

南京工业学校

第二章 核电站压水式反应堆

§1 核电站总体布局及其工艺流程

一、一回路系统和二回路系统

核电站是利用原子核裂变反应放出的核能来发电的发电厂。它通常由一回路系统和二回路系统两大部分组成。如图 2.1 所示。

一回路系统由反应堆、蒸汽发生器（一次侧）、稳压器和主循环泵等设备，以及它们之间的管道和阀门组成。一回路系统的核心是反应堆，它相当于常规火电厂的锅炉。反应堆工作时放出的核能，主要以热的形式由冷却剂带出。冷却剂通过入口管接头进入压力壳，再通过堆芯吊篮与压力壳筒体间的环形通道，沿轴向向下流动，在压力壳底部径向转弯后，通过均流板，使沿整个堆芯入口截面的流量得以均匀化后，由下而上地流过堆芯，并且不直接接触压力壳筒壁，而是通过出口管接头离开压力壳进入蒸汽发生器 U 型管内侧。在那里把热量传给二次侧的水，并使它变成饱和蒸汽。自蒸汽发生器出来的冷却剂，由主循环泵即送回堆芯，并维持其循环流动，不断地将反应堆中的热量带出和转换成蒸汽。一般都有 2—4 个并联于反应堆进出口处的独立冷却环路，

南 京 工 业 学 校

每个冷却环路各有一台蒸汽发生器和一台主循环泵。几个环路共用一台稳压缸。如图2.2所示。

为了确保安全,整个一回路系统装在安全壳的密闭厂房内,这样,无论在正常运行或发生事故时,都不会影响环境安全。一回路系统也称核蒸汽供应系统,又叫核岛。

由蒸汽驱动汽轮发电机组发电的二回路系统,由蒸汽发生器,高、低压缸,汽轮发电机,给水泵等设备,以及它们之间的管道所组成。二回路给水由蒸汽发生器下部,进入内置式预热器预热,然后,在自然循环流动过程中被加热沸腾变成饱和蒸汽。湿蒸汽经过汽水分离器,和蒸汽干燥器变为干饱和蒸汽后,由顶部蒸汽出口,经蒸汽管道进入透平系统。透平系统由同一轴上的高压缸和低压缸组成,蒸汽经部分膨胀离开高压缸后,通过几套汽水分离器,和再加热。从高压缸和蒸汽发生器之间抽出的蒸汽充当再加热源。然后,在低压缸内进一步膨胀做功。从低压缸中排出的乏蒸汽进入透平下方的冷凝器中,冷凝水则作为蒸汽发生器的补给水,但是,在进入蒸汽发生器之前,冷凝水要用透平中抽出的蒸汽加热。二回路系统与常规火电厂的汽轮发电机系统基本相同。因此,

南 京 工 业 学 校

二回路系统被称为常规岛。

二. 一回路系统中几个主要设备

(1) 蒸汽发生器

蒸汽发生器是一个立式倒U型管束热交换器。如图2-3所示。其主要组成部分是水平管板,和立于其上的倒U型管束及管板下方的半球形封头,封头与管板之间用隔板分成两个汇流室,管板上的U型管管口分别与汇流室的进、出口水腔相通。来自反应堆的高温水流入进口水腔后,经U型管内腔流到汇流室的出口腔,然后返回堆芯。蒸汽发生器的二回路侧,由管束的外空间、汽水分离器和蒸汽干燥器等组成。

U型管是一、二回路之间的压力分界面。在水质、热应力和水力冲击等综合作用下,就有可能导致管壁的破裂,造成一回路冷却水向二回路泄漏。为了确保一、二回路的水质,管子的材料和尺寸的选择,对蒸汽发生器设计是很重要的,管材通常采用镍基合金因科镍或因科洛依。

(2) 主循环泵

主循环泵是一回路冷却剂的驱动部件,是一个带有活动支承叶轮的单级离心泵,泵轴是垂直方向的。泵体内的压力是用高压轴封及其串联布置的低压轴封同外界隔开的,如图2-4所示。

南 京 工 业 学 校

循环主泵应能确保堆芯所需的冷却剂流量,提供的扬程应能克服一回路系统各设备在设计流量下的阻力,循环反应堆冷却剂,确保反应堆安全运行。在全厂断电事故时,靠主泵转子自身的惯性惰转,在一定时间内保持部分流量,带出堆芯余热。

(3) 稳 压 缸

所谓压水堆,就是给一回路系统加上高压,使堆芯中的冷却水在高温下不沸腾。反应堆运行时,希望一回路设备尽可能地在稳定压力下工作。由于水的可压缩性很小,如果一回路完全被水充满,在温度波动下,它就将持续地承受强烈的压力变化。为了补偿容积变化,就要以适当的方式在一回路内保持一定数量被加热到和运行压力相应的饱和温度的蒸汽和水,这些水的蒸发和蒸汽的压缩就减弱了压力的变化。稳压缸就是为以目的而设计的,稳压缸下面有饱和水,其上面则是饱和蒸汽。稳压缸的顶部装有喷淋装置,它通过连接管与反应堆冷管段(入口段)相连接。稳压缸的下部装有许多包在密封套管内的电加热圈,底部有接管与反应堆热管段(出口段)连通。如图2-5所示。

当电站负荷下降时,汽轮机的输出功率便降低,透

南 京 工 业 学 校

平入口调节阀就会自动关小,蒸汽发生炉内的压力就增加,二次侧的沸腾温度就升高,从一次侧传出的热量就减少,因而引起堆芯平均温度升高,冷却剂体积增大。这时稳压炉中的额定水位就会升高,从而引起汽空间的压力亦即一回路压力增高。当压力升到喷淋系统的启动压力值时,喷淋系统的伐门自动打开,来自冷管段中的过冷水即由顶部喷嘴喷淋而下,使稳压炉中的部分蒸汽冷凝成水,从而可限制一回路中压力继续升高,并使其恢复到整定值。

当电站负荷增加时,汽轮机的输出功率便加大,透平入口调节伐就会自动开大,蒸汽发生炉内的压力就下降,二次侧水的沸腾温度就降低,从一次侧传出的热量就增加,因而引起堆芯平均温度下降,冷却剂体积随即减小,稳压炉内额定水位与压力随即下降,这时,首先会有部分饱和水闪发(由于压力突然下降,饱和水变成饱和蒸汽的过程)为蒸汽,压力的下降得到部分补偿。与此同时,压力下降信号控制电加热器,使之投入工作,以使部分饱和水变为饱和蒸汽。这样,一回路系统的压力也就可以恢复到整定值的范围之内。

(4) 泄压水箱

910110

南京工业学校

泄压水箱的作用,是在稳压口的泄压伐、安全伐及容积调节系统的安全伐开启时,便排出的蒸汽凝结。泄压水箱中三分之二的容积是水,其上面为空气垫。在泄压过程中,蒸汽便通过泄压伐或安全伐,蒸汽室、蒸汽管、分配管而导入一个环形管,并进而排入水中而凝结。在泄压过程中,泄压箱中的水将被加热,为使其冷却,配置有单独的冷却回路,其凝结水则通过容积调节系统排走。

(5) 伐门

一回路中的伐门,根据其运行条件,可以是手动的也可以是电动的,但泄压伐和安全伐是例外的。

借助于泄压伐,就可以尽量避免压力上升到了引起安全伐动作的程度。泄压伐是一个有辅助控制伐的伐门,它的辅助控制伐是一个电磁伐,是通过电气脉冲信号而开启的。

安全伐也同样有辅助控制伐,但是,是一个弹簧式的控制伐,为了提高密封力除弹簧外,还装有产生附加压力的电磁机构。

南 京 工 业 学 校

三. 一回路中的主要辅助系统

一回路的运行,是靠各种辅助系统的正常工作来辅助或保证的。下面简单介绍几个重要辅助系统的任务及其主要功能。

(1) 压力安全系统.

在稳压池上部,装有通向大厅的安全伐和与卸压箱相连接的卸压伐。在反应堆正常运行的情况下,通过稳压池的喷淋系统和电加热系统,来维持一回路的工作压力在整定值范围内波动。当出现事故引起一回路压力急剧升高时,卸压伐和安全伐可自动开启,将稳压池中的蒸汽分别排至卸压箱和大厅,以实现事故情况下的超压保护,确保反应堆安全。当稳压池压力降低及水位上升超过整定值时,稳压池内电加热池可全部投入工作,可在短时间内使压力升到额定值,然后陆续关掉加热池,直到最后只有一组小功率的电加热池继续运行,以补充绝热层的热损失。

(2) 容积补偿、化学注入和冷却剂净化系统

为了满足运行要求,每小时从主冷却回路中引出其总水容量的10—20%,并将其降至低温低压。在进入补偿箱之前,冷却剂先通过净化系统除掉杂质。容积补偿

南 京 工 业 学 校

箱为各种运行工况储存了一定数量的冷却剂。从容积补偿箱出来的净化水,在进入主冷却回路之前,需要根据反应堆的功率及燃料状态,决定向冷却剂中加硼或减硼,并从化学药品调制罐中,注入调整水的pH值所需要的化学物品,经升温升压后,重新注回到主冷却回路,以补充一回路水,保证在运行以及机组启、停过程中稳压泵的整定水位,同时提供主泵轴封系统所需要的用水。

(3) 余热冷却及安全注入系统

反应堆在满功率运行一段时间停闭之后,由于缓发中子还会引起裂变,裂变产物和辐射俘获产物的衰变,堆内仍有一定的释热率。这种现象产生的热称为余热,与其相应的功率称为剩余功率。

刚停堆时刻,其剩余功率占停堆前热功率的百分之七,停堆一小时后,其剩余功率仍占停堆前热功率的百分之二以上。这么大而且持久的剩余功率,如果不及时导出堆外,反应堆就会发生极其严重的堆芯熔化事故。因此,为确保反应堆安全,压水堆都设有正常和失水事故多重冷却系统。

在按计划正常停堆以及过渡到无压状态时,是用余热冷却系统来排走停堆余热的。刚停堆初期,主循

南 京 工 业 学 校

环泵继续运行,将冷却剂的热量传给蒸汽发生器,产生的蒸汽直接排放到冷凝器中冷凝。当冷却剂温度降到一定数值之后,反应堆冷却系统投入工作,这时,余热冷却泵从反应堆冷却回路的热管段(即反应堆压力壳及蒸汽发生器之间的管段)吸取冷却剂,通过余热冷却器冷却后,再将其注入冷管段(即蒸汽发生器与主循环泵之间的管段)中去。用一个调节装置控制着这个冷却过程,使得不超过主冷却回路所允许的最大冷却速度,这个允许的冷却速度,是由反应堆冷却回路设备的热应力限定的。

反应堆发生一次冷却剂流失率超过补给水能力的事故,称为失水事故。这时,单靠容积调节补偿系统已无法控制。当稳压器内的压力及水位低于事先给定的最低值时,安全注入系统就会自动投入运行。

如果失水量很大,使一回路压力快速下降到事先设定值时,连接于注入管路上的蓄水箱就会自动将其内储存的水注入堆芯。^{如图2-6所示}随后,余热冷却泵立即启动,这时不是从一回路热管段抽水,而是通过止回伐从贮水箱中抽取含硼水,通过几条独立的注水管路向堆芯注水,如图2-7所示。当贮水箱中水用完后,改从地坑吸水,如图2-8所示。
如果失水量不大(小泄漏或中等泄漏),一回路压力缓

南 京 工 业 学 校

慢下降,则启动的不是余热冷却泵,而是高压注入泵(其额定功率小于余热冷却泵)。也是通过同样的管路实现向堆内注水。

各注水管路上都装为止回伐,因此,在反应堆运行时,各注入管路都是处于开启状态的。这样,就使安全注入系统处于非常好的投入准备状态。

§2 反应堆堆芯结构

一个反应堆要能维持和控制核裂变反应速率,实现热能转换,总要有足够的燃料维持临界质量和几何形状。在陶瓷燃料芯块里含有可裂变的核燃料,许多陶瓷芯块放在一根锆合金包壳管内就构成燃料棒。把一些测量管、导向管和燃料棒按一定方案排列成燃料组件。再把这些燃料组件按设计方案放入压力壳内,就构成反应堆。为了确保反应堆安全,压力壳外设有安全壳,以容纳一回路设备并防止放射性物质泄漏,同时对堆内构件起支承作用。压水堆总体结构如图 2.9 所示。

一. 压力壳与压力壳封头

压力壳是用几块平板和锻件焊成一个圆柱体,其底

南 京 工 业 学 校

部用一个半球形顶盖封住,顶部有一个可拆式半球形顶盖封住,压力壳的作用是容纳反应堆堆芯、控制棒以及起支承和导流作用的堆内构件。要求耐高压。

一回路冷却剂入口和出口管咀对称放在上封头法兰下面,为了在水进入堆芯区之前把流速降下来,入口管咀在进入压力壳时成喇叭形,这样也同时降低了回路的压差。

压力壳法兰是压力壳顶上的一个环形锻件,就在这个地方用螺栓把上封头套在压力壳上,并由法兰内表面上的凸缘支承堆芯和堆内构件的垂直重荷。

压力壳与混凝土相连是靠四条钢腿支撑着的,在支撑腿和底板之间,有一个滑动面可以调节压力壳的热膨胀和收缩,压力壳四周有一个保温隔离层,使压力壳壁的温度梯度变化小,减小热应力。

压力壳上封头顶部设置一些贯穿件,支承控制棒的驱动机构 and 热电偶吊架等。下封头上有堆内核测套管的贯穿件。

二 下部堆内构件

下部堆内构件是一个联成整体的结构部件。它由圆筒形的堆芯吊兰,堆芯围板及下部支承结构组成。堆芯围板和堆芯边缘的燃料组件外缘相配合。堆芯吊

南 京 工 业 学 校

兰的上面,通过一个法兰挂在反应堆压力壳的突沿上,并由压力壳顶盖通过沿圆周分布的大量弹簧组将其压紧。下部支承结构座在堆芯吊兰的下部法兰上,并做固定连接。

燃料组件直接放在下部构件的堆芯支承板上,堆芯支承板上有许多销钉,使燃料组件可以对准并固定在自己适当的径向位置上。这块板上有许多流量孔,它们把冷却剂分配给各个燃料组件,下部构件的堆芯支承柱把燃料组件的重量传给坚固的堆芯支承件,堆芯支承件是一个重不锈钢结构,直接焊在堆芯吊兰上,它把燃料组件的重量传给堆芯吊兰。堆芯支承件上也有流孔,其作用就是使堆芯入口处的流速均匀化。这样,整个堆芯下部构件就形成了一个底部开孔的筒件。下部堆内构件的作用是定位和支承燃料组件,使堆芯冷却剂经过正确的流道流过燃料棒,并对压力壳提供辐射屏蔽和热屏蔽。

三 上部堆内构件

上部堆内构件由带有盖板的上格架及支承管组成,支承管联接着上格架及盖在堆芯上部的上栅格板。在支承管内装配有控制棒组件的导向架。这些导向架和上格架是螺栓联接的,并且穿过上格架直达压

南京工业学校

力壳下方空间。导向架是由贯通的条杆组成的。这些条杆在一定距离上和槽板相焊,组成一个牢固的框架,在其下部,外面设有包壳管,以便保证从燃料组件中流出的冷却剂不受干扰地侧向流动。另外,在下面导向架中,还焊有开槽的管,控制棒就在这些管中运动。

燃料组件是通过定位销在上部构件的栅格板中定位的。堆芯装料后,装上部构件时,将这些定位销插入燃料组件端部相应的定位孔中。栅格板的上侧同样也有相应的定位销将控制棒导向架定位,这样,就能始终确保控制棒在导向架中动作位置的正确,并能准确地插入到燃料组件中所要求的位置。

用于测量堆芯出口水温的热电偶,位于热电偶支承柱内,热电偶导向管是成组在一起的,由导线引到压力表之外。

整个上部堆内构件作为一个整体,在堆芯换料时可以搬走。

四 堆芯和燃料组件

核反应堆堆芯是由指定数目的燃料组件构成的,一根燃料组件结构如图 2.10 所示,它是由上管座,下

南京工业学校

管座、导向管、测量管、格架和燃料棒组成的。上、下管座，导向管、测量管和格架是燃料组件的支承结构。下管座在结构上像一个盒子，它提供结构支承，并在组件的燃料棒之间均匀地分配冷却剂流量。上管座是燃料组件的上部结构单元，对控制棒起定位作用。每个燃料组件都有固定数目的燃料棒、导向管和测量管。比如，对 15×15 方陣排列的燃料组件，是由中心1根测量管、204根燃料棒和20根导向管组成。对 17×17 方陣排列的燃料组件，是由中心1根测量管，264根燃料棒和24根导向管组成。视燃料组件在堆内位置的不同，导向管内有的装控制棒组件，有的装中子源组件，有的装可燃毒物组件，凡是不装上述组件的导向管内都装上阻塞棒。堆内所有燃料组件的几何形状是相同的，可以绕纵轴一步步地做 90° 度旋转，采取其中任一方向，都可安装于堆内任何位置上。

1. 燃料芯块与燃料棒

燃料芯块是由稍加浓缩的二氧化铀(UO_2)粉末，经冷压致密，高温烧结而成的陶瓷小块，直径约8毫米，高约10毫米，两端向内凹成蝶形。二氧化铀中的铀是U-238和U-235，为改善反应堆径向功率分布，提高燃耗深度，初始装料分三个浓度

南京工业学校

(指U-235含量)区,即2.4%, 2.67%和3%,堆芯外区装较高浓度的燃料,燃烧一个周期停堆换料时,将外区高浓度的组件移到内区,而新料装在外区。

把燃料芯块装在约4米长的锆-4合金管内,用不锈钢弹簧使它们就位,二头装块填块并焊封,就做成了燃料棒。

2. 导向管和测量管

每个导向管都是用锆-4合金制成,上部有一个相对较大的内径,下部内径减小并有几个孔,使棒接近底部时产生水力制动。

燃料组件中心的测量管是供堆内通量探测用的,一个微型裂变室在选定的燃料组件内从堆芯顶部移到堆芯底部,以提供通量分布。裂变室是在一种可伸缩式不锈钢管中移动的,这种可伸缩管常称为子管,它被插在选定的燃料组件的中心测量管的底部,中心测量管顶部是封口的,只留一个小的流量孔。

3. 控制棒组件

控制棒是用银铟镉或碳化硼等强中子吸收材料做成的,因此,控制棒可以调节堆芯反应性变化,在任何情况下都能保证反应堆安全。对 17×17 排列方式,控制棒组件由24根控制棒组成,它们通过导向管

南京工业学校

5 散在一个燃料组件内。强中子吸收棒封装在不锈钢管内，固定成一个星形组件，这种形状允许把一个燃料组件内的所有控制棒当成一个整体进行移动。

在反应堆运行时，手动棒和自动调节棒是按棒组进行移动的，一个棒组有四或八个控制棒组件。

4. 可燃毒物棒和阻塞棒

人们把吸收中子后变成一种非中子吸收棒的物质称为可燃毒物。可燃毒物棒装入堆芯可“占据”剩余反应性，保持负的温度系数，并可展平径向通量分布。随着毒物的燃耗，可燃毒物棒的反应性当量变小，这种反应性变化有助于补偿燃料中积累的裂变产物毒物的增加。

燃料组件内装的可燃毒物棒数目是不同的，取决于燃料棒含 U-235 的浓度和相对中子通量。可燃毒物棒是通过一块固定板在燃料组件内就位的，而这块固定板是用弹簧装在燃料组件的上管座内的。

可燃毒物棒是由中空的硼硅玻璃棒组成，玻璃棒封装在不锈钢包壳内。可燃毒物的材料是硼-10，它吸收中子后发生下列反应。



凡不装控制棒组件，中子反组件和可燃毒物棒的所有导向管口都装阻塞棒，其目的是使通过燃料组件的流量均衡以及限制流过空导向管的旁通流量。

南京工业学校

5. 中子源组件

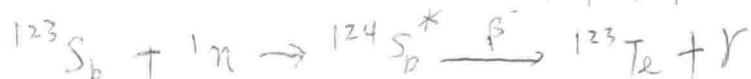
设置中子源组件的目的是提高有底中子水平,减少启动反应堆的盲区,确保有次序有控制地逼近临界并向超临界过渡,对反应堆状态可以监视反应性的变化,证明核探测口工作是否正常。

一次中子反应是“自激型”的,一次反应的主要反应是铀-252的自发裂变:



在反应堆初次启动时起“点火”作用,一般至少要有二个一次反应组件,对称装入堆芯。对17×17排列方式,每个一次反应组件包含一根一次反应棒,19根可燃毒物棒和4根阻塞棒。

二次反应的材料是铈和铍($\text{Ce}-\text{Be}$)。反应堆在高功率运行时的中子通量会激活铈,铈在进行 β 衰变时放出高能 γ 射线引起铍活化而放出一个中子,即:



一般至少要有二个对称布置在堆芯的二次反应组件,每个二次反应组件包含4根反应棒,4根可燃毒物棒和16根阻塞棒。

一、二次中子反应棒都有不锈钢包壳,二次反应里的铈—铍芯块,封装在不锈钢包壳一定高度上。

910110