

钍基熔盐堆和核能综合利用

徐洪杰 戴志敏 蔡翔舟 王建强

(中国科学院上海应用物理研究所 201800)

发展具有经济可行性、固有安全性且能够更好地解决核燃料和核废料问题的未来先进核能系统,始终是国际核能科技界的努力方向和研发热点,以此为目标,国际核能界在2002年遴选出了六种第四代先进核能系统的候选堆型。钍基熔盐堆是其中唯一的“液态燃料+高温+常压”堆型,其采用氟化熔盐作为核燃料载体或冷却剂,能够在线添加核燃料和处理裂变产物,国际公认适合于钍基核燃料的高效利用。随着技术的进步,被认为是最容易实现商业化的堆型之一。

钍基熔盐堆得益于其熔盐冷却剂的高温、低压、高化学稳定性、高热容等特性,可避免使用沉重而昂贵的压力容器,可建成紧凑、轻量化和低成本的小型模块化反应堆;运行只需少量水,可实现在干旱地区高效发电;输出温度可达700℃以上,不仅可用于布雷顿循环发电,也可用于工业生产和高温制氢、二氧化碳资源化等,从而缓解气候问题和环境污染,实现核能综合利用。

钍资源利用研发经过国际社会几十年努力,有望在熔盐堆身上实现。这对我国有特殊意义:发展钍资源核能利用技术是我国核能界半个多世纪的“梦”,我国钍资源丰富,可以在战略上实现核燃料稳定供应和能源独立;钍核燃料终极废料低,更加清洁安全;钍核燃料不易用于制造武器,是更理想的民用核燃料。

十九大确定的强国战略需要我国在四代堆以致更加长远的先进核能技术上实现国际领先,并将用这些先进技术支撑强国目标的实现。钍基熔盐堆核能系统可利于实现核燃料多元化、防止核扩散和核废料最小化,为和平利用核能开辟一条新途

径,对我国能源发展模式转变和优化核能领域布局具有重要意义。

1. 熔盐堆

熔盐堆研发始于20世纪40年代末的美国,主要目的是美国空军为轰炸机寻求航空核动力(轻水堆则是美国海军为潜艇研发的核动力装置),其早期概念为液态燃料熔盐堆,燃料可以为 ^{235}U 、 ^{233}U 、 ^{239}Pu 以及其他超铀元素的氟化物盐,这些氟化物燃料盐直接溶解于冷却剂熔盐中,其中液态氟化盐既用作冷却剂,也作为核燃料的载体。得益于氟化熔盐冷却剂的高热容、高热导、高沸点以及低蒸汽压等特点,熔盐堆具有高温输出、高功率密度、可常压操作等优点,在本征安全性以及经济性上具有极大的优势和潜力。

1954年,美国橡树岭国家实验室ORNL建成第一个熔盐堆实验装置ARE(Aircraft Reactor Experiment),功率为2.5 MW,燃料为NaF-ZrF₄-UF₄混合物。战略弹道导弹的迅速发展使核动力轰炸机的研发失去了军事应用价值,因此熔盐堆的研发于20世纪60年代转向民用。ORNL于1965年建成热功率8 MW的液态燃料熔盐实验堆(MSRE),MSRE满功率运行了将近五年,是迄今为止唯一一个液态燃料反应堆,也是唯一一个成功利用铀-233运行的反应堆,获得巨大的成功。MSRE进行了大量的堆实验,表明熔盐堆具有非常独特而优异的民用动力堆性能,可以用钍基核燃料,更适合于钍基核燃料,理论上可以实现完全的钍铀燃料闭式循环。20世纪70年代,ORNL完成了热功率为2250 MW的增殖熔盐堆(Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)的设计,

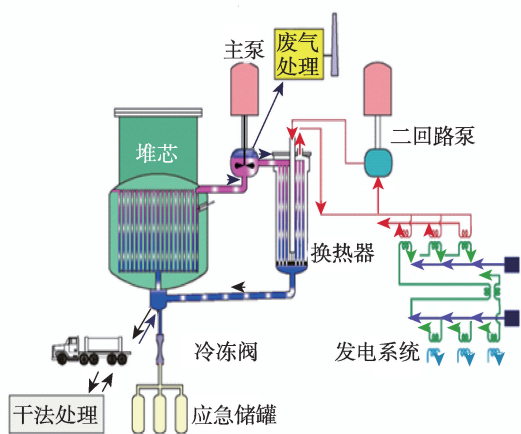


图1 熔盐堆原理图

然而20世纪70年代正是冷战的高潮,发展核武器的重要性远远大于发展民用核能,在核能研究规模整体收缩的背景下,美国政府选择了研发适合生产武器用钚、具有军民两用前景的钠冷快堆,放弃了更适合钚铀燃料循环、侧重于民用的熔盐堆。

熔盐堆原理如图1所示:主要包括堆本体、回路系统、换热器、燃料盐干法处理系统、发电系统及其他辅助设备等。熔盐堆燃料是以氟化铍和氟化锂及溶解在其中的钚或铀的氟化物组成的液态融合物,具有很好的传热特性和非常低的蒸汽压力,可以降低对压力容器和管道压力。堆本体主要由堆芯活性区、反射层、熔盐腔室/熔盐通道、熔盐导流层、哈氏合金包壳等组成,上百根均匀排列、无包壳并带有通道的石墨元件组成燃料盐通道并兼作慢化剂,含有裂变材料和可转换材料的燃料熔盐通过堆芯石墨通道时发生裂变放出热量,经过加热的700℃以上高温燃料熔盐流出堆芯出口,通过热交换器将热量转换到二次回路中的冷却盐中,二次回路再通过另一个热交换器将热量传给第三个氦气回路推动氦气轮机作功发电。燃料盐干法后处理系统包括热室及其工艺研究设备、涉Be尾气处理系统、放射性三废处理系统及其他辅助系统,溶解到盐中的裂变产物,可以连续地被移入化学处理厂进行在线干法处理,回收并循环利用燃料和载体盐。

美国MSRE的成功和适用于钚基核燃料的特点引起我国科学界和政府的高度重视。20世纪70

年代初,我国科研人员选择钚基熔盐堆作为发展民用核能的起步点,上海“728工程”于1971年建成了零功率冷态熔盐堆并达到临界,通过开展各类临界实验,验证了熔盐反应堆的理论计算,取得了熔盐静态与动态特性、反应性及其温度效应和核燃料增殖率等实验结果。限于当时的科技水平、工业能力和经济实力,我国“728工程”转向了轻水反应堆的研发并最终建成秦山一期核电厂,自此在世界范围内熔盐堆研究的国家行为几乎停止。

到20世纪末和21世纪初,能源危机与环境挑战为钚基熔盐堆发展提供了新的机遇,2001年被第四代核反应堆国际论坛(GIF)选为六个候选堆型之一,钚基熔盐堆研发自此在世界范围内呈现急剧上升趋势,经过几十年的发展,熔盐堆已扩展为两类主要堆型:液态燃料熔盐堆(MSR-LF)和固态燃料熔盐堆(MSR-SF,也称为氟盐冷却高温堆-FHR)。欧美各国积极推进国际合作并组建合作机构,开展熔盐堆概念设计和评估;欧盟自2001年起先后启动MOST、ALISIA、SUMO、EVOL等研究项目,由欧洲原子能共同体和其中六个国家参与,开展液态燃料熔盐堆的评估与可行性研究,提出熔盐快堆系统的优化设计;亚洲各国受能源需求的拉动,对两种熔盐堆的发展均表现出很高的积极性,印度与日本正在积极推动液态燃料钚基熔盐堆的研究工作,韩国已经启动了固态熔盐堆研究计划。

针对不同应用前景,各国发展了多种功能和多种类型的钚基熔盐堆概念设计,包括法国的MSFR(Molten Salt Fast Reactor)、俄罗斯的MOSART(Molten Salt Advanced Reactor Transmuter)、日本的Fuji-MSR、加拿大的IMSR(Integral Molten Salt Reactor)、英国的SSR(Stable Salt Reactor)、德国的DFR(The Dual Fluid Reactor)等,并进一步评估其可行性、安全性和经济性等要素。另外还有一些公司也积极介入和推动熔盐堆的研发,提出了一些创新性的概念设计,包括美国Martingale公司的小型模块化堆ThorCon、美国Flibe energy公司的LFTR设计、美国Transatomic Power公司的WAMSR设计、美国Terra power公司的MCFR设计、丹麦的Seaborg Technolo-

gies公司的Swab设计等。但迄今为止,仍未有完整的实质性计划,这为我国在这一领域主导业界标准、实现跨越发展提供了宝贵机遇。

2. 钍基核能

裂变核能燃料可以分为铀基和钍基两类,目前核电工业使用的燃料基本都是铀基核燃料。由于能源需求的高速增长,对核燃料的需求越来越大,开发利用储量大于铀基核燃料的钍基核燃料的重要性越来越突显。钍基核燃料的研究与铀基核燃料一样,也始于美国“曼哈顿”计划,经过几十年研究,科学界已经基本了解相关知识,并发展了一定的应用技术,迄今已在轻水堆、重水堆、球床式高温气冷堆和熔盐堆等反应堆上进行了尝试使用。

人类迄今发现的有商业价值的易裂变核素有:铀-235(^{235}U)、钚-239(^{239}Pu)和铀-233(^{233}U)。其中, ^{235}U 是自然界唯一天然存在的易裂变核素, ^{239}Pu 需较难裂变的铀-238(^{238}U)吸收中子后转换而来,而 ^{233}U 则需较难裂变的钍-232(^{232}Th)吸收中子后转换而来,所以 ^{238}U 和 ^{232}Th 也称可转换核素。天然钍中只含有 ^{232}Th ,要在吸收中子转换为易裂变的 ^{233}U 后,才好利用,即钍铀燃料循环(钍基核燃料)(见图2)。核能利用总是先开发铀的利用,再考虑钍的利用,使用钍基核燃料与使用铀基核燃料技术上有相似之处,但不完全相同,具有一些独特的优势与挑战。

钍基核燃料具有以下特点:钍-232到铀-233的转换效率高,中子经济性好,在热堆中也能实现增殖;相对铀基核燃料,钍基核燃料在反应堆中产生的钚和长寿命次锕系核素较少,放射性毒性相对较

低;铀-233的伴生同位素铀-232的衰变链会产生短寿命强 γ 辐射,这种固有的放射性障碍增加了核素化学分离的难度和成本,且易被核监测,有利于防核扩散;钍和氧化钍化学性质稳定,耐辐照、耐高温、热导性高、热膨胀系数小、产生的裂变气体较少,这些优点使得钍基反应堆允许更高的运行温度和更深的燃耗。同时,钍基核燃料还具有不易用于制造核武器等特点,是更理想的民用核燃料,美国曾用钍基核燃料(铀-233)制造并试爆过原子弹,结论是这条技术路线实用性不高。

我国钍资源储量丰富,初步估算如能实现钍基核燃料的完全循环利用,可供使用几千年以上,将确保我国能源的自给自足。地球上钍资源总储量是铀资源的3~4倍,钍基核燃料的有效利用对于人类发展也有着巨大的价值。

液态燃料熔盐堆因其可在线添料并进行后处理,是国际公认的钍基核能的理想堆型,可实现钍铀燃料的闭式循环;固态燃料熔盐堆中通过不停堆连续更换燃料球,也可在开环模式下提高核燃料使用率,实现钍燃料的部分利用。基于钍铀循环的熔盐堆具有可满足我国核燃料长期供应需求、物理防核扩散、核废料最小化等特点,同时也存在一些需要克服的技术难点,包括:钍铀燃料循环的核数据相对铀钚燃料循环还不完善、液态燃料盐的流动特性使得熔盐堆技术成为完全不同于其他固体燃料反应堆的一种全新的核反应堆技术、熔盐堆的在线处理工艺技术也需完善和提高等。

3. 核能综合利用

从能源效率的观点来看,直接使用热能是更为理想的一种方式,发电只是核能利用的一种形式。随着技术的发展,尤其是第四代核能系统的技术逐渐成熟和应用,核能有望超脱出仅仅提供电力的角色,通过非电应用如核能制氢、高温工艺热、区域供热、海水淡化等各种工业应用在确保全球能源安全和可持续性发展方面发挥巨大的作用,也是第四代先进核能系统的主要应用目标。

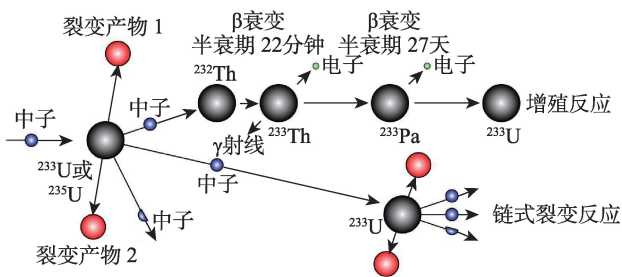


图2 ^{232}Th 的增殖反应和 ^{233}U 的链式裂变反应

对于第四代核能系统——钍基熔盐堆来说,利用熔盐作为传蓄热介质实现高温热利用是其相比其他反应堆型的重要优势。钍基熔盐堆具有出口温度高、能量密度高、功率输出稳定可调等特点,特别适合于高温核热的综合利用和多能融合。风能和太阳能具有资源丰富特点,但能量密度低、波动性大,存在产地与用地不匹配、产电与用电不同步的问题。超高温熔盐传蓄热技术,可将核能、光热、风电等存储在工作温度700℃及以上的熔盐系统之中,结合高温电解制氢和高效布雷顿循环发电技术,实现先进核能与可再生能源等清洁能源的大规模高效存储与转换,构建多能融合的核能-可再生能源复合能源系统(见图3)。

在核能综合利用领域,高温热化学循环制氢和高温电解制氢是重要的核能制氢技术,高温热化学循环制氢可以有效的利用反应堆产生的高温热,目前有上百条技术路线可以实现高温热化学制氢,其中碘硫循环是技术成熟度最高的一条技术路线。与常温电解相比,高温电解制氢技术电能消耗降低20%~30%,电解效率可以达到90%~100%,大幅度降低制氢工艺成本,同时可以利用价格相对低廉的金属氧化物来取代贵金属作为电极材料,降低制氢设备成本。

另外,在如此高的温度下发电显然更有效,因此也更经济,采用布雷顿循环发电技术可以获得

40%以上发电效率。高温工艺热应用和热电联产涉及核电厂与其他系统和应用的整合。目前,约20%的能源消耗是用于工艺热应用,而相比之下电力消耗为35%~40%。用核热取代化石燃料供热,在保证能源安全、减少碳排放、价格稳定性等方面具有巨大的优势,也是一个重要的选项。

核能用于海水淡化已被证明是满足全球日益增长的饮用水需求的一个可行选择,为面临严重缺水的干旱和半干旱地区提供了希望。核能海水淡化还可用于核电厂的有效水管理,特别是缺水地区,以确保核电厂建设,运行和维护的所有阶段都有定期供水。

目前核能主要用于发电,只有少数反应堆应用于区域供热、海水淡化,国际上正在积极探索核能高温制氢、以及高温工艺热在稠油热采、煤液化、冶金等领域应用的非电综合利用,其潜在应用市场的开发将很大程度上影响核能发展。

4. 中科院战略先导专项——钍基熔盐堆核能系统(TMSR)

(1) 钍基熔盐堆核能系统概述

2009年,中国科学院围绕国家能源安全与可持续发展需求,酝酿部署先进核裂变能研发,中国科

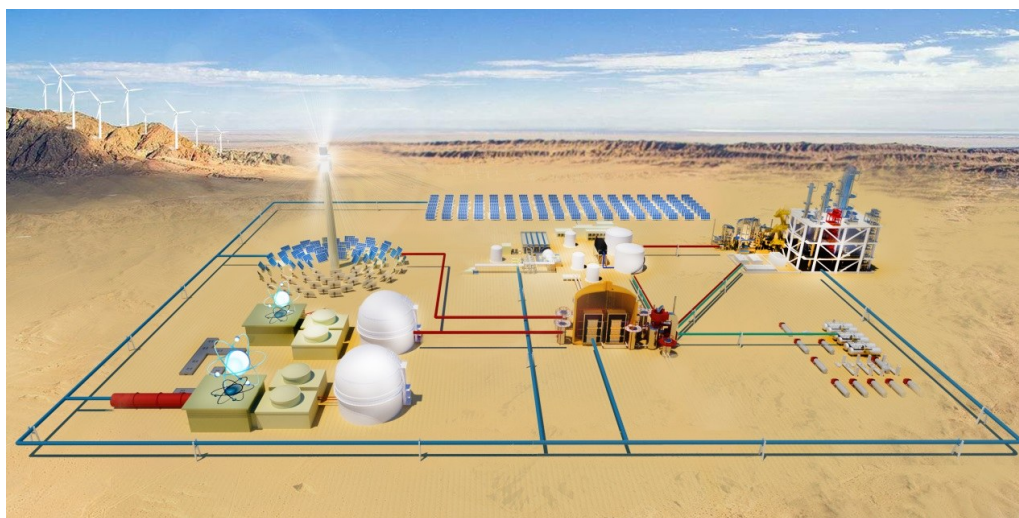


图3 多能融合的核能-可再生能源复合能源系统

学院上海应用物理研究所提出了以钍基燃料高效利用为战略目标、选择熔盐堆实现钍资源利用和核能综合利用两类重大需求、重启钍基熔盐堆核能系统研究的建议。2011年初,“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统(TMSR)”作为首批中国科学院战略性科技先导专项(A类)启动实施,长远目标是面向“一带一路”、节能减排与能源可持续发展等国家重大战略需求,用二十年左右的时间,开展以钍基熔盐堆为核心的新型低碳复合能源系统相关技术研发、实验验证与工程示范,最终实现核燃料多元化,确保我国核电长期发展和促进节能减排,实现防止核扩散和实现核废料最小化,为和平利用核能开辟一条新途径。专项近期科技目标由两部分组成。一是建成2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆,并形成支撑未来发展的若干技术研发能力;二是形成支撑未来TMSR核能系统发展的若干技术研发能力,包括钍基熔盐堆设计和研发能力、熔盐制备技术和回路技术研发能力、钍铀燃料的前道与后道技术研发能力、熔盐堆用高温材料的研发能力、熔盐堆安全规范制定和许可证申办能力等。

钍基熔盐堆核能系统包括钍基核燃料、熔盐堆、核能综合利用三个子系统,研发战略目标是利用储量丰富、防扩散性能好、燃料利用率高和产生核废料更少的钍基燃料,以解决核能长期可持续发展的国家需求。熔盐堆是整个系统技术链条上的基础与核心,目前已经发展了液态燃料和固态燃料两类熔盐堆概念。熔盐堆使用高温熔盐作为冷却剂,具有高温、低压、高化学稳定性、高热容等热物特性,无需使用沉重而昂贵的压力容器,适合于建成紧凑、轻量化和低成本的小型模块化反应堆;熔盐堆采用无水冷却技术,只需少量的水即可运行,可用于在干旱地区实现高效发电;熔盐堆输出温度达700℃以上的高温核热,可用于发电,也可用于工业热应用、高温制氢以及氢吸收二氧化碳制甲醇等,通过实现核能综合利用,以有力缓解碳排放和环境污染问题。

但由于是全新的堆型,还存在许多需要发展的技术以及解决的技术难点:针对熔盐堆尚无成熟的

反应堆设计理论、安全分析方法以及安全评估规范可供借鉴;合金结构材料应用于商业化熔盐堆,其耐高温、腐蚀和辐照问题还需要进一步验证;燃料、石墨与熔盐在化学特性上是兼容的,但对物理的渗透效应,还需要进行一系列实验检验;目前钍铀燃料循环的核数据相对铀钚燃料循环还不完善,需要开展大量钍铀燃料循环基础研究;燃料干法后处理技术目前也仅停留在实验室阶段,并未有实际应用经验,等等。

TMSR 先导专项自启动实施以来,几乎从零开始,在能力建设、科技研发等方面取得突破性进展,解决了一些研究中的关键科学问题,形成了完整的学科布局,整体达到国际先进水平,为TMSR研发奠定了坚实的科学技术基础。TMSR 先导专项跨单位组建和发展了一支专业齐全、年富力强的我国钍基熔盐堆科研队伍,队伍规模约750人。建立了覆盖TMSR各领域方向的基础研究实验室,包括计算平台、堆工程实验室、熔盐化学实验室、放射化学实验室及放射化学分析测试平台、材料性能测试与评估平台等。TMSR 先导专项开展了紧扣目标、卓有成效、以美国为主的国际合作,2011年中国科学院与美国能源部(DOE)签订了核能科技合作谅解备忘录(CAS-DOE NE MoU),在此合作框架下与美国核学会、ORNL 和美国机械工程学会在固态燃料熔盐堆安全标准和高温反应堆材料加工标准制定等领域开展了卓有成效的技术合作,2014~2016年该合作项目连续列入了第六~第八轮中美战略与经济对话框架下战略对话具体成果清单。

(2) 关键技术突破

TMSR 先导专项着眼关键材料与设备制造、设计及工程建设全部自主化,积极推进实验堆建设。实现了关键技术的系统突破,包括:

掌握了氟化物熔盐冷却剂和燃料盐的制备净化技术,自主研发了采用 H_2 -HF 鼓泡法的高纯氟化物熔盐制备净化装置,具备了年产吨级高纯氟化物熔盐的生产能力,研制了熔盐热物性测试设备,解决了高温熔盐粘度、密度、导热系数等关键参数测试难题,建

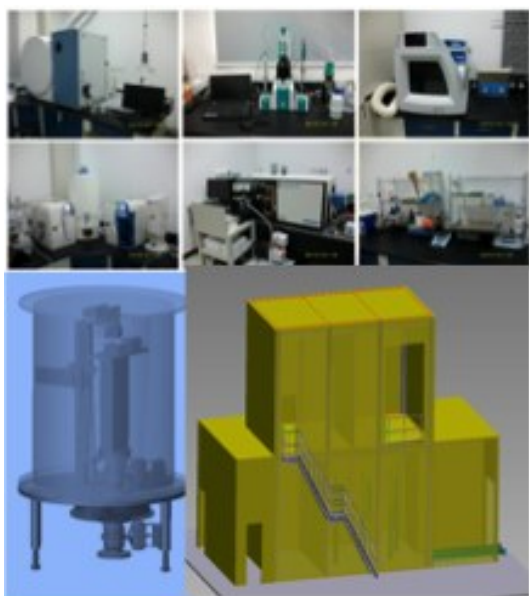


图4 熔盐制备净化和物性分析

成了系统完善的熔盐物性与结构研究平台(见图4)。

掌握了高温镍基合金批量生产制造、加工与焊接工艺,实现了熔盐堆用耐腐蚀镍基合金国产化,突破高硬度合金加工与热处理工艺中的技术瓶颈,实现了宽厚板材、大口径管材、大型环轧件的工业试制;系统开展了氟化物熔盐腐蚀机制、堆用合金材料腐蚀评价与防护技术研究,通过熔盐纯化、合金成分优化及表面处理等技术,解决了氟盐冷却剂腐蚀控制难题,堆结构材料镍基合金在氟化物熔盐体系中的静态腐蚀速率小于2微米/年(见图5)。

研发成功首款熔盐堆专用的细颗粒核石墨 NG-CT-50,解决了放大工艺(1400×600×350 mm³)中的关键技术问题,掌握了工业化生产技术,其力学、热学、纯度和均一性等各项性能满足熔盐堆需求,防熔盐浸渗性能优于进口核石墨;发展了绿色环保的溶剂萃取离心分离锂同位素技术,可以替代传统汞齐法,开发了具有独创结构的专用萃取剂,分离系数达到1.021,完成实验室规模串级实验,萃取离心分离获得满足熔盐堆需求的99.99%以上丰度的锂7;发展了基于氟盐体系的干法分离技术,氟化挥发、减压蒸馏和氟盐电化学分离技术研发取得重要进展,建立了温度梯度驱动的创新蒸馏技术,极大地提高了熔盐的回收率和回收品质,建立了阶跃式

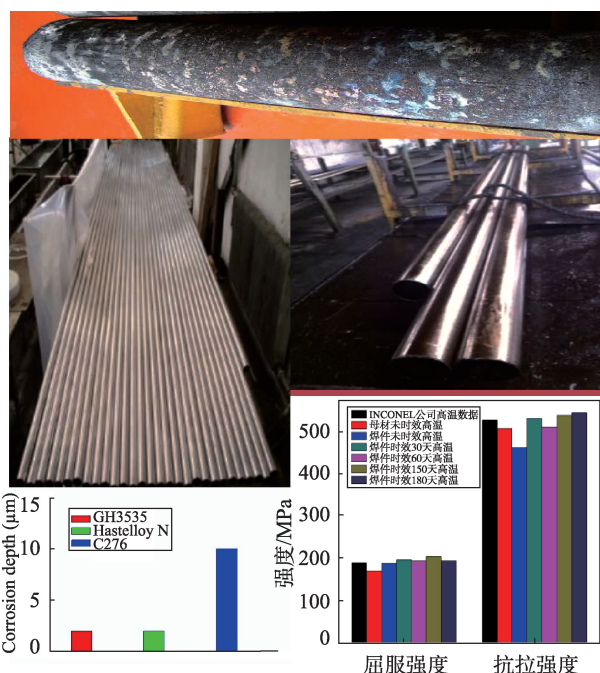


图5 合金制造加工和腐蚀控制

脉冲电流电解技术,在FLiBe-UF₆熔盐体系电解分离得到金属铀,分离率超过90%。

(3) 原型试验系统

TMSR 先导专项完成了四个原型系统的建设,包括:

钍铀燃料循环系统 通过物理模式分析和堆型优化设计,提出创新的钍铀循环方案,除首次装堆需要裂变燃料外,其后各次循环只需提供增殖材料钍;核燃料利用率随着循环次数增加而不断增长,最终可实现完全闭式的钍铀燃料循环(见图6)。采用先进的干法处理技术,筛选和确立了全新的后处理流程,实现了包括氟化挥发和减压蒸馏技术的在线处理工艺段冷态贯通,回收铀产品中 Sr、Cs 和稀土类裂变产物的去污系数大于 10⁵,载体盐中稀土裂变产物的去污系数达 10²。

熔盐实验堆设计系统 在通用的反应堆设计和分析软件基础上,开发建立了满足熔盐实验堆中子物理、热工水力和结构力学等设计分析需要的软件体系。完成了 2 MW 液态燃料熔盐实验堆和 10 MW 固态燃料熔盐实验堆工程设计,解决了高温熔

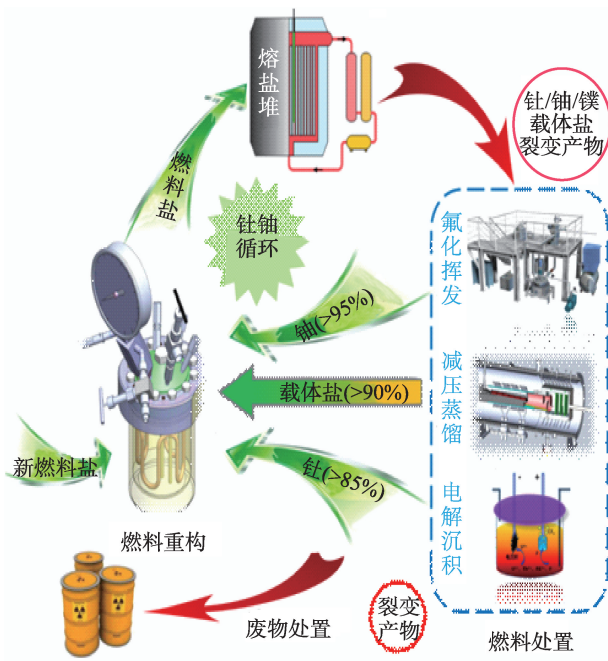


图6 钍铀燃料循环流程和关键技术

盐环境下主容器、堆内构件及其密封、支撑和隔热设计等多项关键技术。完成了控制棒驱动机构样机、球形燃料元件装卸机构原理装置、熔盐热工水力测量等仪表样机以及保护系统样机等研制,开展了相关测试和实验验证。

系列高温熔盐回路系统 掌握了熔盐回路热工水力、结构力学设计方法和高温密封、测量与控制等关键技术,研制成功国内首台套氟盐体系泵、阀、换热器、流量计、压力计等样机(见图7)。先后建成硝酸盐热工试验回路和工程规模的氟盐(FLiNaK)高温试验回路,成功进行了关键设备样机的性能测试和运行考验,开展了大量热工和力学特性研究,获得了熔盐回路运行经验和重要热工水力数据(见图8)。

钍基熔盐堆安全与许可系统 完成了熔盐堆非基岩上构筑物抗震设计标准和熔盐实验堆 II 类堆



图7 氟盐体系泵、阀、换热器

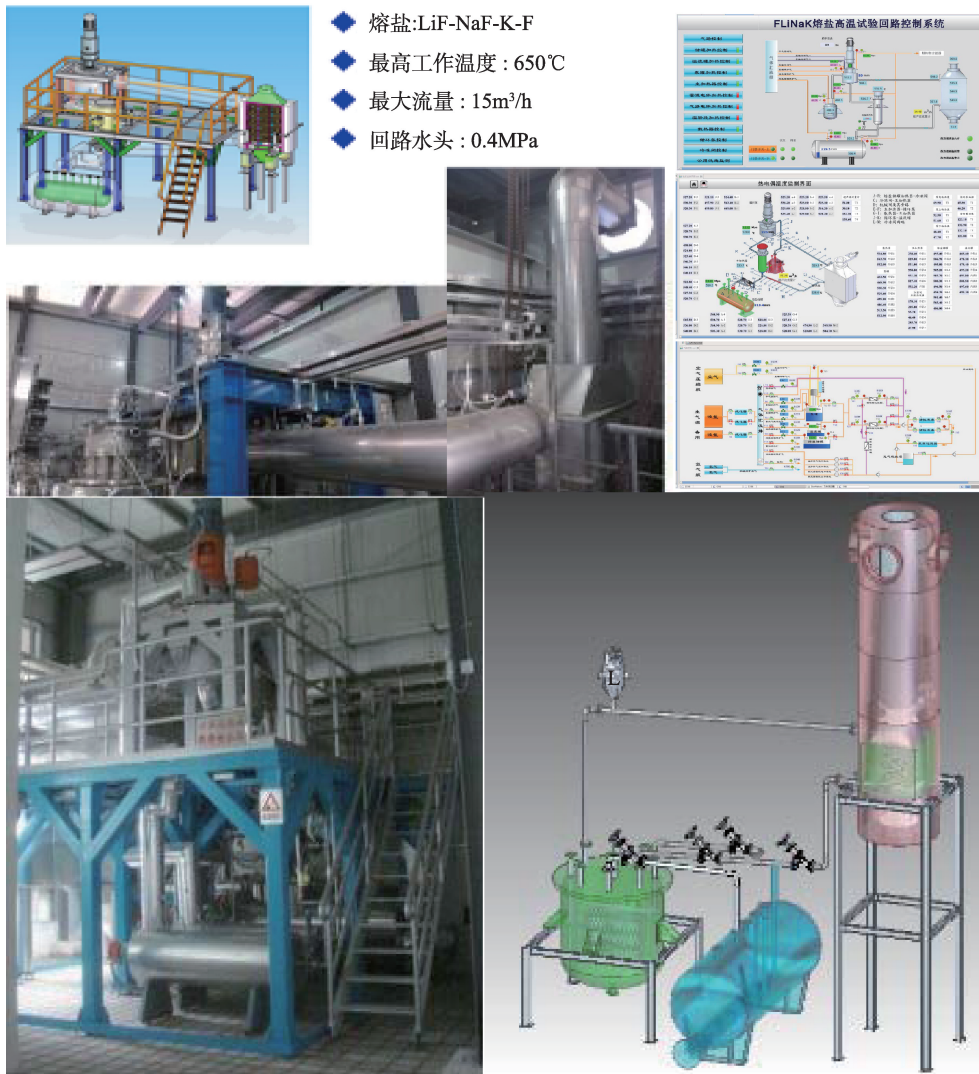


图8 系列高温熔盐回路系统

安全分类论证,论证了非基岩上建反应堆的可行性,获得国家核安全局的认可。作为联合主席成员单位参与共同编制国际液态和固态燃料熔盐堆安全标准。建成了工程规模的非能动熔盐自然循环实验装置,首次验证了熔盐自然循环余热排出系统的固有安全性。

(4) 钍基熔盐堆研发产业链

TMSR是新堆型,还有许多需要发展的技术以及需要解决的技术难点,主流产品体系架构与主要产业链尚未形成和完善,这为中国开展相关产业部署和引领国际发展提供了极大的机遇。通过

先导专项五年的实施,TMSR研发已经取得了很好的进展,初步建立起具备较强自主创新能力、与产学研用紧密结合的产业体系,TMSR研发过程中掌握的多项先进技术,不仅可以用于熔盐堆研发,也为我国新型材料、核心部件、高端装备产业发展提供重要的技术储备,具备很好的市场转化能力。TMSR中心掌握了高端熔盐与镍基合金的技术,可广泛应用到太阳能集热、熔盐相变储能等非核应用中;研发的环保型离心萃取法实现了锂同位素的分离并获得高丰度锂-7,该技术达到世界领先水平,有望应用于分离其它轻同位素,如碳-13、氮-15、氧-18、氟-18等,并将在医学、药理学、生物

学、农学及环境科学等领域得到广泛应用;高温氟盐相关熔盐回路、堆本体及仪控系统等相关设备在国内外均无成熟产品,目前在关键设备样机研制及其台架试验验证已取得重大进展,完成了HTS回路、高温氟化盐(FLiNaK)热工试验平台、控制棒驱动机构、高温熔盐泵、冷冻阀、空气换热器等TMSR实验堆关键设备样机研制,为产业化应用奠定了坚实基础。

TMSR研究将是我国产学研深度融合、创新发展的成功典范,使一流的科研院所与优势企业深度合作,形成具有自主知识产权的核心技术,打造基于TMSR的从核能材料产业、核电装备制造、熔盐堆设计集成到核能综合利用的一体化核能创新产业链(见图9)。通过TMSR研发,将建成拥有国际上最先进、最完备实验设施和条件、以工业应用为目标的世界级TMSR研究中心;成为国际上TMSR相关领域系统科学知识、成套关键技术与装备(含材料与核心部件)和科学技术骨干的主要来源;将以技术创新提升我国先进核能研发能力,引领和带动

产业发展,从而大幅提升我国先进核能制造业和服务业的水平,为加快推进我国能源结构转型和核能优化配置、使我国从核电大国成为核电强国做出重大贡献,为我国能源安全、节能减排、西部大开发提供系统的解决方案。

5. 我国钍基熔盐堆发展战略和展望

钍基熔盐堆以氟化盐为冷却剂,具有本征安全性、可持续发展性、防核扩散性和高温输出的特点,结合其可无水冷却的优势,适合于高温核热综合利用、小型模块化堆应用以及缺水地区应用等诸多用途。四十年前,我国开始了钍基熔盐堆的研发,但限于当时的技术条件,研发工作在20世纪70年代初停止,随着科学技术的进步、工业能力的提升以及能源需求的增长,钍基熔盐堆的商业化具有极高的可行性。

我国于2011年部署的TMSR战略先导专项致力于发展熔盐堆技术,以最终实现基于熔盐堆的钍

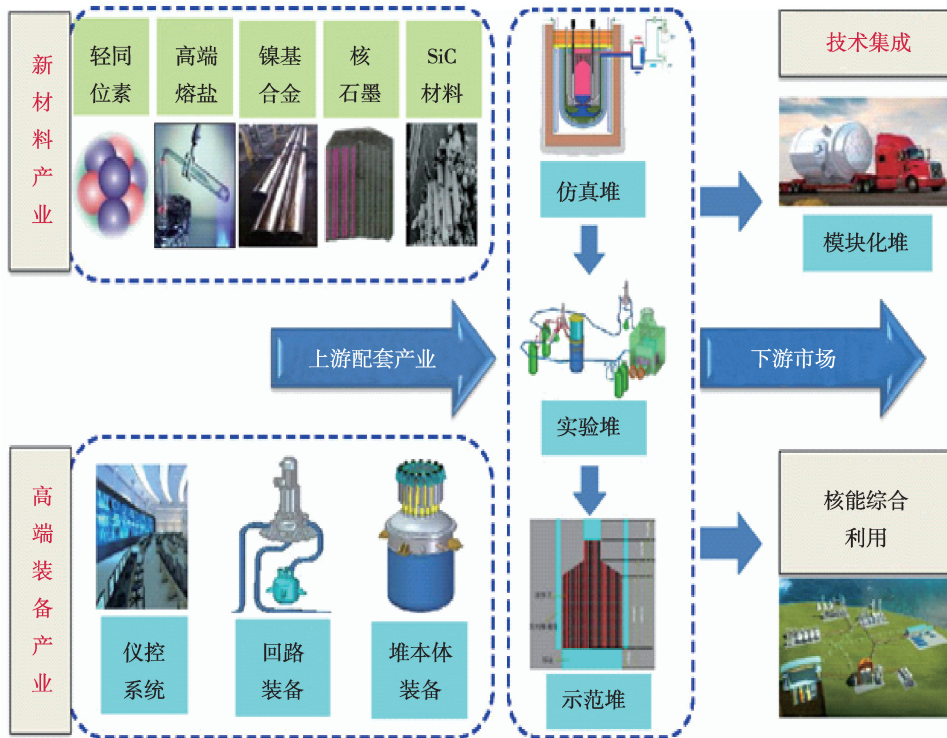


图9 产学研深度融合打造钍基熔盐堆研发全产业链

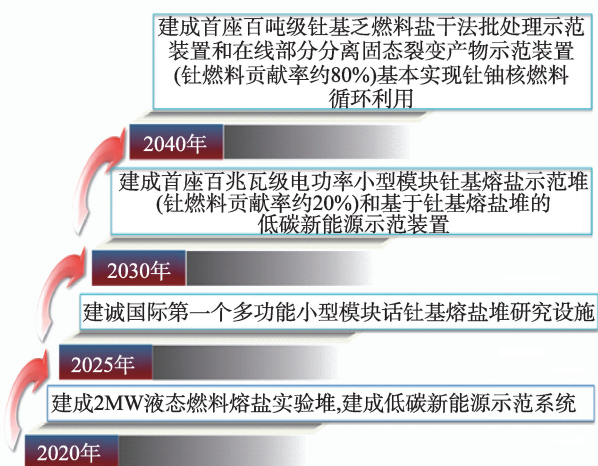


图10 钍基熔盐堆核能系统发展路线图

资源高效利用。(见图10)迄今为止,专项已在熔盐堆原型系统与关键技术研发方面取得一系列重要成果,已经建成世界上首座TMSR仿真装置(TMSR-SF0),计划在2020左右建成2MW液态燃料TMSR实验堆(TMSR-LF1),形成支撑未来发展的若干技术研发能力,实现关键材料和设备产业化;发展小型模块化技术,到2025年左右建成国际第一个多功能小型模块化钍基熔盐堆研究设施;到2030年左右全面实现掌握TMSR相关科学与技术,基本完成TMSR工业示范堆建设和基于TMSR的低碳新能源示范装置建设,开展熔盐堆的商业化推广;到2040年左右建成首座百吨级钍基乏燃料盐干法批处理示范装置和在线部分分离固态裂变产物示范装置,基本实现钍铀燃料循环。



科苑快讯

人们提及男性科学家时更易引用姓氏而不是名字

达尔文、牛顿、爱因斯坦,当科学家的名望达到一定高度时,只需提他们的姓氏,而不需要再用名字了。对于男性科学家尤其如此,这是最新研究得出的结论。不只是科学家,政治家、运动员和其他高知名度人物,如果是男性的话,人们会更多地倾向于单独引用他们的姓氏。

研究者在一系列研究中揭示了性别差异,首先研究了学生们是如何在网络评论中提及教授的。研究者调查了14所美国大学学生对生物学、心理学、计算机科学、历史学和经济学课程的4494份评论。总的来说,男性教授单独被提及及姓氏的情况比女性教授多56%,研究组在《美国科学院院刊》(*Proceedings of the*

National Academy of Sciences)上做了报告。性别差异最大的是计算机科学,提到男性教授时单独引用姓氏的评论占48%,而女性教授只占18%。

在另外三项研究中,男性在其他语境中也更容易被姓氏单独指代。其中一项研究显示,专家在脱口秀节目中使用男性姓氏的情况比女性多126%。另一项研究中,参与者在谈到男性名人(比如乔·拜登、卡尔·萨根)时,74%更倾向于用姓氏,比提到女性名人(比如简·奥斯汀、玛丽·居里)时的情况要多。

(高凌云编译自2018年6月25日 www.sciencemag.org)