

第四代核能系统铅基反应堆前景展望

作为一种可大规模替代化石燃料的清洁能源,核能在目前的世界能源结构中占有重要地位。然而,由于现有大规模应用的热中子反应堆存在资源利用率低、放射性废物不断积累和潜在核安全问题,开发更加清洁、高效、安全的新型核能系统对核能可持续发展意义重大。2014年1月,“第四代核能系统国际论坛组织(GIF)”官方发布的“第四代核能系统技术路线更新图”显示,在第四代核能系统6种堆型中,铅冷快堆预计于2021年率先实现工业示范应用。

铅基反应堆特点

铅基材料(铅、铅铋或铅铋合金等)作为反应堆冷却剂,能使反应堆的物理特性和安全运行具有显著优势,铅基反应堆主要特点如下。

第一,中子经济性优良,发展可持续性好。铅基材料具有低的中子慢化能力及小的俘获截面,因此铅基反应堆可设计成较硬的中子能谱而获得优良的中子经济性,可利用更多富余中子实现核废料嬗变和核燃料增殖等多种功能,也可设计成长寿命堆芯,不仅能提高资源利用率和经济性,也有利于预防核扩散。

第二,热工特性优良,化学稳定性高,安全性好。铅基材料具有高热导率、低熔点、高沸点等特性,使反应堆可在常压下运行,同时实现高的功率密度。铅基材料的高密度也使得反应堆在严重事故下不易发生再临界;较高的热膨胀率和较低的运动粘度系数确保反应堆有足够的自然循环能力;铅基材料的化学性质不活泼,几乎不与水和空气反应,无剧烈化学反应,也几乎消除了氢气产生的可能;铅基材料还与易挥发放射性核素碘和铯形成化合物,可降低反应堆放射性源项。

第三,技术成熟,应用潜力广。铅基反应堆已经具有近百堆年的运行经验,技术较为成熟;铅基反应堆不仅能够应用于临界核能系统,也是次临界核能系统的首选堆型;由于堆芯的高功率密度等特性,铅基反应堆可实现小型紧凑化,易于在海岛、海洋动力等不同环境中应用。

铅基反应堆的发展历史和现状

前苏联从20世纪50年代起,成功建造了8艘铅铋反应堆驱动的核潜艇,并创造了42节航速的世界纪录。进入21世纪后,俄罗斯积极推进铅基反应堆的商业应用,正在开展铅铋反应堆SVBR-100(电功率100 MW)和铅冷快中子反应堆BREST-OD-300(电功率300 MW)设计建造,计划分别于2019年和2021年建成发电。美国在1999年正式启动ATW计划,计划利用铅铋冷却的加速器驱动次临界系统(ADS)进行核废料嬗变。从2001年开始,美国在能源部第四代反应堆研究计划的支持下,开展了小型模块化铅冷反应堆SSTAR、铅铋冷却嬗变反应堆ENHS、铅铋自然循环小型模块化反应堆G4M等堆型概念。2000年后,欧盟在第五、六、七科技框架计划的持续支持下,已经形成了完整的铅基反应堆发展路线和计划,参与该计划的研究机构超过20家。2013年,比利时签订了铅铋冷却的加速器驱动次临界堆MYRRHA的工程设计合同,同时欧盟成立财团FALCON,启动在罗马尼亚设计建造欧洲铅冷示范堆(ALFRED)的工作。此外,日本、韩国都有自己的铅基反应堆发展计划并开展了大量的铅基反应堆研发工作。

2011年,中国科学院正式启动了战略性科技先导专项“未

来先进核裂变能——ADS嬗变系统”,中国科学院核能安全技术研究所·FDS团队在该项目的支持下,针对铅基反应堆CLEAR(China LEAd-based Reactor)全面开展研发工作,计划通过研究实验堆CLEAR-I、工程演示堆CLEAR-II、商用原型堆CLEAR-III三期实现商业应用。目前已在铅基反应堆设计、铅铋回路与氧控技术、关键设备研发、核燃料与材料、安全分析与实验验证等方面取得了显著的进展。

铅基反应堆研发对我国核能发展的促进作用

铅基反应堆作为具有重要发展前景的先进核能方向,其技术既可以应用于裂变核能系统,也可以应用于未来聚变核能系统,同时也可以应用于次临界混合核能系统。通过对铅基反应堆的研究,可以形成一整套在时间上兼顾近、中、远期发展需求,在应用上覆盖聚变技术和裂变技术,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。另外,铅基反应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。

第一,可以用于大规模生产氦。氦是未来聚变堆的启动燃料,而氦在自然界中含量极少。铅基次临界堆在产氦方面具有显著优势:铅铋材料既可作为氦增殖剂,也可作为冷却剂,从而能够简化产氦反应堆的设计;此外,次临界堆具有固有安全性,能够在保证大规模产氦的前提下不对反应堆的安全性产生影响。

第二,可以实现钍资源的高效利用。我国钍资源相对贫瘠,钍资源相对丰富,加大钍资源的利用对核能的可持续发展尤为重要。铅基反应堆由于具有良好的中子经济性,有利于钍-铀转化,可以实现钍资源的高效利用。

第三,可以生产二次清洁能源氢。氢作为一种清洁能源,具有热值高、无污染等特点,当前国际市场上氢的需求量以每年大于8%的速度增长,未来还将可能得到更大规模的应用。铅冷快堆在较高的温度运行时,较适宜于热化学制氢,核能与氢能的结合将使能源生产和利用的全过程实现清洁化。目前美国、俄罗斯等国都已经开展了大量铅冷快堆制氢技术研究。

第四,铅基反应堆可以实现海洋开发/小型电网供电等其他方面的应用。海洋开发一般远离大陆,能源供给较为不便,而铅基反应堆能量密度高且适合小型化,是海洋开发的理想能源供给平台。一些电力需求较小的国家或地区,不适合建造大型反应堆,小型反应堆在这些国家或地区具有很好的前景。

铅基反应堆经过60余年的研发,技术基础较为成熟,具备在短时期内大规模应用的潜力。在中国科学院战略性先导科技专项等项目的前期支持下,我国铅基反应堆的研究已经走上了一条发展的快车道,形成了裂变与聚变技术相互支撑、相互促进的发展模式,能够实现近、中、远期发展的良性过渡,通过不同铅基材料之间的技术共享,实现最优的科研投资回报,可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更大贡献。

文/吴宜灿¹, FDS团队²

作者简介 1.中国科学院核能安全技术研究所,所长/研究员;
2.以中国科学院核能安全技术研究所为依托、与国内外多家科研机构密切合作的多学科交叉先进核能研究团队。

(编辑 王丽娜)