

# 空间堆多节热离子燃料元件性能分析

叶天舟

核科学与技术学院, 西安交通大学, 陕西, 西安

**简介:** 空间堆中的热离子转换器 (TEC) 由于在将核反应堆中产生的热能向机械能转换的过程中不需要中间步骤, 相比于布雷顿循环等动态转换方式更紧凑、质量更轻且无声, 同时又比温差电转换等其他静态转换方式效率较高。由于热离子反应堆的实验研究和测试是一项复杂而昂贵的工作, 因此需要通过仿真模拟对热离子转换器进行性能分析及优化设计, 并对未来的实验设计提供依据。本文使用COMSOL®软件对多节串联热离子转换器实验装置进行了温度、力学和热电转换的耦合计算, 采用2维轴对称几何建模, 核反应热源通过电加热模拟, 热阱采用共轭传热模拟。相比单节热离子转换器, 多节热离子转换器一节的接收极与另一节的发射极之间需要通过换向件串联, 该模型对换向件的结构进行了优化设计。在发电工况下, 确定了合适的加热功率和间隙氦气压力以得到最大热电转换效率所需的温度分布, 并对转换器的结构进行了优化设计以保证每节转换器处于相似的工作并保证输出电流的相互匹配。计算得到装置的转换效率能达到7%左右。

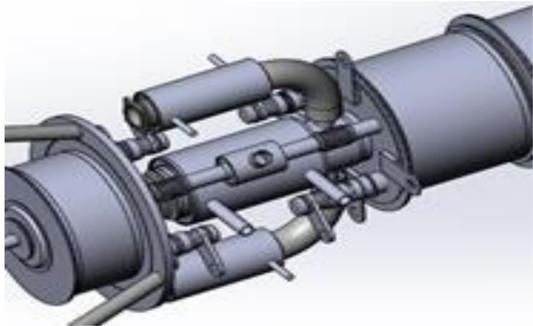


图 1. 多节热离子能量转换实验装置整体结构

**计算方法:** 空间堆热离子转换器的计算涉及到传热、流动、结构力学、热电转换等多个物理场的耦合计算, 使用的计算模块包括AC/DC模块、CFD模块、传热模块、结构力学模块、优化模块、材料库、SolidWorks®同步链接模块、App开发器, 多物理场接口包括表面对表面辐射传热、热膨胀、电磁热、非等温流动。其中各个物理场的控制方程如下

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\vec{q} + \vec{q}_r) = -\alpha T / \frac{dS}{dt} + Q$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\vec{q} + \vec{q}_r) = \alpha_p T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla p \right) + \tau / \nabla \vec{u} + Q$$

$$\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \vec{j} \cdot \vec{E} + Q$$

转换器的各层间隙充有He以增强换热, 同时在电极间充入了Cs蒸汽用来降低功函数, 提升发电效率, 因此各层气隙之间的能量交换为辐射换热和气隙传热的叠加。由于低压窄缝下气隙换热的特殊性, 宏观的传热微分方程不再适用。一般将稀薄气体、低密度和低压下气体的导热分为连续导热区、温度跳跃区、过渡区和自由分子热传导区四个区域。在温度跳跃区, 有不同学者总结了间隙换热的公式。本文采用由Ross和Stoute<sup>[1]</sup>提出的气体间隙换热模型来计算间隙的温降, 其中考虑了间隙压力和间隙宽度对换热系数的影响:

$$h_{gas} = \frac{\lambda_{gas}}{d_{eff} + d + 1.8 \cdot (g_1 + g_2)}$$

级间通过Cs蒸汽的气隙传热采用Hatsopoulos和Gyftopoulos<sup>[2]</sup>的模型:

$$h_{Cs} = \frac{\lambda_{Cs}(T_{mw})}{d + 1.15 \times 10^{-5} [(T_E + T_C) / P_{Cs}]}$$

热离子发射电流遵循Richardson-Dushman<sup>[3]</sup>方程

$$J_{em} = \begin{cases} AT_E^2 \exp\left(-\frac{\phi_E}{kT_E}\right), qV \leq \phi_E - \phi_C \\ AT_E^2 \exp\left(-\frac{\phi_C + qV}{kT_E}\right), qV > \phi_E - \phi_C \end{cases}$$

电子从发射极发射会带走一部分能量, 即发射极电子冷却。对于发射极上任一点, 电子带走的能量密度为

$$q_e = j \cdot \left( \phi_C + \phi_E - \phi_C + \frac{2k_B T_E}{e} \right)$$

对比单节热离子能量转换, 多节的热离子转换器各级的发射电流需要通过自洽计算保持电荷守恒, 并根据外部电路获得不同加热功率下的最佳热电转换效率和最佳发电工况。

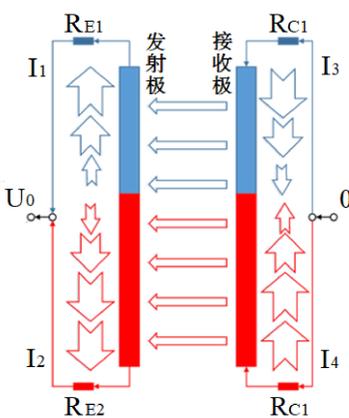


图 2. 单节热离子能量转换示意图

**计算结果:** 温度分布的计算结果和实验值的对比如图3所示。多节热离子转换器中一层几何结构为支撑管, 其上布置有热电偶, 用于测量沿轴向支撑管上的温度分布, 并评估装置整体温度分布。从图3中可以看出计算模型对于温度分布整体估计较为良好, 其在装置两端的温度差异可能由于模型简化所致, 并不影响工作段的计算结果。

在对装置加热功率进行扫描后的温度分布如图4所示。从过去的实验中发现, 在发射极温度分布在1600°C左右, 发射电流具有极大值。通过参数扫描或优化算法可以据此获得相应加热功率, 同时获得支撑管温度分布数据用于指导实验。某输出电压对应电极电势分布如图5所示。图6对比了延长热阱对电极温度分布的影响。延长热阱的目的是展平接收极温度分布, 减低多节串联引起的电流扼流现象, 由于装置两端气隙宽度较中部活性区大, 因此作用并不显著, 需要改进结构设计。

表1给出了加热功率和输出电压对总电流和热电转换效率的影响。随着输出电压的升高, 由于输出电压越小, 发射电流密度越大, 发射的电子越多, 电子冷却的作用越明显, 导致在相同加热功率下, 发射极的平均温度降低。热电转换效率在不同加热功率和温度下存在最大值。用于连接电极的换向件需要较低的轴向导热和较高的强度, 一般用开槽和打孔的方式可以降低其等效导热同时降低最大Mises应力和塑性变形量。图7展示了优化槽宽和孔径前后的对比, 优化后的结构对整体的力学性能略有提升, 但显著降低了轴向导热, 减小了能量损失。

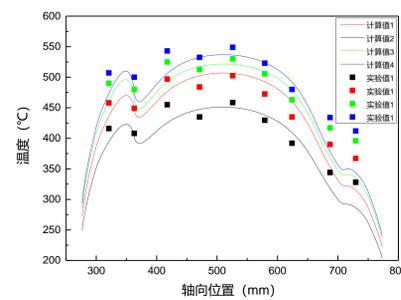


图 3. COMSOL温度分布计算结果与实验的对比

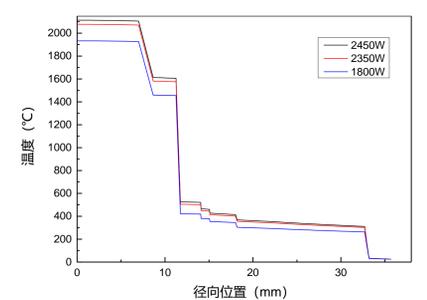


图 4. 径向温度分布

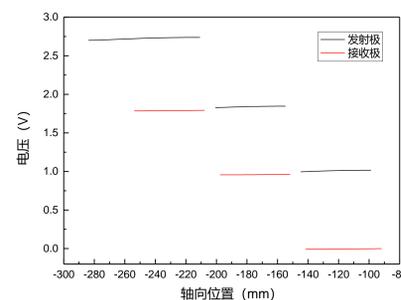


图 5. 电极电势分布

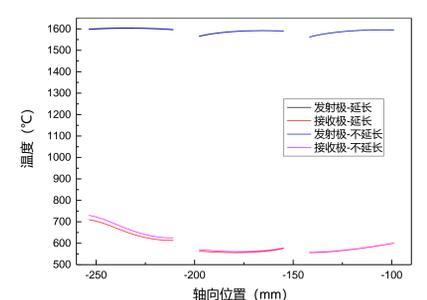


图 6. 电极温度分布

加热功率/W	有效热功率/W	发射极平均温度/°C	接收极平均温度/°C	输出电压/V	总电流/A	转换效率/%
3000	1495.0	1625.4	631.5	4.0	36.4	4.86
3000	1511.7	1613.3	632.4	3.5	45.0	5.25
3000	1552.8	1582.0	634.6	3.0	64.6	6.45
3000	1566.9	1572.8	635.5	2.7	72.3	6.51
3000	1572.8	1568.5	635.9	2.5	76.7	6.39
3000	1660.2	1499.8	641.5	2.0	119.5	7.97
3000	1720.9	1456.4	646.1	1.5	153.0	7.64
2400	1246.6	1533.7	564.9	2.7	33.8	3.80

表 1. 不同参数对转换效率的影响

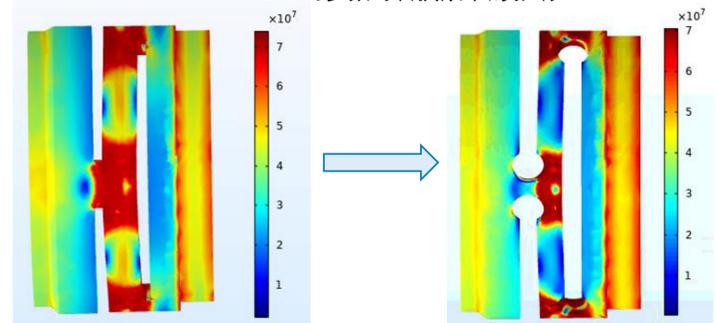


图 7. 换向件的优化设计

**结论:** 本文通过COMSOL®对多节串联热离子转换器实验装置进行了温度、力学和热电转换的耦合计算, 对加热功率和输出电压等参数进行了研究, 并优化了换向件的设计, 对多节热离子能量转换实验的开展提供了数值依据和一定的指导意义。

## 参考文献:

- Ross A M, Stoute R L. HEAT TRANSFER COEFFICIENT BETWEEN UO<sub>2</sub> AND ZIRCALOY-2[J]. Crfd, 1962.
- Houston R B J M. Thermionic Energy Conversion, Vol. 1: Processes and Devices by G. N. Hatsopoulos; E. P. Gyftopoulos[J]. American Scientist, 1974, 62(6):747.
- B.A.乌沙考夫, "热离子转换器的理论基础", 李耀鑫译, 杨继材校, P1.1999年12月。