

铅基反应堆研究进展与应用前景

吴宜灿^{1,2}

(1. 中国科学院核能安全技术研究所 230031;

2. 中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室 230031)

1. 概述

核能是一种清洁、安全、高效的能源,具有大规模替代化石能源的潜力,在世界能源结构中占有重要地位。由于目前正在大规模应用的热中子反应堆存在资源利用率低、放射性废物积累和潜在核安全问题,特别是福岛事故后,安全性更高、可持续性更好的先进核能系统成为未来主要发展趋势。

铅基反应堆(以下简称“铅基堆”)是采用铅基材料(铅或铅合金)作为一回路系统冷却剂的反应堆。作为第四代核能系统中的六种堆型之一,铅基堆是一种能够实现多种应用且可持续发展的先进核能系统。根据2014年1月第四代核能系统国际论坛(GIF)发布的“第四代核能系统技术路线更新图”显示(图1),铅基堆有望成为首个实现工业示范的第四代核能系统。

无论是裂变堆还是聚变堆,临界堆还是次临界堆,铅基材料都有重要的应用价值:在第四代核能系

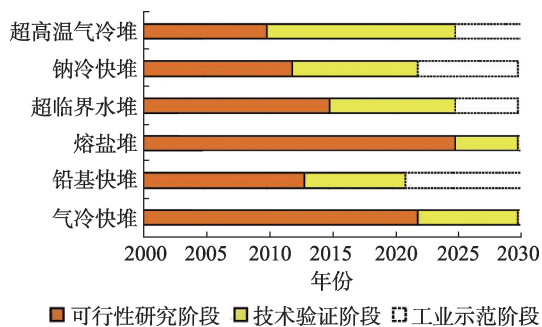


图1 第四代核能系统技术路线更新图

统中,铅基堆是六种参考堆型之一;在次临界堆中,铅基材料是重要的冷却剂候选材料;在聚变堆中,铅基材料冷却的液态包层是包层主流概念之一。

下文将简要介绍铅基堆的工作原理和技术特点,重点对铅基堆的国内外研究进展和应用前景进行总结。

2. 铅基堆原理与特点

2.1 铅基材料特性

铅是重金属,密度高、硬度低、延展性较强、电导率低、热导率高,同时化学稳定性好,与水 and 空气都不发生剧烈反应。常压下铅的熔点是 $327.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,沸点是 $1740\text{ }^{\circ}\text{C}$,常温下密度是 11059.7 kg/m^3 ,熔化时体积增大,密度降低。铅合金是以铅为基础材料,加入其他金属元素形成的合金或共晶体,以此能显著降低熔点并使其他性能与铅类似。

核能领域常用的铅合金分别是铅铋合金或铅锂合金。在裂变铅基堆中,除了铅以外,也广泛采用铅铋共晶体合金作为冷却剂,在聚变铅基堆中采用铅锂共晶体合金作为冷却剂。表1为铅、铅合金与其他堆用冷却剂热物性的对比。

铅基材料具有较低的中子慢化能力及较小的俘获截面,高热导率、低熔点、高沸点等热工特性,以及与水或空气几乎不发生反应的化学惰性,因此以铅基材料作为冷却剂的铅基堆具有良好的中子经济性、热工安全特性和化学安全特性。

表1 铅基材料与其他堆用冷却剂热物性对比

冷却剂	铅 (723 K, 0.1 MPa)	铅铋合金 (723 K, 0.1 MPa)	铅铷合金 (673 K, 0.1 MPa)	钠 (723 K, 0.1 MPa)	水 (573 K, 15.5 MPa)	氦气 (1023 K, 3 MPa)
密度(g/cm ³)	10.52	10.15	9.72	0.844	0.727	0.0014069
熔点(K)	601	398	508	371	--	--
沸点(K)	2023	1943	1992	1156	618	--
比热容 (kJ/(kg K))	0.147	0.146	0.189	1.3	5.4579(Cp)	5.1917(Cp)
体积比热容 (kJ/(m ³ K))	1546	1481	1837	1097	3965	7.304
热导率 (W/(m K))	17.1	14.2	15.14	71.2	0.5625	0.368

除以上共性特点外,铅、铅铋和铅铷又具有各自不同特点,适用于不同的反应堆堆型:使用铅作为冷却剂的快堆可以在较高的温度条件下运行,具有较高的发电效率;高熔点还容易在设备发生小泄露时形成自封,有利于阻止铅的继续泄露;铅铋的熔点比铅低约 200 ℃,可以运行在较低的温度条件下,降低对堆内设备的要求等。铅铷合金中,锂和中子反应产生氦,能起到氦增殖剂作用,而铅在聚变中子辐照环境下发生(n,2n)反应,能起到中子倍增剂的作用。

2.2 铅基堆系统构成

典型的铅基堆系统构成如图 2 所示,包括一回路和二回路两个热力循环系统。

(1) 铅基堆一回路系统一般采用池式布局,将一回路中的驱动泵、换热器等热工设备及堆芯置于堆容器内,容器内的液态铅基冷却剂通过热工设备的驱动与流动传热,将堆芯产生的热量传递至二回

路,整个一回路系统的工作压力为常压。

(2) 铅基堆二回路系统一般采用水作为工质,二回路冷却工质在换热器内吸收一回路释放的热量后,通过汽轮机和发电机将热能转换为电能。

上述仅列举了铅基堆的一般构成,还可以根据不同用途,对一、二回路进行创新设计,形成不同的铅基堆。根据一回路核热产生原理不同,如聚变反应产生核热则称为聚变铅基堆,裂变反应产生核热则称为裂变铅基堆,利用外中子源驱动的裂变反应则称为次临界铅基堆。另外,根据二回路的热量转化和利用方式不同,如利用铅基堆出口温度高的特性则有 S-CO₂发电铅基堆,将高温热量用于制氢的铅基制氢堆,等等。

2.3 铅基堆系统特性

总体来讲,铅基堆具有固有安全、易小型化、可持续性好的显著特点:

固有安全 主要表现在:铅基材料作为冷却剂具有反应性负反馈系数,在出现温度升高的情况下,堆芯的反应性会自动下降,不会发生类似切尔诺贝利的反应堆超临界事故,铅基材料的高密度也使得反应堆在严重事故下燃料随冷却剂流动扩散,不易发生再临界;铅基材料密度高、热膨胀率较高和运动粘度系数较低且可采用大燃料元件栅距,自然循环能力强,能够不依靠外部电力驱动,仅通过自然循环即可带走堆芯余热,消除熔堆事故风险;铅合金熔点高于常温,且沸点高,使得铅合金“自愈合”能力强,同时反应堆可运行在常压下,使得反应堆不易丧失冷却剂,不会发生类似三哩岛的冷却剂丧失事故;

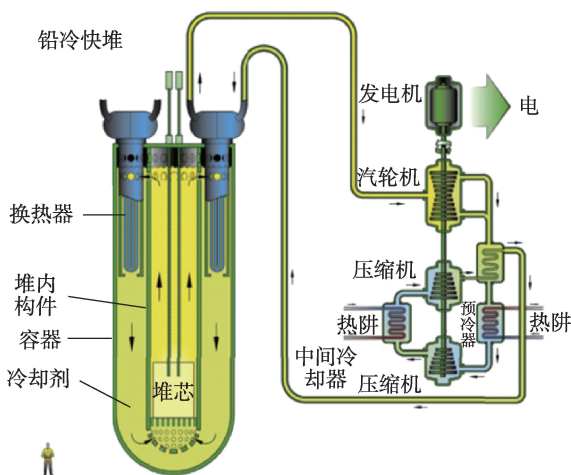


图2 铅基堆示意图

(图片来源: <http://www.gen-4.com>)

铅基材料化学稳定性好,几乎不与水和空气反应,无锆水反应,也消除了氢气爆炸风险,不会发生类似福岛氢气爆炸事故。此外,铅基材料与气态放射性核素碘和铯能形成化合物,可降低反应堆放射源项。

易小型化 主要表现在:铅基材料载热性能优异(铅铋合金热导率是水的30倍),可实现高的功率密度,堆芯设计紧凑;铅基材料的 γ 屏蔽性能优异,能够显著减少辐射屏蔽系统体积;铅基堆主系统为常压,其组成和相关配套设施可以设计得较为简单,可省去常规压水堆中稳压器、化容控制系统、安注系统等设备,同时,也可省去中间循环回路,将一二回路换热的换热器、一回路驱动泵等直接配置在堆容器内,布局更加紧凑,易于实现小型模块化制造。这也使得铅基堆成为小型和超小型核动力的优选技术路线。

可持续性好 主要表现在:铅基材料具有低的中子慢化能力及小的俘获截面,因此铅基堆中子能谱硬,增殖和嬗变能力较强,可用作快堆,将 ^{238}U 增殖成易裂变核燃料 ^{239}Pu 持续燃烧,并能嬗变MA等长寿命核素,燃料利用率高、废料少;中子能谱易调整,反应性可设计长周期平衡,一次装料可运行10~30年,有利于防核扩散;冷却剂出口温度高,能量利用率高,池式设计辅助系统少,建造成本低,可模块化批量建造,有助于实现先进核能技术的商业化应用。

2.4 铅基堆关键技术与挑战

铅基堆的发展存在一定的技术挑战,亟待解决和发展的铅基堆关键技术主要包括:(1)液态铅基

材料对结构材料的腐蚀及氧测控技术;(2)铅基堆堆芯测量技术;(3)铅基堆燃料装卸技术;(4)先进建模与仿真技术;(5)新型燃料研发;(6)非透明介质环境中在役检修技术;(7)高密度冷却剂环境下抗震和防冲击等。针对这些关键技术与挑战,国内外正在开展相关技术研究和攻关。

3. 国际铅基堆研究进展

总体上看,铅基堆发展在第四代核能系统中已走在前列,对此包括第四代核能系统论坛(GIF)在内的各国际组织都达成了共识。尤其在福岛核事故发生后,人们对核能安全空前关注,具有极佳固有安全性的铅基堆愈发受到青睐,发展进程显著加快。目前,主要核大国都制定了铅基堆发展计划,世界范围内有多个示范工程项目正在实施(图3)。

俄罗斯最早将铅基堆应用于核动力潜艇,已积累近百堆年的运行经验。前苏联设计研发了铅铋反应堆作为驱动动力,并成功建造了7艘“阿尔法”级核潜艇,创造了潜艇航速世界记录。进入21世纪后,俄罗斯积极推进将铅基堆用于商业核电站,提出了铅铋冷却反应堆SVBR(100 MWe)和铅冷快堆BREST(300 MWe)项目,计划2021年左右建成发电。

欧盟是铅基堆发展最为活跃的地区之一,在欧盟第五、六、七科技框架计划的长期支持下,形成了完整的发展路线和计划,参与铅基堆研究计划的欧盟研究机构超过20家。据报道,瑞典LeadCold公

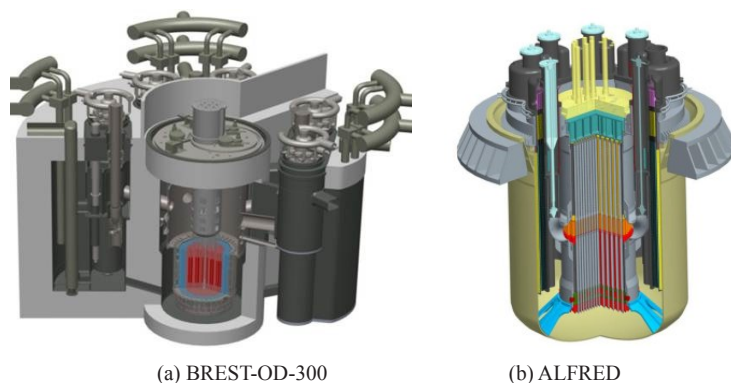


图3 国际典型铅基堆

司获得2亿美元投资,将在加拿大建设小型模块反应堆 SEALER,服务于极地开发需求,计划2021年开始建设,2025年运行。意大利国家新技术、能源和可持续发展局(ENEA)和意大利安萨尔多核工程公司(ANSALDO NUCLEARW)以及罗马尼亚核研究所(ICN)正式签署协议,开始实施 ALFRED 的设计建造工作。比利时核能研究中心(SCK·CEN)也正在开展加速器驱动的铅基次临界反应堆 MYRRHA 工程研制工作。

在美国能源部第四代反应堆研究计划支持下,阿贡国家实验室(ANL)和劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)开展了小型模块化铅冷反应堆 SSTAR 的研究,爱达荷国家实验室(INL)和麻省理工大学(MIT)联合设计了铅铋冷却嬗变反应堆 ENHS 方案,Gen 4 Energy 公司设计了铅铋自然循环小型模块化反应堆 G4M 并积极进行商业化推广。2015年,核电巨头西屋电气公司将铅基堆列为其下一代先进核能发展方向,正式启动了铅基堆研发计划。2016年,为响应加拿大国家实验室(CNL)小型模块化反应堆设计策略,Hydromine 公司开展 200 MWe 铅基堆 LFR-AS-200 设计研究。

韩国开展了铅基堆 PEACER、URANUS 设计和相关热工水力与材料研究。日本实施分离和嬗变高放核废料的 OMEGA 计划,完成了工业级规模的嬗变铅铋反应堆设计,并开展铅铋冷却剂与结构材料的腐蚀实验研究。

4. 我国铅基堆研究进展

我国铅基堆研究始于20世纪80年代中后期,主要由中科院核能安全技术研究所·FDS 凤麟团队在 IAEA 及 ITER 国际合作计划、国家“863”/“973”计划、国家磁约束聚变专项和中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”等重大项目的持续支持下,开展铅基堆基础研究和关键技术攻关。目前整体研发工作走在国际前列,处于引领性梯队。近两年来,部分其他核相关科研院所对铅基堆技术也表现出强烈的研究兴

趣,启动了相关研究。

历经30余年研发,我国在反应堆设计、关键技术研发方面已取得了长足的进步和核心技术重大突破,主要表现在:

(1) 发展了铅基堆设计理论与方法体系

新型反应堆中子学设计理论与方法获2016年度国家自然科学二等奖,研发了体系化的设计与安全评价软件和数据库,自主化核心软件获得国际规模化应用。

(2) 创新设计了系列铅基堆

设计了国际首个临界/次临界双模式反应堆,中国铅基研究实验堆 CLEAR-I(图4),作为中国代表性成果入选国际原子能机构 IAEA 和第四代核能系统国际组织 GIF 官方技术报告和数据库。

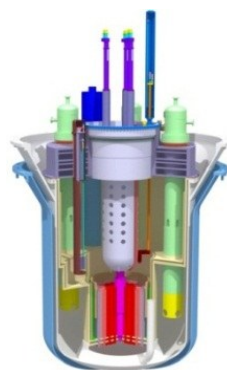


图4 中国铅基研究堆

(3) 突破了铅基堆系列关键技术,建成了三座“实验反应堆”工程验证平台

搭建了大型液态铅合金技术综合实验回路(图5),掌握了铅基冷却剂、专用部件和设备、结构材料和核燃料、堆运行与控制等一系列铅基堆关键技术,液态铅基实验装置累计运行时间已超过3万小时,系列核心设备工程样机测试达到国际领先水平,形成了具有自主知识产权的铅基堆技术体系。

同时,还建成了规模最大、功能与性能参数国际领先的实验装置群,包括铅基堆零功率物理实验装置 CLEAR-0、铅基堆工程技术集成实验装置 CLEAR-S、铅基数字仿真反应堆 CLEAR-V 三座“实验反应堆”工程验证平台(图6)。



图5 大型液态铅合金技术综合实验回路

在上述研究工作的基础上,利用铅基堆易小型化优势,核安全所研发团队提出并设计了超小型化铅基堆“核电宝”,具有固有安全、超小型、高效率的技术特点,系统功率宽泛可灵活适配多种需求。

为了进一步推进铅基堆的创新发展和产业转化,核安全所牵头成立了铅基堆核能产业创新战略联盟,将建立我国铅基堆核能产业标准规范体系,形成铅基堆核能创新产业链,推动铅基堆产业发展,为国家能源战略需求和国民经济发展做出贡献。

5. 应用前景

铅基堆作为具有重要发展前景的先进核能方向,其技术既适用于裂变堆,也适用于聚变堆,既能在临界堆中应用,也能在次临界堆中应用,在功能上包含能量生产、核废料嬗变、核燃料增殖的可持续发展技术路线。通过针对性的设计,铅基堆可以实现不同功能,在国家能源战略和国民经济中的应用前景广泛,覆盖近、中、远期的可持续发展需求,具备在短期内规模化应用的潜力。除了在第四代核电、核废料嬗变处理系统、聚变反应堆等领域发挥重要作用外,铅基堆在其他国民经济与国家能源战略方面也有诸多应用前景。

铅基堆可以作为优秀的小型化高功率能源供应系统,实现偏远地区、海洋开发、小型电网供电等其他方面的应用,这也是核安全所研究团队目前关注的重点。我国海洋面积广阔,海岛众多,包括许多偏远地区能源供给较为不便,而小型化铅基堆可以实现电/热/淡水一站式供给,是这些地区的理想能源供给平台。在一些电力需求较小的国家或偏远地区具有很好的前景。

铅基堆可以作为船舶的动力。俄罗斯的成功经验证明了铅基堆作为舰船/潜艇的动力具有很多优良特性,由于铅铋反应堆自然循环能力强,在船舶巡航时可以直接采用自然循环而不依赖泵的驱动,从而降低机械噪音,提高可靠性。

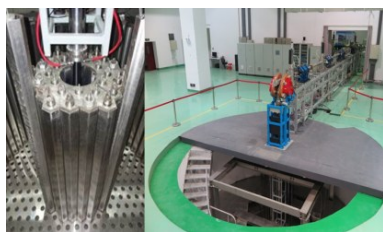
此外,对于同位素生产、钍资源利用、海水淡化等方面,铅基堆也是一种优选的技术方案。

6. 总结

铅基反应堆具有固有安全、易小型化、可持续性好的显著优势,是先进核能系统研究的重要方向,在世界范围内积累了大量的研究经验和成果,已经有非常好的研究基础,具备在短期内大规模利用的潜力。

铅基反应堆可用于能源生产、核燃料增殖和聚变能等方面,尤其作为小型高功率能源的小型化铅基反应堆,在偏远地区、海洋开发、小型电网供电等方面的应用潜力巨大。

我国历经30余年持续研发,在铅基反应堆研发上取得了重大突破,将为我国核能科学与技术事业进步、国家能源安全和核能可持续发展做出重大贡献。



(a) 铅基中子物理实验堆



(b) 铅基工程验证实验堆



(c) 铅基数字仿真反应堆

图6 “实验反应堆”工程验证平台