

空间快堆事故工况下温差发电器特性研究

杨 帅, 单建强, 张 斌

(西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

摘要:从温差发电器的瞬态导热数学模型出发,研究空间快堆在发生无保护超功率事故(UTOP)与无保护失流事故(ULOF)情况下温差发电机温度和热电转换效率的变化趋势。结果表明,在空间快堆发生事故时,温差发电器的热力学变化足以保证热电装置和空间快堆的安全性。

关键词:温差发电机;空间快堆;安全性

中图分类号:TL413.33

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)08-0747-04

Characteristics of Thermoelectric Generator Under Space Fast Reactor Accident

YANG Shuai, SHAN Jian-qiang, ZHANG Bin

(School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the transient conduction model of thermoelectric generator, the analysis was performed on the temperature and efficiency change of thermoelectric generator under UTOP and ULOF of space fast reactor. The results indicate that the thermodynamic changes of thermoelectric generator can insure the safety of thermoelectric device and space fast reactor in case of the accident.

Key words: thermoelectric generator; space fast reactor; safety

热电转换装置是在存在温差情况下直接把热能转换成电能的装置,它在远程空间探索、军事、远距离通讯及导航和设备保护、小功率电源、温差电感器和废热发电方面有着广泛应用。基于热电转换装置在发电过程中无噪音、无磨损、无介质泄露,且结构紧凑、体积小、质量轻等独特优点^[1],将热电转换装置作为空间快堆的发电设备,可确保空间快堆的固有安全性。因此,研究空间快堆发生事故时热电转换装置的热力学特性和转换效率的变化过程对确保空

间堆固有安全性有着重要意义。

在空间堆的使用和研发中,直接热电转换装置一般有3种:温差发电机(Thermoelectric, TE)^[2]、热离子发射热电发电机^[3]和碱金属热电发电机^[4]。在这3种热电转换装置中,尽管TE的热电转换效率相对较低(3%~7%),但其具有结构简单、体积紧凑、适应性强、发展相对成熟的优势,在太空核电源中有着广泛应用。把这种技术应用到空间快堆中,也符合空间快堆固有安全的设计理念。

1 TE 原理及其结构

温差电转换器发电示意图^[5]如图 1 所示,将两种不同类型的热电转换材料 N 和 P 的一端结合并将其置于高温状态,另一端开路并给以低温。热端在高温激发作用下,使得热端的空穴和电子浓度比冷端高,在这种载流子浓度梯度的驱动下,空穴和电子向冷端扩散,从而在冷端形成电势差。将许多对 P 型和 N 型热电转换材料连接起来组成模块,就可得到足够高的电压,形成温差发电机。

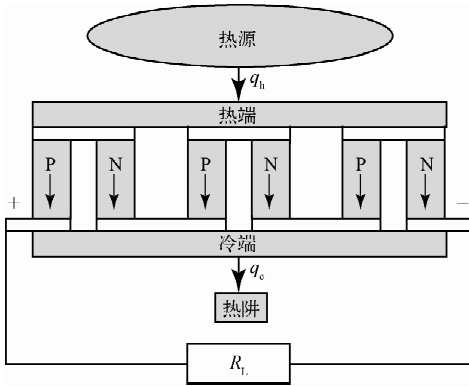


图 1 TE 装置示意图

Fig. 1 Scheme of thermoelectric generator

2 TE 数学模型

取温差发电器的 1 个 P、N 半导体单元为研究对象(图 2),假设 P 和 N 的半导体温差电材料的侧壁面是绝热的,即热量的传递只沿着壁轴的方向,同时假设半导体的导热系数不随壁轴发生变化^[6]。

温差电半导体材料的微分导热方程为:

$$A\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = A\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \pm \tau I \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\gamma I^2}{A} \quad (1)$$

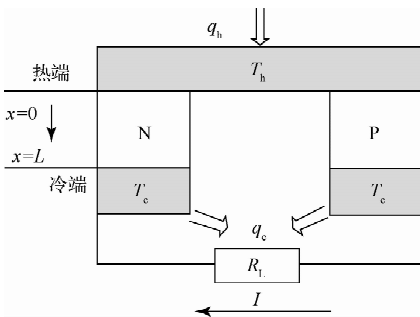


图 2 TE 计算模型

Fig. 2 Computation model of TE

起始条件和边界条件为:

$$T(0, x) = T_0(x)$$

$$q_h(t, 0) = h_h(T_{pri} - T(t, 0)) \quad (2)$$

$$q_c(t, L) = h_c(T(t, L) - T_{sec})$$

式(1)右边第 2 项为汤姆逊热,第 3 项为焦耳热。“+”是 P 型半导体元件,“-”是 N 型半导体元件。

式(1)中: A 为半导体元件的横截面积, m^2 ; ρ 为半导体元件的密度, kg/m^3 ; c_p 为半导体元件的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; λ 为半导体元件的导热系数, $W/(m \cdot K)$; τ 为半导体材料的汤姆逊系数, V/K ; γ 为半导体元件的电阻率, $\Omega \cdot m$; I 为通过半导体元件的电流, A ; L 为半导体元件的长度, m 。

式(2)中: $q_h(t, 0)$ 、 $q_c(t, L)$ 分别为一回路冷却剂向 TE 热端和 TE 冷端向二回路冷却剂传递的热流密度, W/m^2 ; h_h 、 h_c 分别为一回路冷却剂和二回路冷却剂对 TE 的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_{pri} 、 T_{sec} 分别为一回路冷却剂和二回路的冷却剂的温度, $^{\circ}C$; T 为半导体材料温度, $^{\circ}C$; t 为时间, s 。

须计算出通过 TE 元件的电流后才可对式(1)进行求解:

$$I = \alpha_{pn}(T(t, 0) - T(t, L))/(R_L + R_N + R_P) \quad (3)$$

式中: α_{pn} 为 TE 元件的塞贝克系数, V/K ; R_L 为外部电阻, Ω ; R_N 、 R_P 分别为 TE 元件 N 型和 P 型半导体自身的电阻, Ω 。

温差发电器的效率为:

$$\eta = \frac{P_e}{P_h} = \frac{I^2 R_L}{P_p + q_h A - \frac{1}{2} P_J - \frac{1}{2} P_T} \quad (4)$$

式中: P_e 、 P_h 分别为负载功率、温差电热端输入的热功率; P_p 、 $q_h A$ 、 $P_J/2$ 、 $P_T/2$ 分别为珀尔帖热、傅里叶热流、焦耳热和汤姆逊热,并分别为 $P_p = \alpha_{np} T(t, 0) I$ 、 $q_h = -\lambda \partial T(t, 0)/\partial x$ 、 $P_J = LyI^2/A$ 、 $P_T = L\tau I \partial T/\partial x$ 。

式(1)是一非线性、非齐次的微分方程,在应用数值方法求解时,需对时间项进行向后差分,对导热项使用隐式中心差分格式,汤姆逊热项也使用隐式差分格式^[7],则式(1)变为:

$$A\rho c_p \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = A\lambda \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \tau I \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\gamma I^2}{A} \quad (5)$$

式(9)两边同时乘以 Δx , 整理得到:

$$M_i c_p \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = K_i (T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) - K_i (T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}) + \tau I (T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) + \frac{\gamma I^2 \Delta x}{A} \quad (6)$$

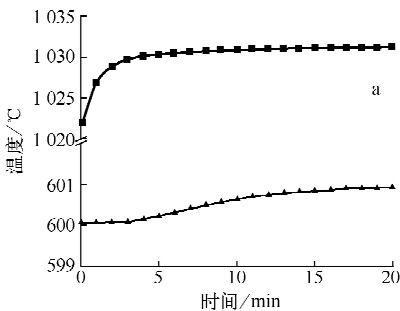
式中: Δx 为差分所取控制体的长度, 其质量 $M_i = A \rho \Delta x$; i 为差分所取控制体的编号; n 为时间层; K_i 为系数, $K_i = A \lambda / \Delta x$ 。

此时, 式(6)已化简成了 1 个常微分方程, 可利用龙格-库塔法进行求解。

3 数值计算结果及其分析

本文所研究的 RAPID-L^[8] 是 1 座热功率为 5 000 kW、电功率为 200 kW 的空间快堆, 氮化铀为燃料, 液态金属锂为冷却剂, 包括两个锂回路, 且一、二回路的冷却剂集管分别通过钠热管与铯热管连接于热电转换装置。一回路的电磁泵唧送锂冷却剂, 经过堆芯将燃料的热量带出, 通过热电转换装置发电, 多余的热量传给二回路, 通过散热盘将废热带走。该堆采用独特的控制系统, 是世界上首次实现自动运行的反应堆。

无保护超功率事故(UTOP)与无保护失流事故(ULOF)是空间快堆两大假想的基准事故。在 UTOP 工况下, 空间快堆因意外的反应性引入会使反应堆的功率在短时间内迅速增加, 但快堆自身的安全设备会使堆的功率很快稳定下来。ULOF 源于空间快堆一回路的电磁泵故障, 它造成堆芯的冷却剂流量骤减, 堆芯无法正常冷却, 但快堆自身的固有安全设备动作会使堆芯的温度降下来。因此, 研究这两种事故状态下 TE 元件的热力学及热电转换效率的变化具有重要意义。



3.1 TE 温度稳态分析

当空间快堆正常运行时, TE 元件稳定, 半导体温差元件的热阻很大, 元件产生的汤姆逊热和焦耳热相对于傅里叶热流较小, 所以, TE 元件以导热为主。计算结果也证实了这一点, 稳态时, TE 元件平均温度分布如图 3 所示, 温度沿元件长度的变化大体上呈一斜线。

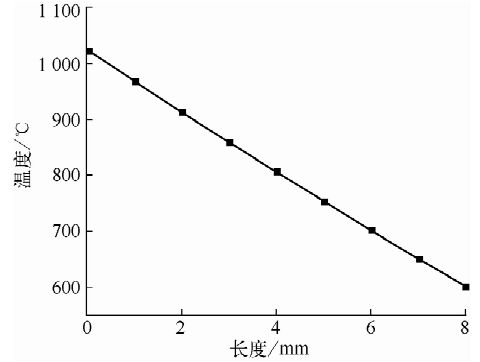


图 3 稳态时 TE 温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of TE at steady state

3.2 UTOP 下 TE 温度和效率的变化

当空间固有安全快堆发生 UTOP 时, 空间快堆的一回路 TE 集管处的温度在 30 s 内从 1 065 °C 升高到 1 075 °C, TE 元件的热端和冷端温度变化和 TE 的热电转换效率的变化如图 4 所示。在发生 UTOP 时, 由于一回路冷却剂的温度升高, TE 元件的热端温度迅速随一回路冷却剂的温度升高, 而 TE 元件冷端的温度变化很小且变化缓慢, 这归因于 TE 元件自身的大热阻。这时, TE 的热电转换效率会有小幅增加, 但变化范围不大, 这主要是由于 TE 元

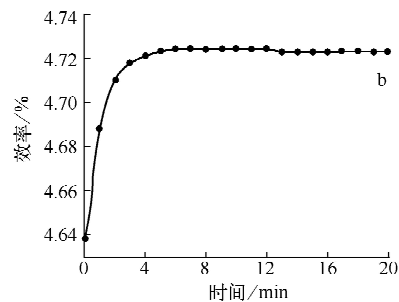


图 4 UTOP 下 TE 温度(a)和效率(b)的变化

Fig. 4 Variations of temperature (a) and efficiency (b) change for TE at UTOP

■——热端; ▲——冷端

件热端温度升高所引起的。从图 4 也可看出,效率与 TE 热端温度的变化趋势基本一致。

3.3 ULOF 下 TE 温度和效率的变化

发生 ULOF 时,空间快堆的一回路 TE 集管处的温度在 30 s 内从 1 065 °C 降到 630 °C,TE 元件热端和冷端温度变化和热电转换效率的变化如图 5 所示。发生 ULOF 时,堆芯温度虽升高,但由于一回路流量的急剧下降,冷却剂从堆芯带入 TE 部分的热量反而减小,一回路 TE 部分的冷却温度在很短时间内会降低约 100 °C,TE 元件热端温度也迅速随之下降,但由于 TE 自身的热阻大,TE 的冷端温度相对于热端温度下降较缓慢,温度变化较平稳。TE 的热电转换效率明显下降,主要归因于 TE 元件热端温度下降至很低。从图 5 可看出,效率与 TE 热端温度的变化趋势基本一致。

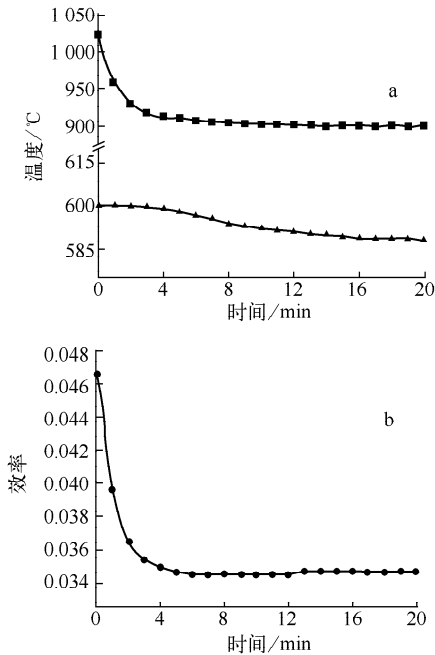


图 5 ULOF 下 TE 温度(a)和效率(b)的变化

Fig. 5 Variations of temperature (a) and efficiency (b) change for TE at ULOF

■——热端;▲——冷端

4 结论

通过建立的 TE 热力学和效率模型,研究分析了空间固有安全快堆 UTOP 与 ULOF 下

温差电元件的热力学过程和效率变化情况。从结果可知,在发生以上事故时,温差电元件热端的温度变化大,但由于温差电元件本身的热阻较大,TE 冷端的温度变化则十分平稳,变化不大,不会对二回路的设备造成温度冲击。同时,由于 TE 冷段温度变化小,TE 效率的变化和 TE 热端温度的变化趋势基本一致。因此,在空间快堆发上述两种事故时,TE 的热力学变化足以确保热电装置和空间堆的安全性,这符合空间快堆固有安全的设计要求。

参考文献:

- [1] 黄志勇,吴知非,周世新,等. 温差发电机及其在航天与核电领域的应用[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(增刊):42-46.
HUANG Zhiyong, WU Zhifei, ZHOU Shixin, et al. Thermoelectric generator and its application in space and nuclear fields[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(Suppl.): 42-46(in Chinese).
- [2] MOHAMED S E, HUIMIN X, DMITRY P. Transient analysis and start-up simulation of a thermionic space nuclear reactor system [J]. Nuclear Technology, 1994, 105(1): 70-96.
- [3] ROWE D M. Applications of nuclear-powered thermoelectric generators in space[J]. Applied Energy, 1991, 40: 241-271.
- [4] MOHAMED S E, JEAN M P. AMTEC/TE static converters for high energy utilization, small nuclear power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45: 511-535.
- [5] MARKKU J L. Thermodynamic analysis of thermoelectric generator[J]. Appl Phys, 1991, 69(8): 4 318-4 323.
- [6] ALATA M, ALNIMR M A, NAJI M. Transient behavior of a thermoelectric device under the hyperbolic heat conduction mode[J]. Thermophysics, 2003, 24(6): 1 753-1 767.
- [7] MICHAEL J G, FREDERICK R B. Transient thermal analysis of a space reactor power system [J]. Nuclear Technology, 1993, 103: 19-33.
- [8] KAMBE M, TSUNODA H, NAKAJIMA K, et al. RAPID-L and RAPID operator-free fast reactors combined with a thermoelectric power conversion system power and energy[J]. Power and Energy, 2004, 218(3): 335-343.