

上置式水力驱动控制棒

李笑天,何树延

(清华大学核能与新能源技术研究院,北京 100084)

摘要:为提高 200 MW 低温核供热堆经济性,对控制棒结构进行优化设计。在新的控制棒方案中,将控制棒驱动缸移到堆芯活化区以上,控制棒由浮动式活塞带动上下移动。由于驱动缸移出堆芯,燃料组件排布不再缺角,减小了堆的水铀比和堆内的中子吸收,增加了堆的运行时间。适当地加大驱动缸的直径和壁厚,有效降低了制造难度,提高了控制棒运行的可靠性。通过数值计算,分析了上置式水力驱动控制棒的落棒时间。

关键词:控制棒;水力驱动;阻尼器

中图分类号:TL351.5 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2006)03-0297-05

Upper Hydraulic Driving Control Rod

LI Xiao-tian, HE Shu-yan

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

Abstract: The optimum design of hydraulic driving control rod is performed in order to improve economics of 200 MW heating reactor. In the new plan, hydraulic control rod drive is arranged above the reactor core and the control rod is moved with the pistons. The advantage of this design is to reduce the ratio of water to uranium and neutron absorption, increase diameter and thickness of cylinder and improve the reliability of control rod. The time of dropping rod was analysed by numerical simulation.

Key words: control rod; hydraulic drive; damper

低温核供热堆^[1]具有良好的固有安全性,且投资少、建设周期短,可建在人口稠密地区。核供热堆技术应用领域广泛,可进行低温制冷、工艺供热以及海水淡化。核能海水淡化技术将是解决淡水资源短缺的有效途径之一。

200 MW 核供热堆是核供热堆向商用化的推广。它在设计上紧跟国际核能技术的前沿,遵循新一代反应堆的发展趋势,采用一体化布置、轻水自然循环冷却,具有自稳压特性,在压

力壳外设有紧贴式承压安全壳。作为处在发展阶段的新堆型,200 MW 核供热堆由于规模小、参数低等原因,其经济性面临着挑战。

以往的水力驱动控制棒的驱动缸布置在堆芯内,每根控制棒占去 12 根燃料元件的位置。为减少驱动缸的中子吸收,驱动缸壁厚减少到 2 mm,制造难度加大,运行后驱动性能也可能劣化,从而影响堆运行可靠性。鉴于以上问题,本课题组拟对 200 MW 低温核供热堆进行优

化设计,以便有效降低制造难度,提高控制棒运行可靠性,从而发展和推广核供热堆技术。

1 水力驱动机构工作原理

经过优化设计,现已形成一控制棒布置和设计方案,称这种水力驱动控制棒为上置式水力驱动控制棒。在上置式水力驱动控制棒方案中,将控制棒驱动缸移到堆芯活化区以上,控制棒由浮动式活塞带动上下移动。由于驱动缸移出堆芯,燃料组件不再缺角,减小了堆的水轴比和堆内的中子吸收,从而增加了堆的运行时间。移出堆芯的驱动缸结构上可充分利用周围的空间,并可适当地加大驱动缸的直径和壁厚。

控制棒水力驱动机构^[2]的工作原理示意图示于图1。冷却水从压力壳经泵加压后,流经保持流量阻力节进入驱动缸下部。进入驱动缸的水,一部分从驱动缸下部的沟槽处流出,一部分从驱动缸上部活塞处的迷宫流出。当进入驱动缸的流量达到一定值后,驱动缸内的活塞(包括连杆和吸收体)的重量与所受的压力平衡,控制棒稳定地保持在某一位置。这时,上升电磁阀处于常开状态,下降电磁阀处于常闭状态,脉冲缸的活塞位于缸的底部。当进行控制棒提升时,将上升电磁阀关闭一段时间后再打开。在压力作用下,脉冲缸活塞先向上运动使脉冲缸内注入一定量的水,然后在高压作用下迅速向下运动,将脉冲缸内流体压出,产生一股正脉冲流量流入驱动缸,使缸内压力升高,控制棒向上作步进运动。当进行控制棒降棒时,将下降电磁阀打开一段时间后再关闭。下降电磁阀的打开使本应流入驱动缸的一部分流体直接经下降电磁阀和下降阻力节流回泵前,导致驱动缸内压力下降,控制棒向下作步降运动。

2 结构设计

2.1 总体结构

上置式水力驱动棒由驱动缸、活塞、柔性连杆、阻尼器、外套管、进水管、循环泵和组合阀组成。组合阀包括上升电磁阀、下降电磁阀、脉动缸、保持流量阻力节、下降阻力节和回零阻力节。中子吸收体固结在图2所示的柔性连杆下部,活塞与柔性连杆上部相连。驱动缸工作时,水从压力壳中引出,经循环泵加压后,通过组合

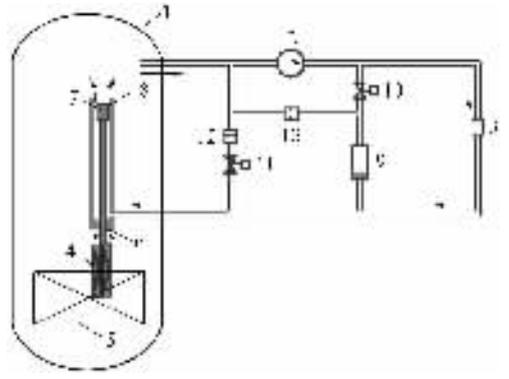


图1 水力驱动机构工作原理示意图

Fig.1 Scheme of hydraulic driving system

- 1——压力壳; 2——泵; 3——保持流量阻力节; 4——吸收体;
5——堆芯; 6——沟槽; 7——活塞; 8——迷宫; 9——脉冲缸;
10——上升电磁阀; 11——下降电磁阀; 12——下降阻力节;
13——回零阻力节

阀经进水管进入驱动缸,然后通过柔性连杆与外套管间的沟槽以及活塞迷宫处流回压力壳。当驱动缸所受的内外压差恰好与活塞、柔性连杆、固接吸收体在水中的重量平衡时,驱动缸处于平衡状态,控制棒保持在一定的棒位上。如果缸内压力有一些小扰动,驱动缸可通过自身的调节能力改变连杆与外套管间沟槽处流量,使驱动缸在原位保持平衡。通过上升电磁阀、脉冲缸以及下降电磁阀的相关动作可产生脉冲流量,使驱动缸内压力增大或减小,从而使控制棒上升或下降。

柔性连杆为长 6 100 mm 的实心钢棒,约 3 个堆芯高度。连杆上部(4 200 mm 长)的外壁上开有距离相等的沟槽,顶端通过一联接接头与活塞相连;下部(1 900 mm)与十字型控制棒固联。外套管的内壁上有与连杆上沟槽相应的沟槽,连杆上沟槽的最大外径和外套管上沟槽的最小内径间有 0.2 mm 间隙。驱动缸和外套管的环缝间布置着起缓冲作用的阻尼环和碟簧。外套管与驱动缸外筒在外套管的凸台处通过焊接连接。外套管通过凸台坐在驱动缸支架上,支架支撑在堆芯围筒上。在外套管凸台上部,外套管与驱动缸外筒的一侧开一进水孔,与进水管相连。进水管是一段 L 型管,它的两端分别通过插焊与驱动缸外筒和驱动缸支架相连。在驱动缸支架和堆芯围筒上开有与进水管等径的孔道,进入驱动缸的水经过堆芯围筒和

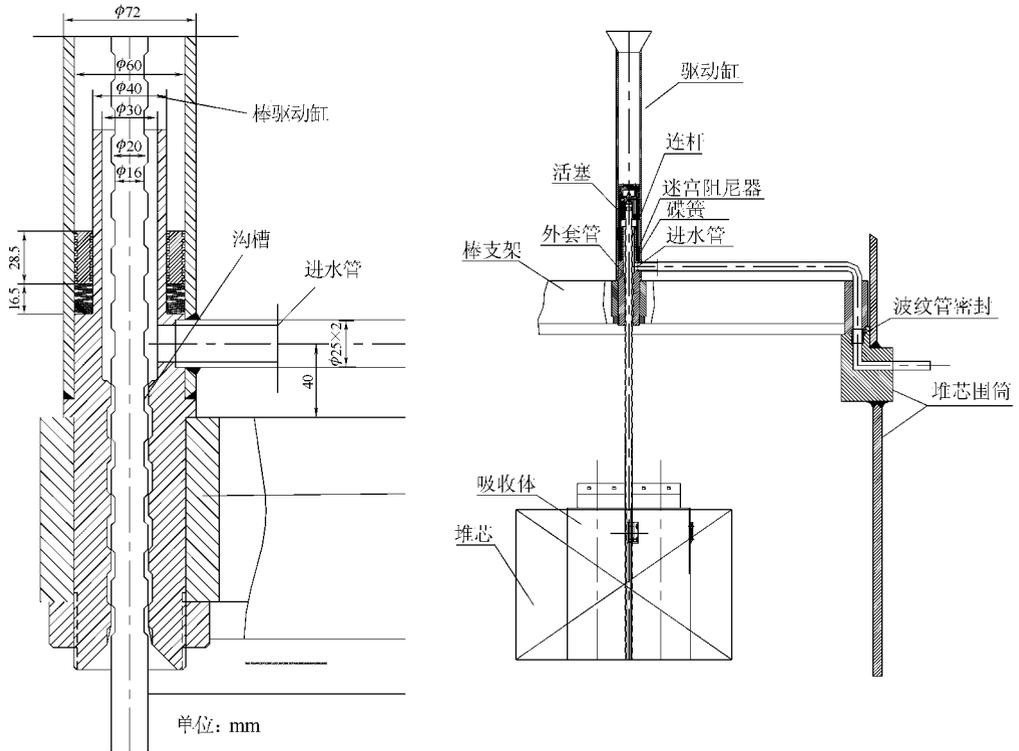


图2 上置式水力驱动棒结构示意图

Fig. 2 Scheme of upper hydraulic driving control rod

支架处的孔道,经进水管进入驱动缸。堆芯围筒和驱动缸支架在进水管的孔道处,采用波纹管结构以保证密封性。活塞外围均是迷宫结构,与驱动缸间有 0.2 mm 间隙。活塞下部内侧也为迷宫结构,在落棒时起缓冲作用。从图 3 可见,采用上置式控制棒结构后,堆芯燃料组件排布不缺角。

2.2 活塞

反应堆需定期换料,控制棒驱动机构的结构应可拆卸,以满足换料要求。换料时,控制棒吸收体应始终插在堆芯内。因此,换料时,柔性连杆留在堆芯,其它部件应均可拆取出堆芯。

上置式水力驱动控制棒的结构易于拆卸。首先,将与连杆连接的活塞取下,然后将控制棒驱动缸和支架从与堆芯围板的密封处拆开,并从堆芯取出。其中,活塞拆卸较为复杂。活塞由上活塞、环形挡板、中活塞、下活塞焊接而成,中心开有不贯通的圆孔,连杆上部的中心接头插在直径 $\phi 60$ mm 的圆孔中,由此将活塞和连杆联为为一体。

连杆上的中心接头主体是 $\phi 20$ mm 钢棒,上部两侧各开有一个 90° 凹槽;中部两侧各有高 8 mm、弧度 110° 的凸缘,凸缘向下弧度缩小,变成高 12 mm、弧度 20° ;下部加工成 M14 的螺栓,连杆上部加工成内螺纹,中心接头与连杆通过螺栓连接在一起,并在连接处点焊一圈。

活塞通过两个部位固定。一是通过卡销在接头凹槽处卡紧。卡销通过弹簧和环形挡板相连,并通过弹簧力将活塞与接头卡住。二是下

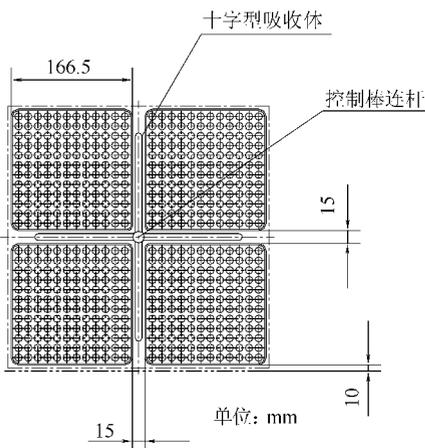


图3 堆芯栅格

Fig. 3 Core lattices

活塞中心开的花槽与中心接头的凸缘通过旋转适当的角度将活塞头锁紧。

上活塞的顶面布有 3 个螺栓孔,以用来拆

卸活塞。当拆卸活塞时,用一与活塞配套的抓取工具将其插入上活塞的 3 个螺栓孔内,旋转 90°取出活塞。活塞结构示于图 4。

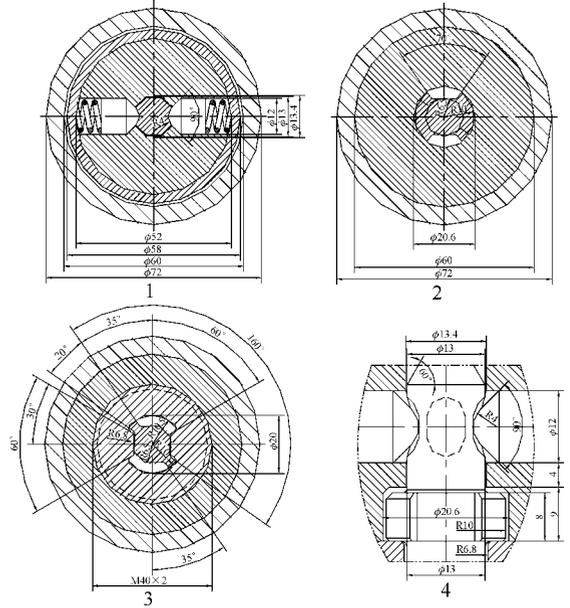
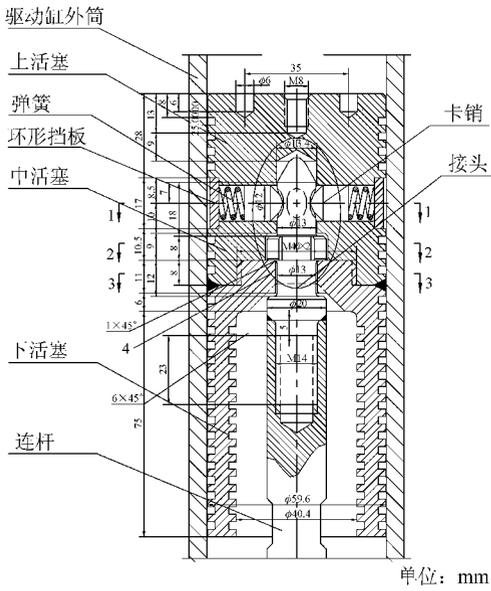


图 4 活塞结构

Fig. 4 Piston structure

2.3 阻尼器

驱动缸下部的阻尼器是用来吸收冲击载荷的能量以减少冲击带来的不良影响的装置。当反应堆需快速落棒停堆时,阻尼器将起到缓冲冲击载荷的作用,对控制棒系统稳定、安全、可靠地工作具有重要意义。阻尼器的缓冲作用由液体缓冲和机械缓冲两部分组成。其中,液体缓冲依靠阻尼环结构上的迷宫及其与驱动缸的缝隙来完成;机械缓冲依靠两组碟形弹簧完成。控制棒落棒时,首先靠重力的作用自由下落,当活塞以速度 v_1 进入阻尼腔后,阻尼器开始起作用。活塞进入阻尼腔中的阻尼环上部时,下活塞内外两侧的迷宫起阻尼作用;当下活塞以速度 v_2 接触到阻尼环时,阻尼环和碟簧同时起阻尼作用。

如图 5 所示,阻尼腔高 100 mm,阻尼环上部高 55 mm,记为阻尼行程 1;阻尼环高 28.5 mm,碟簧 9 片,每片厚 1 mm,下部阻尼行程为 7.5 mm,记为阻尼行程 2。活塞运动方程整理为以下 3 个方程:

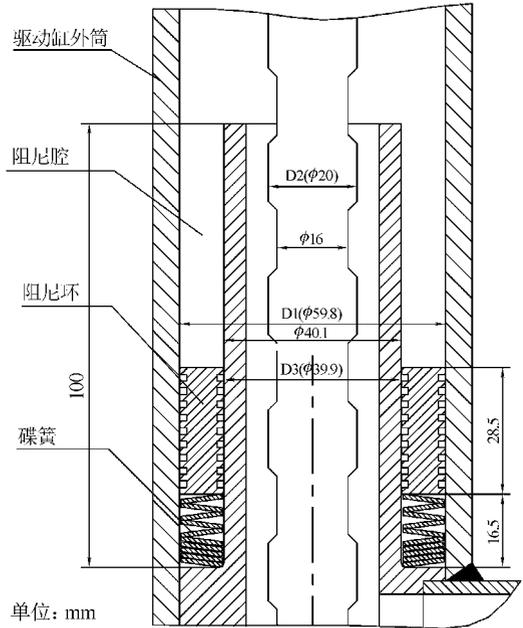


图 5 阻尼器结构

Fig. 5 Damper structure

$$\ddot{x} = g - \frac{A^3 x^2}{m \left(A_u \sqrt{\frac{2}{\zeta_u \rho}} + A_d \sqrt{\frac{2}{\zeta_d \rho}} + A_p \sqrt{\frac{2}{\zeta_p \rho}} \right)^2} \quad (1)$$

初始条件: $x = 0, \dot{x} = 0$ 。

$$\ddot{x} = g - \frac{\zeta_u \rho A_{ds}^3 \dot{x}^2}{2m A_{an}^2} \quad (2)$$

初始条件: $x = 0, \dot{x} = v_1$ 。

$$\ddot{x} = g - \frac{\zeta_d \rho A_{ds}^3 \dot{x}^2}{2m A_{an}^2} - \frac{K}{m} x \quad (3)$$

初始条件: $x = 0, \dot{x} = v_2$ 。

以上各式中: x 为活塞的下落位移; A 为活塞的承压面积; A_u 、 A_d 、 A_p 分别为活塞上部环缝面

积、沟槽处环缝面积、进水管的截面积; ζ_u 、 ζ_d 、 ζ_p 为相应位置的阻力系数; A_{ds} 、 A_{an} 分别为阻尼腔和阻尼腔环缝面积; K 为碟簧的刚度;控制棒质量 $m=49$ kg; ρ 为水的密度; g 为重力加速度。

控制棒落棒过程位移和速度变化曲线示于图6。控制棒在落棒初期速度迅速下降,很快变成匀速运动,进入阻尼腔后又经减速阶段,最后速度降为零。落棒的位移曲线基本上呈线性变化。

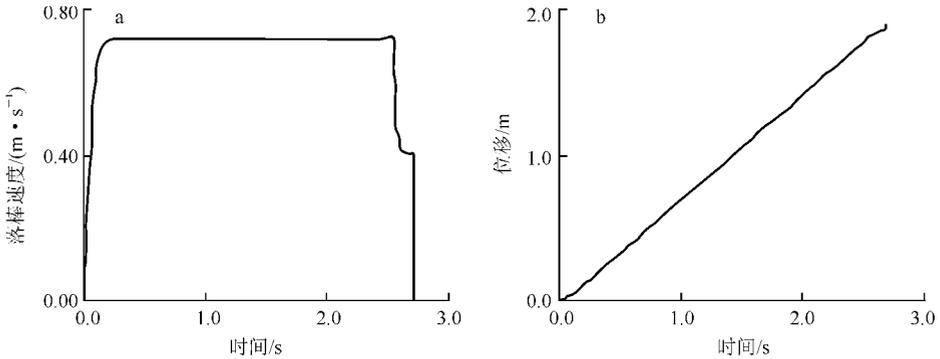


图6 控制棒落棒速度曲线(a)和位移曲线(b)

Fig. 6 Velocity(a) and displacement(b) curves of control rod dropping

3 结语

经过初步的结构设计和计算,上置式水力驱动控制棒的结构形式、维修的可拆装性、落棒时间等能够满足反应堆的安全需要。针对整个驱动回路系统的研究分析工作将另文发表。

参考文献:

[1] 张亚军,王秀珍. 200 MW 低温核供热堆研究进展及产业化发展前景[J]. 核动力工程,2003,24(2):180-184.
ZHANG Yajun, WANG Xiuzhen. Development progress and prospect for industry application of

200 MW low temperature nuclear heating reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(2): 180-184(in Chinese).
[2] 迟宗波,吴元强. 200 MW 核供热堆控制棒水力驱动系统的安全特性设计和研究[J]. 核动力工程,1997,17(4):313-319.
CHI Zongbo, WU Yuanqiang. The safety feature of hydraulic driving system of control rod for 200 MW Nuclear Heating Reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 17(4): 313-319 (in Chinese).