

【引用格式】任禹铄, 李泽光, 王慧富, 等. 水下微纳型核能系统调研及最新进展[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 (1): 2-9.

水下微纳型核能系统调研及最新进展

任禹铄, 李泽光*, 王慧富, 杨俊, 林恒隆, 苏子麟
(清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要 随着深海、深空与极地等特殊应用领域的战略重要性不断提升, 长期稳定的能源供应成为关键挑战。水下微纳型核能系统因其高能量密度、长寿命和不受环境影响等特点, 在这些领域展现出巨大的应用潜力。对美国、前苏联/俄罗斯和中国在水下微纳型核能系统方面的研究现状进行了调研, 并分析了其面临的关键技术挑战, 包括核燃料研发、新型材料研发、先进加工技术和先进仪控系统。此外, 还介绍了基于反应堆蒙卡软件 RMC 与开源 CFD 软件 OpenFOAM 发展的微纳型热管反应堆核能系统先进耦合分析技术, 并基于典型热管反应堆 KRUSTY 开展了验证工作, 证明了耦合方法的有效性和可靠性。未来水下微纳型核能系统的研究和发展将为深海探测、资源开发和国防安全等领域提供重要的技术支撑。

关键词 水下能源动力; 微纳型核能系统; 热管反应堆

中图分类号 TL413 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2025)01-0002-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.001

Research and Latest Progress of Underwater Micro-nano Nuclear Energy Systems

REN Yushuo, LI Zeguang*, WANG Huifu, YANG Jun, LIN Henglong, SU Zilin
(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract With the continuous enhancement of the strategic significance of special application fields such as deep sea, deep space, and polar regions, a long-term and stable energy supply has emerged as a crucial challenge. Underwater micro-nano nuclear energy systems, characterized by their high energy density, long service life, and immunity to environmental influences, have demonstrated immense application potential in these domains. A survey is conducted on the research status of underwater micro-nano nuclear energy systems in the United States, the former Soviet Union/Russia, and China, and the key technical challenges they confront are analyzed, encompassing nuclear fuel research and development, new material R&D, advanced processing technologies, and advanced instrumentation and control systems. Furthermore, the advanced coupling analysis technology of micro-nano heat pipe reactor nuclear energy systems developed based on the reactor Monte Carlo software RMC and the open-source CFD software OpenFOAM is introduced, and verification work is carried out based on the typical heat pipe reactor KRUSTY, validating the effectiveness and reliability of the coupling method. The future research and development of underwater micro-nano nuclear energy systems will provide significant technical support for domains such as deep sea exploration, resource exploitation, and national defense security.

Key words underwater energy power; micro-nano nuclear energy system; heat pipe reactor

收稿日期: 2025-01-03

作者简介: 任禹铄 (2000-), 男, 博士生, 主要从事先进核能、反应堆蒙卡研究。

*通信作者: 李泽光 (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事先进核能研究。

基金项目: 科技部重点研发计划 (2021YFC2802700)。

0 引言

随着装备水平的不断提升与国家战略需求的不断增长, 深海、深空与极地等特殊应用领域已成为大国博弈的新战场。长期、稳定的能源供应成为服务国家战略的基础与关键, 关系到国家政治、安全等重大问题。其中, 深海中蕴藏着丰富的资源, 这些资源对人类社会的持续发展具有重大意义, 被认为是 21 世纪人类可持续发展的重要新领域。无人潜航器 (UUV) 作为一种重要的工具, 能够自主、灵活地完成深海科学考察、资源勘探和开发利用等任务。由于其自主性、灵活性和多用途性, 无人潜航器在未来深海应用中的地位越来越重要。然而, 传统的能源动力方式, 如电池和燃料电池, 在水下环境面临着续航能力有限、维护成本高等问题。

核动力装置以其高能量密度、长久使用寿命和无需依赖空气等优势, 成为大型水下设备动力源的理想选项。考虑到深海环境中有限的舱内空间、复杂的水下条件和无人操作的需求, 水下核动力装置必须具备本质安全性、轻巧紧凑的设计、简洁可靠的运行机制、智能自主控制能力以及良好的抗摇摆性能。因此, 相较于常规能源形式, 微型 (MW 级) 以及纳型 (kW 至百 kW 级) 核能系统具有功率密度高、应用环境限制小、持续时间长等诸多优势, 在相关特殊领域有着重要的应用价值与应用前景, 受到国内外广泛关注。我国相继发布了《“十三五”国家科技创新规划》^[1]《2018 全球工程前沿报告》^[2]等, 将深海核反应堆等微纳型核能系统纳入重点攻关行列。

水下微纳型核能系统具有结构紧凑、系统耦合性强等特点, 对该类型核能系统进行设计研发时, 更加依赖基于考虑复杂耦合过程的精细计算方法及工具对包含反应堆以及能量转换系统在内的整体系统的物理过程和系统特性进行分析研究。相比于传统核反应堆系统, 微纳型反应堆系统更需要精细多物理耦合的设计分析技术。

本文首先调研了国内外水下微纳型核能系统的研究现状, 并指出了水下微纳型核能系统面临的关键技术挑战。然后介绍了团队基于反应堆蒙卡软件 RMC 和开源 CFD 软件 OpenFOAM 发展的针对

对水下微纳型热管反应堆系统的先进精细多物理耦合分析技术。并采取典型的热管反应堆 KRUSTY 的负载跟踪试验数据对耦合分析方法进行了验证。

1 水下微纳型核能系统现状

1.1 美国

国内外已有多个研究机构开展了水下微纳型核能系统的研究和开发工作, 包括日本、法国在内的发达国家已提出了多种方案^[3-4]。然而, 目前只有美国和前苏联/俄罗斯完成了深海核动力潜航器的设计和制造, 在深海领域开展了大量工作。

根据兰德公司的公开报道, 美国曾于 20 世纪 60 年代秘密建造并服役了 NR-1 型深潜器^[5], 该深潜器采用了一台紧凑化布置的压水堆, 可驱动深潜器在 900 m 潜深以 4 kn 的速度执行任务。NR-1 全长 45 m, 水下排水量 400 t, 水下航速 3.5 kn, 水上 4.5 kn, 由一台小型压水反应堆提供动力。结构方面, 艇体中央为耐压壳体, 由高强度钢制成, 前后则为非耐压壳体, 驾驶室、观察区和居住区占据了潜艇前部约 1/3 部分, 后 2/3 由反应堆等动力系统占据。

通用电气公司和加拿大的 ECS 电力系统公司联合设计了 AMPS-100 型海洋核动力装置, 该反应堆设计电功率 150 kW, 采用一体化布置, 具有良好的固有安全性。

2008 年 11 月 21 日, 在投入使用近 40 年后, NR-1 号被宣布退役并停止使用, 之后被送往普吉特湾海军造船厂进行拆解。2013 年 11 月 13 日, 美国海军表示 NR-1 拆解后的部分零部件将作为展品在位于康涅狄格州格罗顿 (NR-1 也是在此地建造的) 的潜艇博物馆进行展出。由于 NR-1 在服役期间表现出的巨大应用价值, 美国已开始论证下一代核动力下一代核动力深潜器的方案。相比于第一代深潜器, 第二代深潜器航速更高、潜深更大、自持力更长。

1.2 前苏联/俄罗斯

前苏联/俄罗斯自 20 世纪 60 年代起, 研发了多款超大潜深核潜艇并已实现列装服役^[3, 6, 7], 实验并制造了多款的深海核动力工作站, 积累了大量的海洋核动力装置应用经验。

俄罗斯鲁宾海洋工程中央设计局正在重启其曾在 20 世纪 80 年代实施的一项研发计划—水下矿产资源勘探系统研发计划。俄罗斯核能共同体 (Russian Nuclear Community) 于 2016 年 8 月 24 日在其官网上表示正考虑使用核反应堆作为动力源，并将这一项目命名为冰山 (Iceberg)。该项目旨在研制一种符合国际原子能机构 (IAEA) 安全要求的核动力装置^[8]。

俄罗斯于 2018 年 3 月推出核动力无人潜航器波塞冬，如图 1 所示，波塞冬无人潜航器直径 1.6 m，长 24 m，最高航速 180 km/h，航程可达 10 000 km，最大潜深 1 000 m，可携带核弹头。2019 年 1 月，据俄罗斯国防工业部门的消息，俄罗斯海军计划部署 32 艘波塞冬无人潜航器以执行战斗任务。同年 4 月，俄罗斯的 09852 型别尔戈罗德号特种核潜艇下水，成为首艘搭载波塞冬无人潜航器的潜艇。



图 1 波塞冬核动力 UUV

Fig. 1 Poseidon UUV

1.3 中国

目前国内多家单位和科研院所均开始了核动力 UUV 的概念设计，如西安交通大学、中国工程物理研究院、中国原子能科学研究院、清华大学等。

西安交通大学提出了一种能够提供 100 kWe 电功率的新型海洋静默式热管反应堆 (NUSTER-100) 电源系统^[9]，可为无人水下潜航器提供低噪音、长寿期的电力供应。系统结构图如图 2 所示，系统采用双层壳体布置，主要由反应堆堆芯、热管、屏蔽体、温差发电器热电转换系统和螺旋式余热排出系统等子系统组成。在反应堆堆芯中， UO_2 燃

料棒、慢化棒和钠热管矩形排列布置，以及热管从堆芯双端伸出，其冷凝段与温差发电器相连，实现热电转换。

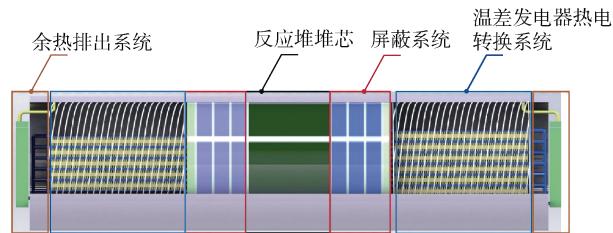
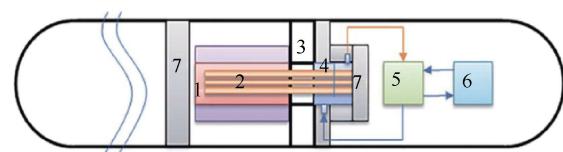


图 2 NUSTER-100 热管堆电源系统结构示意^[9]
Fig. 2 Structure of NUSTER-100 heat pipe reactor power supply system

中国工程物理研究院基于“热管反应堆+超临界 CO_2 循环”新型核动力装置概念，着重开展了海洋热管反应堆、超临界 CO_2 热力循环、安全分析及智能自主控制方法等方面的研究和设计工作^[10]。反应堆系统由堆本体、冷却系统、屏蔽体组成。其中，反应堆使用热管技术，即通过将热管插入固态的堆芯，并通过固体的热传导来排出堆芯热量。因此该堆芯不像传统的液态反应堆冷却剂一样受重力影响，可以水平布置，高度适配方向变化不确定性大的水下环境，也显著减小了 UUV 的设计外径。除热管以外，反应堆冷却系统还包含主换热器和余热排出换热器两部分，两者均为套管式热管。在反应堆正常运行期间，超临界 CO_2 直接进入主换热器，与热管进行热交换，带走堆芯排出的热量。在余热排出或应急冷却情况下，海水通过自然对流在余热排出换热器中带走衰变余热。UUV 不需要操作员进行控制，因此在运行时对屏蔽的要求较低，重点在轴向上加屏蔽层保护电子设备。径向辐射的影响很小，因此可以不予考虑。反应堆本体在潜航器内总体布局如图 3 所示。



1—反应堆；2—热管；3—绝热段应急冷却舱；4—热管换热器；5—动力装置；6—冷阱；7—屏蔽

图 3 核动力 UUV 概念设计
Fig. 3 Concept design of nuclear power UUV

2 水下微纳型核能系统关键技术挑战

在小型核反应堆领域, 多种技术路径并存, 每种技术都有其独特的技术挑战。例如, 铅冷堆需要解决冷却剂的腐蚀和 Po-210 污染问题; 钠冷堆则需提高钠火的安全性; 而气冷堆在气机研发方面遇到了困难^[11]。即便小微型反应堆已经积累了一定的技术和运行经验, 它们仍需克服包含核燃料研发、新型材料研发、先进加工技术、先进仪控系统内的一系列关键技术难题。

2.1 核燃料研发

在核燃料方面, 不同的小微型反应堆根据其特性选择不同的燃料类型, 包括氧化物燃料、金属燃料、氮化物燃料和碳化物燃料。然而, 大多数小微型模块式反应堆在新型燃料研发方面都遇到了关键技术挑战。近年来, 核工业界开始关注高含量低浓铀(High-Assay Low-Enriched Uranium, HALEU)燃料, 这种燃料可以提高反应堆的效率和寿命, 但其在转化、制造和运输容器方面提出了更高的要求。

2.2 新型材料研发

水下环境运行的反应堆与传统核电厂中运行的大型反应堆所处环境差异巨大, 新环境对材料性能提出了更为严苛的挑战。因此传统反应堆中常用的较为成熟的材料不一定适应水下, 必须经过论证或试验, 才能保证安全运行的要求。如果传统的材料不能满足要求, 则必须进行新材料的研发, 以满足水下环境对结构材料在耐腐蚀性、耐高温性和高强度方面的需求。国际上已从多方面对新型材料进行了理论分析和实验, 并积累了部分数据, 但新型材料暂未能完全达到应用要求。

2.3 先进加工技术

微纳型反应堆的一个特色是以一体化和模块化。一体化即将反应堆堆芯、冷却系统及辅助设备等关键设备集成在一起, 而模块化则是指将各个设备设计成独立的单元, 并具备统一的接口, 提高组装效率, 减少风险。一体化和模块化都对加工制造技术提出了更高的要求。此外, 水下微纳型核能系统一旦下水后就难以对设备进行维修和更换, 因此要求在加工制造和组装调试时具备更高的可靠性。

2.4 先进仪控系统

水下无人动力的一大特点就是需要具有可靠的自主运行能力。与传统陆上反应堆不同, 在正常运行和事故工况下, 都没有操纵员能对反应堆进行干预, 仪器设备本身也难以维修更换。因此, 反应堆必须具有更先进、可靠的仪控技术对堆芯状态进行监测并及时作出调整, 避免事故工况的发生。同时, 仪控系统也必须具备独立应对所有事故工况的能力。这些问题使得水下微纳型反应堆仪控系统的设计思路与传统压水堆有很大不同, 必须进行重新设计和验证。除此之外, 水下微纳型反应堆的核燃料周期较长, 也为仪控系统的可靠性提出了更高的要求。

不同堆型的优缺点总结如表 1。

表 1 不同堆型的优缺点
Table 1 Comparison of different reactor types

堆型	优势	不足
压水堆	发展历史最久, 技术最成熟	高压对设备要求高, 成本高
气冷堆	热效率高, 固有安全	气机等设备研发难度大
钠冷堆	热效率高、燃料利用率高	钠火安全性
铅冷堆	铅热导率高, 可低压运行	需要解决冷却剂的腐蚀和 Po-210 污染问题。
热管堆	环境适应性强, 可靠性高	受热管限制功率难以做大, 不同于传统流体冷却堆型的传热特性需要新的分析技术

其中, 热管冷却反应堆具有固有安全特性、成熟技术基础的可借鉴性以及较小的比质量等特性, 已逐步成为新型核动力技术应用的一种优选堆型。热管堆的不足之处在于, 大功率堆散热需要的热管占用很大的体积, 因此热管堆的功率难以做大, 但在微纳型核能系统中不存在这一问题。与此同时, 热管堆具有不同于传统通过流体冷却的反应堆堆型的传热特性, 需要新的分析方法。本团队已经发展了一系列适用于热管堆的先进分析技术。

3 水下微纳型热管反应堆与先进分析技术

3.1 热管反应堆基本组成

热管反应堆核能系统作为一种创新型的微纳型核能系统, 因其具有的良好环境适应性与高可靠性受到格外关注。典型的热管反应堆核能系统组成

如图 4 所示, 包括反应堆部分、能量转换部分系统与废热排出部分。反应堆运行时, 堆芯产生的裂变热通过固体热传导传递至堆内高温热管, 依靠管内碱金属钠工质的相变蒸发, 非能动、高效地将热量

传递至热管冷凝段。采用基于斯特林循环的能量转换部分, 实现能量形式的转换, 并形成稳定的电能输出。能量转换过程中产生的废热, 经由废热排出部分通过辐射换热方式释放至环境热阱中。

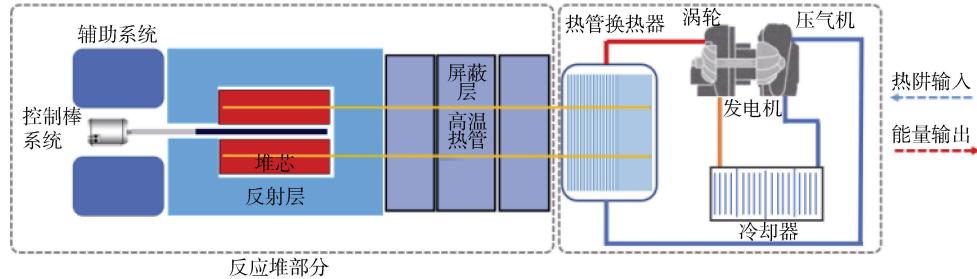


图 4 典型热管反应堆核能系统基本组成

Fig. 4 Basic components of nuclear energy system of typical heat pipe reactor

3.2 微纳型热管堆精细多物理耦合方法

对于全固态堆芯设计的反应堆, 堆芯温度变化与结构力学约束, 会导致材料发生复杂的热膨胀形变, 改变材料几何形状及材料密度, 产生不可忽略的形变反应性反馈。即热管反应堆内实际存在着中子输运-固体导热-材料热膨胀(即“核-热-力”)的复杂耦合过程, 不仅如此, 作为一种结构紧凑、耦合性强的新型反应堆, 堆内部件之间会存在着明显的耦合传热及相互约束作用, 部件间的耦合传热、部件与环境间的对流换热、材料间隙的接触导热、高温热管的独立吸热, 都会实际影响并改变反应堆的温度及动态特性。

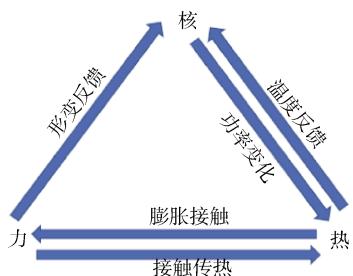


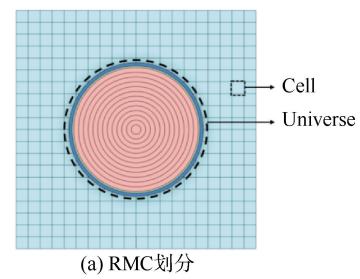
图 5 热管堆“核-热-力”耦合相互作用

Fig. 5 Nuclear-thermal-force coupling interaction in heat pipe reactors

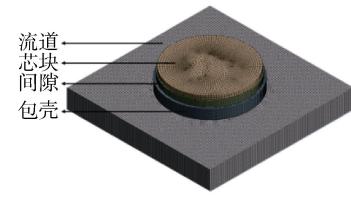
核-热-力 3 个过程分别由中子输运方程、导热微分方程和位移方程控制。中子物理部分采用基于概率论方法的蒙卡模拟。由于采用基于连续能量点截面数据与基于组合实体几何 (CSG) 的几何建模方法, 因此蒙卡方法对反应堆物理设计与分析普遍

具有普适、精准的特点^[12-14]。本文采用清华大学工程物理系反应堆工程计算实验室 REAL 团队自主开发的反应堆蒙卡程序 RMC^[15]进行热管堆中子输运精准求解。导热微分方程与位移方程的数值求解, 使用 OpenFOAM。OpenFOAM 是一款完全由 C++ 编写的开源计算流体力学类库, 具有易拓展、模块化、方便建模的优点, 逐渐被应用于反应堆热工水力分析^[16-17]及反应堆多物理耦合计算中^[18-20]。OpenFOAM 中已内置包含热应力的线弹性力学求解器 solidDisplacementFoam, 能够完成固体热传导-热膨胀形变耦合计算。

图 6 展示了 RMC 与 OpenFOAM 对典型燃料棒及其冷却剂流道的计算域划分方式。



(a) RMC划分



(b) OpenFOAM划分

图 6 典型燃料棒的计算域划分

Fig. 6 Computational domain division of typical fuel rods

3.3 热管堆精细多物理耦合方法验证

由于目前没有水下热管反应堆系统的公开数据, 采用 KRUSTY 热管反应堆进行耦合方法的验证。反应堆的几何建模如图 7 所示。

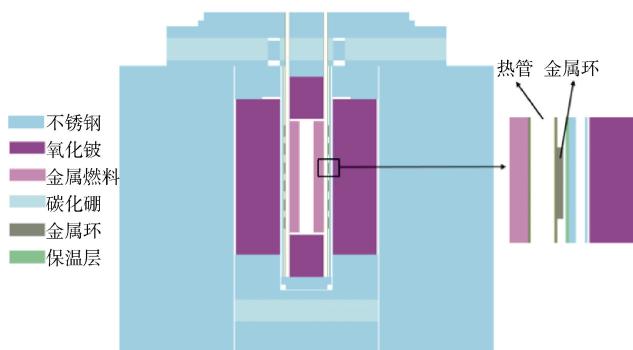


图 7 KRUSTY 热管反应堆几何建模

Fig. 7 Geometric modeling of KRUSTY heat pipe reactor

中子物理部分, 文献参考结果^[21]与 RMC 计算结果的对比见表 2。可以认为建立的 RMC 模型足够准确, 可进行后续的热管堆精细耦合计算。

表 2 不同条件下的 k_{eff}

Table 2 k_{eff} comparison under different conditions

计算条件	参考结果 ^[21]	计算结果
裸堆	0.588 6	0.589 4
裸堆+水	0.959 1	0.961 2
裸堆+沙	0.831 0	0.831 3
完整反应堆	1.022 0	1.022 7

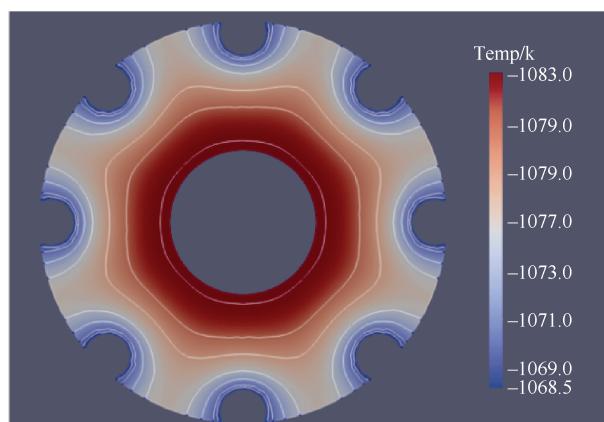
图 8 为 OpenFOAM 计算得到的温度分布和文献^[21]的参考结果。在反应堆传热计算中, 堆功率为 2.37 kW, 热管冷凝段表面温度设为 1 061.0 K。横向对比可发现, OpenFOAM 模型计算得到的燃料温度分布与参考结果基本一致, 验证了 OpenFOAM 计算模型的准确性。

在此基础上, 使用 KRUSTY 反应堆负载跟踪试验进行耦合方法的进一步验证。在该试验中, 斯特林电机的输出功率阶跃下降 25%, 保持径向反射层与控制棒不动, 测量该瞬态过程中的反应堆功率、燃料温度、反应性随时间的变化。

图 9 展示了针对该瞬态过程的模型计算结果与文献公开的试验测量结果^[22]间的横向对比。热管释热功率降低会直接导致燃料的温度上升, 由此产

生的反应性反馈持续改变反应堆功率, 经过数次的反应性反馈调节, 反应堆逐渐达到新的稳定状态。反应堆达到稳定后, 由于反应堆与环境间的漏热, 达到新稳态的堆功率仍会略高于电机功率。瞬态过程中, 燃料的最高温升大约为 7 K, 达到新稳态后的燃料温升大约为 3 K。这是因为热管输热功率的降低会向反应堆内引入正反应性反馈, 为了保持反应堆的临界稳定状态, 需要通过燃料升温产生的负反应性进行抵消。

与试验结果相比, 建立的 KRUSTY 反应堆瞬态耦合分析模型能够较好地预测动态过程中的各参数变化, 验证了所提方法对热管固态反应堆动态特性计算的有效性, 该方法可以用于对热管反应堆的动态特性分析中, 获得的结果能够反映热管堆的动态特性。



(a) OpenFOAM 计算温度分布

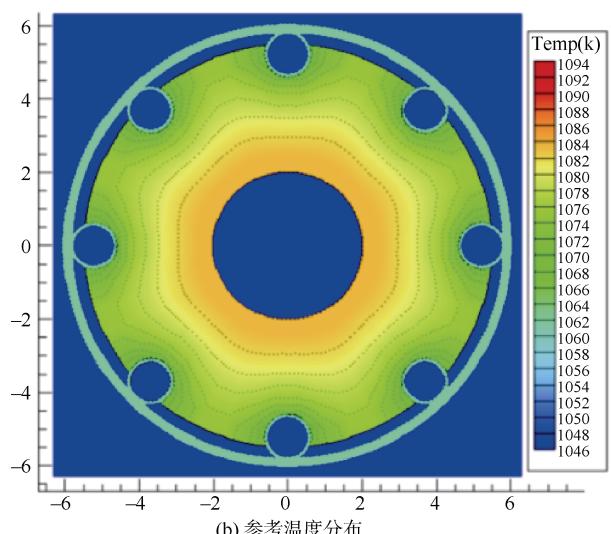


图 8 OpenFOAM 计算模型验证
Fig. 8 OpenFOAM calculation model validation

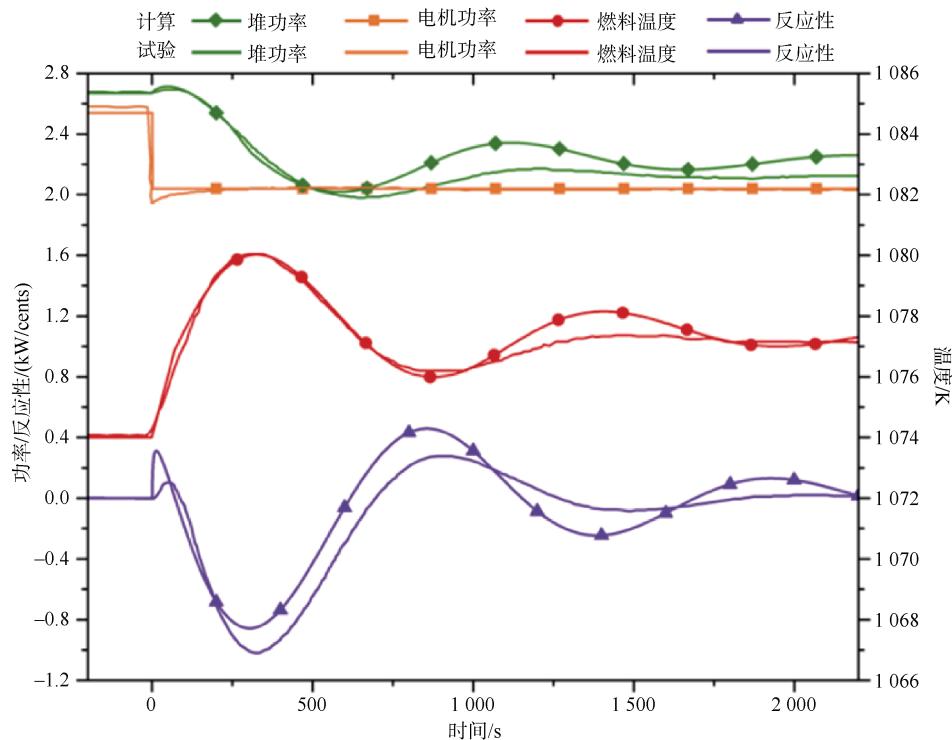


图 9 负载跟踪瞬态过程的结果对比
Fig. 9 Comparison of results of transient load tracking

4 结束语

本文调研了水下微纳型核能系统的研究现状，并分析了其面临的关键技术挑战。从美国、前苏联/俄罗斯和中国的研发进展中，我们可以看到，水下微纳型核能系统正朝着小型化、模块化、高可靠性和智能化方向发展。热管反应堆作为一种具有潜力的技术路线，其先进分析技术的研究也取得了显著进展。

然而，水下微纳型核能系统的研发仍然面临着诸多挑战。核燃料的研发需要解决高浓铀的转化、制造和运输问题；新型材料的研发需要克服耐腐蚀性、耐高温性和安全性等方面的限制；先进加工技术需要提高反应堆部件的制造精度和可靠性；先进仪控系统需要实现精确的温度和功率控制，并保证系统的安全性和稳定性。

本文基于反应堆蒙卡程序 RMC 和开源 CFD 软件 OpenFOAM，发展了针对水下微纳型热管反应堆的先进精细多物理耦合技术，并选取了典型的热管反应堆 KRUSTY 开展验证工作。KRUSTY 原型试验堆的负载跟踪试验数据与计算分析结果总体

符合良好，证明了耦合分析方法的正确性。

水下微纳型核能系统在水下能源动力领域具有广阔的应用前景，未来将朝着多能互补、智能化管理、应用场景拓展和国际合作方向发展。随着技术的不断进步，水下微纳型核能系统将为水下能源动力领域带来革命性的变化，为人类探索海洋、开发海洋资源提供强大的动力支持。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. “十三五”国家科技创新规划[S]. 北京：国务院，2016.
- [2] 中国工程院. 《全球工程前沿 2018》报告发布[J]. 天津冶金，2018，(6): 4.
- [3] 张彩坤, 陈国琳, 王磊. 国外核潜艇大潜深技术发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2011, 33 (12): 134-137.
- [4] 陈炳德. 日本小型核动力反应堆及其技术特点[J]. 核动力工程, 2004, (03): 193-197, 202.
- [5] LACROIX F W, BUTTON R W, JOHNSON S, et al. A concept of operations for a new deep-diving submarine, 1395[R]. Santa Monica: Rand Corporation, 2002.
- [6] 蔡民. 俄罗斯现代潜艇设计管窥[J]. 舰船科学技术, 2002, 24 (3): 18-21.

- [7] 期颐. 苏/俄潜艇核动力[J]. 现代舰船, 2004 (8): 28-31.
- [8] 伍浩松. 俄拟研发核动力水下矿产资源勘探系统[J]. 国外核新闻, 2016 (9): 4.
- [9] 黄金露, 王成龙, 郭凯伦, 等. 新型海洋静默式热管反应堆的概念设计[J]. 中国基础科学, 2021, 23 (4): 9-14.
- [10] 郭斯茂, 王冠博, 唐彬, 等. 兆瓦级高效紧凑新型海洋核动力装置研究[J]. 中国基础科学, 2021, 23 (3): 42-50.
- [11] 王晨, 郑鑫. 小微型模块式反应堆发展研究[J]. 河南科技, 2021, 40 (10): 110-3.
- [12] 吴高晨. 基于 RMC 的连续能量蒙特卡罗均匀化与群常数产生研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [13] 郑俞. 蒙特卡罗减方差加速方法研究与应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [14] 冯致远. 基于 RMC 的等效均匀化群常数及截面参数化研究[D]. 北京: 清华大学, 2022.
- [15] WANG K, LI Z G, SHE D, et al. RMC—a Monte Carlo code for reactor core analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 121-129.
- [16] AUFIERO M, CAMMI A, GEOFFROY O, et al. Development of an OpenFOAM model for the Molten Salt Fast Reactor transient analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 111: 390-401.
- [17] NIEVES-REMACHA M J, YANG L, JENSEN K F, et al. OpenFOAM computational fluid dynamic simulations of two-phase flow and mass transfer in an advanced-flow reactor[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54 (26): 6649-6659.
- [18] DENG B, CUI Y, CHEN J G, et al. Core and blanket thermal-hydraulic analysis of a molten salt fast reactor based on coupling of OpenMC and OpenFOAM[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, 31 (9): 85.
- [19] FIORINA C, CLIFFORD I, KELM S, et al. On the development of multi-physics tools for nuclear reactor analysis based on OpenFOAM®: state of the art, lessons learned and perspectives[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 387: 111604.
- [20] FIORINA C, CLIFFORD I, AUFIERO M, et al. GeN-Foam: a novel OpenFOAM® based multi-physics solver for 2D/3D transient analysis of nuclear reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 294: 24-37.
- [21] POSTON D I. Space nuclear reactor engineering, 1345963[R]. Los Alamos : Los Alamos National Laboratory (LANL), 2017.
- [22] POSTON D I, GIBSON M A, MCCLURE P R, et al. Results of the KRUSTY warm critical experiments[J]. Nuclear Technology, 2020, 206 (sup1): S78-S88.

(责任编辑: 张曼莉)