

5 MW低温核供热试验堆及其安全特性

郑文祥 董 铎

(清华大学核能技术研究所, 北京)

清华大学核能技术研究所开发的5 MW低温核供热试验堆已建成运行。文章简要介绍了该堆的主要设计特性, 包括一体化、自稳压和双层壳的结构设计, 世界上首次采用的控制棒水力传动系统, 自然循环的冷却方式以及防止放射性物质泄入热网的措施等。这些设计措施大大提高了该堆的固有安全性, 本文给出该堆的主要安全性能。

关键词 低温供热堆, 一体化, 自然循环, 固有安全性。

一、引言

低温供热在能源供应中占有十分重要的地位。据统计, 在许多国家的能源结构中, 约有三分之二的能量是以热能形式消耗的, 其中的过半数又是温度不大于 120°C 的低温热能。

核能是一种成熟和重要的能源。发展低温核供热技术、建造低温供热反应堆是核能和平利用的重要方式, 具有显著的经济、社会和环境效益。因此, 世界上许多国家, 如苏联、西德、瑞典、加拿大、瑞士、法国和捷克等国对发展低温供热反应堆很感兴趣, 近十几年来, 开展了多种类型供热堆的研究工作。目前, 单堆热功率500 MW的核供热站即将在苏联建成运行。

我国低温核供热技术开发工作始于八十年代初。虽起步较晚, 但进展很快。为了实现“以核代煤”, 缓解我国北方城市面临的能源短缺、运输紧张和环境污染严重的状况, 国家十分重视低温核供热技术的开发研究, 先后将这项技术发展工作列入国家“六五”和“七五”重点科技攻关项目。作为该项目的重要组成部分, 一座由清华大学核能技术研究所设计的5 MW低温核供热试验堆于1986年3月正式动工兴建, 经约3年半的建设, 于1989年11月3日首次临界成功, 1990年1月16日达到满功率运行, 随后连续运行100 d, 胜利完成首期冬季供暖任务。运行经验表明, 该堆性能优异, 可作为用于城市集中供热的安全、经济和清洁的热源。随着低温核供热堆综合应用技术的开发, 这种反应堆将具有更大的发展前景。

本文简要论述了5 MW供热堆的主要设计特性和安全性能, 可供设计大型商用低温核供热示范站参考。

二、低温核供热堆的发展目标和安全性要求

低温核供热反应堆推广应用需要解决的主要问题是安全性和经济性。这两方面问题又是密切相关的。根据低温核供热经济性考虑, 这种供热堆一般宜建在靠近人口稠密区域,

即靠近供热用户。因此其安全性要求应高于核电厂。显然,如果沿着原有核电厂的设计思路;为了提高安全性,设计上层层加码,过分依赖于工程安全设施,则不仅难于实现其安全目标,而且必将增加建造投资和运行维修费用,从而影响供热堆的经济性和技术现实性。因此,应开发一种固有安全性好、系统简单、建造容易、运行可靠和操作方便的堆型。为了实现这一发展目标,最关键的是提高反应堆的固有安全性。所谓固有安全性,是指利用自然规律实现反应堆安全运行的属性。目前,世界各国研究的供热堆,尽管堆型五花八门,但多沿着这样一种设计思路,即发展一种自身安全性能好的反应堆,由于其内在安全性好,因此不需要进一步提高(甚至可以降低)设备部件的设计等级,可以简化(甚至取消)原有核电厂所设置的庞大、复杂的安全设施,使供热堆系统简单、设备部件制造容易、运行可靠,达到总体上的简化,提高经济上的竞争性。这种类型反应堆固有安全性的体现可归纳如下:

1. 具有较大的负反应性系数;
2. 堆内衰变热依靠自然对流和(或)热传导排出;
3. 运行压力低;
4. 不会发生使堆芯失去冷却剂事故;
5. 能包容住较高温度的放射性物质;
6. 发生超设计基准事故时,有足够长的时间,采取临时应急措施,缓解事故后果。

三、5 MW 供热堆设计描述

5 MW 供热堆建造的目的是为了对大型商用核供热站进行模拟试验,掌握核供热堆的设计、建造和运行等技术经验,为核供热堆的综合利用和技术发展提供实验基地。为此,该堆根据前述关于供热堆固有安全性的原则进行设计。该堆为一体化、自然循环和自稳压的壳式轻水堆。堆体结构示于图 1。主换热器布置在压力壳内,系统压力由壳内上部气或(和)汽空间维持,一回路系统没有主循环泵,冷却剂依靠堆壳内冷区和热区的密度差,形成自然循环。该堆可按微沸腾方式或压水方式运行。当按前者运行时,堆芯内存在微量的容积沸腾(堆芯出口质量含汽量约为 0.8%),从而增强自然循环的驱动力。

5 MW 供热堆堆芯(见图 2)装有 16 盒燃料元件,9 根“+”字型控制棒和 4 根“-”字型控制棒。控制棒依靠相邻的缺角元件盒构成的通道导向。为了提高自然循环能力,在堆芯上部设有较长的水力提升段(或称烟囱)。堆内(一回路)工作压力为 1.5 MPa。冷却剂流过堆芯吸收热量后,经水力提升段进入主换热器,将所载带的堆芯热量传给中间回路(二回路)水介质,然后再通过中间换热器向热网(三回路)输热。因此,5 MW 供热堆的输热系统由三重回路(一、二、三回路)组成(见图 3)。

此外,5 MW 供热堆还设有为数不多的安全相关系统和辅助系统,如余热排出系统、硼注入系统、反应堆控制保护系统、电气系统、水净化系统、设备冷却系统、气体系统和通风系统等。该堆的主要工艺参数示于表 1。

现将 5 MW 供热堆若干重要的设计特性归纳如下:

1. 一体化、自稳压和双层壳结构设计 该堆一回路系统采用一体化、自稳压和自然循环设计,因此,压力壳上除少量小口径工艺引出管外,没有外延的粗管道,压力壳外也没有大型复杂的部件,这不仅大大降低冷却剂压力边界的泄漏几率,而且极大缓解泄漏事故后果。同时,该堆安全壳“紧贴”压力壳,并能承受较高压力,即使在安全壳内发生冷却剂压力边界破损事故,也能保证水位淹没堆芯。这些设计特性可以保证 5 MW 供热堆在

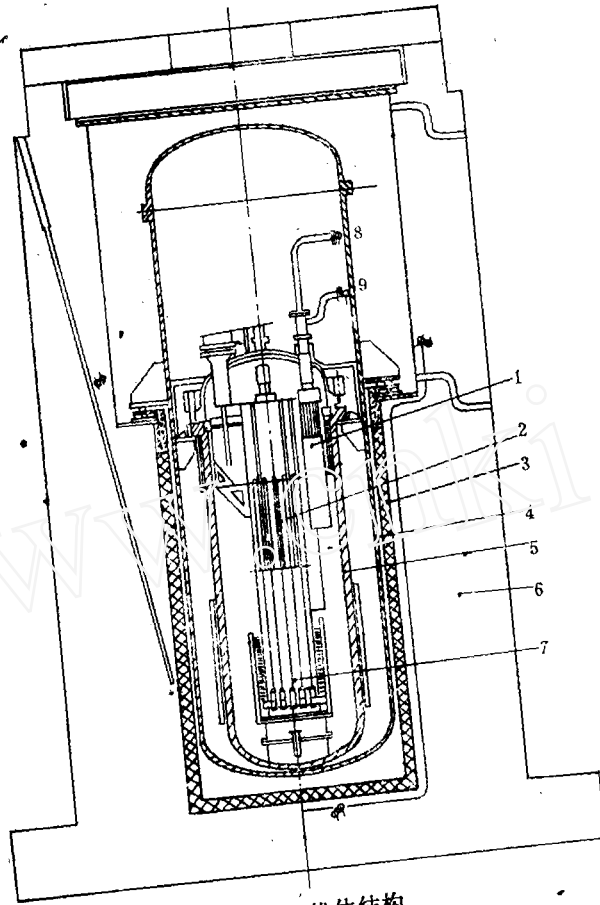


图 1 堆体结构

Fig. 1 Reactor structure

1—主换热器； 2—水力提升段； 3—保温层； 4—安全壳； 5—压力壳； 6—主屏蔽层； 7—堆芯； 8—主换热器二次侧入口； 9—主换热器二次侧出口。

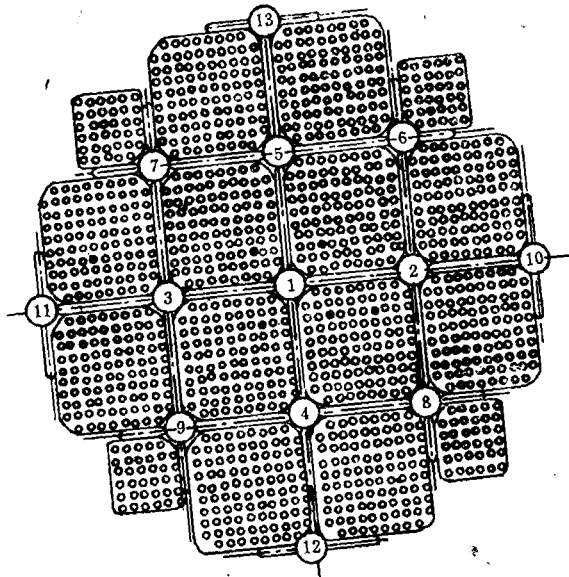


图 2 堆芯布置

Fig. 2 Reactor core

○—元件棒；
●—可燃毒物棒；
1-13—控制棒编号。

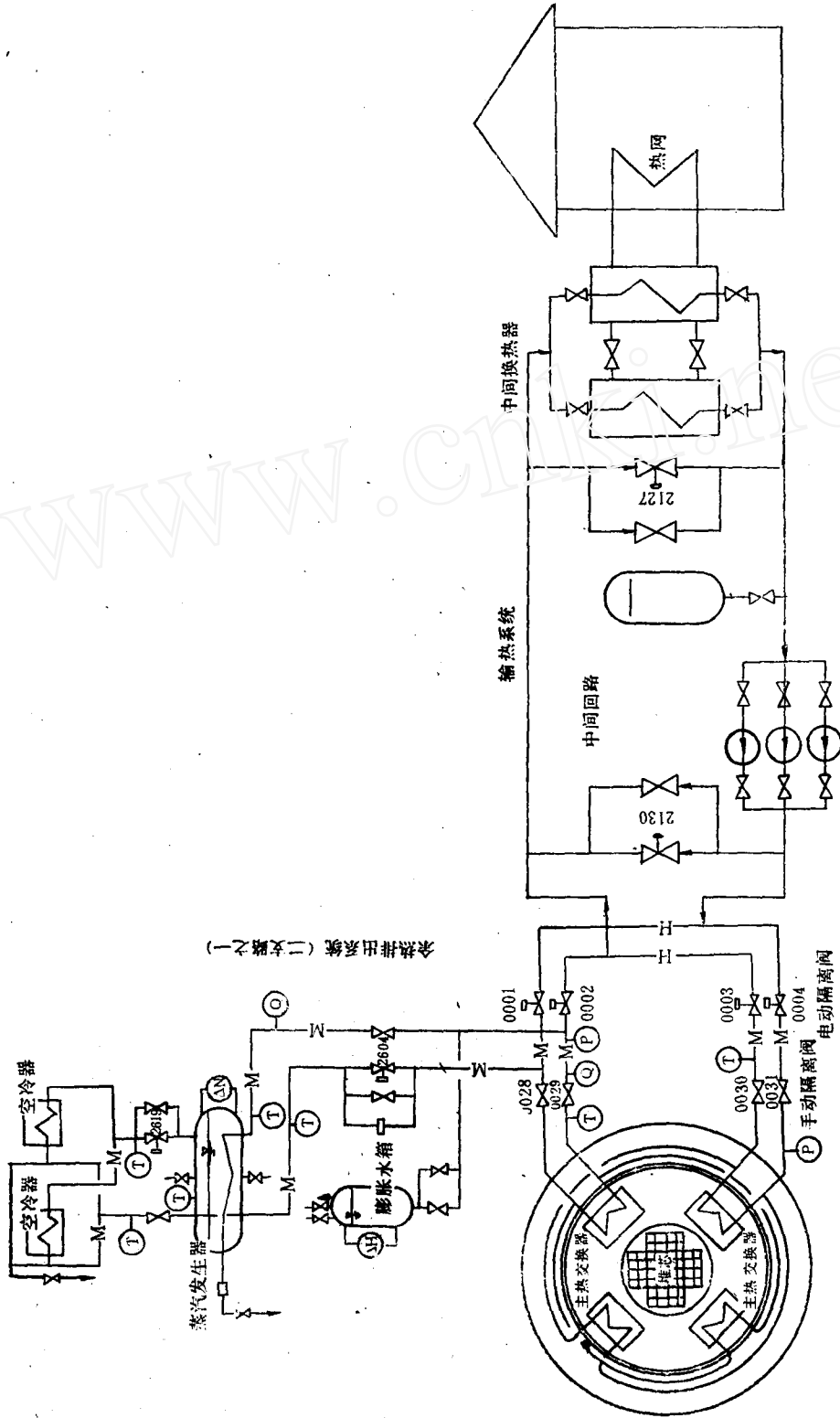


图 3 输热和排热系统 Fig. 3 Main cooling system and residual heat removal system

表 1 5MW供热堆主要参数表

Table 1 Main data of 5 MW heating reactor

反应堆热功率/kW	5000.	压力壳内径/m	1.8
反应堆冷却剂压力/MPa	1.5	压力壳高度/m	6.5
冷却剂温度(进/出口)/°C	186/198(微沸腾工况) 146.6/186(压水工况)	主换热器台数	4
平均功率密度/kW/l	24	主换热面积/m ²	50.8
堆芯活性区高度/m	0.69	二回路压力/MPa	1.7
堆芯当量直径/m	~0.57	二回路温度(进/出口)/°C	158/118(微沸腾工况) 142/102(压水工况)
燃料组件数	12(大盒) 4(小盒)	二回路换热器台数	2
燃料元件直径/mm	10	总换热面积/m ²	146
燃料丰度/%	3	安全壳内径/m	2.8
燃料总装量/kg	~507.3	安全壳高度/m	9.5
堆芯水轴体积比	2.44	热网压力/MPa	~0.5
控制棒总数	13	热网温度(供/回水)/°C	90/60

任何设计基准事故工况下,堆芯不会裸露,因此,该堆不必设置应急堆芯冷却系统。

2. 自然循环冷却方式 余热排出系统是5MW供热堆最重要的安全系统。将堆芯余热散到最终热阱需经三重自然循环回路(见图3)。前面已指出,一回路系统实现了全功率的自然循环冷却,因此,有足够能力载出堆芯余热。余热二回路也是依靠自然循环将主换热器传出的热量载至余热蒸发器,使余热三回路的水加热并蒸发,蒸汽沿上升管流向厂房顶上的空冷器,被空气冷凝后,流回蒸发器。这种设计不会导致余热排出系统因局部环节冷冻结冰而失效。由于采用自然循环冷却方式,因此即使丧失外电源,也可以长期维持堆芯的适当冷却。

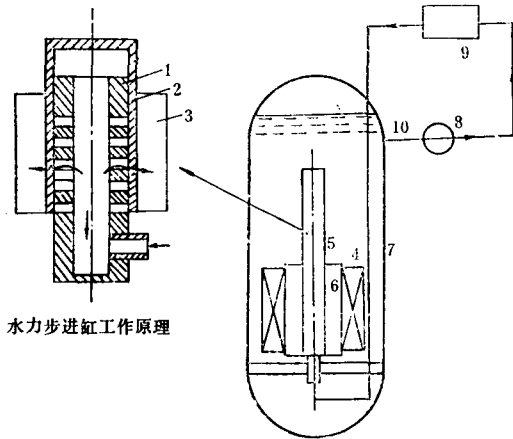


图4 控制棒水力传动系统

Fig.4 Schematic diagram of control rod drive mechanism

1—内套; 2—外套; 3—吸收体; 4—反应堆堆芯; 5—水力步进缸; 6—吸收元件; 7—压力壳; 8—泵; 9—控制单元; 10—取水口。

3. 控制棒水力传动系统 5MW供热堆在世界上首次采用水力传动代替核电厂使用的电磁-机械传动方式来驱动其13根控制棒。水力传动工作介质是反应堆冷却剂,其简化流程如图4所示:循环泵从堆壳内啣送一股冷却剂至堆内各控制棒的步进缸。当流体以一定流速通过步进缸的内、外套的阻力环节时,会在两侧产生压差,这种压差与内、外套上的孔的相对位置有关。正是靠这种压差及其变化来维持或移动控制棒在堆内的位置。因此,水力传动不同于“液压”传动,它是动压传动,即在液体流动,并产生合适的压差条件下,才能产生一定的推动力。这种传动方式具有“失效-安全”的优点,即失电、失压、断管和停泵等事故,均导致控制棒落入堆芯。

水力传动也排除了控制棒弹出的可能性,因此,5MW供热堆采用的传动机构提高了该堆实现安全停堆的可靠性。

4. 防止放射性物质向热网泄漏的措施 避免热网受到放射性物质的污染是核供热堆面临的特殊问题,也是其重要的安全设计准则之一。为此,5 MW 供热堆设置了中间回路,将含放射性物质的一回路系统与热网隔开。它相当于增加了一道安全屏障。同时,中间回路的工作压力(1.7 MPa)高于一回路。因此,即使主换热器发生泄漏,也是中间回路的水流进一回路。为了避免在事故工况下发生放射性物质外泄的可能性,中间回路设有泄漏监测和自动隔离装置。一旦由于某种原因(如断管),使中间回路压力或液位降至保护整定值时,就会触发中间回路隔离阀关闭,从而切断放射性物质可能外逸的路径。此外,中间回路还设有放射性监测、放射性水平异常时,则立即停堆,并隔离中间回路和热网。这些设计措施足可保证实现安全供暖的目标。

5. 运行参数低,设计裕度大 与压水堆核电厂相比,5 MW 供热堆运行压力仅为核电厂的十分之一,堆芯功率密度约为三分之一,冷却剂和燃料元件工作温度均远低于核电厂;在反应堆物理、热工和结构等设计中均留有较大的裕度。如额定工况下 $DNBR_{min}$ 的设计值较大,使燃料包壳的完整性有可靠的保障。

四、5 MW 供热堆安全性能

5 MW 供热堆的设计特性保证了该堆能够可靠地实现安全停堆,能够维持堆芯得到适当的冷却,并防止放射性物质的过量释放。该堆具有良好的安全性能。为了验证该堆的安全特性,我们对各类预期事件和假想的事故工况进行了详细的分析研究。所考虑的初因事件包括下列类别:

1. 二次侧排热或热网负荷减少; 2. 二次侧排热或热网负荷增加; 3. 功率分布或反应性异常; 4. 反应堆冷却剂储量增加; 5. 反应堆冷却剂储量减少; 6. 放射性事故; 7. 不能紧急停堆的预期瞬态工况(ATWS)。

上述各类工况的分析结果表明,5 MW 供热堆在上述任何设计基准事故下,具有下述重要特性:

1. $DNBR_{min}$ 大于安全限值,燃料元件包壳不会因过热而破损; 2. 反应堆冷却剂系统的峰值压力远低于系统的设计压力,冷却剂承压边界的完整性能够很好保持,除发生全厂断电 ATWS 外,压力壳安全阀不会打开; 3. 反应堆堆芯不会裸露,堆芯始终保持合适的冷却; 4. 燃料最大热焓低于规定限值; 5. 放射性释放量远低于规定限值。

为了进一步验证 5 MW 供热堆应付严重事件的能力,我们还对压水运行时超出设计基准事故的工况(或比设计基准事故更严重的工况)进行了分析,如全厂断电 ATWS 时,再叠加硼注入系统失效。分析结果表明:即使在这种情况下堆芯仍可坚持约 24 h 不会发生裸露,因此有足够长的时间允许操纵员采取措施缓解事故后果。所以,该堆可以排除堆芯熔化的可能性。

5 MW 供热堆运行经验和试验结果也证明:该堆具有良好的固有安全性、运行可靠、操作简便。由于该堆堆芯具有较大的负反应性系数,整个系统热惯性大,因此具有优异的自稳性和自调性。例如,在热网 100% 甩负荷 ATWS 试验中,操纵员不加任何干预,反应堆依靠自身的特性将功率降至与堆的散热能力相平衡的水平,堆芯出口温度仅升高约 5°C。

五、结 束 语

5 MW 供热堆采用了先进的设计特性, 具有优异的安全性能。该堆的顺利建成和成功运行标志着我国在低温核供热技术领域跨进了世界先进行列, 并为大型商用低温核供热示范站的建设奠定牢固的技术基础。目前, 基于 5 MW 供热堆相同的设计概念, 正在进行 200 MW 核供热示范站的初步设计。低温供热反应堆将成为一种安全、经济和清洁的能源, 在我国未来的能源系统中占据一定的地位。

参 考 文 献

- [1] 5 MW 低温核供热试验堆最终安全分析报告, 清华大学核能技术研究所资料, 1989。
- [2] IAEA, IAEA-TECDOC-463, 1988。
- [3] Goetzmann, C. et al., Nuclear district heating, Kerntechnik, 50, 4, 1987。

(编辑部收到日期: 1990 年 6 月 5 日)

5 MW EXPERIMENTAL LOW TEMPERATURE NUCLEAR HEATING REACTOR AND ITS SAFETY FEATURES

ZHENG WENXIANG DONG DUO

(Institute of Nuclear Energy, Technology Tsinghua University, Beijing)

ABSTRACT

5 MW Experimental low temperature nuclear heating reactor developed by the Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, has been put into operation. This paper describes briefly the main design characteristics, including the integrated arrangement, dual pressure-containing vessel structure, hydraulic control rod drive system used in reactor structures first time in the world, natural circulation and the design provisions for protecting heating grid from radioactive contamination. These design measures greatly enhance the inherent safety features, which are also presented in the paper.

Key words Low temperature heating reactor, Integrated arrangement, Natural circulation, Inherent safety features.