

# 我国高温气冷堆技术及产业化发展

张作义 原 鲲

(清华大学核能与新能源技术研究院 100084)

## 一、前言

### 1. 高温气冷堆简介

高温气冷堆属于热中子裂变反应堆,用氦气作冷却剂,石墨作慢化材料,采用包覆颗粒燃料以及全陶瓷的堆芯结构材料。模块式高温气冷堆安全性好、氦气堆芯出口温度高,是目前国际核能领域公认的新一代核能系统,在工艺供热、核能制氢、高效发电、空间电源甚至军用领域都有广泛的应用前景。

高温气冷堆的高温特性和安全性能首先源于其独特的包覆颗粒燃料(图1)。目前压水堆使用的燃料由氧化铀陶瓷芯块和锆合金包壳组成,高温气冷堆的燃料是直径0.5 mm左右的 $\text{UO}_2$ 核芯,通过疏松热解碳、碳化硅、致密热解碳等三种同心球壳状包覆材料形成燃料颗粒,直径不足1 mm。燃料颗粒随机弥散在石墨基体内,压制烧结形成球形或棱柱形的燃料元件。只要环境温度不超过1650℃,碳化硅球壳就能保持完整,固锁放射性裂变产物,形成了第一道安全屏障(图1)。

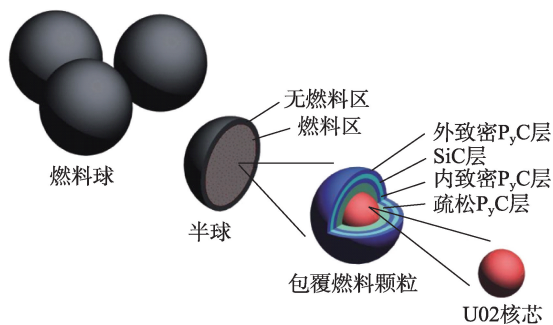


图1 高温气冷堆包覆颗粒及球形燃料元件

高温气冷堆采用氦气作冷却剂。氦气是一种惰性永久气体,不与任何物质起化学反应,中子吸收截面小,难于活化,具有很低的放射性水平。高温气冷堆采用石墨作慢化剂,堆芯不含金属,结构材料由石墨和碳块组成,熔点都在3000℃以上。另外,氦气与反应堆的结构材料相容性好,避免了以水作冷却剂与慢化剂的反应堆中的各种腐蚀问题,使冷却剂的出口温度可达950℃甚至更高。

### 2. 全球高温气冷堆的发展历程

高温气冷堆的前身是气冷反应堆。20世纪50年代,英国和法国在气冷堆方面的开发起到了主导作用。首先得到开发的是镁诺克斯(Magnox)型气冷堆,采用 $\text{CO}_2$ 气体作为冷却剂,石墨作为慢化剂,镁诺克斯金属作为燃料棒的包壳材料。英国随后开发了改进型气冷堆(AGR)。

自20世纪50年代中期开始,人们开始考虑用氦气取代 $\text{CO}_2$ 。氦气冷却的高温反应堆开发起始于英国牵头、多个欧洲国家参与的“龙堆”(Dragon)项目。试验堆的长时间运行证明了采用氦气冷却和石墨陶瓷堆芯设计的原理可行性,验证了包覆颗粒燃料在实现高燃耗深度和阻留裂变产物方面的优异性能,并在氦气领域开发了一系列的专有技术。

几乎与此同时,美国采用棱柱状石墨燃料元件,建造了“桃花谷”(Peach Bottom)反应堆;联邦德国采用球形石墨燃料元件,建造了AVR反应堆。这两座实验反应堆均于1966年达到临界,第二年并网发电。桃花谷实验堆的运行验证了堆芯物理计算

和设计方法,为后来商用堆的设计积累了丰富的数据资料。AVR反应堆直到1988年才退役,在超过一半的运行时间里,氦气堆芯出口温度达到950℃,积累了大量有关燃料和材料的运行经验。

在20世纪70年代世界核电发展高潮时期,美国和联邦德国分别建造了圣·弗伦堡(Fort St. Vrain)高温堆示范电厂和钍高温气冷堆示范电厂(THTR-300)。圣·弗伦堡示范电厂反应堆采用棱柱状燃料元件,1976年并网发电,热功率为842 MW,电功率为33万千瓦。反应堆于1989年关闭,由于氦风机采用水力轴承,密封不好,电厂的利用因子不高。THTR-300采用球形燃料元件,热功率为750 MW,电功率为30万千瓦。由于许可证要求变化导致施工延后,工期长达13年,直到1984年才建成。另外由于业主公司经费短缺,核电厂于1989年提前关闭。该核电厂在短短的运行期内,圆满实现了设计参数,并表现出很高的可用率。

在上述实验堆和核电厂试验中,燃料元件结构和性能得到不断改进,结合其大热容量的石墨堆芯、全范围的负反应性温度系数、惰性的氦气冷却剂,高温气冷堆的安全性也得到国际核能界的公认。三哩岛和切尔诺贝利核电厂事故之后,具有固有安全特征的模块式高温气冷堆成为主要发展方向。其基本特点是:在任何事故条件下,反应堆堆芯的剩余发热能够通过非能动的方式载出,堆芯包覆颗粒燃料的温度不会超过允许的限值。这样就可以避免堆芯熔化的可能,在发生严重事故的条件核电厂厂外的放射性剂量仍在限值范围之内,而不用采取厂外的应急计划。在这一设计思想指导下,西门子 Interatom 发展了基于球形燃料元件的200 MW热功率的HTR-Module,美国提出了基于棱柱状堆芯的模块式高温气冷堆(MHTGR),热功率为250 MW。

目前,正在运行的高温气冷堆包括中国的高温气冷实验堆(HTR-10)和日本的高温工程实验堆(HTTR)。HTTR于1991年开始建造,1998年建成临界,次年开始提升功率。HTTR热功率30 MW,

堆芯氦气出口温度950℃,进口温度395℃。HTTR主要面向高温工艺供热、制氢炼钢等领域的应用。

### 3. 我国高温气冷堆的发展阶段

中国的高温气冷堆技术的研究发展工作,始于20世纪70年代中期,是以清华大学核研院为主开展的。研发大致分为5个阶段。

第一阶段是1974~1985年,早期探索阶段。

第二阶段是1986~1991年,“863”计划立项并开展关键技术研究的阶段。

第三阶段是1992~2000年,10兆瓦高温气冷实验堆的建造阶段。

第四阶段是2001~2007年,10兆瓦高温气冷实验堆的运行与安全试验和商业化示范的准备阶段。

第五阶段是2008年至今,是高温气冷堆核电站国家科技重大专项实施及二十万千瓦核电站示范工程建设阶段。

## 二、10兆瓦高温气冷实验堆(HTR-10)

### 1. 技术科研和反应堆建造

早在1974年,我国就开始对球床型高温气冷堆进行了探索性的研究。1986年国家“863”高技术研究与发展计划启动后,高温气冷堆被列为“863”计划能源领域的一个研究专题,设立了设计研究、燃料元件研究、钍-铀循环燃料后处理研究、石墨堆体性能研究、氦技术及氦关键设备研究、压力容器、球床流动特性和燃料装卸系统技术研究、结构材料使用性能研究等8个研究方向,以清华大学核研院为主,与国内有关单位协作,在“863”计划的统一安排下进行了系统、深入的开发论证和单项关键技术实验研究。

1992年3月,国务院批准了《关于“863”计划能源领域2000年发展目标的请示》,确定2000年前在清华大学核研院建成一座热功率为1万千瓦的高温气冷实验堆,以掌握高温气冷堆的设计、建造及运

行技术,验证模块式高温气冷堆的固有安全特性,进行燃料元件和材料的辐照实验,进行材料和区域供热实验,开展高温核工艺热的应用研究。同年6月,国家教委下达“关于高温气冷实验堆立项的通知”,高温气冷堆的发展开始由实验研究转入实验堆建造的新阶段。1992~1995年,清华大学核研院先后完成了10兆瓦高温气冷实验堆的环境影响报告、可行性研究报告、初步安全分析报告和初步设计,并分别获得了有关领导部门的审查批准。1995年6月,10兆瓦高温气冷实验堆浇灌第一罐混凝土。1997年10月完成了主厂房封顶。2000年4月,完成反应堆压力壳内的全部构件与设备安装,12月首次装料达到临界。2003年1月实现满功率调试运行和验证试验。

HTR-10在世界上首次实现了球床模块式高温气冷堆的布置方案,其基本参数如表1所示。反应堆热功率10 MW,反应堆入口温度250℃,出口温度700℃,采用蒸汽循环发电。反应堆设计模拟德国模块式高温气冷堆(HTR-Module),反应堆压力容器和蒸汽发生器壳体采用肩并肩布置(图2),中间用同轴套管链接。球形燃料元件采用在线装卸。直流蒸汽发生器将二次侧的给水加热至3.5 MPa、435℃的过热状态,推动蒸汽轮机发电。

表1 HTR-10的基本参数

| 性能         | 参数                                            |
|------------|-----------------------------------------------|
| 热功率        | 10 MW                                         |
| 电功率        | 3 MW                                          |
| 一回路氦气压力    | 3.0 MPa                                       |
| 堆芯氦气出口平均温度 | 700℃                                          |
| 堆芯氦气入口平均温度 | 250℃                                          |
| 氦冷却剂流量     | $4.3\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$             |
| 蒸汽温度       | 435℃                                          |
| 蒸汽压力       | 3.5 MPa                                       |
| 给水温度       | 104℃                                          |
| 堆芯体积       | $5\text{ m}^3$                                |
| 堆芯燃料球总数    | 2.7万个                                         |
| 燃料加浓度      | 17%                                           |
| 平均燃耗       | $80\text{ GW}\cdot\text{d}\cdot\text{t}^{-1}$ |
| 堆芯平均功率密度   | $2\text{ MW}\cdot\text{m}^{-3}$               |
| 单球最大的功率    | 1.08 kW                                       |

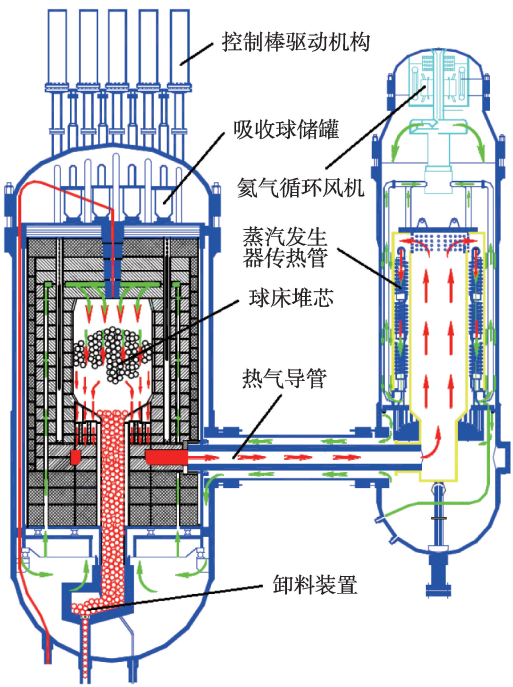


图2 10 MW 高温气冷实验堆(HTR-10)堆本体示意图

经过以上近20年从基础研究、核心技术突破到实验堆建设三个阶段,我国初步具备了高温气冷堆的自主设计和建造能力,形成了自主独立的知识产权。完成了反应堆物理、热工、机械、系统的自主设计,通过了核安全审查;研究和开发了关键的技术和设备,例如燃料装卸系统、氦风机、控制棒驱动机构等;完成了大型部件的国产化制造,例如压力容器、直流蒸汽发生器、金属堆内构件、石墨堆内构件等;建立了燃料元件的生产线,在国内生产了2万多个陶瓷包覆颗粒球形燃料元件;研究和开发了全数字化反应堆保护系统。

2. 固有安全性验证试验

一般的燃煤或燃气锅炉熄火后,就不会再产生热量。而核反应堆不同,它停堆后还会继续由于衰变反应而产生热量,这是核反应堆与常规电厂锅炉的主要区别。只有当衰变反应的热量能够顺利带出堆芯,反应堆才不会发生堆芯熔化、放射性外泄的严重事故,这是保证核安全的最主要技术挑战。模块式高温气冷堆从设计源头上克服了这些挑战,首先是单堆功率较低,只有压水堆的1/10,降低了



衰变热的散热负荷。另外,堆芯功率密度也很低,只有压水堆的1/30,具有相对大的散热表面。通过这样的模块式设计,就可以实现以非能动散热手段对付不可控的衰变放热过程。在主动冷却失效时,衰变热通过辐射、导热和自然对流等方式从堆芯传递给环境热阱。这种固有安全设计在HTR-10上通过了实验验证,这也是全球首次在真实反应堆上进行此类安全演示。

2003年4月、10月和2004年9月,经国家核安全局审查批准,在10兆瓦高温气冷实验堆上进行了厂外电源断电试验,主氦风机停机试验,以及甩负荷试验等3项验证固有安全性的试验。通过人为地制造这三项事故,引起功率急剧增长,同时人为闭锁安全保护,控制棒不能落棒。在这种比福岛核灾难更严重的事故工况下,依靠反应堆的固有安全特性,加上高温气冷实验堆优异的燃料性能,不仅没有发生堆芯熔化的严重后果,而且靠全程负反应性温度系数实现了自动停堆。这些试验展示了模块式高温气冷堆的一个最重要特性:在任何事故下,包括丧失所有冷却的情况下,不采取任何人为的干预,反应堆能保持安全状态。这达到了第4代核能系统的一个重要指标:能够通过对核电站的整体实验向公众证明核电的安全性。这些安全演示受到国际核能界的高度关注和好评。

### 三、20万千瓦高温气冷堆核电站示范工程

自2004年以来,清华大学进一步推动高温气冷堆技术的新发展,开展了高温气冷堆核电站技术开发、设计研究以及产业化平台的建设,形成了高温气冷堆核电站示范工程的攻关方向和态势。清华大学与中国华能集团、中国核工业建设集团公司启动了电功率20万千瓦级高温气冷堆核电站示范工程(HTR-PM)的筹备工作,选择厂址,启动了示范工程的标准设计。项目得到了国家发改委、科技部和国防科工委的支持。2006年1月,国务院公布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~

2020)》,高温气冷堆核电站与大型先进压水堆核电站一起被列入国家重大专项。2007年以清华大学为主导编制了高温气冷堆重大专项总体实施方案,该方案于2008年2月得到国务院常务会议批准。

高温气冷堆核电站重大专项的总体目标是:以我国已经建成运行的10 MW高温气冷实验堆为基础,攻克高温气冷堆工业放大与工程实验验证技术,高性能燃料元件批量制备技术,建成具有自主知识产权的20万千瓦模块式高温气冷堆核电站示范工程,以及开展氦气透平直接循环发电及高温堆制氢等技术研究,为发展第四代核电技术奠定基础。

示范工程技术方案的确定原则是:具有固有安全性和潜在经济竞争力,尽量采用成熟技术或经过验证的技术,实现标准化、模块化设计和建造。技术特点为:采用模块式高温气冷堆设计,单堆热功率250 MW;球形燃料元件,实现不停堆换料;设置两套独立停堆系统:控制棒系统和吸收球停堆系统;双模块反应堆带一汽轮机的运行模式(图3);常规岛采用成熟的超高蒸汽透平机组方案。示范工程的主要设计参数如表2所示。

核岛布置两个反应堆模块,通过两台蒸汽发生器共同为一台汽轮机提供蒸汽。反应堆与蒸汽发生器分别设置在两个压力容器内,其间用热气导管壳体相连接,构成“肩并肩”的布置方式(图4)。

反应堆冷却剂系统的流程简述如下:经主氦风机增压的低温(250℃)氦气,进入热气导管壳体的环形流道,进入反应堆压力容器下部;再流过堆芯底部金属支承结构,对堆底支承结构进行冷却;然后进入侧石墨反射层的冷氦气孔道,向上流动,由顶反射层的冷气联箱汇集后,向下进入堆芯;先经过堆顶的顶空腔,向下流过随机堆积的球床堆芯,带走堆芯发热,氦气升温;高温氦气通过底反射层的流道汇集于下部热气混合室;除流经堆芯的氦气外,还有少量的氦气旁流过燃料卸料管、控制棒孔道和反射层结构的缝隙;高温氦气在下部热气混合室经扰动混合成为平均温度750℃的高温氦气,汇集至热气导管入口,经热气导管进入蒸汽发生器壳体内部的蒸汽发

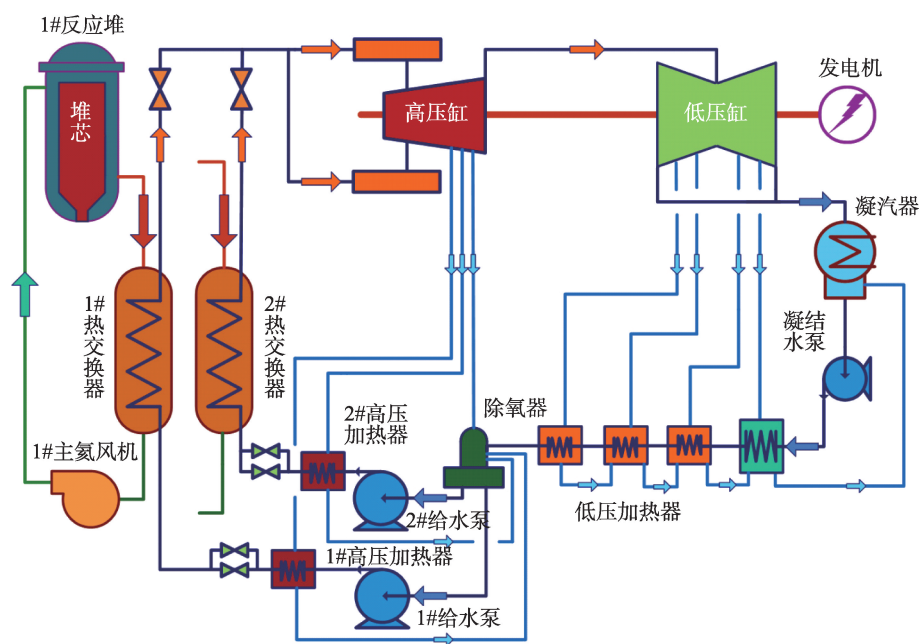


图3 高温气冷堆核电站示范工程原则性流程

表2 示范工程的主要设计参数

| 参数         | 单位                | 数值                      |
|------------|-------------------|-------------------------|
| 名义电功率      | MWe               | 200                     |
| 反应堆总热功率    | MWt               | 2×250                   |
| 设计寿命       | 年                 | 40                      |
| 堆芯平均功率密度   | MW/m <sup>3</sup> | 3.22                    |
| 发电效率       | %                 | 40                      |
| 一回路氦气工作压力  | MPa               | 7                       |
| 反应堆入口/出口温度 | ℃                 | 250/750                 |
| 燃料颗粒类型     | —                 | TRISO(UO <sub>2</sub> ) |
| 每燃料元件装铀量   | g                 | 7                       |
| 燃料元件富集度    | %                 | 8.9                     |
| 活性区直径      | m                 | 3                       |
| 活性区等效高度    | m                 | 11                      |
| 燃料元件总数/堆   | 万个                | 42                      |
| 平均卸料损耗     | GWd/tU            | 90                      |
| 蒸汽发生器类型    | —                 | 直流蒸汽发生器                 |
| 主蒸汽压力      | MPa               | 13.24                   |
| 主蒸汽温度      | ℃                 | 566                     |
| 主给水温度      | ℃                 | 205                     |
| 进汽轮机的主蒸汽流量 | t/h               | 673                     |
| 汽轮机型式      | —                 | 超高压凝汽式                  |

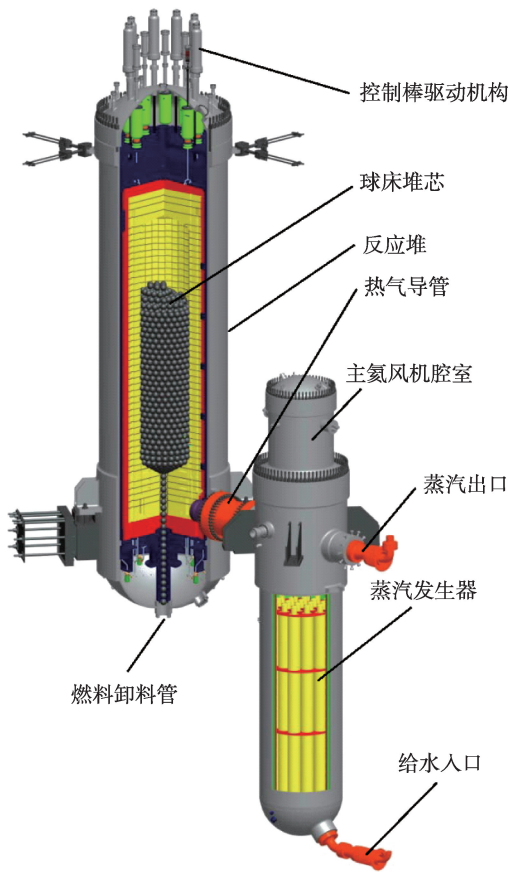


图4 HTR-PM堆本体示意图

生器传热管束上部,进入蒸汽发生器;在蒸汽发生器传热管间,高温氦气自上而下流过蒸汽发生器传热管。经蒸汽发生器冷却后,750℃的高温氦气成为

250℃的冷氦气,向上流经蒸汽发生器外围与壳体之间的环缝流道和冷氦气上升管,进入主氦风机吸入口,完成了反应堆冷却剂的闭合循环流程。

反应堆堆芯设计为可流动的球床结构,球床堆芯外围由石墨反射层和碳砖绝热层构成。靠近堆芯的石墨侧反射层内布置了控制棒孔道,稍外侧设有流通冷氦气的孔道。在石墨反射层内还布置了碳化硼吸收球孔道。控制棒和吸收球系统独立承担反应性的控制功能,满足多样性和冗余性的要求。共有10套控制棒和20套作为第二停堆系统的吸收球停堆装置。整个堆芯陶瓷结构设置在金属堆芯壳内,堆芯壳支承在反应堆压力容器内。堆芯壳与压力容器通过250℃的冷氦气进行冷却,对金属结构进行保护。

在蒸汽发生器壳体上部布置了主氦风机。主氦风机采用立式方案,驱动电机由压力容器外的变频器驱动,由电磁轴承系统支撑。蒸发器包含了19个独立的螺旋管组件。每个组件由5层螺旋管组成,包含35根螺旋管。所有螺旋管入口布置有节流孔以保证两相流的稳定性,可进行在役检测。在反应堆中被加热到750℃的高温氦气在蒸汽发生器中加热二回路水,产生超高压过热蒸汽,送到汽轮机发电。

HTR-PM示范工程于2012年12月开工以来,项目联合团队克服了各种困难,取得了重大进展。2015年6月核岛厂房封顶,2016年12月主控室可用,2017年6月实现了220 kV倒送电,2018年5月完成首台燃料装卸系统安装和首台主氦风机的出厂实验。示范工程已全面进入调试阶段,预计2019年并网发电。

#### 四、我国开发推广高温气冷堆技术的意义和前景

我国在建的高温气冷堆核电站示范工程,是世界上最接近商业化、安全性也最高的四代核电技术。它被国际上认为是一种“不会熔毁的反应堆”。这首先归因于它所采用的全陶瓷型的高性能核燃料,利用清华大学中试生产线的技术成果,在中国核

工业集团包头北方核燃料公司建成了高温气冷堆核燃料元件厂,年产30万个燃料球。截至2017年7月,第20万个连续生产的燃料球下线,标志着燃料元件厂已经实现了设计生产能力,质量满足设计要求。这个采用中国自主研发技术,全部装备国产化的燃料元件厂在技术水平和生产规模上居于世界首位。在燃料元件的质量检测方面,在批量生产过程中任意选取的10个燃料球,在欧盟开展了长达3年多的中子辐照及高温极限条件测试,结果表明燃料元件在高达1650℃高温条件下,能够有效地阻挡放射性的泄露。有关指标达到了世界最好水平。

在重大专项实施过程中,完成了一系列世界首台套的重大装备的制造,对于相关行业的技术提升起到了重要的推动作用。核岛设备总共有15181台套,包括首台套设备2201台,包括世界上之前还没有、通过研发创制的创新型设备660台。例如上海电气完成了反应堆压力容器、金属堆内构件、控制棒驱动机构等重要装备的研制。上海电气鼓风机厂和哈电佳木斯电机厂完成了主氦风机的研制。经过重大装备的研发,示范工程已经实现了90%的国产化率。这些成果中有很多可以“沿途下蛋”,就是说在其他领域也具有很重要的应用。比如支承主氦风机的重载电磁轴承,在常规能源、动力转化、机械加工领域同样具有重要的应用。

高温气冷堆的市场定位是压水堆核电的补充、核能供热的主力。利用示范工程已经验证的技术,在保持主要设备及系统不变的情况下,多个模块组合,形成60万千瓦的核热电联产机组(HTR-PM600)。目前已经完成了标准设计,正在推动项目前期工作(图5)。这种机组具有迄今为止在裂变核能系统上能够实现最高安全性能,并且能够通过全尺度实际反应堆安全验证实验,最大限度改善公众对核能的接受性。在经济上,与商业化3代压水堆核电站的差距控制在有限的范围内,例如上网电价差距在10%~20%以内。这种机组可以用来替代同等功率的燃煤发电机组,实现高效发电。由于发电系统和60万千瓦火电机组类似,还可以充分利用



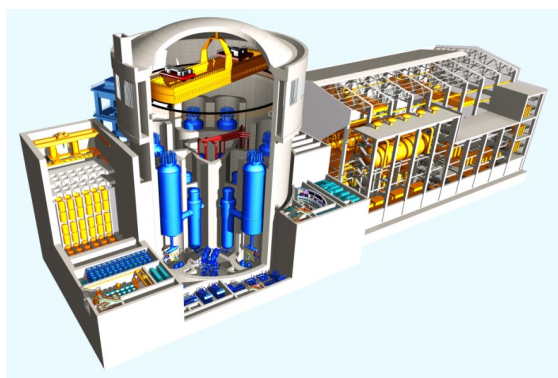


图5 HTR-PM600核电厂3维设计图

燃煤电站原有的设备和基础设施。同时,通过汽轮机的抽汽,既可以提供石化产业的高参数蒸汽,也可以提供民用大规模集中供暖等领域所需的低参数蒸汽,实现很高的能源利用效率。

充分挖掘高温气冷堆的“高温”、“气冷”特征,有望在工业、交通及特殊动力领域实现更大的应用潜力。目前,示范工程的反应堆出口温度是 $750^{\circ}\text{C}$ ,在同样的反应堆设计及使用同样材料情况下,可以实现 $950\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的高温供热。利用这种高温能量,可以用来大规模高效率生产氢气,为从钢铁工业到汽车交通等各种领域提供新型能源,推动这些领域的跨越式发展。从“气冷”的角度,目前所有的核能与核动力装置,都要经过“核-热-电或动力”的转换过程,而“热-电”的转换过程几乎都是用高能气体推动涡轮机高速运转。如果高温气冷堆的燃料性能达到很高的水平,我们就能够把上述“核-热-电”转换高度集成在一个回路中,实现重大专项总体目标中要求的“氦气透平直接循环”。在最小的空间内,实现最高的动力输出,达到最高的效率。

## 封底说明

## 脑控无人机

你能想象吗?人只用自己的脑电波就能操控多架无人机执行不同的任务。以前这种场景只有在科幻电影里才能看得到,不过目前科学家们正试图将其变成现实。据国外媒体报道,美国亚利桑那州大学人机界面与控制实验室的科学家们正在研制开发利用脑电波来操控无人机的导航界面,力图通过这个系统来操纵无人机。目前无人机运行主要是依靠操纵杆或者手机来进行操控,而且一个人只能够操作一架无人机。这项研究的最终目的是破解人类大脑感知多代理系统信息的密钥,从中提取与所期望的集体行为相关的信息,使人与无人机间通过脑电波来进行传输信号,并从中获取控制命令,这是普通的人工控制系统无法比拟的。据研究人

员介绍,这种“集群控制”的行动模式的创意是从自然界的鸟类和鱼类群体行为中获得灵感的。如这项计划研制成功,将会实现一名操控员可以同时操控多架无人机,使无人机形成编队,也可以让多架无人机在不同的航线上执行不同的任务。这项计划将大幅提升无人机的工作效率,尤其是在无人机执行搜索和救援任务时,更有效的实施大面积的覆盖。该项研究应用广泛,特别是在巡视搜索、火灾搜救、集会监控上有着明显优势,同时在军事上也有着广泛的应用前景。美国国防部先进研究计划署和美国空军科学研究办公室对该项目进行了资助,并给予了高度评价。

(博文/供稿)