

TOPAZ-2 型空间核反应堆电源发电元件电加热 试验段热工区分析

赵振华¹ 雷华祯¹ 杨鹏²

(1 中国原子能科学研究院 北京 102413; 2 中核战略规划研究总院 北京 100048)

摘要: 通过热离子发电元件研制过程, 分析了堆外电加热试验段的重要性。根据试验段主体结构及热工区结构的分析, 结合热工区热工设计, 得出热工间隙取值的意义, 同时利用发电元件自身特性, 建立热工区一维热工模型, 计算得出热工间隙距离取值范围, 并进一步验证该结果的正确性, 为后续其他型号试验装置研发提供了重要基础。

关键词: TOPAZ-2; 空间核反应堆电源; 发电元件; 电加热试验段热工区; 热工模型

0 引言

TOPAZ-2 型空间核反应堆电源是采用热离子转换方式将热能直接转换为电能的核反应堆电源。电源的核心部件包括热离子发电元件(简称发电元件)、堆芯容器、核燃料、电极接头等组成。

发电元件在研制过程中, 主要开展核燃料裂变加热堆内试验和电加热堆外试验。电加热堆外试验利用钨电加热器代替核燃料对发电元件进行加热, 由于其试验难度小、成本低、试验后检验方便等优点, 是发电元件研制过程中必不可少的环节。电加热试验需在专用试验台架上开展, 如俄罗斯里克试验台架, 在试验台架上放置装载发电元件的加热试验段, 通过与试验台架连接, 建立发电元件运行所必须的工况, 达到开展电加热试验的要求。

本文对 TOPAZ-2 型核反应堆电源发电元件的专用电加热试验段热工区进行分析。

1 发电元件试验段

发电元件试验段是电加热专用试验台架的核心部分, 是发电元件堆外电加热试验的载体。发电元件依靠钨电加热器提供热源, 通过与试验台架的真空系统、铯系统、氦气系统等相连, 建立发电元件运行的环境。同时将发电元件发电过程中产生的大量余热(输入热量的 90% 以上) 排出并被冷却水带走, 通过调节试验段内氦气隙压力和水流通道的运行参数, 可以达到调节发电元件参数, 干预电输出性能的目的, 试验段、钨电加热器、发电元件相对关系如图 1 所示。

1.1 试验段主体结构

发电元件试验段主要由钨电加热器腔室、电极、上

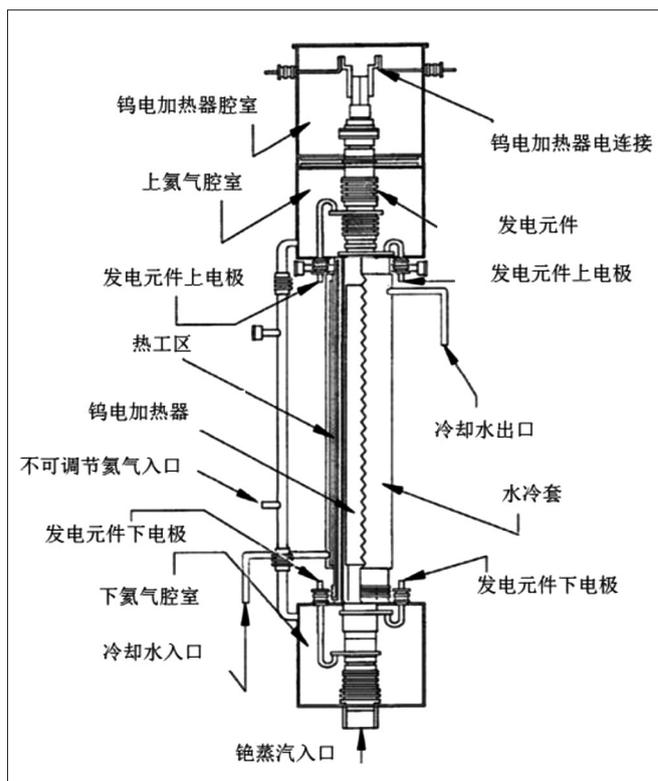


图 1 试验段、钨电加热器、发电元件相对关系图

下氦气腔室、热工区、下端铯蒸汽嘴和支撑架等主要部件组成, 如图 2 所示。

钨电加热器腔室位于试验段最顶端, 主要功能是通过安装在腔室外壁的一对电极为钨电加热器提供电源连接。为降低发电元件与试验段之间接触热阻, 有效排除余热, 热工区上下两端分别设置两个氦气腔室, 通过腔室将恒定压力的氦气充入到发电元件与试验段孔道之间的间隙中, 改善间隙导热环境。热工区是试验段的核心区域, 主要功能是为发电元件建立服役工况

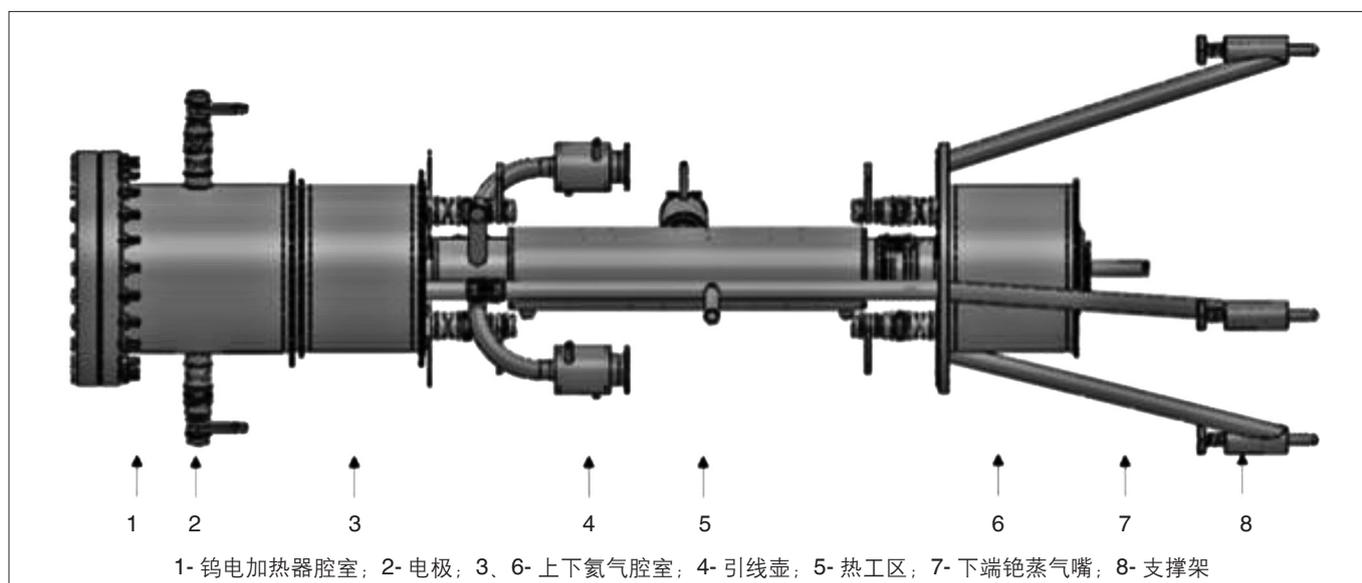


图2 发电元件试验段三维示意图

下的台阶式温度梯度，铯蒸气嘴安装在试验段最下端，将发电元件底端与铯蒸气嘴以焊接方式密封连接在一起，通过铯蒸气嘴向发电元件电极间隙内充入铯蒸气，确保试验过程中元件电极间隙内必须铯环境。

1.2 热工区主体结构

热工区是工作段的核心区域，为多层套管结构，主要由支撑管、导热块、和水冷套等圆柱形部件组成，如图3所示。

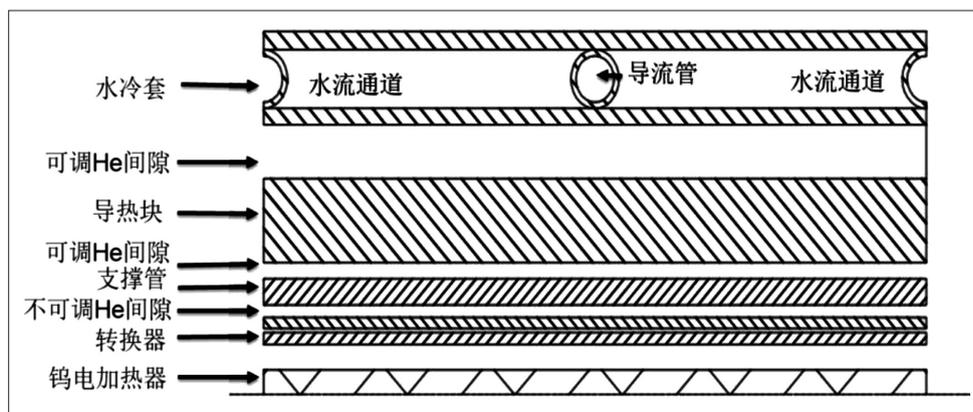


图3 热工区轴向截面示意图

支撑管位于热工区最内层，起到支撑导热块的作用，同时也是发电元件的安装孔道。导热块位于支撑管外侧，主要功能是安装加热炉，为试验段进行试验前除气，防止试验过程中试验段本身释放的杂质气体改变试验段内部气体热导率，从而影响发电元件温度稳定性。水冷套位于热工区最外层，试验运行过程中产生的大量余热通过水冷套被冷却水带走。支撑管与导热块、导热块与水冷套之间都存在一定距离的间隙，间隙内通入一定压力氦气，通过调节氦气压力，改善间隙内氦气导热系数，达到调节发电元件接收极温度

参数的目的。

2 发电元件试验段热工设计

发电元件主要由圆柱形发射极和接收极组成，电极间隙间距为0.5mm，运行过程中电极间隙充入铯蒸汽。接收极表面喷涂一层厚度为0.15mm的氧化铝涂层，用于发电元件接收极与试验台架之间电绝缘。氧化铝绝缘涂层与热工区支撑管之间间隙距离为0.05mm，确保发电元件可以装入试验段中，通过试验段接口将压力范围为27~40kPa恒压氦气充入间隙，改善间隙导热环境。

支撑管与导热块之间由于机械装配需要，间隙距离为0.05mm，间隙内充入压力范围为0.5~2.7kPa可调压氦气。导热块与水冷套内壁之间存在一定距离的间隙，该间隙与支撑管导热块之间间隙相通。试验运行过程中，通过调节试验

段内上述两个间隙氦气压力，改变间隙间气体热导率，达到控制发电元件参数的目的。

发电元件热电转换效率一般小于10%，在堆外电加热试验过程中，热工区既要保证发电元件处于最佳温度范围内，同时保证大量余热顺利排出。因此，需结合发电元件自身特性及发电工况，开展热工区热工设计，确定导热块与水冷套内壁之间的热工间隙距离，确保发电元件各部件在理想的温度条件下运行。

2.1 热工模型

钨电加热器为发电元件提供的热量，仅有小部分通

过发电元件转换为电能,其余大部分热量通过发电元件发射极、电极间隙、发电元件接收极、恒压氦气间隙、试验段支撑管、可调氦气间隙、试验段导热块、试验段水冷套等传热环节,被冷却水带走,其一维热工模型热阻网络示意图,如图4所示。

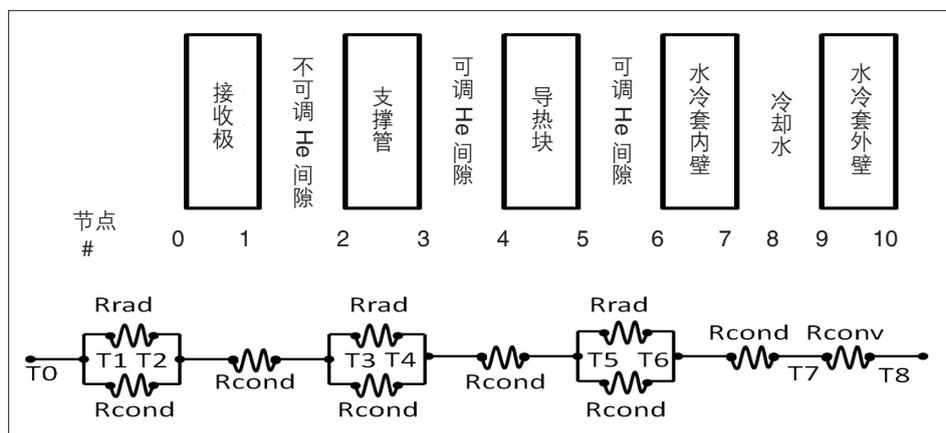


图4 一维热工模型热阻网络示意图

模型假定热量从发电元件接收极外表面开始,一直传递到水冷套。在整个热阻网络中,主要传递方式为热辐射,热传导和强制对流等三种形式。其中热辐射贯穿整个传热过程,在可调和不可调氦气间隙传热过程中,辐射传热起到了关键作用,热传导则主要发生在金属部件和气体间隙,强制对流主要产生于冷却水流动过程中。

2.2 热工计算

根据发电元件相关研究,当接收极温度在 873.15K 左右时,发电元件电输出性能处于最佳状态,因此热工计算过程中,拟设定接收极外表面温度为 873.15K,记为 T1。为了确保冷却水不沸腾,设定冷却水最高温度为 353.15K,记为 T8。钨电加热器输入热功率记为 Q。由于发电元件大部分余热都会通过试验段被冷却水带走,因此计算过程中,忽略电能转变为热能的过程,假定钨电加热器产生的释热全部被冷却水带走,记为 Q_{loss} 。根据俄罗斯相关研究数据,考虑到钨加热器内部负载及导线损耗,钨加热器输入热功率需经修正计算后带入热工模型,修正系数选取 0.88,修正后输入功率记为 P_{az} ,即 $P_{az}=Q_{loss}=0.88 \times Q$ 。

节点 1 温度 T1、节点 8 温度 T8 及系统热量损失 Q_{loss} 作为热工输入参数,分三部分两个方向开展计算:

(1) 从接收极外壁 T1 至导热块外壁 T5 方向计算,得节点 5 温度值 T5;

(2) 从冷却水 T8 至水冷套内壁 T6 方向计算,得节点 6 温度值 T6;

(3) 利用 T5、T6 计算所得温度值,结合热工间隙可调氦气压力,选取氦气热导率下限值,利用热工计算公式,估算得到热工间隙距离。计算过程中,分别选取发电元件在额定工况和加强工况条件下钨电加热器输入功率 3500W、4500W 作为输入热功率 Q,即 $3500W < Q < 4500W$ 。

通过上述计算,分别求得在额定工况下氦气间隙需小于 0.60mm,在加强工况下氦气间隙需大于 0.37mm,即热工区氦气热工间隙距离范围为 0.37 ~ 0.60mm。该数值范围与俄罗斯相关实验装置间隙参数基本一致,验证了该热工模型及其选取热工参数的正确性。

3 结语

发电元件试验段是发电元件在堆外电加热试验的关键设备,它既是发电元件载体又是热工装置,通过对试验段主体结构、热工区结构的分析,结合发电元件本身特性,建立试验段热工区一维热工模型,利用该模型分别计算发电元件在额定工况和加强工况下的热工间隙参数,最终得出热工区导热块与水冷套之间的热工间隙范围,并通过国外相关试验装置,进一步验证该结果的正确性。为后续开展同类型试验装置的研制提供了热工模型及相关热工参数基础。

参考文献:

- [1] 赵爱虎,薛松龄,吕征,等.TOPAZ-2型空间核反应堆电源转换器除气研究[J].原子能科学技术,2018,52(12):2194-2200.
- [2] Wold S K, Izhvanov O L, Vibivanets V I, et al. AIP SPACE NUCLEAR POWER AND PROPULSION: Eleventh Symposium-Albuquerque, New Mexico (USA) (9-13 January 1994) [J]. AIP Conference Proceedings-TOPAZ-II Thermionic Fuel Element Testing, 1994:1025-1030.
- [3] Luchau D W, Follis H D, Schreiber C A, et al. Thermionic Fuel Element Test Rig: Testing of Single Cell Thermionic Fuel Element Technology [J]. American Institute of Physics, 1994:1031-1036.
- [4] Benke S M, Venable J R. Operational testing and thermal modeling of a TOPAZ-II single-cell thermionic fuel element test stand [J]. American Institute of Physics, 1995:495-501.