

熔盐热管温差发电耦合传热特性研究

徐志哲^{1,3} 陈兴伟^{1,2,3} 戴 叶^{1,2,3} 邹 杨^{1,2,3}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(上海科技大学 上海 201210)

3(中国科学院上海应用物理研究所 钍基核裂变能重点实验室 上海 201800)

摘要 热管微型熔盐堆适用于深海堆、空间堆等特种应用。为有效验证微型熔盐堆的设计方案、关键技术及系统集成能力,本文搭建了高温热管传热实验装置,深入开展了热管启动特性、热管温差发电耦合传热等方面的研究。实验中,实验装置在实验中进行热态加盐启动,实验结果的分析表明,因辐射传热与自然对流的作用,700 °C下熔盐等效热导率达 $11.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。传热实验装置的热阻网络模型,其模型热阻与实验结果误差为44.9%,说明该模型存在局限性;但熔盐热管热阻与实验结果仅相差19.3%,热阻网络法与实验结合的方法仍具可行性。温差发电系统传热热阻为 $0.51 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$,占总热阻的87.3%,优化温差发电传热是提高熔盐堆传热效率的关键。

关键词 高温热管, 熔盐反应堆, 温差发电, 热阻网络, 传热特性

中图分类号 TL331

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250055

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250055

Heat transfer characteristics of a coupled system of molten salt heat pipe and thermoelectric power generation

XU Zhizhe^{1,3} CHEN Xingwei^{1,2,3} DAI Ye^{1,2,3} ZOU Yang^{1,2,3}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

3(National Key Laboratory of Thorium Energy, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] Heat pipe micro-molten salt reactors (HP-MSRs) have emerged as a transformative technology for extreme environments such as deep-sea and space applications, where compactness, passive safety, and high-temperature stability are paramount. Molten salt reactors (MSRs) demonstrate enhanced thermal efficiency and inherent safety due to their low-pressure operation and high-temperature compatibility. Fluoride-based salts, such as FLiBe (LiF-BeF₂), exhibit exceptional thermochemical stability under continuous operation, maintaining structural integrity at temperatures above 700 °C. However, challenges persist in understanding the coupled heat transfer

钍基核裂变能全国重点实验室自主研究课题(No.TheLab-2025-07)、高温熔盐-热管束耦合传热研究平台项目(No.E355230101)、产业基金基础研究项目(No.SINAP-CYJJ-202503)资助

第一作者: 徐志哲, 男, 2000年出生, 2025年于上海科技大学获硕士学位, 主要从事熔盐堆热工水力研究

通信作者: 陈兴伟, E-mail: chenxingwei@sinap.ac.cn

收稿日期: 2025-02-28, 修回日期: 2026-03-18

Supported by the Independent Research Project of State Key Laboratory of Thorium-Based Nuclear Fission Energy (No. TheLab-2025-07), the Research Platform of Coupled Heat Transfer between Molten Salt and Heat Pipe Array (No. E355230101), the Basic Research Project of Industrial Fund (No. SINAP CYJJ 202503)

First author: XU Zhizhe, male, born in 2000, graduated from ShanghaiTech University with a master's degree in 2025, focusing on thermal-hydraulics of molten salt reactor

Corresponding author: CHEN Xingwei, E-mail: chenxingwei@sinap.ac.cn

Received date: 2025-02-28, revised date: 2026-03-18

mechanisms and startup characteristics of heat pipes under extreme conditions, particularly when integrated with thermoelectric power generation systems. Recent advancements in high-temperature heat pipe (HTHP) research emphasize the need for experimental validation of thermal resistance models and thermoelectric conversion efficiency. **[Purpose]** This study aims to validate the design scheme, key technologies, and system integration capabilities of a molten salt reactor by constructing a high-temperature heat pipe heat transfer experimental platform, focusing on investigating the startup characteristics of the heat pipe and the coupled heat transfer dynamics within a thermoelectric power generation system. **[Methods]** First of all, a high-temperature heat pipe experimental apparatus was developed, utilizing molten salt (a ternary nitrate mixture with a melting point of 230 °C) as the primary heat transfer medium. The system was initiated *via* a hot-state salt-injection protocol under nitrogen protection, using K-type thermocouples for temperature monitoring. Then, a thermal resistance network model was established to analyze heat transfer pathways, incorporating radiative and convective effects quantified at 700 °C. Finally, three experimental protocols, i.e.: 1) Startup phase, the salt was heated gradually from ambient temperature to 700 °C under a controlled nitrogen atmosphere; 2) Steady-state operation, Thermal conductivity, heat flux, and thermoelectric voltage output were measured using a T-type differential thermopile under controlled experimental conditions; 3) Model validation: comparative analysis between experimental data and thermal resistance network predictions, were applied. **[Results]** The experimental results demonstrate that the equivalent thermal conductivity of molten salt reaches $11.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ at 700 °C, driven by enhanced radiation heat transfer (contributing 63% of total heat flux) and natural convection. The thermal resistance network model exhibits a 44.9% deviation from experimental data in overall system analysis, primarily due to unaccounted interfacial thermal resistances. However, the model's prediction for the molten salt heat pipe thermal resistance shows only a 19.3% discrepancy. This confirms the feasibility of integrating thermal resistance network methods with experimental validation. Systematic thermal analysis reveals that the thermoelectric power generation system accounts for 87.3% of total thermal resistance ($0.51 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$), emphasizing its dominant role in heat transfer inefficiency. **[Conclusions]** This investigation emphasizes the pivotal function of optimizing thermoelectric heat transfer to enhance the efficiency of molten salt reactors. The validated thermal resistance network model offers a robust framework for system-level design enhancements. The high thermal conductivity of molten salt under radiative conditions and the identification of thermoelectric resistance as a primary bottleneck offer actionable insights for future reactor designs.

Key words High temperature heat pipe, Molten salt reactor, Thermoelectric power generation, Thermal resistance network, Heat transfer characteristics

近年来,全球核工业领域致力于推进多元化小型模块化反应堆(Small Modular Reactor)的技术研发^[1-2],其应用方向涵盖广泛的潜在商业用途^[3-5]。当前新型反应堆技术路线按冷却介质可分为气冷堆^[6]和液态金属冷却堆^[7];近年来,将热管技术整合到新型反应堆设计中的研究已成为一个重要趋势^[8-10],例如 Kilopower 反应堆^[11]和热管分段热电转换空间堆^[12]等。热管微型熔盐反应堆有着系统结构简化、尺寸适中,具有良好的可控性、理想的热瞬态反馈性能,且可靠性高、维护需求极低^[13]等优势。它融合了熔盐反应堆、热管技术和温差发电技术等多项创新理念^[14],实现了高温核热的非能动传输,提高了反应堆运行的安全性和可靠性,因此有望成为各类应用场景中颇具吸引力的选择,对科学与能源发展具有深远意义。

微型热管熔盐堆设计中采用高温热管(工作温

度 500 °C 以上)将堆芯核热传输给温差发电系统^[14]。鉴于反应堆应用的迫切需要,在近几年的时间里,科研人员围绕该项技术积极开展了大量的实验研究与数值模拟工作。Zhang 等^[15]建立了温差发电热管反应堆实验装置,并进行了稳态实验。热管蒸发段和冷凝段之间的最小温降可达 6.4 K。热电转换效率约为 8.0%。验证了这一系统在理论和实践层面的可行性,为技术的进一步发展奠定了坚实基础。然而,热管微型熔盐反应堆关于熔盐、热管与温差发电耦合传热特性的研究仍然相对匮乏,存在着较大的探索空间与研究空白。

为了有效填补这一关键领域的研究空白,本文搭建了熔盐-热管-温差发电系统实验装置。该装置通过外部加热模拟燃料盐在实际运行中产生的核热,利用碱金属热管优异的传热性能实现热量的高效传递,并借助温差发电器将热能转化为电能,最终

实现稳定的电力输出。通过理论和实验结合的方法,开展热管启动特性、热管温差发电耦合传热等方面的研究。

1 高温热管传热实验装置

该实验装置的设计主要基于热管冷却微型熔盐堆(micro-Molten Salt Reactor, micro-MSR)概念^[16],该反应堆采用竖直放置结构,通过热管将核热传至温差发电系统。反应堆设计热功率为50 kW,堆芯内填充FLiU燃料盐(72.5LiF-27.5UF₄,摩尔百分比),使用的热管为工作温度是650℃的液态金属钠热管。每根热管具有62 cm长的蒸发段,并在反射层和屏蔽层区域进行约26 cm长的绝缘处理。冷凝

段采用塔式热电发电结构,根据位置不同,热管总长度在1~1.6 m变化。本研究采用总长为1 m的热管进行实验。该实验装置主要用于验证“熔盐-热管-温差发电”概念的可行性,力求与micro-MSR概念保持一致,但在必要时会考虑采取近似方案。例如在核燃料不可用时,采用常规三元氯盐作为替代。

高温热管传热实验装置结构如图1所示,主要包含6个部分:1. 釜及内部结构,包含釜、热管、法兰连接,加盐接口等;2. 加热系统;3. 温差发电系统,包含发电片、冷热端座、保护气及管路,水冷机组及管路;4. 熔盐转运罐;5. 气路系统;6. 测量及控制系统,含热电偶等测量仪表、电脑及数据采集仪。热量通过钠热管传递至热电发电系统,而余热则通过冷水机散至环境。

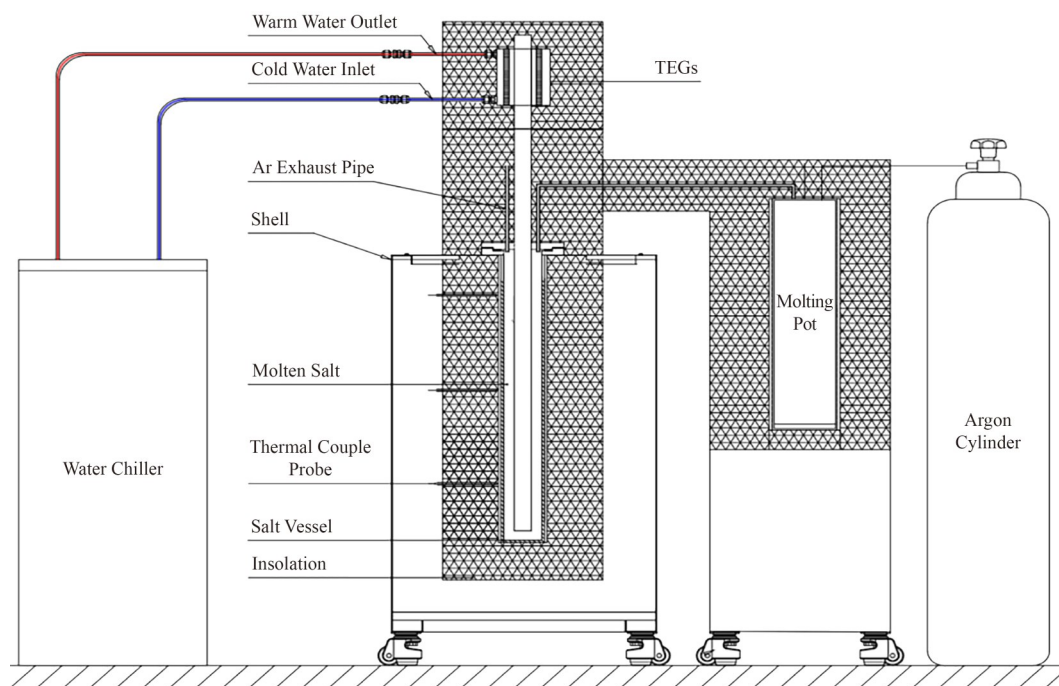


图1 实验装置结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the overall structure of the experimental installation

实验装置主要用于开展熔盐-热管-温差发电耦合系统验证和传热实验,总占地空间约为5 m(长)×4 m(宽)×2.8 m(高),其最大加热功率可达10 kW,熔盐釜最大加热温度可达850℃,容器周围包裹着一层10 cm厚的优质硅酸铝纤维隔热层,可实现恒功率和恒温加热控制。热管以钠为工作介质,充液量(80.3±0.1) g,吸液芯采用4.5×10⁵ nm双层不锈钢丝网,外壳材料为316L不锈钢。热管的蒸发段和绝热段均进行了隔热处理,以尽量减少热损失。温差发电系统采用了基于铅锡碲的热电模块,该模块设计可在500℃下连续运行,间歇性运行温度可达600℃。该模块置于冷热两个铜块之间,热铜块与热管的冷凝段接触,冷铜块设有水冷通道。两个热

电模块串联并对称固定在热管两侧。冷铜块由水冷却器进行冷却。实验装置的主要参数详见表1。

实验中所使用的盐为30NaCl-20KCl-50MgCl₂,是一种三元氯盐,其物性参数如表2所示。与燃料盐类似,该熔盐需要经过熔化过程,且为半透明介质。熔盐内部的热传递包括自然热传递机制和辐射热传递。

实验中两根热管的布置和热电偶的安装位置相同:热管蒸发段为60 cm,绝热段为28 cm,剩余的12 cm为冷凝段,在热管蒸发段一端起0 cm、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、60 cm、70 cm、80 cm、90 cm、97 cm处布置K型热电偶测量壁温,如图2所示。实验过程中,热管蒸发段通过加热炉进行等功率加热,

表1 实验装置参数
Table 1 Experimental apparatus parameters

部件 Component	参数 Density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
输出加热功率 Output heating power / kW	0~10
热管长度 Heat pipe length / cm	100
最大加热温度 Maximum heating temperature / $^{\circ}\text{C}$	850
容器材料 Vessel material	316L
熔盐 Molten salt	30NaCl-20KCl-50MgCl ₂ mol%
加热系统 Heating system	陶瓷伴热带 Ceramic heating tape
保温材料 Insulation material	10 cm 氧化铝纤维 10 cm Alumina fiber
反应釜尺寸 Reactor vessel dimensions / mm	$\varnothing 95\times 5$
加盐孔径 Salt charging port diameter / mm	$\varnothing 38$
能量转换方式 Energy conversion mode	温差发电 Thermoelectric power generation
冷却水流量 Cooling water flow rate L / h	0~420
发电片型号 Thermoelectric generator (TEG) module model	TEG-PB-12690
发电片长宽高 TEG module dimensions ($l\times w\times h$) / mm	$80\times 90\times 4$
发电片铜座长宽高 TEG copper base dimensions ($l\times w\times h$) / mm	$120\times 120\times 50$

表2 熔盐参数
Table 2 Molten salt parameters

实验温度 Experimental temperature / K	熔点 Melting point / K	密度 Density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$	黏度 Viscosity / cP	比热 Specific heat capacity / $\text{J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$	导热系数 Thermal conductivity / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
873	373	1.93	1.63	1.41	1.03
973	383	1.88	1.05	1.49	1.03
1 073	383	1.83	0.74	1.57	1.03

绝热段被保温棉包裹,冷凝段暴露于空气当中,通过空气自然对流和热辐射散热。本文基于该实验装置主要开展不同加热功率及加热温度下的热管启动、运行传热特性研究。

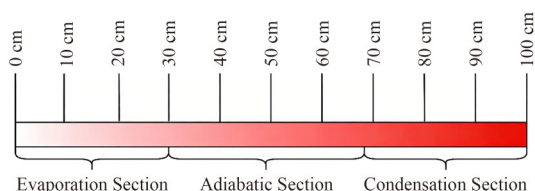


图2 热管布置方式与热电偶测点位置
Fig.2 Heat pipe arrangement and positions of thermocouple measurement points

2 熔盐-热管-温差发电耦合系统传热特性研究

2.1 热态启动

微型熔盐堆的加盐有多种方式,最常用的是通过堆芯预热后加盐压入燃料盐的方式实现堆芯运行。本实验拟采用转运罐向熔盐釜内压入熔融盐,系统加盐及启动过程如下。

1) 由于实验选用的三元氯盐高温时有较强的

腐蚀性,运行过程中要避免与空气和水接触,因此系统的密封性较为重要。检漏是开始实验的第一步。本实验采用分子泵机组抽真空进行保压测试。

2) 熔盐釜的加盐采用转运罐压盐方案,因此,先将5 kg块状三元氯盐加入转运罐,同时加入镁棒净化。封闭法兰盖,缠好法兰伴热带后,打开熔盐釜进气管和转运罐尾气管路阀门,通过熔盐釜进气管持续通入氩气吹扫,以排空转运罐和熔盐釜内残留空气和水。

3) 先开启转运罐加热,为避免熔盐凝固,壁面加热温度设置为500 $^{\circ}\text{C}$ 。至熔化后继续保温12 h,在此过程中持续通入氩气保护气氛。

4) 熔盐熔化吹扫12 h后,开启熔盐釜预热,熔盐釜设置恒功率1 800 W加热,开启冷却水循环,冷却水温度设置在25 $^{\circ}\text{C}$,冷却水流量1 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

5) 待热管启动后,关闭熔盐进气管路阀门和转运罐尾气阀。根据压盐高度和阻力分析,0.01 MPa的气压即可将熔盐压入熔盐釜。调节熔盐釜尾气阀门减小釜内压力至0.03 MPa,打开转运罐进气管,增大转运罐氩气压力至0.2 MPa,熔盐被压入熔盐釜内。重复3~4次,确保熔盐完全转移,停止转运罐和管路伴热带加热。此后调节气路使氩气压力保持在正压0.05~0.06 MPa。

6) 系统稳定运行后,采集温度和发电片开路电压等信号。进一步开展水冷调节和升功率等实验。

压盐过程中,由于热管稳定运行后壁温高于500℃,导致500℃液态熔盐压入的瞬间,可以观察到管壁温迅速下降,继而快速上升。继续二次加压盐,管壁温继续下降然后上升。随着压盐次数增加,温度变化幅度减小。当调节进气气流时,转运罐和熔盐釜气压同时变化,说明熔盐已经转移。加盐过程持续约10 min,加盐结束后,热管运行恢复到加盐前的状态。图3(a)~(b)显示了熔盐釜从启动至加盐3 h内热管蒸发段、冷凝段和冷热铜座温度变化,加盐后,由于熔盐导热和对流影响,熔盐釜内热管壁蒸发段温度分布更均匀。热管壁蒸发段温度分

布趋于均匀化,进而导致冷凝段整体温度上升,热管蒸发段与冷凝段间的温差减小。热管冷凝段内工质温度(91in,in表示为热管内部,91in为热管内部距热管底端91 cm处)随加盐过程由446℃下降到432℃,而冷凝段管壁温度几乎没有变化。因蒸汽持续流动对传热变化响应更敏感,热管冷凝段内工质表现出显著的温度波动特性,而管壁温度因与外界环境保持换热温度变化较小。第一次加盐过程中冷凝段整体平均温度上升9.8℃,蒸发段和冷凝段平均温差减小17.6℃。温差发电片热端座温度由328℃上升到347℃,发电功率由6.4 W增大到8.6 W。

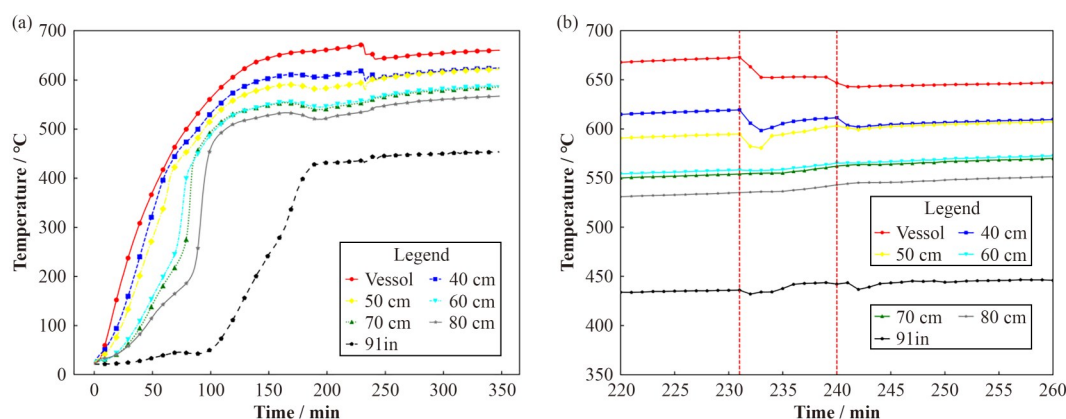


图3 启动过程(a)及加盐过程(b)系统各位置的温度变化(彩图见网络版)

Fig.3 Temperature changes at various positions in the system during startup (a) and salt-adding (b) processes (color online)

2.2 稳定运行分析

稳定运行时,保持加热功率1 800 W恒定,冷却水流量为1 L·min⁻¹。根据加热和漏热量平衡可知加热炉的功率为水冷散热量和系统漏热量之和,表现在温度上为热管管壁保持恒温。图4为系统恒功率运行时系统各部分温度分布情况(T_h 为热端座温度, T_c 为冷端座温度, ΔT_{hc} 为冷端端座温差, ΔT_{hp} 为热管与热端座温差)。可以看出热管壁温保持不变,系统进入稳态。调节变阻器的阻值,当电路的内外阻值相等时,得到最大输出功率为9.94 W。需要说明的是,由于热管冷凝段和热端座直接接触热阻大,导致两者之间温差过大,热端座温度347℃,与发电片同高度的热管冷凝段工质温度为456℃,两者之间温差109℃。而温差发电片在高温时热电转换效率更高,如通过施加高温导热胶等增强导热措施,可有效提高温差发电片发电效率。

600~700℃温度下熔盐自身热导率为1.03 W·(m·K)⁻¹,由于热管堆中传热包含自然对流、导热和辐射等多种形式,计算较为复杂,获得其等效热导率数值对于模拟计算和设计有一定参考意义。

假设环隙中的热量传递形式为热传导,利用多层圆筒壁传热公式获得环隙熔盐等效热导率 λ'_s 。

$$Q = \frac{2\pi\lambda'_s l \Delta t}{\ln \frac{d_f}{d_i}} \quad (1)$$

式中: Δt 为热管外壁和釜内壁的温差,K; l 为加热段高度,m; λ'_s 为测得熔盐热导率,W·(m·K)⁻¹; d_i 和 d_f 分别为釜内径和热管外径,m。据此可以获得环隙熔盐等效热导率。根据系统进出口水温 and 流量,可得热管散热量约为1 017 W。基于式(1),可初步求得熔盐等效导热系数,约为11.2 W·(m·K)⁻¹,充分说明了非强迫循环下的熔盐对流传热的有利影响。

2.3 加热温度对熔盐-热管传热的影响

设定熔盐釜在640℃、670℃、700℃、730℃、760℃和790℃下分别恒温加热60 min。如图5所示,随着加热温度升高,热管传输功率增大,热阻在0.09℃·W⁻¹左右变化不大。发电片冷端温度均随加热温度的升高而增大,发电片两侧温差增大,发电片输出功率增大,热电转换效率从1.0%升至1.6%,总发电功率从9 W升至17.6 W。根据传输热量和环

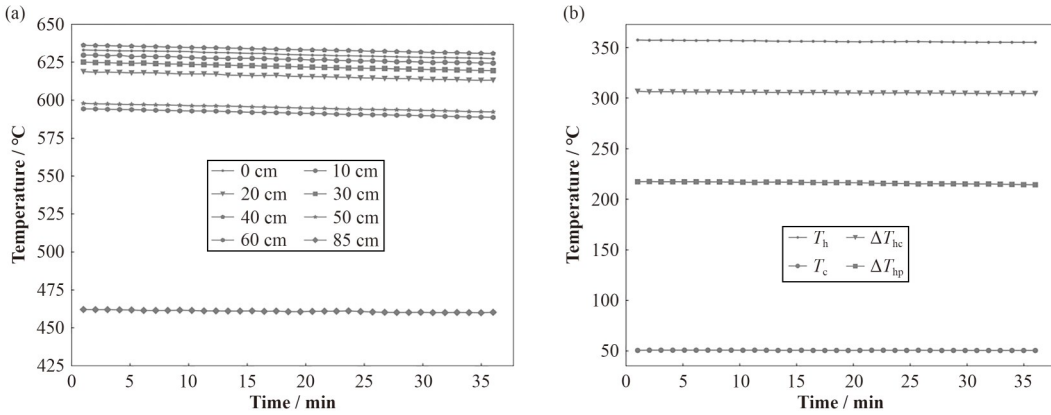


图4 稳定运行时系统状态图 (a) 热管壁及工质温度变化, (b) 发电系统温度变化

Fig.4 System state diagrams during stable operation (a) Temperature changes of the heat pipe wall and the working fluid, (b) Temperature changes of the power generation system

隙温差得到熔盐等效热导率,根据熔盐平均温度和管壁温度,得到管外熔盐对流换热系数。两者均随加热温度升高而增大,主要是因为熔盐对流换热效

应和辐射换热作用。根据式(3)得到不同加热温度下的 Ra , 拟合得到有限空间内熔盐-热管壁关系式 $Nu = 0.014 2Ra^{0.45}$ 。

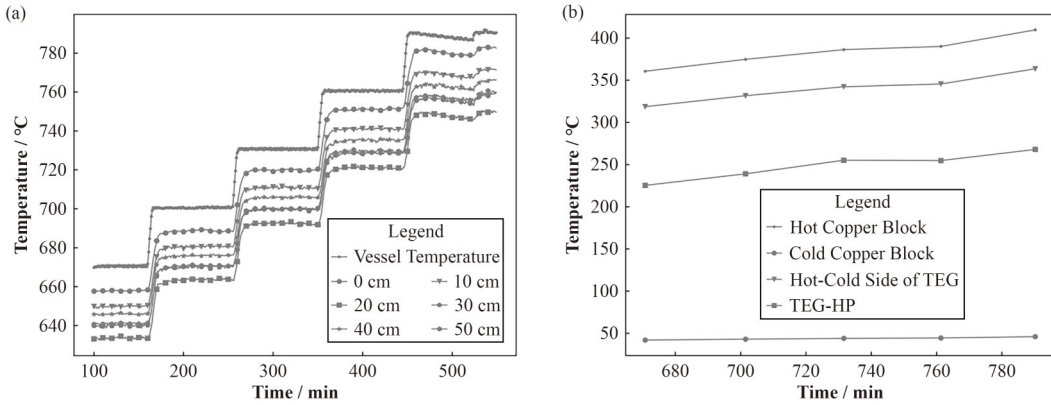


图5 不同加热温度下各温度节点变化 (a) 热管壁面温度, (b) 热电转换系统

Fig.5 Variations of each temperature node at different heating temperatures (a) Wall temperature of heat pipe, (b) Thermoelectric conversion system

3 热阻网络模型分析

3.1 模型建立

对于热管的稳态传热特性研究,热阻网络模型^[17-19]计算等效热阻是其中常见有效的分析方法。近年来,许多研究人员^[20]利用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)来模拟热管的传热特性,CFD可以实现热管的三维建模^[21]并模拟两相流^[22]、蒸发、冷凝和夹带等重要现象。但是,该方法需要消耗大量计算资源,且计算速度较慢,对于不同尺寸和类型的热管需要重新建立几何模型和划分网格,即模型的灵活性较差。针对本实验装置,本文构建了熔盐-热管-温差发电系统的热阻网络模型。该模型主要涵盖三个部分,即熔盐-热管传热热阻、热管传热热阻网络以及温差发电系统热阻。本

文对网络模型中的各个热阻部分展开了详细计算,并做了相应的深入分析。

3.1.1 熔盐-热管传热热阻

熔盐与热管的传热过程主要包括熔盐与热管的热辐射传热和自然对流换热,由于这两种传热方式是同时进行的,因此总热阻可表示为:

$$\frac{1}{R_{s-hp}} = \frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}} \quad (2)$$

根据对流换热的基本公式,对流热阻 R_{conv} 可由下式计算:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

式中: h 是熔盐与热管外壁之间的对流换热系数; A 是熔盐与热管外壁的换热面积。本文实验条件下 (670°C), 熔盐热管间对流换热为有限空间内竖直圆柱体自然对流换热, $GrPrD/H$ 大于 10^{10} , 熔盐呈现

湍流状态^[23]。

$$Nu = 0.13 \left(\frac{GrPrD}{H} \right)^{0.33} = \frac{hd}{k} \quad (3)$$

式中： Nu 为努塞尔数； Gr 为格拉晓夫数； $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ 为普朗特数； D 是反应釜等效直径； ν 是熔盐运动黏度； α 是熔盐热扩散率； k 是熔盐导热系数； β 为熔盐的热膨胀系数。联立各关系式得出 R_{conv} 。

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (4)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (5)$$

根据斯特藩-玻尔兹曼定律，熔盐与热管之间的辐射换热热阻可使用式(6)计算：

$$Q_{rad} = \sigma A F_{1-2} \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (6)$$

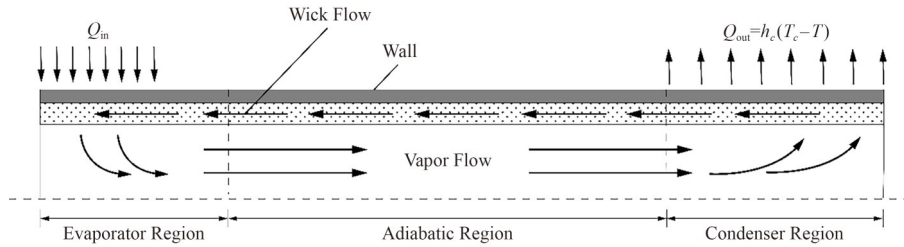


图6 热阻网络物理模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of the physical model of the thermal resistance network

接下来，对热量传递中各部分热阻进行详细介绍以及计算，热管传热热阻由管壁轴向热阻、热管各部分径向热阻、吸液芯轴向热阻、吸液芯径向热阻以及工质相变界面热阻组成，如式(8)~(13)所示。由于热管蒸发段与冷凝段结构相似，因此本文以蒸发段热阻为例进行计算。从蒸发段到冷凝段的热传递靠几个同时发生和相互关联的过程：

热管蒸发段管壁径向导热热阻 R_1 为：

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{d_0}{d_1}\right)}{2\pi\lambda_w L_1} \quad (8)$$

式中： d_0 为热管外径，m； d_1 为热管内径，m； λ_w 为热管管壁导热系数； L_1 为蒸发段长度，m。

热管蒸发段吸液芯径向导热热阻 R_2 为：

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{d_1}{d_g}\right)}{2\pi\lambda_c L_1} \quad (9)$$

式中： d_g 为热管内蒸汽空间直径，m； λ_c 为吸液芯复合导热系数， $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ 。

热管蒸发段气液界面相变传热热阻 R_3 为：

$$R_{rad} = \frac{T_1 - T_2}{Q_{rad}} \quad (7)$$

其中： $\sigma = 5.67 \times 10^8 W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ 是斯特藩-玻尔兹曼常数； A 是辐射换热面积； F_{1-2} 是角系数，它取决于熔盐与热管的几何形状、相对位置和取向，在本文中简化为两圆柱面的辐射换热取1。 T_1 和 T_2 分别是熔盐和热管表面的绝对温度， ε_1 和 ε_2 分别是熔盐和热管表面的发射率。本实验中使用的熔盐为半透明状，其辐射黑度 ε_1 取0.2，热管蒸发段壁面材料为316不锈钢，外壁面辐射黑度 ε_2 取0.35，将各数据代入可得熔盐热管间传热热阻 $R_{s-hp} = 0.0322 K \cdot W^{-1}$ 。

3.1.2 热管传热的热阻模型

热管的传热过程分为蒸发段、绝热段和冷凝段，基于热阻网络理论，本文建立如图6所示的热阻网络模型。在热管启动时，热量自蒸发段传递至冷凝段，这一过程主要借助热管管壁、吸液芯以及蒸汽腔来实现。

$$R_3 = \frac{RT_g^2 \sqrt{2\pi RT_g}}{\pi p r^2 d_g L_1} \quad (10)$$

式中： R 为蒸汽气体常数； T_g 为管内工质蒸汽温度，K； p 为蒸汽压力，Pa； r 为汽化潜热， $J \cdot kg^{-1}$ 。

蒸汽轴向流动传热热阻 R_4 为：

$$R_4 = \frac{128 L_a \mu_g T_g}{\pi d_g^4 \rho_g^2 r} \quad (11)$$

式中： L_a 为热管总等效长度，m； μ_g 为蒸汽动力黏度； ρ_g 为蒸汽密度， $kg \cdot m^{-3}$ 。

吸液芯的轴向导热热阻 R_5 为：

$$R_5 = \frac{4 L_a}{\pi \lambda_c^2 (d_0^2 - d_1^2)} \quad (12)$$

管壁整体轴向热阻 R_6 为：

$$R_6 = \frac{4 L_a}{\pi \lambda_w^2 (d_0^2 - d_1^2)} \quad (13)$$

热管冷凝段汽液界面相变传热热阻，计算方法类似于 R_3 。热管冷凝段吸液芯的径向导热热阻 R_7 ，计算方法类似于 R_2 。热管冷凝段管壁的径向导热热阻 R_8 ，计算方法类似于 R_1 。代入热管参数计算得热管各部分热阻如表3所示。

表3 热阻模型计算值
Table 3 Calculated value of thermal resistance model

热阻 Thermal resistance	阻值 Value / $K \cdot W^{-1}$
R_1	$9.179\ 7 \times 10^{-3}$
R_2	$1.445\ 4 \times 10^{-3}$
R_3	$8.480\ 9 \times 10^{-9}$
R_4	$3.174\ 3 \times 10^{-4}$
R_5	$1.272\ 1 \times 10^{-8}$
R_6	$2.168\ 0 \times 10^{-3}$
R_7	$1.376\ 9 \times 10^{-2}$
R_8	$2.688\ 0 \times 10^{-3}$

3.1.3 温差发电系统热阻计算

温差发电系统包含对称分布于热管两侧的发电模块、铜座、保温层、水冷机和相应的管路仪表等。其结构如图7所示。铜座包括热端铜座和冷端铜座,热端铜座中间弧面与热管紧密接触,左右两个铜座由法兰固定在热管上。发电片夹在冷热铜座之间,冷端铜座由铁丝缠绕固定。在温差发电片的受热和散热面可涂一定厚度的导热胶来减小接触热阻。铜座采用热导率高的紫铜,长宽均为5 cm,高12 cm,水管路直径1 cm,铜座总重约6 kg。

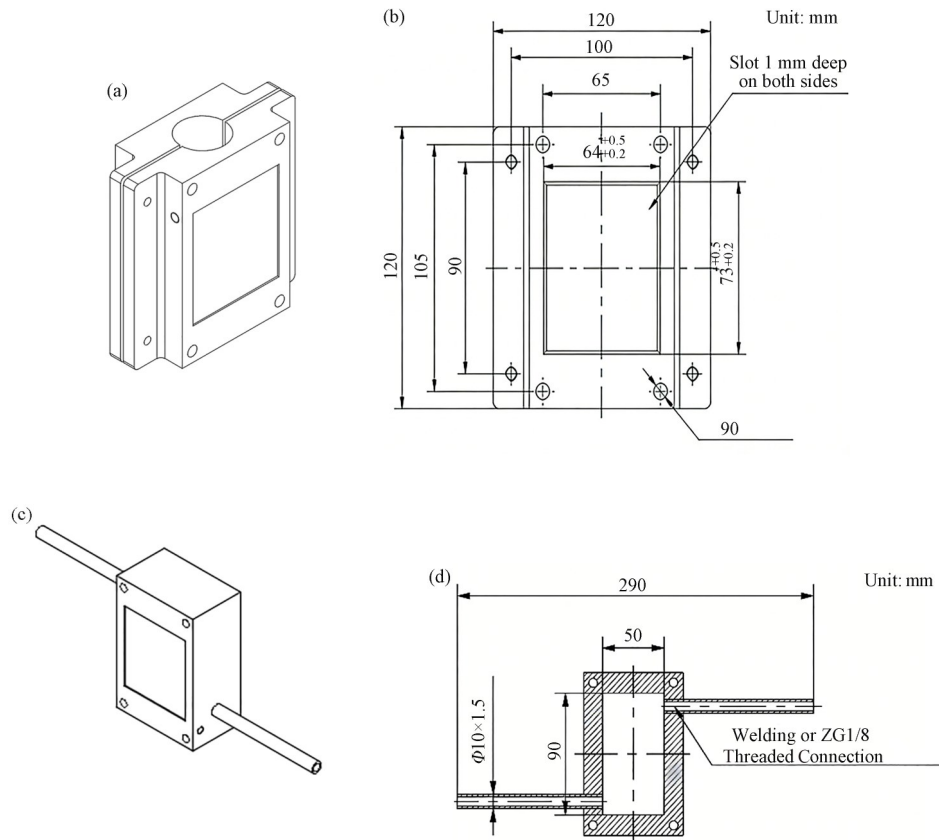


图7 温差发电系统结构示意图 (a) 热端座, (b) 热端座尺寸, (c) 冷端座, (d) 冷端座尺寸

Fig.7 Schematic diagram of the thermoelectric power generation system structure
(a) Hot copper block, (b) Hot copper block dimension, (c) Cold copper block, (d) Cold copper block dimension

根据多层板固体导热公式可以得到温差发电系统的总热阻,其热阻由热端座热阻、冷端座热阻组成。将热端座横截面简化为矩形,其中热端座与冷凝段的接触面由圆柱面和平面组成,其各部分的热阻表达式如下:

圆柱接触面热端部分热阻取决于热端铜座在热流方向上的厚度 h_{hc} , m、铜的导热系数 k_c 、圆柱的直径 d_c 以及圆柱的高度 h_c , 表达式如下:

$$R_{hc} = \frac{h_{hot}}{k_c \pi d_c h_c} \quad (14)$$

同样,热端铜座非圆柱接触面部分热阻计算表达式如下:

$$R_{hp} = \frac{h_{hot}}{k_c \left(lw - \pi \left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \right)} \quad (15)$$

其可近似为长 l 、宽 w 的矩形面积减去圆柱底面面积 $\pi \left(\frac{d_c}{2} \right)^2$ 得到,再结合热端厚度 h_{hot} 和铜的导热系数计算热阻。由此,热端铜座总热阻为 $R_{hot} =$

$$\frac{1}{\frac{1}{R_{hc}} + \frac{1}{R_{hp}}}$$

同样,对于冷端铜座的热阻,取决于冷端铜座在热流方向上的厚度 h_{cold} 、铜的导热系数 k_c 以及冷端铜座平面的面积,其可近似为长 l 、宽 w 的矩形:

$$R_{cold} = \frac{h_{cold}}{k_c lw} \quad (16)$$

不考虑铜端座与发电片的接触电阻,整个温差发电系统的总热阻是热端铜座总热阻与冷端铜座总热阻之和:

$$R_{total} = R_{hot} + R_{cold} \quad (17)$$

3.2 熔盐温差发电耦合系统各部分热阻对比

在熔盐热管温差发电耦合传热特性研究中,通过代入相应参数计算得到了各部分热阻,并对其实验数据计算值与热阻网络模型计算值进行了对比分析,如图8所示。

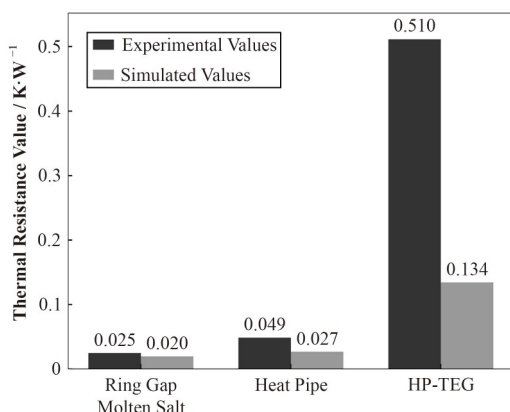


图8 各部分热阻实验数据计算值和热阻网络模型计算值
Fig.8 Calculated values of experimental data and thermal resistance network model for the thermal resistance of each part

首先,对于环隙熔盐热阻而言,实验结果呈现出相对较小的绝对误差。经计算,在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$,其熔盐等效热导率为 $11.2\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,远高于熔盐导热系数,说明了熔盐对流传热的有利影响。对于热管热阻部分,其热阻网络模型计算值与实验值存在 44.9% 的偏差,这可能是因为热阻网络模型在计算时对热管内部的复杂传热机制进行了简化。比如,热管内部的相变传热过程(蒸发-冷凝)、毛细力驱动的液体回流等现象可能没有被精确地纳入模型。此外,模型中或许还存在对一些实际存在的热阻进行忽略或合并的情况,这些因素共同作用,导致了计算值与实验值之间产生偏差。而在温差发电系统热阻方面,实验值与模型计算值之间的偏差为 82.5%。凌君谊通过搭建温差发电模块性能测试平台研究了安装压力、导热硅脂和扰流方式等对温差发电的影响,实验

结果表明,通过更换导热硅脂后开路电压最大可提升 46%,最大输出功率可提高 137.3%^[25]。可见模型计算中未考虑铜端座与发电片之间的接触电阻可能是误差的主要因素。同时,从绝对数值上看,温差发电系统的实验总热阻相较于其他部分热阻高出一个数量级以上,这说明温差发电系统对总热阻的影响占主导地位,对其进行相应的热阻优化和改善也是后续研究工作的重点方向。

4 结语

本研究成功搭建了高温热管传热实验装置,并深入开展热管启动特性、热管温差发电耦合传热等方面的研究,结合实验与数值模拟,为未来微型熔盐堆的发展和优化奠定了基础。

1)在启动特性与运行稳定性上,采用热态加盐方案规避了熔盐熔化阶段,缩短了启动时间,提高了系统响应速度。启动后热管壁温趋于一致并实现稳态运行,为实际应用中的稳定供能提供了坚实保障。在传热性能方面,辐射传热与自然对流共同作用使熔盐等效热导率达到 $11.2\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,超越预期的传热效果,提升了微型熔盐堆的能源转换效率,增强了其在核电领域的竞争力。

2)构建了熔盐热管温差发电耦合系统热阻网络模型,热管热阻部分的模型计算值与实验值存在 44.9% 的偏差,这表明热阻网络模型在处理热管内部复杂传热机制时存在一定局限性,如未能精确反映相变传热及液体回流等过程。而温差发电系统热阻方面,由于模型计算未纳入铜端座与发电片间的接触电阻,导致实验值与模型计算值偏差显著。目前该热阻网络模型尚不能用于准确分析整个传热系统,但可定性分析系统的传热过程,后续需通过瞬态模型计算以及更精确的传热实验进行完善。

从绝对数值看,温差发电系统对总热阻的贡献占主导地位,后续对其热阻的优化和改善将是研究重点,相关深入研究将提升熔盐-热管温差发电系统的整体性能。本文的工作不仅为现有设计的优化提供了方向指导,助力提升系统的热传递效率和稳定性,更在技术层面为后续研发工作夯实了基础,有助于推动微型熔盐堆技术朝着工程化、商业化方向快速迈进。

作者贡献声明 徐志哲负责实施研究、采集数据,分析、解释数据;陈兴伟负责实验设计和实验研究以及对文章的知识性内容作批评性审阅;戴叶负责指导;邹杨负责获取研究经费和指导。

参考文献

- 1 Yoon D, Paek S, Lee C H. Rare earth removal from pyroprocessing fuel product for preparing MSR fuel[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, **56**(3): 1013 - 1021. DOI: 10.1016/j.net.2023.12.026.
- 2 Fang Y H, Li X X, Yu C G, *et al.* Fuel pebble optimization for the thorium-fueled Pebble Bed Fluoride salt-cooled high-temperature reactor (PB-TFHR) [J]. Progress in Nuclear Energy, 2018, **108**: 179 - 187. DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.05.013.
- 3 Zhu G F, Liu S J, Zou Y, *et al.* Thorium utilization with pebble mixing system in fluoride salt-cooled High Temperature Reactor[J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, **114**: 84 - 90. DOI: 10.1016/j.pnucene.2019.02.005.
- 4 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, **45**(9): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, **45**(9): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.
- 5 Wang C L, Chen J, Qiu S Z, *et al.* Performance analysis of heat pipe radiator unit for space nuclear power reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **103**: 74 - 84. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.01.015.
- 6 Sterbentz J W, Werner J E, McKellar M G, *et al.* Special purpose nuclear reactor (5 MW) for reliable power at remote sites assessment report; INL/EXT-16-40741[R]. Idaho Falls, ID, USA: Idaho National Laboratory, 2017.
- 7 张磊, 陈兴伟, 戴叶, 等. 一种热管熔盐堆塔式温差发电系统设计及分析[J]. 核技术, 2023, **46**(7): 070601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070601.
ZHANG Lei, CHEN Xingwei, DAI Ye, *et al.* Design and analysis of a heat-pipe molten salt reactor tower thermal power generation system[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46** (7): 070601. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2023. hjs. 46. 070601.
- 8 胡崇举, 李斌, 余大利, 等. 基于改进集总参数法的锂热管稳态性能分析[J]. 核技术, 2024, **47**(12): 120604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.120604. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2024.47.120604.
HU Chongju, LI Bin, YU Dali, *et al.* Steady - state performance analysis of lithium heat pipe based on improved lumped - parameter method[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(12): 120604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024. hjs. 47.120604. CSTR: 32193.14. hjs. CN31-1342/TL.2024.47.120604.
- 9 Allen K, Hartford S K, Merkel G. Feasibility study of a micro modular reactor for military ground applications[J]. Journal of Defense Management, 2018, **8**(1): 172. DOI: 10.4172/2167-0374.1000172
- 10 Smith C F, Halsey W G, Brown N W, *et al.* SSTAR: The US lead-cooled fast reactor (LFR)[J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, **376**(3): 255 - 259. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.049.
- 11 Beard D, Tarau C, Anderson W G. Sodium heat pipes for space and surface fission power[C]//15th International Energy Conversion Engineering Conference. Atlanta, GA. AIAA, 2017: AIAA2017-5087. DOI: 10.2514/6.2017-5087.
- 12 El-Genk M S. Conceptual design of HP-STMCs space reactor power system for 110 kWe[J]. AIP Conference Proceedings, 2004, **699**(1): 658 - 672. DOI: 10.1063/1.1649628.
- 13 Dasari V R, Trellue H R, Arafat Y. Microreactors: A technology option for accelerated innovation, LA-UR-20-22435[R]. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory, 2020. DOI: 10.2172/1607906.
- 14 Koenig D, Ranken W. Heat pipe nuclear reactors for space applications[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics 3rd International Heat Pipe Conference. Palo Alto, CA, USA, 1978.
- 15 Zhang Y, Chai X M, Wang C L, *et al.* Thermal-hydraulic analysis of heat pipe reactor experimental device with thermoelectric generators[J]. Progress in Nuclear Energy, 2022, **146**: 104137. DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104137.
- 16 Cui D Y, Dai Y, Cai X Z, *et al.* Preconceptual nuclear design of a 50 kWth heat pipe cooled micro molten salt reactor (micro-MSR) [J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, **134**: 103670. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103670.
- 17 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.
- 18 沈妍, 张红, 许辉, 等. 碱金属热管传热特性的模拟与试验分析[J]. 太阳能学报, 2016, **37**(3): 644 - 650. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2016.03.018.
SHEN Yan, ZHANG Hong, XU Hui, *et al.* Simulation and experimental analysis on heat transfer characteristics of alkali metal heat pipe[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, **37**(3): 644 - 650. DOI: 10.3969/j. issn. 0254-0096. 2016.03.018.
- 19 Guo Y C, Su Z L, Li Z G, *et al.* An improved model of the

- heat pipe based on the network method applied on a heat pipe cooled reactor[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, **10**: 848799. DOI: 10.3389/fenrg.2022.848799.
- 20 余清远, 赵鹏程, 马誉高. 基于CFD方法的高温热管特性研究[J]. *核动力工程*, 2022, **43**(2): 70 - 76. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.02.0070.
- YU Qingyuan, ZHAO Pengcheng, MA Yugao. CFD analysis on characteristics of high temperature heat pipe [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2022, **43**(2): 70 - 76. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.02.0070.
- 21 卜治丞, 焦波, 林海花, 等. 脉动热管计算流体力学模型与研究进展[J]. *化工进展*, 2023, **42**(8): 4167 - 4181. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1771.
- BU Zhicheng, JIAO Bo, LIN Haihua, *et al.* Review on computational fluid dynamics (CFD) simulation and advances in pulsating heat pipes[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, **42**(8): 4167 - 4181. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1771.
- 22 Morgan V T. The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders[M]//*Advances in Heat Transfer* Volume 11. Amsterdam: Elsevier, 1975: 199 - 264. DOI: 10.1016/s0065-2717(08)70075-3.
- 23 凌君谊. 船舶温差发电装置性能分析[J]. *科技与创新*, 2023(5): 17 - 21+24. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2023.05.006.
- LING Junyi. Performance analysis of marine thermoelectric power generation device[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2023(5): 17 - 21+24. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2023.05.006.