

钍基熔盐堆核能系统

蔡翔舟 戴志敏 徐洪杰[†]

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2016-08-07 收到

[†] email: xuhj@sinap.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160904

Thorium molten salt reactor nuclear energy system

CAI Xiang-Zhou DAI Zhi-Min XU Hong-Jie[†]

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

摘要 裂变核能是保障能源增长需求和促进节能减排的重要手段。钍基核能具有中子增殖性能好、产生高放废料少和储量丰富等特点；熔盐堆作为第四代先进反应堆的6个候选堆之一，具有钍高效利用、高温制氢、无水冷却、适合小型模块化设计等优势 and 潜力。发展钍基熔盐堆，对中国的核能战略发展具有重要意义，将会有助于解决中国的能源和环境双重挑战。2011年1月，中国科学院启动战略性先导科技专项——钍基熔盐堆核能系统(TMSR)，采取液态熔盐堆和固态熔盐堆两种堆型研发同时部署和相继发展的技术路线，致力于实现基于熔盐堆的钍资源高效利用和核能综合利用，为我国核能发展赢得先机。

关键词 钍基熔盐堆核能系统，钍资源利用，核能综合利用

Abstract Nuclear fission energy has incomparable advantages in satisfying our ever growing need for energy and environmental protection. The importance of thorium-based nuclear fuel has become increasingly prominent because of its excellent breeding capability in both thermal and fast reactors, lesser long-lived minor actinides resulting from fission, and abundant reserves of thorium. One of the six IVth-generation reactor candidates, the molten salt reactor (MSR), has characteristics including high thorium energy conversion, hydrogen production at high temperature, water-free cooling, and small modular design. These properties make MSRs one of the best approaches to solve the energy and environment issues of China.

In January 2011 the Chinese Academy of Sciences launched the “Thorium molten salt reactor nuclear energy system” project of the Strategic Priority Program, which will develop both liquid and solid fuel MSR. It will aim to realize effective thorium energy utilization and comprehensive utilization of nuclear energy in twenty to thirty years. Research has already commenced and achieved some results in key technologies. Although there are still several challenges for Th-U fuel cycle and MSR development, it can be expected that the project will help solve the energy problem as well as maintain sustainable development in China for many years to come.

Keywords thorium molten salt reactor nuclear energy system, thorium energy utilization, comprehensive utilization of nuclear energy

1 概述

1.1 核能是解决能源和环境问题的重要战略选择

能源和资源的稳定供应是保障我国长期可持续发展的必要基础,目前能源消费主要依赖于以煤为主的化石能源,其能源利用效率低下,使得主要耗能产品的单位能耗要比发达国家高12%—55%,同时会产生惊人的物质流和废料流,对交通运输带来巨大压力;煤消耗会产生大量CO₂(即温室气体),其大量排放被国际社会认为可能是引起全球气候变化的最重要因素^[1]。中国现在已经是世界第一大碳排放国,在未来很长一段时间内将面临着能源需求持续增长和CO₂减排的双重压力。2014年11月12日,中国习近平主席与美国奥巴马总统在正式发表的《中美气候变化联合声明》中指出,中国计划2030年左右CO₂排放达到峰值且将努力早日达峰,并计划到2030年非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右,因此发展低碳清洁能源将会是我国能源发展战略的唯一选择。

核能是一种能量密度高、洁净、低碳的能源,是保障国家能源安全、促进节能减排的重要手段,大力发展核能已成为我国能源中长期发展规划的战略重点^[2]。安全是核能发展的生命线,福岛核事故后,越来越多的国家包括美、法、俄等传统核电强国和韩国、印度等新兴核电国家,都采取多种手段,一方面整合核电资源,加快核电产业发展,同时将主要研发力量投入到拥有更高固有安全性、核燃料可循环、物理防止核扩散和更好经济性等特点的第四代核先进反应堆技术中,以期占领国际技术和市场的制高点^[3, 4]。

1.2 钍基核能和熔盐堆

发展裂变核能必须有足够的易裂

变核素——核燃料供应,人类迄今发现的有商业价值的易裂变核素只有3个:铀-235、钚-239和铀-233。其中,铀-235是自然界唯一天然存在的易裂变核素,钚-239需由较难裂变的铀-238吸收中子后转换而来,又称为铀基核燃料(铀基核能);而铀-233则需由较难裂变的钍-232吸收中子后转换而来,又称为钍基核燃料(钍基核能)。钍铀转换的裂变反应链见图1。

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,对核燃料需求越来越大,要解决燃料短缺的问题,降低对铀资源的需求,一方面可以走快堆模式,提高铀基核燃料的利用率,但是也会带来潜在的核扩散问题;另一方面可开发利用储量大于铀基核燃料的钍基核燃料。地球上钍资源的总储量是铀资源的3—4倍,钍基核燃料的有效利用对于人类的发展有着巨大的价值,特别是我国钍资源丰富,预计如能实现钍完全循环利用,可供使用几千年以上,将成为核能可持续发展的战略保证^[5, 6]。天然钍具有α放射性,既是潜在的核能资源,同时又是放射源,应充分注意防止钍污染环境,钍资源通常是其他矿产资源的共生矿,例如在包头白云鄂博,钍矿、铁矿和稀土金属矿是共生矿,目前在开采铁矿和稀有金属的同时,对钍放任不管任其流失,既污染环境,又浪费核能资源。科学合理利用我国丰富的钍资源,在避免环境污染与资源破坏的同时进行未来核燃料储备,已成为众多专家的共识^[7—9]。

钍基核燃料研究与铀基核燃料一样,也始于

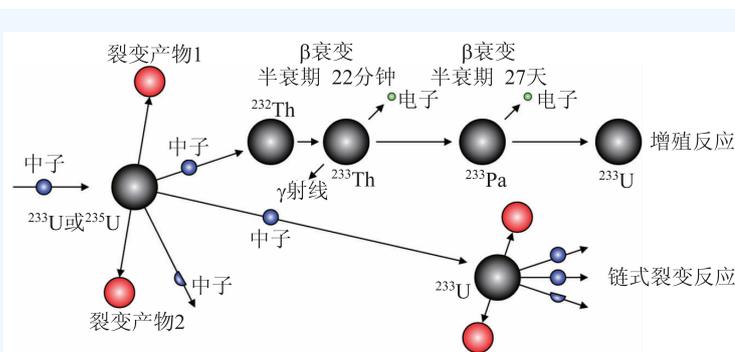


图1 ²³²Th的增殖反应和²³³U的链式裂变反应

美国“曼哈顿”计划,经过几十年研究,科学界已经基本了解钚基核燃料相关知识,并且发展了一定的应用技术。钚基核能钚铀转换效率高,铀-233在热谱、超热谱以及快谱内都有较大的有效裂变中子数,中子经济性好,因此钚在热中子堆中也能实现增殖;钚基燃料产生的钚和长寿命次锕系核素较少,放射性毒性相对较低;钚铀转换的中间核素 ^{232}U 会产生短寿命强 γ 辐射的衰变子核 ^{208}Tl (铊),这种固有的放射性障碍增加了化学分离的难度和成本,易被核监测,有利于防核扩散;钚和氧化钚化学性质稳定,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,这些优点使得钚基反应堆允许更高的运行温度和更深的燃耗^[6, 10]。

钚基核能不易用于制造武器,是更理想的民用核燃料,但由于上世纪发展核武器重要性远远大于发展民用核能,钚在核能中的发展一直处于从属地位。使用钚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,钚基核燃料使用的技术关键是开发合适的反应堆型^[6]。半个世纪多以来,关于钚在核能方面的利用研究取得了许多成果,目前全世界运行过的加钚反应堆超过10座^[5],例如美国希平港的轻水增殖堆,它是第一座使用钚达到增殖的反应堆^[11];美国橡树岭国家实验室的MSRE,它是迄今为止唯一一座长期稳定运行的熔盐堆^[12]。

2000年,美国DOE牵头发起第四代反应堆国际论坛(Generation IV International Forum, GIF)^[4],目标是开发出一种或若干种革新性核能系统,GIF将第四代先进反应堆的定义扩大为包括核燃料前处理、反应堆技术、核燃料后处理的反应堆核能系统,提出了更高的经济性、安全性、核废料最小化和防扩散性要求,并筛选出了6种最有希望的第四代候选堆型,熔盐堆(Molten Salt Reactor, MSR)是其中唯一的液态燃料反应堆。液态燃料熔盐堆(MSR-LF)将燃料盐直接溶于氟盐冷却剂中,其中液态氟化盐既用作冷却剂,也作为核燃料的载体。燃料可以为 ^{235}U 、 ^{233}U 、 ^{239}Pu 以及其他超铀元素的氟化物盐;冷却剂熔盐一般为如

下盐中两种或者多种盐的共晶混合物: LiF 、 BeF_2 、 NaF 、 KF 、 RbF 、 ZrF_4 、 NaBF_4 ,其中 $2\text{LiF}-\text{BeF}_2$ 的共晶混合物由于具有较好中子吸收和慢化特性,被认为是一回路盐的首选目标。经过几十年的发展,熔盐堆在原有液态燃料堆概念基础上扩展出来固态燃料熔盐堆(MSR-SF,也称为氟盐冷却剂高温堆——FHR)的概念,仅将氟化熔盐作为冷却剂传输热量,采用碳化硅密封、石墨包敷的燃料颗粒(TRISO)作为核燃料,继承了来自多种反应堆的包括非能动池式冷却技术、自然循环衰变热去除技术和布雷顿循环技术等,技术成熟度高,其商业化在当前技术基础条件下具有极高的可行性^[13]。

氟盐冷却剂的物理化学性质决定了熔盐堆具有能量密度高、无水冷却、常压工作和高温输出($\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$)等特点。液态燃料熔盐堆以氟化熔盐及溶解在其中的钚或铀氟化物组成的熔合物为燃料,无需燃料元件制作;燃料盐的负反应性温度系数和空泡系数大,具有很好的固有安全性;熔盐具有良好的热导性和低的蒸汽压,可在高温、低压状态下运行;燃料盐中产生的裂变产物,可以连续地被移入化学处理厂进行在线处理,避免了放射性废物长期贮存在堆内;熔盐常温时为固态,可从根本上避免因泄漏而导致大量的核污染,对生物圈和地下水位线的防护要求没有那么严苛,适合建于地下,可以有效防止自然灾害与战争、恐怖袭击的威胁。

钚基熔盐堆核能系统致力于实现基于熔盐堆技术的钚资源高效利用,液态燃料熔盐堆结合连续添换料和在线后处理,易于实现钚基核燃料的增殖,是国际公认利用钚基核能的理想堆型;固态燃料熔盐堆中的流动球床型设计可以不停堆连续更换燃料球,也可在改进的开环模式下实现钚基核燃料的部分利用。在技术层面上,两类熔盐堆存在共同技术基础和梯次研发需求,固态燃料熔盐堆可以作为液态燃料熔盐堆的预先研究,两者的研发可同时进行,相继发展。钚基熔盐堆核能系统具有更高的固有安全性,可建于地下或内陆干旱地区,可用于高温制氢,二氧化碳加氢制

甲醇，对减少温室气体排放有重要意义。

2 钍基熔盐堆核能系统(TMSR)

2.1 TMSR的历史起源

熔盐堆的早期概念为液态燃料熔盐堆(MSR-LF)，其研究始于上世纪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)。1946年5月28日，美国空军启动核能飞行器推进(Nuclear Energy for the Propulsion of Aircraft, NEPA)工程，1951年5月代之以ANP(Aircraft Nuclear Propulsion)计划，核动力轰炸机中计划采用4个核动力涡轮发动机，设计功率为200 MW，由熔盐堆反应产生的热能取代喷气发动机内的燃料燃烧提供动力，可连续飞行数周时间。

美国橡树岭国家实验室(ORNL)承担了ANP计划中核能引擎反应堆的研发任务，于1954年建成第一个熔盐堆实验装置ARE(Aircraft Reactor Experiment)，功率为2.5 MW_{th}，燃料为NaF—ZrF₄—UF₄混合物。ARE成功运行了1000个小时，总积分功率为96 MW-hr，运行最高温度达到882℃，展示了很好的稳定性以及易控制性^[13, 14]。熔盐堆设计理念具有许多超过常规反应堆的明显优势，熔盐堆运行压力低，不需要现今反应堆常见的大型压力容器；可以使用不同的燃料，甚至能焚烧其他反应堆产生的超铀元素废物；熔盐堆能设计成自己增殖燃料而无需场外处理。

战略弹道导弹的迅速发展使核动力轰炸机研发失去了军事应用价值，熔盐堆于上世纪60年代研发转向民用。ORNL于1965年建成8 MW_{th}的液态燃料熔盐实验堆(MSRE)(图2)，MSRE成功运行了将近5年，通过大量实验研究证实了：7LiF—BeF₂—ThF₄—UF₄可以成功用于熔盐增殖堆，具有非常好的辐射稳定性；石墨作为慢化剂与熔盐相容；Hastelloy N合金可成功应用于反应堆容器、回路管道、熔盐泵、换热器等部位，腐

蚀被控制在较低水平；裂变产物氦和氩可从熔盐中分离；熔盐堆可使用不同的燃料，包括²³⁵U、²³³U和²³⁹Pu^[12, 15]。

MSRE的成功运行充分证明了液态熔盐堆运行的稳定性和安全性，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。研究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，利用液态熔盐堆技术理论上可以实现完全的钍铀燃料闭式循环。1970年代，ORNL完成了2250 MW_{th}增殖熔盐堆(Molten Salt Breeder Reactor, MSBR)的设计。由于上世纪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，放弃了更适合钍铀燃料循环、侧重于民用的熔盐堆。

美国MSRE的巨大成功和适用于钍基核燃料的特点引起我国科学界和政府的高度重视。上世纪70年代初，我国科研人员选择钍基熔盐堆作为发展民用核能的起步点，一座零功率冷态熔盐堆于1971年建成并达到反应堆临界，通过开展各类物理实验取得了丰富的实验结果。限于当时的科技水平、工业能力和经济实力，我国民用核能转向了轻水反应堆研发并最终建成秦山一期核电厂。

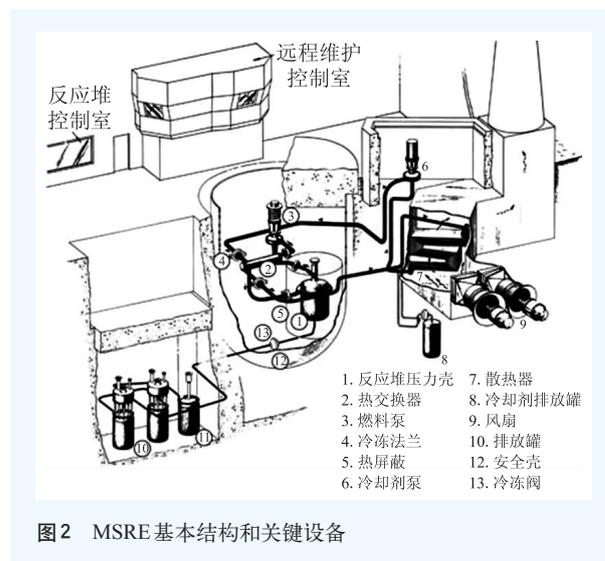


图2 MSRE基本结构和关键设备

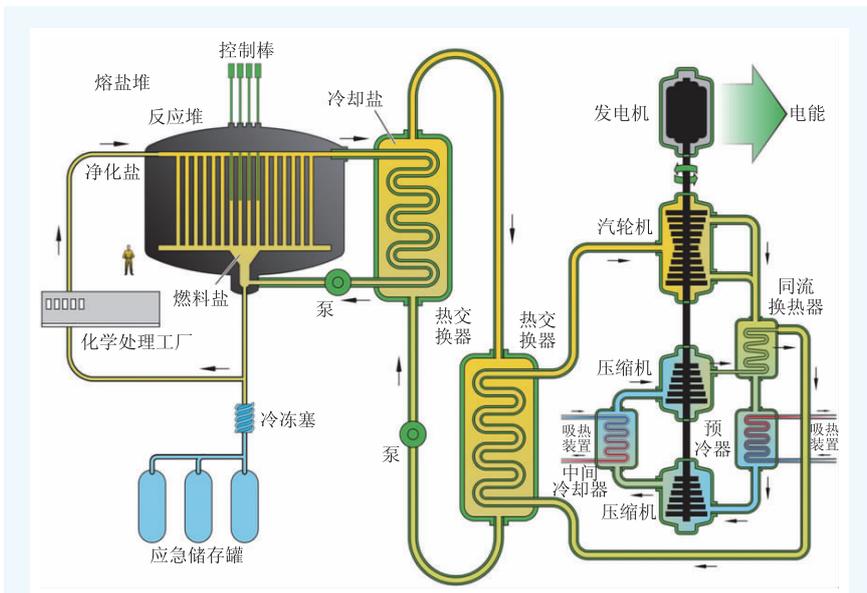


图3 TMSR系统示意图

等。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，反应性控制系统、堆内相关测量系统、堆芯冷却剂流道等布置在堆本体相应的结构件中，其主要功能是容纳堆芯中的石墨熔盐组件、堆内构件及相关的操作与控制设施。回路系统由一回路带出堆芯热能，二回路将一回路熔盐热量传递给第三个氦气回路推动氦气轮机做功发电。燃料盐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，主要功能是对辐照后的液态燃料盐进行在线后处理，回收并循环利用燃料和载体盐。

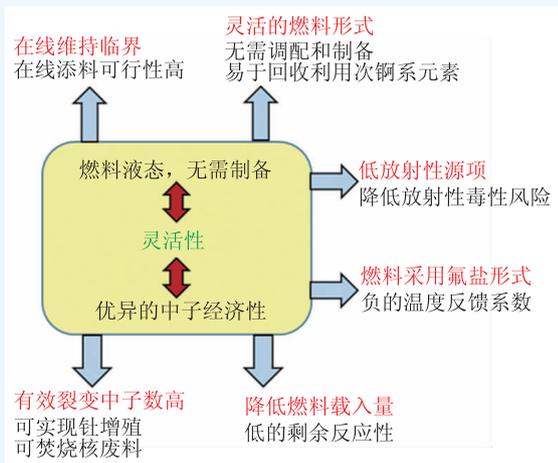


图4 TMSR特性结构图

统、放射性三废处理系统及其他辅助系统，主要功能是对辐照后的液态燃料盐进行在线后处理，回收并循环利用燃料和载体盐。

液态燃料TMSR具有以下特点(图4):

(1)更好的本征安全性：由于燃料本身就是熔化的，无需专门制作固体燃料组件，节省了加工费用，也不存在堆芯熔化风险，避免了其他堆型可能产生的最坏事故；熔盐的低蒸气压减少了破口事故的发生，即便发生破口事故，熔盐在环境温度下也会迅速凝固，防止事故进一步扩展，可避免管道高压爆炸，降低管道要求，管道造价低；燃料盐具有较大的负反应性温度系数和空泡系数，对反应堆调节和运行安全都具有重要意义；在后处理方面只需小型的后处理工厂即可为1 GW功率的TMSR服务，采用连续燃料净化方式，避免了放射性废物长期贮存在堆内，降低了放射性安全风险。

(2)可灵活地进行多种燃料循环方式(如一次利用、废物处理、燃料生产等)：用于焚烧的核废物也无需制作燃料元件，减少了燃料制备的强放射性；卸出的核废物仅为裂变产物并且放射水平较低，处理工序相对简单，采用永久处置对生物圈影响小；由于采用燃料连续在线处理，在热谱、超热、快谱均有较好的增殖性能，可以设计

2.2 TMSR的原理与特点

钚基熔盐堆核能系统的主冷却剂是一种熔融态混合盐，可在高温下工作以获得更高的热效率，还可保持低蒸汽压从而降低机械应力。核燃料既可以是固体燃料棒，也可以溶于主冷却剂中，从而无需制造燃料棒，简化反应堆结构，使燃料均匀化，并易于实现在线燃料后处理^[16, 17]。

液态燃料TMSR的基本结构及功能划分如图3所示，主要包括堆本体、回路系统、换热器、燃料盐后处理系统、发电系统及其他辅助设备

为具有增殖性能的全闭燃料循环模式反应堆，实现核资源的可持续发展；裂变产物种类少，含量低，使堆内中子利用率更高，对于熔盐快堆，超铀元素通过直接裂变或者嬗变为易裂变核素方式最终可被完全焚烧掉。

(3)可有效利用核资源和防止核扩散：熔盐堆可不需要特别处理而直接利用铀、钍和钷等所有核燃料，也可利用其他反应堆的乏燃料，还可利用核武器拆解获得的钷；由于熔盐堆不使用或使用少量的浓缩铀，并产生极少的可以制造核武器的钷，所以可有效地防止核扩散。

(4)热功率密度高、适合小型模块化设计：由于一回路的高温、低压特性可以使堆芯结构更为简单，因此可以设计成具有较高功率输出的小型反应堆。军用方面，由于运行无需控制棒、不停堆换料、寿命长、功率易调等特点，为建造核动力潜艇以及航空器提供了可能；民用方面，亦可以通过建造几个百MW级的小型模块熔盐堆，从而减少电站建设的支出和经济风险。

(5)功能多样性及灵活性：熔盐堆可运行在比较高的温度，同时熔盐具有很好的导热性，因此可以很好地匹配到制氢、制氨、煤气化、甲烷重整等所需的温度条件上。具有功能多样性，如电力、供热、煤气化、甲烷重整、制氢(热化学或高温电解)；同时具有灵活性，可适用于传统的蒸汽式朗肯循环，尤其适合布雷顿循环(发电效率高达45%—50%)，工质可以是氦气或氮气。

(6)地下建造：熔盐常温时为固态，避免了因泄漏而导致大量的核污染，对生物圈和地下水位线的防护没有那么严苛，因此熔盐堆也适合地下建造，将反应堆建造在地表以下，上面覆盖有护盾，其中常规岛部分在地面以上。地下建造既避免了恐怖袭击、飞机坠落、龙卷风等威胁，又防止事故发生对生物圈的影响；熔盐堆配有应急储存罐，方便应急处理，事故发生时，冷冻塞熔化，所有熔盐均流入储罐中，恢复正常时再将熔盐填回堆芯。

液态燃料 TMSR 具有良好的经济性、安全性、可持续性和防核扩散性，其商业化在当前技

术基础条件下也具有极高的可行性，但是针对堆运行温度高、熔盐腐蚀性强和后处理技术不成熟的特点，还需要开展很多基础性工作和克服存在的技术难点，包括：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核反应堆技术，尚无成熟的反应堆设计和安全分析方法以及安全评估规范可供借鉴；燃料盐连续在线后处理技术的可行性需要进行进一步的实验验证；熔盐堆中流体燃料直接接触石墨，因此熔盐堆对于核纯级石墨密封工艺和制造工艺要求较高；燃料盐直接接触管壁，管壁受到的中子通量较高，因此制作管壁的材料需要有较高的耐中子辐照性能；镧系和铀系元素的溶解性、辐照后熔盐与结构材料和石墨的兼容性以及金属偏聚和氡控制等问题。

3 TMSR 发展现状及趋势

3.1 国际研究现状

近年来，由于能源环境问题成为全球新的热点和冷战时代的终结，熔盐堆研究重新成为先进核裂变能领域的热点，被选为四代堆六个最有希望的候选堆型之一，堆型概念扩展为液态燃料熔盐堆和固态燃料熔盐堆两类。世界各国纷纷启动了相关基础研究计划，欧洲和俄罗斯的熔盐堆研究计划和项目着眼于长期和对基础问题的探索，重点在液态燃料熔盐堆，兼顾钍铀燃料和钍钷燃料；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钍基熔盐堆的研究工作，韩国已经启动了固态燃料钍基熔盐堆研究计划^[18-22]。

欧美各国积极推进国际合作并组建合作机构，2001年MOST(Molten Salt & Molten Salt Reactor Technology)项目开始建立，由欧洲原子能共同体和其中六个国家参与，2004年俄罗斯加入，MOST计划针对世界上有关熔盐堆发展状况，评价了三个嬗变和两个增殖的熔盐堆概念设计：TIER, AMSTER-I, SPHINX, MSBR, AMSTER-B。随

后启动了 ALISIA(2006 年), SUMO(2009 年), EVOL(2011 年)和 SAMOFAR(2015 年)等研究项目,对欧盟熔盐堆路线的基准设计 MSFR (Molten Salt Fast Reactor)开展初始设计和安全方案优化、可行性评估以及关键技术研发。

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)(图 5)、日本的 Fuji-MSR 等^[19-22],并进一步评估其可行性、安全性和经济性等要素。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。

法国科学研究中心(CNRS)对于熔盐堆的研究开始于 1997 年,在重新验证及研究美国 MSBR 设计的基础上,提出了 MSFR 设计,其堆芯设计的主要方向为:无石墨慢化、增加径向再生盐、利用快中子能谱。MSFR 在燃料循环时候采取 ^{235}U 启动和超铀元素启动两种方式,具有非常大的负反馈系数,较大的增殖能力和简单的燃料循环模式,能够焚烧其他反应堆内产生的超铀元素。

俄罗斯为实现轻水堆乏燃料中超铀核素的高效嬗变,提出不使用 U—Th 循环,而是采用超铀元素作为燃料的熔盐堆,建立用于燃烧 Pu 和 MAs 的 MOSART 堆,其堆芯内部无任何固体构件,有较高的可控性和安全性,系统具有内在的

动力学稳定性,只需适中的反应性控制能力就可以控制。MOSART 堆功率为 $2400\text{ MW}_{\text{th}}$,使用均匀的熔盐体系,有足够的负反应性温度系数。在 100 年的运行周期中,对超铀核素的设计嬗变效率可以达到 0.83。

日本 FUJI 熔盐堆的概念设计来源于美国 ORNL 的 MSBR 设计, FUJI-12 拥有和 MSBR 相同的熔盐燃料,但在某些方面它不同于 MSBR 的设计,例如不需要在线的燃料处理工厂、较低的额定功率等。FUJI-12 热功率为 $350\text{ MW}_{\text{th}}$,剩余反应性较小,仅在熔盐燃料通过石墨慢化剂的空道时才能达到临界,安全事故容易探测,运行期间仅少量的熔盐燃料需要添加,几乎可以实现核燃料的自持循环。

加拿大的 TEI 公司(Terrestrial Energy Inc.)于 2013 年提出功率为 $80\text{—}600\text{ MW}_{\text{th}}$ 的小型模块化堆 IMSR(Integral Molten Salt Reactor)设计。IMSR 采用石墨作为慢化剂,采用低富集铀作为燃料,采用紧凑的可替换堆芯,运行温度为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。IMSR 无在线后处理,堆芯内累积的气体和其他裂变产物连同熔盐在堆芯替换时进行离线处理或者长期存储。正常运行时,IMSR 依靠功率负反馈实现反应性控制的内在稳定。

英国提出了 SSR(Stable Salt Reactor)设计,功率为 $150\text{ MW}_{\text{th}}$,属池式反应堆,最大的特点是燃料盐处于静态,不流动,无需泵或其他设施控制流速。燃料取自乏燃料,可用于焚烧长寿命锕系元素。燃料盐的生产通过多级还原萃取(金属铋)过程;冷却氟盐方便可得且便宜。

2001—2003 年期间,美国依靠其雄厚的科学技术积累,结合高温制氢等核能综合利用的需求,由美国橡树岭国家实验室(ORNL)、桑地亚国家实验室(SNL)和加利福尼亚大学伯克利分校(UCB)共同发展和提出熔盐堆家族的新成员——固态

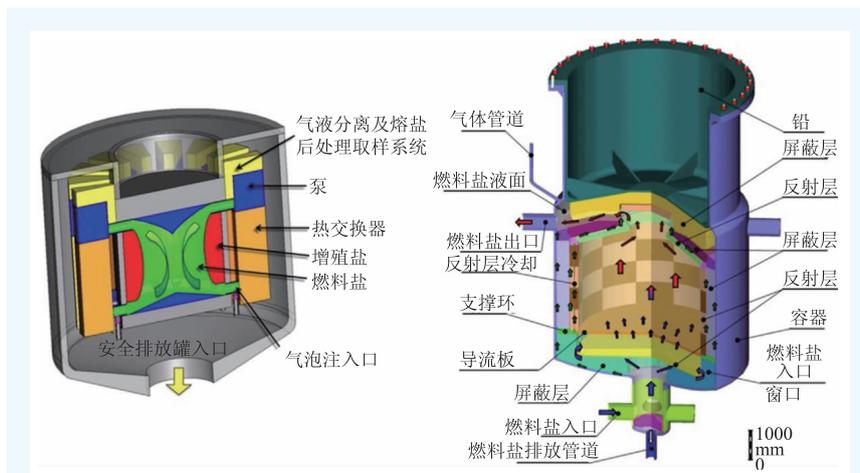


图5 MSFR(左)和MOSART(右)示意图

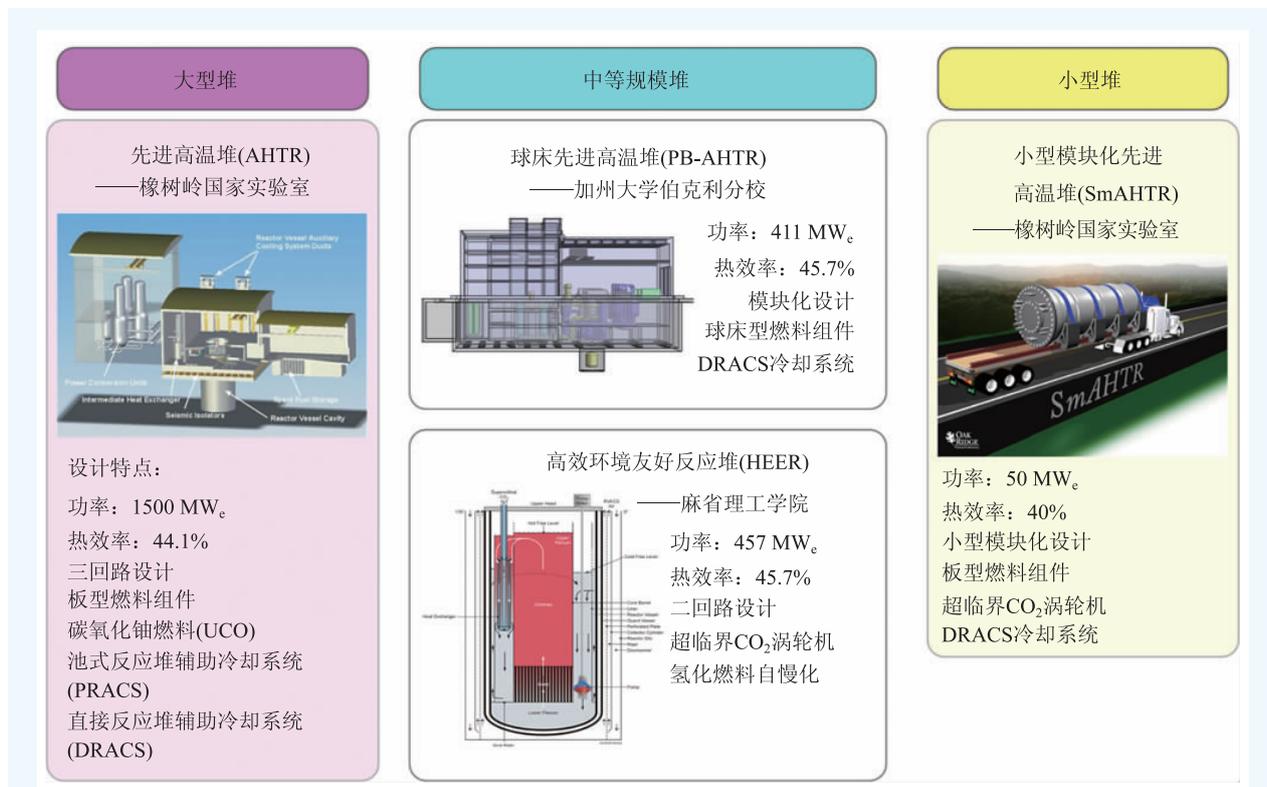


图6 各类固态燃料熔盐堆概念设计

燃料熔盐堆概念, 即为先进高温堆(Advanced High Temperature Reactor, AHTR), 也可称为氟盐冷却高温堆(Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactors, FHRs), 其核心特点是使用氟盐冷却技术和包覆颗粒燃料技术, 同时又继承和发展了其他反应堆的众多优点和技术基础, 包括液态熔盐堆的合金结构材料技术、高温气冷堆的布雷顿循环技术、液态金属反应堆的非能动衰变热排出技术等, 具有良好的经济性、安全性、可持续性和防核扩散性, 其商业化在当前技术基础条件下具有极高的可行性^[23, 24]。

2003年以来, 美国以ORNL, SNL和UCB等参与的研究团队发展了固态燃料熔盐堆的各种概念, 并进行了包括棱柱形燃料先进高温堆、棒状燃料先进高温堆、球床先进高温堆、板状燃料先进高温堆等四种具体设计(图6)。2009年完成了900 MW氟盐冷却高温反应堆设计, 堆芯为环形设计, 半径240 cm, 高度300 cm, 中心位置放石墨柱, 功率密度约20—30 MW/m³; 燃料为

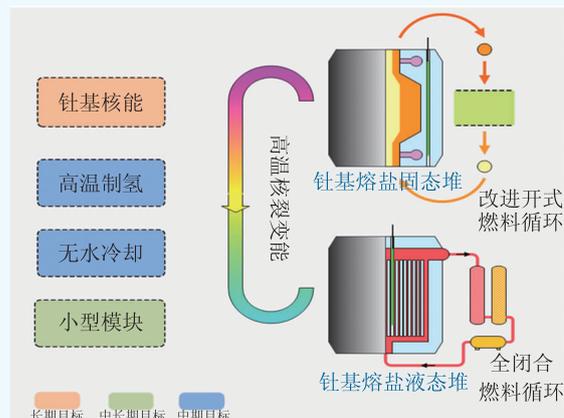


图7 TMSR发展战略图

UC_{0.5}O_{1.5}, 使用3 cm的铀燃料球及可增殖的Th球, 数目约为300万个; 冷却剂为2LiF—BeF₂。2010到2011年期间, ORNL进行了板型氟盐冷却高温反应堆的设计, 包括热功率为3400 MW和125 MW两种, 设计采用板型燃料元件, 以充分利用熔盐优异的传热性质, 提高堆芯比功率。

2011年, 美国能源部开始启动固态燃料熔盐堆前期研究计划(Integrated Research Project),

MIT, UCB, Wisconsin参加, ORNL, INL, Westwood合作参与, 将2009年UCB等提出的900 MW球床氟盐冷却高温反应堆定为基准设计, 在此基础上讨论氟盐冷却高温反应堆的发展战略, 拟定关键问题和技术路线, 同时考虑试验堆和商用堆设计。2016年1月15日, 美国能源部揭晓了美国先进堆研发的“悬赏”名单, 以南方电力公司牵头, 联合泰拉能源公司和ORNL等提出的液态燃料熔盐堆成为获得资助的两个项目之一。

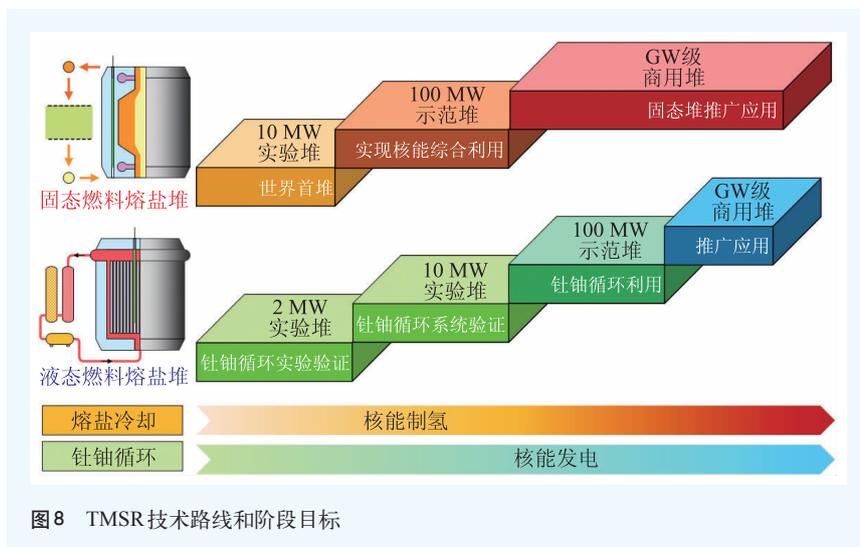
3.2 中国科学院启动TMSR先导专项

2011年, 围绕国家能源安全与可持续发展需求, 中国科学院启动了“未来先进核裂变能”战略性先导科技专项, 钍基熔盐堆核能系统(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)作为其两大部署内容之一, 计划用20年左右的时间, 致力于研发第四代先进裂变反应堆核能系统, 实现核燃料多元化、防止核扩散和核废料最小化等战略目标。TMSR核能系统项目包括钍铀核燃料的制备、钍基熔盐堆建设和燃料(废料)处理等内容, 具备三个基本特征: 一是利用钍基燃料, 二是采用熔盐冷却, 三是基于高温输出的核能综合利用系统。建立基于熔盐堆的先进钍基核能系统, 不仅可实现核燃料多元化, 确保我国核电长期发展和促进节能减排, 还可以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(图7)。

钍基熔盐堆核能系统由于是新的堆型, 还有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。

TMSR核能专项采取了兼顾钍资源利用与核能综合利用两类重大需求, 对固态熔盐堆和液态熔盐堆两种堆型研发同时部署、相继发展的技术路线, 最终实现核能综合利用、干旱地区能源供应和钍基核燃料高效利用, 为我国核能发展赢得先机, 为保障国家能源安全和促进节能减排提供一个切实可行的解决方案。计划在2020年建立完善的研究平台体系, 学习并掌握已有技术, 开展关键科学技术问题的研究; 在2030年左右建成包括“固态熔盐堆”和“液态熔盐堆”的中试系统, 在国际上率先实现TMSR的系统验证和应用; 解决相关的科学问题和技术问题, 发展和掌握相关核心技术, 到2050年实现商业化(图8)。



TMSR核能专项近期的科技目标由两部分组成: 一是建成钍基熔盐实验堆, 并形成支撑未来发展的若干技术研发能力, 将分别建成世界上首座10 MW固态燃料钍基熔盐堆和结合后处理技术的2 MW液态燃料钍基熔盐堆; 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、熔盐制备和回路技术研发能力、钍铀燃料的前道技术与后道技术研发能

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，以及高温电解制氢、二氧化碳加氢制甲醇、布雷顿循环前道及太阳能熔盐集热传热等多用途系统的研发能力。

4 TMSR 先导专项研发进展

TMSR 先导专项实施 5 年来，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，整体达到国际先进水平。依托中国科学院上海应用物理研究所，在中国科学院内外十多个研究机构和核工业单位的协作参与下，跨所组建了一支专业齐全、年富力强的钍基熔盐堆科研队伍。建成了配套齐全的(冷)实验研究基地，开展了广泛而卓有成效的国际合作，在两种熔盐堆概念设计、验证试验台架搭建与实验验证、理论方法研究等方面取得了具有国际影响的重要进展，在氟盐冷却剂与结构材料等关键材料研制与设备研发方面取得突破性进展，为建设实验堆奠定了坚实的科学技术基础。2013 年国家能源局将“钍基熔盐核能系统技术研究及工程实验专项”列入拟重点推进的重大应用技术创新及工程示范专项之一，2014 年上海市将“上海市 TMSR 科技重大专项”列入具有全球影响力的科技创新中心建设的重大科技创新布局。

4.1 主要系统技术突破

TMSR 专项在若干科学前沿领域实现了重点突破，解决了一批 TMSR 专项实施研究中的关键

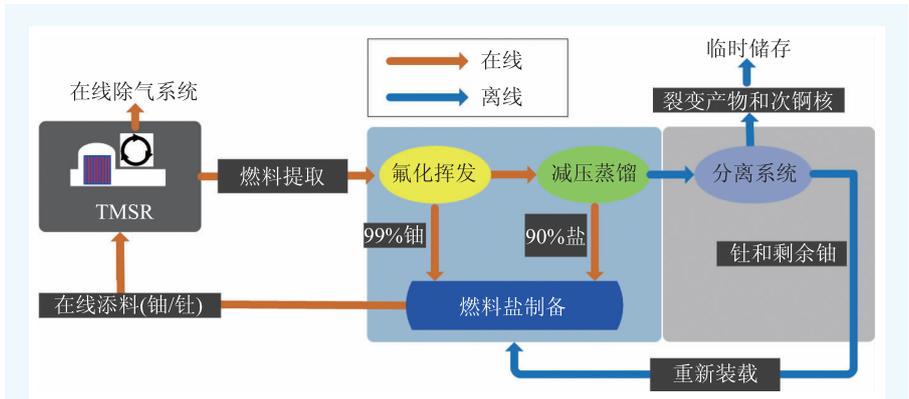


图9 全闭式钍铀燃料循环

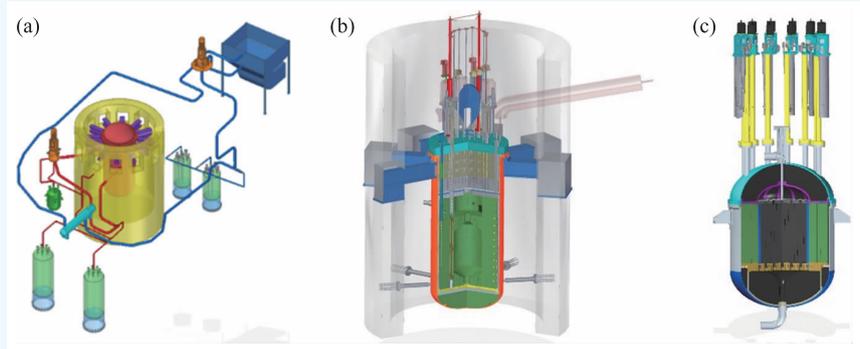


图10 (a)10 MW 固态燃料熔盐实验堆整体布局；(b)10 MW 固态堆三维图；(c)2 MW 液态堆堆本体三维图

科学问题，形成了较为完整的学科布局，新兴交叉学科得到了快速发展，若干领域已进入世界先进行列。

4.1.1 钍铀燃料循环系统建设

基于燃料循环模式和熔盐堆特点，考虑技术就绪度和燃料循环性能优化，提出创新的“三步走”钍铀循环战略方案，总体目标为实现钍资源高效利用，兼顾增殖和嬗变，有效降低核废料排放及提高防核扩散性能。“三步走”的战略采取了可实现性从高到低，关键技术研发从易到难，钍利用性能逐步提高，废料量逐步降低的技术路线，以逐步实现钍燃料自持增殖利用，还可焚烧自身及其他堆型产生的 MA 或 TRU 核素，将重金属燃料的放射性毒性减少到最低。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钍铀燃料循环(图9)。建立了基于后处理流程优化的钍铀循环物理分析方

法,建立了钍铀循环专用核数据工作库 CENDL—TMSR,筛选和确立了全新干法后处理流程,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。

4.1.2 熔盐实验堆设计系统建设

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10 MW 固态燃料熔盐实验堆初步工程设计和2 MW 液态燃料熔盐实验堆概念设计(图10),全面掌握堆本体关键技术,解决了高温熔盐环境下主容器、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。

4.1.3 TMSR 安全与许可系统建设

解决了非基岩上建堆技术难题,设计和评审有据可依,建立了核安全公众接受的科学基础和安全论证依据。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固态燃料熔盐堆安全标准(ANSI/ANS-20.1)。编写了固态燃料熔盐实验堆安全设计准则,完成了熔盐实验堆的安全系统设计。建成了世界上第一个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。

4.1.4 高温熔盐回路系统建设

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。先后建成硝酸盐热工试验回路和世界上第一个工程规模的氟盐(FLiNaK)高温试验回路,掌握了高温熔盐回路设计方法,研制了高温熔盐泵、换热器、流量计等关键设备。在实验台架及试验回路上成功进行了关键设备样机的性能测试和运行考验,两个熔盐回路已分别运行上万小时和数千小时,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。

4.1.5 同位素分离技术

发展了绿色环保的溶剂萃取离心分离锂同位素技术,替代传统汞齐法,革除汞污染;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。开发了溶剂萃取制备核纯钍工艺,筛选出高效钍萃取体系,突破溶剂萃取分离痕量杂质的极限,实现99.999%纯度,实现核纯钍的连续批量制备。发展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蒸馏技术,极大地提高了熔盐的回收率和回收品质,降低了粉尘排放,建立了阶跃式脉冲电流电解技术,在FLiBe-UF₄熔盐体系电解分离得到金属铀,分离率超过90%。

4.1.6 高纯度氟盐制备与腐蚀控制技术

掌握氟化物熔盐冷却剂和燃料盐的制备净化技术,自主研制了采用H₂-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。熔盐堆一回路用核纯FLiBe熔盐的杂质硼当量小于2 ppm,二回路用高纯FLiNaK熔盐的氧杂质含量小于100 ppm。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,建成了系统完善的熔盐物性与结构研究平台。建成氟化物熔盐腐蚀评价平台,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 μm/年。

4.1.7 结构材料制备加工技术

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。成功试制了10吨冶炼锭,常规性能评估显示其高温力学强度、耐熔盐腐蚀性等关键性能与进

口 Hastelloy N 合金相当。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。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 mm)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,防熔盐浸渗能力优于进口核石墨。建立了国产核石墨常规性能数据库,直接推动了熔盐堆专用核石墨国际规范的建立。

4.2 广泛而卓有成效的国际合作

2011年,中国科学院与美国能源部签署核能科技合作谅解备忘录,开启了中美基于熔盐堆的新一代核能技术合作之门。在此合作框架下,中国科学院 TMSR 先导专项与美国国家实验室、大学和核学会等开展了多层次、全方位卓有成效的合作,取得了实质性进展,被列入最近两轮中美战略与经济对话框架下战略对话具体成果清单。

经中国科学院和美国能源部(包括美国技术出口委员会)批准,与橡树岭国家实验室草签熔盐堆技术合作研究与开发协议,双方合作开展熔盐实验堆的研发,包括熔盐堆设计优化,熔盐回路与关键技术研发,实验数据共享和人员交流等。TMSR 中心与麻省理工学院签署了熔盐堆设计与实验合作研究协议,双方共同开展熔盐堆实验堆安全许可和堆材料辐照研究以及基于熔盐堆的能源发展战略研究。

在熔盐堆关键技术研发方面,中美合作开展了熔盐泵、超声波流量计等熔盐堆关键设备的设计、实验与标定;共同开展了熔盐传热实验,热工水

力实验以及设计软件验证,获得熔盐回路设计、建造与运行经验和重要实验数据,为 TMSR 仿真堆和实验堆的建设奠定了坚实的科技基础;成功开展了熔盐自然循环(余)热排出实验研究,验证了 TMSR 的固有安全性。

在熔盐堆安全标准制订方面,TMSR 中心作为中美联合工作组的联合组长,与美国研究机构、企业和政府部门合作,研究制定美国核学会氟盐高温堆(即固态燃料熔盐堆)安全标准,现已完成编写并进入审议阶段,该标准将成为美国国家标准。TMSR 中心加入美国机械工程师学会和美国材料与试验协会的部分标准工作组,参与熔盐堆相关标准的制定,已提出了熔盐堆相关的熔盐浸渗、劈裂法测石墨拉伸强度 2 项 ASTM 标准并通过第一轮评审。

5 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

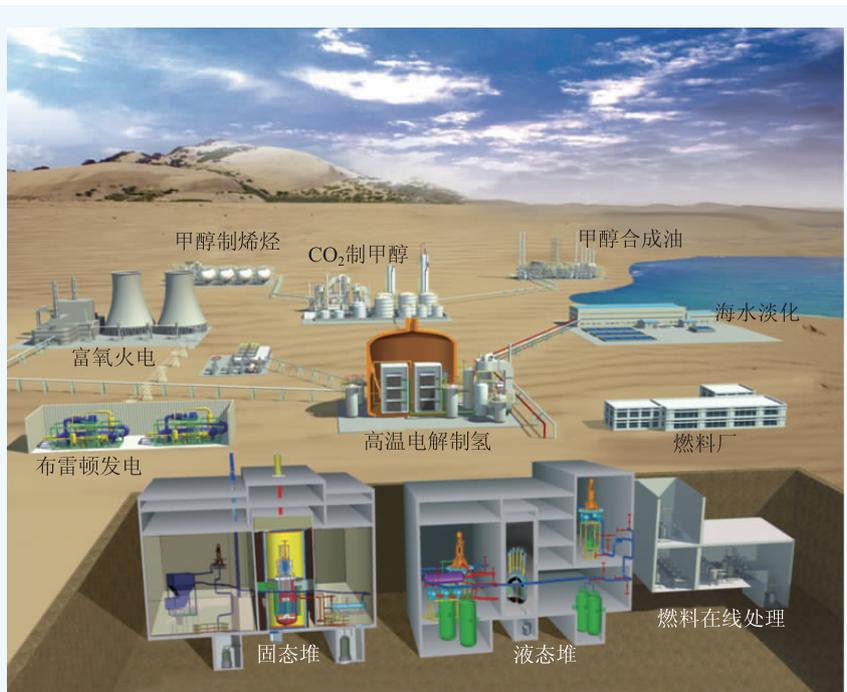


图 11 钍基熔盐堆核能系统未来情景图

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，其商业化在当前技术基础条件下具有极高的可行性(图 11)。

中国于 2011 年部署了 TMSR 战略先导专项，致力于发展液态燃料和固态燃料两种熔盐堆技术，以最终实现钍资源高效利用和核能综合利用。液态燃料熔盐堆基于在线干法处理技术，可实现钍铀增殖，并进一步实现钍铀闭式循环；固态燃料熔盐堆由于其燃料后处理技术难度非常

高，可基于改进的开循环模式以初步利用钍并节省铀资源。迄今为止，TMSR 核能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。未来，专项研究团队将立足眼前、兼顾长远、开拓创新、联合攻关，继续高效推进专项顺利实施，建成钍基熔盐堆实验装置，实现关键材料和设备产业化，形成支撑未来发展的若干技术研发能力，为将来工业示范堆的建设奠定坚实科学与技术基础。

参考文献

- [1] Edenhofer O *et al* (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. New York: Cambridge Univ. Press, 2014
- [2] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究: 电力、油气、核能、环境卷. 北京: 科学出版社, 2011
- [3] Technology Roadmap Nuclear Energy, IEA, 2010
- [4] Renault C *et al*. The MSR in Generation IV: Overview and Perspectives. In: GIF Symposium-Paris (France), 2009
- [5] IAEA-TECDOC-1319. Thorium Fuel Utilization: Options and Trends. 2002
- [6] IAEA-TECDOC-1450. Thorium Fuel Cycle-Potential Benefits and Challenges, 2005
- [7] 中国科学院关于呈送《钍的核能研究》的报告, 科发学部字 [2007] 54 号
- [8] 徐光宪. 稀土信息, 2005, (5): 4
- [9] 顾忠茂. 核科学与工程, 2007, 27 (2): 97
- [10] Kang J, von Hippel F N. Science & Global Security, 2001, 9: 1
- [11] Fuel summary report: Shippingport light water breeder reactor, INEEL/EXT-98-00799, 2002 Rev. 2
- [12] Robertso R C. MSRE Design and Operations Report, Part I, Description of Reactor Design, ORNL-TM-728 [R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1965
- [13] Fraas A P, Savolainen A W. Design Report on the Aircraft Reactor Test, ORNL-2095 [R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1956
- [14] Cottrell W B, Hungerford H E, Leslie J K *et al*. Operation of The Aircraft Reactor Experiment, ORNL-1845 [R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1955
- [15] Guymon R H, MSRE Systems and Components Performance, ORNL-TM-3039 [R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1973
- [16] Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum, 2014
- [17] Forsberg C W, ORNL, Thermal- and Fast-Spectrum Molten Salt Reactor for Actinide Burning and Fuel Production. In: Proc. of the Global 2007 Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems, American Nuclear Society, Boise, ID, USA, September 2007. 9—13
- [18] Reactor and Fuel Cycle Technology Subcommittee Report to the full Commission. Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 2012
- [19] Merle-Lucotte E, Heuer D, Le Brun C *et al*. Fast Thorium Molten Salt Reactors Started with Plutonium. In: Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), Reno, USA, 2006
- [20] Heuer D *et al*. Revue Générale Nucléaire, 2010, 6: 95
- [21] Ignatiev V V, Konakov S A *et al*. Molten salt reactor technology for partitioning & transmutation and harmonisation of the future nuclear fuel cycle. In: Proceedings of the Fifth International Exchange Meeting Mol, Belgium, 25—27 November 1998
- [22] Furukawa K, Mitachi K, Lecoq A *et al*. Th Fuel-Cycle Deploy through Pu Incineration by THORIMS-NES. IAEA-TECDOC-916, 1996
- [23] Forsberg C W, Pickard P S, Peterson P F. Nuclear Technology, 2003, 144 (3): 289
- [24] Forsberg C. American Society of Civil Engineers, 2014, 132 (3): 109