

全球核能科技前沿综述

杨军, 张恩昊, 郭志恒, 吴澳光, 王蓓琪, 史力豪, 杜辉, 徐乐瑾*

华中科技大学能源与动力工程学院核工程与核技术系, 武汉 430074

摘要 讨论了核能前沿科技领域所取得的科技研究与重要工程项目进展, 重点介绍了核电建设与发展、小型模块堆技术、聚变反应堆、空间动力堆、事故容错燃料、数值反应堆等方面的研究及开发进展。在海、陆、空均有良好应用前景的小型反应堆, 将在传统商用核电以外开辟核能利用的新天地。而先进燃料设计、高精度数值模拟等技术则是未来核能安全保障的重要发展方向。随着技术的进一步革新和技术路线的多样化, 呈多元化发展态势的核能预期仍将在全球能源结构中占据重要地位。

关键词 核能科技; 先进核燃料; 空间反应堆; 数字孪生

2019年以来, 全球核电建设稳步推进, 除已有核电强国外, 一些新兴国家也在积极发展核电产业。以NuScale、玲龙一号、Kilopower等为代表的小型模块堆、空间堆等新型反应堆的研究与开发取得显著进展, 核聚变反应堆的研究及实验堆的建造仍在积极推进。事故容错燃料的研究为核电安全性革新开辟了新的方向, 而数值反应堆的开发为核能安全分析和高效运行提供了有力的保障。

1 全球核电现状

核能, 作为世界第二大低碳能源, 核发电量占发电总量约11.5%, 在低碳能源发电量占比中高达

29%。到目前为止, 共有33个国家和地区已有或正在建设自己的核电站^[1]。

1.1 世界各国核电情况

据国际原子能机构数据, 截至2020年3月, 核电站总数排在前6位的国家依次为美国、法国、日本、中国、俄罗斯和英国, 它们也是世界上仅有的核电站总数超过40个的6个国家, 其中美国的核电站总数最多, 达到135个。核电站总数超过20个的国家有11个, 除上述6个外, 依次为德国、韩国、印度、加拿大和乌克兰。

截至2019年6月底, 世界共有449台商业核动力反应堆, 总装机容量近400 GW, 总发电量占全球电能的11.5%左右; 另有54台机组在建, 装机约为

收稿日期: 2020-03-21; 修回日期: 2020-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(0214120048); 装备预研项目(32102040xxx)

作者简介: 杨军, 教授, 研究方向为反应堆热工水力与安全分析, 电子信箱: yang_jun@hust.edu.cn; 徐乐瑾(通信作者), 副教授, 研究方向为放射性废物处理及水处理技术, 电子信箱: xulejin@hust.edu.cn

引用格式: 杨军, 张恩昊, 郭志恒, 等. 全球核能科技前沿综述[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 35-49; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.20.010

5500万kW,全球核电运行堆年超过1.8万年^[2]。

到目前为止,已有16个国家的核能发电量占比较大,超过本国电力供给的1/4。其中,最依赖核能的国家是法国,核电占全国电能供给的70%以上。其次,在捷克、斯洛伐克、芬兰、瑞士、匈牙利、乌克兰、瑞典、斯洛文尼亚、保加利亚等国,核电提供30%以上的电能,而美国、英国、西班牙、罗马尼亚则占20%左右。意大利和丹麦虽本国没有自己的核电站,核电占比也达到10%左右^[3]。

美国是世界上最大的核电生产国,核能发电量占全球核能总发电量的30%以上,目前有96个可运行核反应堆。近年来,全美核电反应堆每年发电稳定在近8000亿kWh,核发电在全国总电量占比保持在20%左右。有4座在建的核反应堆,但其中2座已经停建,在建的2台为AP1000机组。美国政府为保证其先进核电发展的领先地位,持续在核电中小型反应堆、先进堆等研究堆方面给予资金和政策支持。

法国核能发电量占总发电量的比例一直在70%以上,是世界上核能发电比例最高的国家。有58个可运行的核反应堆,总净容量为63.1 GW。截至2020年3月,法国有57台机组在运,1台第三代原子能反应堆(EPR)机组在建。在法国未来的能源规划中,计划大力发展包括核能、可再生能源在内的低碳能源,2035年核能发电规模仍将保持在50%左右^[4]。2019年1月28日,法国核工业界与政府和相关工会组织签署战略协议,明确了2019—2022年在“高风险”项目中取得的成功以及需要开展的工作^[5]。

俄罗斯共有38台机组商运,4台在建。俄罗斯核电工业在国际市场开拓和国内建设方面均取得重要进展,成绩斐然。其注重全球核电战略布局,是全球推销核电的代表。目前,该国核电出口已占据了全球绝大部分新兴市场,在手的核电订单近40台机组^[6]。

日本的核电发展受福岛核事故影响较大。日本过去约有30%的电力来自核能,然而受到福岛核事故的严重影响,2018年,这一数字仅为6%。日本有33个可运行的核反应堆,总净容量为31.7

GW。2011年福岛核事故发生后,仅有9座反应堆恢复运行,另有17座反应堆正在重启审批过程中。

德国有7座反应堆还在运行,总净容量为9.4 GWe。根据该国能源转型政策,德国将于2022年淘汰核能发电。按关停计划,2019年关停2台、2021年关停3台、2022年关停最后1台,但仍将保留研究堆^[4]。

英国拥有15座可运行的核反应堆,总净容量为8.9 GWe。2018年,核能发电量占该国电力的18%。英国政府在2006年年中发表的一份能源文件批准了该国老化的核反应堆船队替换为新的核电站。新一代核电站的第一座已开始建设^[1]。

除上述国家外,还有一些新兴的核电国家,大多在亚非地区,核电发展处于起步阶段。以阿联酋为例,阿联酋的首堆于2012年开工建设,已基本完工,计划于2019年装料、调试,2020年运行。4台机组(单机容量135万kW)建成投运后,将占全国电力供应的25%;未来计划新建4~8台百万千瓦核电机组^[4]。

1.2 中国核电现状

截至2020年3月,中国(大陆地区)运营机组48台,在建机组有10台,是世界上在建机组最多的国家。截至2019年6月,运行机组装机容量4873万kW^[6],在建机组装机容量约1134万kW^[7]。

中国核电目前实现了三代核电技术设计自主化、重要关键设备国产化,包括AP1000、EPR在内的主要三代核电率先在中国建成投运;自主三代核电“华龙一号”(HPR1000)全球首堆福清5号已于2019年4月全面转入调试阶段;具有四代核电特征的高温气冷堆示范工程已进入最后阶段,预计在2020年实现装料;海外首批项目(巴基斯坦卡拉奇2、3号机组)推进顺利。在聚变堆研究方面,中国积极参加国际热核聚变反应堆计划(ITER),并在关键领域取得了重要进展^[8]。2019年7月,国际热核聚变实验堆(ITER)国际组织通知我国成功中标了ITER托卡马克主机TAC-1安装标段工程,这是ITER托卡马克主机最重要的核心设备安装工程,也是自中国参与ITER计划以来通过国际竞标获得的金额最大的工程建设项目^[9]。

除此之外,长期以来中国核电安全运行一直保持良好业绩,根据2019年公布的世界核电运行协会(WANO)的综合指数统计,2018年,全球53台机组获得满分100分,中国有12台^[8]。2020年3月公布了2019年世界核电WANO综合指数排名,中国大陆地区共23台机组获得满分100分,整体WANO综合评分力拔头筹^[10]。

2 小型模块化反应堆研究进展

大型反应堆核电站存在建造周期长、建设成本高以及选址要求高等问题,对核能的发展产生了较大的限制。小型反应堆具有体积小、功率比大、适应性好等特点,可以突破这些限制,因此受到各国的广泛关注。在过去的一段时间,英国、法国、加拿大、俄罗斯等国有关小型模块堆的建设进程顺利,美国的NuScale公司设计研发的小型模块化反应堆项目以及中国的相关小型堆项目也在稳步推进中。此外,学术期刊中发表多篇关于小型模块堆的先进技术研发的论文,这也表明小型堆先进技术研究蓬勃开展。小型堆建设蓝图正在逐渐变为现实。

2.1 英法俄加等国

英国、法国、俄罗斯、加拿大等国家均在进行小型堆的设计研发,同时国家之间有关小型堆的合作项目也在不断推进。

2019年7月,英国政府表示将为罗尔斯·罗伊斯公司提供1800万英镑的资金,进一步推进其小型模块堆的商业化进程^[11]。

2019年9月,法国多家机构联合推出一种小型模块化压水堆设计,功率在300~400 MWe,已与西屋电气公司签署框架协议,共同研发该项目^[12]。

2019年9月5日,俄罗斯国家原子能集团公司与萨哈共和国签署协议,将在小型模块堆建设领域开展合作^[13]。

加拿大核实验室于2019年2月15日宣布其小型模块堆示范项目取得显著进展。其中星核公司和特里斯特尔能源公司已通过第一阶段及资格预审,进入到第二阶段;由全球第一电力公司、安大略电力公司和超安全核公司组成的联合体已完成第

二阶段,进入到第三阶段。此外,特里斯特尔宣布已完成选址研究^[14]。

2019年7月15日,加拿大环境评价署公布小型模块堆建设项目环境评价启动的通知,正式启动了乔克河MMR小堆电厂建设项目^[15]。为加速推进小型模块堆在加拿大的研发和部署,加拿大核实验室于2019年7月17日正式启动加拿大核能研究倡议^[16]。U-Battery公司于2019年7月29日宣布,已经通过加拿大核实验室小型模块堆示范项目第一阶段(资格预审),进入到第二阶段(尽职调查)^[17]。

2.2 美国NuScale小型模块堆

NuScale是美国发展较快、具有代表性的小型堆技术。NuScale公司一直致力于小型模块堆的研发和建设。为推动NuScale小堆未来在全球范围的部署,该公司2019年与多个国家相关公司签署合作备忘录。此外,2019年也是NuScale小堆成功通过设计认证评审的一年,这意味着它的实际建造被提上日程。

2019年3月,为共同在罗马尼亚部署小堆,NuScale公司与罗马尼亚国家核电公司达成协议^[18]。2019年4月,NuScale公司与韩国斗山公司签署战略合作谅解备忘录,将合作推动NuScale小堆在全球的部署^[19]。另外,两家公司在2019年7月23日签署了业务合作和股权认购协议^[20]。

2019年8月,NuScale小型模块堆已成功通过美国核管会第三阶段认证(即设计认证评审),并有望在2020年9月前完成全部的评审。预计将在2021年开展场址准备,在2023年开始工程建设(FCD,浇筑第一罐混凝土),在2026年下半年投运首堆,并在2027年投运全部12座反应堆^[21]。

NuScale公司于2019年8月15日宣布,美国能源部已提供3笔资助,总价值近84.4万美元,分别支持在俄勒冈州立大学、得克萨斯州农工大学学院站分校和爱达荷大学建设用于研究和教育目的的NuScale小型模块堆模拟器^[22]。

在技术应用方面,NuScale公司考虑在NuScale小堆中使用金属燃料,这种燃料可以提高堆芯性能,延长堆芯寿命,缩短换料时间并降低发电成本。为此,该公司与Enfission公司于2019年5月份签署

谅解备忘录,共同探讨金属燃料的设计方案^[23]。

2.3 国内小型堆建设进程

全球各地掀起小型堆建设研发的浪潮,中国也不例外。2019年中国核工业集团有限公司(中核集团)研发的“玲龙一号”模块化小堆示范工程启动、基于铅基反应堆技术的“核电宝”、首座铅铋合金零功率反应堆“启明星Ⅲ号”的成功临界等,都意味着我国正在小型堆的建设中进步明显。

“玲龙一号”模块化小堆(ACP100)是中核集团自主设计的小型压水堆,它在现有成熟压水堆核电技术的基础上,采用“一体化”反应堆设计和“非能动”安全系统,安全性达到了第三代核能系统技术水平。

2019年7月,在海南省举办的自由贸易试验区建设项目集中开工和签约活动上,中核集团正式宣布启动中国多功能模块化小型堆“玲龙一号”示范工程,并表示,“玲龙一号”小型堆的成功应用推广,将会满足不同区域、用户的能源需求^[24]。

ACPR50S是中国广核集团有限公司(中广核集团)响应国家建设海洋强国号召,自主研发设计的海上小型堆技术,可以为海上油气田开采、海岛开发等领域提供可靠、稳定的电力和热量。2016年9月,海上小型堆 ACPR50S 正式进入 IAEA(国际原子能机构)全球小型堆发展路线图,这将进一步推进中广核自有技术与国际堆型的合作交流^[25]。

2019年9月,报道称中国未来将基于铅基反应堆技术推出一种高效迷你型核电站——“核电宝”。它的体积可小型化至一台普通货柜的尺寸,可产生 10 MW 电功率,满足 5 万户家庭用电需求^[26],主要由中国科学院开发。

2019年10月9日,中国首座铅铋合金零功率反应堆“启明星Ⅲ号”在中核集团中国原子能科学研究院实现了首次临界,并且我国铅铋堆芯核特性物理实验也已经正式启动。“启明星Ⅲ号”(图1)反应堆既可设计为百万千瓦级的大型电厂,也可设计为兆瓦级小型模块化核电源,可以在移动、小型化的同时保证足够的核能供应。“启明星Ⅲ号”的成功,是中国移动式小型反应堆技术方面的突破,意味着中国在舰船核动力开发上更进一步^[27]。

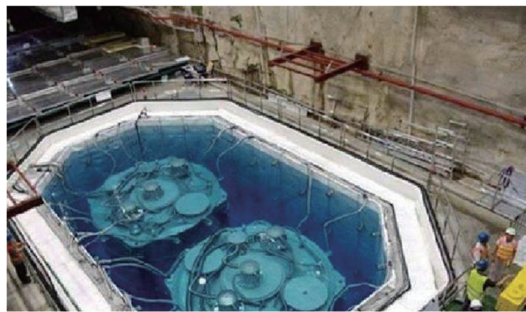


图1 启明星Ⅲ号

2.4 小型模块堆技术研发进展

2019年以来,学术期刊中收录了多篇关于小型模块堆的先进技术研发的论文,这意味着小型堆正在受到越来越多的科技工作者的关注。科技人员对于目前小型堆运行中需要解决的各种问题提出了方案,并通过数值模拟、实验验证等提供支持。

邱阳及其研究团队^[28]通过有限元数值计算方法模拟研究了 300 mm 厚模块式小型反应堆压力容器内支承环和筒体焊接模拟件的残余应力分布,并采用了小孔法测试验证计算结果。

为了给整个系统的设计与分析提供理论依据,蔡志云等^[29]通过使用 Flowmaster 软件对多用途模块式小型堆(ACP100)的 RCV 系统进行了仿真分析,建立了系统主要设备的物理模型,分析了 RCV 系统在不同运行工况下各个回路及各个节点处的流量、压力、温度、流动损失等稳态和瞬态特性。

高颖贤及其研究团队^[30]基于小型模块化压水堆设计特点,分别采用确定论方法和概率论方法分析了事故工况下的应急堆芯冷却系统配置策略。

雷驰等^[31]提出了一种小型可运输长寿命铅铋冷却快堆堆芯设计方案。这种快堆的额定功率为 20 MW,在不换料的条件下可以运行 18EFPY(有效满功率年),能够满足偏远地区的供电需求。

陈振佳等^[32]针对小型钠冷快堆模块化设计需求,提出了一种非能动余热排出系统方案。这种方案利用安全壳内的空气自然循环,将堆芯余热导入大气最终热阱。

赵孝等^[33]设计了一种应用在 15 MW 的一体化小型模块式反应堆中的螺旋管式蒸汽发生器,并对这种蒸汽发生器进行了热工水力分析,具体分析了

蒸汽发生器组件中换热系数、温度、温差和热流密度等沿管长的变化,并给出了螺旋管内流体的动力特性曲线。

3 空间动力堆技术

根据不同的任务需求,目前热门的几种空间反应堆概念包括了千瓦级空间核反应堆(Kilopower)、地面气冷微型模块化反应堆(MMR)、小型模块化裂变反应堆(SMFR)、多用途微型核反应堆等,所应用的领域不仅涵盖了外星任务、人类哨站、月球和火星等空间任务,还包括了在复杂地形和水域中的工作。

随着空间堆研制的不断推进,小型化、精密化、模块化和多功能化将成为主要的发展趋势。选择热值高、占地小、循环利用性能好的燃料以及开发更合理的推进方式,实现燃料与核能的高效转化,是未来核动力空间飞行器的重点研究方向。

2019年3月,美国提出,“随着美国涉足太阳系更遥远的地方,美国需要新型推进系统,包括核动力。”同时,美国国会2019年初两项拨款法案连续加大空间核热推进技术投资额度,2020财年预算额度从2019财年的7500万美元增加到2.25亿美元^[34]。由此可见,无论是从政治导向还是财政拨款方面,美国正在加速推进空间核动力技术发展。

2019年8月18日,中国科学院核能安全技术研究所负责的国家重点研发计划“兆瓦级超小型液态金属冷却空间核反应堆电源”项目启动暨实施方案论证会在合肥召开。

中国首个空间核推进技术联合实验室已于2015年在北京成立,实验室将以中国航天发展战略为牵引,瞄准深空探测任务需求,在空间核推进技术领域开展工程应用研究。目前,中国工程物理研究院提出了基于“热管反应堆+温差发电技术”的技术路线,采用Na热管将核反应堆的热量传递给温差发电换热器热端,温差发电冷端与K热管辐射器耦合,通过K热管辐射器将废热排散^[35]。并且参考核热推进火箭技术,在热管型空间堆电源的基础上提出了热管冷却推进—发电双模式运行的空

间核反应堆系统初步概念^[36]。

在推进工质方面,综合考虑核热/核电推进工质特点以及存储难度,选择氢化镁作为多模式核动力技术的工质。氢化镁的储氢密度可达7.67%,单位体积储氢量高于高压储氢和液氢。同时,放氢温度大于350℃(在空间环境能够长期保持稳定),放氢产物为氢气和单质镁,分别可作为核热推进和核电推进的工质^[37]。

在安全性方面,核动力航天器在运行过程中会产生较高剂量的中子和 γ 射线,为了防止结构材料和航天器平台仪器设备受照射后发热、活化及性能劣化,需要对核动力航天器采用特殊的辐射防护措施^[38]。目前,包括美国、日本、中国在内的许多国家陆续开始将金属氢化物用作中子辐射屏蔽的研究,取得了一些有价值的结论。中国原子能科学研究院王毅等^[39]在小型钠冷快堆屏蔽设计中采用一维离散纵坐标法的ANISN程序结合精细截面库,即VITAMIN-C库,假设中子源强为 2.34×10^{13} n/s,能谱为小型钠冷快堆堆芯区中子能谱条件下模拟了氢化锂、氢化钛、氢化锆的中子屏蔽效果,模拟结果表明金属氢化物材料的中子屏蔽性能明显优于不锈钢、硼钢、石墨、碳化硼等传统的中子屏蔽材料。

3.1 千瓦级空间核反应堆 Kilopower

由洛斯阿拉莫斯国家实验室提出的Kilopower反应堆概念是有史以来提出的最简单的空间动力反应堆概念之一,可以为太空探索任务提供1~10 kWe的持续动力^[40]。目前,Kilopower反应堆(图2)已完成地面临界实验,是近半个世纪以来美国在空间裂变反应堆领域中成熟度较高的设计方案^[41]。



图2 Kilopower反应堆地面测试成功

据2019年8月新闻报道,NASA未来太空运行(FISO)工作组表示,其便携式反应堆,即被称为“采用斯特林技术的Kilopower反应堆”(KRUSTY),将在2022年飞往火星。预计该反应堆将在火星上完成多种任务,例如为航天员提供热量和空气,为用于建筑供电等。

3.2 地面气冷微型模块化反应堆MMR

MMR是USNC Space公司为地球上离网和崎岖不平的地区开发的一种地面气冷微型模块化反应堆^[42]。

2019年7月15日,加拿大环境评价署(CEAA)公布小型模块堆建设项目环境评价启动的通知,正式启动了乔克河(Chalk River)MMR小型模块堆电厂建设项目。全球第一电力公司(GFP)于2019年3月向加拿大核安全委员会(CNSC)提交MMR建设许可证申请。这是CNSC收到的首份小堆许可证申请。MMR是一种15 MWt/5 MWe的高温气冷堆,借鉴了美国、德国、中国和日本相关反应堆的运行经验,已于2019年1月通过CNSC预许可供应商设计评审程序的第一阶段。

3.3 小型模块化裂变反应堆SMFR

对深空的探索需要可靠的持续的电力,USRA公司正在解决可用于商业用途的月球表面小型模块化裂变反应堆(SMFR)问题,期待可以为太空探索提供经济的、可商业化的能源^[43]。

2019年2月28日,新型核裂变反应堆入选科技媒体《麻省理工科技评论》(MIT Technology Review)揭晓的2019年“全球十大突破性技术”(10 Breakthrough Technologies 2019),其中包括了小型模块化反应堆。小型模块化反应堆通常产生数十兆瓦的电力(相比之下,传统的核反应堆一般产生约1000 MW的电力)。NuScale公司表示,小型化反应堆可以节省资金并降低环境和金融风险。

4 聚变反应堆

21世纪以来,为了验证磁约束聚变堆的工程可行性,建造了相关大型聚变堆进行工程实验研究。除国际合作建设的国际热核实验堆(ITER)以

外,许多国家都在积极发展自己的聚变堆计划,如美国的FNSF-ST/AT、俄罗斯的T-15 MD和IG-NITOR、欧盟的EU-DEMO、日本的DEMO和韩国的KO-DEMO。同样,为开展我国磁约束聚变堆的总体研究,中国聚变工程实验堆(CFETER)项目应运而生。

4.1 核聚变

聚变能是一种稳定的提供清洁能源的方式之一,其以受控热核聚变为研究目标的理论研究和科技发展至今仍是国际研究的热点问题。

2019年2月12日,英国First Light Fusion公司(FLF)成功完成脉冲功率装置“机械3”的建设和测试。“机械3”是全球同等规模脉冲功率装置中唯一致力于聚变能研究的装置^[44]。2019年7月,克罗地亚德博斯科维奇研究所(RBI)建成一座聚变支持设施——双离子束设施,可以组合来自不同加速器的两条离子束。IAEA 2019年7月11日表示,该设施加强了克罗地亚的聚变研究能力,并扩大了具有这种前沿能力的设施的全球供应^[45]。2019年10月,英国政府宣布4年内将投资2.2亿英镑(2.7亿美元),推进用于能源生产的球形托卡马克(STEP)概念设计。STEP计划的目标是在2040年前建成一座球形托卡马克商业聚变电厂^[46]。作为我国《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》中优先部署的大科学工程项目之一,“聚变堆主机研究设施”由合肥综合性国家科学中心获批建设,并于2019年11月正式开工。该项目建设地点位于合肥市庐阳区,建设周期5年8个月。将建设具有国际领先水平的超导磁体研究系统和偏滤器研究系统,为聚变堆主机关键系统研究提供粒子流、电、磁、热、力等极端实验条件^[47]。2019年11月7日,美国能源部宣布为高级能源研究计划署(ARPA-E)的一项新研究计划“突破性赋能热核聚变能”(BETHE)提供3000万美元资助,以支持商业上可行的聚变能技术方案研发,目标是增加低成本聚变能技术方案的数量并推进商业化进程^[48]。

聚变能利用的发展在由利用托卡马克装置成功验证科学可行性之后,逐渐转向对工程可行性的探索和研究。因此,聚变反应堆的建设变得至关重要。

要,在工程实践中,聚变堆的规模,设备装置的复杂性,成功运行的难度都将大大提高。为解决这些问题,新型的实验装置支持必不可少,如日本的JT-60SA等。

目前,聚变反应堆工程应用的核心问题集中在聚变燃料的自持、点火条件的满足、第一壁材料的选择等方面,在未来的优化设计中亟待解决。

4.2 国际热核实验堆(ITER)

ITER是目前世界上正在建设的最大的实验性托卡马克聚变反应堆,由7个成员实体共同资助运行,分别是欧盟、印度、中国、美国、日本、韩国和俄罗斯,地点在法国的卡达拉奇(Cadarache)。中国ITER工作组作为重要单位之一,全面参与ITER的管理、设计、建造、安装和将来实验等领域的工作^[49]。

2019年8月,中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所、中国核电工程有限公司、中国核工业二三建设有限公司、核工业西南物理研究院等科研机构组成的中方联合体,成功中标国际热核聚变实验堆(ITER)托卡马克主机TAC-1安装标段工程^[50]。

2019年11月,由中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所承担研制的国际热核聚变实验堆ITER计划首个大型超导磁体线圈——极向场6号线圈(PF6线圈)竣工交付^[51]。

2019年11月7日,国际热核聚变实验堆(ITER)建设项目取得重要进展,托卡马克综合体(Tokamak Complex)已完成土木工程建设,即将启动屋顶金属框架的安装工作^[52]。

2019年8月新闻报道,由中国新奥集团设计建造的中等规模球形托卡马克聚变实验性装置——新奥“玄龙-50”在河北廊坊建成,并实现第一次等离子体放电。该装置是托卡马克聚变和仿星器聚变装置之后的另一种磁约束高温等离子体实验装置。

4.3 中国聚变工程实验堆(CFETER)

中国聚变工程实验堆(CFETER)是从聚变实验堆到原型电站过渡不可或缺的工程堆,CFETER的科学目标为:1)实现自持聚变燃烧;2)实现氦自

持;3)进行聚变科学、材料部件等方面研究并建立核数据库;4)建立聚变堆核安全及标准体系。图3为CFETER的设计图。

目前,CFETER已经完成了总体设计并开始工

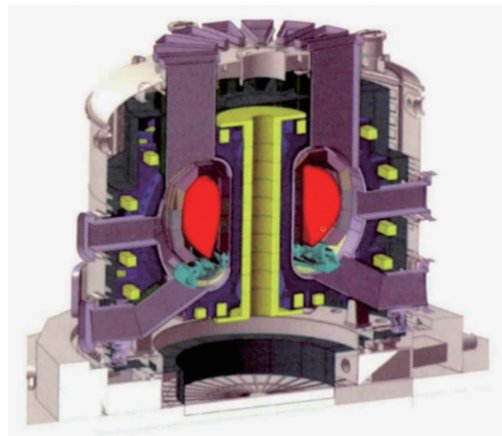


图3 CFETER设计模型图

程设计,预计2030年建成,一期目标 $Q=1\sim 5$,聚变功率200 MW;二期目标 $Q>10$,聚变功率1 GW,稳定运行^[53]。

2019年,黄卫等^[54]完成了CFETR的纵场磁体的低温冷却系统的热分析,确定线圈排布匝数、纵场磁体中心冷却孔以及盒壁内侧冷却孔的质量流速,并计算液氦在导体中心冷却孔流动时的沿程压降。韩厚祥等^[55]完成了CFETR中心螺线管超导模型线圈的绕组设计和公差分析。

中国自20世纪60年代开展对聚变能、聚变装置的研究以来,已建成多种参数规模的托卡马克装置,为核聚变能的应用打下了良好的基础。现在,在中国聚变工程实验堆的设计建造过程中,相对国外同类型聚变装置,在智能远程操作技术、超导磁体系统等方面的设计与工程可行性的评估中具有一定优势。

5 事故容错燃料

日本福岛核事故之后,核能界对核燃料安全提出了更高的要求,并于2012年正式提出了事故容错燃料(也称耐事故燃料,Accident Tolerant Fuel,

简称 ATF)的概念。事故容错燃料是为提高燃料元件抵御严重事故能力而开发的新一代燃料系统,与现有的核燃料相比,能够在较长的时间内抵抗严重事故工况,同时保持或提高其在正常运行工况下性能。ATF可以显著提高核燃料在正常工况下的经济性以及在严重事故工况下的安全性,是核能发展60年以来的重大变革,位于国际核燃料技术研发的最前沿,也是各个核电强国和业内巨头竞争的核心技术。同时,ATF也被载入2019年全球十大新兴技术榜单^[56]。

目前,世界各地的研究人员通过实验或软件模拟等方法,对事故容错燃料的原理、制备、性能等各方面进行了广泛的研究。中国、美国等核电技术强国也都在积极推进事故容错燃料的研究,目前已经开始在反应堆中进行实验,预计该技术将进入实际应用。

5.1 ATF领域研究现状

ATF的设计概念中,在锆合金表面开发高附着、高温抗氧化和耐腐蚀涂层是最重要的策略之一。位东辉等^[57]对锆合金表面CrAl涂层的高温氧化和拉伸行为进行了研究。结果显示,CrAl涂层的氧化速率和氧化增重都远小于原始锆合金,比CrTiAlN涂层和CrAlN涂层的抗氧化性能更好,且带CrAl涂层的样品拉伸性能也较优秀,是一种较好的核燃料包壳事故容错涂层材料。Zhang等^[58]采用磁控溅射方法制备了致密的Cr₂AlC涂层对锆合金包壳进行表面改性。生成的涂层在锆-4合金基体上具有良好的热化学相容性,但在1000℃高温处理后会退化,所以需要引入扩散屏障来确保Cr₂AlC涂层的可行性。

Chen等^[59]通过磁控溅射方法在锆-4合金上沉积了不同成分的CrCuFeMoNi高熵合金(HEA)涂层,研究了涂层的组织、力学性能和高温腐蚀性。结果表明Cr_{0.26}Cu_{0.3}Fe_{0.1}Mo_{0.15}Ni_{0.19}HEA涂层具有出色的相对耐腐蚀性,可以作为ATF材料以增强锆合金的耐腐蚀性。Alat等^[60]研究了在TiAlN涂层中掺杂Yb对涂层抗腐蚀性能的影响。研究了在传统高合金表面添加整体TiN、整体TiAlN和8层TiAlN/TiN这3种涂层中添加和不添加Yb的中子效应,并

进行了机械性能的检测。结果表明,虽然掺杂Yb有利于涂层的抗腐蚀性能,但为了减少对涂层中子性能和硬度的影响,需要对Yb的浓度进行控制。

对ATF材料的模拟计算分析也是ATF研究中很重要的一环。He等^[61]利用RELAP 5/Mod 3.4对高铀密度ATF材料——UN和UN+U₃Si₂复合材料在压水堆中的热工水力性能进行了研究。结果表明,ATF UN和UN+U₃Si₂复合材料相比传统UO₂具有更大的负反应性反馈效应,在事故瞬态下可以有效降低反应堆功率。因此,ATF UN和UN+U₃Si₂复合材料表现出更好的热工水力性能和反应堆安全性,可以更有效地缓解事故。He等^[62]在FRAPTRAN 2.0中开发了一个新的模型——M-FRAPTRAN来模拟反应性引发事故(RIA)和失水事故(LOCA)中的多层次ATF概念。结果表明M-FRAPTRAN对于燃料性能的预测是较为合理的。同时对RIA和LOCA中SiC(CMC/CVD)包层的初步性能进行了分析。结果表明,外涂层CVD层可能处于拉伸状态,威胁涂层的完整性。

Hong等^[63]对ATF材料中由于PCI现象导致的具有Cr涂层的锆合金包壳的开裂进行了分析。通过计算出裂纹通道的能量释放速率,可以针对最大涂层厚度制定设计图,从而避免在不同水平的功率梯度下破裂。此外,还设计了一套程序做到可以使用现有的PCI代码研究涂层和包壳的开裂现象。

岳慧芳等^[64]对耐事故SiC/Zr复合材料的烧结工艺进行了分析,并对SiC与Zr之间的晶面反应进行了研究。得到了利用粉末冶金法制得致密度为96%的SiC/Zr复合材料的烧结工艺。同时也测试了SiC/Zr复合材料的耐腐蚀性能,结果明显优于同条件下制得的锆合金。

Tan等^[65]对SiC包壳组件进行了中子学分析,研究了SiC包壳的一般物理性能及其中子性能。结果显示,SiC包壳组件表现出了比常规锆合金包壳更平坦的功率分布,可以减少必要的燃料富集度。同时,SiC包壳与锆合金包壳具有类似的中子性能,这有利于减少更换包壳时对反应堆的改动。此外,SiC包壳的物理特性更可以提高反应堆的安全性和经济性。

5.2 各国 ATF 研发进展

中国的 ATF 研发工作由中广核集团于 2013 年率先启动,相继获得国家重大专项、中广核战略专项等项目支持,同时与国家电力投资集团、中国科学院、中国工程物理研究院、清华大学、西安交通大学等各领域顶尖团队开展合作。经过几年的努力,2019 年 1 月 20 日,中广核集团自主研发设计的 S2F PI-A 型 ATF 小棒,顺利载入研究堆,正式开始辐照考验工作(图 4)。这次燃料小棒入堆,是国内首次实现 ATF 燃料堆内辐照。通过研究堆辐照试验,研究人员将获得 ATF 燃料在堆内辐照的实验数据^[66]。

2019 年 5 月,由中广核集团和 IAEA 联合举办、

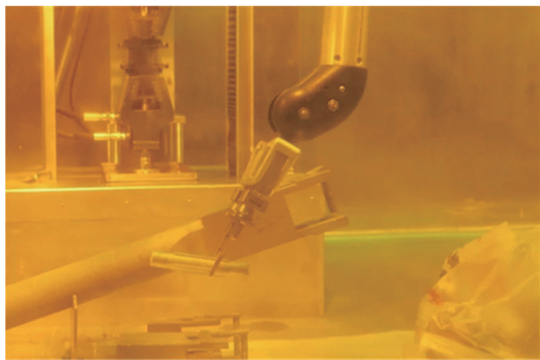


图 4 ATF 小棒入堆辐照(图片来源:中广核集团)

中广核研究院承办的 2019 事故容错燃料国际研讨会在深圳召开,专家分别就 ATF 研发进展、材料测试、模拟分析、程序开发等各方面的成果进行了汇报与讨论^[67]。2019 年 11 月 28 日,在成都举办了首届耐事故燃料技术论坛,论坛展示了国内首次制备出的 FeCrAl 全尺寸包壳管(图 5),而 Cr 涂层型耐事故燃料包壳已走通长尺寸管材的制备工艺^[68]。

同时美国能源部也在大力支持 ATF 技术的发展。2019 年 1 月 18 日,西屋电气公司宣布,已获得美国能源部提供的 9360 万美元资金,用于其事故容错燃料计划 EnCore 燃料的研发^[69]。EnCore 燃料计划包括两部分,即具备先进的安全性能、增强燃料循环和经济优势的短期和长期产品的研发。受这笔资金的支持,西屋电气公司在美国拜伦核电站 2 号机组安装完成了西屋电气公司的 EnCore 耐事



图 5 FeCrAl 全尺寸包壳管(图片来源:中广核集团)

故核燃料,这标志着商用反应堆首次安装 EnCore 核燃料棒组件^[70]。

除西屋电气公司外,美国能源部核能办公室还为美国通用电气公司、法国法马通公司拨款,用于开发 ATF^[71]。2019 年 4 月 3 日,美国乔治亚州沃格特勒核电站 2 号机组在完成春季装料和维修大修后恢复运行,装载了法国法马通公司生产的 GAIA 核燃料组件,运营商表示已安装了“世界上首个完整、装满燃料、全尺寸测试组件,即所谓的耐事故燃料,包括芯块和包壳”^[72]。法马通公司的新型燃料 M5 法马通锆合金包壳上添加了铬涂层,提高了高温抗氧化性,并减少了失去冷却剂时氢气的产生。

俄罗斯国家原子能公司 TVEL 燃料公司也在 2019 年初表示已在耐事故燃料研究方面取得技术突破^[73-74]。TVEL 公司下属新西伯利亚化学浓缩厂制造的两个实验燃料组件由 VVER 反应堆或压水堆燃料棒组成,有 4 种不同包覆材料和燃料基质组合。其首批实验性耐事故燃料的第一阶段反应堆测试于 1 月开始,11 月结束。测试在俄罗斯国家原子反应堆研究所的现代化国际研究堆水回路中进行,TVEL 称,初步的检查表明,“既没有发现燃料棒几何形状有变化,也没有发现包壳表面有损坏”。12 月,TVEL 已在新西伯利亚化学浓缩厂制造出首

批用于商用反应堆的耐事故核燃料组件。这批核燃料组件含有实验性耐事故燃料棒,现已通过验收,并将于2020年第一季度在俄罗斯罗斯托夫核电站的一个VVER-1000反应堆安装^[75]。

6 数值反应堆与核电软件进展

数值反应堆是基于先进耦合建模技术、大规模并行计算技术、先进的验证与确认(V&V)等技术,建立在超级计算机上,可实现实际反应堆各种物理过程高精细模拟预测。它是实际反应堆“外在”和“内在”的镜像,是先进的核反应堆设计优化、高效运行、事故预测和应急以及新材料研发等的试验验证平台^[76]。与此同时,以人工智能、高精度仿真、智能控制、预见性监测及维护为基础的数字孪生(digital twin)技术开始进入先进堆研发领域,目的是显著降低下一代先进堆发电的运行和维护成本。

美国轻水堆先进仿真联盟(CASL)和核能先进仿真与建模(NEAMS)是目前美国针对核能仿真及数值反应堆研发领域最新进展的代表。CASL项目开发了一个用于反应堆多物理模拟集成环境——反应堆应用虚拟环境(VERA)程序^[77]。VERA堆芯物理基准题是以西屋电气公司设计的17×17压水堆Watts Bar为模型,涵盖从二维单栅到三维全堆芯、多物理耦合及时间依赖的10个基准问题。CASL核心模拟器的MPACT中子学模块是为CASL工具集开发的3D完整核心传输代码,称为“反应堆应用虚拟环境”。MPACT代码的关键特性包括用于共振自屏蔽的子组方法和具有2D/1D合成方法的全芯输运求解器。AMPX和SCALE代码包已得到显著改进,包括中间共振参数以及新模块,以提高共振数据和Bondarenko方法和氢传输截面的散射矩阵的准确性。另外,已经开发了CASL XSTools生成MPACT多组截面库。已经开发出一种用于²³⁸U的简单超均质方法,以解决由角度相关的总横截面、较差的散射矩阵和较差的粗组结构干扰共振模型引起的反应速率差异问题。由于即使在高性能计算中也会出现计算能力的局限性,因此已经开发出一种新的51组结构用于高效仿真,该

结构适用于压水堆(PWR)和沸水堆(BWR)仿真。使用AMPX/SCALE和XSTools代码包开发了一个新的ENDF/B-VII.1 MPACT 51-group库,并已通过执行各种基准计算进行了验证^[78]。VERA的一个重要耦合框架是MOOSE^[79]。最近,VERA已被用于模拟AP1000压水堆^[80]和Watts Bar Nuclear Unit 2(WBN2)的启动^[81],验证了VERA强大的堆芯计算和多物理场模拟的能力。此外,CASL研究人员增加包括沸水反应堆、小型模块堆在内的更多类型反应堆建模仿真设计。NEAMS项目是美国能源部的另一项与CASL基本同期进行的数值堆项目。随着数值堆的研发进展,美国能源部将Argonne反应堆计算(ARC)代码套件集成到NEAMS Workbench中,以促进从传统工具到高保真的过渡。针对RPV钢辐照脆化,美国目前正在开展RPV钢辐照脆化多尺度模拟软件Grizzly的开发。在过去的10年中,美国能源部在CASL和NEAMS之间对先进的mod-sim进行了大量投资。2021年,目标是将所有NE mod sim集中在一个程序中^[82]。这将使核电软件在模拟反应堆的统一性和精确度上得到重大突破。

NURESIM是欧洲国家近10余年来主要致力于联合开发的核反应堆模拟平台,该平台是一套用于模拟轻水堆正常运行和设计基准事故的软件,由核反应堆安全模拟欧洲联盟(NURESAFE European Consortium)开发^[83]。到目前为止,NURESIM仿真平台在2代堆、3代堆上开展并完成了大量测试,期望未来能扩展到4代堆的模拟。除NURESIM平台外,还有大量的模拟工具集成到SALOME中,特别是由法国电力能源公司(EDF Energy)构建的Code_Aster和Code_Saturne^[84]。SALOME是一个开源项目,实现了CAD建模器、网格算法、可视化模块和计算代码和求解器之间的互操作性。在材料高性能模拟计算方面,欧盟基于多尺度模拟技术开发了压力容器(RPV)钢辐照脆化模拟系列软件RPV-1、RPV-2等。RPV-1由7个程序包和2个数据库组成,主要用于模拟压水堆和沸水堆RPV钢的辐照效应,能获得RPV钢辐照过程中结构演化以及屈服强度的变化。在完成NURESIM

及在其基础上又规划的 NURISP 项目后的发展统称为 NURE-NEXT 项目,主要目标是通过与用户保持紧密联系使 NURESIM 项目开发的平台实现工业应用,并与欧洲核能技术可持续发展平台(SNETP)的战略规划保持一致。NURESIM 平台未来将用更高的精度和可靠性来增强安全相关参数的仿真预测能力。

近些年,国内核能领域也逐渐开始重视软件自主化的研究开发,并取得了不同程度的进展。“COSINE”软件包是具有自主知识产权的核电厂工程设计与安全分析软件。其自主化的研发路线图按两阶段分步实施:第一阶段为 2011 至 2015 年,相继发布 COSINE 软件包的内部测试版、公开试用版,填补中国核电关键软件的技术空白;第二阶段为 2015 至 2020 年,重点进行验证确认与模型评估,达到国际先进水平。COSINE 已具备压水堆核电站堆芯物理—热工水力及系统安全分析的核心功能,取得的研发成果在具备自主知识产权的 CAP1400 机组或其他压水堆机组上推广应用^[85]。与此同时,中央研究院还与国核示范电站有限公司、国核自仪系统工程有限公司联合签署了《CAP1400 示范工程二号模拟机合作开发三方协议》,标志着 COSINE 从软件开发阶段转入工程应用阶段。图 6 为 COSINE 软件包研发进度时间轴。

中核集团中国核动力研究设计院于 2015 年发

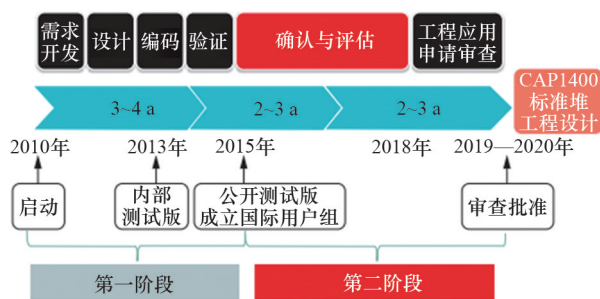


图 6 COSINE 软件包研发进度时间轴

布了中国首套自主化核电软件一体化平台 NESTOR^[86],2018 年已初步完成其综合研发平台 VEACTION 的开发,且部分成果已应用于实际工程设计中。从 AP1000 到 CAP1400,中国三代非能动

核电经过 10 年的努力,基本完成了研发设计自主化、关键设备和材料国产化的历程。在此过程中,中国核电产业能力完成了从二代向三代的跨越^[87]。中广核集团在自主核电软件开发方面也取得了相关重要进展。

中国科学院核能安全技术研究所 FDS 团队研制的核设计与辐射安全评价软件“超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统 SuperMC 项目”总体达到国际先进水平。经过 2000 余道国际基准实验例题的对比验证,SuperMC 计算精度与国际权威蒙特卡罗软件 MCNP 总体相当。SuperMC 已应用于国际热核聚变实验堆 ITER、中国铅基反应堆 CLEAR 的设计与分析中。其被 ITER 国际组织选为核设计分析标准软件^[88]。SuperMC 云采用专门为核仿真设计的高级功能,例如共享的分布式存储、安全的数据存储和传输、许可证控制等,将成为进行核设计和安全评估的首选云平台^[89]。

总的来说,国内外对数值反应堆及核电软件的研发都非常重视,这方面的研究对核反应堆的设计优化、高效运行、事故预测和应急以及新材料研发均有较大助益。数值反应堆主要以美国的 CASL 与 NEAMS、欧洲的 NURESIM 为主要先进代表。其中,美国的 CASL 项目已经深化 VERA 对压水堆的模拟功能并扩展至沸水堆和小堆。总体来看,数值反应堆以及中国核电软件自主化的发展已取得了重大进步,未来主要可通过人工智能、高精度仿真等先进技术来提高对核反应堆模拟及事故评估的准确性。

7 结论

近年来,虽然核能的发展经历了一定的波折,但总体来说核电产业的规模依然在扩大,技术路线更加多样化,前景可期。而小型模块堆、空间动力堆等新型反应堆的研究,让核能可以在更宽广的领域发挥作用。先进的事事故容错燃料则提高了核燃料在严重事故下的安全性。核能系统高精度数值模拟则允许研究人员用较低成本对核电站运行中的各类情况进行计算,对核电站的建设、运行、维护

以及事故防护等方面的研究都提供了支撑。核能因其安全性、经济性且低碳排等优势,预期仍将是未来能源可持续战略中不可缺少的组成部分,而未来核聚变技术的实现则是彻底解决人类能源问题的一线光明。

参考文献(References)

- [1] Nuclear Power in the World Today[EB/OL]. [2020-02-21]. <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>.
- [2] 世界核电行业发展现状与趋势[J]. 水泵技术, 2019(5): 53.
- [3] 王树. 世界核电现状[J]. 国外核新闻, 2019(7): 22-24.
- [4] 龙茂雄. 世界核电发展现状与展望[N]. 中国能源报, 2019-09-16(011).
- [5] 伍浩松, 张焰. 法国核工业界明确中长期行动计划[J]. 国外核新闻, 2019(2): 1.
- [6] 中国核电行业发展现状[J]. 水泵技术, 2019(5): 57.
- [7] 国务院印发《“十三五”节能减排综合工作方案》[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(2): 57.
- [8] 中国核电行业发展现状和前景[J]. 电器工业, 2019(10): 59-63.
- [9] 我国科研机构中标国际热核聚变实验堆总装核心工程[J]. 设备监理, 2019(7): 63.
- [10] 电缆网. 中国大陆 23 台机组获 WANO 满分评价 整体 WANO 综合评分力拔头筹. [EB/OL]. <http://www.elec-fans.com/article/83/2020/202004121201662.html>, 2020-4-12.
- [11] 赵宏, 伍浩松. 英国将资助罗罗小堆研发[J]. 国外核新闻, 2019(9): 11.
- [12] 伍浩松, 戴定. 法公布小堆设计 将与西屋开展合作[J]. 国外核新闻, 2019(10): 7.
- [13] 伍浩松, 赵宏. 俄将在雅库特建设小堆[J]. 国外核新闻, 2019(10): 7.
- [14] 伍浩松, 戴定. 加稳步推进小堆示范项目[J]. 国外核新闻, 2019(3): 19.
- [15] 伍浩松, 张焰. 加正式启动小堆建设环评[J]. 国外核新闻, 2019(8): 12.
- [16] 伍浩松, 赵宏. 加启动核能研究倡议 加速推进小堆研发[J]. 国外核新闻, 2019(8): 11.
- [17] 伍浩松, 戴定. U-Battery 进入加小堆示范项目第二阶段[J]. 国外核新闻, 2019(8): 11.
- [18] 赵宏, 张焰. 罗研究建设纽斯凯尔小堆的可行性[J]. 国外核新闻, 2019(4): 13.
- [19] 赵宏, 张焰. 斗山将参与纽斯凯尔小堆开发[J]. 国外核新闻, 2019(5): 14.
- [20] 赵宏, 伍浩松. 纽斯凯尔与斗山重工开展小堆合作[J]. 国外核新闻, 2019(8): 13.
- [21] 张焰, 伍浩松. 纽斯凯尔小堆通过第三阶段设计认证评审[J]. 国外核新闻, 2019(9): 7-8.
- [22] 赵宏, 伍浩松. 美能源部资助三所大学建设小堆模拟器[J]. 国外核新闻, 2019(9): 13.
- [23] 戴定, 伍浩松. 纽斯凯尔小堆考虑使用金属燃料[J]. 国外核新闻, 2019(6): 16.
- [24] 张慧. 中核启动小堆核电技术“玲龙一号”示范工程[EB/OL]. [2019-07-18]. <https://finance.sina.com.cn/stock/relnews/cn/2019-07-18/doc-ihyteitn2914014.shtml>.
- [25] 中广核海上小型堆 ACPR50S 正式纳入 IAEA 全球小型堆发展路线[EB/OL]. [2016-09-13]. <http://np.chinapower.com.cn/201609/13/0053309.html>.
- [26] 揭秘中国迷你“核电宝”: 一台能供 50000 户[EB/OL]. [2019-09-11]. <http://power.in-en.com/html/power-2333934.shtml>.
- [27] 新型反应堆获突破核电宝来临 国产核航母还有多远[EB/OL]. [2019-10-13]. <http://mil.news.sina.com.cn/jssd/2019-10-13/doc-iicezuev1814201.shtml>.
- [28] 邱阳, 罗英, 杨敏, 等. 模块式小型堆反应堆压力容器内支承环和筒体焊接残余应力数值计算[J]. 电焊机, 2019, 49(7): 1-6.
- [29] 蔡志云, 赵禹, 王保平. 模块式小型堆化学和容积控制系统的仿真分析[J]. 核安全, 2019, 18(3): 62-66.
- [30] 高颖贤, 张航, 邱志方, 等. 确定论与概率论相结合的小型模块化压水堆应急堆芯冷却系统配置研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(3): 175-179.
- [31] 雷驰, 吴宏春, 曹良志, 等. 小型可运输长寿命铅铋冷却快堆堆芯设计研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(8): 1451-1458.
- [32] 陈振佳, 杨红义, 余华金, 等. 小型模块化钠冷快堆非能动余热排出系统分析研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(8): 1417-1423.
- [33] 赵孝, 张震, 杨星团, 等. 小型模块式反应堆螺旋管蒸汽发生器设计和热工水力分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(12): 2361-2366.
- [34] 张莉. 2019 年国外核科技工业发展回顾[J]. 国防科技工业, 2019(12): 14-18.
- [35] 李永, 周成, 吕征, 等. 大功率空间核电推进技术研究

- 进展[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 12-27.
- [36] 李华琪, 杨宁, 田晓艳, 等. 热管冷却双模式空间堆的初步概念[J]. 现代应用物理, 2017, 8(4): 80-85.
- [37] 林庆国, 王浩明, 程诚. 基于氢化镁的核能/核热双模共质空间核动力技术[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 114-120, 133.
- [38] 王钊, 夏陈超, 康志宇, 等. 模块化核动力航天器设计及其关键技术[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 141-147.
- [39] 沈华亚, 陈法国, 韩毅, 等. 金属氢化物中子屏蔽应用研究现状[J]. 材料导报, 2019, 33(Suppl 2): 484-487.
- [40] Postion D I, Gibson M, McClure P. Kilopower reactors for potential space exploration missions[C]//Nuclear and Emerging Technologies for Space, American Nuclear Society Topical Meeting ANS. Richland, WA. 2019.
- [41] 何宇豪, 孟涛, 卢瑞博, 等. 空间核反应堆电源研究进展[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 126-133.
- [42] Eades M, Reed M, Morrison C, et al. The pylon: Commercial LEU nuclear fission power for lunar martian, and deep space applications[C]//Nuclear and Emerging Technologies for Space, American Nuclear Society Topical Meeting. Richland, WA. 2019.
- [43] Herringa J S, Mackwellb S, Pestakc C, et al. Small modular fission reactors for space applications[C]//Nuclear and Emerging Technologies for Space, American Nuclear Society Topical Meeting. Richland, WA. 2019.
- [44] 伍浩松, 戴定. 英完成一座聚变设施的建设和调试[J]. 国外核新闻, 2019(3): 20.
- [45] 赵宏, 伍浩松. 克罗地亚建成一座聚变支持设施[J]. 国外核新闻, 2019(8): 12.
- [46] 张焰, 伍浩松. 英国拟建世界首座商业核聚变电厂[J]. 国外核新闻, 2019(11): 12.
- [47] 国家大科学装置“聚变堆主机研究设施”正式开工建设[J]. 高科技与产业化, 2019(11): 82.
- [48] 伍浩松, 王树. 美能源部为国际聚变研究资助3000万美元[J]. 国外核新闻, 2019(4): 4.
- [49] 张微, 杜广, 徐国飞. 核聚变发电的研究现状与发展趋势[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(8): 58-60.
- [50] 中国科研机构中标国际热核聚变实验堆总装核心工程[J]. 电力设备管理, 2019(8): 10.
- [51] 我国成功研制ITER首个大型超导磁体线圈[J]. 高科技与产业化, 2019(11): 74.
- [52] 伍浩松, 赵宏. ITER托卡马克综合体完成土木工程建设[J]. 国外核新闻, 2019(12): 11.
- [53] 杨青巍, 丁玄同, 严龙文, 等. 受控热核聚变研究进展[J]. 中国核电, 2019, 12(5): 507-513.
- [54] 黄卫, 陆坤, 郑金星, 等. CFETR纵场超导磁体CICC导体低温冷却设计与分析[J]. 核技术, 2019, 42(12): 85-91.
- [55] 韩厚祥. CFETR中心螺线管超导模型线圈绕制成形关键技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2019.
- [56] 2019年全球十大新兴技术榜单发布[EB/OL]. [2019-07-04]. https://huanqiukexue.com/a/qianyan/xinxi_nen-yuan/2019/0704/28502.html.
- [57] 位东辉, 吴亚文, 贺秀杰, 等. 铝合金表面CrAl涂层的高温氧化与拉伸行为[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 44-53.
- [58] Zhang J, Tian Z, Zhang H, et al. On the chemical compatibility between Zr-4 substrate and well-bonded Cr2AlC coating[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(1): 1-5.
- [59] Chen Q S, Liu C H, Long J P, et al. Microstructure and corrosion characteristics of CrCuFeMoNi HEA coatings with different compositions in high-temperature and high-pressure water[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 86511.
- [60] Alat E, Brova M, Younker I, et al. Neutronic and mechanical evaluation of rare earth doped and undoped nitride-based coatings for accident tolerant fuels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 518: 419-430.
- [61] He S, Cai J J. Thermal hydraulic analysis of the PWR with high uranium density accident tolerant fuels under accident transients with and without reactivity[J]. Journal of Nuclear Technology, 2019, 355: 110358.
- [62] He Y, Shirvan K, Wu Y, et al. Integrating a multi-layer deformation model in FRAPTRAN for accident Tolerant fuel analysis[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 133: 441-454.
- [63] Hong K, Barber J, Thouless M, et al. Cracking of Cr-coated accident-tolerant fuel during normal operation and under power-ramping conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 353: 110275.
- [64] 岳慧芳, 冯可芹, 庞华, 等. 粉末冶金法烧结制备SiC/Zr耐事故复合材料的研究[J]. 材料导报, 2019, 33(A01): 321-325.
- [65] Tan Z X, Cai J J. Neutronic analysis of silicon carbide cladding accident-tolerant fuel assemblies in pressurized water reactors[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(3): 128-136.
- [66] 中广核开始国内ATF燃料入堆辐照测试工作[EB/OL]. [2019-01-22]. <http://www.cgnpc.com.cn/cgn/c100944/>

- 201901/22/content_916216b8da314c03b1785b9d798c163d.shtml.
- [67] 中广核举办 2019 事故容错燃料国际研讨会[EB/OL]. [2019-05-20]. http://www.cnpri.com.cn/cnpri/c102033/201905/20/content_5620b4f3f05c4327928be8854c3697d3.shtml.
- [68] 王昱, 潘钱付. 核动力院核电耐事故燃料技术取得新突破[EB/OL]. [2019-11-29]. https://mp.weixin.qq.com/s/gaCN0_aauFyAq2CCJEI-XA.
- [69] 王兴春. 美能源部资助西屋电气开发耐事故核燃料[EB/OL]. [2019-01-23]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ZHXJusgkcq6WcVzaoy9N3A>.
- [70] 王兴春. 美国商用反应堆首次安装西屋电气生产的耐事故核燃料[EB/OL]. [2019-09-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/mjqFFZdIO2WKmVeaxDlsQg>.
- [71] 仇若萌. 美国能源部为耐事故燃料开发提供资金[EB/OL]. [2019-02-19]. https://mp.weixin.qq.com/s/Pbk4xe-q_M_fUIE-74Cn3A.
- [72] 王兴春. 美国核电站开始使用法马通公司增强型耐事故核燃料测试组件[EB/OL]. [2019-04-09]. <https://mp.weixin.qq.com/s/dD2Z8lm3jbsvDwOeiQzrwA>.
- [73] 王兴春. 俄罗斯开始测试压水堆耐事故燃料[EB/OL]. [2019-01-31]. https://mp.weixin.qq.com/s/ovgN5Ri050Zg_c02nZnqGw.
- [74] 张馨玉. 俄罗斯耐事故燃料完成首次测试[EB/OL]. [2019-11-04]. <https://mp.weixin.qq.com/s/L7sXcoBFQq-iMMX9QzXXN2w>.
- [75] 王兴春. 俄罗斯制造出首批用于商用反应堆的耐事故核燃料[EB/OL]. [2019-12-30]. <https://mp.weixin.qq.com/s/WixAIMdC1w8jqhPG3q4QUg>.
- [76] 杨文, 胡长军, 刘天才, 等. 数值反应堆及 CVR1.0 研究进展[J]. 原子能科学技术, 2019(10): 1821-1832.
- [77] Turner J A, Clarno K, Sieger M, et al. The virtual environment for reactor applications (VERA): Design and architecture[J]. Journal of Computational Physics, 2016, 326: 544-568.
- [78] Kim S K, Williams L M, Wiarda D, et al. Development of the multigroup cross section library for the CASL neutronics simulator MPACT: Method and procedure[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 133: 46-58.
- [79] Gaston D, Newman C, Hansen G, et al. MOOSE: A parallel computational framework for coupled systems of nonlinear equations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 239(10): 1768-1778.
- [80] Franceschini F, Godfrey A, Stimpson S, et al. AP1000 PWR startup core modeling and simulation with VERA-CS[C]//Proceedings of the Advances in Nuclear Fuel Management. Illinois, USA: ANS, 2015.
- [81] Godfrey A T, Collins B S, Gentry C A, et al. Watts bar unit startup results with VERA[R]. Tennessee, USA: ORNL, 2017.
- [82] Richard C S. Overview of DOE-NE NEAMS Program [R]. U. S. Department of Energy, 2019.
- [83] Chauliac C, Aragonés M J, Bestion D, et al. NURESIM—A European simulation platform for nuclear reactor safety: Multi-scale and multi-physics calculations, sensitivity and uncertainty analysis[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(9): 3416-3426.
- [84] EDF Energy. Simulation softwares[EB/OL]. [2019-03-04]. <http://www.edf.fr/en/the-edf-group/word-s-largest-power-company/activities/research-and-development/scientific-communities/simulation-softwares>.
- [85] 葛炜, 杨燕华, 刘飒, 等. 大型先进压水堆核电站关键设计软件自主化与 COSINE 软件包研发[J]. 中国能源, 2016, 38(7): 39-44.
- [86] 刘东, 李庆, 卢宗健, 等. “华龙一号”设计分析软件包 NESTOR 的研发与应用[J]. 中国核电, 2017, 10(4): 532-536.
- [87] 郑明光. 从 AP1000 到 CAP1400, 我国先进三代非能动核电技术自主化历程[J]. 中国核电, 2018, 11(1): 41-45.
- [88] 朱学蕊. 中国能源报[N]. 2015-11-16(12).
- [89] Hu L Q, Long P C, Song J, et al. SuperMC cloud for nuclear design and safety evaluation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 134: 424-431.

Recent progress of frontier nuclear energy science and technology

YANG Jun, ZHANG Enhao, GUO Zhiheng, WU Aoguang, WANG Beiqi, SHI Lihao, DU Hui, XU Lejin*

Department of Nuclear Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract This paper reviews the recent scientific researches and the important engineering milestones in the key fields of the frontier nuclear energy science and technology, focusing on the research and project progresses in the nuclear energy engineering, the small module reactor, the fusion technology, the space reactor, and the digital reactor. The research and development of the frontier nuclear energy technology is shown to be progressing steadily in general. Small reactors have good application prospects in sea, land and air and will open up a new world of the nuclear energy utilization beyond the traditional commercial nuclear power. The advanced nuclear fuel design, the high-precision numerical simulation and other technologies are important development directions for the nuclear energy safety in the future. With the further innovation and diversity of the technology, the diversified development trend of the nuclear energy is expected to occupy an important position in the global energy structure.

Keywords nuclear energy technology; advanced nuclear fuel; space reactor; digital twin ●



(责任编辑 祝叶华)