热管堆的高温热管启动模型

张 洁[1,2,3] 刘福东[1,2] 王昆鹏[1,2]

1（生态环境部核与辐射安全中心 北京 102401）

2（国家环境保护核与辐射安全审评模拟分析与验证重点实验室 北京 102401）

3（上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240）

摘要 在对反应堆进行系统分析时，往往采用点堆模型处理反应堆中子动力学问题。与之类似，在对热管堆进行系统分析时，还需要一个热管模型处理热管的传热问题。本文提出了一种新的热管模型，相对于传统的热阻网络法、平面前锋法等模型，该模型不仅物理意义清晰、简洁，可以模拟热管的稳态/准稳态等状态，也可以模拟热管启动过程。通过与文献的模拟结果或实验结果进行对比，发现最大温差小于15%，温差最大的地方在热管蒸发段的管壁处。结果表明：该模型可以模拟不同状态下的热管热流分布，其计算结果较准确，并且计算负担较小。

关键词 MATLAB/Simulink，热管模型，热阻网络，“平面前锋”法

中图分类号 TL333

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250360

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250360

Startup model of high temperature heat pipe applied to heat pipe reactor

ZHANG Jie[1,2,3] LIU Fudong[1,2] WANG Kunpeng[1,2]

1(*Nuclear and Radiation Safety Center*, *Ministry of Ecology and Environment*, *Beijing 102401*, *China*)

2(*State Environmental Protection Key Laboratory of Nuclear and Radiation Safety Regulatory Simulation and Validation*, *Beijing 102401*, *China*)

3(*School of Mechanical Engineering*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai 200240*, *China*)

Abstract **[Background]** The heat pipe reactor has the characteristics of small size, simple system, no pump or valve or active equipment, and high inherent reliability. It is one of the preferred reactors used in deep sea, deep space and other fields. In the systematic analysis of the reactor, the point reactor model is often used to deal with the reactor neutron dynamics problem. Similarly, a heat pipe model is also needed to deal with the heat transfer problem of the heat pipe during the systematic analysis of the heat pipe reactor. **[Purpose]** This study aims to solve the problem of heat pipe simulation method in the process of heat pipe reactor system analysis by proposing an improved heat pipe model. **[Methods]** Firstly, a new heat pipe model was proposed to combine the traditional thermal resistance network model and flat-front method, hence not only had clear and concise physical meaning, but also could simulate the steady/quasi-steady state of the heat pipe, as well as the startup process of the heat pipe. Then, the one-dimensional multiphysics tool Simscape in MATLAB/Simulink was employed for simulation analysis of heat pipes by dividing more fine grids and combining the calculation methods of the thermal resistance network model and flat-front

国家自然科学基金(No.12435012)资助

第一作者：张洁，男，1982年出生，2019年于中国科学院大学获博士学位，研究领域为反应堆热工水力

通信作者：刘福东，E-mail：liufudong1968@sina.com

收稿日期：2025-09-23，修回日期：2025-12-04

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12435012)

First author: ZHANG Jie, male, born in 1982, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2019, focusing on reactor thermohydraulic

Corresponding author: LIU Fudong, E-mail: liufudong1968@sina.com

Received date: 2025-09-23, revised date: 2025-12-04

method. Finally, the calculation results of this model were compared with the simulation or experimental results in the literature, and this model was used to deal with the problem of equivalent multiple heat pipes with a single heat pipe. **[Results]** Simulation results of the proposed new model show that a smooth and continuous time-temperature curve is obtained without a step curve. Comparison results indicate that the maximum temperature difference is less than 15%, and the maximum temperature difference is at the heat pipe evaporator wall. **[Conclusions]** This model can simulate the heat pipe in different states, with accurate calculation results and less computational burden.

Key words MATLAB/Simulink, Heat pipe model, Thermal resistance network model, Flat-front model

小型模块化反应堆在深空探索、深海潜航、陆基核电源等领域都有广阔的应用前景。其中，热管堆以其体积小、结构简单、固有安全性高等特点成为了一个重要的备选方案。与传统水堆不同，热管堆[1-2]通过热管将堆芯内的热量传递给热电转换装置/二回路系统的热端，该过程无需液体冷却剂以及泵的参与。

以 KRUSTY（Kilowatt Reactor Using Stirling TechnologY）为例[3]，该热管堆采用高温钠热管作为堆芯传热元件。其工作原理为：热管内的固态（或液态）钠工质在热端（蒸发段）吸热蒸发，气态钠在压差的作用下流动到冷端（冷凝段）并放热冷凝，液态钠再沿多孔材料靠毛细力的作用流回蒸发段。

在热管堆模拟分析中，热管模型成为了一个难点。传统的热管模型主要有：热阻网络模型[4]、集总参数法[5]、平面前锋法[6]、二维瞬态模型[7-8]等。然而，前3个模型无法很好地描述热管从启动到稳态的全过程，二维瞬态模型又因为计算量偏大而不适合应用于系统分析工作。目前一种可行的方法是，模拟时根据热管所处的不同状态，采用对应的热阻网络模型或平面前锋法[9-11]。然而，在计算过程中，不同模型的切换会带来物理状态的阶跃，从而导致一些计算层面的困难。

本文提出一种新的热管模型，通过将热阻网络与平面前锋法的有机结合，并进一步明确其计算公式，得到更易于理解与计算的热管模拟方法[12-15]。通过该方法，无论模拟单根热管还是等效的一组热管，都能够得到较好的结果。并且，可应用于热管堆等复杂系统的模拟。

1 高温热管系统简介

热管堆等包含多热管的系统，其一种典型的构造如图1所示。其中，多根热管对称地排列，吸收加热器所释放的热量并最终将该热量传递到外部冷却设备中。

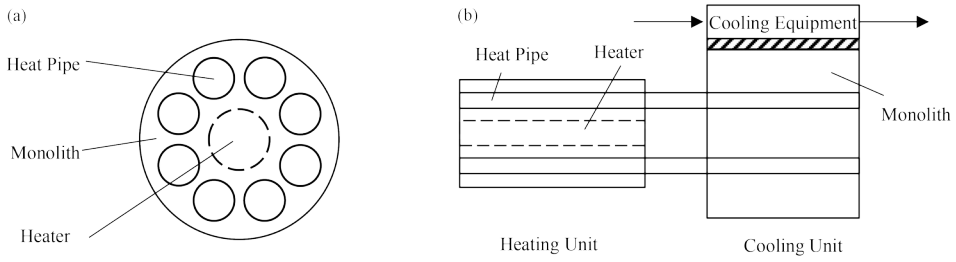


图1 热管系统的横截面图(a)和侧截面图(b)

Fig.1 Cross section diagram (a) and side cross section diagram (b) of the heat pipe system

本文采用的热管为高温钠热管，外径1.27 cm，壁厚0.089 cm，吸液芯厚0.046 cm，工质为钠，共8根。热管的蒸发段对称分布于加热单元中，该单元主体部分的材料为U8Mo合金（铀-8%钼合金，Uranium-8% Molybdenum alloy，U8Mo），直径11 cm；冷凝段对称分布于冷却单元中，该单元主体部分的材料为紫铜。加热单元中间的部件为加热器，外径4 cm，加热功率为3 kW。加热单元中的热管通过中间的绝热段到达冷却单元。其中，冷却单元通过水冷设备对热管进行冷却，同时加入了气隙套并填充氦气，以防止冷却水汽化。该系统的主要参数如表1所示。

2 模型简介

2.1 研究方法与模型方案

为了解决该复杂系统的问题，先从较简单的系统开始研究。先将研究目标从多热管系统转变为单热管系统（图2）；再进一步简化冷却方式，将研究目标确定为普通的辐射散热的热管（图3）。这样，就可以用常规的方式进行处理。

在常用的热管模型中：集总参数法太过简化，无

表1 高温热管系统参数
Table 1 High temperature heat pipe system parameters

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
加热单元直径 Heater unit diameter / cm	11	热管外径 Heat pipe outer diameter / cm	1.27
加热单元长度 Heater unit length /cm	25	热管壁厚 Heat pipe wall thickness / cm	0.089
加热单元材料 Heater unit material	U8Mo	吸液芯厚度 Wick thickness / cm	0.046
加热器直径 Heater diameter / cm	4	吸液芯孔隙率 Porosity	0.6
输出热功率 Output thermal power / W	3 000	蒸发段长度 Length of evaporator / cm	25
冷却单元直径 Cooler unit diameter / cm	11	绝热段长度 Length of adiabatic section / cm	50
冷却单元长度 Cooler unit length /cm	25	冷凝段长度 Length of condenser / cm	25
冷却单元材料 Cooler unit material	Cu	管壳材料 Container material	310S Stainless steel
系统初始温度 Initial temperature of the system	300	吸液芯材料 Wick material	316L Stainless steel
热管数量 Number of heat pipes	8	热管工质 Working fluid	Na

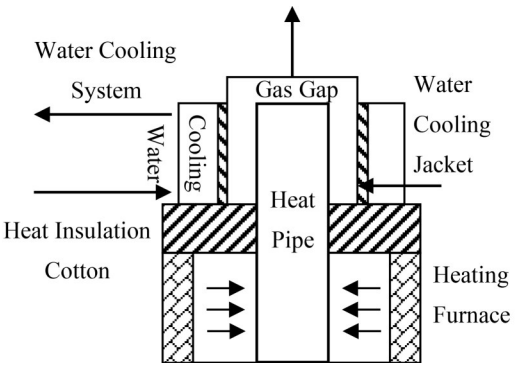


图2 单热管系统示意图
Fig.2 Diagram of single heat pipe system

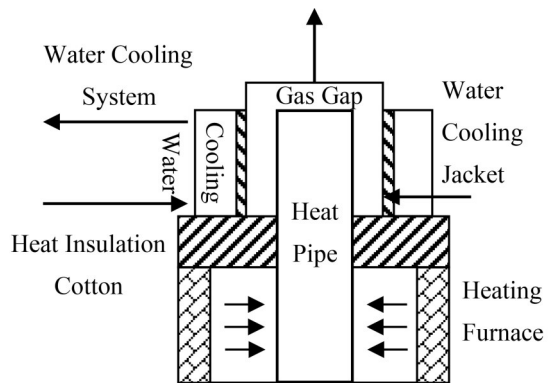


图3 热管传热示意图
Fig.3 Heat transfer diagram of heat pipe

法描述热管不同区域的状态变化；二维瞬态模型的计算负担太重，不适合应用于系统分析工作；而热阻网络模型（图4）与“平面前锋”法（图5）既考虑了热管不同区域的结构，又没有过于复杂的计算公式或庞大的计算量，最终成为了优先考虑的方案。

这里，热阻网络模型可以模拟处于稳态/准稳态阶段的热管，“平面前锋”法主要模拟启动阶段的热管。这样，将两种模型相结合，便可以模拟热管运行过程的全部状态。即从初始阶段经过启动阶段最终

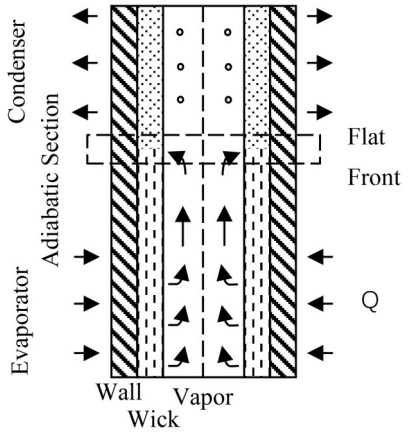


图4 热阻网络模型示意图
Fig.4 A network model for heat pipe

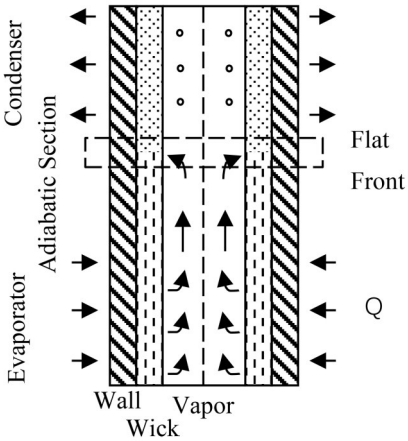


图5 “平面前锋”法模型示意图
Fig.5 Diagram of flat-front model

达到稳态阶段的过程。该改进后的热阻网络模型如图6所示。其在传统热阻网络法的基础上，划分了更多的节块，并考虑了蒸气热阻。

2.2 热阻计算公式

改进的热阻网络模型采用了传统热阻网络模型与“平面前锋”法的热阻计算公式[16-17]。需要特别说

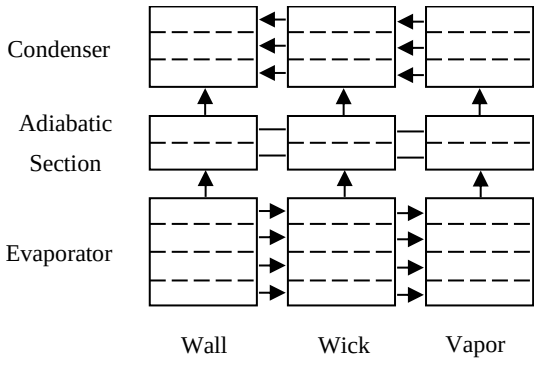


图6 改进的热阻网络模型示意图
Fig.6 Diagram of improved thermal resistance network model for heat pipe

明的是蒸气传热热阻的计算公式，其根据热阻的定义$R=\Delta T/Q$以及温降公式(1)推导而来。

$$\Delta T=\frac{4T_v\mu_v lQ}{\pi\rho_v^2 r_v^4 h_{fg}^2} \tag{1}$$

式中：ΔT为温降，K；T_v为蒸气温度，K；μ_v为动力黏度，Pa·s；l为长度，m；Q为热流量，W；ρ_v为(饱和)蒸气密度，kg·m^{-3}；r_v为蒸气腔半径，m；h_{fg}为工质的气化潜热，J·kg^{-1}。温降公式(1)是“平面前锋”启动模型中的重要公式，计算了热管内已经建立连续流的热区工质的整体温度变化。在这里，将这一公式的应用范围进行了扩展，其也包含了自由分子流以及向连续流转变过程的部分。同时，也不再将蒸气部分看作一个整体，而是与所划分节块对应的一个个区域。

综合以上内容，改进的热阻网络模型主要由式(2~5)组成：

$$R_r=\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi l\lambda} \tag{2}$$

$$R_z=\frac{l}{\pi(r_o^2-r_i^2)\lambda} \tag{3}$$

$$R_{lv}=\frac{R_0T_v^2}{h_{fg}^2P_v r_v l}\sqrt{\frac{R_0T_v}{2\pi}} \tag{4}$$

$$R_v=\frac{4T_v\mu_v l}{\pi\rho_v^2 r_v^4 h_{fg}^2} \tag{5}$$

式中：R_r为管壁、吸液芯的径向传热热阻，K·W^{-1}；R_z为管壁、吸液芯的轴向传热热阻，K·W^{-1}；R_{lv}为气液交界面热阻，K·W^{-1}；R_v为蒸气传热热阻，K·W^{-1}；r_o与r_i分别为所划分节块相对应的热管管壁(或吸液芯)的外径与内径，m；l为所划分节块相对应的热管区域长度或计算区域的蒸气腔轴向长度，m；λ为节块的热导率，W·(m·K)$^{-1}$；R_0为工质的气体常数，J·(kg·K)$^{-1}$；T_v为蒸气温度，K；P_v为(饱和)蒸气压力，Pa；h_{fg}为工质的气化潜热，J·kg^{-1}；r_v为蒸气腔半径，m；μ_v为动力粘度，Pa·s；ρ_v为(饱和)蒸气密度，kg·m^{-3}。

同时，蒸气传热部分还需要考虑传热极限的影响。当蒸气热流量达到该温度下的最大热流量时，热流量无法再增加。

2.3 传热极限的处理方法

在热管的启动运行过程中，其传热能力还受到诸多因素的制约，因此热管的模拟也需要考虑相应的传热极限。在这里，将传热极限问题简化为最大传热量随温度变化[16]的关系(图7)。至此，在热管模拟过程中，除了需要考虑热阻外，还需要考虑最大传热量，即传热极限的影响。二者的关系为：热管内的蒸气传热量不得超过传热极限。当低于传热极限时，热管内的蒸气热阻通过热阻公式(5)进行计算；否则，传热量等于传热极限，不再考虑蒸气热阻的阻值。

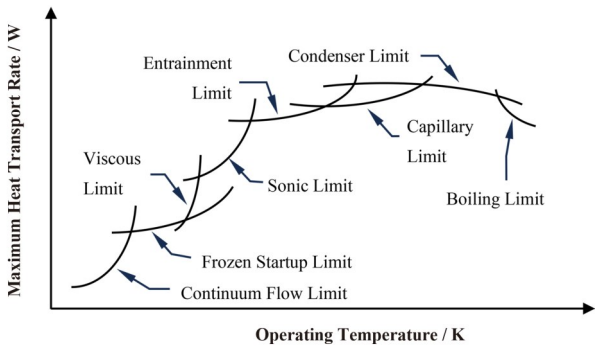


图7 热管的传热极限：最大传热量随温度的变化
Fig.7 Heat transfer limitations: variation of maximum heat transport rate with temperature

2.4 计算工具

本文采用MATLAB/Simulink下的一维多物理场工具Simscape开展热管的模拟分析工作。Simscape是基于物理模型的建模工具，其组件具有直观、可视化的特点，便于描述和分析多物理系统的行为。与其他同类型的多物理系统建模语言/工具(如Modelica/Dymola、MWORKS等)相比，MATLAB具有更为广泛的用户基础以及更高的认可度，这是选择该工具的重要原因。

3 计算结果及分析

在明确了计算方法后，需要验证该计算方法的可靠性，并通过该方法解决所提出的问题。需要验证的内容有：与热阻网络法对比，与“平面前锋”法对比，与实验对比。需要解决的问题为：多热管系统的

传热。

3.1 与稳态传热阶段模型对比

为了验证热管启动后的稳态/准稳态阶段模拟效果，通过本方法与传统热阻网络法的模拟结果进行对比，以验证该方法。此处选择文献[4]热阻网络模型的例子进行对比。其主要参数如表2所示。其中，热管初始加热功率为623 W，当热管启动并处于稳定状态后，功率跃升至770 W。

表2 热阻网络模型主要参数
Table 2 Main parameters of network model

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
管壁厚度 Wall thickness / m	0.001	管壁密度热容$(\rho C_p)_{wall}$ Density multiplied by heat capacity of wall / J·(m³·K)⁻¹	4.64×10^6
吸液芯厚度 Wick thickness/ m	0.001	管壁热导率 Thermal conductivity of wall / W·(m·K)⁻¹	21.7
蒸气腔直径 Vapor channel diameter / m	0.014	吸液芯有效密度热容$(\rho C_p)_{eff}$ Effective density multiplied by heat capacity of wick / J·(m³·K)⁻¹	1.05×10^6
蒸发段长度 Length of evaporator / m	0.105	吸液芯有效热导率 Effective thermal conductivity of wick / W·(m·K)⁻¹	45
绝热段长度 Length of adiabatic section / m	0.052 5	冷凝段外表面对流传热系数 Convective heat transfer coefficient of condenser of outer surface / W·(m²·K)⁻¹	39
冷凝段长度 Length of condenser / m	0.542 5	初始加热功率 Initial heating power / W	623
环境温度 Environmental temperature / K	300	功率阶跃至 Final heating power / W	770

该热管蒸气温度如图8所示。从图中可以看到，计算结果与文献结果符合较好，最大温差仅为3 K左右（误差约0.34%）。从而表明了该方法与原热阻网络模型的计算结果是一致的。

3.2 与启动阶段模型对比

为了验证热管启动阶段的模拟效果，通过本方法与“平面前锋”法的模拟结果进行对比，以验证该方法。此处选择文献[6]的例子进行对比。其主要参数如表3所示。

图9（a~d）显示了改进后的模型与原“平面前锋”模型的计算结果以及实验数据的对比图。从图9（a、b）可以看出，改进的热阻网络模型可以通过平滑的曲线描述中间转变状态，而非“平面前锋”模型的状态阶跃变化；并且该计算结果与实验符合得很好。在图9（c）中，热管的热区前进到了冷凝段，相比

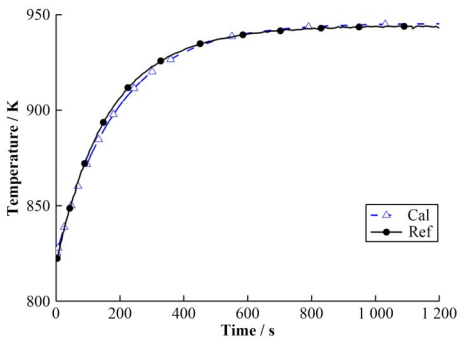


图8 与传统的热阻网络模型的热管蒸气温度对比图（彩图见网络版）
Fig.8 Comparison of heat pipe vapor temperature between the improved model and the traditional thermal resistance network model (color online)

于之前的状态，冷凝段的冷凝功率也需要更多的考虑。此处，仍然保持使用“平面前锋”模型的冷凝段计算参数，最终得到的结果与实验数据产生了一定

表3 “平面前锋”法主要参数
Table 3 Main parameters of flat-front model

参数 Parameters / m	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
管壁厚度 Wall thickness	0.001 65	热管线热容 Heat capacity per unit length of heat pipe / J·(m·K)⁻¹	1 100
吸液芯厚度 Wick thickness	0.003 1	管壁热导率 Thermal conductivity of wall / W·(m·K)⁻¹	21.7
蒸气腔直径 Vapor channel diameter	0.012 7	表面辐射率 Surface emissivity	0.32
蒸发段长度 Length of evaporator	0.375	输入功率 Heating power / W	289.6
绝热段长度 Length of adiabatic section	0.745	热管工质 Working fluid	Na
冷凝段长度 Length of condenser	0.91	环境温度 Environmental temperature / K	298.15

差异。计算值为1.825 m，实验值为1.622 m，二者相差约11.12%。在图9(d)中，热管的端盖区域情况比较复杂，可能存在非凝气体等因素导致该区域仅部分被激活，使得其无法很好地实现热管的等温性，从而与两种模拟方案的结果都不相同。

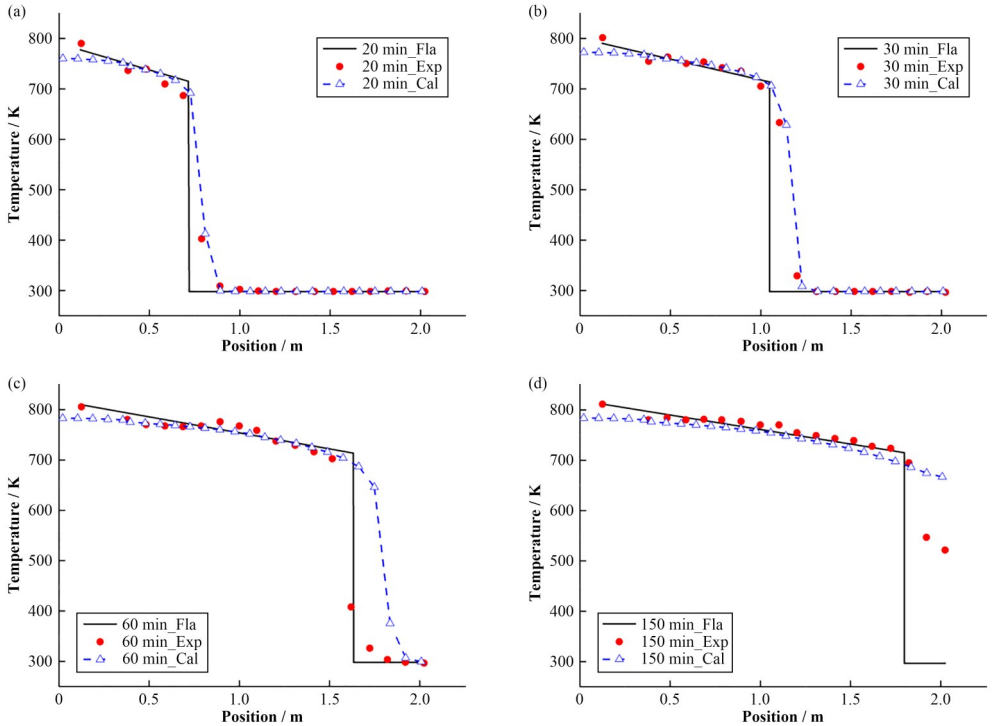


图9 改进模型与“平面前锋”模型在热管运行20 min (a)、30 min (b)、60 min (c)、150 min (d)时的蒸气温度分布对比（彩图见网络版）

Fig.9 Comparison of vapor temperature distribution at 20 min (a), 30 min (b), 60 min (c) and 150 min (d) operation of heat pipe between the improved model and the flat-front model (color online)

3.3 复杂条件下与实验结果对比

以文献[18−19]的热管实验为比较对象，考虑了加热功率变化、绝热段漏热等复杂条件，计算得到热管的状态，并与实验结果进行对比。其主要参数如表4所示。

从图10中可以看到，热管表面的温度与模拟结果有一定差别，尤其是蒸发段的温度差别较大(~100 K)。这与热管本身的制作工艺以及加热方式有关。实际上，实验测量到的蒸发段不同位置处的温

表4 实验中的主要参数

Table 4 Main parameters in the experiment

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
管壁厚度 Wall thickness / m	0.002	初始输入功率 Initial power input / W	0
吸液芯厚度 Wick thickness / m	0.000 8	最终输入功率 Final power input / W	2 300
蒸气腔直径 Vapor channel diameter / m	0.028 4	功率增加速度 Power increase speed / $W\cdot s^{-1}$	2.3
吸液芯孔隙率 Porosity	0.752 6	冷凝段外表面对流换热系数 Convective heat transfer coefficient of outer surface of condensation section / $W\cdot(m^2\cdot K)^{-1}$	8.9
蒸发段长度 Length of evaporator / m	0.40	表面辐射率 Surface emissivity	0.75
绝热段长度 Length of adiabatic section / m	0.20	绝热段外部连接的等效热阻 Equivalent thermal resistance connected to the outer surface of the adiabatic section / $K\cdot W^{-1}$	5
冷凝段长度 Length of condenser / m	0.40	管壳材料 Container material	310S Stainless steel
环境温度 Environmental temperature / K	299	吸液芯材料 Wick material	316L Stainless steel
		热管工质 Working fluid	Na

度本来就有较大差异，而模拟得到的温度比较一致。最终稳态/准稳态阶段的热管均温性也是实验中的热管均温性较差（~150 K），而模拟的均温性较好（~10 K）。这是由于热管的模拟是在理想状态下得到的结果。同时可见，模拟结果对不同时间段的热区范围预测较准确。因此，可以认为该模拟方案是合理的。

3.4 多热管复杂问题的解决

以多热管系统为研究对象。由于其是轴对称分布，仅需其一个扇形区域（1/8圆）即可获得系统整体的状态。另外，也采用等效的方式，将整个多热管系统等效为一个单热管系统。并对这两种方法的计算结果进行比较，以进一步确认该方法的正确性。

在等效方法中，将多热管等效为单根热管。其中，多热管的总质量维持不变（此处为原始单根热管质量的8倍），其轴向热阻与径向热阻均等效为原始单根热管的1/N（此处为1/8）。需要特别说明的是，在该算例中，忽略了加热、冷却单元主体部分的热阻的影响，从而能够更直接地反映热管的传热效果。具体参数如表5~7所示。

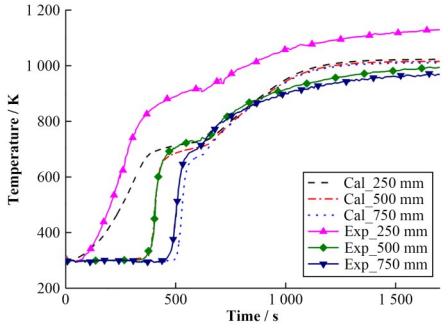


图10 热管表面温度计算结果与实验结果对比图（彩图见网络版）

Fig.10 Comparison of the surface temperature of heat pipe between calculation results and experimental results (color online)

表5 热管的主要参数

Table 5 Main parameters of heat pipe

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
管壁厚度 Wall thickness / cm	0.089	管壳材料 Container material	310S Stainless steel
吸液芯厚度 Wick thickness / cm	0.046	吸液芯材料 Wick material	316L Stainless steel
蒸气腔直径 Vapor channel diameter / cm	1.0	热管工质 Working fluid	Na
吸液芯孔隙率 Porosity	0.6	环境温度 Environmental temperature / K	300

表6 热管系统扇形区域的主要参数

Table 6 Main parameters of the fan-shaped region of the heat pipe system

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
加热单元长度 Length of heater unit / cm	25	冷却单元长度 Length of cooler unit / cm	25
加热功率 Output thermal power / W	375	冷却单元材料 Cooler unit material	Cu
加热单元材料 Heater unit material	U8Mo	冷却单元质量 Cooler unit mass / kg	2.362 5
加热单元质量 Heater unit mass / kg	4.025	外部冷却设备热阻 Thermal resistance of external cooling equipment / K·W^{-1}	0.8
		外部冷却设备温度 Temperature of external cooling equipment / K	300

表7 等效的热管系统的主要参数

Table 7 Main parameters of the equivalent heat pipe system

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
加热单元长度 Length of heater unit / cm	25	冷却单元长度 Length of cooler unit / cm	25
加热功率 Output thermal power / W	3 000	冷却单元材料 Cooler unit material	Cu
加热单元材料 Heater unit material	U8Mo	冷却单元质量 Cooler unit mass / kg	18.9
加热单元质量 Heater unit mass / kg	32.2	外部冷却设备热阻 Thermal resistance of external cooling equipment / K·W^{-1}	0.1
		外部冷却设备温度 Temperature of external cooling equipment / K	300

从图11中可以看出，通过等效方法获得的多热管系统，与仅考虑局部区域的热管，二者的计算结果是完全相同的，从而说明多热管系统的等效方法是合适的。

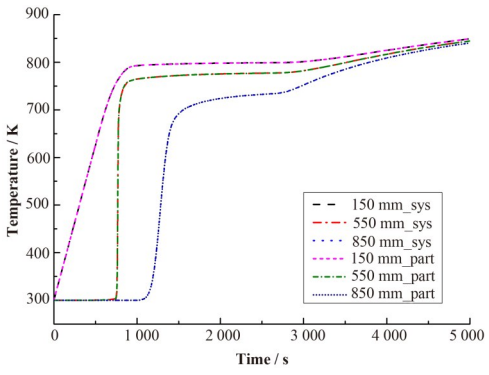


图11 多热管系统等效系统与单热管计算结果对比（彩图见网络版）

Fig.11 Comparison of calculation results between multi-heat pipe equivalent system and single heat pipe system (color online)

4 结语

本文提出了一种新的热管模拟方案，其融合了传统的热阻网络法与“平面前锋”法，并对热管进行了更加细致的区域划分。舍弃了传统的通过编程进行计算的方法，转而利用一维多物理场工具进行模拟计算。其可以处理冷凝段辐射散热、自然对流或热传导散热等散热方式；也可以处理绝热段的散热问题。其可以模拟单根热管的传热，也可以模拟等效的多热管系统。通过与文献中的模拟结果或实验结果进行对比，发现计算结果符合的较好，从而验证了该方法的可靠性。

作者贡献声明 张洁负责酝酿和设计模拟方案；程序研发、系统建模、数据收集与分析、起草文章；刘福东负责技术指导；王昆鹏负责协助分析、解释计算结果。

参考文献

1 余红星, 马誉高, 张卓华, 等. 热管冷却反应堆的兴起和发展[J]. 核动力工程, 2019, **40**(4): 1－8. DOI: 10.13832/j.jnpe.2019.04.0001.
YU Hongxing, MA Yugao, ZHANG Zhuohua, *et al*. Initiation and development of heat pipe cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, **40**(4): 1－8. DOI: 10.13832/j.jnpe.2019.04.0001.

2 Chen X W, Zou Y, Chen Z H, *et al*. Effect of core configuration on natural convection and heat transfer in heat pipe cooled micro-MSRs[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, **395**: 111839. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2022.111839.

3 Poston D I, Gibson M A, Godfroy T, *et al*. KRUSTY reactor design[J]. Nuclear Technology, 2020, **206**(sup1): 13－30. DOI: 10.1080/00295450.2020.1725382.

4 Zuo Z J, Faghri A. A network thermodynamic analysis of the heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, **41**(11): 1473 － 1484. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00220-2.

5 Faghri A, Harley C. Transient lumped heat pipe analyses [J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1994, **14**(4): 351－363. DOI: 10.1016/0890-4332(94)90039-6.

6 Cao Y, Faghri A. Closed-form analytical solutions of high-temperature heat pipe startup and frozen startup limitation [J]. Journal of Heat Transfer, 1992, **114**(4): 1028－1035. DOI: 10.1115/1.2911873.

7 Cao Y D, Faghri A. Transient two-dimensional compressible analysis for high-temperature heat pipes with pulsed heat input[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 1991, **18**(4): 483 － 502. DOI: 10.1080/10407789008944804.

8 Wang C L, Zhang D L, Qiu S Z, *et al*. Study on the characteristics of the sodium heat pipe in passive residual heat removal system of molten salt reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **265**: 691 － 700. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2013.09.023.

9 袁园, 苟军利, 单建强, 等. 热管冷却空间反应堆系统启动特性研究[J]. 原子能科学技术, 2016, **50**(6): 1054－1059. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.06.1054.
YUAN Yuan, GOU Junli, SHAN Jianqiang, *et al*. Startup characteristics of heat pipe cooled space reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, **50**(6): 1054－1059. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.06.1054.

10 李华琪, 胡攀, 江新标, 等. 辐射器部分表面积失效对空间堆电源系统性能的影响[J]. 现代应用物理, 2019, **10**(2): 77－82, 95.
LI Huaqi, HU Pan, JIANG Xinbiao, *et al*. Effect of partial surface area loss of radiator on power system performance of space reactor[J]. Modern Applied Physics, 2019, **10**(2): 77－82, 95.

11 吴攀, 欧阳泽宇, 朱煜, 等. 基于KRUSTY带核实验的热管冷却反应堆瞬态分析程序验证[J]. 核技术, 2023, **46**(11): 110603. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2023. hjs. 46. 110603.
WU Pan, OUYANG Zeyu, ZHU Yu, *et al*. Validation of an in-house system analysis code for heat pipe cooled

reactor[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110603.

12 杨轩, 李权, 李晨曦, 等. 热管堆固态堆芯燃料辐照-热-力耦合性能分析[J]. 核技术, 2024, **47**(7): 070601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.070601.
YANG Xuan, LI Quan, LI Chenxi, *et al*. Coupled irradiation-thermal-mechanical analysis of fuel in solid core of heat pipe cooled reactor[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(7): 070601. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024.hjs.47.070601.

13 沈书秋, 熊进标, 刘晓晶, 等. 基于降阶模型的热管堆核热力耦合启堆瞬态模拟研究[J]. 核技术, 2025, **48**(6): 060013. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240471. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240471.
SHEN Shuqiu, XIONG Jinbiao, LIU Xiaojing, *et al*. Transient simulation of nuclear thermal-hydraulic coupling startup of heat pipe reactor based on reduced-order models[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(6): 060013. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240471. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240471.

14 刘健, 余大利, 沈爱丽, 等. 热管堆用弯折钠热管间歇沸腾现象研究[J]. 核技术, 2025, **48**(7): 070009. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240539. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240539.
LIU Jian, YU Dali, SHEN Aili, *et al*. Study on geyser boiling effect of bent heat pipe in heat pipe cooled reactor [J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(7): 070009. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240539. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240539.

15 吴攀, 朱煜, 欧阳泽宇, 等. 不同热电转换系统的热管堆反应性引入事故特性研究[J]. 核技术, 2024, **47**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.110603. CSTR: 32193.14.j.0253-3219.2024.hjs.47.110603.
WU Pan, ZHU Yu, OUYANG Zeyu, *et al*. Characteristics of reactivity insertion accident of heat pipe reactors using different thermoelectric conversion systems[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(11): 110603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.110603. CSTR: 32193.14.j.0253-3219.2024.hjs.47.110603.

16 Faghri A. Heat pipe science and technology[M]. Washington, DC: Taylor & Francis, 1995.

17 冯踏青. 液态金属高温热管的理论和试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
FENG Taqing. Theoretical and experimental research on liquid metal high temperature heat pipe[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998.

18 Wang X Y, Shi Y W, Liu T C, *et al*. CFD modeling of liquid-metal heat pipe and hydrogen inactivation simulation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, **199**: 123490. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123490.

19 王凯. 临氢高温热管传热失效与再生特性的实验与CFD仿真研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2022.
WANG Kai. Experimental and CFD simulation study on heat-transfer inactivation and regeneration characteristics of high-temperature heat pipe working in hydrogen-containing atmosphere[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2022.