

高温气冷堆发展前景与我国的 10 兆瓦实验堆

Developmental Prospects for High Temperature Gas—Cooled Reactor and China's HTR—10

钟大辛

(清华大学核能技术设计研究院, 教授 北京 100084)

孙玉良

(清华大学核能技术设计研究院, 副教授 北京 100084)

高温气冷堆是一种先进核反应堆, 已被列入国家高技术研究和发展计划(863 计划)。作为我国高温气冷堆发展战略的切实可行的第一步, 一座热功率为 10 兆瓦的高温气冷实验堆已于 1995 年 6 月在清华大学核能技术设计研究院开始建造。高温气冷堆是一种安全性好、多用途的核反应堆。它提供的高温核热源, 既可用于高效率发电, 又可作为高温工艺的热源。本文将着重介绍高温气冷堆的主要技术特点及其发展和应用的前景, 同时扼要介绍我国第一座 10 兆瓦高温气冷实验堆的总体设计特点和建造进展情况。

高温气冷堆的技术特点

高温气冷堆是一种先进的核反应堆, 它采用“全陶瓷”型的包覆颗粒核燃料元件, 用石墨作为中子慢化剂和堆芯结构材料, 以具化学惰性的单相氦气作为冷却剂, 因而堆芯能够承受高温, 具有很好的热稳定性和化学稳定性。高温气体堆是目前唯一能够提供 950℃ 或更高温度的核工艺热的核反应堆, 具有广泛的应用前景。

80 年代以来, 国际上对核反应堆与核电站的安全性提出了更高的要求, 高温气冷堆由于其良好的安全特性受到国际核能界和工业界的重视。高温气冷堆技术的先进国家——德国和美国分别提出并发展了模块式高温气冷堆设计概念。它采用较低的堆芯平均功率密度和较大的堆芯高度—直径比, 使这种反应堆具有固有安全性, 并能满足发电和供热的多用途的要求。它具有下列主要技术特点:

1. 具有固有安全性

在反应堆的整个运行寿期内, 在任何事故下, 反应堆都具有自停堆能力, 堆芯的剩余发热可以借助于非能动的自然机理, 即通过导热、自然对流和辐射由堆芯传出堆外, 保证燃料元件的最高温度不

超过燃料元件的最高温度限值, 从而可排除堆芯和燃料元件发生熔化的严重事故, 不会发生威胁公众和环境安全的放射性释放。此外, 由于反应堆的冷却剂氦气是一种化学惰性气体, 与堆芯结构和一回路材料相容性好, 中子吸收截面小, 难于活化, 因此在反应堆正常运行时氦气的放射性很低, 这有利于运行和维修; 操作运行人员和环境所受的辐射剂量也很低。由于这些特性, 模块式高温气冷堆是目前国际上公认的具有固有安全特性的下一代新堆型。

2. 能够提供高温工艺热

高温气冷堆一回路的出口温度可以达到 950℃ 或更高, 它是各类核反应堆中运行温度最高的堆型, 因此它可以作为高效发电和高温供热的核热源。氦气出口温度为 700~750℃ 的高温气冷堆, 采用蒸汽透平循环发电, 效率可达到 40%, 比目前大型压水堆核电站的效率高出约 20%; 当高温堆的氦气出口温度提高到 850~950℃, 可采用气体透平循环发电, 发电效率可以达到 40~50%。另外, 高温气冷堆还可以通过热电联供广泛应用于稠油热采、石油化工、煤的气体和液化以及其他需要消耗大量高温工艺热的工业部门, 它是目前唯一能提供高温工艺热的核反应堆堆型。

3. 可采用多种燃料循环

高温气冷堆由于堆芯的中子物理性能和结构设计特点, 可采用多种燃料循环方式和不同的核燃料, 燃料循环的灵活性大。它可以采用低浓铀—钚燃料循环, 为快中子堆积累钚燃料; 也可以采用高浓铀—钚燃料循环, 以利用我国丰富的钚资源。我国已开始发展采用球形燃料元件的球床式高温气冷堆, 其燃料元件可以连续地装入或卸出堆芯。这种高温堆的设计可以使不同核燃料循环在同一反应堆内连续过流与灵活转换。

高温气冷堆发展与应用

1. 高温气冷堆在我国未来能源系统中的作用

高温气冷堆在我国未来能源系统的作用是基于它的固有安全性、经济上的竞争力、环境污染小、发电效率高以及工艺热在工业中的广泛应用的可能性。它将在下列方面起到重要作用:

(1)为某些特殊的地区提供发电效率高的核电或核供热站,作为压水堆核电站的一个重要补充。例如压水堆核电站选址困难的地区,能源资料短缺、能源运输困难、环境污染严重的地区或工业热用户集中的地区。

(2)为大量消耗能源的工业用户提供温度高到950℃的低污染热源,用核供热替代常规的化石燃料(例如煤、石油和天然气)供热,以改善环境状况和节省化石燃料的消耗。

(3)从长远看,高温气冷堆还提供了利用钍资源的可能性,这对开辟我国核燃料利用的新途径具有长远的意义。

2. 高温气冷堆的应用前景

(1)发展高温气冷堆气体透平循环核电站

由于高温气冷堆氦气出口温度可以达到950℃或更高,这就为采用高效率的气体透平循环发电提供了基础。国际上对高温堆氦气透平直接循环发电已进行了多方面的研究和发展工作,国际原子能机构也组织了一系列的活动,旨在推动这项技术的国际交流和合作。目前已提出了几种不同类型的高温堆气体透平循环发电的设计方案。例如:美国GA公司的设计方案是采用氦气透平直接循环发电,高温堆热功率为600兆瓦,发电效率为50%;德国KFA研究中心的设计方案是采用气体透平和蒸汽透平联合循环发电,利用改进的技术将高温堆出口氦气温度提高到1050℃,其发电效率可达到54.5%;俄罗斯、日本、荷兰和南非都在进行这方面的研究与发展工作;清华大学核能技术设计研究院根据我国的情况正在进行高温堆间接气体透平循环和气体—蒸汽透平联合循环发电的研究,以避免直接循环中因放射性沉积而带来的透平机组的运行和维修困难,并且可以选择除氦气透平以外的其他气体透平机组。高温堆气体透平循环将大大地提高核电站的发电效率。

(2)高温气冷堆应用于稠油热采

我国稠油资源丰富,粘度很高的稠油资源的开发是增加我国石油产量的重要途径之一。稠油热采需要注入大量的高温高压蒸汽,采用常规的燃料锅炉供蒸汽的方法,提供注入蒸汽所需消耗的燃油可高达原油采油量的30~40%。用高温气冷堆替代燃油锅炉提供高温高压蒸汽,可以节省大量的燃油消

耗,减小CO₂排放以改善环境条件,具有技术和经济上的优越性。美国、德国和稠油资源丰富的委内瑞拉和印度尼西亚都开展了这方面的研究。清华大学核研院与德国KFA研究中心合作,在石油部门的支持下,开展了利用高温气冷堆进行稠油热采的研究,结合胜利油田单家寺稠油区(探明稠油储量为6600万吨,计划开采生产稠油100万吨/年)进行了利用高温核热开采稠油的技术和经济可行性研究,得到了国际同行们的关注与重视。

(3)高温气冷堆热电联供应用于石化工业或其他工业用户

大型石油化工企业是能源消费大户,需要消耗大量电力、工艺热和工艺蒸汽。例如一个典型的炼油厂(处理原油600万吨/年)需要的热功率为450兆瓦,其工艺过程需要高温、中温和低温的各种参数的蒸汽,目前不少是用燃油锅炉生产和供应工艺蒸汽的。由于近期和以后相当长的时期内,节省石油的消耗都是我国的一项重要政策,因此采用高温气冷堆供热来代替常规燃油锅炉是有吸引力和经济效益的。

(4)用高温核供热进行煤的气化和液化

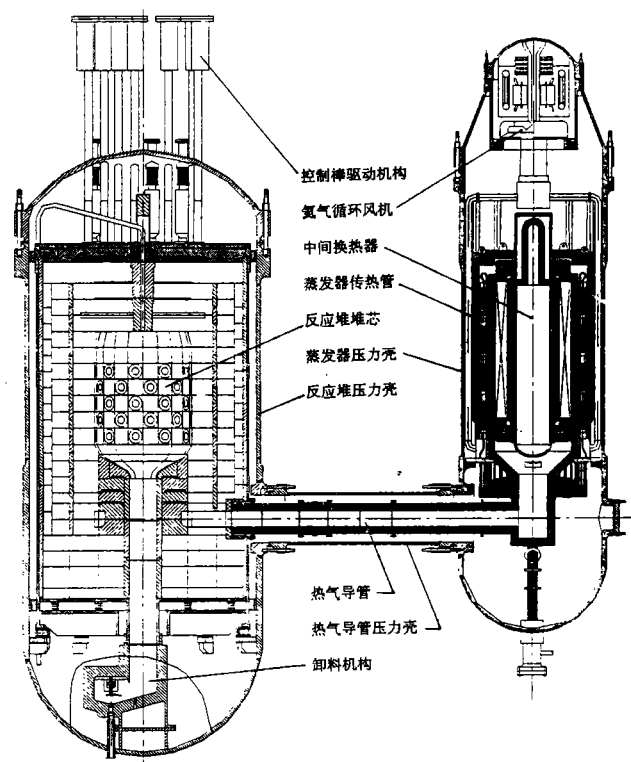
煤的气化和液化是解决未来液体和气体燃料供应的重要途径。通过煤的气化和液化,可以把煤炭转化为高热值的、清洁的气体 and 液体燃料。根据对我国下世纪中叶能源供应和需求的预测,由于现代化的社会与高度发展的经济需要大量的液体燃料,预测在2050年前后液体燃料需求量占能源需求总量的16%以上,即每年需要4.0~4.6亿吨;根据国内生产与供应能力预测,石油供应的缺口达2.0~2.8亿吨。用煤液化工艺来生产液体燃料,将是补充液体燃料不足的重要途径。煤的气化和液化需要750~950℃的高温工艺热,出口温度为950℃的高温气冷堆是唯一能满足其供热需要的核反应堆堆型。通过核能—煤转化技术生产合成液态燃料对缓解我国液态燃料供应短缺、有效利用核能、节约煤炭资源和减少环境污染具有重要作用。

具有重大技术开发意义的我国第一座10兆瓦高温气冷实验堆(HTR—10)

1. 建造目的

根据国家“863计划”能源领域2000年发展战略目标,为了在下世纪初能发挥高温气冷堆在我国能源系统中的作用,实现高温气冷堆在我国的推广应用,作为这一战略的切实可行的第一步,决定在2000年前建造一座热功率为10兆瓦的高温气冷实验堆(简称HTR—10,如下图所示),用于发电、区域供热和高温工艺热应用的开发研究。HTR—10建造的主要目的为:(1)掌握高温气冷堆的设计、建造和

运行技术；(2)进行燃料元件的辐照考验；(3)验证模块式高温堆的安全特性；(4)进行热电联供和气体透平循环发电的试验；(5)开展高温核工艺热应用的研究。



10 兆瓦高温气冷堆一回路剖面图

2. HTR—10 主要技术参数

反应堆热功率	10 兆瓦
一回路氦气压力	3.0 兆帕
堆芯出口氦气平均温度	700~900℃
堆芯入口氦气平均温度	250~300℃
一回路氦气流量	4.3 千克/秒
燃料元件：形式	球形
直径	60 毫米
U^{235} 加浓度	17%
堆芯(活性区)体积	5 立方米
堆芯内燃料元件总数	27 000 个
燃料平均燃耗	80 000 兆瓦·日/吨
燃料循环方式	多次通过

3. HTR—10 总体设计特点

10 兆瓦高温气冷实验堆(HTR—10)的设计体现了 200 兆瓦模块式高温气冷堆(HTR—Module)的主要技术特点。它采用包覆颗粒燃料构成的“全陶瓷型”球形燃料元件，元件直径为 60 毫米，其中直径 50 毫米的球芯为核燃料区，元件外区为 5 毫米厚度的石墨球壳。核燃料铀—235 的初始加浓度为 17%，每个燃料元件的重金属含量为 5 克，设计平均燃耗为 80 000 兆瓦·日/吨，燃料元件多次通

过堆芯循环使乏燃料元件达到的燃耗比较均匀。

反应堆堆芯区是一个由石墨反射层围成、直径为 180 厘米、高度约为 240 厘米、具有锥形底部的圆柱形腔室，内装燃料元件约 2.7 万个，其活性区体积约 5 立方米。堆芯上部设置直径为 65 毫米的燃料元件装入管，堆芯底部有一个直径为 500 毫米的燃料元件卸出管，可以连续装入和卸出燃料。

反应堆设置两套独立的停堆系统，即由 10 根控制棒组成的第一停堆系统和由 7 组硼吸收球孔道组成的第二停堆系统。控制棒孔道和吸收球孔道都位于侧反射层石墨砌体内。两套独立的停堆系统保证反应堆在任何事故下都能够实现停堆，确保反应堆安全。

反应堆一回路以氦气为冷却剂，工作压力为 3.0 兆帕，反应堆出口氦气温度为 700℃，入口温度为 250℃。堆芯产生的热能由一回路氦气通过蒸汽发生器传给其二次侧的水，并获得 4.0 兆帕、440℃ 的蒸汽。二次蒸汽被引向一台 3 兆瓦的汽轮发电机组，反应堆在额定功率运行时，约可发电 26 兆瓦。该反应堆在氦气出口温度 700℃ 下运行取得经验并完成相应的试验后，将进入第二阶段运行，即把反应堆出口氦气温度提高到 900℃，进行气体透平循环发电和高温工艺热应用的试验研究。

为解决高温气冷堆氦气系统的工程技术问题，在清华大学核研院建造了高温氦气试验回路(见封面图)。在该回路上可进行氦气流动和传热特性、氦气净化、系统密封和绝热等试验研究，并可利用此回路进行反应堆部件和设备性能的模拟试验。

4. HRT—10 设计和建造进展

HTR—10 的概念设计和可行性研究报告于 1991 年完成并通过国家科委组织的审评。建造 10 兆瓦高温气冷实验堆项目于 1992 年 3 月被正式批准并立项。1992 年与 1993 年完成“环境影响报告”和“初步安全分析报告”并分别提交国家环保局和国家核安全局审查通过。1994 年 12 月国家核安全局正式颁发了 HTR—10 的建造许可证。1995 年 6 月 10 兆瓦高温气冷实验堆正式在清华大学核能技术设计研究院场址开始建造，目前设计、设备制造、土建工程和各项工程试验均在按计划进行。HTR—10 反应堆计划于 1999 年初建成并达到首次临界。

参考文献

- [1]王大中、吕应运：“我国能源前景与高温气冷堆”，《核科学与工程》，13 卷 4 期，1993. 12
- [2]钟大辛、秦振亚：“10MW 高温气冷堆的总体设计特性”，《核科学与工程》，13 卷 4 期，1993. 12
- [3]zhong Daxin, Xu Yuanhui, "Progress of the HTR—10 Project", LAEA—TCM on "Design and Development of HTGR with Closed Cycle Gas—turbines" 30 Oct. —2 Nov. 1995. Beijing, China

(责任编辑 蔡德诚)