

气冷快堆概述

黄彦平 臧金光

(中国核动力研究设计院 610213)

一、前言与工作原理

气冷快堆,英文名称为 Gas Cooled Fast Reactor, 简称为 GFR, 是一种高温气体冷却快谱反应堆。顾名思义,气冷快堆采用气体作为堆芯冷却剂。由于气体工质密度一般相对较低,对中子的慢化能力较弱,在不显著添加其他慢化剂的情况下,中子能谱为快谱。气体工质的慢化能力一般也弱于金属冷却剂,因此气冷快堆的中子能量要高于金属快堆,也就是说气冷快堆的中子能谱更“硬”。

气冷快堆作为一种快堆,采用闭式燃料循环,对燃料进行后处理和嬗变长寿命锕系元素,可实现铀资源长期可持续利用和核废物最小化;气冷快堆作为一种高温气体反应堆,具有高温系统的技术优势,可提高循环热效率,并为工业应用提供高温工艺热。因此气冷快堆可借鉴快堆(如钠冷快堆 SFR)的燃料回收工艺和高温气冷堆(VHTR)的堆芯技术,如反应堆结构、材料等。尽管如此,气冷快堆并不仅仅是快堆和高温气冷堆的简单组合,需要针对其自身特性开展具体研发。

气冷快堆是第四代核能系统国际论坛(GIF)选定的六种反应堆堆型之一。GIF 当前气冷快堆的参考设计是 2400 MWth 氦气冷却的高温快堆。整个系统包含堆芯、主热交换器、余热排出回路和动力系统,一回路系统内置在钢制压力容器即防护安全壳(Guard Containment)内,用于在事故条件下提供系统背压。堆芯由六角形燃料组件构成,芯块燃料为混合碳化物,包壳为陶瓷材料。堆芯冷却剂是氦气,堆芯出口温度约 850°C。热交换器将一回路氦冷却剂的热量传递到二回路,加热氦气-氮气混合物,驱动燃气轮机发电做功。燃气轮机的余热还

可以进一步加热蒸汽,驱动蒸汽轮机。这种燃气-蒸汽联合循环是一项成熟技术,在天然气发电厂中广泛采用,唯一不同的是参考气冷快堆设计使用闭式循环燃气技术。图 1 显示了 GIF 参考气冷快堆的设计示意图。

除了以上参考设计,另外一种具有发展潜力的气冷快堆方案是采用超临界二氧化碳(sCO₂)作为冷却剂的气冷快堆。该型方案利用了 sCO₂ 高密度、易压缩的优点,可在比高温气冷堆出口温度低(500~650 °C)的情况下保持较高的热效率,因此可以在一定程度上降低对燃料包壳的要求。图 2 给出了 MIT 设计的 sCO₂ 气冷堆方案示意图。采用直接循环,一体式动力转换单元,套管式连接,应急堆芯冷却系统。

二、主要技术特点

气冷快堆作为第四代核能系统国际论坛选定的堆型之一,具有快堆和高温气冷堆的优势,满足第四代核能系统的相关要求。

可持续发展:与其他快堆一样,气冷快堆是利用快中子引发链式裂变的反应堆,在可持续方面具有较好优势。其一,在铀资源中,大部分铀同位素是铀 238,铀 235 只占很小一部分。热谱堆一般利用铀 235 进行裂变,而快堆则可以使铀 238 变成钚 239,钚 239 再发生裂变反应,即快堆在消耗钚 239 的同时,还会生产新的钚 239。因此快堆能够充分利用铀资源,提高核燃料的利用率。其二,气冷快堆采用闭式燃料循环,对乏燃料进行分离,回收铀钚等可裂变和易裂变元素,嬗变长寿命裂变产物,使放射性废物和长寿命毒素最小化,利于地质处置

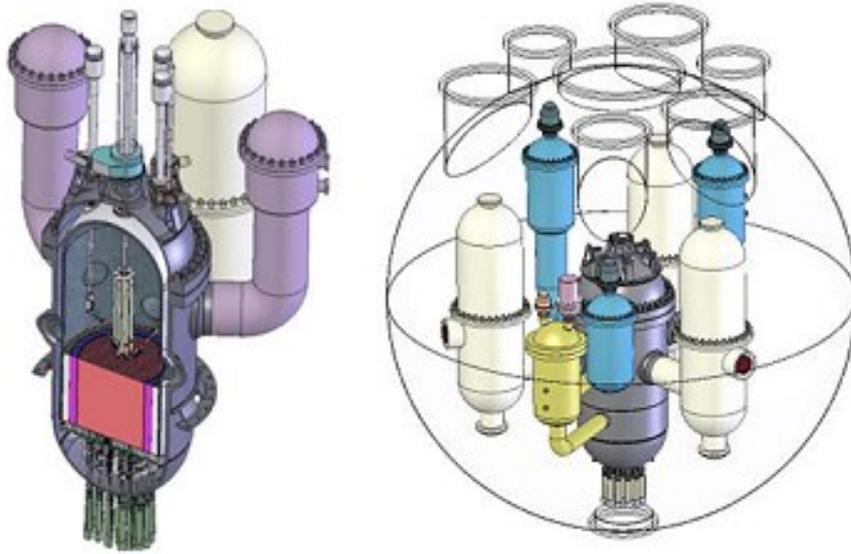


图1 GIF气冷快堆参考设计示意图

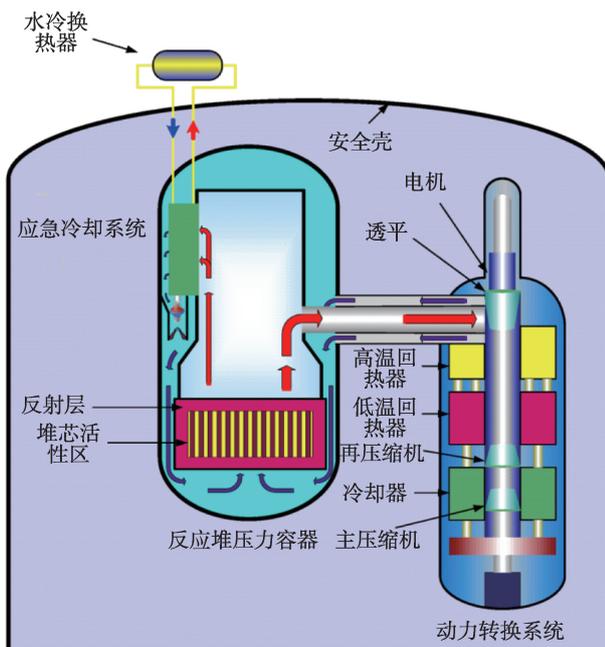


图2 二氧化碳气冷快堆参考设计示意图

和长期环境安全。气冷快堆采用气体作为冷却剂,相比于液态金属(如钠或铅等)具备更硬的中子能谱,理论上会有更高的增殖率和更短的燃料倍增时间。研究表明,气冷快堆的燃料循环具有灵活性,能够适应从传统燃料增殖到次锕系元素焚烧等燃料循环的普遍需求。

防核扩散:防核扩散意味着尽可能避免使用高

富集度铀。气冷快堆使用的燃料富集度更高,因此在防核扩散方面需要进行科学合理设计,如提高燃耗、回收长寿期锕系元素、在线燃料处理等,缓解气冷快堆的防核扩散问题。

经济性:气冷快堆堆芯的出口温度一般较高(850 °C或更高),因此在发电方面具有较高的热效率。气冷快堆相比于气冷热谱堆,体积功率密度更高,堆芯体积更为紧凑;动力循环方式可以采用燃气直接循环,在减少系统设备的同时,提高系统循环效率;或者使用燃气蒸汽联合循环等,以最大限度地提升系统效率。

安全性:气体作为冷却剂工质,化学惰性小,与材料相容性好;工质始终为单相,不会出现两相沸腾危机,这是气冷快堆安全设计的优点。然而,气冷快堆在安全设计方面也存在挑战,例如开发高温(可能达到1600 °C或更高温度)下具有良好裂变产物包容能力的燃料、包壳材料和坚固的结构材料以及高效可靠的余热排出系统。

应用范围:气冷快堆的潜在优势在于其预期技术应用范围较为广泛,由于气冷快堆出口温度较高,可以作为可靠、经济和有竞争力的发电系统,也具有产氢和其他工艺热应用的潜力。

三、技术挑战

气冷快堆具有比液态金属更高的堆芯中子泄漏率,更硬的中子能谱,因此需要更多的燃料装载量、更高的富集度,也带来更恶劣的中子辐照环境;同时与其他快堆相比,燃料多普勒系数进一步降低,燃料负反应性系数变小。这给气冷快堆安全性和防核扩散带来挑战。

在燃料方面,气冷快堆的最大挑战是发展可耐高温、可承受堆内热、机械和辐照环境的性质优良的燃料、包壳材料和堆芯结构材料。目前可用的燃料化合物形式有碳化物、氮化物、氧化物等,燃料元件形式可考虑陶瓷基体和弥散型燃料。对于包壳材料,一般考虑耐高温非金属材料如SiC等,针对中等堆芯出口温度(小于等于650℃),不锈钢材料也是包壳材料的选择之一。

在堆芯设计方面,出于对气冷快堆安全性和经济性的考虑,应尽可能减小堆芯压降。这一方面有助于减少冷却剂泵送耗功,提升系统效率;另一方面,有利于在正常停堆和事故停堆条件下为堆芯提供冷却环境。当然,在给定堆芯热工参数的前提下,小堆芯压降意味着减少堆芯流程、增大流通面积、减小堆芯阻力系数、提高冷却剂体积分数等。这些参数设计还要与气冷快堆的物理设计进行综合平衡。另外,一般条件下,气体的传热能力弱于水和金属,因此为减少燃料元件包壳与冷却剂温差,可以考虑包壳表面的强化传热设计,例如使用带肋包壳,以增强包壳与流体换热。

在系统安全特性方面,由于常压条件下气体密度较低,因此气冷快堆一般运行在带压条件,例如氦气冷却快堆约运行压力为7 MPa,超临界二氧化碳冷却快堆的运行压力约为20 MPa。较高的系统压力有助于提升冷却剂的载热能力,增大冷却剂密度,减小工质运输的耗功,但也给安全设计带来一定挑战。气冷快堆冷却剂的热惯性小,在冷却剂强制循环失效后,燃料温度易于迅速上升。气体快堆的堆芯功率密度较高,温度上升趋势要比气冷热谱堆更为显著。同时,由于堆芯体积紧凑,仅利用热传导难以在设计温度限值内实现热量导出。气冷

快堆冷却剂一般为不可凝气体,高温气体卸放,会给安全壳带来更高的压力载荷。同样因为不可凝性,传统水堆相关的水池冷却措施基本上均难以奏效。为保证气冷快堆的堆芯安全,需要时刻保持堆芯的对流换热能力。目前的余热排出系统基本有两种方案,非能动措施和能动措施。非能动措施利用堆芯和余排换热器之间的自然循环带走堆芯热量,为提高自然循环能力,一般需要在带压条件下运行,同时具备足够的系统高度差,还要考虑系统布置、余热回路与系统回路相互作用等。能动措施利用电动鼓风机提供堆芯冷却流量,在失压条件下鼓风机功耗非常可观。无论是采用非能动措施,还是能动措施,为了在合理功耗下实现热量导出,均需要使余热排出系统运行在带压条件。因此气冷快堆参考设计中增加了防护安全壳,维持系统环境在一定压力之上。

四、国际态势

在20世纪60年代到80年代期间,美国和欧洲开展了气冷快堆的设计,当时简称为GCFR,作为液态金属快堆的替代选择。在1962年左右,美国通用原子公司提出了最初的气冷快堆概念设计。之后,进一步开展了300兆瓦示范电厂和1000兆瓦商业电厂的初步设计。这些设计基于液态金属快堆适用性修改得到,使用氧化物或碳化物燃料,金属材料作为元件包壳。在1978年之前,基本上都设计成冷却剂向下流动的堆芯流程。1979年,更改为冷却剂向上流动,以便于在强制循环失去时建立自然循环。欧洲在气冷热谱堆方面有较好技术积累,英国发展了第一代称为Magnox反应堆的气冷反应堆,图3给出了英国早期的Magnox反应堆的示意图,后来升级为先进气冷堆(AGR)。法国与英国一样,最初也选择了气冷热堆方案,先后发展了二代技术,但后来选择了压水堆技术。在气冷快堆方面,20世纪60年代后期,德国和瑞士进行了气冷快堆的合作研究,欧洲气冷增殖堆协会(GBRA)也支持了一个独立的商业气冷快堆研究计划。早期的气冷快堆方案(Gratton, 1981; Kemmish, 1982)一般采用间接循环,匹配传统的蒸汽朗肯循环,利用大型



图3 英国早期Magnox反应堆的示意图

蒸汽发生器将热量从一次侧转移到二次侧。为了确保失压事故后的堆芯冷却,需要设置专设安全系统。

20世纪90年代国际上开始重新燃起对气冷快堆的兴趣,技术上延续了美国通用原子公司和欧洲气体增殖反应堆协会(GBRA)在20世纪70年代的技术路线,基于已有技术基础进行改良设计,希望在短期内能够建设原型气冷快堆。

2000年,欧洲委员会(EC)第五框架计划FP5支持了气冷快堆项目。项目认为可以基于气冷热堆、钠冷快堆的经验开展渐进性的气冷快堆概念设计。气冷热堆的运行经验为气冷快堆的冷却剂系统设计提供技术支持,钠冷快堆运行经验可以为气冷快堆在燃料、堆芯和燃料后处理方面提供技术借鉴。

2002年,气冷快堆通过第四代核能系统国际论坛(GIF)评估,被列入六种反应堆堆型之一,缩写由GCFR更改为GFR。除此之外,设计目标和设计方案也发生变化。一个重要特点是安全性在GIF中得到了高度重视,特别是将固有安全或非能动安全作为主要设计目标之一。

2005年,欧洲委员会(EC)第六框架计划FP6继续支持气冷快堆项目。与第四代国际论坛(GIF)倡议相符,FP6项目相较于FP5在发展路线上发生了变化,从基于现有技术在较短时间范围内实现原型堆建设,转变为全面实现气冷快堆系统创新发展,也不要求在短时间内进行商业部署。FP6项目认识到,欧洲在气冷反应堆技术方面具有很好基础,具有很多堆年的气冷热堆运行经验,并建造了四座大型钠冷快堆,开展了前期气冷快堆设计研究。这些

经验分散在各成员国的研究机构,因此FP6气冷快堆项目的目标之一是有效集成分散经验,最大程度发挥已有技术价值,并培养年轻一代的科学家和工程师。FP6项目成果也作为欧盟对第四代国际论坛(GIF)GFR的贡献。

截止到目前,国际上还没有建造过真正的气冷快堆。因此在气冷快堆商业化之前,需要建立一个用于鉴定耐高温材料和安全系统的实验反应堆——即ALLEGRO实验堆。ALLEGRO实验堆的设计热功率为75 MW,在设计时考虑了配置不同的堆芯燃料组件,从传统钢制包壳的MOX燃料,到后期运行阶段的全陶瓷燃料元件。ALLEGRO项目于2010年在法国CEA支持下成立,旨在创建ALLEGRO系统并完成示范。目前有四个国家的研究机构加入,分别是捷克、匈牙利、斯洛伐克和波兰。为便于开展工作,四个组织合作成立了联络协调机构,即“V4G4卓越中心”,致力于ALLEGRO示范项目的开发、设计和施工,预期目标是在斯洛伐克建设该项目,2020年完成ALLEGRO预设计,2025年完成概念设计。

目前,国内在气冷快堆方面还没有系统开展工作。

五、总结

气冷快堆作为第四代核能系统国际论坛选定的堆型之一,具有快堆和高温气冷堆的优势,满足第四代核能系统的主要指标,也是未来发展的潜在堆型之一。

气冷快堆虽然可以借鉴快堆和高温气冷堆的研发成果。然而,由于气冷快堆的自身特点,其研发难度更大,技术成熟度更低。2014年第四代核能系统国际论坛重新对包括气冷快堆在内的六种堆型进行了评估,气冷快堆的关键里程碑节点被推后。而且,从当前的研发进展来看,2014年制定的时间节点还会进一步推后。

在未来的研发计划中,还需要对气冷快堆的关键技术进行重点攻关,在此基础上开展系统整体集成验证,为气冷快堆的商业部署提供技术基础。从目前来看,气冷快堆的商业化应用将不是单个国家可以独立完成的,需要国际社会的共同努力。