEG)能直接将热能转化为电能,因此 TEG 有着高可靠性、全固态、结构简单及无噪音等优点,然而目前的 TEG 普遍存在着热电转换效率低下的缺点。使用高性能的热电材料和优化几何形状是常用的解决办法,除此之外使用分段式温差发电机(STEG)也是一种不错的解决办法。STEG 将不同温度范围内能取得最佳性能的热电材料(2种或3种)拼接在一起,使用这种方法,STEG 可在较宽的温度范围内取得更大的平均热电转换效率,这也使得 STEG 可在有着1 000 K温差以上的热管堆中作为能量转换系统。

将 TEG 与核反应堆结合起来的设计在近十几年越来越多。为了改进空间核动力系统,Markoliya 等<sup>[1]</sup>将硅锗 TEG 模块与空间核反

应堆结合起来,并提出了一种降低损耗、提高稳定性的方法。Wang 等<sup>[2]</sup>设计了一种基于 TEG 的核电厂非能动冷却系统,在该系统中,TEG 用于将固有热能转换为电能。Gabbar 等<sup>[3]</sup>评估了 CANDU 反应堆中 TEG 网络的价值,并进行了相关优化。

然而,STEG 在核反应堆中的应用,特别是在热管堆中的应用却鲜有研究。2004年,El-Genk 等<sup>[4]</sup>提出了一种用于 110 kW 的热管-分段式热电模块转换器(HP-STMCs)的空间反应堆电源系统概念设计。该反应堆使用 126 根锂热管从堆芯获取热量,并使用 STEG 将热量转换为电能,转换效率可达 8.1%,反应堆的热功率和裂变功率分别为 1.641 MW 和 1.824 MW,分段式热电模块转换器的热侧温

度恒定为1 300 K。

本文提出一种带有 STEG 的热管堆的新型概念设计。为分析 STEG 在热管堆中的性能,建立相应的三维有限元模型。STEG 的模型由两种热电材料组成,通过 COMSOL 软件对 STEG 的几何结构进行优化,并对其力学性能进行探索。

### 1 带有 STEG 的热管堆的概念设计

图 1 示出带有 STEG 的新型热管堆的概念设计<sup>[5-6]</sup>。该热管堆使用了 Mo-14Re 合金基体、控制棒、燃料棒、热管、STEG 和冷却水板。如图 1 所示,热能自燃料棒中产生,随后经由热管传递至 STEG。然后,部分热能转化为电能,剩余的热能由冷却水板带走。与传统的核反应堆冷却系统相比,热管有着许多优点<sup>[7]</sup>,如高固有安全性、非能动性以及高传热效率。与通常的核反应堆二回路相比,STEG 能使反应堆更加紧凑、无噪音以及模块化。

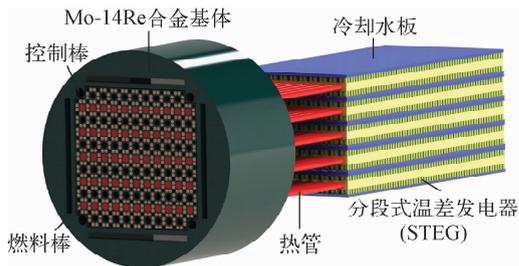


图 1 带有 STEG 的热管堆概念设计图

Fig. 1 Schematic diagram

of heat pipe cooled nuclear reactor with STEG

这种反应堆设计兼具了热管和 STEG 的优点和缺点,这也意味着许多方面需要去探索研究。在经典的热管堆 kilopower 中,堆芯温度往往超过 800 K,而热阱一般为常温冷却水,这对于 STEG 而言,承载如此高的温差是一项艰巨的挑战,因此需使用有限元方法进行 STEG 的数值模拟,以找到最合适的几何结构和最佳的热电性能。

#### 1.1 STEG 结构

STEG 的几何结构如图 2 所示。STEG 主要由陶瓷片、导流片、焊料层和热电材料构成。STEG 参数列于表 1。图 2 中: $L_P$  为 P 腿冷端

的热电材料高度; $L_N$  为 N 腿冷端的热电材料高度; $S_P$  为 P 腿的截面积; $S_N$  为 N 腿的截面积。

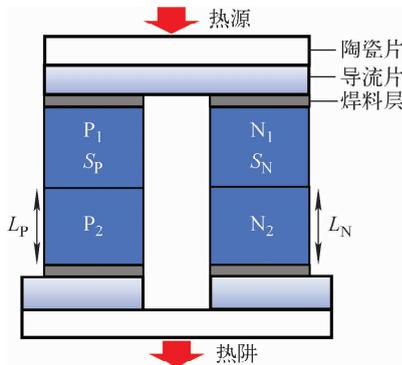


图 2 STEG 的几何结构

Fig. 2 Structure of STEG

表 1 STEG 的详细参数

Table 1 Detailed dimension of STEG

组件名称	尺寸
陶瓷片	9 mm×4 mm×1 mm
顶端导流片	9 mm×4 mm×0.6 mm
底部导流片	6 mm×4 mm×0.6 mm
焊料层	4 mm×4 mm×0.3 mm
热电支腿	4 mm×4 mm×20 mm

当 STEG 的上下两端陶瓷片出现温差时,将 STEG 与外接负载组合成闭合电路后,由于塞贝克效应会有电流产生。这种发电过程还伴随着珀耳帖效应、汤姆逊效应、焦耳效应和傅里叶效应。本文在 COMSOL 软件中创建了如图 2 所示的模型,并选择了相应的热电物理场进行仿真模拟。本文主要是以热电转换效率为导向,寻找最佳的几何结构。

#### 1.2 单通道模型

将 STEG 集成便可形成分段式温差发电模块(STEM),将 STEM 与热管组合进而形成 1 个单通道模型<sup>[8]</sup>,该模型由热管、燃料棒、STEM、铜基体和集热器构成。18 对如图 2 所示的 STEG 组成了如图 3 所示的 STEM。1 根热管和 10 个 STEM 组合成 1 个基本的单通道模型。本文使用 COMSOL 软件对单通道模型建模,选择了相应的热电和热力物理场,探究相应的性能。

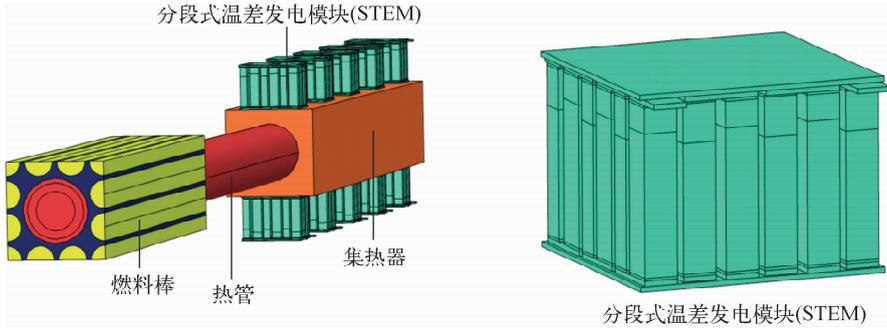


图3 带有分段式温差发电模块的单通道模型

Fig. 3 Single channel model with segmented thermoelectric module

## 2 STEG 的数值模拟模型

### 2.1 热电模型的控制方程

STEG 是一种利用塞贝克效应、珀耳帖效应和汤姆逊效应等物理效应实现电能和热能相互转换的器件<sup>[9]</sup>。当 STEG 两端产生温差后,热能自高温端传递至低温端,由于塞贝克效应,进而有电势产生。若 STEG 和负载形成闭合电路,在电流作用下,热电支腿和电极之间的接触面上产生珀耳帖热,这会削弱了 STEG 的发电能力。热电材料在电流和温度梯度的共同作用下会产生焦耳热和汤姆逊热。此外,热电材料可通过自然对流和辐射向环境散热。

因此,STEG 的内部热分布由傅里叶传导、焦耳热、珀耳帖热、汤姆逊热和热损失决定。STEG 的电势分布由流过热电支腿的电流产生的电势和塞贝克效应产生的电势组成。

热流的控制方程<sup>[9]</sup>可表示为:

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = \dot{q} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

结合热电耦合本构方程:

$$\mathbf{q} = [\alpha]T\mathbf{J} - [\kappa]\nabla T \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = -[\sigma]\nabla\varphi - [\sigma][\alpha]\nabla T \quad (4)$$

从而得到了描述温度和电势分布以及热电耦合效应的控制方程:

$$\nabla \cdot ([\kappa]\nabla T) + \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma} -$$

$$T\mathbf{J} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) \nabla T - T\mathbf{J}(\nabla \alpha)_T = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot ([\sigma]\nabla\varphi) + [\sigma][\alpha]\nabla T = 0 \quad (6)$$

式中: $\mathbf{q}$  为热流矢量; $\dot{q}$  为单位体积产热率; $\mathbf{J}$  为电流密度矢量; $[\alpha]$  为塞贝克系数矩阵; $[\kappa]$  为导热系数矩阵; $[\sigma]$  为电导率矩阵; $T$  为温度; $\varphi$  为

标量电势。

### 2.2 热力模型控制方程

对于 STEG 而言,由于温度梯度较大,热应力是一个不容忽视的问题。热应力会削弱器件的界面结合,导致缺陷,甚至失效<sup>[10]</sup>。热力耦合分析需要确定应力-应变关系,并且需要考虑热膨胀带来的影响。

根据广义胡克定律,在各向同性线弹性材料中,应力和应变相互独立,并且相互叠加。剪切应变与泊松比有关,因此,本文得到以下应力-应变关系式:

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E}, \epsilon_{xy} = -\nu \cdot \epsilon_{xx}, \epsilon_{xz} = -\nu \cdot \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yx} = -\nu \cdot \epsilon_{yy}, \epsilon_{yy} = -\frac{\sigma_{yy}}{E}, \epsilon_{yz} = -\nu \cdot \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zx} = -\nu \cdot \epsilon_{zz}, \epsilon_{zy} = -\nu \cdot \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz} = -\frac{\sigma_{zz}}{E} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E$  为弹性模量; $\sigma$  为法向应力; $\nu$  为泊松比; $\epsilon$  为应变。

法向应力与法向应变之间的 3 种关系为:

$$\begin{cases} (1+\nu)\sigma_{xx} = \frac{E(1-\nu)\epsilon_x}{1-2\nu} + \frac{E\nu(\epsilon_y + \epsilon_z)}{1-2\nu} \\ (1+\nu)\sigma_{yy} = \frac{E(1-\nu)\epsilon_y}{1-2\nu} + \frac{E\nu(\epsilon_x + \epsilon_z)}{1-2\nu} \\ (1+\nu)\sigma_{zz} = \frac{E(1-\nu)\epsilon_z}{1-2\nu} + \frac{E\nu(\epsilon_x + \epsilon_y)}{1-2\nu} \end{cases} \quad (8)$$

热膨胀也会引起材料体积的变化。在各向同性材料中,体积膨胀系数是线性膨胀系数的 3 倍,因此热膨胀引起的应力为:

$$\sigma = K\epsilon = \frac{E}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{3\alpha\Delta T}{L_0} = \frac{\alpha E\Delta T}{L_0(1-2\nu)} \quad (9)$$

式中: $K$  为体积弹性模量; $\epsilon$  为体积应变; $L_0$  为初始长度。对于剪应力  $\tau=G\gamma, E=2G(1+\nu)$ ,  $G$  为剪切模量, $\gamma$  为剪切应变。

综合以上方程可得到最终的应力-应变方程:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & & & \\ \nu & 1-\nu & \nu & & & \\ \nu & \nu & 1-\nu & & & \\ & & & 1-2\nu & & \\ & & & & 1-2\nu & \\ & & & & & 1-2\nu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\nu} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 2.3 热管计算模型

本文基于 Zuo 等<sup>[11]</sup> 提出的热阻网络方法构建了热管的数值仿真模型,如图 4 所示。

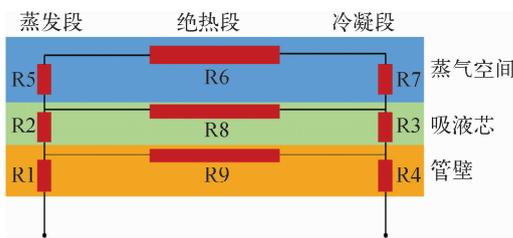


图 4 热阻网络模型

Fig. 4 Thermal resistance network model

热管蒸发段管壁径向导热及其热阻  $R_1$  为:

$$R_1 = \frac{\ln \frac{d_o}{d_i}}{2\pi\lambda_w L_1} \quad (11)$$

式中: $d_o$  为热管管壁外直径; $d_i$  为热管管壁内直径; $\lambda_w$  为热管管壁材料的导热率; $L_1$  为热管蒸发段长度。

热管蒸发段吸液芯径向导热及其热阻  $R_2$  为:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{d_i}{d_v}}{2\pi\lambda_e L_1} \quad (12)$$

式中: $d_v$  为热管内气腔的直径; $\lambda_e$  为当量导热系数,与吸液芯材料和工质的导热性有关。

热管冷凝段吸液芯径向导热及其热阻  $R_3$  为:

$$R_3 = \frac{\ln \frac{d_i}{d_v}}{2\pi\lambda_e L_2} \quad (13)$$

式中, $L_2$  为热管冷凝段长度。

热管蒸发段管壁径向导热及其热阻  $R_4$  为:

$$R_4 = \frac{\ln \frac{d_o}{d_i}}{2\pi\lambda_w L_2} \quad (14)$$

热管蒸发段气液界面的相变传热及其热阻  $R_5$  为:

$$R_5 = \frac{RT_v^2 \sqrt{2\pi RT_v}}{r^2 p_v \pi d_v L_1} \quad (15)$$

式中: $R$  为气体常数; $T_v$  为蒸气温度; $r$  为汽化潜热; $p_v$  为蒸气压力。

蒸气轴向流动传热及其热阻  $R_6$  为:

$$R_6 = \frac{128L_e \mu_v T_v}{\pi d_v^3 \rho_v^2 r} \quad (16)$$

式中: $L_e$  为热管的有效长度; $\mu_v$  为蒸气的动力学黏度系数; $\rho_v$  为蒸气密度。

热管冷凝段气液界面的相变传热及其热阻  $R_7$  为:

$$R_7 = \frac{RT_v^2 \sqrt{2\pi RT_v}}{r^2 p_v \pi d_v L_2} \quad (17)$$

热管吸液芯的轴向导热及其热阻  $R_8$  为:

$$R_8 = \frac{4L}{\pi\lambda_e (d_o^2 - d_i^2)} \quad (18)$$

式中, $L$  为热管长度

热管管壁的轴向导热及其热阻  $R_9$  为:

$$R_9 = \frac{4L}{\pi\lambda_w (d_o^2 - d_i^2)} \quad (19)$$

### 2.4 材料属性

STEG 的导流片主要由铜构成,焊料层主要由 Sn-Sb 合金构成。STEG 靠近热端的热电材料为方钴矿,靠近冷端的热电材料为碲化铋。在本文的仿真模拟中,将陶瓷片和热电材料视为脆性材料,将导流片和焊料层视为弹塑性材料。铜的极限强度、屈服强度和延展性分别为 250 MPa、70 MPa 和 69%,焊料层相对应的值

为 41 MPa、26 MPa 和 38%。热电材料的物性均来自文献[12]。

## 2.5 边界条件

为简化计算,本文忽略了 STEG 不同材料之间的接触电阻和接触热阻,同时忽略了表面自然循环和辐射换热导致的热损失,将与 STEG 相连的热源和热阱视为热边界条件。与 P 型和 N 型支腿相连的陶瓷片的上表面为热源,并设置为固定温度  $T_h$ ;将底部陶瓷片的下表面视为热阱,并设置为固定温度  $T_c$ ;将连接到 P 腿冷端的电极电位设为 0;将连接到 N 腿冷端的电路设置为可变电阻,以形成闭合回路。在热应力的仿真模拟中,STEG 的热端上表面设置为固定约束。

选用 COMSOL 软件求解稳态工况下的有限元方程。图 5 示出 STEG 的网格。本文使用热电效应的多物理耦合模型来模拟 STEG 的热电性能,并使用电磁加热多物理耦合模型来解释热方程中的体积和表面损耗,本文也采用了热膨胀多物理耦合模型来模拟温度变化引起的热应变。本次优化的目标首先需满足热电转换效率最大化,其次满足输出功率最大化。仿真中一般考虑有 5 个独立变量,但为简化,将总热电臂的高度(20 mm)和总截面积(8 mm × 4 mm)设为了固定值,因此只考虑 3 个独立变量,分别为 P 腿碲化铋材料的高度、N 腿碲化铋材料的高度和 PN 腿截面积之比。

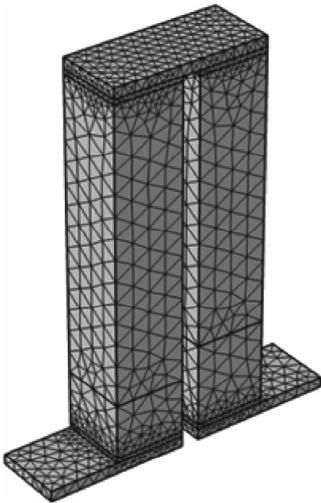


图 5 STEG 的网格

Fig. 5 Mesh of STEG

## 2.6 模型验证

图 6 示出 COMSOL 软件模拟结果与文献[12]结果的比较。随着温差的增大,模拟结果更接近于文献[12]结果。当温差超过 400 K 时,两者的相对误差小于 3%。在 680 K 的温差下,模拟结果表明热电转换效率为 13.13%,文献[12]的为 13.09%。图 6 表明,使用 COMSOL 软件模拟高温下的 STEG 是完全可行的。

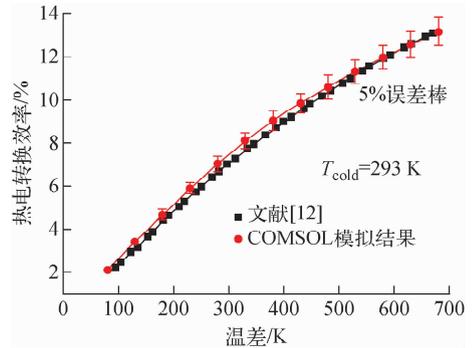


图 6 模型验证

Fig. 6 Model validation

## 3 结果与讨论

### 3.1 STEG 的外接负载

图 7 示出不同支腿长度下热电转换效率随负载电阻的变化。如图 7 所示,热电转换效率呈现出先增后减的趋势,最大值出现在外部负载电阻为 0.03~0.04  $\Omega$  区域。在以下研究中,本文均使用 0.035  $\Omega$  的负载电阻进行模拟。

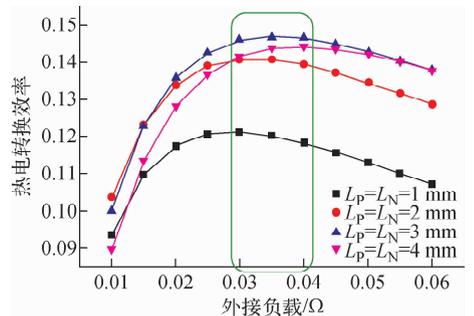


图 7 不同支腿长度下热电转换效率与负载电阻的关系  
Fig. 7 Relationship between thermoelectric efficiency and external resistance under different leg lengths

### 3.2 STEG 的优化设计

STEG 的总体尺寸为: N 型和 P 型支腿的

总高度为 20 mm,之间的间距为 1 mm,PN 腿的总截面积为 32 mm<sup>2</sup>。为确定 STEG 的最优几何形状,还需对碲化铋高度、方钴矿高度和 N 型与 P 型支腿的截面积进行探究。

图 8 示出 P 型支腿中碲化铋高度对热电转换效率和输出功率的影响。当碲化铋高度从 2 mm 变为 4 mm 时,热电转换效率和输出功率均先增大后减小,最大热电转换效率出现在 3.1 mm 高度,最大输出功率出现在 2.3 mm 高度。在优化过程中,热电效率最大值为 13.966%,最小值为 13.486%;最大和最小输出功率分别为 0.329 W 和 0.307 W。根据最高热电转换效率标准,P 型支腿的碲化铋高度为 3.1 mm,相应的方钴矿高度为 16.9 mm,此时 STEG 的输出功率为 0.323 W,仅比最大值低 0.006 W。

保持 P 型支腿的优化尺寸,图 9 示出 N 型支腿中碲化铋高度对热电效率和输出功率的影响。当 P 型支腿的碲化铋高度从 4 mm 增加到 6 mm 时,热电效率先升高后降低,最大热电效

率出现在 4.7 mm 的高度。输出功率则一直在减小,最大值出现在 4 mm 高度处。在优化过程中,热电效率的最大值为 15.000%,最小值为 14.908%,最大和最小输出功率分别为 0.372 W 和 0.361 W。根据最高热电效率标准,N 型支腿的碲化铋高度为 4.7 mm,相应的方钴矿高度为 15.3 mm,此时 STEG 的输出功率为 0.369 W,仅比最大值低 0.003 W。

在截面积优化过程中,N 型和 P 型支腿的尺寸保持了优化结果,图 10 示出 PN 支腿的截面积比值  $S_P/S_N$  对热电转换效率和输出功率的影响。当  $S_P/S_N$  从 0.6 变为 1.7 时,输出功率先增大后减小,而热电转换效率一直在提高。 $S_P/S_N$  为 1.35 时,输出功率达到最大值。在优化过程中,输出功率最大值为 0.374 W,最小值为 0.335 W,最高和最低热电转换效率分别为 15.75% 和 12.961%。根据最大输出功率标准,P 型支腿的截面积为 4.6 mm×4 mm,对应的 N 型支腿截面积为 3.4 mm×4 mm。

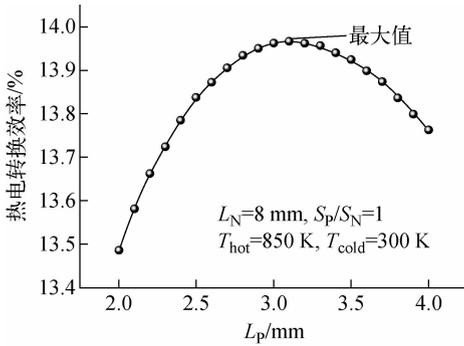


图 8 P 型支腿中碲化铋高度对热电效率和输出功率的影响

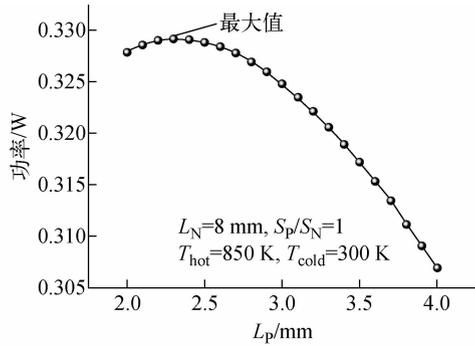


Fig. 8 Effect of bismuth telluride height in P-type leg length on thermoelectric efficiency and output power

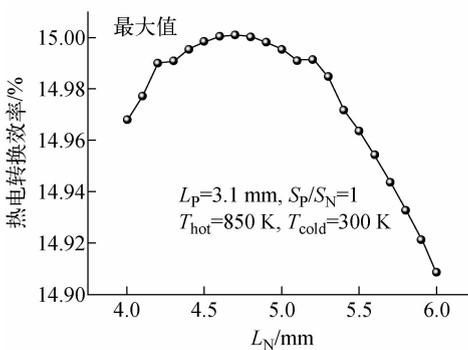


图 9 N 型支腿中碲化铋高度对热电效率和输出功率的影响

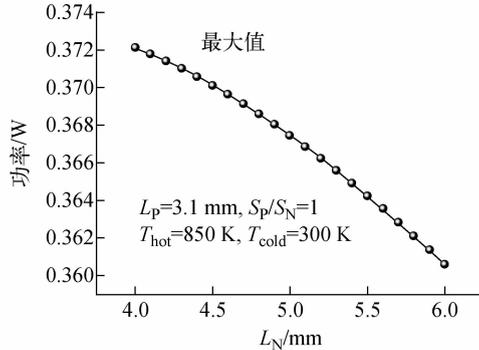
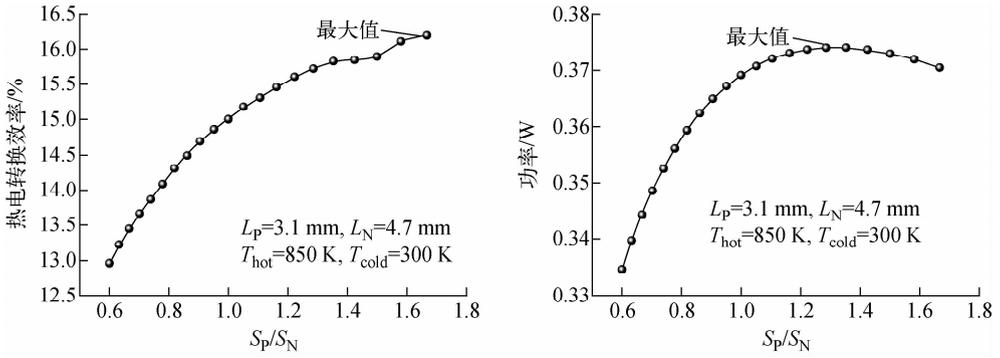


Fig. 9 Effect of bismuth telluride height in N-type leg length on thermoelectric efficiency and output power

图 10  $S_p/S_n$  对热电转换效率和输出功率的影响Fig. 10 Effect of  $S_p/S_n$  on thermoelectric efficiency and output power

### 3.3 STEG 的热力性能

STEG 两端的温差超过 800 K, 如此巨大的温差会带来热应力, 进而导致器件破裂, 因此有必要研究 STEG 的力学性能或热应力极限。

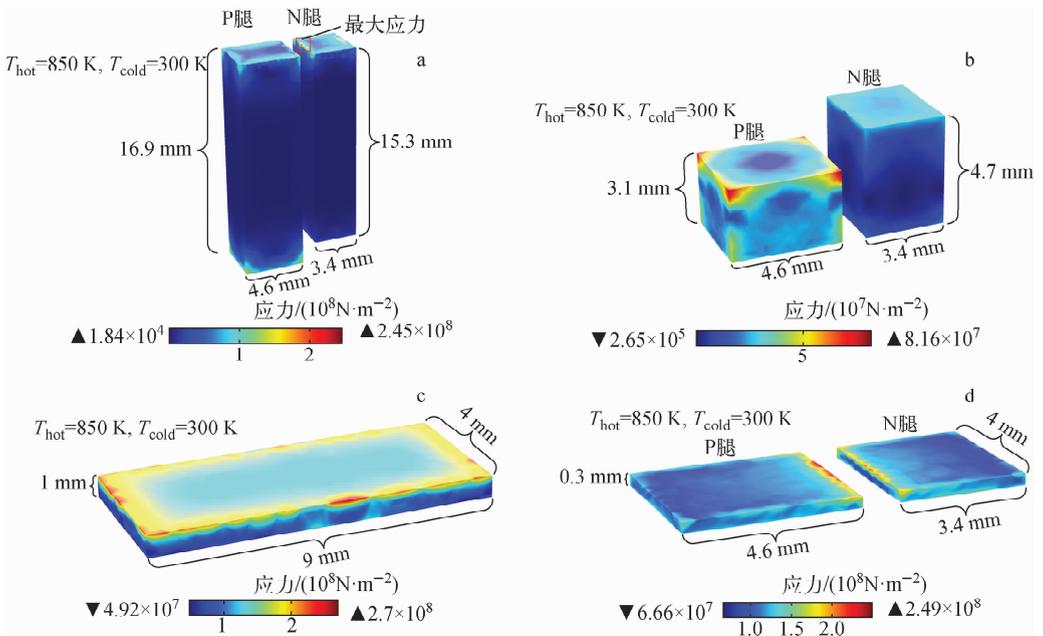
图 11 示出 STEG 中热电材料的 Von Mises 应力分布。由图 11 可见, 碲化铋、方钴矿、热端导流片和热端焊料层的最大应力分别为 245、81.6、270 和 249 MPa, 热应力的最大值一般出现在边缘和拐角处。此外, 热电材料主体部分的应力较低, 最低可达 0.18 MPa。

在模拟过程中也考虑了塑性变形。热源附

近的铜导体和焊料层被视为弹塑性材料, 铜导体和焊料层的变形已进入塑性阶段, 塑性变形可有效缓和 STEG 中的应力, 因此在热力学模拟中塑性行为不可忽略。

### 3.4 单通道模型的热电和热力性能

在对图 2 所示的 STEG 进行详细优化和模拟后, 本文搭建了单通道模型并进行数值模拟, 以探索带有 STEG 的热管堆的热电性能和热力性能。尽管模型中使用了 10 个 STEM, 但热管冷端的温度分布差别不大, 因此只给出 1 个 STEM 的结果。



a—碲化铋; b—方钴矿; c—热端导流片; d—热端焊料层

图 11 STEG 中各材料的 Von Mises 应力分布

Fig. 11 Von Mises stress distribution of different materials in STEG

图 12 示出单通道模型,图 13 示出 STEM 的温度场。如图 12、13 所示,从堆芯到 STEM 热端的温降仅为 7 K,这说明热管具有良好的导热性和等温性能;温降主要集中在 STEM 上,约为 537 K。

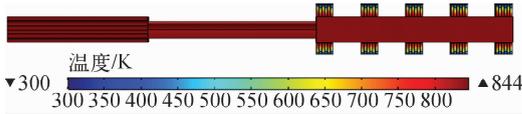


图 12 单通道模型的温度场分布  
Fig. 12 Temperature distribution of single channel model

以上,以防止热电转换效率过度降低。

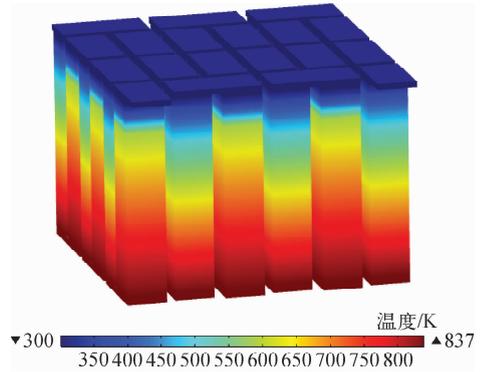


图 13 STEM 的温度场分布  
Fig. 13 Temperature distribution of STEM

图 14 示出单通道模型的热源改变时热电转换效率和输出功率的变化。由图 14 可见,随着加热功率的增加,热电转换效率和输出功率也随之提高,最大热电转换效率为 15.63%,最大输出功率为 47.29 W。当加热功率从 300 W 变为 100 W 时,热电转换效率下降幅度越来越大,每 10 W 最大下降 0.668%。这一现象表明,除停堆工况外,热管堆应保持在一定的功率

与 3.2 节的模拟和优化结果相比,热电转换效率从 15.75% 降至 15.63%,降低了 0.565%,这一结果的主要原因是 STEG 的集成带来的附加热阻以及从堆芯到 STEM 的热损失。

图 15 示出单通道模型中 STEM 的热力特性。如图 15 所示,STEM 的最大应力为 547 MPa,主要发生在冷端的绝缘陶瓷板上;最小应力为

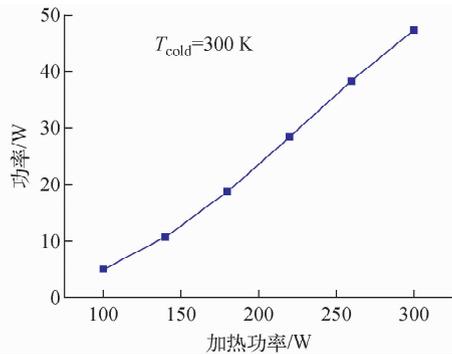
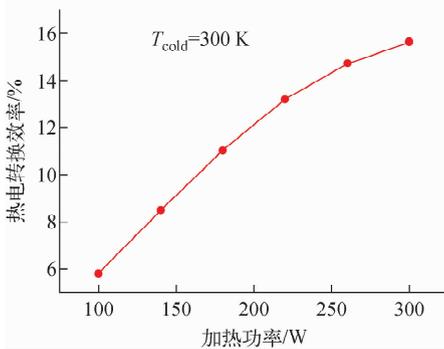


图 14 加热功率变化对热电转换效率和输出功率的影响

Fig. 14 Effect of variation of heating power on efficiency and output power

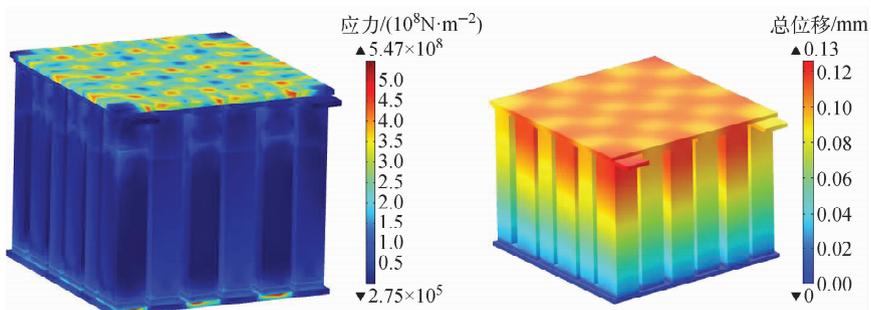


图 15 STEM 的应力和总位移

Fig. 15 Stress and total displacement of STEM

0.255 MPa,发生在方钴矿的中部;STEM 的最大变形可达 0.13 mm。STEM 各组件的详细应力和应变结果列于表 2。

表 2 主要材料的最大应力和位移

Table 2 Maximum stress and displacement of main material

材料	最大应力/MPa	最大位移/mm
碲化铋	190	0.11
方钴矿	192	0.12
热端导流片	258	0.13
热端焊料层	254	0.12

## 4 结论

本文提出了一个带有 STEG 的热管堆的概念设计,并建立了热管堆中 STEG 的三维有限元分析模型,通过 COMSOL 软件对单 STEG 和单通道模型中的热电和热力性能进行研究,研究结果如下。

1) 在设计 STEG 时,采用碲化铋作为冷端热电材料,方钴矿作为热端热电材料,经过数值模拟确定了最佳几何尺寸。P 型支腿的碲化铋高度为 3.1 mm,相应的方钴矿高度为 16.9 mm; N 型支腿的碲化铋高度为 4.7 mm,相应的方钴矿高度为 15.3 mm;P 型支腿的截面积为 4.6 mm×4 mm,对应的 N 型支腿的截面积为 3.4 mm×4 mm。

2) 根据 STEG 的优化结果,最大热应力出现在靠近热端的铜导流片上,约为 270 MPa,最小应力出现在方钴矿上,约为 81.6 MPa。

3) 将优化后的 STEG 进行集成形成单通道模型,并进行性能模拟,结果表明模型的热电性能从 15.75% 下降到 15.63%,最大应力从 270 MPa 上升到 547.5 MPa。

## 参考文献:

- [1] MARKOLIYA A I, SUDAK N M, SABO E P, et al. Development and improvement of thermoelectric generator modules for a space nuclear power system[J]. Atomic Energy, 2000, 89(1): 583-586.
- [2] WANG D, LIU Y, JIANG J, et al. Potential application of a thermoelectric generator in passive cooling system of nuclear power plants[J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(5): 3 109-3 114.
- [3] GABBAR H A, BARRY S C A, STEELE D, et al. Evaluation and optimization of thermoelectric generator network for waste heat utilization in nuclear power plants and non-nuclear energy applications[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 101: 454-464.
- [4] EL-GENK M, TOURNIER J M. Conceptual design of HP-STMCs space reactor power system for 110 kW<sub>e</sub>[C]// AIP Conference Proceedings. [S. l.]: [s. n.], 2004.
- [5] TANG S, WANG C, LIU X, et al. Experimental investigation of a novel heat pipe thermoelectric generator for waste heat recovery and electricity generation[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(9): 7 450-7 463.
- [6] TANG S, WANG C, LIU X, et al. Experimental investigations on start-up performance of static nuclear reactor thermal prototype[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(4): 3 033-3 348.
- [7] TIAN W X, LIU X, WANG C L, et al. Experimental investigation on the heat transfer performance of high-temperature potassium heat pipe for nuclear reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 378: 111182.
- [8] LIU X, ZHANG R, LIANG Y, et al. Core thermal-hydraulic evaluation of a heat pipe cooled nuclear reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 142: 107412.
- [9] CHAMPIER D. Thermoelectric generators: A review of applications[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 140: 167-181.
- [10] CLIN T, TURENNE S, VASILEVSKIY D, et al. Numerical simulation of the thermomechanical behavior of extruded bismuth telluride alloy module[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(7): 994-1 001.
- [11] ZUO Z J, FAGHRI A. A network thermodynamic analysis of the heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(11): 1 473-1 484.
- [12] LI W J, POUDEL B, NOZARIASBMARZ A, et al. Bismuth telluride/half-Heusler segmented thermoelectric uncouple modules provide 12% conversion efficiency[J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(38): 2001924.