

核热火箭发动机技术发展态势分析与启示

彭乐钦, 杨宝娥, 马元, 高玉闪, 杨岸龙, 徐天罡, 吴慧博
(西安航天动力研究所 航天液体动力全国重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘要:为解决航天任务中太阳能利用困难和化学能能力瓶颈的问题,发展空间核动力势在必行。核热火箭发动机具有运行能量转换效率高、推力调节范围广、比冲大、长驻留、启动快、可多次启停等优点,近年来再次成为国内外研究热点。通过回顾美俄在核热火箭发动机技术上的发展历程,梳理涉及的反应堆、发动机、推进剂管理、地面试验、系统仿真与核安全等相关的关键技术,总结美俄核热火箭发动机发展的启示,为未来空间核热火箭发动机的规划论证与技术研发提出发展建议。

关键词:固体堆芯;核热火箭;发动机;反应堆;地面试验;系统仿真

中图分类号:V439.5

文献标志码:A

文章编号:1672-9374(2024)04-0014-17

Development status and prospect of nuclear thermal rocket engine technology

PENG Leqin, YANG Bao'e, MA Yuan, GAO Yushan, YANG Anlong, XU Tiangang, WU Huibo
(National Key Laboratory of Aerospace Liquid Propulsion,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to address the challenges of solar energy utilization and the limitations of chemical energy capacity in space missions, it is crucial to develop space nuclear power. The nuclear thermal rocket engine system offers numerous advantages, including high energy conversion efficiency, a wide range of thrust regulation, large specific impulse, long residence time, quick start-up, and the ability for multiple start-stop cycles. This system has emerged as a prominent research focus both domestically and internationally in recent years. The development of nuclear thermal rocket engine technology in the United States and Russia was reviewed. It summarized the key technologies involved in reactor, engine, propellant management, ground test, system simulation, and nuclear safety. Additionally, it outlined the insights gained from the development of nuclear thermal rocket engine in the United States and Russia, and provided suggestions for future planning, demonstration, and technical research and development of nuclear thermal rocket engine.

Keywords: solid core; nuclear thermal rocket; engine; reactor; ground test; system simulation

收稿日期:2024-03-12 修回日期:2024-06-01

基金项目:陕西省自然科学基金青年项目(2024JC-YBQN-0535);液体火箭发动机技术国家重点实验室基金(6142704220101)

作者简介:彭乐钦(1989—),男,博士,研究领域为发动机流动燃烧与传热技术。

通信作者:杨岸龙(1984—),男,博士,研究领域为发动机流动燃烧与传热技术。

引用格式:彭乐钦,杨宝娥,马元,等.核热火箭发动机技术发展态势分析与启示[J].火箭推进,2024,50(4):14-30.

PENG L Q, YANG B E, MA Y, et al. Development status and prospect of nuclear thermal rocket engine technology[J].
Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(4): 14-30.

0 引言

基于化学能和太阳能的推进系统开发已经接近极致,更高、更远的深空探测和地月/地火载人探测需要功率密度更高、使用寿命更长、不受太阳光照限制的动力源。依据当前科技发展水平,基于核能的推进系统是目前唯一的、在可预期的将来能够实现的、革命性的空间动力系统方案。核反应堆可长时间提供能量,克服了远离太阳导致的太阳能利用困难的问题。载人火星探测用核推进系统可大幅缩短飞行时间,降低了空间辐射、零重力、发射与轨道组装等风险^[1-5];利用核热火箭开展太阳系内行星探测及太阳系边际探测,能够推动飞船以每年 30 个天文单位的速度飞向太阳系的外边缘;此外,液氧增强核热火箭可将到达月球或从月球返回地球的时间缩短至 24 h,从而实现通勤化地月往返^[6]。

核热推进(nuclear thermal propulsion, NTP)系统与液体火箭推进系统类似,利用核反应堆裂变取代化学燃烧而产生热能。NTP 系统运行过程中,直接进入反应堆的推进剂被加热到极高的温度,通过喷管加速喷出而产生推力。由于推进剂直接与反应堆堆芯接触换热,具有较高的能量转换效率,理论推重比也较高^[7-9]。发动机理论真空比冲 $I_{sp} \propto \sqrt{T_c/M}$, 其中 T_c 为反应堆腔室内推进剂温度, M 为推进剂平均分子量,所以火箭发动机的比冲由推进剂分子量与喷出温度决定。因此, NTP 火箭发动机的推进剂为氢,并利用裂变反应将氢加热到尽可能高的温度(受限于材料耐高温能力)。当前推进剂最高加热到 3 000 K 左右^[10-11],对应的理论比冲约为 950 s,是当前比冲最高的氢氧火箭发动机(470 s)的 2 倍^[12]。NTP 系统结构简图如图 1 所示,由 3 个高度集成的分系统构成:核反应堆、火箭发动机以及推进剂贮存和管理分系统^[13]。反应堆分系统由堆芯、控制鼓及其致动器、反射层、屏蔽体和耐压壳体组成;发动机分系统由涡轮泵、喷管、流量调节器、再生冷却回路以及相关的阀门和管路组成。推进剂贮存和管理分系统包括液氢贮罐、氮增压器与低温推进剂在轨管理系统。

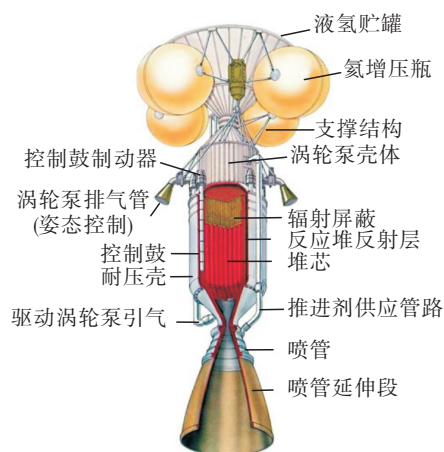


图 1 Rover/NRVER 计划核热推进系统剖面图

Fig. 1 Cutaway schematic of a nuclear thermal propulsion system from the Rover/NERVA programs

空间技术和核技术是 20 世纪两项重要的科技成就,它们的应用和发展不仅极大地推动了人类社会和经济的进步,也深刻地影响了国际政治和安全格局。核动力航天器则是两大科技成就的有机结合,具有深远的战略意义,其发展一直受到航天大国的密切关注。美俄均从国家战略需求出发长期持续发展核动力运载器。美国将其视为“改变游戏规则”(game changing development, GCD)的颠覆性技术,2020 年发布《核电源与核热推进的国家战略》^[14],并计划 2026 年开展 NTP 的飞行演示验证。2018 年 3 月,俄罗斯年度国情咨文中声明“海燕”核动力巡航弹(吸气式核热推进)试验成功^[15],以此形成“非对称”的机动战略核威慑优势。

考虑到空间核动力的战略能力与应用前景,中国于 2017 年发布的《2017—2045 年航天运输系统发展路线图》^[16],计划在 2040 年前后实现核动力空间穿梭机的重大突破。中国航天大会发布了一系列关于空间核推进的重大科学问题和技术难题,包括 2020 年的“核动力航天器及工程应用”^[17],2021 年的“基于核聚变推进系统的空间飞行器设计”^[18],以及 2023 年的“地外天体表面电站用超小型反应堆能源技术”,“2 500 ℃ 以上超高温环境下的热承载材料技术”与“基于核动力的载人火星快速往返技术”^[19]。其中,“如何实现核动力载人火星探测的快速往返”入选中国科协发布的 2023 年重大科学问题难题工程技术难题之一^[20]。

本文对最为成熟的固相堆芯核热火箭发动机系统的发展历程与关键技术发展现状进行综述分

析,并提出未来的发展展望与建议。

1 核热火箭发动机发展历程

在 20 世纪太空竞赛的背景下,美国 and 苏联开展了大规模的地面试验和关键技术验证,逐步推动核热火箭发动机技术走向成熟并形成地面样机。进入 21 世纪,以载人火星探测、星表科研基地建设等空间探测任务为牵引,核热火箭发动机技术研究再次引起美俄的重视,我国也密切关注美俄进展并开展了战略论证与预先研究工作。

1.1 美国

在 20 世纪 50 ~ 70 年代,为了解决核力量的远

程投送和航天器的发射入轨问题,美国实施了 Rover/NERVA 计划,随着登月采用大推力液体火箭而停止大规模研究;同时期,“冥王星”核动力巡航导弹研发计划同步进行,但随固体火箭技术成熟并装备定型,项目于 1964 年终止。星球大战期间,为确保核力量的高效率远程投送,美国启动了 SNTTP 计划,研制结构更紧凑、推重比更高的核热火箭发动机。2010 年以后,面向载人火星探测和轨道机动战任务,美国国防部高级研究计划局(DARPA)和美国航空航天局(NASA)联合开展 DRACO 项目,计划 2026 年开展首次 NTP 运载器在轨试验。具体支持的计划与项目如图 2 所示。

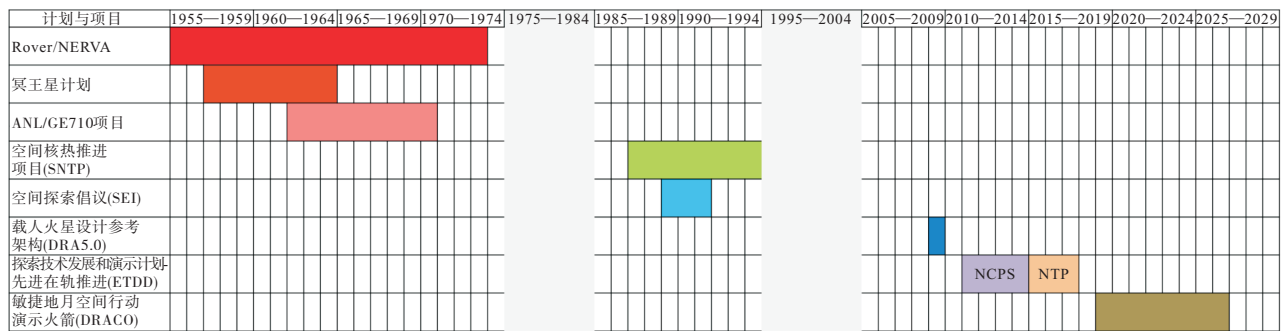


图 2 美国针对核热推进所开展的相关计划与项目

Fig.2 Plans and programs about NTP in the USA

当前美国已形成 NASA、能源部(DoE)和国防部(DoD)协作研发模式,利用各自优势力量开展

技术论证与资源协调^[2],主要研制机构如图 3 所示。

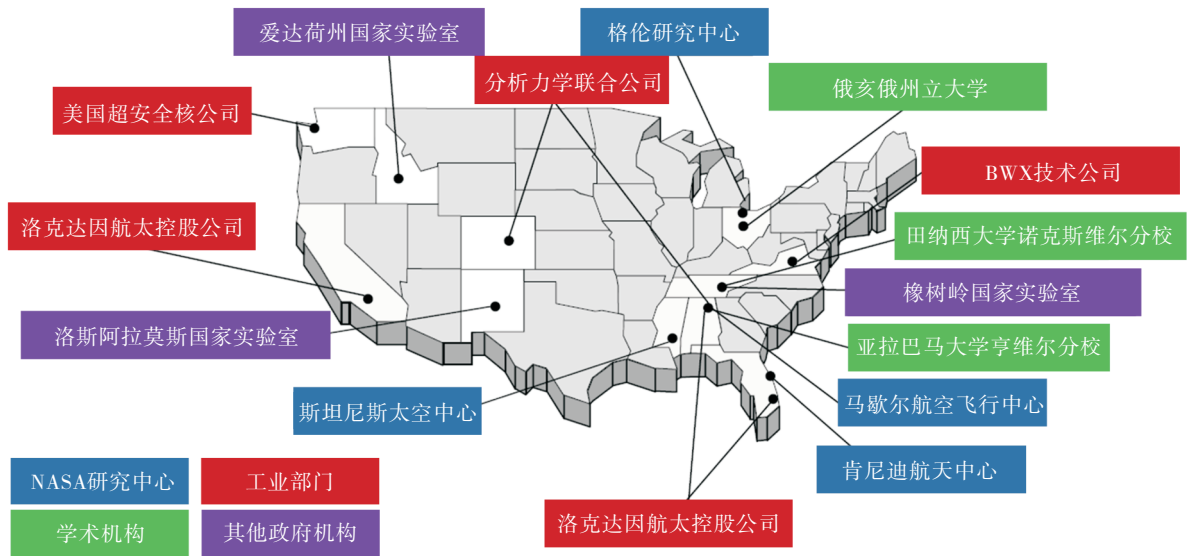


图 3 美国核热推进研制的主要机构

Fig.3 Major agency for the development of nuclear thermal propulsion in the United States

下面对主要计划与项目做详细说明,以梳理 NTP 技术的发展历程。

1.1.1 Rover/NERVA 项目(1955—1973 年)

二战后,美国在航空和火箭领域提出多份军事应用核能的开发报告,认为“核能开辟了实现太阳系内行星间航行的唯一可能途径”^[21]。1955—1973 年期间,原子能委员会(AEC)和国防部联合支持了以大型洲际弹道导弹主推进为研制目标的“漫游巡视器项目”(Rover),开发适合 NTP 系统的反应堆,直至 20 世纪 60 年代初 Rover 计划因无任务需求而

停止。随后 NTP 在载人登月工程中再次得到重视,NASA 接棒美国空军,成立 NASA/AEC 联合空间核推进办公室(SNPO)继续推进核热火箭发动机的研制,启动了针对火星、木星等行星载人探测的 NERVA 计划,充分发挥 NTP 系统高比冲、大推力、可重复使用的技术能力优势。受到美国政策变化和财政负担等方面的影响,经费不断收缩,最终于 1973 年被终止。Rover/NERVA 反应堆和 NTP 发动机开发项目中地面试验了 22 座反应堆^[13],主要核反应堆试验年表如图 4 所示^[22]。

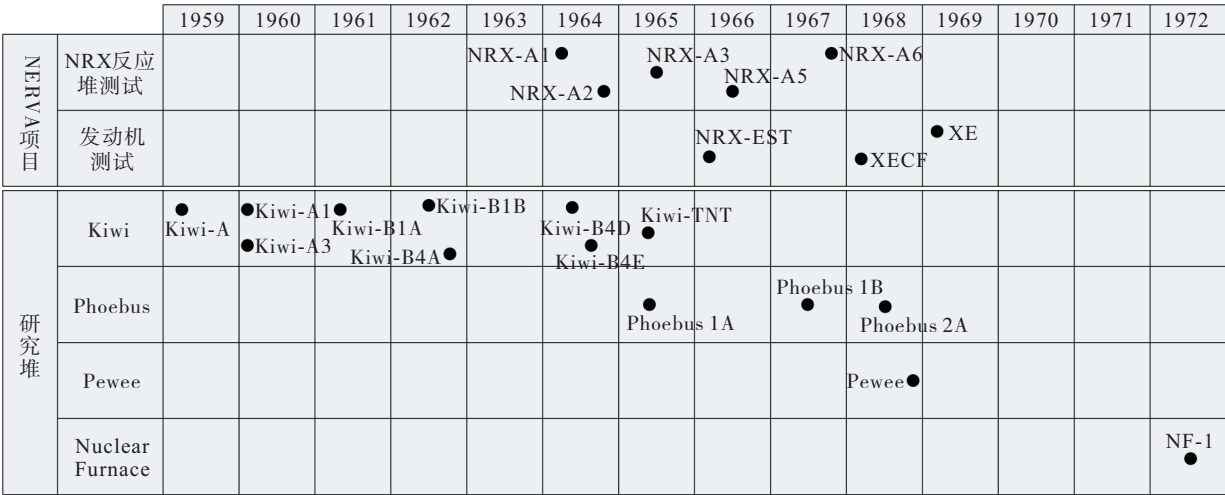


图 4 Rover/NERVA 项目期间主要核反应堆试验年表

Fig.4 Annual schedule of major nuclear reactor tests during the Rover/NERVA project

Rover/NERVA 取得了丰硕的成果,成功证明了 NTR 发动机技术可行性,具备了开展飞行实验样机研制的技术基础。Rover 完成了反应堆部件和发动机组件的热试车,获得了丰富的试验数据。NERVA 综合验证了发动机的比冲、重复启动性、推力调节能力、持续工作寿命、推进系统与发动机的联合工

作特性等,如表 1 所示^[23],反应堆最高功率为 4 082 MWt,最高比冲为 901 s,反应堆出口推进剂最高温度 2 406 K,满功率最长累计运行时间 6 528 s,最多启动次数为 28 次,总体技术成熟度达到 5 级以上^[24]。后续的研究均建立在 Rover/NERVA 成果的基础上。

表 1 Rover/NERVA 项目期间所开展的反应堆试车试验

Tab.1 Reactor tests during the Rover/NERVA project

反应堆	试验时间	启动次数	最大功率/ MWt	最大功率 运行时间/s	反应堆出口温度/K		推力室 压力/kPa	流量/ (kg·s ⁻¹)	理论真空 比冲/s
					燃料	推进剂			
Kiwi-A	1959-07-01	1	70	300	1 778	—	—	3.2	724
Kiwi-A1	1960-07-08	1	88	307	2 206	—	1 125	3.0	807
Kiwi-A3	1960-10-19	1	112	259	2 172	—	1 415	3.8	800
Kiwi-B-1A	1961-12-07	1	225	36	1 972	—	974	9.1	763

续表

Kiwi-B-1B	1962-09-01	1	880	数秒	>2 278	—	2 413	34.5	>820
Kiwi-B-4A	1962-11-30	1	450	数秒	1 556	—	1 814	19.0	677
Kiwi-B-4D	1964-05-13	1	990	64	2 539	2 156	3 606	31.1	865
Kiwi-B-4E	1964-08-28	2	937	480	2 356	1 972	3 427	31.0	834
Phoebus-1A	1965-06-25	1	1 090	630	2 444	2 278	3 772	31.4	849
Phoebus-1B	1967-02-23	2	1 450	2 244	2 306	2 244	5 075	38.1	851
Phoebus-2A	1968-06-07	4	4 082	744	2 283	2 256	3 827	119.0	821
Pewee-1	1968-11-12	3	503	2 400	2 750	1 803	4 344	18.8	901
Nuclear Furnace-1	1972-06-29	5	44	6 528	2 444	—	—	1.7	849
NRX-A2	1964-09-10	2	1 096	40	2 229	2 119	4 006	34.3	811
NRX-A3	1965-04-05	3	1 093	990	>2 400	2 189	3 930	33.3	>841
NRX-EST	1966-02-03	11	1 144	830	>2 400	2 292	4 047	39.3	>841
NRX-A5	1966-06-08	2	1 120	580	>2 400	2 287	4 047	32.6	>841
NRX-A6	1967-11-12	2	1 199	3 623	2 558	2 406	4 151	32.7	869
XE-prime	1969-03	28	1 137	1 680	>2 400	2 267	3 806	32.8	>841

1.1.2 ANL/GE710 项目(1962—1968 年)

1962 年 5 月,AEC 与通用电气(GE) 签署合同开展 710 项目,作为对 NERVA 需求的响应,目标为开发一个高性能、快中子谱、难熔金属反应堆。阿贡国家实验室(ANL)、NASA-Lewis 研究中心(NASA-LRC,现为格伦研究中心)与 GE 完成了金属陶瓷(CERMET) 燃料的开发及核热反应堆方案(代表反应堆为 GE710 与 ANL200/ANL2000 反应堆),以期实现空间探索用电与推进共用一套堆芯设计体系^[25]。燃料测试表明:UC-ZrC/ZrC 复合材料与 UO₂-W-Gd₂O₃/W 金属陶瓷在 2 500~2 700 K 热氢环境中考核 1 h 后的结构性能能够达标。CER-MET 相较于碳化物燃料更具飞行演示条件^[25]。不过这些反应堆并未建成与测试。进入 21 世纪后,鉴于其在 NTP 上的优异性能,研究热度逐渐升高。

1.1.3 空间核热推进项目(1987—1994 年)

Rover/NERVA 项目终止后,NTR 的研究支持停滞了近 15 a。1987 年,星球大战计划中启动了 Timberwind 计划,后更改为空间核热推进(SNTP) 项目。SNTP 项目面向高速拦截弹道导弹、运载火箭上面级和轨道机动/转移运载器,开发结构更为紧凑、推重比更高的空间 NTP 发动机^[1]。SNTP 项目计划分 3 阶段进行。第 1 阶段自 1987 年 11 月持续到 1989 年 9 月,星球大战计划办公室(SDIO) 资助了此

阶段的研究。该阶段获得了 PBR 堆芯和 MITEE 堆芯方案,验证 PBR 用于地基助推阶段拦截器上面级的可行性。第 2 阶段计划自 1989 年持续到 2000 年,项目管理权由 SDIO 转移到空军,应用场景转为空军主导的空间任务,目标为研制 PBR 发动机原理样机。随着冷战结束,在第 2 阶段研究未完成的情况下,项目于 1994 年 1 月被终止。

1.1.4 空间探索倡议(1989—1991 年)

为载人重返月球并最终载人探火,扩大美国在太空领域的影响力,美国启动了空间探索倡议(SEI) 项目。SEI 全面对比了火星任务采用化学发动机和核热发动机的优劣,表明 NTP 为载人探火的优先选择推进技术^[13]。NTP 可将单程飞行时间从 18 m 缩短至 7 m,或相同的任务时间内将发射质量降低 50%^[3]。通过遍历 2008—2022 年所有发射窗口,绘制了分别利用化学推进和 NTP 需要发射到近地轨道的总任务质量与飞行时间的对比图(见图 5)。在短期驻留任务中,NTP 的优势更加明显,能够大规模节省约 1 000 t 发射质量和缩短 100 d 飞行时间^[3]。对比评价了 NERVA 计划衍生反应堆(NDR)、金属陶瓷燃料反应堆和苏联的扭带状三元碳化物燃料方案。由于项目预算过高(在 20~30 a 内花费约 5 000 亿美元),SEI 项目论证后并没有得到资金支持。

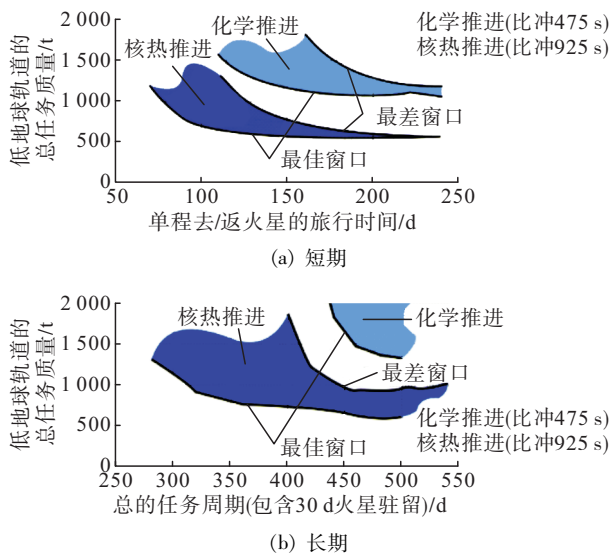


图 5 火星表面长期与短期驻留所需发射质量与飞行时间
Fig. 5 Mission mass and flight time required for long-term and short time residence on the surface of Mars

1.1.5 载人火星设计参考架构(DRA 5.0,2009 年)

2007 年 1 月,NASA 委托火星架构工作组启动新版载人火星设计参考架构 DRA5.0 (Mar design reference architecture)^[26]研究,经过 2 a 的多轮次的深化论证认为,未来载人火星登陆任务采用近地轨

道对接与环火星轨道对接模式。对比了 NTP 发动机和氢氧发动机执行任务的规模,优选 NTP 发动机作为火星转移飞行器发动机方案,计划使用 3~4 台基于 NDR 反应堆的 Pewee 发动机。

1.1.6 探索技术发展和演示计划-先进在轨推进 (ETDD,2011—2017 年)

2011 财年,在 NASA 的探索技术发展和演示计划 (ETDD) 的先进在轨推进部分,重新加入了 NTP 技术研发,由格伦研究中心 (GRC)、马歇尔航天飞行中心 (MSFC) 和 DoE 共同编制,开发规划如图 6 所示^[27],分为基础技术研发和技术验证两条路线。第 1 阶段 (2012—2014 年) 的研究工作由基础技术研发来支持,并纳入 NASA 核低温推进级 (NCPS) 项目^[28]。基于美国已有的技术基础,同时考虑 ETDD 计划的执行进度,优选石墨基燃料,备选 CERMET 燃料^[28]。NCPS 项目的一个重要里程碑是完成了核热火箭元件环境模拟器 (NTREES) 的升级改造。2015 年,NCPS 项目被重命名为“核热推进项目”,重点开展石墨基体复合燃料单项效应测试;燃料元件设计采用标准化设计思路,通过叠加燃料元件数量和等尺寸比例扩大堆芯直径的方式形成整体堆芯^[29]。

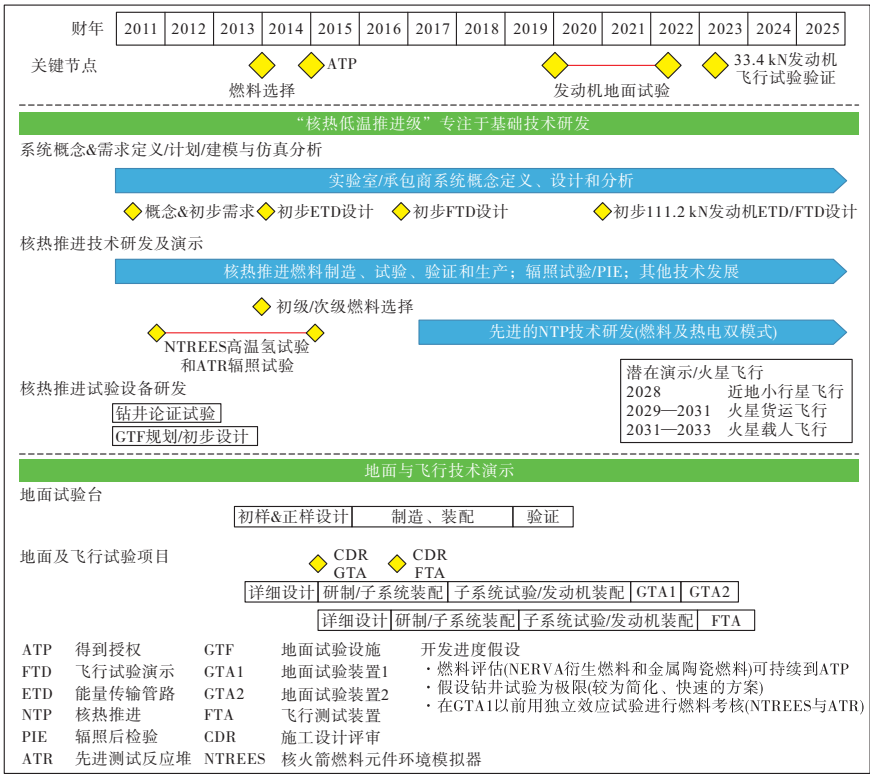


图 6 NASA 和 DoE 于 2011 年提出的核热推进开发规划
Fig. 6 NTP development plan proposed by NASA and the DoE in 2011

1.1.7 敏捷地月空间行动演示火箭 (DRACO,2019 至今)

2019 年,DARPA 启动了 DRACO 项目第 1 阶段合同,重点开发和验证高丰度低浓缩铀 (HALEU) NTP 系统^[30-31]。2022 年 9 月,通用原子电磁系统公司 (GA-EMS)宣布已完成第 1 阶段的反应堆和发动机的基线设计,并成功地在 NTREES 上测试了反应堆高温燃料元件^[5]。同年 5 月,第 2 和第 3 阶段招标合同发布^[32],目标是完成演示系统的初步和详细设计,在第 3 阶段全功率在轨飞行试验之前尽可能

建造和验证 NTR 飞行发动机。DRACO 最大程度地利用 Rover/NERVA 计划期间的试验设施,鼓励使用成熟和/或低风险的非核相关组件和技术,以最大限度地降低项目成本和保证项目进度。

1.1.8 近期政策与计划

随着全域作战需求愈发迫切,美国相继出台了多项航天核动力开发相关的战略政策,以指导和加快该领域研究和应用。表 2 为 2020 年以来美国政府机构发布的空间 NTP 的相关战略政策及有军方背景的研究机构发布的政策文件^[14,33-36]。

表 2 2020 年以来美国空间核热推进相关的战略政策文件
Tab.2 Strategic policy papers of American space NTP since 2020

战略政策文件名称	发布时间	发布机构	发展目标与主要内容
美国国家太空政策 (national space policy)	2020-12-09	白宫-特朗普政府	将开发和使用太空核动力与推进 (SNPP) 系统;明确了关键技术和应用场景,以及各政府部门的职责权限和协作方式,并积极寻求商业合作
太空政策指令-6 (space policy directive-6, SPD-6)	2020-12-16	白宫-特朗普政府	开发铀燃料处理能力,生产出适用于 NEP 和 NTP 所需的燃料;建设 NTP 的技术基础和能力
太空能源战略 (energy for space)	2021-01-06	能源部	为太空探索提供能源动力 (包括核能和非核能源),探索能源管理系统以满足太空任务中潜在的应用需求
推动发展国防和空间 探测用小型模块化反应堆 (promoting small modular reactors for national defense and space exploration)	2021-01-05	白宫-特朗普政府	振兴美国核能部门,重振美国的太空探索计划,开发满足国防需求的多种能源;推广先进的反应堆技术,包括小型模块化反应堆,以支持国防设施的能源灵活及安全使用
太空机动战: 核推进的战略迫切性 (maneuver warfare in space: the strategic mandate for nuclear propulsion)	2022-01-14	米切尔研究所	报告分析了星链的脆弱性,归纳了核推进的主要优势,认为美国具有良好的核推进发展基础,简要分析了美军方对核动力航天器入轨的态度

1.2 苏联/俄罗斯

1955 年,航空工业部第一科学研究院 (现为 Keldysh 研究中心)开展了核火箭发动机原理方案的理论分析和方案论证工作。次年,苏联政府签署了第一份关于发展 NTP 的决定,开始“带核发动机的远程弹道导弹的创建工作”^[8];同年 9 月,莫斯科航空学院成立核推进专业教学班,在 20 世纪 50 ~ 70 年代培养了超过千名航天与核专业复合专家,成为核火箭发动机的研究主力^[8]。1956—1957 年,通

过对比研究选择了技术相对成熟的固相反应堆方案作为主攻方向。1958 年,成立了由航空技术委员会第一科学研究院、国家航空工业设计院、国防技术委员会第 456 试验设计局、第一试验设计局、670 试验设计局、第 58 中心科学研究院、苏联国防部、中型机器制造工业部、苏联科学院原子能研究所组成的委员会。苏联 NTP 技术的研制历程比较平稳,研究内容深入全面。从 1953 年开始的近 30 a 时间里,多家研究院、设计局、实验室协同开展了广泛的

理论和试验研究,包括热交换、流体力学、难熔材料工艺,中子物理和控制,燃料元件最佳组成和结构等,建立了从单个燃料单元到复合燃料组件的广泛的非核/带核测试设备,建成了 IGR、IVG 和 IGRIT 等专用研究堆,建成了性能最强的 RD-0410 核热推进发动机样机。相比 NERVA 发动机,RD-0410 的效率高出 7%^[8],在性能与寿命上皆有优势^[7-8]。大规模的研究工作一直持续到 1980 年前后,随着苏联解体而全面停止。

进入 21 世纪后,俄罗斯在 NTP 方面重点发展 2 个方向:核热-核电双模式推进技术与吸气式核热推进(核冲压与核涡轮)。2006 年,俄罗斯电力工程科学研究设计院(Nikiet)恢复与俄罗斯联邦航天局(Roskosmos)和国家原子能机构(Rosatom)主要企业的合作,重点开发一种核热-核电双模式动力系统地面原型装置^[37]。与此同时,Nikiet 与哈萨克斯坦核动力院启动了 IVG-1 反应堆的升级改造,提升寿命试验能力,氢气出口温度超过 3 000 K,试验时间最长 10 h^[37]。2010 年 6 月,Keldysh 研究中心牵头启动了基于 RD-0410 的研究成果的核热-核电双模式系统(NPPS)研发项目,发展地球轨道与火星轨道间的“宙斯”星际拖船。由于缺乏资金,“宙斯”号项目进展缓慢^[37]。吸气式核热推进方面,2001 年,美国退出“反导条约”,同年俄罗斯开启“海燕”项目。2023 年 10 月 5 号,俄罗斯在“瓦尔代”国际论坛全体会议上证实核动力巡航导弹“海燕”已经成功测试,只需要走向量产和实际部署^[15]。目前,“海燕”项目的具体参数指标还处于严格保密阶段^[15]。

1.3 中国

钱学森在 1949 年提出过发展核火箭的构想^[38]。1958 年,原北京航空学院按莫斯科航空学院的模式建立了核火箭发动机系,但限于技术水平和经济实力,于 1962 年撤销该系,从此国内基本停止了核火箭的研究工作。2010 年以来,随着我国航天发展建设提出的月表探测和全太阳系原位探测等任务,对空间核动力的任务需求逐渐明确。中国原子能科学研究院参考美国 GE710 工程和 ANL 核火箭工程研发的燃料元件^[39],提出了使用钨基金属陶瓷燃料的核火箭发动机 CERMET-SNRE^[40]与 SCCTE^[41]堆芯方案,成功实现了纯钨均匀涂覆以及热循环损坏测试 15 次^[42],分析了 CERMET 燃料的

NTP 反应堆掉落临界安全特性^[43]。清华大学于 2000 年底建成了国内第一座高温气冷堆(HTR-10 堆),持续探索球床堆应用相关的技术难点^[44],开发了用于进行 NTP 系统设计和分析的程序 PANES^[45],耦合核裂变反应与热工水力开展仿真计算。西安交通大学自主开发了适用于 NTP 反应堆的蒙卡参数化建模分析软件 NTPMC^[46-47],对 RELAP5 进行了修改用来计算 NTP 系统的氢热工水力^[48]。北京航天动力研究所开发了基于 Modelica 语言的 100 kN 级和 1 MN 核发动机系统以及中子物理点堆的动态仿真程序^[49-50],针对 30、100、1 000 kN 这 3 种推力量级不同循环方式开展了详细的对比论证^[50-51]。西安航天动力研究所联合中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、西安交通大学,开展了百吨级推力核热火箭发动机的应用方案,100 kN 与 1 MN 推力核热火箭发动机系统论证^[52-53]。

2 核热火箭发动机关键技术

核热火箭发动机系统耦合航天与核技术,对于总体与组件设计、系统集成与任务分解、试验验证与仿真分析能力所涉及的新模式、新技术和新工艺均提出了极高的要求。借鉴美俄研制经验,对关键技术作以下分解剖析。

2.1 反应堆分系统

2.1.1 空间堆总体设计技术

核热火箭发动机的反应堆为小型高温氢冷堆,堆芯出口氢的温度在 3 000 K 左右,而地面轻水堆和高温气冷堆的堆芯最高工作温度分别约为 1 000 K^[54]和 1 900 K^[55]。早期美国空间堆为均匀堆设计,采用石墨作为慢化剂,使得堆芯体积和质量较大。当前设计的堆芯多采用苏联的非均匀设计策略,中子慢化剂材料与含铀的燃料元件分离布置。对小推力(如 100 kN)系统可以增加慢化剂区域体积份额,采用热中子能谱;对于大推力(如 1 000 kN)可不采用慢化剂,采用快中子能谱。通过燃料富集度分区实现功率展平,堆芯内外区域采用不同富集度燃料,降低峰值因子。反应堆构型采用经典的中心为圆柱形活性区、外围为反射层和控制鼓的构型。

2.1.2 新型空间堆燃料元件技术

燃料元件作为堆芯热源,能量密度极高。为了

精确、可靠、安全地控制能量释放速率,芯体材料应在高温、高速冲刷、热氢蚀、辐照环境下保持结构完整性、物理-热工-应力耦合稳定性、材料相容性以及氢相容性,同步发展燃料元件制备工艺。美俄在 NTP 研制计划中相继提出数种堆芯燃料元件方案,文献[56]汇总了已有的主要燃料元件。为防止核武器扩散和促进国际合作及商业化和平利用核能,当前 NTP 固态堆芯燃料由高浓铀(90% 以上)转为高丰度低浓铀(19.5% 左右)^[53]。结构形式上,轴流式多流道的六棱柱结构具有几何结构简单、易于加工制造的优点,但为保证结构强度,换热比表面积提升潜力有限;纽带型换热比表面积高,但 U-Zr-Nb-C 碳化物固溶体燃料与氢气反应生成碳氢化合物,需要耐氢蚀的防护涂层。近年来,陆续提出径流式或多孔介质型燃料元件,具有换热比表面积大、流动压降损失小的优点,但流道结构更为复杂,存在热应力过大而破裂的风险。

2.1.3 反应堆启动、停机与重启控制技术

传统化学火箭发动机的启动时间在毫秒级,地面核电站反应堆、航母/潜艇等移动式反应堆从零功率达到满功率需要几个小时,而空间堆要求在 60 s 内达到满功率^[57-58],以体现其高机动特性并减少工质低效消耗。快速启动对系统总体设计与控制策略提出了极高的要求,启动过程系统动态响应与反应堆运行紧密耦合,兼顾不同功率时的涡轮泵驱动气温度和反应堆冷却能力,避免发生瞬发临界^[59]。NTP 发动机停机过程漫长,传统化学火箭发动机可即时停机,而链式反应中存在缓发中子和裂变产物衰变,链式反应终止后堆内仍继续释热。停堆降温过程消耗大量工质,需要将此部分工质消耗量及其产生的后效比冲考虑到发动机整体设计和任务设计中。核热火箭发动机在执行空间任务过程中需要多次重启。但是,裂变堆长时低功率运行或频繁调整功率后,易导致反应堆中毒(又称“碘坑”)。为此需要提高反应性裕度,增加易裂变物质的装料量,提高控制驱动机构的裕量。美俄通过大量的地面带核试验,已掌握不同构型空间反应堆的功率特性,实现了反应堆启动、运行与停堆冷却过程的迭代设计。目前国内没有成熟经验可借鉴,亟需通过反应堆物理与热工水力联合仿真以获得初步的控制策略,试验中分步验证、逐步逼近。

2.1.4 轻质辐射屏蔽技术

核热推进航天器在太空中受到宇宙空间辐射、核反应堆中子和 γ 射线辐射。已发射各型航天器已具备防护宇宙空间辐射的能力。因此,核热推进航天器的辐射防护/屏蔽主要针对核反应堆裂变产生的中子和 γ 射线辐射^[60]。国内外针对地面/潜艇/航母等低剂量核设施的中子辐射和 γ 辐射防护材料已开展了广泛的研究,形成了多种特种材料^[61]。但应用于空间核反应堆的辐射屏蔽材料需要兼顾密度/质量、反射性能、力学性能和耐温等级^[61]。当前主要是轻质化水平不高,且耐久性、空间特殊环境下的考核验证尚属空白。针对不同的辐射选用相应的屏蔽材料,一般通过复合多种材料形成高效核辐射屏蔽层^[59]。同时,复合层设计时应充分考虑不同材料的热膨胀系数与辐照肿胀特性,避免层面脱落。设计反应堆屏蔽体结构时,基于反应堆设计得到辐射源项,结合液氢贮箱内氢工质对中子和 γ 射线的屏蔽贡献,以分析不同材料屏蔽层的屏蔽效果。

2.2 发动机分系统

现有液体火箭推进系统的发动机设计软件与试验设施可用于核热发动机研制。但是,核热火箭发动机不同于化学推进的启停特性、超高温工质流动换热与自身辐射特性,需要针对性地开展设计与试验验证。

2.2.1 反应堆启停阶段的涡轮泵控制技术

在核热发动机启动和停机阶段,氢涡轮泵在低工况状态下长时间运行,处于不稳定工作区,易产生飞转、失速、喘振等不稳定现象。设计中应耦合堆芯释热和再生冷却以确定涡轮泵工作时序,确保涡轮泵低工况阶段快速跨越临界区并保留一定的转速裕量,降低临界转速附近驻留引起的共振发生概率。通过非核模拟试验获得全工况范围氢涡轮泵稳定工作特性和控制方案,避免涡轮泵在启停阶段进入不稳定工作区。

2.2.2 极宽温度范围内氢工质物性与高效换热技术

轴流式堆芯通道内的氢在极短时间内由入口处的 200 K 升温至 3 000 K,沿程工质物性和换热特性变化剧烈。为优化反应堆内通道结构和易裂变物质分布,避免换热恶化威胁堆芯安全,需要对超

高温氢物性和大长径比通道内流动换热特性进行研究,建立密度、热导率、黏度、比热容等关键物理量的理论模型和基础热物性数据库,获得非均匀分布堆芯热流密度条件下的换热特性。

2.2.3 低温推进剂长期在轨贮存技术

对于长周期(几个月甚至几年)空间任务,核热火箭携带的数千吨液氢在长时间宇宙射线、核反应堆辐射等的加热下,易引起贮箱内流体相变、压力升高和温度分层等问题;同时,排气泄压在损失推进工质的同时存在后效推力,影响航天器姿态。地面低温液体长期贮存技术相对成熟,但是空间微重力、外部热流来源复杂、辐射和粒子撞击等环境条件,以及低功耗、轻质量的严格要求,使得低温推进剂的长期在轨贮存具有极大的技术挑战性,主要技术难点包括:微重力环境下贮箱内液位监测与压力控制、复杂空间环境热防护、气液分离与排气、轻质化与低功耗要求^[62-67]。

2.2.4 低温推进剂在轨加注技术

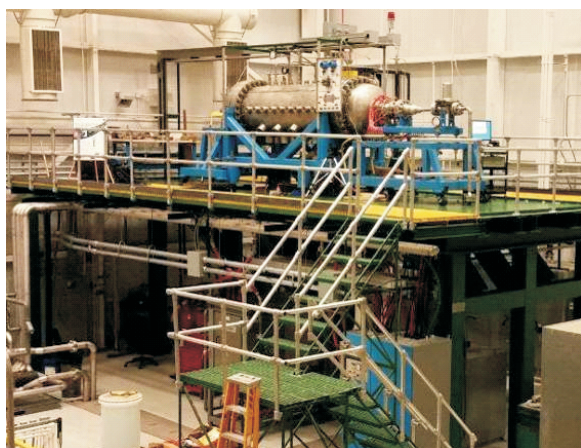
氢的在轨加注是实现核热推进应用于短期与长期空间探索任务的必备技术。通过在轨加注液氢,满足核热火箭发动机空间长时驻留、轨道转移与地月往返载荷摆渡等任务所需的推进剂供给。然而,传统的表面张力贮箱气液定位困难,NASA认为金属网状膜通道式液体获取装置是未来实现低温流体空间气液分离的最佳选择^[68];气液定位困难同样导致排气式加注方案不适用,GRC通过液氢工质地面加注试验认为,无排气加注为最佳替代方案^[68]。同时,低温特性决定了整个加注系统必须做好绝热防护,避免液相燃料大量气化所导致的燃料

损失与压力失控。我国尚未对低温推进剂在轨加注开展系统研究。最近,SpaceX的星舰将在第3次试飞中验证液氧甲烷低温推进剂在轨加注技术,以服务于“阿尔忒弥斯-3”任务^[69]。

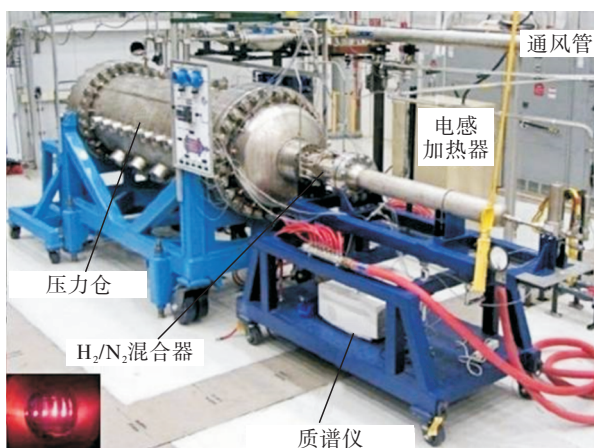
2.3 地面试验技术

与地面核电站反应堆相比,NTP系统具有更高的功率密度、温度和推进剂流速,同时反应堆为开式循环,冷却工质氢通过喷管直接排出。为验证设计方案安全可靠,需要通过地面试验获得组件和系统的稳态和瞬态系统运行性能。除了传统液体火箭发动机所需的试车试验外^[7],核热火箭发动机的地面试验还包括对燃料元件、发动机组件和其他支持系统的非核与带核试验、缩尺与全尺试验。参考美俄研发经验,可将核热火箭发动机地面试验划分为20个子试验^[70],其中,燃料元件试验技术及其地面设施是发展NTP技术的核心。

通过非核试验测试燃料元件基本性能,快速筛选满足需求的燃料元件,能够极大地节省燃料研发成本,减少放射性污染。目前,NASA与美国相关国家实验室已进行了多种燃料元件的测试工作^[56]。其中,NTREES(见图7)为目前最先进的非核模拟测试系统,可模拟燃料通道内高速热氢流动换热^[71-72],以考核热氢环境燃料元件耐高温性能与腐蚀机理。苏联开发了一系列非核试验装置,包括:高温下材料强度测量设备通用高温装置UHTI-1、带电子束加热的EBM-402、带钨加热器的PRV-203、导热系数测量组件TIP、流动热氢蚀与冲击作用试验装置B-2、高温抗热强度测试装置电子束装置UTU-1等^[73]。



(a) NTREES 总体图



(b) NTREES 装置

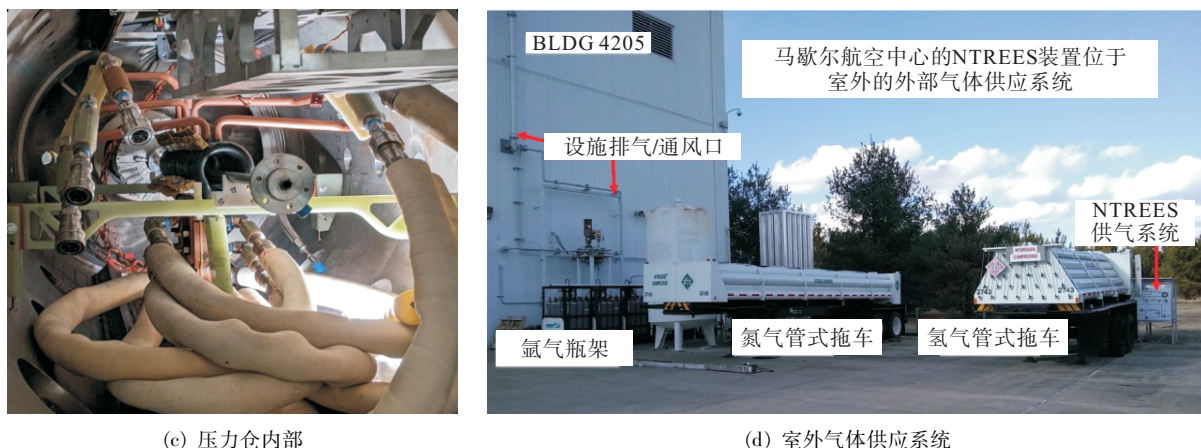


图 7 美国地面非核模拟试验设施 NTREES

Fig. 7 US ground non-nuclear simulation test facility NTREES

带核地面堆综合验证试验能全面验证核热火箭性能,试验中使用核燃料和大量液氢,具有辐射和爆燃的危险。目前,仅有美俄开展了核热发动机带核地面试验,均在核武器试验基地进行^[70],地处荒漠地带且无人居住。因此,建议我国同样选择核试验基地开展 NTP 系统的带核整机试验。综合考虑核热发动机的推进剂开放式排放和可能携带放射性碎片的特点,需要将排放物进行无害化处理达到环境需要范围后排放。美国利用 NERVA 的设施,提出了地下井、地上收集过滤、带燃烧冷凝的整体包容 3 种设计方案,暂推荐整体收集包容,即 H_2 冷却后与 O_2 反应液化为水后集中收集^[70]。

2.4 系统仿真技术

核热推进的各分系统间的匹配设计是系统总体设计的关键。考虑到试验条件苛刻、费用高昂,开发系统仿真工具有助于降低核热火箭发动机的研究设计与性能评估的成本。利用系统仿真技术针对应用方案进行系统总体设计,实现中子物理-流动-传热-辐射-力学-控制-推进的多物理场耦合设计与优化。路易斯研究中心在 Rover/NERVA 计划期间建立了用于预测核热火箭发动机冷却通道压降和换热的一维模型 ELM^[74];MSFC 和阿拉巴马大学开发了耦合裂变反应、湍流、共轭传热、孔隙度和发电的多物理场模型^[75]。对于系统方案分析,GRC 开发了用于 NED 反应堆核热火箭系统的概念设计与系统分析程序 NESS,在 NCPS 计划期间开发了

NPSS 软件对不同核热火箭发动机系统方案进行了详细计算与对比^[28]。国内多个研究院基于 Modelica 语言建立了核热火箭发动机系统模型,进行循环方案对比分析。

2.5 空间核安全技术

核泄漏事故持续时间长,辐射产物清除代价高,国际影响恶劣,核安全在空间核动力能否投入在轨验证和装备应用上具有一票否决权。与空间核动力应用相关的国际条约主要是 1992 年《关于在外层空间使用核动力源的原则》与 2009 年《外层空间核动力源应用安全框架》,没有强制性条款限制发展空间核动力^[76-79]。核反应堆应用有两个原则:①确保达到工作轨道或星际探索路线前的任何事故条件下处于次临界;②空间堆能源系统的运行、寿期后的处置必须在足够高的地球轨道(800 km 以上),避免再入。

空间核动力航天器搭载化学运载火箭入轨后再启动,随后在地外空间持续运行,直至发动机运行终止而转移至长期停留的高轨。因此,NTP 研制流程中不同阶段的安全风险分为地面阶段、发射阶段与在轨运行至退役阶段,如图 8 所示。针对空间核动力研制与应用过程中不同阶段面临的安全风险,制定相应的安全要求与安全准则。对于严重安全事故,如在轨堆芯损害、堆芯熔融、航天器掉落等,制定全面的应急安全预案,确保空间核动力的安全裕度在可控范围内。

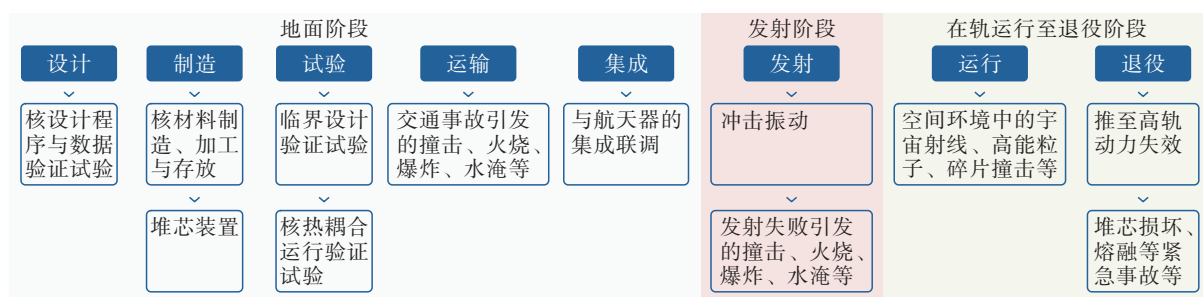


图 8 核热推进研制与应用过程中不同阶段的安全风险

Fig. 8 Safety risk at different stages in the development and application of NTP

3 发展启示

诸多原因导致了 20 世纪核热火箭发动机研制中止。首先,美苏的深空探测任务无限期延期,且大推力液体与固体火箭发动机取得重大进展,满足了载人登月与洲际导弹的需求,核热火箭的需求牵引不再;其次,涉核国际条约和联合国决议颁布,空间核动力与推进技术的研制安全要求大幅提高;再次,切尔诺贝利核电厂事故、苏联 Cosmos954 卫星(载有空间堆)再入大气层并解体,造成极坏的国际影响,苏联全面暂停了空间核应用研究;最后,美国认为其核火箭发动机技术处于绝对领先地位,也暂停了资金支持。

通过 20 世纪近 20 a 的研究,美俄在 NTP 相关基础理论、材料、试验装置研制经验均有相当的积累。进入 21 世纪以来,美俄重启空间核动力研制计划,开展了大量组件级与系统级的非核模拟试验、小型热试验和仿真研究以提高能量利用效率和系统可靠性。NASA 联合商业公司对 HALEU 燃料开展多技术路线及应用方案研究,发布多项政策与计划支持空间 NTP 发展,计划 2026 年开展 NTP 的飞行演示验证;俄罗斯在 NTP 方面重点发展核热-核电双模式推进技术与吸气式核热推进,计划 2030 年开展兆瓦级核动力太空拖船的飞行演示验证。相比于 20 世纪的支持力度,美俄在新世纪的研究计划规模缩减,侧重于单项关键技术的突破和新技术的探索应用。目前,国内仍以概念设计研究为主,相关试验设施刚刚起步。

总结美俄 NTP 技术的发展历程,可以得到如下启示。

1) 设立国家长期发展专项规划,统筹多部门协

作推进。空间核动力系统研发难度大、验证项目多,考核要求高、试验周期长,需要国家长期持续提供资源支持与统筹调度。借鉴美俄研制经验,设立专项研发规划,持续攻关关键技术,全面带动基础理论、材料、试验装置与设计工具的发展。建立专门的统筹协调机制与管理机构负责研制规划制定、资源调配及审查评估等,打通多部门协同体系和流程。

2) 建设核动力航天器研制体系,牵引航天与核产业协同发展。核热推进需要航天和核能两大领域开展跨领域、广学科、多单位的协同研发,以核动力航天器研制为抓手,建立并逐步完善涵盖国家法律、部门条例、行业规范、研制标准、操作手册的成套规章制度和管理规范,构建完备的研发体系,实现新技术、新产品、新工艺和新方法的推广应用。

3) 自主布局关键技术攻关,实现多技术路线探索。我国发展空间核热推进系统的主要制约因素为小型化高温气冷堆技术基础薄弱和系统研制试验能力不足。为构建研制能力,需在超高温(约 3 000 K)耐氢蚀燃料元件、耐辐照耐高温基体材料、轻质辐射屏蔽材料、高效热管理、低温推进剂在轨贮存和加注以及空间堆小型化等方面实现突破,同步建设满足 NTP 地面试验需求的非核模拟、辐照以及带核验证的配套条件,支撑我国未来航天核动力工程化应用。鼓励原创性概念,在前沿技术领域实现多技术路线共同探索,以技术突破带动领域的跨越式发展。

4) 核安全是重中之重。当前核动力设备的研制仍处在攻关和验证阶段,部分关键核心技术和安全防护手段与策略并未完全成熟,核安全风险仍然存在。苏联造成的核泄漏与扩散事故提醒我们,在

发展核动力航天器时要密切注意核安全,针对空间核动力的应用环境、小型轻质、发射与退役等特殊限制条件开展核安全研究,完善技术流程和空间核安全评估体系,制定极端事故应急处置预案,提升研制全流程的安全性和可靠性。

参考文献

- [1] HASLETT R A. Space nuclear thermal propulsion program final report: PL-TR-95-1064 [R]. Kirtland: [s. n.], 1995.
- [2] SONNY M P. Space technology mission directorate game changing development program-nuclear thermal propulsion (NTP) FY19 annual review [R]. Huntsville, Alabama: Marshall Space Flight Center, 2019.
- [3] STAORD T P. America at the threshold: report of the synthesis group on America's space exploration initiative [R]. Washington, D C: US Government Printing Office, 1991.
- [4] Sierra Space Corp. Provides integration services for new nuclear propulsion systems as part of DARPA's DRACO program [Z]. 2021.
- [5] General Atomics Corp. Completes DRACO nuclear thermal propulsion system design and test milestone [Z]. 2022.
- [6] 廖宏图. 空间核能源与核推进技术综述(3: 固芯核热推进及其他先进概念方案) [J]. 空间推进, 2015, 9(3): 38-48.
- LIAO H T. An overview of nuclear power and nuclear propulsion in space (part III: solid core nuclear thermal propulsion and other advanced conceptual schemes) [J]. Space Propulsion, 2015, 9(3): 38-48.
- [7] 小威廉·埃德里希. 核火箭推进原理 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2016.
- EMRICH W J. Principles of nuclear rocket propulsion [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2016.
- [8] 科罗捷耶夫 A C. 核火箭发动机 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020.
- KOPOTEEB A C. Nuclear rocket engine [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2020.
- [9] Nerva Operations Office. Final report, NERVA engine development program and associated tasks, for the period 1961/7/10 through 1962/1/10 [R]. Azusa, California: Aerojet-General Corporation, 1962.
- [10] 廖宏图. 核热推进技术综述 [J]. 火箭推进, 2011, 37(4): 1-11.
- LIAO H T. Overview of nuclear thermal propulsion technologies [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(4): 1-11.
- [11] GABRIELLI R A, HERDRICH G. Review of nuclear thermal propulsion systems [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 79: 92-113.
- [12] 何伟锋, 向红军, 蔡国飙. 核火箭原理、发展及应用 [J]. 火箭推进, 2005, 31(2): 37-43.
- HE W F, XIANG H J, CAI G B. The fundamentals, developments and applications of nuclear rocket propulsion [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(2): 37-43.
- [13] 美国国家科学院, 工程院核医学院, 工程和物理科学司, 等. 载人火星探索中空间核动力推进 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2023.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Division on Engineering and Physical Sciences, et al. Space nuclear propulsion for human Mars exploration [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2023.
- [14] The White House. National space policy of the United States of America [Z]. 2020.
- [15] 孙宗祥, 李文佳, 李一鸣. 俄罗斯“海燕”核动力巡航导弹发展综述 [J]. 战术导弹技术, 2022(5): 106-118.
- SUN Z X, LI W J, LI Y M. Overview of the development of Russian Petrel nuclear-powered cruise missile [J]. Tactical Missile Technology, 2022(5): 106-118.
- [16] 范唯唯. 中国发布《2017—2045 年航天运输系统发展路线图》 [J]. 空间科学学报, 2018, 38(1): 6.
- FAN W W. China releases roadmap for the development of space transportation system 2017—2045 [J]. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(1): 6.
- [17] 中国航天大会. 2020 年宇航领域科学问题和技术难题发布 [J]. 宇航学报, 2020, 41(9): 1.
- China Space Conference. Release of scientific and technical problems in the field of aerospace in 2020 [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(9): 1.
- [18] 中国航天大会. 2021 年宇航领域科学问题和技术难题在中国航天大会发布 [J]. 宇航学报, 2021, 42(5): 1.
- China Space Conference. Release of scientific and technical problems in the field of aerospace in 2021 [J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(5): 1.
- [19] 赵磊. 2023 年宇航领域科学问题和技术难题发布 [N]. 中国日报, 2023-04-24.
- ZHAO L. Release of scientific and technical problems in

- the field of aerospace in 2023 [N]. China Daily, 2023-04-24.
- [20] 李春剑,詹媛. 中国科协发布 2023 重大科学问题、工程技术难题[N]. 光明日报, 2023-10-23.
- LI C J, ZHAN Y. China association for science and technology releases 2023 major scientific issues and engineering technical difficulties [N]. Guangming Daily, 2023-10-23.
- [21] SERFIERT H S, MILLS M M. Problems of applications of nuclear energy to rocket propulsion; Jet Propulsion Laboratory [Z]. 1947.
- [22] ROBBINS W. An historical perspective of the NERVA nuclear rocket engine technology program [C]//Conference on Advanced SEI Technologies. Reston, Virginia: AIAA, 1991.
- [23] FINSETH J L. Rover nuclear rocket engine program: overview of Rover engine tests: 313-002-91-059 [R]. Huntsville, Alabama: Sverdrup Technology Inc., 1991.
- [24] 杨玉新,任全彬,段艳娟,等. 美俄核热推进技术发展现状与启示[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(3): 399-409.
- YANG Y X, REN Q B, DUAN Y J, et al. Development status and prospect of nuclear thermal propulsion technology in US and Russia [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(3): 399-409.
- [25] JOYNER C, LENTATI A, CICHON J. Multidisciplinary analysis of nuclear thermal propulsion design options for human exploration missions [C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [26] DRAKE B G, WATTS K D. Human exploration of mars design reference architecture 5.0 [R]. Houston, Texas: NASA Johnson Space Center, 2014.
- [27] 苏著亭,杨继才,柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- SU Z T, YANG J C, KE G T. Space nuclear power [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2016.
- [28] HOUTS M G, KIM T, EMRICH W J, et al. The nuclear cryogenic propulsion stage [C]//50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2014.
- [29] EMRICH W J. Nuclear cryogenic propulsion stage (NCPS) fuel element testing in the nuclear thermal rocket element environmental simulator (NTRES) [C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2017.
- [30] 伍浩松,张焰. 美拟于 2025 年示范核热推进系统[J]. 国外核新闻, 2021(5): 17.
- WU H S, ZHANG Y. US plans to demonstrate nuclear thermal propulsion system in 2025 [J]. Foreign Nuclear News, 2021(5): 17.
- [31] LYNCHBURG V. BWXT to provide nuclear reactor engine and fuel for DARPA space project [Z]. 2023.
- [32] DARPA. Demonstration rocket for agile cislunar operations (DRACO)[Z]. 2022.
- [33] The White House. Memorandum on the national strategy for space nuclear power and propulsion (space policy directive-6)[Z]. 2020.
- [34] U. S. Department for Energy. Energy for space [Z]. 2021.
- [35] The White House. Promoting small modular reactors for national defense and space exploration [Z]. 2021.
- [36] STONE C. Maneuver warfare in space: the strategic mandate for nuclear propulsion [R]. Arlington, VA: Mitchell Institute, 2022.
- [37] 马世俊,唐玉华,朱安文,等. 空间核动力的进展[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2019.
- MA S J, TANG Y H, ZHU A W, et al. Advances in space nuclear power [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2019.
- [38] 徐友涛. 核热推进运载火箭技术发展综述[J]. 国际太空, 2017(9): 8-14.
- XU Y T. Development review of nuclear thermal propulsion launch vehicle technologies [J]. Space International, 2017(9): 8-14.
- [39] 解家春,赵守智. 核热推进堆芯方案的发展[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(B12):889-895.
- XIE J C, ZHAO S Z. Development of reactor core for nuclear thermal propulsion [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(B12):889-895.
- [40] 霍红磊,安伟健,解家春,等. CERMET-SNRE 堆芯物理计算分析[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(12): 2150-2156.
- HUO H L, AN W J, XIE J C, et al. Core physics calculation and analysis for CERMET-SNRE [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(12): 2150-2156.
- [41] 赵润喆,霍红磊. 低浓铀核热火箭发动机 SCCTE 堆芯物理特性初步研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(Sup.2): 221-227.
- ZHAO R Z, HUO H L. Preliminary study on neutronic

- characteristic of LEU NTR reactor SCCTE core [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(Sup. 2): 221-227.
- [42] 李强, 解家春, 霍红磊. 核热推进钨基 CERMET 燃料模拟件制备工艺研究[J]. 世界有色金属, 2022(12): 169-171.
- LI Q, XIE J C, HUO H L. Research of fabrication technology for CERMET fuel based tungsten used in nuclear thermal propulsion [J]. World Nonferrous Metals, 2022(12): 169-171.
- [43] 霍红磊, 赵守智, 解家春, 等. 采用钨基金属陶瓷燃料的核热推进反应堆掉落临界安全特性研究[J]. 载人航天, 2017, 23(3): 353-357.
- HUO H L, ZHAO S Z, XIE J C, et al. Study on dropping criticality safety performance of nuclear thermal propulsion reactor with tungsten based CERMET fuel [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(3): 353-357.
- [44] 游尔胜, 石磊, 郑艳华, 等. 球床堆在空间核动力系统中的应用[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(Sup. 1): 75-80.
- YOU E S, SHI L, ZHENG Y H, et al. Application of pebble bed reactor in space nuclear power system [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(Sup. 1): 75-80.
- [45] 吉宇, 毛晨瑞, 孙俊, 等. 核热火箭发动机系统循环方案分析与设计[J]. 火箭推进, 2022, 48(1): 14-21.
- JI Y, MAO C R, SUN J, et al. Analysis and design of system cycle for nuclear thermal rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(1): 14-21.
- [46] 韩梓超, 章静, 王明军, 等. 核热推进系统氢气物性及流动换热模型分析[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(7): 1276-1284.
- HAN Z C, ZHANG J, WANG M J, et al. Analysis of thermodynamic property, flow and heat transfer model of hydrogen in NTP system [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(7): 1276-1284.
- [47] 房玉良, 秦浩, 王成龙, 等. 高温、高流速氢气在圆管内流动换热特性研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(10): 1762-1770.
- FANG Y L, QIN H, WANG C L, et al. Heat transfer performance of high temperature and high velocity hydrogen flow inside circle tube [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(10): 1762-1770.
- [48] HAN Z C, ZHANG J, WANG M J, et al. A modified system analysis code for thermo-hydraulic calculation of hydrogen in a nuclear thermal propulsion (NTP) system [J]. Annals of Nuclear Energy, 2021(164): 108632.
- [49] 刘忠恕. 核热火箭发动机系统方案研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2017.
- LIU Z S. Study on the scheme of nuclear thermal rocket engine system [D]. Beijing: First Research Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation, 2017.
- [50] 王浩泽, 李子亮, 吴宏雨, 等. 基于金属陶瓷堆芯 1 000 kN 核热火箭发动机系统及组件参数研究[J]. 载人航天, 2018, 24(5): 637-642.
- WANG H Z, LI Z L, WU H Y, et al. Thruster system and component parameters of a 1 000 kN nuclear thermal rocket thruster based on ceramic-metallic reactor core [J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(5): 637-642.
- [51] 王浩泽, 左安军, 霍红磊, 等. 110 kN 核热火箭发动机系统方案选取与参数优化研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(1): 30-37.
- WANG H Z, ZUO A J, HUO H L, et al. System design selection and parametric optimization analysis of 110 kN nuclear thermal rocket engine [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(1): 30-37.
- [52] 朱岩, 马元, 南向谊, 等. 大推力核热火箭运载器及动力特性分析[J]. 载人航天, 2018, 24(3): 388-393.
- ZHU Y, MA Y, NAN X Y, et al. Characteristic analysis of nuclear thermal rocket launcher and high thrust engine [J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(3): 388-393.
- [53] 王三丙, 马元, 郭斯茂, 等. 核热火箭反应堆燃料对比分析[J]. 载人航天, 2018, 24(6): 784-795.
- WANG S B, MA Y, GUO S M, et al. Comparison and analysis of nuclear thermal propulsion reactor fuel [J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(6): 784-795.
- [54] 宋霁阳. 轻水堆堆芯热工物理耦合特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- SONG J Y. Analysis of coupling characteristics between thermal-hydraulics and neutronics for light-water reactor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [55] 钟科. 高温气冷堆[Z]. 2012.
- [56] 房玉良, 刘林, 孙海亮, 等. 核热推进反应堆燃料元件发展概述[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(1): 63-70.
- FANG Y L, LIU L, SUN H L, et al. Development of fuel elements in nuclear thermal propulsion system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020,

- 4(1): 63-70.
- [57] JOYNER C R, JENNINGS T, HANKS D E, et al. NTP engine system design and modeling [C]//ASCEND 2022. Reston, Virginia: AIAA, 2022.
- [58] Aerojet General Corp. NERVA engine development program and associated tasks, contract year 1962, summary report, volume 1 [R]. Azusa, California: [s.n.], 1962.
- [59] 张泽, 薛翔, 王园丁, 等. 空间核动力推进技术研究展望[J]. 火箭推进, 2021, 47(5): 1-13.
- ZHANG Z, XUE X, WANG Y D, et al. Prospect of space nuclear power propulsion technology [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(5): 1-13.
- [60] SAGER P. Radiation shield design considerations for nuclear rocket space vehicles [C]//Space Programs and Technologies Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1992.
- [61] 宋旺旺, 杜金峰, 赖万昌, 等. 一种紧凑型星球表面反应堆辐射屏蔽初步设计[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(2): 154-158.
- SONG W W, DU J F, LAI W C, et al. A preliminary design of a compact radiation shielding of fission surface power reactor [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(2): 154-158.
- [62] 胡伟峰, 申麟, 杨建民, 等. 低温推进剂长时间在轨的蒸发量控制技术进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(6): 28-34.
- HU W F, SHEN L, YANG J M, et al. Progress of study on transpiration control technology for orbit long-term applied cryogenic propellant [J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(6): 28-34.
- [63] 胡伟峰, 申麟, 彭小波, 等. 低温推进剂长时间在轨的蒸发量控制关键技术分析[J]. 低温工程, 2011(3): 59-66.
- HU W F, SHEN L, PENG X B, et al. Key technology analysis of boil-off control study on cryogenic propellant long-term application on orbit [J]. Cryogenics, 2011(3): 59-66.
- [64] 李鹏, 孙培杰, 包铁颖, 等. 低温推进剂长期在轨储存技术研究概述[J]. 载人航天, 2012, 18(1): 30-36.
- LI P, SUN P J, BAO Y Y, et al. Research on long-term storage technology of cryogenic propellant in orbit [J]. Manned Spaceflight, 2012, 18(1): 30-36.
- [65] 李鹏, 孙培杰, 盛敏健, 等. 推进飞行器低温推进剂在轨贮存被动蒸发控制方案研究[J]. 载人航天, 2018, 24(1): 91-97.
- LI P, SUN P J, SHENG M J, et al. Investigation on passive boil-off control scheme for orbital storage of cryogenic propellant in orbital transfer spacecraft [J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(1): 91-97.
- [66] 胡聪, 蒋文兵, 孙培杰, 等. 低温推进剂空间零蒸发贮存技术研究进展[J]. 载人航天, 2022, 28(4): 487-498.
- HU C, JIANG W B, SUN P J, et al. Advances of zero boil-off technologies for cryogenic propellant storage in space [J]. Manned Spaceflight, 2022, 28(4): 487-498.
- [67] 王亚军, 刘辉, 黄兵, 等. 长时间滑行低温推进剂管理关键技术分析[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(3): 1-9.
- WANG Y J, LIU H, HUANG B, et al. Key technology analysis of cryogenic propellant management during long-coast flight [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(3): 1-9.
- [68] 王磊, 厉彦忠, 马原, 等. 液体推进剂在轨加注技术与加注方案[J]. 航空动力学报, 2016, 31(8): 2002-2009.
- WANG L, LI Y Z, MA Y, et al. On-orbit refilling technologies and schemes of liquid propellant [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(8): 2002-2009.
- [69] 田丰. 猛追登月进度,“星舰”第三飞欲挑战高难项目[N]. 中国航天报, 2023.
- TIAN F. Chasing the progress of the moon landing, the third flight of “Starship” wants to challenge the difficult project [N]. China Space News, 2023.
- [70] 张威震, 霍红磊, 解家春. 核热推进地面试验技术研究[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(2): 44-53.
- ZHANG W Z, HUO H L, XIE J C. Technical research on nuclear thermal propulsion ground tests [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3(2): 44-53.
- [71] EMRICH W, MORAN R, PEARSON J. Nuclear thermal rocket element environmental simulator (NTREES) upgrade activities [C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [72] EMRICH W, MORAN R, PEARSON J. Nuclear thermal rocket element environmental simulator (NTREES) upgrade activities [C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2012.

- [73] 安纳利·兰宁. 核火箭发动机反应堆[M]. 北京: 国防工业出版社, 2023.
- ANATOLY L. Nuclear rocket engine reactor [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2023.
- [74] WALTON J T. Program E L M: A tool for rapid thermal-hydraulic analysis of solid-core nuclear rocket fuel elements [J]. NASA Technical Memorandum, 1992(2): 62-65.
- [75] CHENG G, ITO Y, ROSS D, et al. Numerical simulations of single flow element in a nuclear thermal thrust chamber [C]//39th AIAA Thermophysics Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [76] 刘继忠, 唐玉华, 龙杰, 等. 关于建立我国空间核动力源应用安全机制的建议[J]. 科学通报, 2020, 65(10): 875-881.
- LIU J Z, TANG Y H, LONG J, et al. Suggestions for China on establishing safety mechanisms for space nuclear power source applications [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(10): 875-881.
- [77] 龙杰, 唐玉华. 外空核动力源应用的国内外法规体系概述及我国的对策[J]. 中国航天, 2020(5): 67-71.
- LONG J, TANG Y H. An overview of international and national regulatory systems for the application of space nuclear power sources and practical suggestions for China[J]. Aerospace China, 2020(5): 67-71.
- [78] 荀子奕. 美国太空核动力政策研究[J]. 国际太空, 2021(4): 41-45.
- GOU Z Y. Research on US space nuclear power policy[J]. Space International, 2021(4): 41-45.
- [79] 郭筱曦. 美国空间核动力近期政策与技术发展分析[J]. 国际太空, 2021(8): 4-8.
- GUO X X. An analysis of the recent policy and technology development of space nuclear power in the United States [J]. Space international, 2021(8): 4-8.