

高温气冷堆的发展和设计现状

预计美国等国可从容量较小的模块系统获得重要利益

L. D. Mears 和 A. J. Goodjohn

气冷堆经历了漫长而多变的历程，其历史可上溯至核能发展的最初岁月。早期的开发工作集中于低温反应堆系统，这种系统采用石墨慢化剂、带金属包壳的燃料和二氧化碳冷却剂。它们的商业应用始于 50 年代中期，当时联合王国和法国率先建成了使用天然铀燃料的镁诺克斯型核电站，接着，从 70 年代中期开始，英国独家建成了几座温度较高的以低浓铀为燃料的改进型气冷堆 (AGR) 电站。随着早期的某些镁诺克斯型电站的逐渐退役和最后一批改进型气冷堆电站 (汉沙姆-2 和托内斯) 的建成并于最近投入运行，这两项起先驱作用的计划现在已经结束。1000 多堆年的运行经验，对正在进行的温度更高反应堆的开发和设计计划来说，是一个极好的宝库。

人们从一开始就认识到，如果冷却气体能达到更高的温度，则气体冷却方式会带来更大的效益 (特别是有朝一日能达到现代化石燃料电站的蒸汽工况，那发电效率就能更高)。正是这种目标加上气体温度更高还可能使核能获得更加广泛的应用 (比如提供工业用热) 的观点，促进了高温气冷堆 (HTGR) 的发展。这种高温气冷堆的特点是，堆芯由石墨慢化剂和陶瓷燃料组成，采用惰性气体氦作冷却剂。

美国和德意志联邦共和国自 50 年代中期开始研制 HTGR。由于这两个国家的政府和工业界之间都存在着合作协定，因而他们的核计划是沿着类似的发展

展路线前进的。唯一的根本差别是燃料元件的形状。目前所有的 HTGR 概念都采用小颗粒球状燃料，外面用热解碳和碳化硅之类的耐高温材料多层涂敷。德意志联邦共和国的燃料元件设计是把这些涂敷的颗粒燃料装入球状燃料元件内 (直径 6 cm)，反应堆连续换料。美国的燃料设计是用石墨护套把类似的涂敷燃料颗粒组合成燃料棒，然后把这些燃料棒插进在六角形石墨燃料元件块上钻出的盲孔之中，这些石墨块的对边距离为 36 cm，长约 79 cm。美国的这种设计需停堆换料。

正如本文将要谈到的，正是这种涂敷颗粒燃料特有的性能，导致了目前的这些模块 HTGR 的发展，即德意志联邦共和国开发的高温反应堆模块 HTR，和美国开发的模块式 HTGR 或称 MHTGR。

高温气冷堆设计的发展

首批建造和运行的 HTGR 有英国的“龙” 20 MWth 研究性反应堆，美国的桃花谷-1 40 MWe 试验性发电机组和德意志联邦共和国的 AVR 15 MWe 试验性发电机组。这三座堆都是 60 年代中期投入运行的，而且运行状况全都很好。“龙”堆和桃花谷机组在完成预期任务之后均已退役。AVR 是进行与 MHTGR 概念有关的燃料和安全实验的宝贵试验基地，在服役 20 多年之后于 1988 年年底停止发电。

1979 年，美国 330 MWe 的圣符仑堡电厂投入运行，德意志联邦共和国 300 MWe 的钍高温气冷堆电

Mears 先生是美国的电力公司发起的一个组织——气冷堆协会 (GCRA) 的总干事，Goodjohn 先生为该协会顾问。

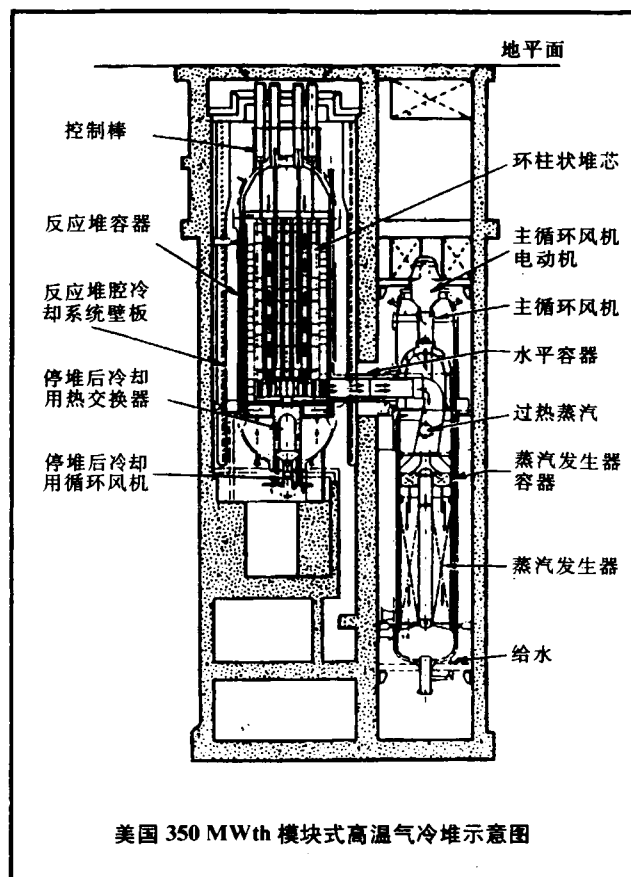
厂 (THTR-300) 则于 1987 年投入运行。圣符仑堡电厂有正反两方面的经验, 它的燃料元件性能极佳, 个人受照射剂量微不足道, 但其可利用率却令人失望, 主要是氦循环风机及其水润滑轴承系统的奇特设计所致。这种设计的可靠性问题, 加上这类电厂的头一个所不可避免的运行和燃料费用较高的问题, 已导致这座电厂计划于 1990 年 6 月关闭。THTR-300 电厂的状况总的说来一向很好。当然, 燃料装卸系统、热气管道的绝热层以及底部石墨定位销也曾出现过一些技术问题。另外, 电力成本经济性差, 燃料供应没有保障和缺乏政府的财政资助, 使得该厂可能于 1991 年以前关闭。

随着圣符仑堡电站并网发电, 美国曾有 10 座大型商用 HTGR 订货 (5 个双机组合同)。可是到了 70 年代中期, 由于阿拉伯石油禁运和继之而来的经济衰退, 这些合同全都终止了。德意志联邦共和国 550 MWe HTR-500 电厂的设计研制工作虽然一直在进行, 但至今没有商业订货。

由于美国上述本来要延伸到 80 年代初期的那些新核电厂订货合同的终止, 以及三里岛事故的发生, 当时出现了一种舆论, 要求开辟新的途径来解决核电中带有根本性的技术问题和法律问题。这种舆论使人们对安全性能更好的反应堆的兴趣大增, 因为反应堆安全特性的改善是增加公众信任和减少许可证审批风险的基础。为了适应这种兴趣便逐渐形成了开发先进核电厂的构想。这种构想涉及好几个因素, 但决定未来反应堆设计发展方向的最重要因素, 显然是与电厂规模及安全有关的那些因素。

就电站规模而言, 70 年代中期与石油禁运、经济不景气和节能思想有关的种种发展, 造成了许多重大的影响, 其中包括电力负荷增长率不高。另外, 大型电站投资巨大、建造周期长、法规管理要求越来越繁琐, 与这些情况相关的风险已经变得极难捉摸。因此, 对大多数电力公司规划人员来说, 大型单堆电站已不再是精明的选择。人们越来越认识到, 为了应付未来多变的情况, 必须建造容量较小但能逐步增加、建造周期短和投资较少的核发电机组。而且, 规模较小、结构较简单的核发电机组显然更能适合发展中国家的需要。

三里岛事故之后, 公众对安全问题更加关注。对已有的和未来的反应堆提出了一些新的安全要求, 为反应堆附近的公众制定紧急掩蔽和疏散计划的工作成了一件大事。此外, 尽管三里岛事故给公众的健康

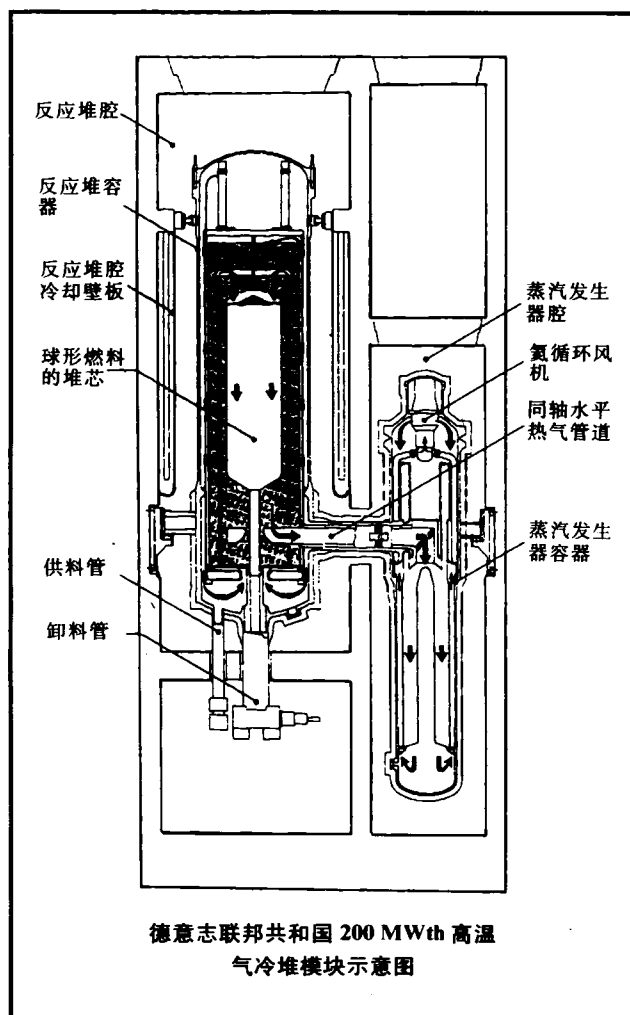


安全造成的实际影响很小, 但给有关电力公司的投资却造成了很大损失。根据上述情况, 看来用加强反应堆非能动安全设施的办法, 改善安全性和投资保护, 是提高公众和投资者的接受能力和减少许可证审批风险的理想办法。同样, 这样一种电厂有可能对操纵员的差错或设备的误动作不太敏感, 这种可能性也是人们所盼望的。

在进行了严格的评价以后, 美国决定选用 MHTGR (见附图) 作为能源部 (DOE) 和工业界正在实施的设计发展规划的参考概念。联邦德国在考虑转向较小型 HTGR 和开发 HTR 模块堆时, 也涉及到了上述的诸因素。本文将着重介绍美国 MHTGR 的概念, 对这些小型模块式气冷堆的基本特性来说, 它是有代表性的。

MHTGR 设计概念

涂敷颗粒燃料是 MHTGR 概念的核心。它由直径约 0.5 mm 的球形芯粒或碳氧化铀燃料作为它的核心, 外面涂敷多层热解碳和碳化硅之类的耐高温材



料。这种球形芯粒能把每个燃料颗粒和反应堆功率运行期间产生的裂变产物都包住，因此它们起着微型厚壁安全壳的作用。MHTGR 的安全特性，来自涂敷颗粒燃料的全部固有特性，它们能承受高温而不会明显地破损，也来自这种设计概念能与假想的恶性事故相关的瞬态期间非能动地限制燃料内的温度升高。

在 MHTGR 堆芯设计中，石墨燃料元件布置成环形，里外有石墨反射层。采用环形堆芯是为了提高堆芯的表面积与体积之比率，从而使输出功率达到 350 MWth，同时又保有以非能动手段散发衰变热的能力。

每个反应堆模块有一个置于钢制容器内的环形堆芯，该容器通过一个水平放置的由同心管道组成的容器与一台蒸汽发生器相连。蒸汽发生器是螺旋状直流式的，置于第三个容器之中，后者位于反应堆容器侧下方。由电机驱动转速可变的主循环风机位于蒸汽发

生器容器的顶部。维修期间主热传输系统停运，为了能导出衰变热，这种设计概念在反应堆容器底部装了一台停堆后用的小型氦-水热交换器，和一台由电机驱动的循环风机。控制棒驱动装置及与其相关的控制棒和备用停堆小球料斗，都通过贯穿件安装在反应堆容器的顶部，反应堆停堆换料操作也要通过这些贯穿件进行。

正常运行时，氦冷却剂自上而下流经石墨燃料元件中的冷却剂孔道，在堆芯下方的环形空腔中汇集、混合之后，经水平放置的同心容器的内管把反应堆的热量带到蒸汽发生器。氦气向下流过蒸汽发生器的螺旋状管束之后，沿蒸汽发生器围筒与容器之间的环形空间向上流至循环风机。氦气加压之后又经水平同心容器的外部环形空间返回反应堆容器，再经堆芯吊篮和反应堆容器之间的环形空间到达堆芯顶部。氦冷却剂就这样周而复始地流经三个钢制容器的壁。给水从蒸汽发生器的底部进入，而温度达 1000 °F 压力达 2500 磅/英寸² 的过热蒸汽则从位于蒸汽发生器容器侧面的管嘴流出。

一套完整的发电机组要包含多个反应堆模块，它们并排地如幻灯片那样，装在地平面以下的封闭性构筑物中。模块堆的数目及其部署时间，可根据电力负荷的增长和（或）资金筹措情况确定。每座模块堆以蒸汽的形式把能量输往邻近的能量转换区，转换效率约为 38%，每座模块堆能提供 135 MWe 的净输出功率。MHTGR 电厂的标准配置包括 4 座模块堆，净输出电功率为 540 MWe。

MHTGR 的非能动安全概念

共准备了三套衰变热导出系统。第一套是非安全相关的主热传输系统，可把衰变热经蒸汽发生器和汽轮机的旁路传给冷凝器。当主热传输系统因计划停堆维修或部件发生故障而停运时，衰变热可经停堆后冷却系统排出。停堆后冷却系统也是一种非安全相关的系统，它通过密闭的冷却水回路和一些单独的强制通风热交换器将衰变热导出。

万一上述两套能动冷却系统均失效，还可以通过第三套系统——堆腔冷却系统（RCCS）将衰变热导出。堆腔冷却系统是一个连续运行的安全相关非能动衰变热导出系统。在该系统中，周围的空气经进风/排风构筑物 and 同心管道，进入位于反应堆封闭构筑物内的空气冷却壁板。从反应堆传导和辐射出的衰变

热把壁板中的空气加热，热空气经同心管道中的内管和进风/排风构筑物返回大气。有了非能动衰变热导出系统，即使失去了强制氦气流和（或）主回路系统失压，燃料的设计限值也不会被超过，电站可免遭损坏。

模块式高温气冷堆的这种冷却本领连同它的永远是负值的反应性温度系数，组成了 MHTGR 所特有的非能动安全概念。当反应堆温度升高时，负温度系数能使功率自动降到衰变功率水平。事情还远非如此，尽管这三种热传输系统全都同时失效的可能性微乎其微，但还是对这样的“超设计基准事故”作了评价。评价结果表明，虽然电厂或许会发生与投资有关的损坏，但衰变热仍会非能动地完全导出。最终的燃料温度不会明显高于如果 RCCS 系统还在工作时的温度。此外，应美国许可证审批机关的要求，还对另外几种完全超出许可证审批依据的事故作了评价，其中包括控制棒全都提到堆外造成紧急停堆的延误，空气不受限制地进入反应堆，水不受限制地进入反应堆，以及所有排热系统同时失效时碰巧水平管道容器也发生严重损坏。对于上述的所有事件，即使在半径为 425 m 的隔离区边界，它们造成的放射性剂量水平也不会超过需要采取保护性行动的程度。这就为取消厂外应急计划中所要求的那些措施提供了技术依据，诸如及早通报（报警等）、紧急疏散和掩蔽演习等。此外，上述结果的获得，都没有依赖靠交流电供电的系统或操纵员的动作，而只是靠燃料颗粒表面涂层对裂变产物的包容能力。由于 MHTGR 全面采用了非能动安全概念，使安全水平达到了前所未有的高度。

经济可行性

推广应用较小型核电机组的任何考虑，到头来都要涉及经济竞争能力问题。在 60 年代和 70 年代初期（事实上很多工业化国家一直延续到今天），在与这种资本密集型企业相关的规模经济法则的支配下，竞争的需要一直在使人们大量建造规模越来越大的核电机组。然而，经验已经证明，将如此巨额的资本投入旷日持久的项目之中，着实要冒很大的风险。由于它有这种灾难性的经济后果，很多国家特别是美国已经体验到了这种风险，即使还没有体验这种风险的国家，也都把它看作任何评价中必须考虑的因素。

MHTGR 取得经济竞争能力的途径，基本上可

以归结为以下三点：由非能动安全概念产生的结构简单性；易于通过模块化和工厂预制而实现标准化的能力；投资风险减小。

采用非能动安全概念之后，许多昂贵的安全系统就不需要了，并能使反应堆模块中必要的安全设施和包容性保护设施从实体上跟汽轮机厂房分开，从功能上切断联系。这样，只有核岛（包括反应堆模块和一切必要的与核有关的辅助系统）需要按核标准建造，而汽轮机厂房可按常规标准建造。核岛部分也可以单独围起来警卫。

模块化不仅指一个电站使用多个输出功率较小的反应堆模块，还指整个机组的各个部件、系统、管道、仪器仪表、控制设备等都采用模块式设计。这样便可使机组的大部分在工厂加工和预先组装。在工厂加工有利于质量控制，而且根据经验其费用要比现场加工和建造低得多。在工厂环境中比较容易相互学习，因而能降低成本。

推广应用这种容量较小的发电机组，可减少经济负担，因为存在着逐步增加模块达到电站预期功率的灵活性。对于减少投资风险来说，这可能是一个最重要的有形因素，尽管其它一些非有形因素也是很重要，例如减少许可证审批风险，提高公众接受能力等。

有关 MHTGR 的许多经济分析已充分考虑了上述因素，并且都已表明，它们确实都能使费用发生变化。这些经济分析表明，标准的 4 模块 540 MWe 电站，将能与美国规划的大多数最现代化的坑口燃煤电站相竞争。值得注意的是，这些分析中涉及的一些因素，与对核能方案感兴趣的任何国家和地区的具体条件的关系非常密切，因此必须细心地进行评价。

前景展望

世界显然正在需要功率较小、非能动安全程度更高的核电机组，MHTGR 看来是满足这种世界性需求的理想堆型，这主要是由于它的简单性和良好的运行性能。为了确证模块式高温气冷堆具有声称的全部性能（安全性、可靠性、可运行性等），有必要建一套验证性机组。目前，美国和苏联正在对这一类机组的首批工程进行评价。美国的是 MHTGR 机组，有德意志联邦共和国工业界参加。苏联的是 HTR 模块的一种变型，有德意志联邦共和国的政府及工业界参加。这些机组可望于下世纪初进入竞争市场。