

高温气冷堆超临界蒸汽动力循环电站研究

朱书堂

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

[摘要] 模块化高温气冷核反应堆是一种安全性好、可用于高效发电和提供高温工艺用热的先进核反应堆, 是国际核能领域第 4 代核能系统中 6 种备选堆型之一。将模块化高温气冷堆技术与目前已经成熟的超临界蒸汽动力循环技术耦合, 发电效率将达到 45% 以上, 比目前在役的压水堆核电站效率 (33% 左右) 高出 30% 以上。我国已经掌握了模块化高温气冷堆技术; 通过引进、消化、吸收, 也已经掌握了超临界蒸汽动力循环技术; 具备条件研究建造高温气冷堆超临界蒸汽动力循环电站, 使其成为世界上最早实现的超临界核电站。

[关键词] 高温气冷堆; 超临界循环; 朗肯循环; 核电站

[中图分类号] TL48

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)05-0011-06

Investigations on the Coupling of HTGR with Supercritical Steam Cycle

ZHU Shutang

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: With its inherent safety and high temperature capability, the modular high temperature gas-cooled reactor (HTGR) has been taken as one of the six candidates for Generation IV innovative reactors. The HTGR supercritical (SC) steam cycle plant coupling the existing technologies of the current HTGR design with operational experiences of the SC fossil power plant (FPP) will achieve high cycle efficiency, 45% and above, which is 30% higher than that of the existing PWR plants (with net efficiency of 33%). The modular HTGR technologies are well mastered in China and the SC FPP technologies are also adopted in China through licensed production and cooperation. All required techniques are available to build the HTGR SC steam cycle plant, which will be the first innovative nuclear system in operation in the world.

Key Words: HTGR; supercritical steam cycle; Rankine cycle; NPP

CLC Number: TL48

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)05-0011-06

1 高温气冷堆技术简介

模块化高温气冷核反应堆采用全陶瓷型包覆颗粒燃料元件、耐高温的石墨作为慢化剂和堆芯结构材料, 化学惰性和热工性能好的氦气为冷却剂, 是一种安全性好、可用于高效发电和高温供热的先进核反应堆。其最大特点就是它的固有安全性: 燃料元件的设计容许温度已经达到 1 600℃, 即使在反应堆冷却剂全部丧失的情况下, 这种燃料也不会破损而造成泄漏。堆芯余热能够通过自然对流、热辐射和热传导有效地向外传出, 使得反应堆堆芯在发生任何事故的情况下都不至于被熔化^[1-2]。这是与其他形式的核反应堆最大的区别。目前世界上正在运行的核电站, 出现核泄漏事故的概率已

经降低到百万分之一的水平, 但还没有完全排除发生核泄漏事故的可能性。只有模块化高温气冷堆, 以其固有安全性设计, 彻底排除了发生核泄漏的可能性。这种固有安全性, 已经在清华大学核能与新能源技术研究院建成的 10 MW 高温气冷实验堆上得到实验验证。

清华大学核能与新能源技术研究院在模块化高温气冷堆技术领域已经作了多年的研究工作。在国家 863 计划长期支持下, 建成了世界上第一座模块化高温气冷堆——10 MW 高温气冷实验堆 (HTR-10)。其一期工程采用亚临界蒸汽动力循环发电, 2003 年 1 月实现满功率运行并网发电。其后, 按计划完成了一系列运行特性研究和固有安全性验证实验, 包括 15 项运行特性研

收稿日期: 2007-02-01

作者简介: 朱书堂, 男, 北京海淀区清华大学核能与新能源技术研究院, 副研究员, 主要从事核能技术研究; Email: zhust@tsinghua.edu.cn

究和 8 项固有安全特性验证实验。经过长期连续运行,对各个系统和设备进行了较长时间的考验并获得良好的运行记录。这些成就不仅引起国际上的广泛关注,在国内也得到了各级政府及企业的高度重视。地方政府对建设高温堆电站显示出浓厚的兴趣。

2 超临界蒸汽动力循环发电技术

热力学原理告诉我们,提高工质的平均吸热温度可以提高循环的热效率。现代蒸汽动力循环装置朝着高参数、超临界循环的方向发展。

所谓的“超临界”(Supercritical State)是物质所处的热力学状态。处于液态的工质,当压力超过临界压力后,物质就处于“超临界”状态,成为具有均匀物性的单相流体,不再有汽相和液相的区分。水的临界压力为 22.12 MPa,对应温度 374.15℃。

2.1 超临界蒸汽动力循环电站发展动力

2.1.1 经济因素

目前,世界快速扩张的电力需求大多数要依赖蒸汽动力循环发电装置来满足,新建电站的设计寿命一般都为 30~40 年,新一代的核电站设计寿命更长达 60 年^[1]。这些电站不仅要有好的静态投资经济性,还必须在整个寿命期内具有好的运行经济性。基于蒸汽动力循环的电站,好的运行经济性即意味着高的循环热效率。代表亚临界蒸汽动力循环主流技术水平的一次再热发电装置,蒸汽参数为 16.5 MPa/538℃/538℃,电站净效率可以达到 37%~38%^[4]。蒸汽参数为 24 MPa/538℃/538℃的超临界机组,电站净效率约 41%;循环参数为 25~31 MPa/580~610℃/580~610℃的高参数超临界机组,电站净效率大于 44%。静态投资并没有显著增加,运行过程中燃料消耗却有可观的降低。

2.1.2 环境因素

环保要求日益严格,对新建火电站的排放许可标准更严苛,迫使燃煤电厂必须采用更高的参数以获得更佳效率。《京都议定书》的签署,对欧洲发达国家 CO₂ 排放量已有约束。这些国家的政府开始采取从政策到财经等各方面的措施,鼓励应用和推广能够提高电站效率、减排 CO₂ 的技术。研究结果表明:循环效率每提高 1 个百分点,CO₂、NO_x、SO_x 及颗粒物可以相应地降低 2 个百分点^[5]。对于像中国和印度这样的发展中大国,通过提高循环效率来减少相对 CO₂ 的排放,还有很大的空间。应用目前成熟的超临界蒸汽动力循环发电装置,可以将发电效率从目前主力电站的 35% 提高到 43%,效率提高 8 个百分点,则可减少 CO₂、NO_x、SO_x 及颗粒物排放约 15 个百分点。因而,蒸汽动力循环电站采用超临界/高超临界发电装置,是提高循环效率及电站运行费效比的最有效的措施。

2.2 超临界蒸汽动力循环电站技术现状

蒸汽动力循环发电过程中的主要环节是热能的传递和转换,将汽轮机入口新蒸汽的初参数提高到超临界状态,可以提高可用能的品位,使热能转换效率更高。理论分析和实践统计都证明,汽轮机入口新蒸汽压力每提高 1 MPa,循环效率可以提高约 0.2 个百分点;汽轮机入口新蒸汽温度和再热温度每提高 20 度,循环效率可以提高 1 个百分点^[6]。火力发电机组采用大容量(300 MW 以上)和超临界参数燃煤机组是降低发电煤耗的主要途径之一。现在新投入运营的大型蒸汽动力发电装置绝大多数都是超临界循环。

自 20 世纪 50~60 年代起,多个国家即已开始对超临界蒸汽动力循环发电技术进行研究。第一台超临界蒸汽动力循环发电机组投运至今已有 40 余年的历史。随着材料科学的进展,超临界蒸汽动力循环参数不断提高。20 世纪 90 年代,汽轮机组入口蒸汽参数为 25 MPa/538℃/560℃水平的超临界机组投入商业运行,发电净效率可以达到 42%。1992 年,商业化超临界循环汽轮机入口压力达到 2.7 MPa。随后,汽轮机入口温度达到 565℃及 593℃。

新材料的开发成功使得超临界机组从技术上具备了发展更高参数的条件。锅炉和汽轮机高压段使用含铬 12% 的钢材,可以把主蒸汽和再热蒸汽的参数提高到 30 MPa/600℃/620℃,净输出功率可以达到 1 000 MW 甚至更高,技术成熟且具有经济竞争力,电站净效率可以达到 46%~48% (不同地域冷却条件不同,实现效率有所差异),代表超临界机组技术水平^[6]。使用奥氏体材料(Austenite),蒸汽参数可达到 31.5 MPa/620℃/620℃。如果使用镍基合金材料,如钢种镍(Inconel),蒸汽参数更可高达 35 MPa/700℃/720℃,电站净效率将可达到 48%^[9]。

对循环本身及其他部件进行改进可以将循环效率再提高 3 个百分点,如采用二次再热循环、充分利用尾烟余热等。上述技术都已经过实际考验,只是由于费效比的原因,没有得到大规模应用。

2.3 超临界蒸汽动力循环电站的技术优势

相对于亚临界汽轮发电机组而言,超临界发电机组有如下技术优势。

1) 由于发电效率提高,单位输出功率燃料消耗成本降低,运营费效比上升。

2) 由于发电效率提高,单位输出功率 CO₂ 排放减少,对环境的影响降低。

3) 经过实践证明,出色的发电利用因子,至少与亚临界机组相当或更优,电站利用因子平均为 85%,很多电站已经超过 90%。

4) 由于采用直流锅炉,更能适应快速负荷变化,并具有较高的部分负荷发电效率。经验表明,75% 负荷时

发电效率降低2%(亚临界电站降低4%)。

5) 电站投资与亚临界机组相当,小于其他清洁煤发电技术。

6) 采用现代化尾气洁净设备后,大大降低了 NO_x 、 SO_x 及颗粒物的排放。

2.4 超临界蒸汽动力循环电站应用

2.4.1 在技术先进国家的应用

基于超临界循环发电机组良好的运行表现,世界技术先进国家已广泛采用。至2006年底,已有超过500座超临界循环火电站投入运营,总装机容量超过300 GW,其发电量已占火电的40%~60%。其中,美国、日本及俄国超临界机组占火电容量的50%以上。目前世界上在建的大型火电站几乎全部是超临界机组。

美国已运行的超临界机组总数近200台,800 MW及以上的火力发电机组均为超临界机组,最大的单机容量为1300 MW。原苏联按国家计划发展超临界发电机组,首台800 MW机组于1967年在斯拉维斯克电厂投运。俄罗斯300 MW以上容量机组全部采用超临界参数,共有超临界机组超过200台。日本于20世纪60年代引进美欧技术发展超临界机组,并进行二次开发创新,大容量火电机组的制造水平已跻身于世界先进之列。日本450 MW以上的火力发电机组全部采用超临界或超超临界机组,其容量占总装机容量的61%。德国于20世纪90年代改变了国家能源政策,逐步放弃核能,全面依赖传统能源,开始研究开发超临界蒸汽动力循环发电技术。20世纪90年代末至21世纪初开始投运了一些800 MW以上的火电机组。基于坚实的工业制造基础和强大的研发能力,德国目前已成为超临界机组技术及装备主要提供国之一。

2.4.2 我国超临界发电技术发展情况

我国20世纪80年代末开始引进技术,依托工程项目攻克超临界机组的关键技术,加快超临界机组的研制。首座超临界电站——石洞口电厂2台600 MW机组于1992年投入运营以来,已有300 MW,500 MW,600 MW,800 MW,900 MW多台引进超临界机组投入运营。通过华能沁北电厂 $2 \times 600 \text{ MW}$ (24.4 MPa/566 °C/566 °C)、华润常熟电厂 $3 \times 600 \text{ MW}$ 国产超临界机组示范,已经实现600 MW超临界机组国产化。国家科技部“十五”期间863计划支持的“超超临界燃煤发电技术”研究课题依托华能玉环电厂1000 MW (26.25 MPa/600 °C/600 °C) 机组,预计2007年投运。

我国超临界蒸汽动力循环发电技术与世界发展趋势基本一致,汽轮发电机组已进入大容量、高参数发展阶段。目前,国内三大动力集团——上海电气集团、哈尔滨动力集团、东方电气集团1000 MW级高参数超临界机组的订单已达数十台。

3 高温气冷堆超临界蒸汽动力循环电站概念设计

世界上绝大多数现役核电站都采用蒸汽动力循环发电。由于现有技术的限制,核电站蒸汽动力循环都在亚临界状态运行,循环热效率较低:先进压水堆热效率35%、沸水堆热效率32%、重水堆只能达到29%。世界上众多专家学者致力于超临界水堆核电站的研究并且取得了丰硕的成果^[3,7-9],但在超临界水堆电站的物理、热工和结构设计方面仍然面对着一系列的技术挑战,离商业化运营还有很长的路要走。

将高温气冷堆技术与目前已经普遍应用的蒸汽动力循环超临界发电技术相结合,是最可能实现的超临界循环核电站。高温气冷堆作为一个高质量的“锅炉”,可以提供超过900 °C的热源,并且没有温室气体和其他污染物的排放。与同容量的常规化石燃料电站相比,高温气冷堆一回路是闭式的,不存在尾烟损失,有潜力实现比超临界火电站更高的效率。

3.1 可行的反应堆——汽轮发电机组配置模式

电站容量越大、功率越高,比投资越低。经验证明:超临界蒸汽动力循环汽轮机组的容量下限是250 MWe。小于此容量的超临界汽轮发电机组,由于高压汽轮机中叶片系统损失相对较大^[4],不可能取得像大容量机组一样的高效率。目前,超临界汽轮发电机组容量在400~1000 MWe之间。

另一方面,模块式高温气冷堆固有安全性的要求限制了反应堆热功率的提高。为了提高经济性,在保持其固有安全性的条件下,应尽量提高单堆功率。具有固有安全性的模块式高温气冷堆主要有两种设计:球床模块式高温气冷堆和环形堆芯柱状燃料元件模块式高温气冷堆,功率水平在200~600 MW之间。这样的单堆热功率水平都不足以配套超临界汽轮发电机组。

综合考虑上述两方面的限制,高温气冷堆超临界蒸汽动力循环电站可行的配置是:多个反应堆标准模块配套一个标准汽轮发电机组。

3.2 模块化458 MW高温气冷堆设计

采用包覆颗粒燃料构成的全陶瓷型球形燃料元件,在不高于1600 °C时阻留放射性裂变产物释放。采用环形球床堆芯设计,中央为内石墨反射层区,环形区为燃料元件区,球形燃料元件自上向下流动;这是目前世界上模块式高温气冷堆都采用的一种设计方案,保证在任何运行工况和事故情况下,燃料元件最高温度不超过安全限值并提高反应堆热功率。堆芯周围全部由石墨和碳砖构成,没有金属部件,使堆芯结构部件能承受高温。

采用燃料元件连续装卸、多次循环的运行模式,使反应堆燃耗分布更为均匀。设置2套独立的停堆系统——控制棒系统和吸收球停堆系统,分别设置于侧

反射层和中心反射层石墨孔道中,控制棒和吸收小球都依靠重力下落实现停堆功能,提高了停堆系统的可靠性。

反应堆堆芯和蒸汽发生器管组分别设置在2个壳体内,并由热气导管壳体相连接,构成一回路压力边界。一回路冷却剂为氦气,工作压力为9.0 MPa。氦气经主氦风机升压后,经热气导管外层环形管进入反应堆压力容器的下部;小部分氦气(<10%总流量)分流,被引去冷却控制棒、燃料卸料管和压力容器壁,氦气的主流通过侧反射层石墨块的孔道自下而上达到堆芯顶部;氦气自上而下流过球床堆芯被加热到750℃,进入堆芯底部的热气联箱,再通过热气导管进入蒸汽发生器,把热量传给蒸汽发生器二次侧的水;一次侧氦气温度降低后再回到主氦风机入口,构成一回路氦气闭合循环。反应堆结构及蒸汽动力循环系统如图1所示。

3个壳体组成的压力边界均通以冷氦气进行冷却,使壳体不承受高温。反应堆压力容器、蒸汽发生器壳体和连接二者的热气导管壳体,均安装在混凝土结构的一回路舱室内,一回路舱室具有“包容性”功能,是阻止放射性释放的第3道安全屏障,被称为“包容体”,它不具备承压的功能。

基于上述高温气冷堆标准模块的超临界蒸汽动力循环电站必须采用多堆配一机方案。

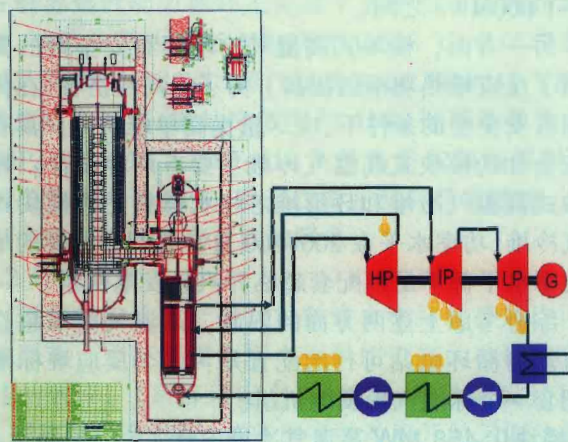


图1 高温气冷堆458 MW模块超临界电站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 458MW HTGR SC plant

3.3 一次再热标准超临界蒸汽动力循环

我国超临界蒸汽动力循环发电技术,一次再热超临界汽轮机组的标准设计按照汽轮机入口压力可以分为25 MPa和27 MPa两个级别。25 MPa级汽轮机入口蒸汽参数为25 MPa/565℃/565℃,单机容量600 MWe占主导地位,代表目前我国超临界机组主流技术水平。27 MPa级汽轮机则以27 MPa/600℃/600℃、单机容量1000 MWe为主。上述两个级别的超临界机组在我国批量建造,技术成熟,可以用于高温气冷堆

超临界循环电站。

3.3.1 超临界汽轮机组的选择

为了提高电站的经济性,选用我国已经国产化的成熟机组:江苏常州发电厂4×600 MW超临界汽轮机组。该机组汽轮机入口蒸汽参数为25 MPa/565℃/565℃,采用3高、1除氧、4低共8级给水回热,给水温度283℃,电站净效率为42%。图2是参数为25 MPa/565℃/565℃的一次再热标准超临界(理想)循环温熵图。

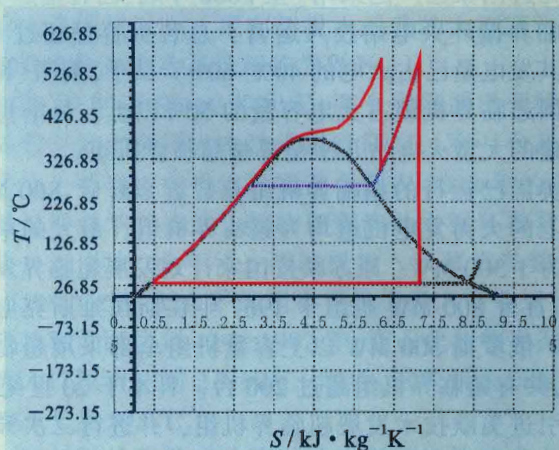


图2 一次再热标准超临界(理想)循环温熵图

(蒸汽参数为25 MPa/565℃/565℃、背压5 kPa)

Fig. 2 Temperature-entropy diagram of standard once reheat SC Rankine cycle with steam conditions 25 MPa/565℃/565℃

3.3.2 直流蒸汽发生器、再热器参数选择

对于25 MPa/565℃/565℃标准汽轮机组而言,蒸发器给水温度为283℃;过热蒸汽出口参数为25.4 MPa/571℃;再热器进口参数为4.38 MPa/311℃;出口参数为4.19 MPa/569℃。对于高温气冷堆一回路直流换热器氦气侧而言,入口温度仍然保持750℃不变,维持180℃左右的传热温差;出口温度必须提高到330℃,以保证从氦气侧到超临界水/水蒸汽侧的有效传热。反应堆入口温度相应地提高到330℃。直流蒸发器及相应的管路设计必须适应上述压力和温度水平;但就设计和制造而言,没有额外的技术困难。

3.3.3 氦风机选择

为了维持反应堆458 MW_t的热功率输出,一回路氦气流量应为209.52 kg/s。反应堆一回路氦气流道应作优化设计,以降低压力损失、减小所需的氦风机功率。在此,假设一回路压力损失为0.15 MPa,则维持循环所需的压缩功可以用下式估算^[10]

$$W_c = m \frac{R_m T \Delta p}{p M} = 209.52 \times \frac{8.31 \times 603.15 \times 0.15}{9 \times 4} = 4377 \text{ kW}$$

氦风机效率取目前技术可以达到的水平为80%,驱动电机效率为95%;每个反应堆模块所需驱动电机

功率为 $4\,377\text{ kW}/(0.8 \times 0.95) = 5\,759\text{ kW}$ 。3个反应堆模块氦风机共需驱动功率 $5\,759\text{ kW} \times 3 = 17.28\text{ MW}$ 。

3.3.4 电站效率

由于选择与超临界燃煤电站完全一样的汽轮发电机组,其蒸汽动力循环部分的特性完全一致。为了计算高温气冷堆超临界电站的配置及效率,首先依据超临界燃煤电站的参数计算出蒸汽动力循环特性。

1) 火电站效率。采用 $25\text{ MPa}/565^\circ\text{C}/565^\circ\text{C}$ 标准 600 MW 汽轮机组的燃煤电站净效率为 $\eta_{\text{f-net}} = 42\%$, 电站辅助耗功占总发电功率的平均水平为 7.5% ^[1]。总发电功率为 $W_e = W_{\text{net}}/(1-7.5\%) = 648.65\text{ MW}$ 。电站毛效率为 $\eta_{\text{f-gross}} = 45.4\%$ 。

2) 蒸汽动力循环效率。锅炉效率取目前以烟煤为燃料的平均值 $\eta_b = 93\%$, 循环用电率平均 4% 。蒸汽动力循环的毛效率和净效率分别为

$$\eta_{\text{st-gross}} = \eta_{\text{f-gross}} / \eta_b = 45.4\% / 93\% = 48.8\%$$

$$\eta_{\text{st-net}} = \eta_{\text{st-gross}} (1 - 4\%) = 46.85\%$$

3) 高温气冷堆电站效率。对于高温气冷堆超临界循环电站而言,由于氦风机压缩功全部转化为一回路氦气的热能,传给二回路水-水蒸汽的热量

$$Q_{\text{st}} = Q_{\text{r}} + W_{\text{comp}} = (458 + 4.38) \times 3 = 1\,387\text{ MW}$$

实际发电总功率为

$$W_e = Q_{\text{st}} \times \eta_{\text{st-gross}} = 1\,387 \times 46.85\% = 649.81\text{ MW}$$

高温气冷堆超临界电站的毛效率为

$$\eta_{\text{t-gross}} = W_e / Q_{\text{r}} = 649.81 / 1\,374 = 47.29\%$$

反应堆辅助系统(包括氦风机、氦气净化系统等)所消耗的功率也按照发电总功率的 3.5% 计算(实际上要小于此比例),则电站净效率为

$$\eta_{\text{t-net}} = \eta_{\text{t-gross}} (1 - 4\% - 3.5\%) = 43.75\%$$

与压水堆电站 33% 的效率相比,电站净效率要高出 10.75 个百分点(相对提高 32.6%)。对于一个运行寿命为 $40 \sim 60$ 年的电站而言,如此水平的效率提高是一个相当大的技术进步,会带来巨大的经济效益。

3.4 抽汽再热超临界蒸汽动力循环

采用一次再热标准超临界蒸汽动力循环,蒸发器和再热器均在蒸发器压力壳内。这样的方案将会给蒸发器压力壳的布置和电站的运行调节增加技术难度。另一种方案是采用类似超临界水堆的新蒸汽抽汽再热循环^[12]。

3.4.1 抽汽再热方案简述

有以下两种抽汽再热方式。

1) 一级抽汽再热:蒸发器出口新蒸汽在进入高压汽轮机之前,一部分被抽出用于将中压汽轮机出口 1.2 MPa 湿蒸汽再热到 538°C 。图3是参数为 $25\text{ MPa}/565^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$ 的一级抽汽再热超临界(理想)循环温熵图。

2) 两级抽汽再热:第1级用高压汽轮机出口 6.9 MPa 蒸汽再热 3.7 MPa 中压蒸汽,第2级用蒸发器

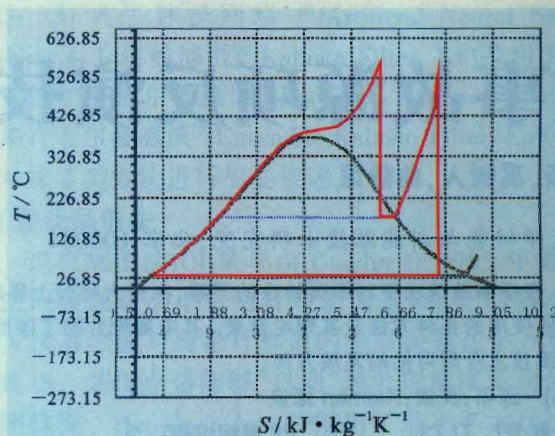


图3 一级抽汽再热超临界(理想)循环温熵图
(蒸汽参数为 $25\text{ MPa}/565^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$ 、再热 1.2 MPa 、背压 5 kPa)

Fig. 3 Temperature-entropy diagram of SC Rakine cycle reheated by separation temperature with $25\text{ MPa}/565^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$

出口新蒸汽,继续将再热蒸汽加热到 538°C 。

3.4.2 抽汽再热方案优缺点比较

与标准一次再热超临界循环相比,抽汽再热超临界循环方案具有以下特点。

1) 方案优点:超临界状态循环工质一次通过反应堆蒸汽发生器压力壳,直流换热器设计简单;反应堆与蒸汽动力循环耦合运行调节简单。

2) 方案缺点:吸热过程温度较低,循环热效率将会比标准一次再热超临界循环效率略低;超临界汽轮机不能直接利用现有成熟产品,需要专门研制。

4 结论

依托我国已经掌握的模块化高温气冷堆技术,耦合目前广泛应用于火力发电站的超临界蒸汽动力循环技术,研究了高温气冷堆超临界循环电站技术。目前在役的压水堆核电站效率约为 33% ,我国即将引进的第3代压水堆核电站 AP1000 的效率约为 35% 左右。与此对比,高温气冷堆超临界循环电站不仅具有高的发电效率(可以达到 45% 以上,比压水堆电站高约 30%)而且反应堆具有固有安全性,这是第4代核能系统应具有的特征之一。在第4代核能系统技术成熟并投入商业运营之前的20年里,高温气冷堆超临界循环电站将是最佳的高效核能发电系统。

参考文献 (References)

- [1] BREY H L. Development history of the gas turbine modular high temperature reactor: IAEA-TECDOC-1238 [R]. IAEA, 2000.
- [2] WEISBRODT I A. Inherently safety design features of the HTR-Module: IAEA-CN-48/125. HTGR. The modular high temperature gas-cooled reactor (MHTGR) in the U.

核事故源项反演技术及其研究现状

徐志新, 奚树人, 曲静原

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

[摘要] 在核事故情况下对源项特性的了解, 在很大程度上影响着辐射后果的评价以及应急措施的采取。介绍了目前国内外反演核事故源项所使用的各种方法及其理论背景, 其中着重介绍了国际当前流行的 Kalman 滤波方法及对这些方法的有关研究成果和应用; 论述了反演技术今后可能的发展方向。

[关键词] 源项; 反演; Kalman 滤波

[中图分类号] TL73

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)05-0016-05

Review on Source Inversion Technology in Analyzing Nuclear Accidents

XU Zhixin, XI Shuren, QU Jingyuan

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: In case of a nuclear accident, the knowledge of source characteristics is closely related to the accuracy in assessing the radiation consequences and the choice of emergency measures. In this paper, the inversion methods applied to obtain the source characteristics are introduced, especially the Kalman filter method, together with related achievements and applications. In the end, the possible direction of studies on source inversion methodology in a near future is discussed.

Key Words: source term; inversion; Kalman filter

CLC Number: TL73

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)05-0016-05

收稿日期: 2007-02-06

作者简介: 徐志新, 男, 北京海淀区清华大学核能与新能源技术研究院, 博士研究生, 主要从事核事故应急决策及数据同化工作;

E-mail: xzx02@mails.tsinghua.edu.cn

奚树人(通讯作者), 男, 北京海淀区清华大学核能与新能源技术研究院, 教授, 主要从事核安全研究工作;

E-mail: xsr-ine@mail.tsinghua.edu.cn

- S. [R]. Doe-HTGR-87-088. USA, 2003.
- [3] US DOE. A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems[R]. GIF-002-00, 2002.
- [4] UK DTI. Technology status report (TSR009): Supercritical steam cycles for power generation applications [R]. UK, 1999.
- [5] PAUL I A. Technology successfully deployed in developing countries, 2000 [E3/OL]. World Bank Group's Web-site. <http://www.worldbank.org/html/fpd/em/supercritical/supercritical.htm#link2>.
- [6] UK DTI. Best practice brochure (BPB010): Advanced power plant using high efficiency boiler/turbine [R]. UK, 2005.
- [7] OKAY, KOSHIZUKA S, OKANO Y, *et al*. Design concepts of light water cooled reactors operating at supercritical pressure for technological innovation[C]//Proc of the 10th Pacific Basin Nuclear Conference. Kobe, Japan, 1996.
- [8] OKAY. Review of high temperature water and steam cooled reactor concepts SCR-2000 [C]//Proc of the 1st International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactor Design and Technology. Tokyo, Japan, 2000.
- [9] DUFFEY R B, PIORO I L. Advanced high temperature concepts for pressure tube reactors, including co-generation and sustainability: HTR2006 [C]//Proc 3rd International Topical Meeting on HTR Technology, Johannesburg, South Africa, 2006.
- [10] SCHULENBERG T, WIDER H, FUTTERER M A. Electricity production in nuclear power plants - Rankine vs. brayton cycles: GLOBAL 2003[C].ANS/ENS International Winter Meeting. New Orleans, USA. 2003.
- [11] UPTON M. Anthracite PF firing goes supercritical[C]//China Power 2005. Beijing, 2005.
- [12] OKA Y, KOSHIZUKA S. Design concept of once-through cycle supercritical-pressure light water cooled reactors: SCR2000[C]//Proc SCR2000 Symposium, University of Tokyo, 2000.

(责任编辑 王士泉)